

令和 7 年度環境省委託業務

令和 7 年度国内資源循環体制構築に向けた再エネ関連  
製品及びベース素材の全体最適化実証事業  
(太陽光パネルの長期使用・資源循環の促進及び有害物質  
管理を目的としたデジタル・プロダクト・パスポート(DPP)の  
運用効果の検証実証事業)委託業務

成果報告書

令和 8 年 3 月

東北電力株式会社

## はじめに

平成24年7月に再生可能エネルギー電気の利用の促進に関する特別措置法(以下「再エネ特措法」と言う。)が施行された後、我が国では太陽光発電所の導入が急速に進んだ。太陽光発電所の長期安定電源化に向けた取組促進、及び使用済太陽光発電パネル(以下「PV パネル」と言う。)のリユース・リサイクル促進等を意図して、令和6年度には、中央環境審議会循環型社会部会太陽光発電設備リサイクル制度小委員会・産業構造審議会イノベーション・環境分科会資源循環経済小委員会太陽光発電設備リサイクルワーキンググループ合同会議が計9回開催され、PV パネルのリサイクル制度のあり方に関する検討が行われた。令和6年12月16日(第8回)には、それまでの計7回の結果を取りまとめる形で「太陽光発電設備のリサイクル制度のあり方について(案)」(以下「あり方(案)」と言う。)が公開された。なお、令和7年度1月23日にも第10回が開催され、これまでの取りまとめを踏まえた太陽光発電設備のリサイクル制度の法制度化に向けた検討状況や、制度案の見直しを含めた今後の制度設計の方向性等について議論が行われた。

本事業の初年度(令和5年度)では、EUのDPPに関する基礎調査の他、我が国の既設のPVパネルに含まれる有害物の情報取得、長期利用可能性の判定を可能とする手法の開発、使用済PVパネルの利用促進方法の検討等を実施し、PVパネルの循環利用促進に向けた情報伝達の要件・項目を検討した。本事業の二年次(令和6年度)では、令和5年度の内容を進展させると共に、令和6年12月18日に公開されたあり方(案)を踏まえて、本事業の成果を社会実装する観点から、事業の姿のイメージを描いた。具体的には、あり方(案)にしたがって、PVパネルのリサイクルを担保するための新たな制度が今後我が国に導入されることを想定し、この制度と連携することを前提にしたビジネスモデルのイメージを描いた。

本年度(令和7年度)は、令和6年度の内容を進展させ、取りまとめると共に、事業開始のタイミングを含め、本事業終了後の事業展開の方針を検討した。具体的には、以下の内容を実施することとした。

- リサイクル推進のためのデータ不足への対応
- 長期使用に関する判断基準の不足等への対応
- PVパネルのリユース・リサイクル事業展開に向けた関係業界との連携構築
- 事業における環境影響改善効果及びCO<sub>2</sub>排出量削減効果の評価

# 要約

---

## 1. 本事業の実施概要

本事業では、現在稼働中の PV パネルを対象とし長期使用・リユース、リサイクルを拡大するビジネスモデルを構築することを目的として、以下の内容を実施した。なお、本事業は計 3 年間実施し、3 年目となる本年度(令和 7 年度)事業においては以下の括弧内の内容を実施した。

- リサイクル推進に必要な情報要件項目の整備(実施事項:使用済 PV パネルのサンプル入手及びガラスの分析、PV パネルのガラスの含有物質情報の集積、含有物質の判別方法の共通化に関する検討、上記に関するユーザーニーズ適合性の検証(ヒアリング))
- ステークホルダー間での連携方法に関する検証(実施事項:二次元バーコードラベルの加速劣化試験に関する検討、長期使用可能性の予測結果を加味した、リユース PV パネルへの情報付与や管理方法に関する検証)
- 使用済 PV パネルの長期使用可能性を予測するモデルの確立(実施事項:試験用 PV セル及び使用済 PV パネルサンプルを対象とした加速劣化試験結果の解析、使用済 PV パネルサンプルを対象とした加速劣化試験及びその結果の解析、長期使用可能性を予測するモデルのアルゴリズムの精度向上、使用済 PV パネルの長期使用可能性を判定するための機器の測定部の作製)
- 異なる型式の使用済 PV パネルからなる太陽光発電設備の設置・運転の知見の蓄積(実施事項:年代・製造者が異なる使用済 PV パネルからなる太陽光発電設備の運転データの取得、長期使用に関する考察)
- リユース・リサイクル事業展開に向けた関係業界との連携構築(実施事項:業界関係者との意見交換、リユース・リサイクル事業展開のあり方の具体化、リサイクル・リユース分野全体のビジネス活性化に必要と考えられる要素の提案)
- 事業における環境影響改善効果及び CO<sub>2</sub> 排出量削減効果の評価(実施事項:事業実施により期待されるリサイクル推進の効果を踏まえた削減効果試算の検討)

## 2. リサイクル推進のためのデータ不足への対応

使用済 PV パネルのリサイクル推進には、必要情報を整備し、関係者がアクセスできる仕組みの構築が重要である。本事業では既設パネルの構成部品やガラスの含有物質情報を収集・分析し、国内出荷状況から主要メーカーや製造年に応じたサンプル 185 枚を入手した。分析では、159 件のガラスサンプルからヒ素 39 件、鉛 35 件、アンチモン 155 件が検出され、濃度や製造年による大きな偏りは無かった。ヒ素とアンチモンは高濃度域で負の相関を示した。また、リサイクル現場での含有物質の判別方法としてハンドヘルド XRF の有効性を検証した結果、ヒ素は 10mg/kg 未満で一次スクリーニング可能であることが確認された。アンチモンは高濃度域で検量線補正を行うことで精度向上が期待できる。

また、リユース向け PV パネルの流通に必要な情報の付与・管理のあり方を確立し、関係者への適切な情報連携を実現することを目的として、令和 6 年度に引き続き二次元バーコードの劣化試験・評価を実施した。東北地方 3 か所で 22 か月間の経過観測を行った結果、耐久性・作業性・経済性の観点からウルトラベル・ネオが実際の運用において最適と判断した。併せて、PV CYCLE JAPAN(PVCJ)認定ルート施設において、リユース検査及び長期使用可能性予測のための測定を組み込んだ業務フローの有効性を確認し、クラウド上での検査データ管理方法も含め、PV パネル単位の情報管理プラットフォーム構築に向けた有用な知見を得た。

### 3. 長期使用に関する判断基準不足等への対応

PV パネルの長期使用やリユースの意思決定促進に向け、その長期使用可能性を予測するモデルの確立を目的として、テーブル試験用 PV セルの加速劣化試験結果を解析し、Cole-Cole Plot (CCP)測定及び低照度 I-V 測定結果を用いた劣化予測モデルを検討した。更に、実際の使用済 PV パネルを対象とした加速劣化試験を実施し、低照度 I-V 測定及び DC オフセット CCP 測定結果の解析を通じて、実運用を見据えてより簡便な方法で判定が可能な長期使用可能性予測モデルを構築した。加えて、実際にリユース PV パネルで発電を行う事業者が保有する PV パネルを用いた検証を行い、長期使用可能性判定結果の妥当性及び有用性を確認した。

また、リユース PV パネルを用いた発電所の円滑かつ効率的な運用方法の確立を目的として、異なる型式の使用済 PV パネルからなる太陽光発電所を運転し、技術的課題の把握と対応策の効果検証を行った。太陽光発電所の運転中に、ストリング間の開放電圧差に起因する発電量の損失を確認したため、PV パネルのメーカー・型式・劣化特性を踏まえてストリング構成を再編成した結果、補正後発電効率で約 10%の改善を確認した。併せて、Maximum Power Point Tracking(MPPT、最大電力点追従制御)が 1 系統の Power Conditioning System(PCS、パワーコンディショナ)構成では電圧の整合が重要であり、電圧差が±10%以内に収まるように構成することが有効という知見を得た。

### 4. リユース・リサイクル事業展開に向けた関係業界との連携構築

PV パネルのリユース・リサイクル促進に向けた事業展開の方針を検討することを目的に、関係業界(PV パネル製造、PV パネルのリユース・リサイクル処理、PV パネルの再資源化で得られたガラスの利用、PV パネルのリサイクル処理の研究を行う事業者)と意見交換を行った。特にガラスの再資源化の意思決定のためには、ヒ素は検出有無による管理、アンチモンは含有量に応じたグレード管理が望ましいことが示唆された。意見交換を通じて、リサイクル原料の適正利用や製品価値向上が期待できる成果を得た。

また、令和 5 年度からの本事業での実施内容を踏まえ、本事業で得られた成果が、今後の社会に及ぼし得る効果を整理した。更に、プラットフォーム運営事業の実装に向けた課題を整理し、本事業の検討から生じた新たな事業アイデアである「リユース C-PPA(Corporate PPA)事業」の具体化を行った。

## 5. 事業における環境影響改善効果及び CO<sub>2</sub> 排出量削減効果の評価

本事業で得られた知見として、PV パネルのガラスリサイクルにおける関係者ニーズを踏まえた「含有物質の判別方法の共通化」が実用化された場合を想定し、令和 5 年度に検討した評価手法に基づき、2035 年時点を想定した CO<sub>2</sub> 排出量削減効果計算を実施した。ガラス中にヒ素を含まない PV パネルのリサイクル促進効果が期待されることから、2035 年時点で想定される使用済 PV パネルの年間排出量約 25 万 t に対して、75%がリサイクル、25%が最終処分と仮定した場合、CO<sub>2</sub> 排出量削減効果は、約 3.9 万 t-CO<sub>2</sub>と試算された。

# Summary

---

## 1. Outline of Implementation of the Project

This project aims to establish a business model to expand the long-term use, reuse, and recycling of photovoltaic (PV) panels currently in operation. The project was implemented over a total period of three years, and the activities listed in parentheses below were implemented in the third year of the project (FY2025).

- Organization of information items necessary to promote recycling  
(Activities: Acquisition of used PV panel samples and glass analysis; accumulation of information on substances contained in PV panel glass; study on standardization of methods for identifying contained substances; assessment of the alignment with user needs regarding the above, through interviews.)
- Evaluation of collaboration methods among stakeholders  
(Activities: Study of accelerated degradation testing of two-dimensional barcode (2D barcode) labels; examination of information provision and management methods for reused PV panels, incorporating the results of long-term usability prediction.)
- Establishment of a model for predicting long-term use of used PV panels  
(Activities: Analysis of accelerated degradation test results for test PV cells and used PV panel samples; accelerated degradation testing on used PV panel samples and analysis of the results; improvement of the algorithm accuracy for predicting long-term usability; fabrication of the measurement unit of equipment for assessing long-term usability of used PV panels.)
- Accumulation of knowledge on installation and operation of PV power generation facilities comprising different types of used PV panels  
(Activities: Acquisition of operational data from PV power generation facilities consisting of used PV panels from various production years and manufacturers; study of long-term use.)
- Development of collaboration with related industries for the expansion of reuse and recycling businesses  
(Activities: Exchange of opinions with industry stakeholders; specification of business models for reuse and recycling; proposal of elements considered necessary to activate the overall recycling and

reuse market.)

- Evaluation of the environmental impact improvement and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emission reduction effects of the project

(Activities: Examination of CO<sub>2</sub> reduction estimates based on the expected effects of promoting recycling through project implementation.)

## 2. Addressing Data Shortages for Promoting Recycling

To promote recycling of used PV panels, it is essential to develop the necessary information infrastructure and establish mechanisms that enable access by relevant stakeholders. In this project, information on the components of existing panels and the substances contained in their glass was collected and analyzed. Based on domestic shipment data, 185 samples were obtained, reflecting major manufacturers and production years.

Analysis of 159 glass samples detected arsenic in 39 samples, lead in 35 samples, and antimony in 155 samples. No significant bias was observed in concentration levels or production years. A negative correlation between arsenic and antimony was observed in high concentration ranges.

The effectiveness of handheld X-ray fluorescence (XRF) analyzers for identifying contained substances at recycling sites was also evaluated. The results confirmed that primary screening for arsenic is feasible at concentrations below 10 mg/kg. For antimony, improved accuracy is expected through calibration curve correction in high concentration ranges.

Furthermore, with the aim of establishing appropriate methods for providing and managing the information necessary for the distribution of reused PV panels, and ensuring effective information sharing among stakeholders, degradation testing and evaluation of 2D barcodes were continued this year, following those conducted in FY2024. After 22 months of exposure testing at three sites in the Tohoku region, “ULTRA LABEL NEO” was determined to be the most suitable option for actual operation in terms of durability, workability, and cost-effectiveness. In addition, at PV CYCLE JAPAN (PVCJ)-certified route facilities, the effectiveness of an operational workflow incorporating reuse inspection and long-term usability prediction measurements was confirmed. Valuable insights were obtained toward the development of a PV panel-level information management platform, including cloud-based inspection data management.

### 3. Addressing the Lack of Criteria for Long-Term Use Evaluation

With the aim of establishing a model to predict long-term usability of PV panels and support decision-making regarding their long-term use and reuse, the results of accelerated degradation tests using PV cells for table-tests were analyzed. Subsequently, a degradation prediction model using Cole-Cole Plot (CCP) measurements and low-irradiance I-V measurement results was examined. Furthermore, accelerated degradation tests were conducted on actual used PV panels, and a simplified long-term usability prediction model suitable for practical application was established through the analysis of low-irradiance I-V measurements and DC-offset CCP measurements. In addition, a validation was conducted using PV panels owned by an actual power generation operator utilizing reused PV panels, and the validity and usefulness of the model's assessment results were confirmed.

To establish smooth and efficient operational methods for power plants utilizing reused PV panels, a PV power plant composed of used panels of different models was operated to identify technical challenges and verify countermeasures. During operation, power losses attributable to differences in open-circuit voltage between strings were observed. By reorganizing the string configuration based on manufacturer, model type, and degradation characteristics of the PV panels, an improvement of approximately 10% in corrected power generation efficiency was achieved. Furthermore, in a Power Conditioning System (PCS) configuration employing a single Maximum Power Point Tracking (MPPT) system, voltage matching was found to be critical, and it was identified that maintaining voltage differences within  $\pm 10\%$  is effective for optimal operation.

### 4. Building Collaboration with Related Industries for the Expansion of Reuse and Recycling Businesses

To examine strategies for promoting reuse and recycling of PV panels, discussions were held with stakeholders in related industries, including businesses engaged in PV panel manufacturing, reuse and recycling processes, utilization of glass recovered from recycled PV panels, and research on PV panel recycling technologies. It was suggested that, in particular, for decision-making regarding the recycling of glass, arsenic should be managed based on presence/absence detection, while antimony should be managed according to graded concentration levels. These discussions yielded outcomes expected to support appropriate utilization of recycled materials and enhancement of product value.

Based on the project activities conducted since FY2023, the potential future societal impacts of the project outcomes were organized. Furthermore, challenges related to the implementation of the platform operation business were also identified, and a new business concept, the “Reuse C-PPA (Corporate PPA)Project”, which emerged from this project, was further developed and specified.

5. Evaluating of the Environmental Impact Improvement and CO<sub>2</sub> Emission Reduction Effects of the Project

Based on the insights gained from this project, a calculation was conducted to estimate the CO<sub>2</sub> emission reduction by 2035, assuming the implementation of the “standardized method for identifying contained substances” —a method developed in response to stakeholder needs in PV panel glass recycling—using the evaluation methodology examined in FY2023. Given the expected promotion of recycling for PV panels that do not contain arsenic in the glass, it was estimated that, assuming 75% of the approximately 25,000 tons of used PV panels projected for 2035 are recycled and 25% are landfilled, the resulting CO<sub>2</sub> emission reduction would be approximately 39,000 t-CO<sub>2</sub>.

---

## 目次

---

1. 本事業の実施概要.....	1
1.1 本事業の実施目的.....	1
1.1.1 社会的背景.....	1
1.1.2 本事業の実施意義.....	1
1.2 本年度の事業実施概要.....	2
1.2.1 本年度の実施項目及び実施体制.....	2
1.2.2 本年度の実施スケジュール.....	4
2. リサイクル推進のためのデータ不足への対応.....	6
2.1 リサイクル推進に必要な情報項目の整備.....	6
2.1.1 国内に設置されている PV パネルの全体像の把握.....	6
2.1.2 PV パネル及びサンプルの入手.....	7
2.1.3 部材別サンプルの分析.....	9
2.2 ステークホルダー間での情報連携に関する検証.....	48
2.2.1 PV パネルに貼付するバーコードの実用性に係る検証について.....	49
2.2.2 PV パネルの余寿命判定を含む業務フローの検証.....	51
2.2.3 余寿命判定結果の活用に関するステークホルダーのニーズについて.....	52
2.2.4 まとめ.....	52
3. 使用済 PV パネルの長期使用に関する判断基準の不足等への対応.....	53
3.1 使用済 PV パネルの長期使用可能性を予測するモデルの確立.....	53
3.1.1 過年度のテーブル試験結果の解析.....	53
3.1.2 使用済 PV パネルサンプルの加速劣化試験による経年劣化解析.....	67
3.1.3 長期使用可能性予測アルゴリズム.....	86
3.2 異なる型式の使用済 PV パネルからなる太陽光発電設備の設置・運転.....	99
3.2.1 実証の目的.....	99
3.2.2 設備概要及びシステム構成.....	99
3.2.3 パネル単位の性能評価.....	102
3.2.4 他試験手法との比較検証.....	104
3.2.5 考察.....	106
3.2.6 まとめ.....	107

4. PV パネルのリユース・リサイクル事業展開に向けた関係業界との連携構築 .....	108
4.1 関係業界との意見交換 .....	108
4.1.1 意見交換の対象事業者等 .....	108
4.1.2 主な聞き取り結果 .....	108
4.1.3 ガラスのリサイクル処理についての考察 .....	111
4.2 本事業を通じた成果・波及効果 .....	114
4.3 本事業終了後の事業化構想及び課題の整理 .....	117
4.3.1 プラットフォーム運営事業 .....	117
4.3.2 リユース C-PPA 事業 .....	120
4.3.3 その他の期待される事業 .....	121
5. 事業における環境影響改善効果及び CO <sub>2</sub> 排出量削減効果の評価 .....	123
5.1 評価手法 .....	123
5.1.1 PV パネルのリサイクルフローの想定 .....	125
5.1.2 評価範囲の考え方 .....	125
5.2 評価の実施 .....	126
5.2.1 評価結果 .....	126
5.2.2 評価に使用したデータ一覧 .....	128
6. 「太陽光パネルの長期利用化と資源循環促進に向けた情報要件整備及びその運用に関する実証事業」現地視察会の開催 .....	137
7. 評価審査委員会の出席 .....	138
8. 対外的な発信の実施 .....	139

---

## 目次

---

図 1-1 欧州(EU)と比較した我が国における既設 PV パネルの情報伝達の必要性	2
図 1-2 本年度の実施スケジュール	5
図 2-1 PV パネルのメーカーシェア(出荷量ベース)の経年変化	6
図 2-2 本年度事業で入手したサンプル数の内訳(メーカー別)	8
図 2-3 本年度事業で入手したサンプルの内訳(製造年別)	9
図 2-4 本事業でのサンプル入手結果	9
図 2-5 ガラスの分析数とヒ素の検出数の分布	12
図 2-6 ガラスの分析数とアンチモンの検出数の分布	12
図 2-7 ガラスの分析数と鉛の検出数の分布	13
図 2-8 ガラス中のヒ素の含有量の分布	14
図 2-9 ガラス中のアンチモンの含有量の分布	15
図 2-10 ガラス中の鉛の含有量の分布	15
図 2-11 ガラス中のアンチモンとヒ素、鉛の含有量の相関関係(左:アンチモンとヒ素右:アンチモンと鉛)	16
図 2-12 ハンドヘルド XRF によるガラス中の含有物質測定の様子	17
図 2-13 ガラスの形状別 ICP-MS とハンドヘルド XRF によるヒ素の分析結果の相関関係	20
図 2-14 ガラスの形状別 ICP-MS とハンドヘルド XRF によるアンチモンの分析結果の相関関係	21
図 2-15 ICP-MS と複数のハンドヘルド XRF によるヒ素の分析結果の相関関係	23
図 2-16 ICP-MS と複数のハンドヘルド XRF によるアンチモンの分析結果の相関関係	23
図 2-17 ガラス中のヒ素の含有量と溶出量(環境庁告示第 46 号に準じる)(令和 6 年度事業報告書図 2-7 の再掲)	25
図 2-18 異なる粒径のサンプルからのヒ素の溶出量(環境庁告示第 46 号に準じる)の相関関係	26
図 2-19 熱処理によるヒ素の溶出量(環境庁告示第 46 号に準じる)の変化(令和 6 年度事業報告書図 2-8 の再掲)	28
図 2-20 令和 5、令和 6 年度のバックシートの構成パターン(N=138)	33
図 2-21 令和 5、令和 6、令和 7 年度のバックシートの構成パターン(N=164)	33
図 2-22 令和 5、令和 6 年度 PV サンプルのフッ素樹脂の年代別パターン(N=138)	34
図 2-23 令和 5、令和 6、令和 7 年度 PV サンプルのフッ素樹脂の年代別パターン(N=164)	34
図 2-24 走査型電子顕微鏡によるバックシート断面分析(「近赤外線分光測定で PVDF と判定されたサンプル(a)」の例)	37
図 2-25 走査型電子顕微鏡によるバックシート断面分析(「近赤外線分光測定で fluorine coating と判定されたサンプル(b)」の例)	37
図 2-26 計測の際のセルの縦横の方向	39
図 2-27 セルの大きさの分布(N=128)	40

図 2-28	製造年とセルの大きさの関係(N=128).....	40
図 2-29	製造年とフィンガー線の数の関係(N=124) .....	42
図 2-30	製造年とフィンガー線の幅の関係(N=123) .....	42
図 2-31	製造年とインターコネクタの数の関係(N=124).....	43
図 2-32	製造年とインターコネクタの幅の関係(N=123) .....	43
図 2-33	令和 6 年度事業で化学分析に供した 1 セル分のセル/EVA シートの外観 .....	44
図 2-34	製造年と 1 セルに含まれる銀の含有量の関係(N=31) .....	46
図 2-35	製造年と 1 セルに含まれる銅の含有量の関係(N=31) .....	46
図 2-36	1 セル中の銀の含有量が他に比べて顕著に多いサンプルのインターコネクタの断面 ..	47
図 2-37	1 セル中の銀の含有量が他に比べて顕著に多いサンプルのインターコネクタの接合素材 の成分分析結果 .....	47
図 2-38	各太陽光発電所(左から、鱒ヶ沢太陽光発電所、石巻雄勝太陽光発電所、白石太陽光発電 所) .....	49
図 2-39	白石太陽光発電所の耐久性試験結果.....	50
図 2-40	PV パネルの余寿命判定を含む業務フロー .....	52
図 3-1	PV セルの外観と断面構造の概念図及び諸元 .....	54
図 3-2	CCP と等価回路の例 .....	55
図 3-3	CCP 測定システムの概要.....	55
図 3-4	加速劣化試験直後と 1 年経過後の PV セルの $R_{sh}$ の変化 .....	57
図 3-5	加速劣化試験を施さずに 1 年間保管した PV セルの $R_{sh}$ .....	57
図 3-6	典型的な I-V 特性の例 .....	58
図 3-7	曲線因子 $FF$ の照度 $I_L$ 依存性(モデル図) .....	59
図 3-8	劣化の程度(劣化試験時間)の増大に伴う曲線因子 $FF$ の照度 $I_L$ 依存性(モデル図) ....	59
図 3-9	曲線因子 $FF$ の照度 $I_L$ 依存性における線形近似式の傾き $\alpha$ と切片 $FF_0$ の関係(モデル図) .....	60
図 3-10	耐候性試験を行った PV セルの曲線因子 $FF$ の照度 $I_L$ 依存性における.....	61
図 3-11	恒温恒湿試験を行った PV セルの曲線因子 $FF$ の照度 $I_L$ 依存性における .....	62
図 3-12	温度サイクル試験を行った PV セルの曲線因子 $FF$ の照度 $I_L$ 依存性における .....	62
図 3-13	冷熱衝撃試験を行った PV セルの曲線因子 $FF$ の照度 $I_L$ 依存性における.....	63
図 3-14	線形近似式の傾き $\alpha$ と切片 $FF_0$ の関係における余寿命を求める式に必要な項目(モデル 図) .....	64
図 3-15	各加速劣化試験後の PV セルから推定した余寿命と電荷移動抵抗 $R_{sh}$ との関係 .....	65
図 3-16	各加速劣化試験後の PV セルから推定した余寿命と純抵抗 $R_s$ との関係 .....	66
図 3-17	PV パネル向け I-V 特性評価システムの概要 .....	69
図 3-18	PV パネル向け EL 測定システム PVX300(アイテス製)の概要 (アイテス提供) .....	70
図 3-19	PV パネル向け PL 測定システム PVX330 + POPLI(アイテス製)の概要 (アイテス提 供) .....	70
図 3-20	PV パネル 2 枚(過年度から継続)の温度サイクル試験前後の EL 測定結果 .....	74
図 3-21	PV パネル 15 枚の温度サイクル試験前後での EL 測定結果 .....	75

図 3-22	PV パネル 2 枚(過年度から継続)の温度サイクル試験前後での PL 測定結果 .....	76
図 3-23	PV パネル 15 枚の温度サイクル試験前後での EL 測定結果.....	77
図 3-24	PV パネルの低照度 I-V 測定方法.....	78
図 3-25	PV パネル向け CCP 測定システム(試作品)の外観と測定時の様子.....	80
図 3-26	劣化状態が異なる PV パネルのナイキスト線図における DC オフセット電圧による軌跡 .....	82
図 3-27	各インピーダンス成分と DC オフセット電圧との関係.....	84
図 3-28	過年度に温度サイクル試験を行った PV パネルの曲線因子 $FF$ の照度 $I_L$ 依存性に ...	88
図 3-29	温度サイクル試験前後での PV パネルの $V_{oc}$ 、 $P_{max}$ 、 $FF$ の試験時間依存性.....	89
図 3-30	低照度 I-V 測定と DC オフセット CCP 測定から求めた余寿命の比較.....	90
図 3-31	温度サイクル試験前後での余寿命の変化(PVCJ 回収品:5 枚) .....	91
図 3-32	温度サイクル試験前後での余寿命の変化(市販中古品:10 枚) .....	91
図 3-33	DC オフセット CCP 測定からの余寿命推測式に補正項を導入した際の.....	92
図 3-34	温度サイクル試験前後での余寿命の平均値の変化.....	93
図 3-35	2 台の試作機で測定した DC オフセット CCP .....	95
図 3-36	使用済 PV パネルの長期使用可能性予測と余寿命判定の手順.....	96
図 3-37	リユースチェッカーの外観 .....	97
図 3-38	使用済 PV パネルの製造年に対する余寿命判定の分布.....	98
図 3-39	PV パネルのセル構成と余寿命判定の関係.....	98
図 3-40	設備概要及びシステム構成.....	100
図 3-41	パネル組み替えの実施内容.....	100
図 3-42	月別発電効率の推移 .....	101
図 3-43	組み替え前後の日射量・発電量分布図 .....	102
図 3-44	PPLC クラウドによる観測値.....	104
図 3-45	PPLC による実測データと EL 試験との相関(PCS②).....	104
図 3-46	PPLC による実測データと EL 試験との相関(PCS⑥).....	105
図 3-47	EL 試験の凡例 .....	105
図 3-48	PCS② No.115 IV 試験結果 .....	106
図 4-1	本事業の全体工程概要 .....	115
図 4-2	本事業の成果と更なる検証が必要な要素 .....	119
図 4-3	本事業を通じて検討した事業化構想「リユース C-PPA 事業」.....	120
図 5-1	令和 7 年度実施した CO <sub>2</sub> 排出量削減効果計算の評価範囲.....	124

---

## 表 目次

---

表 1-1 PV パネルの長期使用・リユースやリサイクルの推進における課題.....	1
表 1-2 本年度の実施体制.....	4
表 2-1 3 年間の実証事業を通して入手したサンプルの数の内訳.....	7
表 2-2 3 年間の実証事業を通じた分析したガラスのサンプルの数の内訳.....	10
表 2-3 ガラスサンプル中の含有物質の含有量の分析結果.....	11
表 2-4 分析に供した標準サンプルの概要(ハンドヘルド XRF 分析へのガラス形状の影響検証).....	17
表 2-5 分析対象の形状と分析条件.....	18
表 2-6 分析に供したサンプルの概要(ハンドヘルド XRF 分析の有効性検証).....	19
表 2-7 分析に用いたハンドヘルド XRF と分析条件.....	19
表 2-8 ICP-MS とハンドヘルド XRF による粉碎ガラスの分析結果.....	22
表 2-9 共通化により一次スクリーニングの精度向上に寄与し得る共通化の条件.....	24
表 2-10 本年度(令和7年度)26 サンプルの近赤外線分光測定結果.....	32
表 2-11 ハロゲン・硫黄分析、CHN 元素分析の分析結果(N=45).....	36
表 2-12 セル上の電極の計測及び分析数.....	38
表 2-13 区分ごとのサンプル数とセルの大きさ.....	39
表 2-14 EPMA でのインターコネクタの接合素材の成分の分析結果.....	45
表 2-15 太陽光発電所一覧.....	49
表 2-16 耐久性・作業性・経済性の総合評価結果.....	50
表 3-1 PV セルに施した加速劣化試験と CCP 測定試料.....	55
表 3-2 曲線因子 $FF$ の照度 $I_L$ 依存性における線形近似式の傾き $\alpha$ と切片 $FF_0$ の関係.....	60
表 3-3 加速劣化試験に使用した使用済 PV パネルの製品仕様.....	68
表 3-4 温度サイクル試験の条件と電気的特性評価に用いた装置及び測定者.....	69
表 3-5 PV パネル 2 枚(過年度から継続)の温度サイクル試験前後の I-V 特性.....	71
表 3-6 PV パネル 15 枚の温度サイクル試験前後の I-V 特性.....	72
表 3-7 パネル単位の性能評価.....	102
表 4-1 リサイクル促進に係る事業の推進にあたり期待する法制度等.....	114
表 4-2 本事業を通じた成果・波及効果.....	115
表 4-3 プラットフォーム運営事業の実装に向けた検証結果.....	117
表 4-4 リユース C-PPA 事業の課題と期待する法制度.....	121
表 5-1 試算の結果【普及段階 2035 年時点( $t$ -CO <sub>2</sub> /年)】.....	127
表 5-2 評価対象の CO <sub>2</sub> 排出量削減効果計算に用いた CO <sub>2</sub> 排出原単位と活動量.....	129
表 5-3 比較対象の CO <sub>2</sub> 排出量削減効果計算に用いた CO <sub>2</sub> 排出原単位と活動量.....	131
表 5-4 評価対象・比較対象の CO <sub>2</sub> 排出量削減効果計算に用いた、CO <sub>2</sub> 排出原単位・活動量のバックデータ.....	133
表 5-5 表 5-4 の出所情報.....	136
表 8-1 令和 7 年度における特許権出願状況.....	139

表 8-2 令和 7 年度における投稿・口頭発表 .....	139
表 8-3 令和 7 年度におけるその他の情報発信 .....	140

# 1. 本事業の実施概要

## 1.1 本事業の実施目的

### 1.1.1 社会的背景

太陽光発電は、主要な再生可能エネルギーの一つとして、これまで急速に普及してきた。その結果、我が国でも 2030 年台前半から使用済 PV パネルの大量排出が始まる可能性があるにも関わらず、世界的に見ても、PV パネルの長期使用、リユース、分離産物の資源循環を確立した仕組みの例は無い。

そういった中で、欧州では、持続可能な製品のためのエコデザイン規則 (ESPR) により、PV パネルも含むあらゆる製品で必要な環境要件を決定し、製品に付与されるデジタル・プロダクト・パスポート (DPP) による情報伝達が進められようとしている。

しかし、現在稼働中の PV パネルに対しては、長期使用・リユースやリサイクルの判断に必要な知見、データが整備されていないため、国内でのリユース、リサイクルが行われないことが懸念される。(表 1-1)

表 1-1 PV パネルの長期使用・リユースやリサイクルの推進における課題

	課題	現在起きている事象
長期使用・リユースの意思決定を行うための判断基準が不足	<ul style="list-style-type: none"><li>● 使用済 PV パネルに対して、その時点での使用可否判定は可能だが、「今後の使用可能性」の評価手法が無い</li><li>● 異なる型式のパネルを組み合わせ構成した太陽光発電所の運転における知見が無い</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● リユース可能なパネルであっても、海外輸出がほとんどである</li></ul>
リサイクル推進のためのデータ不足	<ul style="list-style-type: none"><li>● カタログ情報だけでは、パネルに含まれる有害・懸念物質の情報が得られない</li><li>● PV パネルに閉じず、他の製品も横断で見た場合の資源循環の可能性をまだ確認できていない</li><li>● 日本では PV パネルの処理側のニーズ、要求事項等を整理しきれていない</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● PV パネル由来の素材に閉じたリサイクルが念頭にある上に、有害・懸念物質の情報が得られないため、リサイクル処理が忌避される</li></ul>

### 1.1.2 本事業の実施意義

欧州でも PV パネルの具体的な DPP は今後検討が具体化する段階だが、PV パネル処理は既に EPR (拡大生産者責任) を前提とした WEEE 指令<sup>1</sup>で規定されており、新規 PV パネルへの情報付与だけでなく、設定された要件が既設 PV パネルの処理に影響することが考えられる。

日本では使用済 PV パネルの処理ルートの規定が無く、既設 PV パネルへのメーカーからの情報付与も期待しにくいことから、欧州と異なり、情報不足により長期使用・リユース、資源循環の阻害が特に顕在化する恐れがある。

そこで、本事業を通じて、前述の国際動向も念頭に、既設 PV パネルのデータを収集した上で、我が国の廃棄物処理システムを踏まえた情報伝達の仕組み(実際の PV パネルの流通、処理、データ管理等

<sup>1</sup> 電気電子機器廃棄物指令 (Directive on Waste Electrical and Electronic Equipment)

の体制等)を整備する必要がある。(図 1-1)

上記を実現することで、発電事業者等に対して長期使用可能性の判断基準を提供することで既設発電所の長期使用に貢献し、排出される場合もリユースに仕向けることで、PV パネルの廃棄発生を遅らせることが可能となる。また、PV パネルが廃棄される場合も、各部材を分離できるリサイクル処理を国内で行える体制を持つことで、安易な最終処分を減らすことが可能となる。

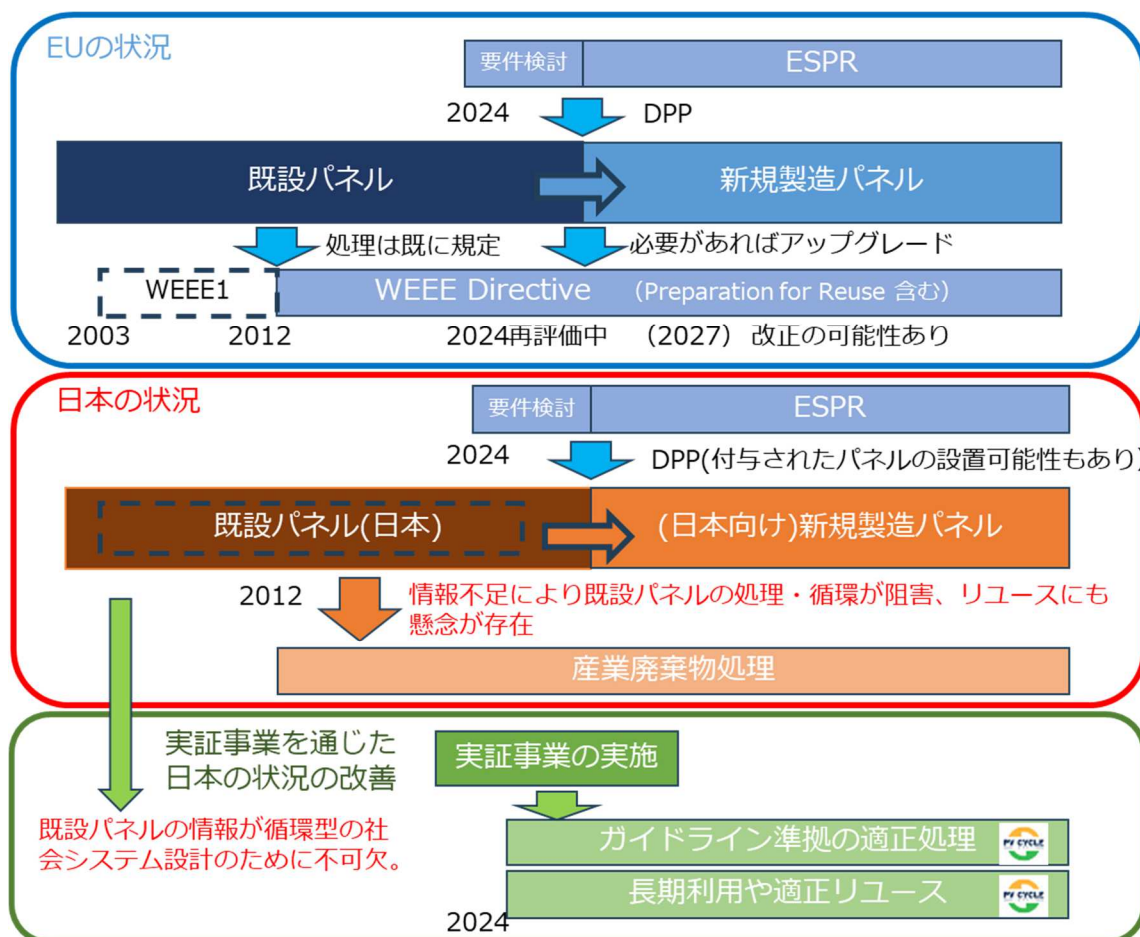


図 1-1 欧州(EU)と比較した我が国における既設 PV パネルの情報伝達の必要性

## 1.2 本年度の事業実施概要

### 1.2.1 本年度の実施項目及び実施体制

前掲表 1-1 で示した PV パネルの長期使用・リユースやリサイクルの推進における課題に対応して、本年度の実施項目を以下のとおり設定した。また、各実施項目の実施体制を表 1-2 に示す。

- リサイクル推進のためのデータ不足への対応
  - リサイクル推進に必要な情報要件項目の整備(実証①関連)
    - 使用済 PV パネルのサンプル入手及びガラスの分析
    - PV パネルのガラスの含有物質情報の集積

- 含有物質の判別方法の共通化に関する検討
- 上記に関するユーザーニーズ適合性の検証(ヒアリング)
- ステークホルダー間での連携方法に関する検証(実証③関連)
  - 過年度に引き続き、二次元バーコードラベルの加速劣化試験に関する検討
  - 長期使用可能性の予測結果を加味した、リユース PV パネルへの情報付与や管理方法に関する検証
- 長期使用に関する判断基準の不足等への対応
  - 使用済 PV パネルの長期使用可能性を予測するモデルの確立(実証②関連)
    - 過年度に得られた、試験用 PV セル及び使用済 PV パネルサンプルを対象とした加速劣化試験結果の解析
    - 使用済 PV パネルサンプルを対象とした加速劣化試験及びその結果の解析
    - 上記解析結果を踏まえた、長期使用可能性を予測するモデルのアルゴリズムの精度向上
    - 使用済 PV パネルの長期使用可能性を判定するための機器の測定部の作製
  - 異なる型式の使用済 PV パネルからなる太陽光発電設備の設置・運転の知見の蓄積(実証④関連)
    - 年代・製造者が異なる使用済 PV パネルからなる太陽光発電設備の運転データの取得
    - 上記を踏まえた、長期使用に関する考察
- リユース・リサイクル事業展開に向けた関係業界との連携構築
  - 業界関係者との意見交換
  - リユース・リサイクル事業展開のあり方の具体化
  - リサイクル・リユース分野全体のビジネス活性化に必要と考えられる要素の提案
- 事業における環境影響改善効果及び CO<sub>2</sub> 排出量削減効果の評価
  - 事業実施により期待されるリサイクル推進の効果を踏まえた削減効果試算の検討

表 1-2 本年度の実施体制

項目番号	実施項目	担当プレイヤー		
		主	副	
(1)リサイクル推進のためのデータ不足への対応				
①	リサイクル推進に必要な情報項目の整備	東北電力	E&ES	-
②	ステークホルダー間での情報連携に関する検証	東北電力	-	-
(2)長期使用に関する判断基準の不足等への対応				
①	使用済 PV パネルの長期使用可能性を予測するモデルの確立	東北電力	MRI	-
②	異なる型式の使用済 PV パネルからなる太陽光発電設備の設置・運転	東北電力	-	-
(3)リユース・リサイクル事業展開に向けた関係業界との連携構築		東北電力	E&ES	MRI
(4)事業における環境影響改善効果及び CO <sub>2</sub> 排出量削減効果の評価		東北電力	MRI	-

(略語)東北電力:東北電力(株)、MRI:(株)三菱総合研究所、E&ES:イー・アンド・イー ソリューションズ(株)

注釈:担当プレイヤーは、幹事法人と共同実施者のみ記載しているが、外注先とも連携して実施。

## 1.2.2 本年度の実施スケジュール

本年度の実施スケジュールは図 1-2 のとおり。予定されていた作業は計画通り完了した。

番号	業務内容	実施月	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	備考
1	3.(1)①-i リサイクル推進に必要な情報項目の整備(サンプルの入手) サンプル入手目標12件	予定		サンプル入手											
		進捗													
2	3.(1)①-ii リサイクル推進に必要な情報項目の整備(サンプルの分析) 分析目標45件	予定				サンプルの分析									
		進捗													
3	3.(1)①-iii リサイクル推進に必要な情報項目の整備(有害物質の判別方法の妥当性の検証)	予定					有害物質の判別方法の妥当性の検								
		進捗													
4	3.(1)②-i ステークホルダー間での情報連携に関する検証(ラベルの劣化に関する検討やモニタリング)	予定					R5年産業務でPVパネルに貼り付けたラベルの劣化状態のモニ								
		進捗													
5	3.(1)②-ii ステークホルダー間での情報連携に関する検証(情報連携に関する検証)	予定					情報連携に関する検証								
		進捗													
6	3.(2)①-i 使用済PVパネルの長期使用可能性を予測するモデルの確立(PVパネルの劣化予測判定のための機器の作製)	予定					PVパネル劣化予測測定のための機器の作製								
		進捗													
7	3.(2)①-ii 使用済PVパネルの長期使用可能性を予測するモデルの確立(劣化予測モデルの妥当性等の確認)	予定					劣化予測モデルの妥当性等の確認								
		進捗													
8	3.(2)②異なる型式の使用済PVパネルからなる太陽光発電設備の設置・運転(運転データ計測継続)	予定					運転データ計測継続								
		進捗													
9	3.(3) PVパネルのリユース・リサイクル事業展開に向けた関係業界との連携構築	予定					業界団体や関係者との意見交換他の主体と連携する上で留意事項の整理								
		進捗													
10	3.(4)-i 事業における環境影響改善効果及びCO2排出量削減効果の評価(評価方法の精緻化検討)	予定					CO2排出量削減効果・他の環境影響効果の評価方法の精緻化検討								
		進捗													
11	3.(4)-ii 事業における環境影響改善効果及びCO2排出量削減効果の評価(LCA試算シート更新)	予定													
		進捗													

図 1-2 本年度の実施スケジュール

## 2. リサイクル推進のためのデータ不足への対応

PV パネルの長期使用・リユース・リサイクル促進のためには、情報伝達すべき項目として必要十分な項目リストを整備し、その項目リストに沿って実際に情報を蓄積し、ステークホルダーがその情報へアクセス可能な仕組みを構築することが重要である。本章では、リサイクル推進に必要な情報項目を整備した結果、ステークホルダー間での情報連携に関する検証を行った結果を取りまとめた。

### 2.1 リサイクル推進に必要な情報項目の整備

#### 2.1.1 国内に設置されている PV パネルの全体像の把握

国内に設置されている PV パネルの全体像を把握することを目的として、既設の PV パネルの出荷状況について、データ整理を行った。具体的には、PV パネルの国内出荷量についてデータ収集を行うと共に、2008～2023 年までの 14 年間(以下「主要期間」と言う。)のいずれかの年で、出荷量ベースで 3%以上の国内シェアを 1 回以上獲得したメーカー(以下「主要メーカー」と言う。)を、図 2-1 のマップで灰色以外の色で示した。出荷量についてみると、2012 年の固定価格買取制度(以下「FIT」と言う。)開始を契機に、国内出荷量は増大した。2016 年はピーク時の 50%程度にまで出荷量が減少したが、2018 年頃からは堅調傾向にある。

メーカーシェアについてみると、2012 年や 2013 年に大きなシェアを占めていたメーカー(図 2-1 の赤・オレンジ)のシェアは、経年的に減少している。

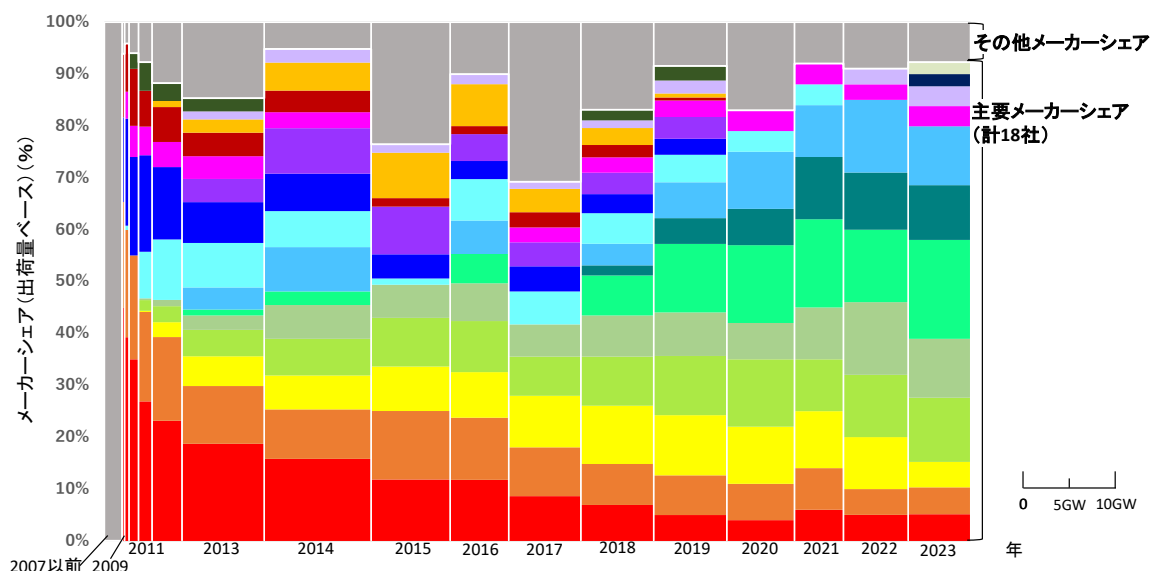


図 2-1 PV パネルのメーカーシェア(出荷量ベース)の経年変化

注釈 1) 横軸は各年の出荷量を、縦軸は出荷量ベースのメーカーシェアを示す。

注釈 2) メーカーのシェアは色で表し、2008～2023 年まで一貫して同じ色を用いた。

注釈 3) 図中「2007 以前」の範囲は 2007 年までの国内における PV パネルの累積導入量を、「その他メーカーシェア」の範囲は主要 18 社以外のメーカーシェアを、それぞれ年ごとに一括して表示し、メーカー別のシェアは示していない。

## 2.1.2 PV パネル及びサンプルの入手

### (1) 入手方法

本事業では合計 185 枚の PV パネルを取得した。令和 5 年度事業では、PV パネルの構成部品中の含有物質を広範に把握することを目的に、メーカーや製造年を問わず、多くの PV パネルを入手することに注力した。一方、令和 6 年度事業と本年度事業では、情報収集の母集団に国内の PV パネルのメーカーシェアを可能な限り反映することを目的に、入手対象とする PV パネルの製造年を主要期間(2008～2023 年)とすると共に、主要期間の各年のシェアに準じて主要メーカーのパネルを入手した。PV パネルの製造年は製品固有のシリアル番号を照会することで、特定した。主要メーカー及び主要期間を対象として入手した 181 枚とは別に、メーカー及び製造年を問わずヒ素を含有する PV パネル(以下「標準サンプル」と言う)を 4 枚入手し、最終的に合計 185 枚の PV パネルを取得した。なお、PV パネルの入手経路は次に記載する 3 通りであった。

- PV CYCLE JAPAN(以下「PVCJ」と言う。)の正会員に登録済みのリサイクル事業者
- 太陽光発電事業者
- 太陽光部材を取り扱うインターネット販売事業者

PV パネルからは、構成部品をサンプルとして採取した。具体的には、標準サンプル 4 枚を除く 181 枚の PV パネルからは、ガラスとセル/EVA シートをサンプルとして採取した。サンプルの採取にあたっては、はじめに PV パネルのメーカーや製造年等の製品固有情報を収集した。次に、ジャンクションボックス、ケーブル、及びフレームを外し、セル/EVA シートと接着されているフロントガラスを破碎してガラスを採取した。セル/EVA シートについては、セル上で樹脂部分を含む範囲を選択し、封止剤と共に切断した。主要メーカー及び主要期間の PV パネルから採取したサンプルを中心に、ガラス 159 件、樹脂 164 件、及び電極 133 件を含有物質等の分析に供した。標準サンプル 4 枚からは、ガラスのみを採取して含有物質等の分析に供した。

### (2) 入手結果

本事業で取得した PV パネルのメーカー別及び製造年別の内訳を図 2-2 と図 2-3 に示す。また、3 年間の実証事業の期間中に入手した PV パネル 185 枚中から標準サンプル 4 枚を除いた 181 枚を、図 2-4 にプロットした。表 2-1 には、3 年間の実証事業で入手したサンプルの数の入手年度別の内訳を示す。

表 2-1 3 年間の実証事業を通して入手したサンプルの数の内訳

サンプルを入手した年度	入手したサンプル数
令和 5 年度	100 サンプル
令和 6 年度	68 サンプル
令和 7 年度(本年度)	13 サンプル
合計	181 サンプル

注釈 1) 上記の合計 181 サンプルの内数に、標準サンプル 4 枚は含まれていない。

PV パネルの入手にあたっては、2012 年頃はシェアが大きかったメーカー(赤・オレンジ)や 2010 年代後半からシェアを拡大してきたメーカー(黄～緑)を中心に、2018 年以降に製造された PV パネルの入手が困難な傾向にあった。これは、製造から経過年数が短く PV パネルの交換による排出が少ないことや、2012 年頃はシェアが大きかったメーカー(赤・橙)については、製品の流通量そのものの減少等が要因と考えられた。また、近年インターネット販売事業者等が扱う中古 PV パネル市場において、主要メーカーの製品を中心に需要が高まっていることも一因として考えられた。

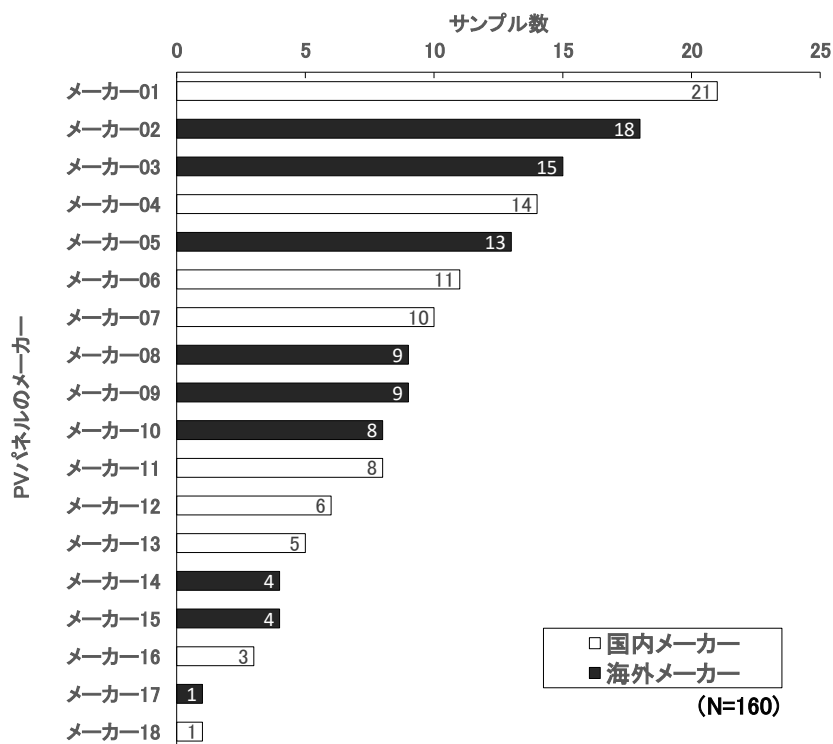


図 2-2 本年度事業で入手したサンプル数の内訳(メーカー別)

注釈 1) 取得した 181 枚のうち、主要メーカーに該当する 160 件の内訳とし、その他 21 件については掲載していない

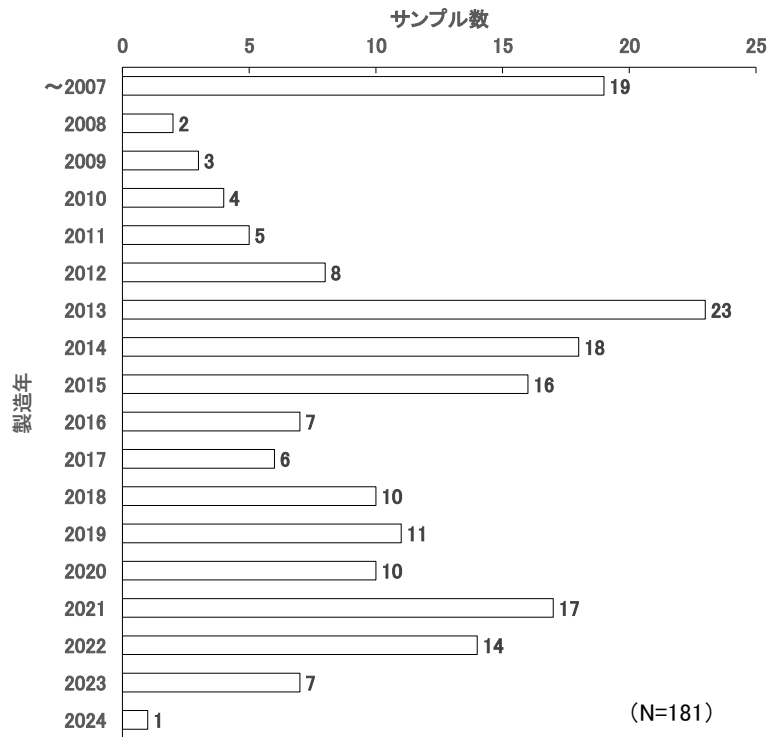


図 2-3 本年度事業で入手したサンプルの内訳(製造年別)

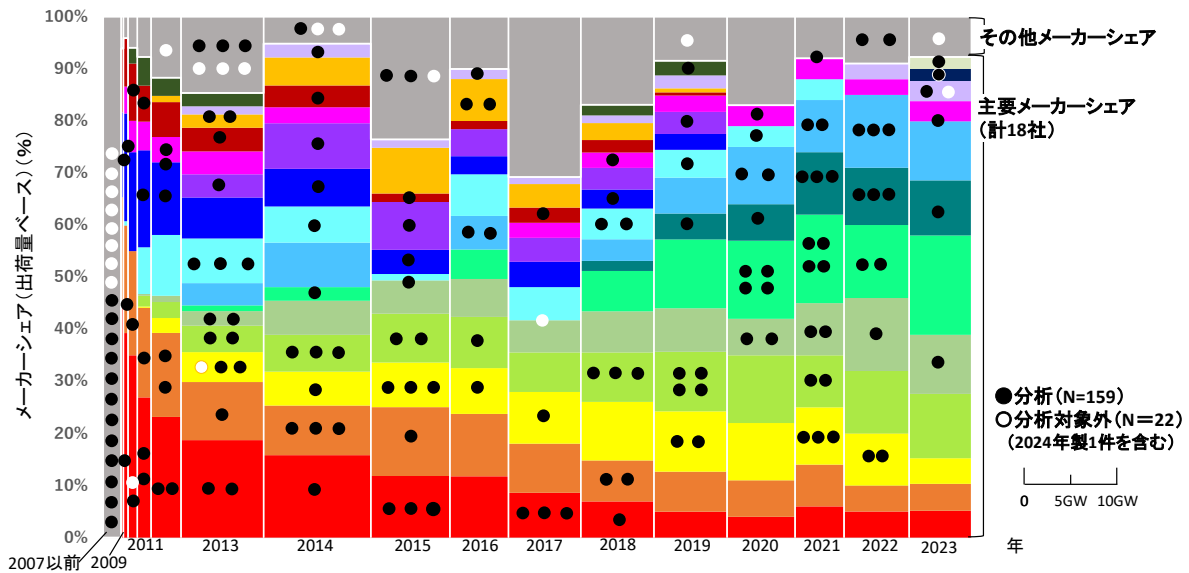


図 2-4 本事業でのサンプル入手結果

注釈 1) 図中の「分析」数はガラスを対象とした分析の実施件数

### 2.1.3 部材別サンプルの分析

#### (1) ガラス

ガラスのリサイクル促進に向けて、令和 5 年度事業と令和 6 年度事業では、PV パネルのガラスの含

有物質の分析を行った。本年度事業では、含有物質の分析を継続すると共に、3 年間の実証事業で得られた分析結果の取りまとめを行った。また、ガラス中の含有物質を再資源化事業者（以下「リサイクラー」と言う。）等の現場で判別することを目的に、可搬型蛍光 X 線分析装置（以下「ハンドヘルド XRF」と言う。）の有効性を検証した。加えて、令和 6 年度事業で得られた結果の一部に対して、追加的な検討を行った。

## 1) 含有量の分析

### a. 分析内容と方法

図 2-4 の黒丸で示す 159 件の PV パネルのガラスサンプルについて、分析を実施した。このうち 152 件が結晶シリコン系の PV パネル、7 件が化合物系の PV パネルであった。表 2-2 には、3 年間の実証事業で分析したガラスのサンプルの数の年度別の内訳を示す。

表 2-2 3 年間の実証事業を通じた分析したガラスのサンプルの数の内訳

ガラスのサンプルを分析した年度	分析したガラスのサンプル数
令和 5 年度	62 サンプル
令和 6 年度	51 サンプル
本年度(令和 7 年度)	46 サンプル
合計	159 サンプル

ガラスサンプルは粒度が 150 μm 未満となるよう粉碎し、均質化して試料調製した。波長分散型蛍光 X 線分析装置（以下「XRF」と言う。）を使用し、ファンダメンタル・パラメータ法（以下「FP 法」と言う。）により含有量の分析を行った。分析対象元素は、Si、B、Na、K、Mg、Ca、Al、S、Fe、Ti、Sr、Zr、Ba、Ce、As、Sb、Bi、Pb、Cd、及び Se の 20 種類とした。

ただし、1 件の化合物系の PV パネルについては XRF による分析を実施せず、ICP 質量分析（以下「ICP-MS」と言う）でカバーガラス中の As、Cd、Sb、Se、及び Pb の含有量を測定した<sup>2</sup>。

### b. 分析結果

本年度事業の下で計 159 件のガラス中の含有量の分析を行った結果を表 2-3 に示す。いずれのサンプルも Si、Na、Ca を多く含み、典型的なソーダ石灰ガラスの組成と一致した。有害性が懸念される元素であるカドミウムとセレンは非検出、ヒ素は 39 件（最大 740 mg/kg、最小 9.1mg/kg、平均 90 mg/kg）、鉛は 35 件（最大 130mg/kg、最小 7.0 mg/kg、平均 39 mg/kg）で検出した。アンチモンについては、155 件（最大 3,000mg/kg、最小 510 mg/kg、平均 1,800 mg/kg）で検出し、アンチモンが検出されたいずれのサンプルでも 500mg/kg 以上の含有量であった。

<sup>2</sup>化合物系 PV パネルのカバーガラス中の含有物質に関する知見は、結晶系 PV パネルと比較して限られている。本事業では入手した化合物系 PV パネルのうち 1 件について、XRF に比べて高い分析精度が得られる ICP-MS によりカバーガラス中の As、Cd、Sb、Se、及び Pb の含有量分析を実施した。

表 2-3 ガラスサンプル中の含有物質の含有量の分析結果

対象元素	検出数/分析数	含有量			[単位]
		最大	最小	平均	
Si	158/158	32	30	31	[mass%]
B	—	—	—	—	
Na	158/158	11	9.4	10	
Ca	158/158	7.5	5.3	6.2	
Mg	158/158	2.6	0.018	2.0	
Al	158/158	0.85	0.028	0.57	
K	158/158	1,200	30	190	
S	158/158	1,700	87	930	
Fe	158/158	490	24	200	
Ti	89/158	1,200	45	170	
Sr	158/158	1,700	15	80	
Zr	133/158	250	8.1	55	
Ba	10/158	1,700	230	650	
Ce	3/158	1,800	520	960	
As	39/159	740	9.1	90	
Sb	155/159	3,000	510	1,800	
Bi	3/158	30	25	27	
Pb	35/159	130	7.0	39	
Cd	—	—	—	—	
Se	—	—	—	—	
Mn	1/158	28	28	28	

注釈1)ICP-MSを実施した1件については、カバーガラス中のAs、Cd、Sb、Se、及びPbのみ含有量を分析したため、その他の元素については分析数が158件となっている

図 2-5 から図 2-7 に、PV パネルの製造年別の分析数と、各年のヒ素、アンチモン、及び鉛の検出数の分布を示す。図中の白枠は分析サンプル数、黒枠は各元素の検出数を指す。

● ヒ素

- ヒ素は、2011年以降に製造されたPVパネルのサンプルを中心に、取得パネル数全体の25%にあたる39件から検出した。ヒ素を含む割合が最も高かったのは2018年であり、80%(8/10件)にヒ素の含有が見られたが、検出の頻度に経年的な変化は認められなかった。

● アンチモン

- アンチモンは、PVパネルのメーカーや製造年を問わず、159件中155件(全体の97%)のパネルに含まれていた。アンチモンを含有していなかったパネルは、2007年以前に製造された国内メーカーのパネル3件と、2015年製造の海外メーカーのパネル1件の計4件のみであった。

● 鉛

- 鉛は、全体の22%にあたる35件から検出し、2010~2011年と、2021年以降に製造されたPVパネルのサンプルから多く検出される傾向が見られた。特に検出数が多かったのは2010~2011年と2022年製のPVパネルであった。前者は取得した同年製のパネルの80%以上、後者は50%以上(8/14件)からそれぞれ検出した。

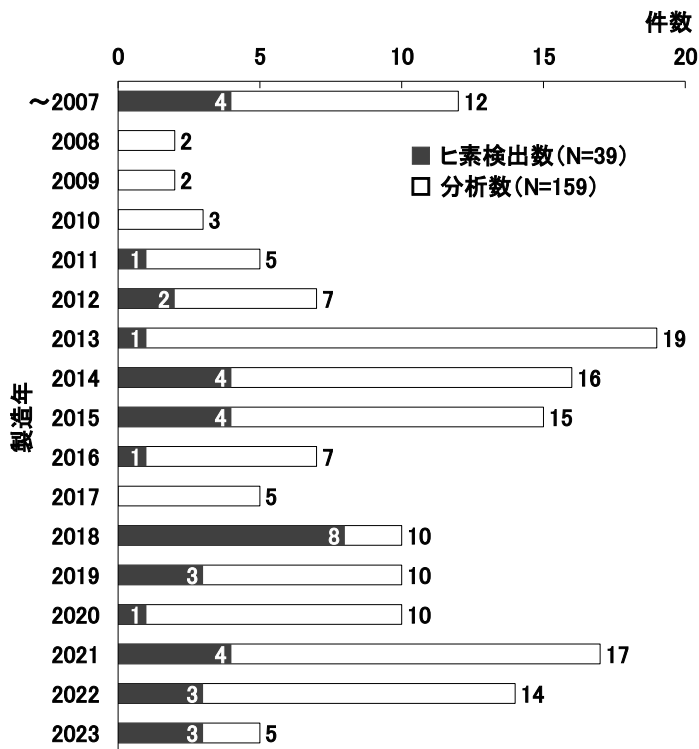


図 2-5 ガラスの分析数とヒ素の検出数の分布

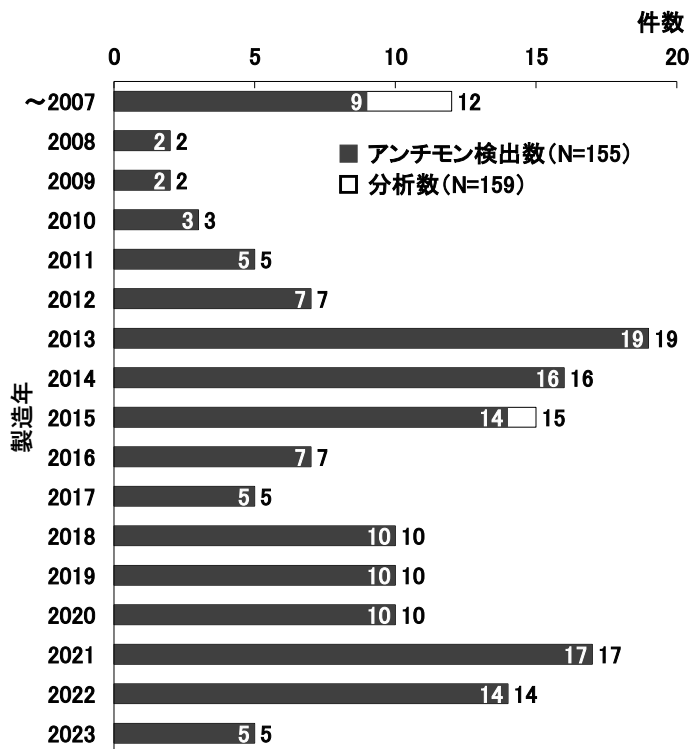


図 2-6 ガラスの分析数とアンチモンの検出数の分布

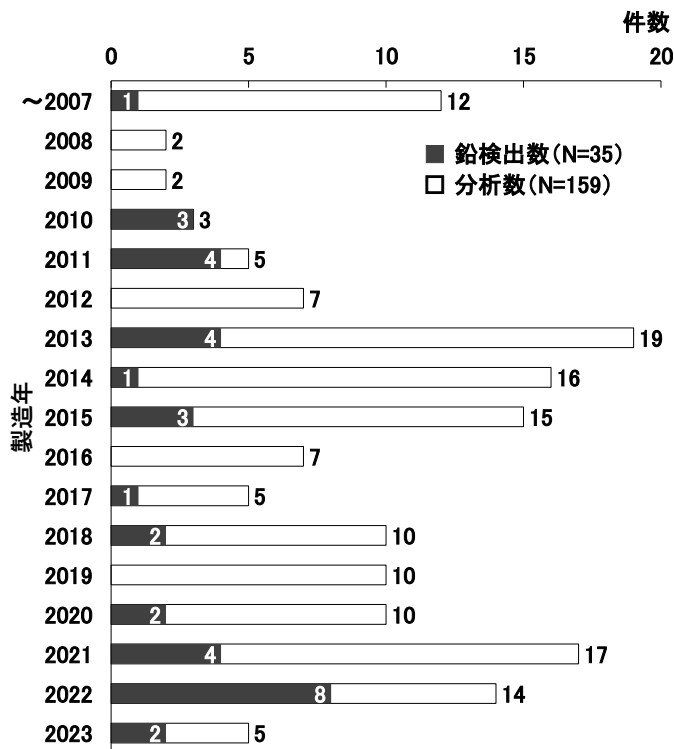


図 2-7 ガラスの分析数と鉛の検出数の分布

次に、図 2-8 から図 2-10 にヒ素、アンチモン、及び鉛を検出したサンプルの元素別含有量と PV パネルの製造年の関係を示す。図中のプロットは、PV パネル入手時に取得した情報に基づいて国内メーカー製または海外メーカー製に色分けし、各元素の検出傾向を見た。なお、いずれも製造年が比較的新しいサンプルに海外メーカーが多い傾向が認められたものの、これは国内の PV 市場シェアを考慮したサンプリングが反映された結果であり、各元素の含有傾向として捉えることはできないと解釈できる。

● ヒ素

- ヒ素の検出は、メーカー、製造年、含有量の関係に大きな偏りは見られなかった。最も含有量が多かったのは 710 mg/kg、平均含有量は 90 mg/kg であった。
- 全体の 9 割(35/39 件)が 200 mg/kg 未満の範囲に分布した。200 mg/kg を超えた 4 件(230~710 mg/kg)のうち 1 件は国内メーカー製、3 件は海外メーカー製の PV パネルであった。

● アンチモン

- アンチモンの平均含有量は 1,800mg/kg で、このうち 9 割(142/155 件)が 1,000~2,500mg/kg の範囲に分布し、含有量の多寡に経年的な傾向は認められない。最も含有量が多かったのは 3,000 mg/kg、少なかったのは 510mg/kg で、いずれも国内メーカー製の PV パネルのサンプルであった。また、後者はヒ素を最も多く含んだものと同じのサンプルであった。

● 鉛

- 鉛は、全体の22%にあたる35件から検出し、このうちの7割以上(26/35件)が50mg/kg未満の範囲に分布した。含有量は、最も多いもので130mg/kg、平均含有量は39 mg/kgであった。製造年に顕著な偏りは認められないが、検出数、含有量共に近年緩やかな増加傾向にある。

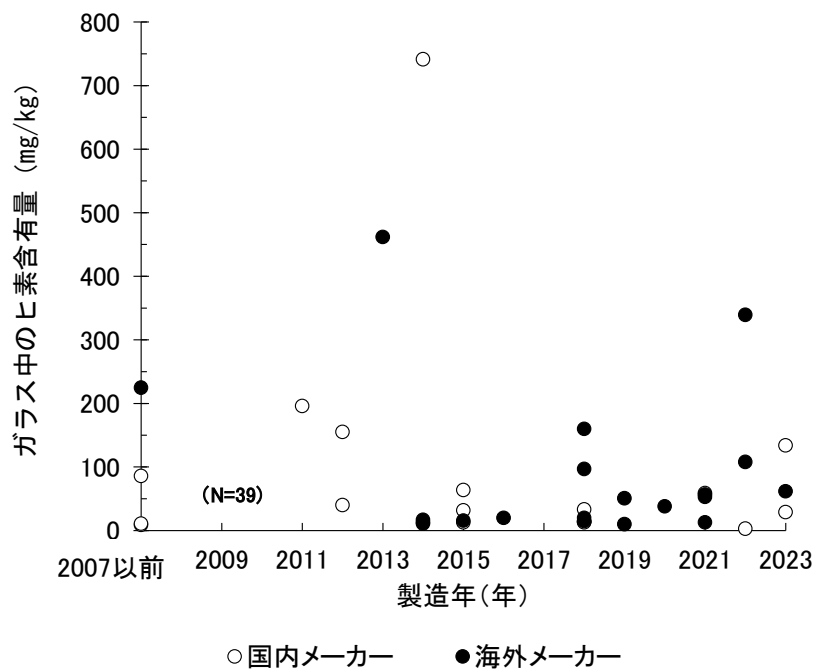


図 2-8 ガラス中のヒ素の含有量の分布

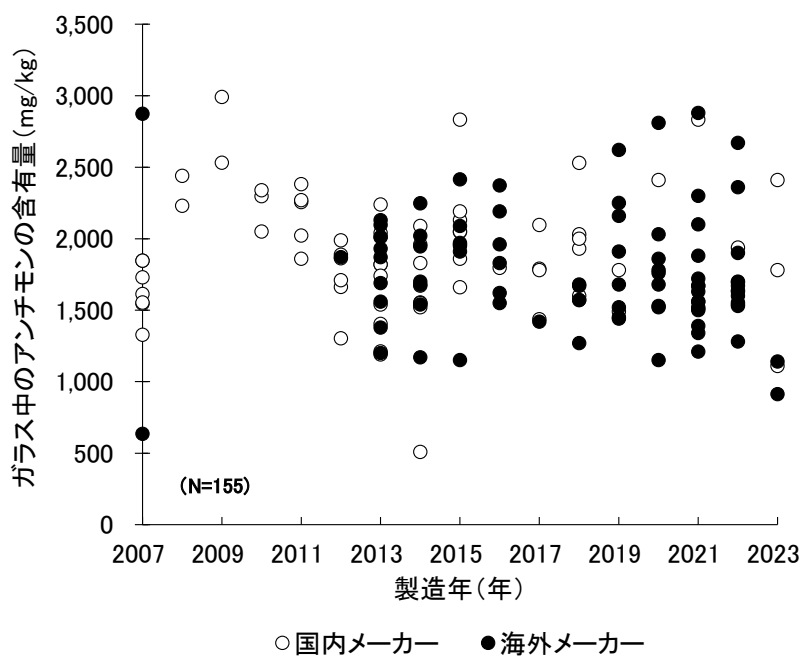


図 2-9 ガラス中のアンチモンの含有量の分布

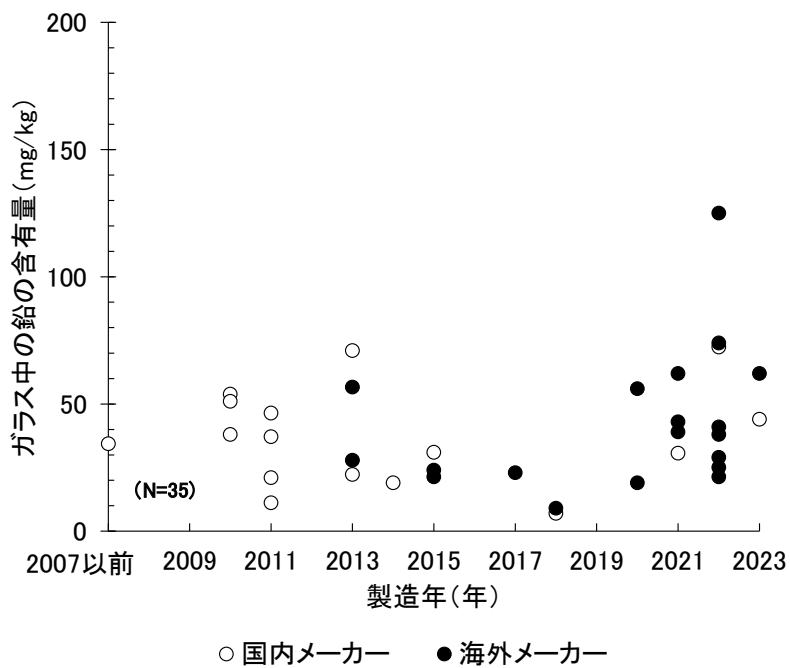


図 2-10 ガラス中の鉛の含有量の分布

XRF 分析でアンチモンが検出された 155 件と標準サンプル 4 件の計 159 件のうち、ヒ素が検出された 43 件と鉛が検出された 35 件を対象に、両元素間の含有量の相関関係を図 2-11 に示す。アンチモンとヒ素の含有量には、ヒ素濃度 110 mg/kg を閾値として区分した場合、高濃度域(110 mg/kg 以上)で負の相関が認められた( $R^2=0.4397$ )。これに対し、低濃度域(110 mg/kg 未満)ではアンチモン含有量のばらつきが大きく、両者の明確な相関は見られなかった。そのため、アンチモンとヒ素の関係は単一の線形関係ではなく、閾値を境にした区分的な線形関係として捉えるのが妥当と示唆される。

また、仮にリサイクラーの下でガラス中にヒ素を含有する PV パネルを選別する場合、これはアンチモン含有量が少ないパネルを選別することも示唆し、リサイクル処理で得られたガラス(つまり、ヒ素の含有量が少ないガラス)のアンチモン含有量は相対的に高くなる可能性がある。なお、アンチモンと鉛の間には有意な相関は認められなかった。

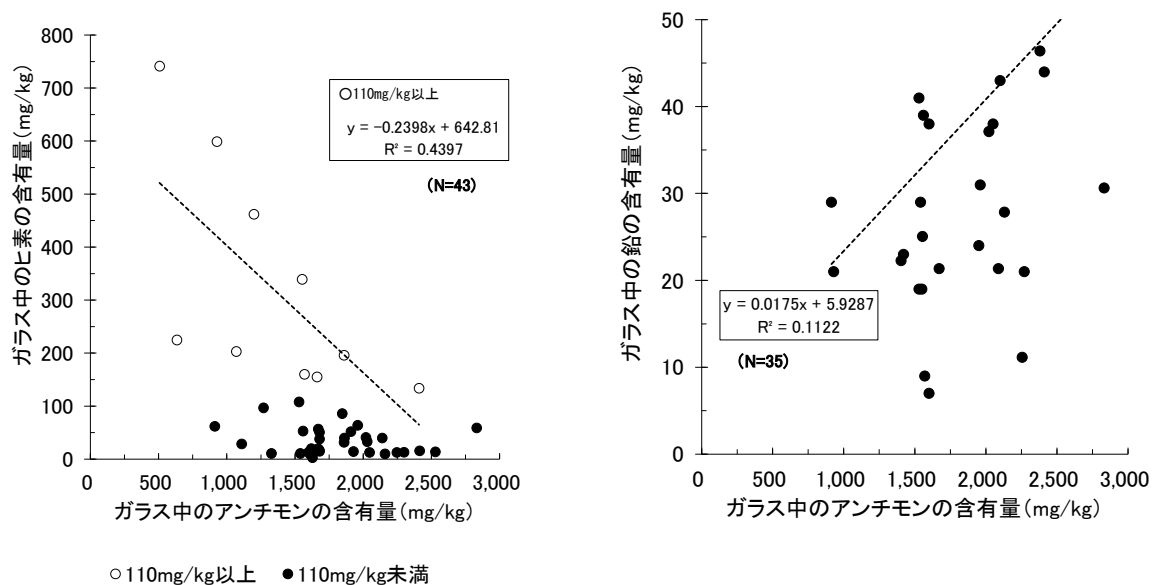


図 2-11 ガラス中のアンチモンとヒ素、鉛の含有量の相関関係(左:アンチモンとヒ素右:アンチモンと鉛)

注釈 1) 左図中の系列○はヒ素含有量 110mg/kg 以上、●はヒ素含有量 110mg/kg 未満のサンプルを示す

右図中の系列●は鉛を検出した全てのサンプルを示す

注釈 2) 左図中に示す近似線はヒ素含有量 110mg/kg 以上のサンプル、右図中に示す近似線は鉛を検出した全てのサンプルを対象としたもの

## 2) ハンドヘルド XRF の有効性の検証

### a. 分析内容と方法

リサイクラー等が現場にて PV パネルのガラス中の含有物質を判別できるかどうかを検証することを目的として、ハンドヘルド XRF による含有物質分析の有効性を検証した。現場での計測にあたっては PV パネルの破碎前に、フロントパネルガラスにハンドヘルド XRF を押し当てて含有物質を測定することが想定される。そこで、フロントパネルガラス面を測定した結果と、粉碎ガラス(粒径 < 150  $\mu\text{m}$ )を測定した結果を比較し、ガラスの形状が分析結果に与える影響の有無を検証した。次に、現在市場で実用されている複数機種の手動 XRF を用いて粉碎ガラスを測定し、ICP-MS 分析値と比較した。これ

により、ヒ素及びアンチモンをどの程度の水準でハンドヘルド XRF により判別可能かを検討した。

#### ア) ハンドヘルド XRF 分析に対してガラス形状が与える影響の検証

ガラスの形状がハンドヘルド XRF による含有物質の定性分析結果に与える影響を検証するため、PV パネルのままフロントパネルガラス面で測定した結果と、これを粉砕したガラス(粒径<150 μm)で測定した結果を比較した。測定は、ガラスの含有量分析及び溶出量分析にも供した標準サンプル4枚を対象に実施し、両形状のガラス中のヒ素及びアンチモンの含有量をハンドヘルド XRF で測定した。ハンドヘルド XRF での分析結果を、ICP-MS による分析結果と比較し、ガラスの形状による影響を検証した。表 2-4 に分析に供した標準サンプルの概要を示す。

表 2-4 分析に供した標準サンプルの概要(ハンドヘルド XRF 分析へのガラス形状の影響検証)

サンプル No.	海外/国内メーカー	製造年	最大出力 (W)
01	海外メーカー	2016	270
02	海外メーカー	2015	280
03	海外メーカー	2013	250
04	海外メーカー	2011	205

フロントパネルガラスの測定は PV パネルの辺縁部とグリッド線上を避け、ハンドヘルド XRF をフロントパネルガラス面に垂直に押し当てて実施した(図 2-12 参照)。なお、分析に使用したハンドヘルド XRF は表 2-7 に示す機種 C である。



図 2-12 ハンドヘルド XRF によるガラス中の含有物質測定の様子

一方、粉砕ガラスの測定は、ガラス粉末をソイルカップに入れてルースパウダー法により一定程度まで均質にし、卓上型スタンドに固定したハンドヘルド XRF を用いて実施した。表 2-5 に分析対象の形状と分析条件を示す。

表 2-5 分析対象の形状と分析条件

形 状	フロントパネルガラス	粉碎ガラス(150 $\mu$ m)
測定方法	パネルの辺縁部とグリッド線を避けて計測	ソイルカップに入れ、ルースパウダー法で均質にして計測
測定モード (演算手法)	土壌モード (エネルギー分散型蛍光 X 線分析法(FP 法))	
測定視野	直径 8 mm	
測定時間	90 秒/回	
測定回数	1 回	3 回 (平均値を計測値とする)

ICP-MSによる含有量分析は、標準サンプルの粉碎ガラス中に含まれるアンチモン及びヒ素を対象として実施した。粉碎試料 1 gをテフロンビーカーに正確に量り取り、硫酸、硝酸、塩酸、過塩素酸、フッ化水素酸を添加してホットプレート上で加熱分解した。分解後、析出物を水と硝酸で溶解し、精製水で 100 mL に定容して検液とした。

#### イ) 複数機種を用いたハンドヘルド XRF 分析の有効性検証

一般に、市場には多様な機種のハンドヘルド XRF が流通している。ハンドヘルド XRF の個別の使用環境や運用状況、経年劣化の程度は一樣ではない。現場にてハンドヘルド XRF を用い、PV パネルのガラス中の含有物質の判別を行う場合においても、様々な状態の機種の使用が想定される。

仮に複数のリサイクラーの下で PV パネルのガラスの含有物質をハンドヘルド XRF により分析し、含有物質の検出有無や含有量により PV パネルを選別(以下「一次スクリーニング」と言う。)する場合、含有物質の分析結果は、ハンドヘルド XRF の機種ごと、及び分析条件ごとに異なることが想定される。更に、「ハンドヘルド XRF によるガラス中の含有物質 A の分析結果は、X mg/kg であった」といった情報がリサイクラー A から、再資源化したガラスの利用業者 Z に提供されたとする。一方で、リサイクラー A と異なる機種のハンドヘルド XRF、異なる分析条件を用いているリサイクラー B から、「ハンドヘルド XRF によるガラス中の含有物質 A の分析結果は、Y mg/kg であった」といった情報が、再資源化したガラスの利用業者 Z に提供されたとする。再資源化したガラスの利用業者 Z にとっては、リサイクラー A から情報提供された X mg/kg の値とリサイクラー B から情報提供された Y mg/kg の値を比較することが難しい。なぜならば、ハンドヘルド XRF の機種ごと、及び分析条件ごとに、含有物質の分析結果が異なることが想定されるためである。

そこで本事業では、実用環境下にあるハンドヘルド XRF による含有物質測定の有効性を検証した。具体的には、現在市場で実用されている複数のハンドヘルド XRF を用い、その分析結果を ICP-MS による分析結果と比較して、ハンドヘルド XRF の有効性を検証した。また、ヒ素及びアンチモン含有量を一定程度の精度で測定可能な手法の共通化も検討した。分析に用いた試料は、表 2-4 に示した標準サンプル 4 枚に加え、先の XRF 分析(159 件)でヒ素が検出されたサンプル 39 件の中から選出した 5 件を含む、計 9 件である(表 2-6 参照)。

表 2-6 分析に供したサンプルの概要(ハンドヘルド XRF 分析の有効性検証)

サンプル No.	海外メーカー/国内メーカー	製造年	最大出力(W)	備考
01	海外メーカー	2016	270	標準サンプル
02	海外メーカー	2015	280	
03	海外メーカー	2013	250	
04	海外メーカー	2011	205	
05	海外メーカー	2019	240	
06	国内メーカー	2015	350	選出サンプル (5/39 件)
07	海外メーカー	2022	445	
08	国内メーカー	2023	255	
09	海外メーカー	2013	470	

分析に使用したハンドヘルド XRF と、分析条件を表 2-7 に示す。ハンドヘルド XRF としては、現在市場に流通する 4 つのメーカーの機器(4 機種)を使用した。①は、機器メーカーから貸与を受けた実用実績の無い最新機器(機種 A)、②~④は、所有組織にて複数年の実用経歴がある機器(機種 B~D)である。また、⑤は①と同一メーカー製の同一機種であるが、再資源化したガラスの利用業者へのガラス供給を意図して、リサイクラーの下で PV パネルの一次スクリーニングに利用されている機器(機種 A)である。

本事業では、150 $\mu$ m に粉碎したガラス粉末をチャック付きポリエチレン袋に封入して試料とし、ハンドヘルド XRF で 1 回あたり 90 秒間測定し、これを 3 回繰り返した平均値をそれぞれ分析値とした。なお、⑤については現在現場で行われている一次スクリーニングと同一条件で測定した。

表 2-7 分析に用いたハンドヘルド XRF と分析条件

	①	②	③	④	⑤
機種 (実用経歴)	機種 A (無し)	機種 B (3 年以上)	機種 C (3 年以上)	機種 D (3 年未満)	機種 A (3 年未満)
測定モード (演算手法)	土壌 (検量線法)	土壌 (FP 法)	土壌 (FP 法)	土壌 (FP 法+検量線補正)	GeoChem (FP 法)
測定視野 (直径)	9mm	14mm	8mm	8mm	9mm
サンプル形状	チャック付きポリエチレン袋に入れた粉碎ガラス(150 $\mu$ m)				
測定時間	90 秒/回				50 秒/回
測定回数	3 回(平均値を分析値とする)				1 回

注釈 1)機種 D の土壌モード(Soil Contaminant-Nutrient)は FP 法をベースに検量線補正を行う演算方式

ICP-MSによる含有量分析は、前述と同様の手順にて、選出サンプル 5 件についても追加で実施し、合計 9 件の分析結果を得た。

## b. 分析結果

### ア) ハンドヘルド XRF 分析へのガラス形状の影響検証

標準サンプル中のヒ素とアンチモンについて、ICP-MS とハンドヘルド XRF(機種 C)による分析結果の相関関係を図 2-13 と図 2-14 に示す。

フロントパネルガラスと粉砕ガラスで測定した ICP-MS とハンドヘルド XRF による分析値を比較した結果、ヒ素、アンチモン共に正の相関が認められた。ヒ素は、ガラス形状によらずハンドヘルド XRF と ICP-MS の分析結果が概ね一致した。アンチモンについては、いずれのガラス形状でもハンドヘルド XRF による分析値が ICP-MS より低く得られた。ガラス形状別に比較した結果、粉砕ガラスについては一部試料で ICP-MS による分析結果と良好な一致が認められたものの、パネルのままの方が ICP-MS の結果に対する直線性と値の一貫性がより良好であった。特に、高濃度範囲では、粉砕ガラスの結果が過小評価となる傾向が強く、全体としてパネルのままの方が安定した定量関係が得られた。主要機器メーカーへのヒアリングや既往知見でも平滑で緻密な固体表面の方が粉体より再現性と直線性に優れることは言及されており、本結果はこれらの知見と整合的な結果といえる。このことから、リサイクル処理前にパネルのまま測定する方がより適切と推察される。

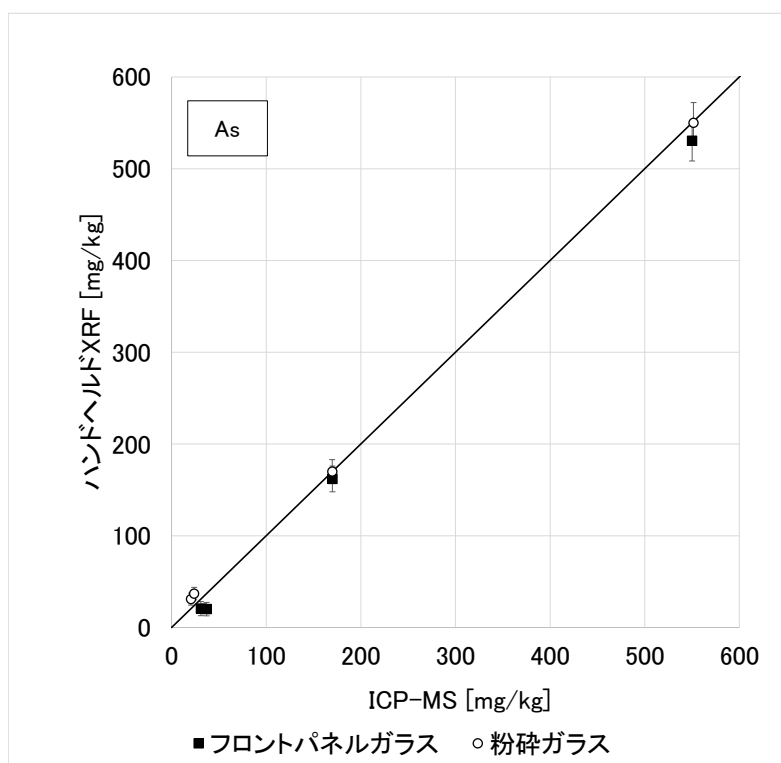


図 2-13 ガラスの形状別 ICP-MS とハンドヘルド XRF によるヒ素の分析結果の相関関係

注釈 1) エラーバーは分析誤差(4σ)を示す。

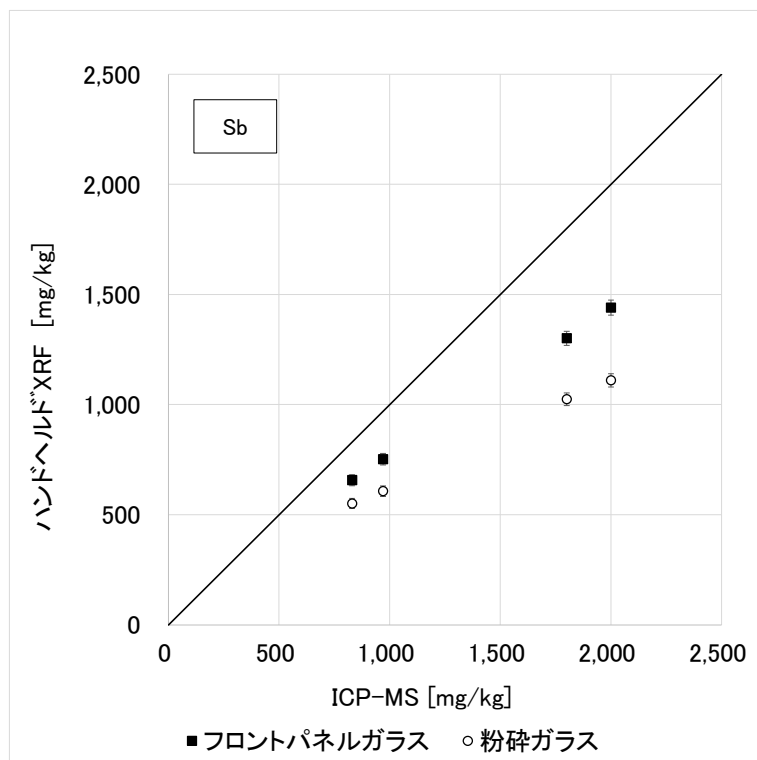


図 2-14 ガラスの形状別 ICP-MS とハンドヘルド XRF によるアンチモンの分析結果の相関関係

注釈 1) エラーバーは分析誤差(4σ)を示す。

#### イ) 複数機種を用いたハンドヘルド XRF 分析の有効性検証

本実証では、現在市場に流通するハンドヘルド XRF による一次スクリーニング水準を把握し、その有効性を検証することを目的として、令和 7 年度に実用経歴の異なる複数機器を用いた分析結果の比較検証を行った。実施にあたっては測定条件を極力統一しつつ、より多くの機器で検証することを重視し、パネルのままの場合と比べて可搬性に優れる粉砕ガラスをサンプルとして用いた。なお、現場でのスクリーニングでは一般にパネルのままでの測定が想定されることから、粉砕ガラスを用いた評価は、市場で実現可能な一次スクリーニング水準を安全側に見積もることにもつながる。粉砕ガラス中のヒ素及びアンチモンの含有量について、ICP-MS 及びハンドヘルド XRF(4 機種 5 台)で分析した結果を表 2-8 に示す。分析に供したサンプル中のヒ素とアンチモンの含有量は、ICP-MS の分析値でヒ素が 4~550mg/kg、アンチモンが 830~2,300mg/kg であった。最もヒ素の含有量が少ないサンプル(07)でも機種 C を除く全てのハンドヘルド XRF で検出可能であったことから、本手法により現場にてヒ素含有量 10mg/kg 未満の水準で一次スクリーニング可能な見通しを得た。

表 2-8 ICP-MS とハンドヘルド XRF による粉砕ガラスの分析結果

サンプル No.	ICP-MS [mg/kg]		ハンドヘルド XRF [mg/kg]									
			①		②		③		④		⑤	
	As	Sb	機種 A		機種 B		機種 C		機種 D		機種 A	
	As	Sb	As	Sb	As	Sb	As	Sb	As	Sb	As	Sb
01	550	830	590	800	530	780	530	560	510	1,300	590	910
02	31	2,000	32	1,900	27	1,700	19	1,200	26	2,800	33	2,200
03	170	970	190	940	170	900	170	560	130	910	210	1,100
04	37	1,800	38	1,700	34	1,500	27	920	28	2,400	40	2,000
05	410	1,100	440	1,100	420	1,000	410	750	390	1,600	460	1,200
06	90	2,300	100	2,200	87	2,000	82	1,400	86	3,200	99	2,500
07	4	2,200	6	2,100	7	1,600	N.D.	1,300	3	2,900	6	2,200
08	33	1,900	34	1,800	34	1,600	25	980	26	2,900	34	1,800
09	65	1,500	68	1,400	66	1,300	62	690	55	1,600	69	1,400

注釈 1) 上表で、「N.D.」は、測定はしたが、ヒ素が検出されなかった分析結果を示す。

次に、ICP-MS とハンドヘルド XRF による分析結果の相関関係について図 2-15 と図 2-16 に示す。ヒ素とアンチモンいずれについても、使用した全ての機種で分析結果で正の相関が認められた。ヒ素については、機種や実用経歴に関わらず、ハンドヘルド XRF の分析結果が ICP-MS の結果と概ね一致し、特に 100mg/kg 以下の濃度範囲では機種ごとの結果のばらつきも小さかった。このことから、ヒ素については現在市場に流通する多くの機種で、補正係数を乗じた分析結果の修正(以下「補正」と言う。)を要することなく 10mg/kg 未満の水準で判別が可能であり、一定精度の一次スクリーニングの実装が可能と考えられる。

一方、アンチモンについては、機種 A、B、C の 3 機種でハンドヘルド XRF の分析結果が ICP-MS の結果と比較して過小評価となる傾向が認められた。特に高濃度域では、ICP-MS の分析値からの乖離が大きくなり、特に③(機種 C)と④(機種 D)ではその傾向が顕著であった。また、機種 A は①と比較して⑤の結果のばらつきが大きくなり、機種ごと、測定条件ごとに結果のばらつきが拡大した。ハンドヘルド XRF は従来、微量元素の検出を主目的としており、機器の初期設定において高濃度帯の精密測定を想定していないことから、比較的高濃度での検出が想定されるアンチモンについては、検量線の補正を適用することで分析精度の向上が期待できる。

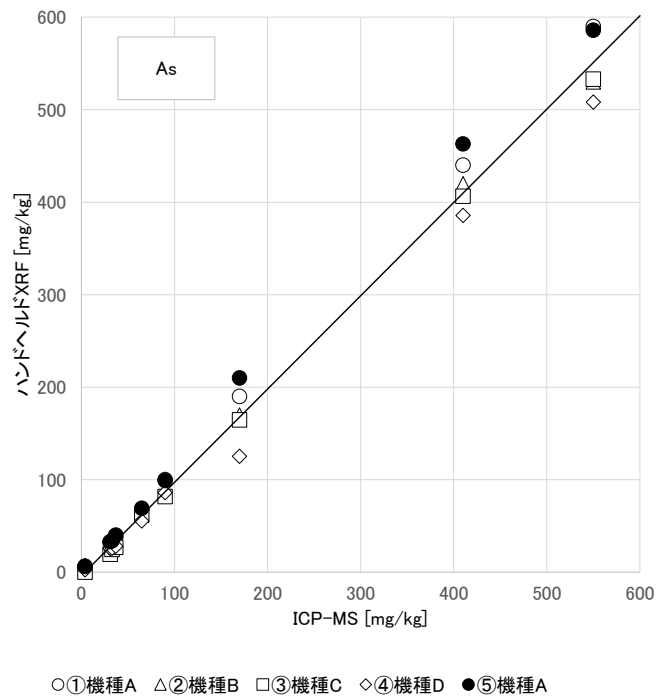


図 2-15 ICP-MS と複数のハンドヘルド XRF によるヒ素の分析結果の相関関係

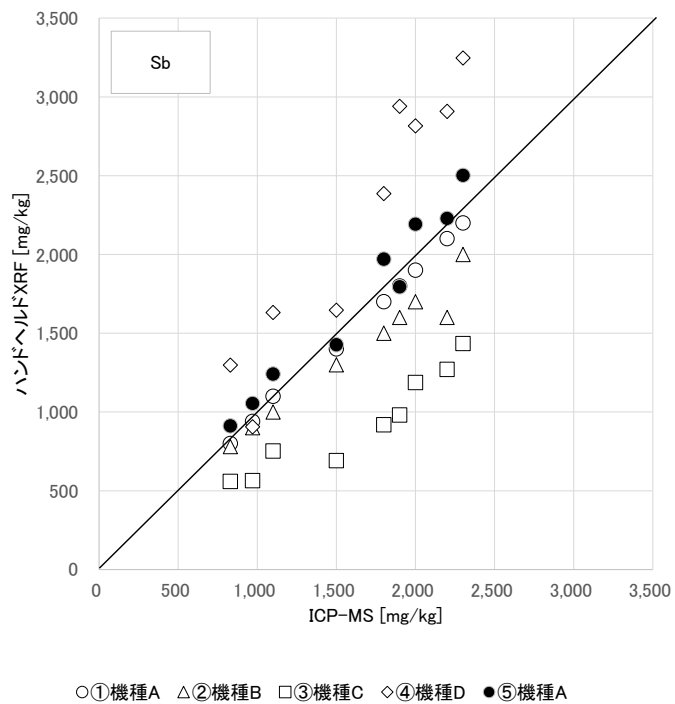


図 2-16 ICP-MS と複数のハンドヘルド XRF によるアンチモンの分析結果の相関関係

続いて、ヒ素及びアンチモン含有量を一定程度の精度で測定可能な手法の共通化を、次のとおり検討した。

本事業では、現在市場で実用される 4 つのメーカーのハンドヘルド XRF(4 機種)を用いてガラス中の含有物質の測定を行った。分析条件①～④は既往文献<sup>3</sup>及び機器メーカーの意見を参考に共通条件を検討し、⑤のみリサイクラーが現場で実施する一次スクリーニングの実運用条件を採用した。共通化を図ることによって、一次スクリーニングの精度向上に寄与し得る分析条件を表 2-9 に整理した。

表 2-9 共通化により一次スクリーニングの精度向上に寄与し得る共通化の条件

項目	共通化条件	共通化が望ましい理由と留意点	共通化の目的
ガラス形状	板状	均質かつ平滑で局所的なムラが少なく、測定視野サイズの違いによる影響差を軽減できる	現時点で 共通化可能 (設定変更等で可能)
測定位置	フロントパネルガラス	表面を十分清掃し、辺縁部とグリッド線上を避けて測定する 測定時にたわみの生じないように配慮する	
モード	土壌モード	微量元素の分析値が安定しやすい土壌(Soil)モードを推奨 (機種 A の場合 GeoChem モードも対応可)	
測定時間	90 秒/回	10mg/kg 未満のヒ素を安定的に検出するため、一般的な微量元素測定(60 秒)より長い 90 秒程度が理想 測定値のばらつき軽減と検出精度向上を図る	
測定回数	3 回/件 (平均を分析値とする)	複数回の計測により偶発的なばらつき(試料の凹凸、表面汚れ、装置の揺らぎ等)の低減を図る 分析精度の改善幅、現場効率、試料保護(表面熱変化、光学的劣化等の回避)の観点から適正な回数	
測定視野	概ね 5 mm 以上 (標準スポット)	スモール/マイクロスポット測定機能やコリメーター使用は、10ppm 未満のヒ素を極力安定的に検出するには X 線のカウント数が少なく十分な分析精度と再現性を欠く恐れがあるため、広めの測定視野を選択する	
演算手法	検量線法	ヒ素・アンチモンの検出精度を重視する場合は検量線法が推奨されるが、低濃度域(概ね 100 mg/kg 以下)は FP 法でも精度やばらつきに大きな差は無い 高濃度範囲の補正には特に検量線法が適する	将来的に 共通化可能 (機器仕様に依存)

なお、表 2-9 に示した項目のうち、測定時間と測定視野は一次スクリーニングの精度向上に寄与する重要なパラメータであり、現状の市場環境下でも共通化を図りやすい項目といえる。また、分析に当たり試料の均質性・表面状態が測定精度に影響することは既往知見からも確認できる事項であり、本実証における検証の結果を踏まえても、分析は粉碎前にパネルのまま実施することが望ましいと推察される。このことは、多くの PV パネルがリサイクルに当たってパネルのままリサイクラーに搬入される実態にも即しており、分析時のガラス形状については比較的共通化が図りやすい項目と見通される。これらの項目の共通化により、機種や機器条件の違いによる不確実性を軽減してヒ素の判別精度を高めることが期待できる。また、アンチモンについては、ヒアリングの結果ガラス品質別のグレード管理など定量的な

<sup>3</sup> 日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター。

ポータブル蛍光エックス線分析装置を用いた岩石試料等の主要元素及び微量元素の定量分析 — 3 mm 径小スポット測定による全岩化学組成の分析手法 — (JAEA-Testing 2021-003). 日本原子力研究開発機構, 2022.

Zhou, Shilin, Jing Wang, Wei Wang, and Shuaipeng Liao.

“Evaluation of Portable X-ray Fluorescence Analysis and Its Applicability as a Tool in Geochemical Exploration.” *Minerals* 13, no. 2 (2023): 166.

管理に対するユーザーニーズが示されている。現在市場で実用される多様なハンドヘルド XRF を活用して標準サンプルによる分析と補正を行い、一次スクリーニングの精度を一定水準まで高めることができれば、処理費用の削減に加え、再生ガラス原料の品質及び価値の向上にも貢献できると期待される。

### 3) 令和 6 年度事業で得られた結果に対する追加的な検討

#### a. 含有量から溶出量の推定

令和 6 年度事業では、4 種類のガラスの標準サンプルについて、各サンプル中のヒ素含有量を ICP-MS により測定した。次に、各サンプルを「粒径 0.5 mm 未満」と「粒径 0.5～2 mm 未満」に分け、それぞれについて環境庁告示第 46 号に準じて溶出試験を行い、ヒ素溶出量を測定した。その結果、ヒ素含有量と溶出量には正の相関関係があること、また粒径 0.5 mm 未満の試料からのヒ素の溶出量は、粒径 0.5～2 mm 未満の試料に比べて大きいことを、図にプロットすることで示した。参考として、以下の図 2-17 に令和 6 年度事業報告書図 2-7 を再掲する。

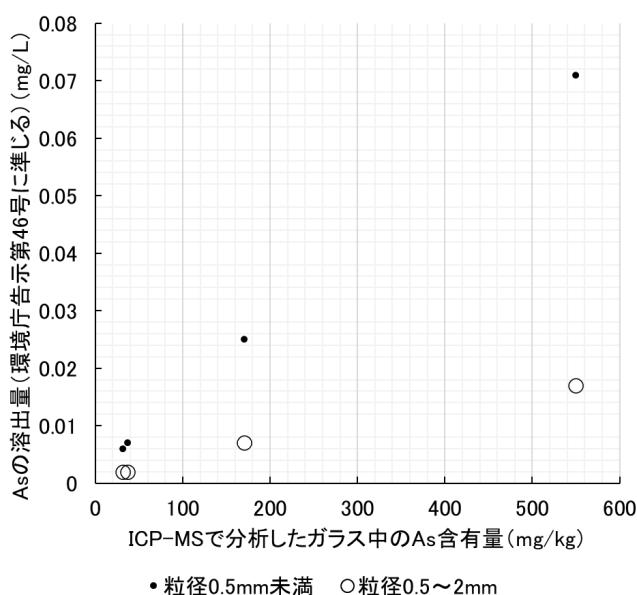


図 2-17 ガラス中のヒ素の含有量と溶出量(環境庁告示第 46 号に準じる)(令和 6 年度事業報告書図 2-7 の再掲)

一般論として、粒子状にしたガラスを球体と仮定すれば、同じ総量のガラスをより細かい粒子にすると、より粗い粒子にした場合に比べて、全粒子の合計表面積は大きくなる。このことから、上図の結果は一般論と整合している。上図に示した結果は一般論と整合が取れている。本年度は、粒径の大きさがどの程度小さくなると、どの程度溶出量が増えるのか、また溶出量の増加に表面積の増加がどの程度まで寄与しているのか、一定の仮定を置いて検討した。

## ア) 検討

横軸に 0.5～2mm 未満の粒径のサンプルからのヒ素の溶出量を、縦軸に 0.5mm 未満の粒径のサンプルからのヒ素の溶出量をプロットすると、以下の図 2-18 のとおりとなり、線形近似による回帰直線の傾きは 4.3 であった。

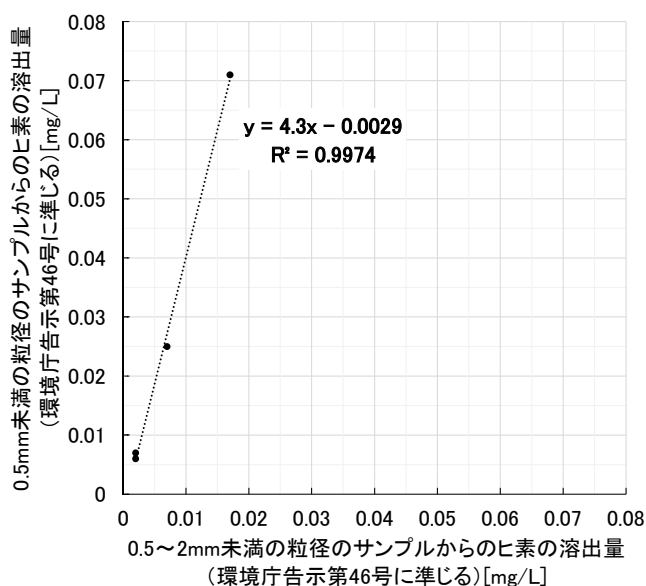


図 2-18 異なる粒径のサンプルからのヒ素の溶出量(環境庁告示第 46 号に準じる)の相関関係

つまり、0.5mm 未満の粒径のサンプルからのヒ素の溶出量は、0.5～2mm 未満の粒径に比べて、4.3 倍大きな値を示していた。

次いで、この溶出量の差が、表面積の差とどの程度関係しているのか、以下の 3 つの仮定を置いて検討した。

- 0.5 mm 未満の粒子の平均粒径は 0.25 mm、0.5～2 mm 未満の粒子の平均粒径は 1.25 mm とする。
- いずれのサンプルも形状は球と見なす。
- 両者の試料の密度は同じと見なす。

球では、密度が同じであれば、「単位重量あたりの表面積」は粒径に反比例する。0.5mm 未満の粒径のサンプルと 0.5～2mm 未満の粒径のサンプルの粒径の比は  $1/5 (=0.25/1.25)$  と計算できることから、両サンプルの表面積の比は 5 倍になる。したがって、上記の 3 つの仮定を受け入れれば、0.5mm 未満の粒径のサンプルからのヒ素の溶出量が、0.5～2mm 未満の粒径に比べて 4.3 倍大きな値を示している要因は、5 倍異なる両サンプルの表面積の比が主要な要因の一つなのではないか、と推論することはできる。

## イ) 検討から得られる示唆

以上の検討も踏まえると、以下の示唆が得られる。

- 環境庁告示第 46 号では、2mm の目のふるいを通過させて得た試料(粒径:2mm 未満)を、溶出試験に供することの旨が定められている。上記の検討から、2mm 未満の粒径のサンプルからのヒ素の溶出量は、0.5mm 未満の粒径のサンプルに比べて小さく、0.5～2mm 未満の粒径に比べて大きい値になると推測される。即ち、環境庁告示第 46 号にしたがって、2mm 未満の粒径のサンプルからのヒ素の溶出量は、図 2-17 の黒丸(粒径 0.5mm 未満)と白丸(粒径 0.5～2mm 未満)の間の値になると想定される。
- ヒ素の土壤環境基準(試験方法:環境庁告示第 46 号)は 0.01mg/L である。図 2-17 よると、ガラス中のヒ素の含有量が 500mg/kg を超えると、粒径が 0.5～2mm 未満のサンプルであっても、ガラスサンプルからのヒ素の溶出量は土壤環境基準である 0.01mg/L を超過する。したがって、一定程度以上の量のヒ素を含有するガラスカレットを土壤に直接接触する形で再利用する際には、環境管理上の注意が必要である。この点は、国からの周知が求められると考えられる。
- 表 2-3 によると、本事業で得た全サンプルの中で、ヒ素が検出されたサンプルの割合は、25%であった。ガラスからヒ素が検出される PV パネルを判別する、あるいはガラス中に一定程度の含有量以上のヒ素が含まれる PV パネルを判別することができれば、残りの PV パネルのガラスからは、ヒ素を起因とした環境管理上の懸念を分離でき得ると考えた。
- 加えて、本年度の成果によると、ハンドヘルド XRF の分析方法の共通化を社会実装できれば、ガラス中にヒ素を含む PV パネルを判別することが可能になると考えられた。
- 本節で行った検討は、仮定を含むものである。今後、アカデミアでの研究が進展し、科学的知見が蓄積することで、PV パネルのガラスのリサイクル促進が期待される。

## b. 熱処理による溶出特性の評価

令和 6 年度事業では、1 種類のガラスサンプルを用いて熱処理試験を行い、熱処理試験前後のヒ素の溶出特性の変化を検討した。具体的には、ガラス中のヒ素含有量と溶出量が既知のガラスサンプルを加熱し、その後のヒ素の含有量と溶出量を分析した。試験条件等は、令和 6 年度事業報告書からの再掲を一部含むが、以下のとおりであった。

- 加熱条件
  - 500℃、800℃、及び 1,100℃の 3 つの温度帯で加熱した。
  - サンプルを各温度帯の温度で 1 時間保持した。
- 用いた設備
  - 電気炉(炉内の温度センサーで温度管理を行いながら、加熱を行った)
  - 容量 50mL のアルミナ製のつぼ
- 含有量と溶出量の分析方法
  - 含有量の分析方法

- 加熱後、るつぼからガラスを取り出し、ヒ素の含有量を ICP-MS で分析した。

#### ■ 溶出量の分析方法

- 加熱後、るつぼからガラスを取り出し、「粒径 0.5 mm 未満」と「粒径 0.5～2 mm 未満」にふるい分け、それぞれについて環境庁告示第 46 号に準じて溶出試験を行い、ヒ素溶出量を測定した。

熱処理試験の結果、500℃、800℃、及び 1,100℃いずれの温度帯でも、加熱前後で、ガラス中のヒ素の含有量にほぼ変化は無かった。一方で、0.5mm 未満及び 0.5～2mm のどちらの粒度でも、また 500℃、800℃、及び 1,100℃いずれの温度帯でも、加熱後のガラスからのヒ素の溶出量は、加熱前に比べて小さかった。参考として、以下の図 2-19 に、令和 6 年度事業報告書図 2-8 を再掲する。

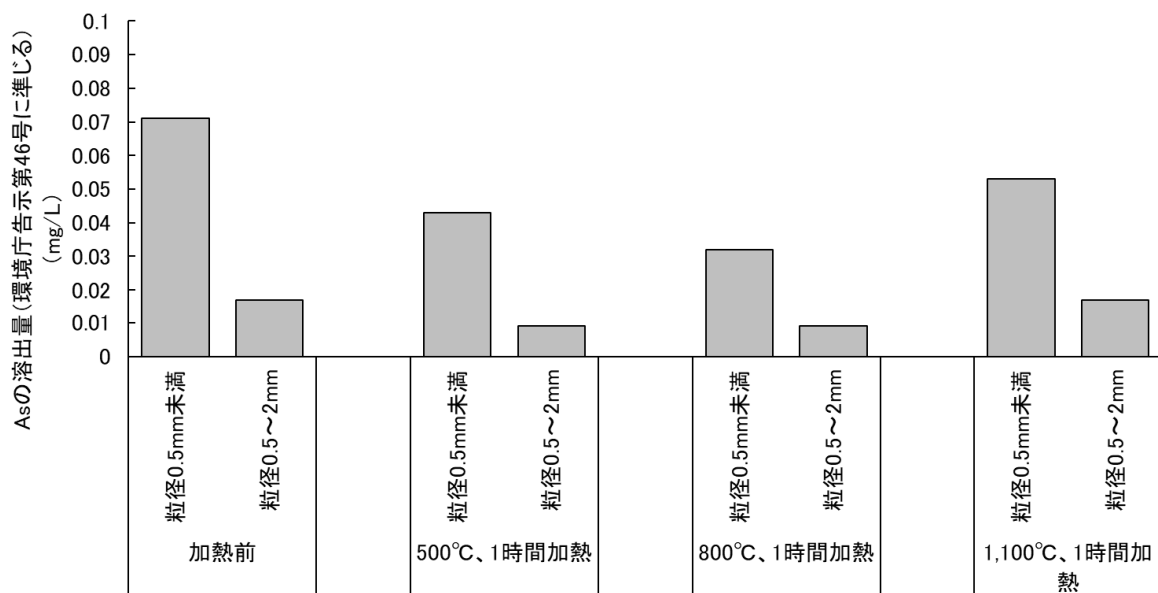


図 2-19 熱処理によるヒ素の溶出量(環境庁告示第 46 号に準じる)の変化(令和 6 年度事業報告書図 2-8 の再掲)

加熱前後でガラス中のヒ素含有量はほぼ変化が無かったにも関わらず、加熱後サンプルからのヒ素溶出量が小さくなった理由に関する知見を得ることを目的として、本年度はガラスの技術に関する専門家へのヒアリングを実施した(本報告書 4.1 参照)。

#### ア) ヒアリング結果

- ガラスは、800℃で加熱すると表面が軟化する。
- 表面が軟化すると、ガラスサンプルが丸みを帯びる。
- 結果、ガラスサンプルの単位体積に対する表面積が小さくなる。
- 一般に溶出は、主に表面から起こる。
- よって、800℃で加熱したことで、ガラスサンプルからのヒ素の溶出量が小さくなった可能性がある。

- 加えて、ガラスサンプル採取の工程で発生した細粒が、熱処理を通して溶融しガラスサンプルと一体化したことで、表面積が減少した可能性も考えられる。
- ガラスの物性を踏まえると、800℃での加熱は、500℃での加熱に比べて、よりガラスサンプルの表面積を減らすと想定される。
- 1,100℃の熱処理でのヒ素の溶出量が、500℃と800℃に比べて大きい理由や要因は不明。

#### イ) ヒアリング結果から得られる示唆

以上のヒアリング結果も踏まえると、以下の示唆が得られる。

- 熱処理試験に供したサンプル数が1サンプルであるため、再現性の確認等の検討が今後求められる点に留意が必要であるが、500℃、800℃、または1,100℃の温度帯でガラスカレットを熱処理することで、ヒ素の溶出量を一定程度抑制でき得る。
- 再現性確保の観点からは、今後、異なる種類のガラスサンプルを用いて熱処理試験を行い、令和6年度事業で得たヒ素の溶出特性の変化が再現されるのか、データを得ていくことが望ましい。特に、熱処理試験前後で、ガラス表面の微視的構造を観察し、表面形状や組成の変化に関するデータを取得することが望まれる。加えて、ガラスへの不純物の溶融に関するデータも収集することで、熱処理による溶出特性の変化に関する検討が進展することが期待される。
- ガラスの技術に関する専門家にヒアリングしたところによると、日本国内にはガラスのリサイクル技術に関する専門家が限られているとのことであった。特に、本事業のような公的な調査・研究事業に、技術面で貢献でき得る専門家は更に限られているとのことであった。PVパネルのガラスリサイクル促進の視点からは、窯業の専門家の人材育成に関する施策が展開されることが望ましいと考えられた。

## (2) 樹脂類

本事業では3年間にわたってサンプルを取得し、部材構成の分析を実施してきた。その背景として、PVパネルの部材の素材構成は、PVパネル自体の性能や耐久性に大きく影響を及ぼすものと考えられるが、しかしながら部材の選択はメーカー判断に委ねられ、詳細開示はほとんどなされていないことが挙げられる。

一方で、本事業の大きな柱の一つであるデジタル・プロダクト・パスポート(DPP)の観点からも、部材構成に関する情報の整理は非常に重要と考えられ、これらの知見は、将来に向けた長期使用の判断や、リサイクルの適正ルート選定において極めて有用なものとなるを考える。

そこで本事業においては、本事業内で計画的に収集している使用済みPVパネルの樹脂部分の分析を行い、我が国に設置されているPVパネルの部材構成の実態を把握することを目的として各種分析を行った。以下に樹脂部分の分析内容と結果についてまとめる。

## 1) サンプルの取得と分析方法

### a. サンプルの取得

本年度分析に供したサンプルは、本事業で PV CYCLE JAPAN (PVCJ)のルートを通じ集められた PV パネル 11 サンプルと、秋田県産業技術センターに運び込まれた PV パネル 15 サンプルの計 26 サンプルである。前者 11 サンプルのパネルは、リサイクル事業者においてアルミ枠、ガラス、ジャンクションボックスを外した後の、セル/EVA シートと呼ばれているものであり、後述の 15 サンプルのパネルは、アルミ枠、ガラス、ジャンクションボックスを外す前の使用済みのガラスが付いたままの状態のものである。

### b. 分析方法

本年度は、封止材、バックシートについて、素材の定性を目的とし近赤外線分光装置による測定を行った。また、フッ素等元素の定量を目的とし、ハロゲン分析、CHN 分析を行った。更に、バックシート構成に関する知見を得るために、電子顕微鏡による断面分析を実施した。

封止材の樹脂の種類判定の分析は、本年度も過去 2 年間と同様、可搬型近赤外線分光装置(モバイル近赤外(NIR)分光ソリューション、trinamiX 社製)を用いて行った。本装置は、PV パネルに関して 3 つのモードを持っている(PV 封止材モード、PV バックシートモード、PV モジュールモード)。封止材モードは表面から、PV バックシートモードは裏面から、PV モジュールモードは表面と裏面の両方から測定を行う。測定は近赤外線分光を照射し、検出されたデータを蓄積されているデータベースに照合して類似する樹脂の組み合わせを探してくるものである。封止材測定では、今回のガラスを剥いだものは PV 封止材モードの測定が不能であるため、PV モジュールモードで表面を 2 回計測した。

バックシートの樹脂種類とその構成の分析についても、封止材の測定と同様、可搬型近赤外線分光装置(モバイル近赤外(NIR)分光ソリューション、trinamiX 社製)を用いて行った。バックシートの計測では、PV バックシートモードを使用し、裏面から 1 回計測した。令和 5 年度事業では 54 サンプル、令和 6 年度事業では 84 サンプル、本年度事業では 26 サンプル、過去 2 年間と本年度事業で計 164 サンプルの測定を行った。

令和 5 年度事業、令和 6 年度事業の測定結果より、バックシートにはフッ素系樹脂が使用されている場合があることが示唆された。フッ素はその処理方法により、機器の腐食等の問題となることも多く、考慮が必要である。そのため本年度事業では、令和 6 年度に 28 サンプルの分析を実施したことに加え、本年度は 17 サンプルの計 45 サンプルを以下の条件にて選定してハロゲン分析及び CHN 元素分析の 2 種類の化学分析を行った。

令和 6 年度は令和 5 年度、令和 6 年度のサンプルの中から 28 サンプルを、本年度は全サンプルの中から 17 サンプルを抽出して、ハロゲン分析と CHN 元素分析を行った。表 2-11 に分析結果を示す。

ハロゲン分析及び CHN 元素分析のサンプルの選定にあたっては、近赤外線分光測定以外に、以下のような考慮を行い、ハロゲン分析及び CHN 元素分析供するサンプルの選定を行った。

- サンプル選定条件

- 本年度新規入手サンプル
- メーカー、型式は同じだが、近赤外線分光測定でフッ素の有無の違いがあるもの
- メーカー、型式は同じだが、近赤外線分光測定で一方は素材判別困難であったもの
- メーカー、素材は同じだが、製造年代の異なるもの

ハロゲン分析では、試料を燃焼分解してガス化した成分を捕獲吸収し、その成分をイオンクロマトグラフィー法で検出分析する。PV パネルのバックシートの主たるハロゲンはフッ素であるため、フッ素の定量評価を目的としてフッ素分析を行った。また、現在欧州で検討されている DPP の項目検討に臭素が含まれるため臭素も分析対象に含めた。なお、これはジャンクションボックス部分のプラスチックの関係事項と考えられる。また、種々添加剤等としての塩素含有可能性も考慮し、塩素も分析対象とした。

CHN 元素分析は、有機化合物中の炭素・水素・窒素含有量を定量的に明らかにする。粉末または液体サンプルを燃焼、分解し H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> ガスとし、それぞれのガスを熱伝導度検出器で定量し、CHN 含有量を分析する。この分析はサンプルの純度の確認や元素組成の決定に利用されている。

両分析については、東北大学巨大分子解析研究センター (<https://kiki.chem.tohoku.ac.jp/>) に依頼し、以下の装置を使用して行った。

- ハロゲン・硫黄分析装置:「YHS-11」(ヤナコ社製)
- CHN 分析装置:「JM-10」「JM-11」(ジェイ・サイエンス・ラボ社製)

今回の分析では、令和 6 年度同様、PV パネルのセル/EVA シートのサンプルを約 3cm 角に切断し、バックシートのみ剥離した。更にこの剥離したバックシートを約 2mm 角に切断し、マイクロチューブに封入したものを分析サンプルとした。

## 2) 分析結果

本年度サンプル 26 サンプルの近赤外線分光測定結果を表 2-10 に示す。結果として、26 サンプル中、25 サンプルが PET、EVA と測定された。1 サンプルは吸光度限界値超過で測定不能であった。

バックシートは多くが複数のシートで構成されることが示唆され、26 サンプル中、PVF、PVDF 等フッ素樹脂と測定されたものが 8 サンプル、フッ素コーティング加工を施したもの (fluorine coating) と同定するサンプルが 10 サンプルという結果となった。

表 2-10 本年度(令和7年度)26 サンプルの近赤外線分光測定結果

No.	製造年(年)	バックシート (NIR)	封止材 (NIR)
1	2023	PP	PET, EVA
2	2016	PVDF, PET, PE	PET, EVA
3	2019	PET, PE, EVA	PET, EVA
4	2020	Unrecognized Material	PET, EVA
5	2023	PET, fluorine coating	PET, EVA
6	2019	PVDF, PET, PE	PET, EVA
7	2017	PVDF, PET, PE	PET, EVA
8	2012	PET	PET, EVA
9	2001	PVF	PET, EVA
10	2022	PET, fluorine coating	PET, EVA
11	-	PET, fluorine coating	PET, EVA
12	2018	PET, PE	PET, EVA
13	2018	PET, PE	PET, EVA
14	2022	PET, fluorine coating	PET, EVA
15	2022	PET, fluorine coating	PET, EVA
16	2022	PET, fluorine coating	PET, EVA
17	2016	PVDF, PET, PE	PET, EVA
18	2016	PVDF, PET, PE	PET, EVA
19	2016	PET, fluorine coating	PET, EVA
20	-	PET, PP	PET, EVA
21	-	PET, PP	Absorbance limit exceeded
22	2016	PET, fluorine coating	PET, EVA
23	2016	PVDF, PET, PE	PET, EVA
24	2016	PVDF, PET, PE	PET, EVA
25	2019	PET, fluorine coating	PET, EVA
26	-	PET, fluorine coating	PET, EVA

バックシート：PVバックシートモードで裏面を1回計測  
封止材：PVモジュールモードで表面を2回計測

図 2-20 には、令和 5 年度事業と令和 6 年度事業で近赤外線分光測定を実施した 138 サンプルの構成パターン分類結果を示した。図 2-21 には過去 2 年間の 138 サンプルに加え、本年度事業のサンプル 26 サンプルを加えた 164 サンプルのバックシート構成パターン分類結果を示した。結果として図 2-20、図 2-21 より、PET+PVF、PET+PVDF、PET+THV といった PET とフッ素樹脂との複合素材が図 2-20 で 41%、図 2-21 で 40%、PET とフッ素コーティングのものが図 2-20 で 25%、図 2-21 で 26%となった。即ち、フッ素系の材料 が約 2/3 を占める結果となった。その他は

図 2-20、図 2-21 共に、2%、判別不能で不明のものは 6%だった。結果として図 2-20、図 2-21 より N 数が 138 から 164 に増えてもバックシートの素材の構成パターンの各割合の傾向に違いは見られなかった。したがって、バックシート構成パターン分類の傾向について本年度サンプルを加えることで検証することができたと考える。

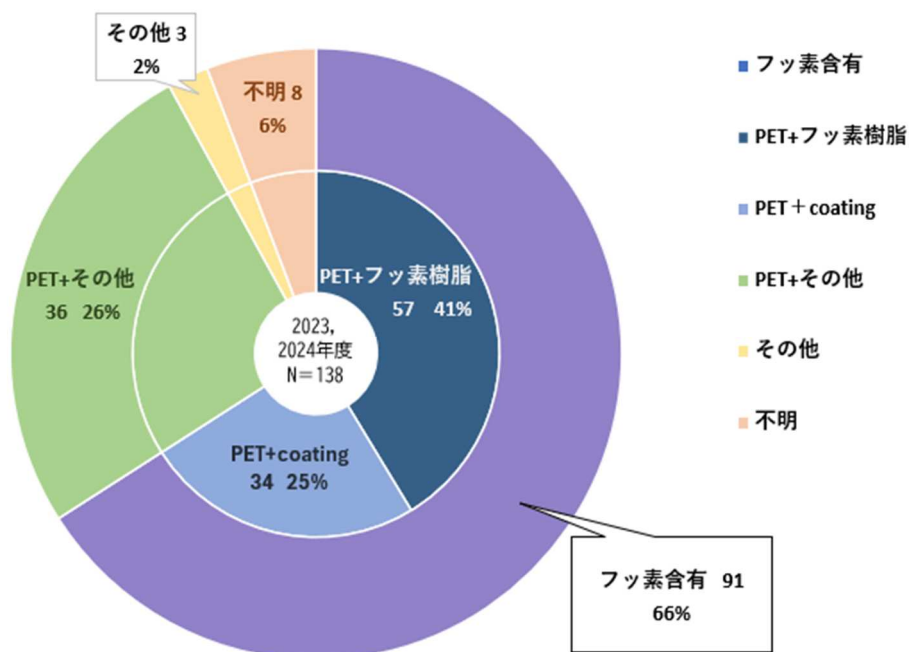


図 2-20 令和 5、令和 6 年度のバックシートの構成パターン(N=138)

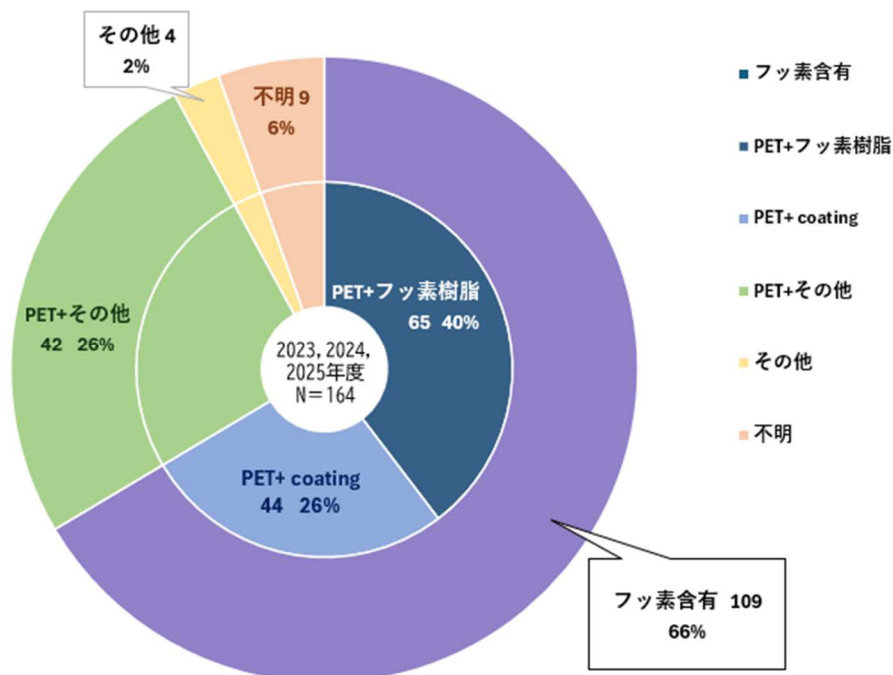


図 2-21 令和 5、令和 6、令和 7 年度のバックシートの構成パターン(N=164)

次に、164 サンプルにおいてフッ素樹脂パターンの年代別の整理も行った(図 2-22、図 2-23)。そ

の結果、PET+PVF、PET+PVDF はどの年代においても見られたが、2013 年を境に PET+THV が見られなくなり、逆に fluorine coating 等フッ素部分の膜厚が薄いと考えられるものが増加していることが分かった。N 数が 138 から本年度サンプル 26 サンプルを加えた 164 に増えても年代別のフッ素樹脂の傾向性は変わらなかった。この傾向が、技術面に由来するものか、メーカーの選択傾向の変化によるものか等明確な理由は不明であるが、こうした素材構成の経時変化については継続して注視していく必要がある。

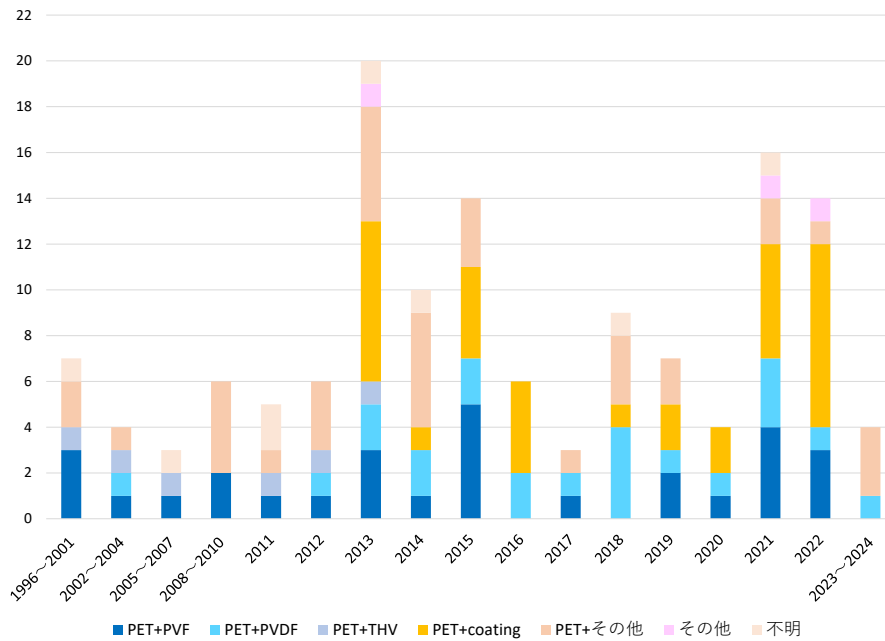


図 2-22 令和 5, 令和 6 年度 PV サンプルのフッ素樹脂の年代別パターン(N=138)

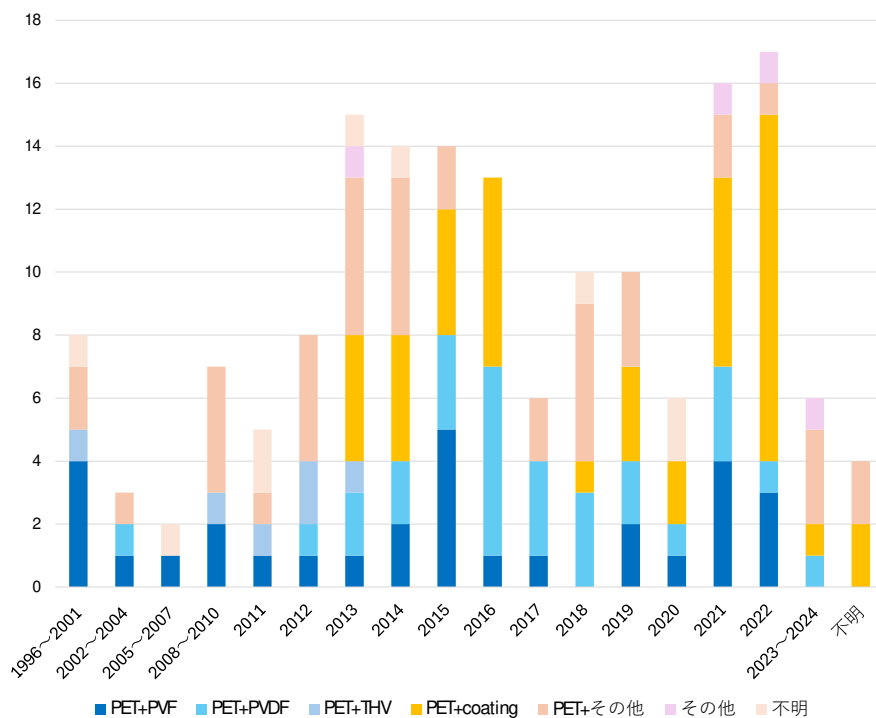


図 2-23 令和 5, 令和 6, 令和 7 年度 PV サンプルのフッ素樹脂の年代別パターン(N=164)

表 2-11 に本事業で実施したハロゲン分析、CHN 分析の結果を示す。令和 6 年度は 28 サンプル、本年度は 17 サンプルの分析を実施した。

表 2-11 の結果から、近赤外線分光測定にて PVF、PVDF と同定されたサンプルについては、ハロゲン分析にてフッ素含有量として不検出のものから最大で 15.80 wt%のものの存在が認められた。フッ素コーティング(fluorine coating)と測定されたサンプルについては、不検出のものから最大で 0.14 wt%であった。上記の PVF、PVDF と同定されたサンプルと比較するとフッ素含有量は 1/100 程度となった。

PET+PE と同定されたサンプルについてはハロゲン分析においてもフッ素はほぼ不検出であった。令和 5 年度は近赤外線分光測定の結果、第一候補、第二候補まで幅広く考慮し、いずれかにフッ素樹脂もしくはフッ素コーティングと測定されたサンプルについては、フッ素含有と判断した。しかし令和 6 年度化学分析を行った結果、第一候補にフッ素が含まれていないサンプルからは化学分析によるフッ素検出は見られなかったことから、令和 6 年度、令和 7 年度は第一候補のみの結果を用いることとした。不明(Unrecognized Material)と同定されたサンプルの中には、ハロゲン分析において不検出のものから最大で 31.38 wt%のフッ素含有が認められた。これらは、黒色や濃紺等着色したバックシートであったため、近赤外線分光法では樹脂の同定が困難であったが、今回のハロゲン分析によりフッ素樹脂であることが示唆された。一方で、CHN 元素分析結果については、樹脂判定とフッ素樹脂と判定されたものを除き、上記の近赤外線分光装置測定結果の違いによる明確な差異は見られなかった。

更に、ハロゲン分析したもののうち、近赤外線分光測定で PVDF と判定されたものでフッ素値が 3.50wt%と多いもの(サンプル(a))と、近赤外線分光測定で fluorine coating と判定されたものでフッ素の含有量が 0.07wt%と少ないもの(サンプル(b))について、どのような違いがあるか秋田県産業技術センターにて走査型電子顕微鏡(Miniscope TM3030Plus,EDX:Quantax70(日立ハイテクロジーズ製))によるバックシート断面の観察を行った。結果を図 2-24、図 2-25 に示す。

走査型電子顕微鏡によるバックシート断面分析では、バックシートの厚さの違いが明確であった。また、赤丸部分のフッ素の質量濃度%は図 2-24 より PVDF は 0.9%、図 2-25 より fluorine coating は 0.7%であった。

表 2-11 ハロゲン・硫黄分析、CHN 元素分析の分析結果(N=45)

No.	製造年 (年)	近赤外線分光測定 (バックシート)	Fの有無 (EPMA) 有/無	XRF分析 (WDS、 裏面照射) (wt%)	ハロゲン分析								硫黄分析		CHN分析						others	計
					F%		Cl%		Br%		I%		S%		C%		H%		N%			
					平均	標準 誤差	平均	標準 誤差	平均	標準 誤差	平均	標準 誤差	平均	標準 誤差	平均	標準 誤差	平均	標準 誤差	平均	標準 誤差		
1	2021	PVDF, PET			n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		50.12	10.04	4.22	0.02	0.16	0.08	45.51	100.00
2	2023	PVDF, PET	-	-	n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		66.75	0.09	6.83	0.08	0.00	0.00	26.42	100.00
3	2014	PVDF, PET, PE	-	-	3.50	0.00	0.04	0.00	n.d.		n.d.		n.d.		59.89	0.06	4.29	0.02	0.00	0.00	32.28	100.00
4	2015	PVDF, PET, PE	○	33.569	2.87	0.03	0.28	0.01	n.d.		n.d.		n.d.		59.68	0.05	4.36	0.01	0.00	0.00	32.81	100.00
5	2017	PVDF, PET, PE	-	-	n.d.		0.07	0.00	n.d.		n.d.		n.d.		60.10	0.06	4.18	0.03	0.00	0.00	35.65	100.00
6	2016	PVDF, PET, PE			3.51	0.04	n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		59.75	0.02	4.27	0.00	0.00	0.00	32.46	100.00
7	-	PVDF, PET, PE			3.00	0.03	0.07	0.01	n.d.		n.d.		n.d.		59.08	0.05	4.31	0.03	0.00	0.00	33.54	100.00
8	-	PVDF, PET, PE			4.78	0.00	n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		58.54	0.05	4.24	0.02	0.00	0.00	32.44	100.00
9	1997	PVF	○	30.344	11.16	0.08	0.08	0.01	n.d.		n.d.		n.d.		18.39	0.04	2.32	0.05	0.26	0.04	67.79	100.00
10	2001	PVF			15.80	0.19	n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		23.24	0.04	2.88	0.01	0.00	0.00	58.09	100.00
11	2014	PVF, PET	○	29.200	2.15	0.01	0.04	0.00	n.d.		n.d.		n.d.		60.12	0.04	4.30	0.05	0.27	0.01	33.12	100.00
12	2015	PVF, PET	-	-	1.53	0.05	0.26	0.02	n.d.		n.d.		n.d.		57.96	0.08	4.24	0.02	0.00	0.00	36.01	100.00
13	2019	PVF, PET			2.95	0.03	0.02	0.00	n.d.		n.d.		n.d.		59.42	0.01	4.41	0.01	0.11	0.05	33.09	100.00
14	2009	PVF, PET, PA	-	-	n.d.		0.05	0.01	n.d.		n.d.		n.d.		71.99	0.10	10.49	0.03	0.13	0.07	17.34	100.00
15	2012	PVF, PET, PA	x	不検出	n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		69.98	1.53	9.12	0.62	0.10	0.05	20.80	100.00
16	2015	PVF, PET, PA	-	-	n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		61.63	1.23	5.20	0.47	0.04	0.04	33.13	100.00
17	2011	PET, EVA, PVF	-	-	n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		62.00	0.09	4.61	0.02	0.24	0.03	33.15	100.00
18	2019	PET, EVA, PVF	-	-	n.d.		0.11	0.01	n.d.		n.d.		n.d.		54.36	0.03	3.73	0.01	0.06	0.06	41.74	100.00
19	2014	PET, fluorine coating	x	11.174	0.05	0.00	0.03	0.00	n.d.		n.d.		n.d.		59.78	0.01	4.42	0.04	0.00	0.00	35.72	100.00
20	2014	PET, fluorine coating	x	11.322	0.09	0.01	0.08	0.01	n.d.		n.d.		n.d.		59.88	0.05	4.35	0.00	0.20	0.01	35.39	100.00
21	2015	PET, fluorine coating	-	-	0.03	0.00	0.13	0.03	n.d.		n.d.		n.d.		69.29	0.78	8.58	0.35	0.00	0.00	21.97	100.00
22	2015	PET, fluorine coating	-	-	0.06	0.02	0.05	0.01	n.d.		n.d.		n.d.		59.31	0.31	4.23	0.04	0.00	0.00	36.35	100.00
23	2015	PET, fluorine coating	-	-	n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		58.99	0.05	4.13	0.02	0.00	0.00	36.88	100.00
24	2021	PET, fluorine coating			0.06	0.00	0.02	0.00	n.d.		n.d.		0.00	0.00	60.54	0.09	4.28	0.01	0.00	0.00	35.11	100.00
25	2023	PET, fluorine coating			0.14	0.00	n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		61.12	0.04	4.33	0.02	0.00	0.00	34.41	100.00
26	2022	PET, fluorine coating			0.03	0.00	0.03	0.00	n.d.		n.d.		n.d.		61.62	0.03	4.23	0.02	0.00	0.00	34.08	100.00
27	-	PET, fluorine coating			n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		56.66	0.07	3.94	0.02	0.00	0.00	39.40	100.00
28	2014	PET, PP, fluorine coating	-	-	0.07	0.02	0.02	0.00	n.d.		n.d.		n.d.		62.67	0.02	4.81	0.06	0.27	0.03	32.16	100.00
29	2013	PET, PE	x	不検出	n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		59.86	0.03	4.35	0.01	0.00	0.00	35.79	100.00
30	2014	PET, PE	-	-	n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		59.32	0.06	4.27	0.01	0.00	0.00	36.41	100.00
31	2014	PET, PE			n.d.		0.01	0.00	n.d.		n.d.		n.d.		59.82	0.19	4.27	0.01	0.10	0.05	35.80	100.00
32	2017	PET, PE	x	不検出	n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		59.62	0.01	4.29	0.02	0.00	0.00	36.09	100.00
33	2015	PET, PE	-	-	n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		65.40	0.08	6.64	0.04	0.00	0.00	27.96	100.00
34	2018	PET, PE	-	-	n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		58.33	0.60	4.43	0.05	0.23	0.04	37.01	100.00
35	2013	PET, PE, EVA			n.d.		0.01	0.00	n.d.		n.d.		n.d.		59.54	0.05	4.22	0.01	0.10	0.05	36.12	100.00
36	2017	PET, PE, EVA			n.d.		0.01	0.00	n.d.		n.d.		n.d.		59.45	0.07	4.18	0.01	0.06	0.06	36.29	100.00
37	2021	PET, PE, EVA			n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		64.22	0.02	5.97	0.01	0.13	0.07	29.69	100.00
38	2019	PET, PE, EVA			4.53	0.04	n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		59.14	0.08	4.27	0.02	0.00	0.00	32.05	100.00
39	2000	Unrecognized Material	○	37.444	31.38	2.09	0.71	0.01	n.d.		n.d.		n.d.		45.05	0.02	5.58	0.03	0.40	0.04	16.88	100.00
40	2006	Unrecognized Material	○	34.795	8.74	0.05	0.15	0.01	n.d.		n.d.		0.01	0.00	58.41	0.02	4.69	0.01	0.26	0.05	27.73	100.00
41	2011	Unrecognized Material	-	-	n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		66.82	0.23	9.15	0.01	0.05	0.05	23.98	100.00
42	2013	Unrecognized Material	○	32.869	3.48	0.02	0.28	0.00	n.d.		n.d.		n.d.		59.21	0.04	4.47	0.01	0.13	0.07	32.43	100.00
43	2014	Unrecognized Material	○	34.896	4.10	0.07	0.10	0.00	n.d.		n.d.		n.d.		60.58	0.04	4.53	0.03	0.14	0.08	30.55	100.00
44	2018	Unrecognized Material			2.96	0.08	0.02	0.00	n.d.		n.d.		n.d.		59.49	0.10	4.44	0.02	0.05	0.05	33.04	100.00
45	2020	Unrecognized Material			3.68	0.06	n.d.		n.d.		n.d.		n.d.		58.67	0.01	4.32	0.02	0.00	0.00	33.34	100.00

2025年度化学分析(17サンプル) XRF分析 バックシート面照射 : WDSタイプの蛍光X線分析装置によるバックシート面の分析値  
 2024年度化学分析(28サンプル) n.d. : not detected(不検出)  
 2025年度EPMA分析サンプル(2サンプル)

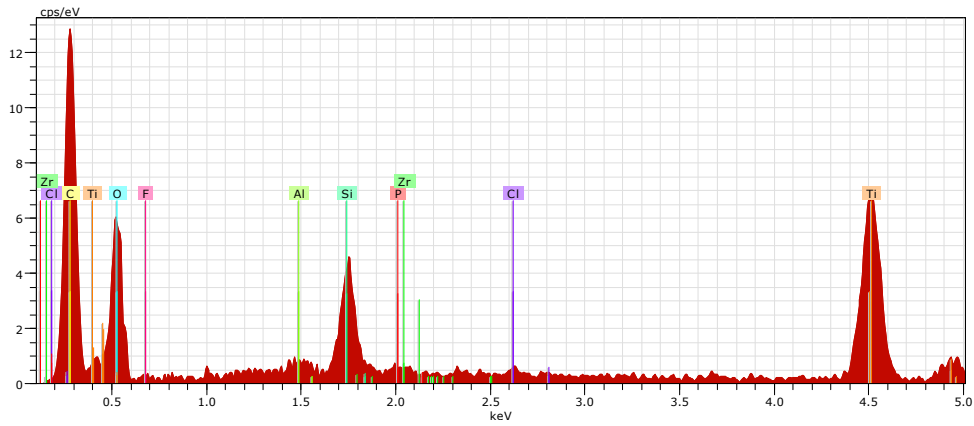
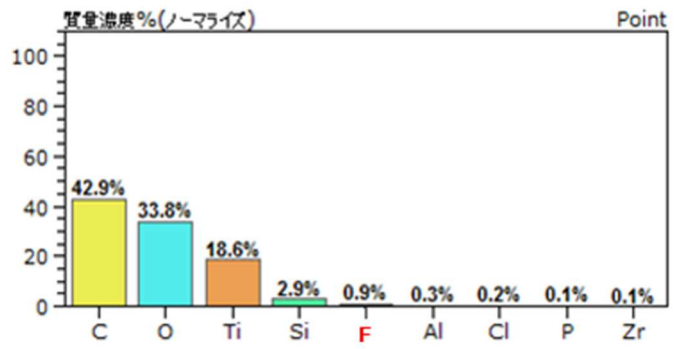
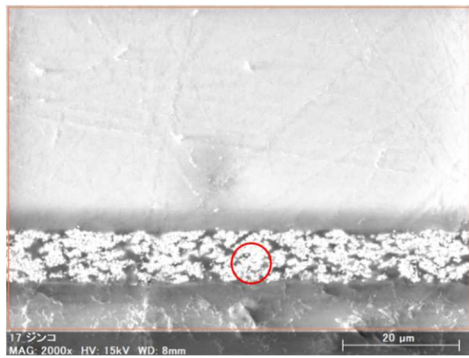


図 2-24 走査型電子顕微鏡によるバックシート断面分析  
 (「近赤外線分光測定で PVDF と判定されたサンプル(a)」の例)

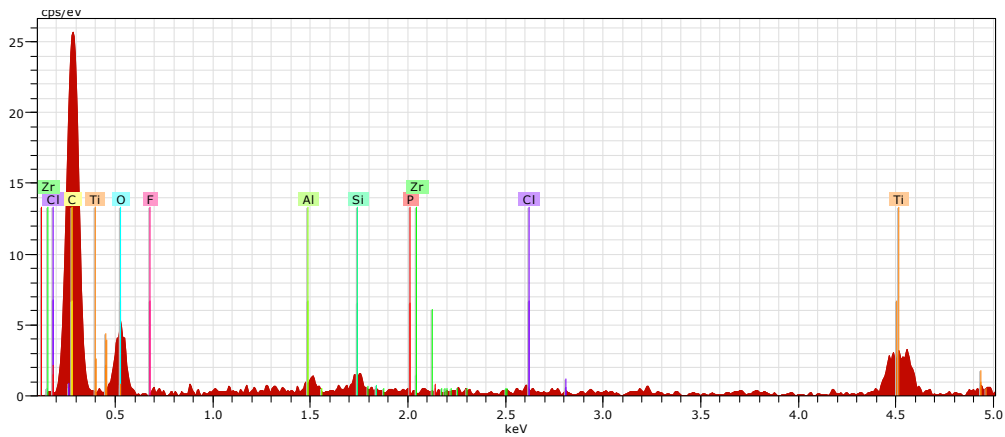
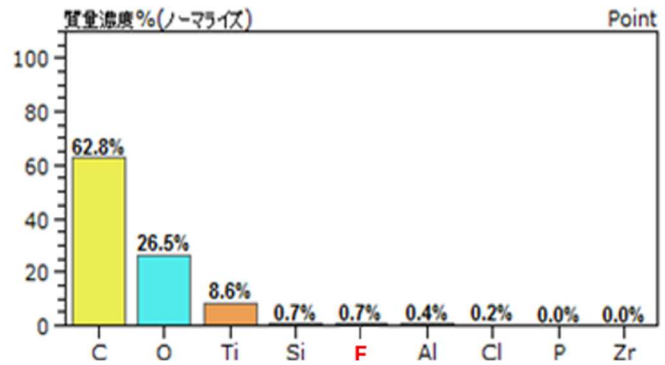
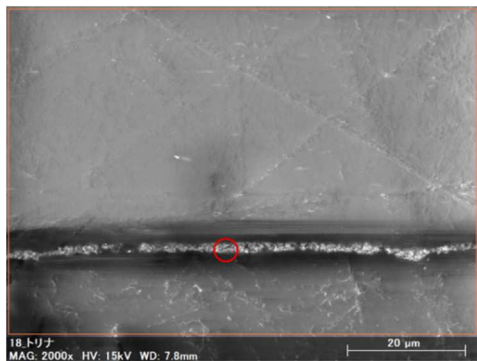


図 2-25 走査型電子顕微鏡によるバックシート断面分析  
 (「近赤外線分光測定で fluorine coating と判定されたサンプル(b)」の例)

### (3) セル上の電極

本年度事業では、31 件のセル/EVA シートのサンプルを対象にして、セル上の電極の計測及び分析を行った。表 2-12 に示すとおり、3 年間の総計で計 133 件のサンプルを対象にして、計測及び分析を行った。なお、計測と分析を行ったいずれのサンプルも、シリコン系であった。

表 2-12 セル上の電極の計測及び分析数

分析実施年	分析数
令和 5 年度	54 件
令和 6 年度	50 件
令和 7 年度(本年度)	29 件
合計	133 件

3 年間の事業を通して、以下の 3 項目について計測・分析を行った。

- 1) セルの大きさの計測
- 2) セル上の電極の数・大きさの計測
- 3) セル上の電極の化学成分の分析

本年度事業は 3 年間の事業の最終年度である。そのため、ここでは、本年度事業で得られた結果を区別せずに、3 年間の事業を通して得られた主な結果をまとめて報告する。

#### 1) セルの大きさの計測

##### a. 計測内容と方法

セルの大きさを計測した。計 133 件のセル/EVA シートのサンプルのうち、セルの大きさが計測可能であったのは 128 サンプルであった。計測にあたっては、インターコネクタ<sup>4</sup>の配線方向をセルの大きさの縦方向、フィンガー線<sup>5</sup>の配線方向をセルの大きさの横方向とした(図 2-26 参照)。

<sup>4</sup> セル間を接続する役割を担う。主に銅線の表面に、接合素材がコーティングされている。

<sup>5</sup> セル上で発電した電気を集電する役割を担う。主に銀から構成される。

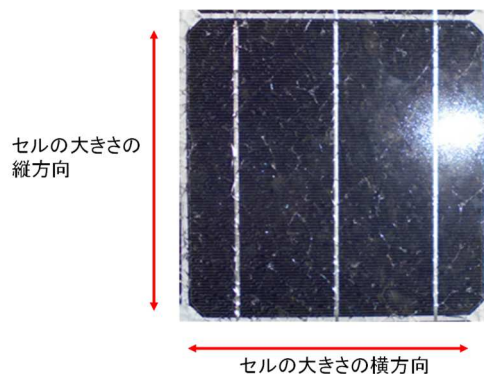


図 2-26 計測の際のセルの縦横の方向

注釈 1) 上図では、垂直方向にインターコネクタが配線されており、水平方向にフィンガー線が配線されている。

## b. 計測結果

計 128 サンプルのセルの大きさは、3つの区分に大別された。ここでは便宜的に3区分をそれぞれ、「125 mmクラス」、「156 mmクラス」、及び「ハーフカットセル」と呼称する。各区分の件数とセルの大きさを表 2-13 に示す。125 mmクラスの区分の大きさは 102×102 mm～126×126 mmの範囲内に収まり、サンプル数は 16 件であった。156 mmクラスの区分の大きさは 150.14×150.14 mm～158.18×158.18 mmの範囲内に収まり、サンプル数は 78 件であった。ハーフカットセルの区分の大きさは 155×66 mm～209.43×107.96 mmの範囲内に収まり、サンプル数は 34 件であった。

表 2-13 区分ごとのサンプル数とセルの大きさ

項目		フルカットセル		ハーフカットセル
		125 mmクラス	156 mmクラス	
サンプル数		16 件	78 件	34 件
横方向の長さ× 縦方向の長さ (セル面積)	最小	102×102 mm (104cm <sup>2</sup> )	150.14×150.14 mm (225cm <sup>2</sup> )	155×66 mm (102cm <sup>2</sup> )
	最大	126×126 mm (159cm <sup>2</sup> )	158.18×158.18 mm (250cm <sup>2</sup> )	209.43×107.96 mm (226cm <sup>2</sup> )

注釈 1) ハーフカットセルの最大サイズは、セル面積が最も大きいサンプルの値を示す

セルの大きさの分布を図 2-27 に示す。125 mmクラスは全体の約 13% (16/128 サンプル) を占めた。125 mmクラスの 8 割以上 (13/16 サンプル) は 1 辺 124.3～126 mmの大きさであった。156 mmクラスは、全体の約 60% (78/128 サンプル) を占めた。156 mmクラスの全てのサンプルが、1 辺 150.14～158.18 mmの狭い範囲内に分布した。全体の約 27% (34/128 件) を占めたハーフカットセルは、長辺 (横方向の長さ) が 155～210.13 mm、短辺 (縦方向の長さ) が 66～107.96 mmと幅広い範囲内に分布し、多様な大きさが確認された。

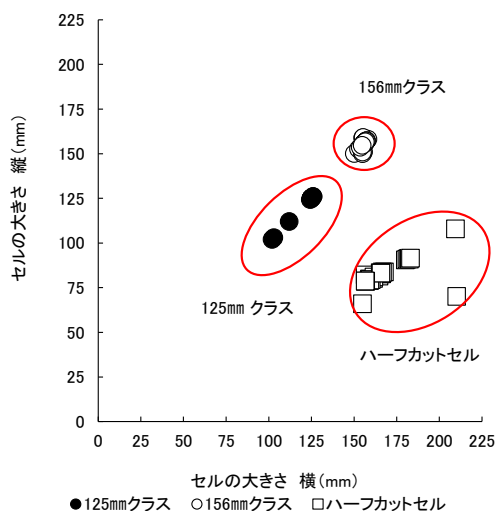


図 2-27 セルの大きさの分布(N=128)

続いて、図 2-28に PV パネルの製造年とセルの大きさの関係を示す。2019 年頃までは125 mm クラス及び 156 mmクラスが主流であり、特に 15 mmクラスは 2012 年以降顕著に増加した。これらフルカットセルの面積に経年的な変化は認められない。一方、2019 年前後からはハーフカットセルが増加し、主流となり、更にハーフカットセルのセルの面積は近年になるほど大きくなる傾向が確認された。

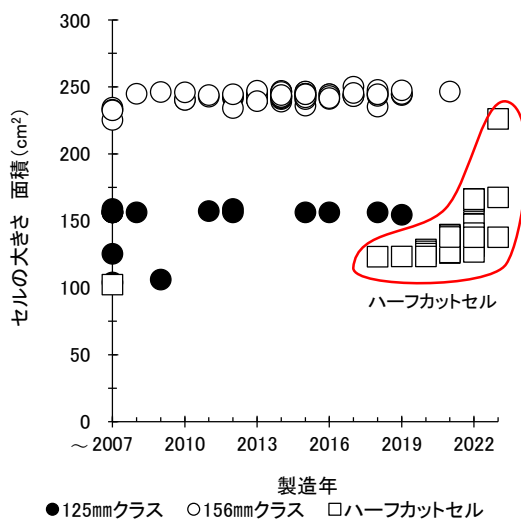


図 2-28 製造年とセルの大きさの関係(N=128)

## 2) セル上の電極の数・大きさの計測

### a. 計測内容と方法

セル上の電極の数・大きさを計測した。セルの大きさを計測した 128 件のセル/EVA シートのサンプルのうち、セルあたりのフィンガー線とインターコネクタを計数可能であったのは124 サンプルであった。

計測にあたっては、フィンガー線とインターコネクタの本数、間隔、長さ、幅、厚さを計数・計測し、そこから断面積と使用量(体積)を推計した。計数・計測及び推計方法を以下に示す。

- 数:目視による計数
- 長さ:ノギスによる計測
- 幅:電子線マイクロアナライザ(EPMA)によるセル/EVA シート断面<sup>6</sup>の計測
- 厚さ:EPMA によるセル/EVA シート断面の計測
- 断面積:幅×厚さ
- 使用量:断面積×長さ

## b. 計測結果

フィンガー線の本数と幅について、PV パネルの製造年との関係を図 2-29 と図 2-30 示す。2007 年以前に製造された太陽光パネルのフィンガー線の本数は平均 55 本/セルであったが、156 mm クラスを中心に継続的な増加が見られ、2019 年頃までに約 1.8 倍となる平均 100 本/セル程度に達した。一方、2019 年以降に主流となったハーフカットセルにはフィンガー線の本数に大幅な増加が認められず、ピーク期のフルカットセルに対し 2/3～3/4 程度に相当する平均 68～76 本/セルで推移している。フィンガー線の幅についてみると、2007 年以前に製造された PV パネルでは平均 0.13 mm 幅であったが、その後、2019 年頃までは 156 mm クラスを中心に細線化が進み、平均 0.03 mm 程度と約 1/4 の幅まで縮小した。しかし、2019 年頃以降は横ばい傾向を示し、ハーフカットセルが主流となった後は、更なる細線化の進展は認められない。近年では、むしろ緩やかな増幅傾向に転じている。

次いで、インターコネクタの本数と幅について、PV パネルの製造年との関係を図 2-31 と図 2-32 に示す。インターコネクタの本数は、フルカットセルが主流であった 2019 年頃までの期間、125 mm クラスでは 2～3 本/セル、156 mm クラスでは 3～6 本/セルで推移し、PV パネル製造年に伴う増減傾向は認められなかった。ハーフカットセルが主流となった 2019 年以降は、インターコネクタの多本数化が進み、2019 年から 2023 年までの 4 年間で平均本数は約 2 倍に増加した。直近では、最大 18 本/セルの PV パネルも確認されており、ハーフカットセルにおけるインターコネクタの多本数化傾向は一層顕著になっている。なお、インターコネクタはセルの縦方向に沿って配置される構造であるため、ハーフカットセルにおいても、フルカットセルと比較してセル単位のインターコネクタ本数が減少することはない。次にインターコネクタの幅についてみると、フルカットセルでは 2015 年頃まで概ね 1～2mm 幅で増減無く推移し、大きな変化は認められなかった。しかしながら、2016 年以降は減幅が急速に進み、この傾向はセルの大きさの主流がハーフカットセルに移行した後も継続した。2023 年には平均 0.3 mm に至ったが、更なる細線化の進展は認められない。

---

<sup>6</sup> セル/EVA シートからそれぞれフィンガー線とインターコネクタの断面を切り出し、その後エポキシ樹脂で固めて、直径 25mm の分析用サンプルに成型して、フィンガー線とインターコネクタの断面を作成した。

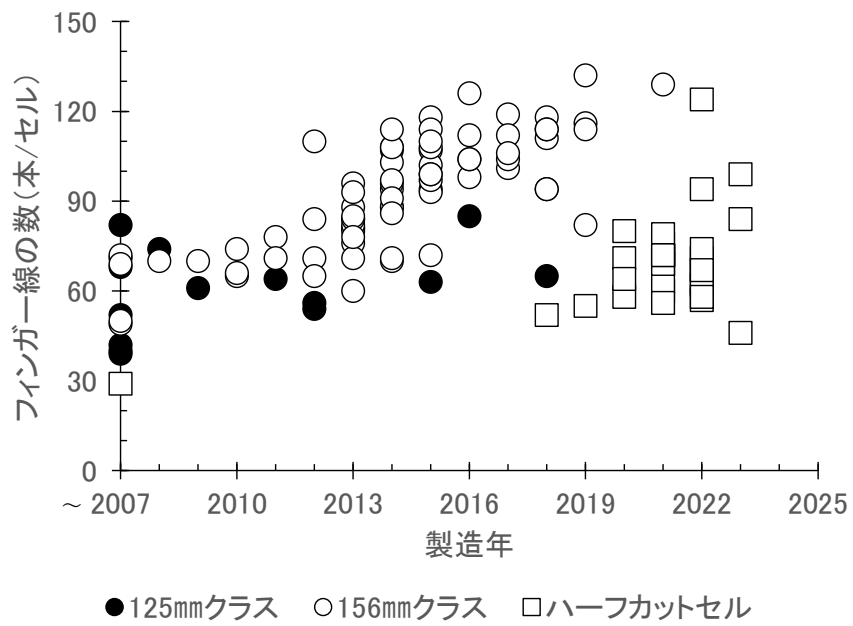


図 2-29 製造年とフィンガー線の数(本/セル)の関係(N=124)

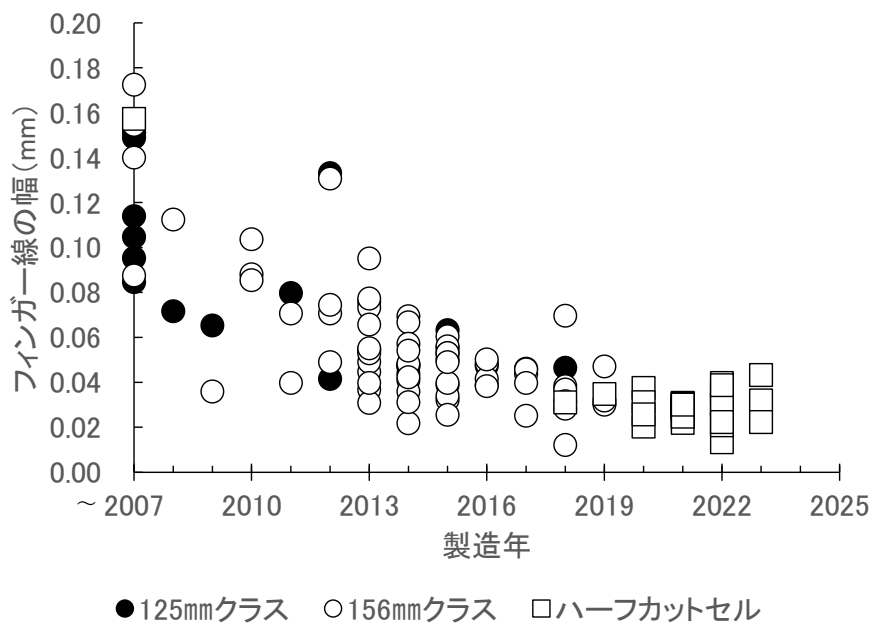


図 2-30 製造年とフィンガー線の幅(mm)の関係(N=123)

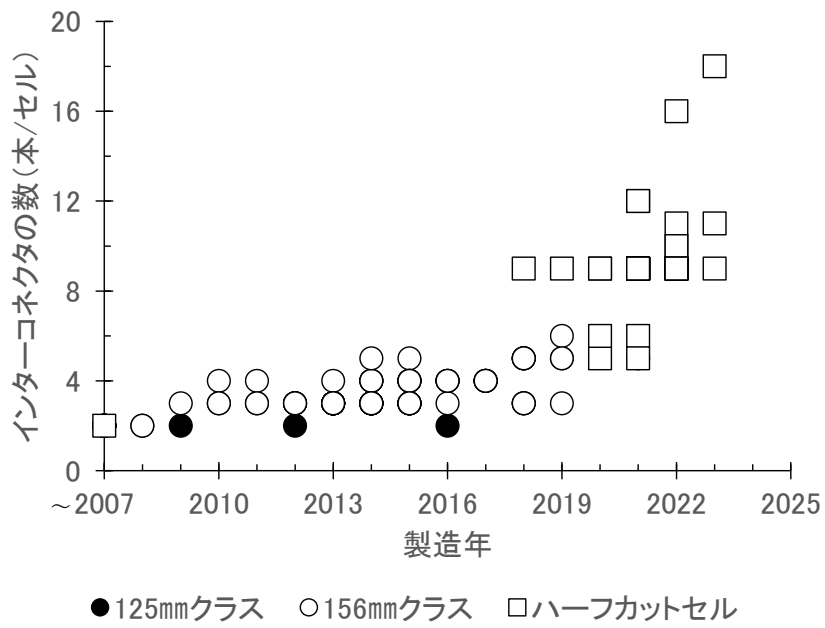


図 2-31 製造年とインターコネクタの数の関係(N=124)

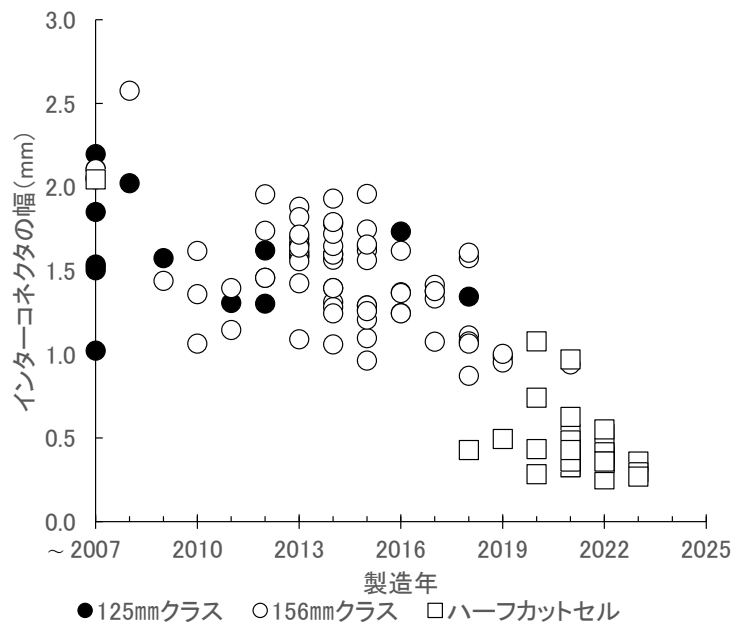


図 2-32 製造年とインターコネクタの幅の関係(N=123)

### 3) セル上の電極の化学成分の分析

#### a. 分析内容と方法

令和 5 年度事業、令和 6 年度事業、及び本年度事業では、計 133 サンプルのセル/EVA シートを対象に、セルを構成するインターコネクタの断面を EPMA で分析することで、インターコネクタの接合素材の成分を分析した。

加えて、令和 6 年度事業では、31 サンプルのセル上の電極に含まれる銀、銅、及び鉛について、化学分析による定量評価を実施した。具体的には、PV パネルから 1 セル分のセル/EVA シートを切り出し（1 セル分のセル/EVA シートを切り出した後の外観は図 2-33 を参照）、試料全量を焼却した。焼却後に得られた残渣を全量粉碎し、分析用サンプルとした。銅と鉛については、酸添加等の前処理を行った上で、ICP 発光分光分析 (ICP-OES) により含有量を測定した。銀については、乾式試金法を用いて定量を行った。これらの分析により、1 セル当たりの銀、銅、及び鉛の含有量に関する実測値を得た。本年度事業では、令和 6 年度事業で得られた結果に依拠して、経済的価値が鉛に比べて高い銀と銅に着目し、データの整理を行った。

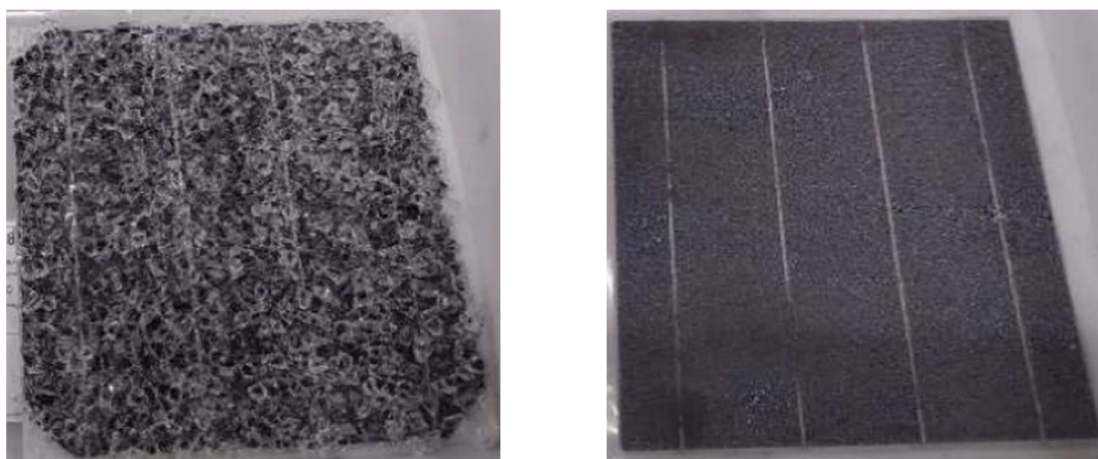


図 2-33 令和 6 年度事業で化学分析に供した 1 セル分のセル/EVA シートの外観

注釈 1)セル/EVA シートに付着するガラスの量は、サンプルにより異なる。サンプルによっては、上の左図のセル/EVA シートのように、上の右図のものに比べて、多くのガラスが付着しているものがある。サンプルによりガラスの付着量が異なる理由は、PV パネルからセル/EVA シートのサンプルを採取するための技術がサンプルの採取先ごとに異なるためである。

#### b. 分析結果

計 135 件のサンプルのうち、インターコネクタの接合素材の成分に鉛を確認できたのは 113 サンプル、鉛を確認できなかったのは 20 サンプルであった(表 2-14 参照)。鉛を確認できなかった 20 サンプルについて、インターコネクタの接合素材の成分としては、銀、スズ、銅、ビスマスが確認された。

表 2-14 EPMA でのインターコネクタの接合素材の成分の分析結果

分析実施年	鉛を検出	鉛を未検出	計
令和 5 年度	43 サンプル	11 サンプル	54 サンプル
令和 6 年度	43 サンプル	7 サンプル	50 サンプル
令和 7 年度(本年度)	27 サンプル	2 サンプル	29 サンプル
合計	113 サンプル	20 サンプル	133 サンプル

次いで、経済的価値が鉛に比べて高い銀と銅に着目し、データの整理を行った。令和 6 年度事業で分析した計 31 サンプルについて、PV パネルの製造年と 1 セルに含まれる銀と銅の重量の関係を図 2-34 と図 2-35 に示す。

銀についてみると、2011 年製の 125 mmクラスのサンプルでは 1 セル中の銀の含有量が 570mg であり、他のサンプルに比べて顕著に銀の含有量が多かった。EPMA の分析によると、当サンプルは、インターコネクタの接合素材に鉛ではなく、銀が使用されていた。そのため、他のサンプルに比べて銀の含有量が顕著に多いと考えられた。参考として、当サンプルのインターコネクタの断面を図 2-36 に、インターコネクタの接合素材の分析結果を図 2-37 に示す。

156 mmクラスのサンプルでは、2013 年から 2018 年にかけて、銀の含有量の顕著な増減傾向は見られなかった。ここで、図 2-29 と図 2-30 によると、156 mmクラスでは 1 セル中のフィンガー線の本数が経年的に増加する一方で、フィンガー線の幅が経年的に縮小していた。フィンガー線の本数増加による銀量増加とフィンガー線の幅の縮小による銀量減少が相殺した結果、図 2-34 に示すとおり、2013 年から 2018 年にかけて銀含有量の増減の傾向が見られなかったのではないかと考えた。ハーフカットセルについては、1 セル中の銀の含有量は 24~72mg/kg であり、156 mmクラスに比べて、銀含有量が低かった。

既往知見<sup>7</sup>によると、2009 年から 2023 年にかけて、1 セル中の銀の含有量は減少傾向にあるとされている(当既往知見によると、2009 年の 1 セル中の銀の含有量は 400mg、2023 年の 1 セル中の銀の含有量は 50~100mg とされている)。本事業でも、2013~2018 年までの 156 mmクラスを除けば、1 セル中の銀の含有量の減少傾向は観察された。本事業終了後、更に分析データが得られれば、2013~2018 年までの 156 mmクラスでの銀の含有量の減少傾向を捉えることができる可能性はある。

銅についてみると、銀と同じように、156 mmクラスのサンプルでは、2013 年から 2018 年にかけて、銅の含有量の顕著な増減傾向は見られなかった。124 サンプルの製造年とインターコネクタの幅の関係を示した図 2-31 と図 2-32 によると、156 mmクラスのインターコネクタの本数は 2013 年から 2018 年にかけて増減傾向が見られなかった一方で、2016 年以降は細線化の傾向が見られた。化学分析を行った計 31 サンプルからは、2013 年から 2018 年にかけて銅含有量の顕著な減少は見られなかった。本事業終了後、更に分析データが得られれば、2016 年以降の銅含有量の減少傾向を捉えることができる可能性はある。ハーフカットセルについては、1 セル中の銅の含有量は 220~1,200mg/kg であり、156 mmクラスに比べて、銅含有量が総じて低かった。

<sup>7</sup>「International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2019 Results Eleventh Edition, April 2020」の Fig 89 の「Review ITRPV predictions Silver amount per cell」を参照した。

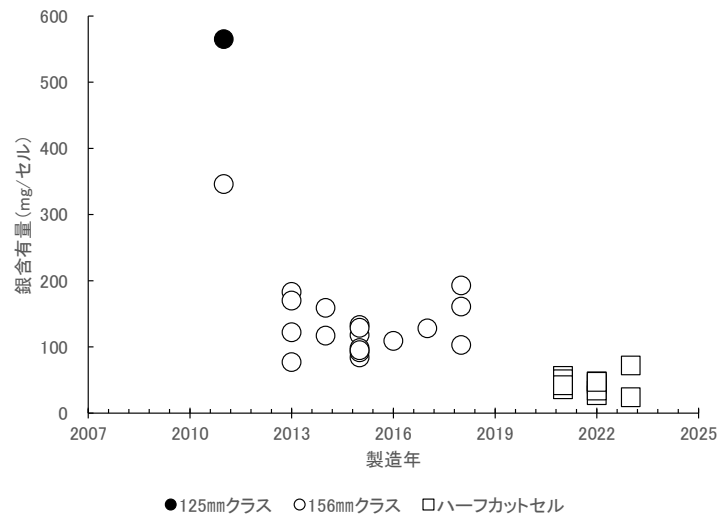


図 2-34 製造年と1セルに含まれる銀の含有量の関係(N=31)

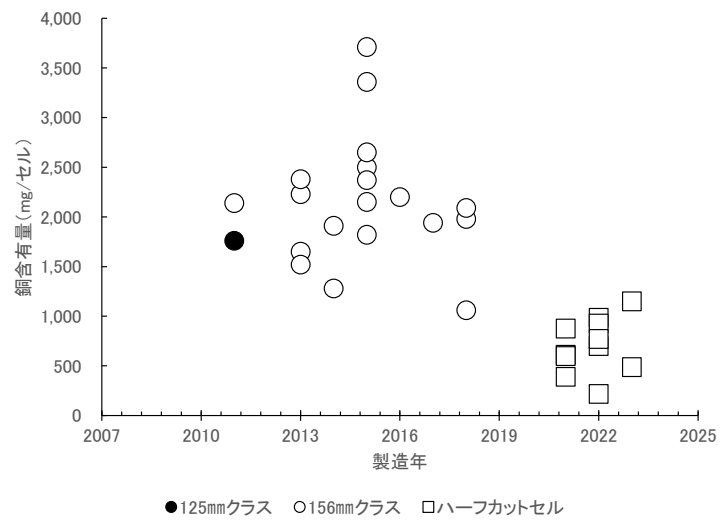


図 2-35 製造年と1セルに含まれる銅の含有量の関係(N=31)

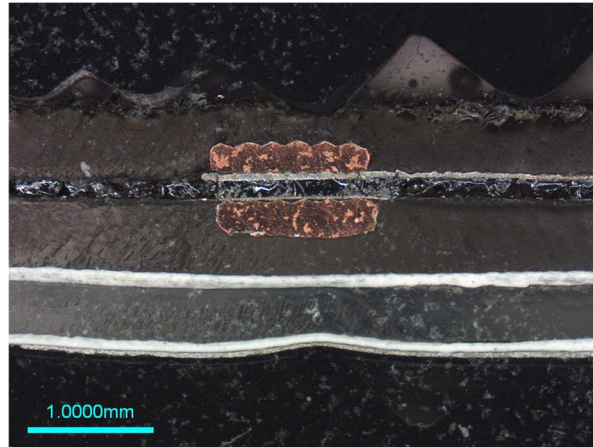


図 2-36 1セル中の銀の含有量が他に比べて顕著に多いサンプルのインターコネクタの断面

注釈 1) 上図で茶色(銅の色)の素材がインターコネクタ。2つのインターコネクタに挟まれている素材が結晶シリコン。2つのインターコネクタは共に樹脂で封止されている。

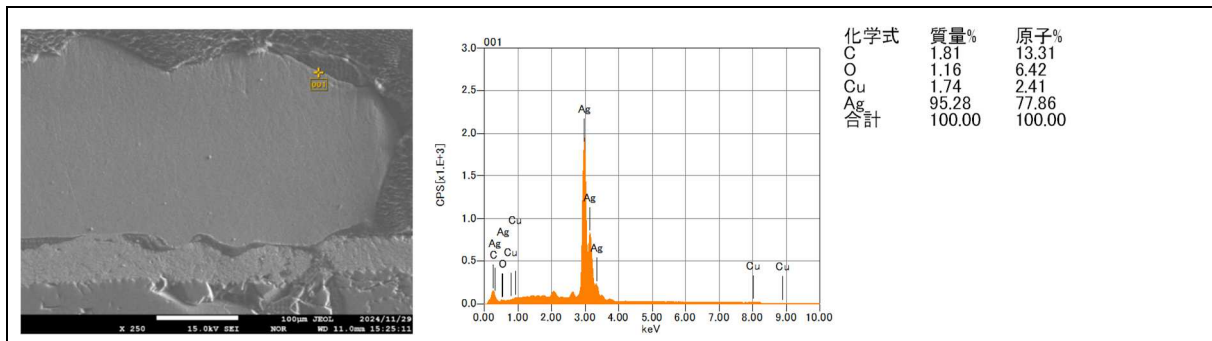


図 2-37 1セル中の銀の含有量が他に比べて顕著に多いサンプルのインターコネクタの接合素材の成分分析結果

注釈 1) 左図の黄色の「+」で示している点の成分分析をした結果が、右図で示されている。銀が 95.28%を占めるとの結果が得られた。

ここまでの銀と銅に関するデータ整理から、以下の示唆が得られたと考える。

- 政策の視点

- 近年、循環経済構築やサプライチェーン再構築(経済安全保障)の観点から、銀と銅を含む鉱物資源の確保が政策の論点となってきた。政策の意思決定にあたっては、たとえ仮定や推計の要素が入ったとしても、定量的に議論をすることが重要である。例えば、既往知見<sup>8</sup>では、「仮に、2030 年後半に 200 千トン/年の PV パネルが廃棄物として発生し、PV パネル中には銀が 8g/枚、銅が 150g/枚含まれると仮定し、PV パネル全量が処分されたとすると、2030 年後半には、90 トン/年の銀、1,800 トン/年の銅が回収されずに廃棄されることになる」と議論がされていた。本事業の結果を踏まえると、1 枚の PV パネルが 156 mmクラスの 60 セルから構成され、その PV パネルの製造年が 2015 年と仮定すると、PV パネル中には銀 6

<sup>8</sup> 環境省委託事業の「令和 3 年度脱炭素型金属リサイクルシステムの早期社会実装化に向けた実証事業(太陽光パネルの収集・リユースおよび非鉄金属の回収に係る技術実証) 委託業務」の成果報告書

～9g/枚(平均値:6.6g/枚)(図 2-34 から 2015 年の 156 mmクラスの 1 セル中の銀の含有量を 100～150mg と読み取る場合)、銅 120～210g/枚(平均値:160g/枚)(図 2-35 から 2015 年の 156 mmクラスの 1 セル中の銅の含有量を 2,000～3,500mg と読み取る場合)が含まれていると推計できる。本事業の結果を用いると、これまでの議論から一歩進めて、推計に幅を持たした形での議論が可能になると想定される。

#### ● 事業の視点

- PV パネルには有価物である銀と銅が含まれている。そのためリサイクル処理を通して銀と銅を技術的に可能な範囲で回収することで、リサイクル処理の経済性が向上するのではないかと、いう論点は、これまで事業者間での議論の焦点の一つであったと考える。特に、PV パネルの大量導入が始まった 2013～2015 年頃の PV パネル中の銀と銅の含有量と、近年に製造された PV パネル中の銀と銅の含有量の差異については、参照すべき有用な基礎データが限定的だったのではないかと考える。
- 近年主流となったハーフカットセルの場合、1 枚の PV パネルのセル数は 144 セルである場合がある。1 枚が 144 セルから構成されるハーフカットセルの場合、1 枚の PV パネル中の銀の含有量は 3～10g(平均値:6.3g/枚)(ハーフカットセルの 1 セル中の銀の含有量を図 2-34 から 24～72mg/kg と読み取る場合)、1 枚の PV パネル中の銅の含有量は 32～170g(平均値:100g/枚)(ハーフカットセルの 1 セル中の銅の含有量を図 2-35 から 220～1,200mg/kg と読み取る場合)と推計される。結果、1 枚の PV パネルという視点で見た場合は、仮に平均値で比較すると、1 枚が 144 セルから構成されるハーフカットセルの PV パネルの銀及び銅の含有量は、2015 年製の 156 mmクラスの 60 セルから構成される PV パネルに比べて、それぞれ 0.95 倍及び 0.63 倍である、という議論も展開可能と考える。今後、PV パネルのリサイクル処理において、リサイクル処理の経済性向上の観点から銀と銅の回収が事業者間で論点になった場合、本事業の結果は一つの基礎資料として参照され得るのではないかと考える。

## 2.2 ステークホルダー間での情報連携に関する検証

使用済 PV パネルの適切なリユース・リサイクルを実現するためには、PV パネルのトレーサビリティ情報や有害物質に関する情報等を適切に管理することが不可欠である。

令和 6 年度は、二次元バーコードの劣化状況を継続的に確認すると共に、加速劣化試験を実施し、その耐久性を検証した。また、リユース事業者及び再資源化事業者等が、二次元バーコードを通じて使用済 PV パネルの情報にアクセスする仕組みの有効性を確認するため、実際に廃棄された PV パネルに二次元バーコードを貼付し、現場での保管・管理を想定したフィールド試験を実施した。

本年度は、令和 6 年度 of 取組を継続し、二次元バーコードの劣化状況をモニタリングすることによる耐久性の確認に加え、作業性及び経済性を含めた総合的な評価を行った。

更に、令和 6 年度に検討した、リユース事業者が当該二次元バーコードを通じて使用済 PV パネルの情報にアクセスする仕組みに、長期使用可能性を予測するための試験(以下「余寿命判定」と言う。)を組み込んだ業務フローを作成し、PVCJ のルート施設において当該フローが実運用可能であるかを検証した。

## 2.2.1 PV パネルに貼付するバーコードの実用性に係る検証について

実際に営業運転中の太陽光発電所における劣化影響を検証するため、令和5年度より、表2-15に示す東北電力所有の太陽光発電所3か所において実証試験を開始した。

具体的には、各発電所において約5か所ずつ、PVパネルの側面及び裏面に二次元バーコードラベルを貼付し、継続的に状態のモニタリングを実施した。

表 2-15 太陽光発電所一覧

発電所名	鱒ヶ沢太陽光発電所	石巻雄勝太陽光発電所	白石太陽光発電所
発電所所在地	青森県西津軽郡	宮城県石巻市	宮城県白石市
出力(※系統連系容量)	421.2kW	500kW	1,000kW
特徴	積雪量が多く、風も強い場所	海に近いので塩害の影響を受ける場所	内陸部のため比較的穏やかな気候の場所
モニタリング開始日	令和6年2月1日	令和6年2月2日	令和6年2月2日



図 2-38 各太陽光発電所(左から、鱒ヶ沢太陽光発電所、石巻雄勝太陽光発電所、白石太陽光発電所)

貼り付けた二次元バーコードは3種類である。

- ① ケミスト汎用 (参考)耐久年数:2年未満  
長期保存が可能な銘板向け汎用的な基材にオーバーラミネートを施した仕様
- ② ケミスト汎用+UVラミネート (参考)耐久年数:10年以上  
ケミスト汎用ラベルの上から、UV吸収ラミネートを貼り付けることで、対候性を強化した基材
- ③ ウルトラベル・ネオ (参考)耐久年数:10年  
ラミネート不要な高耐久のラベルであり、屋外銘板ラベル向けの基材

22か月間にわたり経過観測を実施した結果、ケミスト汎用ラベルについては、白石太陽光発電所の日照条件下に貼付した二次元バーコードラベルにおいて、文字がほぼ判読不能となる劣化が確認された。

一方、鱒ヶ沢太陽光発電所及び石巻雄勝太陽光発電所に貼付した同ラベルについては、文字の退色は一部認められたものの、二次元バーコードとしての読取性は維持されている状態であった。白石太陽光発電所は、前記2地点と比較して気象条件が比較的穏やかな立地であるにもかかわらず、最も劣化が進行していた。この要因については、積雪や塩害といった一般的な環境要因に加え、国道近接立地の発電所において想定される融雪剤の飛散や粉じん等による擦過作用が、二次元バーコード表面の劣化を助長した可能性が考えられる。

一方、ケミスト汎用+UVラミネートを施した二次元バーコード及びウルトラベル・ネオについては、い

ずれの設置箇所においても顕著な劣化は認められず、22 か月間のモニタリング結果から、両者は同等の耐久性能を有すると評価された。

**白石太陽光発電所【日向】耐久試験結果**

ラベル素材	2024年2月	2024年10月	2025年10月
ケミスト汎用			
ケミスト汎用 + UVラミネート			
ウルトラベルネオ			

図 2-39 白石太陽光発電所の耐久試験結果

耐久性の検証に加え、二次元バーコードを PV パネルに貼付する際の作業時間(作業性)及び 3 種類の二次元バーコードのコスト(経済性)について検証を行った。

まず作業時間については、ケミスト汎用ラベルを PV パネルに貼付する作業時間を測定した。その結果、貼付に要する時間は約 3 秒であった。ウルトラベル・ネオについても、ケミスト汎用ラベルと同程度の作業時間であり、約 3 秒で貼付可能であることが確認された。一方、ケミスト汎用+UV ラミネートについては、ケミスト汎用ラベルの上に UV ラミネートを位置ずれなく貼付する必要があり、より慎重な作業が求められる。このため、作業時間は約 9 秒と、他の 2 種類と比較して約 3 倍を要する結果となった。

コストについては、発注枚数や仕様条件等により単価が変動するため、明確な金額を示すことは困難である。このため、本検討ではメーカーの承諾を得た上で、ケミスト汎用ラベルを基準(1)とした相対的なコスト比率により比較を行った。その結果、ケミスト汎用+UV ラミネートはケミスト汎用の約 17 倍、ウルトラベル・ネオは約 11 倍のコスト水準となった。

本事業では、二次元バーコードにおいて最も重要な要件を耐久性と位置付け、耐久性 6 点、作業性及び経済性を各 2 点とする、計 10 点満点の評価基準を設定した。その結果、ケミスト汎用は 4 点、ケミスト汎用+UV ラミネートは 6 点、ウルトラベル・ネオは 9 点となった。これらの結果を踏まえると、本事業の範囲においては、耐久性、作業性及び経済性を総合的に考慮した場合、ウルトラベル・ネオは実運用における有力な選択肢の一つであると考えられる。

表 2-16 耐久性・作業性・経済性の総合評価結果

### 総合評価結果

ラベル種類	耐久性 (評点6)	作業性 (評点2)	経済性 (評点2)	総合評価
ケミスト汎用	×	○ (ケミストの 貼付時間を1とする)	○ (ケミスト汎用の 価格を1とする)	× (4点)
ケミスト汎用 + UVラミネート	○	× (3倍)	× (17倍)	△ (6点)
ウルトラベルネオ	○	○ (1倍)	△ (10倍)	○ (9点)

## 2.2.2 PV パネルの余寿命判定を含む業務フローの検証

二次元バーコードを PV パネルに貼付した上で、「集約拠点における検査・保管・管理」等が正確かつ効率的に実施可能であるかを検証することを目的として、PVCJ 認定施設において、実際に搬入された PV パネルを対象としたフィールド試験を実施した。

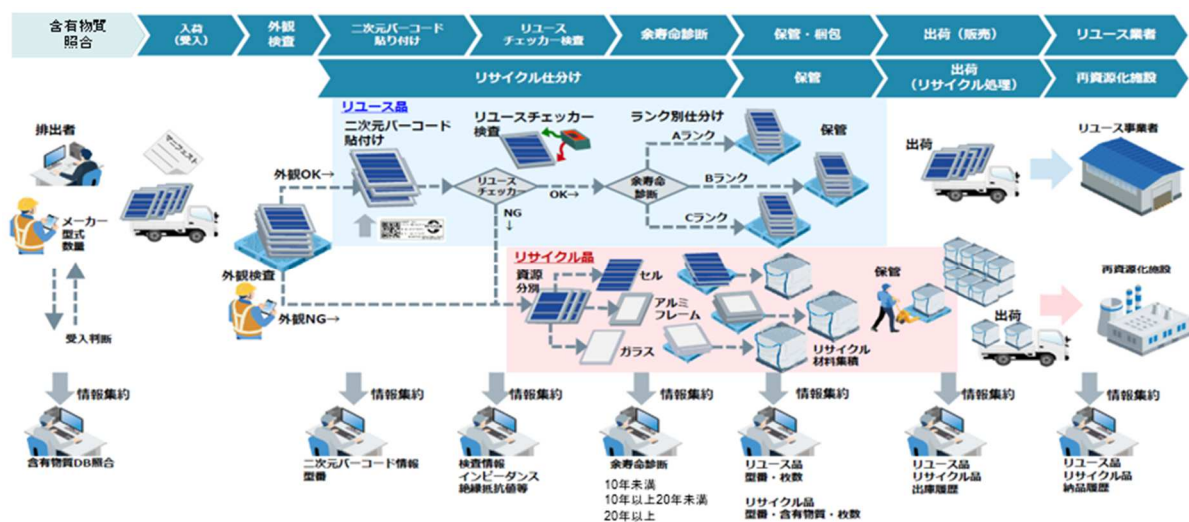
保管及び管理に関する基本的な検証については令和 6 年度に実施していることから、本年度は、余寿命判定を含む業務フロー全体が正確に実行可能であるかに重点を置いて検証を行った。

その結果、PVCJ 認定施設内における当該業務フローの運用については、特段の支障は認められず、実運用上問題が無いことが確認された。

なお、計測時間については、余寿命判定に使用した計測装置が試作段階であるため参考値ではあるが、PV パネル 1 枚当たりの測定に要する時間は、現状では約 5 分程度であった。

また、測定方法については現時点では専門的な知識を要することから、今後の実用化に向けては、一般の作業員でも使用可能な簡易な測定方法であり、かつ短時間で計測可能な仕組みとすることが望ましいと考えられる。





資料作成協力：株式会社サトー、イラストの著作権は株式会社サトーまたは元データ提供のアドビ株式会社に帰属

図 2-40 PV パネルの余寿命判定を含む業務フロー

### 2.2.3 余寿命判定結果の活用に関するステークホルダーのニーズについて

リユース PV パネルの活用にあたっては、当該パネルが今後どの程度の期間使用可能であるかを把握することが、発電事業者による導入判断や適切な運用・保守計画の策定において重要な要素となる。そのため、リユース PV パネルの長期使用可能性を客観的かつ定量的に評価する手法の確立が求められている。

本事業では、PV パネルの長期使用及びリユースの意思決定を促進することを目的として、PV パネルの長期使用可能性を定量的に評価・予測するモデルを構築した。併せて、本モデルを実装した余寿命判定用の試作機を用い、実際にリユース PV 発電所の構築を予定する事業者に対して余寿命判定を実施し、得られた試験データを提供した。

具体的には、リユース PV 発電所で使用予定の PV パネル 311 枚のうち 16 枚を対象として余寿命判定を実施した。その結果、10 年以上の使用が可能と診断されたパネルが 10 枚、10 年未満の使用が可能と診断されたパネルが 4 枚、ならびに故障が確認されたパネルが 2 枚であった。

これらの診断結果について、発電事業者からは、リユース PV 発電所の構築にあたってのパネル選別や、今後の運用・保守計画の検討に資する有益な情報であるとの評価を得た。本事業を通じて、余寿命判定がリユース PV パネルの活用促進及び長期安定運用に寄与する可能性が示唆された。

### 2.2.4 まとめ

以上の結果から、二次元バーコードを起点とした情報管理・共有の仕組みは、使用済 PV パネルの発生から集約、リユース、再資源化に至る各段階において、ステークホルダー間の情報連携を円滑に行う上で有効であることが、本事業の範囲において確認された。

本事業を通じて、PV パネルのトレーサビリティ確保及び情報の可視化が、リユース・リサイクルの高度化や関係者の意思決定の支援に寄与する可能性が示唆された。

### 3. 使用済 PV パネルの長期使用に関する判断基準の不足等への対応

---

PV パネルの長期使用やリユースの意思決定促進に向け、その長期使用可能性を定量的に評価や予測するモデルの確立を目的として実施した。

具体的には、過年度事業において実施したテーブル試験用 PV セルの加速劣化試験結果の解析により、CCP 測定及び低照度 I-V 測定結果を用いた劣化予測モデルを検討し、使用済 PV パネルの劣化を把握するための基礎的知見を整理した。更に、実際の使用済 PV パネルを対象とした加速劣化試験及び、低照度 I-V 測定や DC オフセット CCP 測定結果の解析を通じて、実運用を見据えた総合的に評価可能な長期使用可能性予測モデル、更には使用済 PV パネルの余寿命判定をより簡便な方法で検査するアルゴリズムを構築した。

加えて、実事業者が保有する使用済 PV パネルを用いた検証を行い、本事業で構築した長期使用可能性予測結果の妥当性及び実用上の有用性を確認した。本章では、これらの検討内容を通じて、PV パネルの長期使用に関する判断基準の不足という課題に対する技術的対応について整理する。

#### 3.1 使用済 PV パネルの長期使用可能性を予測するモデルの確立

##### 3.1.1 過年度のテーブル試験結果の解析

本年度は、過年度で実施した加速劣化試験から得られた各種データについて、過年度に引き続き経年劣化に関する解析を実施した。

保管による劣化度合いの評価を目的に、過年度に加速劣化試験を施したテーブル試験用 PV セルについて、加速劣化試験終了時点から約 1 年経過後の交流インピーダンス CCP 測定を行った。なお、令和 6 年度までに耐候性試験を実施及び結果報告した PV セルについては、東北大学で分解して樹脂の分析を行ったため、令和 6 年度中に耐候性試験を実施した別の PV セルで評価した。

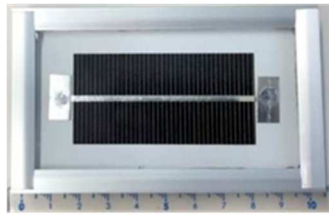
また、劣化予測モデルの構築を目的に、過年度の低照度 I-V 測定データの解析を行った。

##### (1) テーブル試験用 PV セル

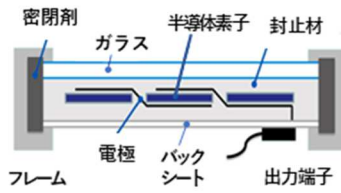
テーブル試験用の試料には、東北大学提供の単結晶シリコン PV セルを用いた(図 3-1)。大きさは 100×60×16 mm である<sup>9</sup>。以降、過年度に加速劣化試験を施したテーブル試験用 PV セルを「PV セル」と言う。

---

<sup>9</sup> 柳澤匠, 小林大樹, 熊谷将吾, 伊勢和幸, 高山健太郎, 齋藤優子, 白鳥寿一, 吉岡敏明, 「紫外線促進耐候性試験による太陽電池封止材の劣化解析」, 第 28 回高分子分析討論会 III-23, 2023 年 11 月 9 日-10 日



(a)外観



(b)断面構造の概念図

**メーカー提供性能値**

最大出力 $P_{max}$	300 mW
短絡電流 $I_{sc}$	650 mA
最大出力動作電流 $I_{pm}$	600 mA
開放電圧 $V_{oc}$	600 mV
最大出力動作電圧 $V_{pm}$	500 mV

(c)諸元

図 3-1 PV セルの外観と断面構造の概念図及び諸元

**(2) 経年劣化に関する解析**

PV セルの経年劣化に関する解析を目的に、加速劣化試験終了時点から約 1 年が経過した PV セルの CCP 測定を行った。更に、過年度に実施した低照度 I-V 測定結果を用いて、劣化予測モデルの検討を行った。

**1) 交流インピーダンス(CCP)測定**

**a. 測定方法**

CCP は、図 3-2 (a)に示すように周波数を変えた時のインピーダンス変化を複素平面上に描いた図で、電気化学的には CCP、電気回路的にはナイキスト線図と呼ばれている。この CCP から PV セルの等価回路を作成した例を図 3-2 (b)に示す。一般的に、 $R_s$  を純抵抗、 $R_{sh}$  を電荷移動抵抗、 $C$  を電気二重層と呼ぶ。 $R_s$  は直列抵抗とも呼ばれ、金属電極の電気抵抗、半導体素子の電気抵抗及び金属と半導体素子の接触抵抗等に起因する。 $R_{sh}$  は並列抵抗やシャント抵抗とも呼ばれ、ダイオードの p-n 接合を貫くピンホールや金属析出物、太陽電池セルの端部における反転層等に起因し、p 型 c-シリコン PV セルにおいては、PID 現象によって形成された欠陥が  $R_{sh}$  低下の原因になる場合がある。等価回路においては、 $R_{sh} \gg R_s$  の関係にある。 $C$  はダイオードの p-n 接合部分に生じる静電容量で、p 層(正孔が多く存在)と n 層(自由電子が多く存在)の間にある空乏層(絶縁体)との接合部分に生じ、接合容量あるいは端子間容量とも呼ばれる。

CCP 測定は図 3-3 に示すシステムで行った。

本年度は、表 3-1 に示す加速劣化試験品について、令和 6 年度の加速劣化試験終了時点から約 1 年経過後に CCP 測定を行い、時間経過による  $R_{sh}$  の変化を観察した。なお、保管条件については、加速劣化試験で端子状態がオープンの場合に  $R_{sh}$  の変化が大きい傾向にあったことや、保管中の PV セルの電荷の影響も踏まえ、温度や湿度を制御していない室温にて暗所に端子ショート状態で保管を行った。

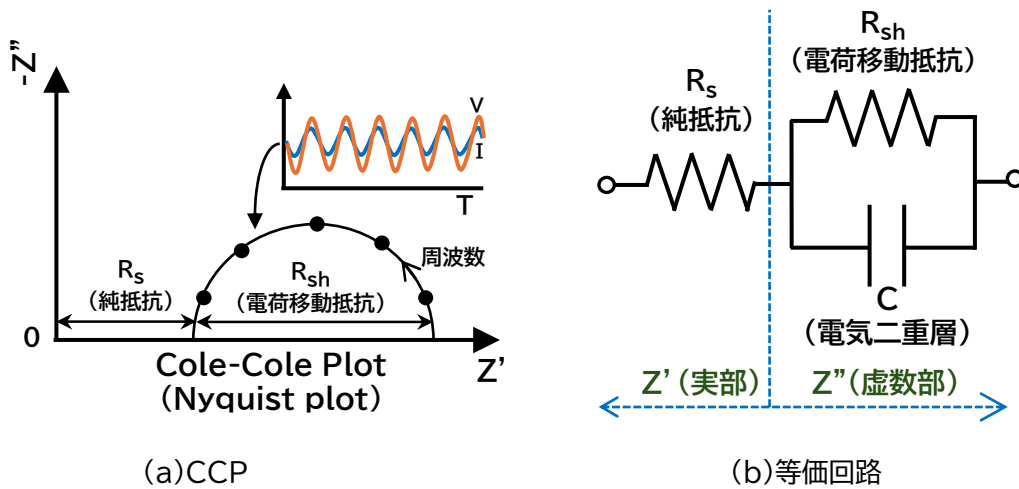
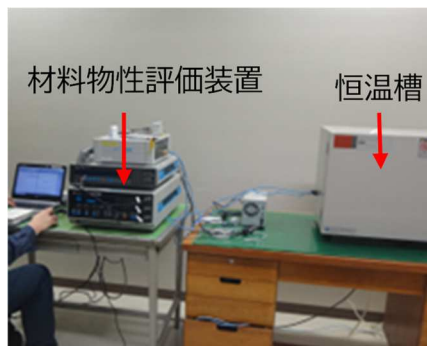


図 3-2 CCP と等価回路の例



装置: 材料物性評価装置  
(株)東陽テクニカ製  
1260-MAS(ソーラトロン)

測定条件  
印加電圧 0.02 V(交流)  
周波数範囲 1 Hz~1 MHz  
測定環境 遮光(非発電)  
25°C(恒温槽)

図 3-3 CCP 測定システムの概要

表 3-1 PV セルに施した加速劣化試験と CCP 測定試料

加速劣化試験	試験の目的と試験条件
耐候性試験	<p>目的: 紫外線照射と結露をサイクルで行い、紫外線と水分の影響を調査</p> <p>条件: 紫外線照射時: 紫外線強 150mW/cm<sup>2</sup>、温度 +85°C、相対湿度 70% RH</p> <p>結露時: 相対湿度 100%RH、温度の設定無し(制御不可)</p> <p>時間: 紫外線照射 10 hr と結露 5 hr を交互に繰り返し</p> <p>紫外線照射直前には 30 秒間の純水シャワーを施す</p> <p>個数: 12 個(過年度に報告した試料とは別の試料)</p> <p>端子状態: オープン 1,000hr 6 個、ショート 1,000hr 6 個</p>
恒温恒湿試験	<p>目的: 熱及び水分で劣化を促進させ、屋外使用環境を模擬した影響を調査</p> <p>条件: JIS C 61215-2:2020 4.13 を基にした条件</p> <p>温度 +85°C、湿度 85%RH</p> <p>個数: 5 個</p> <p>端子状態: オープン 4,000hr 3 個、ショート 3,000hr 2 個</p>
冷熱衝撃試験	<p>目的: 熱膨張係数の異なる材料の接合部分に高温と低温の温度変化を急激に与え、膨張・収縮時にかかる応力によるクラックや破壊の影響を調査</p> <p>条件: 高温 +85°C 保持 0.5hr ↔ 低温 -40°C 保持 0.5hr、遷移時間を含め 1hr/cycle</p>

	個数:6 個 端子状態:オープン 2,000cycle 4 個、ショート 2,000cycle 2 個
温度サイクル試験	目的:緩やかな温度変化を繰り返し、クラック等の不具合発生の影響を調査 条件:JIS C 61215-2:2020 4.11 を基にした条件 高温+85℃ 保持 1hr ↔ 低温-40℃保持 1hr、 遷移時間を含め 5hr/cycle 個数:6 個 端子状態:オープン 800cycle 3 個、ショート 600cycle 2 個 通電 800cycle 1 個
塩水噴霧試験	目的:塩水(塩害)の影響を調査 条件:IEC60068-2-52(試験方法 3) 個数:8 個 端子状態:オープン/受光面から噴霧 2 個 オープン/ バックシート側)から噴霧 2 個 ショート/受光面から噴霧 2 個 ショート/ バックシート側)から噴霧 2 個 <div style="text-align: center;"> <p>試験サイクル</p> </div>
振動試験	目的:輸送過程で受ける垂直振動に対する耐振性を評価 条件:JISZ0232:2020 包装貨物-振動試験 連続 90min を 3 回 個数と端子状態:4 個(ショート) <div style="text-align: center;"> <p>加速度パワースペクトル密度プロファイル</p> </div>

## b. 結果と考察

図 3-4 に、加速劣化試験直後と 1 年経過後の  $R_{sh}$  の変化を示す。横軸には、令和 6 年度の加速劣化試験後に測定した  $R_{sh}$  を劣化試験前の  $R_{sh0}$  で除した値を示している。令和 6 年度に報告のとおり、耐候性試験と恒温恒湿試験で  $R_{sh}$  の低下が顕著になっていることが分かる。一方、縦軸は、加速劣化試験終了時点から約 1 年経過後に測定した  $R_{sh}$  を  $R_{sh0}$  で除した値を示している。加速劣化試験時の端子状態がオープンかショートかによらず令和 6 年度の試験直後から  $R_{sh}$  が低下していることが分かる。耐候性試験を実施したことによる PV セル内部の劣化が、保管による  $R_{sh}$  の低下、すなわち、PV セルの性能劣化を誘因したと考えられる。

同図には、加速劣化試験を施さずに 1 年間保管した PV セル 10 個の結果も併せて示す。加速劣化試験を行っていないことから横軸は 1 としてプロットされているが、その変化にはばらつきがあることが分かる。

図 3-5 に、加速劣化試験を施さずに 1 年間保管した PV セル 10 個の  $R_{sh}$  の  $R_{sh0}$  依存性を示す。

令和 6 年度に報告のとおり、 $R_{sh0}$  が大きいほど  $R_{sh}$  の低下が大きく、また、 $R_{sh0}$  が小さい PV セルでは  $R_{sh}$  の微増も確認できた。過年度に、加速劣化試験初期に  $R_{sh}$  が微増する現象が見られており、この  $R_{sh}$  の微増も劣化の一部と考えることができる。

以上のことから、屋内の室温保管においても、1 年の時間経過によって PV セルの劣化が進行した可能性があることを示していると考ええる。

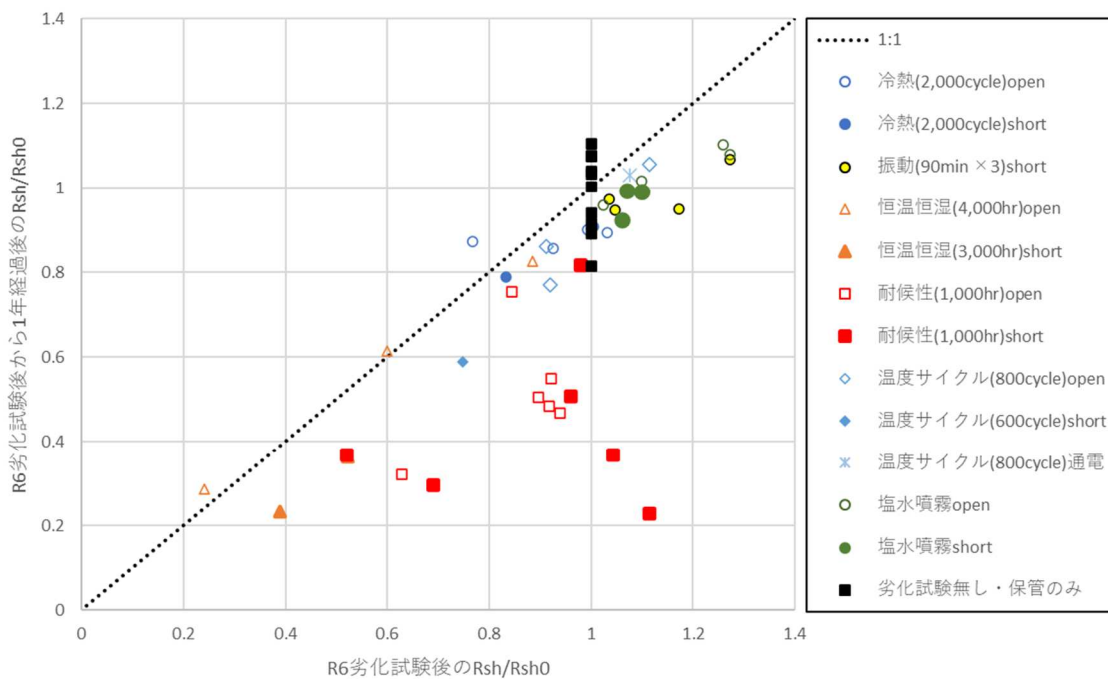


図 3-4 加速劣化試験直後と 1 年経過後の PV セルの  $R_{sh}$  の変化

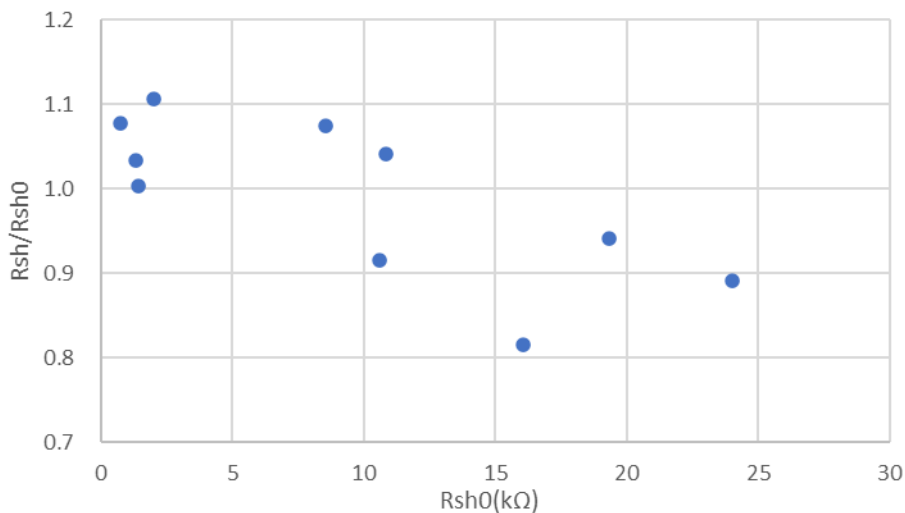


図 3-5 加速劣化試験を施さずに 1 年間保管した PV セルの  $R_{sh}$

## 2) 低照度 I-V 測定結果を用いた劣化予測モデルの検討

実際の PV パネルの劣化予測モデルの確立を複雑にしている要因の一つに、仕様による各種構成材料と電気的特性の変化の関係が明確ではないことが挙げられる。

そこで、本年度は、各種加速劣化試験を実施したテーブル試験用 PV セルの過年度の低照度 I-V 測定結果を用いて劣化予測モデルの検討を行った。

### a. 劣化予測モデルの検討方法

はじめに、典型的な I-V 特性の曲線を図 3-6 に示す。I-V 測定から得られる最大電力  $P_{\max}$  や開放電圧  $V_{oc}$ 、短絡電流  $I_{sc}$  等の特性値は、PV セルや PV パネルの仕様(サイズや構成等)によって大きく異なる場合も多く、その数値を統一的に用いて使用済 PV パネルの劣化を予測するのは難しい。しかしながら、それらの特性値の中で唯一、曲線因子  $FF$  は無次元数であるため、PV セルや PV パネルの仕様が異なる場合でも、統一的に取り扱える可能性があると考えた。そこで、曲線因子  $FF$  に着目して PV セルの低照度 I-V 測定の結果から劣化予測モデルを考察した。

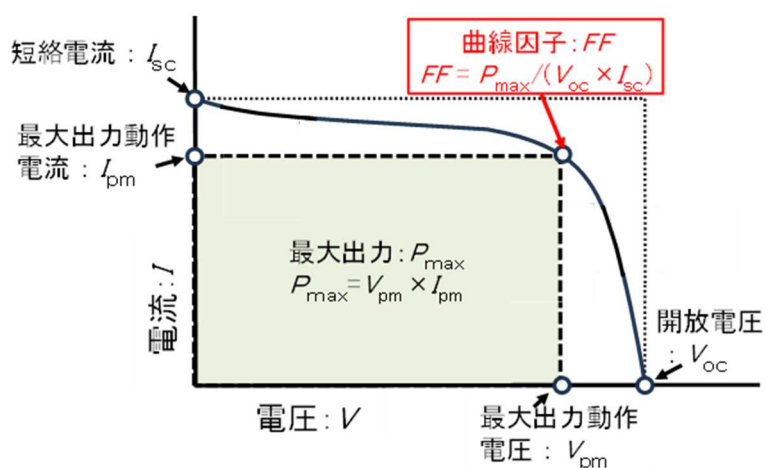


図 3-6 典型的な I-V 特性の例

本事業の PV セルの低照度 I-V 測定では、照度  $I_L$  を数 10 lux から数万 lux とその値を 3 桁ほど変化させて測定した。過年度に実施した各種加速劣化試験の結果を基に、この特定の照度範囲における PV セルの照度  $I_L$  と曲線因子  $FF$  との関係を模式的に図 3-7 に示す。

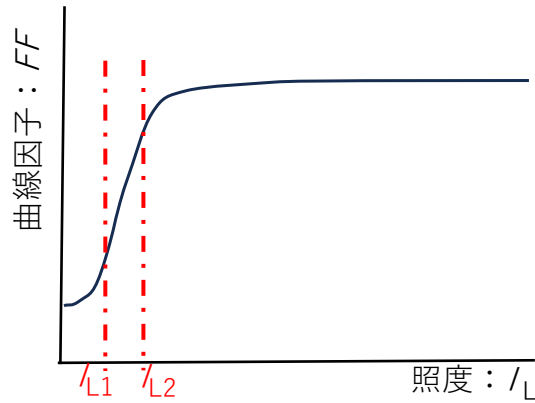


図 3-7 曲線因子  $FF$  の照度  $I_L$  依存性(モデル図)

曲線因子  $FF$  が照度  $I_L$  に対してほぼ線形的に変化する照度の範囲が存在している。この特定の照度範囲  $I_{L1}$  と  $I_{L2}$  (ただし、 $I_{L1} < I_{L2}$ ) 間における I-V 曲線の線形近似式は式(1)で表すことができる。

$$(\text{曲線因子: } FF) = (\text{近似式の傾き: } \alpha) \times (\text{照度: } I_L) + (\text{縦軸 } FF \text{ での切片: } FF_0) \dots\dots (1)$$

令和 6 年度に各種加速劣化試験を実施した PV セルにおける低照度 I-V 曲線の多くは、この特定の照度範囲  $I_{L1}$  と  $I_{L2}$  間で、劣化の程度(加速劣化試験時間)の増大 ①→②→③ に伴い、図 3-8 のような変化を示した。

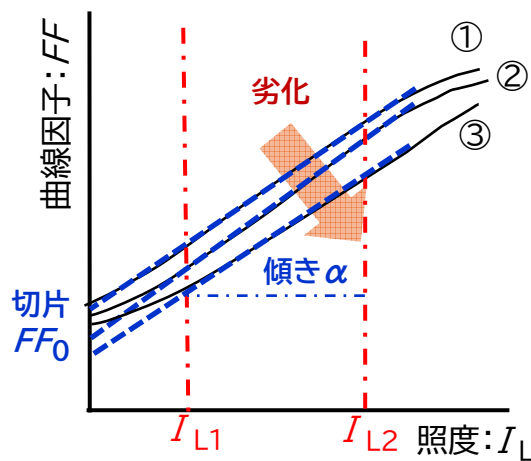


図 3-8 劣化の程度(劣化試験時間)の増大に伴う曲線因子  $FF$  の照度  $I_L$  依存性(モデル図)

ここでの劣化の状態①、②、③と、線形近似式の傾き $\alpha$ と切片 $FF_0$ との間に次のような関係が認められる。

- ① 劣化前～劣化初期 : 傾き $\alpha$ は比較的小さいが、切片 $FF_0$ は比較的大きい
- ② 劣化初期～劣化中盤 : 傾き $\alpha$ は大きくなり、切片 $FF_0$ は若干小さくなる
- ③ 劣化中盤～劣化後期 : 傾き $\alpha$ は小さくなり、切片 $FF_0$ は更に小さくなる

上記の劣化の程度の推移①→②→③に伴う傾き $\alpha$ と切片 $FF_0$ の変化には、表 3-2 のような大小関係が成り立ち、かつ、図 3-9 のような軌跡をとると推測できる。

表 3-2 曲線因子 $FF$ の照度 $I_L$ 依存性における線形近似式の傾き $\alpha$ と切片 $FF_0$ の関係

	傾き: $\alpha$	切片: $FF_0$
① 劣化前～初期	小～中	大
② 劣化初期～中盤	大	中
③ 劣化中盤～後期	小	小

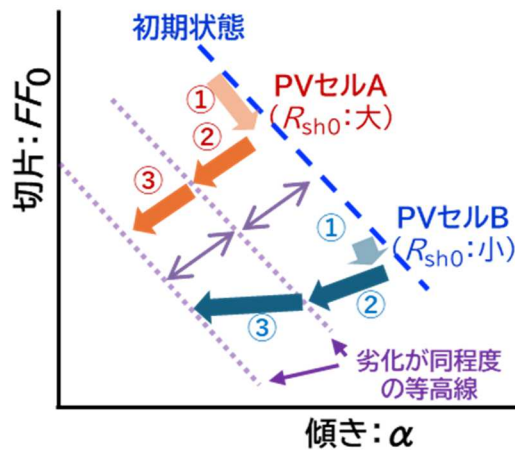


図 3-9 曲線因子 $FF$ の照度 $I_L$ 依存性における線形近似式の傾き $\alpha$ と切片 $FF_0$ の関係(モデル図)

なお図 3-9 には、電荷移動抵抗 $R_{sh0}$ の大小による軌跡の違いも示している。 $R_{sh0}$ の大小に関わらず劣化の程度の進行に伴い同じような軌跡を描くものの、同図内のPVセルAのように $R_{sh0}$ が大きい場合には全体的に左上にあり、①の範囲が広い。一方、PVセルBのように $R_{sh0}$ が小さい場合には全体的に右下の領域で軌跡を描く傾向があり、①の領域は狭い、もしくは、存在しない場合がある。即ち、 $R_{sh0}$ が小さい場合には、加速劣化試験前の時点で既に劣化している可能性が考えられる。

また、このモデルから加速劣化試験前の初期状態、即ち、PV セル初期の劣化の程度が同じ領域は、①劣化前～初期の箇所を結ぶ右下がりの青の点線のように推測できる。また、加速劣化試験で劣化が同程度の点同士を結んだ等高線(紫の点線)は、初期状態(青の点線)とほぼ平行となる。これらの初期状態と等高線を用いることで、劣化予測モデルが提案・構築できると考えられる。

## b. 各種加速劣化試験前後の測定結果を用いた劣化予測モデル

過年度の各種加速劣化試験の結果では、耐候性試験を施したPVセルで最も劣化の程度が大きく変化した。そこで、耐候性試験の結果を検量線として用いることで、劣化の程度を求める劣化予測モデルを検討した。

耐候性試験を施したPVセルの測定結果を用い、図 3-9 におけるPVセルの初期状態となる初期寿命を  $P_{L0}$  と、耐候性試験における 10 年相当の劣化の程度となる等高線の間隔を  $S_t = 10$  年として、傾き  $\alpha$  と切片  $FF_0$  の関係を求めた結果を図 3-10 に示す。図中の塗りつぶしの赤丸は耐候性試験時に端子がオープン、白抜きの青丸は端子がショートの結果で、PVセルごとの軌跡を示している。加速劣化試験時間の増加(劣化の進行)と共に図 3-9 と同じような軌跡を描いていることを確認できた。

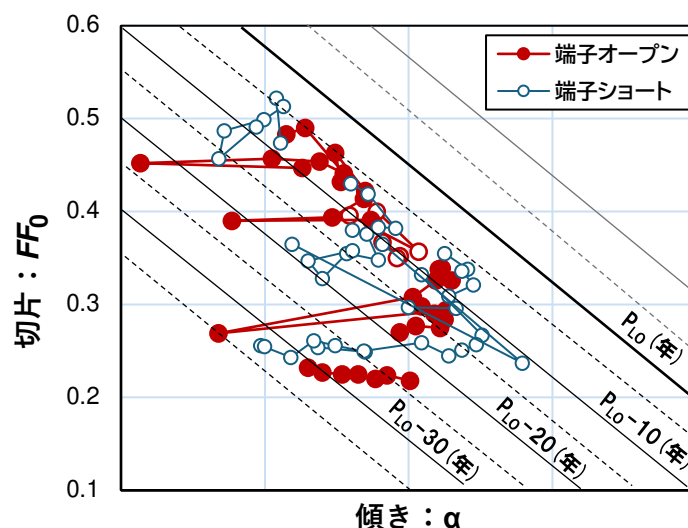


図 3-10 耐候性試験を行ったPVセルの曲線因子  $FF$  の照度  $I_L$  依存性における線形近似式の傾き  $\alpha$  と切片  $FF_0$  の関係

過年度に実施した耐候性試験以外の3つの加速劣化試験の低照度 I-V 測定の結果についても同様に、恒温恒湿試験は図 3-11、温度サイクル試験は図 3-12、冷熱衝撃試験は図 3-13 にそれぞれ示す。いずれも、提案した劣化予測モデルとほぼ同じような軌跡を示している。

ここで、切片  $FF_0$  の値が大きい場合には、図 3-9 で PV セル A の①のように等高線に平行な挙動を示し、劣化の程度は小さいと言える。一方、切片  $FF_0$  が小さい場合には、図 3-9 で PV セル B の②もしくは③のように複数の等高線を横断する挙動を示し、劣化の程度が進行していると言える。このことは、PVセルの  $R_{sh0}$  が小さい場合には、劣化が進行しやすいことを示唆していると考えられる。

以上から、耐候性試験の結果を検量線として用いることで、劣化の程度を求める劣化予測モデルを提案することができた。

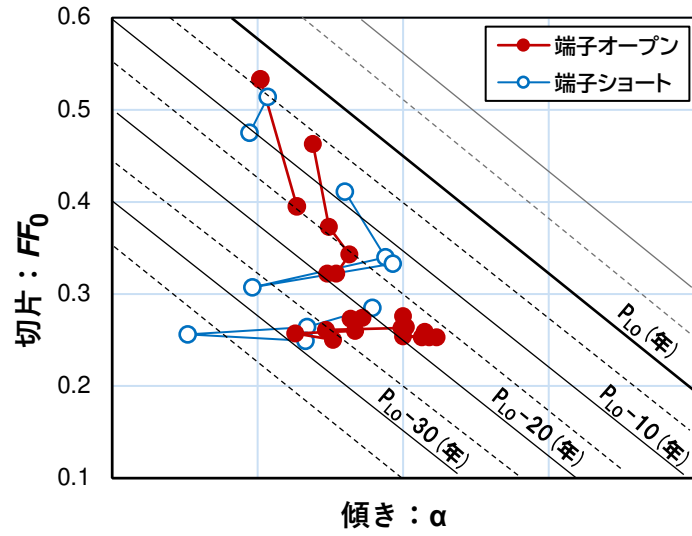


図 3-11 恒温恒湿試験を行った PV セルの曲線因子  $FF$  の照度  $I_L$  依存性における線形近似式の傾き  $\alpha$  と切片  $FF_0$  の関係

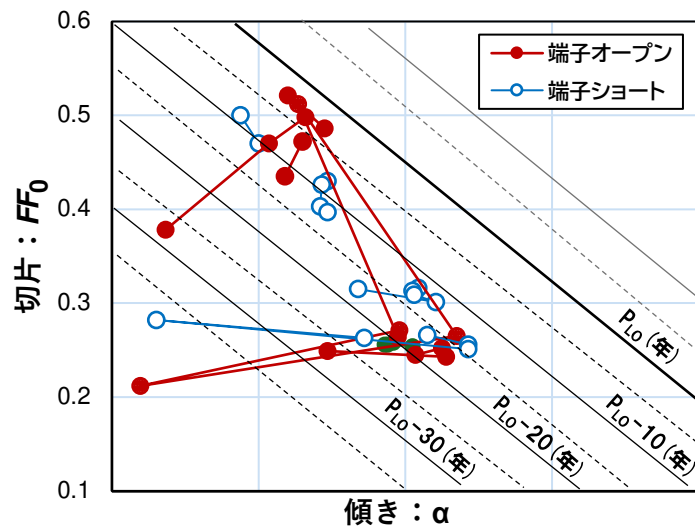


図 3-12 温度サイクル試験を行った PV セルの曲線因子  $FF$  の照度  $I_L$  依存性における線形近似式の傾き  $\alpha$  と切片  $FF_0$  の関係

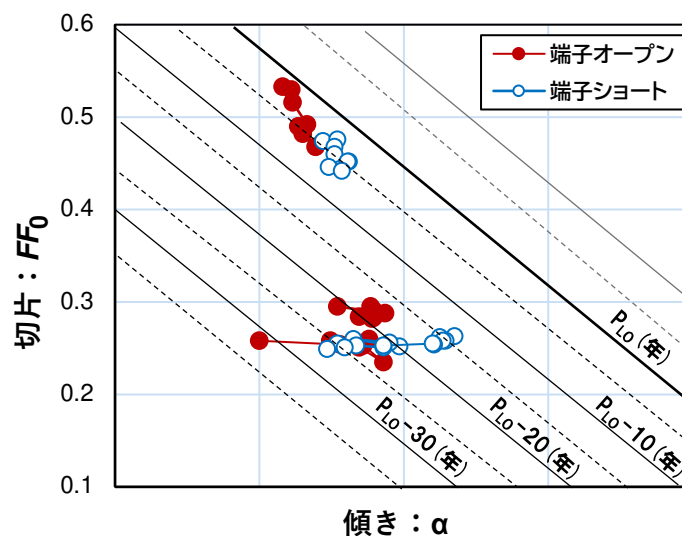


図 3-13 冷熱衝撃試験を行った PV セルの曲線因子  $FF$  の照度  $I_L$  依存性における線形近似式の傾き  $\alpha$  と切片  $FF_0$  の関係

### c. 低照度 I-V 測定による余寿命の定式化

前節では、各種加速劣化試験を行った PV セルの低照度 I-V 測定結果の考察を進めることで、劣化予測モデルを提案することができた。本節では、PV セルの低照度 I-V 測定を行った時点での結果から、直接的に PV セルの余寿命  $P_L$  (年) を求める定式化についての検討を行った。ここで、余寿命は、測定時点での使用可能性を予測した年数である。

加速劣化試験を行った PV セルの低照度 I-V 測定結果を用いた余寿命の定式化に際し、余寿命は変数に対して線形と仮定した。これにより、式を単純化してその妥当性を検証しやすくした。また、耐候性試験の結果より求めた等高線の間隔  $S_t$  は、初期寿命  $P_{L0}$  の線に対して平行、かつ、等間隔であるものと仮定して図 3-9 を補足・修正すると図 3-14 のようになる。図 3-14 に示す各パラメータを設定することで、低照度 I-V 測定を行った時点での線形近似式の傾き“ $\alpha$ ”と、縦軸  $FF$  での切片“ $FF_0$ ”の 2 つの変数を用いる一次線形式(2)から余寿命  $P_L$  を推測することができる。

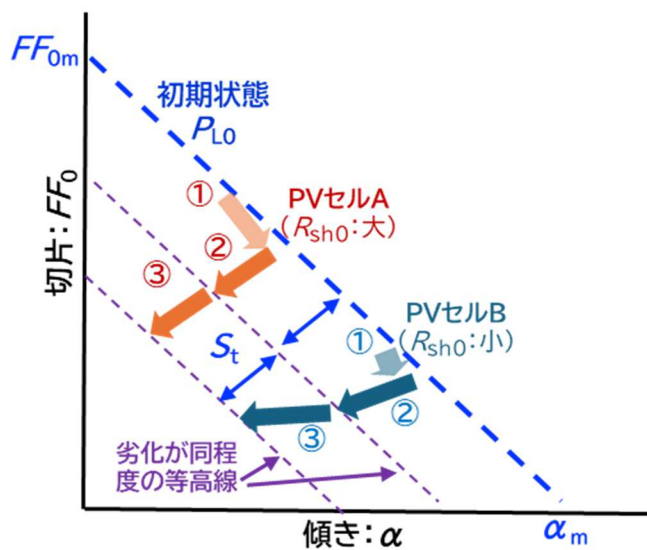


図 3-14 線形近似式の傾き $\alpha$ と切片 $FF_0$ の関係における余寿命を求める式に必要な項目(モデル図)

$$\begin{aligned}
 P_L (\text{年}) &= a \times \{P_{L0} + 10 \times f(\alpha, FF_0)\} + b (\text{年}) \\
 &= a \times [P_{L0} + 10 \times \{(FF_{0m} / \alpha_m) \times \alpha + FF_0 - FF_{0m}\} \times S_t] + b (\text{年}) \dots\dots (2)
 \end{aligned}$$

ここで、 $f(\alpha, FF_0)$  : 劣化の程度を表す2つの変数 $\alpha$ と $FF_0$ の関数

$P_{L0}$  : PVセルの初期寿命

$FF_{0m}$  : 初期寿命 $P_{L0}$ を示す線と縦軸との交点での $FF_0$ の値

$\alpha_m$  : 初期寿命 $P_{L0}$ を示す線と横軸との交点での $\alpha$ の値

$S_t$  : 耐候性試験結果から求めた等高線の間隔

$a$  及び  $b$  : 任意の補正係数及び補正定数

なお、今回の検討において、耐候性試験の結果から定量性のある検量線を反映済みであるため、任意の補正係数 $a$ 及び補正定数 $b$ はそれぞれ1及び0とし、余寿命 $P_L$ を求める式は、式(2)よりも単純化した式(3)で表すことができる。

$$P_L (\text{年}) = P_{L0} + 10 \times \{ (FF_{0m} / \alpha_m) \times \alpha + FF_0 - FF_{0m} \} \times S_t (\text{年}) \quad \dots\dots (3)$$

ここで、 $P_{L0}$  : PVセルの初期寿命

$FF_{0m}$  : 初期寿命  $P_{L0}$  を示す線と縦軸との交点での  $FF_0$  の値

$\alpha_m$  : 初期寿命  $P_{L0}$  を示す線と横軸との交点での  $\alpha$  の値

$S_t$  : 耐候性試験結果から求めた等高線の間隔

このように、過年度で実施した低照度 I-V 測定の結果を用いることで、PVセルの余寿命を推測する式を定義することができた。

#### d. 劣化予測モデルから推測される余寿命と電荷移動抵抗 $R_{sh}$ 及び純抵抗 $R_s$ との関係

過年度の CCP 測定結果より、加速劣化試験時間の増大に伴い、電荷移動抵抗  $R_{sh}$  の減少傾向が確認されている。そこで低照度 I-V 測定結果から求めた電荷移動抵抗  $R_{sh}$  と純抵抗  $R_s$ 、及び余寿命との関係について考察を行った。

過年度に、耐候性試験、恒温恒湿試験、温度サイクル試験、冷熱衝撃試験の各加速劣化試験を施した PVセルの低照度 I-V 測定結果に対して、初期寿命  $P_{L0}$  を 30 年と仮定し、前述の式(3)を用いて余寿命を求めた。その値と低照度 I-V 曲線から求めた電荷移動抵抗  $R_{sh}$  との関係をもとめると図 3-15 のようになる。

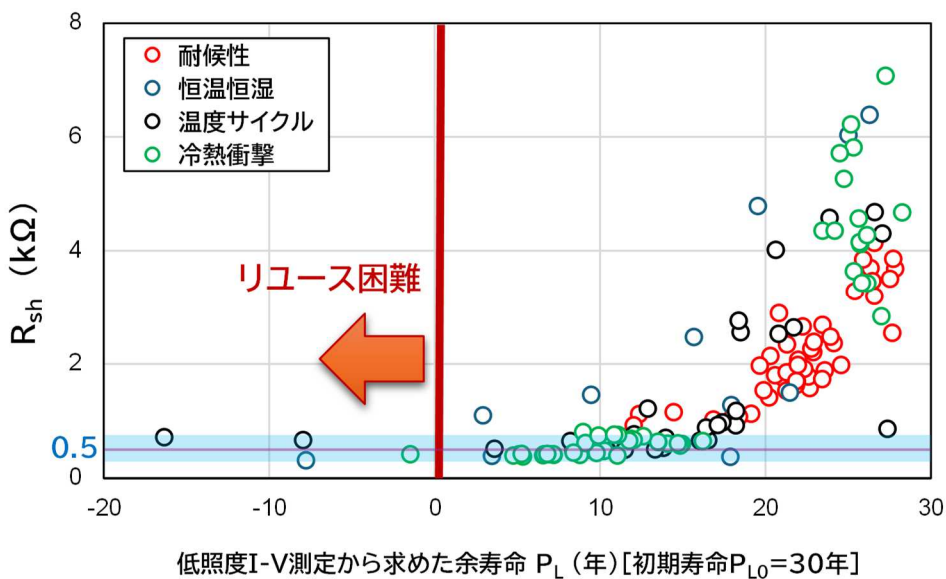


図 3-15 各加速劣化試験後の PVセルから推定した余寿命と電荷移動抵抗  $R_{sh}$  との関係

余寿命が長い領域では  $R_{sh}$  に分布があるが、PV セルの劣化が進み、余寿命が短くなるにつれて  $R_{sh}$  は小さな値 (0.5 k $\Omega$  程度) への収束が認められる。これらの結果から、電荷移動抵抗  $R_{sh}$  を用いて正確に余寿命を推測することは難しいものの、過年度に実施した CCP 測定で求めた加速劣化試験時間増加に伴い  $R_{sh}$  が低下する傾向は一致している。今後、 $R_{sh}$  と余寿命との関係について検討が進むことで、別のモデルが提案される可能性も考えられる。

なお、ここで余寿命が 0 年未満と計算された点に関しては、光を照射すると発電はするものの、今後のリユースでの長期運用は難しいと判断することができる。

続いて純抵抗  $R_s$  についてまとめると図 3-16 のようになる。余寿命が 10 年以下まで短くなると  $R_s$  に増加傾向が見られるが、先の電荷移動抵抗  $R_{sh}$  ほどの強い関連性は見られない。多くの測定点は余寿命が 5~30 年の範囲で、 $R_s$  はおおよそ 0.5~1.5  $\Omega$  の値であり、それ以外の比較的大きい  $R_s$  は恒温恒湿試験や温度サイクル試験等温度の影響が強い加速劣化試験の測定点である。したがって、温度変化や高温維持等によって PV セルを構成する部材間での熱膨張係数の差による層間剥離や配線の損傷等によって、純抵抗  $R_s$  の増大の影響があったと推測できる。

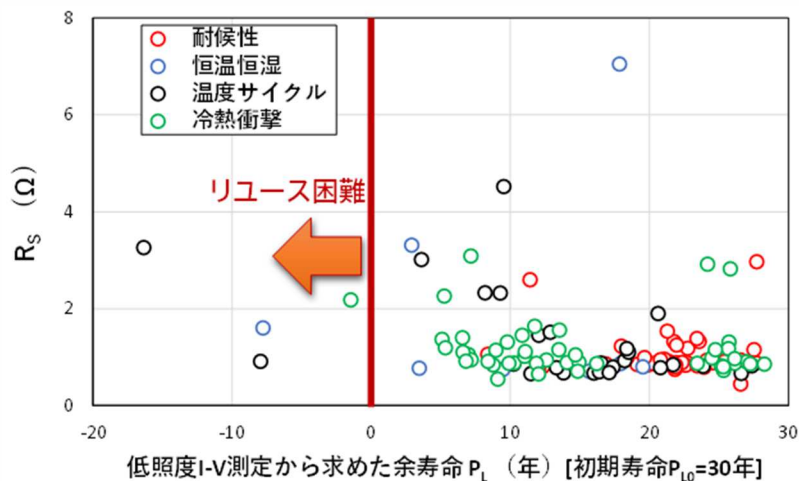


図 3-16 各加速劣化試験後の PV セルから推定した余寿命と純抵抗  $R_s$  との関係

### e. 低照度 I-V 測定結果を用いた劣化予測モデルのまとめ

上記のように、過年度の検討結果より、低照度 I-V 測定における特定の照度範囲における曲線因子  $FF$  と照度  $I_L$  との関係から、劣化予測モデルを新規に考案した。また、各種加速劣化試験の中で最も劣化が進むと考えられた耐候性試験の結果を検量線として用いることで、測定時点における余寿命の定式化ができた。

これにより、PV セルの初期状態や劣化試験時間等の履歴が分からなくとも、余寿命の推測が可能となった。ここでの式(2)及び式(3)は、余寿命の変化を 2 つの変数である傾き  $\alpha$  と切片  $FF_0$  の線形式としたが、より多くのデータの活用と、線形式以外の式も検討及び活用していくことで、余寿命の推測の精度向上が期待される。

ここで、PV セルに関する劣化予測モデルの PV パネルへの応用を考えてみる。この劣化予測モデルの背景には PV セル内でのフォトダイオードに代表される光電現象がある。劣化に伴い曲線因子  $FF$  が

変化を示すのは、特定の照度範囲、即ち、 $I_{L1}$  と  $I_{L2}$  (ただし、 $I_{L1} < I_{L2}$ ) という照度間で起きるシリコン系太陽光発電素子の特徴を反映したものである。そのため、この照度範囲内での曲線因子  $FF$  の挙動で PV パネルの劣化を予測できる可能性がある。

令和 6 年度に報告した PV セルのストリングス状態の測定結果から、直列接続での電圧は個別の PV セルの電圧を重畳した値となるが、曲線因子  $FF$  は平均値であった。一方、並列接続での電流はそれぞれ個別の PV セルの電流を重畳した値となるが、曲線因子  $FF$  もまた平均値であった。このように曲線因子  $FF$  は、PV セルの接続状態によらず、構成する PV セルの平均値をとる可能性が高い。

したがって、この PV セルにおける劣化予測モデルは、PV セルが複数接続された状態である PV パネルにもそのまま適用できる可能性が高いと考える。

### (3) まとめ

過年度に加速劣化試験を施した PV セルについて、CCP 測定及び低照度 I-V 測定の結果から劣化の程度の評価と検証を行った。

CCP 測定結果からは、屋内の室温保管においても、1 年の時間経過によって PV セルの劣化が進行した可能性があることが分かった。低照度 I-V 測定からは、特定の照度での測定結果を用いることで、劣化予測モデルを考案することができた。

これらの結果から、CCP 測定及び低照度 I-V 測定の両者は、使用済 PV パネルの劣化の程度を評価できる有用な手法となり得る。

#### 3.1.2 使用済 PV パネルサンプルの加速劣化試験による経年劣化解析

現在、使用済 PV パネルの正常動作性は、「太陽電池モジュールの適正なリユース促進ガイドライン」(環境省、令和 3 年 5 月)<sup>10</sup>に示されているとおり、一般には I-V 検査、EL 検査及びインピーダンス測定等で検査されている。しかしながら、これらの方法は、大型機器を使用し検査・測定時点での使用可能性は正確に判定できるものの、使用済 PV パネルの材料の劣化やセルの電氣的劣化の度合いの評価まではできない。

一方、本事業では過年度に、テーブル試験用 PV セルにおいて劣化の程度の評価に有用な手法であることを確認した低照度 I-V 測定と遮光状態での CCP 測定は、試験サンプルとして用いた使用済 PV パネルの劣化の程度の評価にも有用な手法であることを確認できている。本年度は、過年度に加速劣化試験を施した PV パネルと、新たに追加した PV パネルに対して加速劣化試験を実施し、CCP 測定と低照度 I-V 測定の結果から経年劣化解析を実施した。

#### (1) 解析に用いた使用済 PV パネルサンプル

試験サンプルの検証には、PVCJ(PV CYCLE JAPAN)認定ルート施設で回収しリユース検査で OK 判定となった使用済 PV パネル(シリコン型)5 枚と、市販の中古 PV パネル 10 枚を用いた。試料番号#と仕様(ラベル公称値)を表 3-3 に示す。試料番号 #1~ #6 は過年度に試験した PV パネルと

<sup>10</sup> 環境省ウェブサイト、太陽電池モジュールの適正なリユース促進ガイドライン、<https://www.env.go.jp/press/files/jp/116250.pdf> (閲覧日:2026 年 2 月 5 日)

同一である。試料番号#9 及び#10 は#4 と同一仕様、#11 は#6 と同一仕様の PV パネルを使用しており、いずれも加速劣化試験は施していない。また、試料番号#12~21 は、市販の中古 PV パネル 10 枚である。

表 3-3 加速劣化試験に使用した使用済 PV パネルの製品仕様

メーカー	No.	モジュールタイプ	最大出力	短絡電流	最大出力 動作電流	開放電圧	最大出力 動作電圧
			$P_{max}$ (W)	$I_{sc}$ (A)	$I_{pm}$ (A)	$V_{oc}$ (V)	$V_{pm}$ (V)
A社	#1(A01C)、#2(A02C)	多結晶シリコン	255	9.00	8.43	37.4	30.2
B社	#3(A03E)、#4(A04E)	単結晶シリコン	360	11.11	10.53	41.3	34.2
C社	#5(A05K)、#6(A06K)	多結晶シリコン	180	8.21	7.57	29.4	23.8
B社	#9(B03E)、#10(B04E)	単結晶シリコン	360	11.11	10.53	41.3	34.2
C社	#11(B06K)	多結晶シリコン	180	8.21	7.57	29.4	23.8
A社	#12(D01C)、#13(D02C)	単結晶シリコン	330	9.65	9.18	43.5	36.0
D社	#14(D03J)、#15(D04J)	多結晶シリコン	265	9.08	8.54	38.1	31.0
E社	#16(D05S)、#17(D06S)	多結晶シリコン	260	9.01	8.52	37.8	30.5
F社	#18(D07H)、#19(D08H)	多結晶シリコン	255	8.88	8.37	38.1	30.5
G社	#20(D09M)、#21(D10M)	単結晶シリコン	275	9.36	8.79	38.3	31.3

本年度の加速劣化試験は、令和 5 年度と同様に、より新しい規格である IEC61215-2:2021 規格の温度サイクル試験を実施した。各年度の実施条件を表 3-4 に示す。

表 3-4 温度サイクル試験の条件と電気的特性評価に用いた装置及び測定者

令和5年度、令和7年度		令和6年度	
<b>温度サイクル試験</b>			
規格：IEC61215-2:2021 Terrestrial Photovoltaic(PV) modules – Design qualification type approval – Part 2: Test procedures 10.11 に基づく温度サイクル試験  電流印加：25°C以上で定格電流を印加  1 サイクル当たりの時間：5 hr  実施：(株)アイテス		規格：IEC 61215-2:2016 Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 2: Test proceduresの4.11 Thermal cycling test (MQT 11)に基づく温度サイクル試験  電流印加：-40°C～80°Cの昇温期間中は100%Impを印加、降温期間中及び-40°Cの持続時間中と80°C以上の期間中は1%Imp以下を印加  1 サイクル当たりの時間：3.5 hr ※ 時間短縮を目的に低/高温の極値間温度変化率をJIS C 61215-2:2020で許容される範囲内で大きく設定 実施：ネクストエナジー・アンド・リソース(株)	
<b>電気特性評価</b>			
(試験前、200cycle後)		(400cycle前後、600cycle後)	
I-V	装置：ロングパルスソーラーシミュレーター 測定：(株)アイテス	装置：ソーラーシミュレーター 測定：ネクストエナジー・アンド・リソース(株)	
EL	装置：太陽電池 EL画像測定装置 PVX300 測定：(株)アイテス	装置：太陽電池EL検査装置 測定：ネクストエナジー・アンド・リソース(株)	
PL	装置：太陽電池 PL画像測定装置 PVX330 + POPLI 測定：(株)アイテス	装置：太陽電池 PL画像測定装置 PVX330 + POPLI 測定：(株)アイテス	

## (2) 従来の評価手法

加速劣化試験として温度サイクル試験を実施したPVパネルに対して、使用済PVパネルの正常動作性の評価として一般的に用いられる従来のI-V測定、EL測定、及びPL測定を実施した。

### 1) 測定の手順

温度サイクル試験前後に実施したI-V、EL、PLの各電気的特性測定に関しては、表3-4に装置及び機関名を示す。各試験の概要については、I-V測定を図3-17に、EL測定を図3-18に、PL測定を図3-19に示す。

測定条件：IEC61215-2

STC(標準試験環境)  
 日射照度：1000W/m<sup>2</sup>  
 エアマス：1.5  
 パネル温度：25±2°C

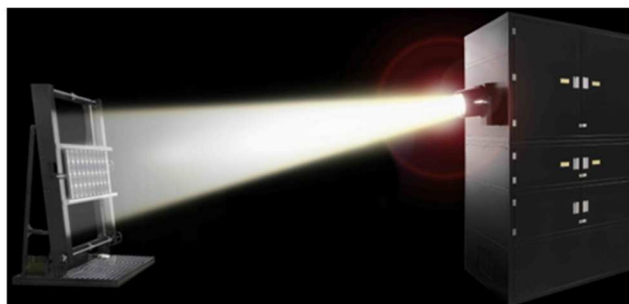


図 3-17 PVパネル向けI-V特性評価システムの概要

出所)株式会社ケミトックスウェブサイト、太陽電池モジュール試験対応シリーズ「高精度ソーラーシミュレーターを用いた太陽電池モジュールの性能評価」、<https://www.chemitox.co.jp/wp-content/themes/chemitox/pdf/07.pdf> (閲覧日:2026年2月5日)

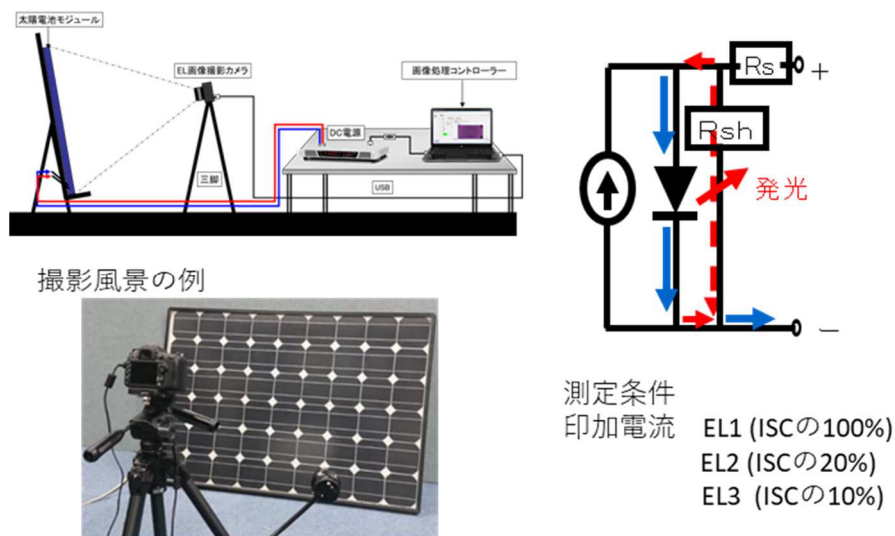


図 3-18 PV パネル向け EL 測定システム PVX300(アイテス製)の概要 (アイテス提供)



図 3-19 PV パネル向け PL 測定システム PVX330 + POPLI(アイテス製)の概要 (アイテス提供)

## 2) 結果と考察

過年度に加速劣化試験を施した 2 枚の PV パネルについて追加試験を行う前後に測定した I-V 結果を表 3-5 に示す。過年度に 600 cycle まで施したパネルの結果に追加して、本年度の試験前(800 cycle 前)、追加 200 cycle 試験後(計 800 cycle 後)、更に追加 200 cycle 試験後(計 1,000 cycle 後)について示す。令和 6 年度の 600 cycle 後は各電気的特性を評価した後は室温で保管し、約 6 か月後に本年度の 800 cycle 前を測定した。また、表 3-6 に、加速劣化試験を行った 15 枚全ての試験前後の I-V 結果を示す。表 3-5 に示した 2 枚のパネルの結果も本年度の試験サイクル数の記載と共に併せて示す。考察については、EL 及び PL の測定結果と併せて総合的に述べる。

表 3-5 PV パネル 2 枚(過年度から継続)の温度サイクル試験前後の I-V 特性

No.	年度	状態	最大出力	短絡電流	最大出力 動作電流	開放電圧	最大出力 動作電圧	曲線因子
			$P_{max}$ (W)	$I_{sc}$ (A)	$I_{pm}$ (A)	$V_{oc}$ (V)	$V_{pm}$ (V)	$FF$ (%)
#4 A04E	R5	試験前	370.08	11.14	10.61	41.49	34.89	80.09
		200cycle後	368.05	11.13	10.65	41.59	34.57	79.50
	R6	400cycle前	371.63	11.25	10.71	41.44	34.71	79.70
		400cycle後	370.24	11.33	10.67	41.45	34.71	78.81
		600cycle後	366.82	11.27	10.56	41.46	34.75	78.48
	R7	800cycle前	358.50	11.12	10.53	41.46	34.03	77.73
		800cycle後	351.80	11.12	10.44	41.55	33.71	76.13
		1,000cycle後	345.50	11.14	10.30	41.52	33.55	74.71
#6 A06K	R5	試験前	184.56	8.33	7.81	29.46	23.63	75.21
		200cycle後	184.30	8.33	7.79	29.56	23.65	74.82
	R6	400cycle前	182.29	8.36	7.40	29.76	24.65	73.24
		400cycle後	182.45	8.42	7.41	29.76	24.64	72.85
		600cycle後	181.67	8.39	7.36	29.75	24.68	72.76
	R7	800cycle前	183.50	8.38	7.83	29.51	23.43	74.18
		800cycle後	180.80	8.37	7.82	29.41	23.12	73.46
		1,000cycle後	182.30	8.37	7.82	29.56	23.31	73.65

表 3-6 PV パネル 15 枚の温度サイクル試験前後の I-V 特性

No.	年度	状態	最大出力	短絡電流	最大出力 動作電流	開放電圧	最大出力 動作電圧	曲線因子
			$P_{max}$ (W)	$I_{sc}$ (A)	$I_{pm}$ (A)	$V_{oc}$ (V)	$V_{pm}$ (V)	$FF$ (%)
#4 A04E	R7	試験前	358.5	11.120	10.530	41.46	34.03	77.73
		200cycle後	351.8	11.120	10.440	41.55	33.71	76.13
		400cycle後	345.5	11.140	10.300	41.52	33.55	74.71
#6 A06K	R7	試験前	183.5	8.382	7.832	29.51	23.43	74.18
		200cycle後	180.8	8.366	7.820	29.41	23.12	73.46
		400cycle後	182.3	8.373	7.820	29.56	23.31	73.65
#9 B03E	R7	試験前	364.5	11.150	10.640	41.29	34.27	79.14
		200cycle後	358.4	11.130	10.570	41.25	33.91	78.09
		400cycle後	354.4	11.140	10.540	41.41	33.62	76.83
#10 B04E	R7	試験前	355.5	11.170	10.510	41.00	33.83	77.61
		200cycle後	349.8	11.160	10.440	41.08	33.52	76.32
		400cycle後	340.6	11.180	10.350	41.07	32.90	74.14
#11 B06K	R7	試験前	184.4	8.389	7.839	29.44	23.52	74.67
		200cycle後	182.9	8.385	7.827	29.48	23.37	74.01
		400cycle後	181.7	8.402	7.807	29.51	23.28	73.29
#12 D01C	R7	試験前	306.6	9.083	8.566	42.86	35.79	78.75
		200cycle後	305.6	9.089	8.537	42.87	35.79	78.42
		400cycle後	303.6	9.083	8.539	42.91	35.55	77.90
#13 D02C	R7	試験前	311.1	9.210	8.689	42.88	35.80	78.76
		200cycle後	310.6	9.207	8.664	42.91	35.85	78.62
		400cycle後	308.4	9.212	8.665	42.88	35.59	78.09
#14 D03J	R7	試験前	256.3	8.998	8.403	37.58	30.50	75.81
		200cycle後	251.8	8.989	8.361	37.48	30.11	74.71
		400cycle後	251.2	8.955	8.335	37.55	30.13	74.68
#15 D04J	R7	試験前	263.1	9.131	8.574	37.70	30.68	76.43
		200cycle後	260.3	9.119	8.552	37.63	30.44	75.87
		400cycle後	258.5	9.114	8.537	37.70	30.28	75.22
#16 D05S	R7	試験前	237.9	8.633	8.171	36.77	29.11	74.93
		200cycle後	236.2	8.647	8.168	36.76	28.91	74.30
		400cycle後	238.2	8.764	8.195	37.26	29.06	72.93
#17 D06S	R7	試験前	238.3	8.784	8.127	36.77	29.32	73.79
		200cycle後	237.0	8.797	8.141	36.80	29.11	73.19
		400cycle後	239.0	8.789	8.192	37.36	29.18	72.80
#18 D07H	R7	試験前	245.3	8.721	8.201	37.30	29.91	75.41
		200cycle後	244.8	8.773	8.204	37.47	29.83	74.45
		400cycle後	241.4	8.775	8.198	37.45	29.45	73.46
#19 D08H	R7	試験前	245.2	8.924	8.292	37.45	29.57	73.37
		200cycle後	239.1	8.933	8.256	37.35	28.96	71.65
		400cycle後	227.9	8.937	8.167	37.50	27.90	68.00
#20 D09M	R7	試験前	264.6	9.124	8.647	37.65	30.60	77.03
		200cycle後	263.8	9.133	8.632	37.72	30.57	76.59
		400cycle後	267.5	9.160	8.648	37.92	30.93	77.02
#21 D10M	R7	試験前	263.9	9.113	8.641	37.62	30.53	76.96
		200cycle後	263.5	9.121	8.619	37.68	30.57	76.66
		400cycle後	266.1	9.134	8.610	37.95	30.91	76.77

図 3-20 に過年度に加速劣化試験を施した 2 枚のパネルに追加試験を行う前後に測定した EL 測定結果を、図 3-21 に加速劣化試験を行った 15 枚全ての試験前後の EL 測定結果を示す。図 3-18 に示す EL1、EL2 と EL3 の 3 種類の電流で行ったところ電流値による見え方の違いが無かったことから、EL1( $I_{sc}$  100%)のみ示す。

同様に、図 3-22 に加速劣化試験を実施した 2 枚のパネルに追加試験を行う前後に測定した PL 測定結果を、図 3-23 に加速劣化試験を行った 15 枚全ての試験前後の PL 測定結果を示す。EL 測定においては図 3-18 に示すように、パネル全体を一度に撮影しているが、PL 測定は一度に撮影できる領域が限定されるため、パネル上部(EL 画像では左側)を撮影した 3 枚の PL 結果のみを示す。

I-V 曲線の各パラメータについては、前述のとおり、PV パネルの出力端子間を短絡させた時に流れる電流が短絡電流  $I_{sc}$ 、出力端子に負荷等を何も接続せずに開放した状態での電圧が開放電圧  $V_{oc}$ 、動作電圧と動作電流の積である最大出力  $P_{max}$  となる点を最適動作点と言い、その時の動作電流は最大出力動作電流  $I_{pm}$ 、動作電圧を最大出力動作電圧  $V_{pm}$  と呼ぶ。また、曲線因子  $FF$  は PV セルの特性の良さを表す指標で、 $FF = P_{max} \div (V_{oc} \times I_{sc})$ 、で表され、主にパネル内部の抵抗劣化やダイオード損失の影響を受ける。

EL 及び PL 測定からは、加速劣化試験前の内部素子欠陥の確認と加速劣化試験後の変化を評価した。EL 測定では、結晶や電極の欠陥があると EL 発光の強度が低下し、PID(Potential Induced Degradation : 電力誘起出力低下)現象による劣化箇所やクラック等が画像の明暗で把握できる。一方、PL 測定では、セルそのものの素子劣化や均質性を発光状態の画像の明暗で把握できる。そのため、両者の比較を行うことで劣化要因の切り分けにつながる。

加速劣化試験を実施したパネルの I-V 測定、EL 測定、及び PL 測定の各結果において、PL 測定結果では試験後に変化がほとんど見られなかった。パネル表面の封止材の変色も特に認められないことから、パネルを構成する素子そのものや素子の均質性はほとんど劣化していないと推測される。

一方、EL 測定結果では、セル単位の黒色化、セル端部の暗部の広がり、クラックの発生等の劣化が見られた。加速劣化試験による化学的劣化だけではなくパネル輸送(秋田-関東甲信越間、のべ 4 回)時の振動による物理的劣化も考えられ、両者による内部の電極や Si 半導体素子の欠陥が生じたと推測される。これらの EL 測定結果での劣化は I-V 測定での劣化につながり、クラックの増大が特に大きかった #19(D08H)では、400 cycle 試験後の曲線因子  $FF$  は試験前に比べて 5%以上減少しており、その他のパネルでの 3%以内の減少と比較して劣化が進行したと言える。

今回加速劣化試験を実施したパネルの劣化の程度にはばらつきがあり、セルの大きさやパネルの種類その他、加速劣化試験前の状態にも依存すると考える。しかしながら、今回の加速劣化試験後に実施したリユース検査では 15 枚全ての PV パネルが OK 判定のリユース可能な状態であり、劣化の程度を判断するまでには至らなかった。

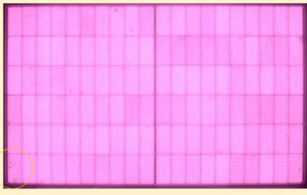
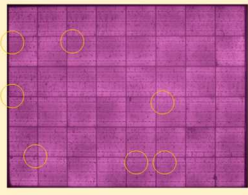
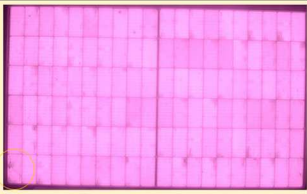
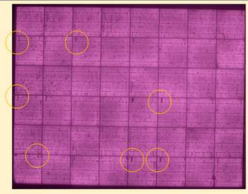

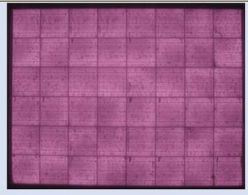
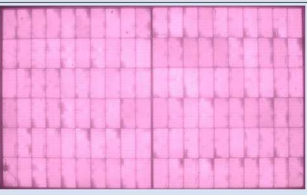
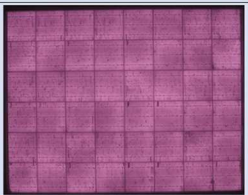
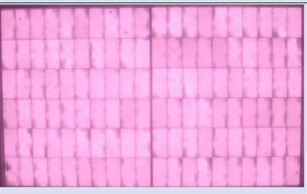
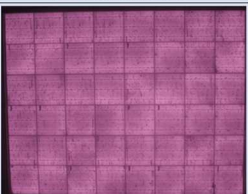
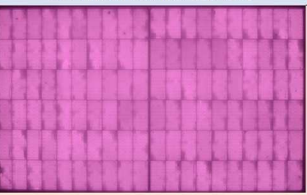
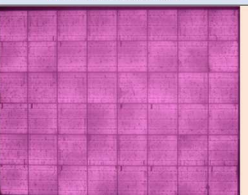
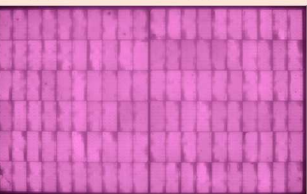
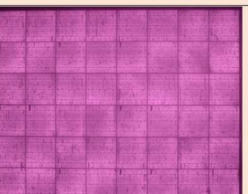
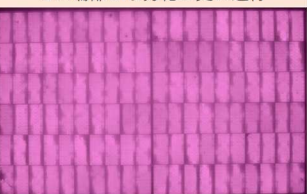
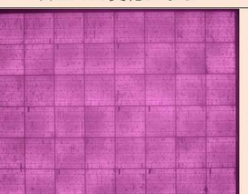
No.	#4(A04E)	#6(A06K)
試験前 (R5)		
200cycle後 (R5)	 クラック箇所とセル端部から劣化が進行	 断線個所の増加
400cycle前 (R6)	 保存による目立った変化は無し	 保存による目立った変化は無し
400cycle後 (R6)	 セル端部から劣化が更に進行	 目立った変化はなし
600cycle後 (R6)	 セル端部から劣化が更に進行	 目立った変化はなし
800cycle前 (R7)	 保存による目立った変化は無し	 保存による目立った変化は無し
800cycle後 (R7)	 セル端部から劣化が更に進行	 目立った変化はなし
1,000cycle後 (R7)	 セル端部から劣化が更に進行	 目立った変化はなし

図 3-20 PV パネル 2 枚(過年度から継続)の温度サイクル試験前後の EL 測定結果

R7	#4(A04E)	#6(A06K)	#9(B03E)	#10(B04E)
試験前 (R7)				
200cycle後 (R7)	 セル端部から劣化が進行	 目立った変化はなし	 セル端部から劣化が進行	 クラックとセル端部から劣化が進行
400cycle前 (R7)	 セル端部から劣化が更に進行	 目立った変化はなし	 セル端部から劣化が更に進行	 クラックとセル端部から劣化が更に進行
R7	#11(B06K)	#12(D01C)	#13(D02C)	#14(D03J)
試験前 (R7)				
200cycle後 (R7)	 断線個所の増加	 目立った変化はなし	 目立った変化はなし	 クラックの劣化が進行
400cycle前 (R7)	 断線個所の増加と劣化の進行	 目立った変化はなし	 目立った変化はなし	 クラックの劣化が更に進行
R7	#15(D04J)	#16(D05S)	#17(D06S)	#18(D07H)
試験前 (R7)				
200cycle後 (R7)	 セル端部から劣化が進行	 セル端部から劣化が進行	 セル端部から劣化が進行	 セル端部から劣化が進行
400cycle前 (R7)	 セル端部から劣化が更に進行	 セル端部から劣化が更に進行	 セル端部から劣化が更に進行	 セル端部から劣化が更に進行
R7	#19(D08H)	#20(D09M)	#21(D10M)	
試験前 (R7)				
200cycle後 (R7)	 クラック発生とセル端部劣化	 断線個所の増加	 断線個所の増加	
400cycle前 (R7)	 クラックの増加とセル端部劣化	 断線個所が更に増加	 断線個所が更に増加	

図 3-21 PV パネル 15 枚の温度サイクル試験前後での EL 測定結果

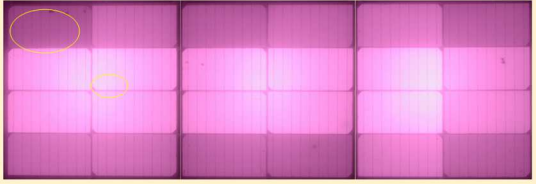

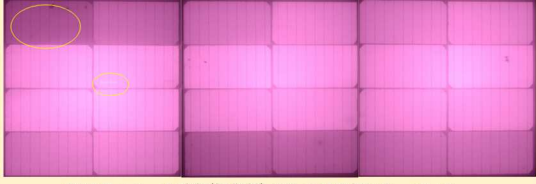

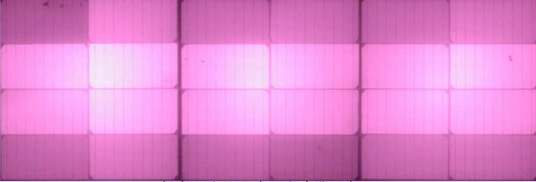
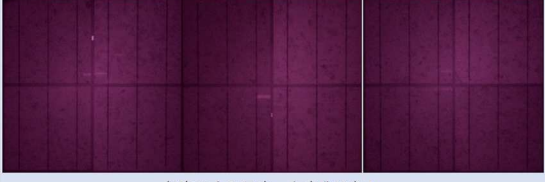
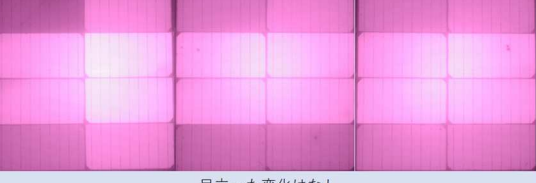



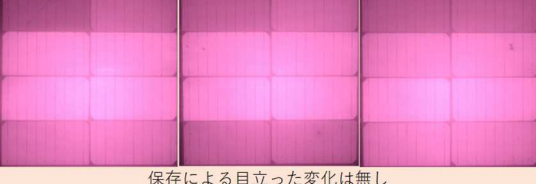

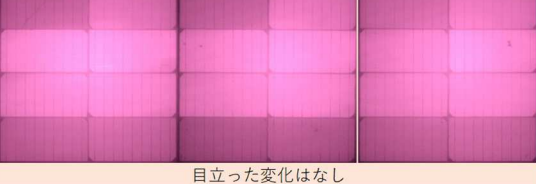

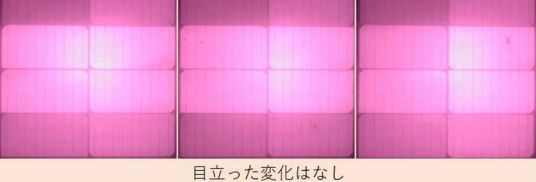

No.	#4(A04E)	#6(A06K)
試験前 (R5)		
200cycle後 (R5)	 ELで見つかった暗部(損傷部)がPLでは明部になっている。	 ELで見つかった暗部(損傷部)がPLでは明部になっている。
400cycle前 (R6)	 保存による目立った変化は無し	 保存による目立った変化は無し
400cycle後 (R6)	 目立った変化はなし	 目立った変化はなし
600cycle後 (R6)	 目立った変化はなし	 目立った変化はなし
800cycle前 (R7)	 保存による目立った変化は無し	 保存による目立った変化は無し
800cycle後 (R7)	 目立った変化はなし	 目立った変化はなし
1,000cycle後 (R7)	 目立った変化はなし	 目立った変化はなし

図 3-22 PV パネル 2 枚(過年度から継続)の温度サイクル試験前後での PL 測定結果

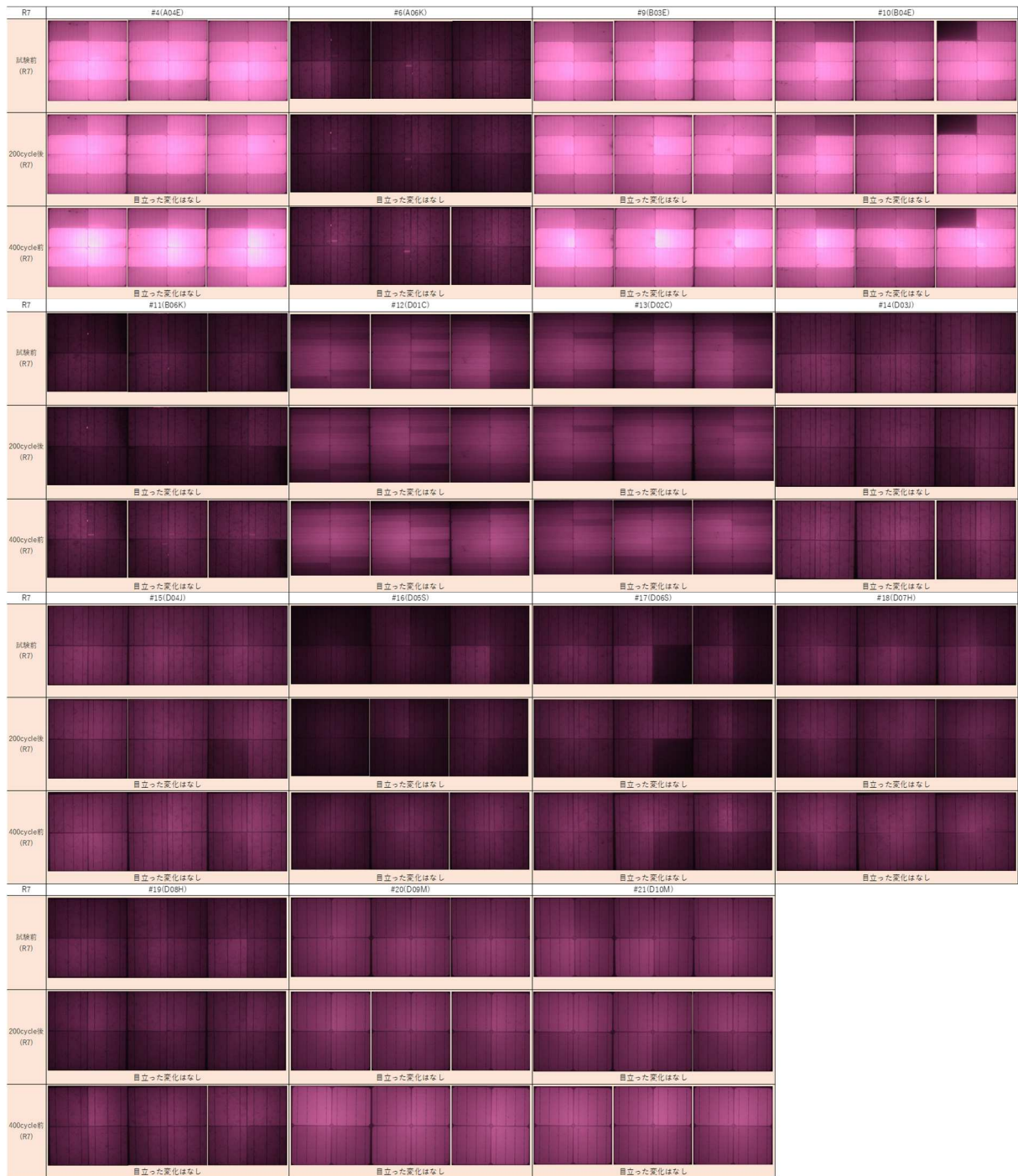


図 3-23 PV パネル 15 枚の温度サイクル試験前後での EL 測定結果

### (3) 劣化予測モデル構築に用いる評価手法

加速劣化試験前後に行った PV パネルの低照度 I-V 測定と DC オフセット CCP 測定の結果を解析することで、劣化予測モデルの構築を試みた。ここでは、PV パネルの評価手法について述べる。

#### 1) 低照度 I-V 測定

PV パネルの低照度 I-V 測定は、過年度は図 3-24 (a)に示すシステムで行った。室内の LED 照明を光源に用い、PV パネル受光面での平均的な照度がほぼ 450 lux になる位置に設置して単一照度で測定する簡易的な評価に留まり、図 3-7 に示すような劣化予測モデルに必要な任意の照度に制御して低照度 I-V 測定を行うことができなかった。そこで、本年度は図 3-24 (b)に示す測定システムを構築した。

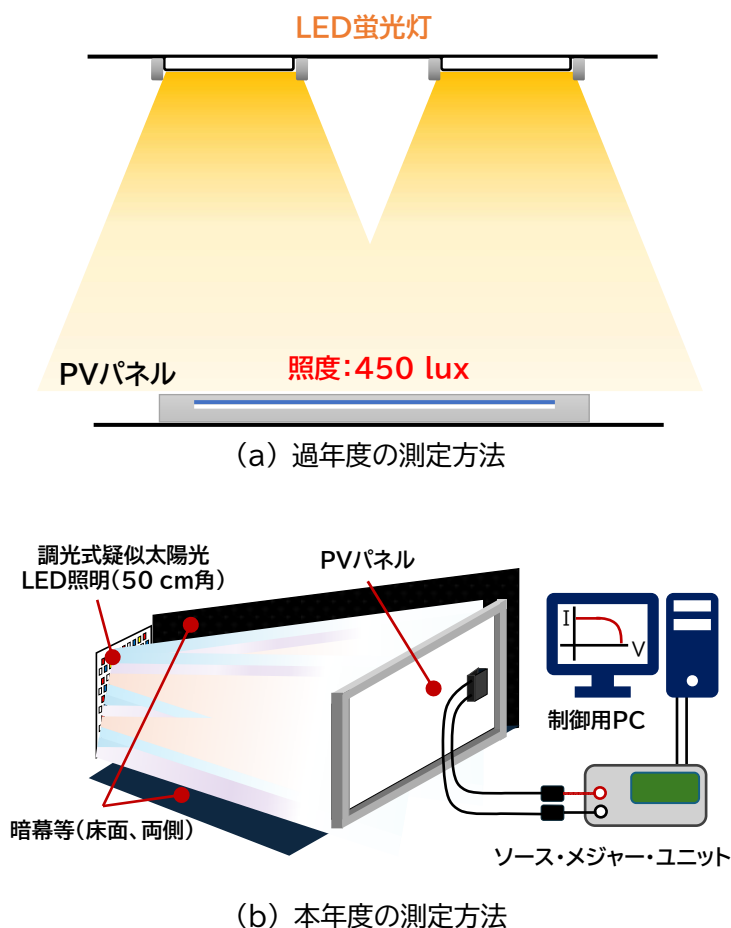


図 3-24 PV パネルの低照度 I-V 測定方法

本年度の低照度 I-V 測定システムでは、劣化予測モデルの算出に必要な不可欠な任意の照度の制御を可能とする測定方法と環境の構築を図った。その際に考慮した項目は主に以下の①～③であり、PV パネルでも低照度 I-V 測定から劣化予測を行えるよう図 3-24 (b)の測定システムを構築した。

- ① PV セルよりもはるかに大きくて重量のある PV パネルの測定・交換がしやすい
- ② PV パネルの低照度 I-V 測定中に周囲環境の直接・散乱光の影響を受けにくい
- ③ PV パネルの受光面(おおよそ畳 1 枚分前後の面積)の範囲での照度分布が小さい

上記項目①に関しては、遮光・消灯可能な室内で、重量物である PV パネルの置き換えや測定を行いやすいようにした。②に関しては、PV パネルを横向きに立てて設置し、受光面側の前方の床面と両側面には反射率の低い黒い暗幕等を配置した。なお、上面側の天井方向に関しては、天井までの距離が長いことから、天井からの影響は小さいと判断して開放し、測定状態モニタリング用の照明として活用した。③に関しては、必要な照度と均一性を両立できるよう、発光領域が一定の広さを持った光源を用いた。今回の光源には、50 cm 角内に 100 個程度の LED が配置された、調光式の疑似太陽光 LED 照明を用いた。これにより、光源と PV パネルとの間隔を 1.5 m とすることで必要な照度を誤差±10%以内で確保することができた。

PV パネルの電気信号の測定はソース・メジャー・ユニット(Keysight 製:B2901A)とその制御 PC の構成で行い、光源には調光式の疑似太陽光 LED 照明を用い、照度を変えて低照度 I-V 測定を行った。PV パネルの測定でも照度を変えられるようにしたことで、曲線因子  $FF$  と照度  $I_L$  との関係から PV パネルの劣化予測を行うことが可能となった。

## 2) DC オフセット CCP 測定

CCP 測定は、過年度は PV セルと同じ図 3-3 に示すシステムで行ったが、測定装置の仕様上、印加できる DC(直流)オフセット電圧は最大 3 V であり、開放電圧  $V_{oc}$  や最大電力出力電圧  $V_{pm}$  が大きい PV パネルの評価に十分な電圧を印加できないことが分かった。そこで本年度は、十分な DC オフセット電圧を印加できる試作機を用いて DC オフセット CCP 測定を実施した。

DC オフセット CCP 測定では、測定のために印加する交流電圧に対して直流の DC オフセット電圧を重畳することにより PV パネルの最大出力動作電圧  $V_{pm}$  付近の電圧を印加し、最大出力動作電圧付近で動作している状態で CCP 測定を行うことが可能となる。

過年度に実施した PV セルの DC オフセット CCP 測定において、DC オフセット電圧は最大出力動作電圧  $V_{pm}$  で動作させる光照射状態を疑似的に実現できることを確認した。PV パネルの評価を光照射で行うには、評価装置の規模が大きくなるため高価な設備が必要となる。しかしながら、高照度の光照射が無い状態でも DC オフセット電圧の大きさを変えるだけで、PV パネルが本来持っている性能(DC オフセットあり)と現時点での劣化状態(DC オフセット無し)を比較することで劣化の程度を把握できることとなり、DC オフセット CCP 測定は劣化予測の一手法として有用であることを報告した。

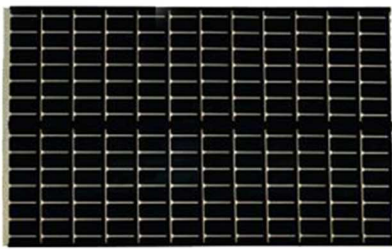
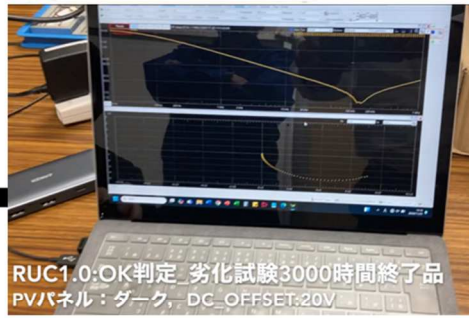
令和 6 年度に RUC V2.0 測定部として開発した試作機 SolarGen DC-Z Analyzer の外観と測定時の様子を図 3-25 (a)及び(b)に示す。DC オフセット CCP 測定システムは、本試作機を PV パネル出力端子に接続し、DC オフセット電圧印加用の外部 DC 電源で電圧を印加した際の CCP を制御用 PC に表示させる簡便な構成となっており、既存品と比較して安価に製作することができる。これにより PV パネルの最大出力動作電圧  $V_{pm}$  近くまでの DC オフセット電圧を印加して、CCP 測定を行うことが可能となった。また、測定時には受光による PV パネルからの出力電圧が計測されないように暗くする必要はあるが、測定時は PV パネルの表裏両面を暗幕で覆い遮光状態とすることで、所望の測定環境を実現した。本試作機は簡単に持ち運ぶことが可能で、かつ、暗幕等の PV パネルを遮光するものがあれば測定場所を選ばない。そのため、回収した PV パネルをその現場で評価することが可能である。

SolarGen DC-Z Analyzer



USB

測定画面



Solar Panel



DC Power Supply

(a) CCP 測定システム(試作品)の外観



(b) 測定時の様子

図 3-25 PV パネル向け CCP 測定システム(試作品)の外観と測定時の様子

#### (4) 加速劣化試験品のデータ解析による劣化予測モデル構築

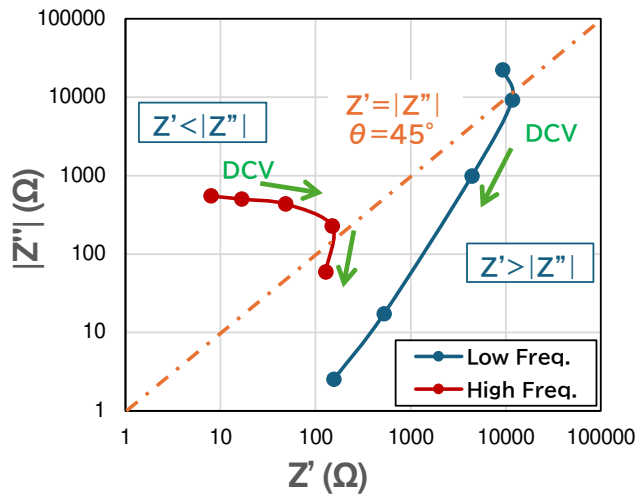
実際の使用済 PV パネルに対しては加速劣化試験を実施して試験前後の比較から劣化の程度を評価することができないため、回収した時点での測定結果のみから劣化の程度を評価する手法が必要になる。

本事業で実施した PV パネルの加速劣化試験前後の低照度 I-V 測定と CCP 測定の結果を解析することで、劣化予測モデルの構築を試みた。

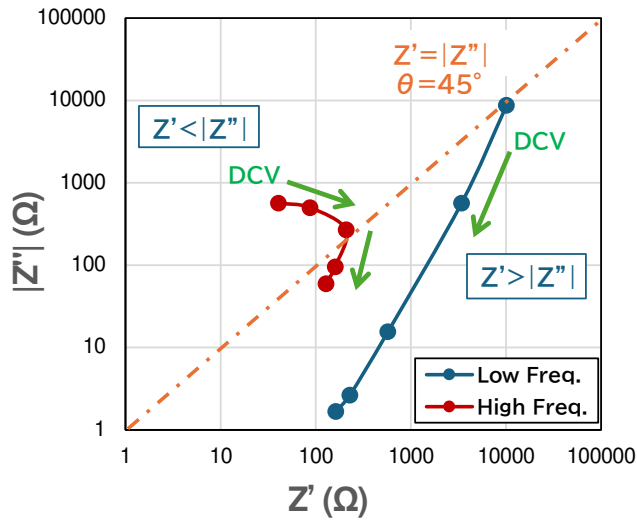
##### 1) PV パネルにおける DC オフセット CCP 測定結果の考察

PV パネルの DC オフセット CCP 測定には、図 3-25 の測定システムを用いた。PV パネルの最大電力動作電圧  $V_{pm}$  近くまでの DC オフセット電圧を印加して CCP 測定を行った。ここでの DC オフセット電圧の値は、各 PV パネルの最大出力動作電圧  $V_{pm}$  を参考に、 $V_{pm}$  の 20%、40%、60%、80% 及び最大値の 5 水準を用いた。なお、 $V_{pm}$  の 80% まで印加できない場合には  $V_{pm}$  の 70% の電圧を用いて 5 水準で測定を行った。

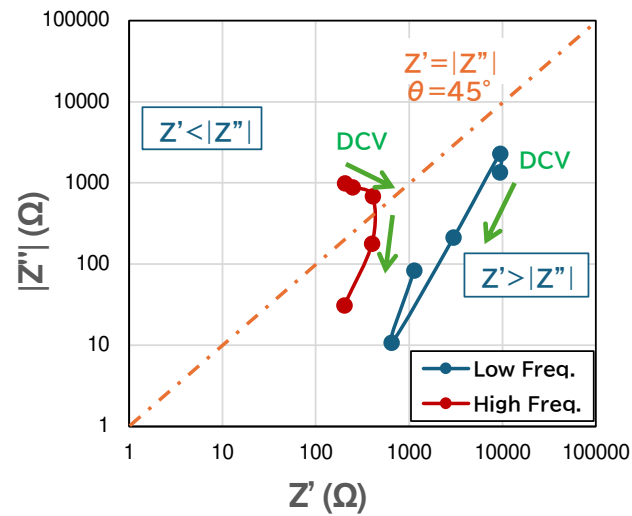
過年度は CCP 測定結果から電荷移動抵抗  $R_{sh}$  の値を求めていたが、本年度は、特定の周波数でのインピーダンスの実部  $Z'$  を横軸に、虚部の絶対値  $|Z''|$  を縦軸にしたナイキスト線図で、DC オフセット電圧増加に沿った軌跡の解析を行った。図 3-26 に、仕様がほぼ同じで劣化状態が異なる 3 枚の PV パネルのナイキスト線図における DC オフセット電圧による軌跡を示す。



(a) 劣化試験無し



(b) 劣化試験あり



(c) NG 判定

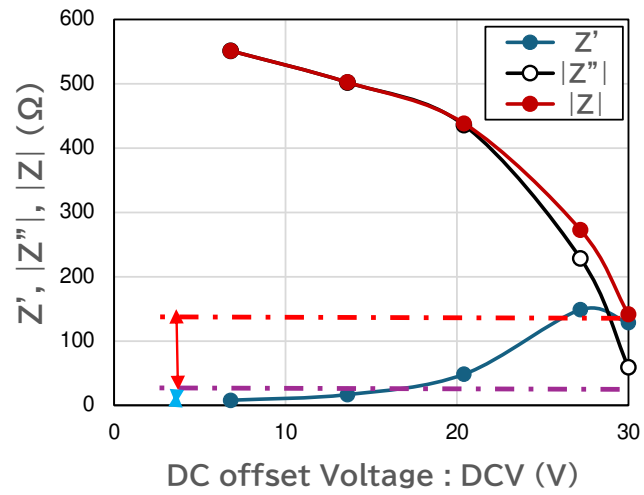
図 3-26 劣化状態が異なる PV パネルのナイキスト線図における DC オフセット電圧による軌跡

周波数が低い場合には青丸(Low Freq.)に示すように、いずれの PV パネルにおいても DC オフセット電圧(DCV)の増加に伴いインピーダンスの実部  $Z'$  と虚部の絶対値 $|Z''|$ は両者共に小さくなり、概ね左下がりの軌跡を描く。このことは、DC オフセット電圧の増加に伴い、周波数が 0 Hz でのインピーダンスの実部  $Z'$  に相当する電荷移動抵抗  $R_{sh}$  が小さくなるこれまでの検討結果と同様で、妥当な傾向である。

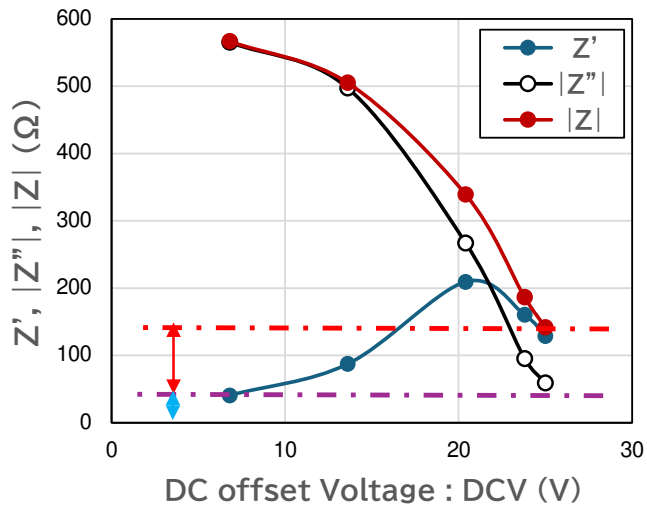
その一方で周波数が高い場合には赤丸(High Freq.)に示すように、劣化状態によって異なる傾向を示した。いずれの軌跡でも、DC オフセット電圧の増加に伴って $|Z''|$ はほぼ一定もしくは微減し、 $Z'$  は増大していく傾向が見られた。その後、位相が  $45^\circ$ である  $Z' = |Z''|$ の付近に至ると、周波数が低い場合と同様に左下がりの軌跡を描く。ただし、劣化の程度が進行しているほど、「 $|Z''|$ は微減しながら  $Z'$  は増大していく」軌跡は狭くなっており、この領域を定量化することで、劣化予測モデルを構築できると考えた。

## 2) PV パネルにおけるナイキスト線図からの劣化予測の検討

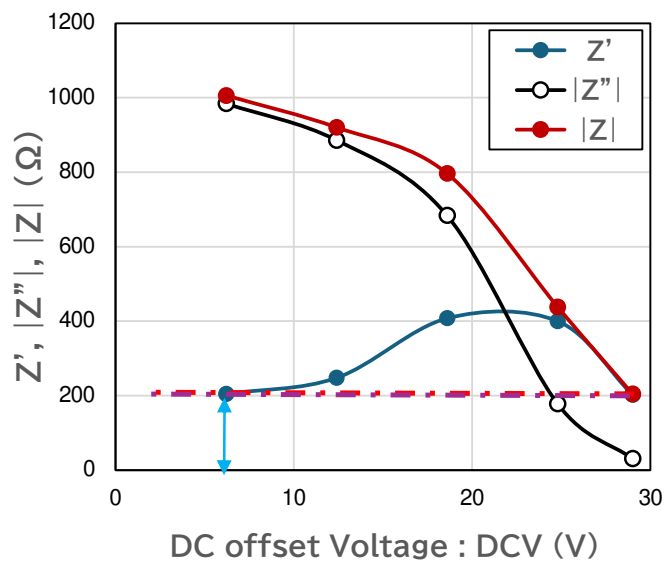
前述のナイキスト線図において、劣化の程度により  $Z'$  に特徴的な挙動が現れた。そこで、周波数が高い場合におけるインピーダンスの実部  $Z'$ 、虚部の絶対値 $|Z''|$ 、及びインピーダンスの絶対値 $|Z|$ の各インピーダンス成分と DC オフセット電圧の関係を調べた。その結果を図 3-27 に示す。



(a)劣化試験無し



(b) 劣化試験あり



(c) NG 判定

図 3-27 各インピーダンス成分と DC オフセット電圧との関係

図 3-27 において、インピーダンスの実部  $Z'$  に着目すると、(a)劣化試験無しで劣化が小さいと思われる PV パネルでは、DC オフセット電圧が低くなると  $Z'$  は小さくなり、0 に近づいている。一方、(b)劣化試験ありと(c)NG 判定品でも、 $Z'$  は小さくなるものの、低い DC オフセット電圧でも 0 からは乖離している。更に(c)NG 判定品では、DC オフセット電圧が小さい時の  $Z'$  と、DC オフセット電圧が最大値の時の  $Z'$  もしくは  $|Z|$  とはほぼ同じ値になっていることが分かる。

このことから、DC オフセット電圧が低い場合のインピーダンスの実部  $Z'$  と、DC オフセット電圧が最大値でのインピーダンスの実部  $Z'$  もしくはそのインピーダンスの絶対値  $|Z|$  を比較することで、おおよその劣化予測ができると考える。

## (5) まとめ

使用済 PV パネルに対して加速劣化試験を実施し、試験前後の DC オフセット CCP 測定結果から経年劣化解析を行った。本年度は、解析手法としてナイキスト線図を用いて劣化予測の検討を行った。

ナイキスト線図における DC オフセット電圧増加に沿った軌跡の解析を行うことにより、特定のインピーダンス成分において、劣化の程度により特徴的な挙動が現れることが分かった。

実際の使用済 PV パネルに対しては加速劣化試験を実施して試験前後の比較から劣化の程度を評価することができないため、回収した時点での測定結果のみから劣化の程度を評価する手法は必要となる。DC オフセット CCP 測定は測定時点での使用済 PV パネルの劣化を予測できる有用な手法となり得る。

### 3.1.3 長期使用可能性予測アルゴリズム

ここでは、劣化予測に有効と考えられる低照度 I-V 測定と DC オフセット CCP 測定の結果から長期使用可能性予測アルゴリズムを検討し、余寿命判定を試みた。

#### (1) アルゴリズムの定義と検証

##### 1) アルゴリズムの定義

DC オフセット CCP 測定の結果から、DC オフセット電圧を最大値とした時のインピーダンス成分について考えてみる。PV セル単体での CCP 形状は、劣化の程度に関わらずほぼ半円となる。しかしながら、PV パネルの場合には、劣化の程度が異なる PV セルの集合体と考えることができ、CCP 形状は半円に対して円弧がずれた状態(円弧の歪み)が見られる。この円弧の歪みについては、過年度に PV セルを用いたストリングスで検討しており、PV セル間の特性の違いが大きいほど円弧の歪みが大きくなることを確認している。即ち、インピーダンスの実部  $Z'$  が同程度の PV パネルであっても、劣化によって円弧の歪みが大きくなるとインピーダンスの絶対値  $|Z|$  は小さくなることから、インピーダンスの実部  $Z'$  よりもインピーダンスの絶対値  $|Z|$  の方が劣化の程度をより反映していると言える。したがって、DC オフセット電圧が最大値の場合には、インピーダンスの絶対値  $|Z|$  を用いることとする。

以上を踏まえて、PV パネルの DC オフセット CCP 測定結果から、測定時点での PV パネルの余寿命  $P_L$ (年)の定式化を試みた。単純化のため、DC オフセット電圧が小さい時のインピーダンスの実部  $Z'_{DCL}$  は、DC オフセット電圧が大きい時のインピーダンスの大きさである絶対値  $|Z_{DCH}|$  に対して PV パネルの劣化に伴って線形的に変化するものとする。この 2 つのインピーダンス成分  $Z'_{DCL}$  と  $|Z_{DCH}|$  の 2 変数の一次線形式である式(4)から、測定時点での PV パネルの余寿命  $P_L$  を簡易的に推測することができる。

$$\begin{aligned} P_L (\text{年}) &= a \times P_{L0} \times f(Z'_{DCL}, |Z_{DCH}|) + b (\text{年}) \\ &= a \times P_{L0} \times (1 - Z'_{DCL} / |Z_{DCH}|) + b (\text{年}) \quad \dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで、 $f(Z'_{DCL}, |Z_{DCH}|)$  : 劣化の程度を表す

2 つの変数  $Z'_{DCL}$  と  $|Z_{DCH}|$  の関数

$P_{L0}$  : PV セルの初期寿命

a 及び b : 任意の補正係数及び補正定数

更なる単純化のため、今後の検討においては、任意の補正係数 a 及び補正定数 b をそれぞれ 1 及び 0 とした次式(5)にて余寿命を推測する。

$$P_L(\text{年}) = P_{L0} \times (1 - Z'_{\text{DCL}} / |Z_{\text{DCH}}|) (\text{年}) \quad \dots\dots (5)$$

式(4)の補正項である a と b に関しては、耐候性試験結果を検量線としている低照度 I-V 測定から求めた前述の余寿命を推測する式(2)もしくは式(3)の結果と相互比較・補完することで、必要に応じて適宜、補正項の導入を改めて検討することとする。

なお本検討では、PV パネルの最大出力動作電圧  $V_{\text{pm}}$  の値を参考にして DC オフセット電圧の値を設定したが、 $V_{\text{pm}}$  の値を基準にせずとも、DC オフセット電圧を PV パネルに対して最大値まで印加した後、それを何等分かに分割した値に設定して測定しても、特に問題は無いと考える。

一方で、上記のように PV パネルごとに  $V_{\text{pm}}$  に対する DC オフセット電圧の最大値の割合が異なることや、測定に用いる適切な周波数を一意に設定することは容易とは言えない。そのため、信頼性のある結果を得るためには一定のノウハウが必要になると考えている。

## 2) アルゴリズムの検証

ここまで、過年度に加速劣化試験を施した PV セルにおける低照度 I-V 測定と、劣化の程度が異なる PV パネルにおける DC オフセット CCP 測定の 2 つの手法から求めた長期使用可能性予測アルゴリズムを用いて余寿命の推測式を提案した。この 2 つの手法による余寿命の推測式を、同一の PV パネルの測定結果、及び、加速劣化試験前後での結果を比較することで、2 つのアルゴリズムの検証を試みた。ここで余寿命の推測式には、式の傾向や妥当性も確認するため、補正項の a と b がそれぞれ 1 と 0 の最も単純な式(3)と式(5)を用い、低照度 I-V 測定結果から求めた余寿命を  $P_L$  (I-V)、DC オフセット CCP 測定から求めた余寿命を  $P_L$  (CCP)として、それぞれ式(3')と式(5')から推測するものとする。

$$P_L(\text{I-V})(\text{年}) = P_{L0} + 10 \times \{ (FF_{0m} / \alpha_m) \times \alpha + FF_0 - FF_{0m} \} \times S_t (\text{年}) \quad \dots\dots (3')$$

$$P_L(\text{CCP})(\text{年}) = P_{L0} \times (1 - Z'_{\text{DCL}} / |Z_{\text{DCH}}|) (\text{年}) \quad \dots\dots (5')$$

ここで、 $P_{L0}$  : PV セルの初期寿命

はじめに、過年度に温度サイクル試験を行った PV パネル 6 枚(表 3-3 中の #1 ~ #6)に関して、低照度 I-V 測定を行い、線形近似式の傾き  $\alpha$  と切片  $FF_0$  の関係を求めた結果を図 3-28 に示す。参考のため同図には、#3 及び #4 と同じメーカー・仕様で、温度サイクル試験を行っていない PV パネル(表 3-3 中の #9)の測定結果を白抜きの赤丸で示してある。

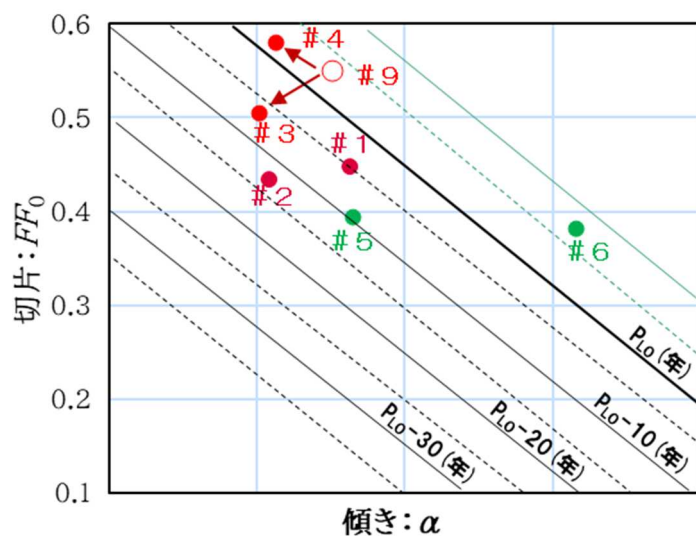
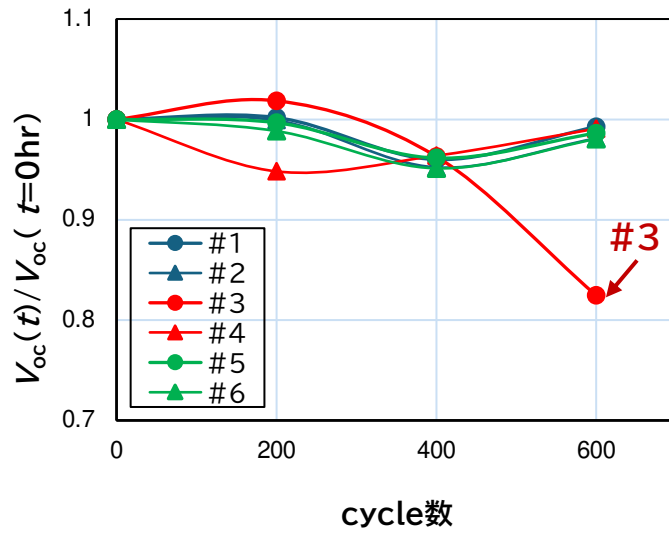


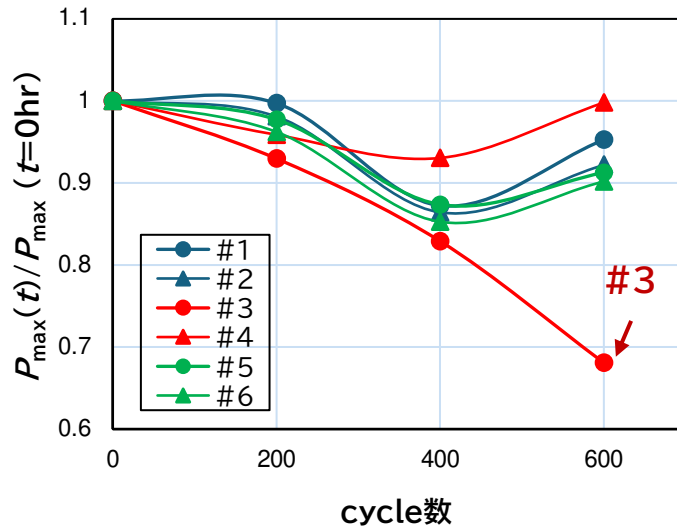
図 3-28 過年度に温度サイクル試験を行った PV パネルの曲線因子  $FF$  の照度  $I_L$  依存性における線形近似式の傾き  $\alpha$  と切片  $FF_0$  の関係

同じ PV パネルを追跡測定した結果ではないものの、温度サイクル試験を行っていない白抜きの赤丸で示した PV パネル #9 に対して、温度サイクル試験後の PV パネル #3 及び #4 の測定点は余寿命が短い方にあり、妥当な結果が得られた。シリコン半導体である PV セルの複数集合体である PV パネルにも、PV セルの I-V 測定から導出した劣化予測モデルが、そのまま適用可能であることが確認できた。

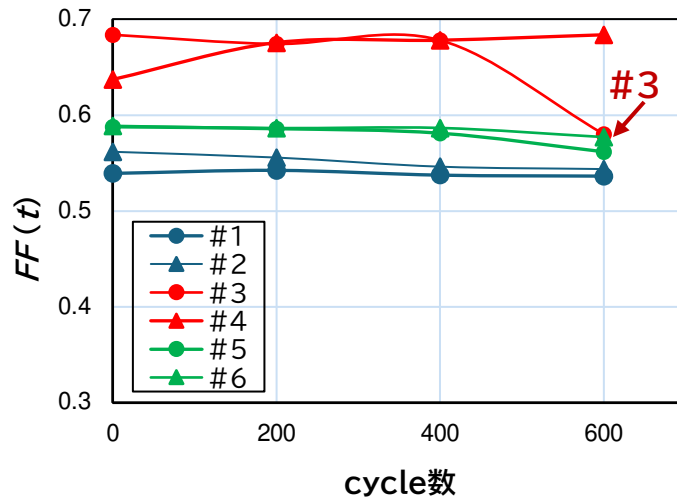
参考までに令和 6 年度の成果報告書に記載した同 PV パネル #1～#6 の開放電圧  $V_{oc}$ 、最大電力  $P_{max}$  及び曲線因子  $FF$  の温度サイクル試験の試験回数依存性の測定結果を図 3-29 に示す。



(a) 開放電圧  $V_{oc}$



(b) 最大電力  $P_{max}$



(c) 曲線因子  $FF$

図 3-29 温度サイクル試験前後での PV パネルの  $V_{oc}$ 、 $P_{max}$ 、 $FF$  の試験時間依存性

#1と#2、#3と#4、#5と#6はそれぞれ同じメーカー・同じ仕様のPVパネルである(表3-3参照)。また、#3に関しては、600 cycleの試験前に生じた物理的損傷による特性の劣化が認められる。それ以外の同じメーカー及び仕様のPVパネルでは、同じような特性の変化を示しており、上記の結果からでは、#3の余寿命が短い可能性があること程度しか推測できない。対して、提案した低照度I-V測定による余寿命推測では、#4よりも#3は余寿命が短いと推測できていることも、余寿命の推測式の妥当性を示していると言える。

次に、本年度に加速劣化試験用に用意したPVパネルの加速劣化試験前の余寿命を実際に推測してみる。用いたPVパネルは、PVCJ認定ルート施設で回収しリユース検査でOK判定となった使用済PVパネル5枚(以下「PVCJ回収品」と言う。)と、市販の中古パネル10枚(以下「市販中古品」と言う。)の合計15枚である。(表3-3参照)低照度I-V測定の結果を式(3')に用いて導出した余寿命 $P_L(I-V)$ と、DCオフセットCCP測定の結果を式(5')に用いて導出した余寿命 $P_L(CCP)$ との関係を図3-30に示す。白抜き赤丸はPVCJ回収品5枚、塗りつぶしの青丸は市販中古品10枚の測定結果である。なお、PVパネルの初期寿命 $P_{L0}$ は平均的な30年と仮定した。

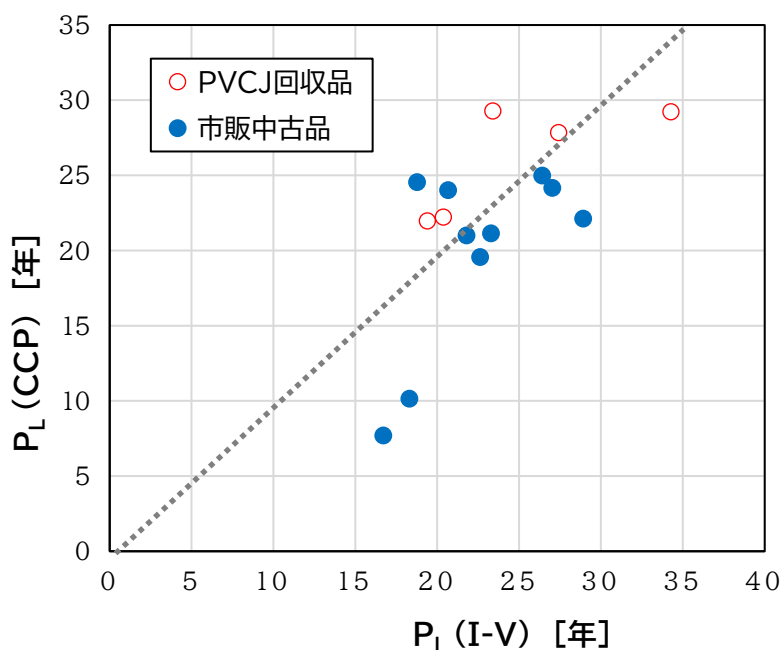


図 3-30 低照度 I-V 測定と DC オフセット CCP 測定から求めた余寿命の比較

図 3-30 より、補正項が入っていない単純な線形式の式(3')と式(5')の2つの式から2つの手法で求めた余寿命の差異は大きくとも5~10年程度で、全体的には同じような傾向及び値であることが確認できる。

ここで、2つの手法がそもそも何を測定しているのかを考えてみる。低照度I-V測定はPVパネルの受光面に光を照射した状態での発電性能の測定結果であり、光電効果を生じるシリコン半導体部分以外にも、封止材の変色による有効照度の低下(光の遮断)の影響等、PVパネルを構成する多くの要素の影響を反映したものである。一方でDCオフセットCCP測定は光が当たっていない遮光状態での測

定環境下で、DC オフセット電圧による疑似照射効果を用いて PV パネルの等価回路におけるシリコン半導体部の電荷移動抵抗  $R_{sh}$  及び配線部等の純抵抗  $R_s$  の電気回路部分の測定結果を反映したものである。したがって、両者は別の現象を反映しており、完全に一致することは考えにくい。しかしながら、両方で求めた余寿命がほぼ同じ傾向及び値となったことは、両者は共に一定の精度を有する長期使用可能性予測アルゴリズムであると言える。また、低照度 I-V 測定においては、過年度に行った PV セルの加速劣化試験の結果を検量線として用いていることも信頼性の後押しになっていると考える。

次に、令和 7 年度に温度サイクル試験を実施した 15 枚の PV パネルに関して、加速劣化試験前後に行った低照度 I-V 測定と DC オフセット CCP 測定それぞれから求めた余寿命をまとめたものを図 3-31 と図 3-32 に示す。

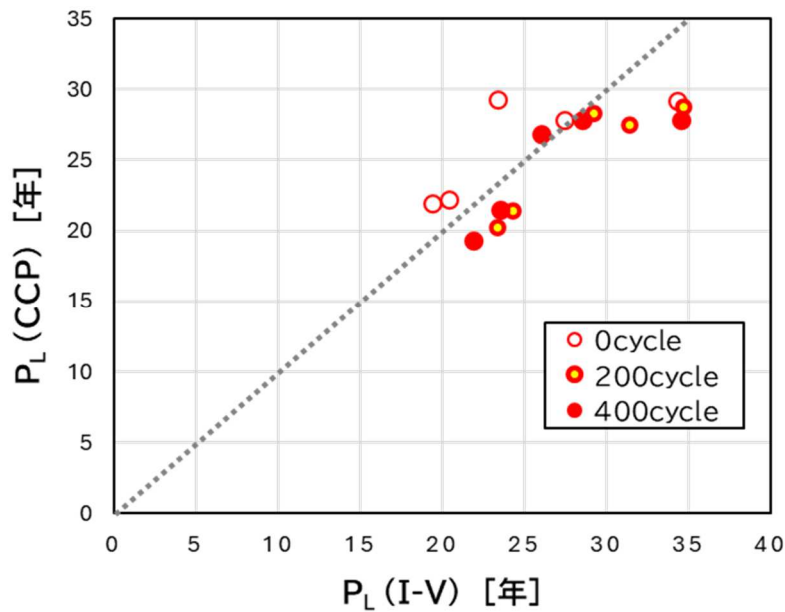


図 3-31 温度サイクル試験前後での余寿命の変化(PVCJ 回収品:5 枚)

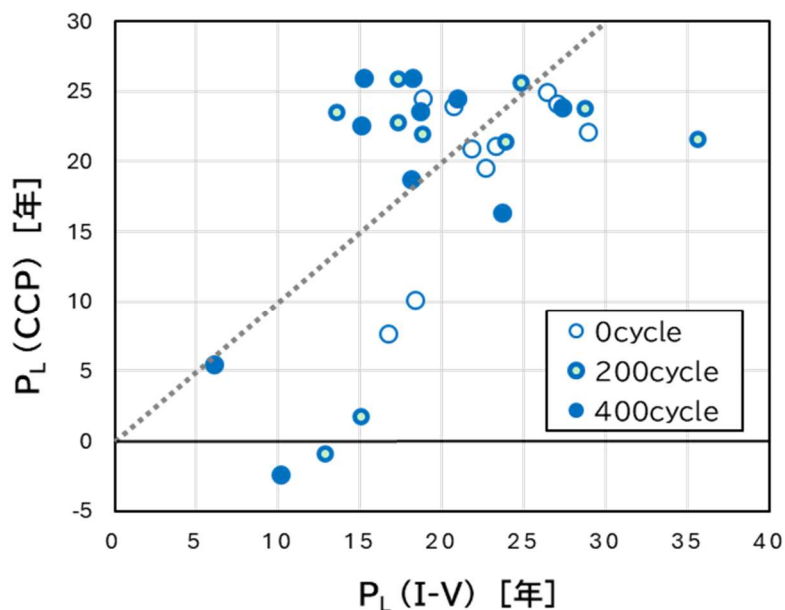


図 3-32 温度サイクル試験前後での余寿命の変化(市販中古品:10 枚)

図 3-31 に示す PVCJ 回収品では、補正項を導入せずとも 2 つの手法で求めた余寿命は、ほぼ同じ値・傾向となっている。

一方で、図 3-32 に示す市販中古品では、温度サイクル試験の実施により、比較的長い余寿命側 (20 年以上) で、低照度 I-V 測定による余寿命が 15~30 年ほどの範囲でばらついている。この要因には、2 つの方法で評価している現象が異なることや、令和 6 年度に報告のとおり、新品に近い PV パネルや PV セルに対して加速劣化試験を行うと、劣化の初期ではむしろ特性が良くなるという現象が反映されたとも考えられるが、詳細は不明である。また、試験回数が進むと DC オフセット CCP 測定による余寿命の値がマイナスになる現象も見られる。これが正しければ、実際のリユースの判断に大きく影響することになる。仮にマイナスの余寿命が適切でない根拠がある場合、余寿命の推測に式(5')ではなく補正項のある式(4)を用い、その補正項である  $a$  に 1 以下の値、 $b$  にプラスの値を適用することで、低照度 I-V 測定による余寿命との差異を小さくする考慮が必要と考える。

例えば、余寿命が 25~30 年程度の長い領域ではほぼ同じで、概ね 10 年未満の短い領域で見られる 10 年ほどの余寿命の差異を半分程度補正する目的で、補正項に  $a=5/6$ 、 $b=5$  を用いて、図 3-32 を補正すると、図 3-33 となる。

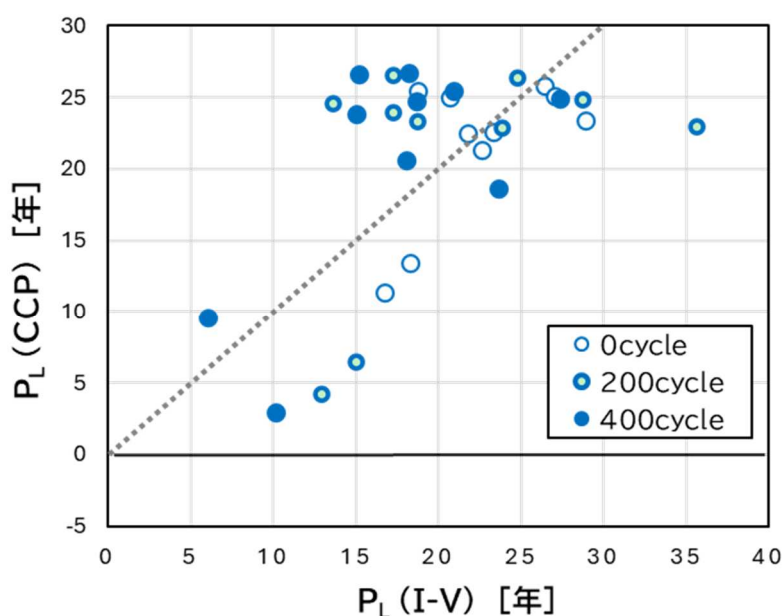


図 3-33 DC オフセット CCP 測定からの余寿命推測式に補正項を導入した際の温度サイクル試験前後での余寿命の変化( $a=5/6$ 、 $b=5$ )

前記の補正項の導入により、長い余寿命の領域では大きな変化は無いが、短い余寿命の領域でのマイナスとなる箇所は解消され、想定した補正を行うことができた。現状、DC オフセット CCP 測定結果からの余寿命の推測に関しては、その信頼性や定量性に関するエビデンスは決して十分であるとは言えない。そのため、過年度の各種加速劣化試験の結果をエビデンスとする低照度 I-V 測定結果からの余寿命推測で比較補完をしていることは、本事業での重要な成果である。しかしながら、次節の「(2) 使用済 PV パネルの実測」においては、低照度 I-V 測定による余寿命推測値で相互補完を行うことはできない。

したがって、ある程度短い寿命側での差異が小さい状態となる余寿命の推測式を用いることが妥当と考えられるため、次節では、 $a=5/6$ 、 $b=5$ とした式(4)で DC オフセット CCP 測定での余寿命を推測することとする。

次に、PV パネルの余寿命の平均値を温度サイクル試験の回数・時間ごとにグラフにしたものを図 3-34 に示す。ここで市販中古品 10 枚に関しては補正項の組み合わせが、 $(a=1, b=0)$ と $(a=5/6, b=5)$ の 2 つのケースを示す。

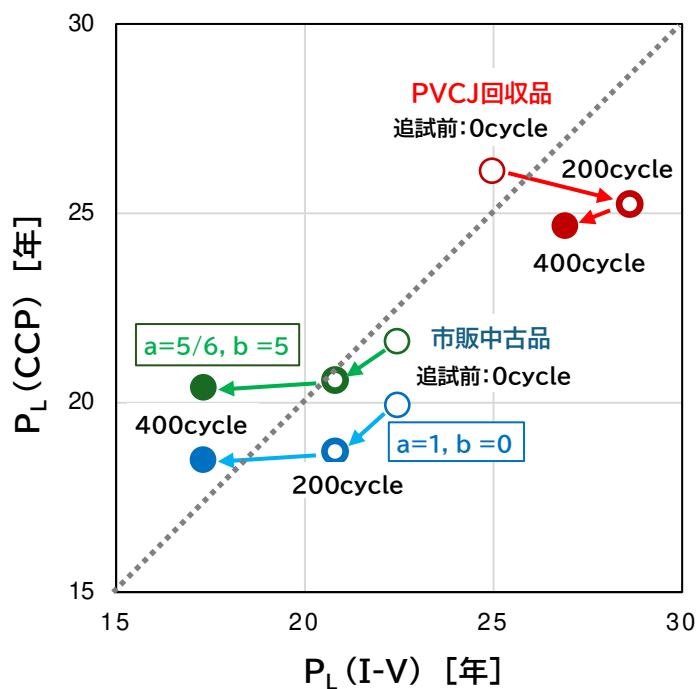


図 3-34 温度サイクル試験前後での余寿命の平均値の変化

低照度 I-V 測定及び DC オフセット CCP 測定から求めた余寿命は、試験回数の増加に伴ってほぼ同じように減少している。ここで減少する余寿命の年数は、200 cycle ごとに 1~2 年程度である。本事業において過年度に実施した温度サイクル試験は、200 cycle で実環境における 5~10 年に相当するとされている。しかしながらこの温度サイクル試験には、PV セルや PV パネルの劣化に対して影響が大きい紫外線や水分の影響が含まれていない。過年度に PV セルに対して行った加速劣化試験の結果から、紫外線や水分の影響を含む耐候性試験に対して温度サイクル試験では、各測定値の変化が 1~2 割程度に留まっていた。本検討における低照度 I-V 測定による劣化予測モデルは、その耐候性試験の結果を余寿命変化量の検量線として用いている。したがって、実時間相当で 5~10 年相当の温度サイクル試験から推測される余寿命の変化が、その 1~2 割程度の 1~2 年程度と求められたことは妥当であると言える。

今回用いた使用済 PV パネルは、新品時の余寿命自体が明確にはなっていない状況にある。そのような背景と、更には PV パネルの仕様・諸元、リユース診断までの経緯が分からない状況においても、提案した 2 つの長期使用可能性予測モデルを用いて測定時点での余寿命を推定した結果には、一定程度の信頼性・精度があると考えられる。

以上より、長期使用可能性予測アルゴリズムとして、低照度 I-V 測定結果と DC オフセット CCP 測定結果から提案した 2 つのアルゴリズムはどちらも適用可能と考える。ここで、DC オフセット CCP 測定は PV パネルを暗幕等で覆い、遮光することで測定が可能であるため、低照度 I-V 測定よりも周囲環境の影響を受けずに測定を行うことが可能である。DC オフセット CCP 測定は、使用済 PV パネルがある様々な実際の現場で活用でき、より実用的な余寿命推測の手段と言える。

## (2) 使用済 PV パネルを用いたアルゴリズム検証

実際の使用済 PV パネルにおいては、加速劣化試験を実施して試験前後の比較から劣化の程度を評価することができないため、回収した時点での劣化の程度を評価する手法が必要になる。

使用済 PV パネルの長期使用可能性を予測する場合、提案した 2 つの測定手法のうち、低照度 I-V 測定では、照度を変更可能な暗室に近い環境が必要となることから、DC オフセット CCP 測定の方が実用的である。その際に必要な測定環境・システムは、PV パネル用に試作した DC オフセット CCP 測定装置(RCUV2.0)とその制御用 PC、DC オフセット電圧印加用の直流電源、商用電源やポータブル電源等の装置駆動用の電源と遮光用の暗幕が最低限あれば、現状でも屋内外場所を選ばずに余寿命推測が可能である。

そこで使用済 PV パネルについて、DC オフセット CCP 測定の実測定及び余寿命の判定を行ったので、その結果について記す。

### 1) 劣化予測判定機器の作製

令和 6 年度に PV パネルの DC オフセット CCP 測定が可能な「SolarGen DC-Z Analyzer」(図 3-25(a))を試作した。この装置は、PV パネルの CCP 測定に必要な十分な DC オフセット電圧を印加できることを特徴とする。PV パネルの処理施設等において、複数台による On-Site 測定を実施する際に装置間の測定誤差が解析に与える影響の有無を確認することを目的として、同様の装置をもう一台製作した。

令和 6 年度に製作した装置を DC-Z Analyzer2024 とし、本年度製作した装置を DC-Z Analyzer 2025 とし、この 2 台の装置を使って、試料番号#4 の使用済 PV パネルの DC オフセット CCP 測定を行った。DC オフセット電圧を 0V、5V、10V、15V、20V、25V と変えて印加し、その各電圧において周波数を 20Hz から 1MHz まで変化させた CCP 測定を行った。その結果を図 3-35 に示す。印加可能な DC オフセット電圧の範囲において、2 台の装置でほぼ同一の測定結果が得られることが確認できた。

DC オフセット電圧が大きい場合に、2 台の装置の間で測定値にわずかに差異が生じた。この要因として、両装置は同一仕様の電子部品で同一の回路構成で製作しているものの、使用部品のばらつき等による測定誤差が考えられる。

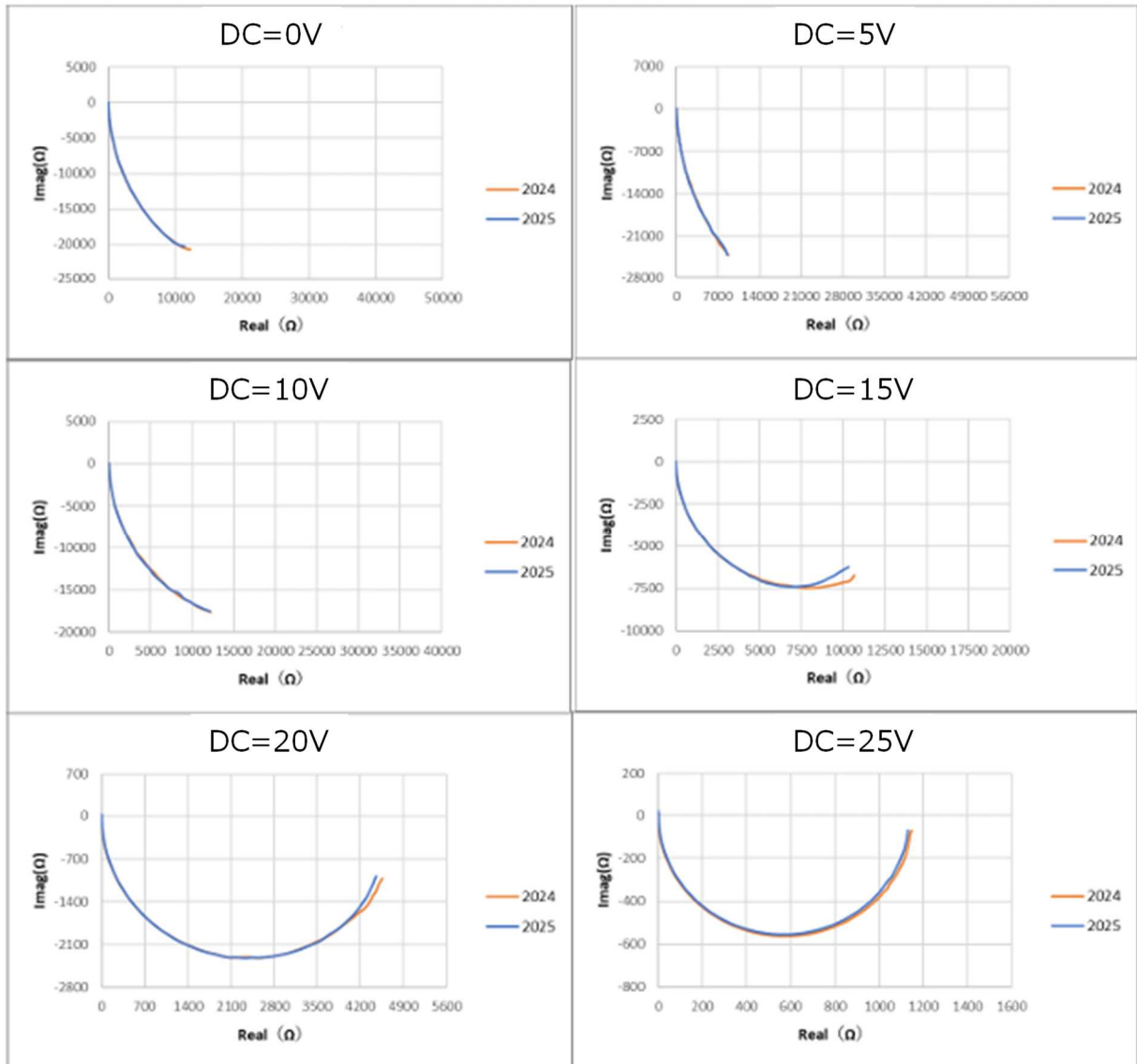


図 3-35 2 台の試作機で測定した DC オフセット CCP

## 2) 使用済 PV パネルの長期使用可能性予測と余寿命判定

本年度、国内 3 か所で行った使用済 PV パネルの長期使用可能性予測及び余寿命判定は、図 3-36 に示すフローチャートに基づく手順で行った。

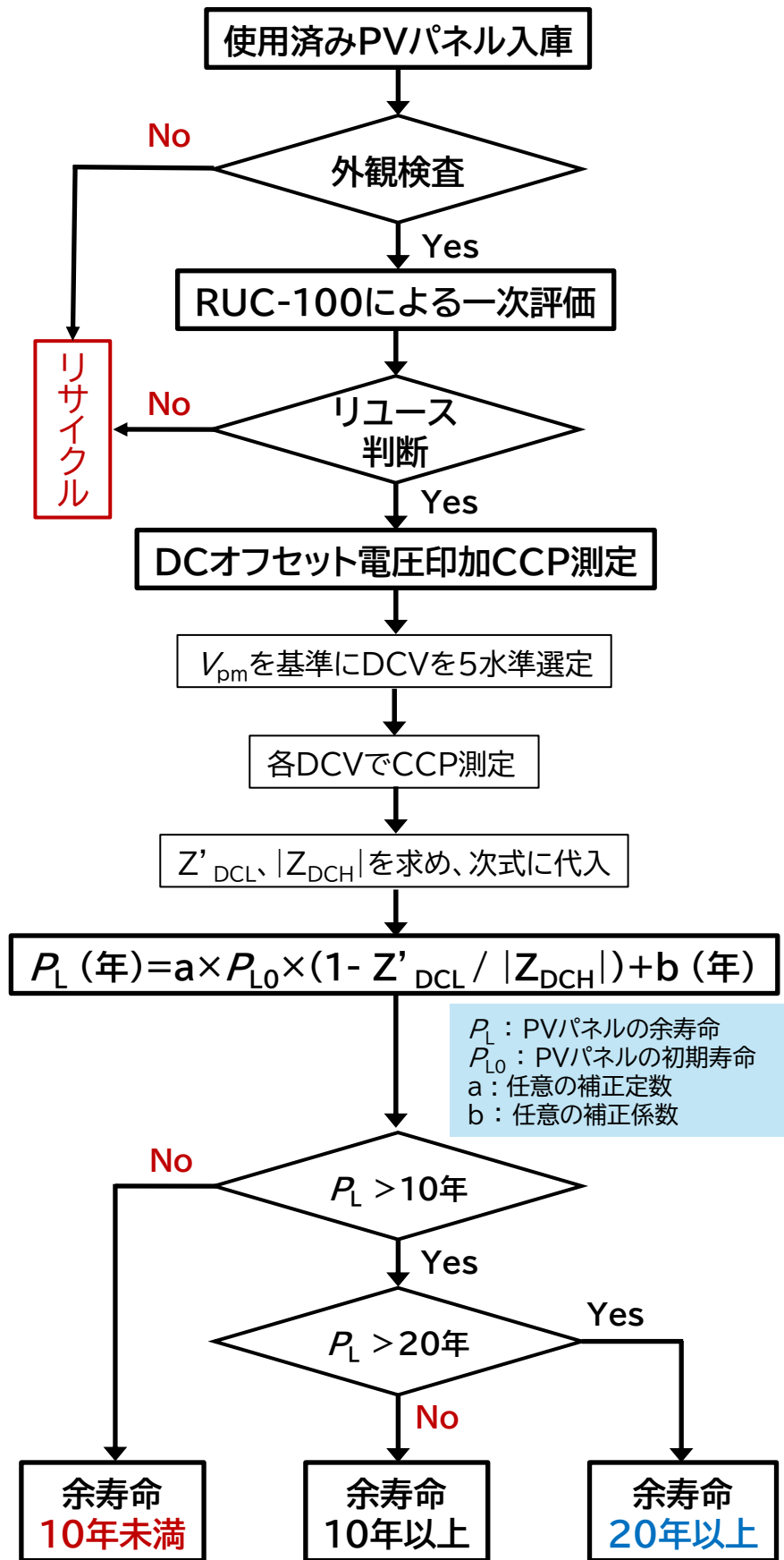


図 3-36 使用済 PV パネルの長期使用可能性予測と余寿命判定の手順

使用済 PV パネルは外観検査で合格したものを、市販のリユースチェッカーRUC-100(図 3-37)でリユースとリサイクルの判断を行う。リユース可能と判定された PV パネルに関しては、余寿命判定によってランク分けするために、DC オフセット CCP 測定を試作機で行う。今回の測定に用いた DC オフセット電圧は、PV パネルの最大電力動作電圧  $V_{pm}$  を参考に、その 20%、40%、60%、80%の電圧、及び、印加可能であった最大電圧の 5 水準を用い、各 DC オフセット電圧を印加して CCP 測定を行った。これらの結果より、DC オフセット電圧が低い場合のインピーダンスの実部  $Z'_{DCL}$  と DC オフセット電圧が高い場合のインピーダンスの絶対値  $|Z_{DCH}|$  を用いて式(4)から余寿命を推測した。

推測した余寿命から今回は、余寿命が 10 年未満、10 年以上 20 年未満、20 年以上の 3 水準に分類して判定するアルゴリズムとした。



図 3-37 リユースチェッカーの外観

出所)株式会社アイテス、リユースチェッカーRUC-100、<https://www.solamente.biz/products-and-service/products/ruc-100/> (閲覧日:2026 年 2 月 5 日)

なお、一般的な PV 発電所における DC-AC 変換器(通称パワコン)等の交換を含む大規模改修が 10 年程度で行われることから、10 年を最初の余寿命の閾値とした。一般的なパワコンに使われている電解コンデンサの寿命は 10 年程度であり、パワコンの寿命(概ね 10 年)を律速(支配)しているという現状に基づいている。

### 3) 使用済 PV パネルの実測定及び余寿命判定

国内 3 か所の PV リユース・リサイクル関連施設において、RUC-100 で OK 判定された使用済 PV パネル 83 枚に対して余寿命判定を行った。その結果を図 3-38 に示す。製造年が古い PV パネルの多くは劣化が進んでおり、余寿命が短く、製造年が新しい PV パネルは余寿命 20 年以上と判定される傾向となった。

データを詳細に考察すると、製造年が新しい PV パネルでも劣化が進んだものや、DC オフセット CCP 測定の直前に行った RUC-100 測定で NG 判定となるものが一定量(今回の測定では6枚)存在した。この原因として、入庫後の保管・移動によりバイパスダイオードの異常や純抵抗  $R_s$  の増大が影響した可能性が考えられる。リユース発電所の設置においては、このようなパネルが混入することで、発電所としては短寿命となるため、事前に余寿命判定を行うことは有用と考える。

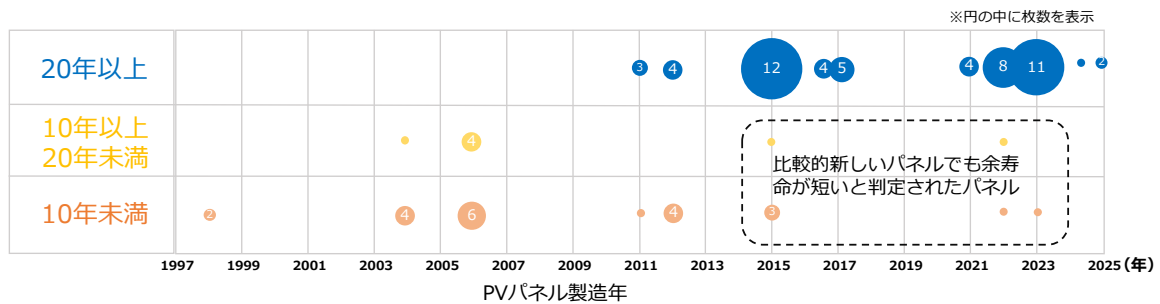


図 3-38 使用済 PV パネルの製造年に対する余寿命判定の分布

余寿命判定結果を用いて、以下の観点でそれぞれの PV パネル枚数を整理した。結果を図 3-39 に示す。

- 測定を行った PV パネルのセル構成( P 型:Al-BSF 系/PERC、N 型:HIT/TOPCon)
- 余寿命判定結果(余寿命 20 年以上/10 年以上 20 年未満/ 10 年未満)

本事業で測定した PV パネルでは、相対的に、P 型パネルで余寿命が長く、N 型パネルは余寿命が短い傾向がそれぞれ確認された。近年の報告<sup>11</sup>では、メーカー仕様との相違の指摘もあるが、余寿命判定は、セル構成以外の要因(製造年代や設置環境、品質管理等)にも左右されるため、更なる検証が必要である。

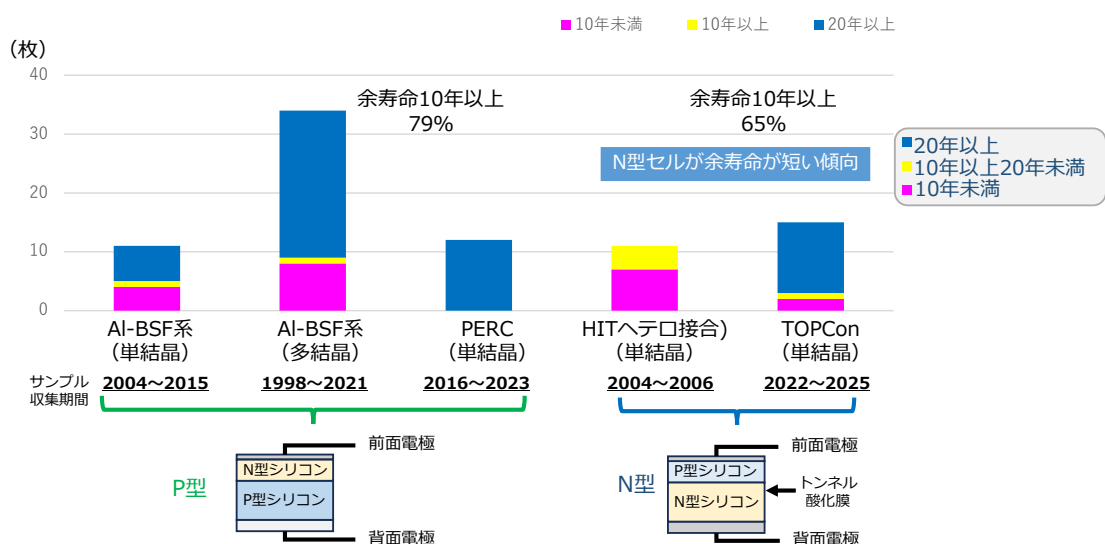


図 3-39 PV パネルのセル構成と余寿命判定の関係

<sup>11</sup> 電力中央研究所、Annual Report 2019 , 2-2

### (3) まとめ

本事業を通じて、シリコン型使用済 PV パネルに対して、長期使用可能性予測モデルを確立し、更には、余寿命判定アルゴリズムまで確立できたと考える。

実証期間中、リユース PV パネルで発電事業を行う事業者に対し、当該事業者が保有する PV パネルの長期使用可能性予測モデルによる余寿命判定結果を提供し、データの有用性を確認することができた。また、リユース発電所を検討している事業者からは、実用化を切望する声もあり、今後、製品化や測定サービスソリューションの構築が必要と考える。

なお、本事業を通じて確立した一連の長期使用可能性予測モデル及び余寿命判定アルゴリズムについて特許出願の予定である。

## 3.2 異なる型式の使用済 PV パネルからなる太陽光発電設備の設置・運転

3.1 のとおり、本事業においては、使用済 PV パネルの長期使用可能性を定量的に評価・予測するための技術的手法について、一定の知見を得ることができたと考えられる。一方で、リユースの社会実装を進める上では、個々のパネルの健全性評価に留まらず、異なる型式・製造年代の使用済 PV パネルを組み合わせ構成した太陽光発電設備を、実環境下でどのように運用し得るかについての実証的知見の蓄積が重要である。

このため、本年度は、東北大学屋上に設置したリユース太陽光発電設備を対象として、実運転データに基づく発電性能の把握及び運用上の留意点の整理を行った。本節では、当該リユース発電所の設備構成及び運転状況に加え、PV パネル組み替え前後における発電特性の変化等について整理し、異なる型式の使用済 PV パネルを用いた発電設備の運用に関する基礎的な知見を示す。

### 3.2.1 実証の目的

本事業では、異なるメーカー・型式・製造年代からなる使用済 PV パネルを用いて構成した太陽光発電設備を、実環境下で運転し、その発電性能及び運用上の留意点を整理することを目的とした。

特に、使用済 PV パネル特有の課題であるパネル間特性差が発電性能に与える影響について、運転データに基づき検証を行った。

### 3.2.2 設備概要及びシステム構成

本事業で用いた太陽光発電設備は、東北大学屋上に設置され、使用済 PV パネル 8 社 11 種類、計 84 枚と 7 台のパワーコンディショナ(PCS)により構成されている。

使用済 PV パネルは、同一型式で構成されたアレイと、異なる型式のパネルが混在したアレイの双方を含んでおり、実際のリユース利用を想定した構成とした。

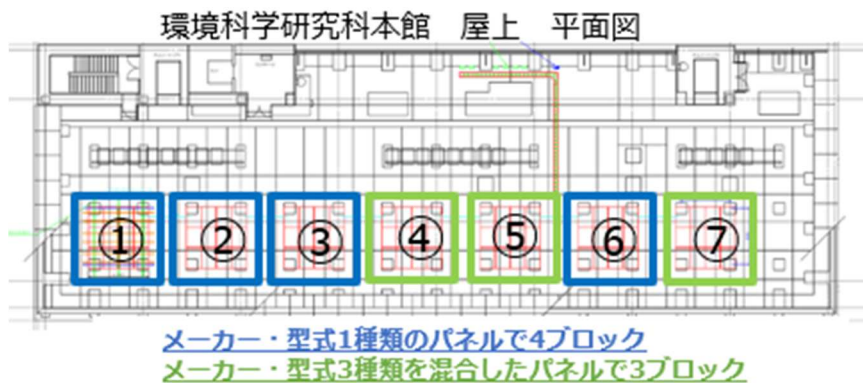


図 3-40 設備概要及びシステム構成

運転データの取得にあたっては、以下の 2 種類の監視システムを併用した。

- PCS 単位で発電量を把握可能な監視システム
- パネル単位の稼働データを取得可能な PPLC(電力線通信)IoT システム

これにより、システム全体の発電量評価とパネル単位の性能評価の双方を可能とした。

### (1) パネル組み替えの実施内容

使用済 PV パネルは、メーカーや型式の違いにより最大出力動作電圧 ( $V_{pm}$ )、開放電圧 ( $V_{oc}$ ) 等が異なる場合がある。

本設備では、初期状態において、特性の異なるパネルが同一 PSC 内に混在しており、ストリング間の電圧ミスマッチが確認された。

そこで、令和 7 年 9 月に、ミスマッチ損失の低減を目的として、各パネルの電気的特性を考慮し開放電圧を±10%以下になるようストリングの組み替え(再構成)を実施した。

組み替え後については、設計図面と現地設備の配置・結線状態が一致していることを確認した。

パネル組み換え前							パネル組み換え後						
ストリング No	社名	型式	枚数	ストリング開放電圧	最大出力	PCS 合計出力	ストリング No	社名	型式	枚数	ストリング開放電圧	最大出力	PCS 合計出力
PCS①	1-1	A社	A-1	6	224.4	255	PCS①	1-1	A社	A-1	6	224.4	255
	1-2	A社	A-1	6	224.4	255		1-2	A社	A-1	6	224.4	255
PCS②	2-1	B社	B-1	6	247.8	360	PCS②	2-1	B社	B-1	6	247.8	360
	2-2	B社	B-1	6	247.8	360		2-2	B社	B-1	6	247.8	360
PCS③	3-1	C社	C-1	6	174.6	131	PCS③	3-1	C社	C-1	6	174.6	131
	3-2	C社	C-1	6	174.6	131		3-2	C社	C-1	6	174.6	131
PCS④	4-1	E社	E-2	4	156.4	285	PCS④	7-1	B社	B-1	4	165.2	360
	4-2	A社	A-2	4	156.4	295		5-3	F社	F-1	4	206.4	215
	4-3	A社	A-3	4	214.4	410		4-3	A社	A-3	4	214.4	410
PCS⑤	5-1	E社	E-1	4	117.6	180	PCS⑤	5-1	E社	E-1	4	117.6	180
	5-2	C社	C-1	4	116.4	131		5-2	C社	C-1	4	116.4	131
	5-3	F社	F-1	4	206.4	215		6-1	D社	D-1	6	172.2	82
PCS⑥	6-1	D社	D-1	6	172.2	82	PCS⑥	6-1	D社	D-1	6	172.2	82
	6-2	D社	D-1	6	172.2	82		4-1	E社	E-2	4	156.4	285
PCS⑦	7-1	B社	B-1	4	165.2	360	PCS⑦	4-2	A社	A-2	4	156.4	295
	7-2	G社	G-1	4	156.88	285		7-2	G社	G-1	4	156.88	285
	7-3	H社	H-1	4	160.4	300		7-3	H社	H-1	4	160.4	300

PCS④最大-最小= 58.0V  
 PCS⑤最大-最小= 90.0V  
 PCS⑦最大-最小= 8.32V

（ストリング開放電圧差が大きい）

PCS③最大-最小= 9.4V  
 PCS④最大-最小= 8.0V  
 PCS⑤最大-最小= 1.2V  
 PCS⑦最大-最小= 4.0V

（ストリング開放電圧差を±10%以下に再編成）

図 3-41 パネル組み替えの実施内容

## (2) 組み替え前後における発電効率評価

PCS 単位で取得した月別の積算発電量データを基に、日射量等の影響を補正した発電効率を算出し、パネル組み替え前後の比較評価を実施した。

その結果、組み替え実施後の発電効率は約 10%向上していることが確認された。

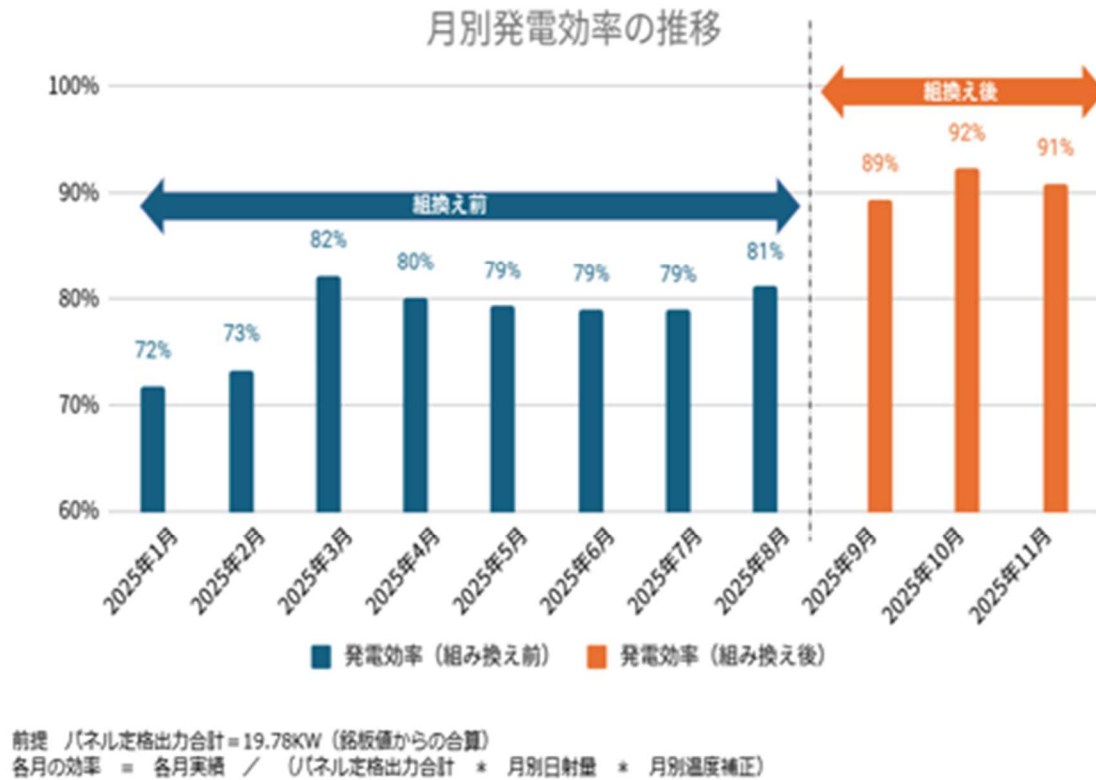


図 3-42 月別発電効率の推移

日射量が多い日、中程度の日、少ない日のいずれの条件においても、発電量改善の傾向が認められており、パネル組み替えによる効果が示唆された。

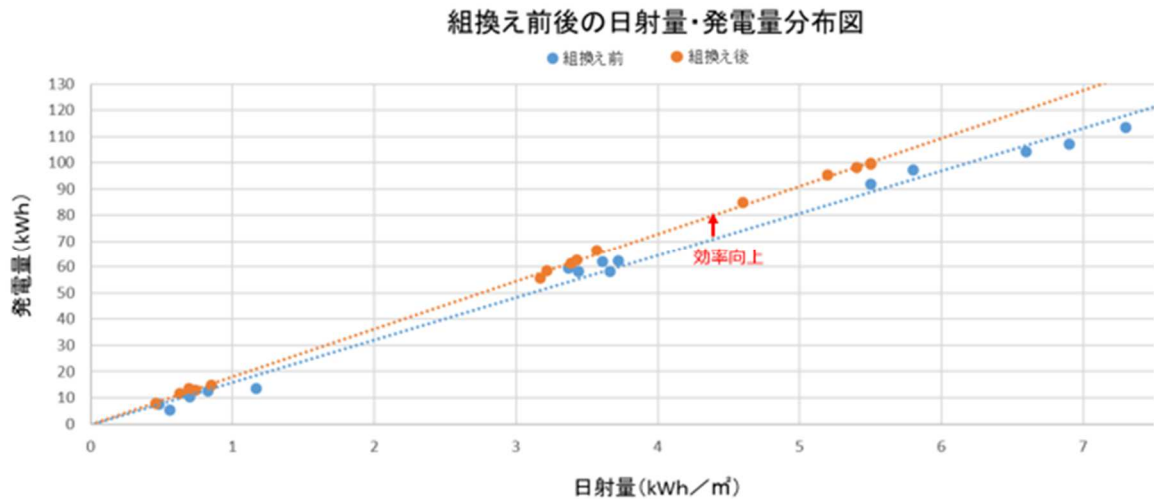


図 3-43 組み替え前後の日射量・発電量分布図

### 3.2.3 パネル単位の性能評価

パネル単位の性能評価では、快晴日を対象として、日射量及び温度条件を考慮した理論出力と、PPLC システムによる実測値との比較を行った。

その結果、評価対象とした大部分の使用済 PV パネルにおいて、実測値は理論値の誤差範囲内に収まり、顕著な性能劣化は確認されなかった。

表 3-7 パネル単位の性能評価

※使用年数情報がないため、経年劣化を不考慮とする。

メーカー	型番	日射	760	W/m <sup>2</sup>	温度	27.23		
1-2	A社	A-1	銘板	理論	理論差	平均	最大	最小
			255	192	-2%	189	190	186
1-1	A社	A-1	255	192	-2%	対平均比	1%	-1%
						対平均比	3%	-2%
2-2	B社	B-1	銘板	理論	理論差	平均	最大	最小
			360	271	1%	273	277	271
2-1	B社	B-1	360	271	3%	対平均比	1%	-1%
						対平均比	1%	-3%
3-2	C社	C-1	銘板	理論	理論差	平均	最大	最小
			131	99	1%	100	101	98
3-1	C社	C-1	131	99	1%	対平均比	1%	-2%
						対平均比	3%	-3%
4-3	A社	A-3	銘板	理論	理論差	平均	最大	最小
			410	222	0%	222	223	221
4-2	A社	A-2	295	222	0%	対平均比	0%	-1%
						対平均比	1%	-1%
4-1	E社	E-2	285	215	-2%	211	214	208

5-3	F社	F-1	銘板 215	理論 162	理論差 1%	平均 163 対平均比	最大 167 2%	最小 157 -3%
5-2	C社	C-1	131	99	5%	104 対平均比	106 2%	101 -3%
5-1	E社	E-1	180	136	4%	141 対平均比	143 2%	138 -2%
6-1	D社	D-1	銘板 82	理論 62	理論差 -25%	平均 46 対平均比	最大 51 9%	最小 43 -7%
7-3	H社	G-1	銘板 300	理論 226	理論差 1%	平均 228 対平均比	最大 234 3%	最小 217 -5%
7-2	G社	G-1	285	215	-3%	208 対平均比	209 1%	204 -2%
7-1	B社	B-1	360	271	0%	272 対平均比	274 1%	269 -1%

※1 4-3のデータについては、令和7年9月6日時点で取得できなかったため、別日(令和7年3月1日)の値で代用した。結果は以下のとおり。

メーカー	型番	日射	217.5	W/m <sup>2</sup>	温度	9.01		
4-3	A社	A-3	銘板 410	理論 95	理論差 3%	平均 98	最大 99	最小 97

パネルの理論出力は、以下の計算式を用いて算出した。

- 発電出力  $t = \text{傾斜面日射量} \times \text{温度損失} \times \text{パネル容量}$

具体的には、個別パネルの銘板値(STC:標準試験条件)を基準とし、日射量及び温度変化による補正、更に経年劣化を考慮して、以下の式により最大出力の理論値を算出した。

- 理論出力  $t = (\text{irr} / 1000) \times [1 - (T - 25) \times \text{温度損失係数}] \times \text{銘板値} \times [1 - \text{経過年数} \times \text{経年劣化率}]$

- 【計算条件】

本章では、令和7年9月26日12時の観測値を例に挙げ、以下の値を設定

- irr(傾斜面日射量): 760W/m<sup>2</sup>
- T(環境温度): 27.23℃
- 銘板値: パネルごとに異なる
- 温度損失係数: -0.4%/℃(リユースモデルの特性を考慮した前世代製品の一般的数値)
- 経年劣化: 0.5%/年

本章では、PPLC クラウドによる観測値と上記で算出した理論値を比較することで、各パネルの稼働性能を評価した。なお、本分析は簡易評価を目的としたものであり、温度補正には環境温度を用いているためセル温度を直接測定したのではなく、また各計測機器に起因する誤差については考慮していない。

2025年9月26日12時の平均

出力の平均

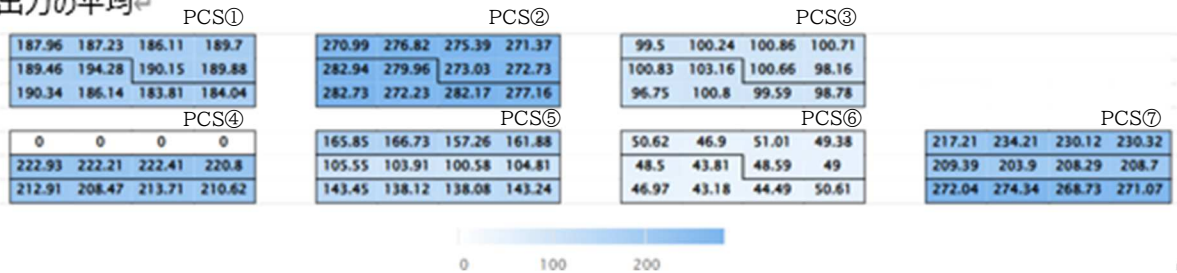


図 3-44 PPLC クラウドによる観測値

### 3.2.4 他試験手法との比較検証

#### (1) PPLC による実測データとエレクトロルミネッセンス試験の相関

クラウドデータ上のPPLC 実測データ(発電性能)と、設置時に実施したエレクトロルミネッセンス試験(以下「EL 試験」)結果との相関について検証を行った。その結果、PCS⑥を除く使用済 PV パネルでは、EL 試験においてセル欠陥が確認された場合であっても、発電性能の著しい低下には必ずしも直結しないケースが多いことが確認された。このことから、EL 試験結果のみを基に運用可否を判断する際には留意が必要であることが示唆された。

No.112 271 (W) Cd	No.113 277 (W)	No.114 275 (W)	No.115 271 (W)
No.119 283 (W)	No.118 280 (W)	No.117 273 (W)	No.116 273 (W) Cd
No.120 283 (W) Cm	No.121 272 (W) Cd	No.122 282 (W)	No.123 277 (W) Cd

2-2	B社	B-1	銘板	理論	理論差	平均	最大	最小
			360	271	1%	273	277	271
						対平均比	1%	-1%
2-1	B社	B-1	360	271	3%	280	283	272
						対平均比	1%	-3%

図 3-45 PPLC による実測データと EL 試験との相関(PCS②)

発電量(W)を比較した結果、Cd、Cm が発生している使用済 PV パネルと健全な使用済 PV パネル

との間に顕著な差は認められなかった。

Na 160 51(W) Cd	Na 161 47(W) Cd	Na 162 51(W) Cd	Na 163 49(W) Cd
Na 167 49(W) Cd	Na 166 44(W) Cd	Na 165 49(W) Cd	Na 164 49(W) Cd
Na 168 47(W) Cd	Na 169 43(W) Cd	Na 170 44(W) Cd	Na 171 51(W) Cd

6-1	D社	D-1	銘板	理論	理論差	平均	最大	最小
			82	62	-25%	46	51	43
						対平均比	9%	-7%

図 3-46 PPLC による実測データと EL 試験との相関(PCS⑥)

一方、PCS⑥については、他の使用済 PV パネルと比較して顕著な発電性能の低下が確認された。設置時の EL 試験では、当該 PCS に接続された全ての使用済 PV パネルに Cd が確認されており、EL 試験結果と発電性能との間に整合が認められた。

当該パネルの型式に関する文献調査等の結果から、1990 年代後半に製造された可能性が高く、25 年以上使用されていたと推定される。これらの状況を踏まえると、PCS⑥における発電性能低下は、リユース前の長期使用に伴う経年劣化が発電性能の低下に影響している可能性があると考えられる。

【異常モード/名称】	【EL画像例】	【定義】	【交換必要性】	【出力保証対象】	【診断理由】
Cd セル内欠陥		セル内の一部で暗部がみられる	×	×	公称最大出力の80%以下とならないため。複数枚あった場合にも、発電量に与える影響は小さい。
Cm セル抜け		セル1枚が完全に暗転	×	×	公称最大出力の80%以下とならない

図 3-47 EL 試験の凡例

注釈)着色無しは健全な状態

## (2) PPLC による実測データと I-V 特性試験の相関

実運用条件下における発電量の実測値平均は 273W であったのに対し、I-V 特性試験(以下「IV 試験」)により算出された最大出力は 352.8W と、パネル銘板値(360W)に近い値を示した。この IV 試

験結果のみから判断すると、当該使用済 PV パネルは比較的高い性能を有しているように解釈される可能性がある。

一方で、IV 試験は測定時の日射条件に強く依存する特性を有しており、特に日射強度が十分でない条件下では、得られた測定結果が実運用時の発電性能を必ずしも正確に反映しない場合がある。

本検討における IV 試験も低日射条件下で実施されていることから、算出された最大出力値については一定の不確実性を含む可能性がある。そのため、IV 試験結果の解釈にあたっては、実測発電量との乖離を踏まえた慎重な評価が必要である。

2-2 B社 B-1

Pmanは352.8W※で、銘板値の360Wの約98%であった。



図 3-48 PCS② No.115 IV 試験結果

### 3.2.5 考察

本事業において確認された発電性能の改善は、主としてストリング再構成により、パワーコンディショナ(PCS)の最大電力点追従制御(MPPT)が動作する電圧条件が適正化されたことによるものと考えられる。

ストリング再構成にあたっては、設計段階における管理指標として、各ストリングの開放電圧( $V_{oc}$ )が過度に乖離しないよう、概ね±10%以内の範囲に収まるよう整理を行った。 $V_{oc}$  は実運転時における動

作電圧そのものを直接示す指標ではないものの、ストリング間の電圧特性を相対的に把握・比較する上で有効な指標である。この指標を用いることで、ストリング間において極端な電圧特性差が生じない構成とした。

その結果、実運転時における各ストリングの最大出力動作電圧( $V_{pm}$ )についても、ストリング間のばらつきが抑制される傾向が確認された。これにより、PCS における MPPT 制御が、複数ストリングに対して概ね同一の電圧領域で安定的に動作しやすい状態となり、ストリング間の電圧特性差に起因するミスマッチ損失が低減されたものと考えられる。

一方で、実運転時の発電性能には、ストリング構成や電気的特性の差異に加え、モジュール温度の空間分布や日射量の不均一性といった外的要因も影響を与える。本事業において確認された発電性能の改善は、これらの要因の影響を完全に排除した上で評価されたものではないものの、ストリング再構成後において MPPT 制御が安定的に機能し、発電量の改善が継続的に確認されたことから、電圧特性の整理による効果が主要な要因の一つであると判断した。

リユースパネルは、新品パネルと比較して、製造年代や使用履歴、劣化状態の違い等に起因する電気的特性のばらつきが避けられない。このため、単純に設置するのみではなく、各パネル及びストリングの電気的特性を考慮した設計や、必要に応じたストリングの組み替えを行うことが重要である。こうした対応により、PCS の MPPT 制御を適切に機能させ、外的要因の影響を受けつつも発電性能を安定的に確保できることが、本事業を通じて示された。

### 3.2.6 まとめ

本事業により、異なる型式・製造年代の使用済 PV パネルを用いた太陽光発電設備においても、適切な設計及び運用を行うことで、十分な発電性能を確保できることが確認された。

特に、ストリング間の電圧特性の整合性確保が、使用済 PV パネル活用における重要な技術的ポイントであることが明らかとなった。本知見は、今後の使用済 PV パネルの普及及び資源循環型社会の構築に向けた検討に資するものと考えられる。

## 4. PV パネルのリユース・リサイクル事業展開に向けた関係業界との連携構築

---

本報告書 2. 及び 3. に記載した結果を踏まえて、PV パネルのリユース・リサイクル促進に向けた事業展開の方針を検討した。検討にあたっては、PV パネルの製造やリユースとリサイクルに関わる業界団体や関係者と意見交換を行った。

### 4.1 関係業界との意見交換

#### 4.1.1 意見交換の対象事業者等

本年度事業で意見交換を行った業界と関係者は、以下のとおりである。

- PV パネルの製造<sup>12</sup>
  - PV パネルを製造する事業者
- PV パネルのリユース・リサイクル処理
  - リユース PV パネルを活用した発電事業を検討中の事業者
  - PV パネルの廃棄物処理を行っているまたは検討中の事業者
  - ハンドヘルド XRF を販売する事業者
  - 製品情報を複数の事業者間で閲覧可能とするサービスを提供する事業者
- PV パネルの再資源化で得られたガラスの利用
  - PV パネルの再資源化で得られたガラスのカレットを取り扱う事業者
  - 再資源化したガラスの利用業者
- PV パネルのリサイクル処理の研究
  - 公設試験研究機関

#### 4.1.2 主な聞き取り結果

業界の関係者と意見交換を行った。意見交換にあたっては、ヒアリング相手に対して、本事業で得られた結果を説明した。その上で、本事業に対する期待や、ヒアリング相手の事業・研究と本事業の接点（国等への要望を含む）に関して聞き取りを行った。加えて、事実関係を整理する観点から、ヒアリング相手の事業内容・研究内容に対する聞き取りも併せて行った。

---

<sup>12</sup> 本事業では PV パネルを製造する複数の事業者にヒアリングを申し込んだものの、ヒアリングに応じたのは 1 事業者のみであった。そのため、本報告書に示すヒアリング結果は、PV パネルの製造業界の統一見解と解釈し得ない点について、留意が必要である。

## (1) PV パネルの製造の業界関係者からの主な聞き取り事項

- 同じ製造工場、同じ製造年に作られた同じ型式の PV パネルであっても、PV パネルのガラス中の含有物質が同じとは限らない。なぜならば、PV パネルの構成部品(ガラス含む)は、単一の調達先から入手しないとイケないというルールになっていないため。事業のリスクマネジメントの観点からも、単一の調達先から PV パネルの構成部品を入手することは考えにくい。なお、ガラスの製造者が、ガラスの原材料をどのように管理しているかは分からない。仮に PV パネルを製造する事業者に対して、ガラスの含有物質の把握が求められるようになれば、PV パネルの産業界への負担が大きくなるか。

## (2) PV パネルのリユース・リサイクル処理の業界関係者からの主な聞き取り事項

### 1) リユース

- 本事業で検証している PV パネルの余寿命判定は、リユース PV パネルを活用した施設を運転・維持管理する観点から、有益な知見を提供するものと考えている。具体的には、あらかじめリユース PV パネルの余寿命判定結果を得ておくことで、運転・維持管理時に、他の PV パネルに比べてより注意を払って管理すべき PV パネルを特定しておくことができるためである。

### 2) リサイクル処理

- 当社の PV パネルの再資源化で得られたガラスは、グラスウールの原料として利用されている。PV パネルのガラスの含有物質については、当社で分析をしていない<sup>13</sup>。PV パネルの再資源化で得られたガラスは、必ずしも全てがグラスウールの原料として出荷できるわけではない。グラスウールの原料として出荷できなかったガラスについては、引き続き出荷先を探索中である。国等に対しては、PV パネルの再資源化で得られたガラスの受入基準の策定・公表を期待する。現在当社は、PV パネルの再資源化で得られたガラスを利用する各業者と 1 対 1 で、ガラスの受入基準を相談し、すりあわせしている。
- 本事業で得られた結果とこれまでに当社が蓄積したデータを比較すると、PV パネルのガラスからのヒ素の検出率が高い。今後、PV パネルのリサイクル処理では、ガラスの含有物質の分析が不可欠になるのではないかと。一方、現場の操業実態を踏まえると、ガラスの含有物質の全数検査にリサイクラーは対応することができるのだろうか。どのような単位(PV パネル各 1 枚の単位なのか、PV パネルの各型式の単位なのか、等)でガラスの含有物質の分析を行うのか、判断が必要になるだろう。本事業で得た含有物質の判別方法の共通化の検討結果は、ハンドヘルド XRF の分析値のばらつきに対し分析条件を揃える等、丁寧にデータを取得した稀な例。含有物質の分析方法の共通化が、品質や販売価格の差別化を図る機会となり得るか関心がある。
- 本事業で得られた結果を見る限り、PV パネルのガラスの含有物質のハンドヘルド XRF による分析は、実務的にも十分に通用する結果という印象を受けた。ハンドヘルド XRF の測定結果は、測

<sup>13</sup> 「ただし、取引先・関係者から分析結果をヒアリングすることを通して、PV パネルのガラスの含有物質の概況は把握している」との旨のコメントも、併せて聞き取りをした。

定モード、校正条件、試料マトリクス(例:ガラス)、試料形状や均質性等の影響を受ける可能性がある。そのため、精密分析(例:ICP-MS)と比較する際には、測定条件の整理や対象試料に応じた校正条件の設定が重要である。一方で、元素や試料条件によっては精密分析結果との間に一定の相関が得られる場合があり、対象試料に応じた校正(補正式の設定)を行うことで、現場でのスクリーニング用途に適用できる可能性がある。なお、PV パネルのリサイクルが義務的でなく、またガラスの含有物質に関するルールが未設定の現状下では、PV パネルの構成部品の含有物質を分析する意義について、ハンドヘルド XRF のユーザーから理解を得にくい。

- 欧州廃自動車規則案を背景に、自動車業界ではトレーサビリティ管理に関するニーズが高まっている。また、バッテリー規則でバッテリーパスポートが 2027 年から義務化されることを受けて、バッテリー関係もトレーサビリティ管理を起因とするニーズがある。本事業の結果を見る限り、PV パネルのサプライチェーンのどのタイミングでデータを読むかにより、QRコード、RFID等のどれが適当かわ変わってくる。デジタル技術を使ったトレーサビリティ管理をリサイクル処理の現場に導入することにより、現場の作業効率の改善や、人手不足の緩和といった操業の改善効果も期待できる。

### 3) PV パネルの再資源化で得られたガラスの利用

- 当社は、PV パネルの再資源化で得られたガラスのカレットをリサイクラーから得て、再資源化したガラスの利用業者に供給している。ガラスのカレットの含有物質の分析は、当社で行っていない。PV パネルの再資源化で得られたガラスの品質が規格化されれば、ガラスのカレットの個別取引ごとの品質の確認の負担が軽減されるだろう。ガラスは単価が安く、遠距離を輸送すると輸送費がかさむ。再資源化で得られたガラスの利用促進には、国による環境整備が必要なのではないか。
- ヒ素を含有するガラスを原料として受け入れることには、慎重である。ヒ素を含有するガラスを原料として用いて製品の製造を行うと、製造過程の環境管理や安全衛生管理が困難になる可能性がある。アンチモンについては、今後定量管理が必要になる可能性がある。本事業の結果を見る限り、ハンドヘルド XRF の分析結果は高い精度という印象を受けた。ハンドヘルド XRF を用いて、リサイクル処理の現場で PV パネルの受入スクリーニングを行ってはどうか。ガラスに一定量以上のヒ素を含有する PV パネルの処分方法については、国から方針が示されると良い。また、本事業終了後も、PV パネルのガラスの含有物質の情報取得を継続してはどうか。
- 本事業で得られた結果を見る限り、ヒ素やアンチモンの含有量の分布を把握した点は評価できる。当社では、PV パネルの再資源化で得られたガラスを原料にして、試験的に製品を製造したことがある。試験終了後、一定の時間が経過したが、製造工程や製品の保管・出荷に問題は報告されていない。原料として利用するガラスカレット中の含有物質については、自社で分析している。含有物質に応じてガラスのカレットをグレード分けすることで、用途別に使用可能な原料を効率的に選択することも期待できるのではないかと。また、本事業で整備したガラスの含有物質情報を参照すれば、自社で行う原料の品質検査を簡素化できる可能性がある。ヒ素については、エンドユーザーからの安全性への懸念に応えるため、管理が求められる。アンチモンについては、ガラス溶融炉への悪影響が懸念され、炉内部で分離・残留すると設備の侵食や損傷の恐れがある。

## 4) PV パネルのリサイクル処理の研究

- 本事業で得られた結果を見る限り、PV パネルのガラスの含有物質に関して、網羅的な分析結果（年代・メーカー別の整理）を得た点は、研究上の価値があると言える。ヒ素とアンチモンについて、どういった有害性がどの程度あるのか、国で整理することが必要ではないか。廃棄物削減を前提とするなら、人体への影響を踏まえつつ、社会性のある管理基準の設定が必要ではないか。公設試験研究機関では、前処理の条件、機種別に同一試料でも含有物質の分析値が異なる課題に対応するため、共通化された手法を提示し、板ガラスの主成分の共通化を図っている。なお、共通化の対象元素に微量元素（ヒ素や鉛）は含めていない。また、ハンドヘルド XRF は共通化の検討対象の機器に含めていない。なお、結晶シリコンの粉末と酸化アンチモンを含有するガラスを高温状態にするとガラスが黒変する。PV パネルのリサイクル処理方法を選択する際には、結晶シリコンの粉末の混入に留意する必要がある。<sup>14</sup>

### 4.1.3 ガラスのリサイクル処理についての考察

#### (1) 本事業開始の段階で立てていた仮説

本事業では、客観的な情報が不足していたため、本事業開始の段階で、以下の仮説を立てていた。

- PV パネルのガラスの含有物質は、PV パネルのメーカー・製造年が同じであれば、概ね同じとみなせるのではないか。
- PV パネルのガラスの含有物質が分かれば、PV パネルのガラスのリサイクル処理が促進されるのではないか。

これらの仮説を検証する意図で、本事業の下では、メーカー別出荷量シェアの経年変化を踏まえて既設の PV パネルのガラスのサンプリングを行い、ガラスの含有物質の分析を行った。併せて、PV パネルのメーカーに対して、PV パネルのガラスの含有物質に関するヒアリングを行った。

加えて、PV パネルの再資源化で得られたガラスの利用業者に対して、再資源化したガラスの利用にあたっての含有物質の位置付けに関してヒアリングを行った。

#### (2) 仮説の検証結果

##### 1) PV パネルのメーカー・製造年からの含有物質の把握について

本報告書 2.1.3 (1)1)に示すとおり、PV パネルのガラスの含有物質については、以下の結果が得られた。

- ヒ素
  - 計 159 サンプルのガラスのうち、25%にあたる 39 サンプルからヒ素が検出された。ヒ素の検

<sup>14</sup> この他、ガラスの熱処理による溶出特性の評価に関して、本報告書 2.1.3 (1)3)b)に示すとおりコメントを得た。

出と PV パネルのメーカー・製造年に、大きな関係は見られなかった。

- アンチモン

- アンチモンは、PV パネルのメーカー・製造年を問わず、計 159 サンプル中、全体の 97%にあたる 155 サンプルのガラスで検出された。

加えて、本報告書 4.1.2 (1)に示すとおり、PV パネルを製造する事業者 1 社に対して、PV パネルのガラスの含有物質に関して、ヒアリングを行った。結果、同一工場・同一製造年の PV パネルであっても、ガラスの含有物質が同一とは限らないのではないかとの旨の示唆を得た。更に、仮に PV パネルを製造する事業者に対して、ガラスの含有物質の把握が求められるようになれば、PV パネルの産業界への負担が大きくなるかとの旨の示唆も得た<sup>15</sup>。

更に、本事業の中で入手した 4 種類の異なる型式の PV パネルについては、以下の分析値を得た。

- 各型式について、少なくとも 2 枚の PV パネルを入手した。
- XRF でガラスを分析したところ、いずれの型式においても、1 枚の PV パネルのガラスからはヒ素が検出された一方、同じ型式の他の PV パネルのガラスからはヒ素が検出されなかった。

以上から、PV パネルの型式等の属性情報に紐付ける形で、含有物質の情報を整備することは現実的ではないと、本事業では考えた<sup>16</sup>。

## 2) リサイクル処理促進の視点からの PV パネルのガラスの含有物質情報の位置付け

本報告書 4.1.2 (2)3)に示すとおり、PV パネルの再資源化で得られたガラスの利用業者に対してヒアリングを行った。結果、PV パネルのガラスのリサイクル処理の促進にあたっては、PV パネルのガラスの含有物質情報が重要であるとの旨のコメントが得られた。

具体的には、ヒ素については、製造時の環境管理と労働者の安全性の確保及び製品の利用者の安全性の確保の観点で懸念され得るとの示唆を得た。本事業では、ヒ素を含有するガラスに対しては懸念が示されていると考えた。

アンチモンについては、製造設備を侵食・損傷する可能性があるとの旨のコメントを得た。また、製品の色(品質)に影響を与える可能性があるとの旨のコメントも得た。ヒ素のように含有そのものに対して懸念が示されているのではなく、アンチモンの含有量の大小が関心事項になっていると、本事業では考えた。

以上から、PV パネルのガラスの含有物質情報(具体的には、ヒ素の含有の有無とアンチモンの含有量の大小に関する情報)を、PV パネルの再資源化で得られたガラスの利用業者に対して伝達することで、PV パネルのガラスのリサイクル処理が促進されると考えた。

---

<sup>15</sup> PV パネルを製造する事業者 1 社に対して行ったヒアリングで得た示唆であるため、PV パネルの製造業界の統一見解と解釈し得ない点について、留意が必要である

<sup>16</sup> ただし、本事業終了後、更なる含有物質のデータ蓄積・傾向等の解析が進むことで、含有物質を優先的に確認する必要があるメーカーや型式等を示唆できる可能性はまだ残されているはずである。

### (3) リサイクラーの現場での PV パネルのガラスの含有物質の把握

本事業では、PV パネルの型式等の属性情報から、ガラスの含有物質情報を推計することは困難と整理した。そのため、リサイクラーの現場で PV パネルのガラスの含有物質情報を取得することを、実証要素として扱った。具体的には、ハンドヘルド XRF を用いてガラスの含有物質を分析することの有効性を、本事業では検証した。検証の結果は本報告書 2.1.3 (1)2)に示したとおり、以下のようにまとめられた。

- ヒ素
  - リサイクラーが現場でハンドヘルド XRF を用いて、ヒ素含有量 10mg/kg 未満の水準で、PV パネルのガラスからのヒ素の検出有無を判別できるとの見通しを得た。
- アンチモン
  - 検量線の補正を適用することで、ハンドヘルド XRF によるアンチモンの分析結果の精度向上が期待できると考えられた。

### (4) リサイクラーとガラスの利用業者から得られた意見

リサイクラーの現場で PV パネルの含有物質をハンドヘルド XRF により分析して、分析結果に応じて PV パネルそのものや PV パネルのガラスの仕向け先を変えること(本報告書では、「一次スクリーニング」と便宜的に呼称している)について、リサイクラーと PV パネルの再資源化で得られたガラスの利用業者から意見を得た。結果は、令和 6 年度事業の報告書及び本報告書 4.1.2 (2)2)及び 3)に示すとおりである。具体的には、以下に示す意見・示唆を得た。

- ハンドヘルド XRF の分析結果は高い精度という印象を受けた。ハンドヘルド XRF を用いて、リサイクル処理の現場で PV パネルの受入スクリーニングを行ってはどうか。
- 現場の操業実態を踏まえると、ガラスの含有物質の全数検査にリサイクラーは対応することができるのだろうか。
- リサイクラー側で、PV パネルの含有物質の分析方法等が共通化されると良い。
- 含有物質の分析方法の共通化が、品質や販売価格の差別化を図る機会となり得るか関心がある。

なお、含有物質の分析方法の共通化については、本報告書 2.1.3 (1)2)に示すとおり、共通化に向けた分析条件の整理を行った。

### (5) 国への要望等

リサイクル促進に係る事業の推進にあたり期待する法制度等に関して、表 4-1 に整理した。

「環境保全を意図した情報発信等に係る事業」については、環境基準確保に係る法規制等の整備を伴うため、国主導での実施が適切と考えられる。

また、伝達すべき情報の把握及びその伝達手法に関する課題の対応策として、本事業では、含有物質情報の取得及び整備のみならず、ガラス中の含有物質判別の共通化にも取り組んだ。共通化された判別方法をもって含有物質が判別されたガラスカレットは、一定の付加価値が付与されると共に、リサイクル促進にも寄与するものと考えられる。一方、現時点では、ヒ素を含有するガラスカレットの取り扱い

に関する国の指針が未整備である。このため、当該指針が示されることにより、「ガラス中の含有物質の判別方法の共通化に係る事業」の社会実装が一層加速するものと考えられる。

表 4-1 リサイクル促進に係る事業の推進にあたり期待する法制度等

リサイクル促進に係る事業	実証の結果得られた示唆	期待する法制度等
環境保全を意図した情報発信等に係る事業	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 環境庁告示第 46 号にしたがってガラス中のヒ素の溶出試験を行った結果、土壤環境基準を超過するサンプルがあった。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● PV パネルの再資源化で得られたガラスを利用する事業に対して、土壤環境基準の確保を求める仕組み</li> <li>● 本事業の成果を社会に周知するような公共セクターが主体の取組</li> <li>● PV パネルのガラスの含有物質についての継続的な情報蓄積(本事業終了後以降に国内に出荷された PV パネルのガラスの含有物質の調査、等)</li> </ul>
ガラス中の含有物質の判別方法の共通化に係る事業	<ul style="list-style-type: none"> <li>● もし PV パネルのガラスの含有物質の判別方法を共通化できれば、ガラスカレットには品質面の価値が付与され得る。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ヒ素が検出されたガラスカレットの利用または処分に関する指針、等</li> <li>● PV パネルのガラスの含有物質を判別するための装置の導入の補助</li> <li>● リサイクラーの現場での PV パネルのガラスの含有物質の検査工程の最適化に関する実証</li> </ul>

## 4.2 本事業を通じた成果・波及効果

本事業は、令和 5 年度から 3 年間実施しており、3 年間の全体工程概要は図 4-1 に示すとおりである。本事業の実施にあたって設定した最終目標に対する成果と、本事業の成果を活用することによる波及効果について、表 4-2 のとおり整理した。

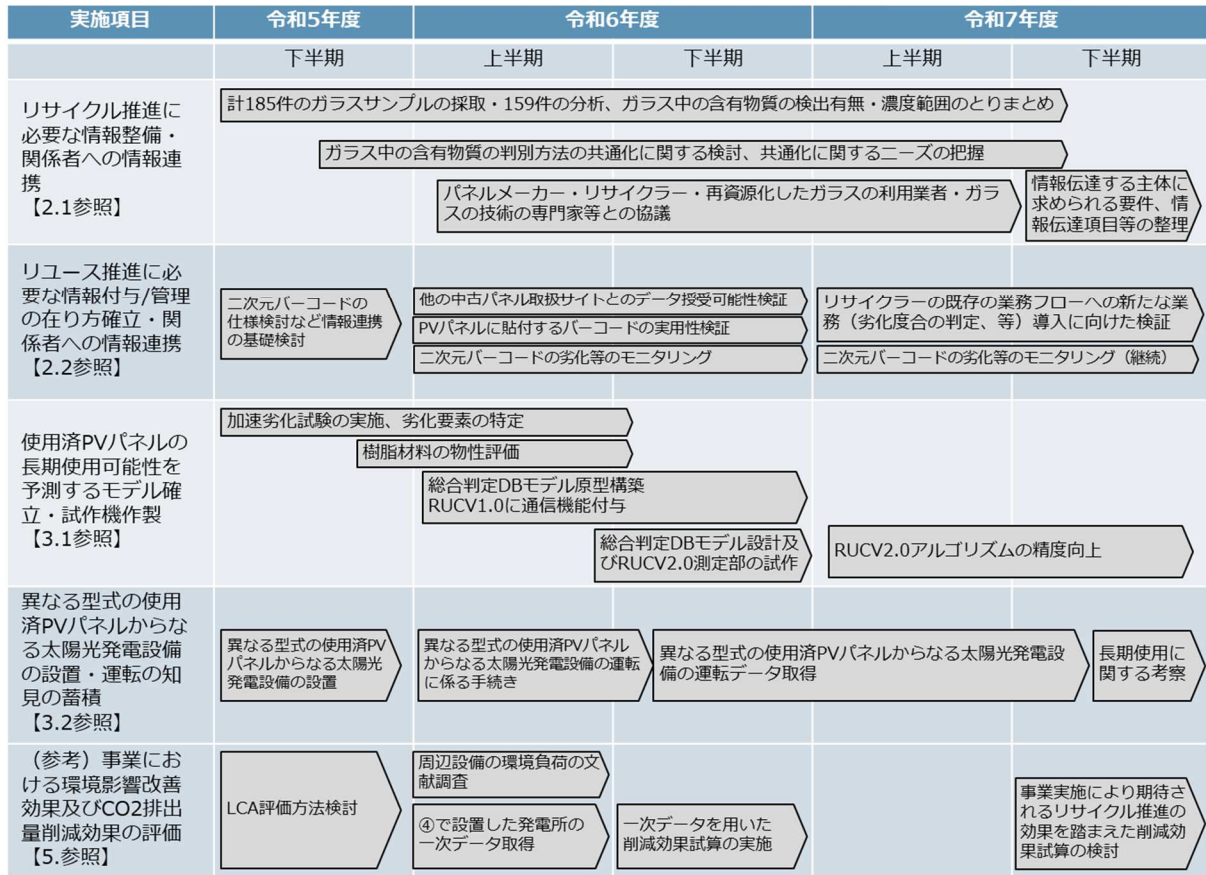


図 4-1 本事業の全体工程概要

表 4-2 本事業を通じた成果・波及効果

課題	本事業の最終目標	本事業の成果	波及効果
リサイクル推進のためのデータ不足	現在日本に設置されている3億枚を超えるPVパネルに関し、よりリサイクルを推進する判断のために不可欠な、分離された部材の有害/忌避物質情報をリサイクラー等の関係者へ提供することで、リサイクル促進に向けた事業体制を作る。	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 3年間の実証事業を通して、市場に多く流通するPVパネルから計181サンプルを採取、計159サンプルのガラスを分析した。結果、約25%のガラスでヒ素が検出された。</li> <li>● ガラスからのヒ素の溶出試験を行った。結果、溶出量は含有量に比例して増えること、サンプルの粒径に反比例して溶出量が増えることが分かった。含有量と粒径によっては、土壌環境基準を超過する場合があることも分かった。</li> <li>● ガラスは、含有物質を確認して、適切に利用するべきと考えられた。</li> <li>● 今後、環境基準確保に向けた情報発信等を行っていくことが重要と考えられた。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 本事業の成果を活用した情報発信等が行われることで、環境保全の観点を取り入れた形で、<b>PVパネルのガラスの再資源化の促進が期待される。</b></li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>● ヒアリング調査を行うことで、再資源化したガラスの利用促進にあたっては、含有物質の情報不足と伝達手段がボトル</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 本事業の成果を活用することで、<b>含有物質の判別方法の共通化が行われることが期待される。</b></li> </ul>

		<p>ネックになっていることが分かった。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● また、一部の中間処理業者ではガラスの含有物質の判別を行っているものの、中間処理業者間で含有物質の判別手法が共通化されていないという課題があることが分かった。そのため、ガラス中の含有物質の判別方法の共通化には、ガラス再資源化業者のニーズがあることが分かった。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 判別方法の共通化が行われ、中間処理業者から再資源化したガラスの利用業者に含有物質の情報伝達が行われることで、<b>再資源化したガラスの利用促進が期待される</b></li> </ul>
長期使用・リユースの意思決定を行うための判断基準が不足	リユース向け PV パネルの流通にあたって必要な情報の付与・管理の在り方を確立し、リユース PV パネルユーザー等の関係者へ情報連携を行う。	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 二次元バーコードを PV パネルに貼付の上「集約拠点での保管・管理」等正確かつ効率的な管理について検証した。</li> <li>● 本検証での検証項目である二次元バーコードの「読取距離」、「作業効率性」について問題無いことを確認した。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 直接効果として、二次元バーコードにより PV パネルの入出庫・在庫・検査情報がリアルタイムで正確に管理され、<b>作業効率と誤出荷防止が向上する。</b></li> <li>● これにより、<b>情報の信頼性が高まり、PV パネル循環基盤促進が期待される。</b></li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>● RUC-100 の測定結果をクラウド上に保存可能な RUCV1.0 を試作した。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 複数の PVCJ ルート施設のデータをクラウドで一元管理することで、リユースパネルの在庫数をリアルタイムに把握でき、購入判断が迅速に行えるようになることで、<b>リユース市場の拡大が期待される。</b></li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 過去の実証試験等で構築した他社 PV パネルの販売サイトと情報連携を試みて技術的に掲載可能であることを確認した。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 販売チャネルの選択肢が増えることで<b>再エネ機器の循環利用促進と市場拡大が期待される。</b></li> </ul>
太陽光発電所の長期使用可能性や、太陽光発電所から取り外したパネルのリユース可能性を予測するモデルを確立し、短時間で判定可能な試作機を作製する。		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 推定寿命を 3 段階(20 年以上/10 年以上 20 年未満/10 年未満)に判定するアルゴリズムを構築した。</li> <li>● 劣化試験を実施した使用済 PV パネルを用いて、アルゴリズムの検証、精度向上を図った。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 本判定技術が普及することで、<b>リユース促進、セカンダリー市場におけるデューデリジェンスや O&amp;M 診断、リパワリング実施時における PV パネルの張替要否の判断等、様々な場面での活用が期待される。</b></li> <li>● このように本技術は、事業者が合理的な意思決定を行うための判断材料を提供し、<b>PV パネルのリユースの促進が期待される。</b></li> <li>● 東北電力としては、使用済 PV パネルを活用したリユース C-PPA 事業において、リユース PV パネル調達時に長期使用可能性の判定結果の活用することを期待しておりアルゴリズムに関する特許も出願予定。</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>● アルゴリズムを含む総合判定 DB モデル設計及び RUCV2.0 測定部を試作し、判定実施及び DB への格納が可能であることを確認した。</li> <li>● リユース PV パネルで発電事業を行う事業者に対し、長期使用可能性の判定結果を提供し、データの有用性を確認した。</li> </ul>	
リユース PV パネルを用いた発電所における、円滑かつ効率的な運用方法を確立する。		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 運転データの取得及び解析により、リユースパネルを用いた運用方法について知見を蓄積した。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● スtring 単位で異なる型式のパネルを使用しても、開放電圧差を 10% 程度に抑える構成とすれば十分に活用可能であることが確認された。上記により、使用用途の拡大による<b>リユースの促進が期待される。</b></li> </ul>

### 4.3 本事業終了後の事業化構想及び課題の整理

本事業では、必ずしも製造・販売時、設置時の情報が入手できない既設の PV パネルに着目し、撤去（排出）以降の情報連携プラットフォーム（以下「プラットフォーム」と言う。）の運営事業を念頭に検証を実施してきた。その成果を踏まえ、プラットフォーム運営事業の実装に向けた課題及び、本事業の検討から生まれた新たな事業アイデアである「リユース C-PPA (Corporate PPA) 事業」について述べる。

#### 4.3.1 プラットフォーム運営事業

##### (1) 実装に向けた課題

本事業を通じて得られた示唆や、事業化を進める上での課題等について表 4-3 に示す。リサイクル促進及びプラットフォーム運営事業の実装に向けた主な課題は、大きく分けて、①伝達すべき情報の把握及びその伝達手法に関する課題、②プラットフォーム運用体制に関する課題の 2 点が挙げられる。

表 4-3 プラットフォーム運営事業の実装に向けた検証結果

主な現状課題	実証の結果得られた示唆	事業化を進める上での課題
<b>【含有物質情報把握及び伝達手法】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 現在、再生資源として PV パネルのガラスが利用されているものの、一部の利用方法では環境への配慮が十分に行われているのかが不明。</li> <li>● 再資源化したガラスの利用業者への含有物質の情報伝達がより高い解像度で行われることで、更なるガラスの利用促進が期待される。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 本事業ではガラスからのヒ素の溶出試験を行った。結果、溶出量は含有量に比例して増えること、サンプルの粒径に反比例して溶出量が増えることが分かった。<u>含有量と粒径によっては、土壤環境基準を超過する場合がある</u>ことも分かった。今後、環境基準確保に向けた情報発信等を行っていくことが重要と考えられた。</li> <li>● PV パネルメーカー 1 社にヒアリングしたところ、製品化の段階でガラスの含有物質情報の把握は困難との示唆を得た。現在、一部の中間処理業者にて PV パネルのカバーガラスの含有物質が分析され、分析結果が再資源化したガラスの利用業者に伝達されている。しかしながら、中間処理業者間で含有物質の判別手法が共通化されていない。もし判別方法を共通化できれば、<u>判別方法の共通化を経た後のガラスカレットには、(機能、安全衛生、環境保全等の観点からの)価値が付加され得ることが分かった。</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 環境基準確保の観点から、<u>本事業の成果を社会に周知するような公共セクター主体の取組</u>が、今後プラットフォーム運営の事業化を進める上で重要になる。</li> <li>● 中間処理業者の下で PV パネルのカバーガラスの含有物質の全数検査をすることは、中間処理工程の律速になる懸念がある。加えて、中間処理業者によってはカバーガラス中の含有物質を判別するための装置（ハンドヘルド XRF、等）を保有していない場合もある。今後、<u>装置の導入の補助や、PV パネルのカバーガラスの含有物質の検査工程の最適化に関する実証等</u>がプラットフォーム運営の事業化を進める上で重要になる。</li> </ul>
<b>【プラットフォーム運営体制】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 情報提供者と情報利用者のインセンティブ構造が不整合であり、情報入力への協力が得られにくい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 処理業者等情報提供者へのヒアリングを通じ、<u>入力負担に対して便益が乏しい現状を確認</u>した。</li> <li>● 一方で、再資源化したガラスの利用業者からは、より<u>正確な含有物質情報への強いニーズ</u>が示された。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <u>情報提供者が適切な便益を受けられる仕組み</u>（対価・優遇制度等）の整備</li> <li>● リサイクル材使用に対するインセンティブ付与</li> <li>● プラットフォーム開発・運用維持費の負担が大きく、収益確保が困難</li> </ul>

##### (2) 更なる検証が必要な要素

(1)を踏まえ、リサイクル促進及びプラットフォーム運営事業の実装に向けて、今後更なる検証が必要と考えられる要素を図 4-2 に整理した。具体的には「リユース販売の事業性の見極め」、「中間処理工

程以降のトレーサビリティ確保の手法検討」、「PVCJ 認定ルート施設以外における情報管理のあり方」、「各工程事業者のプラットフォームへの参画動機付け」の 4 点である。

また、(1)に示したとおり、本事業では、“撤去後工程に限定した情報連携”であっても、“含有物質情報や長期使用可能性に関する情報を共有”することにより、リユース・リサイクルに関わる実務上の意思決定が実際に変わり得ることを確認した。

他方、関係者ヒアリングを通じ、プラットフォームの効果を十分に発現させるためには、情報の一元管理が、特定事業者の利害が関与していると受け取られない形で行われること(中立性)に加え、特定事業者の事業方針等によらずプラットフォームを持続的に利用可能であることを担保する体制(継続性)が不可欠であるとの認識に至った。

中立性・継続性を確保しつつ、実効的な運用を図る観点からは、特定の民間事業者が単独で推進する形態ではなく、国・自治体等の公共セクター、あるいは業界横断的な団体や第三者機関が一定程度関与する枠組みの下で運用されることが望ましいと考えられる。

事業者	製造 /販売	第三者 機関	設置	発電	O&M	撤去 (排出)	リユース 検査	リユース 販売	収集 /運搬	中間処理	再生資源 の利用	最終処分
参照情報 (例)	製造、設置、発電、保守の段階で、撤去後のリユース・リサイクルの意思決定に必要な情報が入力されることが望ましい。 ・製品情報 - 識別情報：型番、製造年月、シリアル番号 等 - 設計仕様：材料構成、有害物質情報、解体リユース性設計情報 等 - 製造時情報：再生材使用率、製造時CO <sub>2</sub> 排出量 等					・製品情報 ・設置環境情報 ・発電・保守情報 ・排出計画	・製品情報 ・設置環境情報 ・発電・保守情報 ・リユースチェック結果 ・余寿命診断結果	・製品情報 ・設置環境情報 ・発電・保守情報 ・リユースチェック結果 ・余寿命診断結果	・製品情報 ・リユースチェック結果 ・含有物質情報	・製品情報 ・収集運搬記録 (発電地点、重量等) ・含有物質情報	・中間処理記録 (中間処理方法、生成物重量等) ・生成物識別情報 ・生成物の含有物質スクリーニング結果	・中間処理記録 (中間処理方法、生成物重量等) ・生成物識別情報 ・生成物の含有物質スクリーニング結果
入力情報 (例)	・設置環境情報 - 設置場所、周辺環境 等 ・発電・保守情報 - 運転情報：環境条件下での性能劣化プロファイル、定格性能 - 点検・修理情報 - 廃棄費用積立情報、排出計画 等					・撤去方法 ・運搬方法	・リユースチェック結果 ・余寿命診断結果	・販売記録 ・リユース設置先情報	・収集運搬記録 (発電地点、重量等)	・中間処理記録 (中間処理方法、重量等) ・生成物識別情報 ・生成物の含有物質スクリーニング結果	・再資源化記録 (再資源化方法、重量等)	・最終処分記録 (最終処分方法、重量等)
119 実証事業の 成果 (青塗部)	フォーカス外					未実施	・余寿命判定技術の開発 ・試験情報等のクラウド保存 ・二次元バーコード連携	・ECサイト連携 ・先行事業者ヒアリングにより課題の確認 ・異型式発電所の運営/発電データ分析	未実施	・中間処理業者ヒアリングによりニーズの確認 ・含有物質の測定方法の共通化	・再資源化したガラスの利用業者へのヒアリングによりニーズの確認	未実施
さらなる 検証が 必要な要素	フォーカス外					・リユース販売の事業性見極め			・中間処理以降のトレーサビリティ確保の手法構築			
						・PVC認定ルート施設以外の情報管理						
						・各工程の事業者の情報連携プラットフォームへの参画動機付け						
国等の制度 への期待	欧州ESPRなど国際的な情報開示要件と整合した情報集約・管理の在り方検討					情報連携プラットフォームの効率的運用には標準化・中立性・長期継続性といった制度的要件が不可欠である。本実証の結果、これらの要件は民間単独では十分に担保し難く、国が一定程度関与する枠組みの下で検討することが実効性の観点から重要であるとの示唆が得られた。						

図 4-2 本事業の成果と更なる検証が必要な要素

## 4.3.2 リユース C-PPA 事業

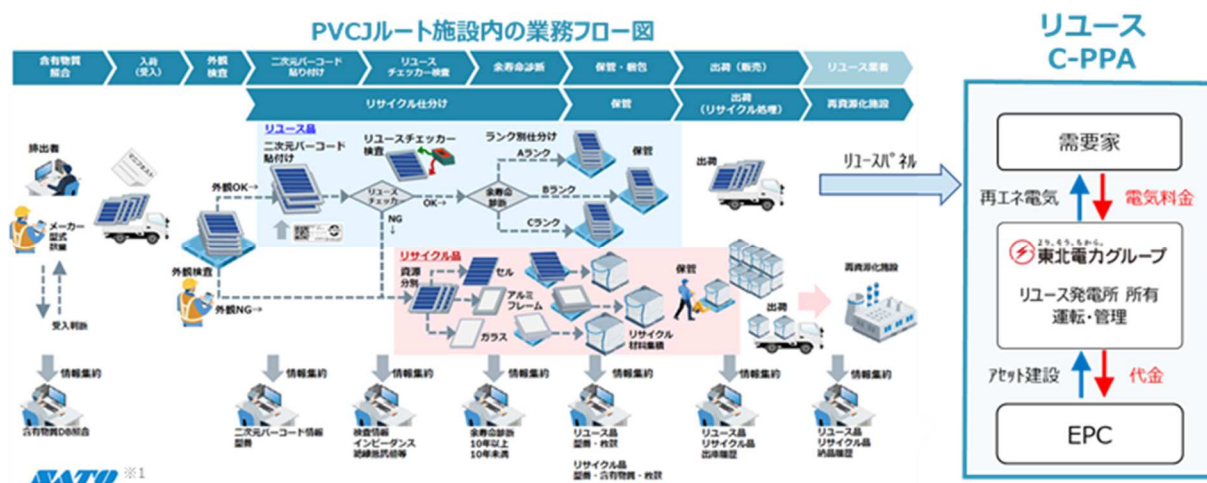
### (1) 本事業を通じて検討した事業化構想

本事業終了後の事業化構想として、使用済 PV パネルを活用した「リユース C-PPA 事業」の検討を進めている。

使用するパネルは、有価で調達するパネルに加え、使用済み PV パネルのうち、PVCJ 認定ルート施設においてリユース可能と判断されたパネルを活用することを想定している。

令和 8 年度には、事業性評価及び運用ノウハウ獲得等を目的として、リユース C-PPA 事業を小規模に開始する予定である。具体的には、EPC(Engineering, Procurement and Construction) 事業者と連携し、リユースパネルの活用によるコスト低減効果の定量的評価や、パネル検査体制のあり方について検討を行うと共に、異なる型式の使用済 PV パネルで構成される発電設備の運用に関するノウハウの蓄積を進める。

令和 9 年度以降については、当該事業の評価結果を踏まえ、事業規模の拡大を図ると共に、得られたノウハウのセカンダリー市場等への展開可能性を検討する予定である。



※1 資料作成協力:株式会社サトー、イラストの著作権は株式会社サトーまたは元データ提供のアドビ株式会社に帰属

図 4-3 本事業を通じて検討した事業化構想「リユース C-PPA 事業」

### (2) 事業の課題と期待する法制度

(1)で述べたリユース C-PPA 事業を推進していく上での課題及び期待する法制度について、表 4-4 に整理した。

現状、リユースパネルの販売においては、新品パネルとの価格差が縮小しており、リユース品としての価格優位性を示しにくい点が課題となっている。また、中古品に対する不安感から、追加的な検査や長期保証が求められる傾向にあり、結果として販売コストの増加につながっているという実情もある。

これらの状況を踏まえると、リユースパネルの普及にあたっては、パネルの単体販売に限定するのではなく、リユース C-PPA として電力を提供するビジネスモデルを活用し、実運用を通じてリユース品の

信頼性・性能を理解してもらうことが有効と判断される。このような考え方の下、本事業の展開に至ったものである。

本事業の推進に向けては、リユースパネルについて新品同様の補助金適用を可能とする、あるいは新品への補助金を見直し、リユースパネルと同条件にすることや、グリーン調達品としてリユースパネルを位置付けるといった、リユースパネルの需要喚起に資する法制度整備が期待される。

表 4-4 リユース C-PPA 事業の課題と期待する法制度

	主な現状課題	本事業を通じた解決案	期待する法制度
経済的課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 新品パネルの価格低下や検査工程の追加により、リユースパネルによる価格優位性が限定的となる恐れがある。(新品で補助を受けた事業に対しては、むしろ高額となる場合もある)。</li> <li>● 近年のパネル高効率化により、リユース品では新品との発電量の差が拡大し、売電収益を含めるとコストメリットが限定的となる可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● リユース特有の、調達(撤去)から検査までの工程を、リユース事業者や EPC との協力体制を構築し、効率化を図る。</li> <li>● 東北電力グループの遊休地活用や、行政や公共団体が保有する土地遊休地活用を検討する。</li> <li>● O&amp;M 費等、イニシャルコスト以外の効率化も検討する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 新品同様の補助金適用もしくは、新品への補助金を廃止して同じ条件とする。</li> <li>● グリーン調達品にリユースパネルを適用させる。</li> </ul>
技術的課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>● リユース品における経年劣化による故障リスクの早期把握</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● リユース C-PPA のスタートを通して、余寿命判定や監視技術により故障リスクの早期把握のノウハウ獲得を目指す。</li> <li>● 上記により O&amp;M 体制の効率化を図る。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● リユース発電所の設計・運転ガイドライン策定</li> </ul>

### 4.3.3 その他の期待される事業

#### (1) 長期使用可能性予測(余寿命判定)を活用した事業化構想

太陽光発電設備においては、パワーコンディショナ(PCS)の製品寿命が一般に 10~15 年程度であるのに対し、PV パネル(PV モジュール)の実使用上の寿命は 20~30 年程度とされており、両者の間には寿命の差が存在する。このため、運用開始後概ね 10 年前後を目安として、PCS の更新を契機に大規模改修やリパワリングの検討が行われるケースが多い。

こうした設備更新の検討においては、PCS のみを更新するか、PV パネルを含めて更新するかについて、設備全体の健全性や残存寿命を踏まえた合理的な判断が求められる。しかしながら、PV パネルの劣化状態や残存性能に関する客観的な情報が十分に得られず、判断が難しい場合も少なくない。

本事業で考案した長期使用可能性予測モデルにより、PV パネルの劣化状態や残存性能を定量的に把握し、余寿命判定が可能となれば、太陽光発電所の設備更新やリパワリングにおける意思決定の高度化・合理化に資することが期待される。その際、判定手順、判定区分、判定結果データ項目等は統一的な運用が行われることが理想である一方で、実際の個別判定結果データは、判定を実施した主体(事業者等)の範囲で管理・蓄積することが想定される。

また、余寿命判定装置としての活用に加え、測定結果に基づく診断・評価手法としての活用も想定されることから、発電事業者や保守事業者のみならず、セカンダリー市場におけるデューデリジェンス(DD)や設備評価への応用も可能である。これにより、当社以外の事業者を含む幅広い関係主体による活用

が見込まれ、PV パネルの長期使用促進、設備更新に伴う廃棄物の抑制、資源の有効利用といった社会的波及効果が期待される。

## (2) リサイクル促進に係る事業化構想

表 4-3 に示したとおり、本事業を進める中で、ガラス中に含まれる一部の物質について、国が定める土壤環境基準を超過するサンプルが確認された。環境基準の確保の観点からは、今後、公共セクターが主体となり、本事業で得られた知見や成果を広く社会に周知していく取組を推進することが重要である。この取組の形としては、例えば、国から委託を受けた事業者が、本事業の結果の周知、含有物質情報の更なる蓄積を行うことが考えられる。また、必要に応じて、ヒ素を一定量以上含有するガラスの利用・処分方法について、国や国から委託を受けた事業者が主体となり、検討し、その結果を周知していく取組も考えられる。

まとめると、環境基準の確保といった公益の観点からは、含有物質情報の取得及び蓄積については国がその役割を担い、当該情報を活用して、環境基準の確保に向けた施策の検討及び展開を行うことが望ましい。

一方、表 4-3 に示したとおり、ガラスの含有物質の測定方法を共通化し、その共通化した含有物質情報をガラスカレットに付与できれば、ガラスカレットには機能や安全衛生、環境保全等様々な観点から価値が付加されることが分かった。含有物質の測定方法の共通化については、リサイクラーや再資源化したガラスの利用業者ではなく、業界団体等の中立的な第三者主体が担うことが望ましいと考えられる。なお、測定方法の共通化が行われた場合であっても、個々のPV パネルに紐づくガラスの含有物質情報については、当該測定を実施した事業者が管理主体の役割を担うことが想定される。

## 5. 事業における環境影響改善効果及び CO<sub>2</sub>排出量削減効果の評価

---

本事業の実施を通じて、PV パネルの長期使用やリユースによる新規 PV パネル製造量の減少、リサイクルや適正処理の推進への貢献が期待される。

本年度は、本事業で得られた知見として、PV パネルのガラスリサイクルにおける関係者ニーズを踏まえた「含有物質の判別方法の共通化」が実用化された場合を想定し、それにより見込まれるリサイクルの推進効果を前提として評価を行った。なお、計算にあたっては、環境省が指定する「LCA 計算シート」<sup>17</sup>を使用した。

### 5.1 評価手法

本年度の CO<sub>2</sub> 排出量削減効果計算における評価範囲を図 5-1 に示す。また、以降で、評価対象・比較対象のフロー想定、評価範囲の概要について整理した。

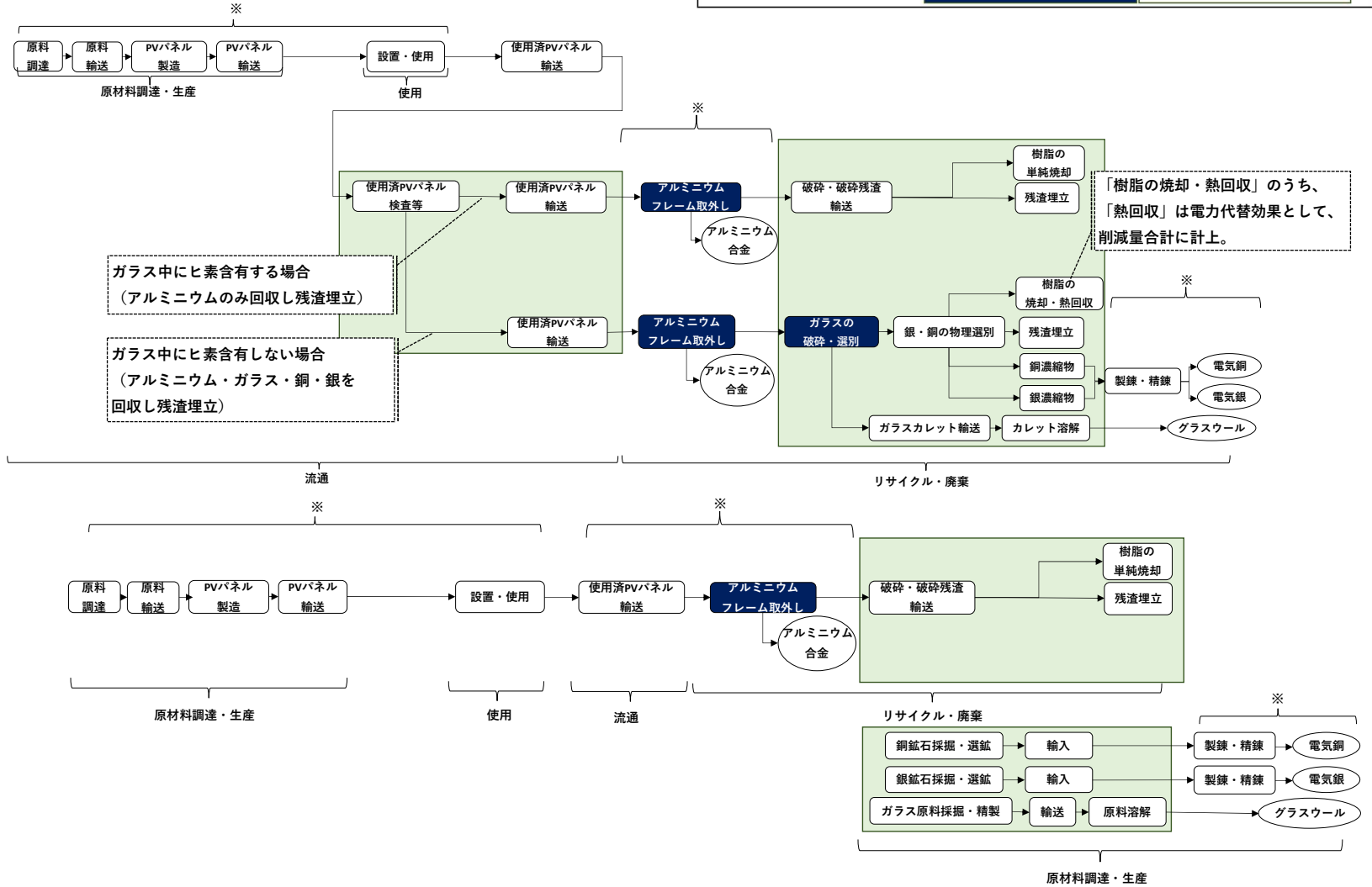
---

<sup>17</sup> 本業務における CO<sub>2</sub> 排出量削減効果の算定には、環境省が作成した計算用 Excel ファイルを活用した。主なシート構成は以下のとおりである。

- 条件設定の考え方(環境省にて作成済み)…評価にあたり設定すべき各項目(評価対象、比較対象、機能単位、評価範囲等)の設定方法が整理されたシート。
- 条件設定…上記に基づき、本業務における評価条件を設定したシート。
- 事業性整理…市場における評価対象事業の事業規模の算定根拠を整理したシート。
- CO<sub>2</sub> 排出量削減効果の算定…評価対象及び比較対象について、評価範囲内の各ライフサイクル工程における CO<sub>2</sub> 排出原単位と活動量を整理したシート。各値を入力することで CO<sub>2</sub> 排出量[t-CO<sub>2</sub>eq]が自動算出される仕様となっている。評価対象及び比較対象の CO<sub>2</sub> 排出量合計の差分により、評価対象事業の普及に伴う CO<sub>2</sub> 排出量削減効果の算定が可能。

<機能単位> 発電出力[kW]

<評価対象>



<比較対象>

図 5-1 令和7年度実施したCO<sub>2</sub>排出量削減効果計算の評価範囲

### 5.1.1 PV パネルのリサイクルフローの想定

評価対象及び比較対象のフローは、以下のとおり想定した。いずれも、令和 5 年度事業で想定したフローの考え方<sup>18</sup>を踏襲しているが、本年度は本事業における使用済 PV パネルサンプル調査の結果を踏まえたリサイクルの実施割合の想定を反映することとした。

- 評価対象のフローの想定
  - 新品 PV パネルの製造～使用后、使用済 PV パネルのガラスに対して、「含有物質の判別」を実施する。
  - 本事業におけるサンプル調査の結果を踏まえ、排出される PV パネルのうち 75%はガラス中にヒ素が検出されないと仮定し、リサイクル施設へ運搬され、アルミニウムフレームの取り外し後、ガラスの破碎・選別、銀・銅の物理選別、樹脂の焼却・熱回収(発電)が行われ、最終的な残渣は埋立処分される。なお、選別されたガラスはグラスウールに、銀・銅は電気銀・電気銅に仕向けられる。
  - 残りの 25%はヒ素が検出されると仮定し、処理施設に運搬された後、アルミニウムフレームが取り外され、破碎される。破碎残渣のうち、樹脂は単純焼却、その他残渣は埋立処分される。
- 比較対象のフローの想定
  - 新品 PV パネルの製造～使用后、処理施設に運搬され、アルミニウムフレームの取り外し及び破碎が行われる。破碎残渣のうち、樹脂は単純焼却、その他残渣は埋立処分される。
  - 評価対象のフローでは、熱回収やリサイクルを通じて、電力、グラスウール、電気銀、電気銅が得られる想定である。よって、同等量の電力を系統電力から調達し、同等量のグラスウール、電気銀、電気銅を天然資源から製造する工程も考慮する。

### 5.1.2 評価範囲の考え方

PV パネルに含まれる主な資源ごとの評価範囲は、令和 5 年度に検討した評価範囲の考え方<sup>19</sup>を踏襲し、以下のとおりとした。

- アルミニウム： 取り外したアルミニウムフレームは、既に有価物として流通していることから、リサイクルによる削減効果を考慮するにあたっては、カットオフ法<sup>20</sup>を採用することとした。なお、フレームの

<sup>18</sup> 環境省、「令和 5 年度国内資源循環体制構築に向けた再エネ関連製品及びベース素材の全体最適化実証事業(太陽光パネルの長期使用・資源循環の促進及び有害物質管理を目的としたデジタル・プロダクト・パスポート(DPP)の運用効果の検証実証事業)委託業務 成果報告書(令和 6 年 3 月東北電力株式会社)」、「4.1.1 文献調査を踏まえた PV パネルのリユース・リサイクルフローの想定」p.81,82 より、<https://www.env.go.jp/content/000261240.pdf> (2026 年 2 月 4 日取得)

<sup>19</sup>18 に同じ。「4.1.2 有識者からの助言を踏まえた評価方法の検討」(1) 実証事業として実施した有識者ヒアリング結果を踏まえた評価範囲の設定」p.82,83 より(2026 年 2 月 4 日取得)

<sup>20</sup> カットオフ法とは、ライフサイクルにおいて、評価対象に直接に関係する排出負荷は考慮するが、その他は負荷が無いとし、評価対象外とする方法である。

取り外し後のフローは評価対象外とする。

- ガラス・銀・銅： 現状、回収やリサイクルがほぼ行われていないとされているため、負荷回避法<sup>20</sup>を採用し、リサイクルにより新規原料の生産を回避できた効果も評価することとした。
- 樹脂： 非鉄製錬では、アルミニウムフレーム等除去後の残渣(PV パネルのバックシートにフッ化樹脂が貼付されたもの等)の単純焼却がなされているとされるため、負荷回避法を採用し、焼却時に熱回収(発電)を行い、電力調達を回避できた効果も評価することとした。

## 5.2 評価の実施

### 5.2.1 評価結果

2035年時点では「含有物質の判別方法の共通化」が十分に普及していると仮定し、使用済PVパネルの処理比率をリサイクル75%・最終処分25%、2035年時点で想定される使用済PVパネルの年間排出量を25万t<sup>21</sup>とした場合、令和5年度に検討した評価手法に基づくCO<sub>2</sub>排出量削減効果は、約3.9万t-CO<sub>2</sub>と推計された。評価結果の詳細は、表5-1に示す。

また、使用済PVパネルのリサイクルを通じた資源循環利用による最終処分量の削減効果は、約12.3万t<sup>22</sup>と推計された。

---

また、負荷回避法とは、リサイクルやエネルギー回収等で排出負荷を回避できた分を控除する方法である。仮に、カスケードリサイクルのプロセスを、クローズドループリサイクルと見なして、削減効果を見積もると、クローズドループリサイクルが実現した際に、その削減効果が差分として表れなくなるため、注意が必要である。

Journal of Life Cycle Assessment, Japan, 特集「プラスチック資源循環とライフサイクル思考」、総説「LCAによるプラスチック資源循環の評価方法の基本と課題」中谷隼、p.106-116、

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/lca/19/3/19\\_106/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/lca/19/3/19_106/_pdf)(2023年2月13日取得)

以上は、<sup>18</sup>「4.1.2 有識者からの助言を踏まえた評価方法の検討」(1) 実証事業として実施した有識者ヒアリング結果を踏まえた評価範囲の設定」p.82,83に基づく。(2026年2月4日取得)

<sup>21</sup> 経済産業省「太陽光発電設備の廃棄・リサイクルをめぐる状況及び論点について」、p.17、

[https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo\\_gijutsu/resource\\_circulation/solar\\_power\\_generation/pdf/001\\_03\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/resource_circulation/solar_power_generation/pdf/001_03_00.pdf)(2026年2月4日取得)

<sup>22</sup> リサイクルを通じた資源循環利用による最終処分量の削減効果は、以下a,b,cの値を用い、「c-(a.+b.)」の計算を行うことで、約12.3万tとなる。

a.: 表5-2(評価対象)「エネルギー起源」「リサイクル・廃棄」「廃棄」「残渣埋立」—「破碎・破碎残渣輸送」直後  
…約4.2万t

b.: 表5-2(評価対象)「エネルギー起源」「リサイクル・廃棄」「廃棄」「残渣埋立」—「銀・銅の物理選別」直後  
…約0.2万t

c.: 表5-3(比較対象)「エネルギー起源」「リサイクル・廃棄」「廃棄」「残渣埋立」  
…約16.7万t

表 5-1 試算の結果【普及段階 2035 年時点(t-CO<sub>2</sub>/年)】

①評価対象		CO <sub>2</sub> 排出量 [t-CO <sub>2</sub> ]
エネルギー起源	流通 ・「使用済 PV パネル輸送」(「使用済 PV パネル検査等」直後／ガラス中にヒ素含有する場合) ・「使用済 PV パネル輸送」(「使用済 PV パネル検査等」直後／ガラス中にヒ素含有しない場合) ・「使用済 PV パネル検査等」	4,347
	リサイクル ・「ガラスの破碎・選別」 ・「ガラスカレット輸送」 ・「カレット溶解」 ・「銀・銅の物理選別」(「銅濃縮物」「銀濃縮物」も原単位に含む。)	255,849
	廃棄 ・「破碎・破碎残渣輸送(うち①「破碎」)」 ・「破碎・破碎残渣輸送(うち②「破碎後残渣輸送」)」 ・「残渣埋立」(「破碎・破碎残渣輸送」直後) ・「残渣埋立」(「銀・銅の物理選別」直後)	2,778
	小計	262,974
非エネルギー起源	廃棄 ・「樹脂の単純焼却」 ・「樹脂の焼却・熱回収」のうち焼却部分	110,252
	小計	110,252
合計		373,227

熱回収(発電)による 電力代替効果	-	22,219
----------------------	---	--------

②比較対象		CO <sub>2</sub> 排出量 [t-CO <sub>2</sub> ]
エネルギー起源	原材料調達・生産 ・「銅鉱石採掘・選鉱」(「輸入」も原単位に含む。) ・「銀鉱石採掘・選鉱」(「輸入」も原単位に含む。) ・「ガラス原料採掘・精製」(「輸送」「原料溶解」も含む。)	269,063
	廃棄 ・「破碎・破碎残渣輸送(うち①「破碎」)」 ・「破碎・破碎残渣輸送(うち②「破碎後残渣輸送」)」 ・「残渣埋立」	10,808
	小計	279,870
非エネルギー起源	廃棄 ・「樹脂の単純焼却」	110,252
	小計	110,252
合計		390,123

③削減量 (②-①)		CO <sub>2</sub> 排出量 [t-CO <sub>2</sub> ]
エネルギー起源	—	16,896
非エネルギー起源	—	0
熱回収(発電)による 電力代替効果	—	22,219
合計		39,115

④単位当たりの削減量		削減量 [-]
発電出力	0.013	t-CO <sub>2</sub> /kW
PVパネル枚数	0.007	t-CO <sub>2</sub> /枚
PVパネル重量	0.16	t-CO <sub>2</sub> /t

## 5.2.2 評価に使用したデータ一覧

表 5-2、表 5-3 において、評価対象・比較対象の CO<sub>2</sub> 排出量削減効果計算に用いた CO<sub>2</sub> 排出原単位と活動量を示した。(以上のバックデータ・参考は、表 5-4、表 5-5-5)<sup>23</sup>

<sup>23</sup> 表 5-2,表 5-3,表 5-4,表 5-5 で整理もしくは試算に用いた重量原単位及び出力換算は、端数を含む元データで計算し、表中は四捨五入表示している。

表 5-2 評価対象のCO<sub>2</sub>排出量削減効果計算に用いたCO<sub>2</sub>排出原単位と活動量

評価対象		CO <sub>2</sub> 排出原単位		活動量		データの出典・根拠	
		数値	単位	数値	単位		
エネルギー起源	流通	0.00149	t-CO <sub>2</sub> /kW-PV パネル	726,563	kW-PV パネル/年	「使用済 PV パネル輸送」(「使用済 PV パネル検査等」直後/ガラス中にヒ素含有する場合) …原単位は、出所 1 に基づき、改良トンキロ法(最大積載量 8-10t、事業用その他(0.0672 軽油 L/tkm))、100km 輸送想定で求めた。 …活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量を用いた。ガラス中にヒ素含有する PV パネル 25%はリサイクル対象外として単純焼却・埋立に回るため、活動量に 25%を乗じた。	
		0.00149	t-CO <sub>2</sub> /kW-PV パネル	2,179,688	kW-PV パネル/年	「使用済 PV パネル輸送」(「使用済 PV パネル検査等」直後/ガラス中にヒ素含有しない場合) …原単位は、出所 1 に基づき、改良トンキロ法(最大積載量 8-10t、事業用その他(0.0672 軽油 L/tkm))、100km 輸送想定で求めた。 …活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量を用いた。ガラス中にヒ素含有していない PV パネル 75%をリサイクル対象とするため、活動量に 75%を乗じた。	
		0.000002	t-CO <sub>2</sub> /枚-PV パネル	5,812,500	枚-PV パネル/年	「使用済 PV パネル検査等」 …原単位は、「ハンドヘルド XRF の測定」にかかる消費電力量に、「国内電源の CO <sub>2</sub> 排出係数」を乗ずることで求めた。 …活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量を用いた。	
	リサイクル・廃棄	リサイクル	0.018	t-CO <sub>2</sub> /t-PV パネル	187,500	t-PV パネル/年	「ガラスの破碎・選別」 …原単位は、PVCJ が認定した廃棄物処理業者 5 社(本事業で分析に使用した使用済 PV パネルの提供元)から把握したエネルギー消費量を平均した値に、「国内電源の CO <sub>2</sub> 排出係数」を乗ずることで求めた。 …活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量を用いた。ガラス中にヒ素含有していない PV パネル 75%をリサイクル対象とするため、活動量に 75%を乗じた。
			0.0039	t-CO <sub>2</sub> /t-ガラス	117,188	t-PV パネル(うちガラス)/年	「ガラスカレット輸送」 …原単位は、後掲のガラスカレット 1t を輸送した場合を想定した CO <sub>2</sub> 排出量を用いた。 …活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量と、出力(kW)当たりのガラス重量(kg)を乗じて求めた。ガラス中にヒ素含有していない PV パネル 75%をリサイクル対象とするため、活動量に 75%を乗じた。
			2.12	t-CO <sub>2</sub> /t-ガラス	117,188	t-PV パネル(うちガラス)/年	「カレット溶解」 …原単位は、後掲のガラス溶解・各種処理を経てガラスウールになるまでの CO <sub>2</sub> 排

			ウール			<p>出量を用いた。</p> <p>…活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量と、出力(kW)当たりのガラス重量(kg)を乗じて求めた。</p> <p>ただし、文献から得られる情報の制約上、原単位はガラス重量当たり(t-CO<sub>2</sub>/t-ガラス)ではなくグラスウール重量当たり(t-CO<sub>2</sub>/t-グラスウール)を用いている。この時、1t-ガラス≒1t-グラスウールと見なした。ガラス中にヒ素含有していない PV パネル 75%をリサイクル対象とするため、活動量に 75%を乗じた。</p>
		0.019	t-CO <sub>2</sub> /t-PV パネル	187,500	t-PV パネル/年	<p>「銀・銅の物理選別」(「銅濃縮物」「銀濃縮物」も原単位に含む。)</p> <p>…原単位は、後掲の PV パネルにおける非鉄金属の物理選別にかかる電力消費量に、「国内電源の CO<sub>2</sub> 排出係数」を乗じて PV パネル 1t あたりの CO<sub>2</sub> 排出原単位とした。</p> <p>…活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量を用いた。ガラス中にヒ素含有していない PV パネル 75%をリサイクル対象とするため、活動量に 75%を乗じた。</p>
	廃棄	0.021	t-CO <sub>2</sub> /t	52,734	t-PV パネル(アルミニウムフレーム除く)/年	<p>「破碎・破碎残渣輸送(うち①「破碎」)」</p> <p>(本項目「破碎・破碎残渣輸送」の原単位は①②の和である。)</p> <p>…①の原単位は、後掲の破碎にかかる CO<sub>2</sub> 排出量を用いた。</p> <p>…活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量と、出力(kW)当たりの PV パネル重量(kg)(アルミニウム重量を除く)を乗じて求めた。ガラス中にヒ素含有する PV パネル 25%はリサイクル対象外として単純焼却・埋立に回るため、活動量に 25%を乗じた。</p>
		0.0001	t-CO <sub>2</sub> /t-PV パネル	62,500	t-PV パネル/年	<p>「破碎・破碎残渣輸送(うち②「破碎後残渣輸送」)」</p> <p>(本項目「破碎・破碎残渣輸送」の原単位は①②の和である。)</p> <p>…②の原単位は、後掲の破碎後残渣輸送にかかる CO<sub>2</sub> 排出量を用いた。</p> <p>…活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量を用いた。ガラス中にヒ素含有する PV パネル 25%はリサイクル対象外として単純焼却・埋立に回るため、活動量に 25%を乗じた。</p>
		0.038	t-CO <sub>2</sub> /t	41,797	t-PV パネル(アルミニウムフレーム、樹脂除く)/年	<p>「残渣埋立」(「破碎・破碎残渣輸送」直後)</p> <p>…原単位は、後掲の管理型埋立に伴う CO<sub>2</sub> 排出量を用いた。</p> <p>…活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量と、出力(kW)当たりの PV パネル重量(kg)(アルミニウム、樹脂重量を除く)を乗じて求めた。ガラス中にヒ素含有する PV パネル 25%はリサイクル対象外として単純焼却・埋立に回るため、活動量に 25%を乗じた。</p>

			0.038	t-CO <sub>2</sub> /t	2,000	t-PV パネル(アルミニウム, ガラス, 銅, 銀, 樹脂除く残渣)/年	「残渣埋立」(「銀・銅の物理選別」直後) …原単位は、後掲の管理型埋立に伴う CO <sub>2</sub> 排出量を用いた。 …活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量と、出力(kW)当たりのアルミニウム・ガラス・銅・銀・樹脂以外の残渣重量(kg)を乗じて求めた。ガラス中にヒ素含有していない PV パネル 75%をリサイクル対象とするため、活動量に 75%を乗じた。
非エネルギー起源	リサイクル・廃棄	廃棄	2.5	t-CO <sub>2</sub> /t-樹脂(EVA)	10,938	t-PV パネル(うち樹脂)/年	「樹脂の単純焼却」 …原単位は、後掲の EVA の焼却に伴う CO <sub>2</sub> 排出量を用いた。 …活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量と、出力(kW)当たりの樹脂重量(kg)を乗じて求めた。ガラス中にヒ素含有する PV パネル 25%はリサイクル対象外として単純焼却・埋立に回るため、活動量に 25%を乗じた。
			2.5	t-CO <sub>2</sub> /t-樹脂(EVA)	32,813	t-PV パネル(うち樹脂)/年	「樹脂の焼却・熱回収」のうち焼却部分 …原単位は、後掲の EVA の焼却に伴う CO <sub>2</sub> 排出量を用いた。 …活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量と、出力(kW)当たりの樹脂重量(kg)を乗じて求めた。ガラス中にヒ素含有していない PV パネル 75%をリサイクル対象とするため、活動量に 75%を乗じた。

131

評価対象	CO <sub>2</sub> 排出原単位		活動量		データの出典・根拠
	数値	単位	数値	単位	
熱回収による電力代替効果	0.00042	t-CO <sub>2</sub> /kWh	53,411,458	kWh/年	「樹脂の焼却・熱回収」のうち熱回収部分 …原単位は、後掲の「国内電源の CO <sub>2</sub> 排出係数」を用いた。 …活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量と出力(kW)当たりの樹脂重量(kg)を乗じた値×廃プラスチックの総発熱量 29.3(MJ/kg)×廃棄物発電効率 20(%)で求めた。 なお、廃プラスチックの総発熱量、廃棄物発電効率は出所 4,5 に基づく。ガラス中にヒ素含有していない PV パネル 75%をリサイクル対象とするため、活動量に 75%を乗じた。

表 5-3 比較対象の CO<sub>2</sub> 排出量削減効果計算に用いた CO<sub>2</sub> 排出原単位と活動量

比較対象		CO <sub>2</sub> 排出原単位		活動量		データの出典・根拠
		数値	単位	数値	単位	
源ギ工   ネ 起ル	産調原   達材 生料	0.057	t-CO <sub>2</sub> /t-PV パネル	187,500	t-PV パネル/年	「銅鉱石採掘・選鉱」(「輸入」も原単位に含む。) …原単位は後掲の銅の採掘～破碎処理、銅精鉱の生産、銅精鉱の輸入にかかる CO <sub>2</sub> 排出量を用いた。 …活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量を用いた。ガラス中にヒ素含有してい

非 起 源 エ ネ ル	リ サ イ ク ル ・ 廃 棄	廃 棄					ない PV パネル 75%をリサイクル対象としており、評価対象の「リサイクル・廃棄」では活動量に 75%を乗じているため、同じく 75%を乗じる。
			0.053	t-CO <sub>2</sub> /t-PV パネル	187,500	t-PV パネル/年	「銀鋳石採掘・選鋳」(「輸入」も原単位に含む。) …原単位は、後掲の銀精鋳の採掘～輸送に伴う CO <sub>2</sub> 排出量を用いた。 …活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量を用いた。ガラス中にヒ素含有していない PV パネル 75%をリサイクル対象としており、評価対象の「リサイクル・廃棄」では活動量に 75%を乗じているため、同じく 75%を乗じる。
			2.12	t-CO <sub>2</sub> /t-ガラスウール	117,188	t-PV パネル(うちガラス)/年	「ガラス原料採掘・精製」(「輸送」「原料溶解」も含む。) …原単位は、後掲のガラス屑、けい砂等採取～調合・溶解・繊維化にかかる CO <sub>2</sub> 排出量を用いた。 …活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量と、出力(kW)当たりのガラス重量(kg)を乗じて求めた。 ただし、文献から得られる情報の制約上、原単位はガラス重量当たり(t-CO <sub>2</sub> /t-ガラス)ではなくガラスウール重量当たり(t-CO <sub>2</sub> /t-ガラスウール)を用いている。この時、1t-ガラス≒1t-ガラスウールと見なす。ガラス中にヒ素含有していない PV パネル 75%をリサイクル対象としており、評価対象の「リサイクル・廃棄」では活動量に 75%を乗じているため、同じく 75%を乗じる。
	リ サ イ ク ル ・ 廃 棄	廃 棄	0.021	t-CO <sub>2</sub> /t	210,938	t-PV パネル(アルミニウムフレーム除く)/年	「破碎・破碎残渣輸送(うち①「破碎」)」 (本項目「破碎・破碎残渣輸送」の原単位は①②の和である。) …①の原単位は、後掲の破碎にかかる CO <sub>2</sub> 排出量を用いた。 …活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量と、出力(kW)当たりの PV パネル重量(kg)(アルミニウム重量を除く)を乗じて求めた。
			0.0001	t-CO <sub>2</sub> /t-PV パネル	250,000	t-PV パネル/年	「破碎・破碎残渣輸送(うち②「破碎後残渣輸送」)」 (本項目「破碎・破碎残渣輸送」の原単位は①②の和である。) …②の原単位は、後掲の破碎後残渣輸送にかかる CO <sub>2</sub> 排出量を用いた。 …活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量を用いた。
			0.038	t-CO <sub>2</sub> /t	167,188	t-PV パネル(アルミニウムフレーム、樹脂除く)/年	「残渣埋立」 …原単位は、後掲の管理型埋立に伴う CO <sub>2</sub> 排出量を用いた。 …活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量と、出力(kW)当たりの PV パネル重量(kg)(アルミニウム、樹脂重量を除く)を乗じて求めた。
			2.5	t-CO <sub>2</sub> /t-樹脂(EVA)	43,750	t-PV パネル(うち樹脂)/年	「樹脂の単純焼却」 …原単位は、後掲の EVA の焼却に伴う CO <sub>2</sub> 排出量を用いた。 …活動量は、後掲の使用済 PV パネルの年間排出量と、出力(kW)当たりの樹脂重量(kg)を乗じて求めた。

表 5-4 評価対象・比較対象の CO<sub>2</sub> 排出量削減効果計算に用いた、CO<sub>2</sub> 排出原単位・活動量のバックデータ

項目	数値	単位	出典
輸送トンキロあたりの燃料使用量	0.0672	L/tkm	出所 1
廃プラスチックの総発熱量	29.30	MJ/kg	出所 4
廃棄物発電効率	0.2	-	出所 5
電力量 1kWh の際の熱量	3,600,000	J/kWh	-
軽油排出係数	2.58	t-CO <sub>2</sub> /kL	出所 6
「ハンドヘルド XRF の測定」にかかる消費電力量	0.0053	kWh/枚	本表中「ハンドヘルド XRF の消費電力」に、「ハンドヘルド XRF の測定点数」「ハンドヘルド XRF の 1 点あたり測定時間」より求められる測定時間[h]を乗じて求めた。
国内電源の CO <sub>2</sub> 排出係数	0.416	kg-CO <sub>2</sub> /kWh	出所 7
ガラスの破碎・選別にかかる消費電力量	0.0441	kWh/kg	出所 8
ガラス 1t を輸送した場合を想定した CO <sub>2</sub> 排出量	0.0039	t-CO <sub>2</sub> /t-ガラス	出所 9、表 8「タイル製造時のプロセス別 CO <sub>2</sub> 排出量(工程 B)」の「輸送」より、排出量 1.71kgCO <sub>2</sub> を輸送量 438kg で除して求めた。
ガラス溶解・各種処理を経てグラスウールになるまでの CO <sub>2</sub> 排出量	2.120	kg-CO <sub>2</sub> /kg- グラスウール(ガラス短繊維)	出所 10、「ガラス溶解・各種処理を経てグラスウールになるまで」をバウンダリとしている「表 4.1-8 グラスウール化のインベントリデータ②」の「2.120kg-CO <sub>2</sub> /kg」を用いた。
PV パネルにおける非鉄金属の物理選別にかかる電力消費量	45.100	kWh/t-PV パネル	出所 11、「表 IV-15 物理選別に関する TMR」より
管理型埋立に伴う CO <sub>2</sub> 排出量	0.038	t-CO <sub>2</sub> /t	出所 9、表 9「タイル製造時のプロセス別 CO <sub>2</sub> 排出量(工程 C)」の「管理型埋立」より
EVA の焼却に伴う CO <sub>2</sub> 排出量	2.5	t-CO <sub>2</sub> /t- 樹脂(EVA)	出所 2 より、PV モジュールを構成する樹脂材料として、充填材(EVA)・周辺シール・バックカバーが挙げられているが、ここでは簡略のため全て EVA と仮定し、「EVA の分子構造から CO <sub>2</sub> 排出量推計」した。 EVA の VA 比率を出所 3 より 30%とした場合、「(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) <sub>7</sub> (C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> 」という分子式になる。以上より樹脂全体に比した C 分子量=(C の分子量)/(EVA の分子量)=312/454 である。また、C 重量から CO <sub>2</sub> 重量を算出する換算係数は 44/12=3.667 であるため、312/454*3.667=2.5 kg-CO <sub>2</sub> /kg(t-CO <sub>2</sub> /t に変換)とした。
銅の採掘～破碎処理、銅精鉱の生産、銅精鉱の輸入にかかる CO <sub>2</sub> 排出量	0.057	t-CO <sub>2</sub> /t-PV パネル	出所 11、「表 IV-4 本業務による CO <sub>2</sub> 排出量の削減効果」「事業実施前 B の 1～3(銅の採掘～破碎処理・銅精鉱の生産・銅精鉱の輸入)の合計」
銀精鉱の採掘～輸送に伴う CO <sub>2</sub> 排出量	0.053	t-CO <sub>2</sub> /t-PV パネル	出所 11、「表 IV-4 本業務による CO <sub>2</sub> 排出量の削減効果」「事業実施前 B の 4(銀精鉱の採掘～輸送)」
ガラス屑、けい砂等採取～調合・溶解・繊維化にかかる CO <sub>2</sub> 排出量	2.12	kg-CO <sub>2</sub> /kg- グラスウール(ガラス短繊維)	出所 10、「ガラス屑、けい砂等採取～調合・溶解・繊維化」をバウンダリとしている「表 4.1-7 グラスウール化のインベントリデータ①」の「2.12kg-CO <sub>2</sub> /kg」

1枚当たり出力	0.5	kW/枚	仮定
PV重量	86	kg/kW	出所2より
ガラス	54	kg/kW	出所2より
アルミニウム	13	kg/kW	出所2より
銅	2.8	kg/kW	出所12より、「図表51 含有量試験結果」、多結晶、国内、2017~、2 サンプルの平均値の合計を求めた。 また、出所2のモジュール出力で除した。
銀	0.05	kg/kW	出所12より、「図表51 含有量試験結果」、多結晶、国内、2017~、2 サンプルの平均値の合計を求めた。 また、出所2のモジュール出力で除した。
アルミニウム、ガラス、銅、銀、樹脂以外の残渣	0.9	kg/kW	本表中の「PV重量」から、「ガラス」「アルミニウム」「銅」「銀」「樹脂」の合計重量を差し引いて求めた。
使用済PVパネルの輸送距離(使用済PVパネルの発生地→PVCJ認定ルート施設)	100	km	仮定値
国内の使用済PVパネルの総処理量(2035年推計値)	250,000	t-PVパネル/年	出所13
使用済PVパネルの年間排出量	250,000	t-PVパネル/年	本事業の知見が世の中に周知され十分普及した場合の使用済PVパネルの年間排出量は、「国内の使用済PVパネルの総処理量(2035年推計値)」とした。
使用済PVパネルの年間排出量	5,812,500	枚-PVパネル/年	本表中の「使用済PVパネルの年間取扱量[kW-PVパネル/年]」を「1枚あたり出力」で除して求めた。
使用済PVパネルの年間排出量	2,906,250	kW-PVパネル/年	本表中の「使用済PVパネルの年間取扱量[t-PVパネル/年]」を「PV重量」で除して求めた。
樹脂	15	kg/kW	出所2より
使用済PVパネルのリサイクル比率(2035年)	0.75	-	排出される使用済PVパネル全量が、リサイクル or 最終処分に回る想定。よって、本事業の知見が世の中に周知され十分普及した場合の使用済PVパネルのリサイクル・最終処分比率(2035年)は、75・25 [%]と設定する(出所14より、ヒ素が含有する使用済PVパネル25%は最終処分、ヒ素が含有しない使用済PVパネル75%はリサイクルに回る想定※)。 ※あくまで「ヒ素検出技術が十分普及し、排出される使用済PVパネル全量のスクリーニングが可能」、「メーカー・年代によるヒ素の含有状況の偏りは無い」という前提。
ハンドヘルドXRFの消費電力	0.07	kW	本事業で使用した4メーカー4機種のうち、公開情報より消費電力が得られた1メーカー1機種の値、出所15より
ハンドヘルドXRFの測定点数	3	点/枚	出所14より(本事業における測定条件の一例)
ハンドヘルドXRFの1点あたり測定時間	90	秒	出所14より(本事業における測定条件の一例)
破碎にかかるCO <sub>2</sub> 排出量	0.021	kg-CO <sub>2</sub> /kg	出所9、表7「タイル製造時のプロセス別CO <sub>2</sub> 排出量(工程A)」の「破碎」より

<p>破碎後残渣輸送にかかる CO<sub>2</sub> 排出量</p>	<p>0.0001</p>	<p>t-CO<sub>2</sub>/t-PV パ ネル</p>	<p>出所 11、「表 IV-4 本業務による CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果」事業実施前 A の 2 (輸送(埋立処分場))」 (本文献では、中間処理施設の最寄りの最終処分場へ輸送し、輸送距離は 1km 未満としているため、排出係数が非常に小さい。)</p>
---------------------------------------	---------------	---------------------------------------	--

表 5-5 表 5-4 の出所情報

出所番号	内容(最終閲覧日:2026年1月28日)
1	経済産業省資源エネルギー庁、省エネ法の手引き(荷主編)一令和4年度改正対応一、「トラックのトンキ口あたりの燃料使用量(代表的な最大積載量と積載率による一覧表)」、 <a href="https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/media/data/s_hoene_tebiki_02.pdf">https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/media/data/s_hoene_tebiki_02.pdf</a>
2	みずほ情報総研株式会社、平成19~20年度新エネルギー・産業技術総合開発機構 委託業務成果報告書 太陽光発電システム共通基盤技術研究開発 太陽光発電システムのライフサイクル評価に関する調査研究、表 2.1-2「対象とする多結晶 Si 太陽電池モジュール」
3	エレクトロニクス実装学会誌 Vol.17、No.1(2014)、材料技術委員会「太陽電池モジュール用材料の動向」、 <a href="https://www.jstage.jst.go.jp/article/jiep/17/1/17_2/_pdf/-char/ja">https://www.jstage.jst.go.jp/article/jiep/17/1/17_2/_pdf/-char/ja</a>
4	経済産業省資源エネルギー庁、エネルギー源別標準発熱量・炭素排出係数(2018年度改訂)の解説、廃プラスチックの標準発熱量(2018年度)、 <a href="https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_028.pdf">https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_028.pdf</a>
5	廃棄物資源循環学会誌, Vol. 26, No. 2, 2015、「高効率発電のための廃棄物処理技術の動向(宇野晋)」、 <a href="https://www.jstage.jst.go.jp/article/mcwmr/26/2/26_114/_pdf/-char/ja">https://www.jstage.jst.go.jp/article/mcwmr/26/2/26_114/_pdf/-char/ja</a>
6	環境省「燃料種別発熱量及び二酸化炭素排出係数一覧」「軽油排出係数 2.58tCO <sub>2</sub> /kL」、 <a href="https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/data/ws_1/betsu_4.pdf">https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/data/ws_1/betsu_4.pdf</a>
7	環境省電気事業者別排出係数令和6年度実績(代替値) <a href="https://policies.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/files/calc/r08_denki_coefficient.pdf">https://policies.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/files/calc/r08_denki_coefficient.pdf</a>
8	PVCJが認定した廃棄物処理業者5社(本事業で分析に使用した使用済PVパネルの提供元)から把握したエネルギー消費量の平均。
9	日本建築学会環境系論文集、第82巻、第741号、2017年11月、「使用済み太陽光パネルのガラス再資源化による環境負荷削減効果(湯浅他)」、 <a href="https://www.jstage.jst.go.jp/article/aije/82/741/82_949/_pdf">https://www.jstage.jst.go.jp/article/aije/82/741/82_949/_pdf</a>
10	リサイクルテック・ジャパン株式会社、平成28年度環境省委託事業 平成28年度低炭素型3R技術・システム実証事業 使用済太陽電池モジュールの新たなリサイクル、リユースシステムの構築実証事業 報告書、 <a href="https://www.env.go.jp/content/900532496.pdf">https://www.env.go.jp/content/900532496.pdf</a>
11	イー・アンド・イー ソリューションズ株式会社、令和3年度環境省委託業務 令和3年度脱炭素型金属リサイクルシステムの早期社会実装化に向けた実証事業(太陽光パネルの収集・リユースおよび非鉄金属の回収に係る技術実証)委託業務 成果報告書、 <a href="https://www.env.go.jp/content/900535427.pdf">https://www.env.go.jp/content/900535427.pdf</a>
12	環境省 環境再生・資源循環局 総務課 リサイクル推進室、太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン(第二版)、 <a href="https://www.env.go.jp/press/files/jp/110514.pdf">https://www.env.go.jp/press/files/jp/110514.pdf</a>
13	経済産業省「太陽光発電設備の廃棄・リサイクルをめぐる状況及び論点について」、p.17、 <a href="https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/resource_circulation/solar_power_generation/pdf/001_03_00.pdf">https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/resource_circulation/solar_power_generation/pdf/001_03_00.pdf</a>
14	本事業成果より
15	消費電力値は公開情報だが、本事業で使用したメーカー・機種は非公開のため出所は記載割愛

## 6. 「太陽光パネルの長期利用化と資源循環促進に向けた情報要件整備及びその運用に関する実証事業」現地視察会の開催

---

本事業の円滑な実施のため、現地視察会を1回開催した。開催概要は以下のとおり。

- 開催日
  - 令和7年12月22日(月)
- 開催場所
  - ハイブリッド形式(相双スマートエコカンパニー(福島県大熊町)、Zoom)
- 参加者
  - 評価審査委員:計4名(1名:現地参加、3名:オンライン参加)
  - 環境省担当官:計4名(1名:現地参加、3名:オンライン参加)
  - 本事業受託者・共同実施者等:計23名(12名:現地参加、11名:オンライン参加)
  - 相双スマートエコカンパニー関係者:計11名(11名全員:現地参加)
- 主な内容
  - 評価審査委員、環境省担当官には、以下3項目に関する概要を説明した。
    - ① 現地視察会を相双スマートエコカンパニーで開催することの意図
    - ② 中間報告会以降の各実証パートの成果(括弧内は具体的な報告内容)
      1. リサイクル推進に必要な情報整備(含有物質の判別方法の共通化検討、ヒアリングを通じたユーザーニーズの検証結果)
      2. 長期使用可能性を予測するモデルの確立・試作機作製(相双スマートエコカンパニー保管PVパネルに関する長期使用可能性診断結果)
      3. リユースに必要な情報付与・管理/関係者への情報連携(二次元バーコード耐久性試験結果)
      4. 異なる型式の使用済PVパネルからなる太陽光発電設備の設置・運転知見の蓄積(発電効率の検証結果)
    - ③ 実証後の事業化構想、事業化にあたり想定される課題等
  - 現地参加の評価審査委員、環境省担当官には、以下2項目の設備装置、実演を視察いただいた。
    - 相双スマートエコカンパニーで設置している使用済PVパネルを使用した発電所
    - ハンドヘルドXRFによるPVパネルのカバーガラスの含有物質の計測(上記②1.関連)

## 7. 評価審査委員会の出席

---

以下 2 回の評価審査委員会に出席し、事業の進捗状況についてプレゼン形式で報告を行った。評価審査委員からの指摘を踏まえ、事業を遂行した。

- 中間報告会
  - 実施日:令和 7 年 9 月 24 日(水)
  - 開催場所:ハイブリッド形式(AP 東京八重洲 11 階 O ルーム(東京都中央区)、Zoom)
- 最終報告会
  - 実施日:令和 8 年 2 月 10 日(火)
  - 開催場所:オンライン形式(Zoom)

## 8. 対外的な発信の実施

令和7年度事業における取組や得られた知見等について、表8-1～表8-3に示すとおり対外的な発信を行った。

表8-1 令和7年度における特許権出願状況

番号	発明の名称	備考
1	使用済みPVパネルの長期使用予測アルゴリズム(仮称)	出願準備中

表8-2 令和7年度における投稿・口頭発表

番号	学会・誌名	タイトル	著者・所属	発表(掲載)日、巻号
1	みちのく分析化学シンポジウム	スプリットレス注入法を用いた熱分解-ガスクロマトグラフィー/質量分析法による太陽電池封止材の劣化評価	中嶋魁心, 熊谷将吾, 齋藤優子, 白鳥寿一, 斯琴高娃, Phanthong Patchiya, 吉岡敏明	2025/07/19
2	令和7年度化学系学協会東北大会	Characterization of Deteriorated Encapsulant Collected from Spent Photovoltaic Modules by Pyrolysis-gas Chromatography/Mass Spectrometry	中嶋魁心, 熊谷将吾, Borjigin Siqingaowa, Phanthong Patchiya, 齋藤優子, 白鳥寿一, 吉岡敏明	2025/09/07
3	第35回 廃棄物資源循環学会研究発表会	熱分解-ガスクロマトグラフィー/質量分析法による太陽電池封止材の劣化評価	中嶋魁心, 熊谷将吾, Borjigin Siqingaowa, Phanthong Patchiya, 齋藤優子, 白鳥寿一, 吉岡敏明	2025/09/17-18
4	PYROASIA2025	Py-GC/MS and UV/Py-GC/MS for evaluation of EVA degradation behavior via UV-accelerated deterioration test under various environmental factors	Patchiya Phanthong, Daiki Kobayashi, Shogo Kumagai, Yuko Saito, Toshikazu Shiratori, Toshiaki Yoshioka	2025/12/10-12
5	Pacificchem 2025	Degradation behavior of ethylene-vinyl acetate (EVA) encapsulant in solar cells via UV-accelerated deterioration test: effects on lifetime and prospects of recycling	P. Phanthong, D. Kobayashi, S. Kumagai, Y. Saito, T. Shiratori, T. YOSHIOKA	2025/12/15

表 8-3 令和 7 年度におけるその他の情報発信

番号	種類	内容
1	講演	高機能素材 Week リサイクルテックジャパン セミナー(2025/11/13)
2	展示会出展	14 回ふくしま再生可能エネルギー産業フェア(REIF ふくしま 2025)出展 (2025/10/16)
3	技術誌「JETI 4 月号」	「交流インピーダンス法を用いた太陽光発電パネルの劣化診断技術の開発」高山健太郎, 伊勢和幸 p.35-38 (2025/3/22,第 73 巻 第 4 号)
4	公開資料への掲載	秋田県産業技術センター 令和 6 年度業務年報へ掲載(2025 年 5 月)
5	講演	令和 7 年度 産業技術連携推進会議 東北地域部会 秋季 情報通信・エレクトロニクス分科会(2025/10/8)
6	講演	令和 7 年度 産業技術連携推進会議 東北地域部会 資源・環境・エネルギー分科会 (2025/11/12)

令和 7 年度国内資源循環体制構築に向けた再エネ関連製品及びベース素材の全体最適化実証事業(太陽光パネルの長期使用・資源循環の促進及び有害物質管理を目的としたデジタル・プロダクト・パスポート(DPP)の運用効果の検証実証事業)委託業務 成果報告書

---

令和 8 年 3 月

東北電力株式会社

---