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

# はじめに

我が国では、電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法が平成 23 年 7 月に施行されたことに伴い、太陽光発電パネル(以下「PV パネル」と言う。)の導入が急速に促進された。経済産業省、農林水産省、国土交通省、及び環境省が事務局となり行われている「再生可能エネルギー発電設備の適正な導入及び管理の在り方に関する検討会」の提言では、2030 年代に PV パネルの排出量が顕著に増加すると予想される課題に対して、「支援期間終了後の設備を長期稼働させるための検討が必要」、「リユース、リサイクルといった資源循環の考え方に沿った対応が重要」、「廃棄物処理業者に対して廃棄物の性状(重金属等の含有等の状況)等に関する情報の提供を徹底することが重要」といった指摘がされている。

他方、欧州では、エコデザインに関する指令(通称 ErP 指令)が廃止され、持続可能な製品のための エコデザイン規則案(Ecodesign for Sustainable Products Regulation(以下「ESPR」と言う。) が開始する。新規則の ESPR では、デジタル・プロダクト・パスポート(Digital Product Passport、 以下「DPP」と言う。)という概念の導入により、製品製造段階の情報のみならず、長期使用・リユース・ リサイクル及び適正処理といった製品使用後の情報も、製品ライフサイクルのステークホルダー間で共 有することが想定されている。DPP は、令和 4 年の時点で既に蓄電池、衣類及び建設材料で導入検討 が始まっているが、PV パネルをはじめとする電気電子機器にも波及していくと考えられる。

そこで、本事業では、PV パネルの長期使用・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ため、以下の内容を実施することとした。

- リサイクル推進に必要な DPP で考慮される情報要件項目の整備
- ステークホルダー間での DPP データの連携方法の検証
- 使用済 PV パネルの長期使用可能性を予測する方法の確立
- 年代・製造者が異なる使用済 PV パネルを混合した太陽光発電設備の設置・運転
- 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
- EUの DPP に関する基礎調査

### 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、以下の内容を実施する。なお、本事業は計 3 年間の実施を予定しており、令和 5 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デジタル・プロダクト・パスポート(DPP)で考慮される情報要件項目の整備(本年度実施事項:使用済 PV パネルサンプルの分析及び関係者ヒアリングを通じた DPP データ項目の仮説構築)
- ステークホルダー間での DPP データの連携方法の検証(本年度実施事項:データ連携に 用いる二次元バーコードの規格検討、情報へのアクセス方法の仮説構築)
- 使用済 PV パネルの長期使用可能性を予測する方法の確立(本年度実施事項:使用済 PV パネルサンプル及び試験用小型 PV モジュールの加速劣化試験、劣化試験前後での 長期使用可能性を予測に関する各種パラメータの測定実施)
- 年代・製造者が異なる使用済 PV パネルを混合した太陽光発電設備の設置・運転(本年度実施事項:年代・製造者が異なる使用済 PV パネルを混合した太陽光発電設備の導入と運転データ取得)
- 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(本年度実施事項:文献調査・有識者ヒアリングに基づく事業における CO2 排出量削減効果の評価)
- DPP に関する基礎調査(本年度実施事項:欧州における DPP 導入状況に関する文献調査及び現地訪問調査、PV パネルのリユース・リサイクルに関する文献調査)

# 2. リサイクル推進のためのデータ不足への対応(情報伝達すべき項目の整理)

はじめに、国内の既設 PV パネルの材料や組成の全体像を把握するべく、PV パネルの製造年別、メーカー別の統計データのとりまとめを行った。とりまとめ結果を踏まえて、全国の PV パネル導入状況について、製造年、メーカー、型式、組成情報、また別途検討を進める劣化予測の情報を紐付け、情報を集約することを目的とし、使用済 PV パネルの分析を行った。

初年度である本年度は製造年・メーカー等に制限を設けることなく、PV CYCLE JAPAN(以下、「PVCJ」と言う。)を通じて得られた使用済 PV パネルについて製造年、メーカー、型式の情報を整理の上、カタログ掲載項目情報の整理とガラス、樹脂、電極のサンプリング・分析を行った。本年度事業における分析によって、全国に導入されている PV パネルの約 2 割に対応する製造年、メーカー、型式の PV パネルに関する組成情報が集約されたため、本年度カバーできなかった製造年・メーカー・型式についても次年度以降調達・分析し、全国の PV パネルの実態把握につなげる。

情報伝達すべき項目については、カタログ掲載項目や上記分析に基づき含有が確認された有 害懸念物質等の他、関係者ヒアリングを通じて得られた把握すべき項目を含める形で、情報伝達 すべき項目の仮説を構築した。

ステークホルダー間での DPP データの連携方法としては、二次元バーコードを太陽光発電所

の PV パネルに貼り付け、リユース業者及び再資源化業者等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を検討、実証した。結果として、搭載するデータ量や耐久性を考慮した二次元バーコードの大きさ、素材等の規格が定められ、規格に基づき二次元バーコードを作成した上で、運転中の太陽光発電所に設置されている PV パネルに貼り付けた。風化の影響や、実際に二次元バーコードを活用した各ステークホルダーによる情報アクセスの実証等は次年度事業にかけて確認していく。

### 3. 長期使用に関する判断基準の不足等への対応(長期使用に関する情報整理)

材料の劣化が PV パネルの出力にどのような影響を及ぼすか明らかにすることを目的として加速劣化試験(耐候性試験、冷熱衝撃試験、恒温恒湿試験、温度サイクル試験)を実施した。劣化試験前後での回路の健全性や樹脂等の材料の劣化度合いの評価手法として交流インピーダンス法を用い、従来の評価方法である直流 I-V 特性、EL 測定、PL 測定と比較して相関を調査することで、本手法の有効性を検討した。交流インピーダンス法を用いた結果、新品 PV パネルと劣化 PV パネルでは異なる複素インピーダンス線図(Cole-Cole Plot、以下「CCP」と言う。)が得られたため、交流インピーダンス測定法は PV パネル内の劣化を明確に捉える有効な手法と言え、CCP を解析することで実際の PV パネルの劣化の度合いを評価できる可能性があることが示唆された。

また、使用済 PV パネルからなる太陽光発電所を導入・運転する技術的知見を得るため、本年度事業では、年代・製造者が異なる使用済 PV パネルを混合した太陽光発電所を東北大学に設置し、運転を行った。結果として、このような太陽光発電所が運転可能であることを確認するとともに、運転データを取得した。次年度以降、一定期間運転データを取得することで、発電出力の不安定さやトラブルの有無等を確認していく。

#### 4. 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

本事業の実施を通じて期待される、PV パネルの長期使用・リュースによる新規 PV パネル製造量の減少、またリュースの国内利用の促進による海外輸出の回避、その先の国内リサイクル活性化による資源循環及び適正処理推進に伴う環境影響改善効果の評価方法を検討し、評価を実施した。本年度は特に CO2 排出量削減効果の評価手法の検討に注力し、ベースラインとリュース・リサイクル促進ケースについて、「実証事業終了時点」「普及段階 2030 年時点」の 2 パターンの時点における CO2 排出量削減効果の評価を行った。結果として、実証事業終了時点におけるベースライン排出量は 8,616t-CO2、リュース・リサイクル促進ケースの排出量は 2,235t-CO2 であった。また、普及段階 2030 年時点におけるベースライン排出量は 86,158t-CO2、リュース・リサイクル促進ケースの排出量は 22,352t-CO2 であった。

本年度は実証終了時点の PV 処理量を直近の PVCJ 処理実績の 10 倍と仮定したが、評価結果を踏まえて、次年度以降は、実証時点終了時のリユース・リサイクル量の想定値見直し、回収した PV パネルのリユース・リサイクルの比率、使用するリサイクル技術の想定等についても、実態に応じて改訂していく余地がある。

### 5. DPP に関する基礎調査の実施

昨今の DPP に関する国際議論動向や、先行して導入議論がされ始めている品目(電池、衣類、建設材料)における具体的な検討状況について、文献調査により情報整理を行った。また、国内外における PV パネルのリユース・リサイクル実施にあたっての課題について、文献調査により情報整理を行った。また、諸外国における PV パネルのリユース・リサイクルの実態を把握し、PV パネルにおいて情報伝達すべき項目及び情報伝達のあり方についてステークホルダーとの意見交換を行うため、海外訪問調査を実施した。結果として、欧州において DPP に関する検討は進められており、特に電池など一部の品目においては DPP 実装のスケジュールも整理されている一方、制度面でも実務面でも、PV パネルの DPP の原型が存在していないことが確認された。また、PV パネルのリユース・リサイクルの課題整理として、ガラス、樹脂、電極等各部材の循環実態を確認し、情報伝達におけるポイントを「情報伝達すべき項目の整理」において盛り込んだ。

# Summary

### 1. Outline of Implementation of the Project

The purpose of this project is to build a business model for expanding long-term use, reuse, and recycling of PV panels currently in operation. The project is scheduled to be conducted for a total of 3 years, and the following subitems in parentheses were implemented in the fiscal 2023 project.

- Organizing data items for digital product passport (DPP) are necessary to promote recycling (This fiscal year: Analyze used PV panel samples and formulate hypothesis of DPP data items through interviews with relevant parties)
- Verification of DPP data linkage among stakeholders (This fiscal year: Establish standards for two-dimensional bar codes used for data linkage and formulate hypotheses on how to access information)
- Establishing a Method for Predicting Long-Term Usability of used PV Panels (This fiscal year: Conduct accelerated degradation tests of used PV panel samples and small PV modules for testing, and measure various parameters for predicting long-term usability before and after the degradation tests)
- Installation and Operation of Photovoltaic Power Generation Facilities Comprising Different Types of used PV Panels (This fiscal year: Introduce photovoltaic power generation facilities mixed with used PV panels of different ages and manufacturers, and acquire operation data)
- Evaluation of Environmental Impact Improvement and CO2 Emission Reduction Effects in Projects (This fiscal year: Evaluate CO2 emission reduction effects in projects based on literature survey and interviews with experts)
- Basic Research on DPP (This fiscal year: Literature survey on the introduction of DPP in Europe and site visit survey; Literature survey on reuse and recycling of PV panels)

# 2. Responding to Data Shortages for Recycling Promotion

Firstly, we compiled statistical data of PV panels by manufacturing year and manufacturer in order to grasp the overall picture of materials and composition of existing PV panels in Japan. Based on the statistical data, we analyzed used PV panels for the purpose of consolidating information on PV panel introduction nationwide by linking the year of manufacture, manufacturer, type, and composition information, as well as information on

deterioration prediction, which will be discussed separately.

In this fiscal year, which is the first year of our study, we organized information on the year of manufacture, manufacturer, and type of used PV panels obtained through PV CYCLE JAPAN, organized information on items listed in the catalog, and conducted sampling and analysis of glass, resin, and electrodes. The analysis in this fiscal year brought together information on the composition of PV panels of the year of manufacture, manufacturer, and type corresponding to approximately 20% of PV panels introduced nationwide. Therefore, from the next fiscal year onwards we will collect and analyze the year of manufacture, manufacturer, and type of PV panels that were not covered in this fiscal year, thereby helping us to understand the actual status of PV panels nationwide.

With regard to the items to be transmitted, we formulated a hypothesis of the items to be transmitted by including items listed in the catalog, substances of hazardous concern that have been confirmed to be contained based on the above analysis, and other items to be grasped through interviews with related parties.

As the method for linking DPP data among stakeholders, we examined and demonstrated the mechanism in which a two-dimensional bar code is affixed to PV panels of solar power plants, and reuse companies and resource recycling companies access the information of used PV panels through the bar code. As a result, having established the standard of the two-dimensional bar code related to the size and material considering the amount of data to be loaded and durability, the two-dimensional bar code was created based on the standard, and then attached to PV panels installed in solar power plants during operation. The effects of weathering and the demonstration of information access by stakeholders using the two-dimensional bar code will be examined over the next fiscal year.

# 3. Response to Lack of Criteria for Long-Term Use

The accelerated degradation test (Weather durability test, cold and hot shock test, constant temperature and humidity test, temperature cycle test) was conducted to clarify the effect of material degradation on PV panel output. The AC impedance method was used as an evaluation method of circuit integrity and degree of degradation of materials such as resin before and after the degradation test, and the effectiveness of this method was examined by investigating the correlation compared with the conventional evaluation methods of DC I-V characteristics, EL measurement and PL measurement. As a result of using the AC impedance method, different complex impedance

diagrams (Cole-Cole plots) were obtained between the new PV panel and the degraded PV panel. Therefore, it was suggested that the AC impedance measurement method is an effective method to clearly capture the degradation in the PV panel, and that the CCP analysis could evaluate the degree of degradation of the real PV panel.

In addition, in order to obtain technical knowledge for introducing and operating a solar power plant consisting of used PV panels, a solar power plant with a mixture of used PV panels of different ages and manufacturers was installed and operated at Tohoku University in this fiscal year. As a result, it was confirmed that such a solar power plant could be operated, and operation data were obtained. After the next fiscal year, by obtaining operation data for a certain period of time, the instability of power generation output and the existence of troubles will be confirmed.

4. Evaluation of environmental impact improvement effect and CO2 emission reduction effect in business

We assessed the effect of this project of resource circulation and appropriate disposal, after examining the evaluation method of environmental impact improvement effect. This project particularly aims to reduce PV panel production quantity by using products for long-term and increasing reusable PV panels, to avoid export by promoting domestic use of reusable PV panels, and to promote recycling within the country.

In this fiscal year, we focused on the evaluation method of CO2 emission reduction effect. We evaluated the CO2 emission reduction effects at two points: "the end of the demonstration project" and "the diffusion stage in 2030," considering the baseline case and the promotion of reuse and recycling case. As a result, the emissions in the baseline case at the end of the demonstration project were 8,616 t-CO2, while the emissions in the reuse and recycling promotion case were 2,235 t-CO2. Additionally, the emissions in the baseline case at the diffusion stage in 2030 were 86,158 t-CO2, and the emissions in the reuse and recycling promotion case were 22,352 t-CO2.

For the estimation in this study of this fiscal year, we assumed that the amount of PV processed at the end of the demonstration project was 10 times that of the latest PVCJ. For this study rom the next fiscal year onwards, however, depending on the actual situation, we will review the assumed amount of reuse and recycling at the end of the demonstration project, the ratio of reuse and recycling of collected PV panels, and the assumed recycling technology to be used.

# 5. Conducting basic research on DPP

The following basic research is conveyed with the objective to introduce DPP for PV panel in Japan. Firstly, we conduct literature survey on the recent trends in international discussions on DPP and the current consideration for introduction of specific items (batteries, clothing, and construction materials). We also surveyed the issues related to reuse and recycling of PV panels in Japan and overseas. In addition, the overseas visit survey was carried out to understand the actual situation of reuse and recycling of PV panels in foreign countries and to exchange opinions with stakeholders on the data items to be transmitted on PV panels and how to share information in DPP. As a result, we found that there is no institution or practice established for the prototype of DPP for PV panels, while Europe has developed the study on DPP and the DPP roadmap for some items such as batteries. Finally, in order to overcome the challenges for reuse and recycling of PV panels, we investigated the current status of the circulation in each material such as glass, resin, and, electrode, so that the points to transmit information transmission were added in the "Organized items for transmission."

# 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
	1.1.3 将来のビジネスモデルイメージ	2
	1.2 本年度の事業実施概要	3
	1.2.1 本年度の実施項目及び実施体制	3
	1.2.2 本年度の実施スケジュール	5
2.	リサイクル推進のためのデータ不足への対応(情報伝達すべき項目の整理)	6
	2.1 リサイクル推進に必要な DPP で考慮される情報要件項目の整備(情報伝達すべき項目 検討)	•
	2.1.1 国内に設置されている PV パネルの全体像の把握	7
	2.1.2 使用済 PV パネルからのサンプルの入手	8
	2.1.3 サンプルの分析と今後のデータ取得の考え方の整理	.10
	2.1.4 リサイクル材の受入条件等の整理	. 29
	2.1.5 長期使用・リユースに対して出融資をする業界関係者への聞き取り	. 32
	2.1.6 DPP データ項目の整備に向けた検討	33
	2.2 ステークホルダー間での DPP データの連携方法の検証(情報にアクセスする方法の実	
	2.2.1 二次元バーコードに付与するデータ量の検討	
	2.2.2 二次元バーコードラベルの大きさ・素材等の規格に関する検討	
	2.2.3 二次元バーコードラベルの風化等に関する検討	
	2.2.4 情報にアクセスする方法の仮説構築	46
3.	長期使用に関する判断基準の不足等への対応(長期使用に関する情報整理)	49
	3.1 使用済 PV パネルの長期使用可能性を予測する方法の確立(回路の健全性と材料の劣	
	度合いの評価に向けた検討)	
	3.1.2 テーブル試験での検証結果 3.1.3 試験サンプルを用いた検証結果	
	3.1.3 試験リノノルを用いた快証桁未	
	っ ・ / ・ / / / //-T/Sig / "/ / // /	nx

	3.1.5 PV パネルの健全性と劣化度合いの評価手法の課題と課題解決の方向性	69
	3.2 年代・製造者が異なる使用済 PV パネルを混合した太陽光発電設備の設置・運転	70
	3.2.1 様々な使用済 PV パネルによる太陽光発電所の導入	70
	3.2.2 様々な使用済 PV パネルによる太陽光発電所の運転データの取得	79
	3.2.3 まとめと今後の予定	80
4.	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	81
	4.1 評価手法の検討	81
	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	
	4.1.2 有識者からの助言を踏まえた評価方法の検討	82
	4.1.3 評価に用いる一次データの取得	85
	4.2 環境影響改善効果の評価実施	86
	4.2.1 評価の条件設定	86
	4.2.2 評価の結果	89
	4.2.3 評価に使用したデーター覧	92
	4.3 次年度以降の検討に向けた参考情報	103
5.	EU の DPP に関する基礎調査の実施	105
	5.1 基礎調査の構成	105
	5.2 EU の DPP に関する文献調査	106
	5.2.1 蓄電池	106
	5.2.2 衣類	111
	5.2.3 建設材料	116
	5.2.4 PV パネル	120
	5.3 PV パネルのリユース・リサイクルに関する既往文献調査	126
	5.3.1 既往調査で把握された PV パネルのリユース・リサイクル実態	126
	5.3.2 既往調査で整理された PV パネルのリユースにおける課題	127
	5.3.3 既往調査で把握された PV パネルのリサイクルにおける課題	129
	5.4 海外訪問調査	132
	5.4.1 目的	132
	5.4.2 実施行程·実施者	132
	5.4.3 結果	133
	5.4.4 まとめ	137

ル	・プロダクト・パスポート(DPP)の運用効果の検証実証事業」現地視察会の開催1	39
7.	評価審査委員会の出席1	40
8.	対外的な発信の実施	141

# 図 目次

义	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	使用済 PV パネルのリユース・リサイクル事業のビジネスモデルイメージ	3
図	1-3	本年度事業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(国内出荷量ベース)の推計結果	7
図	2-2	入手した PV パネル(メーカー別)	9
図	2-3	入手した PV パネル(製造年別)	9
図	2-4	ガラスのサンプルの採取の様子(左)とセル/EVA シートのサンプルの範囲(右)	10
図	2-5	ヒ素の含有量とアンチモンの含有量の関係	13
図	2-6	可搬型近赤外線分光装置(型番:SYS-IR-R-P)	15
図	2-7	ロール機によるガラス剥離資料(左)及びブラスト処理によるガラス剥離試料(右)	16
図	2-8	可搬型ラマン分光装置	17
図	2-9	PB(左)及び EVA(右)	19
図	2-10	PP(左)及び PE(右)	19
図	2-11	アルミニウムシート試料	. 20
		黒シート試料	
図	2-13	青シート試料	. 20
-		セル/EVA シートから切り出したフィンガー線断面とインターコネクタ断面	
図	2-15	セルの大きさ(N=51)	. 23
図	2-16	4 角形(左)、8 角形(中央)、及びハーフカット(右)のセルの例	. 24
図	2-17	フィンガー線の断面積と製造年の関係(N=53)	. 24
図		フィンガー線の使用量と製造年の関係(N=50)	
図	2-19	インターコネクタの断面積と製造年の関係(N=54)	. 25
図		インターコネクタの断面の SEM 像(左図)とはんだ部分の成分分析(右図)	
図	2-21	インターコネクタの元素マッピング(Pb の検出ありのサンプル)	. 26
図	2-22	インターコネクタの断面の SEM 像(左)とインターコネクタの接合素材の成分分析	(右)
			. 27
図	2-23	インターコネクタの元素マッピング(Pb の検出無しのサンプル)	. 27
図	2-24	国内に設置されている PV パネルの中でのサンプルの位置付け	. 29
図	2-25	EU の研究開発プロジェクトの CIRCUSOL の下で検討された PV パネルの伝達項	目案
			. 34
図	2-26	情報にアクセスする仕組みについて	. 38
図	2-27	′二次元バーコード作成例	41
図	2-28	ウルトラベル・ネオ 基材構造	. 42
		ケミスト汎用 基材構造	
		ケミスト汎用+UV 吸収ラミネート 基材構造	
义	2-31	鰺ヶ沢太陽光発電所	. 45

図	2-32	石巻雄勝太陽光発電所	45
図	2-33	白石太陽光発電所	46
図	2-34	二次元バーコードの貼付状況の一例(PV パネル側面、裏面)	46
図	2-35	情報にアクセスする方法のうち集約拠点(倉庫)業務のイメージ図	47
図	2-36	二次元バーコード及び仮サイトヘアクセス	47
図	3-1 =	Iールコールプロット(CCP)と等価回路の例	50
図	3-2	ミニ PV モジュールの外観と諸元	50
図	3-3 I	-V 測定システムの概要	.51
図	3-4 E	L 及び PL 測定システム PVX1000 + POPLI Octa(アイテス製)の概要	.51
図	3-5 (	CP 測定システムの概要	.51
図	3-6	CCP の温度依存性	52
図	3-7 <del>1</del>	=ジュールの EL、PL、CCP(Rsh)測定結果(1)	54
図	3-8 <del>T</del>	=ジュールの EL、PL、CCP(Rsh)測定結果(2)	55
図	3-9 ⋒	対候性試験装置の外観と試料設置時の内部の様子	57
図	3-10	試験時履歴の一部	57
図	3-11	試料作製の手順	57
図	3-12	耐候性試験後のモジュールの外観写真	58
図	3-13	100hr 試料の耐候性試験前後の CCP	58
図	3-14	500hr 試料の耐候性試験前後の CCP	58
図	3-15	Rsh の紫外線照射時間依存性(3 次多項式近似)	59
図	3-16	冷熱衝撃試験装置の外観と試料設置時の内部の様子及び試験条件	59
図	3-17	冷熱衝撃試験前後のモジュール 4 試料の CCP	60
図	3-18	恒温恒湿試験装置の外観と試料設置時の内部の様子	60
図	3-19	恒温恒湿試験 400hr 経過時及び 1000hr 終了時のモジュールの様子	.61
図	3-20	温度サイクル試験装置の外観と試料設置時の内部の様子及び試験条件	.61
図	3-21	温度サイクル試験 400hr 経過時及び 1000hr 終了時のモジュールの様子	62
図	3-22	使用済 PV パネルでリユース判定 OK 品の外観と製品仕様	63
図	3-23	I-V 特性評価システムの概要	63
図	3-24	EL 測定システム PVX300(アイテス製)の概要	63
図	3-25	PL 測定システム PVX330 + POPLI(アイテス製)の概要	64
図	3-26	CCP 測定システムの概要	64
図	3-27	温度サイクル試験前後での EL 測定結果(ISC 100%)	65
図	3-28	温度サイクル試験前後での PL 測定結果(パネル上部 3 枚)	66
図	3-29	温度サイクル試験前後の CCP	66
図	3-30	リユース判定△及び NG となったパネルの外観	67
図	3-31	リユース検査で NG 判定の使用済 PV パネルの CCP	67
図	3-32	モジュールの等価回路設計	68
図	3-33	モジュール 2 個直列接続したストリングスの CCP	69
図	3-34	Rsh が異なる(#1と#3)直列接続の等価回路設計	69

义	3-35	環境科学研究科本館	70
図	3-36	環境科学研究科本館 屋上 平面図	72
図	3-37	架台 図面(一例)	72
図	3-38	設置状況①	73
図	3-39	設置状況②	73
図	3-40	設置状況③	73
図	3-41	PPLC(R)-PV システム例	74
図	3-42	PPLC センサー設置状況(モジュール固定)	75
図	3-43	PPLC センサー設置状況(チャネル固定)	75
図	3-44	PPLC センサー設置状況(モジュール固定)	76
図	3-45	EL 検査の状況	76
図	3-46	EL 検査画像の例	78
図	3-47	PV パネル単位での運転データ	79
図	3-48	取得した運転データの一例	80
図		CA 評価の対象範囲(上図:リユース・リサイクル促進ケース、下図:ベースライン)	
図		)PP に関する基礎調査の実施イメージ1	
		<b>電池サプライチェーンの各段階における電池規則の要件1</b>	
図	5-3	次州における繊維の循環実態1	115
図	5-4	次州における建設材料の循環実態1	119
		PV パネル DPP 実装スケジュールのイメージ1	
図	5-6 F	PV CYCLE による PV パネル回収状況1	24
		次州の太陽光パネルの DPP 実証における情報伝達項目1	
		大陽光パネルの処理実態1	
図	5-9	国内リユースのビジネスモデルイメージと現状の課題1	27
図	5-10	リユース普及促進に向けた施策モデルの全体像1	28
図	5-11	情報プラットフォーム(PF)導入のメリット1	28
义	5-12	ガラス製品の循環実態(2019年)	131

# 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	本年度事業の実施体制	4
表	2-1	ガラスの分析項目	11
表	2-2	ガラスの含有量分析の結果	12
表	2-3	バックシート及び封止材の判別可能な素材一覧	16
表	2-4	分析結果一覧	18
表	2-5	電極の分析項目	22
表	2-6	PV パネルのカタログに掲載されていた項目(1/2)	35
表	2-7	PV パネルのカタログに掲載されていた項目(2/2)	36
表	2-8	各種基材の評価比較表	44
表	2-9	太陽光発電所 一覧表	45
表	2-10	) 読取手法の評価比較表	48
表	3-1	モジュールの I-V 測定結果	53
表	3-2	温度サイクル試験前後での I-V 特性の比較	64
-		使用した使用済 PV パネル一覧	
		主な機器一覧表	
表	3-5	EL 検査に使用した主な機器	77
表	3-6	異常モードの定義及び PV パネル交換判断基準	77
	3-7	#3/C(H/)	
		参考にした主な既往文献	
表	4-2	実証事業事務局側が指定した有識者によるレビュー	84
表	4-3	「実証事業終了時点」「普及段階 2030 年時点」における使用済 PV パネルの年間	取扱量
			86
表	4-4	実証事業終了時点の評価結果	90
表	4-5	普及段階 2030 年時点の評価結果	91
表	4-6	リユース・リサイクル促進ケースの LCA 評価に用いた CO2 排出原単位と活動量	93
表	4-7	ベースラインの LCA 評価に用いた CO2 排出原単位と活動量	96
表	4-8	リユース・リサイクル促進ケース・ベースラインの LCA 評価に用いた、CO2 排出原質	单位·活
		動量のバックデータ	102
		バッテリーパスポートに保存される情報	
表	5-2	持続可能な循環型繊維戦略において低減された主要措置	112
表	5-3	WEEE 指令における目標	120
表	5-4	WEEE 管理への貢献度に関する評価イニシアチブ 部分改正提案	121
表	5-5	WEEE 指令条項のうち回収・処理体制に関する項目	123
表	5-6	CIRPASS において整理された PV データベースの設計要件	124
丰	<b>5</b> 7	DV/パネルのロユーフチ順と概要	127

表	5-8	PV パネルのリサイクルに関する文献調査の方針	129
表	5-9	太陽光パネルの年代別・部材別組成	130
表	5-10	海外訪問調査の行程	132
表	5-11	Sustainable Solar 2023 のプログラムの概要	132
表	8-1	令和 5 年度における論文(投稿・口頭発表)発表	141
表	8-2	令和 5 年度におけるその他の情報発信	141

# 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、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		
長期使用・リュースの 意思決定を行うため の判断基準が不足	<ul><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て構成した太陽光 発電所の運転における知見が無い</li></ul>	● 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	
リサイクル推進のため のデータ不足	<ul> <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>	● 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	

### 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

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

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。

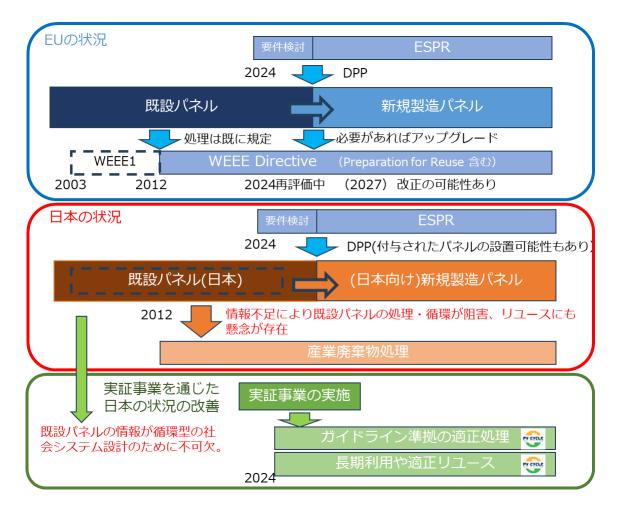


図 1-1 欧州(EU)と比較した我が国における既設 PV パネルの情報伝達の必要性

# 1.1.3 将来のビジネスモデルイメージ

2030 年台前半から始まる、固定価格買取制度(FIT)による太陽光発電由来の電力の調達期間終了後を見据えて、東北電力が東北地方一円にて FIT の調達期間が終了する太陽光発電所から排出される使用済 PV パネルに対して、その後の使用可能性判断も含めた検査結果を活用したリユース事業、ガラスやシート等に含まれる資源の回収も行うリサイクル事業を、PVCJ や地元企業と連携の上、実施していることを目指す(ビジネスモデルのイメージは図 1-2 参照)。併せて、東北電力が始めたビジネスモデルが東北地方に限らず全国に広がっていることを目指す。

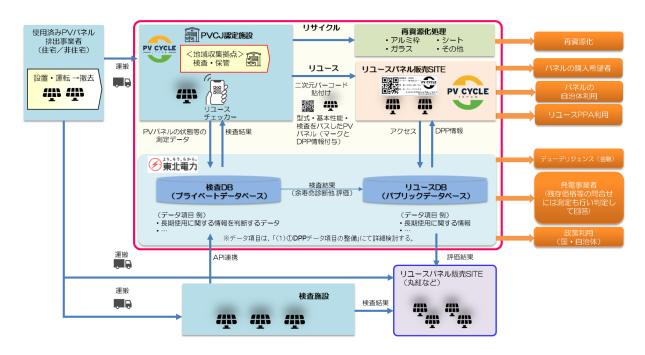


図 1-2 使用済 PV パネルのリユース・リサイクル事業のビジネスモデルイメージ

# 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。各実施項目の実施体制を表 1-2 に示す。

- (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 DPP で考慮される情報要件項目の整備
    - 使用済 PV パネルのサンプル入手
    - 入手したサンプルの分析と今後のデータ取得の考え方の整理(対象部材:ガラス、樹脂類、セル上の電極等)
    - リサイクル材の受入条件等の整理
    - 長期使用・リユースに対して出融資をする業界関係者への聞き取り
    - 情報伝達すべき項目及びデータセットの仮説構築
      - ②ステークホルダー間での DPP データの連携方法の検証
    - 二次元バーコードに付与するデータ量の検討
    - 二次元バーコードラベルの大きさ・素材等の規格に関する検討
    - 二次元バーコードラベルの風化等に関する検討
    - 情報にアクセスする方法の仮説構築

- (2)長期使用・リユースに関する判断基準等の不足への対応
  - ①使用済 PV パネルの長期使用可能性を予測する方法の確立
    - 使用済 PV パネルサンプル及び試験用の小型 PV モジュールを対象とした加速劣化試験 の実施
    - 劣化試験実施前後での各種測定の実施
  - ②年代・製造者が異なる使用済 PV パネルを混合した太陽光発電設備の設置・運転
    - 年代・製造者が異なる使用済 PV パネルを混合した太陽光発電設備の導入
    - 上記太陽光発電設備の運転データの取得
- (3)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
  - 文献調査及び有識者へのヒアリング調査の実施
  - 事業における CO2 排出量削減効果の評価
- (4)EUの DPP に関する基礎調査
  - EUの DPP に関する文献調査
  - PV パネルのリユース・リサイクルに関する文献調査
  - 欧州委員会への訪問調査

表 1-2 本年度事業の実施体制

項目番	実施項目	担当プレイヤー		
号	大肥垻日 	主	副	_
(1)リサイ	クル推進のためのデータ不足への対応	<u>,</u>		
1	DPP で考慮される情報要件項目 の整備	東北電力	E&ES	MRI
2	データの連携方法の検証	東北電力	ı	-
(2)長期侵	<b>使用・リユースに関する判断基準等の不</b>	足への対応		
1	使用済 PV パネルの長期使用可能性を予測する方法の確立	東北電力	MRI	-
2	年代・製造者が異なる使用済 PV パネルを混合した太陽光発電設備 の設置・運転	東北電力	-	-
(3)	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	東北電力	MRI	-
(4)	DPP に関する基礎調査の実施	東北電力	MRI	E&ES

(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 1-3 のとおり。事業開始は 11 月となったが、予定されていた作業は 年度内に終了した。



図 1-3 本年度事業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(情報伝達すべき項目の整理)

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。本年度事業では、情報伝達すべき項目についての検討、及び情報にアクセスする方法の実証を行った。

# 2.1 リサイクル推進に必要な DPP で考慮される情報要件項目の整備(情報伝達すべき項目の検討)

EUの「エコデザイン及びエネルギーラベリング作業計画 2022-2024」及び本年度事業の下で実施した海外訪問調査(5.4 にて詳述)によると、EUでは、PVパネル及びインバーターについて、エコデザイン要件<sup>2</sup>及びエネルギーラベリング<sup>3</sup>の案が現在策定中である。また、EUでは2024年1月に、エコデザイン指令及びエネルギーラベリング規則の下で、PVパネル及びインバーターのリサイクル指標開発に向けた検討を開始し、2025年3月までにドラフト版のリサイクル指標を開発することを目指している<sup>4</sup>。 さらに EUでは、今後、新たに ESPR を制定し、あらゆる製品に対して DPPという概念を導入し、製品製造段階の情報のみならず、長期使用・リユース・リサイクル及び適正処理といった製品使用後の情報も、製品ライフサイクルのステークホルダー間で共有することが想定されている(DPPについては、本報告書「5.2 EUの DPPに関する文献調査」にて詳述)。

エコデザイン要件や DPP の概念が具体化されれば、今後製造される PV パネルに対しては、製造事業者からリサイクルに必要と考えられる情報が付与され、それらを利用した循環利用が一定程度進展することが期待される。一方、我が国に既に設置されている PV パネルは、近い将来に廃棄物として発生し、廃棄の対象となり得るものであるが、長期使用・リュース・リサイクル及び適正処理といった使用後の情報が明示的に付与されていない。

本節 2.1 では、リサイクル推進に必要な DPP データ項目について検討を行った。最初に、国内に既に設置されている PV パネルの材料や組成の全体像を把握する目的で、PV パネルの製造年別、メーカー別の統計データのとりまとめを行った。その上で、初年度である本年度では製造年・メーカー等に特に制限を設けることなく、使用済 PV パネルのサンプリングを行った。次いで、サンプルのガラス、樹脂、及び電極について分析を行った。さらに、サンプルが国内の既設の PV パネルの全体像の中でどこに位

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> EU のエコデザイン指令(DIRECTIVE 2009/125/EC)によると、エコデザイン要件とは、製品の環境パフォーマンスを向上するための製品または製品の設計に関するあらゆる要求事項、または製品の環境側面に関する情報伝達のためのあらゆる要求事項、と定義されている。現時点では、家庭用及びサービス用の照明器具の4品目、電子デバイスの5品目、家電製品の7品目、暖房・冷蔵デバイスの10品目、及びその他製品の8品目は、エコデザイン要件を満たす必要がある。

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> EU のエネルギーラベリング規則(REGULATION (EU) 2017/1369)により求められている要求事項。特定のエネルギー関連製品に対して、エネルギー効率などを表示することが求められる。EPREL というサイトで、エネルギーラベリングを確認することができる。EPREL には、現時点で、照明、小型室内暖房機、スペースヒーター・給湯器、固形燃料ボイラー、冷蔵庫・冷凍庫、業者向け冷蔵機器、直に販売する機能を有した冷蔵庫、洗濯機・乾燥機、衣類乾燥機、空調機器及びファン、換気ユニット、テレビを含むディスプレイ、調理器具、食洗器、コードレス電話機・タブレット・携帯電話、タイヤのエネルギーラベリング掲載されている。

<sup>4</sup> 本年度事業で調査した限り、PV パネルのリサイクル指標は、例えば、EPREL で公開されることも検討されている。

置するかの検討も行い、次年度以降にサンプリングを行うことが望ましい PV パネルについて検討した。 最後に、リサイクル推進に必要な DPP データ項目について検討を行った。

# 2.1.1 国内に設置されている PV パネルの全体像の把握

本年度事業では、民間推計と政府統計に基づき、国内への PV パネルの出荷量・メーカーシェア<sup>5</sup>の 経年変化を独自に推計し、国内に設置されている PV パネルの全体像を把握するための資料を作成した。結果は、図 2-1 に示すとおりである。

図 2-1 によると、国内で固定価格買取制度が開始された 2012 年 7 月以降、PV パネルの出荷量が 急速に増えてきていたことが分かる。また、2008~2011 年までは、グラフ中赤色、オレンジ色、薄い青 色、濃い青色、ピンク色、赤茶色で示す計 6 社のメーカーのシェアが全体の 80%以上を占めていたが、 2012 年以降は多くのメーカーが参入した。2022 年になると、2008~2011 年まで全体シェアの 80%以上を占めていた 5 社のシェアは、全体の計 10%程度となっている。

リサイクル推進の課題の一つとして、リサイクルにおける PV パネルの分解・分別後産物に関する情報 (懸念物質の含有情報等)の不足が挙げられる。次年度事業では、出荷量が急速に増えた 2012 年以降を主な対象として、主要メーカーの PV パネルの材料の特徴を把握することを通じて、リサイクル推進のための情報不足への対応を試みる。

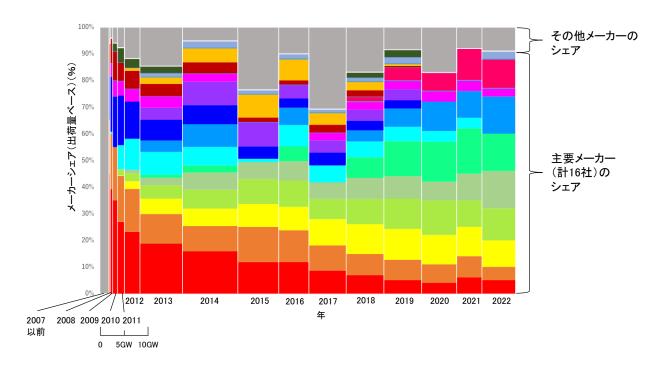


図 2-1 PV パネルのメーカーシェア(国内出荷量ベース)の推計結果

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、2008~2022 年まで一貫して同じ色を用いた。

注釈 3:2007 年以前の出荷量に関する民間推計の値は得られなかったため、上図の「2007 以前」は、2007 年までの国内における PV パネルの累積導入量を表し、メーカー別のシェアは示していない。

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> 海外で生産された PV パネルの日本への出荷分を含み、日本で生産された PV パネルの海外への出荷分を除く。

# 2.1.2 使用済 PV パネルからのサンプルの入手

初年度である本年度は業務実施期間が限られていたことから、最大出力が 50W 未満の特殊な PV パネルを除き、特にメーカー・製造年等に制限を設けずに、PV パネルのサンプルを入手した。

# (1) 使用済 PV パネルの入手

PV パネルは、PV CYCLE JAPAN<sup>6</sup>(以下、「PVCJ」と言う。)の正会員のリサイクル事業者 5 社にて、計 100 枚入手した。なお、型式が重複しないように PV パネルを入手したため、計 100 枚の PV パネルの型式はいずれも異なる。

PV パネルの裏面のラベルから、メーカー及び製造年に関する情報を得た。結果、PV パネルは計 30 メーカーにより製造されたものであり、2010~2014年に製造されたものが最も多かった(図 2-2と図 2-3 を参照)。 製造年が不明の PV パネルについては、PV パネルの裏面のラベルに記載されている最大出力から製造年を推定した7。 いずれの PV パネルも結晶シリコン系であった。

# (2) PV パネルからのサンプルの採取

PV パネルからは、ガラスとセル/EVA シート®のサンプルを採取した。ガラスのサンプルは、PV パネルの表面を破砕し、採取した(図 2-4 の左図参照)。セル/EVA シートのサンプルは、概ね 1 セルの大きさの 120 パーセントの範囲を切断することで得た(図 2-4 の右図参照)。

\_

<sup>6</sup> PV パネルの持続可能な廃棄物管理の仕組みを日本に導入することを目的として、2021 年 1 月に設立された任意団体。PVCJ の運営は、一般財団法人秋田県資源技術開発機構が行っている。PV パネル専用のリサイクル処理装置を持ち、あわせて産業廃棄物処理業の許可を有する産業廃棄物処理業者を、PVCJ の正会員として認定している。

 $<sup>^7</sup>$  最大出力と製造年が既知の PV パネルによると、最大出力が 150W 未満のものは製造年が 2000 年以前、最大出力が 150W 以上 200W 未満のものは製造年が概ね  $2000\sim2010$  年であった。そこで、最大出力が 150W 未満の場合は製造年が 2000 年以前、最大出力が  $150\sim200$ W 未満の場合は  $2000\sim2010$  年と仮定した(最大出力が 10W 増えるごとに、2 年単位で製造年が新しくなると仮定)。また、現在は 500W が主流と仮定し、200W 以上の場合、40W 増えるごとに、2 年単位で製造年が新しくなると仮定した(500W の製造年が、 $2022\sim2023$  年になるように仮定)。

<sup>8</sup> PV パネルからジャンクションボックス・ケーブル、アルミ枠、及びガラスを分離した後に残る産物。

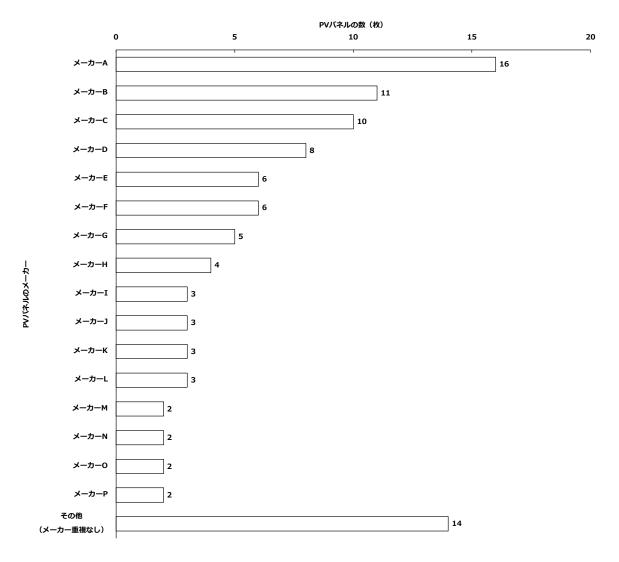


図 2-2 入手した PV パネル(メーカー別)

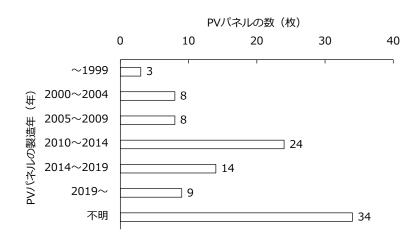


図 2-3 入手した PV パネル(製造年別)

注釈:「不明」と記載しているものについては、前ページの脚注で説明したとおり、最大出力から製造年を推定している。



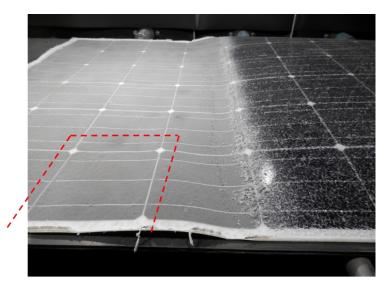


図 2-4 ガラスのサンプルの採取の様子(左)とセル/EVA シートのサンプルの範囲(右)

注釈:右図に示すとおり、セル/EVA シートのサンプルは、赤色の点線に沿って(概ね 1 セルの 120 パーセントの大きさになるように)切断して、これをサンプルとした。

# 2.1.3 サンプルの分析と今後のデータ取得の考え方の整理

本年度事業では、長期使用・リユース・リサイクル促進に向けて情報伝達すべき項目を検討するために、実際にサンプルの分析を行い、情報を取得した。事業期間内に可能な限り多くの分析を行うという視点から、樹脂・電極については 54 サンプルを分析に供し、ガラスについては樹脂・電極で分析に供した 54 サンプルに 8 サンプルを加えた計 62 サンプルを分析に供した。

# (1) サンプルの分析

a. 実施内容と実施方法

# 1) ガラス

PV パネルのガラスは、PV パネルの重量の半分以上を占める。不要になった PV パネルを処理した後に、ガラスが安易に埋立処分されないようにするためには、ガラスを資源として再利用できるように、その性状や成分の情報を把握しておく必要がある。「再生可能エネルギー発電設備の廃棄・リサイクルのあり方に関する検討会」。の「中間とりまとめ」(2024 年 1 月)でも、「リサイクル処理によって回収された素材については、アンチモンや不純物など、ガラスの再資源化において影響を与える成分や物質を除去・高度選別する技術の開発などの状況も踏まえて、動静脈連携によるガラスやシリコン等の再生資源の用途開発や品質向上による市場を形成していくことが重要である。」という意見が出されている。

これまでは、既設 PV パネルの製造年、メーカー、型式、組成情報等の情報を紐付け、データベースの 形で情報を一元管理する視点で PV パネルのガラスを分析した事例はなかった。 PV パネルを個別に分

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> 太陽光発電設備や風力発電設備等の再生可能エネルギー発電設備の廃棄・リサイクルに関する対応の強化に向けた 具体的な方策について検討することを目的として、2023 年 4 月に設置された。経済産業省と環境省が事務を務める。

析して適切なリサイクルルートに仕向けることはコストがかかり、また組成情報等に関する情報を参照可能なデータベースもこれまでなかったため、リサイクル業者は情報不足を理由に、PV パネルのガラスの再利用等に踏み出せていなかったと考えられる。本年度事業では、この点を解消するため、全体を把握し、戦略を立てることができるように意図してサンプリングを行い、PV パネルのガラスの分析を行った。分析項目は、表 2-1 に示すとおりである。分析項目は、既往知見の整理、ガラスの再生利用業者への聞き取りの他、「再生可能エネルギー発電設備の廃棄・リサイクルのあり方に関する検討会」での議論を考慮して、決定した。分析は、含有と溶出を行い、含有は 150 ミクロンに粉砕した試料を蛍光 X 線法(XRF)で分析し、溶出試験は環境省告示第 46 号(土壌溶出基準)で行った。

表 2-1 ガラスの分析項目

分析項目		分析項目として選定した理由
	<b>洧量</b>	
	Si、B、Na、K、Mg、Ca、Al、S、Fe、 Ti、Sr、Zr、Ba、Ce、As、Sb、Bi、Pb	ガラスの一般的な成分と不純物・添加物等と考えられるた め。
	Cd. Se	「再生可能エネルギー発電設備の廃棄・リサイクルのあり方に関する検討会」によると、JPEA 代行申請センターへのPV パネルの型式登録にあたり、4 物質(As、Pb、Cd、Se)の含有物質情報の登録が今後求められる見込みのため。
淫	沿量(環境庁告示第46号)	
	B、As、Pb、Cd、Se、Cr6+、F、Hg、 CN	ガラスの不純物・添加物等と考えられるため。
	Sb	ガラスのリサイクルにあたり従来から懸念されているため。

### b. 結果

# ア) 含有量

含有量分析の結果を、表 2-2 に示す。ほぼ全量が典型的なソーダ石灰ガラスで、特殊なガラスは無かった。また、ガラスの微量成分については、例えば Fe は 127~317mg/kg であった。

ガラスの一般的な成分以外の分析結果によると、「再生可能エネルギー発電設備の廃棄・リサイクルのあり方に関する検討会」等で懸念されていた Cd と Se は未検出、Pb も 11~72mg/kg という無視できるほどの低濃度の範囲であった。一方、As と Sb については、Fe による着色を変化させるために使われていると言われ<sup>10</sup>、多くのサンプルで検出された。As については 62 サンプル中 17 サンプルで検出、Sb については 62 サンプル中 58 サンプルで検出された。調べた範囲では As または Sb が未検出のガラスで Fe 濃度が低いわけではなく、メーカーによるコンプライアンス対応等で As または Sb が未添加となっていたのかと考えられた。今後、サンプル数を増やすことで、特徴が明らかになる可能性がある。

\_

<sup>10</sup> European Solar PV Industry Alliance, "Addressing uncertain antimony content in solar glass for recycling", 2023 によると、板ガラス製造時、As の酸化物または Sb の酸化物を添加することにより、ガラス中の鉄の状態が二価から三価に変化し、結果、太陽電池にとって望ましい波長帯の光の透過率が増加すると言われている。なお、Musgraves Hu Calvez, "Springer Handbook of Glass", 2019 によると、ガラス中で二価の鉄が三価の鉄に比べて多いとガラスは青色を、反対に三価の鉄が二価の鉄に比べて多いとガラスは淡い黄色を呈すと言われている。

表 2-2 ガラスの含有量分析の結果

八七百口	3 出版	含有量		
分析項目	単位	平均值	最大値	最小値
Si	重量%	31.2	31.7	30.6
В	-	未検出	未検出	未検出
Na	重量%	10.1	10.9	9.5
K	mg/kg	179	1,071	37
Mg	重量%	1.8	2.6	0.0
Ca	重量%	6.3	7.5	5.4
Al	重量%	0.6	0.8	0.0
S	mg/kg	1,023	1,746	87
Fe	mg/kg	189	317	127
Ti	mg/kg	364	1,229	96
Sr	mg/kg	127	1,717	15
Zr	mg/kg	62	249	8
Ва	mg/kg	571	1,523	234
Ce	mg/kg	955	1,824	519
As	mg/kg	108	741	9
Sb	mg/kg	1,911	2,991	508
Bi	mg/kg	26	27	25
Pb	mg/kg	37	72	11
Cd	-	未検出	未検出	未検出
Se	-	未検出	未検出	未検出

As と Sb については、含有量に相関関係があるかを見た(図 2-5 参照)。図 2-5 によると、Sb が 1,000mg/kg 未満のサンプルは 2 つあり、それらサンプルではいずれも As が 200mg/kg を超過していた。アンチモンの含有量が少ないガラスには、多くのヒ素が含有されている可能性が示唆された。

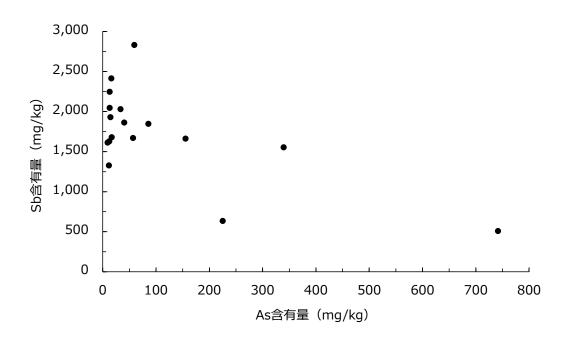


図 2-5 ヒ素の含有量とアンチモンの含有量の関係

注釈:As または Sb の含有量が未検出であったサンプルは除外している。

### イ) 溶出量

溶出量は最終処分場合や、土壌に直接触れるような場合を想定していくつかの基準がある。

本年度事業では、最も厳しいと考えられる土壌溶出基準で溶出試験を行った。AsとSbについては、いずれも含有量が一定以上検出されたサンプルで、As で 0.006~0.51mg/L、Sb で<0.01~1.4mg/L の溶出量の範囲の値を得て、使う場所により基準を超過する可能性を示唆する結果となった。実際のリサイクル処理で使用する条件で分析した場合に、常に同様の値となることは無いと考えられるが、そもそも含有量の情報があるため、リサイクル処理を行う側に、AsとSbの両元素の存在を伝達して、原料として使用する際の配慮を促すことは重要である。

また、PV パネルのガラスを安定型最終処分場に埋立処分することは既に禁止されているが、これを確実にするためにも、DPP の伝達項目に As と Sb の両元素を含めることは妥当である。

### c. まとめ

PV パネルのガラスの一般的な成分と不純物・添加物等の含有量と溶出量の分析を行った。含有量分析の結果によると、ガラスはほぼ全量が典型的なソーダ石灰ガラスであり、Cd と Se は未検出、Pb も無視できるほどの低濃度であった。一方、As については一部サンプルで検出、Sb については多くのサンプルで検出された。溶出量分析は、最も厳しいと考えられる土壌溶出基準で溶出試験を行った。結果、ガラスを使用する場所により基準を超過する可能性が示唆されたものの、リサイクル処理の実態に沿った条件で分析した場合に、常に同様の値となることは無いと考えられた。リサイクル処理を行う側に、As と Sb の両元素の存在を伝達して、原料として使用する際の配慮を促すことが重要であり、DPP の伝達項目にこれら両元素を含めることが妥当であると考えられた。

なお、サプライチェーン上の情報伝達という観点では、JAMP(Joint Article Management

Promotion-consortium)という仕組みが動脈側で実装されている。JAMP は、2007 年に欧州の REACH<sup>11</sup>が施行される直前にあたる、2006 年に設立された組織である。直近では、JAMP は「循環 経済対応の製品含有化学物質管理 ディスカッションペーパー(Ed.3)」(2024 年)を公表し、リサイク ル材の信頼性向上等に向けて、動脈と静脈の連携が重要であるとの認識を示している。次年度以降は、 JAMP が有する知見に関して情報収集を実施する。

また、次年度以降は、次の点に留意して、引き続き情報の蓄積を進める<sup>12</sup>。まず、本年度のサンプルで 採取できていない製造年・メーカーの PV パネルを採取し、分析をすることで、ガラスの成分について新 たな知見が得られる可能性がある。そのため、次年度以降、計画的なサンプリングを行っていきたい。ま た、PV パネルのガラス中の As と Sb は、EU でも認識され始めており、新規に製造される PV パネル のガラスに As と Sb を使用しないメーカーが増えてくる可能性がある点にも留意したい。さらに、PV パ ネルのガラスの用途に合わせて、リサイクル原料の試験項目を整理していきたい(例えば、あるリサイク ル処理の方法によっては、溶出量の項目は不要となる可能性もある)。

### 2)樹脂類

# a. 実施内容と実施方法

本項では PV CYCLE JAPAN (PVCJ)のルートを通じて集めた PV パネルのサンプルを対象に、 東北大学所有の可搬型近赤外分光(NIR)や、一部ラマン分光の分析装置を用いて樹脂種類やシート 構成を特定するための計測を行った。具体的項目は以下のとおりである。

- ガラスの下面、セル上面にある EVA を代表とした、複数種使われている封止材樹脂
- バックシートと呼ばれる、セル下部にある複数層で形成された樹脂の種類と構成
- その他付帯事項(特記すべき特殊なプラスチックや添加剤、その他劣化に関わる情報、通常より多層で断面検査が必要なサンプルの抽出等)

樹脂分析に使用した機器は、近赤外線分光装置とラマン分光装置の二種類であり、どちらも太陽光 発電所などのフィールドでの利用可能性も考慮して可搬型を使用した。

近赤外線分光法は、近赤外領域の光を測定対象とするプラスチック素材に照射し、その吸収された波 長に統計手法を用いて判別を行うもので、OH、NH、CH の官能基などによる吸収の違いを利用するも

\_

<sup>11</sup> EU 域内で 1 トン/年以上の物質を製造または輸入する事業者等は、欧州化学物質庁に当該物質の登録等をしなければならない制度。成形品中に懸念物質が 0.1 重量%以上存在している場合も、サプライチェーンの川下に情報伝達することも求めている。REACH 施行に伴い、EU 域外に立地していても、自社製品を EU に輸出している事業者は、サプライチェーンの上流から自社製品中の含有物質情報を取得し、EU 域内のサプライチェーンの川下に含有物質情報を伝達して、REACH の要求に対応しているようである。

<sup>12</sup> 前段の「2.1.1 国内に設置されている PV パネルの全体像の把握」で述べたとおり、本事業では最初に図 2-1 に示す PV パネルのメーカーシェアの推計を行った。その上で本年度は、特にメーカー・製造年等に制限を設けずに、PV パネルのサンプルを入手した。結果、後段の「2.1.3 サンプルの分析と今後のデータ取得の考え方の整理」の図 2-24 に示すとおり、2013 年以前の製造年のサンプルを多く得て、2016~2020 年の製造年のサンプルはほとんど得られなかった。次年度以降は、本年度入手できなかった製造年・メーカーをねらってサンプリングを行う。ただ、どの製造年・どのメーカーの PV パネルがどの発電所に導入されているかは公開資料から特定し難いだけでなく、PV パネルが発電所で撤去された後のサプライチェーンも公開情報から把握し難い。そのため、ねらった製造年・メーカーのサンプルを入手するためには、限られた情報に基づく現状の把握、仮説の立案、解決策の試行、および是正措置の検討、これらのプロセスを繰り返し行う必要がある。なお本事業では、3 年間の事業を通して、300 サンプルを超えるサンプルを採取することを目標にしている。

のである。基本的に透明や白の素材には有効であるが、着色素材では利用できない。

ラマン分光法は、対象物質に光を照射した際に、光と物質の相互作用により起こる現象(反射、屈折、吸収など)の中でも散乱を利用する。散乱光には入射光と同じ波長の光のレイリー散乱と、非常に微弱ではあるが、分子振動によって入射光とは異なる波長のラマン散乱がある。分析機器は、得られたラマンスペクトルにより、樹脂等の分子レベルの構造をデータベースと照合することで解析するものである。この方法は着色のプラスチック素材でもある程度は計測可能である。

# ア) 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

使用した可搬型近赤外線分光装置を図 2-6 に示す。分光仕様は以下のとおりである。また、同装置で判別可能なバックシート及び封止材の素材を表 2-3 に示す。

- 測定波長範囲:1450 ~ 2450nm
- 波長分解能:波長の1%(例:1500nmで15nm)
- 波長再現性 1(Reproducibility):+/- 0.20nm
- 波長再現性 2(Repeatability): < 0.05nm
- 信号対雑音比:スペクトル分解能単位当たり>5.000



図 2-6 可搬型近赤外線分光装置(型番:SYS-IR-R-P)

表 2-3 バックシート及び封止材の判別可能な素材一覧

PA	PA& PET	PET& EVA	PET& PE	PVDF8 フッ素	&PET& ⊐−ト
PET& PE&EVA	PET& PP	PET& フッ素コート	PP	EBA	EVA
PP &PE	PVDF &PET	PVF &PET	PVF& PET&PA	PE	PVB

バックシート 封止材

出所:モバイル近赤外(NIR)分光ソリューション,カタログ

この可搬型近赤外線分光装置は、PV に関して 3 つのモードを持っている。封止材モード、バックシートモード、PV モードである。封止材モードは表面から、バックシートモードは裏面から、PV モードは表面と裏面の両方から NIR 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送って最も近いものを探してくるものである。通常の使用方法としては壊れていない PV パネルを対象としているようであった。なお、表 2-3 の「フッ素コート」の素材については、本機器では明確な判別はできない。現状では、フッ素を処理する際に、全体の濃度が最重要と考えるため、来年度は化学分析を行う予定である。フッ素のコーティングの種別は、劣化に関係する可能性もあるため、今後も情報収集を進める。

今回の実証事業で取得した試料は、ガラス剥離装置でカバーガラスが除去されているため、封止材モードでの検出は種々のやり方を試みたものの、データベースからの回答が得られなかった。そのため、封止材の計測の際は、PV モードのみを使用し、EVA 以外と考えられるものについてはラマン分析も併用するものとした。

試料例を図 2-7 に示す。



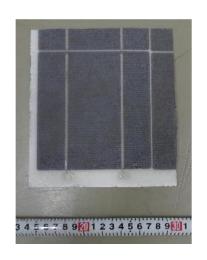


図 2-7 ロール機によるガラス剥離資料(左)及びブラスト処理によるガラス剥離試料(右)

- イ)ラマン分光装置:PolyMax ハンドヘルドプラスチックアナライザー、TSI 社製 使用した可搬型ラマン分光装置を図 2-8 に示す。励起源の仕様は以下のとおりである。
- 周波数安定型、785nm 狭線幅レーザー
- 電力:~15 mW low/110 mW high (試料にて)
- 線幅:<0.15nm
- 推定レーザー寿命:>10,000 時間



図 2-8 可搬型ラマン分光装置

# b. 結果

# ア) 封止材

封止材は、一般的には、モジュールの周辺(上下)で使われている。現在まで使用されているものの主流はエチレン-酢酸ビニル共重合体(EVA)であった。EVA の使用により、酢酸の生成による電極腐食などの懸念があることや、加工時の架橋処理時間が EVA は長いといった問題から、最近は、ポリオレフィン・エラストマー(POE)やポリビニル・ブチラール(PVB:自動車の合わせガラスに使われる素材)などのその他の素材も使われ始めていると言われているが、出荷ベースの各種市場調査でも現状はまだ全体の 10-20%程度と見られる。すなわち、計測した 54 サンプルの年代の多くは 2010 年以前が多かったため、主流は EVA と予想された。

計測結果をまとめたものを表 2-4 に示す。

表 2-4 分析結果一覧

登録番号	封止剤	バックシート			
		第1候補	第2候補	備考	
2300001	EVA	PVF, PET			
2300002	EVA	PVDF, PET, PE	PET, PE		
2300003	EVA	PET, EVA, PVF	PET, fluorine coating		
2300004	EVA	PET	PVDF, PET		
2300005	EVA	PET, PE	PET, fluorine coating		
2300006		Unrecognized Material	, ,	黒色シート	
2300007	EVA	PVF, PET	PVDF, PET, PE		
2300008	EVA	PET, PE, EVA	, ,		
2300009	EVA	PET, PE	PVF, PET, PA		
2300010		PVF, PET, PA	PET, EVA		
2300011		PET, PE	PET, PE, EVA		
2300012		PET, fluorine coating	PVF, PET		
2300012		PVDF, PET	PET, PE		
2300013		Unrecognized Material		黒色シート	
2300011		PVDF, PET, PE	PET, PE, EVA		
2300015		PET, fluorine coating			
2300010		PET, fluorine coating			
2300017		, ,	DET fluoring coating		
2300018		PVDF, PET, PE	PET, fluorine coating		
		PET, fluorine coating	PET, EVA, PVF		
2300020		PET, fluorine coating		B 2 > 1	
2300021		Unrecognized Material		黒色シート	
	Unrecognized Material	Unrecognized Material		黒色シート	
2300023		PVF, PET			
2300024		THV, PET, EVA	PVF, PET, PA		
2300025		PVF, PET, PA	PET, PE		
2300026		PET, PE	PVF, PET, PA		
2300027		PVDF, PET, PE			
2300028		PVF, PET			
2300029	,	PVF, PET, PA	PET, PE		
2300030	EVA	PET	PET, fluorine coating		
2300031	EVA	PVF			
2300032	EVA	PET, PE	PET, fluorine coating		
2300033	EVA	PET, fluorine coating	PET, PE		
2300034	EVA	Unrecognized Material			
2300035	EVA	PET, PE	PET, PE, EVA		
2300036	EVA	PET			
2300037	EVA	PET, PE	THV, PET, EVA		
2300038	EVA	PET		アルミシート	
2300039	EVA	THV, PET, EVA	PET, PE		
2300040	PP, PE	PVF, PET, PA	PET, PE, EVA		
2300041	EVA	PVF, PET, PA			
2300042		PET, PE	PVDF, PET, PE		
2300043	EVA	PVF, PET	PVDF, PET, PE		
2300044	EVA	PVF, PET, PA	THV, PET, EVA	1	
2300045		PVDF, PET, PE			
2300046	EVA	PET, PE, EVA	PET, PE		
2300047		PVDF, PET, PE	PVDF, PET	1	
2300048		PET	,	アルミシート	
2300049		THV, PET, EVA	PET, PE	•	
2300050		THV, PET, EVA	PET, PE		
2300050		PET, PE, EVA	PET, PE		
2300051		PET, PE	PVF, PET, PA		
2300052		Unrecognized Material	VI, I L I, FA	青色シート	
			DVDE DET	月ピジート	
2300054	rr, re	PET, PE	PVDF, PET		

封止材では、判定できないものが 1 試料と、ポリプロピレン(PP)/ポリエチレン(PE)との判定がなされたものが 3 試料存在した。これらについてラマン分析を行った結果、ポリブチレン(PB)との判定となった。図 2-9 に PB と EVA の構造を示す。

$$\begin{array}{c|c} & & & \\ \hline \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ \end{array}$$

図 2-9 PB(左)及び EVA(右)

近赤外線の測定対象は、OH、NH、CH の官能基による吸収であるため、似たような構造を持つものの判別は必ずしもはっきりとは行えないが、PB や PP/PE と EVA では構造が大きく異なるので、NIR による PP/PE 判定は EVA ではないという判定は妥当である。

PPとPEの構造を以下図 2-10 に示すが、どちらも EVA とは大きく異なる。

$$\bigcap_{CH_3}$$

図 2-10 PP(左)及び PE(右)

また、封止材は、単一樹脂ではなく、これらの樹脂の混合で使われることや、架橋促進剤、紫外線防止剤など種々の添加剤を混合するため、今回使用した、近赤外線分光装置とラマン分光装置のライブラリーではカバーしきれていないものと考えられる。

併せて、PP/PE と判定された 3 試料のメーカーは同じであり比較的年代も新しい点も EVA と異なる材料の使用という推論を裏付けるものである。

いずれにせよ、市場出荷の動向を反映して 90%以上は EVA であり、今後は増えると言われている POE 系と断定できるものは無かった。

### イ) バックシート

バックシートはPVパネル裏面において外部環境から発電部分を保護するものであり、高い隔絶性能が要求される。PVパネル用バックシートの市場出荷のデータによれば、フッ素系樹脂のシートが 9 割、他はPET系のシートとされている。分析の結果から、フッ素系であるPVF(ポリフッ化ビニル)やPVDF(ポリフッ化ビニリデン)をPETシートと組み合わせていると考えられる。また、PETシートにフッ素樹脂コーティングを施したものの存在が示唆された。

色については白色のものが多かったが、一部両面パネルを意識したと思われる透明なものや、意匠的に青や黒に着色したものも存在した他、アルミニウムを外部層や中間層に使用したものもあった。

通常のバックシートは多層であったが、ラマン分析は最外の層の判定しか出せないため、近赤外線分 光装置のデータベースを活用した。

バックシートの計測結果についても表 2-4 に示した。データベースと照合した結果の第一候補と第 二候補を記した。

表の見方として、二種類以上の表記がある試料の場合、フッ素系の素材(PVF, PVDF, THV(熱可塑性フッ素樹脂))のものと、PET 系のものとに大別された。その他、アルミニウムシートが使われていたものは、PET と判別されたが、黒色、青色のシートは近赤外線分光装置で判別できなかった。

以下図 2-11~図 2-13 に試料の例を示す。





図 2-11 アルミニウムシート試料





図 2-12 黒シート試料





図 2-13 青シート試料

フッ素樹脂と判定されたものは、ほぼ確実に中間層として PET が使われており、PET と判別されたものでは、コーティングとしてフッ素が検出されているものも多く見られた。ただし、PET のみや PET、PE とされたものでも第二候補としてフッ素材料が表示されるものもあり、例えばコーティングの存在がどこまで正確に判定されるかは、現状不明である。さらに、接着剤として、あるいは最もシリコンに近いところで使われている素材として EVA も検出された。

第一・第二候補を考慮した上で、フッ素の存在が確認できないパネルは 4 枚あり、この数では、特にメーカーや年代の依存性は見られなかった。そのため判断の可否は、今後のより詳細な断面観察などが必要と考えられる。総じて、今回の試料中の 9 割程度にフッ素樹脂の存在が認められた。

#### c. まとめ

可搬型近赤外線分光装置を使って表面と裏面の両方から計測し、データベースと照合することにより、 既設 PV パネル、あるいは発電所から取り外した PV パネルについて、樹脂の組成情報等が得られた。 樹脂材料は非常に複雑であり、混合使用や種々の添加剤が使用される場合があるため、これらの影響 は少なからずあるものと考えられる。今回の事業実施により、少なくとも封止材については、EVA 樹脂 とそれ以外に大別されること、バックシートについてはフッ素樹脂あるいは PET 樹脂(フッ素コーティン グを含む)であること、また中間層の素材について情報が得られた。

判別の精度については、今後、断面の顕微鏡観察結果とも照合し、正確性を高めていく必要があるが、本年度事業において、発電所の設置中であっても取り外した後であっても、また断片の状態であっても樹脂種類の判別が可能であることが確認された。こうして得られた情報は、今後の DPP の情報要件としても取得・情報集約していくことが非常に有効であると考えられる。

今後はサンプル数を戦略的に増やし、型式間のばらつきを確認していくことで、現在日本に設置され、 将来排出されると見込まれるパネルの状況を把握することが可能と考えられる。 本年度事業において収集された使用済 PV パネルは FIT 開始(2012 年)前の個体が多く、かつ国産メーカーのものが多かった。 今後は、現在のボリュームゾーンを占める中国生産の PV パネルをどの程度収集できるかがキーとなる。

また、排出された PV パネルの部材情報が一定程度明らかになれば、市中に流通している材料との照合も可能となり得る。当初は、世界中に数多く存在した PV パネル関連産業だが、PV パネルの製造が世界的に中国にシフトした関係上、現在は部材の生産もほとんどが中国で行われている。さらに産業拡大が進んだことで、集約化が進み、メーカー数が制限されるため、実際の計測結果から、部材を絞り込むことが可能になり、部材が持つ仕様や性能のより詳細な情報、例えば封止材で言えば、架橋の早さ、厚さ、熱収縮性、UV(紫外線)エイジング指数などの物理的特性を明確化することが可能となる。これら情報と交流インピーダンスによる電気的なパネル検定などを結びつけることにより、今後のPVの劣化予測は大きく進展させることができると考える。

今後、封止材・バックシートのメーカーの情報を収集するとともに、シリコン製造者とその製品情報も 集積を進めていく。

#### 3) セル上の電極

#### a. 実施内容と実施方法

PV パネルのリサイクルを促進する上での課題の一つに、セル上の電極の有価金属及び有害金属に関する情報が不足しているという点が挙げられる。

本年度事業では、経年変化を含め、セル上の電極に含まれる金属の種類及び重量を確認することを目的として、セル上の電極の有価金属・有害金属、及び配線の数、長さ等に関するデータを取得した。具体的には、セル/EVA シートのサンプルを用いて、セル上の電極の一般的な項目、物理的な項目、及び化学的な項目を把握した。分析項目は、表 2-5 に示すとおりである。なお、分析にあたっては、図 2-14 に示すようにセル/EVA シートからフィンガー線<sup>13</sup>の断面とインターコネクタ<sup>14</sup>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た。

分析項目 分析方法 −般的な項目 セルの大きさ(縦×横) 計測 セルの形状 4 角形、8 角形、ハーフカットのいずれの形状であるかの目視判定 物理的な項目 フィンガー線の数 目視による フィンガー線の長さ 計測 フィンガー線の断面積 3D 観察・計測システムによる断面の計測 インターコネクタの数 目視による インターコネクタの長さ 計測 3D 観察・計測システムによる断面の計測 インターコネクタの断面積 化学的な項目 インターコネクタの成分 EPMA\*1によるインターコネクタ断面の接合素材の計測

表 2-5 電極の分析項目

<sup>\*1:</sup>Electron Probe Micro Analyzer の略。固体試料表面の組織及び形態の観察と局所元素分析を行う分析機器。



図 2-14 セル/EVA シートから切り出したフィンガー線断面とインターコネクタ断面

注釈:セル/EVA シートから切り出したフィンガー線断面(A)とインターコネクタ断面側(C)。

<sup>13</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。

<sup>14</sup> セル間を接続する役割を担う。銅線の表面に、接合素材がコーティングされている。

#### b. 結果

# ア) 一般的な項目

セルの大きさには、業界の規格があり、製造年が新しくなるほどセルが大きくなってきている。これまで、100mm×100mm、125mm×125mm、156mm×156mm、156.75mm×156.75mm(M2 規格)、161.7mm×161.7mm(M4 規格)、166mm×166mm(M6 規格)、182mm×182mm(G10 規格)、210mm×210mm(G12 規格)などの大きさのセルが製造されてきている。調査の結果、100mm×100mmの大きさのセルは、主に 2000 年以前に製造された PV パネルで採用されていた。2014 年頃は、125mm×125mm と 156mm×156mm のセルが主流であったものの、2023 年前後では 166mm×166mm(M6 規格)及び 182mm×182mm(G10 規格)の大きさのセルが主流であった。

本年度事業で採取したサンプルのセルの大きさを測定したところ、図 2-15 に示すとおりの結果であった。セルの大きさが 100mm×100mm 程度のサンプルは 3 つあり、このうち 2 つのサンプルは製造年が 2000 年、残り 1 つのサンプルの製造年は 2009 年であった。セルの大きさが 125mm×125mm 程度のサンプルは 6 つあり、このうち製造年が 2010 年以前のサンプルは 4 つ、残り 2 つのサンプルの製造年は 2010 年以降であった。また、3 サンプルは、セル/EVA シートからのサンプルの切り出しが不十分で、セルの大きさを測定できなかった。

セルの形状は、4 角形、8 角形、及びハーフカットのセルが、それぞれ 27 サンプル、19 サンプル、及び 5 サンプルであり(図 2-16 も参照)、3 サンプルでは 1 セル分の大きさを特定できなかったため測定不要と整理した。

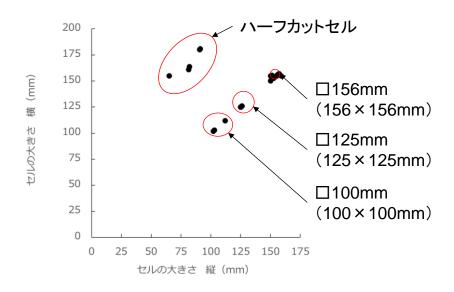
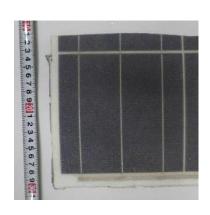
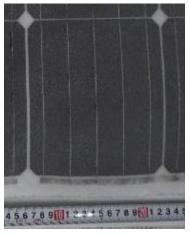


図 2-15 セルの大きさ(N=51)





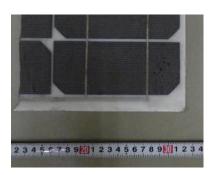


図 2-16 4 角形(左)、8 角形(中央)、及びハーフカット(右)のセルの例

注釈:上図であれば、セルの大きさ(それぞれ縦×横)は、左は 151mm×155mm、中央は 157mm×157mm、右は 66mm×155mm

#### イ) 物理的な項目

フィンガー線の太さの経年変化を見るため、横軸に製造年、縦軸にフィンガー線の断面積をとり、図 2-17 のとおりプロットした。PV パネルの製造年が新しくなるにつれて、フィンガー線が細くなってきていることが分かる。フィンガー線の存在を確認できなかった 1 サンプルについては、測定不能と整理した。

続いて、図 2-18 のとおり、セル上でのフィンガー線の使用量の経年変化を見た。フィンガー線の使用量は、フィンガー線の断面積に長さと本数を乗じることで求めた。フィンガー線の使用量の平均値は15mm³であった。製造年が2011年以降のサンプルでは、フィンガー線の使用量が15mm³以上のものが5サンプル、15mm³未満のものが27サンプルであった。一方、製造年が2010年以前のサンプルでは、フィンガー線の使用量が15mm³以上のものが7サンプル、15mm³未満のものが11サンプルであった。製造年が古いPVパネルほど、フィンガー線の使用量が多い傾向が見られた。なお、セルの大きさを特定できなかった3サンプル、フィンガー線の存在を確認できなかった1サンプル、計4サンプルについては測定不能と整理した。

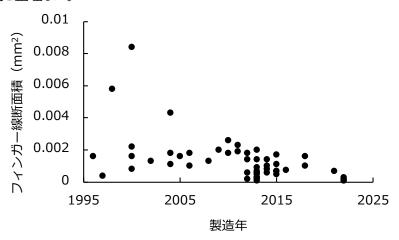


図 2-17 フィンガー線の断面積と製造年の関係(N=53)

注釈:上図からは、セル表面にフィンガー線の存在を確認できなかったサンプルは除外している。

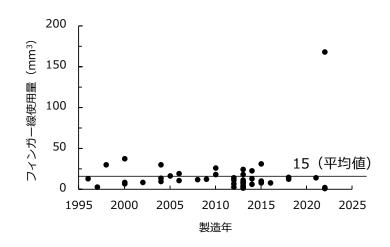


図 2-18 フィンガー線の使用量と製造年の関係(N=50)

注釈:上図からは、1 セル分の大きさを特定できなかったサンプル、およびセル表面にフィンガー線の存在を確認できなかったサンプルは除外している。

インターコネクタの太さの経年変化を見るため、横軸に製造年、縦軸にインターコネクタの断面積をとり、図 2-19 のとおりプロットした。インターコネクタの太さについては、製造年に対する細線化の傾向は見られなかった。

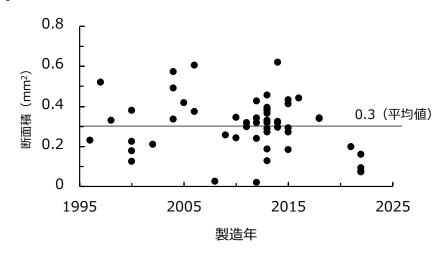
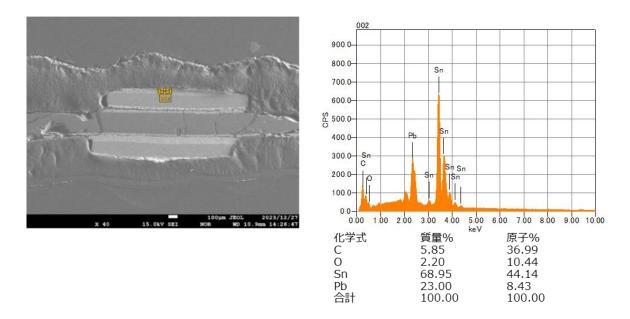


図 2-19 インターコネクタの断面積と製造年の関係(N=54)

# ウ) 化学的な項目

インターコネクタの接合素材に着目して、組成情報を分析した。全 54 サンプルのうち、43 サンプルでは Pb(鉛)が使用されていたものの(図 2-20 と図 2-21 も参照)、11 サンプルでは Pb が検出されなかった。図 2-22 と図 2-23 には、Pb が検出されなかったサンプルの成分分析結果と元素マッピングの結果を示す。図 2-22 と図 2-23 に示すサンプルでは、Sn-Ag(スズ-銀)系のはんだが使用されていると分析された。なお、Pb が検出されなかった(鉛フリーはんだを使用していた)11 サンプルは、すべて国内メーカーのものであった。Pb が検出されなかった 11 サンプルについて、製造年による偏りは特に観察されなかった。



注釈:左図の SEM 像のスケールは、下部に白色のバー(バーの長さ:100μm)で示している。

図 2-20 インターコネクタの断面の SEM 像(左図)とはんだ部分の成分分析(右図)

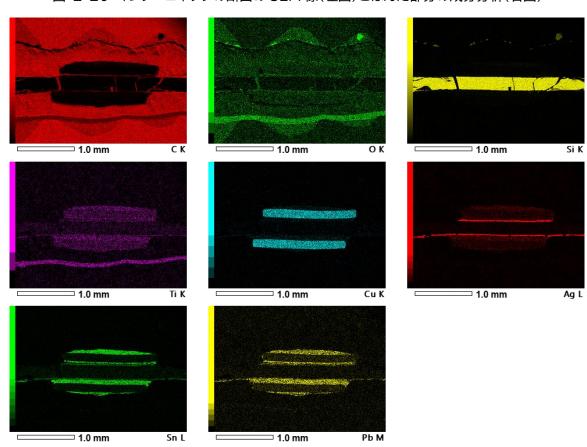
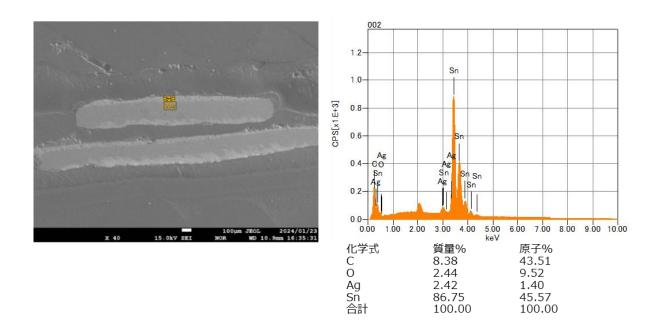


図 2-21 インターコネクタの元素マッピング(Pb の検出ありのサンプル)

注釈 1: 上段左から C、O、Si、中段左から Ti、Cu、Ag、下段左から Sn、Pb のマッピング結果を表す。 注釈 2: Cと O の着色は、切断面への樹脂片の付着等による汚れが原因と推定される。 注釈 3: Ti など一部の元素については、ノイズに起因して、元素が存在しない場所への着色が見られる。



注釈:左図の SEM 像のスケールは、下部に白色のバー(バーの長さ:100μm)で示している。

# 図 2-22 インターコネクタの断面の SEM 像(左)とインターコネクタの接合素材の成分分析(右)

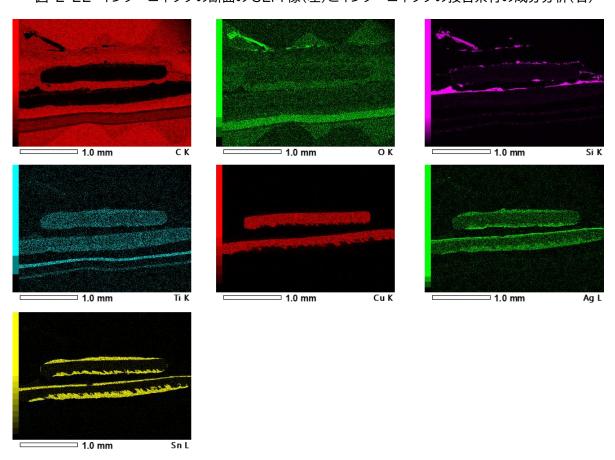


図 2-23 インターコネクタの元素マッピング(Pb の検出無しのサンプル)

注釈 1: 上段左から C、O、Si、中段左から Ti、Cu、Ag、下段左から Sn のマッピング結果を表す。 注釈 2: C と O の着色は、切断面への樹脂片の付着等による汚れが原因と推定される。 注釈 3: Ti など一部の元素については、ノイズに起因して、元素が存在しない場所への着色が見られる。

#### c. まとめ

本年度事業では、セルの一般的な項目(大きさ)、物理的な項目(電極の数、断面積、等)、及び化学的な項目(インターコネクタの接合素材の成分)について、分析を行った。

セルの大きさについては、ハーフカットセルが 5 サンプル、100mm×100mm の大きさの規格のセルが 3 サンプル、125mm×125mm の大きさの規格のセルが 6 サンプル、残りは 156mm×156mm の大きさの規格またはそれに準ずる規格の大きさのセルであった。

物理的な項目については、フィンガー線の細線化が年代とともに進んできたことが改めて確認されたとともに、金属使用量も減少していることが推測された。ただし、フィンガー線は細線化と反比例して線の数が増えるため、使用量の減少速度は低下し、一定値に収束していくと考えられる。一方、時間の進展に伴うインターコネクタの細線化の傾向は見られなかった。また、本年度事業では、電極の化学分析は行っていないが、今後、適切に試料を選択して、計測し、金属使用量の絶対値の確認を進める。

また、化学的な項目として、インターコネクタの接合素材を対象に Pb の分析を行った。結果、54 サンプル中 11 サンプルでは、インターコネクタの接合素材に Pb が含まれていなかった。さらに、Pb が含まれていない 11 サンプルについては、すべて国内メーカーのものであった。国内メーカーも中国生産や OEM での生産が増えていることから、Pb 含有状況については、その時代変遷も含めて、今後サンプル数を増やして確認していく必要がある。いずれにせよ、ほとんどの場合、処理原料には Pb が使われていると PV パネルの廃棄物処理業者が認識した上で、自身の処理プロセスに合わせた判断が必要であることが示唆され、DPP の要件の重要な項目の一つであると考えられた。

本年度は、時間の関係から、金属種の確認と、電極の配置の仕方などに依存する金属使用量のトレンド変化などを重点的に確認した。次年度以降、電極周りの経時変化などにも着目して、長期使用性の判断とも紐付けを試みる。

# (2) 今後のデータ取得の考え方の整理

本年度事業では、特に制限を設けることなく、PV パネルの計 100 サンプルを得た。また、PV パネルの裏面のラベル情報等からメーカー・製造年の特定を行い、製造年が不明のものについては最大出力から製造年の推計を行った。ガラスについては 62 サンプル、樹脂・電極については 54 サンプルの分析を行った。国内に設置されている PV パネルの中で、本年度事業のサンプルは図 2-24 のとおり位置付けられた。

図 2-24 によると、2013 年以前の製造年のサンプルが多かった。また、2016~2020 年の製造年のサンプルは、ほとんど得られなかった。メーカーについては、赤色とオレンジ色のメーカーのサンプルは複数得られてはいるものの、それ以外メーカーについては、十分な数のサンプルが得られなかった。

次年度以降は、我が国に既に設置されている代表的なPVパネルの現状を把握するという観点から、 本年度事業で採取が不足していた製造年・メーカーのPVパネルのサンプルを入手し、分析を進める。

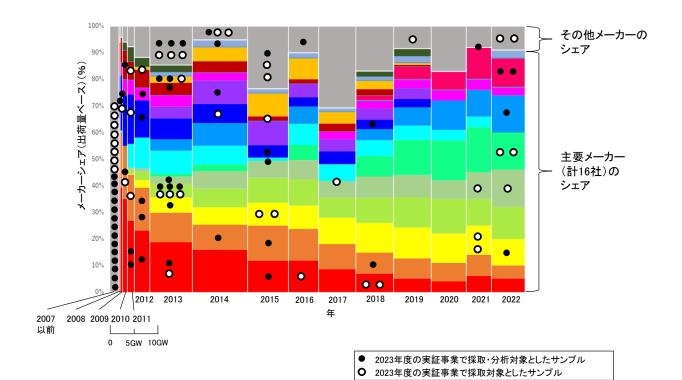


図 2-24 国内に設置されている PV パネルの中でのサンプルの位置付け

注釈 1:上図は、図 2-1 上に本年度事業で得たサンプルをプロットしている。上図で「●」で表現した「2023 年度の実証事業で採取・分析対象としたサンプル」は、樹脂・電極の分析に供した 54 サンプルを示す。

注釈 2:計 100 サンプルのうち、分析に供さなかった 3 サンプルについては、製造年が 2023 年だったため、上記からは除外している。

# 2.1.4 リサイクル材の受入条件等の整理

リサイクル材を使用する業界関係者に対して聞き取りを行い、ガラス、シリコン、及び非鉄金属の受入 条件等を整理した。聞き取りを行った業界関係者は以下のとおりである。

#### ● ガラス

- 国内の発泡ガラスの業界関係者
- 国内の人工砂(再生ガラス砂)の製造事業者
- 国内のグラスウールの業界関係者
- 国内の板ガラスの製造事業者

#### • シリコン

■ 国内の結晶シリコン製造事業者

#### 非鉄金属

- 国内の非鉄金属製錬の業界関係者
- 国内の非鉄金属製錬の有識者

# (1) ガラス

# 1) リサイクル材の受入条件15

#### a. 発泡ガラス

- 現状、使用済のびんを主原料にして、発泡ガラスを国内で製造している。発泡ガラスは、土木資材として用いられている。
- 使用済のびんは、一般廃棄物の専ら物、または有価物として受け入れている。
- 発泡ガラスには JIS(日本産業規格)が制定されている。JIS の規格に適合しているかどうかという 視点で、発泡ガラスの品質を確認している。なお、発泡ガラスの原料には、特段受入条件を設けて いないが、現状、主に使用済のびんを原料に用いている。

#### b. 再生ガラス砂

- 現状、ガラスを原料にして、再生ガラス砂を国内で製造している。再生ガラス砂は、主に道路建設、 及び空港建設などの公共の土木工事で用いられている。
- 一般廃棄物または産業廃棄物として受け入れたガラスを、再生ガラス砂の原料にしている。
- 再生ガラス砂の原料になるガラスとしては、使用済のびん、板ガラスの製造工程で発生するガラスカレット、及び建物の窓ガラスなどがある。
- 安全性と物理的特性と原料の大きさについて、再生ガラス砂の原料の受入条件を定めている。

#### c. グラスウール

- グラスウールの国内製造において、原料として主にガラスカレットが用いられている。
- 各種用途由来のガラスカレットをグラスウールメーカーの要求水準に適合するようブレンドした上で、 グラスウール原料としてメーカーに供給している。
- グラスウールの製造にあたっては、一部天然資源由来の原料を使用しているものの、大半は板ガラスの製造工程で発生するガラスカレット、使用済のびん、その他使用済自動車や家電製品由来のガラスを原料として使用している。
- 動理的特性と化学的特性に基づいて、グラスウールの原料の受入条件を定めている。

#### d. 板ガラス

- 現状、板ガラスを国内で製造している。板ガラスの原料であるけい砂は、一部輸入している。また、 板ガラスの製造工程で発生するガラスカレットも、板ガラスの原料として使用している。
- 使用済製品由来のガラスカレットを、板ガラスの原料にできないか検討している。また、使用済製品 由来のガラスカレットは、原料として購入して、調達することを想定している。
- 板ガラスの原料とするガラスカレットの受入条件としては、「ガラス以外の不純物の許容量」と「混入

<sup>15 「5.3.3 (1)</sup>ガラス」節では、文献調査を通して、PV パネルのガラスのリサイクルにおける課題を整理している。

させてはいけないガラス」が設定されている<sup>16</sup>。

### 2)課題等

#### a. 発泡ガラス

● これまでは、一般廃棄物の専ら物、有価物としてびんを受け入れていたが、産業廃棄物として受け 入れる場合、廃棄物処理法の要求事項を満たすために追加的な対応が必要になり、これが課題と なる。

#### b. 再生ガラス砂

● リサイクル材の使用にあたっての現状の課題は、量の確保にある。いかに安定的に、再生ガラス砂の原料となるガラスを確保できるかが課題である。

# c. グラスウール

● 現状の課題は、量の確保にある。人口減少等の影響により、びん、板ガラス、建築用ガラス由来のガラスカレットが減少しているため、グラスウールの原料となるガラスの量が減っている。

#### d. 板ガラス

● 使用済製品由来のガラスカレットを原料として利用するにあたっての課題は、経済性にある。板ガラスの原料として、製造業者が調達しているけい砂は比較的安価である。調達しているけい砂に比べて、使用済製品由来のガラスカレットが安価であると、経済合理性を確保できる。

# (2) シリコン

#### 1) リサイクル材の受入条件

- 現状、結晶シリコンを国内で製造している。結晶シリコンの原料である金属ケイ素は、輸入している。
- 輸入している金属ケイ素の一部を、リサイクル材で代替できないかを検討している。
- リサイクル材の受入条件としては、輸入している金属ケイ素を代替し得るかどうかという観点になる。

#### 2) 課題等

● PV パネルから回収したシリコンが、輸入している金属ケイ素を一部代替できると評価されたとして

<sup>16</sup> 公開資料によると、カレット品質基準として、「ガラス以外の不純物の許容量」と「混入させてはいけないガラス」が定められている。「ガラス以外の不純物の許容量」としては、有機化合物(フィルム、紙、ゴム、木片等)、砂利、鉄片(ステンレスを除く)、非鉄金属類(アルミ、ステンレス等)について、サイズと許容濃度が定められている。「混入させてはいけないガラス」としては、複数の種類のガラスが定められている。出所:経済産業省ウェブサイト、

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\_environment/disposal\_recycle/pdf/003\_05\_00.pdf、2024年2月9日取得

も、PV パネルから得られる結晶シリコンは少量である。

● いかに多量の結晶シリコンを集める仕組みを作れるかが課題となる。

# (3) 非鉄金属

# 1) リサイクル材の受入条件

- 原料の一般的な受入条件は存在するが、不純物品位については、受入量も勘案する必要がある。
- 製錬技術(溶錬法)によっても一般的な受入条件は異なってくる。

# 2) 課題等

- 現状、PV パネルの発生量が少量であるため、PV パネルからの銅・銀等の回収を非鉄製錬で行う ことについては課題が顕在化していないのではないか。
- PV パネルの発生量が多くなってくると、製錬プロセスの観点から、課題が顕在化してくるのではないか。

# (4) 小括

次年度以降は、サンプリング及び分析で得た結果も踏まえて業界関係者へのフィードバックを行い、 PV パネルだけでなく、他の製品も横断で見た場合の資源循環の可能性を検討する計画である。

#### 2.1.5 長期使用・リユースに対して出融資をする業界関係者への聞き取り

太陽光発電所の長期使用・PV パネルのリユースに対して出融資をする業界関係者へ聞き取りを行った。聞き取りを行った業界関係者と、聞き取った概要は以下のとおりである。

#### ● 聞き取り対象者

■ 太陽光発電所プロジェクトの資金調達を支援するリース業界関係者

# ● 聞き取り内容

- 固定価格買取制度で導入した太陽光発電所については、買取期間が終了した後も、発電事業 を継続することが想定される。
- 太陽光発電プロジェクトでは、PV パネルに関して一定の劣化率を想定し、発電量を予測している。
- 概算であっても、PV パネルの残存寿命を評価できる技術は、今後ニーズが高まるだろう。
- 太陽光発電所プロジェクトに対して PV パネルをリースする場合、リース期間終了後は通常、太陽光発電所プロジェクト側に PV パネルを譲渡する。

# 2.1.6 DPP データ項目の整備に向けた検討

# (1) EU の事例調査

PV パネルを含む各種製品の循環型ビジネスモデルを検証することを目的とした EU の研究開発プロジェクトの CIRCUSOL<sup>17</sup>の下では、バリューチェーンの各関係者にヒアリングを実施し、PV パネルのデータ連携に関して原則・設計要件や伝達項目案が整理されている<sup>18</sup>(本報告書「5.2.4 (5)PV パネル DPP 実装に向けた実証等」も参照)。検討された設計原則、設計要件、及び伝達項目案は以下のとおりである。

#### ● 設計原則

- DP1 既存のデータソース<sup>19</sup>や PV のバリューチェーンの全段階からデータを収集・更新する。
- DP2 DPP を作成するためのプラットフォームを通じて、拡張された PV 製品データに基づく評価スキームを開発する。
- DP3 信頼性の高い検査や再利用のインフラを含む PV オンラインマーケットプレイスを開発する。

#### ● 設計要件

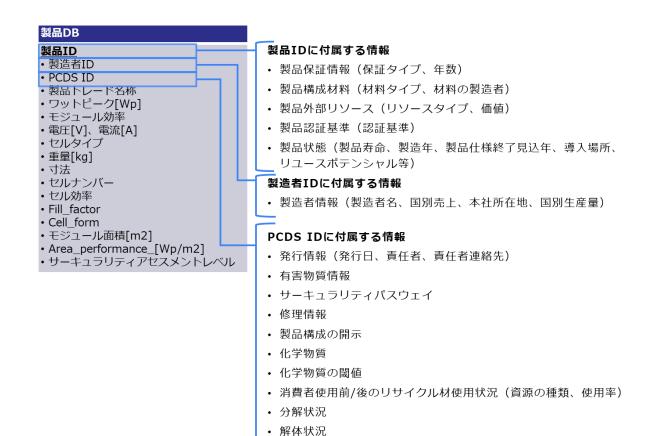
- DR1 アクセシビリティ:ログインを通じて選ばれた主体のみフルアクセスを可能にする。
- DR2 完全性: 追加的な情報を付帯した技術データシートからなるデータを豊富にする。
- DR3 一貫性:バリューチェーンのステークホルダーの間での一貫したデータ共有を促進する。
- DR4 効率性:製品情報を収集するための運用プロセスを調整する。
- DR5 相互運用性:異なるステーホルダーに対する設置に関する情報付与を許可する。
- DR6 安全性:外部の中立的な機関を通したプラットフォームのホスティングを確保する。
- DR7 機密性:材料供給者のような機密情報の範囲を定める。
- DR8 トレーサビリティ:データトラッキングを通じて PV のライフサイクルの履歴を提供する。
- DR9 透明性:データ共有を通じて透明性を確保する。
- DR10 タイムパフォーマンス:ステークホルダーが PV に関する情報収集をするための時間消費を削減する。
- DR11 可視性:それぞれのステークホルダーに応じて異なる形で情報を可視化する。
- 伝達項目案(図 2-25 参照)

\_

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> EU の Horizon2020 の枠組みの下で、EU の支援を受けて行われた PV パネル等に関する研究開発プロジェクト。 次を参照:CIRCUSOL ウェブサイト、 <u>https://www.circusol.eu/en</u>、2023 年 12 月 12 日取得

<sup>18</sup> 本年度事業を通じて調査した限り、CIRCUSOLの下で検討された PVの DPP は研究開発段階である。しかし、本事業の参考となるため、概要を整理した。

<sup>19</sup> データベースは初期情報として、ドイツの「Photo-voltaikforum.com」(100,000 種類を超える PV パネルの製品データシートの情報を集約しているサイト)から得た情報を製品データセットとし保持し、スイスの「Swiss Proof of Origin」(スイス国内で登録されている太陽光発電所の情報(地理情報を含む)を集約しているサイト)から得た情報を導入データセットとして保持している。



#### 図 2-25 EU の研究開発プロジェクトの CIRCUSOL の下で検討された PV パネルの伝達項目案

出所:Boukhatmi, Ässia, Roger Nyffenegger, and Stefan N. Grösser. "Designing a digital platform to foster data-enhanced circular practices in the European solar industry." Journal of Cleaner Production 418 (2023): 137992. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623021509、2023年12月25日取得に基づき作成

#### (2) カタログ掲載項目の調査

本年度事業では、PV パネルについて公開情報からどういった情報が得られるかを検討する目的で、PV パネルのカタログの掲載項目について調査を行った。具体的には、PV パネルのカタログを入手し<sup>20</sup>、各カタログに掲載されている各項目をピックアップし、共通する項目は集約し、各項目の出現頻度を数えた。結果、計59個の項目が確認された(表 2-6及び表 2-7参照)。

カタログには、電気的情報(定格出力、等)、環境条件(モジュール動作温度、等)、機器的情報(モジュール寸法等)、認証・規格(IEC・UL 認証、等)、及び部材材質(フレーム材、等)が掲載されていた。一方で、長期使用・リユース・リサイクル促進に関するデータは得がたいことが分かった。例えば、ガラスであれば、ガラスの材質が「強化ガラス」といったことまではカタログから分かるものの、リサイクル促進の上で重要となる含有物質(Sb や As の含有率、等)はカタログには未掲載であった。

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> 樹脂と電極の分析対象とした 54 サンプルの PV パネルを対象にインターネットでカタログを検索したところ、31 サンプルの PV パネルについて、カタログが得られた。

表 2-6 PV パネルのカタログに掲載されていた項目(1/2)

カタログに掲載されていた項目	掲載率(%)*1
電気的情報	
定格出力	100
出力許容交差	45
定格電圧	97
定格電流	97
解放電圧	97
短絡電流	97
モジュール効率	68
セル実効変換効率	16
短絡電流温度係数	52
解放電圧温度係数	52
最大出力温度係数	52
公称動作セル温度	32
最大システム電圧	68
ダイオード数	10
ヒューズの最大定格	35
最大過電流保護定格	16
最大逆電流	10
耐電圧	23
絶縁抵抗	29
接地抵抗	3
環境条件	
周囲温度	19
周囲相対湿度	13
モジュール動作温度	42
耐風圧	29
耐雪圧	39
耐雹衝撃	23
保管温度	3
保管湿度	3

\*1:全 31 カタログのうち、何カタログに当該項目が掲載されていたかをパーセント表記したもの。

表 2-7 PV パネルのカタログに掲載されていた項目(2/2)

セルの数(配列)       45         モジュールの寸法       100         セル寸法       19         重量       90         耐荷重       39         耐衝撃性       3         適応等級       19         安全等級       10         認証・規格       48         IEC・UL 認証       48         認証機関       26         防塵防水規格(ジャンクション BOX・コネクタ)       39         防火性能       26         部材材質       5         フレーム材       68         モジュール構成       3         ガラス材質       55         太陽電池素子       3         インターコネクションリボン       3         表面材       3         充填材       23         背面材       35         技者剤       3         シール材       3	カタログに掲載されていた項目	掲載率(%)*1
セルの数(配列)       45         モジュールの寸法       100         セル寸法       19         重量       90         耐荷重       39         耐衝撃性       3         適応等級       19         安全等級       10         認証・規格       48         IEC・UL 認証       48         認証機関       26         防塵防水規格(ジャンクション BOX・コネクタ)       39         防火性能       26         部材材質       5         ストラス材質       55         太陽電池素子       3         インターコネクションリボン       3         ジャンパーリボン       3         表面材       3         充填材       23         背面材       35         接着剤       3         シール材       3	機器的情報	
モジュールの寸法100セル寸法19重量90耐荷重39適応等級19安全等級10認証・規格IEC・UL 認証認証機関26防塵防水規格(ジャンクション BOX・コネクタ)39防火性能26部材材質フレーム材モジュール構成3ガラス材質55太陽電池素子3インターコネクションリボン3ジャンパーリボン3表面材3充填材23背面材35接着剤3シール材3	セルタイプ	87
セル寸法19重量90耐荷重39耐衝撃性3適応等級19安全等級10認証・規格IEC・UL 認証認証機関26防塵防水規格(ジャンクション BOX・コネクタ)39防火性能26部材材質フレーム材モジュール構成3ガラス材質55太陽電池素子3インターコネクションリボン3ジャンパーリボン3表面材3充填材23背面材35接着剤3シール材3	セルの数(配列)	45
重量90耐荷重39耐衝撃性3適応等級19安全等級10認証・規格IEC・UL 認証認証機関26防塵防水規格(ジャンクション BOX・コネクタ)39防火性能26部材材質フレーム材モジュール構成3ガラス材質55太陽電池素子3インターコネクションリボン3ジャンパーリボン3表面材3充填材23背面材35接着剤3シール材3	モジュールの寸法	100
耐荷重39耐衝撃性3適応等級19安全等級10認証・規格IEC・UL 認証認証機関26防塵防水規格(ジャンクション BOX・コネクタ)39防火性能26部材材質フレーム材モジュール構成3ガラス材質55太陽電池素子3インターコネクションリボン3変ャンパーリボン3表面材3充填材23背面材35接着剤3シール材3	セル寸法	19
耐衝撃性 3 適応等級 19 安全等級 10 認証・規格	重量	90
適応等級 安全等級19 安全等級認証・規格IEC・UL 認証 認証機関48 認証機関防塵防水規格(ジャンクション BOX・コネクタ) 防火性能26部材材質クレーム材 モジュール構成 ガラス材質 太陽電池素子68 55 太陽電池素子インターコネクションリボン ジャンパーリボン 表面材 	耐荷重	39
安全等級10認証・規格IEC・UL 認証 認証機関48認証機関26防塵防水規格(ジャンクション BOX・コネクタ)39防火性能26部材質フレーム材68モジュール構成3ガラス材質55太陽電池素子3インターコネクションリボン3ジャンパーリボン3表面材3充填材23背面材35接着剤3シール材3	耐衝撃性	3
認証・規格       48         認証機関       26         防塵防水規格(ジャンクション BOX・コネクタ)       39         防火性能       26         部材材質       68         モジュール構成       3         ガラス材質       55         太陽電池素子       3         インターコネクションリボン       3         ジャンパーリボン       3         表面材       23         背面材       35         接着剤       3         シール材       3	適応等級	19
IEC・UL 認証       48         認証機関       26         防塵防水規格(ジャンクション BOX・コネクタ)       39         防火性能       26         部材材質       0         フレーム材       68         モジュール構成       3         ガラス材質       55         太陽電池素子       3         インターコネクションリボン       3         ジャンパーリボン       3         表面材       3         充填材       23         背面材       35         接着剤       3         シール材       3	安全等級	10
認証機関       26         防塵防水規格(ジャンクション BOX・コネクタ)       39         防火性能       26         部材質       68         モジュール構成       3         ガラス材質       55         太陽電池素子       3         インターコネクションリボン       3         ジャンパーリボン       3         表面材       3         充填材       23         背面材       35         接着剤       3         シール材       3		
防塵防水規格(ジャンクション BOX・コネクタ)       39         防火性能       26         部材材質       68         モジュール構成       3         ガラス材質       55         太陽電池素子       3         インターコネクションリボン       3         ジャンパーリボン       3         表面材       3         充填材       23         背面材       35         接着剤       3         シール材       3	IEC·UL認証	48
防火性能       26         部材付質       68         フレーム材       68         モジュール構成       3         ガラス材質       55         太陽電池素子       3         インターコネクションリボン       3         ジャンパーリボン       3         表面材       3         充填材       23         背面材       35         接着剤       3         シール材       3	認証機関	26
部材材質       68         フレーム材       68         モジュール構成       55         太陽電池素子       3         インターコネクションリボン       3         ジャンパーリボン       3         表面材       3         充填材       23         背面材       35         接着剤       3         シール材       3		
フレーム材       68         モジュール構成       3         ガラス材質       55         太陽電池素子       3         インターコネクションリボン       3         ジャンパーリボン       3         表面材       3         充填材       23         背面材       35         接着剤       3         シール材       3	防火性能	26
モジュール構成3ガラス材質55太陽電池素子3インターコネクションリボン3菱面材3充填材23背面材35接着剤3シール材3		
ガラス材質55太陽電池素子3インターコネクションリボン3ジャンパーリボン3表面材3充填材23背面材35接着剤3シール材3		68
太陽電池素子       3         インターコネクションリボン       3         ジャンパーリボン       3         表面材       3         充填材       23         背面材       35         接着剤       3         シール材       3	モジュール構成	3
インターコネクションリボン       3         ジャンパーリボン       3         表面材       3         充填材       23         背面材       35         接着剤       3         シール材       3	ガラス材質	55
ジャンパーリボン3表面材3充填材23背面材35接着剤3シール材3		3
表面材3充填材23背面材35接着剤3シール材3		
充填材23背面材35接着剤3シール材3	ジャンパーリボン	3
背面材35接着剤3シール材3	表面材	3
接着剤3シール材3	充填材	23
シール材 3	背面材	35
	接着剤	3
41111	シール材	3
封止材   13	封止材	13
コネクタ 48	コネクタ	48
		45
ケーブル材質 6	ケーブル材質	6
ラベル 10	ラベル	10
セルコネクタの材質(スズや銅などの材質) 3	セルコネクタの材質(スズや銅などの材質)	3

<sup>\*1:</sup>全31カタログのうち、何カタログに当該項目が掲載されていたかをパーセント表記したもの。

# (3) DPP データ項目の検討

「再生可能エネルギー発電設備の廃棄・リサイクルのあり方に関する検討会」の中間とりまとめによると、PV パネルの型式登録の際、4 物質(Pb、Cd、As、Se)の 4 物質の含有情報を登録することと検討の方向性が示されている。ただし、登録される情報は、PV パネル全体の全体重量を分母にして、これまでのように RoHS 基準を参考の基準とし、それ以下といった情報にとどまり、かつ既設の PV パネルの情報は十分蓄積されないことが懸念される。

一方で、本事業は、ESPR に基づいて定められた情報要件を DPP として取り扱うことでリサイクル側への情報提供を行うものである。ESPR の情報要件としては、以下の項目を求めているため、本事業で

は、可能な限りにこれに沿って有害物質情報を取得する方針にしている。

- 製品が含有する懸念物質の名称
- 製品中の懸念物質の場所
- 製品、その主要構成部品または予備部品のレベルにおける、懸念物質の濃度、最高濃度または濃度範囲
- 製品の安全な使用のための適切な指示
- 解体に関する情報

したがって、国の検討会での議論に加えて、処理過程での分離や破砕を念頭に、PV パネル全体ではなく、「有害物質の部品単位の場所や濃度範囲」を示すこと、「実証事業を通じて可能な限り既設の PV パネルの情報」も伝達すること、「上記 4 物質以外に情報伝達すべき物質」(Sb や F 等)にも対象を広げることがポイントと考えている。

また、本事業では、各製造年や各メーカーの PV パネルを平均的に取得、分析していくことで、既設の PV パネルの情報を外挿していく。さらに、本事業において、リユース判定、一定の実際の分析、外挿に よる推定作業が終了したものについては、PVCJ のマークとともに QR コードを貼り付けて、可能な範囲 で情報を伝達していく。

リサイクル業者は、この QR コードを読み込み、自社施設での有害物質・懸念物質の取扱可否や許容レベルを勘案して処理を進める。また、今後、ESPR に伴う DPP では、リサイクル原料を使った製品にも同様な情報伝達が求められると考えられ、有害物質はリサイクル原料に混入し得る前提でコントロールしながら使用していくことになり、リサイクル業者や製造者の意識も変わり、有害物質が無作為に拡散していく可能性も下がると考えられる。

# 2.2 ステークホルダー間での DPP データの連携方法の検証(情報にアクセスする方法の実証)

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上で、PV パネルのトレーサビリティや有害物質に関する情報など管理する必要がある。これらの情報管理を行う上で重要なポイントが 2 点あると考えられ、1 点目は、「どのように使用済 PV パネルに情報を付与するか」、2 点目は、「どのようにその情報にアクセスするか」である。

本年度事業では、二次元バーコードを太陽光発電所の PV パネルに貼り付け、リユース業者及び再 資源化業者等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を検討、 実証した。

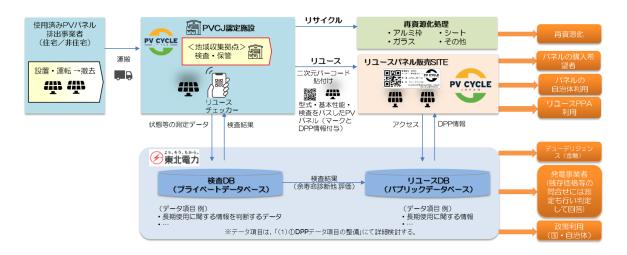


図 2-26 情報にアクセスする仕組みについて

出所:東北電力にて作成

# 2.2.1 二次元バーコードに付与するデータ量の検討

# (1) 二次元バーコードについて

二次元バーコードとは、バーコードと同じく商品や情報の識別に使われるコードの一種であり、バーコードが 1 次元の線形的なコードであるのに対し、2 次元バーコードは縦横に広がった平面的なコードである。今回の検証では、二次元コードの代表となる QR コードを活用した。

QRコード(Quick Response コード)は、高速読み取りを重視したマトリクス型 2次元コードとして、1994 年株式会社デンソーウェーブにより開発された。QR コードを構成する最小の単位(白黒の正方形)をセルと呼び、QR コードは位置検出パターン(ファインダパターン)と、タイミングパターン、誤り訂正レベルやマスク番号などの情報を持ったフォーマット情報、データ及び誤り訂正符合(リードソロモン符号)から構成される。QR コードの仕様は以下のとおり。

● 最小セル数: 21×21 セル

● 最大セル数: 177×177 セル

● 最大データ量: 数字 7089 字、英数字 4296 字、バイナリ 2953 バイト、漢字 1817 文字

また、ファインダパターンとは、QR コードの 3 コーナーに配置される 3 個(マイクロ QR の場合は 1 個)の位置検出用のパターンである。このパターンを検索することで QR コードの位置を認識し、高速な読み取りが可能となる。A、B、C のどの位置からも必ず、白セルと黒セルの比率が 1:1:3:1 になっており、回転していても位置の検出や位置関係から回転角度を認識している。方向性は無く 360°どの方向からでも読み取れるため、作業の効率化を実現できるコードである。

そのため、例えば、倉庫にて積み上げて保管している使用済 PV パネルの情報を読み取る場合でも 作業性が担保されると考えられる。

# (2) QR コードサイズの求め方

QR コードの大きさは、バージョン(セル数)とセルサイズより算出されるため、以下のとおり、「バージョン(セル数)」、「セルサイズ」、「コードの大きさ」の順で決定するものである。

- バージョン(セル数)の決定
  - データ容量・文字種、誤り訂正レベルからバージョン決定する。
  - データ容量は各バージョンの最大入力文字数を参照する。
- セルサイズの決定
  - プリンタの解像度、スキャナの性能を考慮しセルサイズを決定する。
  - 例:プリンタ解像度 208dpi の場合(0.125 mm/dot)
  - セルサイズ: 4dot = 0.5mm
- QR コードサイズの確定
  - セル数とセルサイズを乗算することで、QR コードの大きさを求めることができる。なお、確保すべき印字スペースを計算する場合は、これに 4 セル分のクワイエットゾーンを加える。

例として、セルサイズ=4dot(0.5 mm)とした場合の各バージョンのサイズは次のとおり。

- $\cancel{N}$ - $\cancel{y}$ = $\cancel{y}$ 1(21×21)=10.5 mm×10.5 mm
- $\cancel{N}$ - $\cancel{y}$ = $\cancel{y}$ 4(33×33)=16.5 mm×16.5 mm
- クワイエットゾーン考慮後した場合、以下のとおり。
- $\cancel{N}$ - $\cancel{y}$ = $\cancel{y}$ 1(29×29)=14.5 mm×14.5 mm
- $\cancel{N}$ - $\cancel{y}$ = $\cancel{y}$ 4(41×41)=20.5 mm×20.5 mm

### (3) ラベルサイズから格納可能な QR サイズ上限

PV パネルのフレームの厚みより、ラベル貼付可能スペースとして 35 mm以下とすることで検討する。

なお、使用済 PV パネルは、発電所にて使用された後、撤去⇒運搬⇒検査⇒保管⇒リユースなど多くの工程があることから、二次元バーコードの一部に損傷が生じることも懸念される。そのため、QR コードの一部分が損傷した場合でもデータを損失することなく、復元することができるよう 4 段階ある誤り訂正符号(リードソロモン符号)レベルが最も高い「H(ハイ)」として検討する。

コードサイズが 33.5 mm×33.5 mm以下となる最大桁数については、最小セルサイズ:4dot(推奨最低サイズ値)とすると以下のとおり最大 174 桁まで格納することができる。

- QR コードサイズ 32.5mm×32.5mm
- 格納可能桁数:174 桁
- バージョン:10(57×57)
- クワイエットゾーン含む(65×65)
- 誤り訂正レベル:H(ハイ)

# 2.2.2 二次元バーコードラベルの大きさ・素材等の規格に関する検討

# (1) 二次元バーコードの大きさに関する検討

QR コードサイズは「印字可能サイズ」と「読取可能距離」、「読取機器」の 3 つの要素から決定する必要がある。

フレームの厚みより 35 mm以下に貼付可能なサイズでは最大 174 桁まで格納することができるが、最小セルサイズとすると QR コードの読み取り距離が小さくなる。そのため、実際に管理・運用する際に支障とならないよう適切なサイズとする必要がある。今回は、以下のとおり、QRコードよりウェブサイトにアクセスすることを想定し、QRコードに半角 34 桁が格納できるデータ量とした。

#### ● 格納データ

■ https://pvcj.jp/env demo project/(半角 34 桁)

#### ● 構成

- セルサイズ:7dot=0.875 mmの場合
- バージョン:バージョン 3(29×29)
- クワイエットゾーン含む(37×37)
- 誤り訂正レベル:H(ハイ)
- 最大桁数:35 桁
- 上記条件による QR コードサイズ
  - 32.375 mm×32.375 mm
- 上記サイズにおける読取距離
  - スマートフォン(機種:AQUOS sense6) 読取距離:220mm
  - 汎用ハンディターミナル(機種:DX-A600) 読取距離:500mm
  - ロングレンジハンディターミナル(機種:BT-A700)読取距離:3,000mm

また、読み取りの活用例については以下のとおり。

- スマートフォンやハンディターミナルで読み取り
  - 端末と対象となる QR コードが近い距離で読み取りを行うため、コードサイズが小さくても読み取りが可能。登録作業、検査、情報照会など、パネル単体を確実に読み取る作業に向いている。
- ロングレンジ対応端末での読み取り
  - ロングレンジ対応端末では数メートル程度の読み取りが可能であり、QR コードが大きい程読取距離が遠くなる。そのため、棚卸しや在庫管理など、対象パネルに近づかずとも作業が可能となれば工数低減が図れる。読取距離に合わせ、端末側のカメラ判別が可能なコードサイズとする必要がある。

上記の検討内容を踏まえて、PV パネルのアルミニウム枠幅が通常 35~40mm のため、35×100mm の二次元バーコードを作成した。この二次元バーコードを東北電力管轄の太陽光発電所に貼り付けることで風化等の実証を開始している。詳細は「2.2.3」に記載する。



図 2-27 二次元バーコード作成例

出所:株式会社サトーにて作成

# (2)素材等に関する検討

本年度事業では、3 種類のサンプルを比較する。そのため、各基材の特徴や評価結果を以下のとおりまとめた。

- 1)耐候性、擦過性に強い素材「ウルトラベル・ネオ」
- 2)一般的に使用される素材「ケミスト汎用」
- 3)一般的に使用される素材+ラミネート「ケミスト汎用+UV 吸収ラミネート上貼り」

#### 1) 耐候性、擦過性に強い素材「ウルトラベル・ネオ」

- 基材の特徴と用途
  - ポリオレフィレンを基材ベースとした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 向けの基材である。

#### ● 特徴

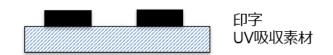
- 屋外耐候性:10 年相当の試験をクリア(メタルウェザーメーター評価)
- ラミネート不要
- 単層基材のため、オーバーラミネート時の懸念点となる「ラミネートの剥がれ」が起きない基材

#### ● 用途例

■ 水道・ガス・電気等のメーター類や信号灯機、EV スタンド…等 ※屋外設置機器の屋外銘板・証印といった屋外で長期保存が必要な用途

#### ● 基材構造

■ 以下のとおり単層基材となり、層間の剥がれが起きない。



# 図 2-28 ウルトラベル・ネオ 基材構造

出所:株式会社サトーにて作成

# 2) 一般的に使用される素材「ケミスト汎用」

- 基材の特徴と用途
  - ポリエステル基材の表面に、熱転写印字を良くする特殊な塗料を塗布した白色フィルムを上紙 に使用した粘着紙。長期保存が可能な銘板向け汎用的な基材。

#### ● 特徴

- 屋外対候性:1年以上2年未満の印字耐久性
- ウルトラベル・ネオと比較し印字適正が高く、高精細な印字が可能
- プレ印刷が可能

#### ● 用途例

- PC や家電の銘板ラベル等 ※一般的な環境(常温、室内)において長期保存が必要となる用途
- 基材構造
  - 「ウルトラベル・ネオ」と同様に単層基材となり、層間の剥がれが起きない。



図 2-29 ケミスト汎用 基材構造

出所:株式会社サトーにて作成

# 3) 一般的に使用される素材+ラミネート「ケミスト汎用+UV 吸収ラミネート上貼り」

- 基材の特徴と用途
  - 印字した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、対候性を強化している。
- 特徴

- 印字面の上からラミネートを貼り付けるため耐久性が非常に高く、印字面が酸性雨や砂塵の影響を受けにくい。
- ラミネート貼付作業が必要。
- フィルムを貼り合わせているため、時間の経過によりラミネートが剥がれる可能性がある。

#### ● 用途例

■ 水道、ガス、電気等のメーター類や信号灯機、EV スタンド…等 ※屋外設置機器の屋外銘板・証印といった屋外で長期保存が必要な用途

#### ● 基材構造

■ ラベル層、ラミネート層の二層構造となるため、ラミネートが剥がれる可能性がある。



図 2-30 ケミスト汎用+UV吸収ラミネート 基材構造

出所:株式会社サトーにて作成

#### 4)素材に関する検討まとめ

ウルトラベル・ネオ及びケミスト汎用の両基材ともに、溶剤系(ソルベント)の糊を使用しており、水分に溶けることがないため、降雨の影響が少ない基材である。そのため、時間の経過につれ粘着力が向上する傾向にあることから、シールの「粘着力」という観点からも、劣化しにくい基材と言える。

また、使用済 PV パネルの「管理」という観点では、「印字耐久性」及び「作業性」が重要な比較要素である。表 2-8 における比較により「ウルトラベル・ネオ」「ケミスト汎用+UV 吸収ラミ」が候補に相応しい基材であることが分かった。

なお、同表の耐候性については、紫外線のみを考慮しており、雨などの影響は評価していないため、 風化等についてはフィールド試験も実施の上で評価する必要があると考えられる。

表 2-8 各種基材の評価比較表

	耐候性	対溶剤性	耐擦過性	層の分離	価格	作業性	解像度	プレ印 字
ウルトラベ ル・ネオ	10年	十分な耐性 を持つが、 酸性雨は要 評価	十分な耐性 を持つが、 砂塵は要評 価	無し(単 層)	Δ	0	203dpi	不可
ケミスト汎用	2年未満	×	×	無し(単 層)	0	0	203~ 609dpi	可
ケミスト汎用 +UV 吸収ラ ミ	10 年+ α	オーバーラ ミネートの ため、ほと んど影響無 し	オーバーラ ミネートの ため、ほと んど影響無 し	あり(貼 り合わ せ)	Δ	×( <u>*</u> )	203~ 609dpi (ケミスト ラベルへ の印字)	可 (印字し たケミス トラベル の上から 貼付)

※ケミストラベル貼付後、上からラミネートを貼り付ける必要あり 出所:株式会社サトーにて作成

# 2.2.3 二次元バーコードラベルの風化等に関する検討

通常、二次元バーコードを屋外環境で長期間、使用した場合には、シール表面の退色や印字消失、ラベル剥がれ等により読取不可となる。

屋外銘板ラベルの印字劣化については、主に下記3つの要因が関係する。

#### ● 紫外線

■ 太陽から照射される紫外線により、基材表面(印字)が劣化。方角や地面からの確度により紫 外線の強さが異なるため、方向・確度といった貼り付け条件によって劣化具合は異なる。

#### 雨

■ 自然界の雨は、純粋な水ではなく様々な不純物(有機物や重金属類、ナトリウム、二酸化硫黄、 窒素酸化物等)を含んでいる。「二酸化硫黄」「窒素酸化物」の濃度が高いと「酸性雨」となり、 酸性雨に長時間当たり続けることで、徐々に印字が劣化する。(印字が溶け流れるイメージ)そ のため、特に都市部や工業地帯などの地域では劣化が進みやすい傾向にある。

#### ● 砂や埃などの接触

■ 風によって砂や埃がラベルに当たることで、印字が劣化する。(印字が削れるイメージ)そのため、特に幹線道路沿いや砂浜の近くでは劣化が進みやすい傾向にある。

劣化に対する対策として、屋外対候性ラベルを活用することで、長期間の保存(試験値 10 年以上)に おいて、「印字内容・バーコード読取」が期待できる。

実際に営業運転している太陽光発電所にて劣化に対する影響を検証するため、以下の東北電力所有の発電所 3 個所にて実証を開始した。具体的には、各発電所にて 5 個所程度、二次元バーコードラベルを PV パネル側面及び裏面に貼り付けた。今後、継続的に状態をモニタリングしていく予定である。

表 2-9 太陽光発電所 一覧表

発電所名	鰺ヶ沢太陽光発電所	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	海に近いため塩害の影響を受ける場所	内陸部のため比較的に 穏やかな気候の場所

出所:東北電力にて作成



図 2-31 鰺ヶ沢太陽光発電所

出所:東北電力にて作成



図 2-32 石巻雄勝太陽光発電所

出所:東北電力にて作成



図 2-33 白石太陽光発電所

出所:東北電力にて作成





図 2-34 二次元バーコードの貼付状況の一例(PV パネル側面、裏面)

出所:東北電力にて作成

# 2.2.4 情報にアクセスする方法の仮説構築

PV パネルに貼付した二次元バーコードを活用し、情報にアクセスすることを想定しているが、例えば、「集約拠点での検査、仕分け」「リユース業者・リサイクル業者から運搬」「納入先業者にて使用」など各業務で二次元バーコードによる一元管理を行うことで、正確かつ効率的なトレーサビリティ管理の実現ができると考えられる。

本年度事業では、集約拠点にてハンディターミナルの専用アプリケーションにて二次元バーコードをスキャンする業務イメージ図を以下のとおり作成するとともに、二次元バーコードを読み込むことによって仮想データベース(PV CYCLE JAPAN ホームページ)ヘアクセスすることが可能であることを確認した。



図 2-35 情報にアクセスする方法のうち集約拠点(倉庫)業務のイメージ図

出所:株式会社サトーにて作成



図 2-36 二次元バーコード及び仮サイトヘアクセス

出所: (左図)東北電力及び PVCJ にて作成 (右図)PV CYCLE JAPAN ウェブサイト、https://pvcj.jp/env\_demo\_project/、2024 年 2 月 8 日取得

活用シーンごとに運用と端末を選定することで、作業性の向上を図ることができるため、以下のとおり、 二次元バーコード(QR コード)活用シーンごとの読取方法を比較した(表 2-10)。

- スマート端末(スマートフォン、タブレット等)
  - 想定シーン:「申込者」、「納入先」における QR コードを読み取る。
  - 特徴:端末の制約が無いが、業務用としては読取精度が不足することも想定される。
- 業務用ハンディターミナル(標準レンジ)
  - 想定シーン:「集約拠点」におけるパネル単体識別作業
  - 特徴:読取精度、速度が高く作業性が良い。(テンキー付きの端末もあり)
- ロングレンジハンディターミナル
  - 想定シーン:「集約拠点」における在庫管理や出荷検品
  - 特徴:読取距離が向上するため、パネルが積載された状態でも、1 点 1 点積み降ろししながら 読まず、離れた位置から読み取ることが可能
    - ※貼付位置やQRコードサイズの要素により読取距離は異なる

表 2-10 読取手法の評価比較表

	端末制約	読取精度	読取速度	読取距離	入力作業	価格
スマート端末(ス	0	Δ	Δ	×	Δ	0
マートフォン、タブ						
レット等)						
業務用ハンディ	×	0	0	0	$\odot$	0
ターミナル						
ロングレンジハン	×	0	0	<b>(</b>	0	Δ
ディターミナル						

出所:株式会社サトーにて作成

本項では、集約拠点(倉庫)業務についてまとめたが、情報にアクセスする方法については、データベースの概念的な要件定義の検討やデータベースの運用面など前節 2.1 と合わせた検討及び具体化が必要である。

本項にて比較評価したとおり、ハンディターミナル等の使用する機器により作業性に大きな影響があることから、現地作業の作業効率など考慮することが重要である。

# 3. 長期使用に関する判断基準の不足等への対応(長期使用に関する情報 整理)

# 3.1 使用済 PV パネルの長期使用可能性を予測する方法の確立(回路の健全性と材料の劣化度合いの評価に向けた検討)

使用済 PV パネルを回収した後に劣化度合いを判定し、リユース、すなわち長期使用が可能かを判断するためには、その判断に必要な情報や知見を蓄積し、判断手法を確立することが必要となる。

材料の劣化が PV パネルの出力にどのような影響を及ぼすか明らかにすることを目的として加速劣化試験(耐候性試験、冷熱衝撃試験、恒温恒湿試験、温度サイクル試験)を実施し、劣化試験前後での回路の健全性や樹脂等の材料の劣化度合いの評価手法を検討した。経年劣化した PV パネルの正常動作の可否を判断する方法についても評価・検討を行った。

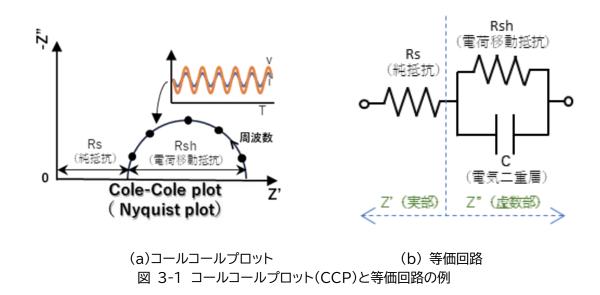
# 3.1.1 検証の手順

長期使用に関する検査技術として一般的な直流信号を用いる I-V 特性評価においては、検査時点での劣化判断はできるものの劣化度合いや残存使用可能期間を把握することは困難である。また、エレクトロルミネッセンス EL(電界発光; Electro-Luminescence)やフォトルミネッセンス PL(蛍光発光; Photo-Luminescence)による非破壊検査での内部破損状況確認では異常セルの場所特定はできるものの、直流電気特性とは必ずしも相関が得られないことから劣化度合いの評価は難しい状況にある。

本年度は、劣化度合いを解析する手法として交流インピーダンス法を用いた。交流インピーダンス法は電気化学的インピーダンス測定法とも呼ばれ、一般的には、めっきや腐食、リチウム蓄電池の他、シリコン型、CIGS型(Cu、In、Ga、Seの4つの元素を主原料とする化合物半導体系太陽電池)及びペロブスカイト型(有機系・色素増感太陽電池)の各PVパネルで材料物性や材料界面における反応過程を非破壊で解析する手法として用いられている。本年度事業では、PVパネルの材料物性に加えて内部の劣化度合いを評価する手法として交流インピーダンス法を用い、従来の評価方法である直流I-V特性、EL測定、PL測定と比較して相関を調査することで、本手法の有効性を検討した。

図 3-1(a)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交流インピーダンス測定の例を示す。電気化学的には複素インピーダンス線図あるいはコールコールプロット(Cole-Cole Plot、以下 CCP)と呼び、電気回路的にはナイキスト線図と呼ぶ。この CCP から PV パネルの等価回路を作成した例を同図(b)に示す。一般的に、Rs を純抵抗、Rsh を電荷移動抵抗、C を電気二重層と呼ぶ。Rs は金属電極の電気抵抗、半導体の電気抵抗及び金属と半導体の接触抵抗 などに起因する。Rsh はダイオードの 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などに起因し、p型 c-Si 太陽電池においては、PID(Potential Induced Degradation:電力誘起出力低下)現象によって形成された欠陥が Rsh 低下の原因になる場合がある。等価回路においては、Rsh>>Rs 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呼ぶ。

本年度は、テーブル試験用のミニ PV モジュールと使用済 PV パネルに対して加速劣化試験を実施し、試験前後に CCP を測定することで、Rs、Rsh、C の変化から PV 内部の劣化との相関について調査した。



# 3.1.2 テーブル試験での検証結果

テーブル試験用の試料には、東北大学提供のミニ PV モジュール(以下、モジュール)を用いた(図 3-2)。大きさは100×60×16(mm)である。<sup>21</sup>



#### メーカー提供性能値

最大出力 P <sub>max</sub>	300 mW
短絡電流 $I_{sc}$	650 mA
最大出力動作電流 $I_{pm}$	600 mA
解放電圧 Voc	600 mV
最大出力動作電圧 $V_{\rm pm}$	500 mV

図 3-2 ミニ PV モジュールの外観と諸元

提供されたモジュール 50 個すべてについて、事前に I-V 測定(図 3-3)を東北大学が、EL 測定(図 3-4)と PL 測定(図 3-4)を株式会社アイテスが、CCP 測定(図 3-5)を秋田県産業技術センターが行った。

50

<sup>&</sup>lt;sup>21</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





I-Vカーブトレーサー MP180 人工太陽照明灯 XC-100EFSS 照度100mW/cm2

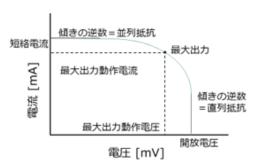


図 3-3 I-V 測定システムの概要







励起光源: POPLI Octa 中心発光波長 830nm 放射照度 40W/m<sup>2</sup>以上

撮影条件: PL 10秒 EL 1秒 印加電圧 1V 印加電流

EL1 650mA(ISCの100%) EL2 130mA(ISCの20%) EL3 65mA(ISCの10%)

ELとPL発光強度

	EL	PL
Rs	暗	影響なし
Rsh	暗	暗
η	暗	暗

図 3-4 EL 及び PL 測定システム PVX1000 + POPLI Octa(アイテス製)の概要

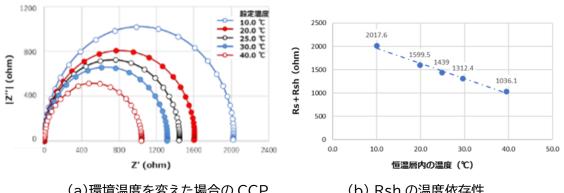


測定条件

印加雷圧	0.02 V (交流)
	, ,
周波数範囲	1 Hz $\sim$ 1 MHz
, ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	
測定環境	遮光(非発電)
	` '
	25 ℃(恒温槽)

図 3-5 CCP 測定システムの概要

モジュール測定時の環境温度を変えて CCP 測定を行ったところ、CCP と Rsh は温度依存性を持つことが分かった(図 3-6)。劣化度合いの評価には環境温度の影響を抑える必要があるため、モジュールを設定温度 25℃の恒温恒湿槽に入れ、温度一定の環境で測定した。



(a)環境温度を変えた場合の CCP

(b) Rsh の温度依存性

図 3-6 CCP の温度依存性

耐候性試験用に先行して準備したモジュール 30 個について、劣化試験前に行った I-V 測定結果を 表 3-1 に示す。図 3-2 のメーカー提供性能値通りの特性を有することが確認できた。また、EL 測定、 PL 測定、及び CCP における Rsh を図 3-7 と図 3-8 に示す。EL 及び PL 測定結果においては一 部のモジュールにセル欠陥が確認でき22、モジュール評価においても異常セルの場所特定に有効な手段 であることが分かった。また、ELとPLは手法が異なり、EL検査では、結晶や電極の欠陥があるとEL 発光の強度が低下し、PID 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 検査 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。Rsh に関しては、小さいものでは lkΩ 以下、大きいも ので数  $10k\Omega$  となり、I-V、EL、PL の各測定結果との相関は今のところ確認できていない。今後、印加 電圧や周波数などの測定条件を変えて Rsh を評価・解析することで、各測定結果の相関や PV 内部の 劣化度合いと要因の把握につながる可能性がある。

以上の各測定結果を総合的に判断して各劣化試験用の試料を選別し、耐候性試験に 20 個、冷熱衝 撃試験に 4 個、恒温恒湿試験に 4 個、そして温度サイクル試験に 5 個、計 33 個のモジュールに対して 加速劣化試験を行った。

<sup>22</sup> 使用したモジュールは一般に流通している製品ではなく、試験用に制作したものであるため、制作過程でセル欠陥が 生じる場合がある。モジュールのセル欠陥に対する劣化試験の影響についても次年度以降調査を行う予定である。

表 3-1 モジュールの I-V 測定結果

	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
No	Pm	Isc	lpm	Voc	Vpm	FF
No.	(mW)	(mA)	(mA)	(mV)	(mV)	(%)
1	250.66	509.50	479.87	627.28	522.35	78.43
2	248.77	506.55	477.89	626.66	520.56	78.37
3	252.98	512.77	484.33	625.78	522.34	78.84
4	257.68	525.80	492.82	627.08	522.86	78.15
5	249.96	508.51	477.75	627.66	523.21	78.32
6	258.19	522.92	494.41	624.95	522.22	79.01
7	244.92	500.15	470.97	624.86	520.03	78.37
8	250.84	506.79	477.79	629.04	525.01	78.69
9	242.18	511.98	475.86	626.72	508.94	75.48
10	254.73	519.58	490.04	626.30	519.82	78.28
11	248.24	505.99	475.02	626.02	522.59	78.37
12	239.12	486.37	456.32	627.05	524.02	78.41
13	250.50	513.27	480.79	625.10	521.02	78.08
14	250.33	515.64	483.89	624.62	517.32	77.72
15	242.33	497.26	465.95	625.31	520.07	77.93
16	243.75	498.51	468.03	626.17	520.80	78.09
17	246.08	502.75	472.31	626.96	521.01	78.07
18	253.72	523.77	490.99	624.42	516.75	77.58
19	247.78	502.75	473.35	625.90	523.45	78.74
20	251.63	510.80	480.07	627.12	524.16	78.55
21	252.70	514.92	481.48	630.15	524.84	77.88
22	246.39	506.23	472.80	626.63	521.14	77.67
23	243.78	499.61	469.26	623.78	519.49	78.22
24	258.18	532.88	499.20	625.22	517.19	77.49
25	245.04	505.61	473.91	626.47	517.06	77.36
26	246.12	509.71	478.21	623.24	514.67	77.48
27	247.01	502.20	471.76	628.15	523.60	78.30
28	247.08	507.83	475.92	626.60	519.16	77.65
29	246.59	499.43	468.38	630.61	526.47	78.30
30	250.75	525.59	491.73	616.88	509.93	77.34

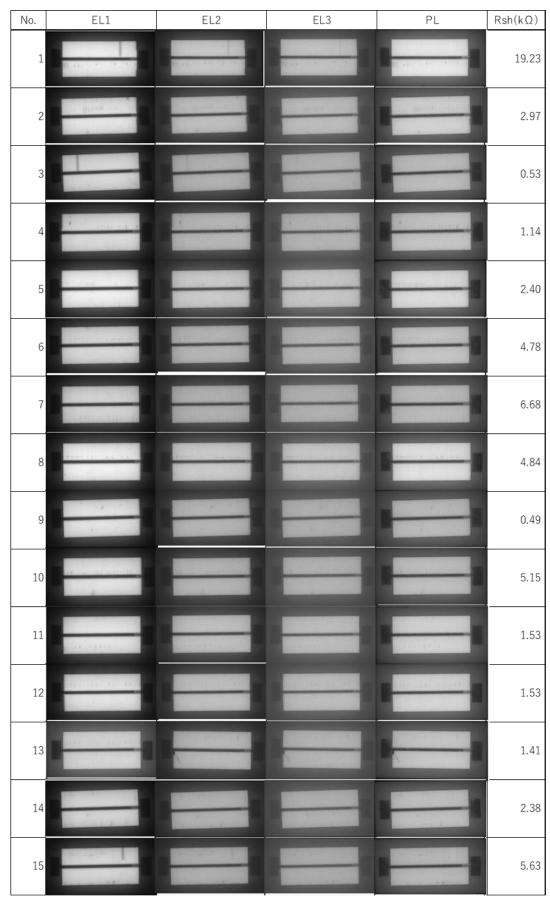


図 3-7 モジュールの EL、PL、CCP(Rsh)測定結果(1)

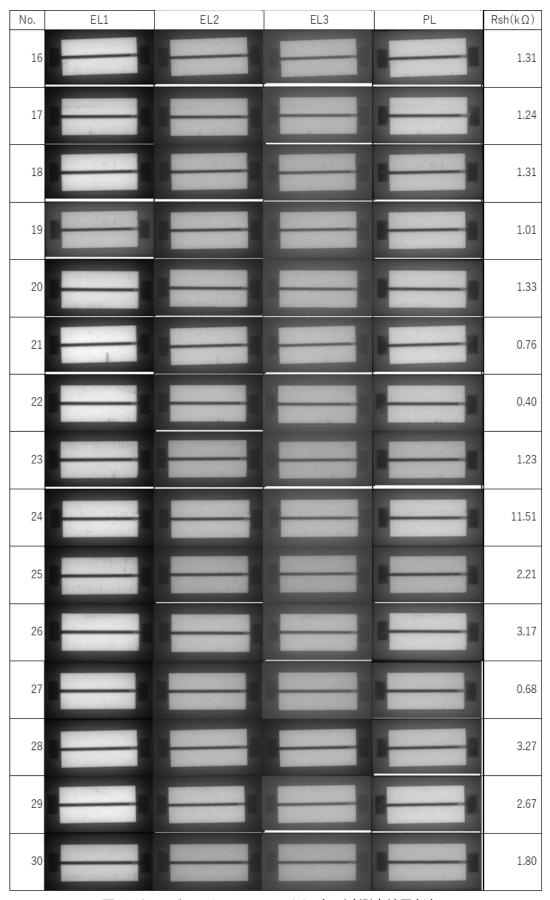


図 3-8 モジュールの EL、PL、CCP(Rsh)測定結果(2)

本年度に行った加速劣化試験は、当初予定していた耐候性試験、冷熱衝撃試験、恒温恒湿試験の 3 種類に温度サイクル試験を追加した 4 種類である。一般に、冷熱衝撃試験と温度サイクル試験は試験方法が異なるものの、試験方法の違いによる試験結果への影響は明確に示されていない。そのため、本年度事業では、1 サイクル当たりの時間が短い冷熱衝撃試験を計画したが、使用済 PV パネルの劣化試験として温度サイクル試験を実施したことから(3.1.3 で後述)、モジュールに対しても同試験を追加実施して、両者の結果について比較検討を行うこととした。すべての加速劣化試験は秋田県産業技術センター所有の設備で行った。各加速劣化試験の特徴と条件及び測定結果を以下に示す。

# (1) 耐候性試験

### 1) 試験方法

本試験では、紫外線照射と結露をサイクルで行うことで、紫外線と水分の影響を調査する。装置の外観と試料設置時の内部の様子を図 3-9 に示す。紫外線照射時の設定条件は、紫外線強度 150 mW/cm²、温度 85 °C、相対湿度 70 %RH、結露時の設定条件は、相対湿度 100%RH、温度の設定無し(制御不可)とし、紫外線照射 10hr(時間)と結露 5hr を交互に繰り返した。なお、紫外線照射直前には 30 秒間のシャワーを施している。図 3-10 に試験環境の履歴(横軸 2.5hr)の一部を示す。(a)は結露から紫外線照射へ、(b)は紫外線照射から結露への切り替わりを示している。装置仕様の制約で結露時は温度制御ができず、5hr 経過後には室温まで温度は下がるが、その他は設定条件で試験されたことを確認している。

紫外線照射時間を 100 から 500hr まで 100hr ごとに各 4 個の試料を作製した。100hr 試料は上記の紫外線照射(10hr)と結露のサイクルを 10 回繰り返して劣化させた。最大照射時間 500hr は、屋外環境でおよそ 10 年分の紫外線照射量に相当する。

作製手順を図 3-11 に示す。試料台上で紫外線照射均斉度が 90%以上の領域に 12 個のモジュールを配置した。最初に配置した 12 個(a)のうち 4 個を 100hr 照射後に取り出し(100hr 試料)、代わりに 4 個の試料を設置する(b)。 200hr 照射後に最初に配置した 8 個のうち 4 個を取り出し(200hr 試料)、代わりに 4 個の試料を設置する(c)。その後は 300hr 連続照射することで、最初に設置した試料は照射時間 500hr 試料に、100hr 経過時に設置した試料は 400hr 試料に、200hr 経過時に設置した試料は 300hr 試料となる。

各照射時間の試料 4 個のうち、2 個は端子を短絡接続(以下、ショート)し、残りの 2 個は端子を開放 (以下、オープン)して試験を行った。本装置では、試料へ外部から電源接続できないため、端子をショートすることで照射した紫外線による発電で疑似的な通電状態とし、実際の PV パネル設置環境に近い条件での試験を想定した。

また、モジュールの封止材として使用している EVA 樹脂そのものを配置し(図 3-9 (c))、モジュールと同様に紫外線照射時間を 100hr から 500hr まで 100hr ごとに変えた試料を作製した。EVA 樹脂そのものを紫外線及び水分に直接晒すことで、モジュール内の EVA 樹脂よりも劣化が進むと期待した。EVA 樹脂の評価は東北大学で次年度に継続して実施する。





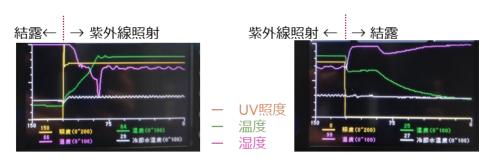


(a) 外観

(b) 試料設置の様子

(c) 試料の配置

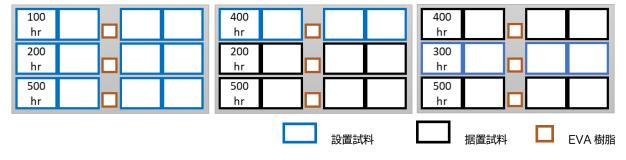
図 3-9 耐候性試験装置の外観と試料設置時の内部の様子



(a) 結露 → 紫外線照射

(b) 紫外線照射 → 結露

図 3-10 試験時履歴の一部



(a) 試験開始時

(b) 100hr で試料(400hr)交換 (c) 200hr で試料(300hr)交換 図 3-11 試料作製の手順

#### 2) 試験結果

図 3-12 に耐候性試験品の外観写真を示す。試験前品(a)と比較して、同図(b)ではアルミニウムフレームのアルマイト皮膜が剥離し、同図(c)ではガラス面での黄変が認められ、紫外線照射時間が長くなるほど外観の劣化が顕著になった。

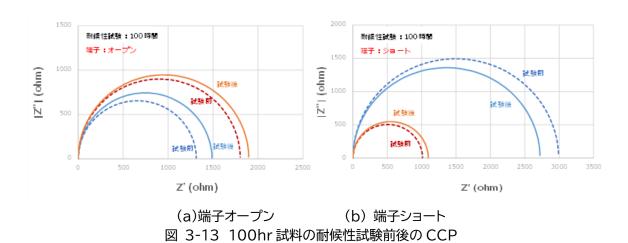
図 3-13 に 100hr 試料、図 3-14 に 500hr 試料の試験前(破線)と後(実線)の CCP を示す。恒 温恒湿状態で紫外線照射を同時に行う耐候性試験では、最長 500hr の試料でも、円弧の変形等は確認できなかった。しかしながら、端子オープン試料では紫外線照射時間が長いと Rsh の低下が顕著であった一方、端子ショート試料では Rsh の低下が抑制される違いが認められた。図 3-15 に Rsh(試験後)の紫外線照射時間依存性を Rsh(試験前)で規格化して示す。サンプル数は少ないが、端子状態、

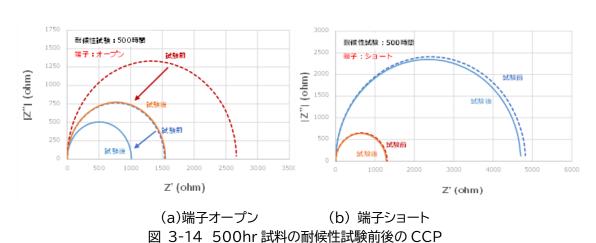
すなわち通電の有無で紫外線による劣化程度の違いが 3 次多項式近似<sup>23</sup>において確認できる。当初、端子ショート試料では、照射した紫外線の影響で発電状態となり劣化が進行すると予想したが、それに反して発電(通電)している方が劣化しないことが分かった。

本年度は、試験前のRshが大きく異なる試料も含まれており、個体差の影響も考えられる他、100hr 試料ではわずかに Rsh の増大が見られている。次年度は、紫外線照射時間を同一試料に累積する試験を行い、Rsh の推移を観測する予定である。また、この要因調査には、試料内部の分析解析も必要と考えている。

その他の I-V、EL、PL の各測定も現在進めており、解析も含めて次年度に継続して実施する。







<sup>23 3</sup>次多項式は以下のとおりであった。

端子ショート:y=9E-10x^3 - 7E-07x^2 + 9E-05x + 1.0002 (R^2=0.0658) 端子オープン:y=3E-09x^3 - 4E-06x^2 + 7E+04x + 1.0143 (R^2=0.9616)

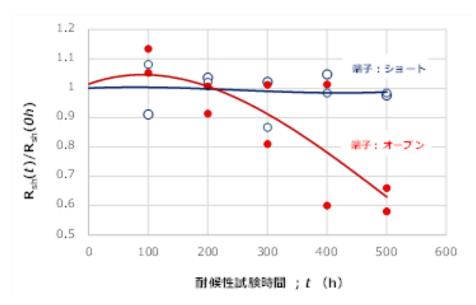


図 3-15 Rsh の紫外線照射時間依存性(3 次多項式近似)

### (2)冷熱衝擊試験

### 1) 試験方法

本試験では、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ることで膨 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する。装置の外観と試料の様子及び試験条 件を図 3-16 に示す。高温 85 $^{\circ}$ 及び低温-40 $^{\circ}$ の遷移・保持時間を 0.5hr、1 サイクル当たりの時間 を 1hr とし、200 サイクル、計 200hr の試験を行った。4 個の試料の端子はすべてオープンで試験を 行った。

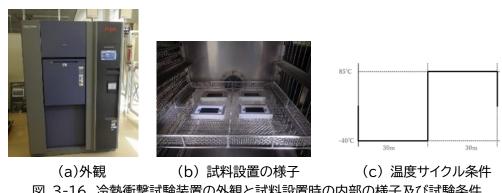


図 3-16 冷熱衝撃試験装置の外観と試料設置時の内部の様子及び試験条件

## 2) 試験結果

図 3-17 に冷熱衝撃試験を行う前(破線)と後(実線)の CCP を示す。4 試料すべてにおいて Rsh がわずかに増大している。前述の耐候性試験の結果において、紫外線照射 100hr 試料では Rsh の増 大が見られることから、冷熱衝撃試験においても劣化によって同様の現象が生じている可能性がある。

次年度、本試験を同一試料に累積して行いRshの推移を観測することで、Rshの変化と劣化度合い の相関を評価する予定である。

その他の I-V、EL、PL の各測定も現在進めており、解析も含めて次年度に継続して実施する。

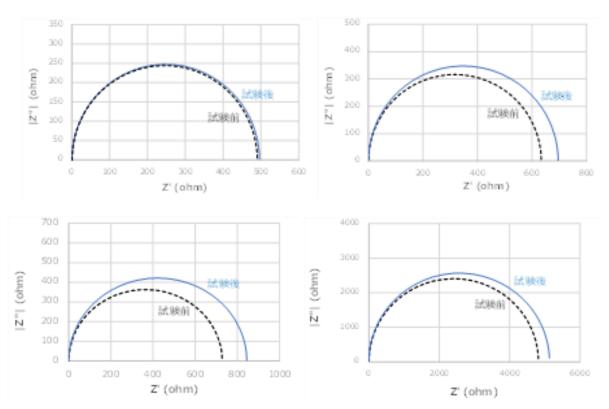


図 3-17 冷熱衝撃試験前後のモジュール 4 試料の CCP

# (3) 恒温恒湿試験

## 1) 試験方法

本試験では、一定の温湿度環境に放置することで熱及び水分による劣化を促進させ、屋外での使用環境を模擬した影響を調査する。装置の外観と試料の様子を図 3-18 に示す。本試験は JIS C 61215-2:2020 4.13 を元にした条件とし、温度 85 $^{\circ}$ C、相対湿度 85 $^{\circ}$ RH にて 1000hrの試験を行った。4 個の試料について端子はすべてオープンで試験を行った。一般的に、前述の JIS の条件で実施した場合、試験時間 1000hr が  $5\sim10$  年経過分に相当することが知られている。



(a)外観



(b) 試料設置の様子

図 3-18 恒温恒湿試験装置の外観と試料設置時の内部の様子

#### 2) 試験結果

図 3-19 は、400hr 経過時点の試験中装置内での試料観察写真である。300hr 経過時からアルミ ニウムフレームの変色が認められ、400hr 経過時にはアルミニウムフレームほぼ全面で変色が確認され た。同図(b)は1000hrの試験終了時の写真で、目視レベルでは外観のさらなる劣化は認められていな い。また、耐候性試験品で見られた黄変は確認できなかった。

試験後の各測定及び解析は次年度に継続して実施する。





(a) 400hr 経過時

(b) 1000hr 終了時

図 3-19 恒温恒湿試験 400hr 経過時及び 1000hr 終了時のモジュールの様子

# (4) 温度サイクル試験

### 1) 試験方法

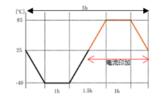
本試験では、緩やかな温度変化を繰り返すことでクラック等の不具合発生の影響を調査する。装置の 外観と試料の様子及び試験条件を図 3-20 に示す。高温 85℃及び低温-40℃の保持時間をそれぞ れ 1hr、遷移時間を含めた 1 サイクル当たりの時間を 5hr とし、200 サイクル、計 1000hr の試験を 行った。本試験は JIS C 61215-2:2020 4.11 を元にした条件とし、温度 25℃以上で定格電流を印 加した。装置の構造上の理由で通電は1試料のみに行い、他の4試料は端子をオープンで試験を行っ た。一般的に、前述の JIS の条件で実施した場合、200 サイクルが 5~10 年経過分に相当することが 知られている。



(a) 外観



(b) 試料設置の様子



(c) 温度サイクル条件

図 3-20 温度サイクル試験装置の外観と試料設置時の内部の様子及び試験条件

#### 2) 試験結果

図 3-21 は、400hr 経過時点の試験中装置内での試料観察写真で、同図(b)は 1000hr の試験終 了時の写真である。特に外観に変化は見られず、耐候性試験品で見られた黄変も恒温恒湿試験品で見 られたアルミニウムフレームの変色も確認できなかった。 試験後の各測定及び解析は次年度に継続して実施する。





(a) 400hr 経過時

(b) 1000hr 終了時

図 3-21 温度サイクル試験 400hr 経過時及び 1000hr 終了時のモジュールの様子 (左下試料 1 個のみ電流印加)

# (5) 加速劣化試験のまとめ

PV パネルが晒される熱、光、酸化、加水分解等劣化に影響すると考えられる環境要因が樹脂材料の 劣化や電極破損等へ与える影響を調べるため、耐候性試験、冷熱衝撃試験、恒温恒湿試験、温度サイクル試験の 4 種類の加速劣化試験を実施した。テーブル試験用試料として用いたモジュールの劣化試験前後に測定した電気特性から、水分が存在し通電が行われない環境下で劣化が進行しやすい傾向を確認できた。また、外観に関しては、ガラス面での黄変が耐候性試験で、アルミニウムフレームの変色 (アルマイト皮膜の剥離)が、耐候性試験と恒温恒湿試験で認められたことから、ガラス面の黄変には紫外線が、アルミニウムフレームの劣化には紫外線と高湿度が影響していると考えられる。

次年度も、劣化試験及び測定・解析を継続して実施する他、物理的破損要因を解析するために振動 試験や塩水噴霧試験等の実施も検討している。

# 3.1.3 試験サンプルを用いた検証結果

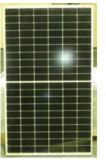
#### (1) 試験方法

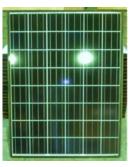
試験サンプルの検証には、PVCJ ルート施設で回収しリユース検査で OK 判定となった使用済 PV パネル(以下、パネル)6 枚(3 メーカー、各 2 枚)を用いた。各試料番号#を以下に示し、外観を図 3-22 に示す。

#1,2 A 社製;出力 255W #3,4 B 社製;出力 360W #5,6 C 社製;出力 180W

加速劣化試験前後に 6 枚のパネルの I-V 測定(図 3-23)、EL 測定(図 3-24)、PL 測定(図 3-25)を株式会社アイテスが、CCP 測定(図 3-26)を秋田県産業技術センターが行った。







(a) A 社製 #1, 2 (b) B 社製 #3, 4 (c) C 社製 #5, 6 図 3-22 使用済 PV パネルでリユース判定 OK 品の外観と製品仕様

測定条件: IEC61215-2

STC(標準試験環境) 日射照度:1000W/m²

エアマス:1.5

パネル温度:25±2℃

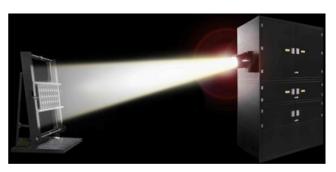
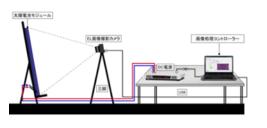


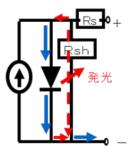
図 3-23 I-V 特性評価システムの概要

出所:株式会社ケミトックス、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、2024 年 2 月 27 日取得



撮影風景の例





測定条件 印加電流 EL1 650mA(ISCの100%) EL2 130mA(ISCの20%) EL3 65mA(ISCの10%)

図 3-24 EL 測定システム PVX300(アイテス製)の概要



図 3-25 PL 測定システム PVX330 + POPLI(アイテス製)の概要





#### 測定条件

印加電圧 0.02 V (交流) 周波数範囲 1 Hz∼1 MHz 遮光(非発電) 測定環境

(室内照明OFFと暗幕)

25±2 ℃

(a) 測定風景

(b) 測定時は両面遮光 図 3-26 CCP 測定システムの概要

(C) 測定条件

加速劣化試験として、時間 1000hr の温度サイクル試験 JIS C 61215-2:2020 4.11 を株式会社 アイテスが行った。条件は図 3-20(c)を参照されたい。

# (2)試験結果

①I-V 特性(表 3-2):試験前後で変化は見られなかった。

表 3-2 温度サイクル試験前後での I-V 特性の比較

メーカー	サンプルNo.	状態	Isc[A]	Voc[V]	Ipm[A]	Vpm[V]	Pm[W]	FF [%]
	ш1	試験前	8. 80	37. 14	8. 25	30.09	248. 16	75. 91
A社	#1	試験後	8. 81	37. 35	8. 24	30. 28	249. 56	75. 85
A↑I	#2	試験前	8. 81	37. 21	8. 30	30. 16	250. 23	76. 31
	#4	試験後	8. 82	37. 53	8. 29	30. 48	252. 65	76. 34
	#3	試験前	11.00	40.34	10. 47	33. 64	352. 37	79. 41
B社		試験後	10.98	40. 52	10. 47	33. 61	352. 04	79. 15
DŢI	#4	試験前	11. 14	41.49	10. 61	34. 89	370. 08	80.09
		試験後	11. 13	41. 59	10. 65	34. 57	368. 05	79. 5
	#5	試験前	8. 32	29. 47	7. 80	23. 63	184. 31	75. 2
C社	#5	試験後	8. 35	29.61	7. 77	23. 78	184. 74	74. 75
	#6	試験前	8. 33	29. 46	7. 81	23. 63	184. 56	75. 21
	#6	試験後	8. 33	29. 56	7. 79	23. 65	184. 30	74. 82

Isc: 短絡電流[A], Voc: 開放電圧[V], Ipm: 最大出力動作電流[A], Vpm: 最大出力動作電圧[V] Pm: 最大出力[W], FF: 曲性因子[%]

# ②EL 測定(図 3-27): 一部のパネルで劣化が進んだことを確認した。

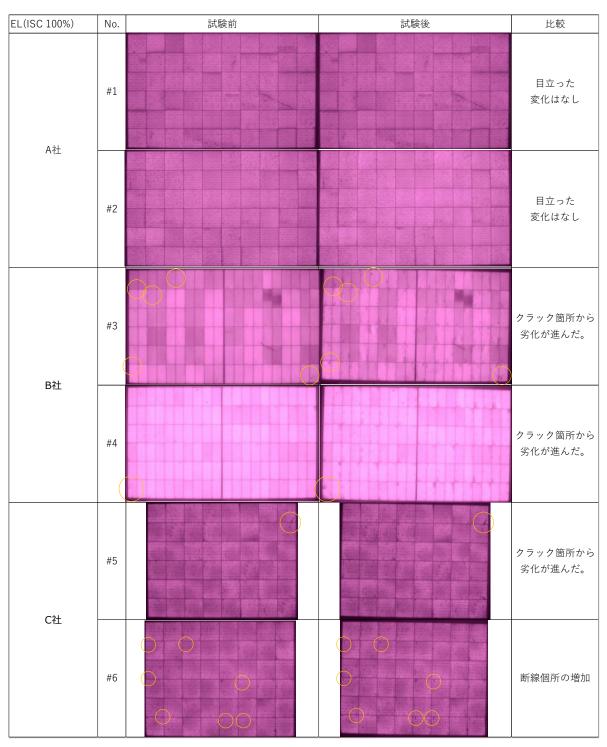


図 3-27 温度サイクル試験前後での EL 測定結果(ISC 100%)

③PL 測定(図 3-28): 一部のパネルで劣化が進んだことを確認し、EL との相関も確認できた。

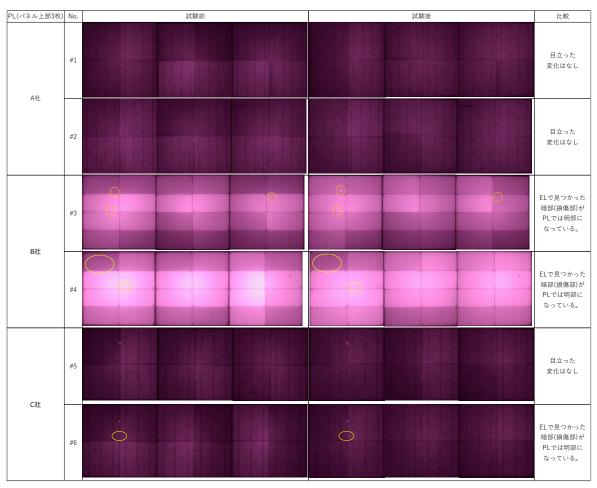


図 3-28 温度サイクル試験前後での PL 測定結果(パネル上部 3 枚)

# ④CCP 測定(図 3-29): 試験後に Rsh の変化を確認できた。

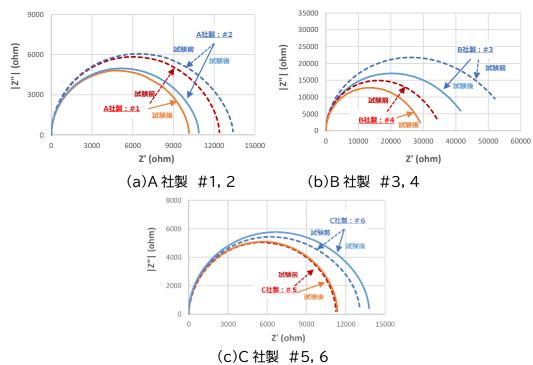


図 3-29 温度サイクル試験前後の CCP

EL・PLとCCPとの相関について、例えば C 社製 PV パネルの結果で考察すると、#5 では EL・PL と CCP の両者で劣化試験後に変化は無く、#6 では試験後に変化が確認できており、CCP 測定と EL・PL 測定との間には相関があり、少なくとも同一メーカーごとに劣化度合いを判別できることが分かった。このことは、本年度事業で新たに試みた交流インピーダンス測定法が、実パネルの評価において有効な手法であることを示している。ここで、C 社製 PV パネルにおいては劣化試験後に Rsh がわずかに増大しており、他の 2 社とは異なる傾向にあるが、モジュールでの劣化試験においても図 3-15 のように劣化試験初期に Rsh の増大が見られており、次年度もパネルの加速劣化試験を累積して行うことで劣化過程を追跡する予定である。

今回用いた 6 枚の OK 判定パネルにおいては 1000hr の加速劣化試験で Rsh の低下が確認できた。また、本年度事業期間において PVCJ ルート施設から入手した使用済 PV パネルのうち、リユース検査では OK 判定が付きにくい△品と NG 品<sup>24</sup>が発生したことから、それらについても CCP 測定を行い、劣化が進んだ状態での評価を行った。各試料番号を以下に示し、外観を図 3-30 に示す。

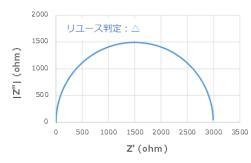
#7 D 社製; 出力 280W; リユース判定 △ #8 E 社製; 出力 275W; リユース判定 NG

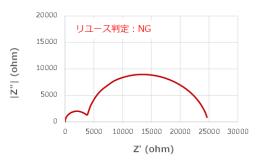




(a)D 社製 #7;リユース判定△ (b)E 社製 #8;リユース判定 NG 図 3-30 リユース判定△及び NG となったパネルの外観

図 3-31 に CCP を示す。同図(b)の NG 品において 2 種類の円弧が確認できた。このことから、交流インピーダンス測定法はパネル内の劣化を明確に捉える有効な手法と言え、CCP を解析することで実パネルの劣化の度合いを評価できる可能性がある。





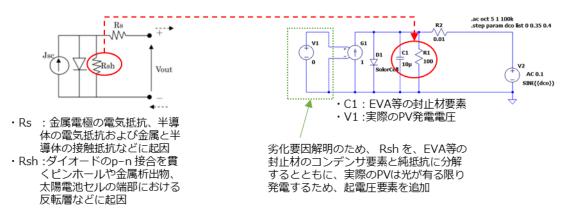
(a)D 社製パネル(#7;△) (b)E 社製パネル(#8;NG) 図 3-31 リユース検査で NG 判定の使用済 PV パネルの CCP

 $<sup>^{24}</sup>$  リユース検査では、インピーダンス測定値等に基準値を定め、OK、 $\triangle$ 、NG の 3 段階で判定が行われる。 $\triangle$ は、NG 判定こそ出ていないものの、PV パネルの状態としては NG 品に近いと考えられる。

# 3.1.4 テーブル試験での検証の結果と試験サンプルを用いた検証の結果の比較

テーブル試験用ミニPVモジュールと使用済PVパネル試験サンプルの測定結果を比較し、劣化要因の相関評価を行うため、等価回路設計を導入し、モジュールを用いたストリングスの解析を試みた。

はじめに、Rs、Rsh 抵抗と p-n ダイオードによって構成される一般的なモジュールの等価回路(図 3-32(a))を元に、周波数特性の評価が可能となるように等価回路(同図(b))を設計した。この等価回路(b)では、劣化要因解明のため Rsh を EVA 樹脂等封止材のコンデンサ要素 C1 と純抵抗 R1 に分解するとともに、実際のパネルでは光がある限り発電動作が行われるため起電圧要素 V1 を追加したことを特徴とする。この起電力要素は、電流が循環する直流回路に対して交流インピーダンス測定を行う上で必須である。



(a) 一般的なモジュールの等価回路 (b) 周波数特性評価用モジュールの等価回路 図 3-32 モジュールの等価回路設計

ストリングスの検討には、前掲図 3-2 のモジュールを用い、各モジュールの Rsh は以下のとおりである。

#1:  $1.81 \text{ k}\Omega$ , #2:  $1.83 \text{ k}\Omega$ , #3:  $19.23 \text{ k}\Omega$ 

これらのモジュールを、Rsh が同程度 2 個(#1 と#2)、及び Rsh が異なる 2 個(#1 と#3)のそれ ぞれを直列接続したストリングスの CCP を図 3-33 に示す。同図(b)の Rsh が異なる場合において、 リユース判定 NG 品の CCP(図 3-31(b))と同様に、きれいな半円に対して円弧がずれた状態(円弧の歪み)が見られた。ここで「計算値」は個々のモジュールの測定値を加算した値であり、ストリングスでの実測値と同程度となっていることから、ストリングスの特性は個々のモジュール特性の重畳になっていると言える。この結果から、実際の PV パネル内に特性が異なるモジュールが存在することが CCP の円 弧に歪みが生じる原因の一つと考えられる。 CCP を解析することでストリングスを構成するモジュールのアンバランスひいては劣化度合いを評価できる可能性がある。

ストリングス実測値から等価回路を設計した例を図 3-34に示す。この等価回路から求めた CCPも実測値(図 3-33(b))と同様の特性となった。このことから、今回導入した図 3-32(b)の等価回路によって PV パネルの回路モデル作成が可能であり、本年度事業で試みた等価回路設計は PV パネル内部の劣化要因と電気特性の関連性を捉える有効な手法と言える。

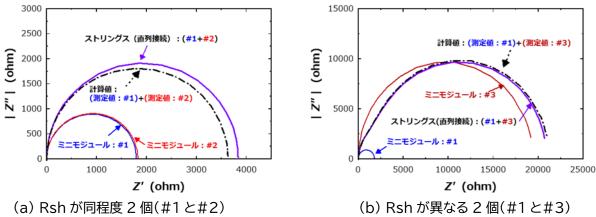


図 3-33 モジュール 2 個直列接続したストリングスの CCP

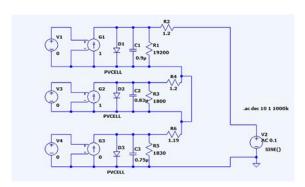


図 3-34 Rsh が異なる(#1と#3)直列接続の等価回路設計

#### 3.1.5 PV パネルの健全性と劣化度合いの評価手法の課題と課題解決の方向性

本年度は、限られた時間の中で、リユース NG 判定の使用済 PV パネルを含めた各種 PV パネル現物の各種電気的特性の評価ができ、劣化過程のデータと知見が得られた。しかし、事業期間の制約により加速劣化時間が限られたため、劣化要因の特定まで至らなかった点は課題である。次年度は、本年度で未完の劣化試験及び各測定・分析結果から劣化要素の特定を目指すとともに、以下により課題解決を進める予定である。

- 本年度実施した加速劣化試験の試験時間を積み上げ、劣化過程のデータを取得
- 物理的破損要因の解析のため、振動試験や塩水噴霧試験など他の加速劣化試験を検討
- 加速劣化試験品の電気的測定と化学的分析を行い、PV セル内劣化要素の解明と特定
- PVCJ ルート施設の協力も得てリユース NG 判定の使用済 PV パネルの評価とデータ蓄積
- リユース NG 品に見られたセルバランスの乱れや発電性能低下の要因を特定する手法を検討

これらは、PV パネルの健全性と劣化度合いの評価手法の確立につながると考える。

さらに直流・交流電気特性、材料劣化特性、使用状況予測等の要素に関する予測モデルを検討し、機械学習機能等を活用した総合診断型アルゴリズムを構築して、次年度に予定されているプライベートデータベースの診断機能として試作する方針である。

## 3.2 年代・製造者が異なる使用済 PV パネルを混合した太陽光発電設備の設置・運転

現状、使用済 PV パネルからなる太陽光発電所を導入・運転する技術的知見が限られている。そのため、太陽光パネルのリユース促進を目的として、使用済 PV パネルからなる太陽光発電所を導入・運転することで、リユース太陽光発電所に係る技術的課題を明確化するとともに、太陽光パネルのリユースが促進している環境下となることを目指していく必要がある。

本年度事業では、年代・製造者が異なる使用済 PV パネルを混合した太陽光発電所の設置・運転を行った。

# 3.2.1 様々な使用済 PV パネルによる太陽光発電所の導入

# (1) 太陽光発電所の設置

現在利用可能な技術を用いて、年代・製造者が異なる使用済 PV パネルを混合した太陽光発電所を 設置した。

今回使用する使用済 PV パネルは、本太陽光発電設備の施工会社が、PV CYCLE JAPAN の正会員のリサイクル業者 2 社及びその他 1 社より入手した。

#### 1) 太陽光発電所の主な仕様

#### a. 設置場所

東北大学 環境科学研究科本館 屋上



図 3-35 環境科学研究科本館

出所:東北大学ウェブサイト、https://www.kankyo.tohoku.ac.jp/facility.html、2024年2月8日取得

### b. 使用済 PV パネル一覧表

使用済 PV パネルは 8 社 11 種類、計 84 枚を使用している。本太陽光発電所の想定される最大出力は約 20kW である。

表 3-3 使用した使用済 PV パネル一覧

メーカー	型式の種類	最大出力[kW]	枚数
	A1	255	12
A社	A2	295	4
	A3	410	4
B社	B1	360	16
C社	C1	131	16
D社	D1	82	12
<b>□</b> →	E1	180	4
E社	E2	285	4
F社	F1	215	4
G 社	G1	285	4
H社	H1	300	4

出所:東北電力が作成

# c. 機器一覧表

表 3-4 主な機器一覧表

機器名称	仕様等	数量
使用済 PV パネル	※詳細は表 3-3 のとおり	84 枚
PCS	定格出力電力 4.80kW(力率 0.95 時)	7台
PPLC センサー	※詳細は 3.2.1 (1)2)のとおり	84 台
架台	傾斜アルミニウム架台 10 度	1式

出所:東北電力が作成

## d. 設置状況

架台ごとに 7 ブロックに分け、1 ブロック当たり 12 枚のパネルを設置した。メーカー・型式 1 種類のパネルで 4 ブロック、メーカー・型式 3 種類を混合したパネルで 3 ブロックにて設置した。

メーカー・型式 1 種類で実施するブロックは、通常運転する場合を想定したものである。3 種類で実施するブロックは、通常運転とは異なる形態であり、運転に支障が無いか確認するとともに課題を明確化するものである。

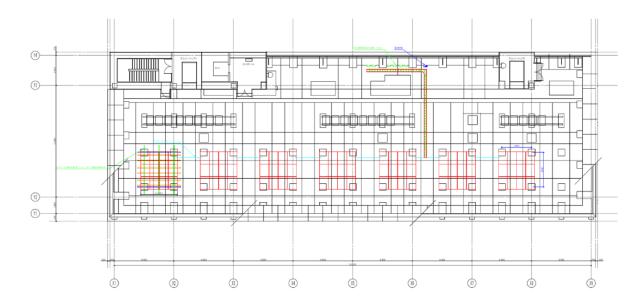


図 3-36 環境科学研究科本館 屋上 平面図

出所:エネテクが作成

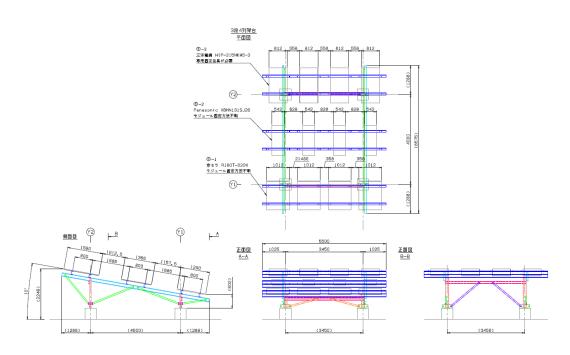


図 3-37 架台 図面(一例)

出所:エネテクが作成



図 3-38 設置状況①

出所:東北電力が作成



図 3-39 設置状況②

出所:東北電力が作成





図 3-40 設置状況③

出所:東北電力が作成

#### 2) PPLC センサーの設置

#### a. PPLC センサーとは

PPLC センサーとは、パネル 1 枚ごとに IoT センサーを設置し、電圧や温度などのデータを電力線経由でゲートウェイに収集することで、大量パネルの稼働状態を一括で正確に把握できるものである。(図 3-41)

# 【PPLC(R)-PVとは?】(ヒラソル・エナジーウェブサイトより抜粋)

「ヒラソル・エナジーが東京大学とともに共同研究・開発してきた、電力線通信技術と IoT を活用した太陽光発電設備の保守管理技術です(特許取得済)。パネル 1 枚ごとに IoT センサーを設置し、電圧や温度などのデータを電力線経由でゲートウェイに収集することで、大量パネルの稼働状態を一括で正確に把握できます。監視機器用の通信網を大規模に敷設する必要が無く、保守業務のコストと時間を大幅に縮小することができるので、メガソーラーでも活用できます。」

出所:ヒラソル・エナジーウェブサイト、https://pplc.co/news/w66e5JHG、2024年2月8日取得



図 3-41 PPLC(R)-PV システム例

出所:ヒラソル・エナジーウェブサイト、https://pplc.co/news/w66e5JHG、2024年2月8日取得

#### b. 現地の設置状況

本太陽光発電所では、使用済 PV パネルのサイズなど構造が異なることから、PPLC センサーを架台 もしくは PV パネルへ固定し、DC ストリング配線に挟みこむように直列に接続した。また、PPLC センサーからの信号を受信するため、ゲートウェイ(受信機本体)他を設置した。PPLC センサーからの電気 信号を受信センサーより受信する構成となっている。(図 3-42~図 3-44)

なお、運転データについては、3.2.2 に記載する。



図 3-42 PPLC センサー設置状況(モジュール固定)

出所:ヒラソル・エナジーが作成



図 3-43 PPLC センサー設置状況(チャネル固定)

出所:ヒラソル・エナジーが作成



図 3-44 PPLC センサー設置状況(モジュール固定)

出所:ヒラソル・エナジーが作成

# (2) EL 検査

# a. EL 検査の状況

使用済 PV パネルの運転前の健全性を確認するため EL 検査を実施した。セルのクラックや破断、回路上の不具合の有無を確認するため、84 枚の使用済 PV パネルそれぞれの画像を撮影の上で解析した。



図 3-45 EL 検査の状況

出所:トーエネックが作成

# b. 主な計測機器

EL 検査に使用した主な機器を表 3-5 に示す。

表 3-5 EL 検査に使用した主な機器

機器名称	メーカー	主な仕様
直流電源	A 社	出力電圧:0~300V
EL 測定システム	B社	動画撮影形式:XAVCS 画像撮影形式:jpg

出所:トーエネックが作成

# c. 異常モードの定義及びモジュール交換判断基準

異常モードの定義及びモジュール交換判断基準を表 3-6に示す。

表 3-6 異常モードの定義及び PV パネル交換判断基準

【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】
Cs セル明暗差		モジュール内のセルの 発光輝度で明暗差が ある	×	×	公称最大出力の80%以下とならないため。
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。
C1 クラスタ欠損		バイパスダイオードで 区切られた回路が暗転	0	0	モジュール内の1/3のセルが発電に寄与して いないため、モジュールの定格出力が少なく とも66.7%以下となっている。モジュール メーカーの出力保証値以下である。
D 成膜不良		化合物系モジュールに おける製造時の成膜ム ラや組成のばらつき	×	×	製造時の成膜ムラや組成のばらつきによって EL画像で発光していない部分はあるが発電 量には影響がない。今後,経過観察を推奨す る。
Cr セル内抵抗値増加		セル内に暗い部分と明 るい部分が混在	×	Δ	数枚のセルでは公称最大出力の80%以下と ならない。
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
P PID現象		PID現象により暗く映 るセルがある	0	Δ	PID現象の進行度合いにより出力保証の対象となる。今後,大きく出力低下する可能性があるためモジュール交換を推奨する。
×  測定対象外		測定対象の回路に接 続されていない	_	_	-

出所:トーエネックが作成

## d. EL 検査の結果

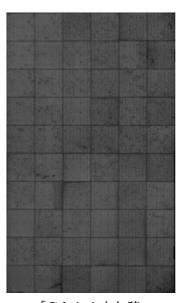
84 枚の EL 測定を行い、使用済 PV パネルの異常を 30 枚検出したが、使用済 PV パネルの交換を 推奨するような異常は発生していなかった。(表 3-7)

また、EL 検査画像の例を図 3-46 に示す。

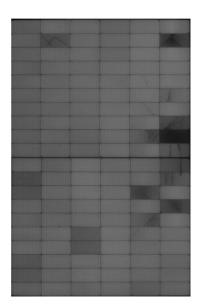
表 3-7 測定結果

【記号】	【名称】	【該当モジュール枚数】		【全体割合】	
Cs	セル明暗差	0	枚	0.0	%
Cd	セル内欠陥	29	枚	34.5	%
C1	クラスタ欠損	0	枚	0.0	%
D	成膜不良	0	枚	0.0	%
Cr	セル内抵抗値増加	0	枚	0.0	%
Cm	セル抜け	1	枚	1.2	%
Р	PID現象	0	枚	0.0	%
><	測定対象外	0	枚	0.0	%
_	異常なし	54	枚	64.3	%
星	ミ常モジュール数	30	枚	35.7	%
浿	定モジュール数	84	枚		

出所:トーエネックが作成



「Cd」セル内欠陥



「Cm」セル抜け

図 3-46 EL 検査画像の例

出所:トーエネックが作成

異常と検出された 30 枚のうち 29 枚は「セル内欠損」に該当し、モジュール内のセルの発光輝度にて明暗差がある状態である。しかし、公称最大出力の 80%以下とならないため、交換の必要性は無いものである。また、残りの 1 枚は「セル抜け」に該当し、「セル内欠損」と同様に公称最大出力の 80%以下とならないため、交換の必要性は無いことを確認した。

EL 検査を実施したことで、使用済 PV パネルに公称最大出力の 80%以下が無いことを確認できたが、一部にセル内に欠損があったことから、今後、設置した太陽光発電所の運転データを取得の上で EL 検査の結果と比較し、発電量への影響など考察する予定である。

# 3.2.2 様々な使用済 PV パネルによる太陽光発電所の運転データの取得

本太陽光発電所を「自立運転」モードにて運転してデータを取得し、設備の健全性を確認するとともに運転可能であることを確認した。

# (1) PV パネル単位での運転データ

運転データの健全性を確認するため、約 500W の掃除機を負荷として、本太陽光発電所を運転した。 運転時の電圧、電流、電力の測定データを図 3-47 に示す。2 分ごとの測定データであり、パネル 1 枚 当たり 55W 程度で発電していることから、パネル 1 枚ごとの発電量が計測可能であることを確認した。 なお、13 時 15 分の電圧値が低く表示されているが、掃除機の起動時に負荷が瞬時にかかったこと から電圧が低下したものと考えられる。また、その他の若干の値の変動については、モジュール間の性 能差や直流交流変換ロス、負荷の不安定があると推察される。

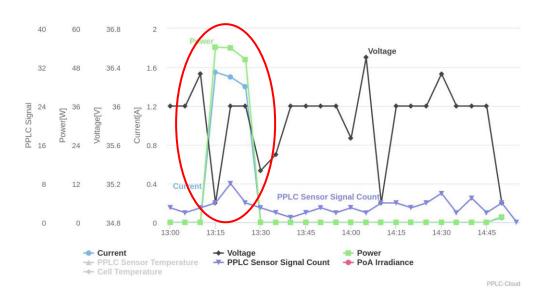


図 3-47 PV パネル単位での運転データ

出所:東北電力が作成

# (2)発電所としての運転データ

前項(1)と同様にデータを取得していることを遠隔監視システムにて確認した。日射強度や気温についても、問題無く計測できた。(図 3-48)

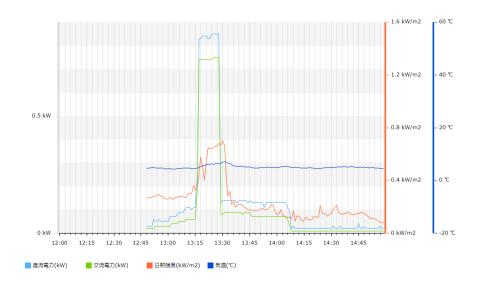


図 3-48 取得した運転データの一例

出所:東北電力が作成

# 3.2.3 まとめと今後の予定

現在利用可能な技術を用いて、年代・製造者の異なる使用済 PV パネルを混合した太陽光発電所を 設置し、運転可能であることを確認するとともに運転データを取得した。

一方で、本年度は短期間の運転データの取得となったため、次年度以降、一定期間運転データを取得することで、発電出力の不安定さやトラブルの有無等を確認する。

併せて、使用済 PV パネルの型式、もしくは接続の組合せを変更することにより、長期使用やリユースの意思決定を後押しする上での課題を明らかにし、リユース PPA 発電所向けの応用等を検討していく予定である。

# 4. 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

本事業の実施を通じて、PVパネルの長期使用・リユースによる新規PVパネル製造量の減少、またリユースの国内利用の促進による海外輸出の回避、その先の国内リサイクル活性化による資源循環及び適正処理推進への貢献が期待される。これらの環境影響改善効果の評価方法を検討し、評価を実施した。環境影響改善効果としては、CO2排出量削減効果に加え、最終処分量や資源循環利用量等にも着目し、評価を実施する予定であるが、本年度は特に「CO2排出量削減効果」の評価手法の検討に注力した。

CO2 排出量削減効果の評価手法の検討にあたっては、PV パネルのライフサイクルアセスメント (LCA)評価手法に関する文献調査、有識者等へのヒアリングを実施した。また、環境省から提供を受けた計算用フォーマットを用いて、CO2 排出量削減効果の試算を行った。

### 4.1 評価手法の検討

LCA 評価の実施にあたり、以下の手順で評価手法の検討を行った。

- 文献調査を通じて、PV パネルのリユース、リサイクルを行う場合のフローの想定を行った。また、比較対象となる、リユースもリサイクルも行われないフローについても併せて想定を行った。(4.1.1参照)
- LCA 分野の有識者にヒアリングを実施し、フローの想定方法や、CO2 排出量削減効果の評価の考え方等について、ご助言を受けた。(4.1.2 参照)
- 前述のヒアリング結果を踏まえて、評価にあたって想定するフローを定め、評価に必要なデータの 収集を行った。その際、PV パネルの処理施設より、PV パネル処理時のエネルギー消費量に関する 一次データを入手し、評価に活用した。(4.1.3 参照)

#### 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

表 4-1 に示す既往文献を参考にして、PV パネルのリユース、リサイクルを行う場合のフローと、比較対象として、リユースもリサイクルも行われないフローについて、想定を行った。

- PV パネルのリユース・リサイクルを行う「リユース・リサイクル促進ケース」のフロー
  - 新品 PV パネルが製造、使用された後、検査や洗浄等を経て、リユース製品として再使用される。その後、使用済 PV パネルがリサイクル施設へ運搬され、リサイクル・処理がなされる。
  - リサイクルについて、アルミニウムフレーム取り外しののち、ガラスの破砕・選別、銀・銅の物理 選別が行われ、残った樹脂は焼却時に熱回収(発電)が行われ、最終的な残渣は埋立処理され る。選別されたガラスはグラスウールに仕向けられ、銀・銅は電気銀・電気銅に仕向けられる。

#### ● 「ベースライン」のフロー

■ 新品 PV パネルが製造、使用された後、処理施設に運搬され、アルミニウムフレーム取り外しののち、破砕される。破砕残渣のうち、樹脂は単純焼却され、その他の残渣は埋立処理される。

■ また、「リユース・リサイクル促進ケース」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のため、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。

表 4-1 参考にした主な既往文献

文献名	概要
環境省令和 3 年度脱炭素型金属リサイクルシステムの早	セルに含まれる銀、銅を回収、再資源化した場合の
期社会実装化に向けた実証事業(太陽光パネルの収集・リ	CO2 排出量削減効果を評価
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(2022年3月)	
湯淺和博他「使用済み太陽光発電パネルのガラス再資源	ガラスを回収、再資源化した場合の CO2 排出量削減
化による環境負荷削減効果」日本建築学会環境系論文集	効
第82巻第741号 p949-955(2017年11月)	果を評価
電力中央研究所「日本における発電技術のライフサイクル	新品太陽電池モジュールの原料調達、製造に係る
Co2 排出量総合評価(YO6) 別冊付録」	CO2 排出量を評価

### 4.1.2 有識者からの助言を踏まえた評価方法の検討

LCA 分野の有識者 1 名にヒアリングを実施し、4.1.1 において検討した、PV パネルのリユース・リサイクルフローの想定について、助言を受けた。また、実証事業事務局を通じて有識者のレビューを受け、可能な範囲で環境影響改善効果の評価に反映した。

#### (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

LCA 評価を行う際の CO2 排出量の負荷と削減効果の割当方法に関するヒアリングでの助言に基づいて、評価範囲の設定を行った。

CO2 排出量の負荷と削減効果の割当方法には、主に次の 3 点がある。25

- 「①カットオフ法」:ライフサイクルにおいて、評価対象とするプロセスに直接に関係する負荷は考慮 するが、その他は負荷が無いと仮定し、評価範囲外とする方法。
- 「②負荷回避法」:リサイクルやエネルギー回収等により排出負荷を回避できた分を控除するという方法。closed-loop approximation 法(クローズドループ近似法)とも言われる。仮に、実際にはカスケードリサイクルであるプロセスを、クローズドループとして削減効果を見積もってしまうと、クローズドループリサイクルを実現した際にその削減効果が差分として表れないということになるため、注意が必要である。
- 「③製品バスケット法」:異なるケースの LCA 評価比較をする際、評価範囲を揃えるために、足りないプロセスについて排出量を上乗せし、両者のケースを等しくする方法。

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> 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、2023 年 2 月 13 日取得

また、PV パネルの素材における、排出量の負荷と削減効果の割当方法に関しては、次のとおり助言をいただいた。

- アルミニウム: 既に有価物として流通しているので、リユース・リサイクルした際の削減効果を表現するには、「①カットオフ法」が適切ではないか。
- ガラス・銀・銅: 現状、回収、リサイクルがほとんど行われていないと考えられるため、負荷回避法 を採用し、リサイクルによって新規原料の生産を回避できた効果を評価対象範囲に含めてはどうか。
- 樹脂: 現状、非鉄製錬に、アルミニウムフレーム等を除去した後の残渣(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)が投入・焼却されており、熱回収は行われていないと考えられる。そこで、リユース・リサイクル促進ケースでは、残渣焼却時に熱回収されるとして、負荷回避法の考え方に基づいて、削減効果を示すのが良いのではないか。

以上のヒアリング結果を踏まえて、評価範囲を次のとおり設定した。

- アルミニウム: 取り外したアルミニウムフレームは、カットオフ法を採用し、フレームの取り外し後のフローは評価対象範囲外とする。
- ガラス・銀・銅: 負荷回避法を採用し、リサイクルによって新規原料の生産を回避できた効果を評価対象範囲に含める。
- 樹脂: ベースライン現状、単純焼却されていると考えられるため、負荷回避法を採用し、焼却時に 熱回収(発電)を行うことで電力調達を回避できた効果を評価対象範囲に含める。

# (2) 実証事業事務局を通じて実施した有識者レビュー

レビュー内容は表 4-2 に示した。各コメントに対し、対応可能な点に関しては、環境影響改善効果の評価に反映させた。

表 4-2 実証事業事務局側が指定した有識者によるレビュー

表 4-2 実証事業事務局側が指定した有識者によるレビュー						
コメント内容	対応					
①現状回収したパネルがすべてリユースされるという設定になっているが、劣化診断を行った上でリユースとリサイクルに分かれる工程があると思われ、また場合によっては、リユース時に歩留まりも発生するかもしれないが、それらが本算定に組み込まれていないように見受けられ	「使用済 PV パネル検査等」の後、既往文献(※)を基に、67% がリユース(歩留まり考慮後)・33%がリサイクルされるとした。また、リユース・リサイクル促進ケースにおけるリユース量に合わせて、ベースラインにおける「原料調達~使用済 PV パネル輸送」の製造量、処理量を設定した。					
るため、できればそのようなフローを踏まえた 算定式にしていただきたい。 なお、現時点で上記パラメータ(劣化診断を踏ま えたリユース率、歩留まり率など)を精緻に設定 するのが難しい場合は仮定値を設定していただ くのが良い。	(※)環境省、令和3年度使用済太陽電池モジュールのリサイクル等の推進に係る調査業務報告書(令和4年3月株式会社エックス都市研究所)、p.10、「図 2.1-2 太陽電池モジュールのリユース・リサイクル量推移」の 2020 年度におけるリサイクル・リユース数量、https://www.env.go.jp/content/900535815.pdf、2023 年 12 月 26 日取得					
②表 4-6 の「使用済 PV パネル検査等」について、「関係者ヒアリングより 0.11kWh/枚」とあるが、内訳をより詳細に示していただきたい(検査工程及び各工程におけるエネルギー消費量を示していただきたい)	既往文献(※)における内訳に記載は以下のとおり。 洗浄 0.05kWh/枚 検査(絶縁抵抗測定、EL 画像測定、IV 出力測定、バイパスダイオード故障測定) 0.06kWh/枚 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・					
③流通の原単位がリユース・リサイクル促進ケース・ベースラインともに「0.00075t-CO2/枚」となっているが、リユースを検討する場合はより丁寧な輸送を実施する(積載率等に変化が発生)ことが考えられるため、流通時の CO2 排出原単位が変わる可能性は無いか。	輸送距離・積載率が変わる可能性はあるが、削減効果全体に占める輸送の寄与は他の項目と比べて小さいため、今回は両ケースで共通とした。					
④表 4-8 の PV パネル組成に関する数値を引用している「平成 19~20 年度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」等は、出典が古いが、これらは今後アップデートしていくのか。	PV パネルの組成情報は、より新しい文献値を把握できない限りは、基本的にこちらのデータを用いる予定。他方で、経年的な PV パネルの高効率化傾向を踏まえて、既往文献(※)よりリュース PV パネルの比較対象となる新品パネルは資源使用量が 4 割減と仮定し、原料調達~使用済 PV パネル輸送、破砕・破砕残渣輸送、残渣埋立、樹脂の単純焼却にかかる排出原単位も 4 割減とした。					
	(※)以下文献より、「20年(2000年→2020年)経つと、6割程度(4割程度減)になる」と読み取った。 END-OF-LIFE MANAGEMENT(IRENA)、p.27、 Figure 4 Exponential curve fit of projection of PV panel weight-to-power ratio (t/MW)、 https://www.irena.org/- /media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/I RENA_IEAPVPS_End-of- Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf、2023年12月22日取得					

### 4.1.3 評価に用いる一次データの取得

4.1.2 でのヒアリング結果を踏まえて、評価にあたって想定するフローを定め、評価に必要なデータの収集を行った。その際、PVパネルの処理施設より、PVパネル処理時のエネルギー消費量に関する一次データを入手し、図 4-1 において「フォアグラウンドデータ」として示されている箇所の評価に活用した。

今回、試算への利用を検討した PV パネル処理時のエネルギー消費量に関する一次データは、PVCJ(本年度事業で分析に使用した使用済 PV パネルの提供元)の認定を受けた廃棄物処理業者 5 社(5 施設)から取得した。試算にあたっては、5 施設の平均値を用いた。

- 取得した一次データ
  - アルミニウムフレーム除去・ガラス除去に用いる設備の名称、メーカー、型式、消費電力
  - 平均的なサイズの PV パネル 1 枚を処理する際のおよその稼働時間
- 取得した一次データを用いた排出原単位[t-CO2/t]の算定
  - 以下式より、各施設の設備別の消費電力量[kWh/枚]を求めた。
    - 消費電力量[kWh/枚]=「消費電力[kW]」×「平均的なサイズのパネル 1 枚を処理する際 のおおよその稼働時間[h]
  - 以下式より、消費電力量[kWh/枚]を消費電力量[kWh/kg]に換算した。
    - 消費電力量[kWh/kg]=「消費電力量[kWh/枚]」/「PV パネルの 1 枚当たりの重量 [kg/枚]」<sup>26</sup>
  - 各施設について、設備別の消費電力量[kWh/kg]を合算し、各施設の消費電力量 [kWh/kg]を算出した上で、5施設の平均消費電力量[kWh/kg]を求めた。
  - 以下式より、5 施設の平均消費電力量[kWh/kg]から、アルミニウムフレーム除去、ガラス除去に係る CO2 排出原単位[t-CO2/t]を算出した。
    - 「CO2 排出原単位[t-CO2/t]」=「施設別の消費電力量合計の平均[kWh/kg]」×「国内電源の CO2 排出係数 0.441[kg-CO2/kWh]」<sup>27</sup>

https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/r05\_coefficient\_rev4.pdf、2023年2月13日取得

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> 「PV パネルの 1 枚当たりの重量[kg/枚]」は、以下式で求めた。

<sup>「</sup>PV パネルの 1 枚当たりの重量[kg/枚]」=「PV パネル重量 86[kg/kW]」\*1/「PV パネル 1 枚当たりの出力 0.5[kW/枚]」\*2

<sup>\*1:</sup>平成 19~20 年度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、P16、多結晶 Si 太陽光発電システム

<sup>27</sup> 環境省電気事業者別排出係数令和 3 年度実績(代替値)P18、

## 4.2 環境影響改善効果の評価実施

4.1 で検討した評価手法に基づき、環境省から提供を受けた計算用フォーマットを用いて、CO2 排 出量削減効果の評価を実施した。併せて、資源の循環利用による最終処分量削減効果の評価も実施した。

### 4.2.1 評価の条件設定

評価にあたっては、PV パネルの発電出力[kW]を機能単位とした。「実証事業終了時点」で、現在の PVCJ 処理実績の10 倍である約14MW(PV パネル約28,000 枚28、重量1,200t29に相当すると想定)の使用済 PV パネルを取り扱い、うち約9MW はリユース、約5MW はガラス、銅、銀の回収後、樹脂焼却時熱回収(発電)することを仮定した。なお、アルミニウムフレームは従前回収されているとして評価対象外とした。表4-3に示すように、「普及段階2030年時点」での「使用済 PV パネルの年間取扱量」は「実証事業終了時点」のさらに10倍と仮定した。

また、PV パネルの高効率化傾向を踏まえて、リユース PV パネルの比較対象となる新品パネルは資源使用量が 4 割減と仮定した。

以上の条件で、図 4-1 に示す対象範囲における LCA 評価を実施した。

表 4-3 「実証事業終了時点」「普及段階 2030 年時点」における使用済 PV パネルの年間取扱量

	(A)市場 規模	(B) (A)にお ける本事業 のシェア	(C) 年間 取扱量 (A)×(B)	設定根拠
単位	(kW)	(%)	(kW)	
実証事業 終了時点	5,085,000	0.27%	13,953	(A)  一般社団法人 太陽光発電協会、「日本における太陽電池出荷統計 2022 年度第 4 四半期」、P3、「2022年度の太陽電池モジュールの国内総出荷量は5,085MW」より、https://www.jpea.gr.jp/wp-content/uploads/2022Q4_news_pv_shipment_in_japan.pdf、2024年2月26日取得(B)「(A´)PVCJにおける使用済PVパネルの処理量(t)=120t」をヒアリングにより得た。よって事業終了時点にはその10倍の処理量と仮定した。上表「(参考)評価に使用したデーター覧」の「PV重量86kg/kW」を用いて、(A´)を重量(t)から発電量(kW)に変換し、(A)に占める(A´)の割合を(B)とした。(平成19~20年度委託業務成果報告書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P16、多結晶Si太陽光発電システム)

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup> 表 4-8より「PV 重量 86[kg/kW]」であるため、「実証事業終了時点」での使用済 PV パネルの重量 120t の 10倍の 1,200t(表 4-3)は、以下式の通りに、発電出力に換算した。

<sup>29</sup> 「実証事業終了時点」での使用済 PV パネルの重量は、表 4-3 より 1,200t である。

 $<sup>1,200 \</sup>times 1000/86 = 13,953 [kW] = 14 [MW]$ 

表 4-8より「PV パネル 1 枚当たりの出力 0.5[kW/枚](仮定)」であるため、「実証事業終了時点」での使用済 PV パネル約 14MW については、以下式の通りに、PV パネル枚数に換算した。

<sup>13,953/0.5=27,906[</sup>枚] ≒28,000[枚]

<sup>10,500/0.5-27,500[</sup>収] - 20,000[収]

普及段階 2030 年時点	5,085,000	2.74%	139,535	(A) 実証事業終了時点と同じと仮定した。 (B) 「(A´)PVCJ における使用済 PV パネルの処理量 (t)=120t」について、実証終了時点では「10 倍」と仮 定したが、2030 年時点では「100 倍」と仮定した。
---------------------	-----------	-------	---------	---

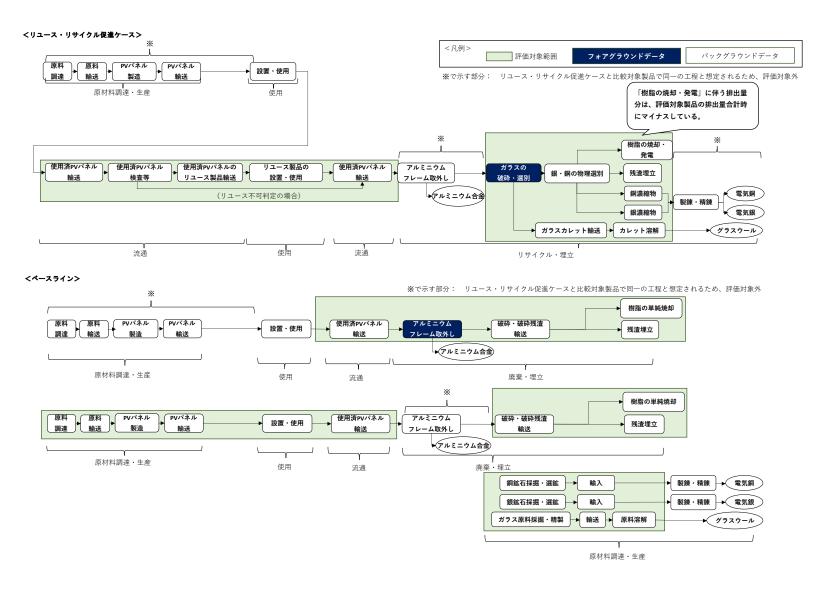


図 4-1 LCA 評価の対象範囲(上図:リユース・リサイクル促進ケース、下図:ベースライン)

# 4.2.2 評価の結果

「実証事業終了時点」「普及段階 2030 年時点」の 2 パターンの CO2 排出量削減効果の評価結果を表 4-4、表 4-5 に示す。

4.2.1 における条件設定のとおり、「普及段階 2030 年時点」は、「リユース・リサイクル促進ケース」「ベースライン」の算定に用いたデータ一覧のうち、「使用済 PV パネルの年間取扱量」を「実証事業終了時点」の 10 倍と仮定した。よって排出量削減効果も 10 倍となっている。

また、リユース・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、「実証事業終了時点」で約1,300t<sup>30</sup>、「普及段階2030年時点」で約13,000tとなった。

-

 $<sup>^{30}</sup>$  リユース・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、表 4-6「エネルギー起源」「リサイクル・廃棄」「廃棄」「廃棄」「残渣埋立」の活動量 13t と、表 4-7「エネルギー起源」「リサイクル・廃棄」「廃棄」のうち「残渣埋立(1 周目)」の活動量 803t 及び「残渣埋立(2 周目)」の活動量 482t の和である 1,285t との差分(1,285-13=1,272)より求めた。

表 4-4 実証事業終了時点の評価結果

①リユース・リサイクル	CO2 排出量 t-CO2	
エネルギー起源	<ul><li>流通</li><li>・ 使用済 PV パネル輸送</li><li>・ 使用済 PV パネル検査等</li><li>・ 使用済 PV パネルのリユース製品輸送</li><li>・ 使用済 PV パネル輸送</li></ul>	57
	リサイクル         ・ ガラスの破砕・選別         ・ ガラスカレット輸送         ・ カレット溶解         ・ 銀・銅の物理選別	1,641
	廃棄(残渣埋立)	0.5
	小計	1,698
非エネルギー起源	廃棄(樹脂の焼却)	529
	小計	529
合計		2,227

②ベースライン		CO2 排出量
		t-CO2
エネルギー起源	原材料調達・生産 ・ 原料調達(原料輸送、PV パネル製造、PV パネル輸送、設置・使用まで含む。) ・ 銅鉱石採掘・選鉱・輸入 ・ 銀鉱石採掘・選鉱・輸入 ・ ガラス原料採掘・精製・輸送・原料溶解	7,643
	<ul><li>流通</li><li>・ 使用済 PV パネル輸送</li><li>・ 使用済 PV パネル輸送</li></ul>	29
	廃棄・ アルミニウムフレーム取り外し・ 破砕・破砕残渣輸送・ 残渣埋立	84
	小計	7,756
北ナナルギーお店	廃棄(樹脂の単純焼却)	847
非エネルギー起源	小計	847
合計		8,603

③削減量		CO2 排出量
		t-CO2
エネルギー起源(②-①)	小計	6,058
非エネルギー起源(②-①)	小計	318
熱回収(発電)による電力代替効果 (樹脂の焼却時の熱回収分)	-	151
合計		6,527

注釈)なお、表 4-8の数値を用いて、CO2排出削減量 6,527 t-CO2 を単位当たりに換算すると、以下のとおり。

- ①使用済 PV パネルの取扱量(出力) lkW 当たり CO2 排出量削減量:0.47 t-CO2/kW
- ②使用済 PV パネルの取扱枚数 1 枚当たり CO2 排出量削減量:0.23 t-CO2/枚
- ③使用済 PV パネルの取扱重量 lt 当たり CO2 排出量削減量:5.4 t-CO2/t

表 4-5 普及段階 2030 年時点の評価結果

①リユース・リサイクル	促進ケース	CO2 排出量 t-CO2
エネルギー起源	<ul><li>流通</li><li>使用済 PV パネル輸送</li><li>使用済 PV パネル検査等</li><li>使用済 PV パネルのリユース製品輸送</li><li>使用済 PV パネル輸送</li></ul>	569
	リサイクル         ・ ガラスの破砕・選別         ・ ガラスカレット輸送         ・ カレット溶解         ・ 銅・銀の物理選別	16,405
	廃棄(残渣埋立)	5
	小計	16,979
非エネルギー起源	廃棄(樹脂の焼却)	5,293
	小計	5,293
合計		22,273

②ベースライン		CO2 排出量
		t-CO2
エネルギー起源	原材料調達・生産 ・ 原料調達(原料輸送、PV パネル製造、PV パネル輸送、設置・使用まで含む。)、 ・ 銅鉱石採掘・選鉱・輸入 ・ 銀鉱石採掘・選鉱・輸入 ・ ガラス原料採掘・精製・輸送・原料溶解	76,426
	<ul><li>流通</li><li>・ 使用済 PV パネル輸送</li><li>・ 使用済 PV パネル輸送</li></ul>	292
	廃棄・ アルミニウムフレーム取り外し・ 破砕・破砕残渣輸送・ 残渣埋立	843
	小計	77,561
非エネルギー起源	廃棄(樹脂の単純焼却)	8,469
	小計	8,469
合計		86,030

③削減量		CO2 排出量
		t-CO2
エネルギー起源(②-①)	小計	60,581
非エネルギー起源(②-①)	小計	3,176
熱回収(発電)による電力代替効果 (樹脂の焼却時の熱回収分)	-	1,508
合計		65,265

注釈)なお、CO2 排出削減量 65,265 t-CO2 を単位当たり(出力、枚数、重量)に換算した結果は、表 4-4 の注釈の記載と同様。

## 4.2.3 評価に使用したデータ一覧

表 4-6、表 4-7、表 4-8 において、「実証事業終了時点」における CO2 排出原単位と活動量を示す。<sup>31</sup>

なお、以降では、複数回存在する工程名を区別するため、以下のとおり、「1周目」「2周目」という表現 を用いている。

- リユース・リサイクル促進ケース
  - 1周目:前掲図 4-1上段1行目で示した、原材料調達・生産~使用の工程を指す。
  - 2周目:同図上段2行目で示した、流通~リサイクル・埋立の工程を指す。

## • ベースライン

■ 1周目:同図下段1行目で示した、原材料調達・生産~廃棄・埋立の工程を指す。

■ 2 周目:同図下段 2 行目で示した、再度 PV パネルを使用するための原材料調達・生産~廃棄・埋立の工程を指す。

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup> 「普及段階 2030 年時点」については、CO2 排出原単位は「実証事業終了時点」と同様であり、活動量は「実証事業終了時点」の 10 倍となる。

# 表 4-6 リユース・リサイクル促進ケースの LCA 評価に用いた CO2 排出原単位と活動量

①リユー	ス・リサイ	①リユース・リサイ CO2 排出原単位		活動量		
クル促進		数値	単位	数値	単位	データの出典・根拠
		0.00075	t-CO 2/枚	27,907	枚-PV パネル /年	「使用済 PV パネル輸送」 …2 周目の流通工程・冒頭について 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 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、P15「トラックのトンキロ当 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)」、https://www.enecho.meti.go.jp/cate gory/saving_and_new/saving/media/data/shoene_tebiki_02.pdf、2024 年 2 月 26 日取得 環境省「燃料種別発熱量及び二酸化炭素排出係数一覧」の「軽油排出係数 2.58tCO2/kL」、P2、 https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/data/ws_1/betsu_4.pdf、2024 年 2 月 26 日取得 …活動量は、後掲表 4-8 の使用済 PV パネル年間取扱量を 1 枚当たり出力で除して求めた。
エネル ギー起源	流通	0.00004 9	t-CO 2/枚	27,907		「使用済 PV パネル検査等」 …使用済 PV パネルの洗浄も含むと 0.11kWh/枚である。 以下文献値「洗浄 0.05kWh/枚」「検査(絶縁抵抗測定、EL 画像測定、IV 出力測定、バイパスダイオード故障測定) 0.06kWh/枚」に基づいて求めた。 「令和4年度資源循環に関する情報プラットフォーム実証事業(使用済太陽光パネルの適正管理情報プラットフォームの運用・事業面の検証)委託業務成果報告書」、P104「表 6-3 すべてリユースした場合の CO2 排出量削減効果の推計で使用した値」https://www.env.go.jp/content/000126685.pdf、2024年2月26日取得ここに、後掲表 4-8の「国内電源の CO2 排出係数」である「0.441kg-CO2/kWh」を乗じて PV モジュール 1 枚当たりの CO2 排出原単位とした。 …活動量は、後掲表 4-8 の使用済 PV パネル年間取扱量を1 枚当たり出力で除して求めた。
		0.00075	t-CO 2/枚	18,698	枚-PV パネル /年	「使用済 PV パネルのリユース製品輸送」 …「使用済 PV パネル輸送」と同値と捉える。 本項目は「検査等の結果リユースできた PV パネルだけを対象」にしている。それに従い、CO2 削減効果試算(※) にもその旨を考慮した。 … (※)以下文献より、排出された PV パネルのうち、67%がリュース・33%がリサイクルされるとした。リュース・リ

11	
_	

			0.00075	t-CO 2/枚	27,907	枚-PV パネル <i>/</i> 年	「使用済 PV パネル輸送」 …2 周目の流通工程・「アルミニウムフレーム取り外し」直前について 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、 経済産業省資源エネルギー庁、省エネ法の手引き(荷主編)ー令和 4 年度改正対応一、P15「トラックのトンキロ当 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)」、https://www.enecho.meti.go.jp/cate gory/saving_and_new/saving/media/data/shoene_tebiki_02.pdf、2024 年 2 月 26 日取得 環境省「燃料種別発熱量及び二酸化炭素排出係数一覧」の「軽油排出係数 2.58tCO2/kL」、P2、 https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/data/ws_1/betsu_4.pdf、2024 年 2 月 26 日取得 …活動量は、後掲表 4-8 の使用済 PV パネル年間取扱量を 1 枚当たり出力で除して求めた。
	リサイクル廃棄	サイクル	0.019	t-CO 2/t-P V パネ ル	1,200	t-PV パネル <i>/</i> 年	「ガラスの破砕・選別」 …PVCJ が認定した廃棄物処理業者 5 社(本年度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排出原単位を用いた。 …活動量は、後掲表 4-8 の使用済 PV パネル年間取扱量と、出力(kW)当たりの PV 重量(kg)を乗じて求めた。
エギ源			0.0039	t-CO 2/t-ガ ラスカ レット	750	t-ガラ ス カ レット/ 年	「ガラスカレット輸送」 …日本建築学会環境系論文集、第82巻、第741号、949-955、「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(湯淺他)」P952、表8「タイル製造時のプロセス別CO2排出量(工程B)」の「輸送」より、排出量1.71kgCO2/tをガラスカレットの輸送量438kgで除して求めた。 …活動量は、後掲表4-8の使用済PVパネル年間取扱量と、出力(kW)当たりのガラス重量(kg)を乗じて求めた。
			2.1	t-CO 2/t-グ ラス ウール	750	t-グラ スウー ル/年	「カレット溶解」 …原単位については、以下文献より PV パネルガラスカレットに選別されたものを輸送後、「ガラス溶解・各種処理を経てガラスウールになるまで」をバウンダリとしている「2.120kg-CO2/kg」を用いた。 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(平成 29 年 3 月 1 日リサイクルテック・ジャパン株式会社)、P55、https://www.env.go.jp/content/900532496.pdf、2024年2月26日取得 …活動量は、後掲表 4-8 の使用済 PV パネル年間取扱量と、出力(kW)当たりのガラス重量(kg)を乗じて求めた。
			0.020	t-CO 2/t-P Vパネ ル	1,200	t-PV パネル <i>/</i> 年	「銀・銅の物理選別」 …「銅濃縮物」「銀濃縮物」も原単位に含む。ここに、後掲表 4-8 の「国内電源の CO2 排出係数」である「0.441k g-CO2/kWh」を乗じて PV パネル 1t 当たりの CO2 排出原単位とした。 令和3年度脱炭素型金属リサイクルシステムの早期社会実装化に向けた実証事業(太陽光パネルの収集・リユースおよび非鉄金属の回収に係る技術実証)委託業務 成果報告書(令和4年3月イー・アンド・イー ソリューションズ株式会社)、「表 IV-15 物理選別に関する TMR」より、P80、https://www.env.go.jp/content/900535427.pdf、2024年2月26日取得 …活動量は、後掲表 4-8 の使用済 PV パネル年間取扱量と、出力(kW)当たりの PV 重量(kg)を乗じて求めた。

(	0	
(		

	廃棄	0.038	t-CO 2/t	13	t(アル ミニガ銅, 銀樹除/年 油/年	「残渣埋立」 …0.038kg-CO2/kg=0.038t-CO2/t とした。 日本建築学会環境系論文集、第82巻、第741号、949-955、「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(湯淺他)」P952、表9「タイル製造時のプロセス別 CO2 排出量(工程 C)」の「管理型埋立」より、https://www.jstage.jst.go.jp/article/aije/82/741/82_949/_pdf、2024年2月26日取得 …活動量は、後掲表4-8の使用済PVパネル年間取扱量と、出力(kW)当たりのガラス・アルミニウム・銅・銀・樹脂以外の残渣重量(kg)を乗じて求めた。
非エネルギー起源	廃棄	2.5	t-CO 2/t-樹 脂(EV A)	210	t-樹脂/ 年	「樹脂の焼却・熱回収」のうち焼却部分 …原単位について。以下文献より 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・バックカバーがあるが、ここでは簡略のためすべて EVA と仮定し、「EVA の分子構造から CO2 排出量推計」した。EVAの VA 比率を以下文献より 30%とした場合、「(C2H4)7(C4H6O2)3」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 CO2 重量を算出する換算係数は 44/12=3.667のため、312/454*3.667=2.5 kg-CO2/kg(t-CO2/t に変換)とした。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」P4、https://www.jstage.jst.go.jp/article/jiep/17/1/17_2/_pdf/-char/ja、2024年2月26日取得・・・活動量について。以下文献より、PV モジュール 1 枚当たりの樹脂重量 2.8kg/枚、モジュール 1 枚当たりの出力は 186W である。また使用済 PV パネル年間取扱量は後掲表 4-8 のとおり 13953kW であるため、年間取扱枚数にして、75019 枚/年となる。2.8kg/枚*75019 枚=約210053kg/年の樹脂が必要とされる。

①リュ	①リユース・リサイ		CO2 排出原単位		活動量			
クル促	クル促進ケース		数值	単位	数值	単位	√ データの出典・根拠 	
熱回収(発電では、発電を表する。	) イ る ク 北 ル・	廃棄	0.00044	t-CO2/ kWh	341,919	kWh/ 年	「樹脂の焼却・熱回収」のうち熱回収部分 …原単位について。環境省電気事業者別排出係数令和3年度実績(代替値)P18 https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/r05_coefficient_rev4.pdf、2024年2月26日取得を利用。 …活動量は、後掲表4-8の使用済PVパネル年間取扱量に占める樹脂重量×廃プラスチックの総発熱量29.3(MJ/kg)×ごみ発電効率20(%)で求めた。 以下文献よりPVモジュール1枚当たりの樹脂重量(充填剤・周辺シール・バックカバー)2.8kg/枚、モジュール1枚当たりの出力は186Wである。また使用済PVパネル年間取扱量は13953kW(75019枚)/年となる。2.8kg/枚*75019枚=約210053kg/年の樹脂が必要とされる。 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」P94、https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_028.pdf、2024年2月26日取得 廃棄物資源循環学会誌、Vol. 26、No. 2、pp. 114-119、2015、「高効率発電のための廃棄物処理技術の動向(宇野晋)」P114、https://www.jstage.jst.go.jp/article/mcwmr/26/2/26_114/_pdf/-char/ja、2024年2月26日取得	

# 表 4-7 ベースラインの LCA 評価に用いた CO2 排出原単位と活動量

②ベース <sup>-</sup>	ニノン	CO2 排出	原単位	活動量		データの出典・根拠
	J1 J	数值	単位	数值	単位	「 ナータの古典・依拠 
エギ源	原材料生産	0.63325 5	t-CO 2/kW -PVパ ネル	9,349	kW-P Vパネ ル/年	「原料調達」 …「原料輸送」「PV パネル製造」「PV パネル輸送」「設置・使用」まで原単位に含む。「PV モジュール素材」「PV モジュール製造副資材投入量」「PV モジュール製造」「PV モジュール製造」「PV モジュール製造」「PV モジュール製造」「PV モジュール製造」「PV モジュール製造」「PV モジュール製造」「PV モジュール輸送(国内)」の CO2 排出量の和を実定格出力で除した。 電力中央研究所報告「日本における発電技術のライフサイクル CO2 排出量総合評価 総合報告 Y-6 別冊付録」 https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDownload?reportNoUkCode=Y06&ten puTypeCode=40&seqNo=2&reportId=8713、2024年2月26日取得、P50-53、付表5.7.2分析結果詳細(事業用1MW 太陽光発電/日本製 PV モジュール使用) なお、ベースラインにおける「2 周目」の排出原単位に関しては、PV パネルの高効率化傾向を踏まえて、リユース PV パネルの比較対象となる新品パネルは資源使用量が4割減と仮定し、排出原単位も「1 周目」の4割減とした。 出力重量比率のトレンドは以下 P27より、「20年(2000年→2020年)経つと、6割程度(4割程度減)になる」と読み取った、END-OF-LIFE MANAGEMENT(IRENA)、P27、Figure 4 Exponential curve fit of projection of PV panel weight-to-power ratio (t/MW)、https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf、2024年2月26日取得  …活動量は、後掲表4-8における使用済 PV パネル年間取扱量のうち、「リユースできた PV パネルだけを対象」にしている。(※) … (※)以下文献より、排出された PV パネルのうち、67%がリユース・33%がリサイクルされるとした。環境省、令和3年度使用済太陽電池モジュールのリサイクル等の推進に係る調査業務報告書(令和4年3月株式会社 エックス都市研究所)、P10、「図2.1-2 太陽電池モジュールのリユース・リサイクル量推移」の2020年度におけるリサイクル・リユース数量、https://www.env.go.jp/content/900535815.pdf、2024年2月26日取得
		0.057	t-CO 2/t-P V パネ ル	1,200	t-PV パネル <i>/</i> 年	「銅鉱石採掘・選鉱」 …「輸入」も原単位に含む。 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・リユースまたびは発金属の同収に係る技術実証)季託業務、成果報告書(令和4年3月イー・アンド・イー・ソリューションで共

	0.053	t-CO 2/t-P V パネ ル	1,200	t-PV パネル <i>/</i> 年	「銀鉱石採掘・選鉱」 …「輸入」も原単位に含む。 令和3年度脱炭素型金属リサイクルシステムの早期社会実装化に向けた実証事業(太陽光パネルの収集・リユースおよび非鉄金属の回収に係る技術実証)委託業務 成果報告書(令和4年3月イー・アンド・イー ソリューションズ株式会社)、「表 IV-4 本業務による CO2 排出量の削減効果」「事業実施前 B の 4(銀精鉱の採掘~輸送)」、P6 2、https://www.env.go.jp/content/900535427.pdf、2024年2月26日取得 …活動量は、後掲表 4-8の使用済 PV パネル年間取扱量と、出力(kW)当たりの PV 重量(kg)を乗じた。
	2.1	t-CO 2/t-ガ ラス	750	t-ガラ ス/年	「ガラス原料採掘・精製」 …「輸送」「原料溶解」も含む。 …原単位については、「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「2.12kg-CO2/kg」を用いた。 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(平成 29 年 3 月 1 日リサイクルテック・ジャパン株式会社)、P54、https://www.env.go.jp/content/900532496.pdf、2024年2月26日取得 …活動量は、後掲表 4-8 の使用済 PV パネル年間取扱量と、出力(kW)当たりのガラス重量(kg)を乗じた。
流通	0.00075	t-CO 2/枚	27,907	枚-PV パネル /年	「使用済 PV パネル輸送」 …1 周目の流通工程について 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 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、P15「トラックのトンキロ当 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)」、https://www.enecho.meti.go.jp/cate gory/saving_and_new/saving/media/data/shoene_tebiki_02.pdf、2024 年 2 月 26 日取得 環境省「燃料種別発熱量及び二酸化炭素排出係数一覧」の「軽油排出係数 2.58tCO2/kL」、P2、 https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/data/ws_1/betsu_4.pdf、2024 年 2 月 26 日取得 …活動量は、後掲表 4-8 の使用済 PV パネル年間取扱量を 1 枚当たり出力で除して求めた。

9	
$\infty$	

			0.00045	t-CO 2/枚	18,698	枚-PV パネル /年	<ul> <li>「使用済 PV パネル輸送」</li> <li>…2 周目の流通工程について</li> <li>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</li> <li>経済産業省資源エネルギー庁、省エネ法の手引き(荷主編)ー令和 4 年度改正対応へ、P15「トラックのトンキロ当たりの燃料使用量(代表的な最大積載量と積載率による一覧表)」、https://www.enecho.meti.og.jp/category/saving_and_new/saving/media/data/shoene_tebiki_02.pdf、2024 年 2 月 26 日取得環境省「燃料種別発熱量及び二酸化炭素排出係数一覧」の「軽油排出係数 2.58tCO2/kL」、P2、https://www.env.go.jp/policy/local keikaku/data/ws.1/betsu_4.pdf、2024 年 2 月 26 日取得なお、ベースラインにおける「2 周目」の排出原単位に関しては、PV パネルの高効率化傾向を踏まえて、リユース PV パネルの比較対象となる新品パネルは資源使用量が 4 割減と仮定し、排出原単位も「1 周目」の 4 割減とした。出力重量比率のトレンドは以下 P27 より、「20 年(2000 年→2020 年)経つと、6 割程度(4 割程度減)になる」と読み取った。</li> <li>END-OF-LIFE MANAGEMENT(IRENA)、P27、Figure 4 Exponential curve fit of projection of PV panel weight-to-power ratio (t/MW)、https://www.irena.org/-/media/Files/IREN A/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf、2024年2月26日取得</li> <li>…活動量は、後掲表 4-8 の使用済 PV パネル年間取扱量を 1 枚当たり出力で除して求めた。本項目は「リユースできた PV パネルだけを対象」にしている。(※)</li> <li>(※)以下文献より、排出された PV パネルのうち、67%がリユース・33%がリサイクルされるとした。環境省、令和3年度使用済太陽電池モジュールのリサイクル等の推進に係る調査業務報告書(令和4年3月株式会社エックス都市研究所)、P10、「図 2.1-2 太陽電池モジュールのリユース・リサイクル量推移」の 2020 年度におけるリサイクル・リユース数量、https://www.env.go.jp/content/900535815.pdf、2024年2月26日取得</li> </ul>
	リサ		0.0010	t-CO 2/t-P V パネ ル	1,200	t-PV パネル <i>/</i> 年	「アルミニウムフレーム取り外し」 …PVCJ が認定した廃棄物処理業者 5 社(本年度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排出原単位を用いた。 …活動量は、後掲表 4-8 の使用済 PV パネル年間取扱量と、出力(kW)当たりの PV パネル重量(kg)を乗じて求めた。
エネルギー起原	イクル廃棄	廃棄	0.021	t-CO 2/t-P Vパネ ルケ ルミニ ウムフ レーム 除()	1,013	t-PV パネル (アルミ ニウム フレー ム除() /年	「破砕・破砕残渣輸送(うち①「破砕」)」 …1 周目の廃棄・埋立工程について。本項目「破砕・破砕残渣輸送」の原単位は①、後述した②の和である。 …①「破砕」0.021kg-CO2/kg=0.021t-CO2/t。 日本建築学会環境系論文集、第82巻、第741号、949-955、「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(湯淺他)」P952、表7「タイル製造時のプロセス別CO2排出量(工程A)」の「破砕」より、https://www.jstage.jst.go.jp/article/aije/82/741/82_949/_pdf、2024年2月26日取得 …活動量は、後掲表4-8の使用済PVパネル年間取扱量と、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。

О.	.0001	t-CO 2/t-P Vパネ ル	1,200	t-PV パネル <i>/</i> 年	「破砕・破砕残渣輸送(うち②「破砕後残渣輸送」)」 …1 周目の廃棄・埋立工程について。本項目「破砕・破砕残渣輸送」の原単位は前述した①、②の和である。 …②「破砕後残渣輸送」0.0001t-CO2/t、 令和3年度脱炭素型金属リサイクルシステムの早期社会実装化に向けた実証事業(太陽光パネルの収集・リユースおよび非鉄金属の回収に係る技術実証)委託業務 成果報告書(令和4年3月イー・アンド・イー ソリューションズ株式会社)、「表 IV-4 本業務による CO2 排出量の削減効果」「事業実施前 A の 2(輸送(埋立処分場))」、P62、https://www.env.go.jp/content/900535427.pdf、2024年2月26日取得(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。) …活動量は、後掲表 4-8の使用済 PV パネル年間取扱量と、出力(kW)当たりの PV パネル重量(kg)を乗じて求めた。
	0.038	t-CO 2/t-Pネ ルルウム 上 上 上 上 よ く	803	t-PV パルシ ニウレー ス人 様く)/ 年	「残渣埋立」 …1 周目の廃棄・埋立工程について …0.038kg-CO2/kg=0.038t-CO2/t とする。 日本建築学会環境系論文集、第82巻、第741号、949-955、「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(湯淺他)」P952、表9「タイル製造時のプロセス別CO2排出量(工程C)」の「管理型埋立」より、https://www.jstage.jst.go.jp/article/aije/82/741/82_949/_pdf、2024年2月26日取得 …活動量は、後掲表4-8の使用済PVパネル年間取扱量と、出力(kW)当たりのPVパネル重量(kg)(アルミニウムフレーム,樹脂重量を除く)を乗じて求めた。
	0.021	t-CO 2/t-P V ル (ミン レー () ()	608	t-PV パアルシ ニフレ除( 年	「破砕・破砕残渣輸送(うち①「破砕」)」 …2 周目の廃棄・埋立工程について。本項目「破砕・破砕残渣輸送」の原単位は①、後述した②の和である。 …①「破砕」0.021kg-CO2/kg=0.021t-CO2/t。 日本建築学会環境系論文集、第82巻、第741号、949-955、「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(湯淺他)」P952、表7「タイル製造時のプロセス別 CO2 排出量(工程 A)」の「破砕」より、ht tps://www.jstage.jst.go.jp/article/aije/82/741/82_949/_pdf、2024年2月26日取得なお、ベースラインにおける「2周目」の排出原単位に関しては、PVパネルの高効率化傾向を踏まえて、リユース PVパネルの比較対象となる新品パネルは資源使用量が4割減と仮定し、排出原単位も「1周目」の4割減とした。出力重量比率のトレンドは以下P27より、「20年(2000年→2020年)経つと、6割程度(4割程度減)になる」と読み取った、END-OF-LIFE MANAGEMENT(IRENA)、P27、Figure 4 Exponential curve fit of projection of PV panel weight-to-power ratio (t/MW)、https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf、2024年2月26日取得…活動量は、後掲表4-8の使用済PVパネル年間取扱量と、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。

_	
_	)
$\subset$	

	0.00010	t-CO 2/t-P Vパネ ル	720	t-PV パネル <i>/</i> 年	「破砕・破砕残渣輸送(うち②「破砕後残渣輸送」)」 …2 周目の廃棄・埋立工程について。本項目「破砕・破砕残渣輸送」の原単位は前述した①、②の和である。 …②「破砕後残渣輸送」0.0001t-CO2/t、 令和3年度脱炭素型金属リサイクルシステムの早期社会実装化に向けた実証事業(太陽光パネルの収集・リユースおよび非鉄金属の回収に係る技術実証)委託業務 成果報告書(令和4年3月イー・アンド・イー ソリューションズ株式会社)、「表 IV-4 本業務による CO2 排出量の削減効果」「事業実施前 A の 2(輸送(埋立処分場))」、P62、https://www.env.go.jp/content/900535427.pdf、2024年2月26日取得(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。)なお、ベースラインにおける「2 周目」の排出原単位に関しては、PVパネルの高効率化傾向を踏まえて、リユース PVパネルの比較対象となる新品パネルは資源使用量が4割減と仮定し、排出原単位も「1 周目」の4割減とした。出力重量比率のトレンドは以下P27より、「20年(2000年→2020年)経つと、6割程度(4割程度減)になる」と読み取った、END-OF-LIFE MANAGEMENT(IRENA)、P27、Figure 4 Exponential curve fit of projection of PV panel weight-to-power ratio (t/MW)、https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf、2024年2月26日取得・・・活動量は、後掲表4-8の使用済 PVパネル年間取扱量と、出力(kW)当たりの PVパネル重量(kg)を乗じて求めた
	0.038	t-COP ルルウレ樹く しかい カーカー 1 とり 1 と	482	t-PV パクニフム 除年 トネルミム 一脂 //	<ul> <li>「残渣埋立」</li> <li>…2 周目の廃棄・埋立工程について</li> <li>…0.038kg-CO2/kg=0.038t-CO2/t とする。</li> <li>日本建築学会環境系論文集、第 82 巻、第 741 号、949-955、「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(湯淺他)」P952、表 9「タイル製造時のプロセス別 CO2 排出量(工程 C)」の「管理型埋立」より、https://www.jstage.jst.go.jp/article/aije/82/741/82_949/_pdf、2024 年 2 月 26 日取得なお、ベースラインにおける「2 周目」の排出原単位に関しては、PV パネルの高効率化傾向を踏まえて、リユース PV パネルの比較対象となる新品パネルは資源使用量が 4 割減と仮定し、排出原単位も「1 周目」の 4 割減とした。出力重量比率のトレンドは以下 P27 より、「20 年(2000 年→2020 年)経つと、6 割程度(4 割程度減)になる」と読み取った、END-OF-LIFE MANAGEMENT(IRENA)、P27、Figure 4 Exponential curve fit of projection of PV panel weight-to-power ratio (t/MW)、https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2 016.pdf、2024 年 2 月 26 日取得・・・活動量は、後掲表 4-8 の使用済 PV パネル年間取扱量と、出力(kW)当たりの PV パネル重量(kg)(アルミニウムフレーム、樹脂重量を除く)を乗じた。</li> </ul>

_	_
	_
$^{\prime}$	`
•	_
_	_

			2.5	t-CO 2/t-樹 脂(EV A)	210	t-樹脂/ 年	「樹脂の単純焼却」 …原単位について。以下文献より 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・バックカバーがあるが、ここでは簡略のためすべて EVA と仮定し、「EVA の分子構造から CO2 排出量推計」した。EVA の VA 比率を以下文献より 30%とした場合、「(C2H4)7(C4H6O2)3」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 CO2 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-CO2/kg(t-CO2/t に変換)とした。 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」P4、https://www.jstage.jst.go.jp/article/jiep/17/1/17_2/pdf/-char/ja、2024 年 2 月 26 日取得・・・・活動量について。以下文献より、PV モジュール 1 枚当たりの樹脂重量 2.8kg/枚、モジュール 1 枚当たりの出力は 186W である。また使用済 PV パネル年間取扱量は後掲表 4-8 のとおり 13953kW であるため、年間取扱数にして、75019 枚/年となる。2.8kg/枚*75019 枚=約 210053kg/年の樹脂が必要とされる。
非エネルギー起源	リサイクル廃棄	廃棄	1.5	t-CO 2/t-樹 脂(EV A)	210	t-樹脂/ 年	「樹脂の単純焼却」 …2 周目の廃棄・埋立工程について …原単位について。以下文献より 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 バーがあるが、ここでは簡略のためすべて EVA と仮定し、「EVA の分子構造から CO2 排出量推計」した。EVA の VA 比率を以下文献より 30%とした場合、「(C2H4) 7(C4H6O2) 3」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 CO2 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-CO2/kg(t-CO2/t に変換)とし た。 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」P4、h ttps://www.jstage.jst.go.jp/article/jiep/17/1/17_2/pdf/-char/ja、2024 年 2 月 26 日取得 なお、ベースラインにおける「2 周目」の排出原単位に関しては、PV パネルの高効率化傾向を踏まえて、リユース PV パネルの比較対象となる新品パネルは資源使用量が 4 割減と仮定し、排出原単位も「1 周目」の 4 割減とし た。出力重量比率のトレンドは以下 P27 より、「20 年(2000 年→2020 年)経つと、6 割程度(4 割程度減)に なる」と読み取った、END-OF-LIFE MANAGEMENT(IRENA)、P27、Figure 4 Exponential curve f it of projection of PV panel weight-to-power ratio (t/MW)、https://www.irena.org/-/m edia/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels 2016.pdf、2024 年 2 月 26 日取得 …活動量について。以下文献より、PV モジュール 1 枚当たりの樹脂重量 2.8kg/枚、モジュール 1 枚当たりの出 力は 186W である。また使用済 PV パネル年間取扱量は後掲表 4-8 のとおり 13953kW であるため、年間取 扱枚数にして、75019 枚/年となる。2.8kg/枚*75019 枚 = 約 210053kg/年の樹脂が必要とされる。 電力中央研究所報告「日本における発電技術のライフサイクル CO2 排出量総合評価 総合報告 Y-6 別冊付録」P 50「付表 5.7.2 分析結果詳細(事業用 1MW 太陽光発電/日本製 PV モジュール使用)」より、 https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDownload?reportNoUkCode=Y06&ten puTypeCode=40&seqNo=2&reportId=8713、2024 年 2 月 26 日取得

表 4-8 リユース・リサイクル促進ケース・ベースラインの LCA 評価に用いた、CO2 排出原単位・活動量のバックデータ

項目	数値	単位	出典
使用済 PV パネルの年 間取扱量	13,953	kW/年	表 4-3 で算定した年間取扱量より
使用済 PV パネルの年 間取扱量(2030 年)	139,535	kW/年	表 4-3 で算定した年間取扱量より
国内電源の CO2 排出 係数	0.441	kg- CO2/kW h	環境省電気事業者別排出係数令和 3 年度実績(代替値)P18 https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/r05_coefficient_rev4.pdf、2024 年 2 月 26 日取得
1枚当たり出力	0.5	kW/枚	仮定
PV 重量	86	kg/kW	平成 19~20 年度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 P16、多結晶 Si 太陽光発電システム
ガラス	54	kg/kW	平成 19~20 年度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 P16、多結晶 Si 太陽光発電システム
アルミニウム	13	kg/kW	平成 19~20 年度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 P16、多結晶 Si 太陽光発電システム
銅	2.8	kg/kW	環境省「太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン」(平成 30 年)P92、多結晶、国内、2017 <sup>-</sup> 、2 サンプルの平均値の合計 https://www.env.go.jp/press/files/jp/110514.pdf、2024 年 2 月 26 日取得
銀	0.05	kg/kW	環境省「太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン」(平成 30 年)P92、多結晶、国内、2017 <sup>-</sup> 、2 サンプルの平均値の合計 https://www.env.go.jp/press/files/jp/110514.pdf、2024 年 2 月 26 日取得
樹脂	15	kg/kW	平成 19~20 年度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 P16、多結晶 Si 太陽光発電システム
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。

## 4.3 次年度以降の検討に向けた参考情報

4.2.2 における評価結果を踏まえて、次年度以降は、実証時点終了時のリユース・リサイクル量の想定値見直し(本年度は、直近の PVCJ 処理実績の 10 倍と仮定)、回収した PV パネルのリユース・リサイクルの比率、使用するリサイクル技術の想定等についても、実態に応じて改訂していく余地があると考えている。

そのうち、「使用するリサイクル技術の想定」については、既往文献(Heiho et al. (2023)<sup>32</sup>)から以下の知見が得られた。

- 以下に挙げる PV パネルの高度な物理的分離技術に関する、プロスペクティブ LCA33を実施。
  - 引張力を利用し PV パネルの短辺・長辺より自動的にアルミニウムフレームを分離する技術 (Matsumoto, 2020)<sup>34</sup>
  - 偏心撹拌機を用い2段階の精緻な研削を行うことでシリコン系 PV パネルにおけるガラスを選択的に破砕し樹脂から分離する技術 (Tokoro et al., 2021)35
  - カバーガラスと EVA を分離のためのホットナイフ法(Matsumoto, 2020)36
  - PV パネルのセル中の Cuと Ag の回収を行うことを目的とする高電圧パルス放電法 (Tokoro et al., 2020; Lim et al., 2021)<sup>37</sup>
- PV パネルの製造〜従来の処理システムでの処理をした場合、PV パネルの製造〜代替の処理システムを組み合わせて処理をした場合(複数パターン)について、それぞれ PV パネル 1 枚の GHG 排出量を比較。
- その結果、前者が 198~254 kg-CO2eq/panel、後者が 185~198 kg-CO2eq/panel で

Resources, Conservation and Recycling, Volume 192, 2023, 106922, ISSN 0921-3449, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106922.、2024年2月26日取得

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup> Aya Heiho, Izuru Suwa, Yi Dou, Soowon Lim, Takao Namihira, Taketoshi Koita, Kazuhiro Mochidzuki, Shinsuke Murakami, Ichiro Daigo, Chiharu Tokoro, Yasunori Kikuchi, Prospective life cycle assessment of recycling systems for spent photovoltaic panels by combined application of physical separation technologies,

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup> プロスペクティブ LCA とは、小規模で実施した開発段階の技術に関し、今後大規模に実施した場合を仮定した LCA を行うこと。Journal of Life Cycle Assessment, Japan, Vol.17 No.3 July 2021,「コ ラ ム(Column)」 p.200 より、https://www.jstage.jst.go.jp/article/lca/17/3/17\_200/\_pdf/-char/ja、2024 年 2 月 16 日 取得

<sup>&</sup>lt;sup>34</sup> Matsumoto, K., 2020. Automated solar panel disassembly line using heated blade separation method. Ind. Mach. 840, 25-28. 、2024 年 2 月 26 日取得

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup> Tokoro, C., Nishi, M., Tsunazawa, Y., 2021. Selective grinding of glass to remove resin for silicon-based photovoltaic panel recycling. Adv. Powder Technol. 32, 841-849. https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.01.030., 2024年2月26日取得

 $<sup>^{36}</sup>$  Matsumoto, K., 2020. Automated solar panel disassembly line using heated blade separation method. Ind. Mach. 840, 25–28、2024 年 2 月 26 日取得

<sup>&</sup>lt;sup>37</sup> Tokoro, C., Lim, S., Sawamura, Y., Kondo, M., Mochidzuki, K., Koita, T., Namihira, T., Kikuchi, Y., 2020. Copper/silver recovery from photovoltaic panel sheet by electrical dismantling method. Int. J. Autom. Technol. 14 (6), 966-974. https://doi.org/10.20965/jjat.2020.p096.、2024年2月26日取得

Lim, S., Imaizumi, Y., Mochidzuki, K., Koita, T., Namihira, T., Tokoro, C., 2021. Recovery of silver from waste crystalline silicon photovoltaic cells by wire explosion. IEEE Trans. Plasma Sci. 49 (9), 2857-2865. https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3106307.、2024 年 2 月 26 日取得

あり、製造〜処理に係る GHG 排出量は代替のシステムを組み合わせた場合の方が小さい結果となった。

以上のような、本年度事業で想定したものより高度な物理的分離技術を使用する場合、物理的分離工程に係る排出原単位や、物理的分離の結果回収される資源の質や量が変化し、CO2 排出量削減効果の評価結果も変化し得ることが示唆された。

また、本年度は PV パネル本体のみに着目した試算を行ったが、次年度以降はインバーター、コントローラ等の周辺設備を評価対象に含めることも検討していく。

# 5. EUの DPP に関する基礎調査の実施

2. 及び 3. において実施する検討に資する基礎情報を得るため、昨今の DPP に関する国際議論動 向や、先行して導入議論がされ始めている品目(電池、衣類、建設材料)における具体的な検討状況に ついて、文献調査により情報整理を行った。また、国内外における PV パネルのリユース・リサイクル実施にあたっての課題について、文献調査により情報整理を行った。なお、PV パネルのリサイクルについては、特に 2.1.3 で分析対象としたガラス、樹脂類、及びセル上の電極などに着目して調査した。

また、諸外国における PV パネルのリユース・リサイクルの実態を把握し、PV パネルにおいて情報伝達すべき項目及び情報伝達のあり方についてステークホルダーとの意見交換を行うため、海外訪問調査を実施した。

## 5.1 基礎調査の構成

基礎調査は、2. 及び 3. において実施する検討に資する基礎情報を得るものとして実施した。本調査の全体構成と、基礎調査における調査結果が関連する項目のイメージは図 5-1 のとおり整理される。 以降では、基礎調査の内容を「5.2 DPP に関する文献調査」、「5.3 PV パネルのリユース・リサイクルに関する文献調査」、「5.4 海外訪問調査」の 3 項目に分割して実施結果をとりまとめた。

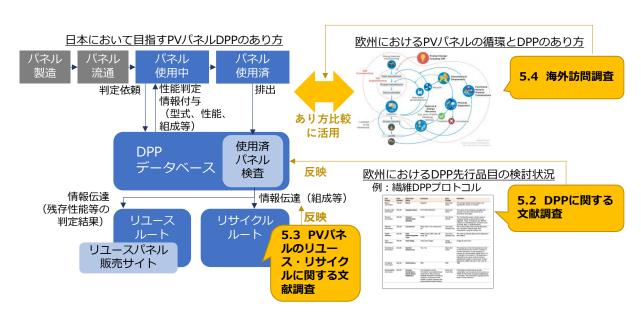


図 5-1 DPP に関する基礎調査の実施イメージ

出所:図「欧州における PV パネルの循環と DPP のあり方」:Norgren, A., Carpenter, A. & Heath, G. Design for Recycling Principles Applicable to Selected Clean Energy Technologies: Crystalline-Silicon Photovoltaic Modules, Electric Vehicle Batteries, and Wind Turbine Blades. J. Sustain. Metall. 6, 761-774 (2020). 図「欧州における DPP 先行品目の検討状況」:TRACE4VALUE, "Trace4Value Digital Product Passport in Textile Data Protocol", <a href="https://trace4value.se/content/uploads/2023/09/Trace4Value-Digital-Product-Passport-in-Textile-Data-Protocol-2023-09-06.pdf">https://trace4value.se/content/uploads/2023/09/Trace4Value-Digital-Product-Passport-in-Textile-Data-Protocol-2023-09-06.pdf</a>, 2023 年 12 月 1 日取得

### 5.2 EUの DPP に関する文献調査

先行して DPP 導入議論がされ始めている品目である蓄電池、衣類、建設材料について、実装状況や 伝達項目案等を調査した。また、上述の 3 品目と比較すると DPP に関する検討は始まったばかりであ るものの、PV パネルの DPP において情報伝達すべき項目の検討にあたり重要な参考情報となり得る ことから、PV パネルの DPP 伝達項目案に関する情報も整理を行った。

## 5.2.1 蓄電池

#### (1) 欧州電池規則の概要

2023 年 8 月 17 日、欧州において電池規則が施行された。これは 2006 年に採択された電池指令 に置き換わるものであり、加盟国による国内法化を必要とする「指令」から、すべての加盟国に直接適用 される「規則」に変更されている。

携帯型、電気自動車用、産業用、SLI(車両や機械のスターター、照明、イグニッション)用、軽輸送手段(二輪・三輪・超小型四輪車)用を含む、すべての電池及び電池内蔵製品を対象とする。原材料調達から設計・生産、再利用、リサイクルに至るライフサイクル全体を規定することで、循環経済を促進することを目的の一つとしている。そのため、廃棄段階における EPR や材料回収等の要件を定め、廃棄物管理の観点から旧指令を補完するものとなっている。

EU 内で電池を上市または使用するための要件として以下を定め、その遵守を製造者に課している。

- 持続可能性要件:カーボンフットプリント(第7条)、再生材の使用(第8条)
- 安全性要件:性能・耐久性の確保(第10条)
- ラベル・情報要件:ラベルと標示(第13条)、劣化状態と予想寿命に関する情報(第14条)

電池を上市または使用する経済事業者に対し、デューデリジェンス(責任ある調達)義務を課している。 電気自動車用電池、2kWh 以上の産業用電池、軽輸送手段用電池にはバッテリーバスポートが付与され、個々の電池に標示されるQRコードを介してアクセスし、一般公開情報(材料組成、カーボンフットプリント等)や規定された関係者のみに公開される情報(分解手順、安全対策、性能・耐久性情報、ステータス情報等)を利用することができる。

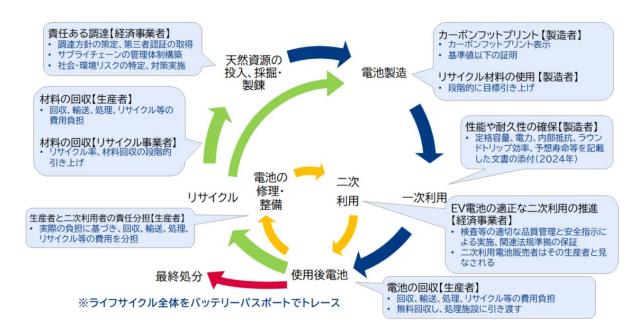


図 5-2 電池サプライチェーンの各段階における電池規則の要件

出所: 令和4年度環境省請負事業「令和4年度リサイクルシステム統合強化による循環資源利用高度化促進業務 自動車リサイクル制度の効率化に関する調査・検討等編JP.3 図 1-1、https://www.env.go.jp/content/000155603.pdf、2024年2月16日取得

## (2) バッテリーパスポートの概要

#### 1) バッテリーパスポートとは

欧州委員会の電池規則で規定された、電池の製品情報を電磁的に登録・公開する仕組みである。電 池バリューチェーンに関わる事業者が個々の電池製品の属性情報を登録し、利用者はオンラインで閲覧 可能となる。

システム利用者に公開される情報には、原材料の構成、CFP、調達に関する社会的責任情報、リサイクル原料の含有量、サイクル回数で表される寿命等が含まれる。

リサイクル業者やリサイクル材利用者等に限定公開される情報の中には、処理作業用の分解手順や安全対策に関する情報の他、正極・負極・電解液の材料を含む詳細構成等も含まれる。これら情報はリサイクルのために必要な情報ではあるが、材料配合等は極めて重要な技術情報であり懸念を抱くステークホルダーも存在する。

EU 加盟国では制度導入に向けた取組が進む見込みであり、ドイツ国内ではバッテリーパスポートの制度設計のイニシアチブを握るため、新しいコンソーシアムが 2022 年 4 月 25 日に立ち上げられた。

## 2) 欧州電池規則による規定内容

欧州電池規則による規定内容38は下記のとおりである。

-

<sup>&</sup>lt;sup>38</sup> 電池規則 https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542、2024年2月16日取得

#### ● 導入時期・アクセス方法

- 2027 年 2 月 18 日以降、上市または使用開始する軽輸送手段(二輪・三輪・超小型四輪車) 用電池、2kWh 以上の産業用電池、EV 用電池に、バッテリーパスポートが必要になる(第 77 条「バッテリーパスポート」第 1 項)
- 2027 年 2 月 18 日以降、すべての電池に QR コードが付与される。上記電池に付与される QR コードは、バッテリーパスポートへのアクセスを提供する(第 13 条「電池のラベルと標示」 第 6 項 a)
- 電池を上市する経済事業者またはその代行者の義務【データの保存】
  - バッテリーパスポートにデータを保存する(第 78 条「バッテリーパスポートの技術設計と運用」 c)
  - バッテリーパスポートの情報が正確、完全、最新であることを保証する(第77条第4項)
- 義務の移管とバッテリーパスポートの変更【ステータス変更時】
  - 電池が二次利用のための修理・整備(再利用の準備、転用の準備、転用、再製造)の対象となる場合、第77条第4項に規定する経済事業者の義務は、当該電池を上市または使用開始する経済事業者に移管される。当該電池には、元の電池のバッテリーパスポートにリンクする新しいバッテリーパスポートが付与される(第77条第7項)
  - 電池が「廃棄物」となる場合、第77条第4項に規定する経済事業者の義務は、生産者または 委任を受けた生産者責任組織、廃棄物管理者に移管される(第77条第7項)
  - 電池がリサイクルされた後、バッテリーパスポートは消滅する(第77条第8項)
- 正当な利害関係者がアクセスできる情報【データの利用】(第77条第2項)
  - バッテリーパスポートには、モデル関連情報と個々の電池に関する情報が含まれており、一般人、関連機関、正当な利益を持つ自然人または法人(正当な利害関係者)の三者に対し、それぞれアクセス可能な情報が規定されている(次頁参照)
  - 正当な利害関係者は、次のいずれかの目的がある場合のみ、規定された情報にアクセスし利用することができる
    - 修理業者、再製造業者、再利用業者、リサイクル業者がその経済活動を実施するために、 安全対策やモデルの詳細な構成を含む電池の分解情報が必要な場合
    - 電池購入者またはその代行者が、特定卸供給事業者またはエネルギー市場参加者が電池 を利用できるようにするために、個々の電池に関する情報が必要な場合
- 欧州委員会の役割【正当な利害関係者の特定】(第77条第9項)
  - 欧州委員会は、2026 年 8 月 18 日までに、「正当な利害関係者」と見なされる者を特定し、その者が規定された情報のなかでアクセスできる範囲、及び情報をダウンロード、共有、公開、再利用できる範囲を規定する実施法令を採択する

- 上記を決定する基準は、以下のとおりである
  - 電池のステータス、残存価値、使用能力を評価するために情報を入手する必要性
  - 二次利用のための修理・整備、リサイクルまたはその選択のために情報を入手する必要性
  - 商業上の機密情報へのアクセスと利用が必要最小限に制限されていることを保証する必要性

# 3) バッテリーパスポートに保存される情報

バッテリーパスポートに保存される情報は対象者により開示範囲が異なる。公開範囲別の保存情報 は表 5-1 のとおりである。

#### 表 5-1 バッテリーパスポートに保存される情報

### 一般に公開されるモデル関連情報 (附属書XⅢ第1項)

- a. 附属書VIパート A の項目(製造者を特定する情報、電池分類と電池を特定する情報、製造場所、製造日、重量、容量、化学的性質、水銀・カドミウム・鉛以外の有害物質の有無、使用可能な消火剤、重量比 0.1%以上の重要鉱物の有無)
- b. 材料組成(化学的性質、水銀・カドミウム・鉛以外の有害物質の有無、重要鉱物の有無を含む)
- c. カーボンフットプリント情報
- d. 調達方針報告書に示された責任ある調達に関する情報
- e. 再生材使用量に関する情報
- f. 再生可能な材料の含有率
- g. 定格容量(Ah)
- h. 最小·公称·最大電圧(該当する場合は温度範囲)
- i. 「オリジナル」の電力(W)と限界値(該当する場合は温度範囲)
- j. サイクル数で表した予想寿命と使用される参考試験
- k. 電池切れまでの容量閾値(EV 用電池のみ)
- l. 未使用時に耐えられる温度範囲(参考試験)
- m. 商業保証の適用期間
- n. 初期とサイクル寿命 50%の充放電エネルギー効率
- o. セル及びパックの内部抵抗
- p. サイクル寿命試験における C レート(充放電のスピード)
- q. 標示要件
- r. EU 適合宣言
- s. 「廃棄物」の防止・管理に関する情報

#### 通知機関、市場監視当局、欧州委員会のみアクセス可能なモデル関連情報 (附属書XⅢ第3項)

a. 本規則に規定された要件または本規則に従い採択された委任法令·実施法令への準拠を証明する試験結果

#### 正当な利害関係者と欧州委員会のみアクセス可能なモデル関連情報 (附属書XⅢ第2項)

- a. 正極、負極、電解液の材料を含む詳細な組成
- b. 構成部品の品番と交換部品供給者の連絡先
- c. 少なくとも以下を含む分解情報
  - ・ セルの位置を示すシステム及びパックの分解図
  - 分解手順
  - ・ 解除する必要のある固定技術の種類と数
  - ・ 分解に必要な工具
  - ・ 部品を損傷する危険性がある場合の警告
  - ・ セル数とレイアウト
- d. 安全対策

## 正当な利害関係者のみアクセス可能な個々の電池に関する情報・データ

#### (附属書XⅢ第4項)

- a. 上市時とステータス変更時の性能・耐久性パラメータ値(第10条「性能・耐久性要件」及び附属書IVパートAに規定)
  - ・ 定格容量(Ah)とその減少率(%)
  - · 電力(W)とその減少率(%)
  - 内部抵抗(α)とその増加率(%)
  - ・ 充放電エネルギー効率とその減少率(%)
  - ・ 設計時の基準条件下での予想寿命(サイクル、年数)
- b. 劣化状態のパラメータ値(第 14 条「劣化状態と予想寿命に関する情報」及び附属書VIIに規定)
  - ・ EV 用電池の場合は、認定エネルギーの状態(SOCE、state of certified energy) ※認証試験に基づく使用可能エネルギーの状態を%で表す
- c. 「オリジナル」「転用」「再利用」「再製造」「廃棄物」のステータス情報
- d. 使用状況に関する情報・データ(充放電サイクル数、故障等の負の事象、温度等の動作環境や充電状態に関する 定期的な記録等)

出所:電池規則 https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542、2024 年 2 月 16 日取得

#### 4) バッテリーパスポートの仕様

バッテリーパスポートの仕様は下記のとおり定められている。

- 電池を上市する経済事業者の固有の識別子にリンクする QRコードを通じてアクセスできる(第77条第3項)
- バッテリーパスポートのすべての情報は、オープンスタンダードに基づき、相互運用可能な形式で、 特定ベンダーの技術に依存せずオープンで相互運用可能なデータ交換ネットワークを通じた転送 が可能であり、機械読み取り、構造化、検索が可能とする(第77条第5項)
- エンドツーエンド通信とデータ転送に関する技術的・意味論的・組織的側面に関し、エコデザイン規則により規定される他の DPP と相互運用可能とする(第78条a)
- 消費者、経済事業者、その他の関係者は、バッテリーパスポートに無料でアクセスできる(第 78 条 b)
- バッテリーパスポートは、経済事業者が消滅または EU における活動停止後も引き続き利用可能と する(第78条e)

## 5.2.2 衣類

#### (1) 衣類の循環に関する欧州の法令等

#### 1) 持続可能な製品のためのエコデザイン規則案

持続可能な製品のためのエコデザイン規則案は 2022 年 3 月、欧州委員会が現行のエコデザイン指令の改正案として公開された。規則に格上げし、適用対象をエネルギー関連製品から食品や医薬品を除くあらゆる製品に拡大した上で、製品ごとのエコデザイン要件を設定するための枠組みを規定する。すべての対象製品に DPP の付与を義務付ける。2023 年 12 月、欧州理事会と欧州議会が暫定合意した。今後、正式な採択を経て施行される予定である。

暫定合意案では、欧州理事会の主張により、企業(零細・小規模を除く)に対する売れ残り等の未使 用繊維製品の廃棄禁止が明文化されている。また、欧州委員会に対し、未使用製品の廃棄禁止を定め る実施法令を採択する権限が与えられており、今後、繊維以外の製品グループにも適用される可能性 がある。

#### 2) エコデザイン要件(欧州委員会委任法令)

製品ごとの具体的なエコデザイン要件は、欧州委員会が別途策定する。2024年第1四半期には、新たにエコデザイン規則の対象となる製品について、環境影響の大きい分野を中心に優先的に委任法令化を進める製品グループを選定し、欧州委員会案として採択する予定である。

2023年12月時点で、三機関は、鉄、鉄鋼、アルミニウム、繊維製品、家具、タイヤ、洗剤、塗料、潤滑剤、化学品を優先的に委任法令化することに合意したとされる<sup>39</sup>。また、欧州委員会は、エネルギー関連

<sup>&</sup>lt;sup>39</sup> JETRO「EU 理事会、エコデザイン規則案で合意、未使用繊維製品の廃棄禁止を目指す」

製品、ICT 製品やその他電子機器についても優先的に取り扱うとしている。

#### 3) 「持続可能な循環型繊維製品戦略」

持続可能な循環型繊維製品戦略は、2022 年 3 月のエコデザイン規則案と同時に、繊維業界向けの政策として、欧州委員会により発表された。2030 年までに域内で販売される繊維製品を、耐久性があり、修理・再利用・リサイクル可能で、再生材を大幅に使用し、危険な物質を含まず、労働者の権利などの社会権や環境に配慮したものにする、との目標を掲げている。表 5-2 に示す 6 つの主要措置について、提言を行っている。

また、具体的施策の策定に向けた議論の場となる官民共同イニシアチブ「Transition Pathway for the Textiles Ecosystem」の立ち上げ、循環型ビジネスモデルへの転換の推奨(ファストファッションを「時代遅れ」と指摘)、繊維廃棄物の域外輸出の制限(2021 年 11 月、欧州委員会が「廃棄物輸送規則改正案」を発表)等についても、提言を行っている。

表 5-2 持続可能な循環型繊維戦略において低減された主要措置

主要措置	関連法令等
1. 繊維製品のエコデザイン要件の導入	・「エコデザイン要件」
2. 売れ残り等の未使用繊維製品の廃棄の抑制	・「持続可能な製品のためのエコデザイン規則案」
3.合成繊維由来のマイクロプラスチック対策	・ エコデザイン規則案等で設計・生産・使用に関す規定を検討
4. <u>情報要件と DPP の導入</u>	・ エコデザイン規則案に基づき DPP を導入し、循環性やその他環境側面に関する情報提供を義務化・ DPP との整合性確保のため、「繊維表示規則」の見直しを実施
5. グリーンクレームの正確性の確保	・ 2022 年 3 月、欧州委員会が「グリーン移行に向け消費者 の権利を強化する指令案」を発表、2023 年 9 月に欧州理 事会と欧州議会が暫定合意
6. EPR の導入と繊維廃棄物の再利用・リサイク ルの促進	・「廃棄物枠組み指令」

出所:欧州委員会「EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles」、https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022DC0141、2023年11月29日取得

#### 4) 「廃棄物枠組み指令」改正案

■ 2023年7月、欧州委員会が改正案を発表。

- 現行指令は廃棄物削減に向け発生予防、再使用、リサイクル、廃棄の順に実施する廃棄物管理原則を設定。繊維廃棄物については、再使用促進のため、2025 年 1 月までに分別回収の開始を加盟国に義務付けているが、取組の遅れが指摘されている。
- 改正案は、繊維と食品の廃棄物削減に特化したもので、繊維廃棄物については「持続可能な 循環型繊維製品戦略」に基づき、再使用・リサイクルによる廃棄削減や循環型製品の開発を後

(https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/05/4daa35d637dd4941.html)、JETRO「欧州委、循環型経済を推進するためのエコデザイン規則案を発表」

(https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/04/a08c5c6a05bd0c33.html)、JETRO「EU、エコデザイン規則案で政治合意、未使用繊維製品の廃棄禁止へ」

(https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/12/ed09003e4ac32460.html)以上、2023 年 12 月 14 日取得

押しすべく、費用負担を伴う EPR を規定。

- 欧州理事会と欧州議会で審議された後、三者による最終合意を経て施行予定。
- 「繊維表示規則」の見直し
  - 2023 年 7 月、欧州委員会は繊維表示規則の改正に向けた見直しを開始。
  - 現行規則によるラベル表示は繊維組成に限定されているが、新繊維開発やリサイクル技術の 進展に伴い、より優れた繊維識別が求められること、デジタルラベルへの対応、「持続可能な循 環型繊維製品戦略」に基づく環境関連情報の充実等の観点から、改正が行われる予定。

出所:JETRO「欧州委、繊維製品に関する拡大生産者責任を提案、域外事業者も対象」、

https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/07/5db3b1c54ede295e.html、2023年11月29日取得、欧州委員会「Review of Regulation (EU) 1007/2011」(https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/textiles-ecosystem/regulation-eu-10072011\_en)、以上、2023年11月29日取得

## (2) 衣類の DPP 実装スケジュール

DPP は、電池規則に基づき、2027 年 2 月 18 日より、電池に導入されることが決まっている。 2023 年 8 月 17 日に施行された電池規則では、DPP の導入時期について、以下規定している。

- 2027 年 2 月 18 日以降、上市または使用開始する軽輸送手段(二輪・三輪・超小型四輪車)用電池、2kWh 以上の産業用電池、EV 用電池に、バッテリーパスポートが必要になる(第 77 条「バッテリーパスポート」第 1 項)
- 2027 年 2 月 18 日以降、すべての電池に QR コードが付与される。上記電池に付与される QR コードは、バッテリーパスポートへのアクセスを提供する(第 13 条「電池のラベルと標示」第 6 項 a)

電池に続き、繊維と電子機器に段階的に導入されるものと考えられる。

EU の資金提供を受けた協働イニシアチブ「CIRPASS」が、電池、繊維、電子機器の 3 分野について、エコデザイン規則案の要件に沿った DPP の試験運用と展開に向け、2022 年 9 月~2024 年 3 月の予定で基盤整備を実施している<sup>40</sup>。

欧州委員会は、CIRPASS が 2023 年 6 月 12 日に開催したウェビナーで、「タイムラインは非常に タイトだが延長することはできない。2027 年初めまでに、最初の DPP が EV 用電池向けに稼働する 予定である。ほぼ同時に、エコデザイン規則案の対象製品の最初の委任法令が施行可能になるはずで ある」と発言している。

#### (3) 衣類の現時点における回収・処理体制

EU27 カ国における 2020 年の一人当たりの平均繊維消費量は衣類 6.0kg、家庭用繊維製品

 $^{40}$  EU[REGULATION (EU) 2023/1542 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC] (https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542), iimpcoll

「Digital Product Passports (DPP): what, why, and how?」(https://impcoll.com/content/what-are-digital-product-passports#heading-19)、欧州委員会「Webinar on the Digital Product Passport initiative 2023\_06\_12\_PPT DPP Webinar on standardisation needs」

(https://ec.europa.eu/docsroom/documents/54874)、以上、2023年12月21日取得

6.1kg、靴 2.7kg である。2018 年には 217 万トンの繊維廃棄物が発生し、うち 53%が非 EU 諸国に輸出され、32%が他の加盟国に輸出されている。

繊維廃棄物は多くの場合、一般廃棄物として焼却・埋立処理されている。分別回収される場合には、 品質と材料組成に応じて分別され、再利用・リサイクルまたは廃棄される。分別回収された繊維廃棄物 のうち、再利用可能な衣類は主に海外市場に販売され、そこで販売されるか廃棄物として埋め立てられ る。再利用できないものは、ダウンサイクル(ウエス、室内装飾品の充填物、断熱材等)か、焼却される場 合が多い。現行の廃棄物枠組み指令は、リサイクル・再利用の前提条件として、2025 年までに繊維製 品を分別回収することを義務付けている。繊維の分離と品質に関する技術的課題により、繊維から繊維 にリサイクルされる比率は 1%程度にとどまっているが、欧州委員会は、2024 年末までに都市繊維廃 棄物の再利用・リサイクルの目標設定を検討する予定である。

### (4) 衣類の現時点における回収・処理体制(域外輸出)

欧州域内では再利用・リサイクルの能力が限られるため、回収された繊維廃棄物の大部分は域外に 輸出されており、その行方は極めて不確実である。2019 年の繊維廃棄物の輸出量は約 170 万トンで あり、うち 46%がアフリカに輸出された。欧州からの安価な古着の需要があり、主に再利用される。再 利用に適さないものは、ほとんどが埋立か不法廃棄される。また、41%はアジアに輸出されており、専用 の経済特区で選別・加工され、ほとんどが工業用ウエスや充填剤にダウンサイクルされるか、他のアジア 諸国でリサイクルするためや、アフリカで再利用するために再輸出される。それらに適さないものは埋立 処分されている可能性が高い。

EU27 カ国のうちの 5 カ国と英国が、欧州全体の繊維廃棄物輸出の約 75%を占めている。また、 EUでは平均して繊維廃棄物の38%が分別回収されているが、スペインは12%、ドイツは60%と国に よるばらつきが大きい。

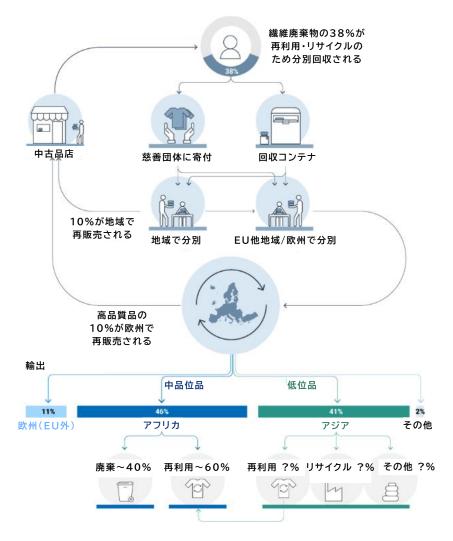


図 5-3 欧州における繊維の循環実態

出所:欧州環境庁「EU exports of used textiles in Europe's circular economy」、
https://www.eea.europa.eu/publications/eu-exports-of-used-textiles、2023 年 11 月 29 日取得

## (5) 衣類の DPP 実装に向けた実証等

#### 1) CIRPASS

CIRPASS は EU の資金提供を受けた協働イニシアチブであり、産業界、研究機関、デジタル企業、国際機関、標準化機関を代表する 31 のパートナーで構成される<sup>41</sup>。電池、繊維、電子機器の 3 分野に焦点を当て、エコデザイン規則案の要件に沿った DPP の段階的試験運用と展開に向け、DPP の明確なコンセプトの創出、セクター横断的な製品データモデルとサーキュラーエコノミーに対する利点が実証された DPP システムの定義、DPP システムの展開に向けたロードマップの作成等に取り組む。2022年 9 月から 2024年 3 月までの 18 か月間の実施を予定している。

<sup>41</sup> CIRPASS ウェブサイト、https://cirpassproject.eu/、2023年11月29日取得

#### 2) TRACE4VALUE

TRACE4VALUE はスウェーデン国立研究所による、トレーサビリティに重点を置くグリーン移行のためのプロジェクトである42。繊維製品のDPP案をとして、サプライチェーンに関わる企業、関係当局、消費者が、製品関連情報を電子的に登録、処理、共有する仕組みを作成し、試験運用を実施している。具体的には、本プロジェクトのパートナーであるアパレルブランドのKappahlとMarimekkoが、一部製品の生産段階で製品データに紐付くIDキャリアをタグ付けし、DPPにサプライチェーンに関するデータを保存する。これにより、消費者、ブランド、関係当局はモバイル機器を用いて販売時点より上方へのアクセスが可能となる。

本プロジェクトは長期的に、基準に基づきデータ属性が構造化・分類され、ブランド・消費者の要件及び EU の DPP ガイダンス・関連政策に基づき特定されたデータニーズを含むデータプロトコルを提供することを目標としている。

#### 5.2.3 建設材料

## (1) 建設材料の循環に関する法令等

## 1) 廃棄物枠組み指令(2008/98/EC)

2008 年 12 月に発行された廃棄物枠組み指令では、建設・解体廃棄物(Construction and demolition waste)を優先的な廃棄物フローと位置付け、以下の目標を設定している。

- 2020 年までに、無害な建設・解体廃棄物(欧州廃棄物リストのカテゴリ 17.05.04 に定義される 自然由来の材料を除く)のリサイクル率(代替材料としての埋め戻しを含む、再利用のための検査・ 洗浄・修理、リサイクル、その他材料回収)を、重量ベースで 70%以上にする
- 材料の選択的除去と分別システムの確立により、有害物質の除去と安全な取り扱いを可能にし、再利用と高品位リサイクルを促進するための選択的解体を促進する
- 廃棄物の発生量を削減する

2023 年 7 月に欧州委員会より改正案が発表されているが、建設・解体廃棄物については特に記載が無い。

#### 2) 建設・解体廃棄物管理プロトコルと解体・改築前廃棄物監査ガイドライン

建設・解体廃棄物管理プロトコル<sup>43</sup>と解体・改築前廃棄物監査ガイドライン<sup>44</sup>は、ともに 2018 年 9 月 より導入された。プロトコルは、建設・解体廃棄物管理プロセスと再生材の品質への信頼を高めることを

 $<sup>^{42}</sup>$  TRACE4VALUE ウェブサイト、https://trace4value.se/subproject/digital-product-passport-intextile/、以上、2023 年 11 月 29 日取得

<sup>43</sup> 欧州委員会「Construction and demolition waste」

<sup>(</sup>https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste en)、2024年1月17日取得

<sup>&</sup>lt;sup>44</sup> 欧州委員会「EU Construction and Demolition Waste Protocol and Guidelines」(https://single-market-economy.ec.europa.eu/news/eu-construction-and-demolition-waste-protocol-2018-09-18 en)、以上、2024 年 1 月 17 日取得

目的とし、廃棄物の識別・発生源選別及び回収・輸送・処理の改善、品質管理、適切な政策及び枠組みについて提示している。ガイドラインは、2020年目標の達成に向け、加盟国当局を支援するため、廃棄物監査の方法論について提示している。

#### 3) 建設資材規則改正案

2022 年 3 月 30 日、欧州委員会は、2011 年発行の建設資材規則(Construction Products Regulation)の改正案を発表した。2023 年 12 月 28 日には欧州理事会と欧州議会が同改正案に暫定合意しており、今後、両者による正式な採択を経て施行される $^{45}$ 。以下の 2 つを主な目的とする。

建設資材規則改正案では主に 2 つの目的が掲げられており、一つは資源利用の持続可能性に関する規定を設け、欧州グリーン・ディールとデジタル化に対応することである。現行規則は環境面の規定が汚染対策等に限られるため、建設資材の必須特性に関し、安全性能だけでなく気候関連を含む環境性能の表記方法を規定する。また、製品要件についても、安全性や機能性に加え、再生材利用の最大化等の環境性能を導入する。製品要件は、別途、欧州委員会が委任法令により規定することとし、製造者はその要件に従い設計・製造することが義務付けられる。さらに、エコデザイン規則に基づく DPP 制度を設ける。同制度の機能や要件は、別途、欧州委員会が委任法令により規定することとし、経済事業者に対し、DPPへの情報の保存とアクセスを容易にすることが義務付けられる。

もう一つの目的は、加盟国間の規制調和の促進により、単一市場を強化することである。建設資材は、2022年2月に発表された欧州標準化戦略において最も標準化が求められる分野の一つとされ、規制調和の促進により、競争力の改善、市場参入障壁の低減が期待されているが、標準化の取組は進んでおらず、欧州で約400の製品規格が承認待ちの状態と言われている。このため、特定条件下で、欧州委員会が実施規則を通じ独自に標準化要件を規定することとし、標準化の遅れに対応するとされている。

#### (2) 建設材料の DPP 実装スケジュール

DPP は、2027 年 2 月 18 日より電池に導入されることが決まっており、その後、繊維と電子機器が続くものと考えられる。建設材料については、「建設資材規則改正案」に、DPP の導入が明記されている。

DPP 導入の条件として、DPP を規定するエコデザイン規則案と製品ごとに DPP に含まれる情報等を定める要件の成立が不可欠であり、建築資材に関する DPP 要件については、欧州委員会が委任法令により規定することとなっている。

建設材料における DPP の導入時期は未定だが、上記3製品グループより遅れるものと想定される。

\_

<sup>&</sup>lt;sup>45</sup> JETRO「欧州委、持続可能性に関する規制調和に向けた建設資材規則の改正案を発表」 (https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/04/12clda70ecdea906.html)「EU、循環型を目指す建設資材規則の改正案で政治合意」(https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/12/3e74b18692254ecd.html)、欧州理事会「Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council laying down harmonised conditions for the marketing of construction products, amending Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Regulation (EU) 305/2011 - Mandate for negotiations with the European Parliament」(https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-10920-2023-INIT/en/pdf)、以上、2024年1月17日取得

### (3) 建設材料の現時点における回収・処理体制(建設・解体廃棄物の定義と状況)

「建設・解体廃棄物管理プロトコル」によると、建設・解体廃棄物には、欧州廃棄物リストのカテゴリ 17 「建設・解体廃棄物」に該当する①コンクリート、レンガ、タイル、セラミック、②木材、ガラス、プラスチック、③瀝青混合物、石炭タール及びタール製品、④金属(合金を含む)、⑤断熱材及びアスベスト含有建設材、⑥石膏系建材等が含まれる。

建設・解体廃棄物は年間 8 億トン以上発生し、EU の全廃棄物発生量の約 35%を占める、EU 最大の廃棄物発生源である<sup>46</sup>。主に鉱物部分(コンクリート、レンガ、タイル等)で構成され、比較的重く、リサイクルは容易だが価値は低い。市場価値のある物質(金属)や、分別回収した場合に潜在的な価値がある物質(プラスチック等)も含まれる。分別・回収技術は十分に確立されており、一般的に安価に利用できる。発生源で分別されない場合は、溶剤やアスベストなどの有害物質が含まれることがあり、リサイクルを妨げる可能性がある。

リサイクルと材料回収のレベルは、加盟国間で 10%未満~90%超の大きな差がある。また、加盟国間で建設・解体廃棄物の定義が異なるため、比較が困難である(プロトコルによる定義は加盟国に対する法的拘束力が無い)。

## (4) 建設材料の現時点における回収・処理体制(2020 年目標の達成状況の分析)

廃棄物枠組み指令が設定した 2020 年までに 70%とする回収目標(すべてのリサイクルと埋め戻し等の他の回収作業を含むと定義)に対し、ほとんどの加盟国が、2016 年時点で目標値を上回っている。しかし、国レベルでデータを精査すると、この高い回収率は、大部分が埋め戻し(回収した廃棄物やがれきを使用して建設現場の穴を埋める)や低品位回収(鉱物部分からのリサイクル骨材を道路路盤に使用等)により達成されていることが分かる。

lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1537873850842&uri=COM:2018:656:FIN)、以上、2024年1月17日取得

<sup>&</sup>lt;sup>46</sup> 欧州委員会「EU Construction and Demolition Waste Management Protocol」 (https://ec.europa.eu/docsroom/documents/20509/)「Construction and demolition waste」 (https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste\_en)、EU「REPORT on the implementation of EU waste legislation」(https://eur-

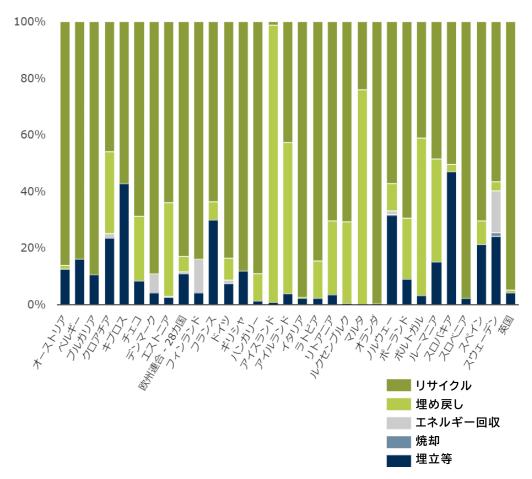


図 5-4 欧州における建設材料の循環実態

出所:欧州環境庁「Construction and demolition waste: challenges and opportunities in a circular economy」
(https://www.eea.europa.eu/publications/construction-and-demolition-waste-challenges/construction-and-demolition-waste-challenges)、2024年1月17日取得

### (5) 建設材料の DPP 実装に向けた実証等

## 1) Construction Materials Exchange (CMEx) project

Construction Materials Exchange (CMEx) project はアイルランド・グリーンビルディング 評議会(Irish Green Building Council、IGBC)が 2021 年 12 月に開始した実証プロジェクトである<sup>47</sup>。廃棄物フローから再利用の可能性のある材料を特定し、再利用を実現するメカニズムを開発することを目的としている。マテリアルパスポートを生成し材料のマッチングを容易にするオンラインプラットフォームを通じて実現する。マテリアルパスポートは、建物内のすべての部品に関する情報を含み、すべての材料が循環し、埋立や焼却を回避できるようにする。同プロジェクトは、アイルランド環境・気候・通信省の循環経済イノベーション助成金制度より、資金提供を受けている。

IGBC は、オンライン材料交換プラットフォームを運営し、様々な国で同様の実証を多数実施している

\_

 $<sup>^{47}</sup>$  IGBC「The Irish Green Building Council launches a pilot scheme to increase reuse of construction materials」 (https://www.igbc.ie/the-irish-green-building-council-launches-a-pilot-scheme-to-increase-reuse-of-construction-materials/)、IEMA「Circular credentials: digital product passports in construction」 (https://www.iema.net/articles/circular-credentials-digital-product-passports-in-construction)、以上、2024年1月17日取得

オランダの Excess Materials Exchange (EME)と提携し、同プロジェクトに取り組んでいる。

## 5.2.4 PV パネル

## (1) PV パネルの循環に関する法令

#### 1) WEEE(電気·電子機器廃棄物)指令

WEEE 指令は 2003 年に制定された。WEEE の発生抑制と再利用・リサイクル促進による廃棄量削減を目的とし、加盟国と生産者に回収・リサイクルシステムの構築及び EPR に基づく費用負担を義務付けている。現行指令は 2012 年に改正されており、改正により PV パネルが対象製品に追加されるとともに、表 5-3 に示す目標値が設定された。

2012 年改正指令は、2014 年より加盟国で国内法化されているが、加盟国によって生産者の解釈が異なる(定義上、製造販売者、再販者、輸入者、ネット販売者も含まれる)等の問題があり、実施状況や導入成功率に差が生じている。また、産業界からは、PV パネルの長寿命と市場の変動性を考慮し、他の WEEE とは異なる収集目標を求める声が上がっている。

項目 目標值 WEEE 収集目標 2016 年より、過去 3 年間の EEE 販売量の平均重量の \*収集(collection) 45%以上 2019 年より、過去 3 年間の EEE 販売量の平均重量の 65%以上もしくは WEEE の総重量の 85%以上 「大型機器」(PV パネル含む)の回収目標 2012年8月~2015年8月、75%以上を回収 \*回収(recovery):燃料・エネルギー利 2015年8月~2018年8月、80%以上を回収 用、金属・金属化合物その他無機物のリサ 2018年8月より、85%以上を回収 イクル・再生利用(reclamation)等 「大型機器」(PV パネル含む)の再利用・リサ 2012年8月~2015年8月、65%以上をリサイクル 2015年8月~2018年8月、70%以上を再利用の イクル目標 \*再利用のための準備(preparing for ために準備・リサイクル re-use):検査、洗浄、修理 2018 年 8 月より、80%以上を再利用のために準備・リ サイクル

表 5-3 WEEE 指令における目標

出所:EU「DIRECTIVE 2012/19/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)」(https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02012L0019-20180704)、Photorama「EU regulation pushing forward PV recycling: the WEEE directive」(https://www.photorama-project.eu/eu-regulation-pushing-forward-pv-recycling-the-weee-directive/)、以上、2023年12月15日取得

また、2022 年 10 月に欧州委員会は、同指令の目標達成状況と循環経済及び環境に配慮した WEEE 管理への貢献度に関する評価イニシアチブを開始した。2023 年 6~9 月にパブリックコンサル テーションを実施し、2024 年第 2 四半期(4~6 月)に、評価報告書を発表する予定である。

2023 年 2 月には欧州委員会によって同指令の部分改正提案が行われ、2023 年 12 月、欧州理事会と欧州議会が暫定合意し、最終合意文書について審議を行った。PV パネルに関連しては表 5-4 のとおり、新たに独立したカテゴリとし、予測寿命に基づく収集目標を計算する可能性について評価を実施する提案がなされている。

表 5-4 WEEE 管理への貢献度に関する評価イニシアチブ 部分改正提案

提案内容	項目(PV パネル関連)		
「第 2a 条 見直し(Review)」を追加	・ 欧州委員会は、2026 年 12 月 31 日までに、本指令の改正の 必要性を評価し、必要に応じて、社会経済及び環境に関する影響 評価を伴う改正案を提出するものとする ・ 影響評価において、欧州委員会は、特に以下を評価するものとす る		
	<ul> <li>✓ PV パネルを「大型機器」カテゴリから切り離して新たに「PV パネル」カテゴリを作成し、販売量ではなく、予測寿命に基づ く収集可能量を基準として収集目標を計算する</li> <li>✓ 生産者が破綻または清算した場合に、住宅及び非住宅の両方 から排出される PV パネルを収集・処理・回収・適正処分する ための将来の費用が確実に補償される仕組みを確立する</li> </ul>		

出所:欧州委員会「Waste from electrical and electronic equipment - evaluating the EU rules」 (https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13420-Waste-from-electrical-and-electronic-equipment-evaluating-the-EU-rules\_en)、欧州委員会「Waste electrical and electronic equipment - targeted amendment」(https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13731-Waste-Electric-and-Electronic-Equipment\_en)、欧州理事会「Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (WEEE)」(https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-16246-2023-INIT/en/pdf)、以上、2023年12月15日取得

#### 2) 持続可能な製品のためのエコデザイン規則案

持続可能な製品のためのエコデザイン規則案において、PV パネルはエコデザイン規則の対象となっており、DPP の付与が義務付けられるものと思われる<sup>48</sup>。

現行のエコデザイン指令は、約30のエネルギー関連製品を対象とする枠組み指令であり、個別の製品グループに関する要件については、別途、実施措置(Implementing measures)として規定されている。欧州委員会は、作業計画を策定し、定期的に、製品グループごとに実施措置の評価・見直しを行っている。「エコデザイン作業計画2016-2019」では、新たに実施措置の策定を検討する製品グループの一つに「太陽光パネル及びインバーター(Solar panels and inverters)」を挙げ、事前調査を開始するとしている<sup>49</sup>。また、「エコデザイン及びエネルギーラベリング作業計画2022-2024」では、事前調査が完了し、欧州委員会は2023年第2四半期までにエコデザインまたはエネルギーラベルの実施措置を採用することを目指し、作業を継続するとしている<sup>50</sup>。

#### (2) PV パネル DPP 実装スケジュール

DPP は、2027 年 2 月 18 日より電池に導入されることが決まっており、その後、繊維と電子機器が

<sup>&</sup>lt;sup>48</sup> EU「Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products」(https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32009L0125)、2023 年 12 月 21 日取得

<sup>49</sup> 欧州委員会「Ecodesign Working Plan 2016-2019」(https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52016DC0773)、2023 年 12 月 21 日取得

<sup>&</sup>lt;sup>50</sup> 欧州委員会「COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT Accompanying the document COMMUNICATION FROM THE COMMISSION Ecodesign and Energy Labelling Working Plan 2022-2024」(https://eur-lex.europa.eu/legal-

content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022SC0101&amp%3Bqid=1649262685108)、以上、2023年12月21日取得

続くものと考えられる。PV パネルは、電気設備(electrical equipment)であり、電子機器 (electronics)には該当しないと考えられるため、PV パネルへの導入は、上記 3 製品グループより遅れると想定される。DPP 導入の条件として、DPP を規定するエコデザイン規則案と、製品ごとに DPP に含まれる情報等を定めるエコデザイン要件(欧州委員会委任法令またはエコデザイン指令実施措置)の成立が不可欠である。

欧州委員会は、CIRPASS が 2023 年 6 月 12 日に開催したウェビナーで図 5-5 を紹介し、エコデザイン規則案は早ければ 2024 年中に施行され(図中①)、それを受け、優先順位に基づく最初の委任法令(図中②)及び、実施措置(図中③)により、DPP が実装されるとしている。PV パネル(太陽光パネル及びインバーター)の実施措置については、現在、策定作業が進められている。

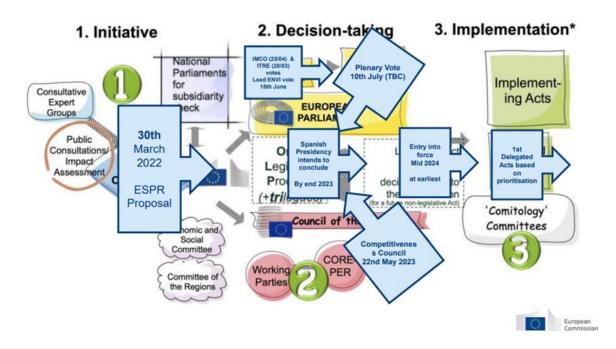


図 5-5 PV パネル DPP 実装スケジュールのイメージ

出所:欧州委員会「Webinar on the Digital Product Passport initiative 2023\_06\_12\_PPT Progress in Codecision」 (https://ec.europa.eu/docsroom/documents/54874)、2023 年 12 月 21 日取得

### (3) PV パネルの現時点における回収・処理体制(WEEE 指令による規定と達成状況)

WEEE 指令は、EPR に基づき、表 5-5 の規定を満たす形で生産者が WEEE の収集とリサイクル に責任を持つ廃棄物管理プログラムを導入することを加盟国に義務付けている。EU で上市される EEE は、2011 年の 760 万トンから、2018 年には 870 万トンに増加した。2018 年の WEEE 収集 量は一人当たり平均 8.9kg と推定され、収集率 47%だった。Eurostat によると、2019 年の WEEE 収集目標値 65%を達成した加盟国は、3 カ国のみである。

表 5-5 WEEE 指令条項のうち回収・処理体制に関する項目

WEEE 指令条項	規定内容
第5条 分別収集	・住宅からのWEEE について、加盟国は、販売者・小売店による無料収集、生産者による個別・集団収集等を確保するものとする。また、収集事業者を指定し、収集されたWEEE が生産者またはその代理を務める第三者、再利用の準備のための指定施設・事業者に引き渡されることを要求することができる。 ・ 非住宅からのWEEE について、加盟国は、生産者またはその代理を務める第三者が収集を行うことを保証するものとする。
第7条 収集目標	<ul> <li>・ 加盟国は、EPR の原則に基づき、毎年、収集目標が達成されることを保証するものとする。</li> <li>*インフラの欠如と EEE 消費レベルの低さを考慮し、東欧等の 10 カ国</li> </ul>
	については、目標値の引下げまたは期日の延期が認められている。
第8条 適切な処理	<ul> <li>加盟国は、分別収集されたすべての WEEE が、適切な処理を受けることを保証するものとする。</li> <li>加盟国は、生産者またはその代理を務める第三者が、利用可能な最善の技術を用いて WEEE の回収(recovery)を提供するシステムを構築することを保証するものとする。</li> </ul>
第11条 回収目標	<ul><li>・ 加盟国は、生産者が、回収目標及び再利用・リサイクル目標を満たしていることを保証するものとする。</li></ul>
第12条 住宅からの WEEE に関する資金提供	・ 加盟国は、生産者が、WEEE の収集、処理、回収、適正処分の資金を提供することを保証するものとする。
第13条 非住宅からの WEEE に関する資金提供	・ 加盟国は、生産者が、WEEE の収集、処理、回収、適正処分の資金を提供することを保証するものとする。

出所:EU「DIRECTIVE 2012/19/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)」(https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02012L0019-20180704)、iimpcoll「Digital Product Passports (DPP): what, why, and how?」(https://iimpcoll.com/content/what-are-digital-product-passports#heading-19)、以上、2023年12月22日取得

#### (4) PV パネル 現時点での回収・処理体制(PV パネルの収集・リサイクルスキーム)

WEEE 指令に基づき、EEE 製造業界の多くは、独自資金による収集・リサイクルプログラムを立ち上げている。PV 業界でも、PV CYCLE 等の収集・リサイクルスキームが構築されている。

PV CYCLE は欧州太陽光発電協会(EPIA)、ドイツソーラー産業協会(BSW)、PV パネルメーカー 6 社によって、2007 年 7 月に設立された生産者責任機関である。使用済 PV パネルの自主的な収集・リサイクル・適正処分システムの構築を目的とし、2010 年より活動開始した。2012 年の WEEE 改正 指令に基づく各国法に準拠した処理業者の一つであり、欧州市場の PV パネルルメーカーの 90%以上 が加盟している。

PV CYCLE による PV パネル回収状況は図 5-6 に示すとおりである。2022 年に収集した使用済 PV パネル重量は約 1.6 万トンであり、2010 年 6 月の収集開始以来、約 7.7 万トンに上る。大半が非 住宅で運用されていた PV パネルである。また、大部分が Si 系モジュールで、基本的にガラスリサイクル事業者により処理されている。

収集拠点は、2014 年 11 月時点で 347 個所だが、実際に活動しているのは約 35 個所である。約 7 割がドイツ、イタリア、フランスに位置し、ほとんどが太陽電池モジュールの施工業者の運営である。

# **OPERATIONS OVERVIEW 2022**



TOTAL COLLECTED TONS YTY

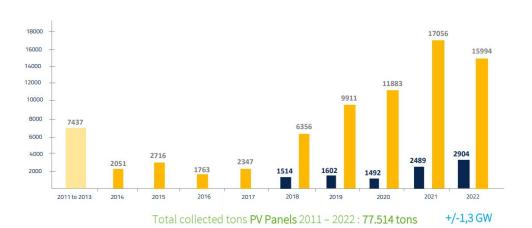


図 5-6 PV CYCLE による PV パネル回収状況

出所:Solar Waste/European WEEE Directive「Collection & Recycling」(http://www.solarwaste.eu/collection-and-recycling/)、PV CYCLE「ANNUAL REPORT 2022」(https://pvcycle.org/wp-content/uploads/2023/07/Annual-report-AISBL-2022-Def.pdf)、一般社団法人環境エネルギー循環センター「欧州のPV サイクル事例、PV CYCLEの概要とリサイクルスキーム」(https://eecc.jp/2021/03/23/news3/)、以上、2023年12月22日取得

# (5) PV パネル DPP 実装に向けた実証等

#### 1) CIRCUSOL

CIRCUSOLは、欧州における、PVパネルを含む各種製品の循環型ビジネスモデルを検証する実証事業である。本実証事業を通じて、バリューチェーンを通じた PV パネルのデータ連携に関する検討がなされた。バリューチェーンの各関係者にヒアリングを実施し、設計原則・設計要件が整理されるとともに、複数回デモ版データベースを関係者に提示してブラッシュアップが図られた。

5.4 で後述するが、本実証事業における検討はあくまで研究開発段階であり、実装される要件へ直接の紐付けはまだなされていない。しかし、関係者ヒアリングを実施しての要件整理結果であり、本調査の参考となり得るため、表 5-6 及び図 5-7 に示すとおり、設計要件や伝達項目案の概要を整理した。

表 5-6 CIRPASS において整理された PV データベースの設計要件

設計原則	
DP1	既存のデータソースや PV のバリューチェーンの全段階からデータを収集・更新する
DP2	DPP を作成するためのプラットフォームを通じて、拡張された PV 製品データに基づく評価スキームを開発する
DP3	信頼性の高いテストや再利用のインフラを含む PV オンライン市場を開発する

設計要件						
DR1	アクセシビリティ	DR7	機密性			
DR2	完全性	DR8	トレーサビリティ			
DR3	一貫性	DR9	透明性			
DR4	効率性	DR10	タイムパフォーマンス			
DR5	相互運用性	DR11	可視性			
DR6	安全性					

出所:Boukhatmi, Ässia, Roger Nyffenegger, and Stefan N. Grösser. "Designing a digital platform to foster data-enhanced circular practices in the European solar industry." Journal of Cleaner Production 418 (2023): 137992. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623021509、2023年12月25日取得

## (6) 欧州の太陽光パネルの DPP 実証における情報伝達項目

CIRCUSOL における検討の結果、図 5-7 に示す情報伝達項目案が整理された。製品 ID に付属する情報のうち、製品状態(製品寿命、製造年、製品使用終了見込年、導入場所、リユースポテンシャル等)に関するパフォーマンスデータの情報は、時系列データベースを構築の上膨大なデータの集約が必要となりうるため、CIRCUSOL では優先順位が下げられており、本事業においても長期使用可能性判断に必須の情報ではないことから、DPP への実装の優先順位を下げることが考えられる。

また、PCDS(Product Circularity Datasheet)に関する情報のうち、修理情報や消費者使用前後のリサイクル材使用状況といった情報は、将来的に太陽光パネルの長期使用・リサイクル材利用が進んだ状態においては有用な情報となる。しかし、本事業の対象とする、すでに日本に導入され、2030年代に大量排出が見込まれる太陽光パネルに関してすぐに必要となる情報ではないことから、これらのDPPへの実装の優先順位を下げることが考えられる。



図 5-7 欧州の太陽光パネルの DPP 実証における情報伝達項目

出所:Boukhatmi, Ässia, Roger Nyffenegger, and Stefan N. Grösser. "Designing a digital platform to foster data-enhanced circular practices in the European solar industry." Journal of Cleaner Production 418 (2023): 137992. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623021509、2023年12月25日取得

## 5.3 PV パネルのリユース・リサイクルに関する既往文献調査

#### 5.3.1 既往調査で把握された PV パネルのリユース・リサイクル実態

環境省「令和3年度使用済太陽電池モジュールのリサイクル等の推進に係る調査業務報告書」では、アンケート調査の回答があった廃棄物処理業者では7割弱がリユースされていると把握された。

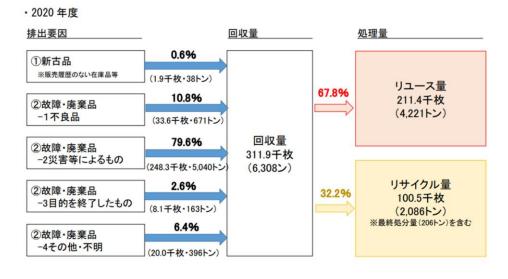


図 5-8 太陽光パネルの処理実態

出所:環境省「令和 3 年度使用済太陽電池モジュールのリサイクル等の推進に係る調査業務報告書」P12、https://www.env.go.jp/content/900535815.pdf、2024 年 2 月 13 日取得

### 5.3.2 既往調査で整理された PV パネルのリユースにおける課題

PV パネルのリユースに関しては、これまで環境省等において調査事業や実証事業等が進められてきた。環境省が公開した「太陽光発電設備等のリユース・リサイクル・適正処分に関する報告書」において整理された、国内における PV パネルリユースのビジネスモデルイメージと現状の課題は図 5-9 のとおりである。同報告書では、現状では国内リユースビジネスが成立しておらず、他方で海外の個人向けに流通している例は認められるとしている。また、各種分析・検査に必要な機器のイニシャルコストが高いため、一定量の需要と供給が見込めない限り、リユースビジネスへの新規参入ハードルは高いことが示唆された。なお、PV パネルのリユースにあたり実施する項目とその概要は表 5-7 のとおりである。

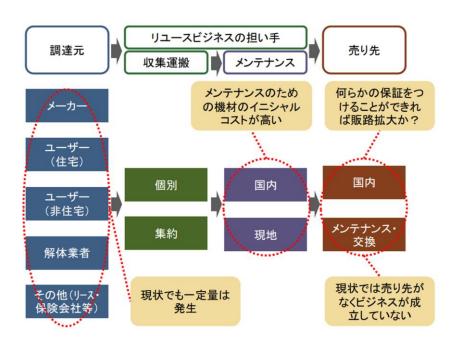


図 5-9 国内リユースのビジネスモデルイメージと現状の課題

出所:環境省「太陽光発電設備等のリユース・リサイクル・適正処分に関する報告書」P20-21、 https://www.env.go.jp/press/files/jp/27415.pdf、2024 年 2 月 13 日取得、一部加筆

表 5-7 PV パネルのリユース手順と概要

項目	内容	イニシャルコスト	PV パネル 1 枚当たり の所要時間
①太陽電池モジュール洗浄	検査前に太陽電池モジュールの洗浄を実施	-	5~10 分程度
②絶縁検査	ドライ検査と湿潤検査がある。湿潤検査では水 中に入れて漏電の危険性が無いかを確認する	検査機器:数万円	1分程度
③出力検査	IV カーブにより出力特性を確認	検査機器:1,000 万円程度	1分程度
④EL カメラ 検査	赤外線を使って測定し、太陽電池モジュール中 の異物やバイパスダイオードのショートが無い か等をチェック	分析機器:100~ 200 万円程度	1分程度
⑤バイパスダ イオード検査	バイパスダイオードが切れていないかを確認	分析機器:数万円	1分程度
⑥外観検査	外観のこげ、キズ等を確認	-	1枚当たり1分程度

出所:環境省「太陽光発電設備等のリユース・リサイクル・適正処分に関する報告書」P20-21、 https://www.env.go.jp/press/files/jp/27415.pdf、2024 年 2 月 13 日取得、一部加筆 これらの課題を受け、リユース普及促進に向け図 5-10 に示す促進策の案がとりまとめられた。

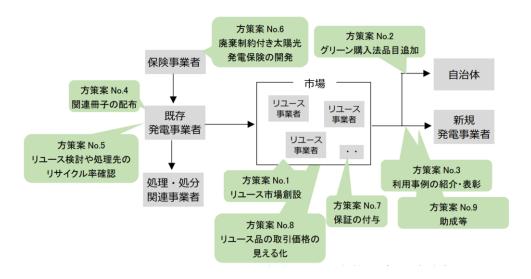


図 5-10 リユース普及促進に向けた施策モデルの全体像

出所: 環境省「令和 3 年度使用済太陽電池モジュールのリサイクル等の推進に係る調査業務報告書」P87、 https://www.env.go.jp/content/900535815.pdf、2024 年 2 月 13 日取得

リユース促進に向け、環境省の下で実証事業が展開されている。環境省「令和 4 年度資源循環に関する情報プラットフォーム実証事業報告書」によると、使用済太陽光パネルのトレーサビリティの確保や適正な情報管理等の機能を有する、回収からリユースまでの一体的な管理情報プラットフォームを導入することで、リユース PV パネルの購入者及び適正リサイクル業者とのマッチングを効率的に実現でき、国内リユースの加速化や埋立処分の回避といったメリットが生じるとされている。

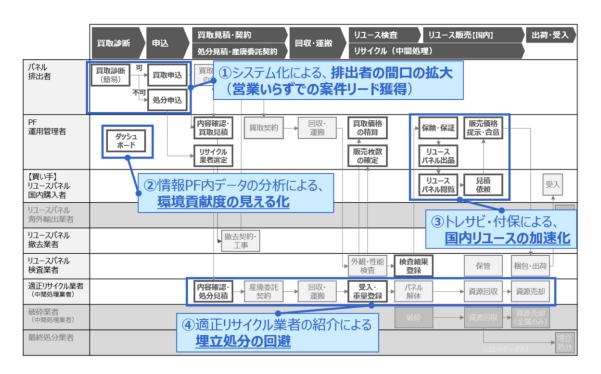


図 5-11 情報プラットフォーム(PF)導入のメリット

出所:環境省「令和 4 年度資源循環に関する情報プラットフォーム実証事業(使用済太陽光パネルの適正管理情報プラットフォームの運用・事業面の検証)報告書」P22、https://www.env.go.jp/content/000126685.pdf、2024 年 2 月 13 日取得

#### 5.3.3 既往調査で把握された PV パネルのリサイクルにおける課題

PV パネルリサイクル技術の開発は経済産業省、NEDO、環境省等においてこれまで進められてきており、既に多様なリサイクル技術が開発・導入されてきている。ここでは、PV パネルのリサイクルにおける課題を整理するため、表 5-8 のとおり、PV パネルを構成する部材ごとにリサイクル実態と循環におけるポイントに着目して調査を実施した。

表 5-8 PV パネルのリサイクルに関する文献調査の方針

	調査のポイント	実施事項
ガラス	PV ガラスに限定せず、ガラス全体の循環を描き、その中で PV ガラスの活用可能性を検討する	<ul> <li>ガラスの循環実態把握(用途別 / ガラス種類別 / 元素別)</li> <li>ガラスの組成調査(文献調査の他、2. にて分析も実施)</li> <li>ガラス用途先へのヒアリング(二次原料の使用実態等。2. にて実施)</li> </ul>
電極材・ 樹脂類・ シリコン	電極材、シリコンを含むセルシートや付着する樹脂類の組成に基づき、製錬側において必要な処理を明らかにする上記に基づき、原料として製錬プロセスに投入可能なセルシート・樹脂類の重量割合を考察するとともに、望ましい費用負担のあり方についても示唆を得る	<ul> <li>セルシート・樹脂類の組成調査(文献調査の他、2. にて分析も実施)</li> <li>製錬プロセスにおけるセルシート・樹脂類の取り扱いに関する有識者ヒアリング(2. にて実施)</li> </ul>

## (1) ガラス

既往調査において、導入年代ごとの PV パネルに使用される各部材の組成は下記のとおり調査されている。年代により量の差はあるが、結晶系 PV モジュールのフロントカバーガラスの一部から Sb や Pb が検出されている。本年度事業における使用済 PV パネルのサンプル分析と比較すると、Sb は本年度事業の分析でも同様に検出された一方、Pb に関しては本年度事業のサンプル分析の方が少量であった。全体の傾向は大きな差が無かったことから、個体差によるものと考えられる。

以上のように、これまでも PV パネル由来ガラスに関する組成分析を行った調査事例はあるが、サンプル数の不足や、データの代表性の検討不足により、ガラス製造業界で使用済 PV パネル受け入れに踏み切れるようなデータではなかった。

表 5-9 太陽光パネルの年代別・部材別組成

種類		製造年	部位	Pb	Cd	As	Se	T-Hg	Cr <sup>6+</sup>	Be	Sb	Te	Cu	Zn	Sn	上:最大値 Mo	In	Ga	有量単位:mg Ag										
12700				鉛	カドミウム	ひ素	セレン	水銀	大価クロム	ベリリウム	アンチモン	テルル	銅	亜鉛	すず	モリブデン	インジウム	ガリウム	銀	N数									
単結晶 国内	国内	国内 ~1999	国内 ~1999	フロントカバーガラス	20	-	<1	-	_	-	-	5	-	-	-	-	- 11	_	-	_									
					5	-	<1	-	_	_	-	3	-	_	_	_	9	-	-	_	—								
			電極	110000	-	_	_	_	_	_	-	_	740000	_	69000		_	_	30000	4									
			EVA・結晶・パックシート	85000 1900	3	- (1	<u>-</u>	<1	<0.5	<1	69	<1	550000 4500	220	490 1900	4	1	17	18000 6200	_									
			EVA · NOM · NOOD—II	1800	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	20	<1	320	51	1700	3	<1	15	4300	1									
		2000~2009	フロントカバーガラス	310		1	_	_	-	_	2100	_	-	-	-	2		-	-	-									
				<1	_	<b>&lt;</b> 1	_	_	_	_	1600	-	-	_	-	<1	-	_	_	1									
			電極	1100	_	_	_	_	_	_	_	-	730000	-	150000	_	_	_	25000										
				44	-	_	_	_	_	_	_	-	670000	_	950	_	_	_	4900	_									
			ガラス・EVA・結晶・バックシート	110	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	12	<1	13	13	180	8	68	7	3200	4									
			EVA・結晶・パックシート	32 270	(1	<1 <1	<1	<1 <1	<0. 5 <0. 5	<1 <1	8 10	<1	11 460	13 40	58 1100	7	58 3	7	3200 5300	-									
			E V A - som - Myyy- I	220	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	6	<1	71	11	270	2	2	3	3100	4									
		2010~	フロントカバーガラス	120		4	_	_	-	_	2200	_			-	(1	_	_	-	-									
				16	_	<1	_	_	_	_	1200	-	-	_	-	<1	_	_	_	1									
			電極	170	_	_	_	_	_	_	_	-	950000	_	18000	_	_	_	23000										
				5	_	_	_	_	_	_	_	_	780000	_	3	_	_	_	280	_									
			EVA・結晶・バックシート	290	<1	25	<1	<1	<0.5	<1	96	26	160000	170	3700	7	400	6	9400	4									
ŀ	海外	2008-2012	フロントカバーガラス	10	<1	<1 <1	<1	<1	<0.5	<1	9 780	<1	49	12	26	<1	<1	<1	150	+									
	/## 7 F	2000~2013	20002013	2000 2010	2006~2013	プロントがハーガラス	5	_	<1				_	510	_	_		_	<1	_			1						
		-	電極	58000	_		-	_	_	_	-	-	880000	_	97000	-	_	_	22000										
				9	_	_	_	_	_	_	_	-	760000	_	9800	-	_	_	84										
			ガラス・EVA・結晶・パックシート	66	<1	3	<1	<1	<0.5	<1	2200	2	140	100	87	3	<1	1	470										
				27	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	1200	<1	21	16	28	1	<1	1	280	₩									
			EVA・結晶・パックシート	10	<1 <1	<1	<1 <1	<1 <1	<0, 5 <0, 5	<1 <1	52 36	<1 <1	110000 94000	26 13	19000 16000	2	<1 <1	<1 <1	120 59	4									
多結晶	国内	2001~2005	フロントカバーガラス	360	_	<1	_		-	_	2000	_	94000	- 13	-	17		_	- 59	$\vdash$									
50 HIII	Int Pa	2001-2000			2007	200.	200.	200.	200. 2000	200.	200.	) = )   // // // // // // // // // // // // /	<1	-	<1	_	_	_	_	2	-	-	_	-	<1	-	_	_	1
			電極	140000	-	_	_	_	_	_	_	-	830000	_	250000	-	_	_	32000										
				390	_	-	-	_	_	_	-	-	410000	_	460	_	_	_	4700										
			EVA・結晶・バックシート	7600	6	14	<1	<1	<0.5	<1	57	7	5600	940	14000	5	1	7	12000	4									
	国内	2012~	701147 #=7	100	<1	<1 3	<1	<1	<0.5	<u>&lt;1</u>	5	<1	40	14	41	2 <1	<1	3	290	-									
	国内	2012~	フロントカバーガラス	8 <1	_	2			_		2000 1700	_	_			<1	_			1									
			電極	64000	_	_	_	_	_	_	-	_	83000	_	89000		_	_	12000										
			-C12	5500	-	_	-	-	_	_	-	-	70000	_	2900	-	-	_	1800	1									
					EVA・結晶・バックシート	990	<1	14	<1	<1	<0.5	<1	35	7	890	940	290	5	1	4	2600								
-	at			100	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	5	<1	40	97	41	2	<1	3	290	_									
	海外				フロントカバーガラス	30	_	6		_	_		1700	-	-			<1 <1	_	_	_	4							
							雷極	59000	_	<1 -					450 —		850000		85000	- 1			19000	-					
						HE.12	1400	_	_	_	_	_	_	_	_	750000		3700	_	_	_	3900	4						
			EVA・結晶・バックシート	1400	<1	19	<1	<1	<0.5	<1	100	100	2900	210	1500	5	3	5	2100	-									
				100	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	15	3	160	58	280	2	<1	3	160	1									
				ガラ	ガラス・EVA・結晶・バックシート	630	<1	10	<1	<1	<0.5	<1	570	16	200	51	1100	3	<1	3	3300								
			and the	41	<1	<1	<1	<1	<0.5	<1	81	2	13	20	10	2	<1	1	250										
i薄膜	国内	2008~2013	電極	70 52	_			_	_	_	_	-	690000 620000		320000 1000	-	_	=	10000 8500	4									
			ガラス・EVA・結晶・バックシート	15	<1	<1	2	<1	<0.5	<1	2	<1	4200	680	680	6	<1	2	180	$\vdash$									
				10	(1	<u> </u>	<1	<1	<0.5	<1	<1	<1	12	21	240	3	<1	1	47	1									
比合物	国内・海外	2007~2013	雷極	4100	_	_	-	_	-	_	_	_	840000	-	160000	_	_	-	5800										
				8	-	-	-	-	-	-	-	-	570000	-	26	_	-	-	12										
			ガラス・EVA・結晶・バックシート	26	390	2	370	<1	<0.5	<1	1600	470	4500	500	450	180	300	53	- 11										
		I	I	2	5	1	150	<1	<0.5	<1	<1	<1	18	10	15	8	<1	<1	<1	1									

出所:環境省、経済産業省「使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル・適正処分に関する調査結果」表 3-6、https://www.env.go.jp/recycle/report/h26-02.pdf、2024 年 2 月 14 日取得

PV パネルに限らずガラス製品全般の循環実態は図 5-12 のとおり整理される。ガラスびんはそのほとんどが回収され、びん to びんのリサイクル率は約8割である他、その他の用途でもガラスびん由来のカレットが活用されている。他方、板ガラスに関しては板ガラスメーカーの工場で発生したガラス屑を除けば板ガラス用途での再利用は極めて難しい。建設材料として用いられるガラスは排出時、その他の建設材料と分離されずにサーマルリサイクルや最終処分となるものが大半を占め、家電系については個別リサイクル法により一定程度回収されるものの、マテリアルリサイクルとしては約1割がガラス短繊維で活用される程度である。自動車系についてはガラス繊維等、より高い品質が求められる用途での活用について実証の段階にある。

このような状況にあって、PV パネルがピーク時に 17-28 万 t/年排出されること、PV パネル中のガラス重量が約 6 割であることを考慮すると、約 10-17 万 t/年の PV 由来ガラスについて再資源化先を確保する必要がある。NEDO における既往調査によれば型板ガラスやガラス繊維、発泡材、セラミック、路盤材等への PV ガラス活用が見込まれるが、受入可能量をさらに拡大していくことが求められる。他方、その他ガラス製品由来のカレットと競合関係が予想されることを考慮する必要があり、またピーク時までは安定的な排出が見込まれないため素材メーカーにとっては他の原料と比較して活用が難しいことは課題の一つである。

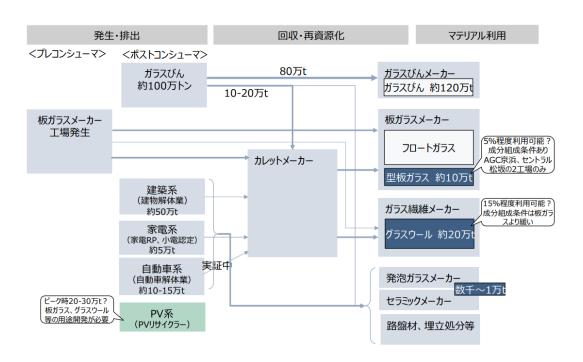


図 5-12 ガラス製品の循環実態(2019年)

出所: NEDO「「太陽光発電システム長期安定電源化技術開発プロジェクト」事業原簿【公開】」図 10、https://www.nedo.go.jp/content/100924408.pdf#page=160、2024 年 2 月 14 日取得

## (2) 電極材・樹脂材・シリコン

PVパネルに使用される電極材及び樹脂材(EVA)やシリコンを含むセルシートの組成は、それぞれ表 5-9 のとおりである。セル上に電極を形成するための銀ペーストに由来する銀やインターコネクト、バス パー電極に用いられる銅、またこれらを接続するためのはんだに由来する Pb、Sn が多量含まれる。

日本における PV パネルのリサイクルは、多くの場合ジャンクションボックスとアルミニウムフレームを取り外したのち、ガラスとセルシートを分離して、セルシートは追加の選別を経ずに製錬プロセスへ投入される。しかし、再資源化率向上のためには電極材、樹脂材、シリコンについても選別の上で再資源化されることが望ましい。

既往調査<sup>51</sup>では、国際的に検討されてきた電極材、樹脂材、シリコン等に含まれる資源のうち、銀や銅については酸浸出等の湿式処理による回収を、シリコンについてはアルカリ溶液を用いた化学エッチングプロセスが取り上げられている。

#### (3) 次年度以降の方針

-

本年度はガラス及び電極材・樹脂材・シリコンのリサイクル実態と課題をとりまとめた。PV パネルを構成する部材のうちアルミニウムフレームについては、有価で取引され、循環されていることが確認されてきたが、地金の種類に踏み込んでの循環実態の整理は実施されていない。CO2 排出量削減効果算定の観点からは、地金の種類や用途先の原単位も考慮することが望ましい。このため、次年度以降はアルミニウムフレームについても組成や循環実態に関する情報収集を実施することが考えられる。

<sup>&</sup>lt;sup>51</sup> Deng, Rong, Yuting Zhuo, and Yansong Shen. "Recent progress in silicon photovoltaic module recycling processes." Resources, Conservation and Recycling 187 (2022): 106612.

## 5.4 海外訪問調査

## 5.4.1 目的

WEEE 指令の下で使用済 PV パネルの管理を行っている欧州を対象に、PV パネルの DPP として考えられる情報伝達項目及びその情報伝達のあり方に関する今後の方向性を把握するため、海外訪問調査を行った。

## 5.4.2 実施行程·実施者

## (1) 実施行程

海外訪問調査は、表 5-10 に示す行程で実施した。

表 5-10 海外訪問調査の行程

日付	実施内容	宿泊地
2023年 12月5日	<ul> <li>フランクフルトへ移動(LH717 便 12:35 羽田発)</li> <li>19:00 フランクフルト着</li> <li>ブリュッセルへ移動(LH5990 便 21:35 フランクフルト発)</li> <li>22:35 ブリュッセル着</li> </ul>	・ブリュッセル
12月6日	午後: PV CYCLE と面談	) ) <u>.</u> , c/v
12月7日	終日:Sustainable Solar 2023 参加(概要は表 5-11 参照)	
12月8日	午前:欧州委員会(DG-GROW、DG-ENV の政策担当官)と面談	
12月9日	● 東京へ移動(NH232 便 20:50 ブリュッセル発)	機中泊
12月10日	■ 18:25 成田着	

## (2) 実施者

海外訪問調査は、東北電力 $(2\ A)$ 及びイー・アンド・イー ソリューションズ $(1\ A)$ が実施した。また、現地訪問調査には、WEEE 指令をはじめとした EU の制度に関する専門家として、東北大学の客員教授 $(1\ A)$ も同行した。

表 5-11 Sustainable Solar 2023 のプログラムの概要

項目	内容
開催日時	2023年12月7日(木)9:00~18:00
開催場所	La Tricoterie(Brussels 内に位置する建物)の会議室

- セッション 1: Supply Chain Transparency
  - 登壇者の所属: 登壇者の所属: Solar Power Europe、TDi Sustainability、Trina Solar、Aquila、EIB、Business & Human Rights Resource Centre
- セッション 2:EU Regulatory Framework for Sustainable Solar: Ecodesign, Energy Label and Best-in-class Solar
  - 登壇者の所属:欧州委員会、Oxford PV、FuturaSun、TÜV Rheinland

#### • セッション 3:Sustainability of PV Components

- 登壇者の所属:欧州委員会、European Aluminium、Eurometaux、Glass for Europe
- セッション 4: How to Maximise Dual use of Land and Water Surface Potential: Floating solar and Agrivoltaics
  - 登壇者の所属:欧州委員会、BayWa r.e.、SolarDuck
- セッション 5: Sustainable End-of-life Solutions for Solar Products
  - 登壇者の所属:欧州委員会、SOREN、Sunrock

## 5.4.3 結果

セッション

(1) 政策側での PV パネルの情報伝達に関する検討状況

#### 1) エコデザイン指令・エネルギーラベリング規則・ESPR 案の下での検討状況

- EU では、PV パネルの情報伝達について、現行の 2 つの制度、及び検討中の 1 つの制度案が関わる。現行の制度はエコデザイン指令(Directive 2009/125/EC)及びエネルギーラベリング規制(Regulation (EU) 2017/1369)であり、検討中の制度案はエコデザイン・持続可能な製品に関する規制案(ESPR 案)である。
- エコデザイン指令とエネルギーラベリング規制は枠組みを定める制度である。この枠組みの下で、 2024 年第 1 四半期を目標に、PV パネル・インバーターに特化した新たな実施措置が公開される 予定<sup>52</sup>。同規則ドラフト版では、エコデザイン指令の要求事項(カーボンフットプリント、長期使用性、 リペアビリティ、リサイカビリティ等)、エネルギーラベリング規則の要求事項(エネルギー効率)が定 められる予定。
- ESPR 案は、エコデザイン指令をレビューした結果である。DPP は ESPR 案の中で議論されている。ESPR 案は 2024 年第 1 四半期に文書案が作成される見込み。
- 2024 年第 1 四半期に公開される PV パネル・インバーターに特化した新たな実施措置には、DPP という概念は出てこない。また、当実施措置には、PV パネルの製造時のカーボンフットプリントの計算方法が定められるようである。

<sup>52</sup> 例えば、次の URL に実施措置ドラフト版の検討状況が公開されている:

https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12819-Ecodesign-European-Commission-to-examine-need-for-new-rules-on-environmental-impact-of-photovoltaics\_en、2023年12月12日取得

- エネルギーラベリング規則の下では、EPREL<sup>53</sup>というウェブサイトが公開されている。EPREL にアクセスすれば、EU 市場で販売されている製品のカタログ、及びエネルギー効率等を見ることができる。製造者は、EU 市場に製品を販売する際、EPREL に製品情報を登録する必要がある。
- PV パネルの長期使用性、特に劣化度については、EU ではまだ具体的な検討が無い。
- PV パネル・インバーターに特化した新たなエコデザインとエネルギーラベリングの実施措置が成立 すると、EPREL を通じて、PV パネルの製品カタログ、エネルギー効率等を見ることができるように なる。さらに詳細未決定であるが、EPREL には、PV パネルの物質情報を入れることも検討されて いる。例えば、物質情報としては、リサイカビリティの観点から、日本側で検討している PV パネルの ガラス中の重金属含有情報等を含めることも検討できる。
- EPREL での情報伝達項目は、ステークホルダーコンサルテーションをとおして決定する。
- 上記の要求事項は、新たに EU 市場に販売される製品を対象としている。既に導入済の PV パネル については、適用されない。
- 2024年1月からは、エコデザイン指令とエネルギーラベリング規制の枠組みの下で、PV パネルのリサイカビリティ・インデックスに関する検討プロジェクトが始まる予定。PV パネル中の部材と含有物質を特定する他、解体の容易性を評価し、最終的に一つのインデックスで PV パネルのリサイカビリティを表現することを目指す。
- 現在、QR コードの仕様・風化に関する検討も行っている。PV パネルの裏面に QR コードを貼り、QR コードをスキャンすれば、リサイクルする上で有用な情報が分かる運用を検討している。パネルの設置から撤去までは長期間かかるため、長期間経過しても読み取ることができる QR コードの仕様を技術面で検討している。
- EU では、PV パネルについて、エコデザイン指令の下で、EN IEC 61215 の設計基準を満たすことを求めている。

#### 2) WEEE 指令の下での検討状況

- WEEE 指令(Directive 2012/19/EU)は、現在、施行後 10 年間の運用結果を評価するため、 レビューが行われている。2024 年 9 月に、レビュー結果が公開される予定。
- レビューの過程で、PV パネルについては、大きさと製品寿命が他の WEEE と異なる、収集率を達成するという観点等から、独自カテゴリが必要ということが分かってきた。
- 別の観点では、Critical Raw Material Actの制定に伴い、2026 年 12 月までに、WEEE 指令の改正提案をすることを求められている。WEEE のリサイクルをとおして、Critical Raw Material(以下、「CRM」)54の回収を促進することをねらいとする。
- 2024 年からは、WEEE のどの製品にどの CRM が含まれているか、回収の経済合理性も考えながら、検討するプロジェクトが開始する。例えば、100t の PV パネルが発生した場合、どれだけの

 $<sup>^{53}</sup>$  EPREL の URL は、https://eprel.ec.europa.eu/screen/home、2023 年 12 月 12 日取得

<sup>54</sup> Critical Raw Materials Act の中では、CRM として、34 物質(ボーキサイト、アンチモン、ヒ素、重晶石、ベリリウム、ビスマス、ホウ素、コバルト、原料炭、長石、蛍石、ガリウム、ゲルマニウム、ハフニウム、ヘリウム、重希土類、リチウム、軽希土類、マグネシウム、マンガン、天然黒鉛、ニオブ、白金族、リン鉱石、銅、リン、スカンジウム、金属ケイ素、ストロンチウム、タンタル、チタン、タングステン、バナジウム、ニッケル)が指定されている(出所:<a href="https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials\_en">https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials\_en</a>、2023 年 12 月 12 日アクセス取得)

パーセンテージの CRM が含まれているかが分かるようになる。

#### 3) その他

- PV パネルの違法輸出については、公式なデータは把握されていない。ただ、PV パネルの廃棄物管理を行う EU 内の民間事業者によると、欧州では廃棄になった全パネルのうち、40%程度が第三国にリユース品と称して保証も無く輸出されているようである。
- 民間ベースの取組として、WEEE Forum の i4R では、リサイクル・リユース施設に、WEEE に含まれる有価な物質、危険な物質、爆発性の物質の情報を伝達する。

## (2) 実務側での PV パネルの情報伝達に関する検討状況

#### 1) PV パネルの排出事業者から廃棄物処理事業者に伝達される有害物質の情報

● EU 加盟国内で PV パネルを廃棄する際、廃棄物処理業者は許可の範囲内で廃棄物処理をするため、排出事業者に PV パネルに有害物質が含まれているか質問することがある。有害物質の処理が許可に含まれていない場合、有害な廃棄物の処理ができない。有害物質とは、鉛、カドミウムなどを指す。

## 2) EU における PV パネルの DPP 検討プロジェクト

● CIRCUSOL の下では制度ができるより前に、PV の DPP を検討していた。CIRCUSOL の下で 検討された DPP のデモは、PV パネルの処理の実務では使用されていない。

#### 3) EU におけるリユース PV パネルの発電所設置プロジェクト

- CIRCUSOLでは、2つの異なる型式のリユースPVパネルを用いて太陽光発電所を設置した。
- 経緯として、リユース PV パネルを用いて太陽光発電所を設置できるということが社会的に認知されていなかった。CIRCUSOL でのデモンストレーションをとおして、リユース PV パネルを用いて太陽光発電所を設置できるということを社会に示したかった。

#### 4) PV パネルのガラスのリサイクル

- EUでは、PV パネルのリサイクル事業者によって、ガラスについてはいくつかのリサイクルの方法がある。PV パネルのガラスはコンクリートブロック、または路盤材として利用されている。なお、路盤材として利用をリサイクルにカウントしない国もある。
- 現在の EU に導入にされている PV パネルのガラスは、ほぼ中国で製造されたものである。中国で製造された PV パネルのガラスには Sb が含まれている。Sb が含有されたガラスを原料にして、板ガラスを製造しようとすると、生産設備を傷める。

#### 5) その他

- ドイツ政府は、2024 年に、太陽光発電所のリパワリングを合法化する見込み。ドイツでは、2005年に、固定買取価格の期間が 20 年間の FIT が始まった。2025年になると、固定買取価格の期間が終了する PV パネルが出てくる。
- フランスの事業者によると、使用済 PV パネルを検査して、検査に合格した PV パネルの裏面に QR コードのラベルを貼り、一定期間の保証を付けて、リユース PV パネルとして再販する計画を有しているとのことであった。
- 循環経済作りには資金を要する。例えば、カーボンフットプリントの少ない PV パネル、リサイクル材を多く含有する PV パネルを調達するにはコストがかかる。そのため、金融機関と協調して、環境に配慮した PV パネル等を調達する際、資金調達面でインセンティブを働かすことができないか協議している発電事業者がいる。

## (3) 海外訪問調査のフォローアップ調査

2024 年 1 月、EU の欧州気候・インフラ・環境執行機関(CINEA: The European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency)、域内市場・産業・企業・中小企業総局 (DG-GROW: Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs)、及び研究イノベーション総局 (Directorate-General for Research and Innovation)は、デンマークのコンサルティング会社の Viegand Maagøe と契約を締結し、PV 製品のリサイクル指標に関する検討を開始した。 Viegand Maagøe は、スペインのムルシア大学 (Universidad de Murcia)、及びスペインの国立再生可能エネルギー研究所 (CENER: Centro Nacional de Energias Renovables)と共同して、本検討を行う。

2024 年 2 月、PV パネルのリサイカビリティ・インデックスに関する検討プロジェクトの下で、第 1 回 ステークホルダーコンサルテーションがウェブ会議ベースで開催された。本年度事業では、当ステークホルダーコンサルテーションに参加し、EU での検討状況に関する情報収集を行った。

経緯としては、本年度事業の下で 2023 年 12 月に欧州委員会を訪問し、本事業の概要を説明したところ、欧州委員会は本事業に関心を持ち、帰国後、先方から PV パネルのリサイカビリティ・インデックスに関する第1回ステークホルダーコンサルテーションの開催を案内された。第1回ステークホルダーコンサルテーションへの参加登録者は 150 人程度、実際に 100 人程度が参加し、参加者の中で EU 域外からの参加者は調べた限り本事業参加メンバーだけであった。本事業では、PV パネルのリサイカビリティ・インデックスの検討に対して意見を提出することができる状態になっている。

第1回ステークホルダーミーティングは、Viegand Maagøe の司会の下、DG-GROW からの主旨説明、その後 Viegand Maagøe、ムルシア大学、及び CENER により PV パネルとインバーターのリサイクル指標を開発する旨が説明された。主旨としては、以下の3点を考慮して、一つのスコアリング指標により、PV パネルとインバーターそれぞれのリサイクル性を表現することを目的としている。

- 解体関係:製品の技術仕様を定めるとともに、解体の容易性に影響を与えるパラメータを参照する (例えば、アルミニウムフレーム、ケーブル、ジャンクションボックスの分離しやすさ)
- 物質関係:PV 製品の物質組成情報の評価したものをカバーする(環境とクリティカリティの観点から見た製品とその部品中での物質の組成情報、等)

● サービス関係:メーカーにより規定される製品のリサイクル性(例えば、情報に関する規定)

また、第 1 回ステークホルダーミーティング中、及びミーティング後の調査票から得られたステークホルダーからの意見も踏まえて、リサイクル指標を開発していくとしている。今後は、2024 年 9 月に第 2 回ステークホルダーミーティング、2025 年 3 月に第 3 回(最終回)のステークホルダーミーティングが開催されることとされている。次年度事業でも当ステークホルダーミーティングへの参加を通した情報収集、及び可能であれば EU 側の政策・実務担当者との意見交換を行い、EU の事例を有効に活用していきたい。

#### 5.4.4 まとめ

#### (1) 欧州訪問調査のまとめ

- 現地訪問調査をした結果、EU では、制度面でも実務面でも、PV パネルの DPP の原型が存在していないことが分かった。デモンストレーションを目的に PV パネルの DPP は検討されていたものの、処理の実務では使われていないことが分かった。
- 2024 年第一四半期になると、PV パネルに対して、エコデザイン指令が定める要求事項(カーボンフットプリント、長期使用性、リペアビリティ、リサイカビリティ等)、エネルギーラベリング規則が求める要求事項(エネルギー効率)が定められる予定。EU 市場に新規に PV パネルを販売する者は、EPREL という公開データベースに製品情報(エコデザイン指令が定める要求事項を含む)を登録しなければならなくなる。そのため、今後、新規に製造される PV パネルについては、その型式が分かれば、長期使用性やリサイカビリティといったエコデザイン指令が定める項目を、日本からでも閲覧できるようになる可能性がある。
- EU では、既に設置されている PV パネルに対しては、情報伝達を求める制度は無い。
- 環境省の実証事業は、既に設置済みの PV パネルに対して、日本のインフラで処理する際の情報を取得し、業界にフィードバックをするものである。EU と日本の間で技術交流を続けることで、日本で検討した情報伝達項目は、EU の制度にフィードバックできるポテンシャルを持っている。新規に製造される PV パネルについては、EU の公開情報を通じて、日本では長期使用・リサイクル推進に重要な情報を今後得ていくことになる可能性がある。
- また、環境省の実証事業の下で検討を行う劣化度合いの判定方法は、日本のような発想が出てきておらず、EUの政策面・実務面では未検討の事項であることが分かった。
- EU の製品情報の伝達は、現在の制度(エコデザイン指令・エネルギーレベリング規則等)と処理に 関する制度(WEEE 指令、RoHS 指令<sup>55</sup>)に立脚したものであることから、環境省実証事業で検討 している情報伝達項目とは範囲が異なる。ただ、EU の事例を有効に利用するとともに、日本なりの 情報付加、管理方法を検討することが重要である。
- EU のエコデザイン指令及び ESPR の下での PV パネルに関する検討状況は、次年度以降も情報 収集していきたい。

<sup>55</sup> 電子・電気機器における特定の有害物質の使用を制限する EU の指令(Directive 2011/65/EU)のことを指す。

## (2) DPP データ項目の観点からのまとめ

- 「2.1.6 (3)DPP データ項目の検討」で述べた通り、本実証事業は、ESPR が定める情報要件を DPP データ項目として取り扱うことで、リサイクル側へ情報を提供しようするものである(DPP データ項目のトレーサビリティを確保しようとするものである)。ESPR の下では、トレーサビリティを確保 保するための情報要件として、以下が定められている。
  - 製品が含有する懸念物質の名称
  - 製品中の懸念物質の場所
  - 製品、その主要構成部品又は予備部品のレベルにおける、懸念物質の濃度、最高濃度又は濃度範囲
  - 製品の安全な使用のための適切な指示
  - 解体に関する情報
- ここで、最後の2つの項目の「製品の安全な使用のための適切な指示」と「解体に関する情報」については、製品安全の情報と解体時の注意事項であるため、本実証事業では直接的に取り扱わない。
- 本実証事業では、「製品が含有する懸念物質の名称」、「製品中の懸念物質の場所」、「製品、その主要構成部品又は予備部品のレベルにおける、懸念物質の濃度、最高濃度又は濃度範囲」を DPP データ項目として取り扱うことを試みる。
- 「2.1.3 サンプルの分析と今後のデータ取得の考え方の整理」に示した通り、ガラス、樹脂、及びセル上の電極別に検討を行った結果、ガラスでは As と Sb が、樹脂では F が、電極では Pb が懸念物質になると考えられた。
- 動脈側が製品データ安全シート<sup>56</sup>で懸念物質の情報伝達をしているように、本実証事業では、リサイクラーに対して、PV パネルの主要構成部品中の懸念物質を伝達することを目指す。情報伝達の方法としては、以下を想定する。
  - 既設の PV パネルに対して二次元バーコードを貼り付ける
  - リサクラー側で二次元バーコードを読み取ると、PVCJ のホームページの特定サイトに案内される
  - 特定サイトから、主要構成部品における、懸念物質の濃度、最高濃度又は濃度範囲が分かるようになる。57
- このように材料の情報をリサイクラーが得られることにより、材料の利用方法を事前に検討できるようになることが期待される。

<sup>&</sup>lt;sup>56</sup> 特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律、労働安全衛生法、及び毒物および劇物取締法の下で、特定の化学物質を出荷する際、当該化学物質に添付することが求められているデータシート。化学物質の安全な取り扱い方法等が記載されている。

<sup>&</sup>lt;sup>57</sup> 個々の型式の PV パネルに応じて懸念物質の濃度範囲を掲載するのではなく、本報告書に掲載したように、日本を代表する PV パネル中の主要部品における懸念物質の濃度範囲が分かるようになることを目指す。

# 6. 「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」 現地視察会の開催

本年度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
  - 2023年12月7日(木)
- 開催場所
  - 秋田県産業技術センター(秋田県秋田市)
- 参加者
  - 評価審査委員:3名(オンライン参加)
  - 環境省担当官:1名
  - 本事業受託者·共同実施者等:13 名
- 主な内容
  - オンライン参加の評価審査委員向けに、本年度事業で実施したミニモジュールの加速劣化試験(詳細は3.1 参照)に関する技術的な背景や進捗状況を説明
  - 現地参加の環境省担当官向けに、実際に加速劣化試験に用いた装置や、ミニモジュールの現物の視察会を実施

## 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、業務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て、業務を遂行した。

## ● 中間報告会

■ 実施日:2023年11月9日(水)

■ 開催場所:オンライン開催

## ● 最終報告会

■ 実施日:2024年2月20日(火)

■ 開催場所:東京都内会議室

## 8. 対外的な発信の実施

本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 8-2に示すとおり対外的な発信を 行った。

表 8-1 令和5年度における論文(投稿・口頭発表)発表

番号	学会·誌名	タイトル	著者·所属	発表(掲載)日、巻号
1	The 10th 3R International Scientific Conference (3RINCs)	Research on the development of data infrastructure for the proper disposal and longterm use of waste photovoltaic panels	Yuko Saito, Shogo Kumagai, Toshikazu Shiratori, Toshiaki Yoshioka	2024年3月15日~17日
2	第28回高分子分析討論会	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	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	2023年11月9日~ 10日

表 8-2 令和5年度におけるその他の情報発信

番号	種類	内容
1	講演	循環バリューチェーンコンソーシアム 第 15 回セミナー 太陽光パネルの資源循環における現状と課題 Part II(2024年1月22日(月))にて講演
2	ウェブサイト(および 会員へのメールマガ ジン)	11/30 秋田県庁産業労働部だより
3	公開資料への掲載	秋田県産業技術センター 令和 5 年度業務年報へ掲載予定(2024 年 5 月頃)

令和5年度国内資源循環体制構築に向けた再工ネ関連製品及びベース業(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	りとしたデジタル・プロダク
2024年3月 初版 2024年10月 改訂	
2027 + 10 / J WDJ	東北電力株式会社