

2024年度「太陽光発電分野に関する調査事業成果報告会」

# 海外における太陽電池モジュールのリサイクル動向

発表日：2025年4月23日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名 河本 桂一

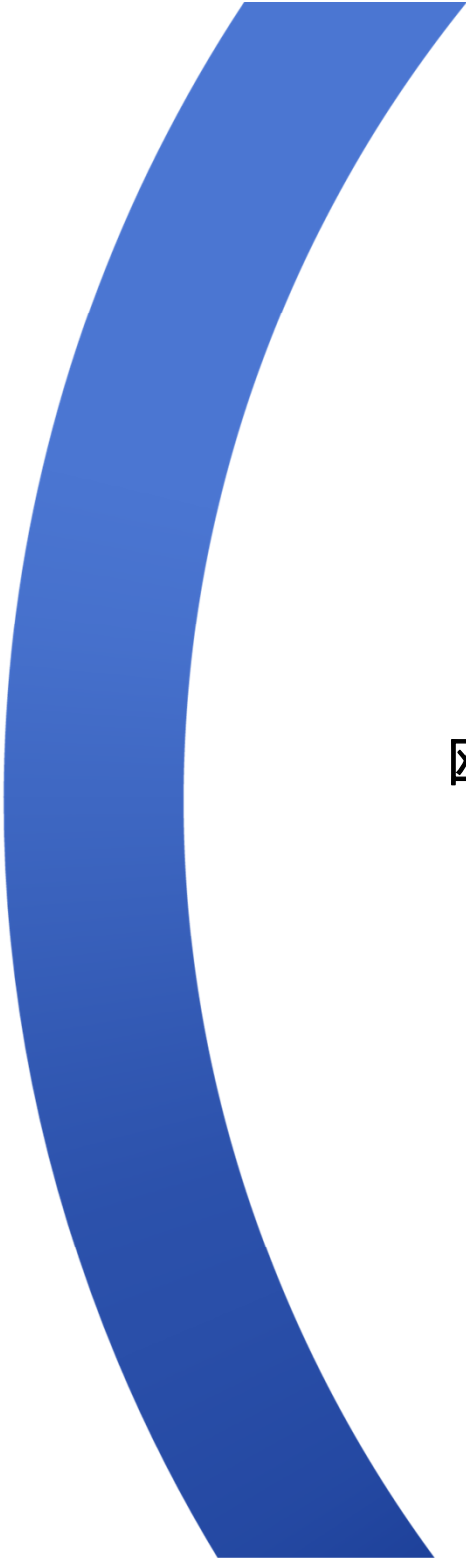
団体名 みずほリサーチ&テクノロジーズ(株)

問い合わせ先 みずほリサーチ&テクノロジーズ(株) E-mail: keiichi.komoto@mizuho-rt.co.jp TEL: 03-5281-5286

# 構 成

---

- 欧州における太陽電池モジュールリサイクルの動向
- 米国における太陽電池モジュールリサイクルの動向
- その他の国々における太陽電池モジュールリサイクルの動向
- 海外における結晶Si太陽電池モジュールリサイクル技術の俯瞰
- ペロブスカイト太陽電池リサイクルの取り組み事例
- おわりに

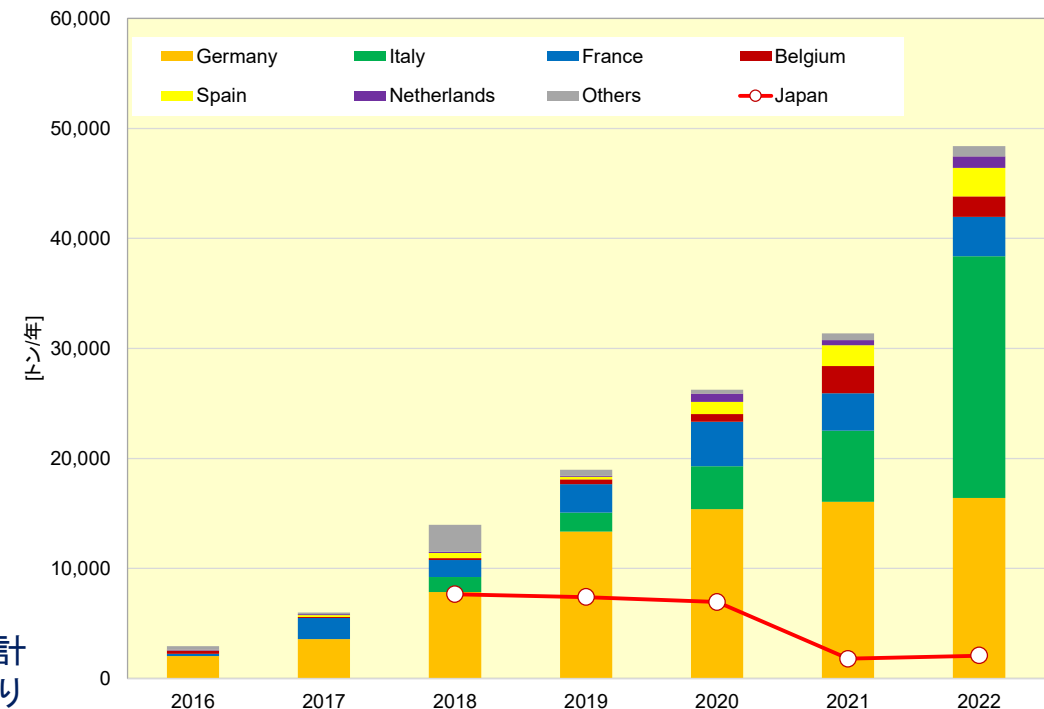


## 欧州における太陽電池モジュールリサイクルの動向

# WEEE指令による太陽電池モジュールの回収・リユース・リサイクル

## 概 略

- WEEE指令により、太陽電池モジュールに課せられる
  - 資源回収率:85%、リユース\*・リサイクル率:80% *\*preparation for reuse*
- 資源回収・リサイクル等の義務履行者
  - Producer: 欧州国内(各国)において、太陽電池モジュールを販売・供給する者
- 太陽電池モジュールの回収実績
  - 2022年:48,395 トン
    - イタリア :21,493トン
    - ドイツ :16,430トン
  - 2021年:31,380 トン
    - イタリア : 6,486トン
    - ドイツ :16,050トン



Ref.) Eurostat (2025年3月アクセス、2016～2018年分は旧統計によるデータ)、日本の回収量は環境省報告書(2024年3月)より

# 欧州における太陽電池モジュールリサイクル実施事業者の例

## フランス

- Envie 2E Aquitaine
  - ホットナイフ装置によりカバーガラスを分離
  - ガラス分離後のEVA/セルシートはROSI Solarへ
- ROSI Solar
  - 熱分解により太陽電池モジュール構造を分解し、ガラスと金属を回収
  - 回収したSiセルから、Ag、Si等の金属も分離・回収

## ドイツ

- Reiling PV-Recycling GmbH & Co. KG
  - ドイツに拠点を置くガラスリサイクル事業者
  - 結晶Si太陽電池モジュール専用ラインを建設し、2023年夏より運転開始
- First Solar
  - CdTe太陽電池モジュール製造メーカー
  - 旧モジュール工場に併設して設置されたプラントにてCdTeモジュールの分解処理

## イタリア

- Tialpi、9-tech、EcoWeTech

## スペイン

- Solar Recycling、Reciclajes Pozo Cañada SL、FCC ÁMBITO, S.A、La Hormiga Verde、Medenasa

# 欧州における太陽電池モジュールリサイクルR&Dプロジェクトの例

## EU funded projects

- PHOTORAMA(2021~2025)、EVERPV(2023~2026)、RETRIEVE(2023~2027)
  - 構造分解 → Siセル金属回収 → 回収資源の用途開拓
- FORESi(2024~2027)
  - 構造分解 → Si回収・高純度化 → SOG-Si原料としてのSiリサイクル
- RESILEX(2022~2026)
  - SiO<sub>2</sub>還元プロセスの低炭素化、モジュールからの回収Siのリサイクル用途開拓(SOG-Si原料、LiB負極活物質など)、環境配慮・CRM非使用の太陽電池開発
- ICARUS(2021~2025)
  - Siインゴット・ウェハー製造時の廃棄物、およびモジュールからの回収Siのリサイクル用途開拓(SOG-Si原料、水ガラスなど)
- QUASAR(2023~2027)
  - 太陽電池モジュールの使用後処理のルートの確立、サプライチェーンとしてのクローズドループの構築

# 欧州の太陽光発電技術開発ロードマップにおける位置づけ

## SRIA: Strategic Research and Innovation Agenda on Photovoltaics

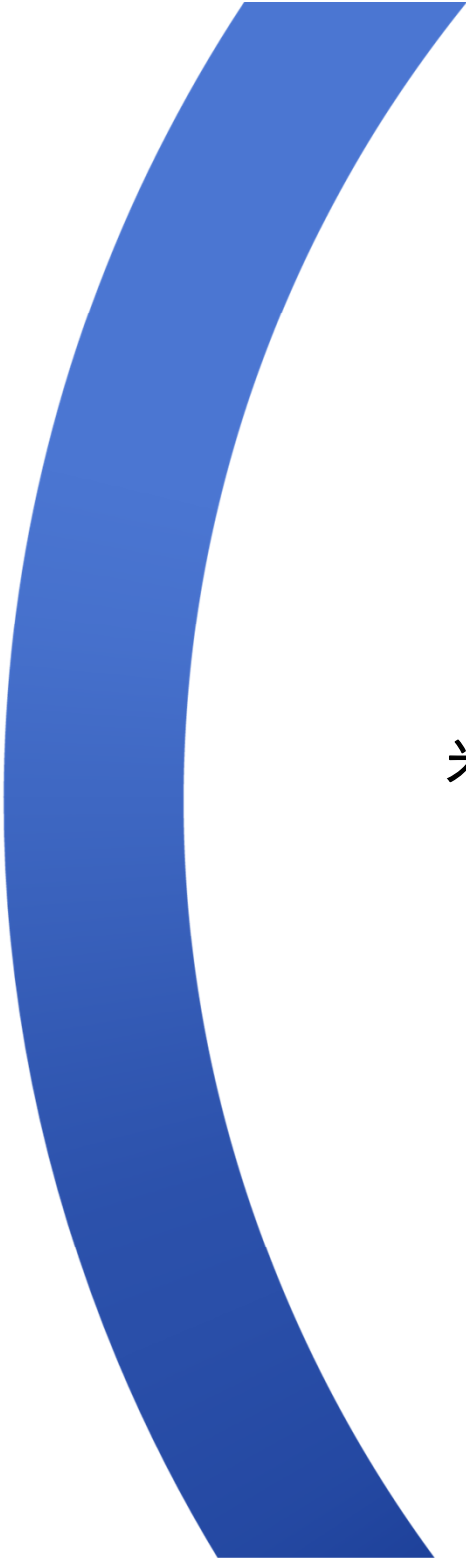
- 2022年5月に公表され、その後、2024年8月に改訂版を公表
- Challenge 2 (Lifetime, Reliability and Sustainability Enhancements) / Objective 1 (Sustainable and Circular solar PV) / Roadmap 3 (Recycle and Recover) にてKPIを設定

| KPI                                                              | Target value 2035                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Recycling of kerf                                                | recovery of about 40% of pure silicon (8N purity)                                                  |
| Recovery of polymers from PV module waste for chemical recycling | >90% recovery of PET,<br>>99% PVF, PVDF<br>>70% EVA                                                |
| End-of-Life recycling rate (EOL-RR)                              | Silicon (>98%, 6N)<br>Silver (>98%, 3N)<br>Indium (>3N), >95%<br>Copper (>95%, 3N)<br>Ga (95%, 3N) |
| Delamination; material recovery after deframing and deboxing     | >98%                                                                                               |
| Glass recovery                                                   | 100% with antimony traceability <sup>66</sup>                                                      |
| Ecodesign criteria (ratio of recycled material)                  | >80%                                                                                               |

- Challenge 2 / Objective 1 / Roadmap 4 (Technologies for sustainable manufacturing) では、リサイクルによる回収材料の使用、リサイクルSiの利用などを定性的なKPIとしてを設定

Ref.) ETIP/EERA: Strategic Research and Innovation Agenda for Photovoltaics, Aug. 2024 update

([https://media.etip-pv.eu/filer\\_public/f5/8b/f58b06d7-60fa-457a-8562-80eb71fa667c/etip\\_pv\\_-\\_sria\\_report\\_update-\\_august24.pdf](https://media.etip-pv.eu/filer_public/f5/8b/f58b06d7-60fa-457a-8562-80eb71fa667c/etip_pv_-_sria_report_update-_august24.pdf))



## 米国における太陽電池モジュールリサイクルの動向



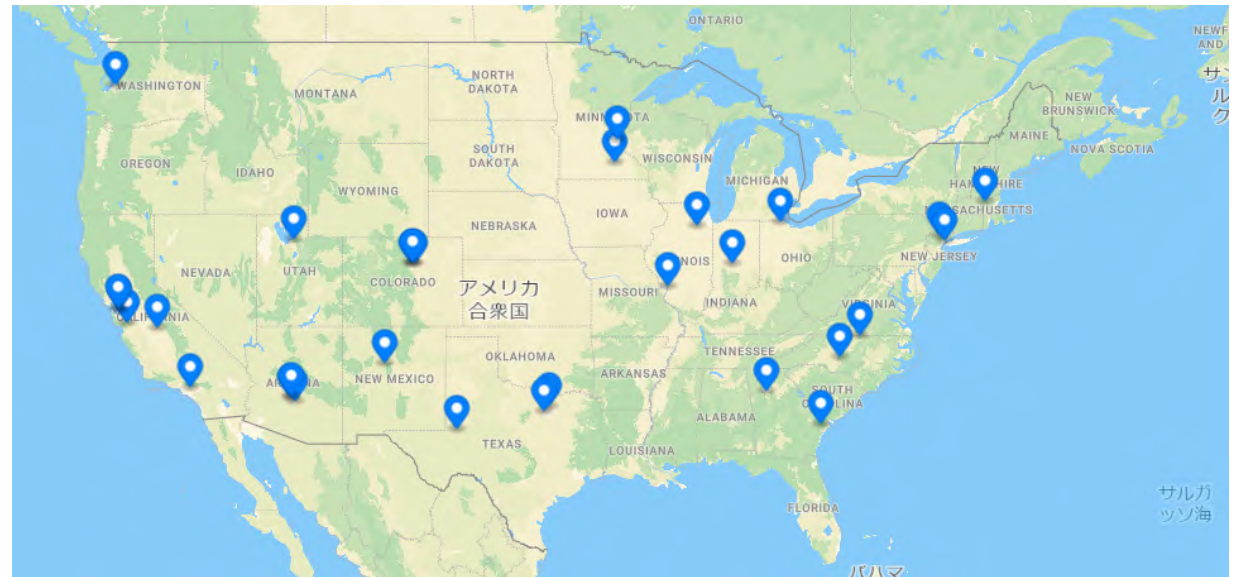
# 米国における太陽電池モジュールリサイクル等に関する取り組み

## U.S.EPA(米国環境保護庁)

- 太陽電池モジュールとリチウムイオン電池をUniversal wasteに指定する検討を開始  
政策、規制等が実施、議論されている州

- カリフォルニア、ワシントン、ノースカロライナ、ニュージャージー、ハワイなど  
太陽電池モジュールリサイクルを手掛ける事業者の例

- Electronics Recyclers International
- FabTech Solar Solutions
- First Solar
- METech Recycling
- Okon Recycling
- OnePlanet Solar Recycling
- Ontility
- Revive PV
- SOLARCYCLE
- Solar Panel Recycling.com
- We Recycle Solar



Ref.) <https://www.solarrecycle.org/vendors>

# U.S.DOE: Photovoltaic End-of-Life Action Plan (March 2022)

---

## Targets for PV EOL Research

- By 2025: 10MW of PV EOL data
  - 2000年頃までの導入量は約50MW(うち、10MWが系統連系)
  - 25年以上経過しているもののあり、数年以内にEOLに到達
  - PV EOL(システム構成機器)を管理するデータベースを構築
- By 2030: Module recycling cost <3 USD/module (<150 USD/ton)
  - リサイクル事業者によるモジュール受入価格は現状、15-45 USD/モジュール
    - 埋立処理費用は1-5 USD/モジュール(地域によっても異なる)
  - モジュールリサイクルに係る処理コストを現状の半分以下に低減

Ref.) U.S.DOE, Office of Energy Efficiency and Renewable energy: Solar Energy Technologies Office Photovoltaics End-of-Life Action Plan, March 2022

# 米国における太陽電池モジュールリサイクルR&Dプロジェクトの例

## - 2023年に発足したR&Dプロジェクト

|                                                                                                                                                                                                                                 |                                    |                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Metal Complex Inks for Low-Cost Photovoltaic Material Metallization                                                                                                                                                             | Electroninks Incorporated          | 様々な太陽電池 (Si、CdTe、ペロブスカイト等) に適用可能なインク型導電材料                                  |
| Development of Commercial-Ready Screen-Printed 23% Passivated Emitter and Rear Contact (PERC) and Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCON) Cells by Replacing Silver Contacts with Novel Low-Cost Copper and/or Aluminum Pastes | Georgia Institute of Technology    | 電極コンタクトのAgを置換する、銅・アルミベースのペーストを用いたスクリーン印刷による電極形成                            |
| PV Module Supply Chain Traceability Standards and Technology for Reuse and Recycling                                                                                                                                            | Locusview                          | 太陽電池モジュールのサプライチェーンをトレースするためのスタンダードの開発: 特に、モジュールに使用されている原材料のリサイクル・リユースに焦点   |
| Maximization of Recovery of Key Materials from End-of-Life Photovoltaic Panels                                                                                                                                                  | Solarcycle, Inc.                   | 使用済み太陽電池モジュールから高純度の原材料を回収するための技術: Mechanicalプロセスの後、環境に優しいChemicalプロセスを適用   |
| Porous Aromatic Frameworks as Multifunctional Adsorbents for Selective Metal Recovery from Spent Photovoltaic Materials                                                                                                         | University of California Berkeley  | 使用済み太陽電池モジュールのリサイクル・リユースのため、太陽電池モジュールから、様々な金属を選択的に除去するための材料・物質の開発          |
| PV Packaging Designed for Circularity                                                                                                                                                                                           | University of California San Diego | 太陽電池モジュールのリサイクル、使用材料のリユースに向け、太陽電池モジュールの分解を容易にする、太陽電池セルと充填材の間に挿入する新たな層材料の開発 |
| Photonic Curing of Printed Copper Contacts for High Efficiency and Low-Cost Silicon Heterojunctions                                                                                                                             | University of Central Florida      | 太陽電池セル電極コンタクトのAg代替として、レーザーを持ちいて銅電極を形成する技術の開発                               |
| Recycling of End-of-Life Solar Panels using Near-critical Fluids and Ozone                                                                                                                                                      | University of Kansas               | 回収物質の品質と収率を最大にする、CdTe太陽電池モジュールの分解、分離プロセスの開発                                |

# 米国における太陽電池モジュールリサイクルR&Dプロジェクトの例

## - Materials, Operation, and Recycling of Photovoltaics (MORE PV) (2024年～)

|                                                                                                            |                                                                                 |                                                                                                                              |                                                                                                                                             |                                                                                                                                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Topic Area 1. MORE Connection: Connecting PV Materials, Design, Installation, Performance, and End of Life | PVシステムとその構成要素のコストとライフサイクルへの影響を削減し、PV技術のエネルギー、経済、環境への影響指標を最適化する技術および設計ソリューションを開発 | AgroPV: Orchestrating the Complete Photovoltaic Lifecycle Using Generative Artificial Intelligence and Spatiotemporal Graphs | Case Western Reserve University with the University of Central Florida and Sandia National Laboratory                                       | 太陽光発電システムのライフサイクルにおけるエネルギー消費やコスト、環境影響を最小化するためのAIツールの開発                                                                                     |
|                                                                                                            |                                                                                 | Raising the Bar: Data-Driven Standards to Increase and Incentivize PV Resiliency                                             | kWh analysis with NREL, Det Norske Veritas Group and STANCE                                                                                 | 自然災害等によるダメージに対する強靱性を改善するためのスタンダードの開発                                                                                                       |
|                                                                                                            |                                                                                 | Contactless Multi-Curve Tracer for Enhanced Photovoltaic System Installation, Operations, Maintenance and Performance        | University of North Carolina at Charlotte with Portland State University, Pordis LLC, SOLV Energy, Arizona State University and Duke Energy | 非接触型のI-Vトレーサーの開発                                                                                                                           |
| Topic Area 2. Solar Partnership to Advance Recycling and Circularity (Solar PARC)                          | 太陽光発電システム機器を低コストで再利用、改修、修理、リサイクルを可能にする技術と方法、およびこれらの材料の安全な廃棄のためのベストプラクティス        | Breaking Barriers to Enable Soth Technology Circularity (BBEST Circularity))                                                 | EPRI, with about 30 organizations                                                                                                           | 太陽光発電システムの循環性とライフサイクル環境影響を改善するため、関連する既存技術の評価、リサイクル義務化等の政策レビュー、太陽電池モジュールの組成や有害性の分析、使用後処理のベストプラクティスの開発、長期計画を支援する”End-of-life database”を開発を実施 |



その他の国々における太陽電池モジュールリサイクルの動向

# 韓国における太陽電池モジュールリサイクルの動向

## EPRにより太陽電池モジュールリサイクルの義務化

- きっかけは、2018年7月の台風被害による大量の太陽電池モジュール廃棄物の発生
- 産業界との議論、合意を経て、2023年1月より、太陽電池モジュールのリユース・リサイクルが義務化
- モジュール回収重量に対する80%のリユース・リサイクルが必要
- 政府認可の非営利団体(E-Cycle Governance)が所管し、回収・リサイクル事業者は同単体に登録し、リサイクル処理は許認可取得が必要

## 太陽電池モジュールリサイクルを手掛ける事業者の例

| 地 域                | 事業者名                | 地点・所在地    | 処理能力(トン/年) |
|--------------------|---------------------|-----------|------------|
| Metropolitan area  | Won Kwang S&T       | Incheon   | 4,500      |
| Gyeongsang region  | Yoonjin Tech        | Kyeongbuk | 2,400      |
| Chungcheong region | Chungbuk Technopark | Chungbuk  | 4,080      |
| Honam region       | Seokchung Korea     | Jeonbuk   | 2,145      |
| Jeju region        | JRC                 | Jeju      | 1,600      |

Ref.) E-Cycle Governance, PV Waste Panel Collection and Recycling System and Development Plans, 2nd PV Circular Economy Workshop, May 20, 2024



# 中国における太陽電池モジュールリサイクルの動向

## 太陽電池モジュールリサイクル等への取り組み

- 太陽電池モジュールリサイクルや資源循環をサプライチェーンの一部と位置づけ、取り組みを展開
- 2023年8月: National Development and Reform Commission (NDRC) が中心となり、風力発電および太陽光発電設備のリサイクル推進のためのガイドラインを作成
- 2024年: State Council (中国国務院) が風力発電ブレード、太陽電池モジュール、蓄電池等のリサイクルを推進する仕組みの制定を提案
- 2022年: ECOPV PV Recycle Industry Development Center 設立 → 2025年2月 Exhibition hall 開設

## 太陽電池モジュールリサイクルを手掛ける事業者の例

|                                                     |                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| JinkoSolar Co., Ltd.                                | 結晶Si太陽電池モジュールの熱分解によりガラスと電極、セル金属を回収、化学的処理により、SiセルからAgとSiを回収。                                                                                                                              |
| Yingli Energy Co., Ltd.                             | 環境に配慮した処理技術を目指し、低温での処理が可能な機械的処理（熱したナイフによるモジュール切断）を採用。                                                                                                                                    |
| RESOLAR Energy Technology Co., Ltd.                 | 結晶Si太陽電池モジュールを機械的処理により粉砕し、化学的処理によりガラスと金属を回収。化学的処理は自社開発の溶剤を使用し、ガラスの回収純度は99.9%。Siセルから分離、回収したSiの純度は6N (99.9999%) で、太陽電池用Si原料としてのリサイクルが可能。2024年にTrina Solarと協力し、使用済みモジュールからの回収材料によるモジュールを製造。 |
| State Power Investment Group Co., Ltd.              | 機械的処理によりフレームと端子ボックスを取り外し、モジュールを加熱してバックシートを除去、熱分解によりガラスと金属を分離し、化学的処理により、SiセルからAgとSiを回収。現在、両面ガラス構造のモジュールの処理に対応する技術を開発中。                                                                    |
| Changzhou Ruisai Environmental Technology Co., Ltd. | 機械的処理によりフレームと端子ボックスを取り外し、ガラス面の研削によりガラスとEVA/セルシートを分離、EVA/セルシートの熱分解により電極材料とSiセルを回収し、化学的処理によりSiセル金属を分離・回収。                                                                                  |
| Fachmann Intelligent Technology Co., Ltd.           | 機械的処理、熱化学処理により、結晶Si太陽電池モジュールを分解し、分離・精製工程を経て、アルミフレーム、ガラス、Si、Ag、Cu およびポリマーを回収。                                                                                                             |
| Jereh Environmental Technology Co., Ltd.            | 結晶Si太陽電池モジュールからアルミフレームと端子ボックスを取り外し、熱分解（排ガス処理含む）、分離・選別を行う装置を開発。Siウェハー材料の回収率は95%以上。                                                                                                        |
| Yceryg Technology Co., Ltd.                         | Siウェハーおよび太陽電池セル製造を手掛ける事業者。可搬型の結晶Si太陽電池モジュール分解装置を開発。                                                                                                                                      |

# 豪州における太陽電池モジュールリサイクルの動向

## 太陽電池モジュールリサイクル等への取り組み

- 2016年来、Product Stewardship Actにおいて太陽光発電が対象製品候補としてリストアップされ、その後の検討にて、太陽電池モジュールを対象とすることは妥当という方向性
- 2023年: DCCEEW (Australian Department of Climate Change, Energy, the Environment, and Water) において、具体的な規制スキームの案を提示
- このスキームに基づく規制が2025年より実施される予定であったが、まだ議論の最中であり、現時点において実施には至っていない。

## 太陽電池モジュールリサイクルを手掛ける事業者の例

|                            |                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PV Industries              | アルミフレームと端子ボックスを分離した後、ガラス、銅タブ、Siセルおよびポリマーを回収し、回収資源は地域の製品製造事業者へ供給。現在、SiセルからAgを回収する技術を開発中。                                                                                                |
| Elecsome                   | 機械的処理により、アルミフレーム、端子ボックス、ガラス、銅タブ、Si、Agおよびポリマーを回収し、回収率は97%。年間処理能力は太陽電池モジュール100万枚。ガラスは微分化してコンクリート材料とし、SolarCreteとして再生。現在、大学と共同で、SiとAgの純度を向上（それぞれ98%、99.9%）させるための研究を実施中。                   |
| Sircel Solar               | 2024年に3サイトで操業開始を開始し、処理能力はそれぞれ2,000トン/年。Parkesサイトは日本のエヌ・ピー・シー社製のホットナイフ処理装置を導入し、Dandenongサイトはシュレッダー、Yatalaサイトは現時点ではフレーム除去のみ。                                                             |
| Solar Renew                | パイロットプラントを建設して運転。機械的処理によりアルミフレームと端子ボックスを分離した後、加熱してバックシートを分離、さらに熱分解によって充填材を除去してガラスと金属を回収。異なるプロセスとして、モジュール裏面の研削により、ガラスと銅タブ、Siセルを分離する技術を開発中で、いずれの技術もカバーガラスを板上のまま回収可能。SiセルからAgを回収する技術も開発中。 |
| Solar Recovery Corporation | 2025年5月に2サイトで処理能力4,600トン/年のプラントを運転開始予定。<br>処理技術は明らかではないが、ガラス、アルミフレーム、銅タブおよびSiセルの99%以上の回収が可能。                                                                                           |
| Pan Pacific Recycling      | 機械的処理によるリサイクル（分解）処理プラントを運転。処理能力は240,000モジュール/年。                                                                                                                                        |
| Lotus Energy Recycling     | 破碎機およびミルによりモジュールを粉碎。                                                                                                                                                                   |





海外における結晶Si太陽電池モジュールリサイクル技術の俯瞰

# 結晶Si太陽電池モジュールリサイクル技術の動向（概観）

## - ガラス分離技術を中心とした取組から、ガラス分離後の金属回収・用途開拓に拡張

### 2010年代

構造分解（デラミネーション）が主な焦点

- 既存技術による大量処理：破碎→選別
- ガラスの分離・回収
  - 熱分解/燃焼
  - ガラス水平分離
    - ホットナイフ®、セパレータ／ブレード、ダイヤモンドワイヤーなど
  - ガラス研削・粉砕による回収
    - スクレーピング、ブラスト、ハンマーなど
- 充填材/セルシート研削
  - ウォータージェットなど
- その他
  - 光照射、レーザー、パルスなど

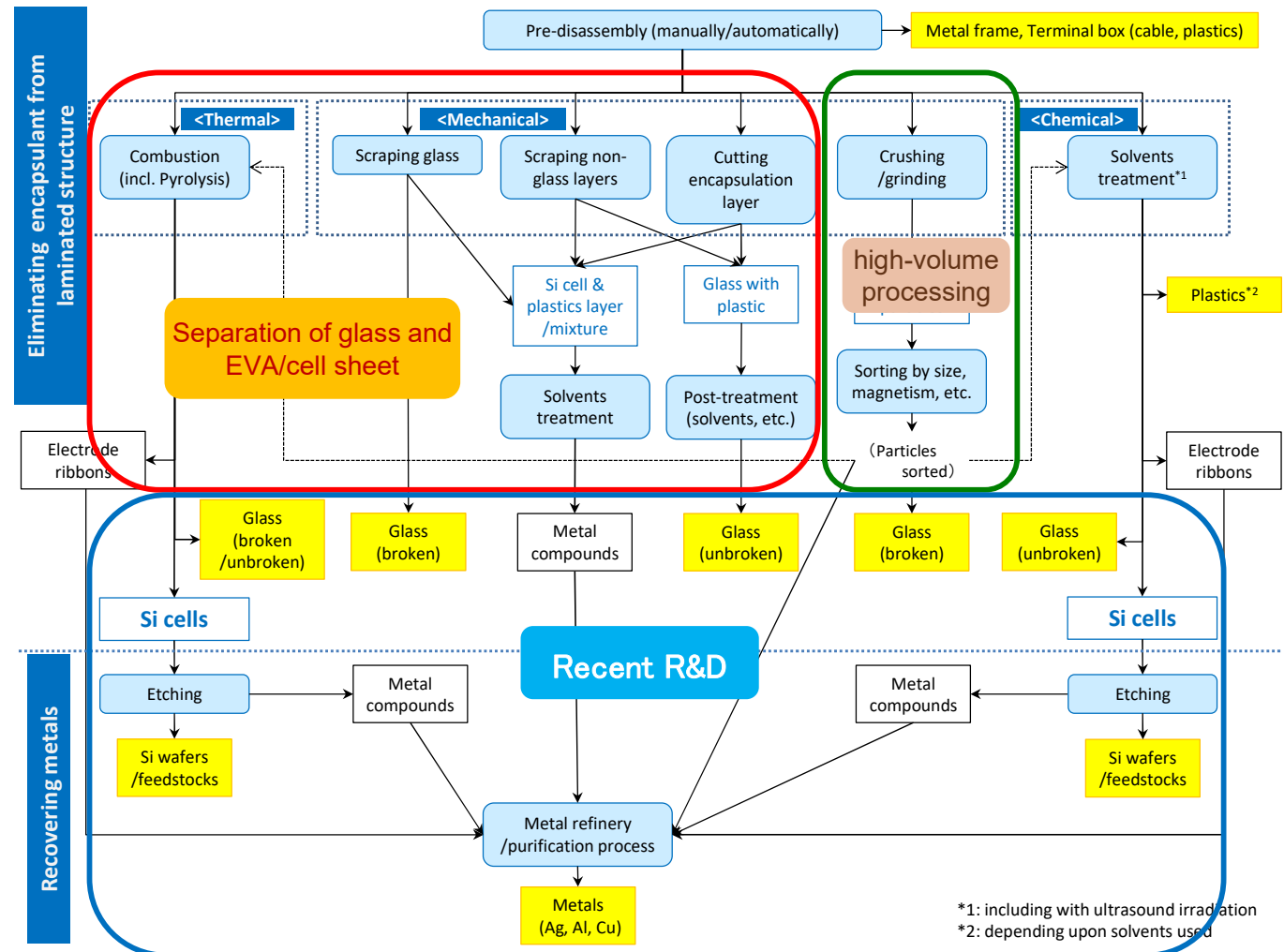
### 2020年代

セル金属回収にも焦点（Si, Ag, Cu, In）

- 化学的手法が中心
  - 酸・有機溶剤、電気化学的手法、など
- 環境に優しい手法の探索

回収物の高付加価値化（脱ダウンサイクル）

【結晶Si太陽電池モジュールリサイクルの処理フロー】



Ref.) K. Komoto, et al.: End of Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies, IEA-PVPS T12-10: 2018 を一部改変

# リサイクル実施企業における対象領域と資源用途

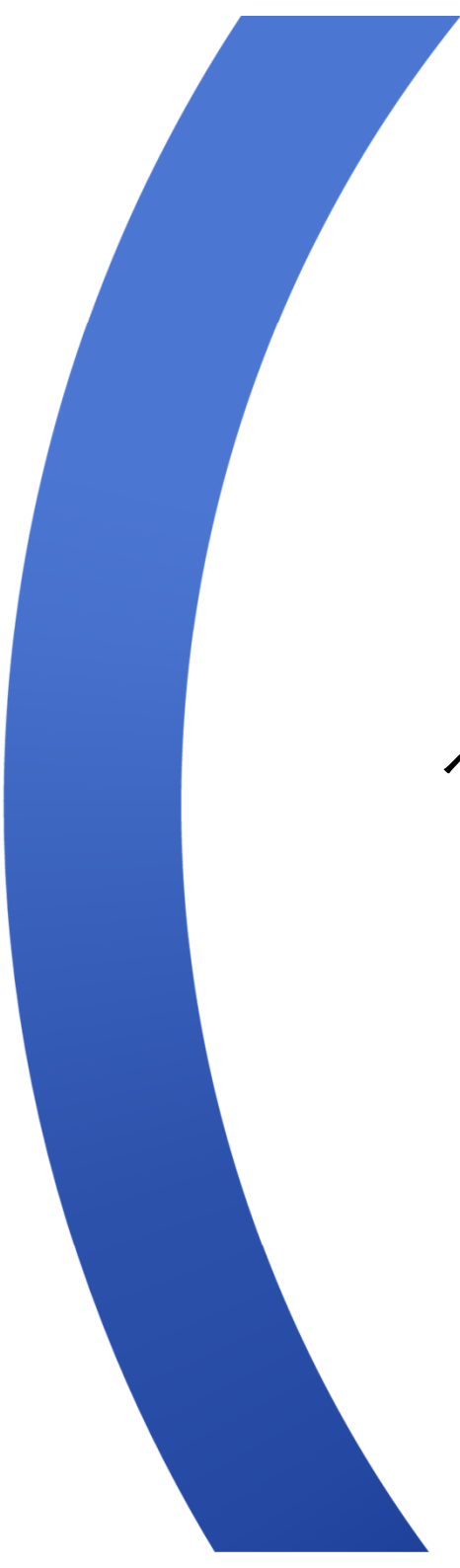
| 国・地域 | 企業・プロジェクト                                 | 構造分解(ガラス分離等)         | セル金属分離回収     | 回収率・資源用途等                                                  |
|------|-------------------------------------------|----------------------|--------------|------------------------------------------------------------|
| 欧州   | Reiling                                   | 破碎処理→分離・選別           | (セルとポリマーは分離) | 回収率:92%~<br>・ガラス:建設資材、断熱材<br>・Siセル:精錬事業者へ<br>・ポリマー:焼却(熱回収) |
|      | ROSI Solar                                | 熱分解                  | 薬液処理         | 回収率:90%程度<br>・ガラス:ガラス製造業へ<br>・セル金属:精錬事業者等へ                 |
|      | ENVIE                                     | ホットナイフ               |              | 回収率:95%<br>・ガラス:ガラス製造業へ                                    |
|      | FLAXRES                                   | 光パルス照射               | (セルとポリマーは分離) | 回収率:~100%(パイロット)                                           |
| 中国   | Jinko Solar                               | 熱分解                  | 薬液処理         | 回収率:92%                                                    |
|      | Yingli group                              | Hot-knife→粉碎         | (セルとポリマーは分離) | 回収率:99%                                                    |
|      | Resolar Energy                            | 粉碎処理                 | 薬液処理         | 回収率:n.a.<br>・Si:太陽電池原料(6N)<br>・ガラス、Al:太陽電池用<br>・その他:n.a.   |
|      | Yellow Hydropower Development             | 機械的処理 → 加熱処理 → 化学的処理 |              | n.a.(現状、パイロットライン)                                          |
|      | Changzhou Ruisai Environmental Technology | 機械的処理/熱分解            | 薬液処理         | n.a.(現状、パイロットライン)                                          |
| 韓国   | WongKwang S&T                             | Hot-blade→粉碎         | (セルとポリマーは分離) | n.a.                                                       |

# 技術開発プロジェクトにおける対象領域

| 国・地域 | 機関・プロジェクト                | 構造分解(ガラス分離等)             | セル金属分離回収 | 回収資源再生・用途開発                 |
|------|--------------------------|--------------------------|----------|-----------------------------|
| 欧州   | <u>PHOTORAMA</u>         | ウォータージェット／<br>ダイヤモンドワイヤー | 深共晶溶媒→電解 | 回収資源用途開拓                    |
|      | <u>EVERPV</u>            | 裏面研削/IRランプ               | 化学的処理    | 回収資源用途開拓                    |
|      | <u>RETRIEVE</u>          | ガラス・セル金属・ポリマーの回収         |          | 回収資源用途開拓                    |
|      | <u>FORESi</u>            | 機械的処理                    | 化学的処理    | Si: 太陽電池原料再生                |
|      | <u>ReSiLEX</u>           |                          |          | Si: 太陽電池原料再生<br>／LiB負極活物質利用 |
|      | <u>ICARUS</u>            |                          |          | Si: 再生用途開拓                  |
|      | <u>QUASAR</u>            | 熱分解／<br>ウォータージェット        | 化学的処理    | 回収資源用途開拓                    |
| 米国   | SolarCycle               | 機械的処理/静電分離               | 化学的処理    |                             |
|      | <u>BBEST Circularity</u> |                          |          |                             |
| 豪州   | Univ. of NSW             | 熱分解                      | 化学的処理    |                             |
|      | Swinburne Univ.          |                          |          | Si: 太陽電池原料再生                |

# 技術開発プロジェクトにおける回収物・回収率および用途の目標

| 国・地域 | 企業・プロジェクト        | 回収物                                        | 回収目標                                     | リサイクル用途                                            |
|------|------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 欧州   | <u>PHOTORAMA</u> | ガラス、Alフレーム、Cu、Si、Ag、<br>In (from HJT)、ポリマー | 全体: 98%<br>金属: 95%                       | n.a.                                               |
|      | <u>EVERPV</u>    | ガラス、Alフレーム、Cu、Si、Ag、<br>EVA、PET/PVF        | ガラス: 100%<br>EVA/PET: 純度95%<br>Ag: 純度99% | ガラス: 板ガラス<br>ポリマー: 種類別用途開拓                         |
|      | <u>RETRIEVE</u>  | ガラス、Alフレーム、Cu、Si、Ag、<br>ポリマー               | ガラス: 99%<br>Si: 98%、Ag: 99%              | ガラス・Si: 太陽電池用<br>Al、Cu、Ag: 非鉄リサイクル<br>ポリマー: 合成ガス原料 |
|      | FORESi           | n.a.                                       | 95%                                      | Si: SOG-Si原料 (投入の15%以上)                            |
|      | <u>RESiLEX</u>   | Si                                         | n.a.                                     | Si: 太陽電池原料、LiB負極材料<br>(回収Siの97%以上を再生利用)            |
|      | <u>ICARUS</u>    | Si、シリカ、グラファイト<br>(ウエハ・インゴット製造廃棄物から)        | 95%                                      | Si: 太陽電池原料 (6-8N)、水ガラス                             |
|      | <u>QUASAR</u>    | ガラス、Alフレーム、Cu、Si、Ag、<br>(ポリマー)             | Si: 90%、Ag: 70%<br>ポリマー: 90%             | ガラス: 80%以上をフロートガラス<br>金属: 太陽電池用                    |
| 米国   | SolarCycle       | ガラス、Alフレーム、Cu、Si、Ag、<br>(ポリマー)             | Si: 70% (純度98%)<br>Ag: 90% (純度99.9%)     | n.a.<br>(ガラスは太陽電池モジュール用)                           |
| 豪州   | Univ. of NSW     | ガラス、Alフレーム、Cu、Si、Ag                        | 95%                                      | n.a.                                               |
|      | Swinburne Univ.  | Si、Ag                                      | Si: 6N、Ag: 90%                           | Si: 太陽電池原料                                         |



## ペロブスカイト太陽電池リサイクルの取り組み事例

# ペロブスカイト太陽電池リサイクルの取り組み事例

## ‘PeroCycle’ project

- 実施期間は2024年2月～2026年1月、ZSWが幹事機関となり、Solar Materials GmbH、Solaveni GmbHと共同で実施
- The German Federal Environmental Foundationがプロジェクトを支援

### [ミニモジュール作製: ZSW]

- ガラス基板を用いたペロブスカイト太陽電池ミニモジュールを作製

### [モジュール構造分解: ガラス基板(ペロブスカイト層付き)分離: Solar Materials]

- ‘Thermomechanical process’により、ガラス基板を分離回収
- 充填材等は混入せず、ペロブスカイト層除去後のガラスはContainer glassとしても利用可能

### [ペロブスカイト層の分離回収: Solaveni]

- 低コストで環境負荷の小さいプロセスを開発(有害・有毒な溶剤や高温での処理を回避)
- ペロブスカイト層の90%を、純度99%で回収することが目標

### [回収ペロブスカイトを用いたモジュール再生: ZSW]

- 初期製品に対比で90%以上の効率を実現することが目標

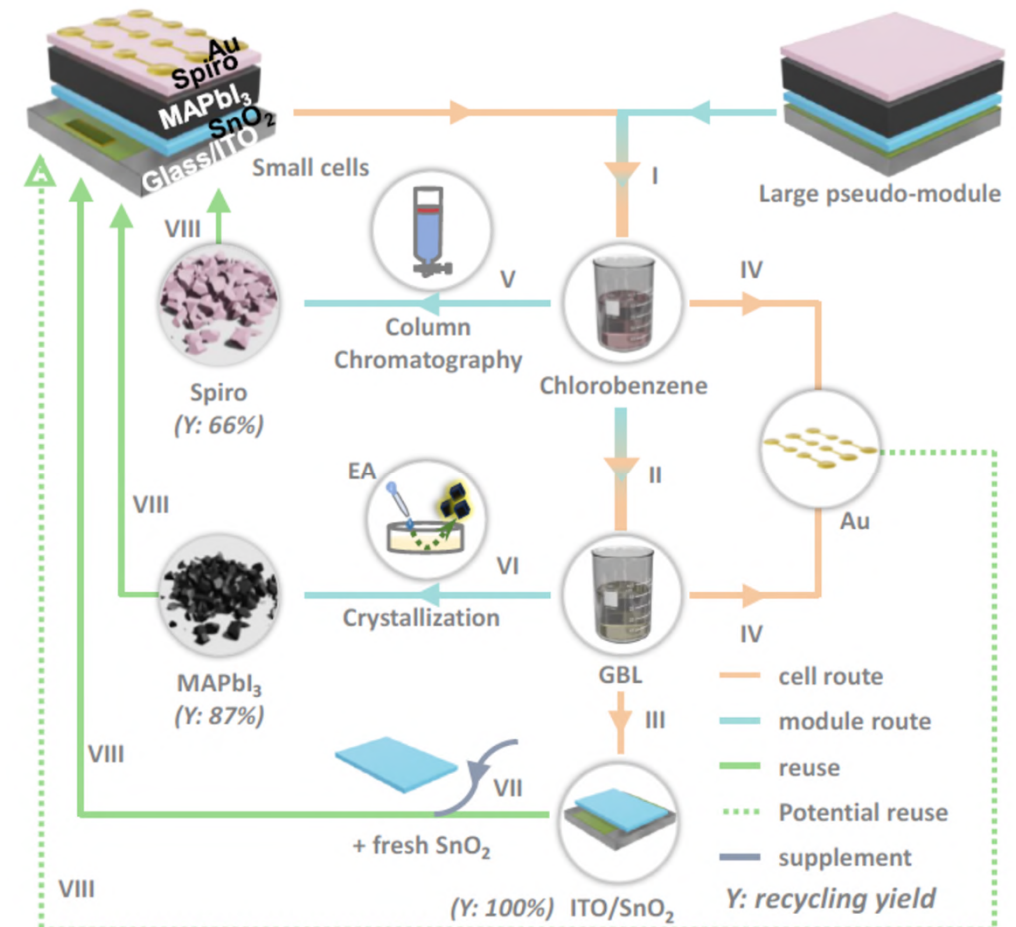
Ref.) ZSW news (<https://www.zsw-bw.de/en/newsroom/news/news-detail/news/detail/News/thinking-about-the-future-of-new-photovoltaic-materials-today.html>), 14 Sep. 2024,  
C. Wessendorf: ZSW 3<sup>rd</sup> Recycling workshop, 14 October 2024



# ペロブスカイト太陽電池リサイクルの取り組み事例

## ‘The Helmholtz Institute Erlangen-Nürnberg for Renewable Energy (HI ERN)’

- Cradle-to-Cradle Design of Photovoltaic Modules (C2C-PV) プロジェクトの一環として、ガラス基板のペロブスカイト (MAPbI<sub>3</sub>) 太陽電池セルのリサイクルフローを研究
  - クロロベンゼンによるSpiro層の除去
    - Column ChromatographyによるSpiro層原料回収 (収率66%)
  - GBL (γ-ブチロラクトン) によるMAPbI<sub>3</sub>層の除去
    - 酢酸エチルを添加し、MAPbI<sub>3</sub>層原料回収 (収率87%)
  - 透明導電膜付きガラスの回収
- 回収Spiro層原料、回収MAPbI<sub>3</sub>層原料および回収ガラスを利用した太陽電池セルを再生
  - 初期製造品と比較して、いずれの場合もセル性能に大差がないことを確認
  - 環境負荷の低減 (低環境負荷の溶媒選定) およびコスト低減が課題



Ref.) Z. Wu, et al: Recycling of MAPbI<sub>3</sub> Perovskite Solar Cells, 41<sup>st</sup> EU-PVSEC, Vienna, Austria, September 2024

# ペロブスカイト太陽電池リサイクルの取り組み事例

## その他のペロブスカイト太陽電池リサイクル研究事例

- 1) 有機溶剤浸漬(ブチルアミン)→乾燥後にトルエンにてペロブスカイト層除去  
: X. Feng (Southern University of Science and Technology, China), et al. (2021)
- 2) 有機溶剤浸漬(エチレン)→水浸漬→乾燥後にペロブスカイト層を研削除去  
: M. Ren (Shanghai Jiao Tong University, China), et al. (2021)
- 3) DMF:DMSOにてペロブスカイト層を溶解除去  
: F. Deng (Beijing University of Chemical Technology, China), et al. (2022)
- 4) KI溶液にてペロブスカイト層を溶解除去(本件発表者が研究している手法)  
: T. O'Hara (South Dakota School of Mines and Technology, USA), et al. (2023)
- 5) DMFにてペロブスカイト層を溶解除去  
: H. J. Kim (Sungkyunkwan University, Korea), et al. (2023)

Ref.) J. P. Herrera, et al.: Comparative life cycle assessment of different recycling processes for perovskite solar cells, 52<sup>nd</sup> IEEE-PVSC, Seattle, WA, USA, June 2024



まとめ

# 日本の技術と海外の技術の比較

- 欧州では、リサイクルによる資源循環をサプライチェーンの一部と位置づけ、ガラスや金属、ポリマーの回収率を個別に設定した技術開発を実施しており、ガラスやSiは太陽電池向けリサイクルも目指している。太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギーの'Made in Europe'という政策的旗印も後押ししている。
- 米国や中国、豪州も、Siセル金属の分離回収までを手掛け、太陽電池向けリサイクルも視野に入れており、中国では既に回収Siの太陽電池利用を始めている。
- 日本は、ガラス分離（構造分解・デラミネーション）の技術が多様で、回収したガラスの用途も様々な可能性が検討されている。一方、ガラス分離後の残存物は、ポリマー分離を行っている企業が一部あるものの、主流はそのまま非鉄金属事業者へ送られており、自発的な金属回収には至っていない。
  - 2020～2024年度NEDO事業による開発技術はセル金属の回収も手掛けている。
- 日本においても、リサイクルをサプライチェーンの一部と位置づけ、ガラスやSiをはじめとする構成材料・金属の高収率・高純度な回収、および付加価値の高いリサイクル用途の開拓に注力していくことが望ましい。
- ペロブスカイト太陽電池や両面ガラス構造モジュールなど、新しいタイプのセル・モジュールへの取り組みは緒についたばかりであり、日本の技術開発によって、世界を先導していくことが期待される。

# 太陽電池モジュールリサイクルの推進に向けて

- 太陽光発電導入は加速的に拡大、見通しを大きく上回っており、使用済み太陽電池モジュールの大量発生時期の早期化、発生量の増大を予見させる。適正な使用後処理を施すためには、政策的および技術的なアプローチを効果的に融合させて推進する必要がある。
- WEEE指令のような規制の有無にかかわらず、各国・地域において、公的支援を受けた技術開発推進に加え、事業としてリサイクルを手掛ける企業が出現し、実施している。
- 現状、取扱量の少なさ、技術の成熟度、回収・運搬の非効率さ、分解処理後の資源の市場価値の低さが、リサイクルコストの低減、リサイクルの経済性を阻害する要因となっているが、中長期的に予見される使用済み太陽電池モジュールの大量発生への適切な対応に向けて、使用後処理プロセス全体の効率化を高めていく必要がある。
- リサイクル技術への取り組みは、デラミネーションにとどまらず、分解後の金属資源の回収、ガラスも含めた回収資源の高付加価値化に向けた広がっている。太陽電池モジュールへの資源循環も目指すべき姿の一つとなるが、回収資源の純度向上、添加物対策などが課題として残されている。
- 中長期的な太陽光発電導入拡大に対して、原料資源の供給不足（調達困難）を指摘する向きもあるが、将来にわたる太陽光発電設備容量の維持・拡大に向けて、長期間の運転を終えた太陽光発電のリパワリング／太陽電池モジュールのリプレースが市場の主役となる時代には、モジュールリサイクルは重要な資源供給源となる。
- リサイクル技術や使用後処理プロセスの改善・効率化に加え、市場導入が期待される新材料、新構造を有する全ての太陽電池モジュールにおいて、‘Design for Recycling’の視点が必要である。

# ご清聴ありがとうございました。

ともに挑む。ともに実る。



【本資料に関するお問い合わせ】  
みずほリサーチ&テクノロジーズ  
サステナビリティコンサルティング第1部  
TEL: 03-5281-5286