

「太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト」

事業原簿【公開】

担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー部
-----	---------------------------------------

—目次—

概 要	i
プロジェクト用語集	v
I. 事業の位置づけ・必要性について	
1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	I -1
1.1 NEDO が関与することの意義	I -1
1.2 実施の効果	I -1
2. 事業の背景・目的・位置づけ	I -1
II. 研究開発マネジメントについて	
1. 事業の目標	II -1
1.1 研究開発の目的	II -1
1.2 研究開発の目標	II -1
2. 事業の計画内容	II -1
2.1 研究開発の内容	II -1
2.2 研究開発の実施体制	II -10
2.3 研究開発の運営管理	II -16
2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性	II -17
3. 情勢変化への対応	II -17
4. 評価に関する事項	II -17
III. 研究開発成果と実用化の見通し	
1. 分野別、課題に対する主要な成果	III -1
2. 個別テーマの成果と実用化見通し	III -13
3. 成果発表の件数	III -167
IV. 添付資料	
添付資料 1：プロジェクト基本計画	IV -1

概要

最終更新日	2019年11月11日
-------	-------------

プログラム (又は施策)名						
プロジェクト名	太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト	プロジェクト番号	P14020			
担当推進部/PMまたは担当者	<p>新エネルギー部</p> <p>PM : 山田 宏之 主任研究員 (2014年3月~2019年6月)</p> <p>山崎 光浩 主任研究員 (2019年7月~現在)</p> <p>担当者: 山本 厚行 主査 (2014年3月~2014年4月)</p> <p>穂積 潤一 主査 (2014年5月~2016年4月)</p> <p>南 悌二 主査 (2016年5月~2018年4月)</p> <p>嶋田 聡 主査 (2018年5月~現在)</p>					
0. 事業の概要	<p>太陽光発電システムのリサイクル社会の構築に向け、廃棄物の大量発生回避を低コストに実現する技術として、使用済み太陽光発電システムのうち、分解処理が困難である太陽電池モジュールの低コスト分解処理技術を確認するとともに、撤去・回収・分別・リユース関連技術など、リサイクルコストの低減効果を実証する。</p>					
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>太陽光発電の健全な普及拡大のためには、使用済みの太陽光発電システムを適正に処理する対策や手段を検討しておく必要がある。一方、公共性が極めて高いことや、市場が苛烈な競争状態にあることから、コスト増につながるリサイクルシステムの民間主導による自律的な構築は非常に困難である。そのため、国主導による使用済み太陽光発電システムの適正処理に関する検討や技術開発などの取り組みが必須であることから、NEDOが主導して支援することは意義がある。</p> <p>太陽光発電システムのリサイクル処理において、太陽電池モジュールの分解処理に関する従来技術としては、ガラスリサイクルを目的とした技術が一部存在するものの、低品位のガラス回収に留まり処理コストが高いものになる等の課題があった。</p> <p>また、リサイクルに係る費用負担の低減には、撤去や回収など分解処理以外における低コスト化も有効であると思われるが、その有効性や課題、効果は明確になっていないため、低コスト化技術の有効性や実現可能性、課題や目標コストを明確化する必要がある。</p> <p>以上より、太陽光発電システムのリサイクル社会の構築に向け、廃棄物の大量発生回避を低コストに実現する技術として、太陽電池モジュールの低コスト分解処理技術の確立と、撤去・回収・分別・リユース関連技術など、リサイクルコストの低減効果の実証を目指す、本プロジェクトの目的は妥当と考えられる。</p> <p>近年の導入普及の拡大や、国会附帯決議への対応など、リサイクル社会の構築は強く求められている。リサイクル社会の早期実現のためには、廃棄物の大量発生回避を低コストに実現する技術の早期確立が必須であるが、市場に動機が無く、市場原理に任せては進まない事業領域であるため、民間主導では早期確立は望めない。従って、NEDOが本プロジェクトにより、リサイクル処理技術の早期確立を支援することが必要であると考えられる。</p>					
II. 研究開発マネジメントについて						
事業の目標	<p>使用済み太陽光発電システムの適正処分に関する技術の確立を図るために、リサイクル処理技術や、撤去・回収・分別・リユース関連技術など、大量かつ様々な種類の使用済み太陽電池モジュールのリサイクルコストの低コスト化につながる技術を開発し、リサイクルコストの低減効果を実証する。</p> <p>最終目標として、分解処理コスト5円/W以下(年間200MW処理時)を設定した。</p> <p>個別研究開発項目毎の最終目標および中間目標は、開発項目毎の内容や目的に合わせて判断し設定した(詳細目標は、「2.1.4 研究開発内容」を参照)。</p>					
事業の計画内容	主な実施事項	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
	低コスト撤去・回収・分別技術調査	←→				
	低コスト分解処理技術FS(開発)	←→				
	低コスト分解処理技術実証		←→			
	太陽光発電リサイクル動向調査	←→				
	使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発			←→		

開発予算 (単位：億円)	会計・勘定		2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	総額	
	特別会計(需給)			3.3	1.8	2.2	2.0	0.9	10.2
契約種類：委託、共同研究 (2/3)	総予算額		3.3	1.8	2.2	2.0	0.9	10.2	
	(委託)		3.3	0.2	0.4	0.6	0.4	4.9	
	(共同研究)：負担率 2/3		0	1.6	1.8	1.4	0.5	5.3	
開発体制	経済産業省担当原課		資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギー課						
	プロジェクトリーダー		設置せず。						
	委託先		『Ⅱ. 研究開発マネジメントについて』の図Ⅱ-2-1(PⅡ-13)～Ⅱ-2-5(PⅡ-15) (実施体制)参照						
情勢変化への対応	<p>【2015年度】</p> <p>・2014年度FSでの結果を踏まえて、実用化に向けた実証を行うために、「低コスト分解処理技術実証」について公募を行った。</p> <p>【2016年度】</p> <p>・社会負担の少ないリサイクルシステムを構築する上で非常に重要な要素として、「使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発」について公募を行った。</p>								
評価に関する事項	事前評価	2013年度実施(担当部：新エネルギー部)							
	中間評価	2016年度実施(担当部：新エネルギー部)							
	事後評価	2019年度実施(担当部：新エネルギー部)							
Ⅲ. 研究開発成果について	<p>【2014～2018年度】(最終目標及び成果)</p> <p>① 低コスト撤去・回収・分別技術調査 撤去・回収・分別、それぞれの低コスト化技術の実現可能性と有効性を見極め、有望な技術については、課題と目標コストを明確化する。 →アンケート、ヒアリング調査、模擬屋根や試作した回収用通箱を使った運搬実験等によりリサイクルのコスト目標である5円/Wの可能性を確認するとともに撤去、回収、分別それぞれの工程における課題の抽出を行い解決策の検討を実施した。</p> <p>② 低コスト分解処理技術FS(開発) 低コスト汎用分解処理技術、低コスト専用分解処理技術など、年間200MW処理時の分解処理コスト5円/W以下に資する技術を確認する。分解処理コストを試算する。 →分解処理の要素技術は大きく分けてガラスの剥離技術及び回収金属と固着しているEVAの処理技術がある。ガラス剥離技術として粉砕やホットナイフ法、EVA処理技術として薬液処理及び熱分解処理等異なったアプローチで各々の技術の可能性を検証し、5円/W実現の可能性を確認した。</p> <p>③ 低コスト分解処理技術実証 低コスト汎用分解処理技術、低コスト専用分解処理技術を適用した試作プラントを構築し、分解処理コスト5円/W以下(年間200MW処理時)を実証する。 →分解処理方法として、粉砕+色彩選別法、ホットナイフ法、パネルセパレータ法、熱分解法を開発した。すべての処理方法で、年間200MW処理時の分解処理コスト5円/W以下を実証した。</p> <p>④ 太陽光発電リサイクル動向調査 国内の太陽光発電システム導入分布を考慮した排出量予測をまとめる。国内外の各種動向を調査し、本プロジェクトへのフィードバック情報をまとめる。 →最新の技術動向を俯瞰的に整理した「開発戦略マップ」を作成した。排出量推計モデルを構築すると共に排出量推計の精緻化を実施し、経済産業省から公表した。海外諸国におけるリサイクル技術の開発動向を継続的に調査し、状況を把握した。リサイクル技術の評価手法を検討し、太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクトで実施されている「低コスト分解処理技術実証」の各テーマを対象とした環境性、社会性の評価を実施した。</p> <p>⑤ 使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発 使用済み太陽電池モジュールの回収・運搬、分別、修復コスト180円/枚を達成する技術を開発する(使用済み太陽電池モジュールの大量発生が見込まれる2030年)。 →太陽電池モジュールの低コスト修復技術を開発し2030年に180円/枚以下の達成の可能性を見出した。太陽電池モジュールのリユースの評価方法を確立し、2030年に180円/枚以下を達成できる低コスト化を見通せることができた。</p>								
	投稿論文	「査読付き」1件、「その他」1件(2019年8月末現在)							
	特許	「出願済」7(0)件(うち国際出願件)(2019年8月末現在)							
	その他の外部発表(プレス発表等)	「研究発表・講演」40件、「新聞・雑誌等への掲載」18件、「受賞実績」1件 「展示会への出展」4件(2019年8月末現在)							

<p>IV. 実用化の見通しについて</p>	<p>「低コスト分解処理技術実証」については、太陽電池モジュールの分解処理法として、粉碎+色彩選別法、ホットナイフ法、パネルセパレータ法、熱分解法を開発した。各事業者において、実証プラントを構築し、連続実験による試験結果と想定処理条件に基づいて、処理コストを試算したところ、すべての事業者で、年間 200MW 処理時の分解処理コストを NEDO 目標の 5 円/W 以下を達成した。プロジェクト終了後、廃処理施設としての認可を取得し、使用済み太陽電池モジュールの発生量の増加に応じて、本リサイクル処理システムで事業を実現することができる。なお、本プロジェクトで作成した排出量予測では、200MW を超える排出量は 2030 年ごろと推計されている。</p> <p>また「使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発」については、太陽電池モジュールの低コスト修復技術を確立し、従来の修復コストを 40%低減させた。2030 年頃に、分別とリサイクル処理を発電事業者が行い修復だけをリユース事業者に委託するというケースが増大すると予測され、このケースでコスト試算を行い、NEDO 目標である 180 円/枚の達成の可能性を見出した。また、太陽電池モジュールのリユースにおいて、リユース技術を確立すると共に低コスト化を実現するための高速測定を開発した。2030 年に向けて、分別処理時間の更なる短縮、光熱水費の削減、労務費の削減を進めて行くことで、NEDO 目標である 180 円/枚の達成を見通せた。</p> <p>以上の通り、成果の実用化・事業化の道筋は明確である。</p>	
<p>V. 基本計画に関する事項</p>	<p>作成時期</p>	<p>2014 年 3 月 策定</p>
	<p>変更履歴</p>	<p>2016 年 3 月 研究開発項目⑤「使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発」、研究開発項目⑥「使用済み太陽電池モジュールの用途開拓検討」を新たに制定。</p>

プロジェクト用語集

用語(日本語)	用語(英語)	説明
CCD カメラ	CCD camera	CCD は人間の目でいう網膜、光をデジタル信号に変換するためのセンサー、撮像素子のこと。CCD カメラとは、これらを撮像素子として使用したカメラのこと。
CIGS	CIGS	$\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ という化合物半導体。
CIGSSe	CIGSSe	半導体 $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ の構成元素の頭文字からとった略称。光吸収層として使われる。
CIS 系太陽電池	Copper Indium Selenium Cell	銅、インジウム、セレン他による化合物を光吸収層とした太陽電池。
EL 検査	Electro Luminescence Test	太陽光発電モジュールの製造工程等で用いられる検査。太陽光発電モジュールに強制的に電流を流して発光させ、特殊カメラで撮影し検査を行う。
EVA/セル層	EVA/Cell layer	太陽電池モジュールを分離装置で分離したセルを含むシート状の物。
EVA 樹脂	Ethylene-vinyl-Acetate Copolymer	太陽電池モジュールの封止に使用される樹脂材料の一つ。
EVA 積層体	Powder material with Ethylene Vinyl Acetate	研削工程により削り取られたEVAとシリコン、金属類が混合した粉状物質。
FF	FF (fill factor)	太陽光発電素子の短絡電流密度×開放端電圧に対し、最大電力を生じる電流密度×電圧の動作点のこと。直列抵抗が大きく、並列抵抗が小さくなるとFFが減少する。
G5 G8.5	G5 G8.5	ガラス基板サイズの呼称。Gは世代(Generation)を表す。通常G5は $1.1 \times 1.3\text{m}^2$ 、G8.5は $2.2 \times 2.5\text{m}^2$ を指すが、本開発では $1.1 \times 1.4\text{m}^2$ もG5と呼んでいる。
ITO	indium tin oxide	インジウム・スズ合金の酸化物。透明で導電性を有する。
PV CYCLE	PV CYCLE	2007年に設立された、欧州における太陽光発電モジュールリサイクルを手がける機関。
Pmax	Pmax	太陽電池の動作曲線上において、電力が最も大きくなる点での電力。
RP	Recycle Point	回収したPVシステムをリサイクルする場所。
RPD 法	RPD method	薄膜堆積技術の一種。反応性プラズマ堆積法(reactive plasma deposition)と呼ばれる。TCO薄膜の成膜に利用される。
RTA 処理	RTA (rapid thermal annealing) treatment	急速に温度を上げ、短時間保ったのちに、急速に温度を低下させる処理。
SLG	SLG	青板ガラス、ソーダ石灰ガラス。
SY	Stock Yard	回収したPVシステムを一時的に保管する場所。
TCO	Transparent Conductive Oxide	透明導電膜と呼ばれる。フッ素添加された酸化錫や酸化インジウム錫、酸化亜鉛などが良く用いられる。太陽電池の光入射側に用いて光を透過させながら電流を外部に取り出すのに必要な材料である。
アイオノマー樹脂	Ionomer Resin	イオンによる擬似架橋構造を有する樹脂。高い水分バリア性を有し、架橋樹脂の強靭さを保持しつつ、熔融成型が可能な点で太陽電池封止材へ展開されている。

アパーチャーエリア	Aperture Area	太陽電池モジュールにおいて発電部外周を囲った領域を示す。
アモルファスシリコン	Amorphous silicon	シリコンを主成分とし、原子配列に結晶性を持たない固体半導体。真空蒸着法などにより非常に薄い半導体膜を形成可能。半導体膜形成時の条件を変えることで pn 接合を作製することができる。
アライメント	alignment	集光型太陽光発電システムの各構成部材において、各受光面に対する各入射光線がどのような角度関係にあるかを表すもの。
アルミ枠	Aluminum frame	太陽電池パネルの機械的強度の確保と架台や屋根等への設置を容易とするアルミ製の外周枠。
アレイ	array	ストリングを並列接続したもの。
アレイ状メサ	arrayed mesa	規則正しく配置されたメサ(段差)。
安定化効率	stabilizing efficiency	アモルファス Si 太陽電池は光にあたると出力が低下するが、光を照射して出力が安定になったときの変換効率。
ウェット処理	wet treatment	主に化学薬品等の液体に浸漬させる、基板や半導体材料の表面処理技術。一般的な洗浄処理も含まれる。
エアマス	Air mass (AM)	地球大気に入射した太陽光直達光が通過した路程の長さ。標準状態の大気圧(標準気圧:1013hPa)に垂直に入射した太陽直達光が通過した路程の長さを AM1.0 として、それに対する倍率で表す。
エアロゾル	aerosol	気体中に浮遊する微小液体または固体の粒子。
エピタキシャル成長	epitaxial growth	基板の結晶構造を反映した結晶膜をその上に堆積すること。
エレクトロルミネッセンス(電界発光)	EL, Electronic luminescence	光を照射しない状態でセル(半導体)に電界を印加するとセルが発光する現象。セル正常部は電流が流れるので発光するが異常部は発光しないので、セル故障の検査ができる。
エンジニアリングプラスチック	Engineering Plastic	耐熱性・強度に優れるプラスチックの総称。
遠心風力式破砕機	Centrifugal crushing machine	太陽電池パネルを高速回転するブローア状の羽根で破砕・風選し、ガラスとその他に分離する装置。
凹凸型のロール形状	Ruggedness roll shape	ロール破砕機における2本のロールの表面突起部の形状が角型のもの。
オートクレーブ	autoclave	内部を高圧力にすることが可能な耐圧性の装置や容器、あるいはその装置を用いて行う処理のこと。医療分野では滅菌処理に、工学分野ではコンクリート製品の促進養生に使用されている。
送り速度	input speed	ロール破砕機の回転する2本のロールで挟まれた太陽電池パネルの送り込まれる速度。
温度サイクル試験	Thermal Cycle Test	本稿では IEC61215 に定められた、85°Cと-45°Cの温度変化を一定周期で一定回数与える試験。試験後の出力低下 5%以下であれば合格。
開放電圧	Open circuit voltage	太陽電池セル・モジュールの出力端子を開放した時の両端子間の電圧。
可視光下	Under visible light	照度 200Lx(光波長範囲 400~700nm での光エネルギー57.7 μW/cm ²)環境下。
架台	Support Structure	太陽光発電モジュールを取り付けるための支持物。

ガラス	glass	太陽電池パネルの破損を回避するために表面を保護する強化ガラス。
ガラス/ガラス モジュール	Glass/Glass module	ガラス/封止材/セル/封止材/ガラス という構成からなる太陽電池モジュール。
ガラス/バックシート モジュール	Glass/Backsheet module	ガラス/封止材/セル/封止材/バックシート という構成からなる太陽電池モジュール。
ガラスカレット	glass-cullet	太陽電池パネルを保護するガラスを破碎することで得られる粒状のガラスのかけら。
基準状態	Standard test condition	太陽電池セル・モジュールの特性を測定する際の基準。(セル温度:25℃、分光分布:基準太陽光、放射照度 1000W/m ²)
基準太陽光	Standard sunlight	太陽電池セル・モジュールの出力特性を共通の条件で表現するために放射照度および分光放射照度を規定した仮想的太陽光。
基準太陽電池セル	Reference solar cell	太陽電池セル・モジュールの測定にあたって、測定用光源の放射照度を基準太陽光換算で決定するために使用される、基準セル・モジュールと相対的に同じ分光感度を持った太陽電池セル。
切妻	Gable Roof	屋根の形状の一つ。屋根の最頂部の棟から地上に向かい、2つの傾斜面が本を伏せたような山形の形状をした屋根。
グリッドパリティ	Grid parity	再生可能エネルギーによる発電コストが既存の電力のコスト(電力料金、発電コスト等)と同等かそれより安価になる点(コスト)を指す。
蛍光 X 線分析	X-ray fluorescence analysis	X線を試料に照射したときに発生する蛍光 X 線のエネルギーや強度から物質の成分元素や構成比率を測定する分析法。
結晶シリコン太陽電池	crystal-silicon solar cell	太陽電池セルが結晶シリコンの無機質である太陽電池。
高温高湿試験	damp heat (DH) test	太陽電池モジュールの信頼性試験の一つ(IEC61215 10.13 項に規定の耐環境試験)。一般的な条件は温度 85 °C、湿度 85% である。認証試験では、1000 時間の試験後の性能低下が初期値の 5%以内であることを要件としている。
固定価格買取制度	the establishment of Feed-in Tariff	2012 年 7 月に導入された再生可能エネルギーによる発電電力の全量買取制度。
コレクションポイント	Collection Point	使用済の太陽光発電モジュールの回収拠点であり、発生場所から運び込まれる。一定量が収集されると、リサイクル処理プラント等に搬送される。
最大電力	Maximum power	太陽電池セル・モジュールの電流電圧特性曲線上で電流と電圧の積が最大になる点での電力。
サブストレート型太陽電池	substrate type solar cell	太陽光を基板を通さずに入射させるタイプの太陽電池。
サブモジュール	Submodule	集積構造を備えているがカバーガラス等による封止がされていない太陽電池、サーキット(Circuit)とも言う。
△型のロール形状	Traiangle roll shape	ロール破碎機における2本のロールの表面突起部の形状が三角型のもの。
三角分布	triangular distribution	有限区間の上限と頂点、下限を直線で結ぶことで表現される確率分布であり、三角形の形状を取るもの。サンプルデータに限りがあり、母集団の特定が困難な場合に利用されることが多い。

集光型太陽光発電	concentrating photovoltaics (CPV)	集光レンズ、集光鏡等を用いて太陽光を集光し、その光で発電する方法。
シリカ	Silica SiO ₂	シリコン酸化物。 二酸化珪素または主として二酸化珪素によって構成される天然鉱石、珪石、珪砂の総称。
振動篩型分級機	vibration type screening machine	分別機に振動を与えることで形状(重さ、大きさ等)の異なるものを効率的に分別できる装置。
水蒸気透過率	water vapor transmission rate (WVTR)	単位面積・単位時間あたりフィルムから水蒸気が透過する量。一般的な単位としては、g/m ² day が用いられる。
スネイルトレイル	Snail trail	セルに発生したマイクロクラック部分に水分が侵入し、PV モジュールのオモテ面にカタツムリが這ったような模様が見える現象。
スーパーストレート型太陽電池	superstrate type solar cell	ガラス基板などの透光性基板上に、透明導電膜、シリコン層、裏面電極の順に製膜され、光は透光性基板と透明導電膜層を通して、光活性であるシリコン層に入射させるタイプの太陽電池。
据付システム	Installation System	モジュールを屋根等に取り付けるシステムを指す。
ストリング	string	モジュールを複数直列接続したもの。
精錬	Smelting	鉱石を還元することによって金属を取り出す過程
絶縁耐圧試験	Dielectric withstand voltage test	IEC61215 10.3 項に規定の絶縁性能試験。試験条件:システム電圧×2+1000Vを1分間
絶縁抵抗	insulation resistance	太陽電池モジュールの出力端子と接地間の抵抗。これが不十分(低抵抗)であれば地絡の危険性があり、感電や火災の原因となりえる。
セル	Cell	集積構造を備えていない太陽電池、単セル(Single Cell)とも言う。
セル屑	cell waste	太陽電池パネルを構成するガラス以外のもの(セル、バックシート、樹脂等)の総称。
ソーダライムガラス	soda lime glass	現在最も広く利用されている安価なガラス。板ガラスや瓶ガラスに使用されている。
太陽光発電	Photovoltaic (PV)	太陽光のエネルギーを直接電気エネルギーに変換する発電方式。
太陽光発電システム	solar powergeneration	太陽電池パネルで得た電気を、パワコンを経て自家消費又は系統連結して利用する電力システム。
太陽電池パネル	solar panels	複数の太陽電池セルを直列に接続し、ガラスや樹脂等で封止したもの。太陽電池モジュール。
太陽光発電モジュール	Photovoltaic Module	配線材を用いて複数の太陽電池セルを直列に接続し、ガラスや高分子部材を用いて封止したもの。太陽電池パネルともいう。
太陽電池モジュールの温度係数	太陽電池モジュールの温度係数	太陽電池は一般的に温度上昇に伴い出力が低下する。この係数が温度係数である。
太陽電池セル	Photovoltaic cell (Solar cell)	太陽光発電に用いる太陽電池の構成要素最小単位。
多接合太陽電池	multi-junction solar cell	光の利用波長領域が異なる太陽電池を複数積層した太陽電池。
ダーク I-V 測定	Dark I-V measurement	セル、又は PV モジュールに光を照射しない状態で主回路を直流電源に接続し、I-V 特性(ダイオード特性)を測定すること。

ダブルガラスモジュール	double-glass module	受光面側のみならず、裏面材にもバックシートではなくガラスを用いた太陽電池モジュール。
端子ボックス	Terminal box	太陽電池パネルで発電した電力と外部に出すための送電線とを繋ぐパネル裏面に取り付けたBOX。
タンデム型セル	Tandem cell	短波長を吸収するセルを光の入射側、その後ろに長波長側を吸収するセルを直列になるように構成されたセル。
タンデム型太陽電池	tandem-type solar cell	最小単位のセル(単セル)を重ね合わせた構造を有する太陽電池をタンデム型太陽電池という。ただ実際は、慣習的に2段のものをタンデムと呼んでおり、3段のものはトリプル型と呼ばれる。
ダンプヒート試験	DH Test	高温高湿環境下テスト。本開発では温度 85°C湿度 85%環境下と規定。
短絡電流	Short circuit current	太陽電池セル・モジュールの出力端子を短絡した時の両端子間に流れる電流。
直列接続	series-connection	複数の太陽電池を電氣的に直列につなぐこと。
通函	Returnable Box	繰り返し使用される運搬用の容器。
テクスチャー	texture	光を散乱させるためウエハ表面に形成する凹凸のこと。光を凹凸によって散乱させることで光の吸収長を長くとり、光をより効果的に半導体で吸収させるのに用いられる。薄膜シリコン太陽電池では必須技術である。
デラミネーション	delamination	太陽電池モジュール内の層間剝離。光入射側(セルとガラス間)、裏側(セルとバックシート間)の両者がある。光入射側の場合は表面白濁、裏面側の場合はバックシートの膨らみが観測される。
電圧誘起出力低下	PID, Potential induced degradation	セルとアルミフレーム間に漏れ電流が発生し PV モジュールの出力低下を招く現象。
ドーピング	dope	結晶の物性を変化させるために少量の不純物を母材結晶に添加すること。GaAsN に Si 原子をドーピングすると GaAsN は n 型半導体に変化する。
ドライ処理	dry treatment	主に反応性ガスやプラズマ処理などを用いる、化学薬品等の液体を用いない基板や半導体材料の表面処理技術。
薄膜系太陽電池	thin-film solar cell	数 μm の光吸収層を用いた太陽電池であり、省資源・低コスト化が期待される。シリコンを用いたものと銅-インジウム-ガリウム-セレン化合物を用いたものが実用化されている。結晶系に比べて水蒸気浸入に弱いとされている。
バックシート	back sheet	太陽電池モジュールの裏面側に用いる高分子系シート。ポリエチレンテレフタレート(PET)をベースフィルムとするものが多く、PET フィルムをフッ素系の樹脂ではさんだものや、アルミニウム箔を PET フィルムではさんだものなどが用いられる。
発光分光分析	Emission spectrochemical analysis	放電等により試料を発行させ、分光器によってそのスペクトルを調べ、試料中に含まれる元素の種類やその含有量を定量的に測定する分析法。
パワーコンディショナー	Power Conditioner	太陽光発電システムや家庭用燃料電池を利用する上で、発電された電気を家庭などの環境で使用できるように変換する機器。

バンドギャップ	Band gap	固体中の電子が定常状態でとり得るエネルギー値の差。電子がエネルギーを受けて低エネルギー状態から高エネルギー状態へ遷移する際、バンドギャップ以下のエネルギーでは遷移できない。
ハンマー式破碎剥離機	hammer-type crushing and separation machine	太陽電池パネルを回転する突起(ハンマー)で破碎・粉碎してパネルからガラスを剥離する装置。
光閉じ込め	Light trapping	太陽電池内部での光の伝播方向を制御することにより、伝播距離を伸ばし太陽電池内部での光吸収率を向上させ、太陽電池の変換効率を向上させる技術。
表面パッシベーション	surface passivation	半導体素子の表面保護膜を作成する工程。
ファンデルワールス力	van der Waals force	電荷を持たない中性の原子、分子間ではたらく凝集力。この力を介して物体間の物理吸着が生じる。
封止材	encapsulant	太陽電池モジュール内にセルを固定するための高分子部材。一般的には、エチレン-酢酸ビニル共重合体(EVA)を用いる。
不純物	impurity	結晶中に混入している微量元素。
プラズマ CVD	plasma-enhanced chemical vapor deposition	高周波などを印加することで原料ガスをプラズマ化させることを特徴とする化学気相成長法(CVD)の一種。化学反応を活性化させるため、高周波などを印加することで原料ガスをプラズマ化させ、薄膜等を堆積させる方法。
分解処理コスト	disassembling cost	太陽電池パネル 1 W あたりの処理費用
分級機	screening machine	ガラスやバックシート等をその形状(重さ、大きさ等)の違いで分別する装置。
分光感度	Spectral response	太陽電池の入射光波長ごとの変換効率。 太陽電池出力の入射光波長依存性を表した特性で、短絡電流の入射単色光入力に対する比。 なお、単位は A/W または相対値(相対分光感度)で表す。
ヘテロ接合	hetero junction	異種材料の接合。例えば、単結晶膜とアモルファス(非晶質)膜との接合。
ヘテロ接合結晶系太陽電池	heterojunction crystalline silicon solar cell	結晶シリコンとアモルファスシリコンで pn 接合を形成した結晶シリコン系太陽電池。高い電圧が得られて高性能が実現する。実用化されたものとしては、三洋電機が開発した HIT 太陽電池が代表例である。一般的な結晶系に比べれば、水蒸気浸入に弱いとされている。
変換効率	Efficiency	最大電力を太陽電池セル・モジュール面積と放射照度との積で除した値。
BPD(バイパスダイオード)	bypass diode	太陽電池モジュール内に設置するダイオード。セル断線などにより太陽電池の一部が高抵抗になり電流が流れない状況になった際に、電流をバイパスさせる。PV システムの出力低下を最小限にするとともに安全性を向上させるもの。
ホットスポット	Hot spot	PV モジュールの受光面の一部又は全部が日陰になると、その部位が高抵抗化し発熱する現象。遂には PV モジュールの損傷に至る。
ホットプレート	Hot plate	ワークの温度を精密に調整するための熱板を有する実験器具。
ポリシリコン	Polysilicon	半導体用、太陽電池用に用いられる高純度シリコン。主としてシーメンス法で生産される。

マイクロクラック	micro crack	本報告書では、EL 観察により観察されるセル割れを指す。
モジュール変換効率	module efficiency, η module	モジュールの受光面に入った太陽光と発電された電力の割合。
モノリシックモジュール	Monolithic module	1枚の基板上に太陽電池構成材料を層状に積層して作製したモジュール。
有機系太陽電池	organic solar cell	有機半導体で pn 接合を形成する太陽電池。最近では効率も10%を超え、早期の実用化が期待されているが、水蒸気浸入に弱いとの欠点もある。
有機色素	organic dye	色素分子を構成する元素が主に炭素からなり、かつ金属元素を含まない色素。
油化	Oiled	廃プラスチックを熱分解して生成油を製造する方法
寄棟	Hipped Roof	屋根の形状の一つ。4方向に傾斜する屋根面をもつものをいう。
ラバーヒータ	Rubber heater	発熱体であるニクロム線をシリコンのシートで両側から挟み込んだ面状ヒーター
ラミネータ	Laminator	熱圧接装置。
リサイクル	Recycle	不要物等を再生、再資源化して使用すること。
リフトオフ	Lift-off	薄膜と基板間に層構造を有する場合に、下層を化学反応により取り去ることにより、薄膜を基板から剥離する方法。
裏面バックシート	back sheet	太陽電池モジュールの裏面側のシート。一般的には不透明の樹脂を用いる。モジュールの不具合事例のひとつが裏面バックシートの膨らみであるが、断線や水分侵入などが懸念される。
リユース	Reuse	一度使用されたものをそのまま再び使用すること。
レーザー誘起分光分析	Laser induced breakdown spectroscopy	試料表面に短パルスでレーザーを当てることで発生するマイクロプラズマを用いた分析法。
ロール間隔	distance between the rolls	ロール式破砕機の2本のロール間の隙間(数mmレベル)。
ロール式破砕機	roll-type crushing machine	アルミ枠を外した太陽電池パネルを2本のロールの間に挿入してその押付圧により破砕する装置。
ロールツーロールプロセス	Roll to Roll Process	材料フィルムをロールからロールへと連続的に供給し、印刷やラミネートを行うプロセス。
ロットアウト	Lot Out	抜取検査で一定水準以上の不良品が見つかり不ロット全体が不合格されたもの。
ワイブル分布	Weibull distribution	物体の強度を統計的に表現するための確率分布であり、耐久消費財の使用年数を表現する分布として排出量予測に適用される例が多い。

I. 事業の位置づけ・必要性について

1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

1.1 NEDO が関与することの意義

太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクトでは、使用済み太陽光発電システムのうち、リサイクル処理が困難となる太陽電池モジュールについて、低コストリサイクル処理技術の確立とともに、リユース関連の技術を開発し、撤去・回収関連技術などについて課題と対策を検討し、太陽光発電システムのリサイクルシステムの構築促進を図る。

太陽光発電の健全な普及拡大のためには、使用済みの太陽光発電システムを適正に処理する対策や手段を検討しておく必要がある。

一方、公共性が極めて高いことや、市場が苛烈な競争状態にあることから、コスト増につながるリサイクルシステムの民間主導による自律的な構築は非常に困難である。そのため、国主導による使用済み太陽光発電システムの適正処理に関する検討や技術開発などの取り組みが必須であることから、NEDO が主導して支援することは意義がある。

1.2 実施の効果

太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクトでは、低コストのリサイクル処理技術に加え、撤去・回収関連技術等、使用済み太陽光発電システムの適正処分を実現する技術を開発・実証し、リサイクルに関する循環型社会システム構築に貢献することを目的とする。

また、太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクトの成果により、資源コストあるいは廃棄処理コストの面から太陽光発電システム価格の低減に寄与でき、国の目指す 2030 年太陽光発電コスト 7 円/kWh 実現の一助となり得る。

2. 事業の背景・目的・位置づけ

近年のエネルギーセキュリティや地球環境問題への意識の高まり、東日本大震災後の電力供給不足への懸念により、太陽光発電は、1998 年に住宅用太陽光発電システムの国内導入件数が 1 万件に到達、2004 年に国内累積導入量 1GW を達成、2014 年には住宅用太陽光発電システムの国内導入件数が 100 万件を突破、累積導入量も 6.6GW に達するなど、着実に導入拡大が続いている。さらに、2012 年 7 月より再生可能エネルギーの固定価格買取制度が実施されたことで、今後さらに大幅な普及拡大が見込まれる。

一方、大量導入が実現すると、将来、耐用年数を経過した使用済みの太陽光発電システムが大量発生することが予想され、太陽光発電の健全な普及拡大には、使用済みのシステムを適正に処分可能な手段や循環型社会システムを確保することが重要である。

また、「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」の附帯決議において、「耐用年数経過後において大量の廃棄物の発生を防ぐ観点から、設備のリサイクル構築等、早急に必要な措置を講ずること」が求められている。

これに対し、我が国ではリサイクル処理技術に関する取り組みが一部存在するものの十分ではなく、NEDO は「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」において、大量かつ様々な種類の太陽電池モジュールに対応した低コスト汎用リサイクル処理技術の開発をしているところである。太陽光発電のさらなる普及を図るためには、リサイクル処理技術の実用化を着実に進めるとともに、撤去・回収・分別・リユース関連技術の開発も必要である。

Ⅱ. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

1.1 研究開発の目的

使用済み太陽光発電システムの適正処分に関する技術の確立を図るために、リサイクル処理技術や、撤去・回収・分別・リユース関連技術など、大量かつ様々な種類の使用済み太陽電池モジュールのリサイクルコストの低コスト化につながる技術を開発し、リサイクルコストの低減効果を実証する。

1.2 研究開発の目標

使用済み太陽電池モジュールのリサイクル処理に係る低コスト分解処理技術を確立し、その効果を実証することを目標とする。

最終目標として、分解処理コスト 5 円/W(年間 200MW 処理時)を設定すると共に、使用済み太陽電池モジュールの大量発生が見込まれる 2030 年に太陽電池モジュールの回収・運搬、分別、修復コスト 180 円/枚を達成する技術を開発する。

個別研究開発項目毎の最終目標は、開発項目毎の内容や目的に合わせて判断し設定した(詳細目標は、「2.1.4 研究開発内容」を参照)。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

2.1.1 研究開発技術分野

本事業では、使用済み太陽電池モジュールのリサイクル処理に係る低コスト分解処理技術について、分解処理コスト 5 円/W を最終目標として研究開発及び実証を実施する。

上記目標を達成するため、下記項目について研究開発を実施する。

- ① 低コスト撤去・回収・分別技術調査
- ② 低コスト分解処理技術 FS(開発)
- ③ 低コスト分解処理技術実証
- ④ 太陽光発電リサイクル動向調査
- ⑤ 使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発
- ⑥ 使用済み太陽電池モジュールの用途開拓検討

2.1.2 研究開発項目の推移

2014 年度には、公募から選定された上記①②④の 8 件の研究開発を開始した。

2015 年度には、公募から選定された上記③の 5 件の研究開発を開始した。

2016 年度には、公募から選定された上記⑤の 2 件の研究開発を開始した。

なお、上記⑥について、2016 年度に公募を行ったが、1 件も採択されなかったため、開発を中止した。

【2014～2018 年度】

研究開発テーマ毎の 2014 年度から 2018 年度までの開発スケジュールを表 II-2-1 に示す。

表 II-2-1. 研究開発の全体スケジュール (2014～2018 年度)

N o	研究開発項目	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
①低コスト撤去・回収・分別技術調査						
①-1 使用済み太陽光発電システムのリサイクル処理を安定的に実施するための課題調査						
1	撤去の調査	←→				
2	回収の調査	←→				
3	分別の調査	←→				
①-2 太陽電池モジュール撤去における実作業調査						
1	撤去作業の現場調査及び撤去の実作業	←→				
②低コスト分解処理技術FS (開発)						
②-1 結晶シリコン太陽電池モジュールのリサイクル技術開発						
1	小型試験機的设计・製作	←→				
2	前処理方法の検討	←→				
3	最適な運転条件の検討	←→				
4	選別方法の検討	←→				
5	回収物の評価	←→				
6	剥離・選別ライン的设计	←→				
②-2 ウェット法による結晶系太陽電池モジュールの高度リサイクル実用化技術開発						
1	剥離液 A の消費量低減策の検討	←→				
2	剥離液 B の消費量低減策の検討	←→				
3	剥離液 A による処理速度向上のためのシステムの基本構成検討	←→				
4	剥離した EVA・金属複合体から金属類を分離するための B 液処理の基本システム構成の検討	←→				
②-3 結晶シリコン太陽電池の低コスト分解処理技術の調査/開発						
1	ロール式破砕機によるガラスの剥離	←→				
2	ハンマー型破砕剥離機と遠心風力破砕機によるガラス剥離率の比較	←→				
3	効率的な分級法の検討	←→				
4	低コスト処理の実現	←→				
②-4 可溶化法を用いた使用済み太陽電池からの資源回収技術の開発						
1	太陽電池モジュールのガラスと EVA/セルの分離	←→				
2	可溶化法による EVA/セルからの資源回収	←→				
3	PV モジュールより分離する金属回収技術の開発	←→				
③低コスト分解処理技術実証						
③-1 結晶シリコン太陽電池モジュールのリサイクル技術実証						
1	実証剥離機の開発		←→			
2	ガラス中ヒ素成分の同定機器選定と測定評価		←→			
3	試作プラントによる事業化検討		←→			←→
4	実証プラントの構築				←→	←→
5	事業化実証					←→
③-2 ウェット法による結晶系太陽電池モジュールの高度リサイクル技術実証						
1	実機パネルでの実証		←→	←→		
2	試作パイロットラインによる実証		←→	←→		
3	回収シリコンの純化研究		←→	←→		
4	有価物評価検証		←→	←→		
③-3 ホットナイフ分離法によるガラスと金属の完全リサイクル技術開発						
1	アルミフレーム除去装置の開発及び実証		←→			←→

2	ガラス分離装置の改良及び実証		←			→
3	割れガラス分離装置の開発				←	→
4	ガラスカレットを板ガラス原料にするための調査		←			→
5	回収金属の売却単価の調査		←			→
6	実証試験による処理コスト評価		←			→
③-4 合わせガラス型太陽電池の低コスト分解処理技術実証						
1	基板ガラスとカバーガラスの解体技術開発		←			→
2	カバーガラス EVA の剥離技術開発		←			→
3	基板ガラス EVA の剥離技術開発		←			→
4	CIS 膜の剥離技術開発		←			→
5	試作プラント構築、実証			←		→
③-5 PVシステム低コスト汎用リサイクル処理手法に関する研究開発						
1	システム整備と装置立上げ		←	→		
2	EVA 熱処理装置の長期信頼性・安定性・経済性の向上		←	→		
3	処理システム全体の実用性及び処理コスト評価			←	→	
④太陽光発電リサイクル動向調査						
④-1 太陽光発電リサイクルにおける国内外動向および評価手法に関する調査						
1	海外における使用済み太陽電池モジュールに関する動向調査		←			→
2	太陽光発電リサイクルに関する評価手法の検討		←			→
④-2 太陽光発電リサイクルに関する国内動向調査、分布調査及び排出量予測						
1	国内の技術動向、政策動向、実施事例の定点観測		←			→
2	太陽光発電システムの分布調査と、その分布に基づいた排出量予測		←			→
⑤使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発						
⑤-1 使用済み太陽電池モジュールの低コスト修復技術の開発						
1	修復技術Ⅰ (故障 BPD の交換)			←	→	
2	修復技術Ⅱ (バックシート損傷部位の交換)			←	→	
3	修復技術Ⅲ (故障セルの交換)			←	→	
4	分別ラインの自動化の検討			←	→	
⑤-2 On-Siteでのリユースモジュール分別技術の開発						
1	簡便な電気安全性判定方法の開発			←	→	
2	迅速な分別判断ツールの開発(外観判定用マニュアル作成/太陽電池モジュール温度係数のデータベース化)			←	→	
3	On-Site での分別技術開発			←	→	
4	コスト目標			←	→	

2.1.3 研究開発予算の推移

各年度の研究開発予算（実績）の推移を表Ⅱ-2-2に示す。

表Ⅱ-2-2. 研究開発予算（実績）の推移（単位：億円）

研究開発テーマ名	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	総額
①低コスト撤去・回収・分別技術調査	0.2	-	-			0.2
②低コスト分解処理技術FS（開発）	2.8	-	-			2.8
③低コスト分解処理技術実証	-	1.6	1.8	1.4	0.5	5.3
④太陽光発電リサイクル動向調査	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	1.2
⑤使用済み太陽電池モジュールの 低コストリユース技術の開発			0.2	0.4	0.1	0.7
合計 特別会計（需給勘定）	3.3	1.8	2.2	2.0	0.9	10.2

2.1.4 研究開発内容

研究開発項目別の開発内容、目標は以下の通りとした。

①低コスト撤去・回収・分別技術調査

本調査は、現時点では不透明となっているリサイクルシステムとも大きく関連する、撤去・回収・分別などを対象に、分解処理以外のリサイクルコスト低減の実現可能性や課題の見極めのために行う調査であり、経済産業省や環境省などの動向にも影響を受ける公共性の非常に高い事業であるため、委託事業として実施する。

【最終目標】

- ・回収・分別、それぞれの低コスト化技術の実現可能性と有効性を見極め、有望な技術については、課題と目標コストを明確化する。

②低コスト分解処理技術 FS（開発）

本研究開発は、社会負担の少ないリサイクルシステムを構築する上で非常に重要となる要素の一つである、分解処理コスト低減に関して、目標処理コストの達成目処やコスト削減効果を見極めるために行う FS であり、国民経済的には大きな便益がありながらも、研究開発成果が直接的に市場性と結び付かない公共性の高い事業であり、委託事業として実施する。

【最終目標】

- ・低コスト汎用分解処理技術、低コスト専用分解処理技術など、年間 200MW 処理時の分解処理コスト 5 円/W 以下に資する技術を確立する。
- ・分解処理コストを試算する。

③低コスト分解処理技術実証

本研究開発は、社会負担の少ないリサイクルシステムを構築する上で非常に重要となる分解処理技術の実用化に向けて、コスト削減効果を実証するために実施する研究開発であり、共同研究事業として実施する。

【中間目標】

- ・低コスト汎用分解処理技術、低コスト専用分解処理技術を適用した試作プラントを構築する。
- ・使用済み太陽電池モジュールの供給と、リサイクル処理により得られる回収物の提供に関して、一時的ではない体制・仕組みを確保する。
- ・様々な運転条件下における分解処理コスト低減効果を実証可能な実験計画を策定する。

【最終目標】

- ・分解処理コスト : 5 円/W 以下 (年間 200MW 処理時)

④太陽光発電リサイクル動向調査

本調査は、研究開発した技術が社会親和性の高い技術であることが求められることから、国内外の技術、普及、政策などの動向や、実施事例などについての調査するものであり、社会的に大きな便益のある公共性の高い事業のため、委託事業として実施する。

【中間目標】

- ・国内の太陽光発電システム導入分布を考慮した排出量予測をまとめる。
- ・撤去、回収から分解処理に至るまで、各技術の効果の横断的な評価方法を確立する。

【最終目標】

- ・国内外の各種動向を調査し、本プロジェクトへのフィードバック情報をまとめる。

⑤「使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発」

本研究開発はリサイクル技術開発と同じく、社会負担の少ないリサイクルシステムを構築する上で非常に重要な要素である。使用済みの太陽電池モジュールをリユースするための技術開発であり、国民経済的には大きな便益がありながらも、研究開発成果が直接的に市場性と結び付かない公共性の高い事業であり、委託事業として実施する。

【最終目標】

- ・使用済み太陽電池モジュールの回収・運搬、分別、修復コスト 180 円/W 枚を達成する技術を開発する。

例えば、分別技術であれば出力検査、絶縁検査、外観検査、バイパスダイオード検査等の一連の分別工程を精度よく 5 分以内で行うことが可能な技術を開発する。

上記以外の技術開発の場合、具体的な開発目標及び実施内容は、採択テーマごとに NEDO と実施者との間で協議の上個別に設定することとする。

⑥「使用済み太陽電池モジュールの用途開拓検討」

本研究開発はリサイクル技術開発と同じく、社会負担の少ないリサイクルシステムを構築する上で非常に重要な要素である。使用済みの太陽電池モジュールを有効活用するための可能性検討事業であり、国民経済的には大きな便益がありながらも、研究開発成果が直接的に市場性と結び付かない公共性の高い事業であり、委託事業として実施する。

【最終目標】

- ・導入可能量、市場規模や導入課題等を明らかにする。

表Ⅱ-2-3. 研究開発項目別開発内容、目標 (2014～2018年度)

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	最終目標	備考
①低コスト撤去・回収・分別技術調査						
1	2014年	使用済み太陽光発電システムのリサイクル処理を安定的に実施するための課題調査	イー・アンド・イーソリューションズ DOWAエコシステム 秋田県資源技術開発機構	① 撤去、回収、分別の現状分析 ② 撤去、回収、分別の実践によるデータの取得 ③ 撤去、回収、分別の課題抽出 ④ 撤去、回収、分別の課題解決策の明確化 ⑤ 撤去、回収、分別のコスト削減の可能性の明確化、目標の設定	・ 撤去、回収、分別に要するコスト5円/W ・ 目標コスト5円/W以下にさらに削減するための目標設定と、それに向けた課題抽出、必要な対策を調査し、取りまとめる。	
2	2014年	太陽電池モジュール撤去における実作業調査	萬世リサイクルシステムズ	住宅に設置された太陽光発電システムの撤去作業現場の調査及び、住宅屋根からの太陽電池モジュール撤去の実作業を実施することにより、机上では想定しえなかった撤去の技術課題の抽出を行い、抽出された課題の解決策と撤去コスト削減の可能性の明確化を行い、加えて目標コストの策定を行う。	撤去の工程についてコスト低減に資する技術の実現可能性と有効性を見極め、有望な技術については、その課題と目標コストを明確化する。	
②低コスト分解処理技術FS (開発)						
1	2014年	結晶シリコン太陽電池モジュールのリサイクル技術開発	三菱マテリアル	①小型試験機的设计・製作 ②前処理方法の検討 ③最適な運転条件の検討 ④選別方法の検討 ⑤回収物の評価 ⑥選別ライン的设计	①太陽電池パネルからガラスを剥離するためにローラ式剥離機を設計・製作する ②太陽電池パネルからガラス分を剥離するために有効な手段を検討する ③①で製作した試験機において最適運転条件を検討する ④剥離した回収物においてガラス分と金属分を選別する方法を検討する ⑤ガラス分と金属分各々について再資源化が可能かを評価する ⑥処理コストを試算し、5円/W以下を目標とする	
2	2014年	ウェット法による結晶系太陽電池モ	東邦化成	結晶系太陽電池モジュールのリサイクルを困難にしていた封止材(EVA)に対し、剥離剤を用いた	剥離液の消費量低減し(目標;現状の1/10の消費量に抑える)、システムとしてのリサイクル処	

		ジュールの高度リサイクル実用化技術開発		ウェット法による EVA 剥離システムを開発する。分解処理コスト 5 円/W 以下を実現するための剥離、分別基礎システムの開発を行う。	理コスト 5 円/W 以下の実現性に目処をつける。	
3	2014 年	結晶シリコン太陽電池の低コスト分解処理技術の調査/開発	市川環境エンジニアリング 鹿島建設 ホンジョー	太陽電池パネルのリサイクル技術の現状を調査すると共に結晶シリコン太陽電池パネルに特化した乾式物理的破碎処理設備の試作とそれを用いた実証試験を実施し、経済性評価と事業性の検討を行った。	200MW/年処理時において処理コスト 2 円/W 以下を達成すること。	
4	2014年	可溶化法を用いた使用済み太陽電池からの資源回収技術の開発	エヌ・ピー・シー 日本スペリア社 産業技術総合研究所	アルミニウム枠を取り外した後、ガラスとEVAを加熱したカッターで切り離し、次に太陽電池モジュールのEVAを200℃程度の温和な条件下で可溶化してシリコンや金属を回収する。可溶化されたEVAから溶媒を蒸留して回収し、EVAは化学原料あるいはエネルギー資源として再利用する。回収されたシリコンは熔融塩電解で精錬し、太陽電池用の高純度シリコンとして再利用する。回収された金属は混合物であるので、いったん熔融スズに溶かし銀を回収し、残りをハンダの原料として再利用する。本法は、温和な条件下でEVAを可溶化するため回収されたシリコンは比較的清浄であり、熔融塩電解法で太陽電池用高純度シリコンへ精製することができる特長を有している。	<ul style="list-style-type: none"> ・目標とする分解処理コストは5円/W以下(年間200MW処理時) ・ガラスとEVA/セルの分離装置の処理サイクルタイムは50秒/枚以下とする。 ・可溶化法によるEVA/セルからの資源回収率を80%以上 ・可溶化後の金属、シリコン500gからの銀の回収率を90%以上 	
③低コスト分解処理技術実証						
1	2015 年 ～ 2018 年	結晶シリコン太陽電池モジュールのリサイクル技術実証	三菱マテリアル	<ol style="list-style-type: none"> ①実証剥離機の開発 ②ガラス中ヒ素成分の同定機器選定と測定評価 ③試作プラントによる事業化検討 ④実証プラントの構築 ⑤事業化実証 	<ol style="list-style-type: none"> ①実用に耐えるべくパネル 1 枚を 60 秒以内で処理し、より粗粒な剥離後ガラス粒として剥離可能な実証剥離機を製作する。 ②ガラス中のヒ素成分を定量的に測定する機器を 	

					<p>選定する</p> <p>③試作プラントを製作し、実証試験に必要なデータを取得する。</p> <p>④試作プラントにおいて設備をライン化し、連続運転が実施可能な実証プラント設備を製作する。</p> <p>⑤60秒/枚でパネルを処理する連続運転を実施し、分解処理コスト(ネット)5円/W以下を確認する。</p>	
2	2015年～2016年	ウェット法による結晶系太陽電池モジュールの高度リサイクル技術実証	東邦化成株式会社	2014年度に実施した「ウェット法による結晶系太陽電池モジュールの高度リサイクル実用化技術開発」にて得た知見、基礎技術を基に大規模処理における処理コスト5円/W以下の実証評価を行い、実用化に目処をつける。また分解処理により得られた回収物の高付加価値化技術を開発し安定したリサイクル先の確保につなげる。	<p>1.試作パイロットラインでのランニング評価により処理コスト5円/Wを実証する。</p> <p>2.実機パネル10,000枚以上の処理により処理能力7.7MW/年の目処を付ける。</p>	
3	2015年～2018年	ホットナイフ分離法によるガラスと金属の完全リサイクル技術開発	エヌ・ピー・シー 浜田	太陽光パネルを割ることなく、ガラス、金属を分別し有価物として回収する	<ul style="list-style-type: none"> ・5円/W以下で太陽電池モジュールを処理できるプラントを建設する。 ・開発、実証する装置の処理能力は50秒/モジュール以下とする。 ・処理能力4.8MW/年の試作プラントにて分解処理コスト5円/W以下を実証する。 	
4	2015年～2018年	合わせガラス型太陽電池の低コスト分解処理技術実証	ソーラーフロンティア	合わせガラス型太陽電池のリサイクルにおいて、設備投資が少なく、使用熱量が少ない低コストのリサイクルプロセスを確立する。	現在生産されている合わせガラス型モジュールの生産量を鑑み、約3,600枚/日(年間200MW相当)処理におけるリサイクルコストが、5円/W(40円/kg)以下を達成するプロセスを策定する。	
5	2015年～2017年	PVシステム低コスト汎用リサイクル処理手法に関する研究開発	新菱	PVシステム汎用処理手法の主要装置であるEVA熱処理装置の改造を行い、実用化に向けた処理システム全体の長期信頼性・安定性及び経済性の実証を行う。	約15,000枚のCIS系PVモジュールの処理を行い、年間200MW処理時の処理コストが5円/W以下を実証	

④太陽光発電リサイクル動向調査					
1	2014年 ～ 2018年	太陽光発電リサイクルに関する動向および評価手法の調査	みずほ情報総研	(1)海外における使用済み太陽電池モジュールに関する動向調査 (2)太陽光発電リサイクルに関する評価手法の検討。	(1)太陽光発電リサイクルに関する海外の技術開発や政策等を継続的に調査し、動向を把握する。 (2)太陽光発電システムのリサイクル関連技術の評価指標・手法を確立し、研究開発テーマからの評価に必要なデータを収集・評価する。 評価結果を各研究開発テーマへフィードバックするとともに、開発された技術を効果的に社会へ導入するための方策を検討する。
2	2014年 ～ 2018年	太陽光発電リサイクルに関する国内動向調査、分布調査及び排出量予測	三菱総合研究所	太陽光発電リサイクルに関する国内動向調査、分布調査及び排出量予測 ①国内の技術動向、政策動向、実施事例の定点観測 ②太陽光発電システムの分布調査と、その分布に基づいた排出量予測 ③全体とりまとめ、委員会運営支援	・国内における太陽光発電システムの適正処分に関する技術動向、政策動向、実施事例などを継続的に調査し、最新の動向を把握する。 ・太陽光発電システムの導入分布推計および排出量予測手法については必要に応じて見直しを行い、推計・予測の更新を適宜行う。
⑥使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発					
1	2016年 ～ 2017年	使用済み太陽電池モジュールの低コスト修復技術の開発	ジー・エム・ジーエコエナジー株式会社	低コスト修復技術の開発 ・修復技術Ⅰ(故障BPDの交換) ・修復技術Ⅱ(バックシート損傷部位の交換) ・修復技術Ⅲ(故障セルの交換)	・使用済み太陽電池モジュールの大量発生が見込まれる2030年に太陽電池モジュールの回収・運搬、分別、修復コスト180円/枚を達成する技術を開発する。 ・修復コストを40%低減
2	2016年 ～ 2018年	On-Siteでのリユースモジュール分別技術の開発	太陽光発電技術研究組合(PVTEC)	PVTECを受け皿として、組合員によるコンソーシアムを形成し、研究開発体制を構築し、以下の研究開発活動を行う。 ①「簡便な電気安全性判定方法の開発」②「迅速な分別判断ツールの開発(温度補正係数データベース化/外観判定マニュアル作成の開発)」③「On-Siteでの分別技術開発」	使用済み太陽電池モジュールの分別処理ランニングコストを2030年に180円/枚の達成を見据えて、使用済み太陽電池モジュールの分別を1枚当たり7分で行う技術を開発するとともに、分別処理ランニングコストは、650円/枚(ただし、設備償却費、株式会社ケミトックスからリユース事業者への運搬費を除く)とする。

2.2 研究開発の実施体制

本事業を実施するための基本計画については、2013年9月に経済産業省産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発・評価小委員会評価ワーキンググループにおいてその方向性を審議、NEDO 内部で事前評価を実施し、2014年3月に策定された。また、2016年3月に研究開発項目⑤「使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発」、研究開発項目⑥「使用済み太陽電池モジュールの用途開拓検討」を追加し改訂された。

本事業は、NEDO が選定する企業、大学、民間研究機関、あるいは独立行政法人等(以下、「委託先」)が、NEDO と業務委託契約を締結し実施した。

実施した公募の状況は以下のとおりである。

【2014年度】

公募期間：

2014年3月31日から5月26日

審査項目・基準：

- ①低コスト撤去・回収・分別技術調査、④太陽光発電リサイクル動向調査
 - 1) 提案内容は、NEDO の定める基本計画の目的、目標に合致しているか。
 - 2) 調査の方法、内容等が優れていること。
 - 3) 調査の経済性が優れていること。
 - 4) 関連分野の調査・事業等に関する実績を有すること。
 - 5) 当該調査を行う体制が整っていること。
 - 6) 経営基盤が確立していること。
 - 7) 当該調査等に必要な研究員等を有していること。
 - 8) 委託業務管理上 NEDO の必要とする措置を適切に遂行できる体制を有すること。
 - 9) 総合評価
- ②低コスト分解処理技術 FS (開発)
 - 1) 提案内容は、NEDO の定める基本計画の目的、目標に合致しているか(不必要な部分はないか、太陽電池モジュールの分解処理コストの低減に繋がるものか)。
 - 2) 提案された技術(低コスト汎用分解処理技術、低コスト専用分解処理技術、有価物高付加価値化技術等)は、新規性、あるいは従来技術に対する優位性が十分認められるか。
 - 3) 太陽電池モジュールの分解処理に係る課題が存在し、その課題解決の必要性が十分認められるか(単に別分野における既存の分解処理技術を太陽電池モジュールに適用しただけの内容になっていたりしないか)。
 - 4) 提案された技術は、分解処理コストの目標を満たす見込みのあるものとなっているか。
 - 5) 事業化計画は、実現性のある内容となっているか。
 - 6) 応募者は、本研究開発の実施に必要な能力(設計、試作及び評価分析等)、体制(関連分野の開発等の実績、再委託予定先・共同研究相手先等を含めた実施体制等)を有しているか(共同提案の場合、各者の提案が相互補完的であるかを含む)。
 - 7) 総合評価

採択審査委員会 (敬称略)：

- 委員長 中村 崇 (東北大学 教授)
委員 大木 達也 (産業技術総合研究所 研究グループ長)
委員 松野 泰也 (東京大学 准教授)
委員 宮崎 裕 (有限会社コモンズ研究所 代表取締役所長)
委員 加藤 聡 (ガラス再資源化協議会 代表幹事)

件数：

応募 10 件、採択 8 件

【2015 年度】

公募期間：

2015 年 5 月 29 日から 7 月 13 日

審査項目・基準：

③低コスト分解処理技術実証

- 1) 提案内容は、NEDO の定める基本計画の目的、目標に合致しているか(不必要な部分はないか、太陽電池モジュールの分解処理コストの低減に繋がるものか)。
- 2) 提案された技術(低コスト汎用分解処理技術、低コスト専用分解処理技術、有価物高付加価値化技術等)は、新規性、あるいは従来技術に対する優位性が十分認められるか。
- 3) 太陽電池モジュールの分解処理に係る課題が存在し、その課題解決の必要性が十分認められるか(単に別分野における既存の分解処理技術を太陽電池モジュールに適用しただけの内容になっていたりしないか)。
- 4) 提案された技術は、分解処理コストの目標を満たす見込みのあるものとなっているか。
- 5) 事業化計画は、実現性のある内容となっているか。
- 6) 応募者は、本研究開発の実施に必要な能力(設計、試作及び評価分析等)、体制(関連分野の開発等の実績、再委託予定先・共同研究相手先等を含めた実施体制等)を有しているか(共同提案の場合、各者の提案が相互補完的であるかを含む)。
- 7) 応募者は本研究開発を遂行するための高い能力を有するか(関連分野の開発等の実績、再委託予定先・共同研究相手先等を含めた実施体制、優秀な研究者等の参加等)。

採択審査委員会 (敬称略)：

委員長 大和田 秀二 (早稲田大学 教授)
委員 大木 達也 (産業技術総合研究所 研究グループ長)
委員 松野 泰也 (東京大学 准教授)
委員 宮崎 裕 (有限会社コモンズ研究所 代表取締役所長)
委員 加藤 聡 (ガラス再資源化協議会 代表幹事)

件数：

応募 8 件、採択 5 件

【2016年度】

公募期間：

2016年3月28日から5月10日

審査項目・基準：

⑤ 使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発

- 1) 提案内容が基本計画の目的、目標に合致しているか(不必要な部分はないか、使用済み太陽電池モジュールのリユースに繋がるものか)。
- 2) 提案された技術は新規性あるいは従来技術に対する優位性が十分認められるか。
- 3) 太陽電池モジュールのリユースに係る課題が存在し、その課題解決の必要性が十分認められるか。
- 4) 提案内容・研究計画は実現可能か(技術的可能性、計画、最終目標の妥当性等)。
- 5) 応募者は本研究開発を遂行するための高い能力を有するか(関連分野の開発等の実績、再委託予定先等を含めた実施体制、優秀な研究者等の参加等)。また、共同提案の場合、各者の提案が相互補完的であるか。
- 6) 応募者が当該研究開発を行うことにより国民生活や経済社会への波及効果は期待できるか(企業の場合、成果の実用化・事業化が見込まれるか。大学や公的研究開発機関等で、自らが実用化・事業化を行わない場合には、どの様な形で製品・サービスが実用化・事業化されることを想定しているか)。

⑥ 使用済み太陽電池モジュールの用途開拓検討

- 1) 提案内容が基本計画の目的、目標に合致しているか(不必要な部分はないか、使用済み太陽電池モジュールのリユースに繋がるものか)。
- 2) 調査対象とするリユースモジュールを活用すべき用途について、活用すべき理由は明確かつ妥当であるか。
- 3) 調査終了後、提案する用途に対し、主体的に取り組む体制が整っているか。
- 4) 提案内容・研究計画は実現可能か(技術的可能性、計画、最終目標の妥当性等)。
- 5) 応募者は本研究開発を遂行するための高い能力を有するか(関連分野の開発等の実績、再委託予定先等を含めた実施体制、優秀な研究者等の参加等)。また、共同提案の場合、各者の提案が相互補完的であるか。
- 6) 応募者が、当該調査の結果、事業化に取り組んだ場合、国民生活や経済社会への波及効果は期待できるか(企業の場合、成果の実用化・事業化が見込まれるか。大学や公的研究開発機関等で、自らが実用化・事業化を行わない場合には、どの様な形で製品・サービスが実用化・事業化されることを想定しているか)。

採択審査委員会 (敬称略)：

委員長 大和田 秀二 (早稲田大学 教授)

委員 加藤 宏 (電気安全環境研究所 計測器管理グループ GM)

委員 杉 研也 (日本リユース業協会 事務局)

委員 津野 裕紀 (テュフラインランドジャパン株式会社 シニアスペシャリスト)

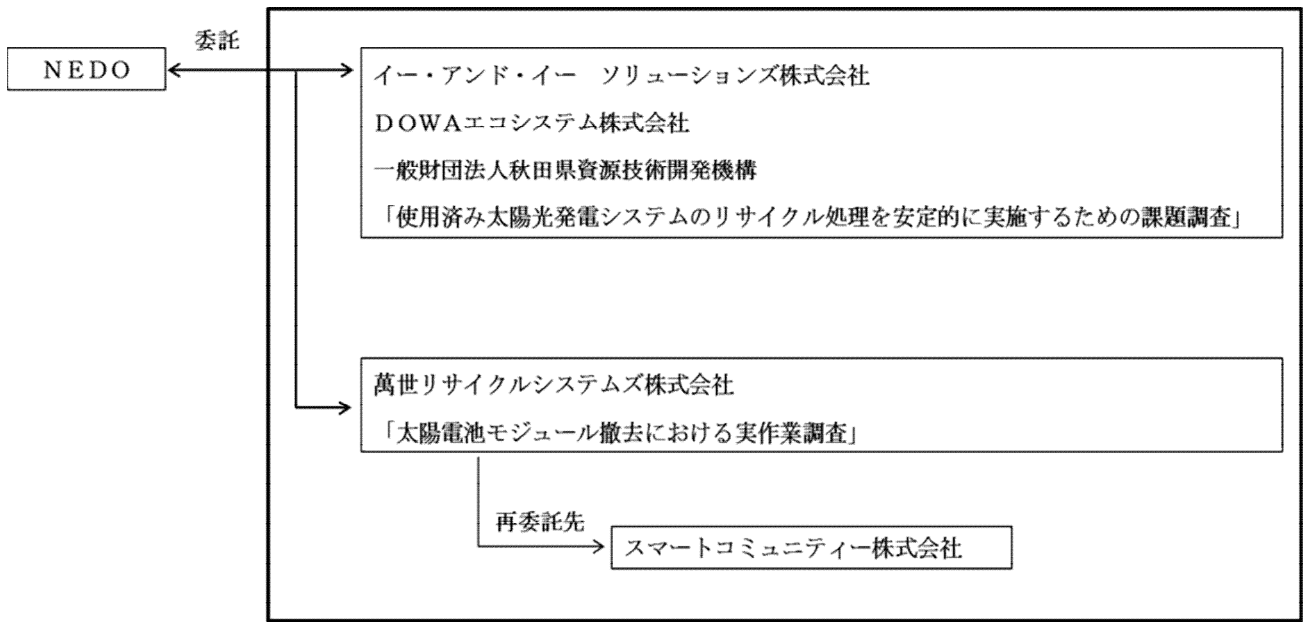
委員 波多部 彰 (日本リユース機構 代表理事)

件数：

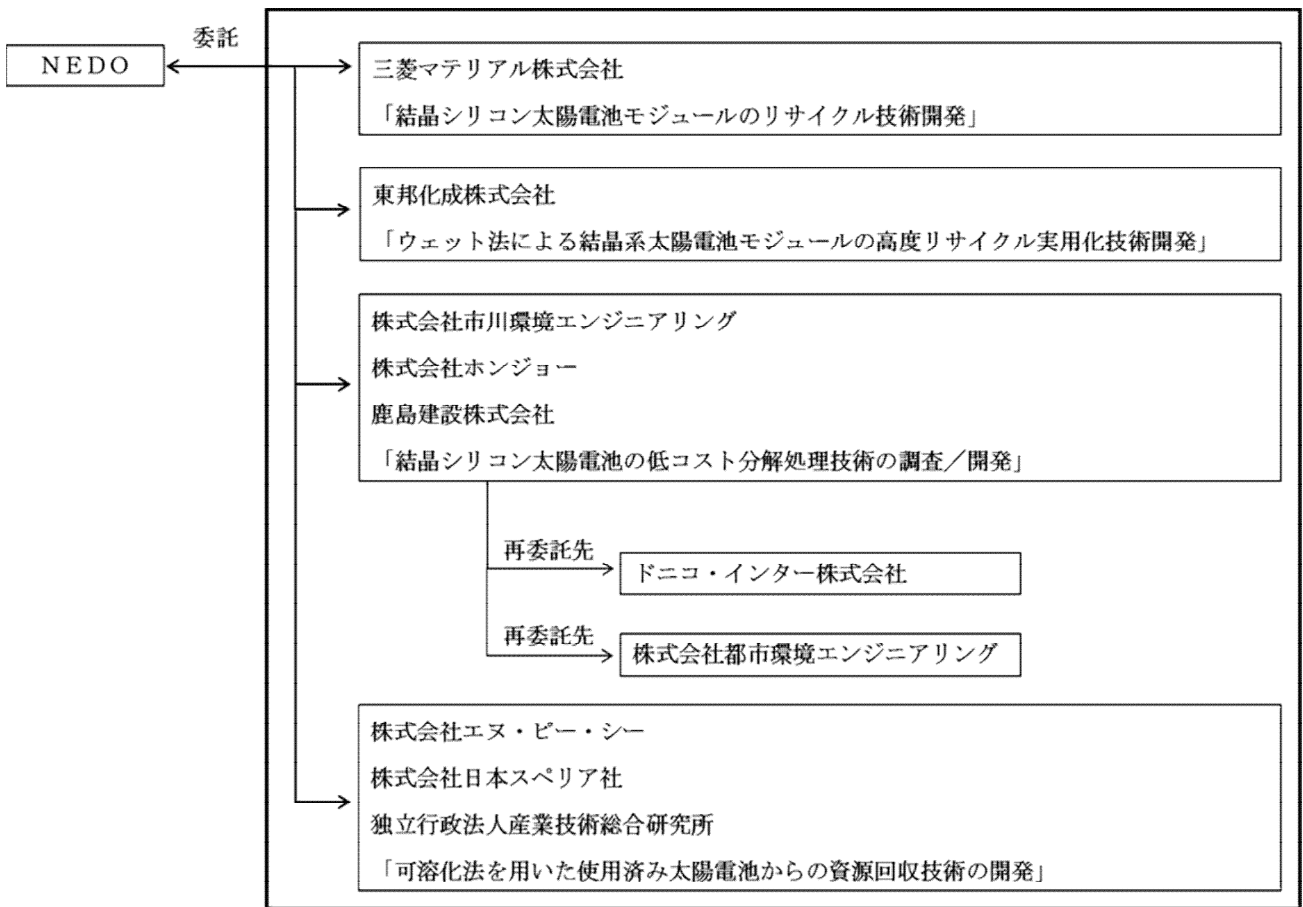
応募5件、採択2件

※開発項目⑥「使用済み太陽電池モジュールの用途開拓検討」への応募は1件であった。
その1件が不採用になったため、開発を中止した。

研究開発の実施体制を図Ⅱ-2-1～Ⅱ-2-5に示す。



図Ⅱ-2-1. 研究開発項目①「低コスト撤去・回収・分別技術調査」実施体制図 (2014年度)



図Ⅱ-2-2. 研究開発項目②「低コスト分解処理技術 FS (開発)」実施体制図 (2014年度)

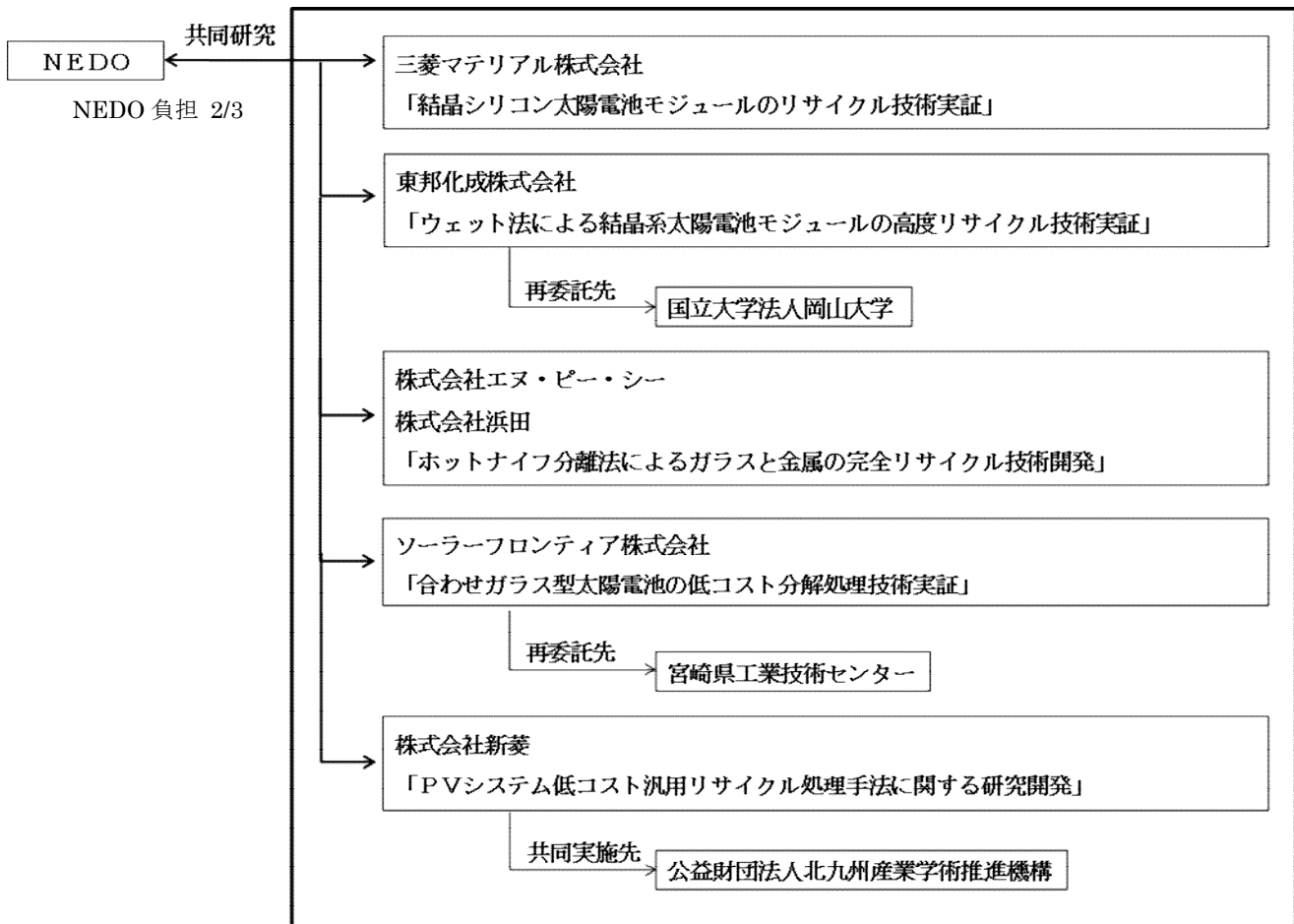


図 II-2-3. 研究開発項目③「低コスト分解処理技術実証」実施体制図
(2015～2018 年度)

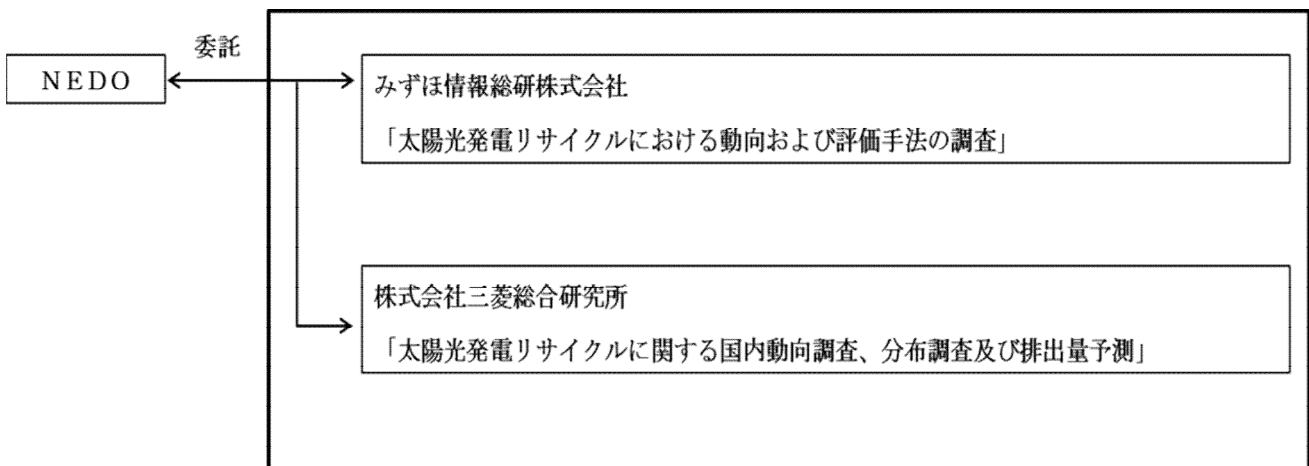


図 II-2-4. 研究開発項目④「太陽光発電リサイクル動向調査」実施体制図
(2014～2018 年度)

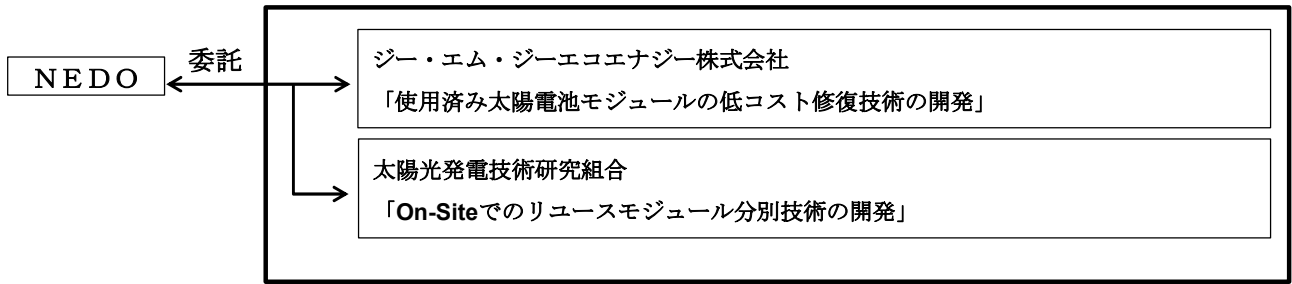


図 II-2-5. 研究開発項目⑤「使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発」
実施体制図
(2016～2018 年度)

2.3 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任と決定権をもつ NEDO は、経済産業省と密接な関係を維持しつつ、研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施した。

また、外部有識者による推進委員会を定期的開催し、委託先から報告を受け、開発の方向性などを審議し、必要に応じて開発内容の修正を実施した。

委員は技術的視点での進捗状況を確認するとともに、各テーマ、或いは委託事業者の成果を評価し、対応策について助言・提言を行った。

太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト期間中に推進委員会 9 回、現地調査会 2 回を実施した(表 II-2-4 参照)。

推進委員会 (敬称略) :

- 委員長 大和田 秀二 (早稲田大学 教授)
- 委員 松野 泰也 (千葉大学 教授)
- 委員 加藤 聡 (ガラス再資源化協議会 代表幹事)
- 委員 大木 達也 (産業技術総合研究所 総括研究主幹)
- 委員 藤崎 克己 (三菱電機株式会社 環境推進本部 企画 GM) 第 1 回～第 7 回
- 委員 亀田 正明 (太陽光発電協会 技術部長) 第 8 回～第 9 回

表 II-2-4. 推進委員会日程

実施項目	開催時期	主な検討項目
推進委員会	第 1 回 (2015 年 4 月 17 日)	排出量予測について、排出分布を用いて検討すること
推進委員会	第 2 回 (2016 年 2 月 29 日)	リフトオフプロセスの安定性を考慮すること。
推進委員会	第 3 回 (2017 年 2 月 22 日)	粗粒分の増加による銀の分布状況を把握すること。
推進委員会	第 4 回 (2017 年 7 月 26 日)	ガラス品質とリサイクル先について検討すること。
推進委員会	第 5 回 (2017 年 12 月 11 日)	ホットナイフの耐久性について検討すること。
現地調査会(推進委員会)	第 1 回 (2018 年 2 月 14 日)	粉碎+色彩選別法の現地調査。
推進委員会	第 6 回 (2018 年 4 月 20 日)	ガラスのリサイクル用途についてさらに調べること。
推進委員会	第 7 回 (2018 年 8 月 3 日)	実サイズのセパレータ処理が可能である確証を得るよう調査すること。
推進委員会	第 8 回 (2018 年 11 月 8 日)	LCA は非常に重要。バックグラウンドをそろえて、公開すること。
現地調査会(推進委員会)	第 2 回 (2018 年 11 月 22 日)	ホットナイフ法の現地調査。
推進委員会	第 9 回 (2019 年 2 月 13 日)	事業化への見通しについて。

さらに成果の発信・公表の場として、年度毎の成果報告会を、他の太陽電池関連事業と共に実施している(表 II-2-5 参照、参加者数は太陽光のセッションの出席者数)。

表Ⅱ-2-5. 成果報告会等の実施状況

実施項目	開催時期	場所
2014年度成果報告会	2015年10月28-29日	パシフィコ横浜 (参加者数：486名)
2015年度成果報告会	2016年10月31-11月1日	ワークピア横浜 (参加者数：344名)
2016年度成果報告会	2017年9月21-22日	パシフィコ横浜 (参加者数：427名)
2017年度成果報告会	2018年10月3-4日	パシフィコ横浜 (参加者数：363名)
2018年度成果報告会	2019年10月17-18日	パシフィコ横浜 (参加者数：403名)

また他の太陽電池関連事業も含めて、ホームページや展示会による広報、事業紹介パンフレットの作成、学会やシンポジウムでの講演、国際学会への参加と発表、雑誌への寄稿などを通じて成果の発信に努めている。

2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

研究開発成果の実用化に向けては、進捗報告会などを用いた迅速な進捗状況の把握を行い、進捗が著しいテーマについて、加速流用予算等の予算手当てを行い、実証評価を行える段階に進めるようマネジメントした。「低コスト分解処理技術実証」では、2015年度の調査結果から、ガラス破碎機・選別機の導入を不要と判断し、2016年度予算の減額を実施するなど、研究成果の状況に合わせて柔軟に対応することを心掛けている。

3. 情勢変化への対応

【2015年度】

- ・2014年度FSでの結果を踏まえて、実用化に向けた実証を行うために、「低コスト分解処理技術実証」について公募を行った。

【2016年度】

- ・社会負担の少ないリサイクルシステムを構築する上で非常に重要な要素として、「使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発」、「使用済み太陽電池モジュールの用途開拓検討」について公募を行った。

4. 評価に関する事項

【事前評価】

評価実施時期：2013年度

評価手法：内部評価

評価部門：評価部、技術戦略研究センター、総務部

【中間評価】

評価実施時期：2016年度

評価手法：外部評価

評価事務局：評価部

評価項目・基準：「標準的評価項目・基準」

評価委員：

分科会長 中村 崇 (東北大学 教授)

分科会長代理 原田 幸明 (物質・材料研究機構 特命研究員)

評価委員 加藤 聡 (ガラス再資源化協議会 代表幹事)

評価委員 倉持 秀敏 (資源環境・廃棄物研究センター

基盤技術・物質管理研究室 室長)

評価委員 平井 康宏 (京都大学 准教授)

評価委員 藤崎 克己 (三菱電機株式会社 環境推進本部 企画 GM)

評価委員 松野 泰也 (千葉大学 教授)

Ⅲ. 研究開発成果と実用化の見通し

1. 分野別、課題に対する主要な成果

①低コスト撤去・回収・分別技術調査(2014年度)

主要な成果、達成度について表Ⅲ-1-1に示す。

表Ⅲ-1-1. 研究開発項目①低コスト撤去・回収・分別技術調査の主要な成果

テーマ名	目標	成果	達成度	備考
(1)使用済み太陽光発電システムのリサイクル処理を安定的に実施するための課題調査				
①撤去の調査	撤去、回収、分別に要するコスト5円/W 目標コスト5円/W以下にさらに削減するための目標設定と、それに向けた課題抽出、必要な対策を調査し、取りまとめる。	産業用発電施設の撤去費用に関するアンケート調査において、杭基礎の場合、23.0円/W、コンクリート基礎の場合、27.4円/W程度であることを確認。 本調査での撤去費用にかかる試算結果について、産業用太陽光発電施設で見込まれている撤去費用(建設コスト5%)を下回っていることが確認できた(建設コストは調達価格検討委員会資料10～50kW平成24年7～9月期のコストデータをもとに算出)。	○	
②回収の調査		一般化した回収コストの試算結果より。トラック輸送の場合、1Wあたり1.62円、JRコンテナの場合、1Wあたり1.49円であり、5円/Wを下回ることが確認された。 コレクションポイントの適正配置、保管費用の削減、効率のよい積載などがコスト削減の課題となっている。	○	
③分別の調査		分別試験において1Wあたり0.28円程度を確認。 標準作業書の作成などによる効率化等での更なる低減も見込まれる。	○	
(2)太陽電池モジュール撤去における実作業調査				
①撤去作業の現場調査及び撤去の実作業	撤去の技術課題の抽出	太陽電池モジュールの撤去調査によって得られた情報を元に、模擬屋根を用いて太陽電池モジュールの撤去を試験的に行い、撤去における課題として6つの項目が挙げられた。その中でも特にモジュールの撤去費用に寄与している項目として「太陽電池モジュール設置の諸条件の違い」「太陽電池モジュールの荷下ろし工事に係る工数」「屋根上作業の危険性」が挙げられた。	○	
	課題の解決策	撤去の調査によって抽出された6つの課題について、調査を元にそれぞれ解決策の提示を行った。	○	
	撤去コスト削減の可能性の明確化	抽出された6つの課題のうち、解決策を用いてコスト削減が可能で、且つ	○	

		撤去側の改善によりコストの削減が可能であるものが2つあることが判明した。		
	目標コストの策定	住宅用の太陽光発電システムにおいてパネル24枚の撤去を行う場合の撤去費用は198,000円という試算結果となった。その後、撤去における課題を解決することにより、現状より40%程度の撤去コスト削減が可能であると推定された。	○	

※達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：達成見込み

②低コスト分解処理技術 FS (開発) (2014 年度)

主要な成果、達成度について表Ⅲ-1-2 に示す。

表Ⅲ-1-2. 研究開発項目②低コスト分解処理技術 FS (開発)の主要な成果

テーマ名	目標	成果	達成度	備考
(1)結晶シリコン太陽電池モジュールのリサイクル技術開発				
①小型試験機の設計・製作	パネルからガラスを剥離するためにローラ式剥離機を設計・製作する。	小型試験機の設計・製作した。回転する2本のローラ間にパネルを通すことでガラスを剥離し、シートからガラス粒を選択的に剥離する構造とした。	○	処理速度を勘案した実証機の製作を進める。
②前処理方法の検討	太陽電池パネルからガラス分を剥離するために有効な手段を検討する。	ガラスを固定している熱軟化性樹脂を加熱することにより剥離性が向上することがわかった。加熱方法としてハロゲンヒータを採用した。	○	パネル毎に条件を適正化する必要がある。
③最適な運転条件の検討	製作した試験機において最適運転条件を検討する。	試験機の運転条件を変え、種々のパネルにおいて剥離試験を実施した。結果、パネルの種類により剥離状態に差異があることがわかった。	○	パネル毎に条件を適正化する必要がある。
④選別方法の検討	剥離した回収物においてガラス分と金属分を選別する方法を検討する。	剥離したガラス粒について、色彩選別機により選別を行った。結果、シート分や金属分が付着しているものとしていないものを選別が可能であることがわかった。	○	選別プロセスを把握するために、サンプル量を確保し検討を重ねる必要がある。
⑤回収物の評価	ガラス分と金属分各々について再資源化が可能かを評価する。	剥離後の粒度毎ガラスとシートについての組成評価、及び物質収支を確認した。結果、金属含有の少ない0.6mm以上のガラス粒については、再資源化できる目途がたった。	○	パネル毎に使用している金属の種類や量に違いがあるため、回収物の評価検討を重ねる必要がある。
⑥剥離・選別ラインの設計	処理コストを試算し、5円/W以下を目標とする。	上述の知見をもとに剥離・選別ラインを想定し、分解処理コストを試算した。結果、2.9円/Wで処理できる見通しを得た。	○	本技術を用いた実用規模のスケールの剥離・選別ラインを検討し、実証試験を実施する
(2)ウェット法による結晶系太陽電池モジュールの高度リサイクル実用化技術開発				
①剥離液 A の消費量低減策の検討	ガラス面残存 EVA を除去する剥離液 A の消費量を 1/10 まで低減し剥離液コスト低減を狙う。	ガラス面側から 0.1mm 以下の厚みの EVA を残す所までの研削を実施することで剥離液 A での膨潤量を 1/10 まで低減できる見通しを得た。また、EVA への膨潤飽和が起きるまでの特性を確認(膨潤飽和時間約 30 分)、及び、膨潤飽和までの過程で物	○	

		理力を加え、剥離可能最短時間の計測(最短剥離時間 5 分)を実施。		
②剥離液 B の消費量低減策の検討	ガラスから分離した EVA 積層体から金属を分離する剥離液 B の消費量を 1/10 まで低減し剥離液コスト低減を狙う。	剥離液 B での EVA を膨潤させるプロセスは、消費量低減に限界があることが判明。「次々項目④」にて、消費量低減策も含め剥離プロセスを変更することで処理コストを達成できる見通しを得た。	○	
③剥離液 A による処理速度向上のためのシステムの基本構成検討	剥離時間の目標 2 時間、実験機の製作・コスト検証。	①により剥離液 A 浸漬槽への EVA 持込量を低減、かつ膨潤飽和が起きる前に浸漬処理を終えブラシによる物理力にて EVA の剥離を行うことで、処理時間を短縮できる見通しを得た(剥離時間 5 分)。	○	
④剥離した EVA・金属複合体から金属類を分離するための B 液処理の基本システム構成の検討	剥離液 B による処理の基本システム構成確立。	EVA と金属類の複合体に剥離液 B を加え膨潤、剥離を促進するため攪拌機を使用し液中でのせん断力を加えた後、比重分離にて EVA とシリコン・金属の分離を行うプロセスを考案。 但し、剥離液 B により EVA を膨潤させることで消費量大幅低減と分離時間の短縮が困難であることからプロセス改善の検討実施した結果、単価が安く、比重分離にて分離時間を大幅短縮させるための新たな溶媒を使用し、同様の評価を実施。シリコン・金属の回収率約 80%、かつ処理時間においても 5 分を達成できる見通しを得た。	○	
(3) 結晶シリコン太陽電池の低コスト分解処理技術の調査/開発				
①ロール式破砕機によるガラスの剥離	ガラス回収率 50wt%以上あること。	ロール間隔の最適値は 6mm であったがガラス回収率は平均 44wt%であった。	△	パネル毎にパネル厚さが異なるためロール間隔制御よりロール間の圧力制御ができる機構が必要。
②ハンマー型破砕剥離機と遠心風力破砕機によるガラス剥離率の比較	ハンマー型破砕剥離機と遠心風力破砕機の選定すること。	比較ではハンマー型破砕剥離機が優れ、ロール式破砕機との組合せではガラス回収率は総合平均 60wt%であった。	○	
③効率的な分級法の検討	回収したガラスとその他が有価性のある状態で分離できること。	ガラスとバックシート等のセル屑とふるい下に分級でき、それらはすべて有価性あることを確認した。	○	
④低コスト	200MW/年処理時	建設費用、運転費用、有価物売却益	○	

処理の実現	に処理コスト 2 円/W 以下を達成すること。	等を考慮して 0.32 円/W 処理(有価物売却益 1.88 円/W を含む)の見通しを得た。		
(4) 可溶化法を用いた使用済み太陽電池からの資源回収技術の開発				
①太陽電池モジュールのガラスとEVA/セルの分離	サイクルタイム：50秒/枚	サイクルタイム：50秒/枚	○	様々な使用済みモジュールでの実験、刃の耐久性の検証
②可溶化法によるEVA/セルからの資源回収	80%以上の資源回収率	90%以上の資源回収率	○	ビーカーレベルでの実験では達成したが、スケールアップし確認する必要
③ PV モジュールより分離する金属回収技術の開発	金属・シリコン 500g から銀の回収率 90%以上	可溶化で回収した金属・シリコン 482g から銀の回収率 51%を確認。	△	モジュールに構成しなかった太陽電池セルからは銀の回収率 89%であった。条件を詰めれば回収率向上の可能性は十分にある。

※達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：達成見込み

③低コスト分解処理技術実証(2015～2018 年度)

主要な成果、達成度について表Ⅲ-1-3 に示す。

表Ⅲ-1-3. 研究開発項目③低コスト分解処理技術実証の主要な成果

テーマ名	目標	成果	達成度	備考
(1)結晶シリコン太陽電池モジュールのリサイクル技術実証				
①実証剥離機の開発	実用に耐えるべくパネル 1 枚を 60 秒以内で処理し、より粗粒な剥離後ガラス粒として剥離可能な実証剥離機を製作する。	パネル 1 枚を 60 秒以内で剥離可能な実証剥離機を製作した。	○	
②ガラス中ヒ素成分の同定機器選定と測定評価	ガラス中のヒ素成分を定量的に測定する機器を選定する。	可搬型の蛍光 X 線分析装置を導入し、パネル 1 枚あたり 60 秒以内で測定可能なであることを確認した。	○	
③試作プラントによる事業化検討	試作プラントを製作し、実証試験に必要なデータを取得する。	実証剥離機、振動篩、色彩選別機を設置した試作プラントを製作し、処理試験(120 枚程度)を行い、分解処理コストを試算した。	○	
④実証プラントの構築	試作プラントにおいて設備をライン化し、連続運転が実施可能な実証プラント設備を製作する。	実証プラントの据付工事完了。安全に実証試験を行うために安全対策を実施。	○	
⑤事業化実証	60 秒/枚でパネルを処理する連続運転を実施。	4 時間以上の連続運転を実施。併せて電力量計を設置しユーティリティの測定を実施。	○	
	分解処理コスト(ネット)5 円/W 以下を確認。	2018 年度情勢	分解処理コスト(ネット)3.9 円/W を確認した。	◎
		2014 年度情勢	分解処理コスト(ネット)1.6 円/W を確認した。	◎
(2)ウェット法による結晶系太陽電池モジュールの高度リサイクル技術実証				
①実機パネルでの実証	分解処理コスト目標；5 円/W	処理コスト試算結果 2.35 円/W (有価物売却益 2.81 円/W を含む)。実使用後の返却されたパネルの EVA 剥離工程にてガラスからの EVA 剥離力が弱く、改良。有価物売却コストを除くモジュール分解コストとしては 5.16 円/W で更なるコスト低減。	○	
②試作パイロットラインによる実証	分解処理コスト目標；5 円/W	研削、分離工程に関する実証機仕様確定。剥離工程の実証機仕様詰め。パイロットライン稼動によるコスト検証の結果、3.81 円/W を試算した。	○	
③回収シリコンの純化	シリコン純化の低コストプロセスの	分離工程で回収した EVA、金属類を含む EVA 積層体の EVA 除去、エッ	○	

研究	確立。	チングにより純度 98.5%以上の金属シリコン粒子を回収した。		
④有価物評価検証	有価物の価値確定(分解処理含むトータル処理コスト 0.1 円/W)と売却ルートの確立。	アルミフレーム、板ガラス、金属含有シリコンによる回収物の有価物価値は 3.42 円/W となった。分解処理含むトータル処理コスト 0.39 円/W となり目標未達。	×	
(3)ホットナイフ分離法によるガラスと金属の完全リサイクル技術開発				
①アルミフレーム除去装置の開発	パネル割れ率 0.1% 以下	パネル割れ率 0.03%以下を達成。	◎	
②ホットナイフ分離装置の改良及び実証	EVA 残膜厚 0.1mm 以下 ホットナイフ耐久性、2,400 枚/交換	EVA 残膜厚 0.1mm を達成。 ホットナイフ耐久性、2,500 枚/交換	○	
③割れガラス分離装置の開発	EVA 残膜厚 0.1mm 以下 ホットナイフ耐久性、1,000 枚/交換	EVA 残膜厚 0.1mm を達成 ホットナイフ耐久性、1,100 枚/交換	○	
④ガラスカレットを板ガラス原料にするための調査	ガラス原料売却単価 3 円/kg 以上	ガラス原料売却単価 5 円/kg 以上を確保	○	
⑤回収金属の高価売却単価の調査	EVA/セル層を 45 円/kg 以上で売却する。	売却評価 57~100 円/kg を得た。	○	
⑥実証・試験プラント建設及び実証実験による処理コスト評価	処理コスト、5 円/W 以下	割れなしモジュールの処理コスト 2.23 円/W を達成。割れモジュールの処理コスト 3.82 円/W を達成。	◎	
(4)合わせガラス型太陽電池の低コスト分解処理技術実証				
①基板ガラスとカバーガラスの解体技術開発	・カバーガラス割れ率 ≤5%。 ・処理時間 ≤ 100 秒/枚。	パネルセパレータ(300mm 角基板)にて、 ・カバーガラス割れ率 <1% ・処理時間：80 秒/枚 を確認	○	
②カバーガラス EVA の剥離技術開発			○	
③基板ガラス EVA の剥離技術開発	・処理時間 ≤ 1.2h/バッチ。 ・材料費 ≤ 1.12 円/W。	300mm 角基板を破砕したワークにて、 ・処理時間：1.0h/バッチ ・材料費：1.12 円/W を達成	○	
④CIS 膜の剥離技術開発			○	
⑤試作プラント構築、実証	各開発結果から得られたデータに基づいて試作プラン	上記結果に基づいた量産工場仕様を元にコスト試算し、3.38 円/W を達成	◎	

	トを構築する。 処理コスト、5 円/W 以下			
(5)PVシステム低コスト汎用サイクル処理手法に関する研究開発				
①システム整備と装置立上げ	汎用リサイクル処理システムの整備及び立上げが完了していること。	汎用リサイクル処理システムの整備及び立上げを完了。	○	
②EVA 熱処理装置の長期信頼性・安定性・経済性の向上	EVA 熱処理装置の改造及び性能評価が完了していること。	EVA 熱処理装置の改造及び性能評価を完了。	○	
③処理システム全体の実用性及び処理コスト評価	連続処理試験に供する CIS 系工場スクラップの提供について、PV モジュールメーカーとの契約が完了していること。	CIS 系工場スクラップ 15 千枚の提供について契約及び納入を完了。	○	
	リサイクル処理で得られた回収物の売却先、及び産廃物の処理先との契約が完了していること。	回収物の有価売却先、及び産廃物の処理先との契約を完了。	○	
	CIS モジュールで 5 円/W 以下を実証する(有価物売却益なし：7 円/W 以下)。	24 時間体制の連続処理試験で、CIS モジュールを約 15 千枚、分解処理を行い、分解処理コスト 3.7 円/W を実証(有価物売却益なし：6.1 円/W)。	◎	

※達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：達成見込み

④ 太陽光発電リサイクル動向調査(2014～2018 年度)

主要な成果、達成度について表Ⅲ-1-4 に示す。

表Ⅲ-1-4. 研究開発項目④太陽光発電リサイクル動向調査の主要な成果

テーマ名	目標	成果	達成度	備考
(1)太陽光発電リサイクルにおける国内外動向および評価手法に関する調査				
①海外における使用済み太陽電池モジュールに関する動向調査	太陽光発電リサイクルに関する海外の技術開発や政策等を継続的に調査し、動向を把握する。	海外諸国における使用済み太陽電池モジュールリサイクル等に関する政策や市場の動向、リサイクル技術の開発動向を継続的に調査し、欧州、米国、中国、韓国などの状況を把握した。	○	
②太陽光発電リサイクルに関する評価手法の検討	太陽光発電システムのリサイクル関連技術の評価指標・手法を確立し、研究開発テーマからの評価に必要なデータを収集・評価する。 ・評価結果を各研究開発テーマへフィードバックするとともに、開発された技術を効果的に社会へ導入するための方策を検討する。	太陽光発電リサイクルに関連する評価手法・視点に関する既存事例の概略を把握し、それらを参照のうえ、太陽電池モジュールリサイクル技術の評価手法を検討し、本プロジェクト下で実施されている「低コスト分解処理技術実証」の各テーマを対象とした環境性、社会性の評価を実施した。評価に際しては各テーマからのデータ提供を受け、評価結果のフィードバックを行った。 また、開発技術の導入・実用化により期待される埋立廃棄物の削減や、回収ガラスのリサイクル(再資源化用途)等について検討を行った。太陽光発電リサイクルに関連する評価手法・視点に関する既存事例の概略を把握し、それらを参照のうえ、太陽電池モジュールリサイクル技術の評価手法を検討し、確立した手法をガイドラインとして取り纏めるための構成案を検討した。また、既存プロジェクトを対象とした予備的な環境影響評価を実施した。	○	
(2)太陽光発電リサイクルに関する国内動向調査、分布調査及び排出量予測				
①国内の技術動向、政策動向、実施事例の定点観測	国内における太陽光発電システムの適正処分に関する技術動向、政策動向、実施事例などを継続的に調査し、最新の動向を把握する。	・最新の技術動向を俯瞰的に整理した「開発戦略マップ」を作成。 ・国内における主たる政策動向について整理。 ・太陽光発電システムのリユースの実態及び今後の事業化の可能性・課題等を検討。	○	
②太陽光発電システムの分布調査と、その分布に基づいた排出量予測	太陽光発電システムの導入分布推計および排出量予測手法については必要に応じて見直しを行い、推計・予	・国内における太陽光発電システムの導入量データを整備。 ・初期状態、出力低下率、排出判断に至る出力低下率をパラメータとする排出量推計モデルの有効性を確認。	○	

測	測の更新を適宜行う。国内の太陽光発電システム導入分布を考慮した排出量予測をまとめる。	・上記排出量推計モデルを用いて、複数シナリオの排出量について推計を実施。		
---	--	--------------------------------------	--	--

※達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：達成見込み

⑤使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発(2016～2018年度)

主要な成果、達成度について表Ⅲ-1-5に示す。

表Ⅲ-1-5. 研究開発項目⑤使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発の主要な成果

テーマ名	目標	成果	達成度	備考
(1) 使用済み太陽電池モジュールの低コスト修復技術の開発				
①修復技術 I (故障 BPD の交換)	<ul style="list-style-type: none"> ・ BPD 交換後モジュールの Pmax 低下率: < 5% ・ コスト: < 1.41 円/W 	物理的なポッティング材除去法を開発し、最終目標を達成した。	○	
②修復技術 II (バックシート損傷部位の交換)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 補修後モジュールが信頼性評価試験 (DH1000, TC50) に合格 ・ コスト: < 1.43 円/W 	物理的なバックシート除去法を開発し、最終目標を達成した。	○	
③修復技術 III (故障セルの交換)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 補修後モジュールが信頼性評価試験 (DH1000, TC50) に合格 ・ コスト: < 11.25 円/W 	RTV 法による補修方法を開発し、最終目標を達成した(透明 RTV-カバーガラス間剥離の問題、バックシート膨らみの問題が発生したが、これらを解決することができた)。	○	
④分別ラインの自動化の検討	<ul style="list-style-type: none"> ・ 低コスト自動分別ラインの設計仕様の提案 	モジュール洗浄、EL 検査にオンサイト装置を導入することにより、コストを 60%低減した。	○	
(2) On-Siteでのリユースモジュール分別技術の開発				
①簡便な電気安全性判定方法の開発	実際のリユースモジュール健全性判定試験方法として、時間短縮された気中絶縁抵抗試験を採用する。	気中試験は断念。湿潤試験での効率化を行い、電圧印加時間を従来の 2 分から、ベストケースで 10 秒まで短縮できた。	○	
②外観判定マニュアルの作成	現場での作業を基に外観判定のための教育にも使用出来る体裁に仕上げる。	外観判定レベルを 3 段階に整理し、マニュアルを作成した。	○	
③太陽電池モジュールの温度係数のデータベース化	温度係数データベースをまとめるとともに、出荷品質ランクの判定マニュアルを作成する。	JET 認証品 24,947 件の内、10,731 件を確認。 温度係数非公開品について補正方法を決定。	○	
④移動式 PV ラボを活用したリユースモジュール分別技術の開発	使用済み太陽電池モジュールの分別を一枚あたり 7 分以内で行う。	分別時間 6 分 10 秒を実証し、目標の 7 分/枚を達成した。	○	

※達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：達成見込み

2. 個別テーマの成果と実用化見通し

①低コスト撤去・回収・分別技術調査

- (1)使用済み太陽光発電システムのリサイクル処理を安定的に実施するための課題調査
(イー・アンド・イー ソリューションズ、DOWA エコシステム、秋田県資源技術開発機構)
【2014 年度】

1.成果詳細

使用済み太陽光発電モジュールは、普及後の日数が浅いため、経年劣化等によりまとめて発生することはなく、非常にばらついた個所から、主に自然災害等の原因により突然かつ不定期に発生することが想定される。本調査では、ヒアリング調査などのほか、廃棄モジュールを実際に回収し受け入れることができる体制を一か所(秋田県のレアメタル等リサイクル資源特区内)で整え、破損品、不良品などの発生により生じた廃棄モジュールを実際に回収し、回収にかかる情報取得を主な目的として実施している。そして撤去などの情報の他、破損等の要因の把握など、これまで整理されていない、実際的な情報整理、課題の取り纏めを行っている。

また、欧州では太陽光発電モジュールのリサイクルが先行しているが、コレクションポイント等の回収に関する点については、既存の調査において余りフォーカスされてきておらず、本調査において現地での情報の収集、整理を行った。

a) 撤去に関する調査

i) 現状及び課題

撤去について、現状は一部破損品、不良品が発生し、個別・小規模での対応がなされており、撤去作業についての知見の集積はなされていない。欧州調査において、撤去作業については、太陽光発電事業者の責任範囲で行われ、現場撤去・回収以降は PV CYCLE との調整で実施されていることが確認された。

撤去に関する課題について、設備の長期間利用による経年劣化による作業阻害、あるいは架台、基礎等の多様な組合せによる効率的作業の阻害が想定される。この場合、取外し作業は設置作業に比べて、労力を要するものになると考えられる。課題解決策として、現状としてはまず撤去事例にかかる事例の集積と検証、解体撤去に関する作業手順の作成と撤去技術講習などの実施が考えられる。また、易解体設計の検討、導入も有効と考えられる。

ii) 撤去コストの検討

本調査では、施工事例あるいは一定規模の発電施設を想定した現状での解体撤去コストの試算を行った。調査方法は施工業者等に対するアンケート、ヒアリング調査によるものである。調査対象として、家庭用太陽光発電施設、産業用太陽光発電施設それぞれに、概略の共通仕様を設定し、概算見積もりを入手し、その結果を整理している。共通仕様を含めた撤去コストの調査方法を以下に示す。

家庭用の撤去コストについて、今回の仕様及び規模(4.32kW)の場合、撤去費用全体のコストは、リユースを想定しない場合(全回答)で平均 246 千円程度となり、モジュール 1 枚あたりで計算すると、13,672 円(寄棟)、12,931 円(切妻)となり、屋根の形状による大きな違いは見受けられなかった。コスト区分として、大きな比率を占めたのが足場工事を含めた準備作業であり、両方の屋根の形状とも平均 4 割程度を占めていることが分かった。

リユースを想定した場合とリユースを想定しない場合(「する」を回答した結果のみ比較)については、寄棟で「リユースする場合」が 14,183 円/枚、「リユースしない場合」が 12,648 円/枚であり、切妻の場合、「リユースを想定する場合」が 13,371 円/枚、「リユースを想定しない場合」12,321 円/枚であった。屋根の形状の両ケースとも、「リユースを想定する場合」は「リユースを想定しない場合」に比べて、1 割程度のコストアップが見込まれた。また、これらの増加分はリユースのために破損しないような養生費用や取外し後の梱包のための費用であることがアンケート調査の個別の回答からわかっている。

解体撤去(住宅用の屋根)の場合は、足場等の準備作業のコストが大きなウェイトを占めていることが見積検討から明らかとなっている。安全確保の観点からコスト削減を目的とした検討は難しいが、足場については、安全確保の観点だけでなく、足場の作業性向上を考慮することにより、総合的な撤去作業の効率を高める方策が有効と考えられる。

表Ⅲ-2-①-(1)-1 撤去コストの調査方法

1. 家庭用	
規模	240W×18枚 (4.32kW)
屋根の形状	寄棟と切妻の両ケースを設定。
2. 産業用	
規模	240W×200枚 (48kW)
基礎	杭基礎とコンクリート基礎の両ケースを設定。
架台	溶融亜鉛メッキを設定。
3. アンケート調査対象	
○対象企業：モジュール販売業者、施工業者等(一部、解体業者へのヒアリング結果含む) ○対象企業の立地する地域：全国(東北～九州) ○対象企業の概要：家庭用及び産業用の太陽光発電設備の取扱(販売、施工等)実績がある会社 ○対象数：65社にアンケート送付 ○コスト範囲：準備(足場工事費等)、モジュール撤去、架台撤去、パワーコンディショナー・接続箱等撤去、その他(リユースの場合は養生費等)	

表Ⅲ-2-①-(1)-2 家庭用発電施設に関する撤去コスト (アンケート結果)

撤去コスト (円)	寄棟			切妻		
	しない (n=12)	する/しないの両方を回答 (n=7)		しない (n=11)	する/しないの両方を回答 (n=6)	
		しない	する		しない	する
合計	246,103	227,663	255,291	232,749	221,773	240,673
1枚あたり	13,672	12,648	14,183	12,931	12,321	13,371
1Wあたり	57.0	52.7	59.1	53.9	51.3	55.7

産業用の撤去コストについて、今回の仕様、規模(48kW)の場合、撤去費用全体のコストは、リユースを想定しない場合(全回答)で「杭基礎」で平均 1,106 千円程度(1枚あたり 5,530 円)、「コンクリート基礎」で 1,314 千円(6,571 円)となり、コンクリート基礎は杭基礎の 2 割程度のコストアップが見込まれた。理由としてはヒアリング調査結果などからも、杭基礎はコンクリート基礎に比べて、取扱い(取外し)が容易であり、その分の作業コストが低く見込まれたものと推察される。

リユースを想定した場合とリユースを想定しない場合(「する」を回答した結果のみ比較)については、杭基礎で「リユースを想定する場合」が 7,261 円/枚、「リユースを想定しない場合」が 6,404 円/枚であり、コンクリート基礎の場合、「リユースを想定する場合」が 7,804 円/枚、「リユースを想定しない場合」が 6,985 円/枚であった。基礎の種類の場合とも、「リユースを想定する場合」は「リユースを想定しない場合」に比べて、1 割程度のコストアップが見込まれた。これは家庭用の場合と同レベルのコストアップであった。

表Ⅲ-2-①-(1)-3 産業用発電施設に関する撤去コスト (アンケート結果)

撤去コスト (円)	杭			コンクリート		
	しない (n=11)	する/しないの両方を回答 (n=7)		しない (n=10)	する/しないの両方を回答 (n=6)	
		しない	する		しない	する
合計	1,105,909	1,280,714	1,452,143	1,314,200	1,397,000	1,560,750
1枚あたり	5,530	6,404	7,261	6,571	6,985	7,804
1Wあたり	23.0	26.7	30.3	27.4	29.1	32.5

産業用の太陽光発電所の場合は、建設(システム)コストの 5%程度を既に撤去コストとして織り込んでいるのが通常であるということが本調査においても確認している。5%のコストと本調査で想定した撤去コストの範囲、定義が異なり厳密な比較はできないが、本調査試算による撤去コスト(下表の a)の値)と上記の考えを試算対象施設で適用した場合(システムコストの 5%)の撤去コスト(下表の d)の値)を参考として比較した。

本調査の試算(想定規模の撤去コストトータル)は 1,106 千円(杭基礎)、1,314 千円(コンクリート基礎)で、システムコスト 5%(撤去費用)は 1,133 千円であり、本調査の試算は概ね 5%という目標値をクリアできることが期待できる。

表Ⅲ-2-①-(1)-4 撤去コストの目標値確認

項目	内容
a) 撤去コスト	システム費用の 5% (太陽光発電事業計画における計上)
b) 太陽光発電のシステム費用	47.2 万円/kW (10kW-50kW 未満、2012 年 7-9 月期)
c) 本試算事例のシステムコスト	22,656 千円 (48kW×47.2 万円/kW)
d) 本試算事例の撤去コスト (c)システムコストの 5%)	1,133 千円 (22,656 千円×5%)
A) 本試算 (撤去コスト) (処分費、売却コストは加味していない)	1,106 千円 (杭基礎、平均)(W あたり : 23.0 円)
	1,314 千円 (コンクリート基礎、平均)(W あたり : 27.4 円)

iii) 課題解決策の検討

架台、基礎については、地形、地質、気象、あるいは関係者が所有する技術により、多様な種類、多様な組合せが存在する。このため、解体撤去作業においては、これらの要素を考慮する必要があり、現状では資機材の選定含めてケースバイケースの対応となると考えられる。一般的な考え方として、モジュールの固定を簡単にする、架台の易解体設計などが考えられるが、設置時点ではそれを考えて選択することは困難である。

一方で、撤去後の太陽光発電モジュールのリユースを想定する場合には、全体の流れも大きく影響を受ける。リユースを行うのかどうかの決定は、計画的撤去の場合に重要な観点で、これにより解体撤去の効率も大きく変わることになる。

もう一つの重要ポイントは、スキルの向上である。現状、事例は少ないが、作業手順の作成、撤去技術講習などの継続的な実施は重要である。また、作業は労働安全を担保している必要があり、撤去事例にかかる事例の集積、検証を行い、効率化、安全な作業のための向上を図っていくことが、健全なリサイクルを行う上で必要な基礎要素となると思われる。

大規模なケースに該当するが、架台については現場での分別を確実にを行うことにより、素材に適した引取施設に運搬することができ、回収(運搬)に関する効率化を行うことができる。発電モジュールについては、アルミの枠を太陽光発電施設の現場で行うことができれば、アルミとその他とそれぞれに適した引取施設(保管、リサイクル施設)に提供することが可能であり、回収(輸送)コストの低減につながる可能性がある。このため現場でのアルミ枠の分別を効率的に行う方法、技術が有効となる。

また、製品設計時にアルミ枠の取外しを考慮した技術があれば、これを適用することにより、後の撤去、回収、リサイクルの工程の効率化に貢献するものと考えられる。

b) 回収に関する調査

i) 現状及び課題

廃棄される太陽光発電モジュールについて、現状発生する分については大きく分けて工場ロットアウト、製品の不具合、破損(運搬時、施工時、運転時(自然災害等))、使用済みとなったものの廃棄が考えられる。ヒアリング調査の結果から不具合の場合は多くがパネルメーカーにより回収されており、その後の処理については太陽光発電事業者としては不明との回答であった。破損に関しては、設置時の作業中等における破損、積雪及び強風等の自然災害による破損の事例があった。回収に関する欧州調査において、産業用の発電施設からの廃棄モジュールの発生件数は少ないが、1箇所あたりの発電規模が大きく、モジュール数は多い。従って、PV CYCLE ではダイレクトコールで情報を得た後、収集計画を組んで実行している。家庭用については、外した工事会社や所有者が PV CYCLE のウェブサイトで申し込みをした後、最寄りのコレクションポイントまで、所有者が運搬することになる。コレクションポイントは、地域での偏りが生じないように 50km 以内には、2つ以上が重ならないよう、認証する際に注意されている。コレクションポイントは、PV パネルが多く設置されるところに、設置業者が多く存在し、コレクションポイントの密度も濃くなる傾向にあることを確認している。

回収の課題として、運搬時の積載効率及びロットの確保が効率化の観点から重要と思われる。また、回収時のパネルの破損防止などの安全確保の配慮も必要となる。

ii) 回収コストの検討

ii) -1 回収のための準備

本調査では、破損品、不良品などの発生により生じた太陽光発電モジュールを実際に回収し、回収コストの検討の他、その他、破損等の要因の把握を行った。太陽光発電モジュール等の回収のため、専用の組み立て式の通函を作成、用意した。欧州においてはコレクションポイントにおいて既にこの様な通函が使われているが、海外製の通函はコレクションポイントにおけるフォークリフト等の使用を前提としたものであるが、日本の特性を考慮して、キャスターによる通函の移動が容易であること、リフター付きのトラックなども利用できることを改良点として、オリジナルに製作した。通函にはモジュールをそのまま入れることができる、帰り便では折りたたんで輸送効率を上げることができる、壁材は遮光が可能な軽量素材であるなどの特徴は欧州のものと同変ならないものとしている。

回収を実施するにあたって、経済産業省東北経済産業局に協力要請し、管内にある認定された太陽光発電事業者へはリーフレットによる回収についての周知を行い、また、各県及び市町村の再生エネルギー担当部署へは秋田県資源技術開発機構のホームページを活用し、関連事業者への周知を依頼し、回収への協力依頼を行った。また、関係する事業者への周知も適宜実施した。回収に関しては、試験目的として実施するため、試験研究書を秋田県生活環境部へ提出し、「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」の特例措置を受け実施した。

また、回収時の管理のため、廃パネル管理票を作成し、運用した。運送設計・方法は、破損具合や発生量、距離によって異なるため、トラック輸送、JR コンテナ輸送など適宜調整を行った。回収対象物は、工場ロットアウト、不具合、破損、使用済みのパネルである。

荷姿については、パネルを有姿のまま平置きにして複数枚重ね、フォークリフトで積み下ろしが可能となるよう添え木等をして、荷崩れしないように紐による固縛またはシートによるラッピングを行った。今回、実際に回収した際に用いた機材等は、積み下ろしに用いるフォークリフト、添え木またはパレット、トラック、JR コンテナ、通函であった。

回収後の保管のために秋田県内の既存倉庫の一角を確保(賃貸)して利用した。倉庫の運用は、秋田県の「レアメタル等リサイクル資源特区」内で行なった。倉庫は、発電や不慮の事故防止のため、屋根付き及び施錠可能なものとした。



トラック

フォークリフト



JR コンテナ

添え木



通箱

図Ⅲ-2-①-(1)-1 利用した資機材

ii)-2 回収結果

今回の実回収の対象について、それぞれのケースとその内容を以下に示す。なお、それぞれの運搬先は秋田県鹿角郡小坂町である。

表Ⅲ-2-①-(1)-5 回収対象の概要

運搬元	①群馬県太田市	②長野県長野市	③宮崎県国富町
運搬先までの距離	約 620km	約 600km	約 1,850 k m
運搬方法	トラック運搬	JR コンテナ運搬	JR コンテナ運搬
運搬回数	5 回	1 回	1 回
運搬枚数 (合計)	2,508 枚	118 枚	320 枚
運搬重量 (合計)	52,980kg	1,442kg	6,400kg

回収に要したコストを以下の表に示す。想定ケースとして、撤去、回収後のリユースを行うケースとリユースをしないケースを想定した。リユース対象は実際には回収していないが、リユースを行うための条件を考慮し、想定しない場合の運搬効率が2分の1、また作業時間が2倍という同一の条件のもと算定した。ただし、枚数は実際回収した枚数ではなく、想定しうる最大の積載可能量を用いている。コストの範囲は現場から一次集積所までと、そこから秋田県の保管場所までの費用と、積み下ろしの作業コストが含まれている。リユースをしないケースとして、群馬県からのトラック輸送で、1枚当たり 382 円、長野市からの JR コンテナで 436 円、宮崎県からの JR コンテナで 468 円となっている。

表Ⅲ-2-①-(1)-6 回収に要したコスト

運搬元		群馬県太田市		長野県長野市		宮崎県国富町	
		しない	する (仮定)	しない	する (仮定)	しない	する (仮定)
枚数*	(枚)	2,508	1,254	236	118	480*	240
回収コスト(サイトから一時集積所(施工業者等)、保管場所まで)	合計 (円)	957,000	1,011,000	102,800	113,600	224,640	235,440
	1枚あたり (円/枚)	382	806	436	963	468	981
	Wあたり (円/W)	1.53	3.22	1.74**	3.85**	1.88**	3.92**

(* パネルの枚数は積載可能量(上限)を想定した)

(** 実際には1枚あたり130Wであったが、①にあわせて250Wとして計算)

上記の事例によるコストの検討の他、将来的に使用済モジュールが大量発生するケースを想定し、この場合での一般化したコストを検討した。検討に際しての前提条件を以下に示す。

前提条件：

- ・コストの構成は、収集、保管、運搬及び積み降ろし作業とする。
- ・パネル規格は、一般的なメガソーラーと同程度規格の250W、20kgとする。
- ・コレクションポイントは、EUの事例を参考すると収集エリアは半径50kmとして想定。
- ・コレクションポイントを関東圏として、リサイクル処理を行う地点を秋田県とする(輸送距離は約600km)。
- ・コレクションポイントの保管能力は約100t(250Wパネルの重量20kgとして5,000枚)
- ・保管コストは30万円/月とする。
- ・National Survey Report of PV Power Applications in Japan 2010 (International Energy Agency Photovoltaic Power System Programme (IEA PVPS))より、2010年の国内導入量は約1GW(991MW)であり、単純にこの分の導入量が設計寿命(20年)を迎える分を仮の廃棄量(2030年)として想定する。
- ・パネル1枚(250W)あたりの重量を20kgとすると、導入量約1GWの場合、2030年の廃棄重量は約8万tと計算される。
- ・この内、東日本の発生量を半分と想定して、月換算すると約3,330tが毎月発生。
- ・コレクションポイントを東日本で33地点(1県当たり1~5地点)と仮定すれば、1地点当たり月約100t収集される。
- ・コレクションポイントまでのパネル1枚当たりの収集コストは、本調査で得られた同程度の距離(45km)の効率の良い収集コスト91円/枚を採用。
- ・積み降ろし等の作業は、フォークリフトを用いるため本調査と同等の作業と仮定。1時間当たり10,800円とする。調査実績から、1時間当たり約500枚の積み降ろし作業が可能。
- ・運搬コストは、ほぼ同等の距離であるので群馬県からのトラック輸送及び長野県からのコンテナ輸送の金額を採用し、リサイクル施設までとする。

トラック輸送の場合、1Wあたり1.62円、1枚あたり404円、JRコンテナの場合、1Wあたり1.49円、1枚あたり372円と算出されている。この場合には、目安として考えた5円/Wを下回るようになるが、これは最大限効率よくコレクションポイントに収集される前提となっている。このため、コレクションポイントの適正配置、保管費用の削減、効率のよい積載などがコスト削減のポイントと挙げられる。

表Ⅲ-2-①-(1)-7 回収コストの目標値確認

	トラック輸送	JR コンテナ輸送
1W あたり	1.62 円/W	1.49 円/W
1 枚あたり	404 円/枚	372 円/枚

iii) 課題解決策の検討

パネル等の破損防止のためには、運搬中の振動による荷台等の上での移動を防ぐ必要がある。実際に回収した結果から、紐による固縛、シートによるラッピングのいずれの場合でも、積載量が少ない場合はパネルの移動が認められた。この移動を防ぐためには、移動できる空間を少なくするように積載方法を工夫する必要がある。例えば、出来るだけ隙間を埋めるようにパネルを積載するか、パネルが無い場合は隙間に緩衝材を詰め込む等である。

今回、試験的に通函及び緩衝材を用いてパネルを運搬した。これにより、パネルの破損を防止し、安全に運搬出来ることが確認出来た。しかし、通函を用いることで、輸送効率は低下する。そのため、運用する場合は小口の発生量の場合やリユース目的、有害物質を含むパネルの輸送などに用いることが効果的と考える。また、この運搬方法は既に破損したパネルの破損物の拡散防止にも有効であると思われる。

その他、引越し業者などが利用している発泡スチロールなどを用いた収納ボックスや運搬中の揺れによる移動や破損を防止する観点から固縛用のベルトを装備したコンテナを開発して活用することなどが考えられる。

c) 分別に関する調査

i) 現状及び課題

分別の現状に関して、リサイクル処理はパネル全体を破砕することが多く、パネルが破損していても大きな問題はないため、リサイクルの効率を上げるなどを目的とした分別は想定する必要がないと考えられた。分別の課題として、リユースを想定した場合の分別による追加コストの発生が見込まれる。また、分別の効果的な設定、配置がトータルシステムの中での効率化として重要であることが想定された。

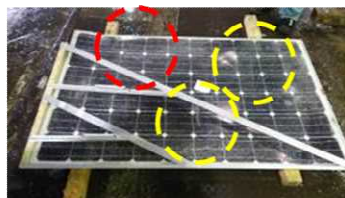
ii) 分別試験、分別コストの検討

本調査では、実際に雪害により外されたパネルの抜き取りを行い、リユース出来る可能性がある物の有無を調べた。回収試験により得られた 50t の廃棄パネルから、100 台のサンプルを無作為に抽出し、変形、破損の有無を確認した。サンプル 100 台を調査した結果、変形・破損ともに無いものは 88 台だった。変形・破損のあるサンプルのうち、パネルが変形しているものが 1 台、パネルが変形破損しているものが 4 台、枠及びパネルともに変形しているものが 2 台、枠が変形し、尚且つパネルが変形破損しているものが 4 台、そして枠及びパネルともに変形破損しているものが 1 台だった。

破損のなかったパネルは、導線が切断されているので、実際にリユースすることはできない。



変形・破損なし



枠の変形破損あり(赤丸内)
パネルの変形破損あり(黄丸内)



端子から導線が切断
されている様子

図Ⅲ-2-①-(1)-2 破損の状況

変形の確認は、直線形の木材を当て、パネル面での変異をみることにより確認。雪害で発生した廃パネルの調査で、外観上ではリユースの検討をできそうなものが 80%以上存在した。ただし、撤去時に有価で売却できる導線部分が切断されており、実際には、リユースは出来ない。リユースを進めて行くにあたり、解体撤去の段階で、リユースのプロセスに入れることが決まっていなくて作業ができない。本調査で、メガソーラーから雪害で発生した廃パネルの分別を行ったが、今回のコストは、対象のパネルが、100 枚で、作業者の人数が 3 名、延べ 70 分の時間を要した。これによる人件費相当が

コストとなり、総額 6,990 円となった。従って、1 枚あたり、約 70 円のコストを要した事になる。従って、1 枚あたり、約 70 円のコストを要した事になる(1W あたり 0.28 円)。標準作業書の作成などによる効率化や作業者の教育などで、おそらく 2 名で作業出来るようになると考えられる。このことにより、今回の約 2/3 程度のコストで分別が可能となると期待できる。

iii) 課題解決策の検討

課題の解決策として、リサイクルの前段階の分別の他、撤去時、あるいは回収時の分別を行うことにより、全体における効率化を図ることが期待できる。例えば、大量に発生する場合には、現場撤去時にパネルのアルミ枠を取外す、回収時にはパネルの種類ごとに分別保管を行うことより、効率的な運搬に寄与することが考えられる。リユースの判別を目的としたパネルの分別試験によるコスト検討では追加的な費用の発生は大きくないことが見込まれたが、リユースの際にはその前段の検査等が必要で、効率的な検査実施が重要となる。また、分別については、リサイクル、リユースの直前のみならず、撤去現場、集積現場での更に前段での分別も全体コストの低減に効果があると思われる。

2.波及効果

収集網整備により目指している効果は、環境効果である。全国的に太陽光発電モジュールの収集網を整備でき、この収集網の中に太陽光発電モジュールが入る仕組みができれば、将来大量増加すると予想されている太陽光発電モジュールの流れをコントロールできるようになる。これをもって、以下の「3.今後の展開」に記載するように、資源が安易に投棄されなくなる社会システムの構築の実現を目指す。

3.今後の展開

実証事業やモデル事業のような形で国等の公的機関の支援を得て、今後は、これまでに得られた成果を踏まえ、以下のように、取り組みを発展していきたい。

地域の拡大

- ・ 東北地方を中心にして構築した収集網の他地域への展開を推進していく。

資源価値等が変動しても、安易に投棄されなくなる社会システムの構築とその定着

- ・ 収集から処分までを最も効率的に行えるネットワークをリサイクル業者の面も含めて構築していく。
- ・ 数多く収集し、その破損状況なども含め、最適なりサイクルを検討する。ここで最適なりサイクルとは、最大限資源を投棄することなく、経済的に利用する方法(時代ごとの EVABAT(Economically Viable Application of Best Available Technology)とも言える)を指す。

(2)太陽電池モジュール撤去における実作業調査(萬世リサイクルシステムズ)
【2014 年度】

1.成果詳細

抽出された課題と解決策及びその効果を表Ⅲ-2-①-(2)-1 に示す。

表Ⅲ-2-①-(2)-1 抽出された課題と解決策及びその効果

課題	解決策	撤去コストの削減可能性	コスト削減額
(1) 太陽電池モジュール、設置工法、設置諸条件	撤去作業の案件ごとに、撤去対象となる太陽電池モジュールのサイズ、枚数、メーカー、設置工法、対象の屋根の周辺のスペース等に関する記録を蓄積していきデータベース化し、同一の工法、類似した条件の撤去案件が出現した際には前例を生かして作業を段取りできるようにする	○	24,500～49,000 円 ※撤去コスト前提条件 ・住宅：木造2階建て住宅 ・屋根：スレート ・太陽光パネルの枚数：24枚
(2) 太陽電池モジュールの降ろし作業	家具やピアノ等を2階以上の住宅に運び入れる際に使用される専用のユニック車の活用が考えられる。手順としては、住宅に面した道路に専用ユニック車を駐車し、屋根の上で架台から取り外した太陽電池モジュールを毛布のような厚手の布で梱包し、専用ユニックで直接車両の荷台に降ろす方法が考えられる。屋根上に一時仮置きできるように足場による数㎡の仮置き場を設ければ、専用ユニック車を使用して3～5枚程度を同時に降ろすことができる。	○	20,000～30,000 円 ※撤去コスト前提条件 ・住宅：木造2階建て住宅 ・屋根：スレート ・太陽光パネルの枚数：24枚
(3) 屋根上作業の安全性確保	設置時に太陽電池モジュールと架台の地組(地上の平らな場所で仮に組み立てる)を行えるように架台を設計し、設置時と併せ撤去時も屋根上での作業を減らすことが考えられる。この場合、撤去時にもモジュール数枚のユニット毎に分割した状態で地上に降ろし、地上で分解作業を行うことになる。地上設置用を前提とした地組式の架台であるが、架台製造工場まで一定段階まで組み立てた後、現場での組み立てることが可能ないわゆるプレハブ化を可能とした架台が有効である考えられる。	△	—

	一般的な結晶シリコンタイプのモジュールは重量が 12~17kg/ m ² のものが多いが、10kg/ m ² 未満の薄膜型太陽電池で既に商品化されているものがある。これら軽量パネルが、パネルの荷下ろし作業、安全性の確保の上でも改善が期待できる。	△	—
(4) 太陽電池モジュールの分解性	太陽電池モジュールの設計段階から、アルミ枠とガラス主体のモジュール本体との分解がし易い構造とすることができれば、リサイクル性に優れ、かつ分解作業時間の短縮化による分解コストの低減につながることを期待される。	△	—
(5) 太陽電池モジュールの部品数	太陽電池モジュールや架台の設計段階から、部品点数の少ない構造とすることができれば、リサイクル性に優れ、かつモジュール本体と架台の分解および架台の部品ごとの分解の作業時間の短縮化による撤去コストの低減につながることを期待される。	△	—
(6) 撤去中のトラブル低減	屋根上での太陽電池モジュール撤去作業の効率向上および屋根の軒下の安全確保の観点から、屋根から架台やモジュールを取り外す際に接続金具類を地上に落とさないようにするため屋根上作業時に作業員が装着する素材別専用ポーチの使用や、金具類の保管ボックス、また金具類の地上への落下を防止するための朝顔養生により、リスクコストの削減が期待される。	△	—
	架台の屋根への取付けに接着剤を使用する工法があるが、太陽電池モジュールの撤去作業においては、最終工程で屋根に付着した接着剤の除去が必要となる。接着剤を使用しない工法の場合はこの工程を省くことができ、撤去作業時間の短縮による撤去コストの低減が期待できる。	△	—

撤去費用算出の調査で得られた結果をもとに、リサイクルを前提とした場合で撤去事業者自らの取り組みでコスト低減が可能になると考えられる「太陽電池モジュールの設置工法、設置条件の情報共有化」および「太陽電池モジュールの降ろし作業の時間短縮化」を取り入れた場合の目標コストを表Ⅲ-2-①-(2)-2に示す。

設置工法、設置条件の情報共有化を活用した場合、太陽電池モジュールの屋根上での取り外し作業時間と屋根上からの降ろし時間が25~54%短縮され、モジュール本体取り外し工事、架台取り外し工事、モジュール下ろし工事の人件費を25~54%(24,500円~49,000円)低減可能と推定される。また、専用ユニックを用いた太陽電池モジュールの降ろし作業の時間短縮化を図った場合、専用ユニック車の

レンタル費用として20,000～30,000円分増加が見込まれるが、屋根上からの降ろし時間が約1/4～1/5に短縮されることによりモジュール本体取り外し工事、架台取り外し工事、モジュール下ろし工事の人件費が75～80%(約50,000円相当)低減可能となり、合計で20,000～30,000円の低減が期待される。さらに、設置工法、設置条件の情報共有化と専用ユニックを用いた太陽電池モジュールの降ろし作業の時間短縮化の両方を行った場合は、44,500～79,000円のコスト低減が期待される。

上記のような課題解決によりリサイクル、リユースを前提に太陽電池モジュールだけを撤去する場合の費用削減が期待できる。また更なるコストの削減には、太陽電池モジュールを撤去するために必要な足場の組み払い工事費100,000円の低減が必要となる。このためには、例えばクサビ式足場など、組み立て時間を大幅に短縮できる組み立て方式の足場の検討なども求められる。

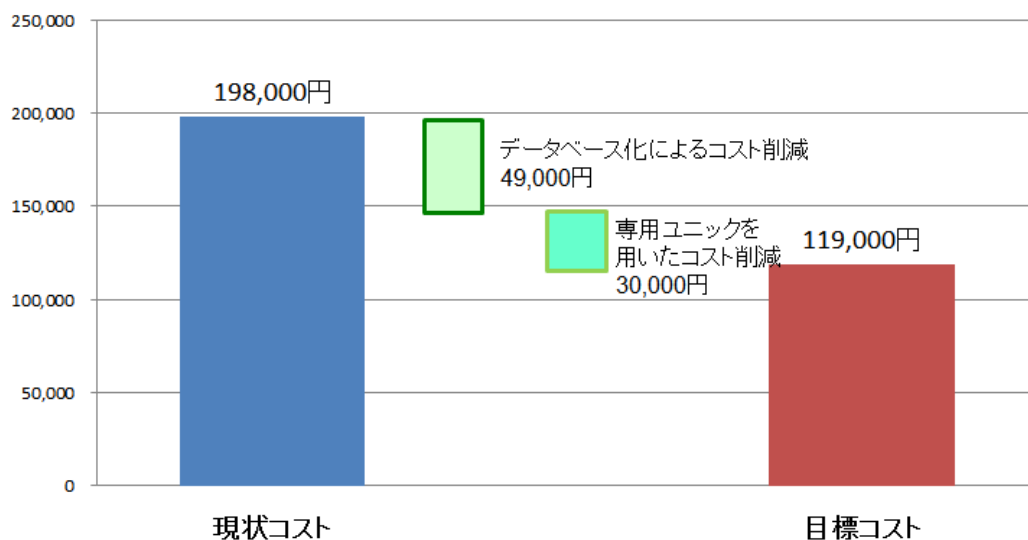
表Ⅲ-2-①-(2)-2 現状の撤去コストと目標とする撤去コストの算出

コスト項目	A) 現状のコスト	B) 設置工法、設置条件の情報を共有化した場合のコスト低減幅(円)	C) 専用ユニックを用いた太陽光パネルの降ろし作業の時間短縮化によるコスト削減幅(円)	B)とC)両方を採用した場合のコスト低減幅(円)	目標コスト(円)
太陽光取り外し工事費用	198,000	24,500 ～49,000	50,000 (ユニック車借用費用: 20,000～30,000円)	44,500 ～79,000	153,500 ～119,000
削減割合	—	12.3～24.7%	10.1～15.1%	22.4～39.8%	—

※撤去コスト前提条件

- ・住宅：木造2階建て住宅
- ・屋根：スレート
- ・太陽光パネルの枚数：24枚
- ・太陽光パネルのメーカー・型番：シャープ製ND-175AC(175W/枚)

【円/24枚】



図Ⅲ-2-①-(2)-1 撤去に係る現状コストと目標コスト

表Ⅲ-2-①-(2)-3 住宅用太陽電池モジュールの撤去作業に関するデータベースへの記録入力項目(例)

設置工法	支持金具工法	支持瓦工法	アンカー工法	打込み金具工法
適用される屋根の種類	瓦	瓦	瓦	スレート
				金属屋根
固定方法	垂木固定工法	垂木固定工法	垂木固定工法	垂木固定工法
	野地板固定工法	野地板固定工法	野地板固定工法	野地板固定工法
面積	屋根全体の面積	屋根全体の面積	屋根全体の面積	屋根全体の面積
	撤去対象面積	撤去対象面積	撤去対象面積	撤去対象面積
屋根形状	勾配	勾配	勾配	勾配
	アンテナ等障害物の状況	アンテナ等障害物の状況	アンテナ等障害物の状況	アンテナ等障害物の状況
撤去対象モジュール	メーカー	メーカー	メーカー	メーカー
	枚数	枚数	枚数	枚数
	1枚当たり重量	1枚当たり重量	1枚当たり重量	1枚当たり重量
	1枚当たりサイズ	1枚当たりサイズ	1枚当たりサイズ	1枚当たりサイズ
撤去後の屋根の現状復旧	穴埋め方法	穴埋め方法	穴埋め方法	穴埋め方法
	屋根材の補てん	屋根材の補てん	屋根材の補てん	屋根材の補てん
車両の駐車可否	クレーン車・ユニック車の駐車可否	クレーン車・ユニック車の駐車可否	クレーン車・ユニック車の駐車可否	クレーン車・ユニック車の駐車可否
	使用可能な車種(道路幅員)	使用可能な車種(道路幅員)	使用可能な車種(道路幅員)	使用可能な車種(道路幅員)
周辺スペース	足場設置スペース[m ²]	足場設置スペース[m ²]	足場設置スペース[m ²]	足場設置スペース[m ²]
	朝顔養生スペース有[m ²]、無	朝顔養生スペース有[m ²]、無	朝顔養生スペース有[m ²]、無	朝顔養生スペース有[m ²]、無
	モジュール分解のスペース有[m ²]、無	モジュール分解のスペース有[m ²]、無	モジュール分解のスペース有[m ²]、無	モジュール分解のスペース有[m ²]、無
留意点	近隣状況	近隣状況	近隣状況	近隣状況
	その他	その他	その他	その他
結果	工期	工期	工期	工期
	作業工数	作業工数	作業工数	作業工数
	足場の組み方	足場の組みか	足場の組み方	足場の組み方
	撤去後のモジュールの処分方法	撤去後のモジュールの処分方法	撤去後のモジュールの処分方法	撤去後のモジュールの処分方法

本プロジェクトの模擬屋根を使用した撤去作業の際には、事前に表Ⅲ-2-①-(2)-3のような項目の確認を行わなかったが、設置工法や設置条件に関するデータベースが整備され予め活用できた場合、足場設置の所要時間は変わらないが屋根上でのモジュール取り外しおよび地上への降ろし作業の時間は合計で25~54%程度の短縮が可能になると期待される。

表Ⅲ-2-①-(2)-4 データベースを活用した場合の撤去作業短縮効果の予測

作業工程(1枚あたり)	模擬屋根試験の結果	予めデータベースを活用し撤去作業を行った場合の推定	作業時間の短縮効果
足場設置	2時間30分	同左	—
モジュール取り外し	約7分~11分	約5分	29~55%
屋根からの降ろし作業	約1分~2分	約1分	0~50%
取り外し、降ろし時間合計	約8分~13分	約6分	25~54%



図Ⅲ-2-①-(2)-2 太陽光パネルの荷おろしの様子

太陽電池モジュールを屋根から下ろす作業は、手おろしの場合と重機を用いる場合の双方とも一枚ずつしか下ろすことが出来ず、一枚あたり1分~2分の時間を要することが判明した。また、手降ろしの場合には、モジュールの落下事故や手の怪我の恐れもあり安全性確保においても課題が残る。



図Ⅲ-2-①-(2)-3 専用ユニック車を用いた荷おろしの様子

この課題に対する解決策として、例えば図Ⅲ-2-①-(2)-3に示すような家具やピアノ等を2階以上の住宅に運び入れる際に使用される専用のユニック車の活用が考えられる。手順としては、住宅に面した道路に専用ユニック車を駐車し、屋根の上で架台から取り外した太陽電池モジュールを毛布のような厚手の布で梱包し、専用ユニックで直接車両の荷台に降ろす方法が考えられる。屋根上に一時仮置きできるように足場による数㎡の仮置き場を設ければ、専用ユニック車を使用して3~5枚程度を同時に降ろすことができる。

2.波及効果

太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクトでは、太陽電池を年間 200MW 処理時に分解処理コストが 5 円/KW 以下に抑えることを最終目標としている。本事業では、太陽光発電システムの処理、リサイクルの流れの中でコスト低減とリサイクル性の向上に大きな影響を及ぼすと考えられる太陽電池モジュールの撤去工程に着目し、コスト低減とリサイクル性向上に資する撤去作業技術の提案とその実現可能性および有効性を検討し、課題の抽出と目標コストを明確化した。

本事業の太陽光発電システムのリサイクル分野での波及効果としては以下のことがあげられる。

- ・国内での撤去・リサイクル技術確立による不法投棄、不正輸出、不適正処理の防止
- ・データベースの構築による継続的な撤去技術の向上並びに撤去技術の開発加速
- ・撤去コスト及び分別回収コストの低価格化
- ・撤去の前工程及び撤去工程の簡略化
- ・効率的な撤去及び現場での分別推進によるリサイクル率の向上
- ・太陽光パネルのリサイクル率の向上による環境負荷の低減
- ・太陽光パネルの撤去・コスト低減に伴う、太陽光パネルの買い替え需要の促進
- ・撤去事業の確立による雇用の創出
- ・太陽電池の撤去技術確立による収集運搬や中間処理業などの周辺産業の振興

また、太陽光発電システムのリサイクル分野以外への波及効果としては、太陽光発電システムの製造工程への適用の可能性がある。たとえば、太陽光パネルの製造における部品数の低減やパネル自体の軽量化により環境への負荷低減につながる可能性がある。

以上、本事業より、日本のリサイクル技術の開発による技術基盤の強化が見込める。

3.今後の展開

太陽光パネルの処理・リサイクルをする際には、まず必ず太陽光発電システムの撤去から始まる。このため撤去に関する技術を体系化することにより、国内での不法投棄、不正輸出、不適正処理を防止することにつながる。また、これらの業務を一手に引き受け、上記の不法行為が発生しないようにするため、撤去、運搬、処理の技術を横断的に調査、開発に取り組んでいく。

②低コスト分解処理技術 FS (開発)

(1)結晶シリコン太陽電池モジュールのリサイクル技術開発(三菱マテリアル)

【2014 年度】

1.成果詳細

本事業では、初期に導入され、かつ今後も普及が見込まれる結晶シリコン太陽電池を対象とし、ローラ式剥離機を使用した剥離方式を採用することでガラスと銀をそれぞれ高い品位で回収して再資源化原料とすることを検討した。

1.1 小型試験機的设计・製作

太陽電池パネルからガラスを剥離するため、小型試験機を設計・製作した。本試験機は、回転する 2 本の刃付きローラ間にパネルを通すことでガラスを選択的に剥離し、銀を含有するシートとガラスを分離することが可能である。本試験機は小型であるため、パネルは長手方向に 6 分割して試験に用いた。図Ⅲ-2-②-(1)-1 に製作した小型試験機の外観を示す。



図Ⅲ-2-②-(1)-1 小型試験機

シートとガラスを高品位で回収するという目的を達成するためには、最適運転条件を見出す必要がある。本試験機はローラ回転速度、ローラ間隔、刃の形状等のパラメーターを下記の通り設定することができる。

- ・シート側ローラ回転数：0～15.6rpm
- ・シート処理速度：0～163.5mm/sec
- ・ローラ間隔：0～10mm
- ・ローラの回転速度比(シート側：ガラス側)：
(1：2.5)、(1：5)、(1：8)、(1：10)
- ・刃 7 種
 - 《1》ピラミッド小 (ガラス側・シート側兼用)
 - 《2》ピラミッド大 (ガラス側・シート側兼用)
 - 《3》アヤメローレット加工 (シート側専用)
 - 《4》丸型 (シート側専用)
 - 《5》サメ刃型 (ガラス側・シート側兼用)
 - 《6》キャタピラー型 (ガラス側専用)
 - 《7》螺旋型 (ガラス側専用)

1.2 前処理方法の検討

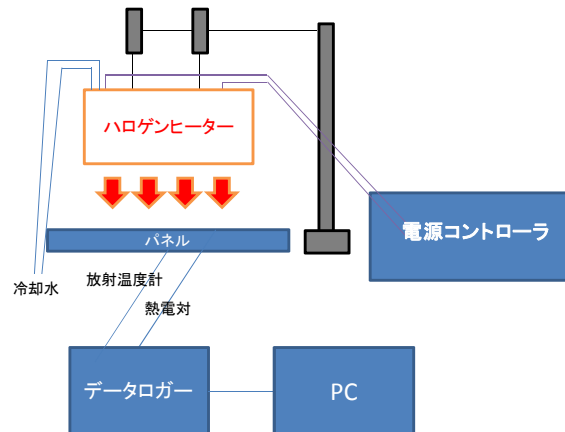
太陽電池パネルのガラスを固定している EVA は熱軟化性樹脂であり、加熱により剥離が容易になる可能性がある。パネルの加熱がガラス剥離性に与える効果を評価するため、加熱したパネルの剥離試験を実施した。表Ⅲ-2-②-(1)-1 に温度の測定結果と剥離性の定性評価を示す。

表Ⅲ-2-②-(1)-1 温度の測定結果と剥離性の定性評価

試料名称	ガラス温度(°C)	バックシート温度(°C)	炉内温度(°C)		剥離性の定性評価
			左	右	
A社No.4	48.6	52.6	64.0	64.0	容易に剥がれる。手で曲げればポロポロ剥がれる。
B社No.1	45.2	45.9	65.0	70.0	剥がれ難くEVAが納豆の様に糸を引いた。追加で10分間(積算20分間)加熱してもEVAは糸を引く状態であり、剥離性は10分間放置後と変わらなかった。
C社No.1	43.0	47.9	71.0	70.0	5分間の加熱では剥がれ難かったが、10分間加熱することにより、剥がれやすくなった。

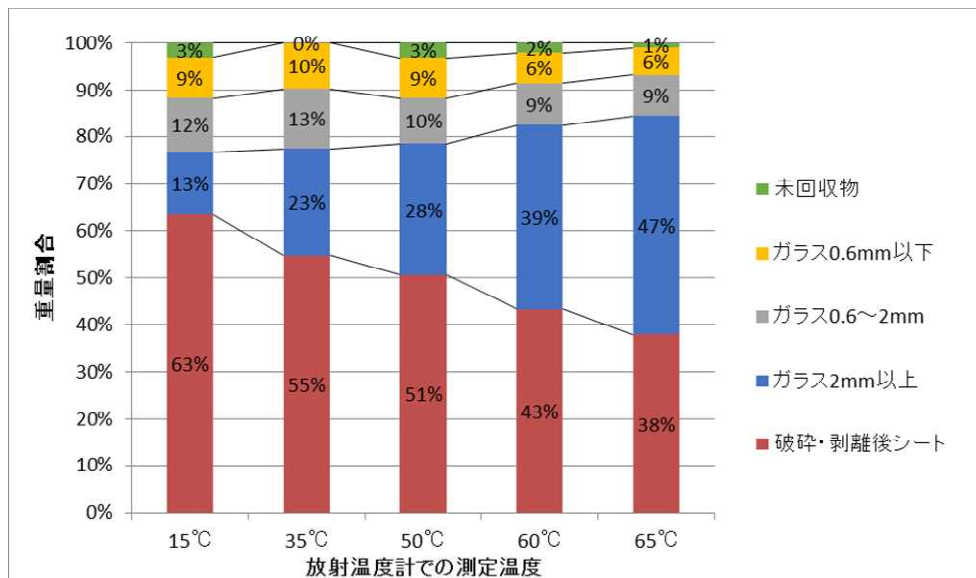
試料により程度の差はあるものの、いずれの試料も加熱後の方が剥離しやすいことが確認できた。60°C程度で加熱すれば、EVA が軟化し、ガラスが剥離しやすい状態になることがわかった。ただし、加熱後にパネルの温度が室温程度まで低下すると、いずれの試料もガラスは剥がれ難い状態に戻ったため、温度が低下しないうちに剥離することが有効である。

次にパネルの加熱方法について検討を行った。ガラスを透過して EVA を選択的に加熱できる可能性のある近赤外線(ハロゲンヒーター)を用いて検討を行った。本事業にて用いたハロゲンヒータは、棒状のハロゲンランプを使用したライン状集光加熱ユニットである。このハロゲンヒータの焦点距離は25mm であり、焦点幅は約 1.5mm である。また、焦点距離を離すことにより広範囲を加熱することも可能である。ランプ容量は 200V・5kW と高出力が可能である。加熱対象物質の温度の計測には放射温度計と熱電対を用い、データロガーにより昇温速度を記録することができる。図Ⅲ-2-②-(1)-2 にハロゲンヒータ設置時の模式図を示す。



図Ⅲ-2-②-(1)-2 ハロゲンヒータ設置時の模式図

小型試験機を用い、投入直前にパネルを加熱することによるガラスの剥離効果を確認するため、ハロゲンヒータを用いた剥離試験を実施した。試験にはC社No.1の試料を使用した。図Ⅲ-2-②-(1)-3に加熱温度と破碎・剥離後シート及び粒度別ガラスの重量割合の相関性を示す。高い加熱温度となるほど、回収物に占めるガラスの重量割合が増加した。すなわち、シートから剥離されたガラスの重量が多くなった。65°Cに加熱した場合、2mm以上のガラス剥離量は15°Cの場合の約3.6倍となった。加熱をしてから剥離することで、常温で剥離した場合と比較してガラスの剥離量が増加し、かつ、2mm以上の比較的粒径の大きいガラスを多く回収できることが確認できた。



図Ⅲ-2-②-(1)-3 加熱温度と破碎・剥離後シート及び粒度別ガラスの重量割合の相関性

1.3 最適な運転条件の検討

低コスト分解・処理技術の確立と回収物の評価を行うため、製作した小型試験機の最適な運転条件の検討を行った。その結果を以下に示す。

- ・ガラス側刃の形状：ピラミッド小 (10mm 角、4mm 高)
- ・シート側刃の形状：ピラミッド小 (10mm 角、4mm 高)
- ・ガラス側ローラの回転速度：27.2m/min
- ・シート側ローラの回転速度：3.4m/min
- ・回転速度比 (ガラス側ローラの回転速度：シート側ローラの回転速度) 1：8
- ・ローラ間隔：A 社 No.1～3、B 社 No.1 及び C 社 No.1：3.7mm
A 社 No.4：4.0mm

上記の運転条件にてパネルのガラス剥離試験を行った。パネル種を問わず、80%程度のガラスを剥離することができた。剥離したガラスを【2mm 以上】・【0.6～2mm】・【0.6mm 以下】に篩分けし、各回収物の銀含有量を測定した結果を以下に示す。銀はガラス 0.6mm 以下に濃縮していることがわかった。銀回収対象物(剥離後シート・ガラス 0.6mm 以下)はパネルに対し重量比率約 82%であった。したがって、銀を剥離後シートに残留濃縮させるためには、剥離時に 0.6mm 以下のガラスの発生を抑えた運転条件を求める必要がある。

剥離後シート：1,800ppm (77%)	}	銀回収 82%
剥離後ガラス粒 2mm 以上：30ppm (2%)		
0.6～2mm：60ppm (2%)		
0.6mm 以下：270ppm (5%)		
未回収物：14%		

1.4 選別方法の検討

剥離後の回収ガラスを高有償な再資源化原料にするためには、金属や有機物等が付着していないガラスと、付着しているガラスとに選別する必要がある。そこで上記最適運転条件を用いて剥離し回収したガラスを【2mm 以上】・【0.6～2mm】・【0.6mm 以下】に篩分けし、それぞれ色彩選別機を用いて選別を行った。色彩選別機は、対象物の色の違いを識別し選別する機械である。本事業では透明物と識別したものをガラス再資源化原料、有色物を銀回収原料とし検討を行った。

本事業で用いた色彩選別機の概略仕様を示す。また、図Ⅲ-2-②-(1)-4 に色彩選別機の外観を示す。

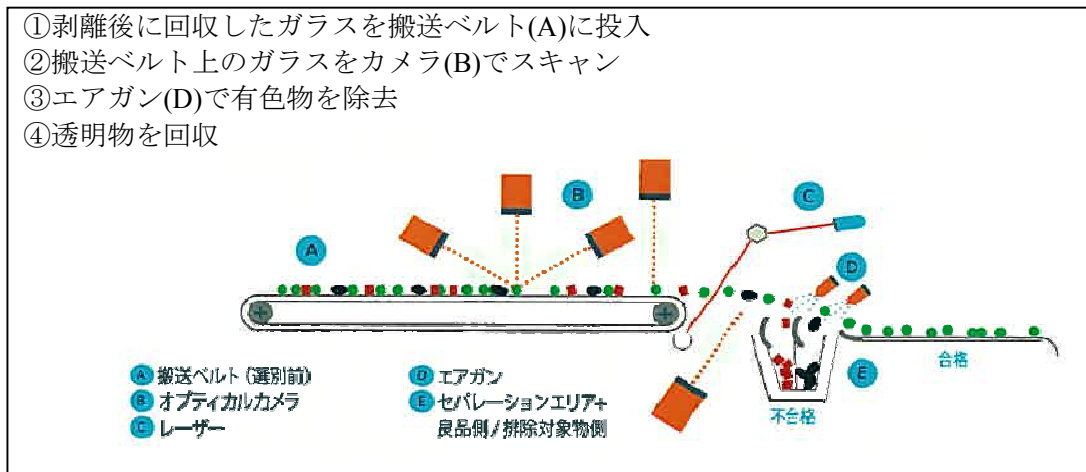
- ・エアノズルピッチ幅：10mm
- ・オプティカルカメラ：モノクロタイプ
- ・搬送ベルト：樹脂製白色
- ・搬送ベルト (検出有効) 幅：640mm
- ・搬送ベルト速度：2m/s
(可変：1.5～3 m/s)



図Ⅲ-2-②-(1)-4 色彩選別機

出典：トムラソーティング(株) GENIUS 製品カタログ

色彩選別の流れを図Ⅲ-2-②-(1)-5 に示す。



図Ⅲ-2-②-(1)-5 色彩選別の流れ

出典：トムラソーティング(株) GENIUS 製品カタログ

剥離試験で得た回収ガラスの約 20kg を用いて試験を行った。図Ⅲ-2-②-(1)-6 にガラス 2mm 以上の色彩選別時の物質収支、図Ⅲ-2-②-(1)-7 にガラス 0.6～2mm の色彩選別時の物質収支を示す。また、図Ⅲ-2-②-(1)-8 に色彩選別後の透明物、図Ⅲ-2-②-(1)-9 に色彩選別後の有色物を示す。

色彩選別前		色彩選別後	
2mm以上	100%	透明物	85%
		有色物	12%
		ロス	3%

図Ⅲ-2-②-(1)-6 ガラス 2mm 以上の色彩選別時の物質収支

色彩選別前		色彩選別後	
0.6～2mm	100%	透明物	95%
		有色物	3%
		ロス	2%

図Ⅲ-2-②-(1)-7 ガラス 0.6～2mm の色彩選別時の物質収支



図Ⅲ-2-②-(1)-8 色彩選別後透明物



図Ⅲ-2-②-(1)-9 色彩選別後有色物

色彩選別前の2mm以上のガラスのうち選別機により透明物として選別されたものは85%であり、0.6～2mmは95%であった。選別回収した有色物はほとんどが金属や有機物が付着したガラスであった。特に2mm以上の有色物については、大きなガラス粒に微量の金属や有機物が付着していたものが多く見受けられた。

ガラス0.6mm以下については粒度が細かすぎるため、選別不可と判断し色彩選別試験は実施しなかった。したがって、0.6mm以下のガラスの透明物と有色物の選別方法については別途検討していくことが必要である。

上記の試験で得られた透明物の金属付着物含有濃度及び有機物含有濃度の分析を実施した。表Ⅲ-2-②-(1)-2に色彩選別前後のガラスの金属付着物含有濃度及び有機物含有濃度を示す。

表Ⅲ-2-②-(1)-2 色彩選別前後のガラスの金属付着物含有濃度及び有機物含有濃度

試料名称	Ag (ppm)		Cu (ppm)		Sn (ppm)		Pb (ppm)		Al (ppm)		Fe (ppm)		有機物 (ppm)	
	選別前	選別後	選別前	選別後	選別前	選別後	選別前	選別後	選別前	選別後	選別前	選別後	選別前	選別後
ガラス2mm以上	30	20未満	590	10未満	70	20未満	50	50未満	40	20未満	10	10未満	2,700	260
ガラス0.6～2mm	60	20未満	1,100	10未満	130	20未満	80	50未満	100	20	350	10未満	2,100	490

各粒度共に透明物には各金属及び有機物の含有が見られなかった。色彩選別を行うことにより、ガラス再資源化原料と銀回収原料に選別することができ、選別方法として有効な手段であることがわかった。

1.5 処理コスト試算

本事業の結果を基に処理コストの試算を行った。まず、パネルとパネル処理速度、作業時間の前提条件を以下に示す。

- ・パネル：1枚=110W=11kg (ハーネス、アルミフレームを除去したもの)
- ・パネル処理速度：1分あたり1枚
- ・作業時間：1日8時間、月20日間操業 (年間240日、1920時間操業)
- ・年間のパネル処理量：115千枚=12.67MW=1,267t

試算に用いた試験データは、回収物の分析を詳細に行ったC社 No.1のデータとし、処理コストの試算を行った。表Ⅲ-2-②-(1)-3にC社 No.1の剥離後の回収物重量比率と銀の分散状況を示す。剥離後のガラスは、使用用途を考慮し、2mm以上、0.6mm～2mm、0.6mm以下の3つの粒度に篩分けを行った。剥離前のパネルには、銀が9.1g、濃度にして590ppmが含まれていた。剥離後の回収物における銀の分散状況をみると、シートが1,800ppm(全銀量の77%)と最も高い結果となった。次いでガラス0.6mm以下、ガラス0.6mm～2mmとなり、ガラスの粒度が小さいほど銀濃度が高い結果となった。

表Ⅲ-2-②-(1)-3 剥離後の回収物の重量バランスと銀の分散状況

	回収物重量 (g)	回収物重量比率 (%)	回収物中銀含有量 (g)	回収物中銀含有比率 (ppm)	回収物における銀の分散状況 (重量比率) (%)	回収物の処理
剥離前パネル	15420	100	9.10	590	100	-
ガラス 2mm以上	6739	43.7	0.20	29	2	ガラス再資源化原料 (ガラスリサイクル業者で買取)
ガラス 0.6~2mm	2791	18.1	0.17	60	2	
ガラス 0.6mm以下	1712	11.1	0.46	268	5	銀回収原料 (製錬所で買取)
シート	3886	25.2	7.00	1801	77	
ダスト	292	1.9	1.27	4349	14	

これら銀の分散状況から、それぞれの回収物について用途を下記のように想定し、評価を実施した。

A. 銀回収原料：シート、及びガラス 0.6mm 以下

B. ガラス再資源化原料：ガラス 2mm 以上、及びガラス 0.6mm~2mm

上記Aについては、当社がスクラップを買い取る際に通常用いている計算方法により価格を算出した。銀建値は金属資源の市場価格により変動するが、提案書に記載の建値と同様、50 千円/kg と仮定した。有価金属である銅に関しては、含有量が少ないため、評価対象にしなかった。

上記Bについては、ガラスの再資源化評価より軽量骨材として再資源化可能の用途が立っており、有価物として売却できると考えられるが、試料が少なく売却価格の算定が現段階では難しいものとなっているため、本試算では 0 円と仮定した。表Ⅲ-2-②-(1)-4 に回収物の価格評価の結果を示す。

表Ⅲ-2-②-(1)-4 回収物の価格評価

回収物単価	銀回収原料	7.1 円/kg	製錬所にて銀を回収
	ガラス再資源化原料	0.0 円/kg	軽量骨材へ再生
回収物の発生量	銀回収原料	459,921 kg/年	重量比率 36.3%
	ガラス再資源化原料	783,006 kg/年	重量比率 61.8%
合計(有価物売却益)		3,265,439 円/年	

続いて、設備投資、操業コストについて試算を行った。使用する設備は以下を想定した。

- ・投入コンベヤ：パネル投入
- ・ハロゲンヒータ・ローラ式剥離機：加熱・剥離
- ・振動篩：粒度選別
- ・供給コンベヤ 2 台：ガラス供給
- ・色彩選別機 2 台：色彩選別

上記の設備一式の費用は約 106.4 百万円となる。設備に関しては 5 年定額償却とし、保守・管理費を加え、設備費は 26.6 百万円/年とした。光熱水費は上記の設備の稼働による電力使用量、電力料金から 2.164 百万円/年とした。人件費はパネルの投入に 1 人員、設備の操業管理に 1 人員、回収物の輸送及び管理に 1 人員を想定し、11.52 百万円/年とした。以上より、分解処理コストの試算結果をまとめたものを表Ⅲ-2-②-(1)-5 に示す。

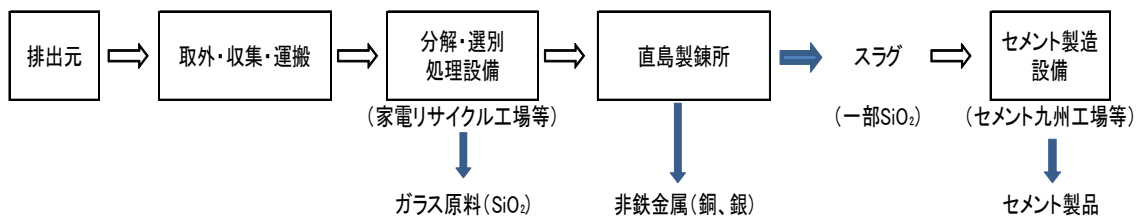
表Ⅲ-2-②-(1)-5 分解処理コストの試算結果

分解コスト	2.9 円/W	29.2 円/kg	
		321.3 円/枚	
年間処理量	12,672,000 W	1,267,200 kg	1ライン当たり
		115 千枚	
年間処理費用		37,018,401 円/年	
内訳	材料費	0 円/年	使用予定無し
	光熱水費	2,163,840 円/年	電気代23円/kwhと仮定
	人件費	11,520,000 円/年	作業員2,000円/時・人として3名
	設備費	26,600,000 円/年	5年定額償却・保守費(起業費の5%)
	土地・建物費	0 円/年	既存の家電リサイクル工場を利用
	有価物売却益		3,265,439 円/年

上記より、パネルの分解処理コストは2.9円/Wと試算した。本設備1ライン当たりの処理能力は12.67MW/年であるため、年間200MWのパネルを処理するためには本設備が16ライン必要となる。分解処理コスト単価が変わることなく年間200MWを処理することができ、地域分散型の処理にも適応できる。太陽電池の普及実績を考慮すると、廃棄量は徐々に増加するはずであり、処理設備も並行して増設していくことが合理的である。改良を重ねることにより、後発の設備ほど設備費が小さくなり、将来的にはより低コストでの処理を目指すことができる。前述の通り、この試算においては剥離試験における未回収物の評価が含まれておらず、ガラス再資源化原料の売却価格は0円/kgと仮定しており、今後コスト評価の精度を上げるためには、剥離試験を重ね、詳細な分析や評価を行う必要がある。

1.6 選別ラインの設計

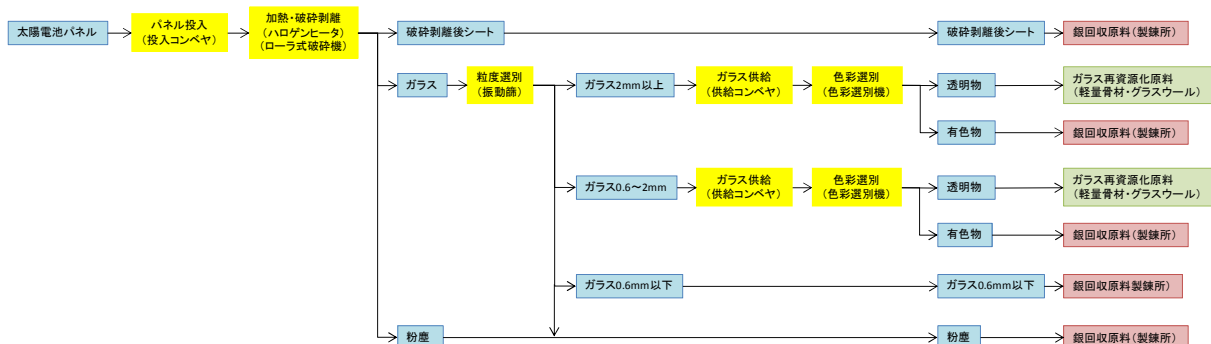
三菱マテリアル株式会社(以下MMC)は、非鉄製錬事業、セメント事業及び家電リサイクル事業を運営している。とくに家電リサイクル事業では太陽電池を製造する家電メーカーと協力して運営しており、本事業のリサイクル拠点として位置付けている。これらのネットワークを利用することで、MMCの既存設備を活かした処理フローを構築することが可能である。家電リサイクル工場の有する分解・選別処理設備を利用し、太陽電池パネルの大部分を占めるガラスを分解・選別処理して取り除くことで、製錬工程向け銀の有償性を高め、ガラスを製品原料として再資源化することが実現すれば理想的である。図III-2-②-(1)-10にMMCの既存設備を活かした処理フローの構想図を示す。



図III-2-②-(1)-10 MMCの既存設備を活かした処理フローの構想図

本事業の結果及び上記フローを踏まえ、以下の剥離・選別処理の流れを想定した。また、図III-2-②-(1)-11に太陽電池パネルの剥離・選別処理の流れを示した。

- ・パネルを投入コンベヤに供給
- ・ハロゲンヒータによりパネルを加熱
- ・パネルを加熱後直ちに、ローラ式剥離機により剥離
- ・シートを回収
- ・剥離したガラスを振動篩で【2mm以上】・【0.6~2mm】・【0.6mm以下】に選別
- ・ガラス【2mm以上】・【0.6~2mm】は色彩選別機により異物の除去



図III-2-②-(1)-11 太陽電池パネルの剥離・選別処理の流れ

2.実用化見通し

三菱マテリアル株式会社(以下 MMC)は、非鉄製錬事業、セメント事業、及び家電リサイクル事業を運営している。とくに家電リサイクル事業では太陽電池を製造する家電メーカーと協力して運営しており、本事業のリサイクル拠点として位置付けている。MMC が運営に携わっている全国 5 社 6 工場のネットワークを活かし事業を進める。

3.波及効果

太陽電池スクラップの発生場所は全国に分散していることが予想される。よって集中して処理するよりも、処理工場は分散することが有効と考えられる。上述のとおり全国に展開する家電リサイクル工場に処理設備を設置することで対応可能であるとする。

4.今後の展開

家電リサイクル工場に試験処理設備を設置し、必要なデータを取得し実証プラントの設計・製作を行う。サンプル量を増やすことで処理コストの精度を上げ、事業化展開を進める。

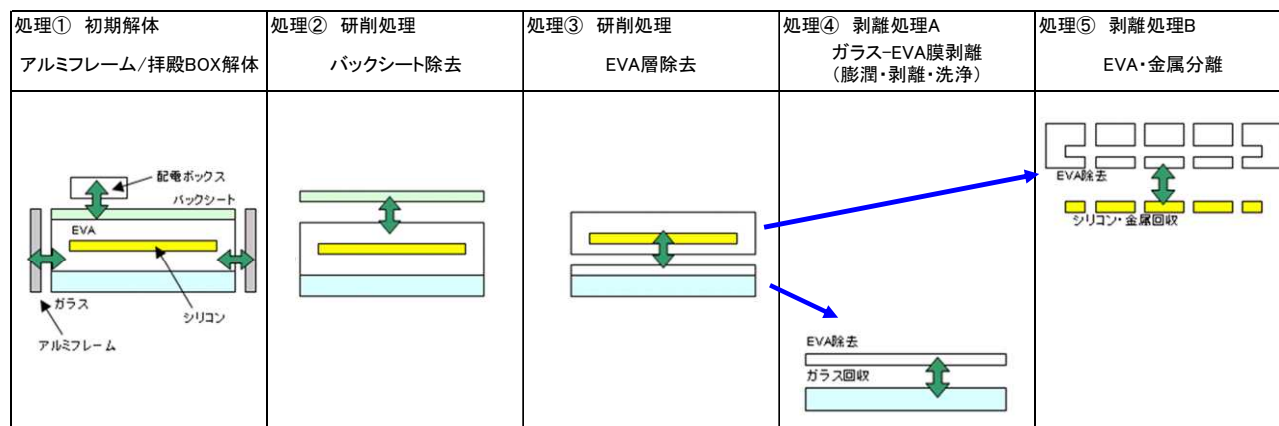
(2)ウェット法による結晶系太陽電池モジュールの高度リサイクル実用化技術開発(東邦化成)

【2014 年度】

1.成果詳細

1.1 モジュール解体の概略工程の実現

本研究において目標とした分解工程を図Ⅲ-2-②-(2)-1 に示す。



図Ⅲ-2-②-(2)-1 解体工程図

この解体プロセスによりコスト 5 円/W 以下を目指した。

<各工程概略>

処理①：初期解体

対象となる太陽電池パネルからアルミフレームと配電 BOX を取り除く工程
(※今回は手作業にて実施し参考値としてデータを反映した)。

処理②：バックシート除去

裏面に貼り付けられたフッ素製バックシートを研削機により除去する工程。

処理③：EVA 積層体(EVA+シリコン層)除去

処理②と同研削機にて EVA・シリコン層を研削・回収する工程。

処理④：ガラス面上の残存 EVA の剥離除去

残存する EVA を剥離剤により膨潤させた後、ブラシにより除去する工程。

処理⑤：処理③で除去した EVA 積層体から EVA とシリコン、金属類を分離

処理③で回収した EVA 積層体からシリコン、金属類を分離・回収する工程。

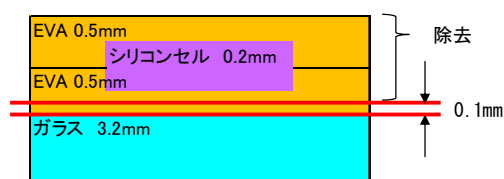
1.2 取組み課題と成果

a)剥離液 A の消費量低減

図Ⅲ-2-②-(2)-1 の処理④において、EVA を剥離するための剥離液 A の消費量が多く、解体コストを圧迫しておりこれを低減させる必要がある。そこで剥離液に浸漬する前の研削工程(処理③)後、ガラスに残留する EVA を極限まで削減し、EVA の膨潤による剥離液消費量低減を図ることを狙った。

i) EVA 含むシリコンセル層の除去

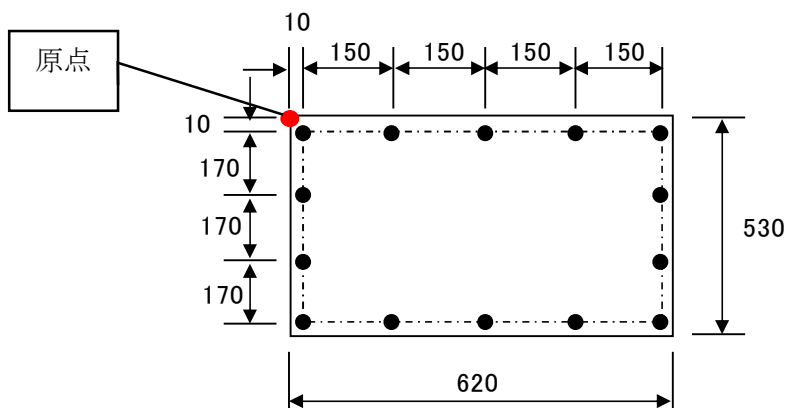
基礎ピーカー実験の結果より、200W 級モジュールにおける剥離液 A の消費量は 1 枚当たり約 2.3kg あり、計算上、約 1/10 の 250g 以下でないとコストが見合わないことがわかり、これを目標に取り組んだ。図Ⅲ-2-②-(2)-2 に示すようにガラス面に残る EVA 層を 0.1mm 残すまで研削することをターゲットとした。



図Ⅲ-2-②-(2)-2 EVA 層研削ターゲット

<得られた成果>

研削実験にサイズ ; 620mm×530mm のオリジナルテスト試料を用い、研削後の厚み(ガラス+残 EVA 層)はマイクロゲージにて測定。これとは別に超音波を利用したガラス厚み測定器によりガラスのみの厚みを測定。これらの差を EVA 層と判定し、以下図Ⅲ-2-②-(2)-3 に示すポイントでの測定を行い表Ⅲ-2-②-(2)-1 に示すような結果が得られ目標を達成した。



図Ⅲ-2-②-(2)-3 EVA 層研削後の厚み測定ポイント

表Ⅲ-2-②-(2)-1 測定ポイントにおける EVA 層厚み

n=3 Average

単位: mm

原点	10	160	310	460	610
10	0.08	0.11	0.10	0.13	0.10
180	0.08	/			0.13
350	0.11				0.09
520	0.09	0.14	0.10	0.06	0.07

Average	Max	Min
0.099	0.14	0.06

※原点 : 図Ⅲ-2-②-(2)-2 における左上部とする

ただしターゲットの 0.1mm という数字には到達したものの、マイクロゲージではガラス単面から 25mm 前後内側までしか測定できず、ガラス中央部分はデータ取得できなかった。よって今回は上記図Ⅲ-2-②-(2)-2 のポイントで測定したデータを基に次工程の剥離テストを行った。また、研削に時間を要し、1枚あたり約 90 分必要で今後に課題を残した。

ii) 上述 i)により残存 EVA の剥離液 A による処理において剥離液の消費量の検証

<得られた成果>

前項 a)により、研削した試料を図Ⅲ-2-②-(2)-4 の剥離装置を使用してガラスから EVA を除去し、その際に消費された剥離液 A の量を測定したところ、テスト試料において平均 62.5g、200W 級のモジュール換算で 218.8g の剥離液 A の消費量となり、目標消費量 245g、1/10 以下を達成した。



図Ⅲ-2-②-(2)-4 実験に使用した剥離装置
(左；剥離液浸漬ユニット、右；EVAのブラシ除去ユニット)

b) 剥離液 B の消費量低減

図Ⅲ-2-②-(2)-1 の処理③で研削除去により回収した研削後の EVA とシリコンの研削混合粉(以降 EVA 積層体と称する)は EVA とシリコン、金属類が単に混ざっているだけではなく、EVA 樹脂に粉碎されたシリコン、金属類等が埋め込まれたような形で存在しており、より付加価値を高める為には EVA 内の金属を EVA から引き剥がす手段が必要となる。そして、その剥離手段として剥離液 B 用いた剥離方法が提案されていたが、コスト低減が課題となっており分離液 B の消費量を低減する必要がある。

i) 研削後の EVA 積層体からの金属類分離工程の確立

コスト面からみて、こちらも剥離液 A と同じく、200W 級モジュール 1 枚当り 250g 以下の使用量に抑えなければならない。これを加味した分離処理工程の確立を目指した。

<得られた成果>

剥離液 B による EVA-シリコン、EVA-金属の結合を剥離するための補助力として、先に物理力を付与することで EVA と金属類の剥離促進を狙った。まずは①超音波+剥離液による分離効果、②マグネットスターラーでの攪拌+剥離液による分離効果、③ハンドミキサーでの粉碎+剥離液による分離効果の 3 方式を試行し比較した結果、③ハンドミキサーの粉碎剥離方法がもっとも良好に金属類を回収できた。高回転ミキサーによる物理力がもっとも EVA とシリコンの粉碎効果が得られ、よって、剥離液 B との EVA 積層体混合前に高回転物理力を与えるプロセスを採用することとした。次に、剥離液 B の減量のためまず処理後の EVA 積層体+剥離液 B の混合物から余分な剥離液を回収することを試みた。混合物を①濾過、②濾過+圧搾、③濾過+圧搾+遠心機の 3 条件での回収を試みたところ、表Ⅲ-2-②-(2)-2 ような結果が得られた。

表Ⅲ-2-②-(2)-2 EVA 積層体の剥離液 B 回収後の重量増加率

回収方法	重量比 [%]
EVA重量 (未浸漬)	100
①濾過	約 470
②濾過+圧搾	約 220
③濾過+圧搾+遠心機	約 206

【条件】

圧搾 : 約 20 [kgf]

遠心機 : 約 1000 [rpm] × 5 分間

結果より、EVA 積層体が剥離液 B を吸収、膨潤しその分重量が増加したことがわかる(①で 4.7 倍、②で 2.2 倍、③で約 2 倍の重量となっている)。これを 200W 級モジュールの重量に換算すると、もっとも消費量の少ない③の方式であっても約 800g の剥離液 B を要する事となり、目標の 250g には程遠いことがわかった。

試行錯誤の上、別の安価な溶媒 C を用い、従来どおりの混合+ミキサー粉碎後比重分離を実施することで剥離液 B と同じ結果が得られることがわかり、更に剥離液 B よりも短時間の約 10 分で分離可能なことも見えてきたため溶媒 C を用いたプロセスとすることとした。次の表Ⅲ-2-②-(2)-3 に剥離液 B と溶媒 C とを種々組合せ分離した場合の分離性能を記す。

表Ⅲ-2-②-(2)-3 各処理プロセスにおける比重分離後の重量分布

使用液 (剥離液→分離液)	分離層	重量分布 (%)		
		有機分画	無機分画	合計
当初プロセス B → B	上層	47	14	100
	下層	28	11	
変更プロセス-1 B → C	上層	61	16	100
	下層	1	22	
変更プロセス-2 C → C	上層	54	15	100
	下層	3	28	

ポイントとして、下層・無機分画の重量比が大きいほどシリコン、金属類を多く含むことがいえるため分離方法として最適といえる。したがって、当初プロセス(剥離処理に剥離液 B 使用し、その後放置し比重分離)よりも変更プロセス-2(剥離処理に溶媒 C 使用し、その後放置し比重分離)で同等以上の結果が得られたことがわかった。更に、変更プロセス-2 で得られた結果から有価物として高付加価値の銀(Ag)、銅(Cu)に着目し、それぞれの含有利率を計算すると次の表、表Ⅲ-2-②-(2)-4 のような結果が得られ、下層に比較的金属純度の高い回収物が得られていると判断し、このプロセスを採用することとした。

表Ⅲ-2-②-(2)-4 変更プロセスにより得られた回収物中の金属含有量

項目	分析結果	
	上層	下層
銀 (Ag)	0.31 %	1.45 %
銅 (Cu)	0.07 %	13.10 %

c) 剥離液 A による処理速度向上のためのシステムの基本構成検討

1.1 項、図Ⅲ-2-②-(2)-1 の処理①研削工程において 1.2-a)にて講じた研削手段により剥離液 A の浸漬時間の短縮と消費量低減に繋がった。①剥離液 A への浸漬により EVA が飽和膨潤する前に浸漬処理を終え、②ブラシによる物理的な力により EVA を除去することで当初目標としていた EVA 剥離時間 2 時間を最短 5 分まで短縮できるめどが立った(システム詳細は g)項に示す)。

d) 剥離した EVA・金属複合体から金属類を分離するための B 液処理の基本システム構成の検討

1.1 項、図Ⅲ-2-②-(2)-1 の処理①研削工程により回収した EVA 積層体を 1.2-b)により講じた手段により比重分離を行うことでシリコン及び金属類の回収率 80%を達成でき、またその処理時間も 5 分を達成した(システムの詳細は g)項に示す)。

e) 各工程での回収材料とその重量一覧

オリジナルのテスト用モジュール構成材料に対して、本技術開発において解体した後の回収材料の各重量を表Ⅲ-2-②-(2)-5 に示す。

表Ⅲ-2-②-(2)-5 分解・解体により回収した材料とその重量

部材	試験モジュール 処理前 重量(g)	各工程で回収した材料重量(g)					回収
		①	②	③	④	⑤	回収重量(g)
アルミフレーム	3976.0	794	—	—	—	—	794
シール材(粘着材)		23	—	—	—	—	23
電源 BOX(シラント含む)		69	—	—	—	—	69
ガラス		—	—	—	2554	—	2554
バックシート		—	140	—	—	—	477
EVA		—		(247)	90	247	
シリコン、金属		—	—	—	—	—	—
計							3917

～回収率計算～

試験モジュール解体前の初期重量 ; 3,976g

解体後の回収物総重量 ; 3,917g . . . 回収率 ; 98.5%

※オレンジ網掛けはリサイクル可能と見る材料で、これらの合計は3,685g。
これらをリサイクルした場合のリサイクル率としては、全重量の92.7%が
リサイクルできることになる。

g) 全工程処理コスト試算

これまで実施してきた処理によるコスト試算結果を表Ⅲ-2-②-(2)-6に示す。解体・分解処理において、5円/W以下のコストを達成した。

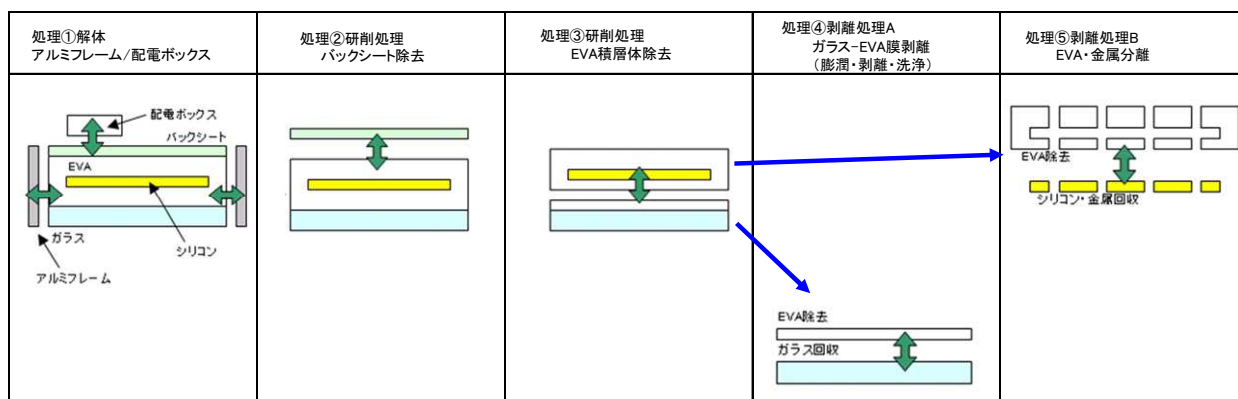
表Ⅲ-2-②-(2)-6 処理コスト試算結果

項目	目標値	達成値			備考
	円/W	円/W	円/kg	円/年	
材料費	2.63	1.24	13.06	8,574,336	剥離剤等
光熱水費	0.844	0.16	1.66	1,090,462	設備用力
人件費	0.8	2.22	23.39	15,360,000	@1,000円/人(パート, アルバイト想定)
設備費	0.806	0.65	6.89	4,520,860	設備 ; 8年償却試算、保守費用含
土地・賃借費	0.24	0.35	3.66	2,400,000	貸倉庫・貸工場 HP より(*1) 弊社工場周辺 150m ² 程度を想定
最終処分費	0.51	0.35	3.68	2,415,882	使用済剥離剤、EVA等
合計	5.83	4.97	52.34	34,361,540	有価物売却益を含まず

*1) <http://www.homes.co.jp/chintai/soko/nara/list/>

f) 各工程システム装置概要

i) 各工程概要



図Ⅲ-2-②-(2)-5 処理工程概略

表Ⅲ-2-②-(2)-7 各処理工程内容

工程	対象機	内容
処理①	—	アルミフレーム、配電BOX解体(手作業)
処理②	研削機	バックシートを研削、除去する。
処理③	研削機	ガラス面0.1mmの厚さを目標にEVA、Si層を研削し、研削片は回収し処理⑤へ回す。
処理④-1	剥離剤A浸漬ユニット	ガラスを剥離剤Aに浸漬させEVAを膨潤させる。
処理④-2	ブラシユニット	回転ブラシでEVAを剥離、除去する。
処理⑤-1	粉碎ミキサー	処理③で回収した試料研削片を溶媒Cとあわせて投入し粉碎する。
処理⑤-2	剥離装置(B)	粉碎した試料をC液(80°C)で比重分離させ、上層(有機分画)・下層(無機分画)のそれぞれを回収する。

ii) 各実験機概要

<研削機(NC制御ルーター)>・・・処理②、③

主軸のルーター軸と丸のこ軸を備えるが今回、丸のこは使用せず。



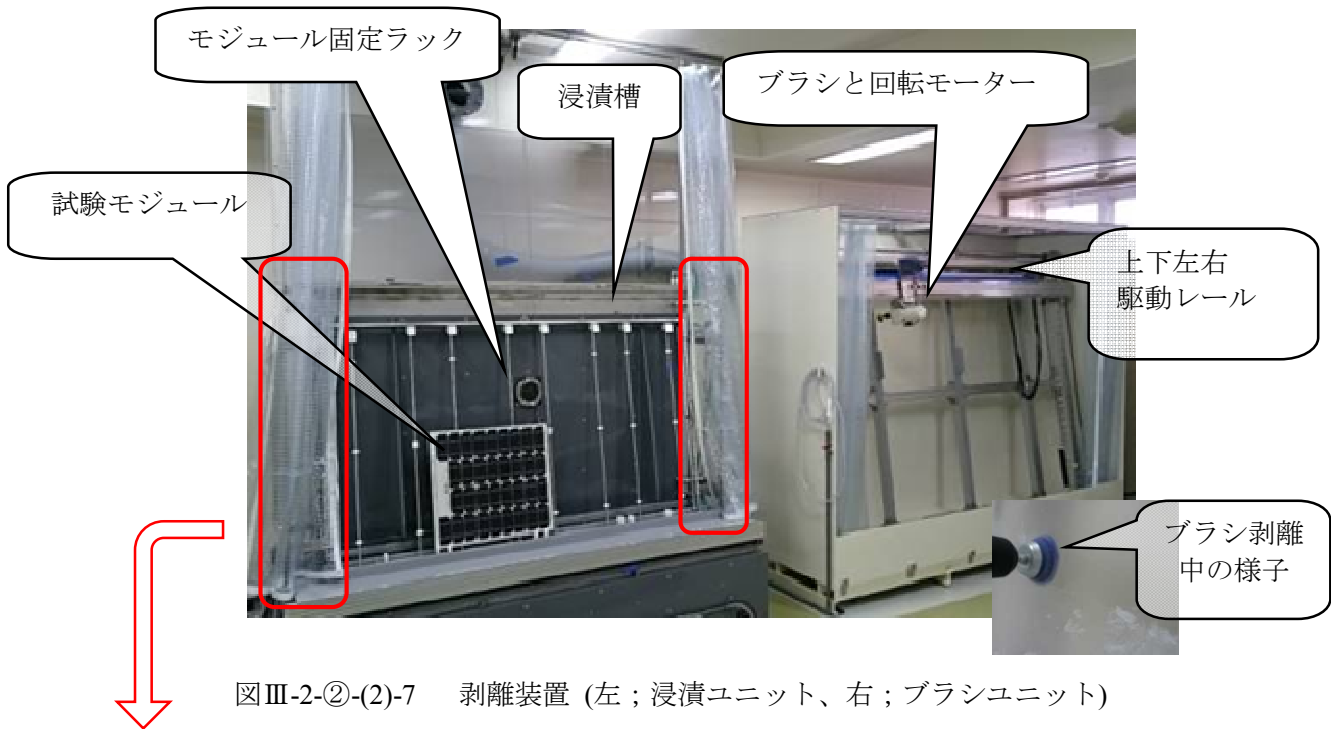
研削刃周辺に研削片回収BOXを設置し集塵機により研削片を回収する。

モジュールはバキュームポンプにより真空吸着、固定し、研削する。

図Ⅲ-2-②-(2)-6 研削機

<EVA 剥離装置 (浸漬ユニット、ブラシユニット) >・・・処理④

処理③により粗方の EVA・シリコン層を除去したモジュールからガラスのみを回収するため EVA 層を膨潤剥離、ブラシ剥離させる装置。剥離剤 A に浸漬するユニットとブラシにより剥離するユニットに分けた。



図Ⅲ-2-②-(2)-7 剥離装置 (左 ; 浸漬ユニット、右 ; ブラシユニット)



図Ⅲ-2-②-(2)-8
超音波発振子

～浸漬ユニット～

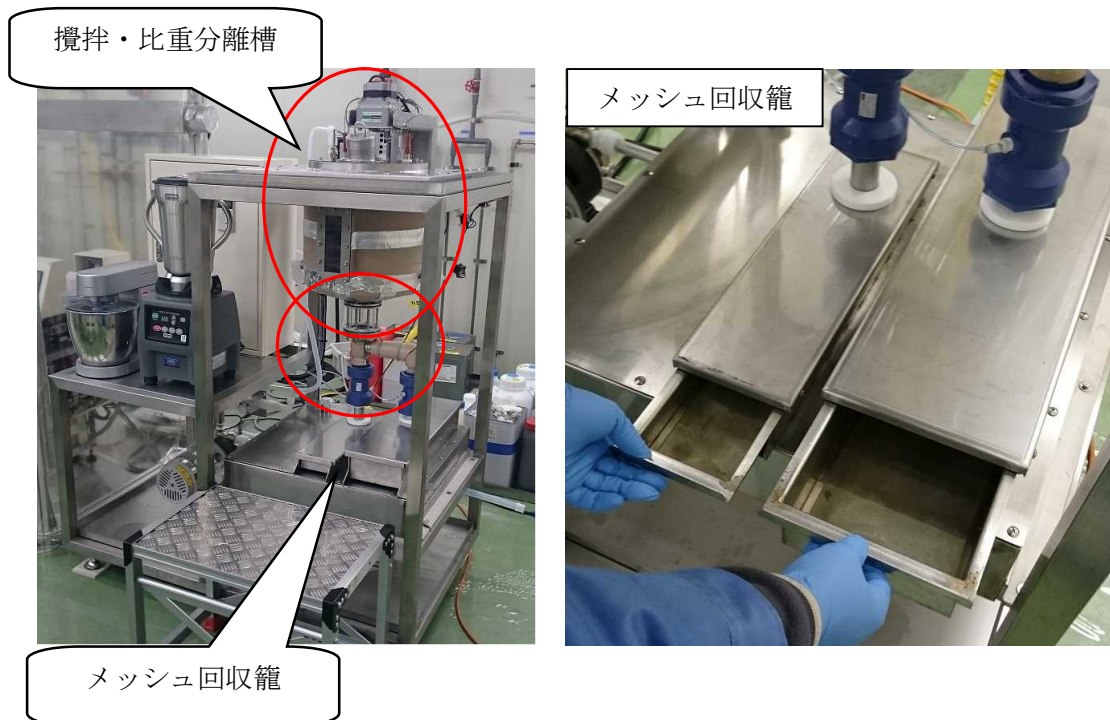
- ①モジュール固定ラックに処理するモジュールをセットしラックごと浸漬槽へ投入。
- ②浸漬槽左右に超音波発振子を取り付け、浸漬中のモジュール表面の EVA を膨潤させると共に、ガラス界面への剥離力アップを狙った。38kHz、100kHz、160kHz を一定時間間隔で自動変更が可能。

～ブラシユニット～

浸漬、膨潤後のモジュールをブラシユニットにセットし X-Y 動作軸により駆動するブラシによりガラス上の EVA を除去させる。

<EVA/シリコン金属分離装置 (分離ユニット) >・・・処理⑤

モジュールガラス上から研削・回収した EVA 積層体から EVA 成分の多い有機分画、シリコン・金属成分の多い無機分画に分離する為の装置。積層体粉碎装置と比重分離装置から成る。



図III-2-2-(2)-9 比重分離装置

比重分離、回収装置

粉碎後の EVA 積層体試料をムラ無く分離させるために攪拌機構を搭載し、上層の有機分画、下層のシリコン、金属類の回収は液の流下によって回収籠で回収する。上層、下層は分別回収する為にバルブを切り替えて回収する。

2. 実用化見通し

(1) 想定しているビジネス形態

本研究開発成果において、弊社が想定しているビジネス形態は以下3つある。

- ① 太陽電池モジュール用リサイクルシステムの製造・販売(装置・剥離剤)
- ② 太陽電池モジュール用リサイクルシステム・レンタル事業(メーカー、解体業者工場処理、各都道府県自治体)
- ③ 太陽電池モジュールリサイクルサービスの事業化(東邦化成社内処理)

来たるべき太陽電池モジュールの大量排出時代に備えて、処理に関わる潜在的ユーザーが、どのような現場においても使用しやすい簡便でコンパクトなシステムをノウハウ付きで提供したい。また、当該市場を育成する観点から、潜在的ユーザーが参入しやすい技術環境を整える目的で、システムの販売だけでなく、弊社の立地を生かしたレンタルやサービスの受託など、実用化に向けた幅広い選択肢の提供も検討したい。

(2) 実用化見通し

技術開発の観点から本年度、リサイクルシステムの見立て、処理コストの試算を行った結果、弊社にとってもっともハードルの高い上記③を想定した場合のビジネス形態の実現性が見えてきた。まだ弊社として調査の及んでいない物流関係コストに関しては課題を残すものの、解体リサイクルの観点からは有価物売却益を含まずとも5円/W以下での処理が可能であることがわかった。この結果から、まずはモジュールメーカーと手を組み、メーカーに戻ってくるモジュールの解体処理から始め、本格大量処理に向けたノウハウを蓄積し5年、10年先に来る大量廃棄に備える予定。

(3) 実用化に向けた課題

事業化に向けて、今後以下の課題がある。

- ① 本格的なパイロットラインを使用したビジネスモデル実証
- ② 物量を意識した廃棄モジュールを想定したコスト試算

③リサイクル法等の規制対応

まず、来年度①の実証を行いつつ、廃棄モジュールの収集ルート、回収物のリサイクルルート確保を行い、ビジネスモデル実証を行い、事業化への道筋をつける。

3.波及効果

大規模プラントではなくコンパクトな処理システムを構想。これによりリサイクルが各拠点で実施でき、まずは小規模ラインでのリサイクル処理から始めることが可能。処理量の増加に伴いシステムを増設すれば対応できることから地方分散型のリサイクルシステムが実現できる。年々増加していくであろう廃棄モジュールにあわせてシステムを設置できることから、自治体、リサイクル事業者等が手を出しやすいことが予想できるため、社会システムの構築も平行して行えるメリットがあり、廃棄量と同時に普及すると考える。

4.今後の展開

(1)プロジェクト研究期間中 (2014～2018 年度)

実証装置による処理コスト検証及び回収有価物の売却ルートの確保とそれら情報による事業性の検証を行う。また、事業開始の準備段階としてのビジネス形態の方向性を見定める。

(2)プロジェクト終了後 (2019 年度～)

ビジネスの開始。まずは小規模ながらもメーカー、自治体等協力の下リサイクル事業を開始する。また、現在結晶系モジュール特化の為、薄膜系など多種モジュールのリサイクル法の開発を模索して行く。

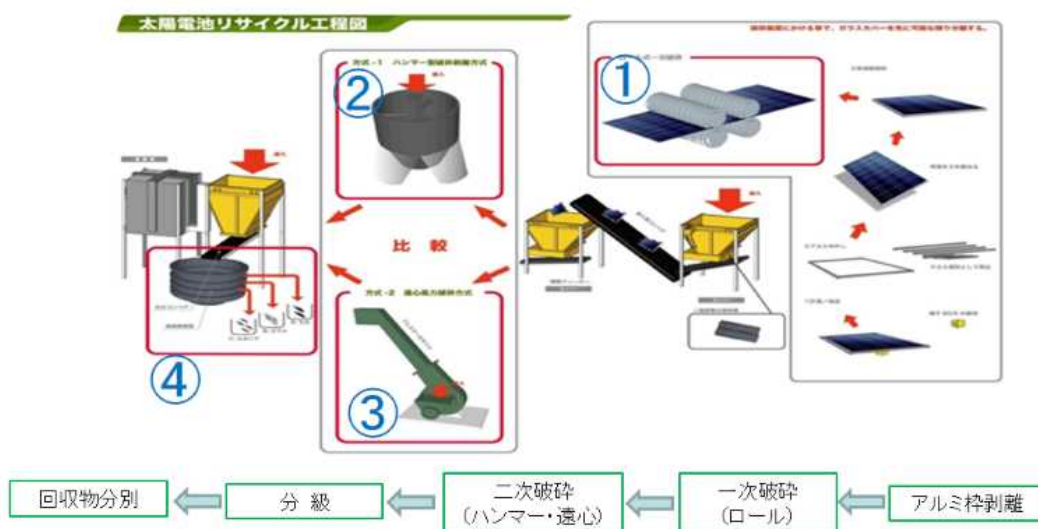
(3)結晶シリコン太陽電池の低コスト分解処理技術の調査/開発(市川環境エンジニアリング、ホンジョー、鹿島建設)

【2014年度】

1.成果詳細

(1)調査の概要

現在広く普及し、今後大量廃棄が見込まれる結晶シリコン太陽電池を対象とした低コスト処理技術の開発を行った。太陽電池の処理工程として、図Ⅲ-2-②-(3)-1のようなフローを想定した。まず図中①のロール式破碎機にて太陽電池の70%程度(重量比)を占めるガラスをガラスカレットとして回収する。その後、②ハンマー型破碎剥離機、もしくは③遠心風力破碎機にてさらにガラスとシート状のセル層の分離後、④の分級機で処理物の回収を行う工程である。4種類の機器(①ロール式破碎機、②ハンマー型破碎剥離機、③遠心風力破碎機、④分級機)を作成し、各機器の太陽電池処理状況を調査し、得られた回収物の割合や市場調査を行った。ハンマー式破碎剥離機と遠心風力破碎機は処理状況を比較してどちらが優れているかを評価した。



図Ⅲ-2-②-(3)-1 処理フロー

なお、処理実験には26種類の太陽電池を調達し処理実験を行った(図Ⅲ-2-②-(3)-2)。



図Ⅲ-2-②-(3)-2 (左：太陽電池パネル搬入状況、右：搬入された太陽電池)

(2)ロール式破砕機

まず、重量比で太陽電池の70%程度を占めるガラスを純度の高い状態で回収するためのロール式破砕機を開発した(図Ⅲ-2-②-(3)-3)。本装置は、上下にロールを持ち、その間にガラス面を表にした2枚の太陽電池を投入することによって、太陽電池表面のガラスを破砕・剥離する装置である。処理後は図Ⅲ-2-②-(3)-4のように太陽電池表面のガラスが粉砕され、カレットとして回収可能になる。この装置の最適な運転条件を求めるためにロール間隔(5 mm~8 mm)、ロール形状(凹凸型、△型(図Ⅲ-2-②-(3)-5))、太陽電池の送り速度のガラス回収に及ぼす影響を評価した。



図Ⅲ-2-②-(3)-3 ロール式破砕機(左：外観、右：投入状況)

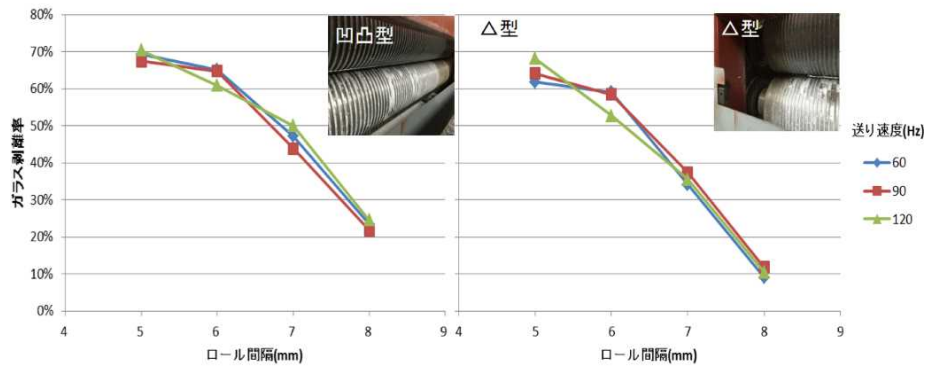


図Ⅲ-2-②-(3)-4 ロール式破砕機処理後の太陽電池



図Ⅲ-2-②-(3)-5 ロールの形状(左：凹凸型、右：△型)

ロールの形状としては凹凸型が△型より優れている結果となった(図Ⅲ-2-②-(3)-6)。ロール間隔としては狭いほどガラス剥離率は良好であったが、5 mmでは他の物の混入も多くなり、6 mmが最適であると判断した。送り速度については大きな影響はなかった。



図Ⅲ-2-②-(3)-6 ロール間隔、送りスピード、ロール歯形状とガラス剥離率の関係

(3)ハンマー式破碎剥離機、遠心風力破碎機

次に更なるガラス剥離による回収物の高付加価値化を目指し、2種類の処理機(ハンマー式破碎剥離機、遠心風力破碎機)を製作し、処理状況の比較検討を行った。ハンマー式破碎剥離機は内部に高速回転するハンマーを持ち(図Ⅲ-2-②-(3)-7)、これと太陽電池シートがぶつかりさらにガラスとシート状のセル層を分離する装置である。遠心風力破碎機は鉛直方向に回転するロールに処理物を投入し、打撃破碎、軽いものは上部へ、重いものは下部へ移行させることで回収物の分離を図る装置である(図Ⅲ-2-②-(3)-8)。

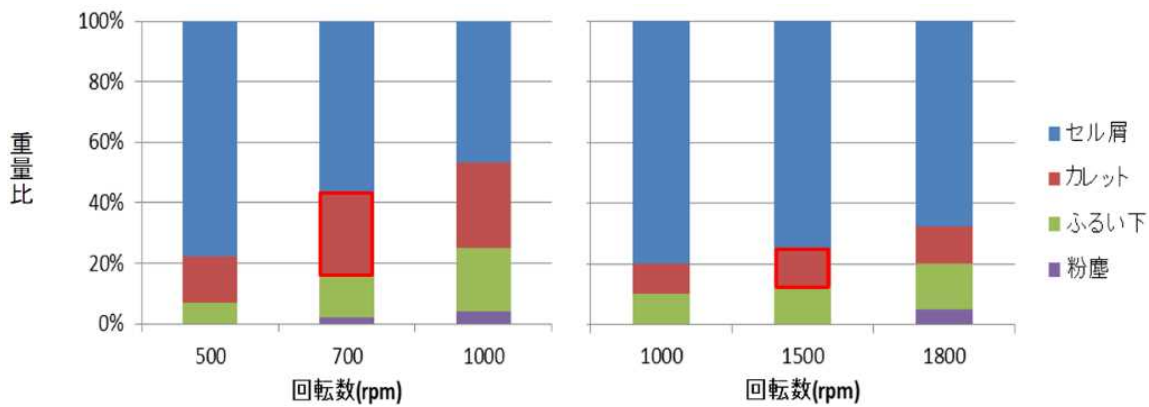


図Ⅲ-2-②-(3)-7 ハンマー式破碎剥離機 (左：外観、右：内部)



図Ⅲ-2-②-(3)-8 遠心風力式破碎機 (左：外観、右：内部)

比較の結果、ガラスの剥離率はハンマー式破碎剥離機の方が良好な結果となった(図Ⅲ-2-②-(3)-9)。したがって太陽電池の処理に関してはハンマー式破碎剥離機が優れているという結論を得た。



図III-2-②-(3)-9 ハンマー式破碎剥離機(左)、遠心風力破碎機(右)での処理結果

(4)分級機

次に回収物を回収する振動篩型の分級機の検討を行った(図III-2-②-(3)-10)。2 段のメッシュを持ち、サイズによって回収物の分離を行う装置である。



図III-2-②-(3)-10 分級機 (左：外観、中央：パンチングメタル、右：メッシュ)

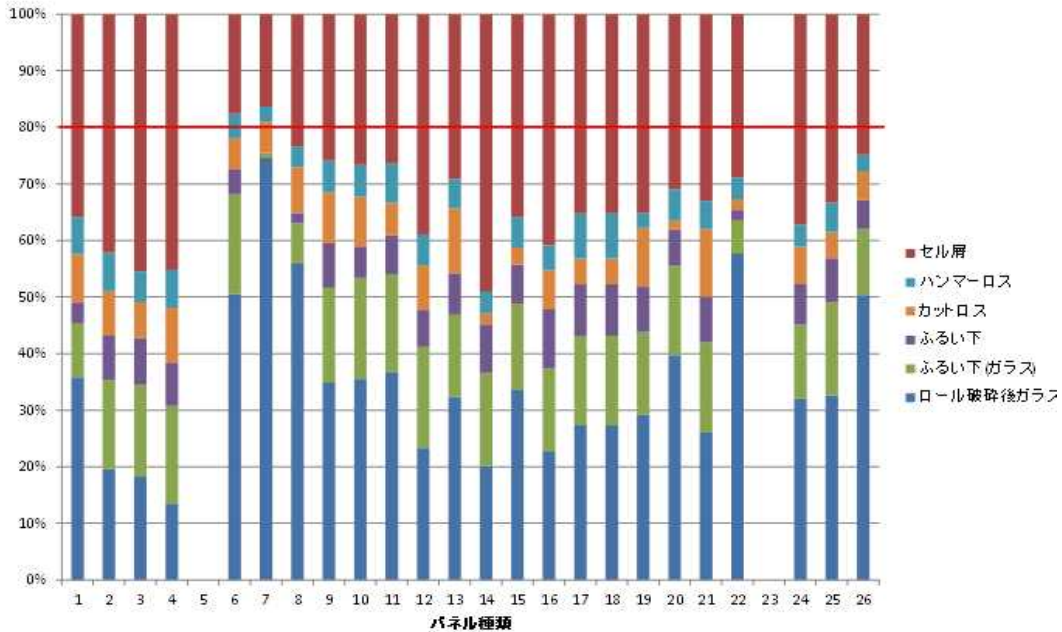
孔径 1 cm のパンチングメタルによって、シート状のセル屑が効率よく回収されることが明らかとなった(図III-2-②-(3)-11 左)。次に孔径 2 mm のメッシュによって、ガラスカレット、金属片の回収が可能であり(図III-2-②-(3)-11 中央)、残りは微粉末として回収された(図III-2-②-(3)-11 右)。



図III-2-②-(3)-11 回収物(左：セル屑、中央：ガラスカレット及び金属片、右：微粉)

(5)実際の太陽電池の処理状況

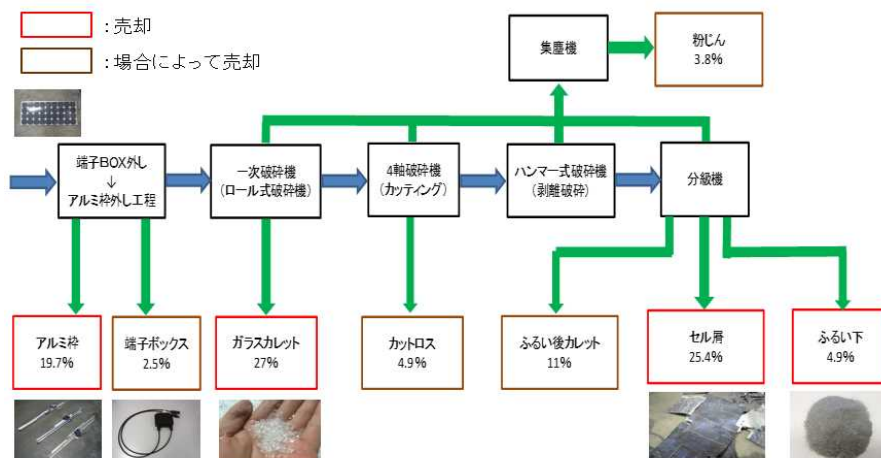
以上の結果からロール式破碎機→ハンマー型剥離破碎機→分級機という処理フローを想定した。取り寄せることのできた26種類の太陽電池パネルを処理した結果、図Ⅲ-2-②-(3)-12に示すような割合で回収物を得る結果となった。太陽電池の種類によって処理結果はかなり異なった。図中の80%の赤線はアルミ枠や端子ボックスを除いたガラスの重量割合となるが、No.7はほとんどのガラスがロール式破碎機で回収されたが、No.4のようにロール式破碎機でガラスがあまり回収されないものもあった。No.7ではセル層の割合は低いのに対して、No.4ではセル層の割合が高い。これは太陽電池の種類によって、ガラスが剥離されやすいものとされにくいものがあることを示すものである。平均するとアルミ枠、端子ボックスを除いた太陽電池総重量を100%とした時、35%がガラスカレットとしてロール式破碎機で回収さ、ハンマー型剥離破碎機、分級機の工程で14%がガラス粉(ふるい下)、33%がセル層、6%が微粉(ふるい下)として回収された。残りはカットロスと集塵装置へ吸引された粉塵である。



図Ⅲ-2-②-(3)-12 26種類の太陽電池の処理結果

(6)処理工程

以上より、処理工程としてはアルミ枠、端子ボックスの剥離の後に①ガラス破碎機によるガラスカレットの回収、②ハンマー式破碎剥離機による更なるガラスとセル層の分離、③分級機による回収物の分離、という工程を確立した(図Ⅲ-2-②-(3)-13)。また各回収物の比率は図に示す数値となった。

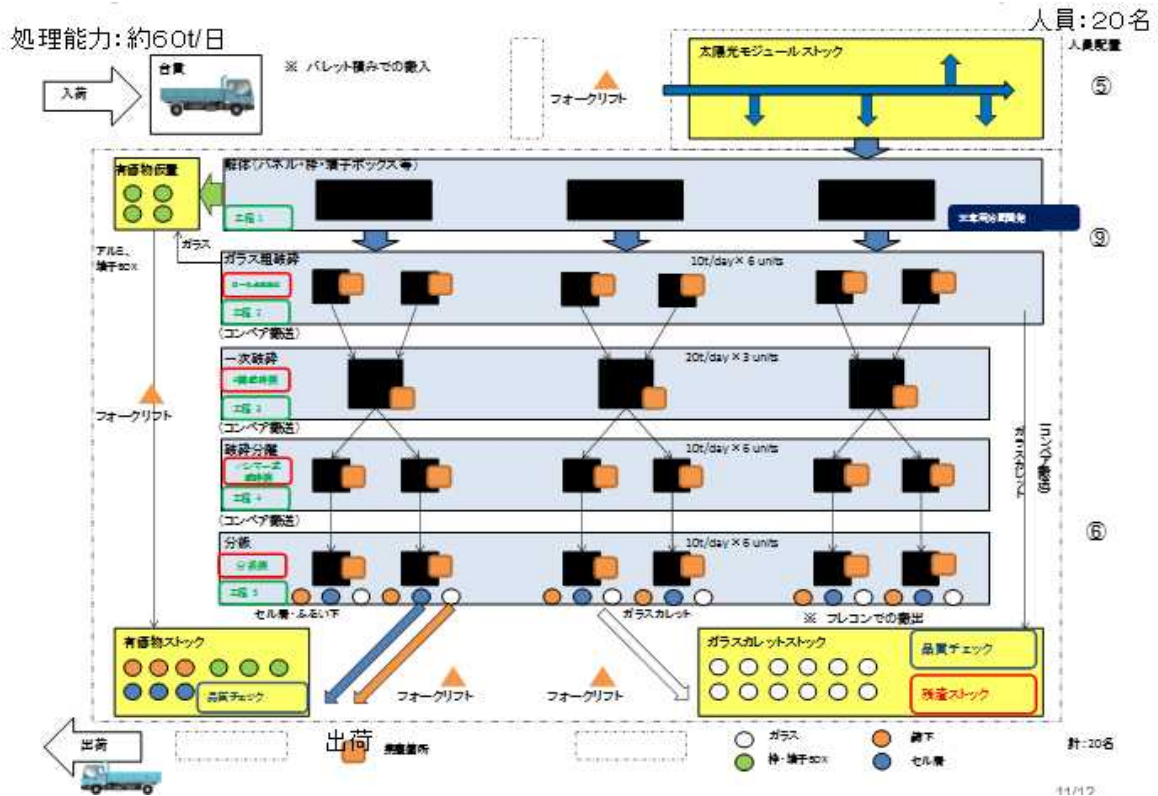


図Ⅲ-2-②-(3)-13 マテリアルフロー図

(7)事業性評価

回収物はアルミ、ガラスカレット、セル層、微粉となったが、それぞれ取り扱い業者にサンプルを持ち込んで評価した結果、有価(アルミは111円/kg、ガラスカレットは1円/kg、セル層は3円/kg、微粉は13円/kg)での売却の見込みが立った。

そして200MW/年の太陽電池を処理した時の事業性の検討を行った。太陽電池1枚を200W、15kgとすると、処理能力約60t/日の処理工場が想定された(図Ⅲ-2-②-(3)-14)。施設建設費用、運転費用、回収物売却益等を考慮し、事業性を検討した結果、2円/W以下での処理の見通しを得た(表Ⅲ-2-②-(3)-1)。



図Ⅲ-2-②-(3)-14 事業化イメージ

表Ⅲ-2-②-(3)-1 事業性評価 (200MW/年処理時)

項目	金額	備考	
売上(有価物売却益)	376,576,000円/年		
内訳	枠(アルミニウム)	349,872,000円	
	セル層(銀)※0.1%以上含有	12,192,000円	
	ふるい下(銀)	10,192,000円	
	ガラス	4,320,000円	
原価合計	440,179,880円/年		
内訳	材料費(資材・機材費)	20,000,000円	フレコン、梱包材
	光熱費	40,000,000円	1000kw × 7h × 250日 × 23円/kwh
	人件費	100,000,000円	20名 × 500万
	設備費(3ライン)	54,250,000円	設備費5.42億円、10年償却
	建物建築費(衛生設備含む)	32,500,000円	建物費6.5億円、20年償却(5,000m2 × 130,000円/m2)
	土地賃借料	5,000,000円	500円/m2 × 10,000m2
	廃棄物処分費 ※1	123,200,000円	3520t/年、35,000円/t(22%)
	一般管理費	48,954,880円	売上の13%
	維持管理費	16,275,000円	設備費の3%
売上-原価	-63,603,880円/年		

※1 端子BOX、カットロスを処理するものとします。

2.実用化見通し

第一に、現時点で廃棄される太陽電池パネルは多くが太陽電池製造メーカーからの不良品もしくは設置時の破損品さらには台風や積雪等による破損品であるが一定量が常に廃棄されており、2020年ごろからはRPS制度や補助金さらにはFIT制度で急激に導入された大規模な太陽光発電所等から使用済太陽光発電システムが大量に廃棄されてくると想定できること。第二に、廃棄太陽電池パネルの処理後に回収されるガラスカレット及び銀等を含むセル層も一定の価値(有価性)が期待できること。第三に、年間200MWの太陽電池パネルを処理すると想定した時の処理費が0.32円/W程度で対応可能であること。以上①②③より今後大量に廃棄されてくる太陽電池パネル処理事業における市場性や経済性さらには環境負荷低減等の効果は高いと判断できることから、太陽電池パネルリサイクルの実用化及び事業化は今後数年の内に活発化すると想定する。

3.波及効果

廃棄される太陽電池パネルには使用できないもののほかまだ十分に使用できるものも混在していると想定されることから、太陽電池パネルのリサイクル事業の延長線上にリユース事業との一体化事業への展開波及が容易に予想される。

さらには、ガラス主体のガラスと金属と樹脂の混合体である太陽電池パネルのリサイクル事業が進めば、樹脂を階層化した合せガラスや強化ガラスの処理も同様に処理可能となることから、今後の超高層建物の老朽化に伴う建物解体時に廃棄される複合窓ガラスや強化ガラス、廃棄自動車のフロントガラス等の処理事業への拡大をも念頭においた総合ガラス処理事業への波及が期待できると予想する。

4.今後の展開

本事業で得た成果を基礎として、近い将来に予想される使用済み太陽電池の大量廃棄期に向けてできるだけ早く事業化したいと考える。但し、大量廃棄期が到来する前に近年の異常気象(大型台風、ゲリラ豪雨、竜巻、洪水等々)による破損時の損害保険等によりまだまだ使用可能な太陽電池パネルも廃棄されてくることから、リユースも含めた総合処理事業の立上げと全国の処理ネットワークの構築を進め来べき大量廃棄の時代に備えたいと考える。

(4)可溶化法を用いた使用済み太陽電池からの資源回収技術の開発 (エヌ・ピー・シー、日本スペリア社、産業技術総合研究所)

【2014 年度】

1.成果詳細

研究開発項目の「太陽電池モジュールのガラスと EVA/セルの分離」の目標の設定根拠

目標：サイクルタイム 50 秒/枚

表Ⅲ-2-②-(4)-1 目標設定試算表

太陽電池モジュール仕様(想定)

モジュールサイズ	1000×1650	mm
モジュール出力	240	W

前提条件

目標処理額	5	円/W
年間処理量	200,000,000	W
年間処理枚数	840,000	モジュール
年間処理金額	1,000,000,000	円

処理条件(想定)

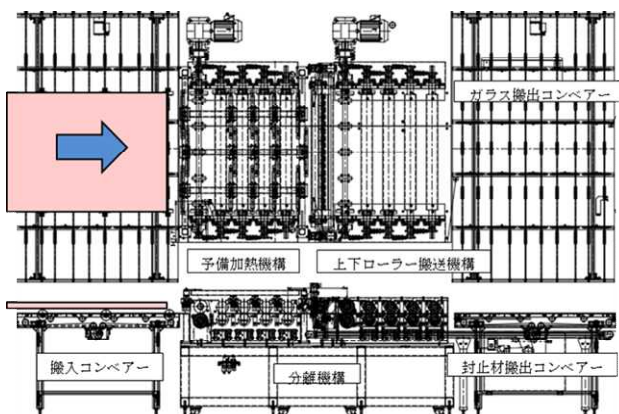
年間稼働日	345	日/年
稼働時間	21	時間/日
年間稼働時間	7,245	時間/年
稼働率	90%	
実稼働時間	6,521	
必要処理能力	129	モジュール/時
処理タクト	28	秒/モジュール

以上の通り年間 200MW の太陽電池モジュールを処理することを前提とすると必要な処理タクトは 28 秒/枚となる。

サイクルタイム 50 秒/枚の設備を 2 台とすると、目標処理コストを達成することが確認できたため、設備 1 台当たりの能力を 50 秒/枚と設定した。

研究開発① 太陽電池モジュールのガラスと EVA/セルの分離

- 1.単セルモジュールで 200℃に加熱すると EVA/セルを分離できることを確認
- 2.ガラスとセル/EVA の分離装置の製造 1000×1700 mm
 - 上下駆動ローラにて挟み込み投入 搬送速度 40 mm/sec
 - IR ランプで予備加熱し、200℃に加熱した刃で分離
 - ガラスは上部ローラコンベア、EVA/セルは下部ベルトコンベアへ搬送



図Ⅲ-2-②-(4)-1 ガラスと EVA/セル分離装置図面 図Ⅲ-2-②-(4)-2 ガラスと EVA/セル分離装置写真

3.分離テスト、評価結果

処理能力 50 秒/枚を達成

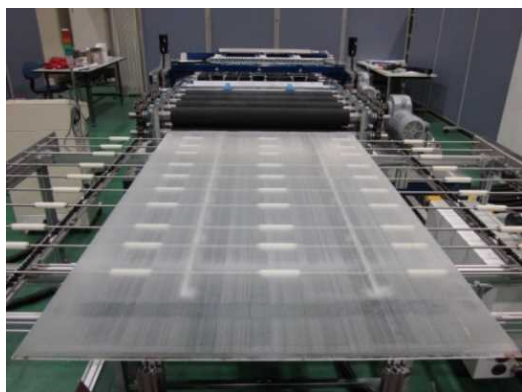
刃温度 150-200℃で酸化に伴う変色なく分離可能

ガラスが割れることなくガラスと EVA/セルを分離

4.今後の課題

平均 7 割程度は分離可能、ガラスに追従させる機構を追加

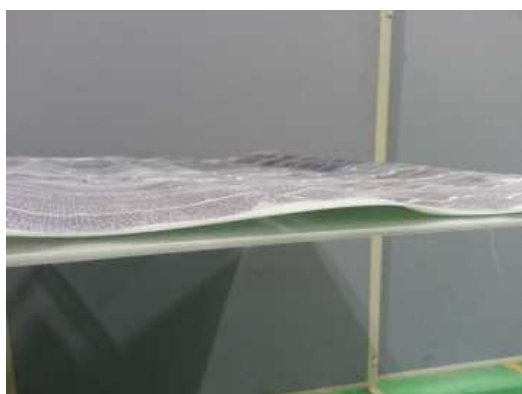
使用済み様々な太陽電池モジュールの処理や刃の耐久性の検証



図Ⅲ-2-②-(4)-3 分離後ガラス写真



図Ⅲ-2-②-(4)-4 分離後 EVA/セルシート写真



図Ⅲ-2-②-(4)-5 分離後の横からの写真

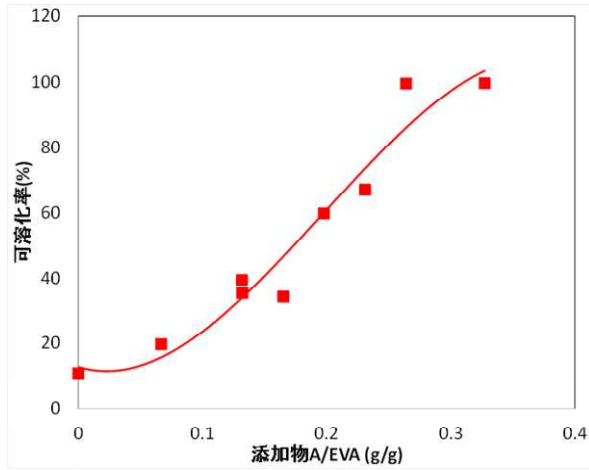


図Ⅲ-2-②-(4)-6 分離後の EVA/セルの受講面側写真

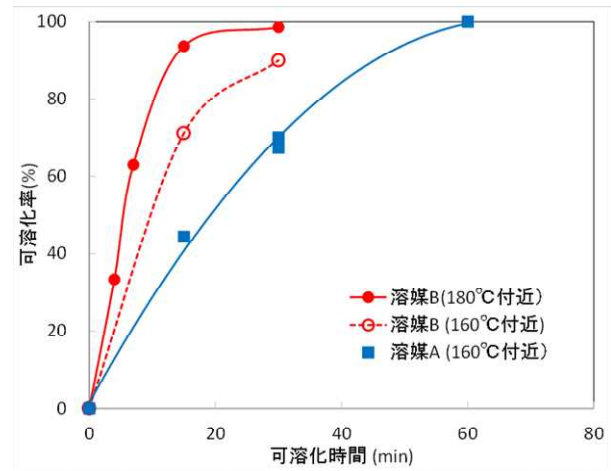
研究開発② 可溶化法による EVA/セルからの資源回収

太陽電池モジュールに封止材として使用されている架橋化されたエチレン酢酸ビニル共重合体(EVA)は、EVA にトリアリルイソシアヌレート等の架橋化剤を添加し、150～160℃加熱して架橋を成形させて製造される。架橋化反応は主にアセチル基の水素と架橋剤との間で起こり、架橋化率は加熱温度が高く加熱時間が長くなるにしたがって高くなり、通常架橋化率は 85%以上で使用されている。架橋内にはエステル結合が含まれていると考えられるので、本研究では、架橋に含まれるエステル結合を溶媒とのエステル交換反応によって開裂させ、EVA を可溶化して金属やシリコンを分離回収することを目指す。

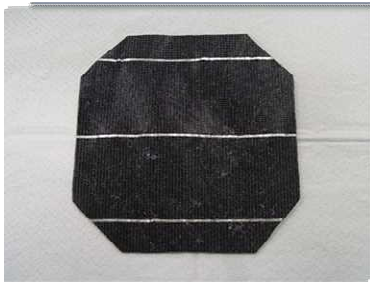
- 1.架橋化された EVA の可溶化率は、アルカリ A の添加量に比例して増加した。
- 2.架橋化された EVA は、溶媒 B 中 15 分で 90%以上可溶化された。
- 3.EAV を溶媒 B 中 180℃付近 30 分で処理すると、EVA がほぼ完全に可溶化され、金属・シリコンが回収された。
- 4.今後の課題
スケールアップのための基礎データを蓄積する。



図Ⅲ-2-②-(4)-7
架橋化 EVA の可溶化に対するカリウム A の添加効果 (溶媒 A、157℃、60min)



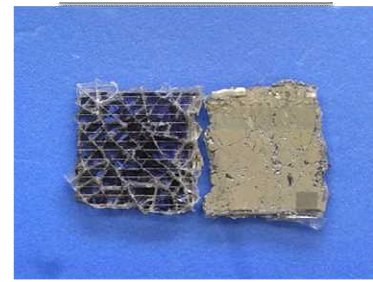
図Ⅲ-2-②-(4)-8
架橋化 EVA の可溶化速度に対する溶媒および可溶化温度の影響 (アルカリ/EVA=0.33)



溶媒A ↓ 可溶化率 99%



溶媒B ↓ 可溶化率 99%



溶媒B ↓ 可溶化率 97%



図Ⅲ-2-②-(4)-9 ガラスを切り剥がした太陽電池モジュールから回収された金属およびシリコン



図Ⅲ-2-②-(4)-10 新しい太陽電池モジュールから回収された金属およびシリコン



図Ⅲ-2-②-(4)-11 使用済み太陽電池モジュールから回収された金属およびシリコン

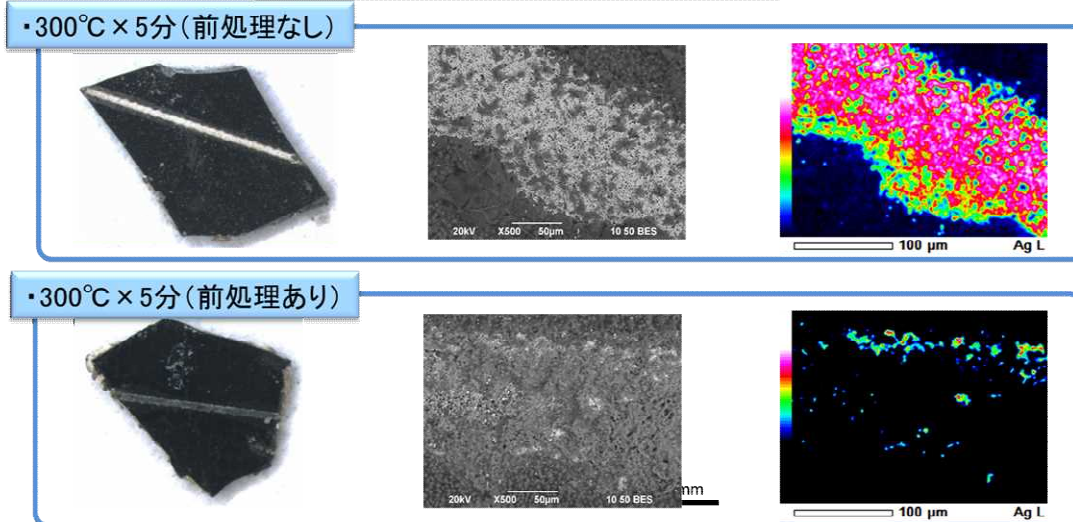
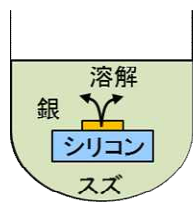
研究開発③ PV モジュールより分離する金属回収技術の開発

EVA を可溶化して回収した残渣(セル、配線材料など)を溶融スズに浸漬し、はんだ接合で生ずる溶食という現象を利用して金属をスズに溶かし込み、目的とする金属を分離回収することを検討する。

表Ⅲ-2-②-(4)-2 処理条件表

前処理	処理条件		結果
	温度	時間	
なし	300℃	5分	×
有機酸	300℃	5分	△
無機酸A	300℃	5分	○
無機酸B	300℃	5分	○
無機酸C	300℃	5分	○

○：銀が溶解
 △：銀が一部溶解
 ×：銀がほとんど溶解しない



図Ⅲ-2-②-(4)-12 金属分離回収の図

太陽電池セルのスズ槽への銀の溶出実験を行った結果、溶融スズ槽温度 300℃、無機酸で前処理を行った状態であれば、ほとんどの銀がセルからスズ槽に溶出することが確認された。

1. 清浄なセル片を用いた場合、300℃ 15分 で 89%の銀が回収できた。
2. 太陽電池モジュールを可溶化して得られた金属・シリコンからは、51%の銀が回収された。
3. 今後の課題
 - ・ 溶融スズとセルとの接触が重要(表面の前処理が必要)
 - ・ 装置、条件を変更することによって、回収率の向上は可能と考える。

スズ槽を用いた銀の回収

- ・ モジュール化していないセル：約 12g(セル 1 枚分)

表Ⅲ-2-②-(4)-3 銀回収率表 1

15 分間攪拌

温度	Ag回収率(%)
300℃	89
350℃	88
400℃	75

- ・ 太陽電池モジュールから可溶化して回収した金属・シリコン：約 482g
(モジュール 1 枚分)

表Ⅲ-2-②-(4)-4 銀回収率表 2

温度	Ag回収率(%)
300℃	51

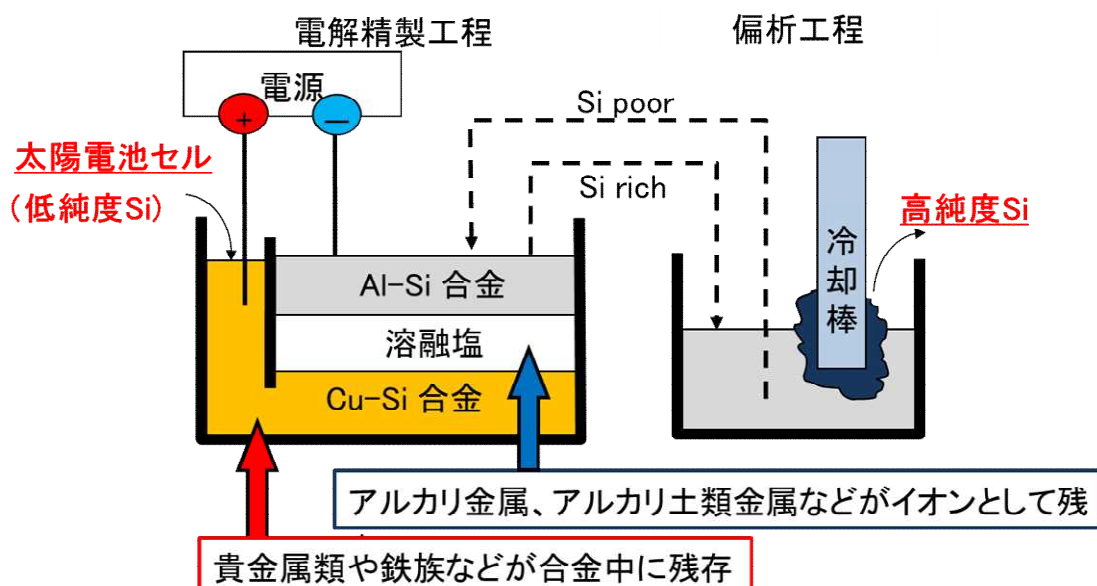
目標はモジュール 1 枚分の可溶化後のセルから銀の回収率 90%以上であったが、結果は回収率

50%となり、達成しなかった。

研究開発④(参考研究) シリコンの高純度化 (産業技術総合研究所)

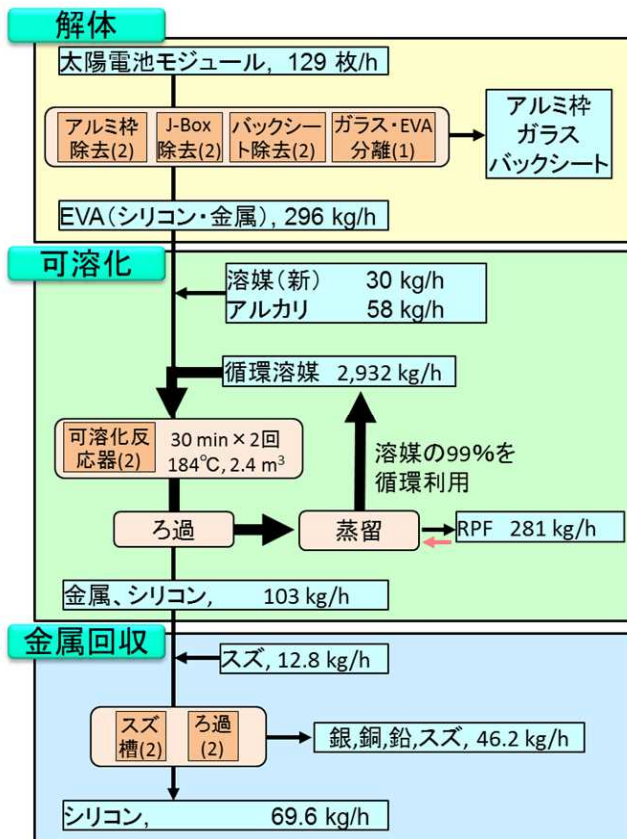
本研究開発では溶融塩電解精製を用い、使用済み太陽電池から回収されたシリコンを、陽極となる銅-シリコン液体合金に溶融させて系内に導入する。陰極はアルミニウムとシリコンの液体合金である。これに通電すると、上記と同様の原理でシリコンのみが陽極から陰極に移動し、陰極中のシリコン濃度が上昇する。シリコン濃度の増加したアルミニウム-シリコン液体合金は偏析工程に送り、部分的に冷却することで高純度のシリコンを晶出させるとともに、シリコン濃度の低下したアルミニウム-シリコン合金を陰極として再利用する。

1. 可溶化によって得られたセルは、Alの酸化が抑制され、後段の処理が容易になることを確認
2. 回収されるシリコンの不純物濃度を推算し、一定の効果が見込めることを示した
(回収したシリコンの不純物 Fe: 3.2 ppm, P: 1.1 ppm、金属シリコン Fe: 3000 ppm, P: 48 ppm)。
3. 溶融電解法を用いてシリコンの高純度化を達成する。



図III-2-②-(4)-13 溶融塩中でのSiの電解精製およびSi回収方法の概念図

分解処理コストの試算結果



試料概要

太陽電池モジュール	単位
200	MW
840,000	枚
15,460	t

回収物

回収物	重量 (t)	単価 (円/kg)	評価額 (億円)
ガラス	10,500	0	0
アルミニウム	2,659	120	3.19
銅	175.2	480	0.84
鉛&スズ	32.8	640	0.21
銀	9.6	52,800	5.07

消耗品

消耗品	重量 (t)	単価 (円/kg)	評価額 (億円)
溶媒	193	240	0.46
アルカリ	378	140	0.53
スズ	83,412	2,000	1.67

図Ⅲ-2-②-(4)-14 分離処理コスト試算図

本研究開発を行ったプロセス(解体、可溶化、金属回収)の試算から 0.78 円/W で使用済み太陽電池モジュールを処理できることが分かった。

分解処理コストの明細(収支計算)

解体、可溶化、金属回収の各段階における経済収支を表Ⅲ-2-②-(4)-1 以下に示す。これらの計算から、本プロセスでは 0.78 円/W(10.0 円/kg)で使用済み太陽電池を処理できることが分かった。太陽電池モジュールに含まれる銀は、経済性を向上させるために比重に貢献しているが、銀の含有量は年々減少していることが知られている。仮に太陽電池モジュールに銀が全く含まれない場合には、処理費は、3.31 円/W(42.8 円/kg)と推算された。

表Ⅲ-2-②-(4)-3 目的とする処理量

年間処理量	200,000,000	W
年間処理枚数	840,000	枚

表Ⅲ-2-②-(4)-4 太陽電池モジュールの仕様

結晶性シリコン太陽電池	100	%
重量	18.4	kg
1枚当たりの出力	240	W
モジュールサイズ	1000×1650	mm

表Ⅲ-2-②-(4)-5 太陽電池に含まれる有価物の含有量

項目	重量 (1枚当たり)		年間処理量	
アルミフレーム	3.166	kg	2,659	t/y
ガラス	12.5	kg	10,500	t/y
EVA	1.50	kg	1,260	t/y
金属	0.25	kg	208	t/y
銀ペースト、アルミペースト	0.0114	kg	9.58	t/y
シリコン	0.54	kg	454	t/y
バックシート	0.44	kg	370	t/y
合計	18.41	kg	15,460	t/y

表Ⅲ-2-②-(4)-6 操業条件

年間稼働日	345	d/y
稼働時間	21	h/d
年間稼働時間	7,245	h/y
稼働率	90%	%
実稼働時間	6,521	h
必要処理能力	129	枚/h
処理タクト	28	sec/枚

表Ⅲ-2-②-(4)-7 土地建物

	解体	液化	金属回収	
土地		5,000	825	m2
建物		5,000	350	m2
土地購入費		0	20,000,000	円
建物建設費		35,779,355	30,000,000	円
付属設備費		4,100,000		円
合計		39,879,355	50,000,000	円
減価償却年数		7	7	年
減価償却費	2,848,525	2,848,525	7,142,857	円

主な設備とその費用について下表に示す。

表Ⅲ-2-②-(4)-8 解体工程

設備名	台数	購入費 (円)	減価償却 (年)	処理設備 償却費(円)	光熱費 (円)	材料費 (円)
1,アルミフレーム除去装置	2	30,255,000	7	8,644,286	829,446	
2,J-Box除去装置	2	16,370,000	7	4,677,143	829,446	
3,バックシート除去装置	2	20,940,000	7	5,982,857	829,446	
4,ガラス/EVA分離装置	2	31,600,000	7	9,028,571	1,463,728	
5,その他	1	21,000,000	7	3,000,000	1,219,773	
小計		120,165,000		31,332,857	5,171,839	4,000,000

表Ⅲ-2-②-(4)-9 液化工程

設備名	台数	購入費 (円)	減価償却 (年)	処理設備 償却費(円)	光熱費 (円)	材料費 (円)
1,EVA可溶化装置	2	400,000,000	7	114,285,714	3,939,835	
2,蒸留装置	1	400,000,000	7	57,142,857	23,574,668	
小計		800,000,000		171,428,571	27,514,503	99,267,840

表Ⅲ-2-②-(4)-10 材料費内訳

試料名	年間使用量 (t)	単価 (円/kg)	費用 (円)
2-エチル-1-ヘキサノール	193	240	46,347,840
水酸化カリウム	378	140	52,920,000

表Ⅲ-2-②-(4)-11 金属回収工程

設備名	台数	購入費(1台分) (円)	減価償却 (年)	処理設備 償却費(円)	光熱費 (円)	材料費 (円)
1,錫槽	2	10,000,000	7	2857142.857	4,003,200	
2,シリコンろ過装置	2	5,000,000	7	1428571.429	800,000	
小計		15,000,000		4,285,714	4,803,200	166,824,000

表Ⅲ-2-②-(4)-12 材料費内訳

試料名	年間使用量 (kg)	単価 (円/kg)	費用 (円)
スズ	83,412	2,000	166,824,000

表Ⅲ-2-②-(4)-13 回収資源売却収入

	重量 (g/枚)	回収重量 (kg)	販売単価 (円/kg)	売却額 (円)
アルミフレーム	3,166.0	2,659,440	120	319,132,800
銀	11.43	9,601	52,800	506,943,360
シリコン(99.9999%)	540	453,600	0	0
銅	208.6	175,224	480	84,107,520
錫&鉛	39	32,760	640	20,966,400
ガラス	12,500	10,500,000	5	52,500,000
合計				983,650,080

表Ⅲ-2-②-(4)-14 年間処理費用

内訳	解体 (円)	液化 (円)	金属回収 (円)	全体 (円)
土地建物減価償却費	2,848,525	2,848,525	7,142,857	12,839,908
処理設備償却費	31,332,857	171,428,571	4,285,714	207,047,143
光熱水費	5,171,839	27,514,503	4,803,200	37,489,542
材料費	4,000,000	99,267,840	166,824,000	270,091,840
人件費	288,021,772	288,021,772	26,688,000	602,731,543
その他経費	500,000	500,000	7,772,000	8,772,000
合計	331,874,993	589,581,211	217,515,771	1,138,971,976

表Ⅲ-2-②-(4)-15 まとめ

総支出		1,138,971,976	円
総収益		983,650,080	円
総処理費用		155,321,896	円
処理費用	銀11.4g/枚	0.78	円/W
		10.0	円/kg
処理費用	銀0g/枚	3.31	円/W
		42.8	円/kg
処理費用	回収資源無	5.69	円/W
		73.7	円/kg

2.実用化・事業化見通し

研究開発① 太陽電池モジュールのガラスとEVA・セルの分離 (エヌ・ピー・シー)

本プロジェクトにて開発した分離プロセス、実証機から、今後の市場、顧客の要望に基づき、最適な装置の開発、設計を行い、実機の製造、リサイクル事業を行う事業者への装置販売事業を行う。

実用化、事業化の定義は、本プロジェクトで開発した装置の販売開始とする。

なお2015年度～2018年度の「低コスト分解処理技術実証」に採択され、今回開発を行った装置を引き続きリサイクルプロセス開発、改良、実証用として使用。

研究開発② 可溶化法によるEVA・セルからの資源回収 (産業技術総合研究所)

実験レベルでの可溶化は十分満足のいく結果となったが、実用化・事業化までの実証を行うとなると、プラント的な大がかりな設備が必要となることから、引き続き独自にて研究開発を行っていく。

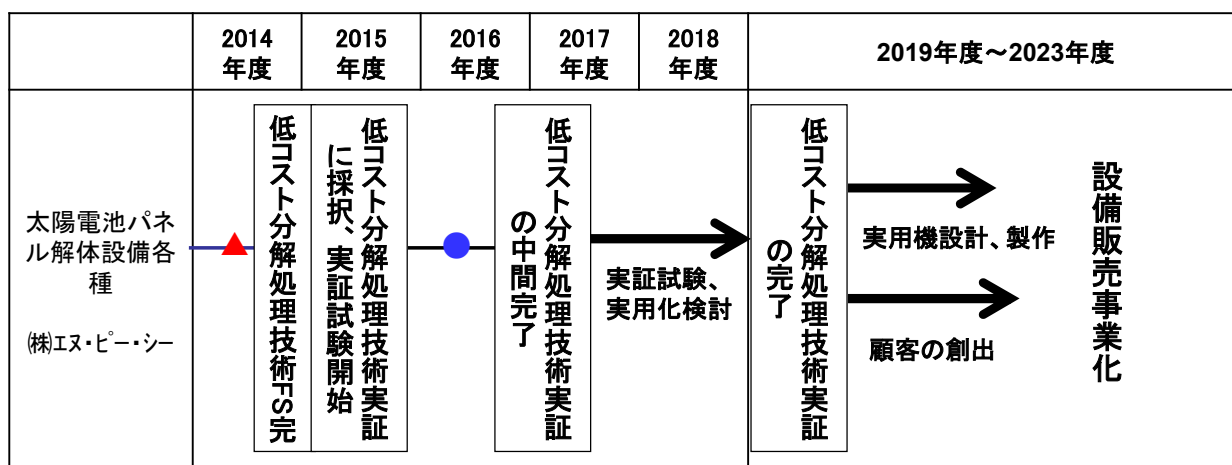
研究開発③ PV モジュールより分離する金属回収技術の開発 (日本スペリア社)

目的とした金属回収できる事象は確認でき、今後より条件、設備仕様を詰めていけば、更なる回収率の向上、実用化・事業化に向けた取り組みができるため、将来に向け独自にて研究開発を行うことを検討する。

3.波及効果

現状の廃棄する太陽電池モジュールパネルは破砕して埋め立て処分が一般的と聞いているが、ガラスと EVA/セル分離装置を運用することにより、板状の状態でガラスが回収できるため、ガラスの再生、再利用につながる可能性があり、そのようになれば太陽電池モジュールの廃棄、リサイクルについて劇的に変化し、またガラスメーカーも太陽電池用ガラスの再生、再利用に取り組まざるを得なくなると考える。

4.今後の展開



図Ⅲ-2-②-(4)-15 今後の展開スケジュール

本プロジェクトにて研究開発を行い、今後の課題としては様々な太陽電池モジュールの処理、分離の精度、刃の耐久性となる。

2015年度～2018年度の「低コスト分解処理技術実証/ホットナイフ分離法によるガラスと金属の完全リサイクル技術開発」に採択され、このプロジェクトにて様々なタイプの太陽電池モジュールの処理、刃の耐久性の検証を行う。

プロジェクト終了後、課題を克服できる設備の検討、設計を行い、実機製作の検討を行う。

その後太陽電池モジュールの廃棄市場の調査と営業活動を通じて解体・リサイクル事業を行う企業の創出、探索を行い、装置販売の事業化を行う。

また、2015年度～2018年度の「低コスト分解処理技術実証」での共同採択者の(株)浜田はリサイクル関連事業を行っていることから、協力することにより、より一層の解体・リサイクル事業者への装置販売につながると考える。

③低コスト分解処理技術実証

(1)結晶シリコン太陽電池モジュールのリサイクル技術実証(三菱マテリアル)

【2015～2018 年度】

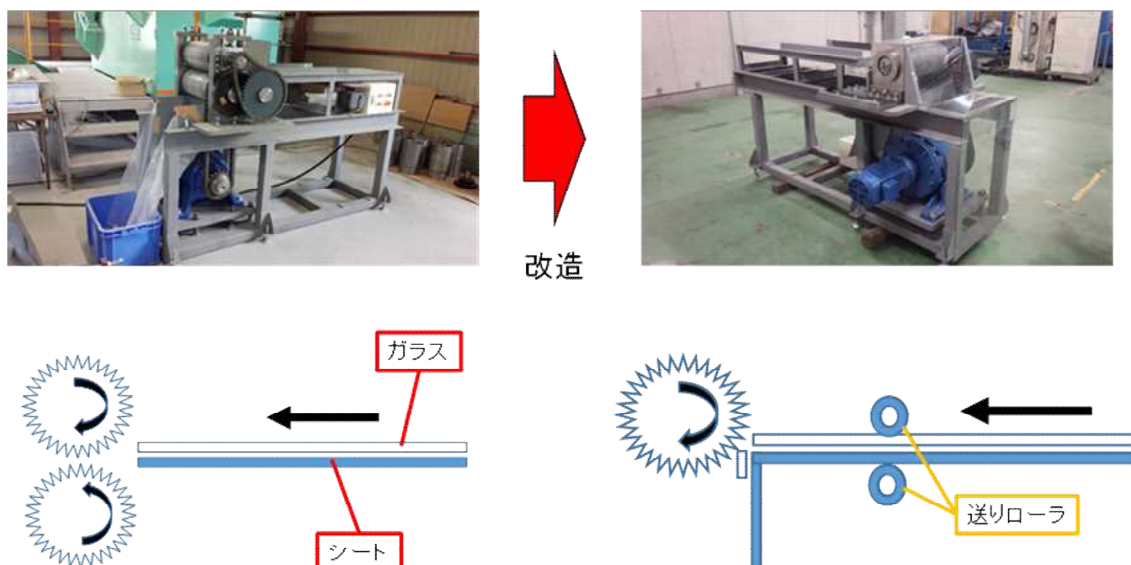
1.成果詳細

本事業では 2014 年度に実施した「結晶シリコン太陽電池モジュールのリサイクル技術開発」の結果を基に、ローラ式剥離機の改造、及びスケールアップや、各要素技術の開発を行った。開発した要素技術をラインに組み込んだ実証プラントでは、60 秒/枚の処理速度で連続運転を実施して、回収物の評価・採算性の計算を行った。その結果、パネル分解処理コスト(ネット)は 3.9 円/W となり、本プロジェクトの目標である分解処理コスト(ネット)5 円/W を達成した。また、目標値を設定した 2014 年度当時の回収物価値での評価では、パネル分解処理コスト(ネット)は 1.6 円/W となった。

多種の太陽電池モジュールの処理についても知見を得るため、約 3,000 枚の太陽電池モジュールの処理を行ったところ、複数の改善すべき点が明らかになった。今後はそれら改善点の検討を行い、処理コストの更なる削減を目指す予定である。

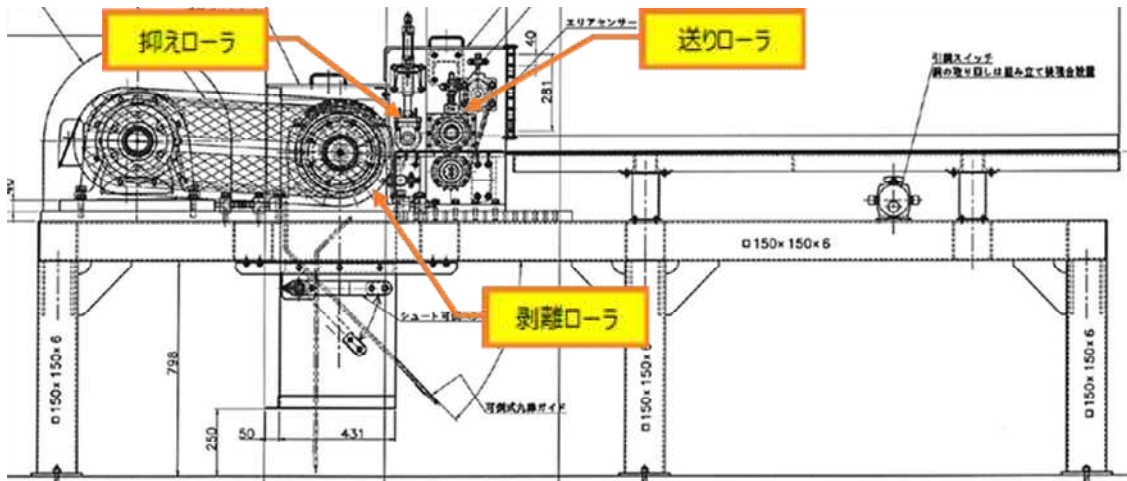
1.1 実証剥離機の開発

2014 年度に実施した「結晶シリコン太陽電池モジュールのリサイクル技術開発」(以下、2014 年度 PV リサイクル技術開発)では、回転する 2 本の破碎刃付きローラ間に太陽光パネル(以下、パネル)を通すことで、ガラスを破碎しシートからガラス粒を剥離する小型試験機を製作した。本事業ではこの仕様を変更して、ガラス面を上方にしたパネルを移動させ、回転する剥離ローラの表面のピン(以下、剥離刃)でガラスをシートから剥離する構造とした(図Ⅲ-2-③-(1)-1)。



図Ⅲ-2-③-(1)-1 剥離後ガラス粒の粒度毎重量比率

この改造により、剥離したガラス粒の粒度が全体的に増大して、0.6 mm 未満のガラス粒や粉塵の発生量も減少する結果となった。よって回収物品位の向上や作業環境の向上等への寄与が期待された。以上の知見から、パネル 1 枚を 60 秒以内で剥離する検討を行うべく、小型試験機をスケールアップした実証剥離機の製作を行った。実証剥離機には追加機能として、パネルが剥離ローラに接触した際、パネルが浮き上がるのを防止する抑えローラを設置している(図Ⅲ-2-③-(1)-2)

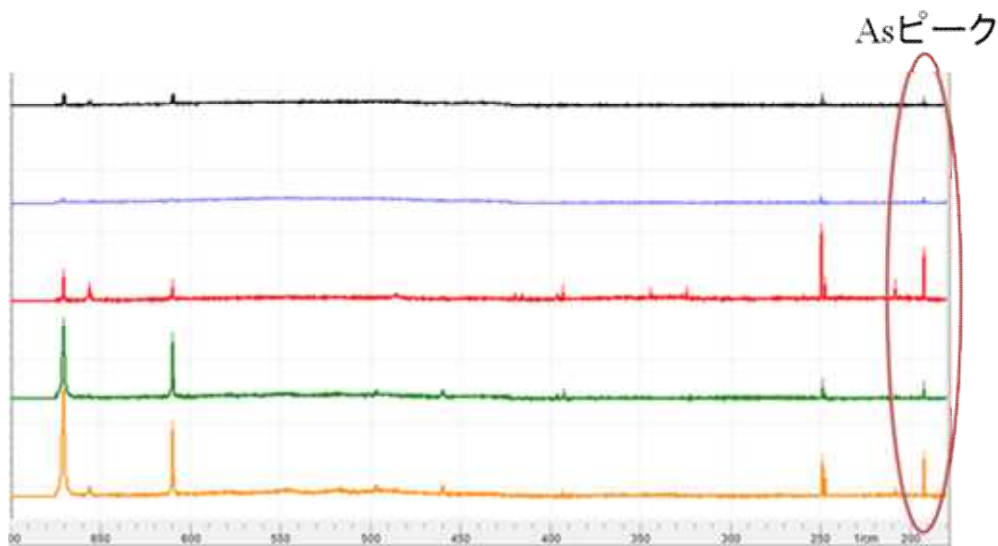


図Ⅲ-2-③-(1)-2 実証剥離機の構造

1.2 ガラス中ヒ素成分の同定機器選定と測定評価

「2014 年度 PV リサイクル技術開発」において、使用したパネルサンプルの含有成分を分析した結果、ガラス中にヒ素を含有するパネルがあることがわかった。ヒ素は毒性が非常に強く、急性中毒症状としては頭痛、麻痺、呼吸困難等が報告されているため、ガラス再資源化原料として使用せずに非鉄製錬所等で適正に処理する必要がある。よってガラス剥離前にヒ素含有の有無を同定し、パネルを選別する必要がある。迅速、且つ現場での同定・選別作業には可搬型の乾式同定器の導入が有効であると考え、レーザー誘起ブレイクダウン分光分析計(LIBS)と蛍光 X 線分析装置(XRF)の事前選別の可否評価を行った。なお、評価用のサンプルは、湿式分析によりヒ素、及びアンチモンの存在が確認されているガラスを用いたパネルである。

LIBS でヒ素、及びアンチモンの測定を行ったところ、両元素共にガラスの成分であるケイ素、炭素、マンガンのピークに影響を受けることが分かった。また、同一サンプルを用いて 5 回測定したところ、ヒ素の検出強度(ピーク強度)が異なることから再現性が乏しいことが明らかとなった



図Ⅲ-2-③-(1)-3 LIBS のガラス中ヒ素検出ピーク(同一サンプル、5 回測定)

一方で、XRF を用いてヒ素、及びアンチモンの測定を行ったところ、湿式分析の結果と近い測定値が得られた(表Ⅲ-2-③-(1)-1)。また、測定時間も 10 秒程度で精度が高い測定結果が得られたため、XRF を選定した。

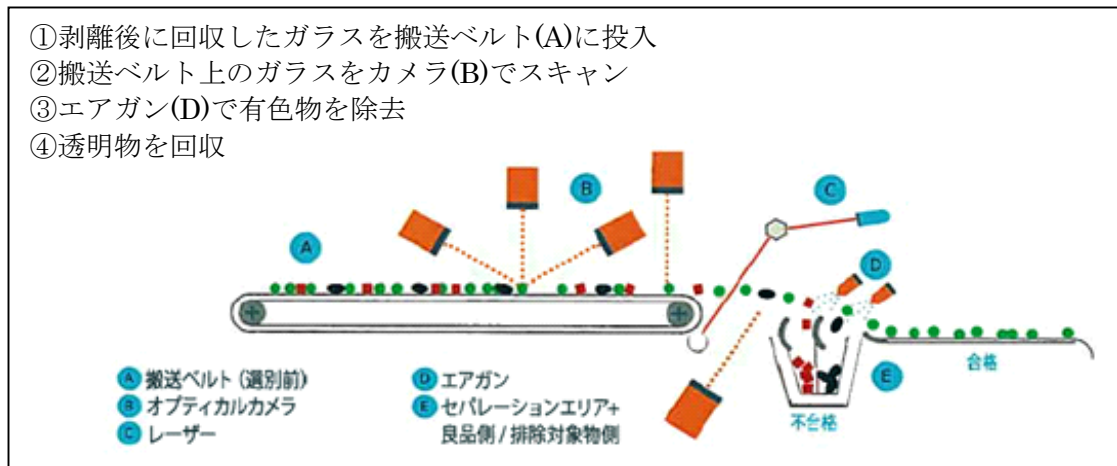
表Ⅲ-2-③-(1)-1 各社 XRF による測定結果

		湿式	A 社製	B 社製	C 社製
As	Sample 1	<100	N.D.	N.D.	N.D.
	Sample 2	<100	N.D.	N.D.	8
	Sample 3	610	688	787	561
Sb	Sample 1	1100	1072	1033	1227
	Sample 2	1800	1615	1537	1867
	Sample 3	580	578	540	663

1.3 試作プラントによる事業化検討

a) 色彩選別機の導入

パネルから剥離されたガラスは、クリアガラスとシートが付着した有色ガラス、バスバー等が混在した状態で排出される。ガラスの再資源化や銀や銅等の金属の回収を踏まえると、これらを選別して回収することが望ましい。「2014年度PVリサイクル技術開発」により、色彩選別機がガラスを選別するのに効果的との結論を得た。色彩選別機はベルトコンベア上に積載された対象物を CCD カメラによって色を識別し、予め設定した色の対象物をエアガンによって弾くことで選別を可能としている(図Ⅲ-2-③-(1)-4)。



図Ⅲ-2-③-(1)-4 色彩選別機の概略図(出典:トムラソーティング株 GENIUS製品カタログ)

本事業ではパネル1枚あたり60秒で剥離処理することを想定した。パネル1枚の重量を11 kg、ガラス重量比率を80%と仮定した場合、ガラスの排出量は以下の通りとなる(式Ⅲ-2-③-(1)-1、式Ⅲ-2-③-(1)-2)。

$$\text{式Ⅲ-2-③-(1)-1: 処理枚数: } 1(\text{枚/秒}) = 60(\text{枚/時})$$

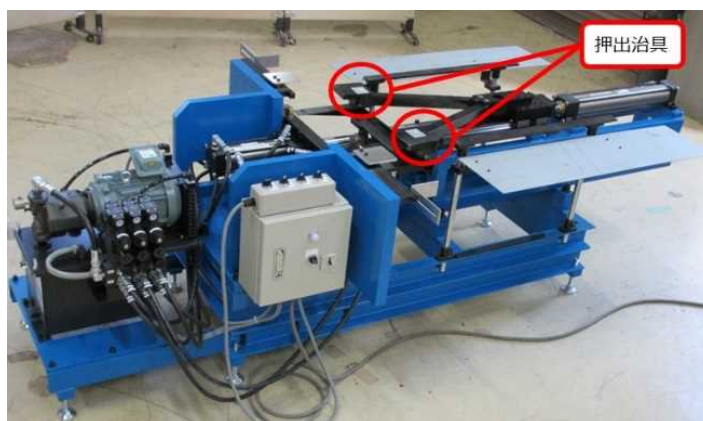
$$\text{式Ⅲ-2-③-(1)-2: 剥離ガラス重量: } 60(\text{枚/時}) \times 11(\text{kg/枚}) \times 80(\%) = 528(\text{kg/時})$$

選別対象物であるガラスは528kg/時でパネルより剥離される。クリアガラスの歩留まりを高めるため、リターンコンベア等を用いて再選別を行う場合には、ガラス粒1,056kg/時の選別能力が必要である。要求仕様を満たし、購入が可能な色彩選別機を選定した結果、トムラソーティング社製「GENIUS 1600」を採用した。本装置は対象ガラス粒を1,300kg/時で選別可能であることを導入前試験で確認している。また、選別対象物である剥離後ガラス粒の粒度を合わせることで、選別精度が向上する知見を得ている。しかし、本装置ではガラス粒0.6 mm以下の選別が難しく、2.0 mm以上を選別した方が、選別精度が向上することが判明している。よってガラス粒度の選別を実施するため、合わせて振動篩も導入した。

b) アルミ枠取外機の製作

色パネル周囲はアルミ・鉄枠が取り付けられており、取り付け方法はビス止め、リベット止め等様々である。予察の結果、一定の力を掛ければ枠を取り外せる事が確認できた。装置のサイズを小さく出来る事から、枠を内側から油圧駆動の押出治具により押し広げる方式で製作を行った。実証剥離機が60秒/枚の処理能力であることから、アルミ枠取外機についても60秒/枚

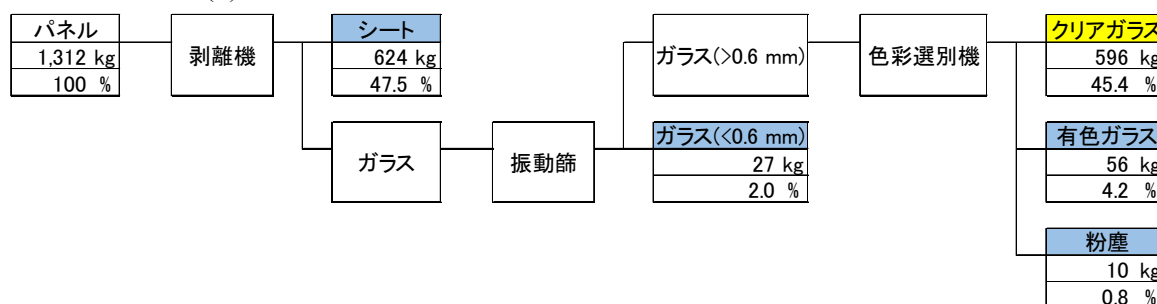
で処理できるよう設計した。併せて、実証剥離機の投入口で阻害となるジャンクションボックスの取外し機能も付加させた(図Ⅲ-2-③-(1)-5)。



図Ⅲ-2-③-(1)-5 アルミ枠取外機

c) 試作プラントの製作

研究してきた要素技術を用いて、パネルのリサイクル試作プラントを製作した。パネル120枚の処理試験を実施して、1枚あたり60秒以内の処理能力を確認した。また、回収物の物質収支についても図Ⅲ-2-③-(1)-6に示す。



図Ⅲ-2-③-(1)-6 パネル120枚試験時の物質収支

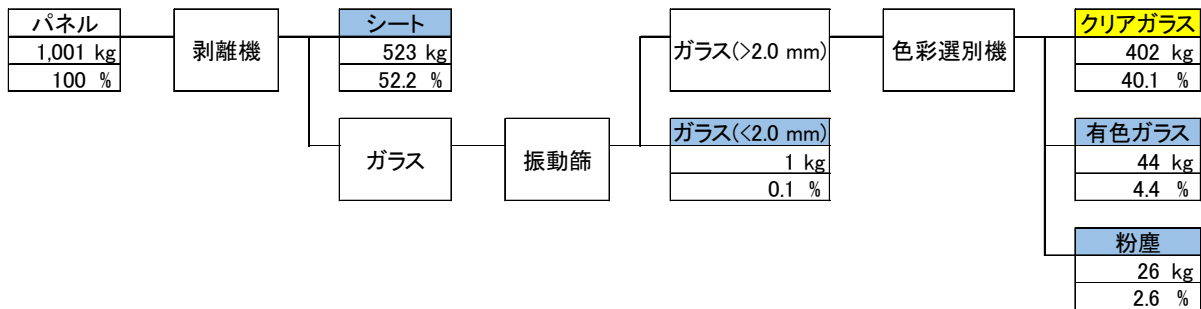
物質収支の結果から分解処理コストを試算した結果、有価売却益を差引く前の分解処理コスト(グロス)は 3.2 円/W となった。また、有価売却益も含めたパネル分解処理コスト(ネット)は、2.8 円/W となった(表Ⅲ-2-③-(1)-2)。よって目標値のパネル分解処理コスト(ネット)5.0 円/W を達成する試算となった。

表Ⅲ-2-③-(1)-2 分解処理コストの試算

項目	明細	試算	算出式等
年間処理量		115,200 [枚/年]	①
		12,672,000 [W/年]	①' 110 W=1枚
		1,267,200 [kg/年]	①'' 11 kg=1枚
処理費用	材料費	0 [千円/年]	使用予定なし
	光熱水費	2,164 [千円/年]	電気代: 23円/kWh
	人件費	11,520 [千円/年]	作業員3名
	設備費	26,600 [千円/年]	5年定額償却
	土地・賃借代	0 [千円/年]	保守費(起業費の5%)
	最終処分費	315 [千円/年]	家電リサイクル工場を利用
	合計	40,599 [千円/年]	②
分解処理コスト(グロス)	有価物売却益前のグロス単価	3.2 [円/W]	②/①'
		32 [円/kg]	②/①''
有価物売却益	モジュール	25,231 [千円/年]	③ アルミ枠等の売却益含む
	パネル	4,909 [千円/年]	③'
分解処理コスト(ネット)	有価物売却益を差引きのネット単価	モジュール	▲1.2 [円/W]
			▲12 [円/kg]
		パネル	2.8 [円/W]
			28 [円/kg]

1.4 実証プラントの製作

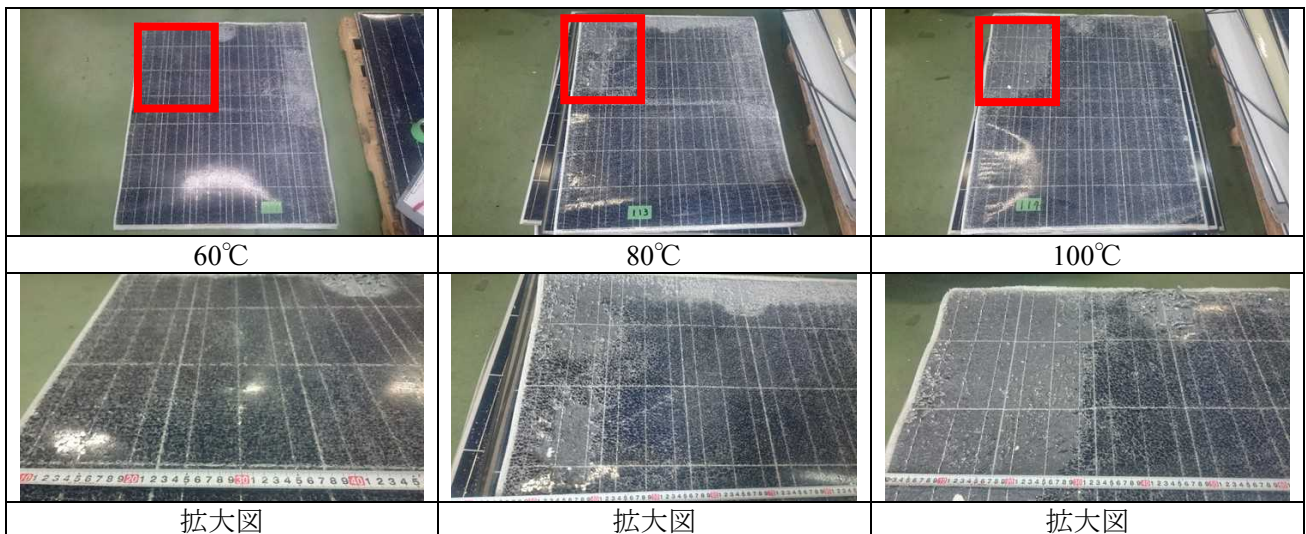
各要素技術にパネルを供給する搬送設備を製作して、各要素技術をライン化した実証プラントを製作した。構築した実証プラントを用いてパネル 105 枚の処理試験を行ったときの物質収支を図Ⅲ-2-③-(1)-7 に示す。試作プラントで検討した物質収支よりシートの重量比率が高くなっているのは、メーカー、型式、年式等によりガラスとシートの接着力に差があることが挙げられる。また、3 月に調査したため外気温の低下に伴い、パネルも冷えていた。それによりガラスとシートの接着剤であるエチレンビニルアセテート(以下、EVA)が硬くなっており、剥離が十分にできていなかったためと考えられる。



図Ⅲ-2-③-(1)-7 実証プラントにおける物質収支

1.5 パネル温度による剥離性の検討

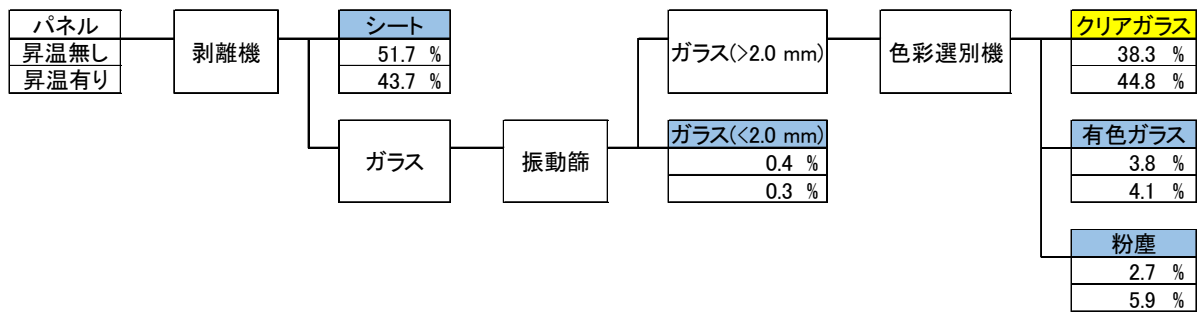
パネルの温度が及ぼす剥離性への影響を検討すべく、実証剥離機に設置したラバーヒータ上に剥離性が悪い傾向にあるパネルを置き、接触温度計を用いてパネルの一部表面温度が 60℃、80℃、100℃になるまで昇温した後、剥離具合の評価を行った。パネル表面温度 60℃の場合、ガラスを剥離させることはできなかったが、80℃から 100℃の場合には、ガラスが剥離されていることが確認された(図Ⅲ-2-③-(1)-8)。



図Ⅲ-2-③-(1)-8 昇温温度による剥離性の違い(赤い枠の部分がラバーヒータ使用箇所)

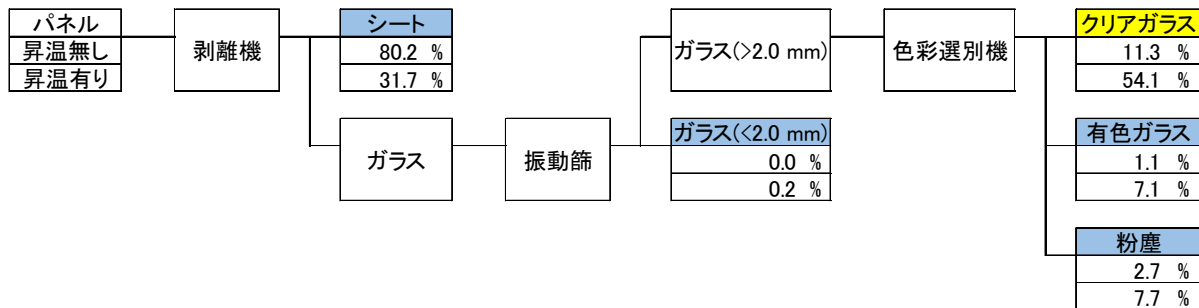
ラバーヒータ上に設置されているステンレス板は熱膨張により隆起しており、熱源とパネルが部分的にしか接触できず、接点付近が目標温度になっていたと考えられる。80℃では接点付近の剥離が良好であり、100℃では大部分の箇所剥離が良好だった。100℃の場合、接点以外は目標温度に到達していないと考えられるため、表面温度が 80℃以上に達するまで昇温を行えば、剥離が容易になると結論付けた。

上記検討の結果が物質収支にどのような影響を及ぼすのかを検討するため、昇温の有無における物質収支を比較した。その結果が図Ⅲ-2-③-(1)-9 である。パネル重量 100%としたとき、昇温無しではシートの回収重量が 51.7%となったが、昇温することによってガラスが多く剥離された結果、シートの回収重量は 43.7%まで削減することができた。



図Ⅲ-2-③-(1)-9 昇温の有無による物質収支への影響

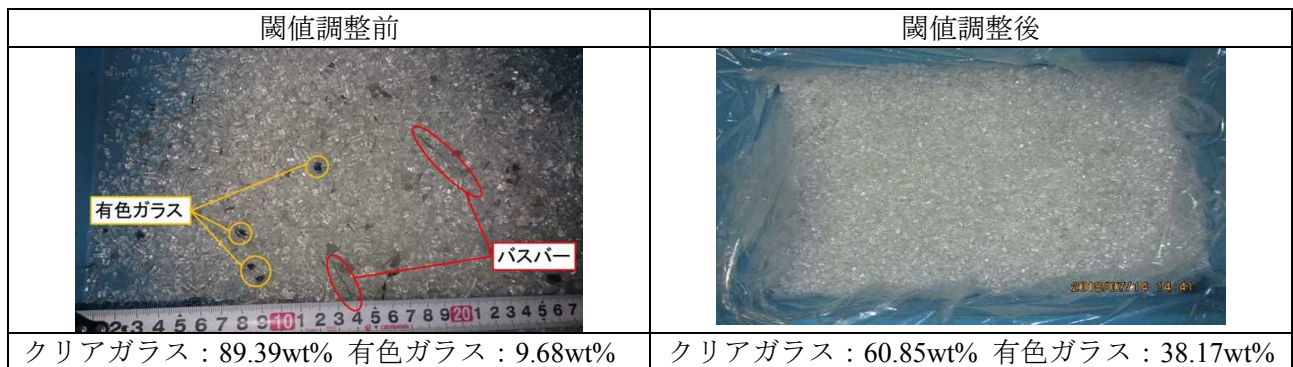
上記結果からパネル全面を均一に昇温できるようにするため、ラバーヒータを増やして昇温面積を広げ、パネル全体を昇温できるように改造工事を行った。昇温面積の拡張後、特に剥離性が悪い傾向にあったパネルを用いて、昇温の有無による影響を調査した(図Ⅲ-2-③-(1)-10)。シートについては昇温の有無で 48.5%の差が出るのが分かり、昇温面積拡張前後(図Ⅲ-2-③-(1)-9 昇温有りと比較)では 12.0%の差が発生した。また、クリアガラス、及び有色ガラスの回収重量についても、昇温面積拡張前より更なる改善が見られた。



図Ⅲ-2-③-(1)-10 昇温面積拡張による物質収支への効果

1.6 ガラス選別条件の検討

剥離後の回収ガラスを再資源化原料として使用するためには、金属が付着していないガラスと付着しているガラスやバスバー等に選別する必要がある。本事業ではパネル剥離後に排出される有色ガラスやバスバー等の異物を色彩選別機によって選別・分離する仕様としたが、最適温度条件の検討で回収されたクリアガラスに有色ガラスやバスバーの混入が確認された。この問題を解決すべく、色彩選別機の閾値を変更して剥離ガラスの選別テストを行った。結果、有色ガラス側にクリアガラスが混入してしまう結果となったが、目視ではクリアガラス中に有色ガラス、バスバーの混入は確認されなかった(図Ⅲ-2-③-(1)-11)。



図Ⅲ-2-③-(1)-11 色彩選別機における閾値調整前後のガラス選別

1.7 事業化実証

60 秒/枚の処理速度で 4~7.75 時間の連続稼働評価を行うため、60 秒/枚の処理速度で 4 時間連続処理を 2 回(投入合計 480 枚)行った。その物質収支を以下に示す(図Ⅲ-2-③-(1)-12)。

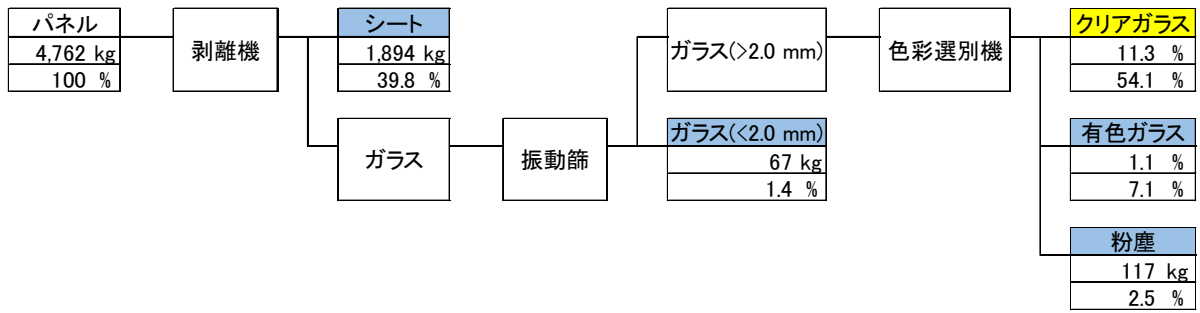


図 III-2-③-(1)-12 連続稼働試験での物質収支

クリアガラス、及び有色ガラスの比率が 1-6 の結果から大きく外れる結果となった。ガラス選別過程を観察したところ、大量のクリアガラスが有色ガラスとして選別されており、銀回収原料の重量比が増加している結果となった。よって色彩選別機の閾値を再度調整することにした。閾値の調整後、回収したクリアガラスと有色ガラスを物質収支の比率で混合して再度選別を行ったところ、クリアガラス:有色ガラス=81.2%:17.5%となった。この結果を用いて物質収支を再計算したところ、図 III-2-③-(1)-13 の結果となった。

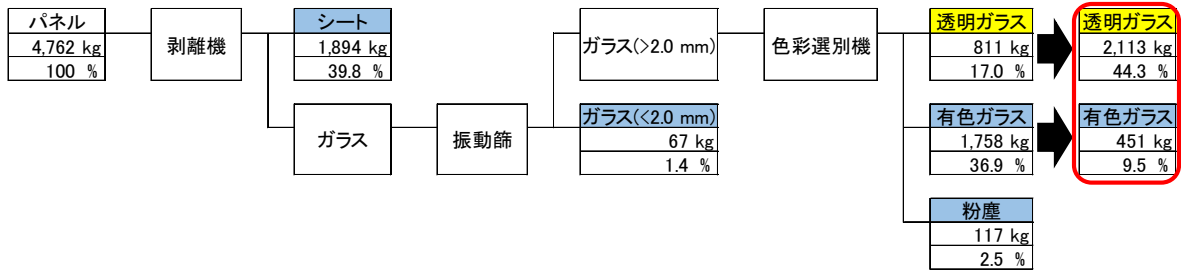


図 III-2-③-(1)-13 選別条件変更後の物質収支

上記調整の結果、銀回収原料：ガラス再資源化原料=53.1：44.3 となり、ガラス再資源化原料の比率が増加した。また、クリアガラスの品位については若干の異物混入が認められたものの、ガラス再資源化業者からは問題のない範囲と評価をいただいた。

1.8 分解処理コスト

連動稼働試験における物質収支、及び回収物の分析結果による銀の濃度から、パネル 1 枚あたりの処理で発生する各回収物の重量バランス、及び金属の分散率は表 III-2-③-(1)-3 の通りとなった。

表 III-2-③-(1)-3 剥離後の回収物の重量バランスと銀の分散状況

項目	回収物重量[g]	回収物重量比率[%]	回収物銀含有量[g]	回収物銀含有量[ppm]	銀の分散率[%]	
太陽光パネル	9,860	100%	11.00	1,116	100%	
クリアガラス	4,374	44.4%	0.00	0	0.0%	
シート	A品	468	4.8%	2.03	4,339	93.9%
	B品	3,444	34.9%	8.30		
有色ガラス	934	9.5%	0.06	69	0.6%	
<2.0 mmガラス	139	1.4%	0.12	832	1.1%	
粉塵	243	2.5%	0.12	480	1.1%	
未回収物	258	2.6%	0.37	—	3.4%	

これら銀の分散状況から、それぞれの回収物について用途を以下のように想定し、評価を実施した。

A.銀回収原料：シート A 品、シート B 品、有色ガラス、<2.0 mm ガラス、粉塵

B.ガラス再資源化原料：クリアガラス

上記 A の価格算出は当社グループ会社に依頼した。また、B は再資源化業者により 1 kg あたり 4 円の評価額を受けている。以上の条件で年間の有価物売却益を試算して(表Ⅲ-2-③-(1)-4)、設備投資や操業コスト等も含めた処理コストの試算を行った(表Ⅲ-2-③-(1)-5)。

表Ⅲ-2-③-(1)-4 年間有価物売却価(2018 年度情勢)

回収物単価	銀回収原料	▲ 6.8	[円/kg]
	ガラス再資源化原料	4.0	[円/kg]
回収物発生量	銀回収原料	650,874	[kg/年]
	ガラス再資源化原料	544,563	[kg/年]
合計 (有価物売却益)		▲ 2,258,445	[円/年]

表Ⅲ-2-③-(1)-5 分解処理コスト(2018 年度情勢)

項目	明細	試算	算出式等	
年間処理量		111,600 [枚/年]	①	
		12,276,000 [W/年]	①' 110 W=1枚	
		1,227,600 [kg/年]	①'' 11 kg=1枚	
処理費用	材料費	0 [千円/年]	使用予定なし	
	光熱水費	1,389 [千円/年]	電気代: 23円/kWh	
	人件費	14,880 [千円/年]	作業員3名	
	設備費	29,526 [千円/年]	5年定額償却 保守費(起業費の5%)	
	土地・賃借代	0 [千円/年]	家電リサイクル工場を利用	
	最終処分費	310 [千円/年]	枠ゴム・ダストの処分費	
	合計	46,106 [千円/年]	②	
分解処理コスト (グロス)	有価物売却益前のグロス単価	3.8 [円/W]	②/①'	
		38 [円/kg]	②/①''	
有価物売却益	モジュール	31,912 [千円/年]	③ アルミ枠等の売却益含む	
	パネル	▲ 2,258 [千円/年]	③'	
分解処理コスト (ネット)	有価物売却益を差引きの ネット単価	モジュール	1.2 [円/W]	(②-③)/①'
			12 [円/kg]	(②-③')/①'
		パネル	3.9 [円/W]	(②-③)/①''
			39 [円/kg]	(②-③')/①''

パネル分解処理コスト(ネット)は 3.9/W 円となり、本プロジェクトの目標である分解処理コスト(ネット)5 円/W を達成した。また、目標を設定した当時と情勢が大きく異なっているため、当時の買値条件で試算を行った(表Ⅲ-2-③-(1)-6、表Ⅲ-2-③-(1)-7)。試算を行った結果、パネル分解処理コスト(ネット)は 1.6 円/W となった。

表Ⅲ-2-③-(1)-6. 年間有価物売却価(2014 年度情勢)

回収物単価	銀回収原料	37.6	[円/kg]
	ガラス再資源化原料	4.0	[円/kg]
回収物発生量	銀回収原料	650,874	[kg/年]
	ガラス再資源化原料	544,563	[kg/年]
合計 (有価物売却益)		26,642,297	[円/年]

表Ⅲ-2-③-(1)-7. 分解処理コスト(2014年度情勢)

項目	明細	試算	算出式等
年間処理量		111,600 [枚/年]	①
		12,276,000 [W/年]	①' 110 W=1枚
		1,227,600 [kg/年]	①'' 11 kg=1枚
処理費用	材料費	0 [千円/年]	使用予定なし
	光熱水費	1,389 [千円/年]	電気代: 23円/kWh
	人件費	14,880 [千円/年]	作業員3名
	設備費	29,526 [千円/年]	5年定額償却 保守費(起業費の5%)
	土地・賃借代	0 [千円/年]	家電リサイクル工場を利用
	最終処分費	310 [千円/年]	枠ゴム・ダストの処分費
	合計	46,106 [千円/年]	②
分解処理コスト (グロス)	有価物売却益前のグロス単価	3.8 [円/W]	②/①'
		38 [円/kg]	②/①''
有価物売却益	モジュール	60,813 [千円/年]	③ アルミ枠等の売却益含む
	パネル	26,642 [千円/年]	③'
分解処理コスト (ネット)	有価物売却益を差引きの ネット単価	モジュール	▲1.2 [円/W]
			▲12 [円/kg]
		パネル	1.6 [円/W]
			16 [円/kg]

1.9 今後の課題

最適温度条件検討でパネル表面温度を 80℃程度に昇温した後、剥離を行うことでガラスの剥離性を改善する知見を得た。しかし、実証試験にて種々のパネルの処理を行ったところ、依然として剥離性にばらつきが発生していることが分かった。よって今後は昇温方法や、昇温能力の更なる向上等を検討して、剥離性の改善を行っていく予定である。また、ガラスの再資源化に関しても、出荷が実現したのはガラスウールのみである。また、2036年にパネルは約 28 万 t 排出されると予測されており、その重量の約 80%はガラスとされている。一方でガラスウールの生産量は 2018 年度時点で約 22 万 t となっており、今後の生産量増加もあまり見込めない。また、既存のガラス材も加味すると、パネルのガラスを全てガラスウールにリサイクルすることは難しい。よってガラスウールの原料以外にも、用途拡大を検討する必要がある。その他にも、処理プラントに搬入される際に、売却益が大きいアルミ枠やハーネスが付属していないものがあることや、パネル中銀濃度の低下傾向等による処理コスト増大の可能性も踏まえて、開発・検討を行う必要がある。

2. 実用化見通し

2.1 成果の実用化・事業化に向けた戦略

三菱マテリアル株式会社（以下 MMC）は、非鉄製錬事業、セメント事業、及び家電リサイクル事業を運営している。とくに家電リサイクル事業では太陽電池を製造する家電メーカーと協力して運営しており、本事業のリサイクル拠点として位置付けている。MMC が運営に携わっている全国 5 社 6 工場のネットワークを活かし事業を進める

2.2 成果の実用化・事業化に向けた具体的取組

各種パネルにおける剥離性の個体差を少なくするべく、EVA の劣化判別技術や、昇温方法等を検討して、処理条件の改良を行う。また、回収したクリアガラスの用途拡大や、銀回収原料の減容、濃縮を検討する予定である。

3. 波及効果

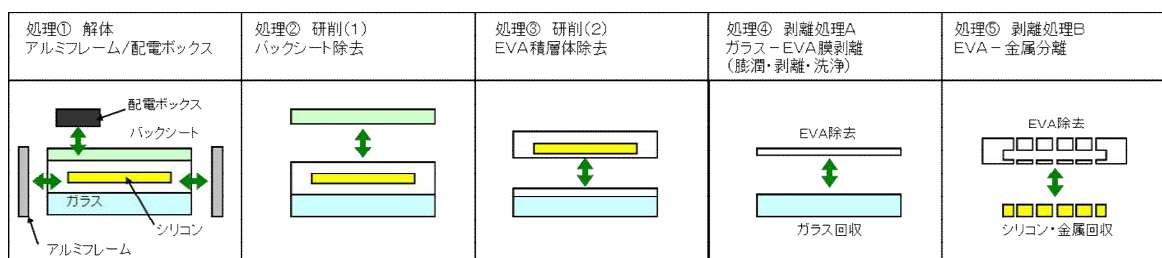
太陽電池スクラップの発生場所は全国に分散していることが予想されるため、輸送費等の観点から集中して処理するよりも、処理工場は分散することが有効と考えられる。また、本プロジェクトで開発した処理設備は低コスト・小規模であるため、全国に展開する家電リサイクル工場内に処理設備を設置することが可能である。よって処理コストを抑えつつ、全国的な太陽電池スクラップの発生に対応し得ると考える。

(2)ウェット法による結晶系太陽電池モジュールの高度リサイクル技術実証(東邦化成)
【2015～2016 年度】

1. 成果詳細

1.1 実機パネルの実証(年代別使用済みパネルの実証)

2014 年度の低コスト分解処理技術 FS において図Ⅲ-2-③-(2)-1 に示す工程を経て太陽電池モジュール(以下、モジュール)の分解が可能であることが検証できた。ただこの検証の際にはデータの信頼性をあげるため、モジュールの組成が既知である試作モジュールを使用して検証を行った。これにより、実証に移る前に一定期間実際に使用されてきた太陽電池モジュールを使用した検証から行った。



図Ⅲ-2-③-(2)-1 解体工程

a)年代別使用済み太陽電池モジュールの実証

実際に使用されたモジュールのうち以下表Ⅲ-2-③-(2)-1 に挙げる年数経過したモジュールを入手し、それぞれについて剥離性能評価を行った。

表Ⅲ-2-③-(2)-1 剥離評価したモジュールの経過年数と機種数

経過年数	10 年	11 年	13 年	14 年	15 年	18 年	19 年
評価機種数	7 機種	1 機種	1 機種	1 機種	1 機種	1 機種	1 機種

分解試験の結果、入手した全ての機種において、試作モジュールのようにガラスからの EVA 剥離効果が見られず、剥離液浸漬後のブラシ研磨でもガラスから EVA は剥離できなかった。図Ⅲ-2-③-(2)-2 にその一例の写真を示す。格子状に見える部分では多少剥離が進んでいるが、茶色に変色している部分は強固にガラスに密着しており、剥離剤による膨潤効果が見られず EVA が剥離できなかった。



図Ⅲ-2-③-(2)-2 剥離剤浸漬後の使用済み太陽電池モジュール

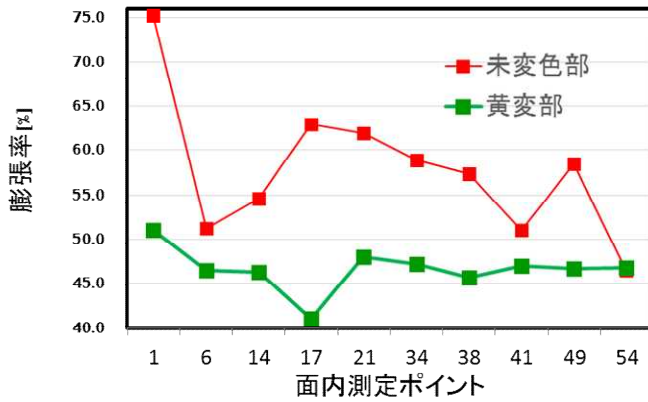
剥離剤の新液への交換、処理温度の高温化など種々条件を変更し処理を行ったものの、約 12 時間の剥離剤浸漬を行っても EVA に目立った膨潤効果は見られず、ガラスから剥離させることができなかった。

b)EVA 単体の剥離液による膨張率の調査

15 年経過品のモジュールを選定し、このパネルのうち黄変部と未黄変部の膨潤率を比較すると、サンプルの採取位置によって差があるものの、約 8～15%程度黄変部の方が膨張率は低い結果となった。更に、黄変部は一律 50%以下の値を示した(図Ⅲ-2-③-(2)-3)。黄変部は膨潤剥離しなかったことより、膨張率が 50%以下ではガラスと EVA の界面に働かず応力が弱く剥離しないと推

定できた。

各測定ポイントとしてモジュールを 54 分割し(図Ⅲ-2-③-(2)-4)各ブロックの黄変部、未黄変部を採取し試料とした。図Ⅲ-2-③-(2)-3 にはその採取した測定ポイントの場所を横軸にし、それぞれ黄変、未黄変部の膨張率を縦軸に表した。本データは 80[°C]の剥離剤 A に 60[min]浸漬させたデータである。

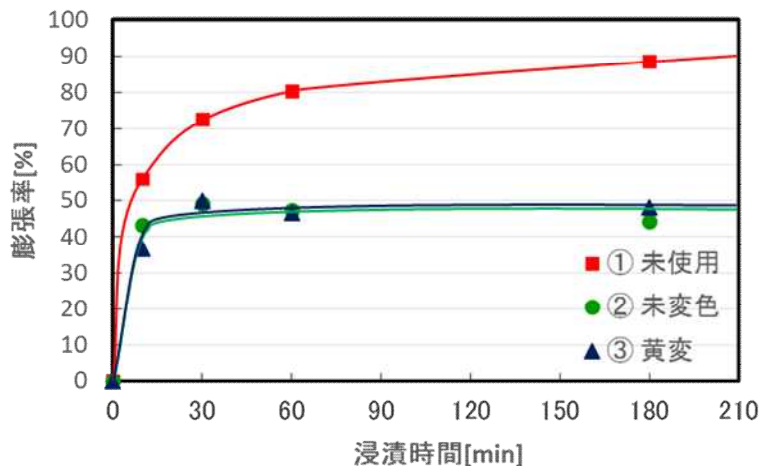


図Ⅲ-2-③-(2)-3
モジュール面内各ポイントより
採取した EVA の膨張率の違い

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42
43	44	45	46	47	48
49	50	51	52	53	54

図Ⅲ-2-③-(2)-4
図Ⅲ-2-③-(2)-3 における EVA 採
取ポイント

また、未使用 EVA、使用済み EVA(黄変、未黄変)について浸漬時間に応じた膨張率を測定したところ、未使用 EVA については 10[min]の浸漬で膨張率が約 55%まで到達し、60[min]の浸漬で 80%に至る。それに対し、使用済み EVA については変色に関係なく 30[min]の浸漬以降 50%程度の膨張率を示し、その後変化は見られない(図Ⅲ-2-③-(2)-5 に膨張率の変化グラフを示す)。



図Ⅲ-2-③-(2)-5 各種 EVA の最大膨張率

以上のことから、EVA の膨張率低下によりガラスと EVA の界面におけるずり応力が弱まり剥離効果が弱まっていると推定した。

c)物理力強化による EVA 剥離(金属ブラシによる剥離促進)

前処理として NC ルーターで研削処理(バックシート層、シリコンセル層を除去)した後のモジュールを金属ブラシ 1(図Ⅲ-2-③-(2)-6)で研削し、ガラスに残った EVA を除去する。その後剥離液にモジュールを浸漬させた状態で EVA 面に金属ブラシ 2(図Ⅲ-2-③-(2)-6)を鋭角にあてて擦ることで、テクスチャ内の EVA の除去が可能であった。この方法により得られたガラスに残る有機物残渣(EVA と想定)を測定したところ 58[ppm]であった。

ブラシの材質には鋼線を使用しているため、金属疲労による耐久性に懸念があるが他の方法と比べ EVA 除去性能が格段に向上したことから装置化も可能と判断しこの方法を採用することとした。



ナイロンブラシ



金属ブラシ 1



PP ブラシ



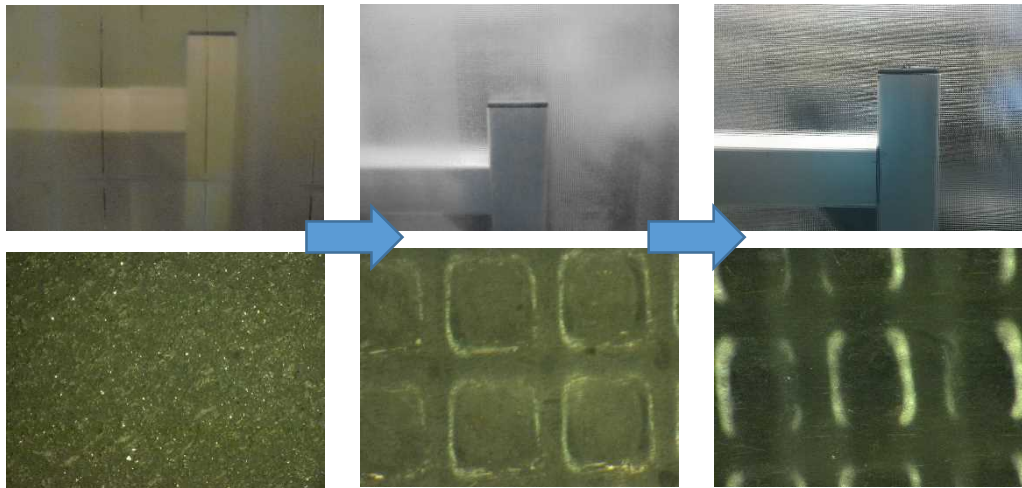
金属ブラシ 2

図Ⅲ-2-③-(2)-6 各種材質の異なるブラシ

～実験手順～

- ①NC ルーターにて通常の研削処理した太陽電池モジュールを金属ブラシ 1(図Ⅲ-2-③-(2)-6)で EVA の薄膜が残る程度にブラシ研削を行った。
- ②その後モジュールを剥離剤 A に 5[min]浸漬させテクスチャ内の EVA を膨潤させた。
- ③金属ブラシ 2(図Ⅲ-2-③-(2)-6)を使用して直線的に往復 50[回]動作させテクスチャ内の EVA を除去した(以下、ブラシ研磨工程)。

各工程におけるガラス表面の状態写真を図Ⅲ-2-③-(2)-7 に示す。



NC ルーター研削
後のガラス表面状態

金属ブラシ 1
ブラシ研削処理後

金属ブラシ 2
ブラシ研磨処理後

図Ⅲ-2-③-(2)-7 EVA 除去の各工程でのガラス表面状態

1.2 試作パイロットによる実証

2014 年度の低コスト分解処理技術 FS 及びこれまで述べてきた評価・知見から、目標処理能力 7.7MW/年、及び目標処理コスト 5 円/W 以下を目指した試作パイロットラインのシステム構成を検討し、仕様を確定した。以下項目の順に構成概要を記述すると共に、この仕様による分解処理コスト試算値を記述する。

a) 試作パイロットラインのシステム構成

モジュールの分解処理を実行する試作パイロットラインの工程概要を以下に示す。

図Ⅲ-2-③-(2)-8 に処理工程図、表Ⅲ-2-③-(2)-2 にその内容を記述する。

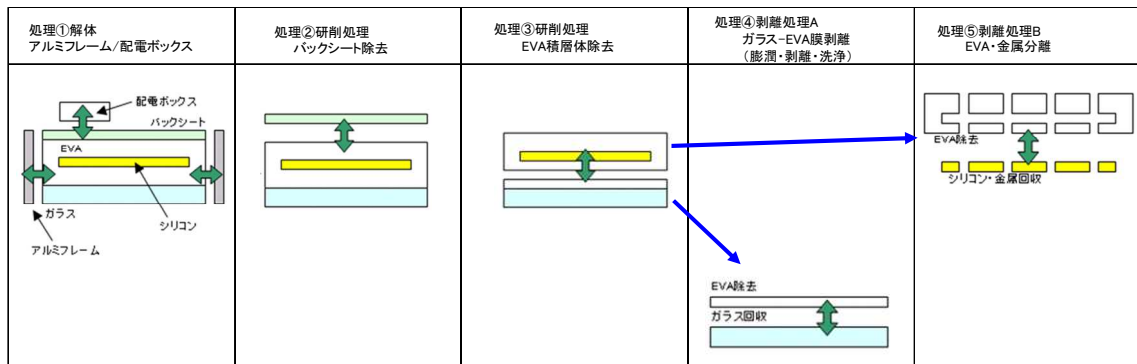


図 III-2-3-(2)-8 処理工程図

表 III-2-3-(2)-2 各処理工程内容

工程	対象機	内容
処理①	—	アルミフレーム、配電BOX 取り外し (手作業)
処理②	研削機 集塵機 A	バックシート層を研削除去し、集塵機 A にて回収する。
処理③	研削機 集塵機 B	ガラス面に残る EVA 層の厚み 0.1mm を目標に EVA 積層体層を研削し、集塵機 B で回収。回収片は処理⑤-1 へ回す。
処理④-1	剥離装置	Loader にて搬送治具にセットする。
処理④-2	剥離装置	回転系ブラシにて EVA 層を研削し、薄膜の EVA を残す。
処理④-3	剥離装置	剥離剤(水でも可)に浸漬させ、直動系ブラシでテクスチャ内の EVA を除去する。
処理④-4	剥離装置	乾燥後、搬送治具から取出し、ガラスをラックに収納する。
処理⑤-1	ふるい振とう機	処理③で回収した研削片をふるい振とう機にかけ 2mm 以上の粒子径の試料を取り除く。
処理⑤-2	分離装置	ふるい振とう機で分別された 2mm 以下の研削片をサイクロン分離装置に投入、有機(EVA)分画、無機(シリコン)分画に分離し、それぞれの分画を回収する。

b) 試作パイロットラインの処理コスト試算

試作パイロットラインでモジュール分解を行った際の処理コストの試算について表 III-2-3-(2)-3 に示す。

表 III-2-3-(2)-3 試作パイロットラインでの分解処理コスト試算

項目	目標値	達成値			備考
	円/W	円/W	円/kg	円/年	
材料費	1.24	0.30	3.12	2,274,600	
光熱水費	0.16	0.18	1.89	1,382,104	設備用力
人件費	2.22	1.75	18.38	13,408,000	@1,000 円/人
設備費	0.65	0.61	6.44	4,696,299	設備；8 年償却試算、保守費用含
土地・賃借費	0.35	0.63	6.58	4,800,000	賃借費用 40 万円/月
最終処分費	0.35	0.35	3.65	2,664,158	BS、EVA、配電 BOX 等
合計	4.97	3.81	40.06	29,225,162	

※ 試作する際の年間処理枚数の前提値

項目	試算	算出式
年間処理枚数	38,400 [枚/年]	
	7,680,000 [W/年]	200W/枚
	729,600 [kg/年]	19kg/枚

目標とした 5 円/W(有価物売却益含まず)の分解処理コストは試算上クリアできた。EVA 剥離工程、分離工程における剥離剤を安価な水とすることで大きなコストダウンに結びついた。技術的にも EVA

剥離工程においては、物理力による剥離で EVA の除去が可能であることもわかった。

一方で、回収物の有価物価値としての調査結果を表Ⅲ-2-③-(2)-4 に示す。

表Ⅲ-2-③-(2)-4 モジュールの分解処理により得られる回収物の有価物価値試算

回収物(有価物)	単価(円/W)	単価(円/kg)	評価依頼先
アルミフレーム	1.77	18.59	金属リサイクルメーカー
板ガラス	0.14	1.46	ガラスカレットメーカー
金属含有シリコン (銀としての価値)	1.52	15.99	金属リサイクルメーカー
有価物価値合計	3.42	36.04	

表Ⅲ-2-③-(2)-3 及び表Ⅲ-2-③-(2)-4 の収益を突合せたものを表Ⅲ-2-③-(2)-5 に示す。

表Ⅲ-2-③-(2)-5 モジュール分解による処理コスト(収支)

	単価(円/W)	単価(円/kg)
分解処理に要するコスト・・・(A)	3.81	40.06
有価物売却による益・・・(B)	3.42	36.04
トータルコスト (A)-(B)	0.39	4.02

目標とした、トータルコスト 0.1 円/W は未達となった。

<結果分析>

ひとつの要因に、当初、ガラスのリサイクルとして、技術的には回収した板ガラスをそのまま太陽電池モジュールに再利用する『水平リサイクル』が可能であると見込んでいた。技術評価として、あるモジュールメーカー A 社に回収したガラスを使用してモジュールを組み上げ、その発電性能を評価してもらったところ、新品モジュールと遜色ない発電性能が得られた。これにより、回収ガラスの価値は相応の価値が見込めると踏んでいたが、再生モジュールには保証問題が付くため、ガラスの再利用はできないとの判断が下され、『水平リサイクル』の道が絶たれた。その結果、カレットとしてのリサイクル方法に切り替え評価したものの、その価値は板ガラスへのリサイクルほど小さくなく、有価物売却益を稼げなかった。

またこれに起因して、EVA 剥離装置の製作にもストップを掛けざるを得なかった。コストを掛けて EVA を剥離しても、EVA 剥離しないものとの価値(売却額)は変わらなかった(EVA 残留有無にかかわらず、最大 5 円/kg の買取額との評価結果であった)ため、ガラスから EVA を剥離する工程の存在意義が無くなった。

1.3 回収シリコンの純化研究

太陽電池モジュールの配線材料として使用されている銀について、発電性能は維持しながらもモジュール生産コストの面から銀使用量が徐々に削減されてきており、中には配線材料としては銀ではなく銅を使用したものも存在する。リサイクル事業の面から見た場合、高い有価益を生み出す材料が減少傾向に進むことは痛手となる。そのため、銀に変わる有価物としてシリコンに着目した。

あるメーカーのヒアリングにより、98.5%以上の純度があれば、シリコンインゴット製作の材料として扱えるとの情報から、モジュール分解により得られる EVA 積層体よりシリコンを抽出する技術研究を実施した。研究開発は岡山大学に依頼し実施した。以下にその成果を述べる。

a)酸処理によるシリコン純化プロセスの研究開発

モジュール分解処理における研削工程により回収される EVA 積層体は、主に EVA、シリコンから成り、その他、銀・アルミなどの金属も含まれる。これを出発原料に、シリコンを抽出し 98.5%以上の高純度シリコンを得るためのプロセスを確立することを目的とした。

方法としては、シリコンは溶解させず、他の金属のみを溶解させるため王水を使用しシリコン純化プロセスの技術確立を目指した。

i)試料の前処理

研削工程にて回収される EVA 積層体に含まれる無機物の組成分析を行ったところ、有機物の EVA 樹脂が 7.3%、無機物が 92.7%含まれていた。さらにこの無機物中の組成を分析したところ、表Ⅲ-2-③-(2)-6 の結果を得た。

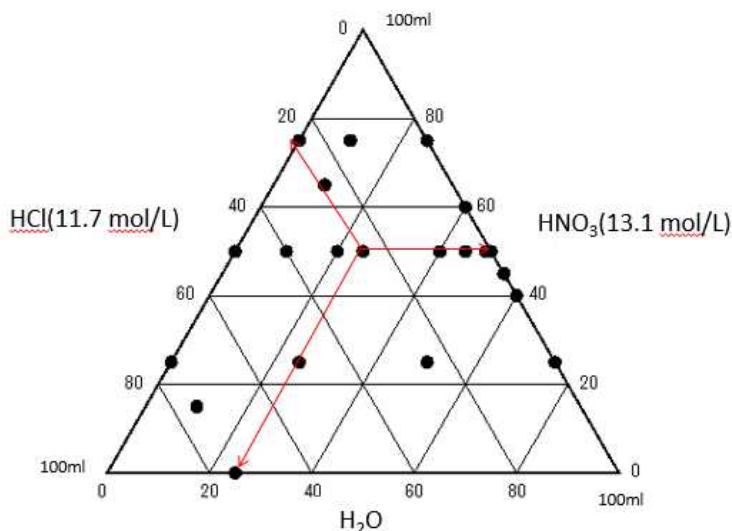
表Ⅲ-2-③-(2)-6 試料中の無機物物の組成

組成 [mass %]					
Al	Si	Cu	Ag	Sn	Pb
6.3	86.3	4	0.6	1.4	1.3

また、次の酸処理実験の前処理として、ふるいにより 450~600 μ m に整粒後、有機物と無機物を分けるため、トルエンを使用して、試料中の EVA を膨潤させ取り除き乾燥させた。

ii)酸処理条件

前処理を行った無機物試料に 36wt%HCl(11.7 mol/L)、69wt%HNO₃(13.1 mol/L)、純水を所定濃度に調製し、各々の濃度の酸溶液での金属溶解速度、溶液に溶け出た金属の浸出率を調べた。図Ⅲ-2-③-(2)-9 に酸溶液の濃度条件を示す。実験条件としては、溶液温度 30℃、攪拌速度 500rpm、固液比 0.01 を標準条件として行った。



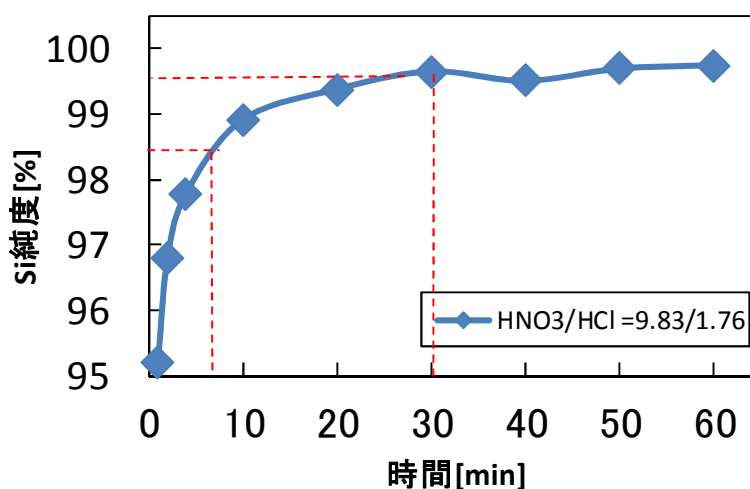
図Ⅲ-2-③-(2)-9 酸溶液の濃度条件

iii)結果

標準条件において、各金属の浸出率の経時変化を見たところ Cu の浸出が最も遅かったため、Cu の浸出挙動を中心にして調査を行った。次に酸溶液の混合条件を変え、Cu の浸出率の挙動を見たところ HNO₃/HCl = 9.83/1.76 の混合比が最も Cu の浸出速度が大きかった。

iv)シリコン回収率のデータ

標準条件における HNO₃/HCl = 9.83/1.76 の混合条件での Si 純度の経時変化を図Ⅲ-2-③-(2)-10 に示す。



図Ⅲ-2-③-(2)-10 標準条件における HNO₃/HCl = 9.83/1.76 の混合条件での Si 純度の経時変化

シリコン純度 98.5%を得るためには 7 min の処理時間が必要で、30min の処理時間ではシリコン純度 99.6%が得られた。温度を上げることにより、さらなる処理時間の短縮が考えられる。

b)シリコンのリサイクル用途およびシリコン純化工程のコスト試算

i)リサイクル用途

酸処理によるシリコン純化プロセスを想定し試算レベルでのコストを算出した。結果を表Ⅲ-2-③-(2)-7に示す。

当初、シリコンメーカーのヒアリングから想定シリコン売却額を 0.3 円/W と設定。これより純化プロセスの最大処理コストも 0.3 円/W とした。処理プロセスに課題もあり検証不足は否めないが、廃液処分費等薬液関係のコストの占める割合が大きく、赤字となってしまった。

表Ⅲ-2-③-(2)-7 シリコン純化処理における試算コスト

項目	目標値	達成値	備考
	円/W	円/W	
材料費	—	0.37	薬液費用、消耗部品
光熱水費	—	0.01	設備用力
人件費	—	0.28	@1,000 円/人
設備費	—	0.12	設備；8 年償却試算、保守費用含
土地・賃借費	—	0.09	賃借費用 40 万円/月
最終処分費	—	0.44	廃液処分費用
小計	0.30 以下	1.31	
純化 Si 売却益	0.30	0.60	ヒアリングによる目視評価額
差し引き	0.00	-0.71	純化処理コストが上回り赤字

1.4 有価物評価検証

a)有価物高付加価値化

本分解処理により得られる回収物(回収マテリアル)において、有価物、廃棄物の区分け、また有価物についてはその売却評価額を示した一覧を表Ⅲ-2-③-(2)-8に示す。

有価価値については、分離工程における性能向上により、EVA 積層体より回収される金属の有価価値が高い点の特徴であるが、一方で当初有価価値を見込んでいた板ガラスの売却益が想定よりも低くなったため、有価売却益としての目標である 4.9 円/W に未達となった。ガラスの売価額低下については総括で後述する。

表Ⅲ-2-③-(2)-8 回収マテリアル一覧

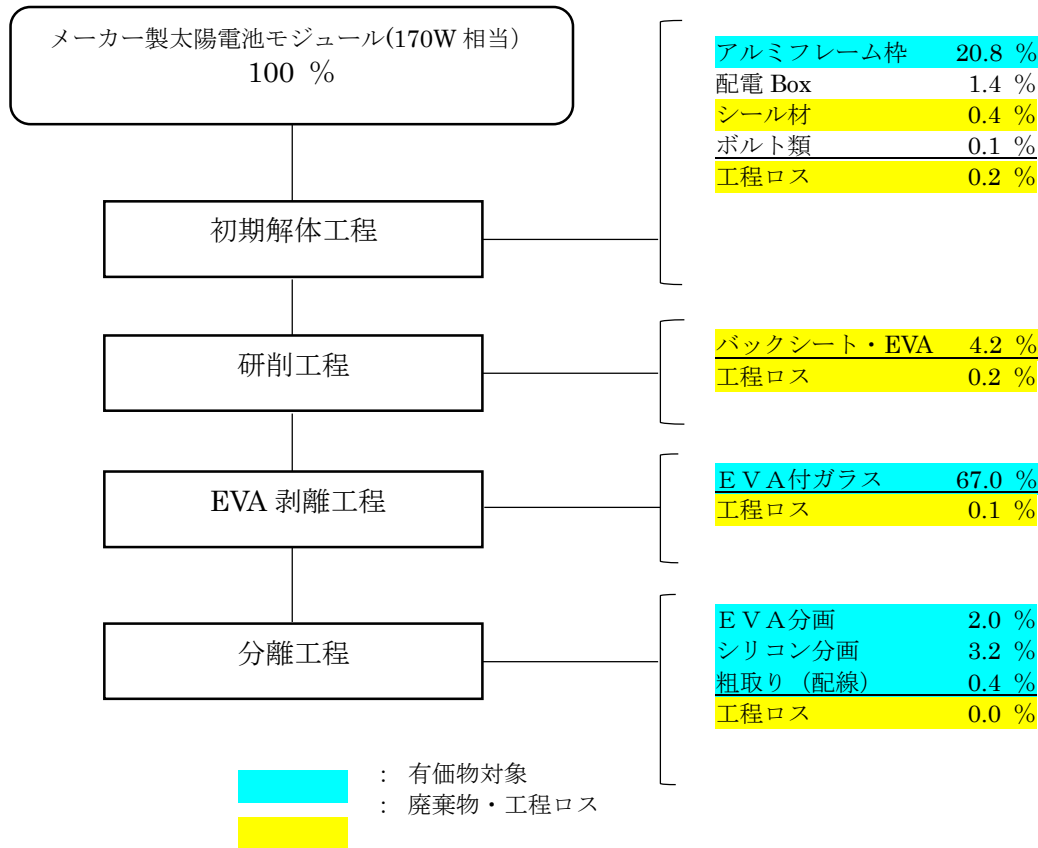
分解処理工程	回収マテリアル	取扱区分	円/W	円/kg
前処理	アルミフレーム枠	有価物	1.77	18.59
	配電 BOX、シール材、ビス類	廃棄物	—	—
研削	バックシート	廃棄物	—	—
	EVA 粉体	廃棄物	—	—
剥離	ガラス(板ガラス)	有価物	0.14	1.46
分離	金属類(EVA リッチ組成)	有価物 (銀として)	1.52	15.99
	金属類(シリコン、金属リッチ組成)			
	粗取り分(配線が主体の組成)			
合計			3.42	36.04

また、2014 年度の低コスト分解処理技術 FS にて、有価物としての可能性を見込んでいた EVA に関して、あるメーカーに評価依頼したが、EVA の架橋が進んでおり、熱可塑性が見られず用途は見つかっていない。

b)リサイクル率向上

太陽電池モジュールを本システムで処理した場合のマテリアルバランスデータを図Ⅲ-2-③-(2)-10 に示す。初期重量に対する、分解により得られる各回収物の重量比を表した。有価物対象の材料を背景

色：水色とし、廃棄物や回収ロスとなる材料を背景色：黄色で表示した。現時点では、リサイクル率の目標 95%に対して、背景色：水色の有価物対象の合計は 93.4%であり、未評価の配電 BOX、固定ビス類の金属有価物評価によりリサイクルにまわせる可能性は十分にあり、これらを含めると 94.9%のリサイクル率となる。



図Ⅲ-2-③-(2)-11 マテリアルバランスデータ

c)総括

本プロジェクトにおける太陽電池モジュールの分解処理技術のプロセスならびにその設備仕様が完成した。これによる分解処理コスト(想定)として中間目標に掲げていた 5 円/W に対して、3.81 円/W とクリアする目処がついた。ただし、分解によって得られる回収物の有価物の売却目標額 4.9 円/W が未達で、3.42 円/W にとどまり結果、有価物売却益を含めたトータルコスト目標：0.1 円/W は、未達の 0.39 円/W となった。

未達要因は、当初、当ウェット法によるモジュール分解で得られるガラスは無傷回収が可能であり、太陽電池モジュールの再生の可能性を見込んでいた。実際にモジュールメーカーに回収ガラスを渡して試作モジュールを再製作、性能評価してもらったところ、新品と遜色ない性能結果が得られた。しかし再生品となると、メーカーとしての保証面で担保ができないことから回収ガラスの再使用はできないとの判断が下った。このことで、ガラスリサイクルとしては板ガラスとしての再生用途しか残らなくなり、高付加価値を見込んでいたガラスの売却額が落ち込み、目標未達となってしまった。

一方、ガラスメーカーからは、混入ゴミが少ないことから板ガラスとしての回収にはメリットがあるが、買取額に大きなフィードバックが見込めず、さらにヒアリングにより、現状のガラスメーカーの仕入れ先であるカレットメーカーとつながりが強いため、当方が直接ガラスメーカーへ納品することは困難との情報を得た。結果、現時点では回収ガラスはカレットメーカーに収める以外の用途開発ができず、有価物売却益の向上にはつながらなかった。

2.実用化見通し

前述の試算コスト 0.39 円/W での事業化を行うとなれば、発電事業者の設備解体に伴う処分費用を支払ってもらうことが必須となってしまう、現時点法制化としては、建設費の 5%の負担は謡われているが、強制力はないためリサイクル費用を当て込んでの事業化にはリスクがある。更に、モジュールの入手経路にまつわる物流面が未確定。他社と比較して当方には物流の生業となる

商品がなく、何かのついでにモジュールを引き取って帰るといった手法を取れないため、直にコストに影響することが見込まれる。

ガラスの付加価値低下に加え、これら状況を鑑みたときに、太陽電池モジュールの排出ピークを迎えるであろう 2036 年まで事業が続けられない可能性があることから事業化は見送ることを決断した。伴って更なる今後の技術検証についても中断し、本プロジェクトを終えることとした

3.波及効果

大規模プラントではなくコンパクトな処理システムを構想。これによりリサイクルが各拠点で実施でき、まずは小規模ラインでのリサイクル処理から始めることが可能。処理量の増加に伴いシステムを増設すれば対応できることから地方分散型のリサイクルシステムが実現できる。年々増加していくであろう廃棄モジュールにあわせてシステムを設置できることから、自治体、リサイクル事業者等が手を出しやすいことが予想できるため、社会システムの構築も平行して行えるメリットがあり、廃棄量と同時に普及すると考える。

(3)ホットナイフ分離法によるガラスと金属の完全リサイクル技術開発(浜田、エヌ・ピー・シー)
【2015～2018 年度】

1. 成果詳細

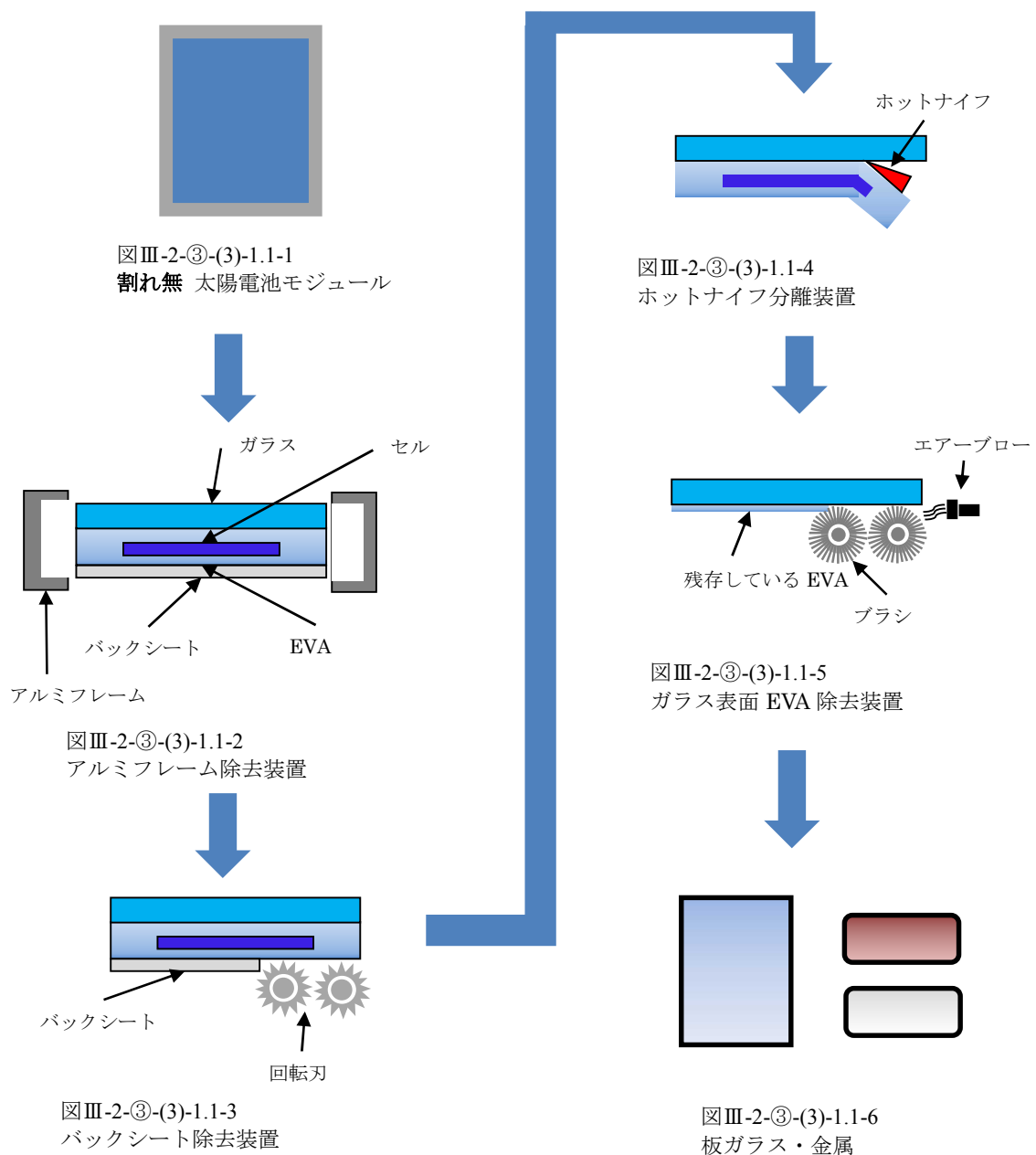
1.1 プロセスフローの検討(担当：株式会社エヌ・ピー・シー)

下記示すプロセスフローでリサイクルプロセスを検討した。

「図Ⅲ-2-③-(3)-1.1-1 割れ無 太陽電池モジュール」を「図Ⅲ-2-③-(3)-1.1-2 アルミフレーム除去装置」に投入しアルミフレームを取外す。

アルミフレームを外した、太陽電池モジュールは、「図Ⅲ-2-③-(3)-1.1-3 バックシート除去装置」でバックシートを除去し、「図Ⅲ-2-③-(3)-1.1-4 ホットナイフ分離装置」でガラスと EVA/セル層を分離する。

ガラスには、EVA が残存している為、「図Ⅲ-2-③-(3)-1.1-5 ガラス表面 EVA 除去装置」でブラシとエアブローでガラスから残存している EVA の除去を行い、「図Ⅲ-2-③-(3)-1.1-6 ガラス・金属」に分離し、有価物を回収する。

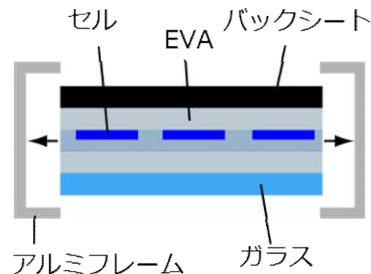


1.2 アルミフレーム除去装置の開発(担当：株式会社エヌ・ピー・シー)

【内容】

太陽電池モジュールのガラスを割ることなく、アルミフレームを取り外し有価物として売却することができる装置を開発し、実証を行う。具体的には、固定したモジュールのアルミフレーム枠を複数のチャックで挟み込み、外側に力強く引っ張ることでモジュールからアルミフレームを取り外す仕様とする(図Ⅲ-2-③-(3)-1.2-1)。

ガラスを割らないこと以外にも、パネルサイズやメーカー毎のフレーム形状の違い、フレームの取付け方法や使用している封止剤も多様であり、本開発ではそれらの様々な仕様の全てに対応させていくことが解決すべき課題となる。



図Ⅲ-2-③-(3)-1.2-1 アルミフレーム除去装置(イメージ)

【最終目標】

処理時間 50 秒/モジュール 割れ率 0.3%

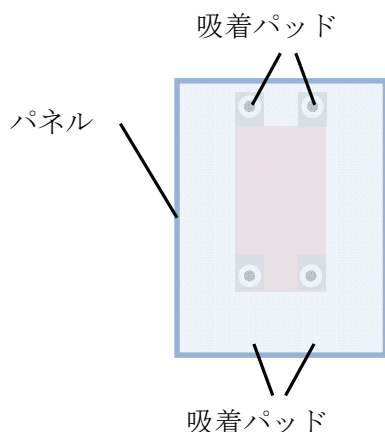
【成果】

処理時間 50 秒/モジュールを達成。処理枚数 5553 枚中 1 枚割れと割れ率に関しては 0.02%と大幅に目標達成。

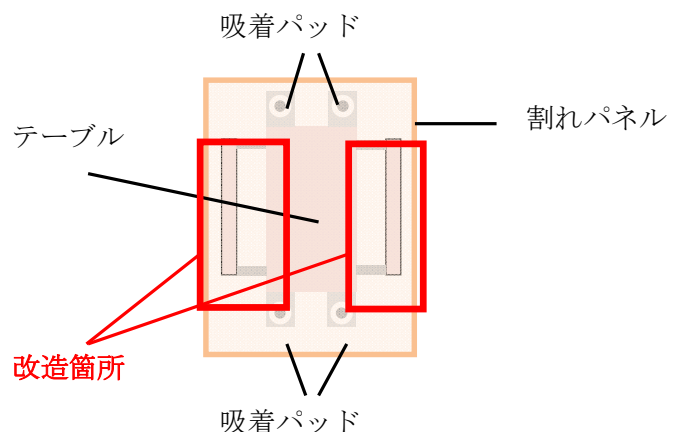
【経緯】

アルミフレーム取り外しの際に、パネルの割れ軽減のため、チャック位置の最適化を行った。また取り外し後、チャックからアルミフレームが外れないことがあったが、その対策としてばね式の取り外し機構を追加した。またパネルのサイズが変わっても自動でサイズを検出し、取り外せるようにセンサーを追加するとともにソフト改造を行った(図Ⅲ-2-③-(3)-1.2-3)。

割れたモジュールについては、当初の予定にはなく後述する 1.3 で割れガラス分離装置を開発することによって、割れモジュールのリサイクルプロセスを確立した。プロセスの確立に伴い割れた太陽電池パネルのアルミフレームを外せるようにパネル受けテーブルをモジュールサイズに合わせられる様に改造し、アルミフレームを取り除いてもパネルが垂れないようにすることによって取り外しを可能とした(図Ⅲ-2-③-(3)-1.2-3)。



図Ⅲ-2-③-(3)-1.2-2 改良前



図Ⅲ-2-③-(3)-1.2-3 改良後

1.3 ホットナイフ分離装置の改良及び実証(担当：株式会社エヌ・ピー・シー)

【内容】

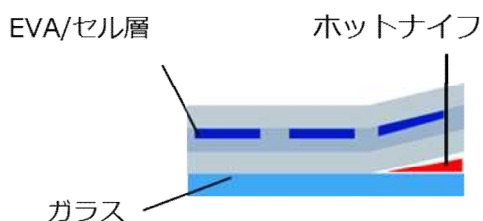
2014 年度「太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト/低コスト分解処理技術 FS(開発)」において、太陽電池モジュールをホットナイフでガラスを割ることなく、EVA/セル層を取り除き有価物として売

却することができるホットナイフ分離装置を開発した(図Ⅲ-2-③-(3)-1.3-1)ものの、装置の耐久試験や、応力等によりひずみが発生している太陽電池モジュールの分離実験が出来ていない。それらの課題を解決すべく、以下の改良を行い、評価を実施する。

- ・ホットナイフを様々な材質(例えば S45C、SACM645、SKD11 など)で試すことで耐久性の評価を実施する。
- ・刃部の分割またはバネによる追従機能を設けること等により、モジュールの反りや歪みに対するホットナイフの追従性の向上をはかり、EVA 層と分離したガラスに残存する EVA 量をより減少させる。

なお、既に 50 秒以内/モジュールの処理能力を達成しているが、最適化されたリサイクルラインから 1.6 のガラス表面 EVA 除去装置を除外するため、2 枚刃機構を搭載するなどの方法でガラスに付着する EVA 残膜厚 0.1mm 以下となるよう改良する。また、処理コストの低減を図るため、消耗品であるホットナイフの耐久性として、2,400 枚で交換を目標に部材や刃の形状の研究を行う。

また、ガラス分離の確実性を上げるため、前切込み部を追加したことにより、処理時間が伸び処理コストが増加した。そこで、処理コスト低減化を図るために処理時間の短縮に取り組む。



図Ⅲ-2-③-(3)-1.3-1 ホットナイフ分離装置(イメージ)

【最終目標】

処理時間 50 秒/モジュール EVA 残膜厚 0.1mm 以下 2400 枚/刃物交換

【成果】

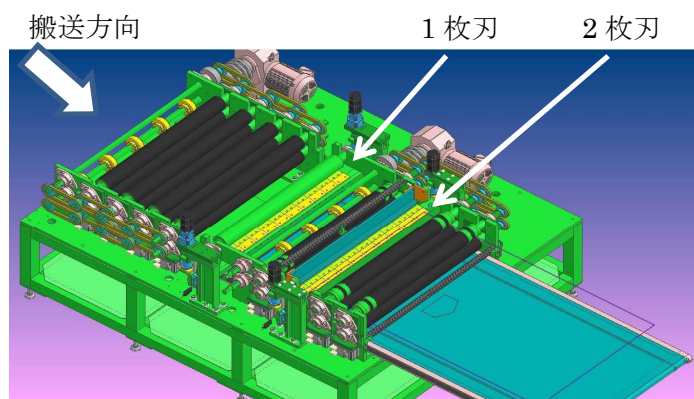
処理能力 50 秒/モジュール EVA 残膜厚も 0.1mm と目標を達成。刃物耐久性に関しても 2500 枚と目標達成。

【経緯】

NEDO 目標である分解処理コスト 5 円/W を達成する為に、損耗品であるホットナイフの 1 交換あたりの処理枚数目標を 2400 枚と設定した。

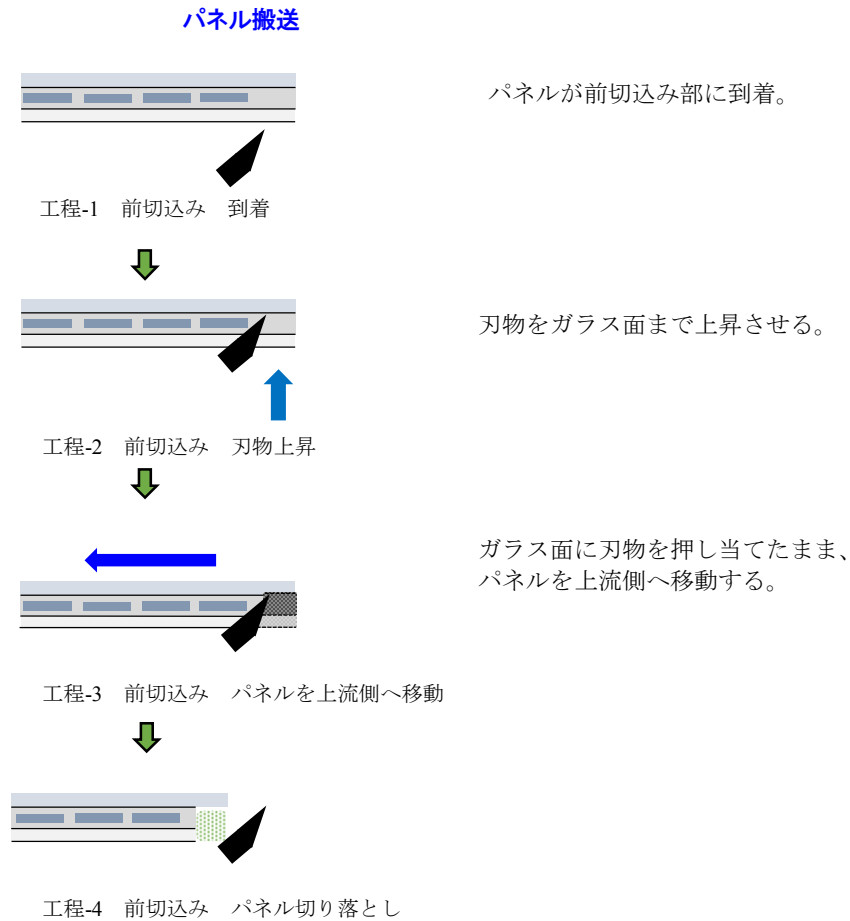
残膜厚量を低減するため 2 枚刃機構を追加することで目標を達成した。また、分離する刃物位置を位置制御からトルク制御に変更することにより、より容易位置設定が可能となった。

EVA 残膜厚の調査結果によると、ガラスメーカーの受け入れ基準として、ガラスを 2m の高さから落としたときに名刺サイズに割れる程度まで EVA を除去することが求められるが、1 枚刃での EVA 残膜が 0.14 mm では 2m から落とすとしても名刺サイズにはならないことがある。EVA 残膜厚を 0.14 mm 以下になるようホットナイフ位置等を調整するとパネルが分離中に割れることがあった。そこで、EVA 残膜厚の安定性を求めるため、図Ⅲ-2-③-(3)-1.3-2 に示す 2 枚刃機構を搭載した装置を開発した。その結果、EVA 残膜を 0.1 mm とすることができた。



図Ⅲ-2-③-(3)-1.3-2 ホットナイフ分離装置

また、パネル端面からガラスと封止材の間に刃物を入れることは困難であることに加え、パネル端から分離を開始しなければ、パネルの端に封止材・バックシートが残る。そこで、ガラス分離を確実に
 行うため、前切込み工程を追加した(図Ⅲ-2-③-(3)-1.3-3)。



パネルが前切込み部に到着。

刃物をガラス面まで上昇させる。

ガラス面に刃物を押し当てたまま、
 パネルを上流側へ移動する。

図Ⅲ-2-③-(3)-1.3-3 前切込み部_装置動作(イメージ)

1.4 割れガラス分離装置の開発(担当：株式会社エヌ・ピー・シー)

【内容】

前項の ホットナイフ分離装置ではガラスが割れているパネルを処理することが不可能なため、ガラスが割れたパネルを分離できる装置を新たに開発する。なお、調査結果によると、ガラスメーカーの受け入れ基準として、ガラスを 2m の高さから落としたときに名刺サイズに粉々になる程度まで EVA を除去することが求められるが、ガラスが割れているパネルは表面に凹凸があり、受入基準まで分離できるかどうか課題となる。

【最終目標】

処理時間 60 秒/モジュール EVA 残膜厚 0.1mm 以下 1000 枚/刃物 1 交換

【成果】

処理能力 60 秒/モジュール EVA 残膜厚は 0.1mm と目標を達成。刃物耐久性に関しても 1000 枚と目標達成。

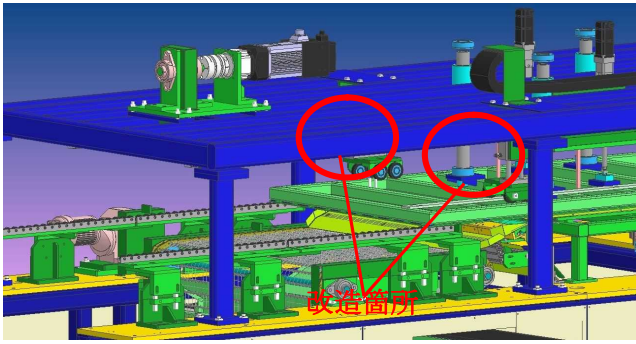
【経緯】

分解処理コスト 5 円/W を達成する為に、損耗品であるホットナイフの 1 交換あたりの処理枚数目標を 1000 枚と設定。

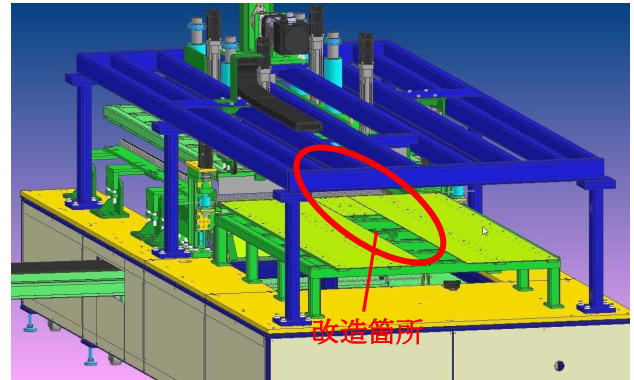
課題として J-Box やアルミフレームを取り外した後に接着用のシリコンがモジュールに残ることがあり、その量が多い場合、パネルを押えきれず、分離ができないことがあった。そこで、刃物上部に押え機構を追加することと溝加工することにより改善した(図Ⅲ-2-③-(3)-1.4-1、2)

また、1.3 のホットナイフ分離装置ではガラスが割れないことが前提の為、1 枚刃での EVA 残膜 0.14 mm が限界であったが、割れガラス分離装置は刃物の分離圧力をより上げることができると、1 枚刃で EVA 残膜を 0.1 mm 以下にすることが可能となった。

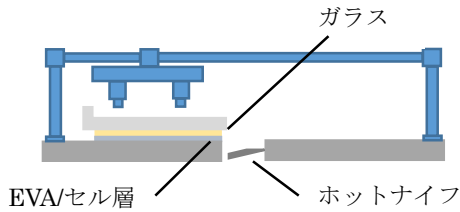
割れガラス分離装置の工程イメージを図Ⅲ-2-③-(3)-1.4-3 に示す。



図Ⅲ-2-③-(3)-1.4-1 押え機構追加

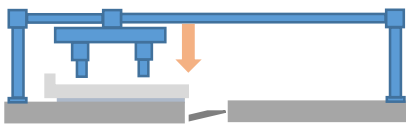


図Ⅲ-2-③-(3)-1.4-2 J-Box の接着剤を外す機構追加



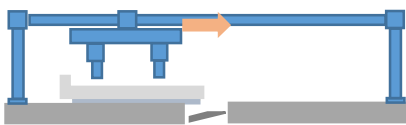
工程-1 割れガラス分離装置 パネルセット

① 装置に割れたパネルをセットする。



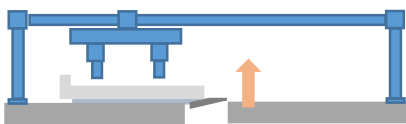
工程-2 割れガラス分離装置 パネル押え

② L字プレートで割れたパネルを上から押える



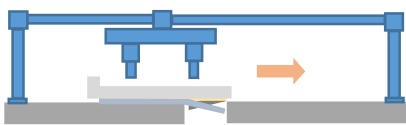
工程-3 割れガラス分離装置 パネル搬送

③ 移載機でホットナイフ位置までパネルを押す。



工程-4 割れガラス分離装置 ホットナイフ

④ ホットナイフが上昇。



工程-5 割れガラス分離装置 割れパネル分離

⑤ 移載でパネルを押しガラスと分離を行う。

図Ⅲ-2-③-(3)-1.4-3 割れガラス分離装置_装置動作(イメージ)

1.5 バックシート除去装置の開発(担当：株式会社エヌ・ピー・シー)

【内容】

太陽電池モジュールに含まれる有価物を回収しやすくするために、バックシートを回転刃にて切削する装置を開発し、実証を行う。具体的には、回転する切削刃にてバックシートを削り取って除去していく仕様とする(図Ⅲ-2-③-(3)-1.5-1)。

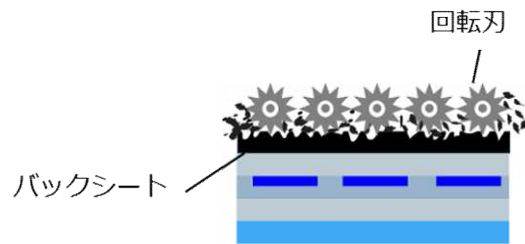
パネルメーカーやパネルタイプ毎、更には製造された年代毎にバックシートの素材や厚みが異なり、本開発ではそれら全てに対応させていくことが解決すべき課題となる。

なお、上記の課題を解決した上で、中間目標(2016年度末)は50秒/モジュールの処理能力を達成することとする。しかし、後述する1.10の研究結果のように、年々、金属の含有率が低下している状況か

ら、バックシートを除去する設備と作業にかかるコストの方が回収した金属より高価になるため、同装置は不要と判断し、2016年度以降の装置の開発・改良は実施しないこととした。

【開発技術】

回転刃を用いたバックシート除去装置において、バックシートをすべて除去できることを確認した。ただし、上述したように費用耐効果が見込まれないことから、本装置の開発・改良を中止した。



図Ⅲ-2-③-(3)-1.5-1 バックシート除去装置工程(イメージ)

1.6 ガラス表面 EVA 除去装置の開発(担当：株式会社エヌ・ピー・シー)

【内容】

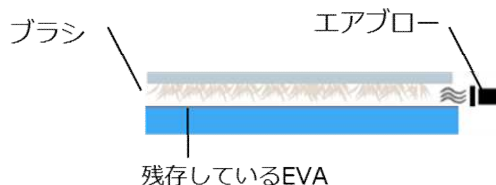
ホットナイフ分離装置で分離したガラスの表面には EVA が残存しており、ガラスの買い取り価格を高額にするためには 1.3 で述べたとおり、EVA 残膜厚 0.1mm 以下にする必要がある。そのため、ガラスに残存した EVA を除去する装置を開発し、実証を行う。具体的には、EVA が付着しているガラス表面を、ブラシで掻き取りながら、エアブローで EVA を除去する仕様とする(図Ⅲ-2-③-(3)-1.6-1)。また、様々な形状や材質でブラシを作製し、最適なロールブラシの開発を行っていく。

本工程はガラスをリサイクルできるかどうかの重要ポイントのひとつであり、本開発ではガラスメーカーが受入可能なレベルまで EVA を除去することが解決すべき課題となる。なお、上記の課題を解決した上で、中間目標(2016年度末)は 50 秒/モジュールの処理能力を達成することとする。また、最終目標の処理コストを達成するために、EVA 残膜厚を 0.1mm 以下に抑えるよう目標を定めて装置を改良し、各種ブラシのテスト及び選定も行っていく。

しかし、ホットナイフ分離装置を 2 枚刃に改造することによって、EVA 残膜厚を 0.1mm 以下にすることが可能となったため、本装置は不要と判断し、2017 年度において本装置の開発・改良は中止することとした。

【開発技術】

ホットナイフで分離後のガラスをガラス表面 EVA 除去装置にて EVA を除去し残膜厚を 0.1mm 以下となることを確認した。また、ブラシの回転数を 2100rpm と高回転で掻き取りると騒音が 102dB と高くなった。そこで、防音対策として、ガラス搬送出入り口を塞ぎ、回転数を 1500rpm に落とすことによって騒音を 80dB まで軽減することができたが、快適な作業環境を保つためには、更なる防音対策が必要となる。しかし、上述したようにホットナイフ分離装置の改良により、EVA 残膜量の目標を達成できたことから、本装置の開発・改良は中止した。



図Ⅲ-2-③-(3)-1.6-1 ガラス表面 EVA 除去装置工程(イメージ)

1.7 最終的な処理工程(担当：株式会社エヌ・ピー・シー)

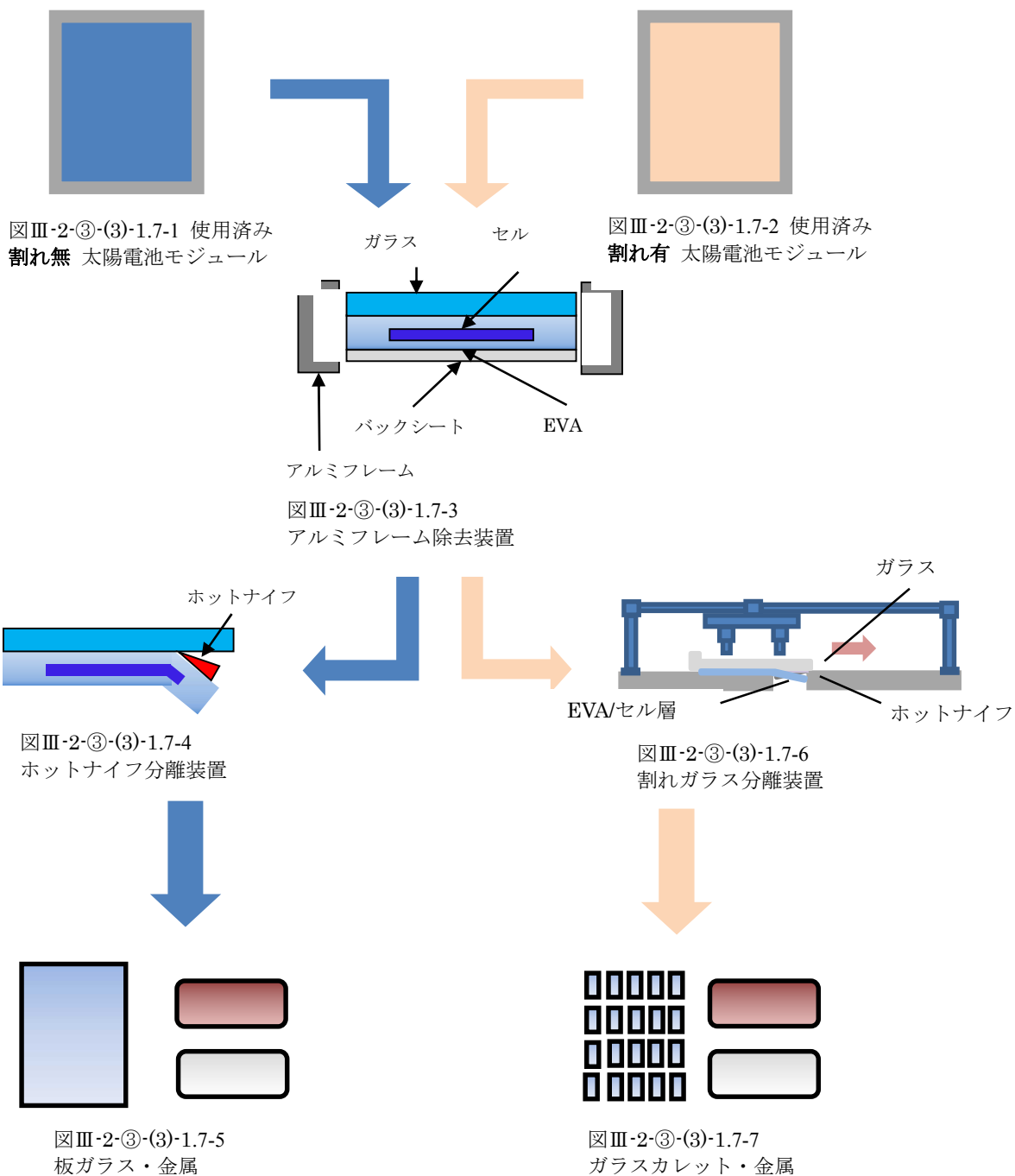
【処理内容】

上記の開発結果を踏まえ、実証プロセスのフローを以下とした。

「図Ⅲ-2-③-(3)-1.7-1 使用済み割れ無 太陽電池モジュール」と「図Ⅲ-2-③-(3)-1.7-2 使用済み割れ有 太陽電池モジュール」を「図Ⅲ-2-③-(3)-1.7-3 アルミフレーム除去装置」に投入しアルミフレームを取外す。

アルミフレームを外した、割れ無 太陽電池モジュールは「図Ⅲ-2-③-(3)-1.7-4 ホットナイフ分離装置」で分離を行い、「図Ⅲ-2-③-(3)-1.7-5 板ガラス・金属」に分離し、有価物を回収する。

アルミフレームを外した、割れ有 太陽電池モジュールは、「図Ⅲ-2-③-(3)-1.7-6 割れガラス分離装置」で分離を行い、「図Ⅲ-2-③-(3)-1.7-7 ガラスカレット・金属」に分離し、有価物を回収する。



1.8 ガラスカレットを板ガラス原料にするための調査(担当：株式会社浜田)

【最終目標】

板ガラス原料売却単価 3 円/kg 以上。板ガラス原料以外の用途開拓。

現在、ガラスカレットは、路盤材やセラミックタイルの原料とするリサイクル方法があるが、売却単価が低いことが課題である。リサイクル方法として、価値の高い板ガラスの原料にすることができれば、売却単価を上げることが可能になる。なお、板ガラスの製造工程において、異物の混入が板ガラスの品質に大きく影響するため、太陽光パネルのリサイクルにおいて、異物の混入が無いことや、許容される EVA 残膜量が重要になる。ホットナイフ法を用いることにより、ガラスを板状で回収できるため、ガラスカレットへの異物混入がないことを確認した。ガラスに付着する EVA 残膜の許容量を調査するため、板ガラスメーカーで品質評価を実施した。

【成果】

板ガラスメーカーに、ガラスカレットのサンプルを出荷し、板ガラス原料として受け入れが可能であるという評価を2社から得た。板ガラスメーカーの1社より売却単価3円/kg以上という評価を得た。板ガラスメーカーへガラスカレットの受け入れ調査を実施した。条件を以下、表Ⅲ-2-③-(3)-1.8-1に示す。

表Ⅲ-2-③-(3)-1.8-1 ガラスカレット受け入れの条件

項目	内容
条件1	アルミは、耐火レンガを侵食するため混入不可。 そのため、ガラスカレットは受け入れ時にアルミ端子などの異物が混入していないことを確認する必要がある。
条件2	ガラスをカレット化せず板状での受け入れが可能。ガラスカレットは異物確認に機械が必要となり、その分手間コストがかかり、売却単価が下がる。そのため、ガラスカレットより板状の方が売却単価は高い。 <参考売却単価>ガラスカレット 0.5円/kg以上 板状 3円/kg以上
条件3	板ガラスメーカーは品質規定として異物混入率を定めており、そのうち1社のメーカーの受入条件ではEVA残膜厚は0.01mm以下とされていた。今回、板状ガラス(EVA残膜厚0.07mm)を用いて板ガラスの製造試験を行ったところ、製品への影響はなかったと回答を得た。
条件4	通常、カレット化したガラスを板ガラスメーカーの原料投入口へ投入するが、今回、粉碎するコストを削減するため、板状ガラスのまま投入することを検討した。 原料投入口から投入された際、落下により板状ガラスが名刺サイズになれば投入が可能とのこと(実際に高さ2mから板状ガラスを落下させた際、名刺サイズになったのは、EVA残膜厚が0.1mmの場合であった)。

本調査により、板ガラスメーカーで、太陽光パネル由来のガラスを原料として使用している会社が少ないこと、また、表Ⅲ-2-③-(3)-1.8-1のように受け入れ条件が厳しいことがわかった。しかしながら、分解処理コスト低減のためにはガラスリサイクルの高付加価値が必要であるため、今後も板ガラスへのリサイクルを進めて行く。また、将来の太陽光パネルの大量廃棄は約17万t～28万tと推計されており、その際には、受け入れ先として板ガラス原料だけで賄えない。板ガラス原料以外の用途の調査を行っていたところ、セメント原料に使用する場合、ソーダライムガラスの成分は適さないことがわかった。大量廃棄に向けて、受入れ量が多い資源化の用途開発が今後も必要となる。そのため、板ガラス原料以外の用途調査を実施し今後も調査を継続する。

1.9 ガラス破碎機・選別機の開発(担当：株式会社浜田)

【最終目標】

処理コスト40円/kg以下、ガラス原料売却単価3円/kg以上。

一般的なりサイクル由来のガラスを原料として扱う板ガラスメーカーは、ガラス問屋でガラスを破碎しカレット化・粒度選別を行い、異物確認にて基準をクリアしたものを受け入れている。そのため、太陽光パネルのガラスカレットの売却先である板ガラスメーカーの条件に適した、ガラス破碎機・選別機の開発を行うこととした。

【成果】

1.8の調査結果より、板状ガラスのまま板ガラスメーカーの受け入れが可能であることがわかった。ガラス破碎機によってカレット化すると、板ガラス原料として、異物混入の確認が必要であり、その分コストが上昇することが分かった。これより、分離後のガラスを破碎せず、そのまま売却することが、リサイクルプロセストータルではコスト低減につながる。以上のことより、破碎機・選別機の導入は不要であるという結果となった。そのため、2016年度以降の開発は実施しないこととした。

1.10 回収金属の高価売却単価の調査(担当：株式会社浜田)

【最終目標】

EVA/セル層を45円/kg上で売却する。

EVA/セル層に含まれる金属の売却単価によっては、リサイクルプロセストータルコストの低減につながる。そのため、継続的かつ安定した価格で売却実施できる条件の調査を行うこととした。



【成果】

EVA/セル層に含まれる銀を評価することができる精錬会社を選定し、EVA/セル層を出荷した。3社の精錬会社及び仲介業者から売却評価 57～100 円/kg を得た。

また、銀含有量によって、売却単価が大きく影響ため、同じ太陽電池モジュールメーカーにて、製造年代別で銀含有量を調査した。その結果を以下、表Ⅲ-2-③-(3)-1.10-1 に示す。これより、2015 年製の太陽光パネルの銀含有量は 2002 年製の約 17%まで減少していることがわかった。

現在は、回収金属としては銀が一番高い価値となっているが、将来的なりサイクルフローとしては、銀以外の回収金属の評価を検討する必要があることがわかった。

表Ⅲ-2-③-(3)-1.10-1 同太陽電池モジュールメーカー製造年式による EVA/セル層の銀含有量比較

製造年式	2015 年	2002 年
写真		
銀含有量	4700ppm	28000ppm

1.11 EVA/セル層の処理方法の検討及び EVA/セル層処理装置の開発(担当：株式会社浜田)

【最終目標】





EVA 除去の処理コスト 30 円/kg 以下。EVA/セル層に付着した EVA を除去することで、回収金属の売却単価が上がるが見込まれる。そのため、EVA 除去方法・除去装置の検討を行うこととした。

【成果】

EVA/セル層の除去方法として、EVA/セル層を分離することにより、EVA の油化を行った。油化した EVA を精錬所で評価を行った結果を以下、表Ⅲ-2-③-(3)-1.11-1 に示す。精錬所での評価は、EVA/セル層のままのサンプルと EVA/セル層を破碎したサンプルについても行った。

その結果、EVA/セル層のままでも売却は可能であるが、EVA/セル層を破碎したサンプルの方が精錬会社での破碎工程が不要になるため、10～15%程度高価に引き取られることがわかった。しかし、破碎機を導入するほどの費用対効果が見込まれなかった。また、EVA/セル層の油化については、製錬処理時に油化された EVA は燃焼されるため、油化の価値を見いだせなかった。以上から、EVA 分離装置、および破碎機の導入は不要であるという結果となり 2016 年度以降の開発は実施しないこととした。

表Ⅲ-2-③-(3)-1.11-1 EVA/セル層処理方法別評価

処理方法	EVA/セル層(処理無し)	EVA/セル層の破砕	EVA 層の油化
結果	売却可能。	破砕を行った方が売却単価は10～15%程度高い(精錬会社の破砕コストがいらぬ分高価引き取りが可能)。	EVAの油化については、製錬処理時に燃焼されるため、油化の価値を見いだせなかった。EVA分離装置によるEVA油化の処理コスト30円以下は、不可能。
写真			<p>油化後 EVA</p>  <p>金属残渣</p> 

1.12 実証・試験プラント建設及び実証実験による処理コスト評価(担当：株式会社浜田)

【最終目標】

太陽電池モジュールの種類ごとによる動作設定の省略化、処理作業の省力化、道具消耗費の削減に向けて取り組み、目標の処理コストを達成する。

処理コスト 5円/W

※有価物売却益を差引き後のネット単価

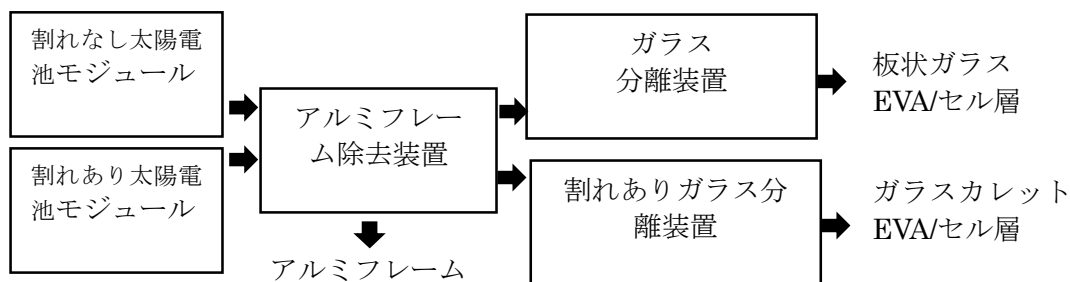
【成果】

実証試験プラントにて、図Ⅲ-2-③-(3)-1.12-1に示すプロセスフローで実証試験を行った。結果としては、割れなし太陽光パネルで2.23円/W 割れあり太陽光パネルで3.82円/Wと目標を達成した。

取組みとしては、太陽光パネルの種類によって、パネルサイズが違っているため、当初、太陽光パネルの種類が変わるごとに動作設定を行っていた。このため、タクトタイムの増大、処理ミスなど悪影響が発生した。そこで、実証試験内で調整を行い、アルミフレーム除去装置及びガラス分離装置を改良し、自動運転が可能となった。このことにより、タクトタイムの短縮及び処理ミスの改善できた。

また、モジュールは1枚20kg程度あるため、2名で持ち運び作業を行っていたが、パネルの荷捌きにバランスを導入したことで、持ち運び作業が半自動化となり1名作業が可能となった。

本プロセスにおいて、処理コストに一番影響があったのが、ガラス分離装置のナイフであった。そこで、より耐久性の高いナイフを活用することで目標を達成することができた(1.3 ホットナイフ分離装置の改良及び実証の項参照)



図Ⅲ-2-③-(3)-1.12-1 実証プロセスフローと研究実施装置

2. 実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

2.1 販売計画

本プロジェクトにおいて太陽電池モジュールリサイクルのために技術開発した各解体装置の実験、実証結果を元に実用化できる量産用装置を製作し、太陽電池リサイクル事業を行う企業に販売活動を行っていく。販売スケジュールを表Ⅲ-2-③-(3)-2.1-1 に示す。このことより、事業化のが見通せることがわかった。

表Ⅲ-2-③-(3)-2.1-1 販売スケジュール

開発項目	年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度
ガラス分離装置		2 台	3 台	3 台
アルミフレーム除去装置		2 台	3 台	3 台
割れガラス分離装置			1 台	3 台

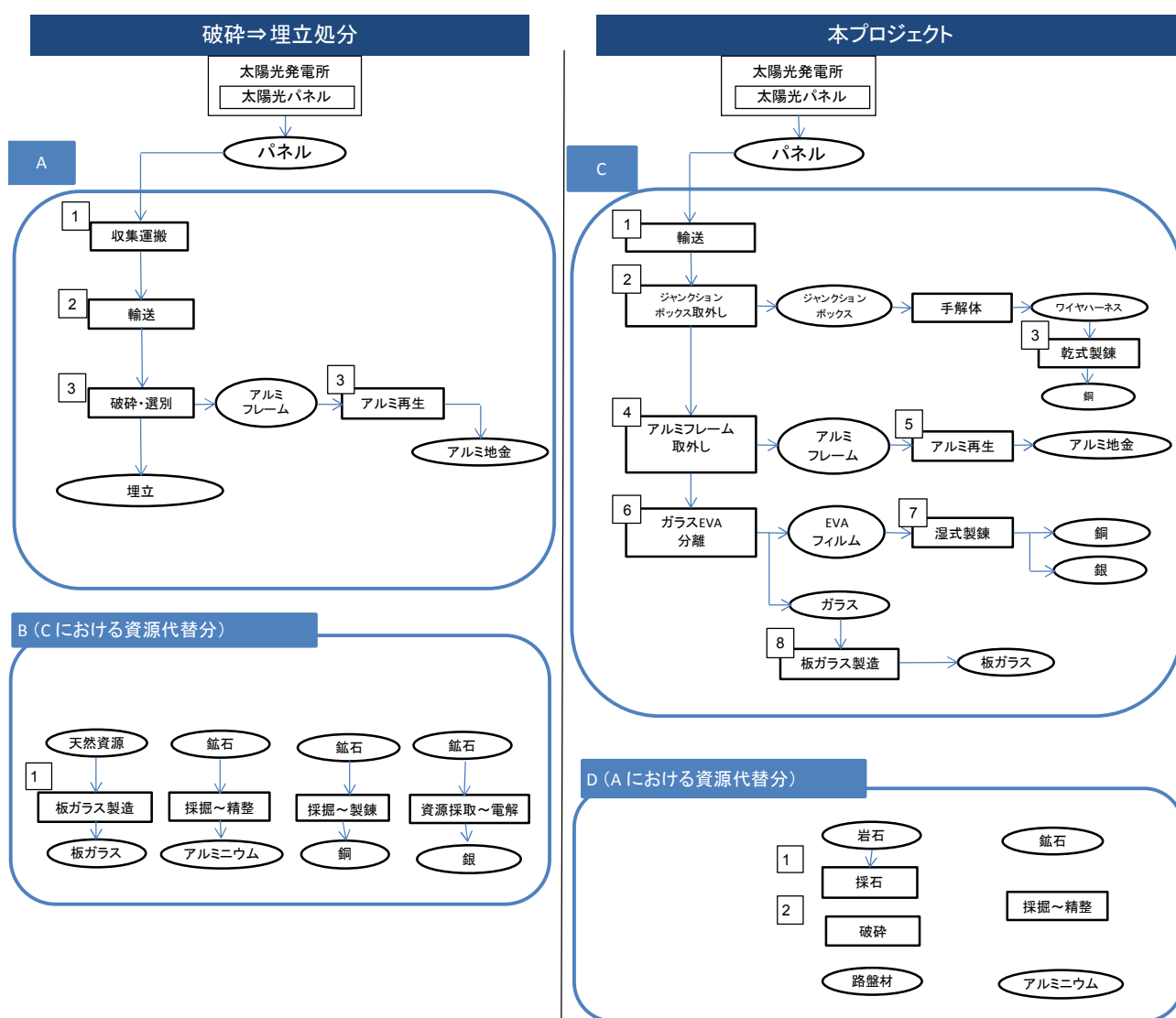
2.2CO₂削減効果

本プロジェクトにおいて、アルミ、ガラス、EVA/セル層を破碎しないで回収できることから、破碎後の選別が不要となり、2次破碎機及び選別機が不要であるという特徴がある。加工工程が多ければ設備が増加し設備稼働にかかるCO₂排出量の抑制につながる。表Ⅲ-2-③-(3)-2.2-1 にCO₂の削減量を図Ⅲ-2-③-(3)-2.2-1 に処理フローの比較を示す。このことより、ホットナイフ法はCO₂削減に効果のある手法であることがわかった。

表Ⅲ-2-③-(3)-2.2-1 CO₂削減効果算出結果 太陽光パネル 1tあたりの削減量

カテゴリ	項目	排出量 (CO ₂ e-kg/t)
A	現状(ベースライン)の排出量	524
B	本プロジェクト時の代替分	515
C	本プロジェクトの排出量	443
D	現状(ベースライン)の代替分	6
	CO₂削減効果(A+B)-(C+D)	589

図Ⅲ-2-③-(3)-2.2-1 処理フローの比較



3.波及効果

本プロジェクトにおいて、ガラスを粉砕しないまま太陽電池モジュールを解体して有価物を回収するため、廃棄物がほぼゼロとなる。全国の埋立処分残余年数が約14年(2015年時点)を切った中で、廃棄となる太陽電池モジュールの埋立処分地への搬入を食い止めることができる。

(4)合わせガラス型太陽電池の低コスト分解処理技術実証(ソーラーフロンティア)

【2015～2018 年度】

1. 成果詳細

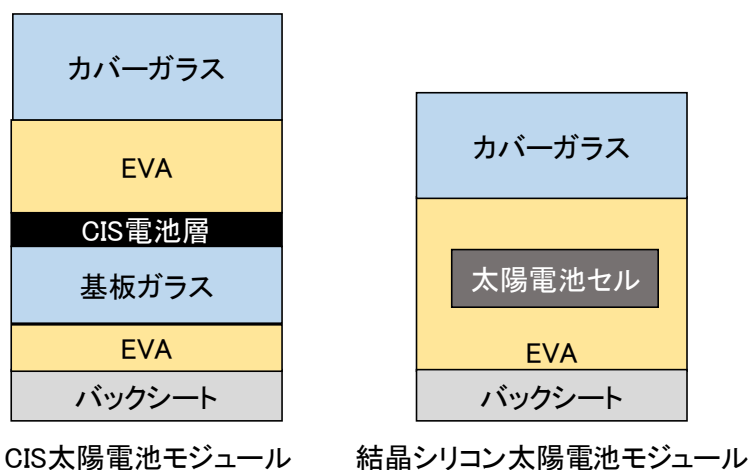
1.1 合わせガラス型太陽電池モジュールの構造

図Ⅲ-2-③-(4)-1 に合わせガラス型太陽電池モジュールである CIS 太陽電池モジュールと、結晶シリコン太陽電池モジュールの断面構造の違いを示す。

CIS 太陽電池モジュールはカバーガラス(CG)と基板ガラスの 2 枚のガラスに挟まれた構造をしており、基板ガラスの表面に薄膜の CIS 太陽電池層および電極が形成され、EVA を介してサンドイッチされている構造をしている。また基板ガラスの背面側には EVA を介してバックシート(BS)が形成されている。

一方、結晶シリコン太陽電池モジュールには基板ガラスが存在せず、太陽電池セルがガラスと接していない。このため CIS 太陽電池モジュールと比較して分解が容易な構造となっている。

以上から CIS 太陽電池モジュールのリサイクルには独自の技術開発が必要となっている。



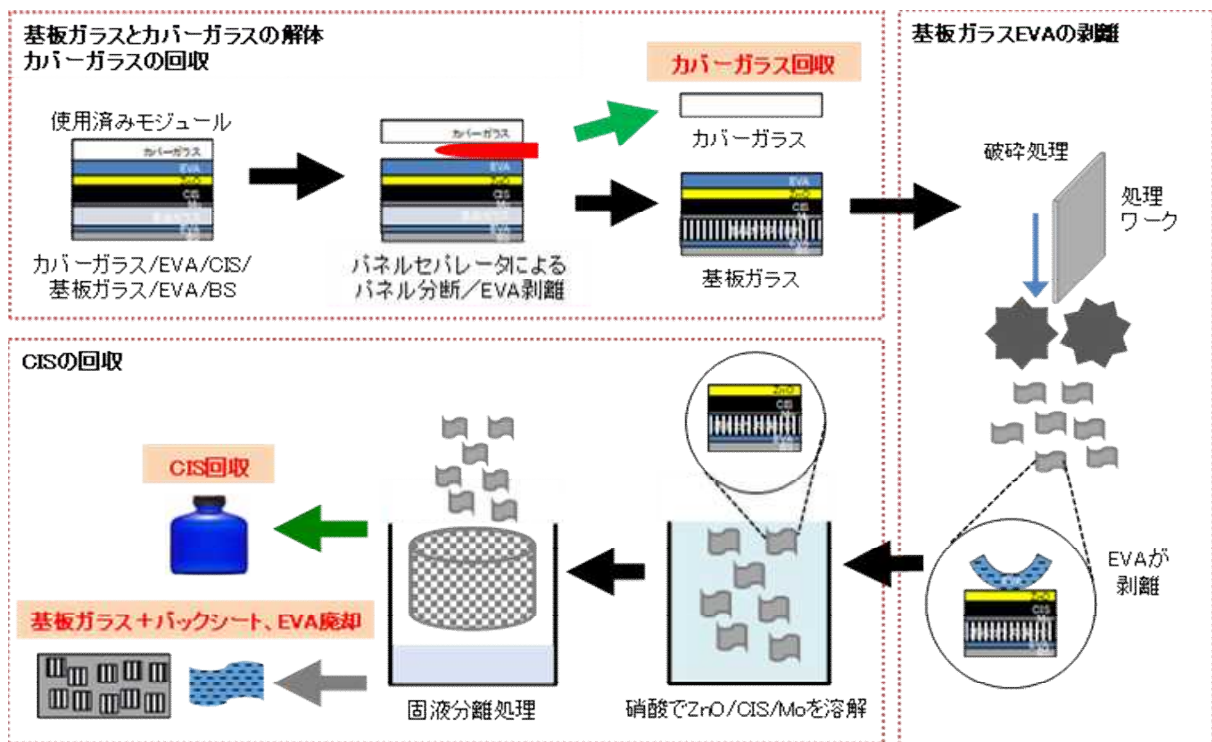
図Ⅲ-2-③-(4)-1 CIS 太陽電池モジュールと結晶シリコン太陽電池モジュールの断面構造

1.2 処理フロー

今回開発したプロセスの全体フローを図Ⅲ-2-③-(4)-2 に示す。

CIS 太陽電池モジュールからアルミフレームと端子箱を除去したワーク(パネル)は、パネルセパレータによりカバーガラスとそれ以外の部分(EVA、CIS、基板ガラス、BS)に分離される。分離されたカバーガラスはそのままの状態でもガラスカレット原料としてリサイクルされる。

一方、カバーガラスから分離された残りのワークは、破砕機により粉砕される。その際、EVA、CIS + 基板ガラス + バックシートに分離される。破砕されたワークを硝酸に浸漬し、CIS 層及び電極層(Mo 層、ZnO 層)をエッチングにより回収する。残ったワークからも、遠心分離型固液分離装置にて硝酸溶液を回収する。このように、CIS および電極材料は硝酸に溶解された状態で回収する。硝酸溶液を除去された部材(EVA、基板ガラス + バックシート)は、現時点では有効なリサイクルルートが見つかっておらず、産業廃棄物として廃却する。



図III-2-③-(4)-2 全体プロセスフロー

1.3 各プロセスの詳細

1.3.1 パネルセパレータ(パネル分解)

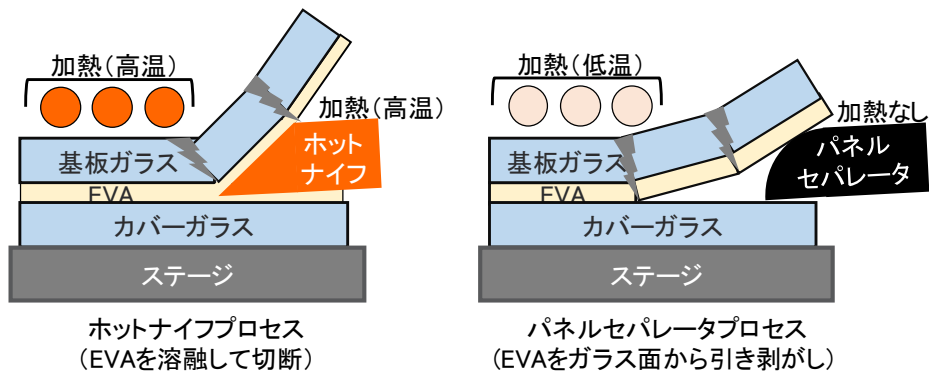
結晶シリコン太陽電池モジュールを分解する手法としてホットナイフ法が提案されている。本手法は200℃程度に加熱された、先端の鋭利なホットナイフ(スクレーパー)をカバーガラスに押し当てながらEVAを溶断するプロセスである。

しかしながら、この手法でカバーガラス表面に残渣として残るEVAの量は、設備の精度および、パネルの反り/たわみに大きく依存する。さらに、カバーガラスのEVAと接する面には防眩効果を目的とした細かなエンボス加工が施されており、その凹部内にもスクレーパーにてすり切られたEVA残渣が原理上発生する。そのためガラスカレット用途にリサイクルするには、大量に残存したEVA残渣を、有機溶剤等の後処理により除去する必要が生じていた。

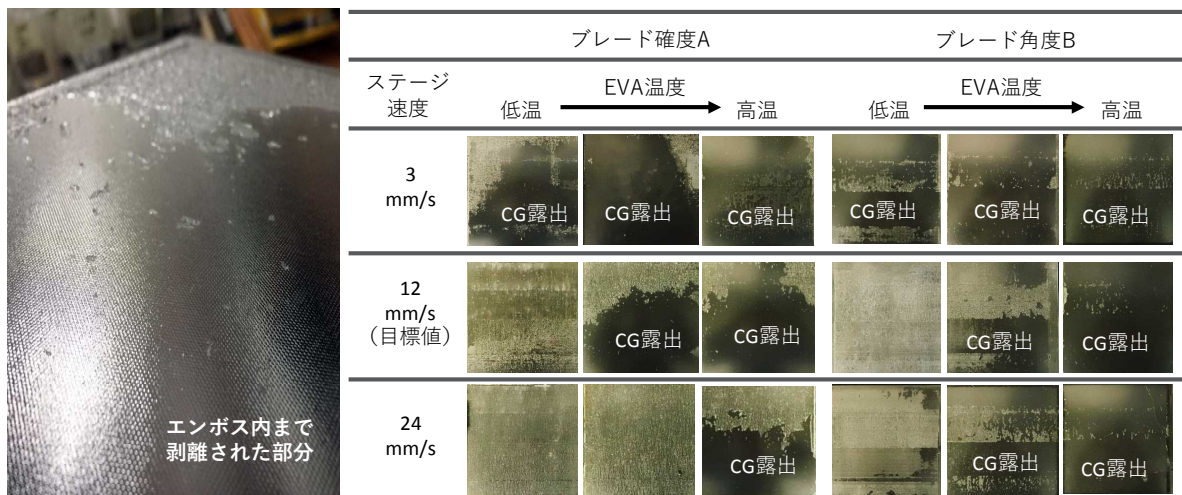
そこで我々はプロセスコスト低減を目的に、メカニカルな処理のみでカバーガラス上にEVAを残存させない『パネルセパレータプロセス』を開発した。従来のホットナイフプロセスとの違いを図III-2-③-(4)-3に示す。

パネルセパレータプロセスは、ホットナイフ法のスクレーパーに相当するパネルセパレータ(挿入ブレード部)は加熱されておらず、EVAを溶かして切断するのではなく、ガラスとEVA界面の密着力を制御することにより、『引き剥がして』いる。その結果、エンボスの凹部内のEVAまで除去することが可能となり、ホットナイフプロセスで行っていた後処理が不要となった。この方法により、分離されたカバーガラスは、そのままガラスカレット用途としてリサイクルが可能となるため、プロセスコストの大幅な低減が可能となった。また、ブレードの加熱が不要であり、かつ、ガラス加熱も比較的低温であることから電気代抑制効果も大きい。

図III-2-③-(4)-4にこのプロセスの代表的な制御因子とガラス表面状態を示す。ガラス面にEVA残渣を残さぬよう制御するには、EVAとガラスとの密着性制御および両者を引き剥がすベクトルが影響する。前者はEVAとガラス界面の温度制御であり、後者は分離速度(ステージの送り速度)及び挿入ブレードの角度により制御が可能となる。CG露出(カバーガラス露出)と記載した部分がエンボス内までEVAが剥離された状態であり、条件を最適化することによりガラス全面(今回は300mm×300mmサイズ)からEVAを剥離することが可能となった。



図III-2-③-(4)-3 ホットナイフとパネルセパレータの比較



図III-2-③-(4)-4 パネルセパレータプロセスの代表的な制御因子とガラス表面状態

1.3.2 CIS 回収

CIS 太陽電池モジュールは In や Ga 等のレアメタルを使用しており、有価物としての価値だけではなく、資源保護の観点からも CIS 回収は重要である。これまでに検討・提案されてきた CIS 太陽電池モジュールのリサイクルプロセスにおいては、基板ガラス上の CIS 層を研磨することにより粉体として採取する方法がとられてきた。今回我々は、プロセスコストの低減と回収効率の向上を目的とし、液体による採取プロセスを検討した。液体採取の導入に際し、予想されるメリットおよび懸念事項を表 III-2-③-(4)-1 に示す。

表 III-2-③-(4)-1 CIS 回収方式の比較

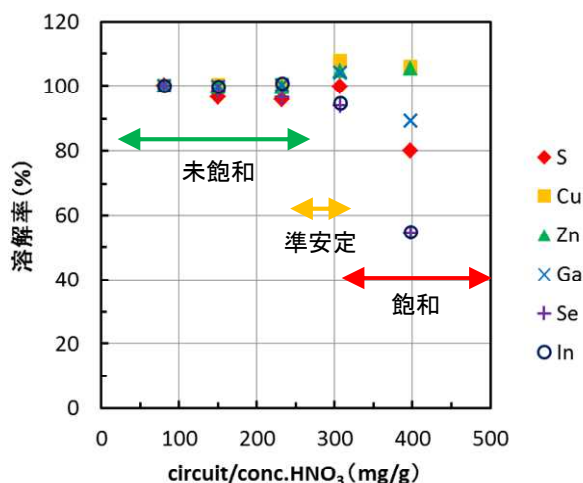
	粉体採取 (従来)	液体採取 (現在)
メリット	<ul style="list-style-type: none"> 回収後のハンドリングが容易 	<ul style="list-style-type: none"> プロセスコストが低い 回収率が高い
問題点 及び 懸念事項	<ul style="list-style-type: none"> CIS比率が小さいため精錬時のロス大 回収率が低い 	<ul style="list-style-type: none"> 溶解液の運搬コスト 高濃度溶解液の持出しロス 設備コスト

従来の粉体採取は、回収物が軽量で運搬の懸念がない一方、採取後の粉体を EVA と CIS を含むガラスに分離するプロセスコスト及びガラス粉中の CIS 比率が小さいことによる精錬時の収率が悪いことが課題となっていた。一方、今回開発した液体採取は、プロセスコストで大きなメリットが見込めるものの、液体状態で輸送することによる高運搬コストと、溶解液が基板に付着して持ち出されてしまうことによる回収率の低下が懸念される。そこでそれらの検証を行った。

エッチャントである硝酸に対する CIS を構成する各元素の溶解度を図 III-2-③-(4)-5 に示す。各元素は 30wt%以上の高濃度にて溶解が可能である。

これは研磨法においてガラス粉体中の CIS 比率が 1wt%以下と非常に少なかったことに比べると、溶解液の高濃度化による運搬コストの大幅な低下に加え、原料の含有量が 30 倍以上になることから、利材としての価値も向上する。

さらに、この濃度から年間 200MW のリサイクル処理を試算すると、年間排出量が約 50t となり、既存の精錬メーカーが十分受け入れ処理可能な量であることが分かり、液体採取の懸念点は概ね払拭された。

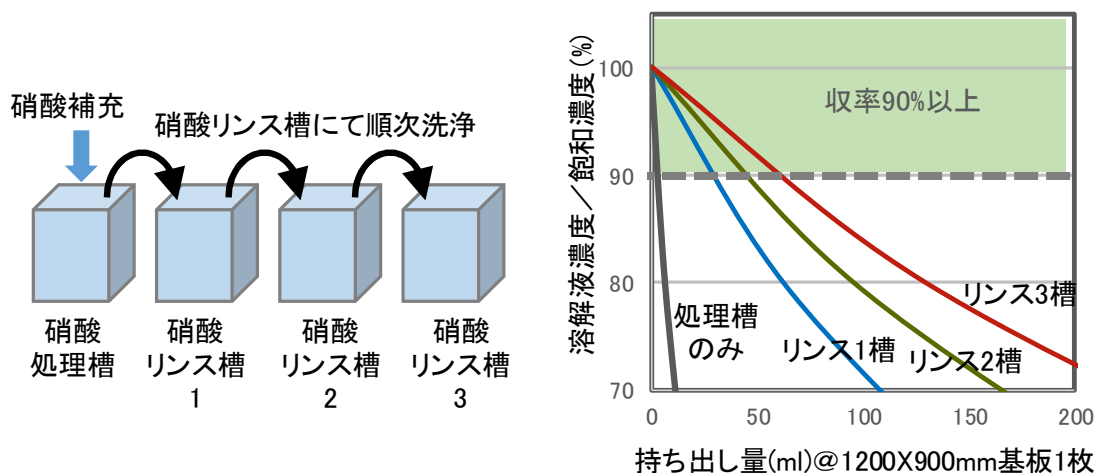


図Ⅲ-2-③-(4)-5 硝酸に対する CIS 太陽電池構成元素の溶解率

次に溶解液が廃棄物に付着して持ち出されてしまうロスについて検討した。

液体採取法は、基板上的 CIS 層(電池層)全てを硝酸に溶解するため、溶解状態での回収率はほぼ 100%である。しかし、エッチング処理槽から引き上げられた残存物に CIS 溶解液が付着して持ち出されてしまうため、その分の回収率が低下してしまう。しかもそれは、溶解液が高濃度になっているほど顕著になる。

そこで、エッチング処理槽の後に硝酸リンス層を複数並べ、持ち出された CIS 含有溶解液を回収する効果を検討した結果を図Ⅲ-2-③-(4)-6 に示す。1.3.4 項で述べるが、1200mm×900mm サイズのパネルにおける溶解液の持ち出し量は 29ml であり、リンス槽を 1 層追加することで収率 90%を達成することが可能となることが分かった。



図Ⅲ-2-③-(4)-6 リンス槽追加による溶解液持ち出し回収効果

1.3.3 ワークの破砕

CIS の回収プロセスにおける処理槽の小型化、後述する固液分離設備間の輸送の簡便化、及び装置本体の価格を下げるため、処理基板(ワーク)の小型化を検討した。図Ⅲ-2-③-(4)-7 に概念図を示す。図左に示した従来の 900mm×1200mm サイズパネルを用いた場合、巨大な処理槽および固液分離装置が必要であり、運用も含めた設備コストが膨大になることが予測される他、CIS の硝酸に対する飽和溶解度が 30wt%であることを考慮すると、大容積のエッチング槽では飽和に達する前にエッチャントが劣化する懸念がある。そこでパネルを破砕することにより、設備を小型化することで、ワークの設備間ハンドリング性を向上させるとともに、工場規模の縮小を検討した。

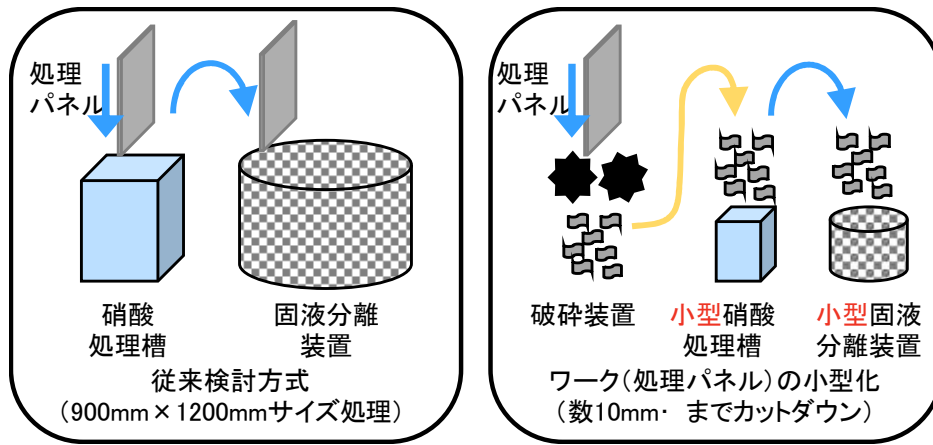


図 III-2-3-(4)-7 処理ワークの小型化検討

検討した破碎機およびワークの破碎状態を図 III-2-3-(4)-8 に示す。1 軸型と呼ばれる片刃で設定サイズ以下になるまで連続破碎する装置。2 軸型と呼ばれる向かい合う刃が基板を噛み込みながら 1 スルーで破碎する装置。更に堅型と呼ばれる高速回転するハンマーでたたきながら、設定サイズ以下になるまで連続破碎する装置の 3 タイプにおいて検討した。その結果、基板が破碎されて小片化するだけでなく、構成する部材同士が剥離することが分かった。またその剥離箇所は装置によって異なり、バックシートのみ、ZnO 上の EVA、上下層の EVA の 3 つのモードがあることも分かった。

破碎処理方式	1軸破碎機(A社)	1軸破碎機(B社)	2軸破碎機(B社)	堅型破碎機(A社)
破碎後の状態	矩形型に排出 粒度分布:良	矩形型に排出 粒度分布:中	短冊形に排出 粒度分布:中	不定形に排出 粒度分布:悪
剥離箇所				
処理タクト	数10s程度	数10s程度	2s程度	数10s程度

図 III-2-3-(4)-8 破碎処理による EVA の剥離と設備依存性

破碎処理の違いによる EVA の剥離状態の違いが、CIS 回収に要する時間へ及ぼす影響を図 III-2-3-(4)-9 に示す。破碎処理により、エッチング時間が 5 倍以上短縮されることがわかる。これは破碎処理を行っていない(EVA が剥離していない)プロセスにおいては、エッチング面がワークの側面しか露出しておらず、サイドエッチング(リフトオフ)により CIS 層および電極層を溶解していたのに対し、ZnO 上の EVA が剥離したことで、表面からエッチングが進んだことが原因と考えられる。また同様の理由でエッチング時間のばらつきにも効果があり、エッチングの開始と終了までの時間に対する基板内ばらつきも大きく改善されることが分かった。

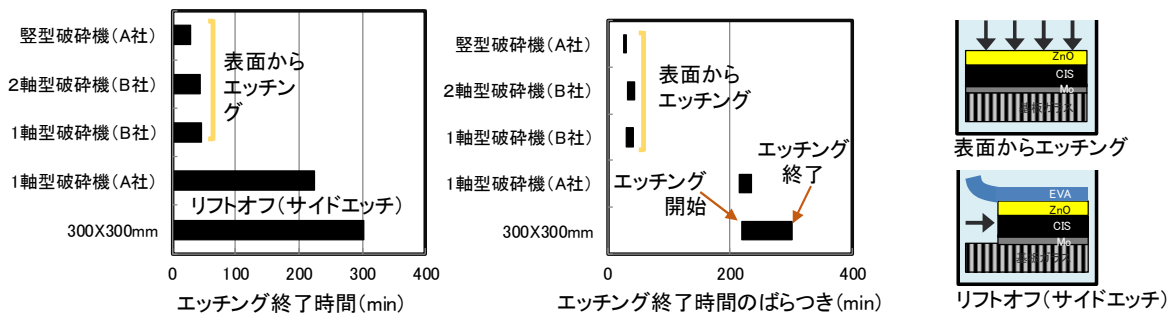
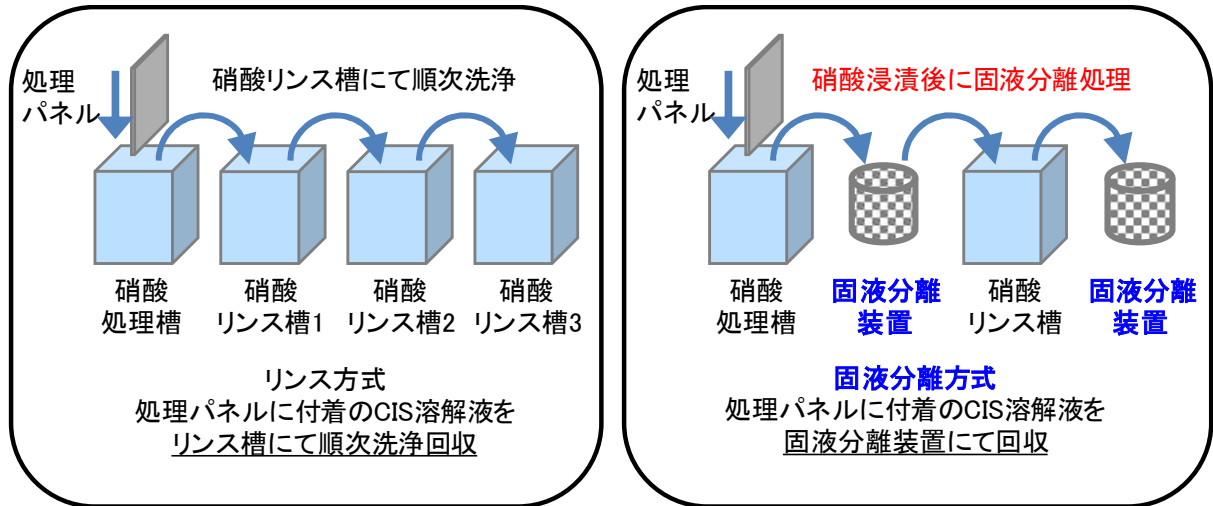


図 III-2-3-(4)-9 破碎処理による CIS 回収時間への影響

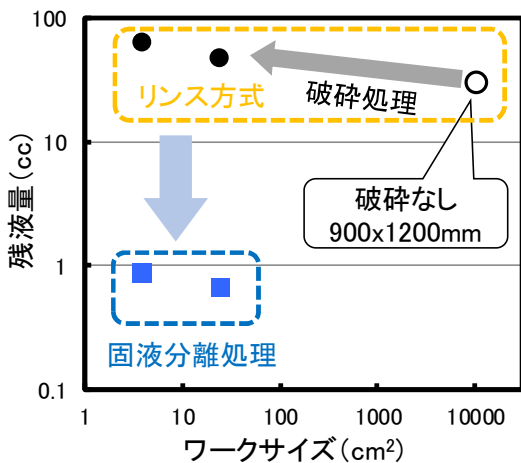
1.3.4 固液分離

1.3.2 項に示した通り、基板に付着した CIS 溶解液の持ち出しは、CIS の回収率に大きな影響を与えることが分かっている。そこで効率的な液切りプロセスにより、持ち出し量を削減し、設備の規模を縮小すべく、遠心分離型固液分離装置を検討した。そのコンセプトを図Ⅲ-2-③-(4)-10 に示す。また、液切りプロセスにおいて、ワークの表面積の増大はネガティブな方向に働く可能性が高い。そこで 1.3.3 項にて検討したワークの破碎の影響についても同時に検討を行った。

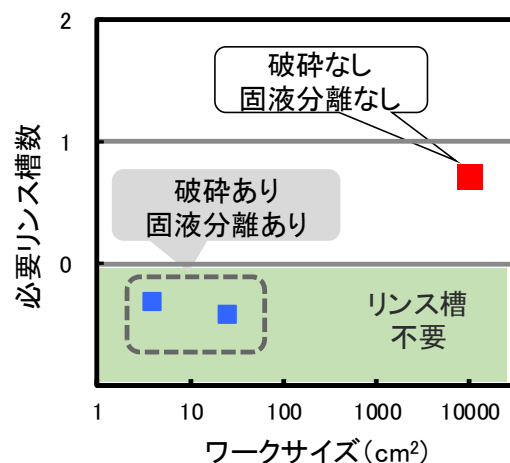


図Ⅲ-2-③-(4)-10 固液分離装置によるリンス槽の削減検討

ワークサイズに対する固液分離処理による液切り能力結果を図Ⅲ-2-③-(4)-11 に、必要リンス槽数への影響を図Ⅲ-2-③-(4)-12 に示す。破碎処理によりワークの表面積が増加するため、破碎前の 900mm×1200mm サイズのパネルから含有水分量はやや増加する。ただし、固液分離処理により、残液量は 1/100 以下まで減少することが分かった。またこの結果を元に CIS 回収率 90%を達成するために必要な、硝酸リンスの槽数を試算した結果、リンス槽が不要であることが分かった。すなわちワークを破碎し固液分離処理を行うことで設備の規模を大幅に縮小することが可能となった。



図Ⅲ-2-③-(4)-11 分離装置による残液低減効果



図Ⅲ-2-③-(4)-12 回収率 90%に必要なリンス槽数

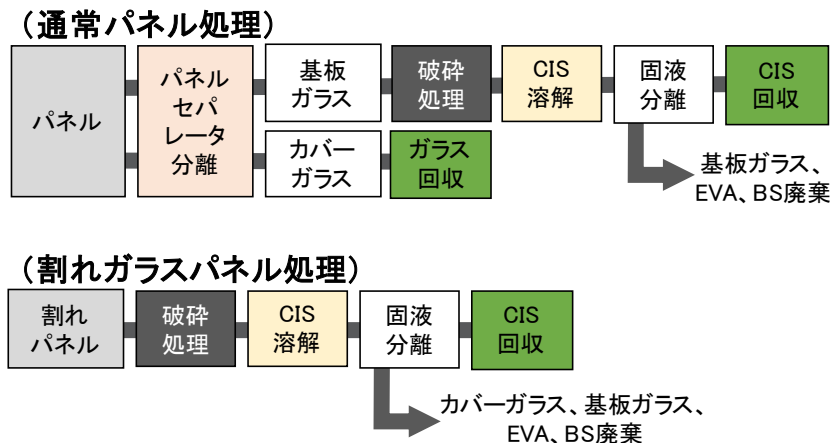
1.3.5 割れガラスモジュール処理

昨今、自然災害(地震、台風等)起因の影響により、図Ⅲ-2-③-(4)-13 に示すように太陽電池モジュールも大きな被害を受けていることが報告されている。被災地には割れて使用不能となった太陽電池モジュールが大量に発生しており、この割れガラスモジュールは、1.3.1 項にて示した基本処理フローにて処理することが不可能である。そこで効率的な手法を検討した。



図Ⅲ-2-③-(4)-13 自然災害により被害を受けた太陽電池モジュール
 (※日経 BP 社 <https://tech.nikkeibp.co.jp/dm/atcl/news/16/083011447/?ST=msb> から引用)

図Ⅲ-2-③-(4)-14 に基本プロセスを応用し、低コストで処理するラインを検討した結果を示す。
 通常の太陽電池モジュールが、パネルセパレータによりパネル分解を行った後に、破碎処理を行い、硝酸にて CIS を回収するのに対し、割れた太陽電池モジュールでは、アルミフレーム及び端子箱を除去した後、破碎処理を行うことにより、1.3.3 項に示したガラス、EVA およびバックシートは分離され、それらを一括してエッチング処理することにより、残部を通常の産業廃棄物として廃棄することが可能となる。ただし、この処理の場合、カバーガラスはリサイクルできず、産業廃棄物として廃棄することになる。



図Ⅲ-2-③-(4)-14 割れガラスモジュール処理フロー

1.3.6 試作プラント

今回のプロジェクトにおいて、プロセスの実証を目的に、300mm×300mm サイズ基板対応設備として、パネルセパレータ、CIS 回収設備を導入した。設備概要を図Ⅲ-2-③-(4)-15 に示す。

これらの設備による実証試験において、パネルセパレータは 300 枚以上の処理を行い、カバーガラスの割れ率は 1%以下となることを確認した。また同時に処理時間 80 秒/枚を達成した。

CIS 回収設備においては、120 枚の連続処理実験を行い、プロセスの検証と CIS 溶解液の持ち出し量を測定した。結果を図Ⅲ-2-③-(4)-16 に示す。120 枚の連続処理に対し、20 枚毎に持ち出されて減少した硝酸を、補充しながら処理を行い、120 枚処理終了時点にて積算すると、290ml 持ち出されていることが分かった。これは 900mm×1200mm サイズに換算すると 1 枚あたり 29ml に相当する。この結果を元に 1.3.2 項で述べた、硝酸リンス槽の追加についての検討を行った。

パネルセパレータ

低エネルギー印加にてガラスと
EVA界面を剥離
カバーガラス割れ率:1%以下
処理時間:80秒/枚

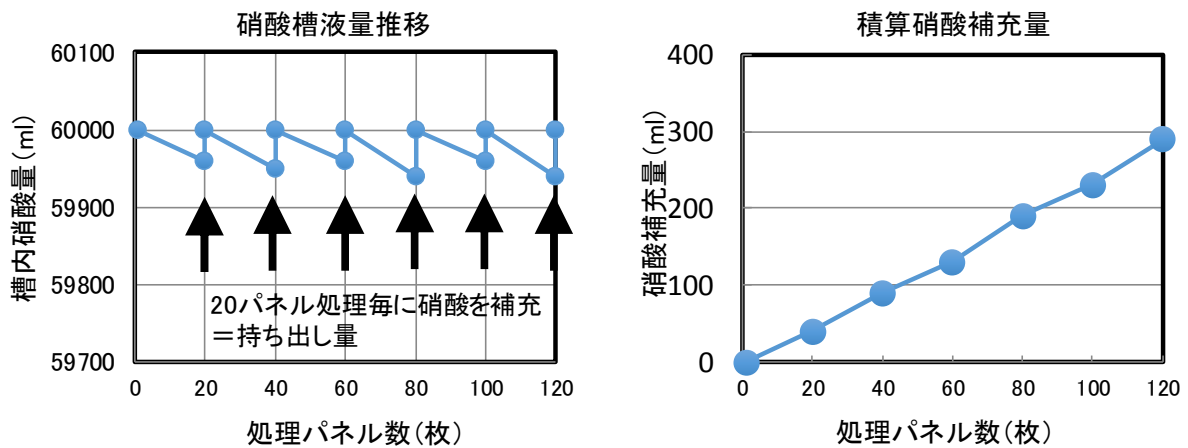


CIS回収装置

CISを硝酸に溶解した状態
で回収
処理時間:1.0h/バッチ
材料費:0.07円/W



図Ⅲ-2-③-(4)-15 試作プラントの設備概要



図Ⅲ-2-③-(4)-16 試作プラントにおける 120 枚連続処理による持ち出し量測定

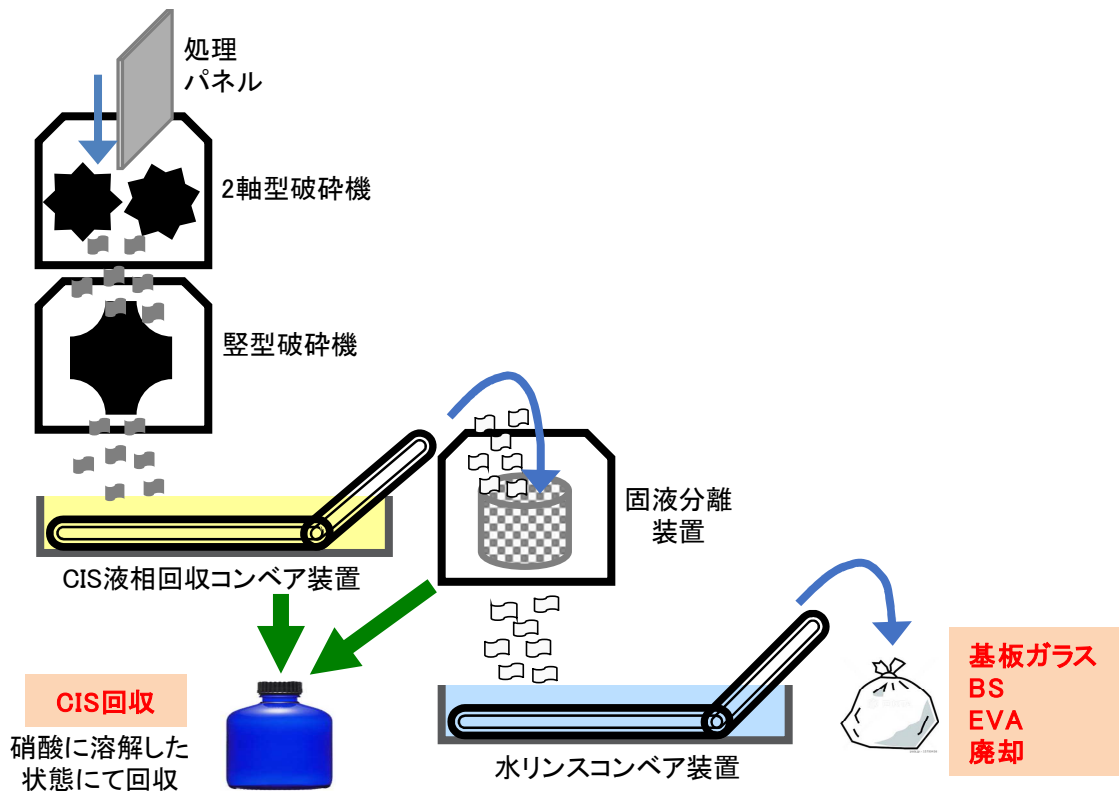
1.4 量産設備および工場設計

ここまでの検討結果を元に量産設備および量産工場を検討した結果を表Ⅲ-2-③-(4)-2 に示す。量産設備として、①アルミフレーム/端子箱分解設備、②パネル分解設備、③CIS 回収設備により構成されており、②パネル分解設備(パネルセパレータ)以外は市販の設備を用いることにより、設備価格の圧縮を図った。図Ⅲ-2-③-(4)-17 に CIS 回収プロセスの詳細な処理フローを示す。コンベア装置(CIS 回収および水リンス)がエッチングやリンスと搬送を兼ねており、設備のコンパクト化を図っている。

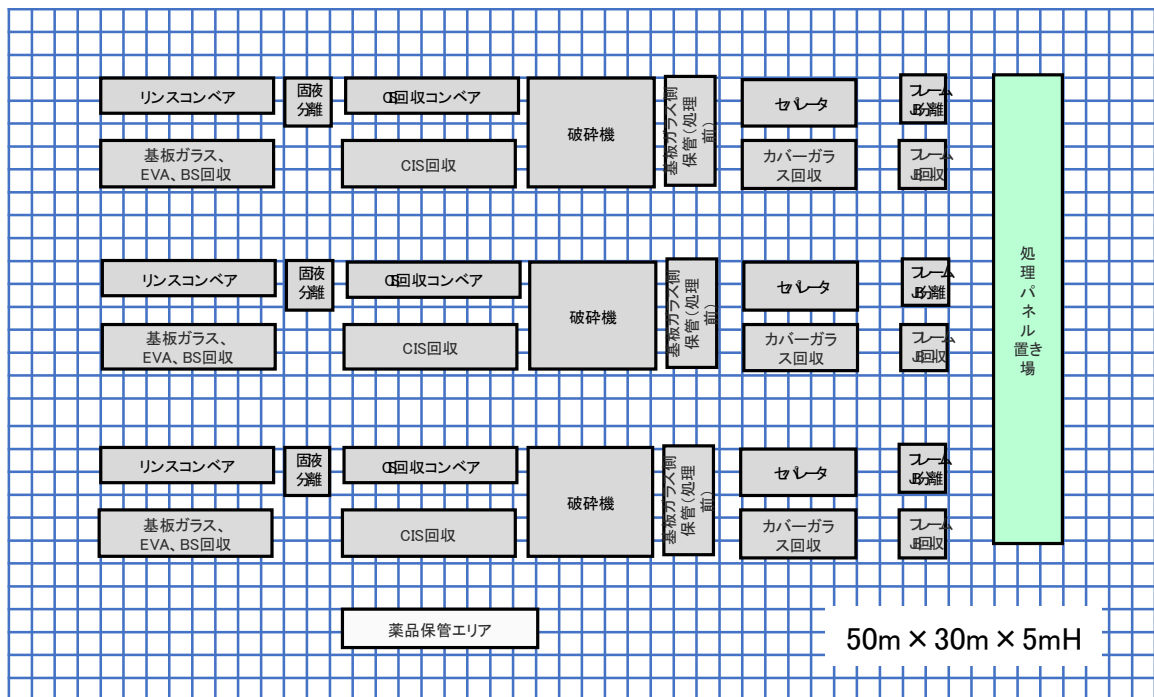
次に上記設備において 200MW パネルの処理を試算した工場のレイアウトを図Ⅲ-2-③-(4)-18 に示す。上記設備の能力を考慮し 3 ライン配置してあり、面積は約 50m×30m、破砕機の高さから 5m の天井高となっており、プロジェクト開始時点における計画のおおよそ 2/3 程度まで縮小することが可能となった。これはワークの破砕処理に伴う設備小型化、エッチング処理のタクトアップによる設備数の減少、さらに破砕機以降はクーラントコンベア装置を介してインラインで処理することにより設備数の減少と人件費の抑制を両立する工場を計画した。

表Ⅲ-2-③-(4)-2 試算した量産工場の設備リスト

工程	設備	台数
アルミフレーム/端子箱分解	自動分解装置	3
パネル分解	パネルセパレータ装置	3
CIS 回収	破砕機	3
	固液分離装置	3
	エッチング+ワーク搬送装置	6



図Ⅲ-2-③-(4)-17 CIS回収プロセスの詳細処理フロー



図Ⅲ-2-③-(4)-18 200MW相当のリサイクル工場レイアウト

1.5 コスト

表Ⅲ-2-③-(4)-3 に、今回達成した最終的な分解処理コストを本プロジェクト開始時点の計画と比較し、それらを実現するために開発したアイテムとの関連性を示す。材料費は、硝酸のみとなり、コストダウンに大きく寄与している。光熱費は、ホットナイフと異なり低温処理であるセパレータプロセスによりコストダウンを行った。人件費、設備費、土地建物費は、プロセスが簡略化したことから設備台数が大きく減少し、ワークの小型化に伴い、設備の小型化およびインライン化することによりコストダウンを行った。

一方で最終処分費は、当初予定していた基板ガラスのリサイクル先が見つけれず、バックシートと

EVA も廃却することから大きく費用が増加した。

有価物の売却益は実勢価格を複数社に対し調査を行った結果、売却益を得られる部材はアルミフレームのみであった。カバーガラスは想定買取価格に比べ安価であり、運搬費とほぼ相殺レベルであることから売却益が得られないことが判明した。また CIS は構成元素により精錬業者が異なるが、総合すると精錬処理費が想定以上にかかることが判明しており、プロジェクト開始時点の計画から大幅に低下した。上記のコストを総合し、3.38 円/W と NEDO 目標である 5 円/W を大きく上回る試算結果を得ることが出来た。この結果は、プロセスコスト低減を最優先に進めた結果であり、有価物の買取り相場価格に依存することのない、十分に実現可能な値であると考えている。

表Ⅲ-2-③-(4)-3 最終的な分解処理コストと開発アイテム

項目	明細	開始計画時点	最終	単位	開発アイテム
処理費用	材料費	263,299	13,934	[k円/年]	硝酸溶解回収(有機溶剤なし)
	光熱水費	190,888	104,093	[k円/年]	効率的な加熱による基板分離
	人件費	490,000	258,000	[k円/年]	プロセスタクト向上 設備の小型化、インライン化
	設備費	254,791	80,197	[k円/年]	設備の小型化、既製品の流用
	土地・建物費	185,050	103,450	[k円/年]	ワークの小型化、設備の小型化
	最終処分費	19,973	364,731	[k円/年]	基板ガラス、BS、EVAの廃棄
合計	合計	1,404,001	924,405	[k円/年]	
分解処理コスト (グロス)	有価物売却益を差引き前のグロス単価	7.03	4.63	[円/W]	プロセスコスト低減を最優先 有価物の売却益に依存されないプロセスの開発 有価物売却益を現実に即して見直し
		58.0	38.2	[円/kg]	
有価物売却益	アルミフレーム、ガラス、CIS、リボン電極	404,145	248,651	[k円/年]	
分解処理コスト (ネット)	有価物売却益を差引き後のネット単価	5.01	3.38	[円/W]	最終目標(5円/W)(40円/kg) に対し大きく上回り達成
		41.3	27.9	[円/kg]	

2.実用化見通し

本プロジェクト終了後の 2019 年から 5 年間は、工場からの歩留り落ち製品や市場不良品が主なりサイクル対象となるため、10MW/年の規模を有するリサイクル処理設備の投資計画を検討中である。その後、小規模工場における運転ノウハウを元に当社太陽電池の市場回収品が大量に発生すると想定される 2028 年頃までに、数百 MW スケールのリサイクル工場建設への投資を検討する。

3.波及効果

本プロジェクトの成果は、合わせガラス型パネルモジュールのリサイクルにおいて高い経済合理性を持つことが確認された。また加えて、特殊な工程を用いないことは、将来の結晶型シリコンモジュールに対する応用についても示唆された。

さらに現在廃棄されているセレン等レアメタルに関しても高い収率で回収が可能であることは、現在日本国内において約半数の生産量を誇る CIS 型太陽電池におけるキーマテリアルが水平リサイクルが可能であることを示しており、高性能で低コストの CIS 系太陽電池が永続的に市場に供給が可能となる。

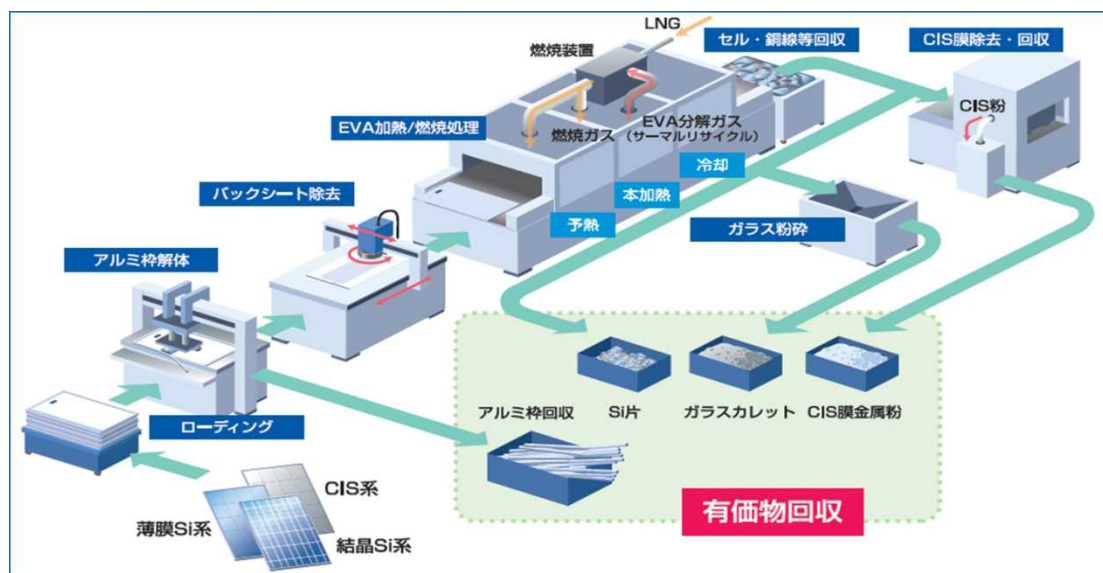
(5)PVシステム低コスト汎用リサイクル処理手法に関する研究開発(新菱)
【2015～2017年度】

1. 成果詳細

1.1 システム整備と装置立上げ

外部借用地での分解処理技術の研究開発を終えて、解体して倉庫保管していたリサイクル処理システムを実証工場内に設置し、リサイクル処理システムを稼働するために必要な電源・燃料ライン等を整備することで、実証プラントを構築した。

汎用リサイクル処理フローを図Ⅲ-2-③-(5)-1 に、工場全景を図Ⅲ-2-③-(5)-2 に、汎用リサイクル処理システム全景を図Ⅲ-2-③-(5)-3 に、サイクル処理システム配置図を図Ⅲ-2-③-(5)-4 に示す。



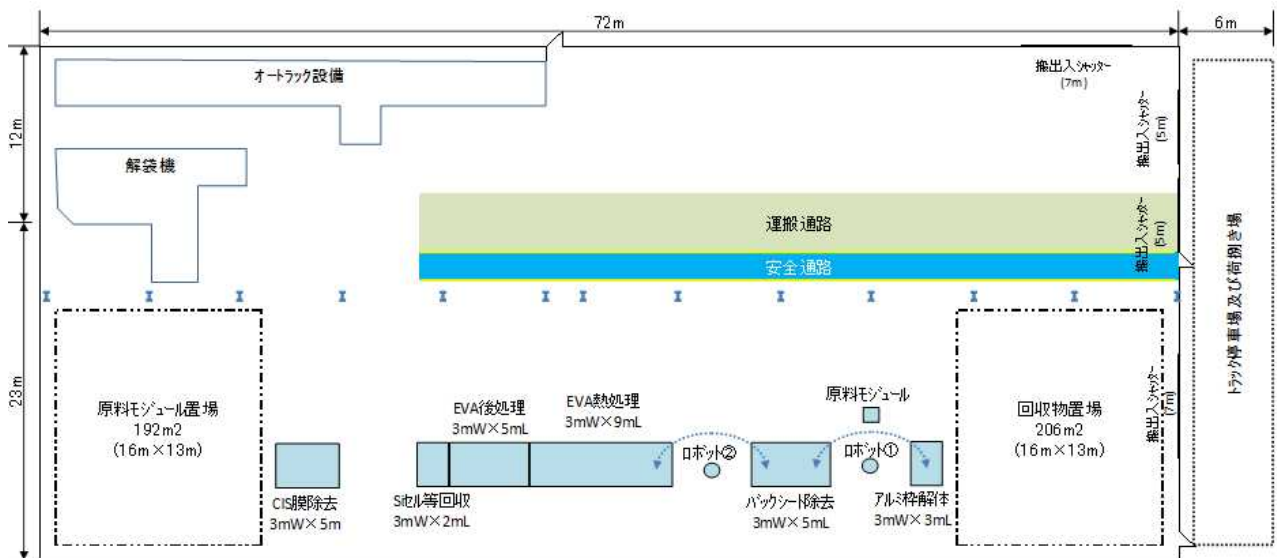
図Ⅲ-2-③-(5)-1 汎用リサイクル処理フロー



図Ⅲ-2-③-(5)-2 工場全景



図Ⅲ-2-③-(5)-3
汎用リサイクル処理システム全景



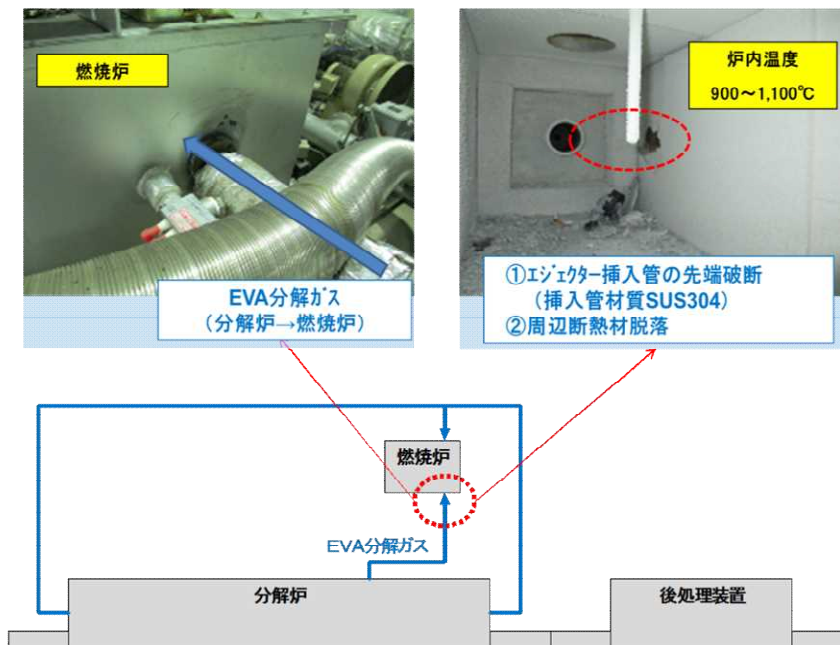
図Ⅲ-2-③-(5)-4 サイクル処理システム配置図

1.2 EVA 熱処理装置の長期信頼性・安定性・経済性の向上

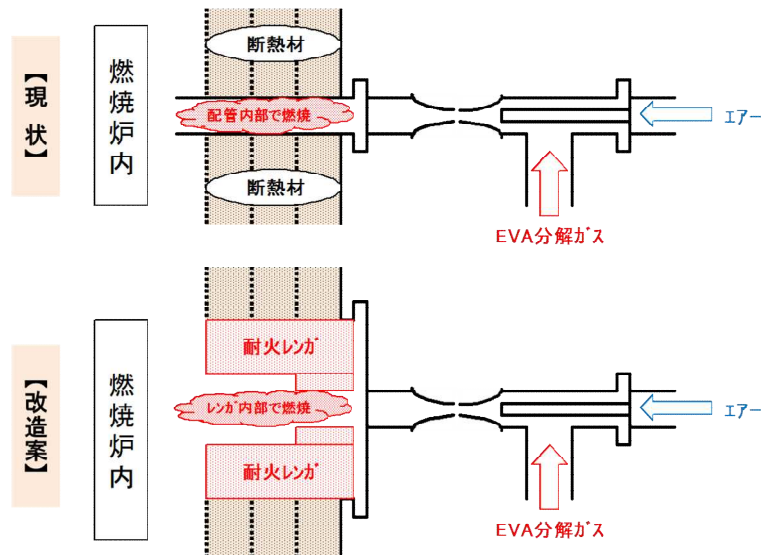
主要装置である「EVA 熱処理装置」は、既実施の NEDO プロジェクトの研究開発用として試作した装置で、長期信頼性・安定性及び経済性の向上に対する課題が残っていたので、この課題を解決するために以下の改造を実施し、連続処理試験でその性能評価を完了した。

1.2.1 エジェクター部の耐熱強化

燃焼炉の炉壁の貫通部を耐火レンガで構成するバーナー構造へ改造し、貫通部での EVA 分解ガスの燃焼に耐え得る耐熱性の向上を実現した。エジェクター部の概念図と改造前の不具合状況を図Ⅲ-2-③-(5)-5 に、改造後のバーナー構造の概念図を図Ⅲ-2-③-(5)-6 に示す。



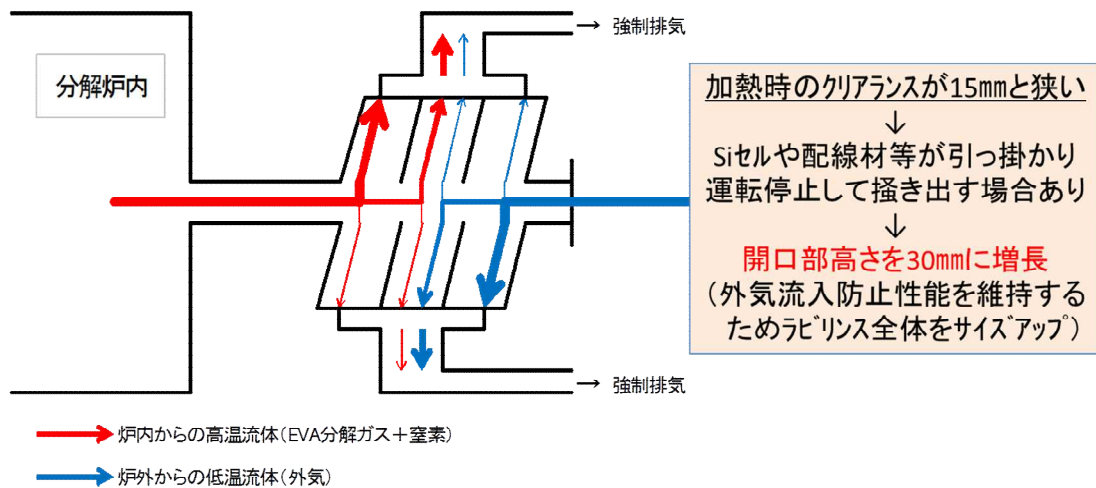
図Ⅲ-2-③-(5)-5 エジェクター部の概念図と不具合状況



図Ⅲ-2-③-(5)-6 バーナー構造の概念図

1.2.3 出口側ラビリンス開口高さ増長

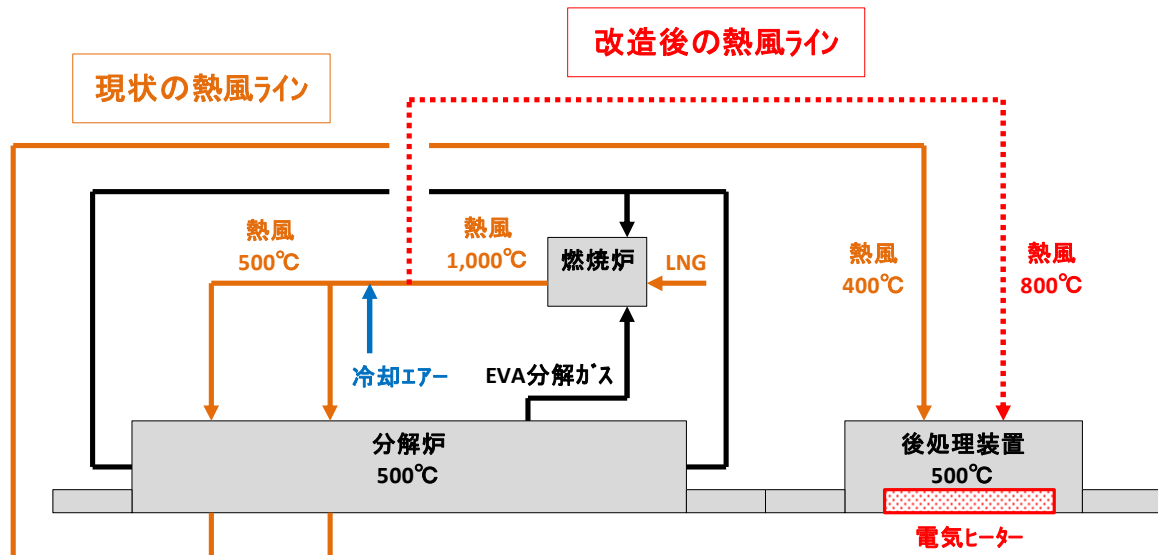
出口側ラビリンスの開口高さを 30mm に増長する改造を行い、Si セルや配線材及びバックシート切削残の引っ掛かりの防止を実現した。出口側ラビリンス開口高さ増長改造の概念図を図Ⅲ-2-③-(5)-7 に示す。



図Ⅲ-2-③-(5)-7 出口側ラビリンス開口高さ増長改造の概念図

1.2.3 後処理装置(大気炉)の加熱強化

電気ヒーターの使用電力を削減するために、より高温の 800℃の熱風を利用出来るように、熱風配管の系統を変更する改造を行い、後処理装置の加熱強化による経済性の向上を実現した。後処理装置(大気炉)の加熱強化改造の概念図を図Ⅲ-2-③-(5)-8 に示す



図Ⅲ-2-③-(5)-8 後処理装置(大気炉)の加熱強化改造の概念図

1.3 処理システム全体の実用性及び処理コスト評価

1.3.1 連続処理試験に供する CIS 系工場スクラップの調達

PV モジュールメーカーと契約を締結し、CIS 系工場スクラップを 15,000 枚調達した。またリサイクル処理システムへ投入するための前処理として、以下の処理を手作業で実施した。

- a) 電気ケーブルの切断
端子箱に接続している電気ケーブル 2 本を鋏で切断。
- b) アルミ枠固定ネジ外し
アルミ枠を固定しているネジ 8 本を電動ドライバーで取り外し。
- c) パレットへの積み付け
パレット 1 枚 당りに CIS モジュール 25 枚を積み付け。

CIS モジュール 15,000 枚の前処理に要した作業負荷は、「延べ 616 時間・人」である

1.3.2 リサイクル処理で得られた有価物売却先及び産廃物処理先の確保

リサイクル処理で得られた有価物の売却先及び産廃物の処理先と契約を締結した。有価物の売却先及び産廃物の処理先を表図Ⅲ-2-③-(5)-1 に示す。

表図Ⅲ-2-③-(5)-1 有価物の売却先及び産廃物の処理先

	品名	用途 処理方法	概略単価 (円/kg)	売却先 処理先
有価物	アルミ枠	アルミ	130	丸清
	カバーガラス	ガラスウール	2	西日本ガラスリサイクルセンター
	CIS 粉	インジウム	8,000	三菱マテリアル
	Si セル	銀	1,000	三菱マテリアル
産廃物	バックシート	焼却	35	丸清
	基板ガラス	破碎・選別	160	西日本ガラスリサイクルセンター

1.3.3 連続処理試験計画の策定及び予備試験結果

処理システム全体の実用性及び処理コストを実証するための連続処理試験計画を、以下のとおり策定した。

- ◆STEP.1 8 時間体制での連続処理試験
 - ・目的 : 各処理装置の耐久性確認、不具合摘出
 - ・運転員 : 3 名(直 2 名×1.5 直)

- ・処理時間 : 3日/週
(装置立上げ4時間～連続処理8時間～装置立下げ4時間)
- ◆STEP.2 24時間体制での連続処理試験
 - ・目的 : 処理システム全体の長期信頼性・安定性及び経済性の実証
 - ・運転員 : 4名(直2名×2直)
 - ・処理時間 : 5日/週
(装置立上げ4時間～連続処理24時間×4日～装置立下げ4時間)

上記の連続処理計画に基づき、先ずSTEP.1として8時間体制での連続処理試験を実施し、約1,000枚のCISモジュールの処理を行った。その結果、CISモジュールの処理レシピ及び各処理装置の不具合を摘出し、その改善を行うことで、STEP.2の24時間体制での連続処理試験に移行出来る体制を構築した。

a)アルミ枠解体工程の自動化

イ)ブチルゴムの糸引き切断治具の開発

糸を引いているブチルゴムを切断する治具を開発し、アルミ枠解体装置に組み込むことで、アルミ枠を完全自動で解体することが可能となった。

ロ)端子箱の解体方法の改善

端子箱に対して45度程度斜め方向から解体用治具を挿入することで、銅配線も切断することが出来るようになり、かつ解体後の端子箱もモジュール搬送用ロボットの操作で、専用回収容器に回収するように改善し、端子箱を完全自動で解体することが可能となった。このアルミ枠解体工程の自動化により、運転員3名(直1名×3直)の労務費削減効果を得た。

b)CISモジュールの処理レシピ改善

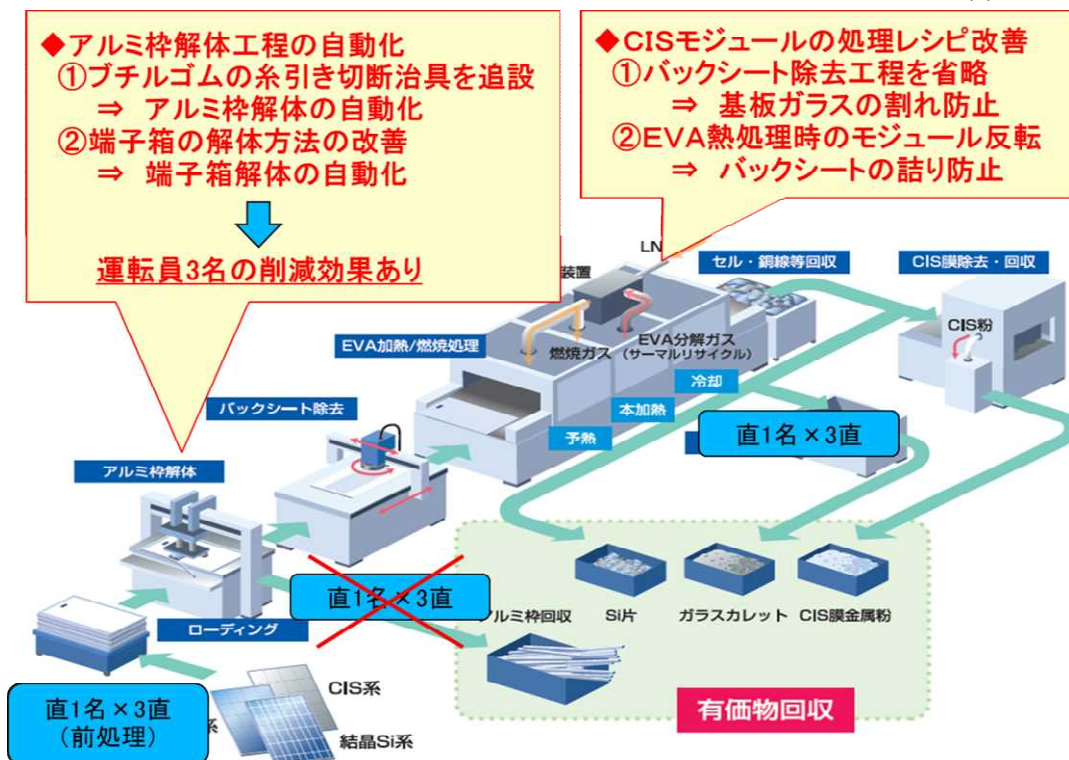
イ)バックシート除去工程の省略

EVA熱処理工程の処理温度及び処理速度を種々検討し、バックシート除去工程を省略することで、バックシート切削時の基板ガラスの割れを低減した。

ロ)EVA熱処理時のモジュール反転

バックシート面(EVA面)を下向きで熱処理を行うことで、モジュールの自重でバックシートの反り上がりを抑制し、出口側ラビリンス部へのバックシート詰りを防止した。このCISモジュールの処理レシピ改善により、CISモジュールの連続処理の安定化を実現した。

アルミ枠解体工程の自動化及びCISモジュールの処理レシピ改善の概念図を図Ⅲ-2-③-(5)-9に示す。



図Ⅲ-2-③-(5)-9 アルミ枠解体工程の自動化及びCISモジュールの処理レシピ改善の概念図

c)EVA 熱処理装置の耐久性不具合改善

前述の「1.2 EVA 熱処理装置の長期信頼性・安定性・経済性の向上」で実施した「1.2.1 エジェクター部の耐熱強化」改造効果で、数週間の安定運転が可能となったが、更に数ヶ月の連続運転を行うと、エジェクター部の破損トラブルが再発した。燃焼炉の炉壁(断熱部)を貫通する Si 材料の挿入管が熱破壊されてしまい、EVA 分解ガスが吸引出来なくなる不具合で、原因は EVA 分解ガスが燃焼炉に入る前に挿入管内で燃焼するためである。この挿入管内での燃焼が起こると、耐熱材質の挿入管でも長期耐久性が不足することが判明したため、挿入管内での燃焼を防止する抜本対策として、以下の 2 件の改善を行った。

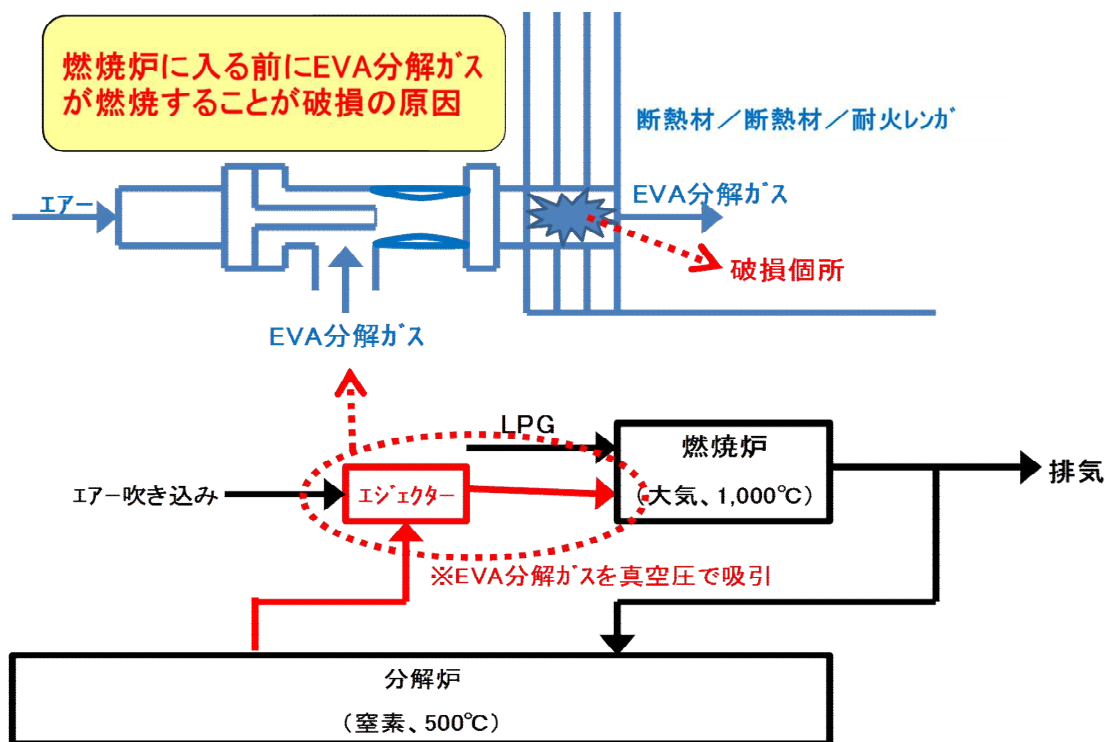
イ)エジェクターファンの能力 UP00

EVA 分解ガスの燃焼炉内への押し込みを強化するために、エジェクターファンを更新し、エジェクターの駆動源であるエアーの圧力及び流量を増加した。この改善効果で挿入管内での燃焼発生頻度は減少したが、ゼロにすることは出来なかった。

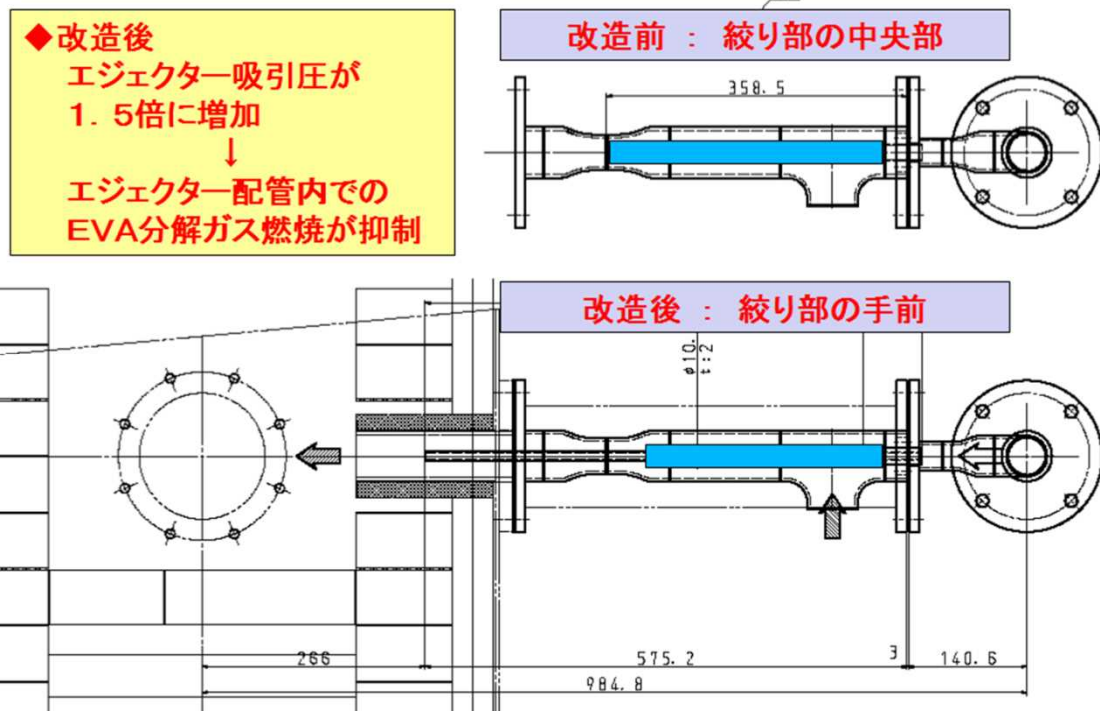
ロ)エジェクターエアーノズルの長さ調整

更なる改善として、エジェクターエアーノズルの長さを種々検討した結果、エジェクターの絞り部の手前にエアーノズルの先端部が一致する長さが最適で、エジェクター吸引圧が改善前の 1.5 倍に増加し、挿入管内での燃焼を防止することが可能となった。

エジェクター挿入管の破損原因を図Ⅲ-2-③-(5)-10 に、エジェクターエアーノズルの長さ調整の概念図を図Ⅲ-2-③-(5)-11 に示す。



図Ⅲ-2-③-(5)-10 エジェクター挿入管の破損原因



図Ⅲ-2-③-(5)-11 エジェクターエアノズルの長さ調整の概念図

d) CIS 除膜装置の耐久性不具合改善

CIS モジュールの基板ガラスを約 1,000 枚処理した時点で、モーターとブラシユニット取付用シャフトの連結部が破断するトラブルが発生した。この改善として、応急策ではあるが全 6 本のシャフト及び連結部カップリングを更新すると共に、ガラスへの押し付け圧を低くして振動を低減することとした。ただし研磨 1 回当たりの CIS 膜除去効率率は低下するので、研磨回数を増やすことで改善前と同様の CIS 膜除去率を確保した

1.3.4 連続処理試験による実用性及び処理コスト実証結果

前述の連続処理試験計画に基づき、STEP.2 として 24 時間体制での連続処理試験を実施し、約 14,000 枚の CIS モジュールの処理を行った。連続処理試験は、「週 4~5 日×31 週」実施し、以下の成果を得た。

a)各処理装置の実用性実証結果

イ)アルミ枠解体装置

前述の改善効果で、全自動化及び長期信頼性・安定性を実証した。またスループットは「年間 25MW」であり、年間 200MW 処理時の 1 ライン相当であることも実証した。

ロ)バックシート除去装置

今回の連続処理試験では、CIS モジュールの処理レシピ改善によって未使用であったが、既実施の NEDO プロジェクトで数千枚の処理を実証済みである。また本装置のベースは、平面切削加工機で多種市販されている機械であり、長期信頼性・安定性も充分であると判断している。なおスループットは「年間 25MW」であり、年間 200MW 処理時の 1 ライン相当である。

ハ)EVA 熱処理装置

前述の改善効果で、長期信頼性・安定性を実証した。ただし現有装置は、エジェクターラインが 1 系統しかなく、運転を停止して定期清掃を行う必要があるため、年間 300 日稼働となる。経済性の面から更なる稼働率 UP を図るには、エジェクターラインを 2 系列有して、運転中に切り替えながら定期清掃を行うことが有効であり、この場合は年間 350 日稼働となる。なおスループットは「CIS モジュールで年間 6.5MW、結晶 Si モジュールで年間 10.7MW」であり、年間 200MW 処理時の 1 ライン相当である「CIS モジュールで年間 25MW」とするには、装置長さ(炉長)の約 3.3 倍増及びエジェクターラインの 2 系列化による稼働率 UP が必要である。

ニ)CIS 膜除去装置

前述の改善効果で、長期信頼性・安定性を実証した。ただし現有装置は、既実施の NEDO プロジェクトで開発した試作機で装置剛性が不足しており、新規製作する場合は、装置架台や各シャフトのサイズ UP による装置全体の剛性向上は必要である。なおスループットは「年間

25MW」であり、年間 200MW 処理時の 1 ライン相当であることも実証した。

b)処理コスト実証

イ)連続処理試験で得られた実証データ

24 時間体制の連続処理試験で以下の実証データを得た(表Ⅲ-2-③-(5)-2)。

表Ⅲ-2-③-(5)-2 24 時間体制の連続処理試験で得られた実証データ

処理物	CIS モジュール(未使用品) <ul style="list-style-type: none"> ・ 寸法 : 1,257mm×978mm×35mmH ・ 出力、重量 : 150W/枚、20kg/枚 ・ 主要部材構成 : <ul style="list-style-type: none"> カバーガラス 9.3kg/枚 基板ガラス 5.3kg/枚 アルミ枠 2.2kg/枚 バックシート 1.5kg/枚 CIS 膜 12g/枚
スループット	アルミ枠解体 : 20 枚/時間 EVA 熱処理 : 6 枚/間 CIS 膜除去 : 20 枚/時間
消耗品	フレコンバック : 1 枚/3 日
消費電力量	アルミ枠解体 : 2.3kWh EVA 熱処理 : 16.7kWh CIS 膜除去 : 2.0kWh
LPG 消費量	EVA 熱処理 : 0.8Nm3/時間
作業負荷	モジュール前処理 : 1 人役 CIS 膜除去 : 1 人役
ガラス割れ発生率	基板ガラス : 21%
メンテナンス頻度	EVA 熱処理装置のエジェクター部への付着物除去作業が定期的に必要である。 作業内容は、以下の 2 種類である。 ①空焼き(装置の「降温～昇温」は不要) <ul style="list-style-type: none"> ・ 実施頻度 : 1 日毎 ・ 作業時間 : 4 時間 ②分解清掃(装置の「降温～昇温」が必要) <ul style="list-style-type: none"> ・ 実施頻度 : 1 週間毎 ・ 作業時間 : 10 時間 ※ただし前述のとおり、エジェクターラインを 2 系列化して切り替え出来るように改造すれば、上記①②の作業が運転を停止せずに実施可能となる。

ロ)年間 200MW 処理時の処理コスト試算結果

年間 200MW 処理時の処理コスト試算の前提条件として、手作業が必要な廃モジュールの前処理(電気ケーブル切断、アルミ枠固定用ネジ外し、パレット積み付け)及び CIS 膜除去工程の労務負荷を勘案して、運転員 2 名で対応可能なスループットは 20 枚/時間(1 系列当り)とし、その処理ラインを 8 系列配置することとした(表Ⅲ-2-③-(5)-3)。また建屋及び各処理装置は、新設ベースで処理コストを試算した。

表Ⅲ-2-③-(5)-3 年間 200MW 処理時の処理コスト試算の前提条件

処理物	CIS モジュール <ul style="list-style-type: none"> ・ 出力 : 150W/枚 ・ 重量 : 20kg/枚
スループット	20 枚/時間(1 系列当り) ※年間 25MW 相当
稼働日数	350 日/年
処理設備	①建屋 <ul style="list-style-type: none"> ・ 新設ベース

	<ul style="list-style-type: none"> ・約 7,500m² ②装置 <ul style="list-style-type: none"> ・新設ベース ・年間 25MW×8 系列
運転要員	52 名 <ul style="list-style-type: none"> ①管理者 <ul style="list-style-type: none"> ・プラント運営全般管理 ・管理職 1 名(8 時間勤務) ②班長 <ul style="list-style-type: none"> ・プラント運転管理、デリバリー担当 ・社員 3 名(12 時間勤務、直 1 名×3 直) ③運転員 <ul style="list-style-type: none"> ・プラント運転 ・パート 48 名(12 時間勤務、直 2 名×3 直×8 系列)

CIS モジュールの年間 200MW 処理時の処理コストを試算した結果、当初計画に対して基板ガラス割れ発生によって産廃処理費(最終処分費)が上昇したが、前述のアルミ枠解体工程の完全自動化による労務費削減効果及び処理レシピ改善による消耗品(材料費)削減効果でカバーし、有価物売却益を差引き後の処理コスト(ネット)が 3.7 円/W となり、最終目標 5 円/W 以下を実証した(表Ⅲ-2-③-(5)-4)。

表Ⅲ-2-③-(5)-4 CIS モジュールの年間 200MW 処理時の処理コスト試算結果

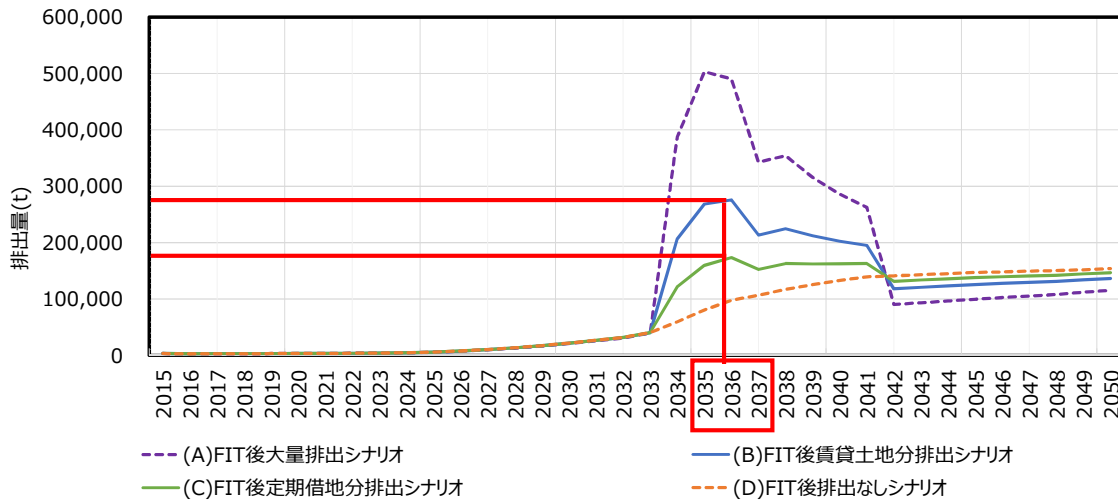
項目	現状試算	単 位	算出式
年間処理量	1,332,800 200,000,000 26,656,000	[枚/年] [W/年] [kg/年]	① 150W=1 枚 ①' 20kg=1 枚 ①''
処理費用			
材料費	0	[千円/年]	
光熱水費	47,247	[千円/年]	
人件費	148,976	[千円/年]	
設備費	645,336	[千円/年]	
土地・建物費	25,800	[千円/年]	
最終処分費	375,245	[千円/年]	
合 計	1,242,604	[千円/年]	②
分解処理コスト(グロス)	6.21	[円/W]	②/①'
※有価物売却益を差引き前	46.6	[円/kg]	②/①''
有価物売却益	505,327	[千円/年]	③
分解処理コスト(ネット)	3.69	[円/W]	②-③/①'
※有価物売却益を差引き後	27.7	[円/kg]	②-③/①''

【定義】

- *材料費 : 薬品費など
- *光熱水費 : 電力費、水使用費など
- *人件費 : 作業員費など
- *設備費 : 設備償却費、保守費、交換部品費など
- *土地・賃借費 : 土地・建物の賃借料など
- *最終処分費 : 埋立処分費など
- *有価物売却益 : 回収されるアルミやガラス、銀など有価物の売却益

2.実用化見通し

本研究で長期信頼性・安定性及び経済性を実証したリサイクル処理システムのスループットに相当する量の廃 PV パネルが発生する時期は数年後と予想される(図Ⅲ-2-③-(5)-11)。



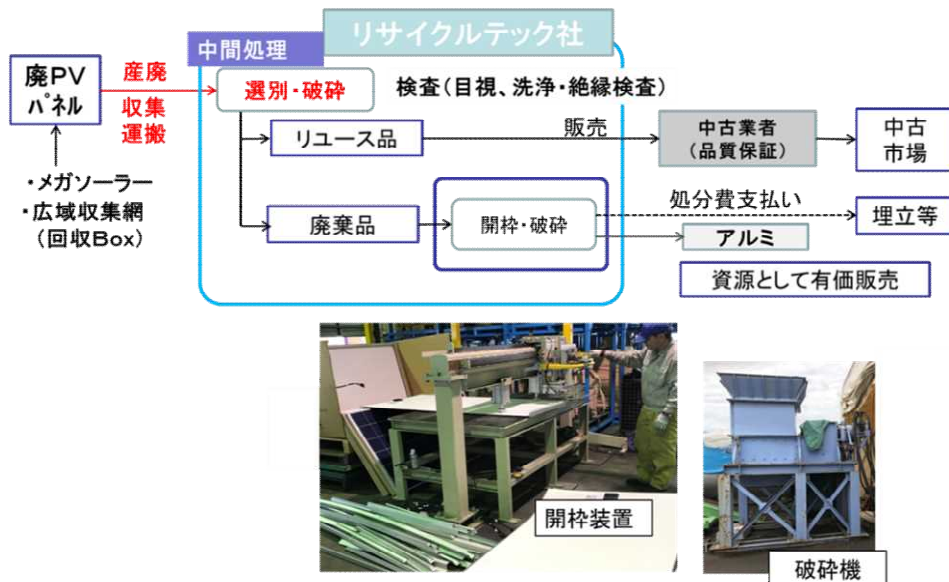
出典)第10回総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会/電力・ガス事業分科会
再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会

図Ⅲ-2-③-(5)-11 廃 PV モジュールの発生量予測

また現状では廃 PV パネルは産業廃棄物となっており、廃 PV パネルの収集及び処理を事業として行う際は、現行法に適用した法対応が必要となる。これらの状況を踏まえて、我々は以下の 2 ステップで PV リサイクルの事業化に取り組んでいく計画である。

◆STEP.1 産業廃棄物処理事業(破砕)をスタート

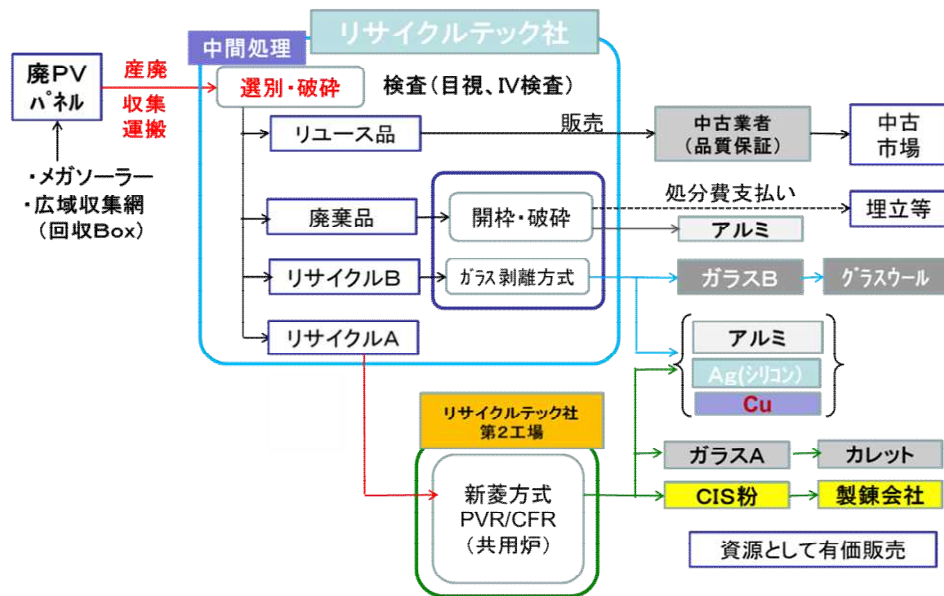
当社子会社(株式会社リサイクルテック、北九州市エコタウン内)で少量発生する廃 PV パネルの産廃処理事業(破砕)を 2019 年 4 月からスタートさせる(図Ⅲ-2-③-(5)-12)



図Ⅲ-2-③-(5)-12 産廃処理事業(破砕)スキームのイメージ

◆STEP.2 EVA 熱処理装置の産業廃棄物処理施設の認可取得

廃 PV パネル発生量の増加に応じて、EVA 熱処理装置を一部改造した後に、産廃処理施設(廃プラ焼却)としての認可を取得し、本リサイクル処理システムでの事業をスタートさせる(図Ⅲ-2-③-(5)-13)。



図III-2-③-(5)-13 本リサイクル処理システムでの事業スキームのイメージ

3.波及効果

3.1 技術的効果

EVA 熱処理技術は炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の樹脂除去に応用可能であり、炭素繊維リサイクル処理技術開発に貢献している。

3.2 経済的効果

PV リサイクル処理のバリューチェーンに属する下記業界の事業拡大に貢献出来る。

- ・ 物流業者 : 廃 PV モジュールの回収、回収物の運搬
- ・ 非鉄精錬業者 : 回収アルミ及び Si セル、CIS 粉の売却先
- ・ ガラスメーカー : 回収ガラスの売却先

3.3 社会的効果

将来必ず大量発生する廃 PV モジュールを埋立て処理することなく、リサイクル処理により資源有効利用を促進して地球環境負荷を下げ、持続可能社会実現に貢献出来る。

④太陽光発電リサイクル動向調査

(1)太陽光発電リサイクルにおける国内外動向および評価手法に関する調査(みずほ情報総研)

【2014～2018 年度】

1.成果詳細

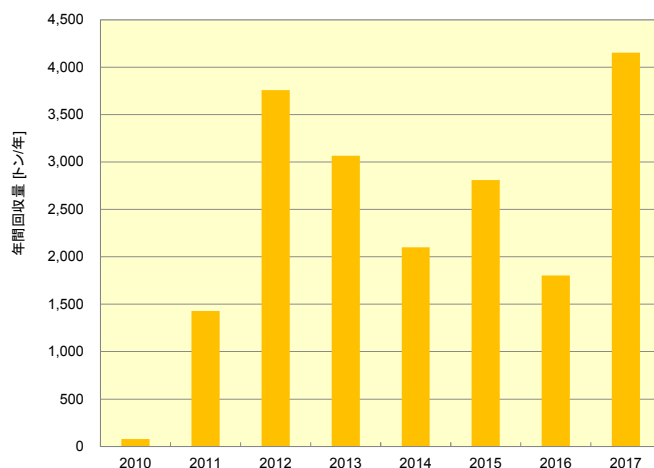
1.1 海外における使用済み太陽電池モジュールに関する動向調査

a)太陽電池モジュールリサイクルに関する政策・市場動向

<欧州>

欧州では WEEE 指令が 2012 年に改正され、太陽電池モジュールが同指令の対象に加えられた。これにより、当初 3 年間は回収したモジュールからの資源回収率：75%、リサイクル率：65%という義務が課せられ、その後 3 年間(～2018 年 8 月 14 日)は資源回収率：80%、リサイクル率：70%、さらにその後(2018 年 8 月 15 日～)は資源回収率：85%、リサイクル・リユース率：80%となる^{Ⅲ-2-④-(1)-(a)-1}。また、市場からの廃棄物回収率として、2015 年までは 1 人あたり 4kg あるいは過去 3 年間の平均廃棄物発生重量、2016 年からは過去 3 年間の平均販売重量の 45%、2019 年からは廃棄物発生重量の 85%あるいは過去 3 年間の平均販売重量の 65%という義務が課せられる。改正 WEEE 指令に基づく実際の運用・管理は EU 各国内の規制に委ねられることとなっており、同指令では、2014 年 2 月 14 日までに対応する国内法を整備することを要求した。指定期日までに法整備を行うことができなかった国が多いが、これまでにほぼ全ての国で新たな国内法が施行されている。

図Ⅲ-2-④-(1)-1 は、WEEE 指令改正以前から欧州の使用済み太陽電池モジュールの回収・リサイクルスキームを構築・運営している PV CYCLE による使用済みモジュールの年間回収量の推移である。2010 年 6 月に回収を開始し、2011 年は約 1,430t を回収し、2012 年には大きく増加し約 3,760t、その後、減少傾向が見られたが、2017 年は 4,153t と再び増加し、2017 年末までの累積回収量で 19,195t であった。回収された太陽電池モジュールは、Si 系はガラスリサイクルプラントにて破碎・分別し、ガラスを回収した後、他のリサイクル業者にて金属回収等が行われ、薄膜化合物系は化学的処理によりガラスや原料金属の回収が行われる。改正 WEEE 指令に対応する各国法が施行され、欧州の各地で太陽電池モジュールのリサイクル・リユースを行う企業が増加してきている中、PV CYCLE も欧州一律のスキームから各国の制度や仕組みに応じたスキームに転換し、欧州内主要国への Country office の設立と既存機関との連携を推進し、その国の制度に適合したサービスを提供する体制に移行している。



図Ⅲ-2-④-(1)-1 PV CYCLE による太陽電池モジュール年間回収量の推移^{Ⅲ-2-④-(1)-(a)-2～7}

WEEE 指令の改正に関連する動向として、CENELEC(欧州電気標準化委員会)において、電気・電子機器の使用後処理の標準化に関する議論が開始され、太陽電池モジュールも対象製品の一つとなっている。一般的な要求事項である EN50625-1 は 2014 年に発効されており、その時点で太陽電池モジュールも対象として含まれていたが、個々の製品・廃棄物の特性に応じた要求事項として、「EN 50625-2-4: Specific Requirements for the treatment of Photovoltaic Panels」および「Technical Specification TS 50625-3-5: Depollution requirements for Photovoltaic Panels」が策定され、2017 年秋に公表された。その概略を表Ⅲ-2-④-(1)-1 に示す。

<p><目 的></p> <ul style="list-style-type: none"> ・汚染防止と排出物最小化 ・リサイクルの促進 ・高品質な回収処理の促進 ・不適切な廃棄の防止、人間・環境への悪影響防止の保証 ・不適切な処理につながる移送の防止 <p><要求事項></p> <ul style="list-style-type: none"> ・取り扱い、保管段階における注意の喚起(ガラス破損、感電など) ・Si系と非Si系の区別 ・鉛、その他有害廃棄物(非Si系の場合)の分離・除去 ・Si系と非Si系の区別ができない場合は、非Si系のための処理技術を適用 ・有害廃棄物含有濃度を低減するための希釈、他物質との混合等の禁止 ・ガラス混合物中の有害廃棄物含有濃度の上限 -鉛 : 100 mg/kg(乾重量) -カドミウム : Si系 1 mg/kg(乾重量)、非Si系 10 mg/kg(乾重量) -セレン : Si系 1 mg/kg(乾重量)、非Si系 10 mg/kg(乾重量)

<米国>

米国では、現時点において太陽電池モジュールリサイクルのための国としての具体的な施策は講じられていないが、州レベルの取組みが進み始めている。

カリフォルニア州では、州法のもと、有害廃棄物に相当する太陽電池モジュールを使用後に未処理のまま廃棄すること禁じるとともに、Universal Wasteとして指定しているⅢ-2-④-(1)-(a)-10。Universal Wasteは、有害廃棄物ではあるが、広く普及しており、他の有害廃棄物と比較して相対的にリスクは小さく、適切な使用後処理が施されることを前提とし、有害廃棄物としての厳粛な管理要求を軽減できる。

ワシントン州では、再生可能エネルギー導入を促進するための制度(税額控除等)が改正され、再生可能エネルギー機器のリサイクルが要求されることとなり、ワシントン州内で太陽光発電を供給・販売する事業者に対し、使用済みモジュールの回収・リサイクルが求められるⅢ-2-④-(1)-(a)-11。

ニューヨーク州では、使用済み太陽電池モジュールの回収を販売業者に義務付ける州法の議会審議が行われており、上院議会で可決され、現在は下院での審議を待っている状況にあるⅢ-2-④-(1)-(a)-12。

一方、米国の太陽エネルギー産業協会(SEIA : Solar Energy Industries Association)は、2016年9月より、National PV Recycling Programを開始しているⅢ-2-④-(1)-(a)-13。将来の大量廃棄を見越した取り組みで、プログラムの第1フェーズでは、参加企業間での回収ネットワーク構築と情報交換の場作り、第2フェーズで既存リサイクル技術の向上のための研究開発を実施し、その後SEIA会員企業共用のリサイクル施設への投資を計画している。同プログラムでは、選定したパートナー企業とSEIAの間でContractを締結し、共同での取り組むことを想定しており、これまでに、GREEN CENTURY RECYCLING、CLEANLITES、First Solar、DYNAMIC、Echo Environmentalがパートナー企業として選定されているⅢ-2-④-(1)-(a)-14。また、州政府からの問合せへの対応、情報交換等も積極的に実施しており、各州の制度に応じた仕組みの確立を支援していくことを目指している。

このほか、NSF Internationalは、太陽電池モジュールのライフサイクルの様々な側面における情報の開示を求め、達成状況によりランキングを行うためのSustainability Leadership Standard for Photovoltaic ModulesⅢ-2-④-(1)-(a)-15を策定し、公表した。ランキングのための指標(Criteria)はRequired criteria(達成が必須なもの)とOptional criteria(加点の対象となるもの)に分けられ、使用後処理に関するCriteriaは以下の三つである。

- ・ Required criteria : 使用済み製品を回収するサービスを提供すること
- ・ Optional criteria : 回収製品からの資源回収・リサイクル、リユースの実績を公開すること
- ・ Optional criteria : 回収製品からの資源回収率の達成度

<その他の国々>

中国では、第12次5ヶ年計画のもと、太陽電池モジュールリサイクル等に関して今後、実施・推進すべき施策に関する検討が実施され、リサイクル実施の制度化、制度運用のための第三者機関の設立、リサイクル技術の標準化、ガイドラインの制定などが提案された。その後、National Renewable Energy

R&D Plan(2018-2022)において、リサイクル技術開発の推進とともに、太陽電池モジュールリサイクルに関するロードマップを策定するという方向性が示されたⅢ-④-(1)-(a)-16。

韓国では、太陽電池モジュールリサイクルセンターの設立に向けた取組みが開始されているⅢ-2-④-(1)-(a)-17。使用済み太陽電池モジュールを収集、処理する拠点(リサイクルセンター)を構築し、国内で発生する使用済み太陽電池モジュールの適正処理の推進を目的としている。また、使用済み太陽電池モジュールの回収・リサイクルの義務化に向けた議論も開始されている。

b)太陽電池モジュールリサイクルに関する技術動向

<EUによる技術開発プロジェクト>

欧州では現在、使用済みとなった Si 系太陽電池モジュールのリサイクル処理は主としてガラスリサイクル会社により行われているが、EU では、今後の使用済み太陽電池モジュールの大量発生に対応するため、様々な技術開発プロジェクトを実施してきている。それらの概略を表Ⅲ-2-④-(1)-2 に示す。

表Ⅲ-2-④-(1)-2 EUによる太陽電池モジュールリサイクル技術開発プロジェクト

Cu-PV(※1)Ⅲ-2-④-(1)-(a)-18~21	結晶 Si 太陽電池モジュール製造における Si 消費量、エネルギー消費量、銀消費量の使用量を低減するとともに、リサイクル性を高めるモジュール構造に関する研究開発である。「充填材としての熱可塑性プラスチックの利用」、「フレーム装着・固定方法の改善」を提案しているほか、フレーム除去後のモジュール分解について、「加熱(120℃)による充填材軟化」→「裏面ホイル除去」→「加熱温度上昇(200℃)」→「Wire-Saw による充填材切断」→「セル・ガラスの分離回収、洗浄」という手順を提案している。
FRELP(※2)Ⅲ-2-④-(1)-(a)-22~24	結晶 Si 太陽電池モジュールから高品位なガラスや金属を回収し、リサイクル率 100%の実現を目指すもので、赤外線を用いる処理により、ガラスと EVA の接着界面を軟化させた後、機械的にガラスのみを粉砕・回収し、残存物の熱分解・酸処理等によって、油分、Si、他の金属等の回収を目指すものである。
PV Mo.Re.De(※3)Ⅲ-2-④-(1)-(a)-25~26	使用済み太陽電池モジュールの分解処理を太陽光発電サイトにおいて実施するためのモバイル装置の開発を目指している。「フレーム除去・モジュール裁断」→「ガラスの分離」→「残存物の粉砕」→「セル・プラスチックの分離」という工程から構成され、従来と比較して、40%程度の処理コストの低減が期待されている。
RECLAIM(※4)Ⅲ-2-④-(1)-(a)-27~28	使用済みの CIGS 太陽電池モジュールや液晶パネル、プリント基板等からの貴金属を回収する技術開発で、インジウム、ガリウム等の貴金属の回収率 95%、回収金属純度 99.99%を掲げている。 アルミフレームを除去した後、モジュールを破砕し、CIGS 層の少ないガラス片(カバーガラス)を選別・回収、残存ガラスをさらに粉砕し、CIGS 含有量の多いガラス片(EVA 付着)を選別、ダストを回収する。回収したガラス片を硫酸・過酸化水素を用いた薬液に浸漬し、CIGS 層を溶解させ、抽出・吸着剤および塩酸を用い、モリブデン、インジウムおよびガリウムを回収する。
PhotolifeⅢ-2-④-(1)-(a)-29~31	異なる種類の使用済み太陽電池モジュールを同時にリサイクルする技術の開発を目指している。シュレッダーで破砕した混合片を粒度によって分別後、可搬型のパイロットプラントで湿式精錬法によって有価金属を回収し WEEE 指令の資源回収率を達成する技術の開発を目指している。
CABRISS(※5)Ⅲ-2-④-(1)-(a)-32~37	太陽電池モジュールリサイクルの循環経済を確立することを目的とし、①使用済みモジュールおよび太陽電池廃棄物の回収、②構成要素の分離・分解(→ガラスはガラス産業へ)、③シリコンおよびその他回収金属の精製(高純度化)、④回収・精製シリコンを利用したウェハの作製⑤同ウェハの太陽電池セルへの再生⑥再生セル、および回収・精製金属のモジュールへの適用(あるいは他の金属原料)といったコンセプトを掲げている。10t の使用済み太陽電池モジュールの収集を想定し、ガラスやセル、金属の回収、ウェハ・セルとしての再生などの要素技術の開発を実施することとしている。ダイヤモンドソーにより Si インゴットをスライスする際のカーフロスから太陽電池セルを製造可能なインゴット・ウェハを製造する技術の開発や、リサイクルされた低純度シリコンを支持材として用いた太陽電池セルの製造方法などの研究が進められている。
ELSi(※6)Ⅲ-2-④-(1)-(a)-38~39	使用済み結晶 Si 太陽電池モジュールに含まれる全ての材料を回収し、再生・再利用する仕組みづくりを目指している。分解処理は、フレームとケーブル類を除去し、裁断したモジュールを、低酸素雰囲気反応容器内で熱分解することにより、太陽電池モジュールに含まれる EVA 等のプラスチックを除去するもので、90%のリサイクル率を達成することを掲げている。2018 年 9 月にドイツにパイロットプラントを竣工している。

- ※1 : Cradle-to-cradle sustainable PV modules
- ※2 : Full Recovery End-of-Life Photovoltaic
- ※3 : Photovoltaic panels Mobile Recycling Device
- ※4 : Reclamation of Gallium, Indium and Rare-earth Elements from Photovoltaics, Solid-State Lighting and Electronics Waste
- ※5 : Implementation of a Circular economy Based on Recycled, reused and recovered Indium, Silicon and Silver materials for photovoltaic and other applications
- ※6 : Industrial scale recovery and reuse of all materials from End of Life Silicon-based photovoltaic modules

<企業による取り組み>

First Solar、Loser Chemie、Veolia などの企業も太陽電池モジュールリサイクルの技術を開発している。CdTe 太陽電池製造企業である First Solar は、各製造拠点にリサイクルプラントを配備し、太陽電池モジュールのリサイクル処理を自ら手掛けている^{III-2-④-(1)-(a)-40}。リサイクルプラントの基本的な処理技術は、太陽電池モジュールをシュレッダーおよびハンマーミルにより粉砕し、薬液処理を行うものである。最初のプラント(Version-1)は 2006 年に導入され、その後、2011 年より技術改良を加えた Version-2 が導入されている。現在、ドイツでは Version-1 が稼働しているが、マレーシアでは Version-2 が稼働している。米国およびベトナムでは、さらなる改良を加えた Version-3 が 2015 年より稼働を開始している。Version-1 の処理能力は 10t/日(現在は 20t/日に拡張)、Version-2 は 30t/日である。Version-1 および Version-2 はバッチ式であるが、Version-3 は連続処理方式で年間通じた処理が可能となり、処理能力も 150t/日と拡張している。これにより、処理効率および回収金属の純度を高め、既存の有害物質処理よりも安価なコストを実現するとしている。

Loser Chemie はドイツに位置する化学系企業で、有する技術の応用および事業範囲の拡大を狙い、太陽電池モジュールのリサイクル技術を手掛けている^{III-2-④-(1)-(a)-41}。ダブルガラス構造の分解は、ラミネーションされた太陽電池モジュールに対して、特定波長のレーザー照射、あるいは FLA ランプの照射によって、発電層(金属)と EVA の接着界面を軟化させ、二枚のガラスを EVA/透明導電膜(TCO 等)付のガラスと発電層と電極が蒸着されたガラスに分離する技術の開発を手掛けている。シングルガラス構造、およびダブルガラスの外側にプラスチック層を有する構造のモジュールは、Water jet にてプラスチック層を除去する技術が開発されている。バックシートはプラスチックとして回収、EVA/cell/EVA 層は薬液処理にて EVA および各種金属に分離・回収される。レーザー照射、あるいは FLA にて分離された薄膜化合物太陽電池モジュール基板、および Water jet にて分離された結晶 Si モジュールの EVA/cell/EVA 層には薬液処理が施され、前者は半導体金属とガラス基板、後者は各種金属が回収される。Loser Chemie は当初、薄膜化合物太陽電池モジュールのリサイクル事業を立ち上げる予定としていたが、ニーズが小さいことから、結晶 Si モジュールリサイクル事業を優先的に立ち上げることを目指しており、2019 年秋頃の試験運転開始を想定している。また、回収した Si、ならびに Si セル製造段階で発生する廃シリコンをターゲット材として再生するプラントを立ち上げている。

フランスの Veolia 社は、使用済み結晶 Si 太陽電池モジュールの分解処理プラントをフランス南部に建設し、2018 年より運転を開始している^{III-2-④-(1)-(a)-42}。処理技術の詳細は明らかではないが、アルミフレーム・端子ボックスを除去した後、モジュールを裁断し、粉砕・選別工程を経て、分解した太陽電池モジュール構成材料を回収する。回収率は 95%とされている。現在の処理能力は 1,400t/年程度であるが、2021 年までに 4,000t/年への処理能力拡張を想定している。

<その他の国々>

中国や韓国では、結晶 Si セルを Si 原料あるいは Si ウェハとして再利用するための技術が注目されている。

中国では、国立の研究機関：中国科学院电工研究所(Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Science(IEE CAS))と太陽電池製造企業、研究機関の協力による結晶 Si モジュールリサイクル技術の基礎的な研究が実施されてきた^{III-2-④-(1)-(a)-16}。そして、第 13 次 5 ヶ年計画下で実施される National Science and Technology Plan において、太陽電池モジュールリサイクルに関する技術開発プロジェクトが発足した。

韓国においても、KIER(Korea Institute of Energy Research)が中心となり、結晶 Si 太陽電池モジュールを対象とし、燃焼による太陽電池セルの回収と再生、各種金属資源の回収・リサイクルを手掛けている。表面ガラス、EVA(裏面側)への切り込み(Patterning)を入れることで、セルを破碎せずに回収可能となることが確認されており、薬液処理による太陽電池セルからの各種金属回収、ならびに Si ウェハとしての再生も試みている。いずれの金属も 90%以上の回収率が確認されており、再生ウェハから作製した Si セルは、新品ウェハを用いたセルと同程度の効率が実現されている^{III-2-④-(1)-(a)-17,43}。

1.2 太陽光発電リサイクルに関する評価手法の検討

a) 評価手法・指標の検討

開発技術の評価の側面として、経済的側面、社会的側面、環境的側面があるが、本評価では、経済的側面に含まれる社会全体の費用低減効果、ならびに社会的・環境的側面を対象とした。そして、社会全体の費用低減効果は、社会的側面の評価として実施した。

技術導入による効果の評価に際し、当該技術が無い場合の技術をベースラインとして考えることが一般的であるが、本技術開発プロジェクトで開発されるリサイクル技術の評価に際しては、現在の廃棄・リサイクルの状況を加味したベースラインを考慮するのではなく、評価対象となる開発技術についての評価範囲を揃え、それらの結果を比較可能としておくことが重要であると考えられる。ただし、各開発技術の評価を実施する場合には、リサイクルを行わないことをリファレンスとし、効果を算定した。

評価の手法・指標に関し、環境的側面の評価項目として、エネルギー消費、地球温暖化、光化学オゾン生成、酸性化、富栄養化、人間毒性、資源枯渇、廃棄物の影響領域が挙げられる。これらの影響領域は、ライフサイクル範囲における検討が必要な領域と特定サイトでの排出量・消費量を検討することが有効な領域があると考えられるが、本評価では、廃棄物については特定のサイトにおける影響として評価するものとし、他の項目はライフサイクルを考慮した評価を行うものとした。また、通常のライフサイクル評価では、リサイクルによる効果は、使用済み製品を排出する側とリサイクル材を使用する側で分け合うことになるが、リサイクル技術の評価にあたっては、リサイクルに係る効果の全てを考慮すべきと考えられる。

社会的側面の評価に関しては、環境的側面の評価に比べ、グローバルには評価軸が定まっていない面が多いが、本評価では、まず、社会全体の費用回避ポテンシャルを取り上げることとした。社会全体の費用回避ポテンシャルは、リサイクルによって社会全体で支払いが不要となった費用に相当する。ここでは、処理場における埋立費用の削減効果、および再生材利用による新規資源調達費用の削減効果を対象とした。また、定性的な検討項目として、静脈産業の振興、地域貢献の効果、技術の波及効果を取り上げることとした。

評価の単位については、太陽光発電分野の評価では、製品製造等に係る評価において出力あたりという単位が多く用いられる。一方、廃棄物処理の分野では処理重量に対する評価が多く用いられる。本評価では、定量評価の実施において、太陽電池モジュール 1 kW あたり、および太陽電池モジュール 1t あたり、という単位による評価を実施した。

b) 開発技術の環境的側面の評価

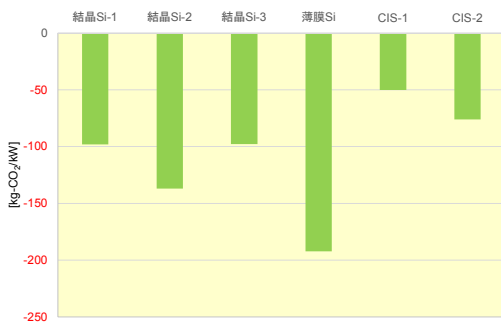
開発技術の環境的側面として、地球温暖化、光化学オゾン生成、酸性化、富栄養化、人間毒性、資源枯渇、廃棄物という環境影響項目を対象とした。このうち、廃棄物については特定のサイトにおける影響として評価し、他の項目はライフサイクルにおける影響を評価した。ライフサイクルベースの評価では、評価範囲を廃モジュールの排出場所からリサイクルプラントへの回収・輸送(撤去は除く)から、プラントにおける分離・解体処理、回収物の輸送と再資源化・埋め立て処理までとし、ライフサイクルインベントリ分析では、環境負荷項目として CO₂ 排出量および一次エネルギー消費量を対象とした。

評価実施に際し、開発技術に関する処理効率(スループット)、ユーティリティ・資材の使用量やリサイクル処理に伴う各部材のマテリアルバランス等のデータはプロジェクト実施事業者からの提供を受けた。各ユーティリティや資材の使用・製造に伴うエネルギー消費量、CO₂ 排出量等のバックグラウンドデータは、日本における最新の LCA データベースである IDEA ver.2.2^{III-2-④-(1)-(a)-44}を使用した。環境影響項目の評価に際しては、日本国内における評価向けに開発された LIME2(Life-cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modeling)^{III-2-④-(1)-(a)-45}を使用した。

<CO₂ 排出削減効果と一次エネルギー消費量削減効果>

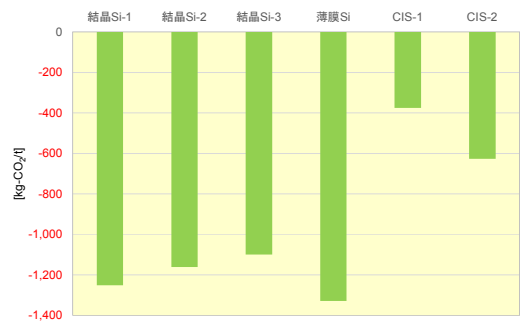
図III-2-④-(1)-2 および図III-2-④-(1)-3 に CO₂ 排出削減効果の評価結果を示す。いずれの開発技術も、リサイクル処理による CO₂ 排出量よりも資源代替による CO₂ 排出削減量が大きく、リサイクルによって CO₂ 排出量が削減される(CO₂ 排出の増加がない)。開発技術により対象としている太陽電池モジュールの仕様(出力、重量、モジュール構成材料等)が異なるため、直接的な比較は困難であるが、排出量と削減量の差に相当する削減効果は、kW あたりでは薄膜 Si、結晶 Si、CIS の順である。重量あたりでは薄膜 Si と結晶 Si はほぼ同程度と見ることができ、同種のモジュールにおける CO₂ 排出量削減効果の違いは、処理対象モジュールの部材構成や処理方法、リサイクル工程におけるエネルギー消費量等に起因する。

一次エネルギー消費量削減効果も CO₂ 排出量削減効果と同様の傾向を示した(図Ⅲ-2-④-(1)-4 および図Ⅲ-2-④-(1)-5)。



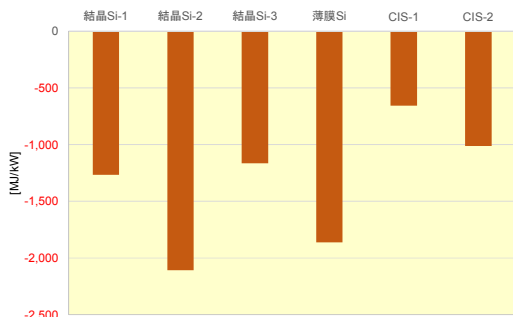
※:処理対象モジュールの出力、重量構成等は、開発技術や太陽電池種類により異なっている。

図Ⅲ-2-④-(1)-2 モジュール 1kW のリサイクル処理による CO₂ 排出量削減効果(kg-CO₂/kW)



※:処理対象モジュールの出力、重量構成等は、開発技術や太陽電池種類により異なっている。

図Ⅲ-2-④-(1)-3 モジュール 1t のリサイクル処理による CO₂ 排出量削減効果(kg-CO₂/t)



※:処理対象モジュールの出力、重量構成等は、開発技術や太陽電池種類により異なっている。

図Ⅲ-2-④-(1)-4 モジュール 1kW のリサイクル処理による一次エネルギー消費量削減効果(MJ/kW)

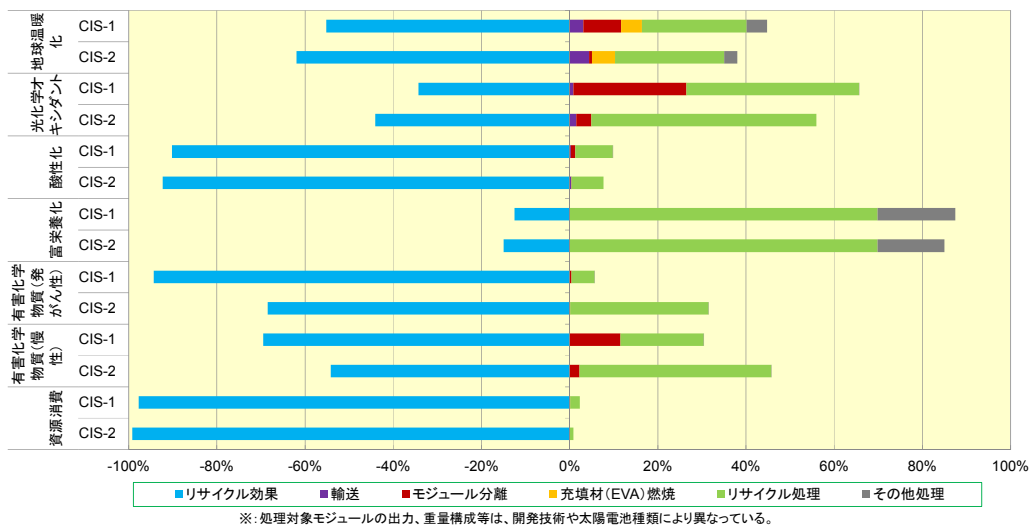


※:処理対象モジュールの出力、重量構成等は、開発技術や太陽電池種類により異なっている。

図Ⅲ-2-④-(1)-5 モジュール 1t のリサイクル処理による一次エネルギー消費量削減効果(MJ/t)

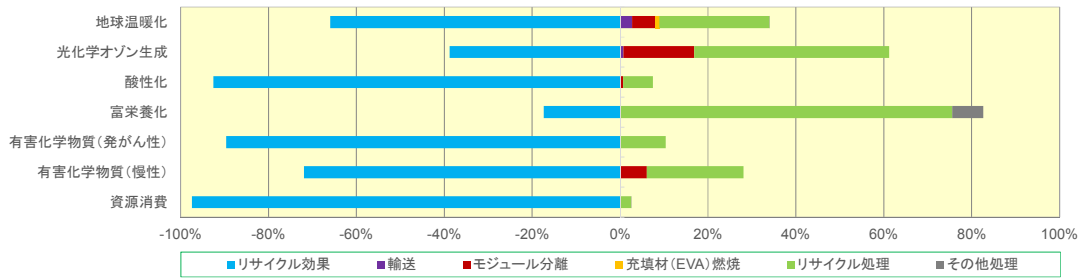
<ライフサイクル環境影響>

図Ⅲ-2-④-(1)-6～図Ⅲ-2-④-(1)-8 に、CIS モジュール、薄膜 Si モジュールおよび結晶 Si モジュールに関するライフサイクル環境影響評価の結果を示す。いずれの開発技術も地球温暖化、酸性化、有害化学物質、資源消費の 4 領域において、回収資源のリサイクルによる環境負荷低減量がリサイクルの実施に伴う環境負荷発生量を上回り、環境負荷低減効果がみられたが、光化学オゾン生成については、環境負荷が増加する結果となった。富栄養化については太陽電池種類・開発技術により傾向が異なり、環境負荷が増加する場合も見られた。

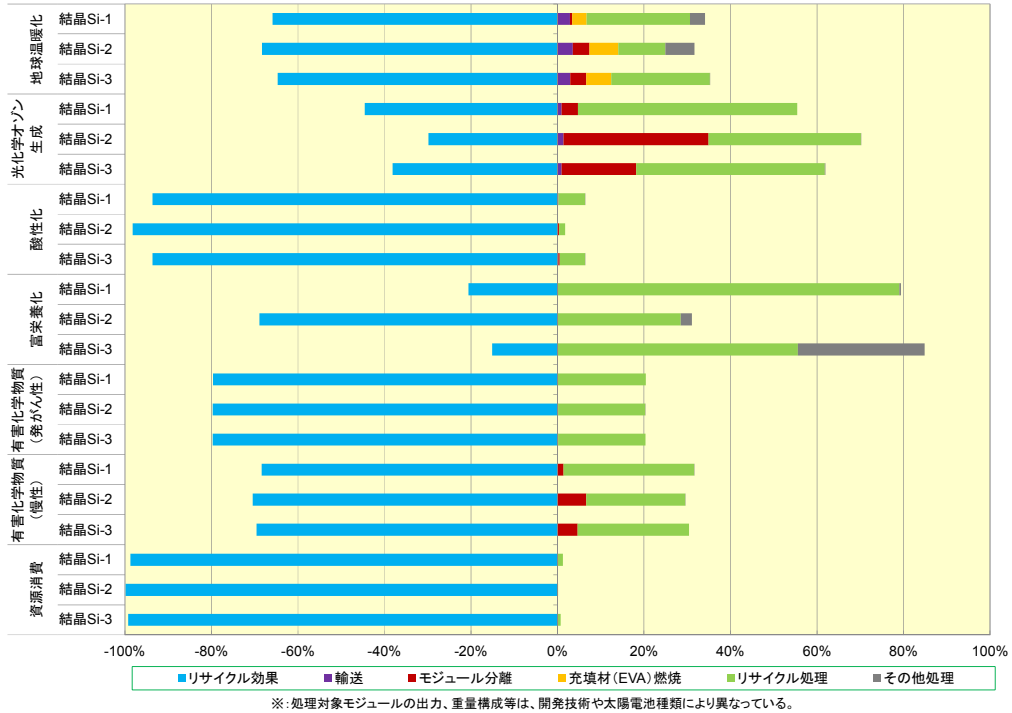


※:処理対象モジュールの出力、重量構成等は、開発技術や太陽電池種類により異なっている。

図Ⅲ-2-④-(1)-6 CIS モジュールリサイクルに関するライフサイクル影響評価結果



図III-2-④-(1)-7 薄膜 Si モジュールリサイクルに関するライフサイクル影響評価結果



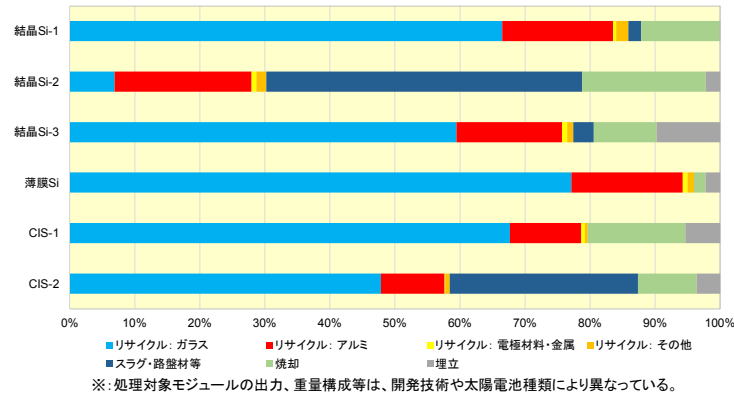
図III-2-④-(1)-8 結晶 Si モジュールリサイクルに関するライフサイクル影響評価結果

<リサイクル率>

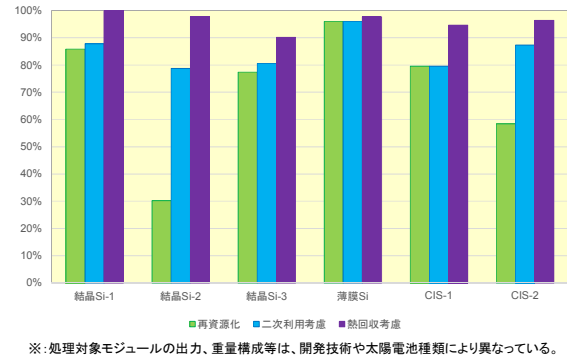
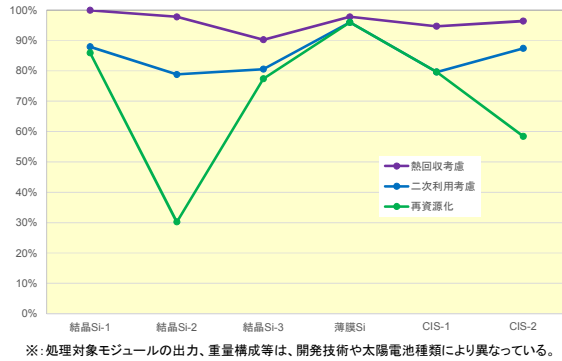
図III-2-④-(1)-9 に、開発技術による処理後の構成材料リサイクル、焼却および埋立の比率を示す。ここで、リサイクル率については以下の3通りの定義が考えられる。

- ・回収された材料(ガラス、アルミ等)が再資源化される比率
- ・上記に加え、資源としては戻らないが、スラグ/路盤材等としての二次利用を考慮した比率
- ・さらに、材料は消失するが、焼却による熱回収(=サーマルリサイクル)を考慮した比率

図III-2-④-(1)-9 に基づき、各開発技術のこれらの比率を示したものが図III-2-④-(1)-10 である。回収された材料の再資源化比率で見ると、回収ガラスの一部がスラグ・路盤材等として二次利用されることが想定される場合に比率が小さくなっているが、そのような二次利用も考慮すると、その比率はいずれの開発技術も 80%以上の水準となる。薄膜 Si の値が大きいのは、焼却処理となるプラスチックの比率が少ないことが主たる要因である。そして、プラスチック焼却等を熱回収と判断・考慮すると 90%~95%以上の水準に達する。この値は、モジュール重量に対する、埋立廃棄物削減率に相当する。なお、これらの結果は、回収率に加え、実証対象モジュールの構成要素(重量比)の相違にも起因している。



図Ⅲ-2-④-(1)-9 開発技術による処理後の構成材料リサイクル、焼却および埋立の比率



図Ⅲ-2-④-(1)-10 各開発技術におけるリサイクル率

c)開発技術の社会的側面の評価

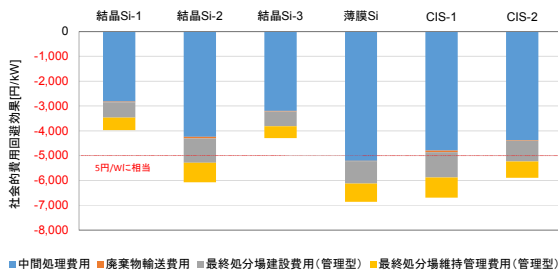
社会的側面の評価項目として、処分場における埋立処理費用ならびに新規資源の調達費用の回避効果を取り上げた。これらの効果はリサイクルにより回収・再利用される資源量が評価のベースとなるが、環境的側面の評価に基づき、埋立処理費用回避効果は埋立廃棄物の削減量(熱回収まで考慮した場合のリサイクル率がベース)、新規資源調達費用回避効果は再資源化される資源量(再資源化のみを考慮した場合のリサイクル率がベース)を用いた。また、定性的な評価として、静脈産業の振興、地域貢献の効果、技術の波及効果について検討した。

<埋立処理費用回避効果>

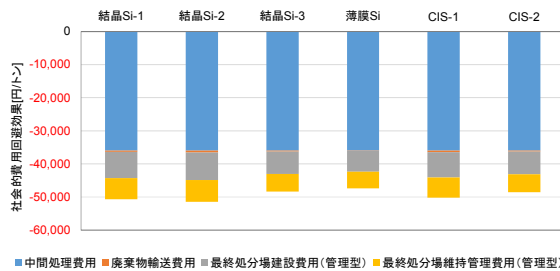
埋立処理費用回避効果の評価結果を図Ⅲ-2-④-(1)-11 および図Ⅲ-2-④-(1)-12 に示す。

開発技術により対象としている太陽電池モジュールの仕様異なるため、直接的な比較は困難であるが、モジュール 1kW あたりの埋立処理費用回避効果は結晶 Si よりも薄膜系の方が大きくなった。これは、薄膜系モジュールの効率が低いため、kW あたりの重量が結晶 Si 系モジュールよりも多く、1kW 相当のリサイクルによって削減される埋立量が多いことによると考えられる。

モジュール 1t あたりの埋立処理費用回避効果を比較すると、1t あたり 5 万円前後の効果が期待される。モジュール効率の相違が評価結果に与える影響が除かれ、開発技術やモジュールの種類による大きな差は見られなかった。



図Ⅲ-2-④-(1)-11 モジュール 1kW あたりの処分場における埋立処理費用回避効果



図Ⅲ2-④-(1)-12 モジュール 1t あたりの処分場における埋立処理費用回避効果

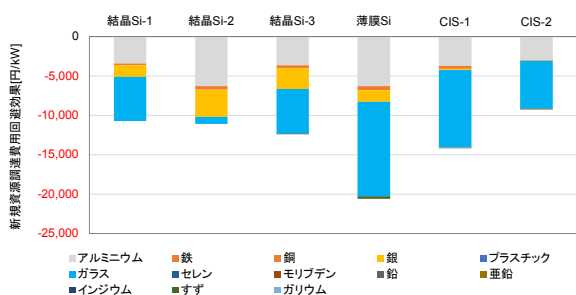
＜新規資源調達費用回避効果＞

新規資源調達費用回避効果の評価結果を図Ⅲ-2-④-(1)-13 および図Ⅲ-12-④-(1)-14 に示す。

新規資源調達費用回避効果は、再資源化される材料の価格によって決定され、再資源化率と材料価格の影響を受けるが、再資源化される材料の kW あたり重量はモジュール効率にも左右され、結果を見ると、再資源化率が高く、モジュール効率が低い薄膜 Si における効果が突出して大きい。結晶 Si と CIS は再資源化率の大小とモジュール効率の高低により、ほぼ同程度となった。

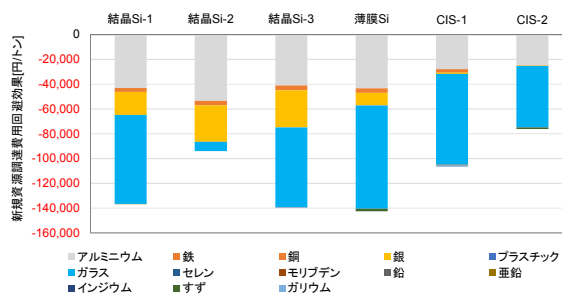
モジュール 1t あたりの効果は、モジュール効率の相違による影響が除かれ、回収ガラスの一部がスラグ・路盤材等として二次利用されることを想定している場合に効果が小さくなった。

処分場における埋立処理費用回避効果は、重量のみに起因する効果であるのに対し、新規資源調達費用の回避効果は、量と単価の積が効果となって現れることから、回収された材料の再資源化率に加え、モジュールに含まれる材料の相違も影響を与えている。



※:処理対象モジュールの出力、重量構成等は、開発技術や太陽電池種類により異なっている。

図Ⅲ-2-④-(1)-13 モジュール 1kW あたりの新規資源調達費用の回避効果比較



※:処理対象モジュールの出力、重量構成等は、開発技術や太陽電池種類により異なっている。

図Ⅲ-2-④-(1)-14 モジュール 1t あたりの新規資源調達費用の回避効果比較

＜その他の社会的側面＞

その他の社会的側面として静脈産業の振興、地域への貢献、技術の波及などが挙げられる。

開発技術が実用化され、産業廃棄物の中間処理事業者(家電リサイクル等も含む)が主体となって運用し、それらの事業者が有する様々なネットワークを活用することで、開発技術の援用や技術協力なども含む、使用済み太陽電池モジュールリサイクルへの取組みが全国に広がっていく。また、事業者間の融通・情報共有による効率的な回収・処理の仕組みの構築も期待される。仕組みの構築に際しては、広域輸送認定などの対応が課題となるが、開発技術の普及拡大と、使用済み太陽電池モジュールリサイクルを起点とした静脈産業の振興・活性化が期待される。

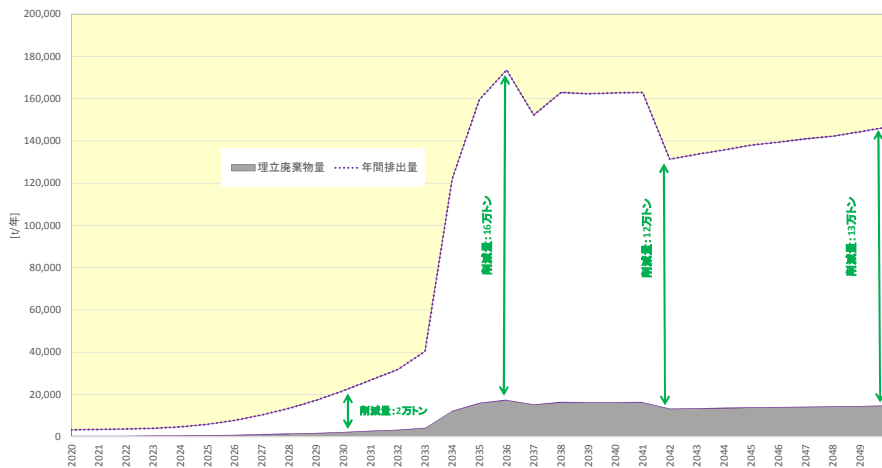
また、太陽電池モジュールリサイクル事業が展開されることは、地域への貢献につながる。例えば、エコタウン等において、リサイクル産業の幅が広がり、事業規模の拡大につながる。分解処理・リサイクルプラントのみならず、発生した使用済み太陽電池モジュールを回収・運搬する効率的な仕組みを構築することで、回収からリサイクル・再資源化までの循環系が整い、地域内(広域含む)の雇用拡大や生産額増加などの経済発展に貢献できる。

さらに、開発技術の援用により、他製品のリサイクルにつながる可能性もある。そして、太陽電池モジュールと他製品のリサイクル、既存の中間処理(家電リサイクル等も含む)を一体化していくことで、リサイクル拠点としての価値や事業規模の拡大、地域のリサイクル産業の発展、より効率的な中間処理・リサイクル事業の形成・発展に貢献することができる。

d)開発技術の導入方策に関する検討

太陽電池モジュールの排出は 2030 年代半ば以降、大量に発生するが、リサイクル技術の実用化により、最終処分となる埋立廃棄物量を最小限にとどめることが可能となる。

「第 10 回再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会(2018 年 11 月 10 日)」において報告された太陽電池モジュールの排出量見通しⅢ-2-④-(1)-(a)-46 によれば、排出量のピークは 2035～2037 年頃で、年間約 17～28 万 t 程度となる。ここで、ピーク排出量が約 17 万 t となるシナリオに対し、リサイクルによる埋立廃棄物削減率を 90%とすると、排出量のピーク時には約 16 万 t の埋立廃棄物が削減され、その後も 12 万 t/年以上の埋立廃棄物が削減される(図Ⅲ-2-④-(1)-15)。そして、2020 年から 2050 年にかけて削減される埋立廃棄物の合計(累積量)は約 390 万 t となる。



図Ⅲ-2-④-(1)-15 太陽電池モジュールからの埋立廃棄物量の見通し

太陽電池モジュール分解処理技術を効果的に市場に導入していくためには、開発技術による効果や意義をより高めていくとともに、それらの技術を有効に活用するための社会システムの構築が必要である。

中長期的な使用済み太陽電池モジュールの大量発生に備え、本プロジェクトによる開発技術を、さらにそれらを起点とした、より精度や効率の高い技術を導入していくためには、表Ⅲ-2-④-(1)-3 に示すような視点に立脚した方策が必要と考えられる。

表Ⅲ-2-④-(1)-3 太陽電池モジュールリサイクルの導入拡大に向けた方策の視点

- 回収資源の再資源化用途の確立・開拓
 - ・ ガラスの再資源化用途の確立
 - ・ プラスチックの再資源化用途の開拓
 - ・ Si の再資源化の可能性の検討
- リサイクルによる価値の再評価
 - ・ 回収資源の再資源化用途に応じた比較・評価
 - ・ リサイクルを考慮した太陽電池モジュールのライフサイクル評価
- 開発技術を活用する社会システムの構築
 - ・ 使用済み太陽電池モジュールの収集・運搬システムの構築
 - ・ 分解処理・リサイクルプラントの適正配置に向けた検討
 - ・ 大量発生に備えるための移行措置

2. 実用化見通し

本調査は、太陽光発電リサイクルに関する技術開発の推進、社会システムの構築に資するため、海外における技術開発や政策に関する情報収集を行うとともに、リサイクル関連技術の横断的な評価手法を検討し、『太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト』全体の推進に寄与することを目的としている。

本調査による成果を基に、海外における動向等について NEDO を通じて資源エネルギー庁・環境省による太陽電池モジュール適正処理に関する議論の基礎資料として提示することができたほか、IEA 傘下の国際協力プロジェクトである IEA PVPS Task12(PV Sustainability) に対して貢献し、日本の存在感を示した。また、本技術開発プロジェクトで実施された「低コスト分解処理技術実証」プロジェクトによる開発技術の評価を実施し、プロジェクト実施者にフィードバックすることで、開発技術の環境性の向上等に貢献するとともに、国際会議等での発表を積極的に行い、日本における太陽光発電リサイクルへの取り組みを周知することができた。

太陽光発電の導入拡大が加速する中、使用済み太陽電池モジュールの適正処理に関する政策的な議論、ならびにリサイクル処理技術の開発・実用化に向けた取り組みが世界的に活発化しているが、リサイクルをはじめとする太陽光発電の適正処理技術の確立は、激しさを増す国際競争を勝ち抜くための活路の一つになり得る。

本調査の成果を広く周知することで、わが国における太陽光発電リサイクルに関する技術開発の推進、

社会システムの構築に資するとともに、わが国の取り組みに関する国際的な情報発信に貢献することが見込まれる。はじめとする太陽光発電の適正処理技術の確立は、激しさを増す国際競争を勝ち抜くための活路の一つになり得る。

3.波及効果

- ・海外における動向等について、NEDO を通じ、国による太陽電池モジュール適正処理に関する議論の基礎資料として提示した。
- ・「低コスト分解処理技術実証」プロジェクトによる開発技術の評価を実施し、プロジェクト実施者にフィードバックすることで、開発技術の環境性の向上等に貢献した。
- ・国際会議等での発表を積極的に行い、日本における太陽光発電リサイクルへの取り組みを発信するとともに、IEA 傘下の国際協力プロジェクトである IEA PVPS Task12(PV Sustainability)に対して貢献し、日本の存在感を示した。
- ・今後も、本調査の成果を広く発信していくことで、わが国における太陽光発電リサイクルに関する技術開発の推進、社会システムの構築に資するとともに、わが国の取り組みに関する国際的な情報発信に貢献することができる。

【参考文献】

- III-2-④-(1)-(a)-1) European Parliament website
(<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:197:FULL:EN:PDF>)(アクセス日:2019年1月)
- III-2-④-(1)-(a)-2) PV CYCLE Annual Report 2011、2012
- III-2-④-(1)-(a)-3) PV CYCLE Annual Report 2012、2013
- III-2-④-(1)-(a)-4) PV CYCLE Annual Report 2014、2015
- III-2-④-(1)-(a)-5) PV CYCLE Annual Report 2015、2016
- III-2-④-(1)-(a)-6) PV CYCLE Annual Report 2016、2017
- III-2-④-(1)-(a)-7) PV CYCLE Annual Report 2017、2018
- III-2-④-(1)-(a)-8) CENELEC : EN 50625-2-4 Collection, logistics & Treatment requirements for WEEE - Part 2-4: Treatment requirements for photovoltaic panels (draft), May. 2017
- III-2-④-(1)-(a)-9) CENELEC : TS 50625-3-5 Collection, logistics & Treatment requirements for WEEE - Part 3-5: Technical specification for de-pollution - Photovoltaic panels (draft), May. 2017
- III-2-④-(1)-(a)-10) SB-489 Public resources: photovoltaic modules
(http://leginfo.legislature.ca.gov/faces/billNavClient.xhtml?bill_id=201520160SB489)
- III-2-④-(1)-(a)-11) Final Bill Report ESSB 5939(<http://lawfilesexternal.wa.gov/biennium/2017-18/Pdf/Bill%20Reports/Senate/5939-S.E%20SBR%20FBR%2017%20E3.pdf>)(アクセス日:2018年3月22日)
- III-2-④-(1)-(a)-12) “Senate Bill S2837B”, The New York State Senate
(<https://www.nysenate.gov/legislation/bills/2017/s2837>)(アクセス日:2019年2月14日)
- III-2-④-(1)-(a)-13) SEIA PV Recycling Working Group : National PV Recycling Program, Solar Power International 2016, Las Vegas, NV, 14 September 2016
- III-2-④-(1)-(a)-14) SEIA website(<https://www.seia.org/initiatives/seia-national-pv-recycling-program>)(アクセス日:2019年2月14日)
- III-2-④-(1)-(a)-15) NSF International Standard/American National Standard: NSF/ANSI 457-2017 Sustainability Leadership Standard for Photovoltaic Modules, Oct 2017
- III-2-④-(1)-(a)-16) J. Zhang : Status and Prospect of PV Module Recycling R&D in China, IEA PVPS Workshop@PVSEC-27: PV for Sustainability, Otsu, Japan, 16 November 2017
- III-2-④-(1)-(a)-17) Jin-Seok Lee : Status of PV Module Recycling in Korea, IEA PVPS Workshop@PVSEC-27: PV for Sustainability, Otsu, Japan, 16 November 2017
- III-2-④-(1)-(a)-18) CORDIS website (<https://cordis.europa.eu/project/rcn/105212/factsheet/en>)
- III-2-④-(1)-(a)-19) Cu-PV プロジェクト website (<http://www.sustainablepv.eu/cu-pv/>)
- III-2-④-(1)-(a)-20) B. Geerligs : Cu-PV Project, Resource efficiency cluster meeting, Brussels, September 2015
- III-2-④-(1)-(a)-21) M. J. A. A. Gomes : Production of Recyclable Crystalline Si PV Modules, 31st EU-PVSEC, Hamburg, Germany, September 2015
- III-2-④-(1)-(a)-22) L. Ramon : Full Recovery End of Life Photovoltaic, Workshop on PV Life Cycle Management and Recycling at the 29th EU-PVSEC, Amsterdam, the Netherlands, September 2014
- III-2-④-(1)-(a)-23) Conferenza presso, Laghetto Gabella, Italy

(<https://frelpinfo.wordpress.com/2015/10/02/conferenza-progetto-frelp-comunicato-stampa/>)

III-2-④-(1)-(a)-24) FRELP プロジェクト website(<http://frelp.info/4-2/>)

III-2-④-(1)-(a)-25) PV Morede プロジェクト website(<http://frelp.info/4-2/>)

III-2-④-(1)-(a)-26) R. Reggi : PV Recycling Innovations: PV-MOREDE, 3rd International Conference on PV Recycling, Rome, Italy, February 2013

III-2-④-(1)-(a)-27) RECLAIM Fact Sheet
(http://www.4980.timewarp.at/sat/reclaim/pdf_secure/PROJECT%20TEMPLATE%202014ENVTECH%20Reclaim%20final.pdf)

III-2-④-(1)-(a)-28) R. Bisselink and W. Steeghs: Recovery of Gallium and Indium from Liquid Crystal Displays and CIGS Photovoltaic modules, RECLAIM Workshop on Reclamation of key metals from Energy Efficient Lighting, Flat Panel Displays and Photovoltaic modules, June 2016

III-2-④-(1)-(a)-29) EC website
(http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=4898)

III-2-④-(1)-(a)-30) Layman' s Report, "PROCESS AND AUTOMATED PILOT PLANT FOR SIMULTANEOUS AND INTEGRAL RECYCLING OF DIFFERENT KINDS OF PHOTOVOLTAIC PANELS" LIFE13 ENV/IT/001033

III-2-④-(1)-(a)-31) Ludovica Baldassari : Where are WEEE going?, WEEEN MODELS, Genoa,Nov. 2016

III-2-④-(1)-(a)-32) CABRISS : Introducing Spire 2014 Projects, H2020-Waste1-2014 Cabriss, June 2015

III-2-④-(1)-(a)-33) D. Pelletier, et.al : Developing a Circular Economy Based on Recycled, Reused and Recovered Indium, Silicon and Silver Materials for Photovoltaic and Other Applications, 31st EU-PVSEC, Hamburg, Germany, September 2015

III-2-④-(1)-(a)-34) CABRISS : Newsletter Issue: 2, May 2016

III-2-④-(1)-(a)-35) CABRISS : Newsletter Issue: 3, November 2016

III-2-④-(1)-(a)-36) CABRISS : Newsletter Issue: 4, May 2017

III-2-④-(1)-(a)-37) CABRISS : Newsletter Issue: 5, January 2018

III-2-④-(1)-(a)-38) ELSi プロジェクトウェブページ(<https://geltz.de/elsi-pv/>)(アクセス日 : 2019 年 2 月)

III-2-④-(1)-(a)-39) CORDIS website(<https://cordis.europa.eu/project/rcn/202719/brief/en/>)(アクセス日 : 2019 年 2 月)

III-2-④-(1)-(a)-40) A. Wade : Beyond Waste - the Socio-Ecnooic Benefits of High Value Recycling, IEA PVPS Workshop@PVSEC-27: PV for Sustainability, Otsu, Japan, 16 November 2017

III-2-④-(1)-(a)-41) W. Palitzsch : Status and activities for PV Module Recycling, IEA PVPS Workshop@PVSEC-27: PV for Sustainability, Otsu, Japan, 16 November 2017

III-2-④-(1)-(a)-42) Veolia 社ウェブサイト(<https://www.veolia.com/en/newsroom/news/recycling-photovoltaic-panels-circular-economy-france>)(アクセス日 : 2019 年 2 月 20 日)

III-2-④-(1)-(a)-43) S.-H. Joo, J.-S. Lee, et al. : Recycling process of waste Photovoltaic cells and its application, 25th PVSEC, Busan, Korea, November 2015

III-2-④-(1)-(a)-44) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ、一般社団法人 産業環境管理協会 : LCI データベース IDEA version 2.2

III-2-④-(1)-(a)-45) 産業環境管理協会 : LIME2 意思決定を支援する環境影響評価手法、2010

III-2-④-(1)-(a)-46) 経済産業省資源エネルギー庁再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 : 第 10 回委員会資料 3 「太陽光発電設備の廃棄対策について」、2018 年 11 月 21 日

(2)太陽光発電リサイクルに関する国内動向調査、分布調査及び排出量予測(三菱総合研究所)

【2014～2018 年度】

1.成果詳細

(1)国内の技術動向、政策動向、実施事例の定点観測

1)太陽光発電システムのリサイクルに関する技術開発動向調査、政策動向調査及び実施事例調査
国内における太陽光発電システムのリサイクルに関する技術開発動向、政策動向及び実施事例について調査を行い、情報収集・分析を行った。

ア.国内における技術開発動向調査

文献調査に基づき、現時点における太陽光発電システムのリユース・リサイクル・適正処分に係る国内技術の動向についてとりまとめた。概要は以下のとおりである。

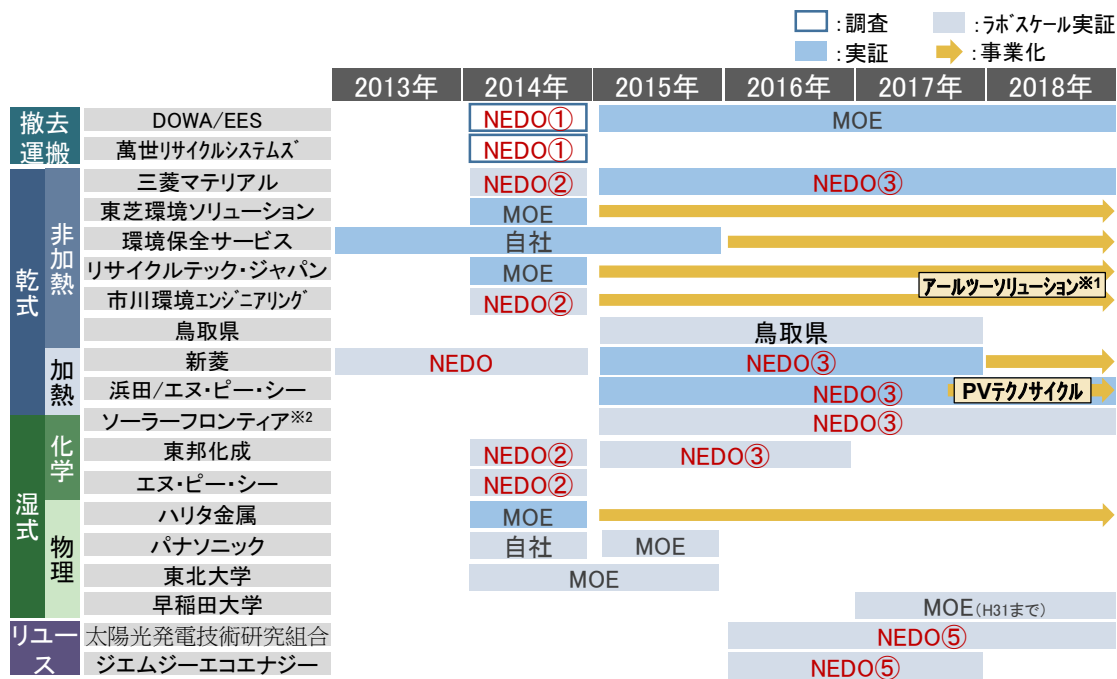
- 撤去・運搬技術については、2014 年度 NEDO 事業において技術開発調査が 2 件実施されている他、環境省事業にて 2015 年度から 2016 年度にかけてモデル事業が行われている。
- リサイクルに関しては多くの技術開発が行われている。技術の類型としては、乾式処理(乾式リサイクル)と湿式処理(湿式リサイクル)に大別される。
 - ✓ 乾式リサイクルについては、NEDO 事業や環境省事業等にて研究開発や実証事業が行われている。非加熱処理として破碎・物理選別機によるセルとガラスの選別技術や、加熱により EVA を除去することで、セルとガラスを分離する技術が開発されている。
 - ✓ 湿式リサイクルについては、乾式リサイクルと同様、NEDO 事業や環境省事業等にて研究開発や実証事業が行われている。薬剤等を用いてセルとガラスを分離する化学的な技術や、破碎後に湿式比重選別を用いてセルとガラスを分離する物理的な技術等が開発されている。
- その他には、NEDO 事業としてリユース技術開発が行われている他、回収物(ガラス)の利用・評価技術、環境配慮設計技術(リサイクルしやすいモジュールの構造の開発)等の技術開発が実施されている。

上記の調査・整理結果を踏まえ、リサイクル関係技術の開発戦略の策定に活用することを目的とした開発技術の俯瞰的な整理を行った。当初は技術の比較を行うことを目指していたが、既に事業化している技術や今後事業化を目指す技術への影響を考慮し、技術間の比較ではなく、研究開発のフェーズや技術の特徴を分かりやすく示すことを主目的とすることとした。なお、マップへのプロットについては、2016 年 10 月時点の事業原簿等の各種文献調査、ヒアリング調査等に基づき三菱総合研究所が作成したものであり、今後の技術開発状況等によりマップ上のプロットの位置が変わる可能性があることに留意が必要である。

① 技術開発動向・実施状況を示すマップ

横軸を研究・事業化フェーズ、縦軸を技術区分として整理した結果を図Ⅲ-2-④-(2)-1 に示す。

NEDO プロジェクトを経て事業化した技術、その他の実証等を通じて事業化した技術、自社開発の末に事業化した技術の大きく 3 類型となっている。本マップは、現在の技術開発動向・実施状況を俯瞰的に整理したものであり、現在の技術の状況・実施状況を把握する際に活用可能と考えられる。



※1 市川環境エンジニアリング、ネクストエナジー・アド・リソース、リサイクルテック・ジャパン、近畿工業の4社出資による株式会社

※2 GISパネルに特化した技術

NEDO: 広域対象のPVシステム汎用リサイクル処理方法に関する研究開発

NEDO①: 研究開発項目[1]「低コスト撤去・回収・分別技術調査」 NEDO②: 研究開発項目[2]「低コスト分解処理技術FS(開発)」

NEDO③: 研究開発項目[3]「低コスト分解処理技術実証」

NEDO⑤: 研究開発項目[5]「使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発」

MOE: 環境省予算による研究開発・実証、鳥取県: 鳥取県予算による研究開発・実証、自社: 自社による研究開発・実証

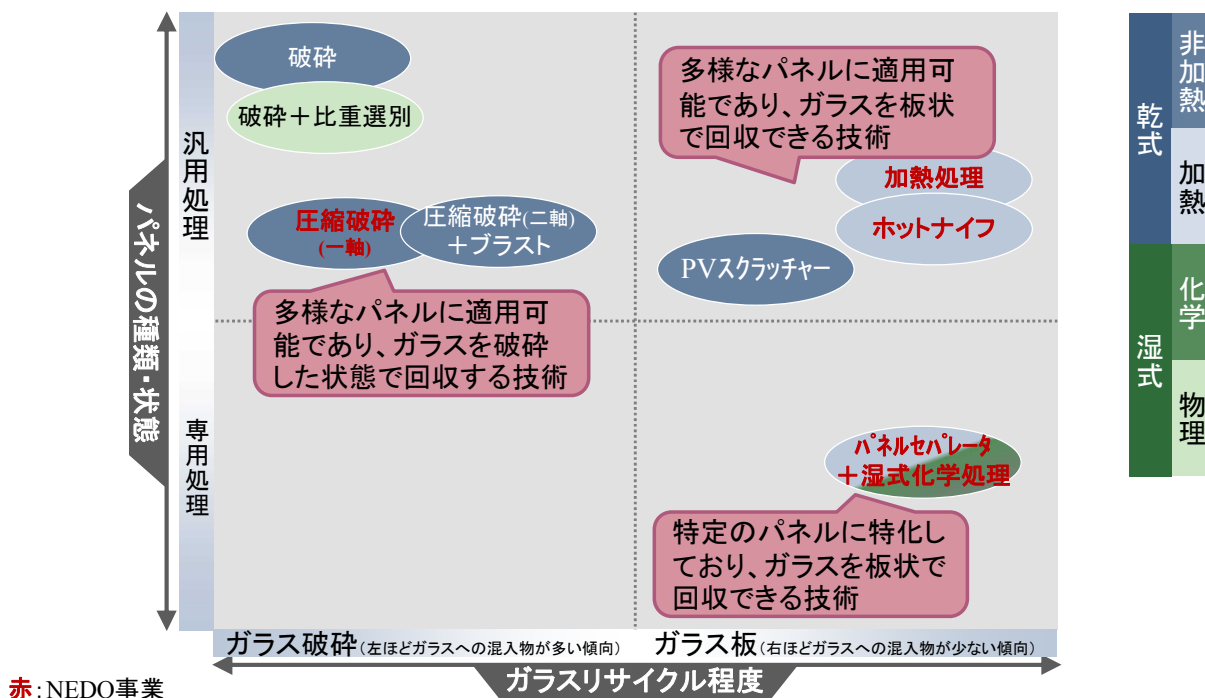
図Ⅲ-2-④-(2)-1 技術開発動向・実施状況を示すマップ

出所) 事業原簿(2016年10月時点)等各種文献調査、ヒアリング調査等に基づき三菱総研作成

② 技術の特徴を示すマップ

横軸をガラスリサイクルの程度(ガラスへの混入物の程度)、縦軸を対象パネルの種類・状態として開発技術を整理した結果を図Ⅲ-2-④-(2)-2に示す。

本マップの右上の技術は多様なパネルに適用可能であり、ガラスを板状で回収できる技術を示している。また、右下の技術は特定のパネルに特化しており、ガラスを板状で回収できる技術を示している。一方、左上の技術は多様なパネルに適用可能であり、ガラスを破碎した状態で回収する技術を示している。



図Ⅲ-2-④-(2)-2 技術の特長を示すマップ

出所) 事業原簿等各種文献調査、ヒアリング調査等に基づき三菱総研作成(実証試験実施、事業化済み技術のみを整理)

イ.国内における政策動向調査

国内での太陽光発電システムのリサイクルに係る政策動向として、国内における太陽光発電システムのリサイクル関係プロジェクトを確認するとともに、太陽光発電システムの廃棄・リサイクルに関する注目すべき政策動向(下記)を取り上げ、その概況を整理した。

- 総務省：太陽光発電設備の廃棄処分等に関する実態調査＜結果に基づく勧告＞
- 環境省：太陽光発電のリサイクル・適正処分等に関する検討チームとりまとめ
- 環境省：太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン(第二版)
- 資源エネルギー庁：再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 中間整理(第二次)

ウ.国内の実施事例調査

公表資料に基づき、太陽電池モジュールのリサイクルに関する国内の先進的な取組事例を調査した。その上で、いくつかの事例についてヒアリング調査を実施し、具体的な内容を把握した。ヒアリング調査先は表Ⅲ-2-④-(2)-1 のとおり。

表Ⅲ-2-④-(2)-1 実施事例に関するヒアリング調査先と調査項目

ヒアリング調査先	調査項目
環境保全サービス	<ul style="list-style-type: none"> ● 技術の概要・背景 ● 適用モジュールの種類 ● 大量処理の容易性 ● 処理コスト ● 資源・有害物質の回収率・処理後の引き渡し ● エネルギー消費量等 ● 事業化の状況 ● 課題点・今後の見通し・今後の技術開発
ミクロンメタル株式会社	<ul style="list-style-type: none"> ● 技術の概要・背景 ● 適用モジュールの種類 ● 大量処理の容易性 ● 処理コスト ● 資源・有害物質の回収率・処理後の引き渡し ● 事業化にむけた状況 ● 課題点・今後の見通し・今後の技術開発
イー・アンド・イー ソリューションズ株式会社	<ul style="list-style-type: none"> ● 取組経緯 ● 秋田県エコタウン事業(環境省事業)の概要 ● 太陽電池モジュールのリユース・リサイクルにあたっての留意事項
三沢市ソーラーシステムメンテナンス事業協同組合	<ul style="list-style-type: none"> ● 取組概要 ● 事業の経緯 ● 使用済太陽電池モジュールのリユース・リサイクル事業の概要
ガラス再資源化協議会	<ul style="list-style-type: none"> ● 取組概要 ● 太陽電池モジュールのリユース ● 太陽電池モジュールの排出 ● 排出量予測 ● 太陽電池モジュールのガラスリサイクル ● CdTe系太陽電池モジュールの取扱

2)太陽光発電システムのリユースに関する調査

ア.リユースビジネスの可能性検討

太陽光発電設備のリユースビジネスモデル他製品を含めたリユースビジネスの現状やその成立条件について調査した結果を踏まえリユースビジネスモデル(案)を整理した。また、中古パネルの経済性評価のための基礎データの収集や関連法規についても整理した。

イ.災害等で発生した使用済太陽電池モジュールの排出・処分実態調査

リユース市場創出に向けた課題抽出と可能性の検討を視野に、国内において災害等で発生した使用済太陽電池モジュールの排出・処分実態把握のための調査を実施した。予備的調査として文献調査に基づき近年の災害事例の抽出整理を行った上で、文献調査・ヒアリング調査に基づき近年の災害における太陽電池モジュールの排出事例を整理した。

収集・整理した31件の事例の概略を図Ⅲ-2-④-(2)-3に整理する。図中で吹き出しに網掛けしている

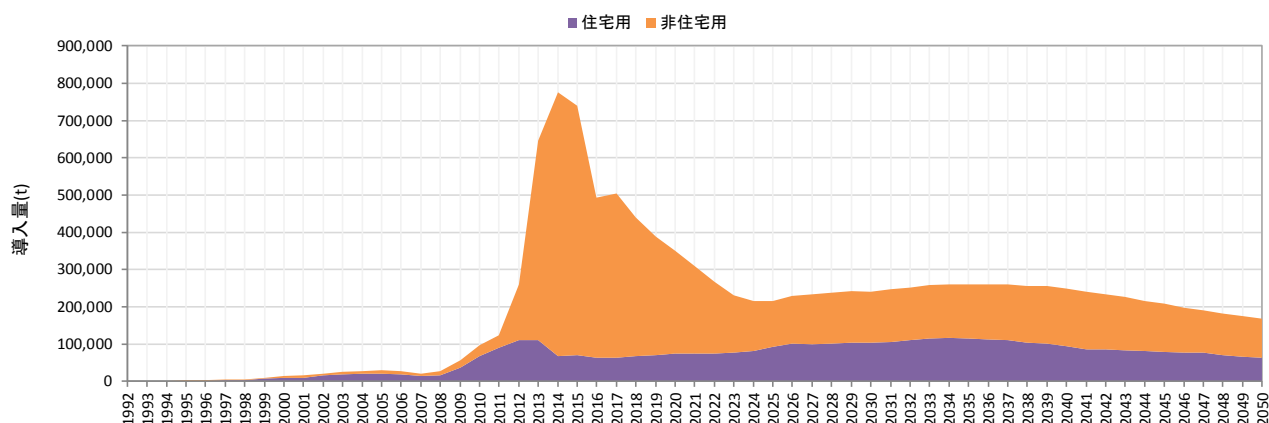
表Ⅲ-2-④-(2)-2 太陽光システムの導入実績に関する収集データ一覧

データ種別	データ 利用期間	出典
全国導入量	1992～2017	IEA PVPS 公開データ
メガソーラーの都道府県別 設置容量比率	—	公表情報によりメガソーラーリスト (後述)を調査し算出
都道府県別住宅用導入容量	1994～2005	NEF 補助金データ(新エネルギー財 団(NEF)公開データ)
	2009～2013	J-PEC 補助金データ(太陽光発電普及 拡大センター(J-PEC)公開データ)
	2006～2008	前後のデータから推計により補完
FIT 都道府県別導入容量	2012/7 ～2017/3	固定価格買取制度(FIT)設備認定状況 データ
各メガソーラーにおける導 入モジュール比率	—	メーカー別の使用モジュール比率を 基に、メガソーラーリストより算定
モジュール別出荷容量	2002～2017	JPEA 太陽電池の出荷統計(四半期 データ)より

導入量予測については、JPEA「JPEA PV OUTLOOK～ 太陽光発電 2050年の黎明～」(2017年6月)による推計値のうち、リプレースを除いた量を導入量として組み入れた。

また、発電出力を重量換算するための出力重量比率は、IRENA(2016)と同様のものを使用し、導入年次ごとの出力重量比の実績値及び理論値をプロットし、指数近似による回帰式を算出した(1990年で約140t/MW、2050年で約40t/MW)。

以上のデータを利用して作成した導入重量推計結果(用途別)を図Ⅲ-2-④-(2)-5に示す。



図Ⅲ-2-④-(2)-5 導入重量(2016年までが実績値、2017年以降が推計値)

2) 分布に基づいた排出量予測

ア. 排出量予測手法の検討・確立

太陽電池モジュールは、社会システムの動向等によって排出量が大きく左右されることが考えられること、排出状況等の情報が不足していること等から、排出量予測の変動要素が非常に多く、現時点で正確な排出量推計を行うことは困難である。有識者へのヒアリングを実施した結果、本事業における排出量推計の目的を以下のように設定し、その達成への影響度の大きさという観点でパラメータに優先順位をつけて検討を行うこととした。

＜本事業で実施する排出量予測の目的＞

1. 大量排出時代のピーク(時期、量)を予測する
2. 現状の再資源化能力を上回る排出がなされるようになる時期を予測する

目的に基づいて検討した排出量予測手法の概要を表Ⅲ-2-④-(2)-3に示す。

基本的な考え方として、排出重量は前項までに算定した導入重量に沿い、設置区分別に、主に「内的要因による排出(出力低下)」と「外的要因による排出(FIT買取期間終了等)」の2種類の排出が発生す

ると仮定した。また、市場戻り率として0.3%を設定し、災害に伴う排出は想定しないこととした。また、FIT 制度は2020年に終了すると仮定した。

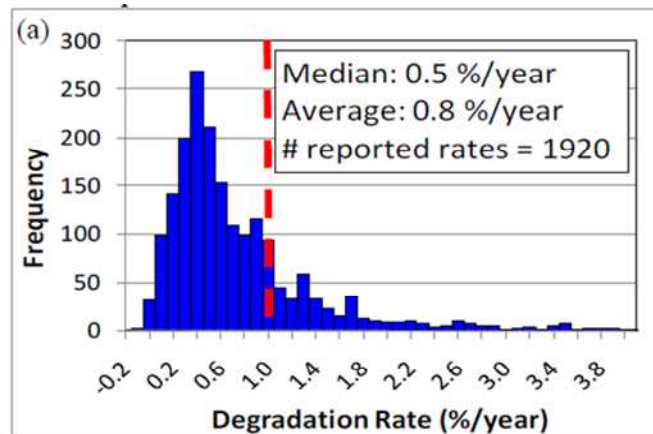
表Ⅲ-2-④-(2)-3 本事業における排出量予測の概要

推計方法	内的要因による排出+外的要因による排出の組み合わせ (比率は分類別にシナリオにより決定)	
全体導入容量 データ出典	～2017：IEA PVPS National Survey Reports Japan 2002-2017 2018～：JPEA 予測	
重量換算手法	IRENA(2016)と同様の手法を採用。導入年次ごとの出力重量比の実績値及び理論値をプロットし、指数近似で回帰式を算出。	
分類	設置主体	以下の3分類で推計。 (A)住宅用 (B)非住宅用・50kW以上 (C)非住宅用・10kW以上50kW未満
	モジュール種類	Si単結晶/Si多結晶/Si薄膜/その他の4種類それぞれの排出量を推計
	地域	都道府県別に推計
市場戻り率 (設置前排出)	0.3% (JPEA 推計における設定値。欧州の回収実績等に基づき設定)	
災害等、内的・外的要因 以外の要因による排出	考慮なし	

イ.内的要因による排出

「内的要因による排出」では、文献値と同様に分布で設定した出力低下率に従い、初期容量比である一定の値(排出判断値)を下回ると排出されると仮定した。このとき、変数として出力低下率と排出する判断がなされる出力(排出判断値)を設定する必要がある。

出力低下率はモジュール種別に依らず、文献値と同様の分布をとるとした(図Ⅲ-2-④-(2)-6)。



図Ⅲ-2-④-(2)-6 太陽光発電システムの出力低下率
出所) Jordan and Kurtz” Photovoltaic Degradation Rates - An Analytical Review” (2012, NREL)

排出判断値は標準偏差(SD)0.05の正規分布をとると仮定した。排出の判断に際しては収支構造(売電収入、ランニングコスト、撤去・処分等の費用)が大きく関わってくると考えられる。そのため、収支構造が大きく異なる以下の3分類で排出判断値を設定することとした。

- (A) 住宅用：ランニングコストが低く、逆に撤去・排出時の費用負担がかかることから、相対的に排出判断を行う値が低くなると考えられる。
 - (B) FIT 買取期間中：比較的高い価格で売電可能であるため、撤去・リプレースするインセンティブが低く、排出判断を行う値は相対的に低くなると考えられる。
 - (C) FIT 買取期間終了後：FIT 制度終了後に導入されたものもここに分類。事業モデルによって異なるが、(B)よりは排出判断を行う値が高くなると考えられる
- 排出判断値は、設置者の分類に応じて設定した。分類を表Ⅲ-2-④-(2)-4に示す。

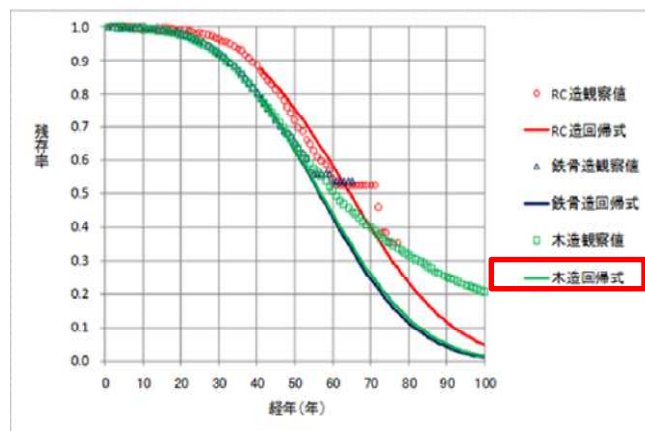
表Ⅲ-2-④-(2)-4 設置者分類(排出判断値の分類)

		FIT買取期間中	FIT買取期間終了後
住宅用		(a) 0.5	
非住宅	50kW未満	(b) 0.5	(c) 0.8
	50kW以上		

ウ.外的要因による排出

「外的要因による排出」では、一定期間が経った際に「内的要因による排出」がなされていないモジュールに対して発生すると仮定した。一定期間の定め方については、住宅用として導入された設備と非住宅用として導入された設備で異なる考え方をとった。

住宅用では、住宅の建て替え時にはモジュールが排出されると考え、2011年における日本の木造建築の寿命分布(鎌谷、2012)に従って排出されると仮定した(図Ⅲ-2-④-(2)-7)。この調査結果によると、木造建築の平均寿命は58年であり、建築後20年で4.7%、30年で9.0%、50年で35.9%、80年で83.7%、100年で99.7%の木造建築が寿命を迎える。なお、余剰買取制度やFIT買取期間終了に起因する排出は想定していない。



図Ⅲ-2-④-(2)-7 2011年調査による日本の建築物の構造別残存率曲線
出所) 鎌谷直毅「建築寿命に関する研究～2011年における我が国の住宅平均寿命の推計」(2012、早稲田大学)

非住宅用では、FIT期間中に導入されたモジュールについては、導入から20年後に固定価格買取の終了に伴う排出(「FIT買取期間終了後即排出」)が生じると仮定した。排出されるモジュールの割合(「FIT買取期間終了後即排出割合」)は、シナリオ別に設定した。なお、FIT制度開始前に導入されたモジュールについては、全て2012年に移行認定を受けたと仮定した。

エ.排出量予測の実施

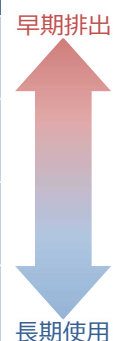
上記に基づき実施した排出量予測の結果を示す。

太陽電池モジュールは、社会システムの動向等によって排出量が大きく左右されると考えられること、排出状況等の情報が不足していること等から、排出量予測の変動要素が非常に多く、現時点で正確な排出量推計を行うことは困難である。

そのため先述の目的に照らし、排出量のピークに注目して検討を行った。排出量のピークは、FIT買取期間終了後に即排出される割合によって大きく変動する。その判断は土地の所有形態によって影響を受けるとの仮説のもと、表Ⅲ-2-④-(2)-5に示す4つの排出シナリオを作成し予測を行った。

表Ⅲ-2-④-(2)-5 排出シナリオの設定

シナリオ	FIT買取期間終了後即排出割合※			シナリオの詳細
	定期借地	賃貸の土地 (定期借地以外)	自社保有地	
(A)FIT後大量排出	100%	100%	50%	賃貸の土地の全てと、自社保有地のうち半分はFIT買取期間後に即排出される。
(B)FIT後賃貸土地分排出	100%	100%	0%	賃貸の土地は全てFIT買取期間後に即排出されるが、自社保有地であれば、排出されない。
(C)FIT後定期借地分排出	100%	0%	0%	定期借地で借りている土地に設置されている場合は、FIT買取期間終了後に即排出される。その他は排出されない。
(D)FIT後排出なし	0%	0%	0%	土地の所有形態にかかわらず、FIT買取期間終了をきっかけにした排出はされない。



※ 「2017年度新エネルギー等の導入促進のための基礎調査(太陽光発電に係る保守点検の普及動向等に関する調査)(2018年2月)」により設定

(A)FIT 後大量排出シナリオ及び(D)FIT 後排出なしシナリオは、比較的極端なケースを想定したシナリオであり、実際の排出量は(B)FIT 後賃貸土地分排出シナリオや(C)FIT 後定期借地分排出シナリオに近い値になると考えられる。FIT 買取期間終了後に、安定的に売電されなくなったり、メンテナンスコストが高騰する等の要因によりビジネスの成立が難しく、FIT をきっかけで導入した事業者の多くがFIT 買取期間終了後に即排出を行う状況になると、(B)に近い排出量になると考えられる。一方で、FIT 買取期間終了後も比較的ビジネスが成立し、FIT 買取期間終了をきっかけにした排出があまりなされない場合には、(C)に近い排出量になると考えられる。

オ.排出量推計結果

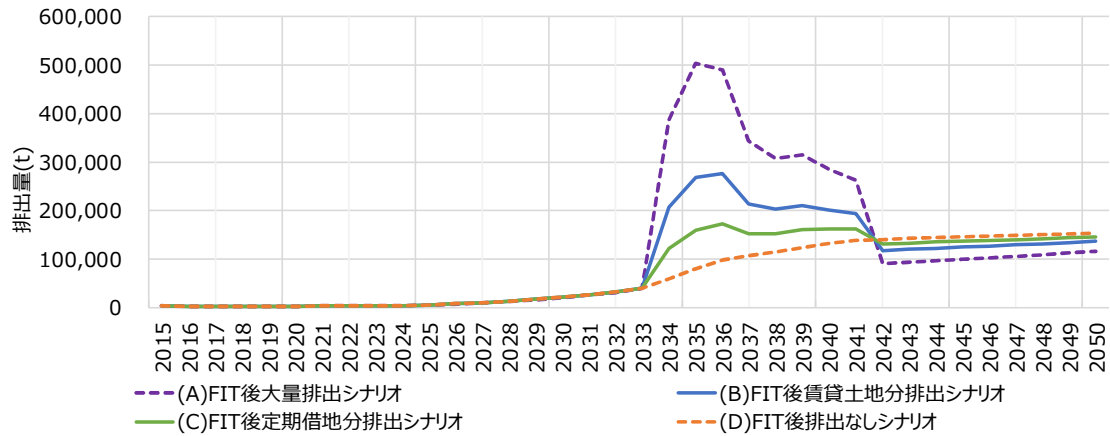
4つのシナリオによる排出量推計結果の比較を図Ⅲ-2-④-(2)-8に、シナリオ(B)、(C)における排出量推計結果の産業廃棄物最終処分量との比較を表Ⅲ-2-④-(2)-6に示す。なお、2015年度の産業廃棄物の最終処分量に占める割合で比較した。

(A)(B)(C)シナリオにおいて、排出量のピークは、FIT 制度開始当初に導入された太陽光発電システムがFIT 買取期間終了を迎える2034～6年頃である。その量はFIT 買取期間終了後即排出割合に大きく依存され、(B)、(C)シナリオでは2036年に約17～28万tが排出される。その後、本モデルにおいてFIT 買取期間が全て終了する2041年頃までにピークは落ち着くと考えられる。

比較的極端なケースだと考えられる(A)シナリオにおいては、排出量のピークは約50万tとなっており、数年のうちに年間排出量が10万t以上変動する結果となった。一方で、(C)シナリオにおいては、2035年から2041年頃比較的安定的な排出量となっており、2042年以降も同程度の排出がなされるとの算定結果となった。また、同様に極端なケースである(D)シナリオにおいては、FIT 買取期間に伴う排出ピークは見られず、2040年ごろにかけて徐々に排出量が増加する結果となった。いずれのシナリオでも、最終的には10万～20万tの間の排出量となると推計された。また、(B)、(C)シナリオでは2015年度の産業廃棄物の最終処分量に占める割合は2036年で1.7～2.7%と推計された。

なお、今後FIT 買取期間終了後に事業者が行う判断について予測可能性が高まることで、シナリオの蓋然性が高まり、予測精度が上がってくると考えられる。

また、本推計は議論の基準となるケースを設定するものであり、データの限界から、災害排出量は含めない等の様々な仮定をもとにしている。このため、必ずしも事業性の判断に足るものではないことに留意する必要がある。



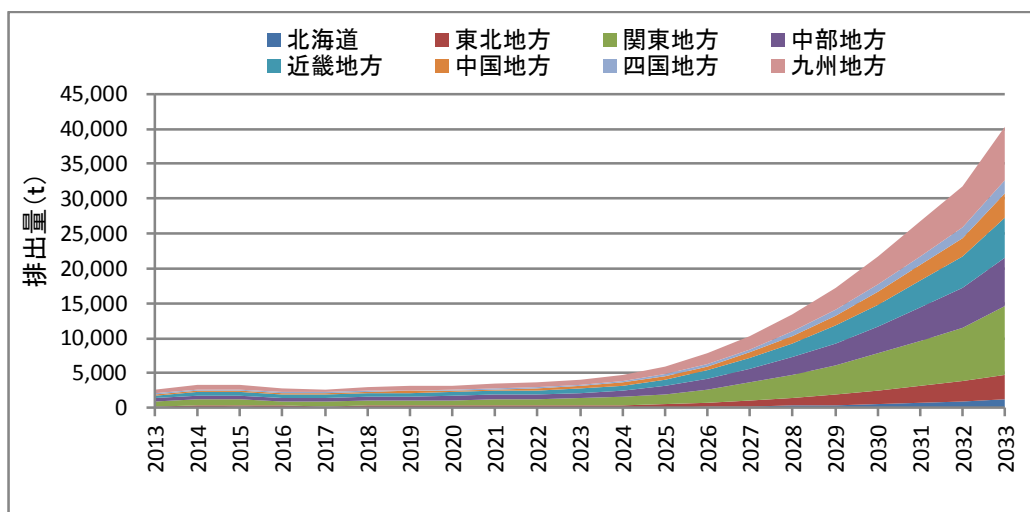
図Ⅲ-2-④-(2)-8 シナリオ別の排出量推計結果

表Ⅲ-2-④-(2)-6 排出量推計結果の産業廃棄物最終処分量との比較

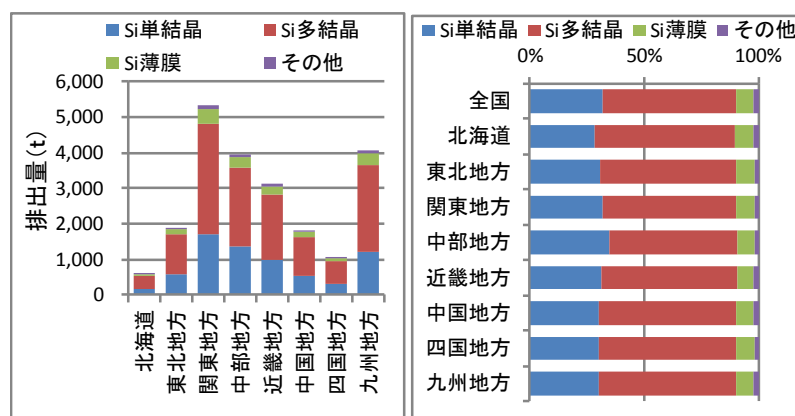
年度	排出見込量 (B)、(C)	2015年度の産業廃棄物の 最終処分量に占める割合
2020	約0.3万トン	0.03%
2025	約0.6万トン	0.06%
2030	約2.2万トン	0.2%
2036	約17~28万トン	1.7~2.7%

次に、2013年から、排出量がシナリオによって大きくは変化しない2033年までの都道府県別・モジュール別での排出量予測結果を図Ⅲ-2-④-(2)-9に示す。2013年から2033年にかけて、排出量全体は増加するが地域別の排出割合は大きくは変化せず、関東地方、九州地方、中部地方、近畿地方の順で排出量が大きくなる予測となっている。また、図Ⅲ-2-④-(2)-10に示すとおり、各地方で排出されるモジュール種別も、現時点のデータでは地方ごとの差は小さいと考えられる。

地域別排出量予測結果については、現在は地域別で入手できるデータが限定的なことから、必ずしも実態に即した予測となっていない可能性が考えられる。さらに実態に即したデータとするためには、改正FIT法の事業計画情報を利用する等、導入量データの拡充を実施する必要がある。



図Ⅲ-2-④-(2)-9 地域別排出量推計結果((B)FIT後賃貸土地分排出シナリオ)



図Ⅲ-2-④-(2)-10 2030年における地域別のモジュール別排出量及び排出比率推計結果 ((B)FIT 後賃貸土地分排出シナリオ)

2.実用化見通し

本調査研究は、我が国における太陽光発電システムのリサイクルの技術開発を実施する上で参考となるよう、国内動向(技術開発、政策、事業化事例)及び将来的な排出見込量を調査したものである。本調査研究を通じて得られた成果は、本事業内で実施されているリサイクル等の技術開発において、目指すべき技術開発の水準や方向性等の検討に資することが期待される。さらに NEDO 技術開発機構を通じて本調査研究の成果を一般に周知することで、我が国の太陽光発電システムのリサイクルシステムの構築に貢献することが見込まれる。

3.波及効果

固定価格買取制度の導入を契機に、太陽光発電システムの導入が急激に進んだが、太陽光発電システムを将来的に我が国の安定的な電源として位置づけていくためには、それらが使用済設備となり排出される段階までを想定したリユースやリサイクルに関する技術開発を進め、排出が本格化するまでに社会実装しておくことが重要である。

このような環境の中で本調査研究は、国内の太陽光発電システムのリユース・リサイクルの技術開発・政策・事業化の動向について調査・分析することを通じて、我が国の今後の技術研究開発の方向性等を明確にするとともに、将来的な排出見込量を提示することで、我が国の太陽光発電システムのリユース・リサイクルの技術開発及び社会実装に貢献することが期待できる。

なお、本調査研究の成果の一部は、経済産業省・環境省が太陽光発電システムにおけるリユース・リサイクル・適正処分に向けた対応方策を検討した「使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル・適正処分の推進について 報告書」(使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル・適正処分に関する検討会、2015年3月)、総合資源エネルギー調査会電気・ガス事業分科会再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会資料(2018年11月)で公表された。

⑤使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発

(1)使用済み太陽電池モジュールの低コスト修復技術の開発(ジー・エム・ジーエコエナジー)

【2016～2017年度】

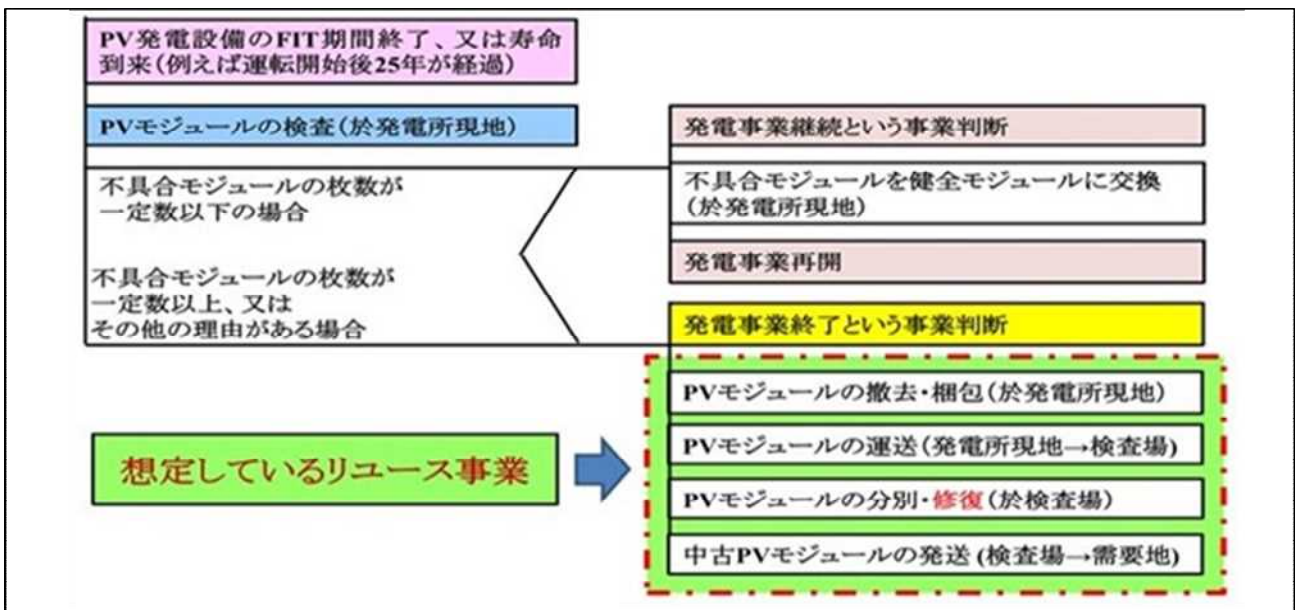
1.成果詳細

1.1 NEDO 目標と達成状況

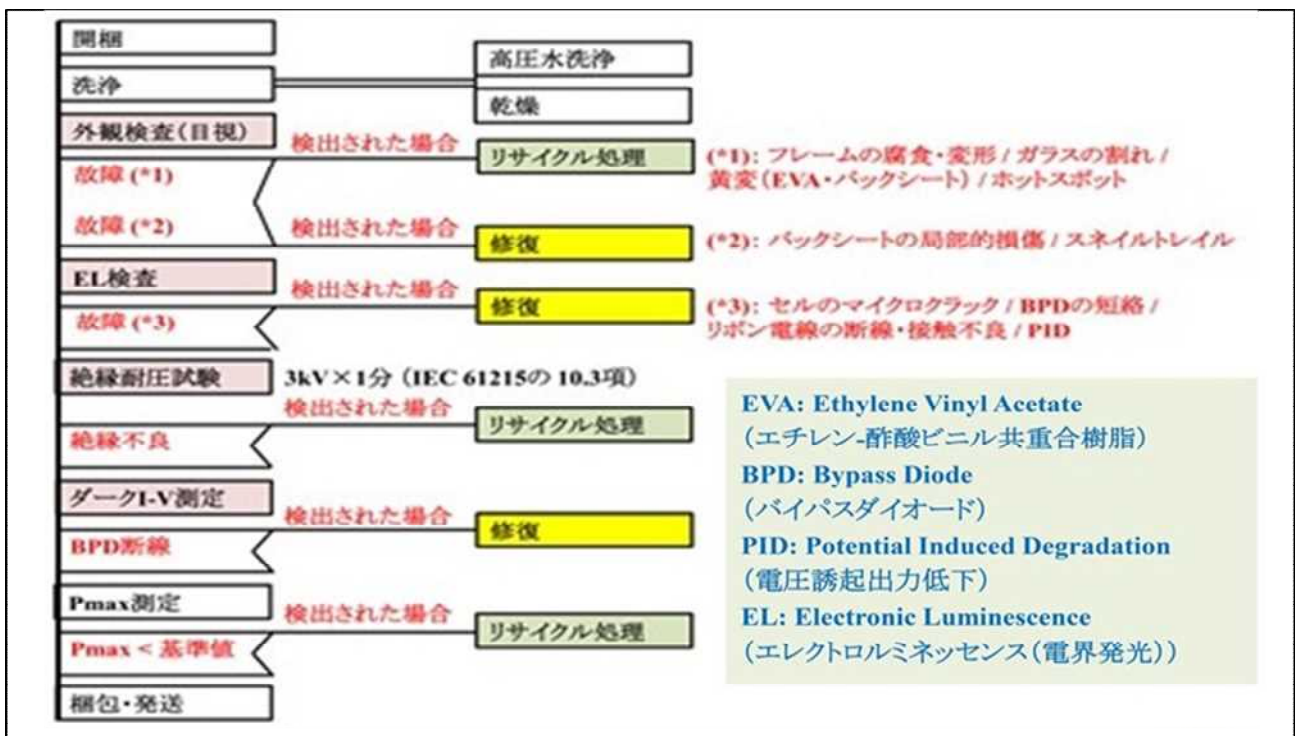
リユースコスト低減を目的として、本研究では故障モジュールの低コスト修復技術の開発を研究テーマとした。具体的には修復コストの約 40%低減(リユースコスト全体の約 2.5%低減に相当)を研究目標とした。

1.2 リユース事業概要とコスト計算条件

リユース事業を図Ⅲ-2-⑤-(1)-1 に示すように定義し、分別工程のフローを図Ⅲ-2-⑤-(1)-2 に示す。



図Ⅲ-2-⑤-(1)-1 使用済み太陽電池モジュールのリユース事業の定義



図Ⅲ-2-⑤-(1)-2 分別工程のフロー

リユースコスト計算条件を表Ⅲ-2-⑤-(1)-1 に示す。修復技術を、修復技術Ⅰ(故障 BPD の交換)、修復技術Ⅱ(バックシート損傷部位の交換)、修復技術Ⅲ(故障セルの交換)に分類し夫々の低コスト技術を追究した。

表Ⅲ-2-⑤-(1)-1 リユースコスト計算条件

一般	項目	仮定	備考		
	モジュールのPmax	200W	60セル結晶シリコンモジュール(初期Pmaxが250W)。		
	分別の年間処理枚数	115,200枚/年	23,040kW/年に相当する。撤去・梱包・運送工程の年間処理枚数もこれと同じ。		
	リサイクル処理コスト	40円/W	環境省ガイドライン(2016.03発行)のp.62によれば、10,000t(100MW)のリサイクル費が40億円。		
	直接員労務費単価	2,000円/h			
	運送距離	片道400km	東京ー大阪間を仮定した。		
	設備寿命	10年	初期投資額/10を年間の償却費とした。		
	検査場家賃	2,400千円/月	1,500円/m ² ・月×1,600m ²		
	検査場電気代単価	15円/kWh	業務用電力契約		
修復の発生率	修復の種類	発生率	年間処理枚数	修復の程度	修復技術
	BPD交換	1%	1,152枚/年	BPD 1個を交換	修復技術Ⅰ
	バックシート交換	1%	1,152枚/年	セル5枚分の範囲を補修	修復技術Ⅱ
	セル交換	3%	3,456枚/年	セル5枚を交換	修復技術Ⅲ
	修復の合計	5%	5,760枚/年		
リサイクル処理の発生率	5%	5,760枚/年			

PV モジュールの故障モードの検出手段・処置方法を表Ⅲ-2-⑤-(1)-2 に示す。

表Ⅲ-2-⑤-(1)-2 PV モジュールの故障モードの検出手段・処置方法

故障モード		検出手段	処置方法
フレームの腐食・変形		外観検査(目視)	リサイクル処理
ガラスの割れ		外観検査(目視)	リサイクル処理
黄変(EVA、バックシート)		外観検査(目視)	リサイクル処理
絶縁不良		絶縁耐圧試験(IEC 61215 Ed.2 10.3)	リサイクル処理
Pmax < 基準値		Pmax 測定	リサイクル処理
BPD の故障	BPD の断線	ダーク I-V 測定	修復→修復技術Ⅰ
	BPD の短絡	EL 検査	修復→修復技術Ⅰ
バックシートの局部損傷		外観検査(目視)	修復→修復技術Ⅱ
セルの不具合	スネイルトレイル	外観検査(目視)、又は EL 検査	修復→修復技術Ⅲ
	マイクロクラック	EL 検査	修復→修復技術Ⅲ
	ホットスポット	外観検査(目視)、又は EL 検査	修復→修復技術Ⅲ
	PID	EL 検査	修復→修復技術Ⅲ
リボン電線の断線・接触不良		EL 検査	修復→修復技術Ⅲ

1.3 修復技術Ⅰ(故障 BPD の交換)の開発

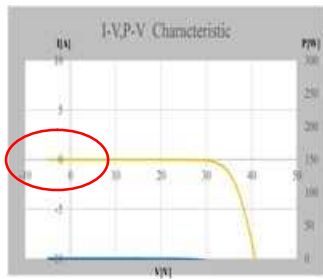
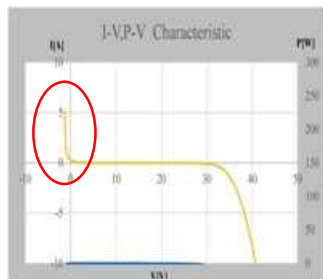
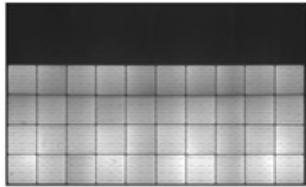
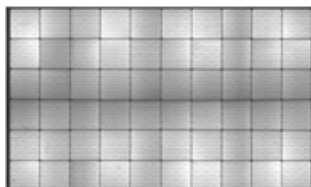
図Ⅲ-2-⑤-(1)-3 に示すように、3 タイプの端子ボックスについて、BPD 露出方法を検討し、実験を通じて、RTV 溶剤を用いない、作業効率が高く廃液処理が不要な補修方法を開発した。



図Ⅲ-2-⑤-(1)-3 種々の端子ボックス構造と BPD 補修技術

BPD 故障には、断線故障と短絡故障があるが、夫々の故障の補修を 60 セルモジュールで実施し、補修前後にモジュールで検査を行った。表Ⅲ-2-⑤-(1)-3 に示すように補修後の品質に問題無いことを確認した。

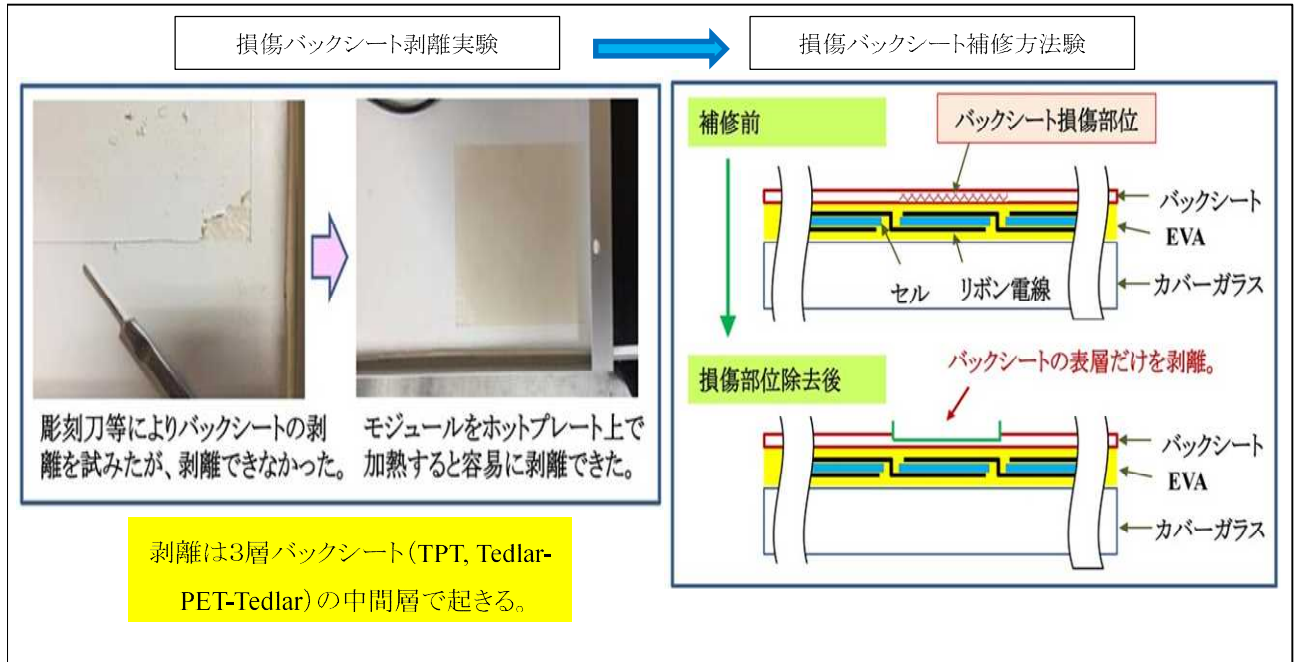
表Ⅲ-2-⑤-(1)-3 BPD 故障前後の検査結果

故障モード	検査法	補修前検査結果	補修後検査結果
BPD 断線故障	ダーク I-V 測定		
BPD 短絡故障	EL 検査		

1.4 修復技術Ⅱ(バックシート損傷部位の交換)の開発

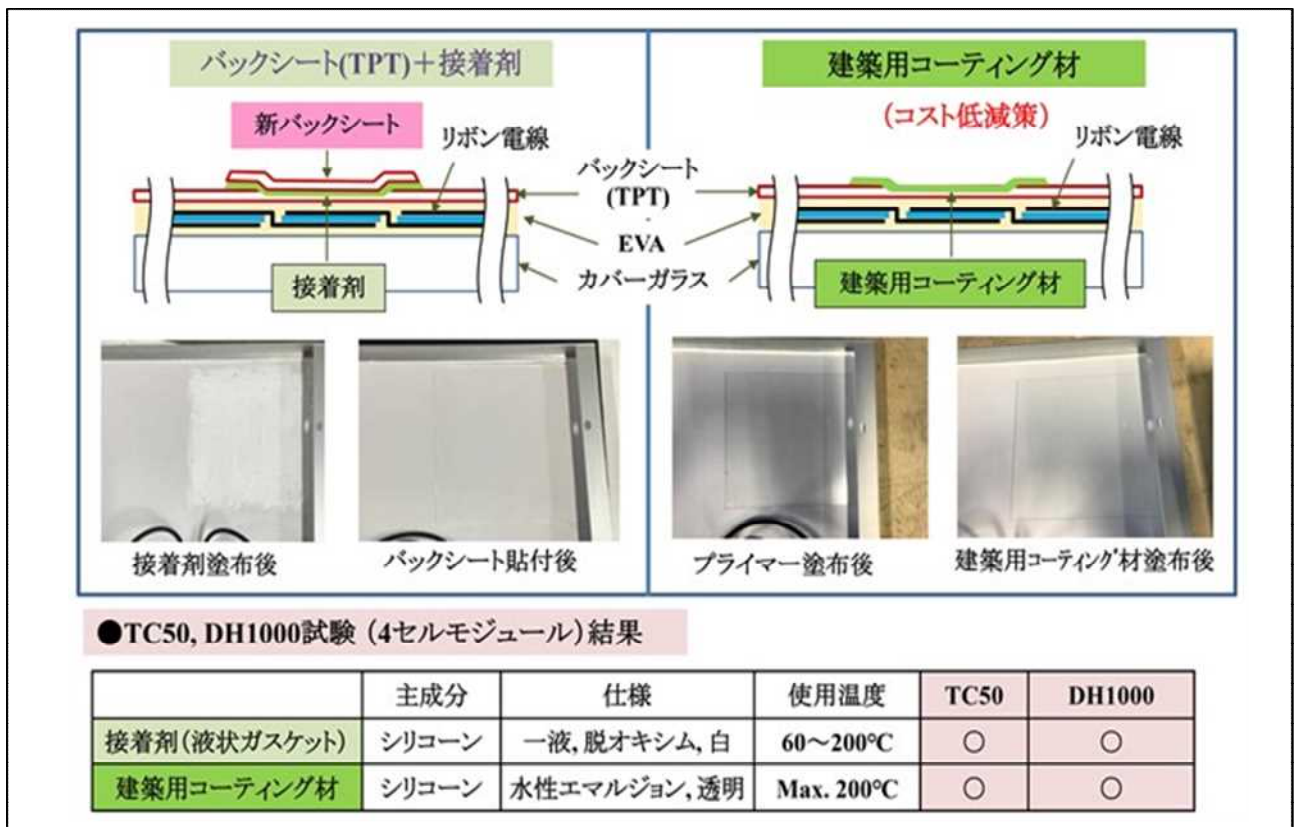
図Ⅲ-2-⑤-(1)-4 に示すように、損傷バックシートの剥離実験において、モジュールをホットプレート上で加熱すると損傷部が容易に剥離できること、剥離は 3 層バックシート(TPT)の中間層で起きることが判明した。このことから、モジュール内部の封止材を損傷せずにバックシート損傷部位表層だけを

除去する方法を開発した。



図Ⅲ-2-⑤-(1)-4 損傷バックシートの補修方法

図Ⅲ-2-⑤-(1)-5 に示すように、バックシートの損傷想定部の表層だけを剥離させ、その部位に接着剤（一液性縮合型 RTV）を用いて新バックシートを貼り付ける方法と、コスト低減のためにバックシートを用いずに建築用コーティング材を接着させる方法を実施し、耐候性試験(TC50、及び DH1000)を行い、問題無いことを確認した。

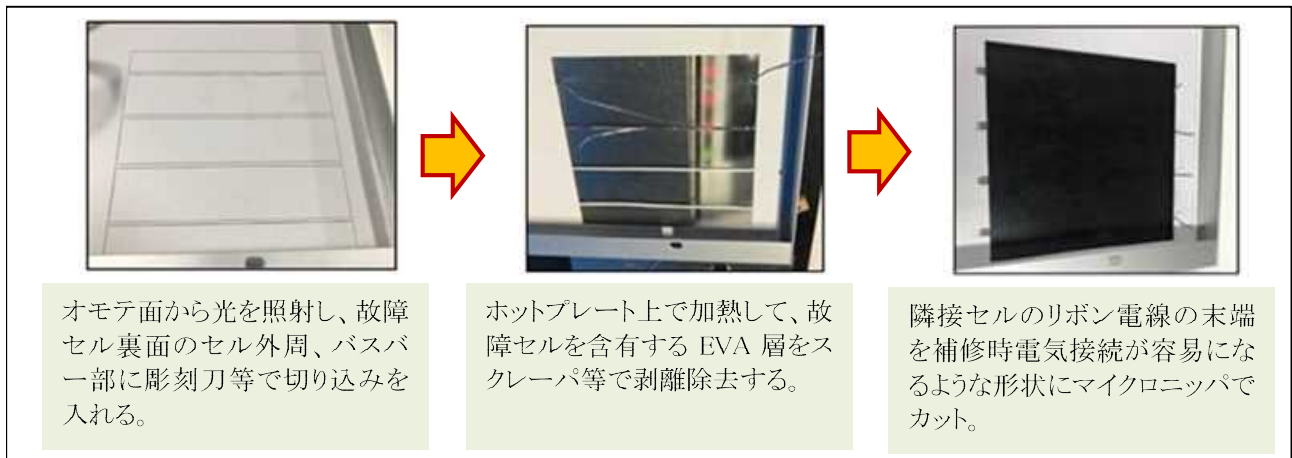


図Ⅲ-2-⑤-(1)-5 損傷バックシート補修方法の実験結果

1.5 修復技術Ⅲ(故障セルの交換)の開発

1.5.1 故障セルの除去方法

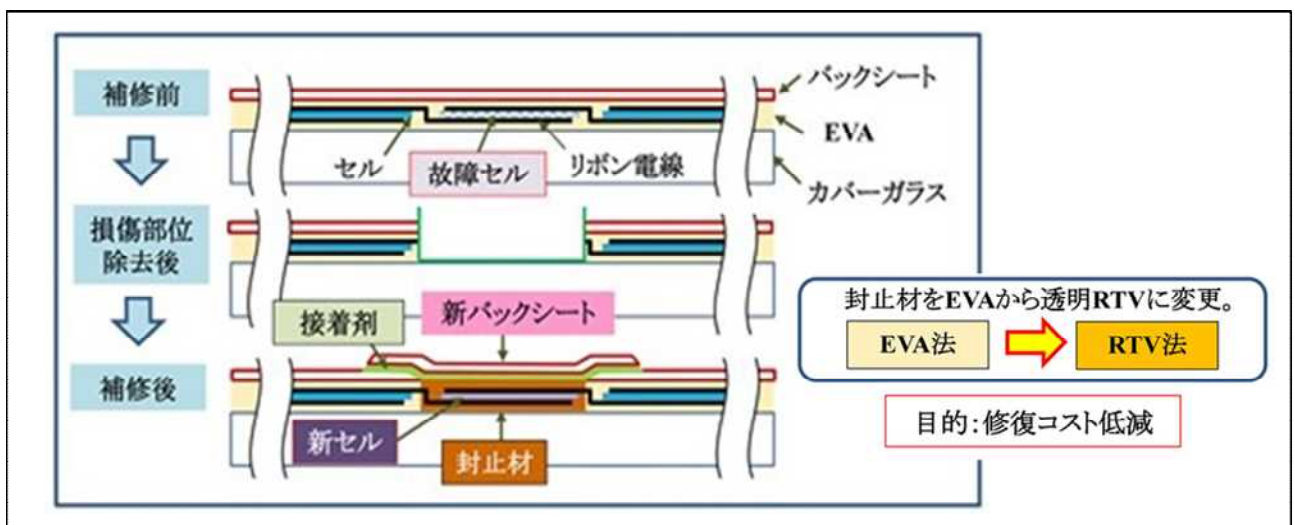
図Ⅲ-2-⑤-(1)-6 に示すように、EVA 溶剤を用いずに故障セルを除去する方法を開発した。物理的な方法なので、作業効率が良く、廃液処理も不要である。



図Ⅲ-2-⑤-(1)-6 故障セルの除去方法

1.5.2 EVA 法と RTV 法

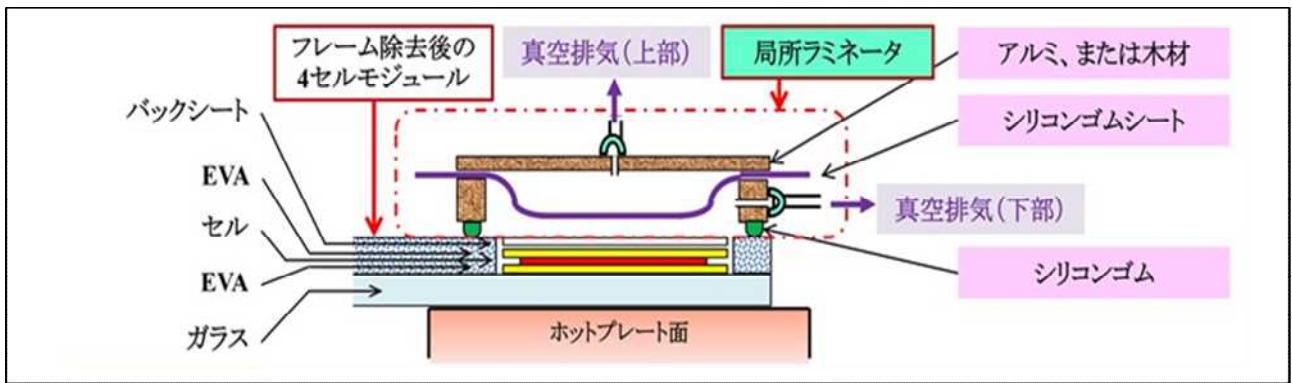
故障セル交換方法の概念を下図に示す。故障セル除去後に、新セルを電気接続し、これを新バックシートとともに封止材で封入するというものであるが、封止材に EVA を用いる方法(EVA 法)ではコストが高くなってしまい事業化は困難と予想されたので、封止材に透明 RTV を用いる方法(RTV 法)を適用して修復コストの大幅な低減を目指すこととした。図Ⅲ-2-⑤-(1)-7 に故障セル交換方法の概念を示す。



図Ⅲ-2-⑤-(1)-7 故障セル交換方法の概念

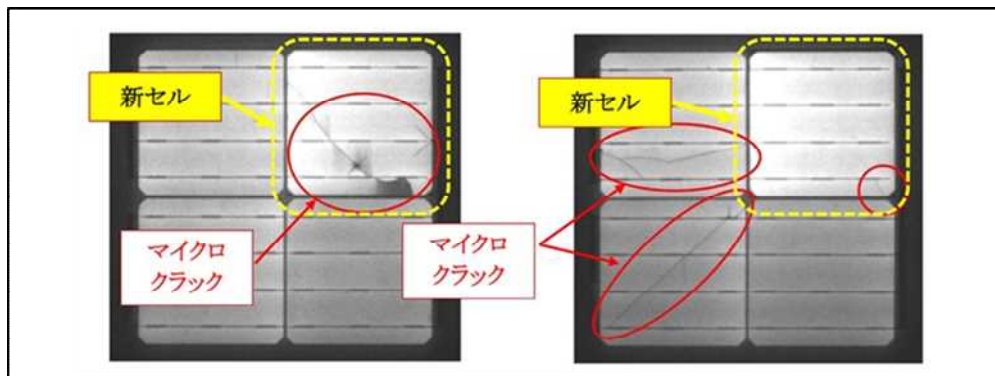
1.5.3 EVA 法の実験結果

EVA 法においては、故障セル部だけの EVA を局所的に架橋処理できるラミネータが必要と考えた。これは、モジュール全体をラミネートすると健全部も加圧・加熱されてしまい、その品質が損なわれることを危惧したからである。そこで、図Ⅲ-2-⑤-(1)-8 に示すように、4 セルモジュールのセル 1 枚を対象とした局所ラミネータを開発した。



図Ⅲ-2-⑤-(1)-8 局所ラミネータの開発

4セルモジュール8枚を対象に、局所ラミネータを用いてEVA法による補修を実施したところ、図Ⅲ-2-⑤-(1)-9に示すように、EL検査で8枚中2枚に、セルのマイクロクラックの発生が認められた。原因は、局所ラミネータを用いても故障セル部と周辺部の応力不均衡が発生したからと推定される。この現象から、コスト要因以外に品質要因もあることが判明したので、EVA法の適用は不可と判断した。



図Ⅲ-2-⑤-(1)-9 EVA法で発生したセルのマイクロクラック(EL検査結果)

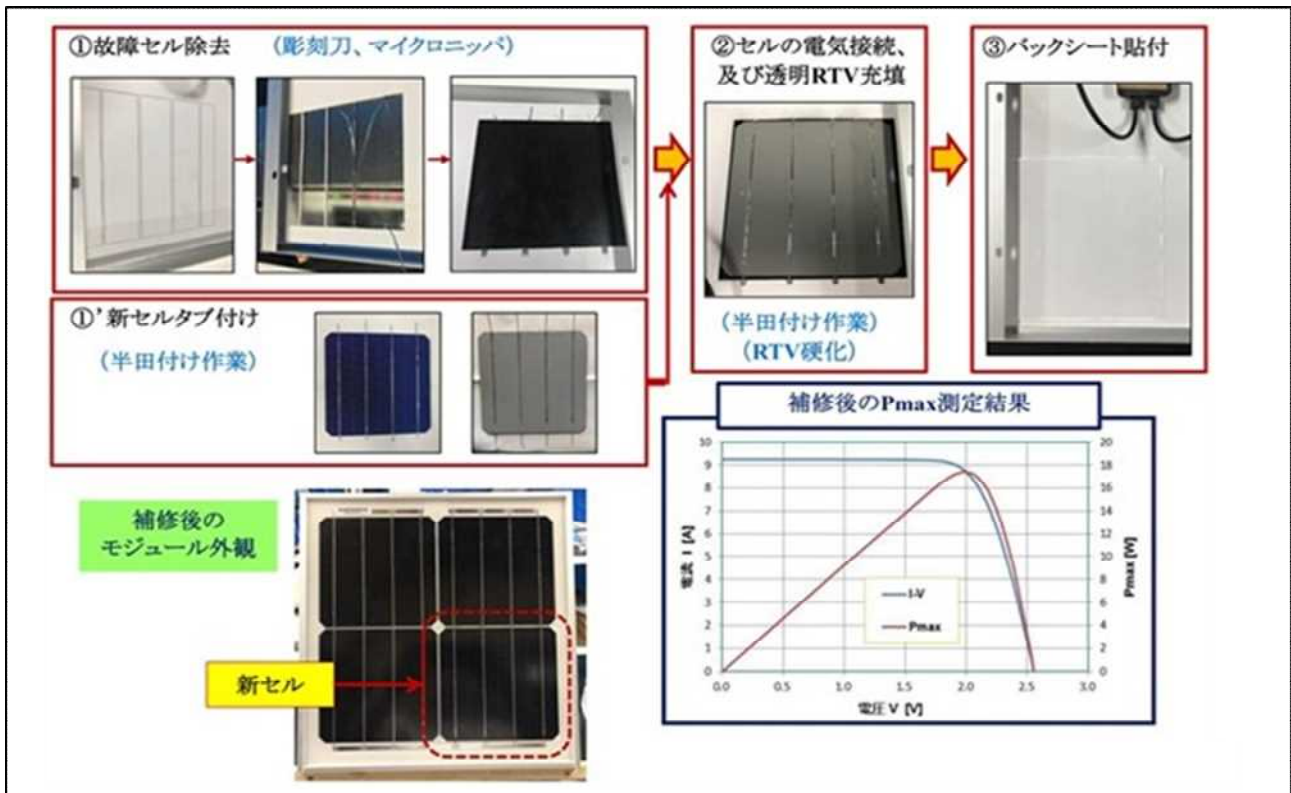
1.5.4 RTV法の実験結果

RTV法の実験に際し、表Ⅲ-2-⑤-(1)-4のような2種類の透明RTVを準備した

表Ⅲ-2-⑤-(1)-4 準備した透明RTVの仕様

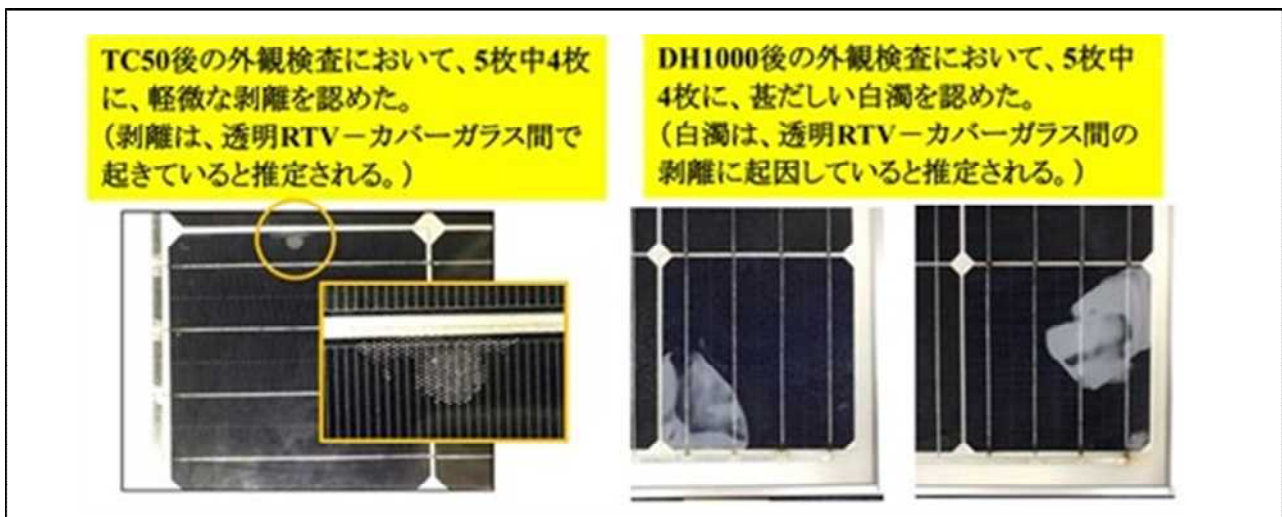
RTV名称	硬化タイプ (副生ガス)	色	標準硬化条件
RTV-A	二液付加 (無し)	透明	23℃×72h
RTV-B	二液付加 (無し)	透明	23℃×72h

まず、4セルモジュール、10枚を対象に、透明RTVとして“RTV-A”を用いて、RTV法による補修を実施した。補修手順の概要を図Ⅲ-2-⑤-(1)-10に示す。



図Ⅲ-2-⑤-(1)-10 RTV法の補修手順

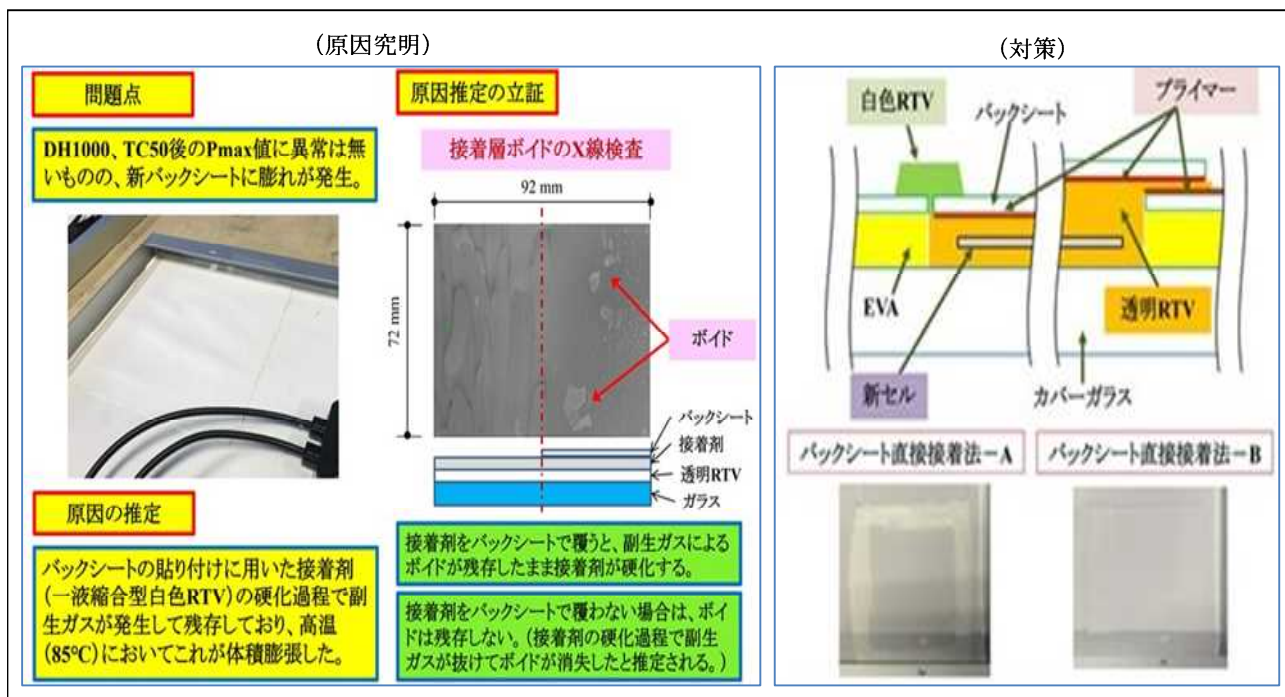
これら 10 枚中 5 枚を TC50 に、5 枚を DH1000 に供したところ、図Ⅲ-2-⑤-(1)-11 に示すように、透明 RTV-カバーガラス間の剥離に起因すると思われる現象が発生した。



図Ⅲ-2-⑤-(1)-11 RTV法で発生した透明 RTV-カバーガラス間の剥離

この不具合は、“RTV-A”の接着力が不十分であったことに起因すると考え、“RTV-B”を用いて同じ補修法を実施したところ、透明 RTV-カバーガラス間の剥離は起きなくなった。

但し、図Ⅲ-2-⑤-(1)-12 に示すような新バックシートの”膨れ”が観察された。バックシートの貼り付けに用いた接着剤(一液縮合型白色 RTV)の硬化過程で副生ガスが発生してこれが残存したものと推定し、X 線検査によりこの推定を立証した。以上の原因究明結果に基づき、新バックシートを、プライマーを利用して直接、硬化後の透明 RTV に接着させるという対策を実施した。2 つの方法を実施し、そのいずれもが、TC50、及び DH1000 に合格した。これを以って、RTV 法による修復技術Ⅲは確立したと考える。



図Ⅲ-2-⑤-(1)-12 RTV法で発生した新バックシートの”膨れ”と原因究明、及び対策

1.6 コスト低減達成状況

1.6.1 コスト

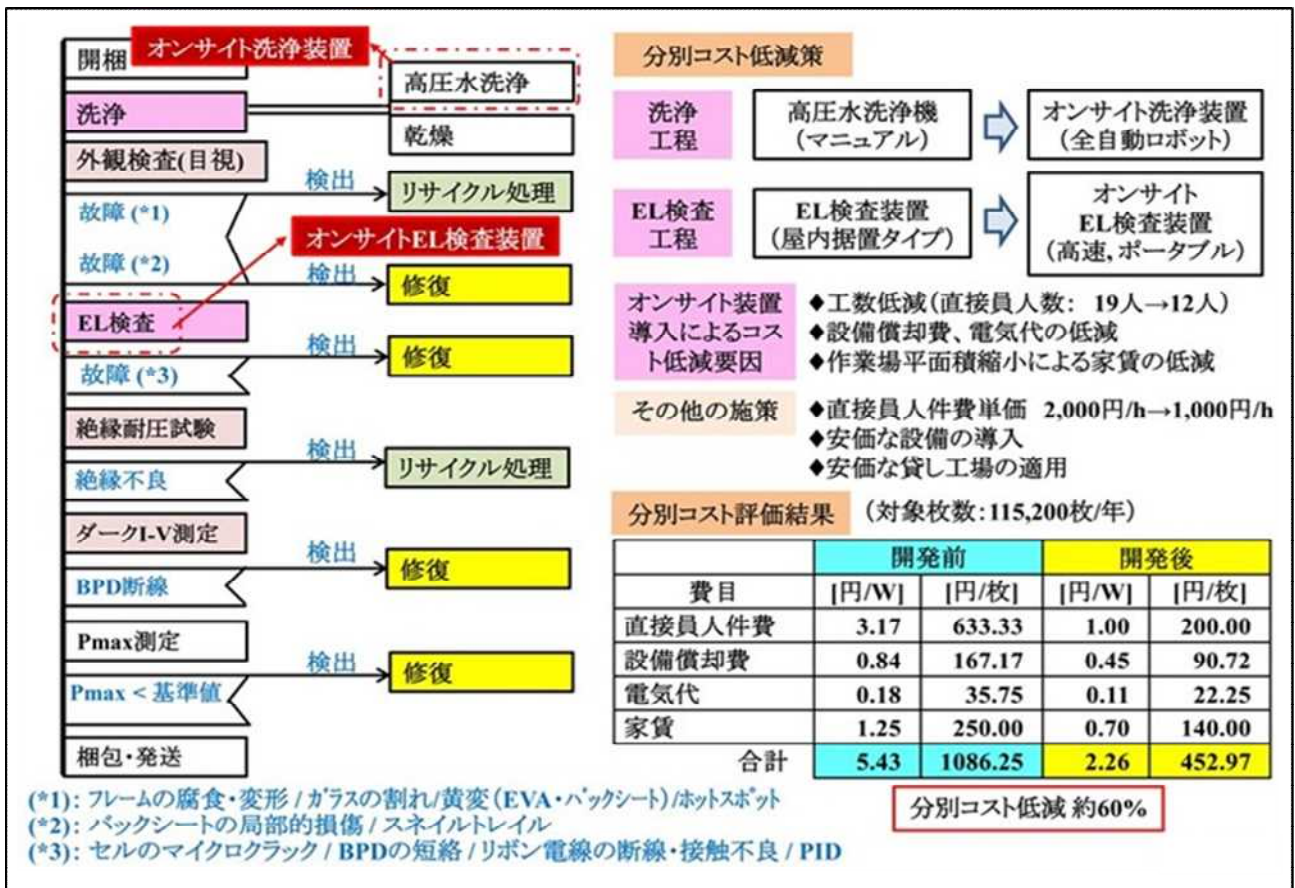
表Ⅲ-2-⑤-(1)-5 に示すように、修復コスト低減率は計画値 40%に対し、成果は 46%であり、目標を達成した。

表Ⅲ-2-⑤-(1)-5 修復コストの低減

項目	開発前		開発後 (計画)		開発後 (成果)		主なコスト低減要因
	[円/W]	[円/枚]	[円/W]	[円/枚]	[円/W]	[円/枚]	
修復Ⅰ	1.41	282.13	1.41	282.13	0.54	108.38	RTV 溶剤を用いないポッティング材除去方法の導入による工数低減、及び材料費低減
修復Ⅱ	3.16	631.44	1.43	285.04	0.69	137.96	内部封止材を損傷させないバックシート除去方法の導入による工数低減、材料費低減
修復Ⅲ	17.95	3589.32	11.25	2250.13	10.96	2191.88	EVA 法→RTV 法 (主に工数低減、ラミネータ設備償却費低減)
合計	22.51	4502.88	14.09	2817.29	12.19	2438.21	
修復コスト低減率			約 40%		約 46%		

1.6.2 分別コスト

図Ⅲ-2-⑤-(1)-13 に示すように、オンサイト洗浄装置、及びオンサイト EL 検査装置の導入等の効果により、分別コスト低減 60%を達成した。



図Ⅲ-2-⑤-(1)-13 分別コストの低減

1.6.3 リユースコスト

修復コスト、分別コストに関する低減効果を反映させてリユースコストを評価した。表Ⅲ-2-⑤-(1)-6に示すように、リユースコスト低減は計画値 2.5%に対し、成果 22.2%であり、目標を達成した。

表Ⅲ-2-⑤-(1)-6 リユースコストの低減

工程	対象割合	対象枚数 [枚/年]	開発前			開発後 (計画)			開発後 (成果)		
			コスト (*1)			コスト (*1)			コスト (*1)		
			[円/W]	[円/W]	[円/枚]	[円/W]	[円/W]	[円/枚]	[円/W]	[円/W]	[円/枚]
撤去・梱包・運送	100%	115,200	8.09	8.09	1,617	8.09	8.09	1,617	8.09	8.09	1,617
分別	100%	115,200	5.43	5.43	1,086	5.43	5.43	1,086	2.26	2.26	453
修復	5%	5,760	22.51	1.13	225	14.09	0.70	141	12.19	0.60	122
リサイクル処理	5%	5,760	40.00	2.00	400	40.00	2.00	400	40.00	2.00	400
間接経費 (15%)			—	2.50	499	—	2.43	487	—	1.94	389
リユースコスト合計			—	19.14	3,828	—	18.66	3,731	—	14.89	2,981
コスト低減率			—	—	—	—	2.5%	—	—	22.2%	—

(*1) この欄のコストは、個々の工程の対象枚数に関するコストを示す。

1.6.4 将来のリユースコスト低減見直し

次の3種類のコスト、

コスト A	本研究開発後のコスト
コスト B	通常予想される範囲でのコスト低減策を実施した場合のコスト
コスト C	発電所現地における分別(検査)技術が進歩した結果として、2030年頃に、分別とリサイクル処理を発電事業者が行い修復だけをリユース事業者に委託するというケースが増大すると予測。そのようなケースのコスト。

を定義し、夫々のコストに本研究の成果を反映させたものが表Ⅲ-2-⑤-(1)-7である。コスト C のビジネスモデルにおいては、180 円/枚というリユースコスト達成の可能性はある。

表Ⅲ-2-⑤-(1)-7 将来のリユースコスト低減見直し

工程	コスト A [円/枚]	コスト B 達成のための施策	コスト B [円/枚]	コスト C における 仮定	コスト C [円/枚]
撤去・梱包・運送	1,617	多能工化による直接員削減 12人→8人 直接員労務費単価：2000→1000円/h 運送距離(片道)の短縮：400km→100km リース車両の自家用化等	536	修復後モジュールの出荷時に片道運送コストだけが発生する。	89
分別	1,036	自動化による人員削減:19人→8人 直接員労務費単価：2000→1000円/h 安価な貸し工場の適用 安価な設備の導入 (洗浄工程、EL検査工程に ON-site 装置を導入、等)	453	分別コストは発生しない。	0
修復	122	直接員労務費単価：2000→1000円/h 安価な設備の導入、材料の大量調達	52	修復費はコスト B と同じ。	52
リサイクル処理	400	大量処理等	200	リサイクル処理は発生しない。	0
その他経費 (15%)	484		186		21
(合計)	3,709		1,427		162

2.実用化見通し

事業化推進日程と事業化留意事項を表Ⅲ-2-⑤-(1)-8 に示す。事業化判断の時期は早くて 2026 年頃と見ている。

表Ⅲ-2-⑤-(1)-8 事業化推進日程と事業化留意事項

年		2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
事業化推進日程	市場調査	[Yellow bar from 2019 to 2027]											
	分別ライン設計									[Yellow bar from 2027 to 2028]			
	設備投資										[Yellow bar from 2028 to 2029]		
	操業・販売											[Yellow bar from 2029 to 2030]	
事業化留意事項	使用済みモジュール発生量	環境省予測通りに使用済みモジュールが発生するかどうかを見極める必要がある。最新の環境省ガイドライン(2018年12月発行)によれば、直近の使用済みモジュール排出量は、4,400t/年(44MW/年)であり、事業化を志向するにはまだ少ない。											
	中古モジュールの顧客開拓	離島・僻地等の系統が弱い地域において独立分散電源の設置を志向する事業者を開拓して行く(系統連系して売電事業を行う PV 発電事業者は、発電出力と寿命を重視するので、中古モジュールの顧客にはなりにくいと推察される)。											
	中古モジュールの価格	開発後のリユースコストは、約 14 円/W(18 頁参照)である。→中古モジュール売価を例えば 20 円/W と設定することができる。 ●但し、新品モジュール(寿命保証 20 年)の価格が、直近で 30 円/W に下がっている。⇒寿命保証 10 年(仮定)の中古モジュールは、売価を 15 円/W にまで下げる必要がある。⇒引き続き、コスト低減に注力する必要がある。 ●また、将来、新品モジュール価格が 20 円/W 以下になった場合は、産業廃棄物の低減という観点から、中古モジュールに対する何らかのインセンティブが必要になる。 ●リサイクルコストの低減次第では、リユースは不要となるかも知れない。その場合は、リサイクル業者と協力した事業化を志向する。											
	特許戦略	当面は、特許取得はしない(ノウハウとして保持する)。											

3.波及効果

本研究によって、故障モジュールの修復がリユース事業の一翼を担う可能性を示すことができた。

(2)On-Site でのリユースモジュール分別技術の開発(太陽光発電技術研究組合)

【2016～2018 年度】

1. 成果詳細

1.1 簡便な電気安全性判定方法の開発 (担当：太陽光発電技術研究組合)

<目標> (最終目標_2018 年度)

いろいろな使用済み太陽電池モジュールについてこれまで検討した測定試験技術を適用し、時間短縮された気中絶縁抵抗試験が実際のリユースモジュール健全性試験として有用であることを実証する。

<成果>

太陽電池モジュールの絶縁抵抗値の測定方法として、JIS C 8990 に気中での方法(10.3 項 絶縁試験)と、水中にモジュールを浸漬させる湿潤での方法(10.14 項 湿潤漏れ電流試験)の 2 つの方法が存在する。

湿潤での測定は水を張る水槽が必要になるなど時間面でのコストが大きいため、当初の計画では気中と湿潤の相関試験を行い気中の絶縁抵抗試験で湿潤絶縁抵抗試験の代替が可能かを検討した。この検討において、一般財団法人電気安全環境研究所(JET)との相関試験を実施した。

相関試験用サンプルとして、実際に屋外で使用された中古太陽電池モジュール 184 枚を購入し実験を行った。絶縁抵抗測定を行う際には、モジュールの外観状態を確認し外観と絶縁抵抗測定結果の関係も確認した。

相関試験の結果、気中と湿潤での絶縁抵抗結果には相関が見られず、気中絶縁試験で湿潤絶縁試験を代替することは困難であると判断し、On-Site での湿潤絶縁試験方法の確立と時間短縮を新たな開発目標と定めた。On-Site 湿潤絶縁試験の時間短縮については、後述する。

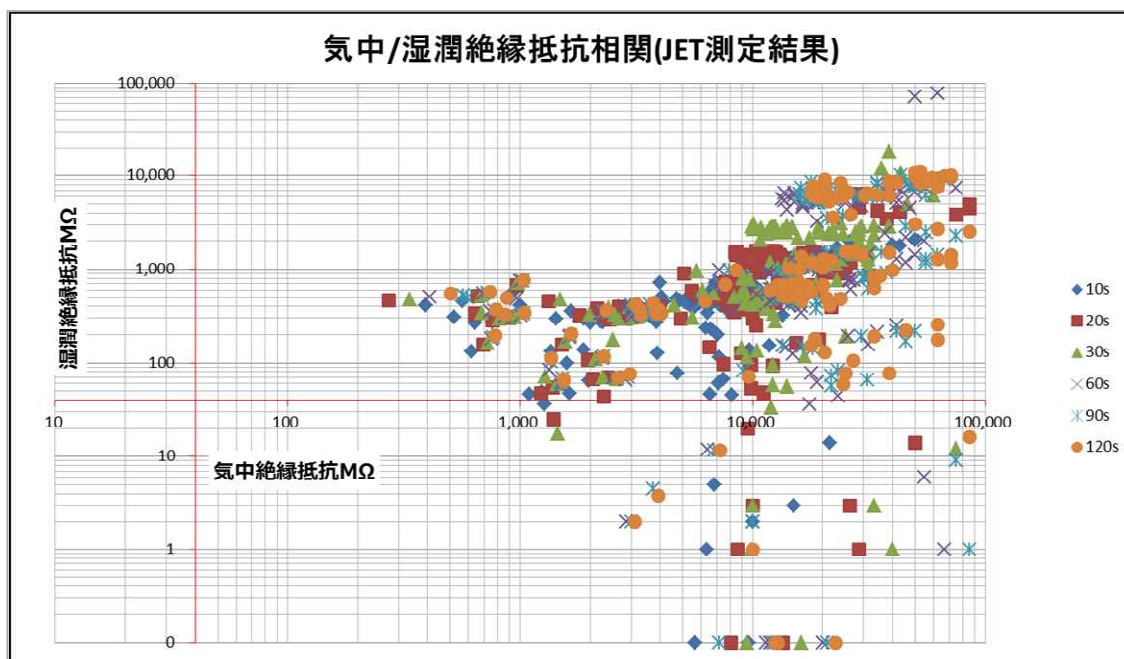
1.1.1 気中試験と湿潤試験の代替の検討(JET との相関試験)

図Ⅲ-2-⑤-(2)-1 に気中/湿潤の相関試験結果を記載する。中古太陽電池モジュールについて、気中および湿潤での絶縁抵抗測定を実施、測定結果をグラフにプロットした。グラフ横軸が気中絶縁抵抗試験結果、縦軸が湿潤絶縁抵抗試験となる。規格に基づく合格条件は、「抵抗測定値×モジュール面積 > 40MΩm²」である。湿潤抵抗試験での測定結果が 0 近傍のものは、内部回路が露出して短絡していることを示す。

この相関グラフが直線となっていれば、気中と湿潤の試験に相関があり、気中試験の結果を湿潤試験の結果に置き換えることの検討が可能となるが、グラフが示すように両者には相関が見られないという結果が得られた。

特に、気中試験で高い抵抗値を示しても湿潤試験では短絡で不合格となるモジュールが存在していることが、代替とすることを困難と判断する大きな理由となった。

今回の開発で湿潤試験短絡を示したモジュールは、ほぼすべて外表面に傷があり内部回路が露出している状態であった。湿潤抵抗試験においては、この内部回路露出部分に水が侵入し、抵抗値は短絡を示し不合格となるが、気中での絶縁試験では内部回路の露出部が存在している場合でも、抵抗値は無傷の製品と大差は無く合格を示した。実環境においても、雨天や早朝の結露時などは湿潤試験と同等の環境になることが予想されるため、気中試験のみでは安全性の保障が難しいと判断した。



図Ⅲ-2-⑤-(2)-1 気中/湿潤絶縁抵抗測定結果の相関グラフ

1.2 迅速な分別判断ツールの開発(外観判定用マニュアル作成/太陽電池モジュール温度係数のデータベース化)(担当：太陽光発電技術研究組合)

<目標> (最終目標_2018年度)

①「簡便な電気安全性判定方法の開発」、③「On-Site での分別技術開発」から要求される課題と進捗を確認しながら、リユースモジュール分別方法検討委員会において2019年2月までに以下を完成させる。

- ・外観判定用マニュアル
- ・太陽電池モジュール温度係数のデータベース
- ・温度係数非公開の太陽電池モジュールにおける出力値判定方法
- ・出荷品質ランクの判定マニュアル

<成果>

1.2.1 外観判定用マニュアル作成

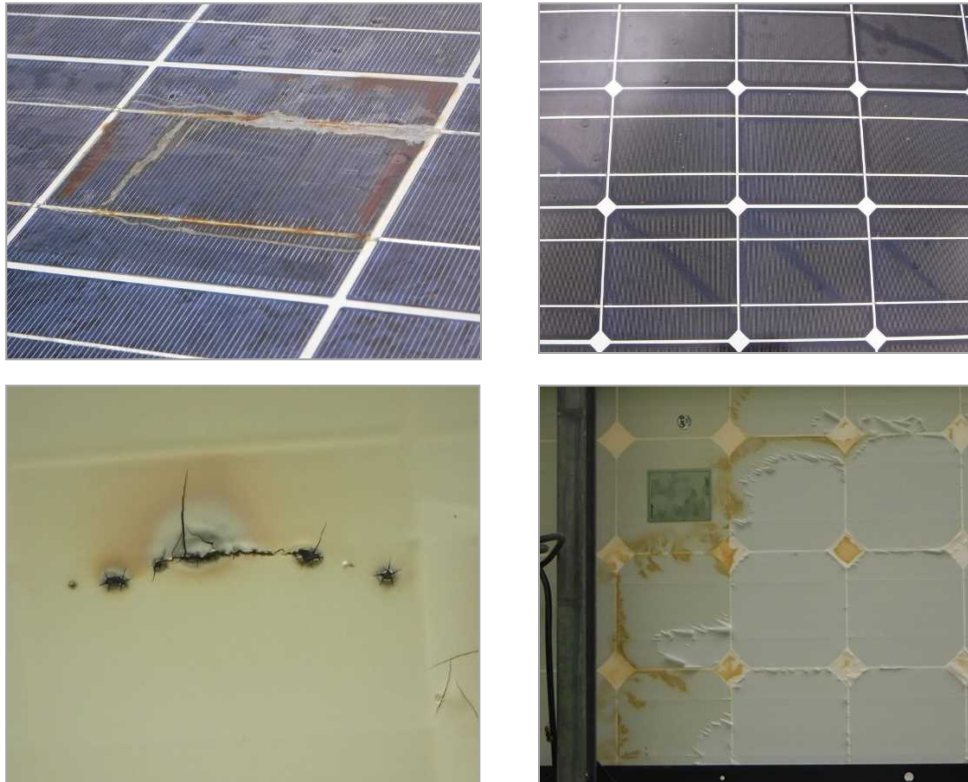
モジュールの不具合は外観上の異常となって現れる場合が多く、モジュールの内部回路に不具合が発生した場合、回路内の温度上昇を招くため、表面の変色や剥離、焼損というかたちで表面上に現れる。太陽電池モジュールの外観不具合の判定は、IEC 61215 (JIS C 8990)を参照して下されるが、On-Siteで迅速な判定を可能にするため太陽電池モジュールにおける典型的な不具合事例の調査を行い、外観判定マニュアルの作成を行った。

既知の調査報告書の内容を整理するとともに、2018年6月に山梨県北杜市の「北杜サイト太陽光発電所」の現地調査を行った。

【北杜市 Web サイト 北杜サイト太陽光発電所紹介ページ】

<https://www.city.hokuto.yamanashi.jp/docs/1993.html>

北杜サイト太陽光発電所(総出力 2MW)では、2006～2010年度 NEDO 事業として国内外の 20 社ほどの太陽電池モジュールが 2008～2010 年頃に設置され各種実証が行われた。事業終了後は北杜市に譲渡され、設置から 10 年程度経過した太陽電池モジュールが現在も運用されている。調査により観測された不具合事例を以下に写真で掲載する(図Ⅲ-2-⑤-(2)-2)。



図Ⅲ-2-⑤-(2)-2 北杜サイトでのモジュール不具合事例

調査した太陽電池モジュールにおいては、外観不具合(外観変化)の発生頻度はモデル毎で大きく異なっていた。例として表面の変色の程度の場合、あるモデルでは全数変色しているが、別のモデルでは1枚も変色したモジュールは無かった。裏面バックシートの剥離や膨らみについても、特定のモデルで発生が集中しており、またモジュール中の発生箇所の位置にも傾向が見られた(バックシートの膨らみがセルの四隅にみられるなど)。

ホットスポット現象と思われる焼損痕があるモジュールも少数存在したが、これも特定のモデルに発生が集中しており、外因性の影の影響などよりもモデルが製造時から存在する固有の品質差が強く影響しているものと考えられる。

調査によって撮影した外観不具合の写真を整理し、写真毎に「発生している現象の解説、予想される原因、判定ランク、今後予想されるリスク」等をまとめ、判定マニュアルを作成した。後述(1.3.2②)の通り、3段階(外観異常のないもの、または性能に影響しない程度の変化をランクA、影響するが軽微であるものをランクB、リユースに適さない重大な不具合をランクCとした)で評価した。

現状、測定者の習熟度によって判定までの時間や精度にバラつきが存在するが、マニュアルを拡充していくことで分別判定技術の向上が期待できる。

1.2.2 太陽電池モジュール温度係数のデータベース化

JISによるSTC条件での太陽電池の出力測定は25℃で行うよう定められているが、迅速、低コストの出力測定障害となっている。そこで、出力測定時の許容温度範囲を広げ、出力の温度係数で補正することによりこの問題の解決を図った。

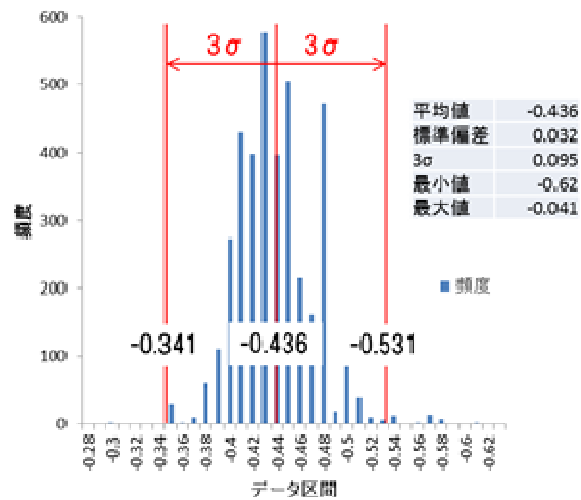
(1)温度係数のデータベース化

太陽電池の温度係数は公開されているものと非公開のものがあるため、モジュールメーカーへのヒアリングを通して、非公開のものも含めて温度係数のデータベース化を行った。JET認証品24,947件の内10,731件についてデータベース化した。

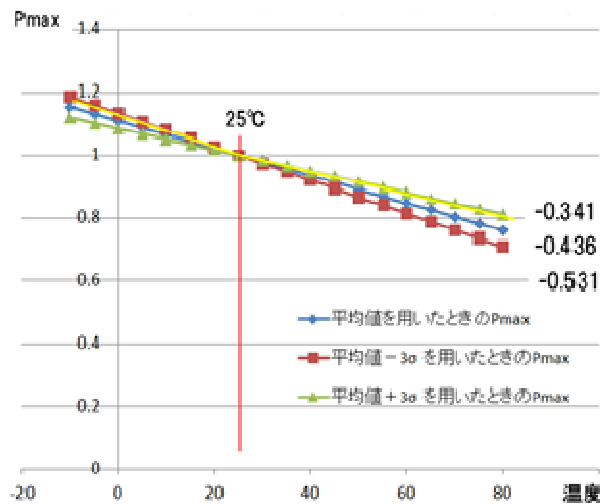
一方、温度係数の判らないモジュールについては、モジュールの種類毎のヒストグラムから25℃の出力に換算する際に過大な出力判定にならないような補正式を考案し、リユースモジュール分別方法検討委員会で了解を得た。図Ⅲ-2-⑤-(2)-3に多結晶太陽電池の場合のヒストグラムを、図Ⅲ-2-⑤-(2)-4に温度変化グラフを示す。温度係数が不明なモジュールに適用する温度係数は以下のように25℃のPmax換算で過大な出力にならないように①又は②の温度係数を使用する。

出力測定時の温度が 25℃以下の場合：温度係数の平均値+3σ ……①

出力測定時の温度が 25℃以上の場合：温度係数の平均値-3σ ……②



図Ⅲ-2-⑤-(2)-3 多結晶シリコン太陽電池モジュールの温度係数分布ヒストグラム



図Ⅲ-2-⑤-(2)-4 Pmax(多結晶モジュール)の温度変化

(2)温度係数データベース検索ソフトの作成

前項で編纂した太陽電池モジュールデータベースについて、検索をより簡便にするため、専用の検索ソフトウェアを開発した。モジュール型式をフォームに入力することで、データベースに存在する場合は、公称値やそれを元にした最大出力クラス判定基準が自動で表示される。データベースにないモジュールの場合、公称値は自動では表示されないが、銘板ラベルから読み取った公称 Pm 値を手動入力することで、最大出力クラス判定基準の計算が行われる。図Ⅲ-2-⑤-(2)-5 に検索ソフト画面を示す。

◆PVモジュールデータ検索ソフト

Chemitox

モジュール型式： 型式を入力してください

検索結果：

セルタイプ： 不明

◆公称スペック

Pm： W

Isc： A

Voc： V

Ipm： A

Vpm： V

Pm温度係数： %/℃

◆最大出力クラス判定基準

クラスA： W以上 (公称値の90%以上)

クラスB： W以上 (公称値の80%以上)

クラスC： W未満 (公称値の80%未満)

※データベースに登録が無い場合
公称Pm値を測定者が入力し、
クラス判定ボタンから手動で判定する

図Ⅲ-2-⑤-(2)-5 PVモジュールデータ検索ソフト画面

1.3 On-Site での分別技術開発 (担当：株式会社ケミトックス)

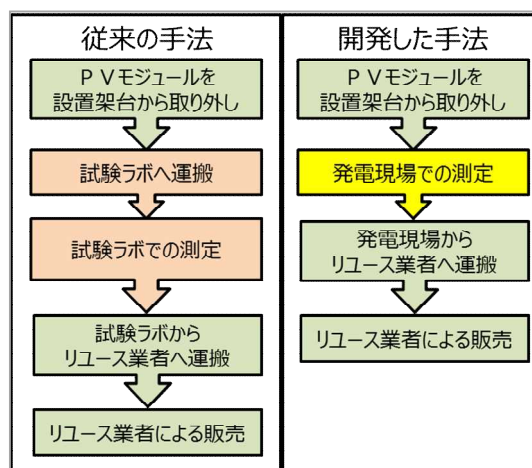
<目標> (最終目標_2018年度末)

使用済み太陽電池モジュールの分別を1枚あたり7分で行うことにより、1,900円/枚のコスト目標を達成する。現状は13.5分/枚を要する1枚当たりのリユースコストは、現状8,000円/枚程度であるが、On-Siteでの測定により、これを1/4以下の1,900円/枚とすることを目標とした。

<成果>

1.3.1 リユースコストの検討

従来の手法と開発した手法の比較を図Ⅲ-2-⑤-(2)-6に示す。従来の方法では、中古モジュールを試験ラボへ送付する費用(回収費)が大きなコストとなり、負担となっている。開発した手法ではOn-Siteで分別処理を行えるため、回収費が削減され、大きなコスト低減が可能となる。



図Ⅲ-2-⑤-(2)-6 リユース手法の比較

当初8,000円/枚程度であったリユースコストを、目標である1,900円/枚に低減するための試算を行った。表Ⅲ-2-⑤-(2)-1に目標リユースコストを達成するための諸条件を示す。比較のため、従来(本研究開始時)のコストを表Ⅲ-2-⑤-(2)-2に示す。なお、コストの算出は、年間2万枚を処理(内、1万枚がリユース適合品として再利用)した場合として計算した。

従来(本研究開始時)のコストでは、モジュールを運搬するためのコストが非常に大きくなるが、本研究では測定装置が移動するため、回収、運搬コストが大きくなる。また、測定技術を開発するため、分別コストも低減される。

このように、リユース品判別をモジュール 1 枚あたり 7 分で行うことにより、1 枚当たりのリユースコスト 1,900 円/枚が達成できることがわかった。

表Ⅲ-2-⑤-(2)-1 目標リユースコスト

目標リユースコスト		1,900 [円/枚] (現地でリユース業者へ引渡し)
年間処理量		20,000 [枚] (150 日稼働として 134 枚/日を想定※2)
リユース品出荷量(※2)		10,000 [枚]
分別、修復コスト		1,250 万 [円]
内訳	消耗品費	50 万 [円]
	光熱水費	100 万 [円] (主に移動式 PV ラボのガソリン代)
	人件費	300 万 [円] (2 名×150 日×10,000 円/日)
	設備費	800 万 [円] (主に移動式 PV ラボ測定器の償却費)
	土地・建物費	0 [円]
	その他諸費用	0 [円]
回収・運搬コスト		2,650 万 [円]
内訳	車両費	450 万 [円] (移動式 PV ラボトラックの償却費)
	燃料費	200 万 [円]
	運送費(ケミトックス→リユース事業者)(※3)	2,000 万円 0 円(※1)
	人件費	0 [円] (分別修復コストに含む)

表Ⅲ-2-⑤-(2)-2 従来(本研究開始時)のリユースコスト

従来リユースコスト		8,000 [円/枚]
年間処理量		20,000 [枚]
リユース品出荷量(※2)		10,000 [枚]
分別、修復コスト		2,000 万 [円]
内訳	消耗品費	50 万 [円]
	光熱水費	50 万 [円]
	人件費	1,000 万 [円]
	設備費	800 万 [円]
	土地・建物費	100 万 [円]
	その他諸費用	0 [円]
回収・運搬コスト		6,000 万 [円]
内訳	運送費(※3)	4,000 万 [円]
	人件費	0 [円]
	運送費(ケミトックス→リユース事業者)(※3)	2,000 万円

※1：現地でリユース事業者への引き渡し、リユース事業者が現地で梱包出荷を行うことを想定した場合。

※2：リユース品再生率 50%と試算。50%は 7 分、50%は 1 分で分別するとして 9 時間稼働を想定

※3：運送費は運送会社に依頼(混載便)した場合を想定し、1 枚あたり 2000 円と見積もった。モジュールの運送時は、一般的にパレット積載にて行うが、その単価がおおよそ 1 パレット(20 枚積載)あたり 4 万円であるためである。なお、2014 年度の環境省委託業務「2014 年度使用済再生可能エネルギー設備のリサイクル等促進実証調査委託業務 報告書」によると、運搬費用として 10 円/kg の報告があるが、再生販売を目的としたパレット輸送については上記単価が妥当と考える。

この試算結果より、2018 年度に達成した分別処理コスト 1,900 円/枚から、設備償却費を除いた分別処理ランニングコストは 650 円/枚(設備償却費、株式会社ケミトックスからリユース事業者への運搬費を除く)となった。今回の事業後の目標は、2030 年度、180 円/枚であり、更なるコストダウンが必要と

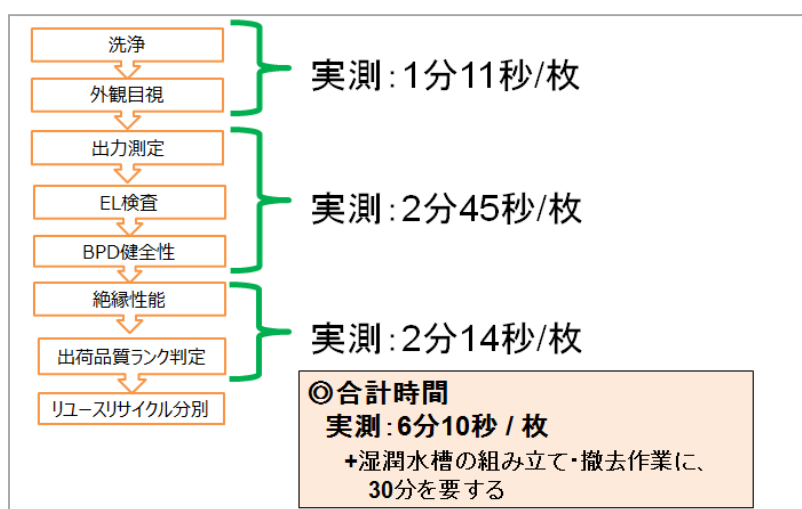
なる。コストダウンの進め方は後述する。

1.3.2 リユース判別時間短縮の検討

On-Site での太陽電池モジュール分別判定の測定項目を以下に示す。

- ① モジュール洗浄
- ② 外観目視検査
- ③ 出力測定
- ④ EL 検査
- ⑤ バイパスダイオード健全性確認
- ⑥ 絶縁性能測定
- ⑦ 出荷品質ランク判定

本事業では、それぞれの測定項目について測定時間短縮の検討を行った。2018年10月に、開発した種々の測定の短縮技術の実証測定を実施した結果を図Ⅲ-2-⑤-(2)-7に示す。その結果、分別測定に要する時間を「目標の7分/1枚」から更に短縮する「6分10秒/1枚」を達成した(※測定準備としての湿潤抵抗試験水槽組み立て撤去作業に30分程を別に要する)。



図Ⅲ-2-⑤-(2)-7 2018年10月の実証測定における、各測定の所要時間

下記にそれぞれの測定項目における開発内容を報告する。

①モジュール洗浄

屋外で長期間使用された太陽電池モジュールの表面は、砂埃や塵、油分の付着などの汚れが堆積している。今回の分別判定のなかでこれら表面の汚れは、特に③出力測定で大きな影響を及ぼすため、性能を正確に評価するには測定前の洗浄が必要となる。

今回の開発では社内で製造した純水を持参し、「純水とスチームクリーナ」を組み合わせた洗浄方法を考案した。スチームクリーナによって、少量の純水を効率的に利用するとともに、高温蒸気による洗剤を用いることなく油分に対しても洗浄力を高めることが可能となった。

③外観目視検査

今回の事業で作成した外観判定用マニュアルを用いて、太陽電池モジュールの外観状態のランク分けを行った。外観異常のないもの、または性能に影響しない程度の変化をランク A、影響するが軽微であるものをランク B、リユースに適さない重大な不具合をランク C とする3段階で評価した(表Ⅲ-2-⑤-(2)-3)。

規格に記載された要求事項だけでなく、実際の不具合写真をまとめた外観判定マニュアルを用いることで、On-Site での外観目視検査の判別速度を向上でき、時間削減を可能にした。

表Ⅲ-2-⑤-(2)-3 外観目視検査のランク分け

ランク	モジュールの状況	外観目視検査結果例
ランク A	劣化事象の発生無し	不具合なし。表面、裏面の全体的な変色。
ランク B	微小・軽微な劣化事象	セル内部のデラミネーション。スネイルトレイル。表面の一部に局地的な変色
ランク C	明確な劣化事象	裏面シートの亀裂、剥離、膨らみ。モジュール端面に至るデラミネーション。銘板値ラベル読取不能。表面、裏面の焼損痕。等

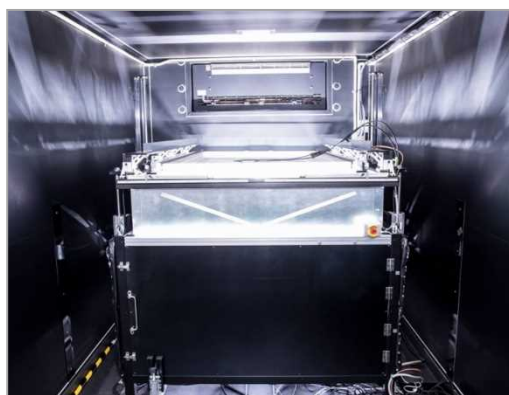
③出力測定

移動式 PV ラボ庫内に設置された IEC60904-9 クラス AAA ソーラーシミュレータを用いた最大出力測定(I-V 特性測定)により、中古太陽電池モジュールの発電性能の評価を行う。本装置による STC(Standard Test Conditions)測定にて、銘板値に記載された公称出力値との比較を行う。但し、測定時間短縮のため、サンプル温度については STC 条件(25℃)に温度調整することはせず、本事業で作成した温度係数データベースによる温度補正を適用する。

分別判定が行われる中古太陽電池モジュールは、正確な設置年数が不明な場合も多いため、経年劣化率を元にした評価は行わず、「測定値と公称値」の比較により品質ランク付けを行う。表Ⅲ-2-⑤-(2)-4 に示すように判定基準を 3 段階にクラス分けを行った。また、移動式 PV ラボ庫内の最大出力測定/EL 画像検査装置を図Ⅲ-2-⑤-(2)-8 に示す。

表Ⅲ-2-⑤-(2)-4 出力判定のランク分け

ランク	モジュールの状況	出力測定結果
ランク A	劣化事象の発生無し	公称出力の 90%以上
ランク B	微小・軽微な劣化事象	公称出力の 80%以上
ランク C	明確な劣化事象	公称出力の 80%未満



図Ⅲ-2-⑤-(2)-8 移動式 PV ラボ庫内 最大出力測定/EL 画像検査装置

④EL 検査

移動式 PV ラボ庫内に設置された図Ⅲ-2-⑤-(2)-8 に示した装置を用い、EL 撮影カメラによる EL 画像検査を行う。EL 撮影により、マイクロクラックや不具合など可視化することが可能となるが、EL 画像であるため定性的なデータとなる。本事業で新規開発した EL 画像解析ソフトウェアを用いることで、マイクロクラックによる個々のセルの消光面積の数値化およびマイクロクラックの強調表示等を可能にした(図Ⅲ-2-⑤-(2)-9～11)。

EL 画像解析ソフトウェアは画像処理ライブラリ HALCON 上で動作し、撮影した EL 画像(jpg 形式)を読み込み、セル枚数のなどの各種モジュール情報を入力した後、解析が行われる。

検査中 分割数: 12 × 6 検査画像: 20180215010915_MSAACS1200000835.jpg
 パネル画素値: 80 レシピファイル名: Recipe_12_errcp 自動保存

検査画面

表示
 ライン
 消光比率
 パルパ
 消光状況
 マイクロクラック

検査開始 設定 拡大表示 CSV作成

No.	クラス	%	エリア	幅	高さ
1	A	0.92%	92749	842	36
2	A	0.39%	96779	854	36
3	A	0.42%	96161	852	36
4	B	2.87%	94988	854	36
5	A	0.41%	97940	858	36
6	A	0.20%	96966	854	36
7	A	0.12%	97630	856	36
8	A	0.70%	97647	858	36
9	A	0.06%	97101	854	36
10	A	0.81%	99011	863	36
11	A	0.21%	98073	851	36
12	A	0.66%	93877	845	36
13	A	0.62%	92725	842	36
14	A	0.43%	96413	854	36
15	A	0.17%	96081	852	36
16	A	1.03%	95835	854	36
17	C	12.79%	85450	858	36
18	A	0.05%	96786	854	36
19	A	1.69%	95774	856	36
20	A	0.17%	97843	858	36
21	A	0.34%	96501	854	36

検査結果

総合判定: クラスC

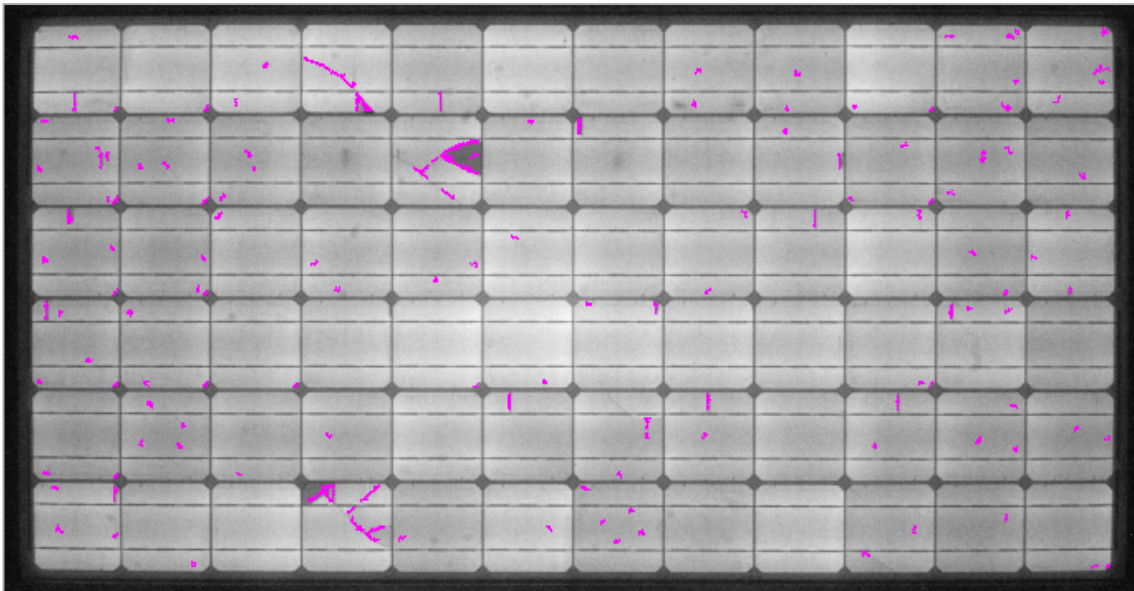
最大輝度比(ワースト)

#1: No.17 12.79% クラスC
 #2: No.64 5.95% クラスC
 #3: No.04 2.87% クラスB

図Ⅲ-2-⑤-(2)-9 EL 画像解析ソフトウェア 操作画面

01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
0.92%	0.39%	0.42%	2.87%	0.41%	0.20%	0.12%	0.70%	0.06%	0.81%	0.21%	0.66%
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0.62%	0.43%	0.17%	1.03%	12.79%	0.05%	1.69%	0.17%	0.34%	0.25%	0.07%	0.10%
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1.23%	0.13%	0.01%	0.11%	0.03%	0.00%	0.04%	0.09%	0.36%	0.22%	0.06%	0.38%
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
1.39%	0.52%	0.25%	0.75%	0.63%	1.01%	0.78%	0.27%	0.11%	0.39%	0.38%	0.12%
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
0.74%	0.23%	0.01%	0.03%	0.13%	0.23%	0.13%	0.28%	0.01%	0.51%	0.14%	0.15%
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
1.11%	0.13%	0.03%	5.95%	0.01%	0.00%	0.03%	0.04%	0.04%	0.52%	0.20%	0.21%

図Ⅲ-2-⑤-(2)-10 EL 画像解析ソフトウェアによる消光面積の数値化



図Ⅲ-2-⑤-(2)-11 EL 画像解析ソフトウェアによるマイクロクラックの強調表示

EL 画像によるランク分け基準を表Ⅲ-2-⑤-(2)-5 に示す。EL 画像解析ソフトによる計測された各セルの消光面積のうち、最も悪い消光面積からランク分けを行う。

表Ⅲ-2-⑤-(2)-5 EL のランク分け

ランク	モジュールの状況	出力測定結果
ランク A	劣化事象の発生無し	セルの消光面積の最大が 2%以下
ランク B	微小・軽微な劣化事象	セルの消光面積の最大が 5%以下
ランク C	明確な劣化事象	セルの消光面積の最大が 5%以上

⑤ バイパスダイオード(BPD)健全性確認

バイパスダイオードの健全性確認として最も直接的な方法は、ジャンクションボックスを開け内部の BPD を直接計測する方法である。但し、一般的な太陽電池モジュールのジャンクションボックス内部は、通常ポッティング材により充填されており、直接 BPD にコンタクトすることが出来ない。

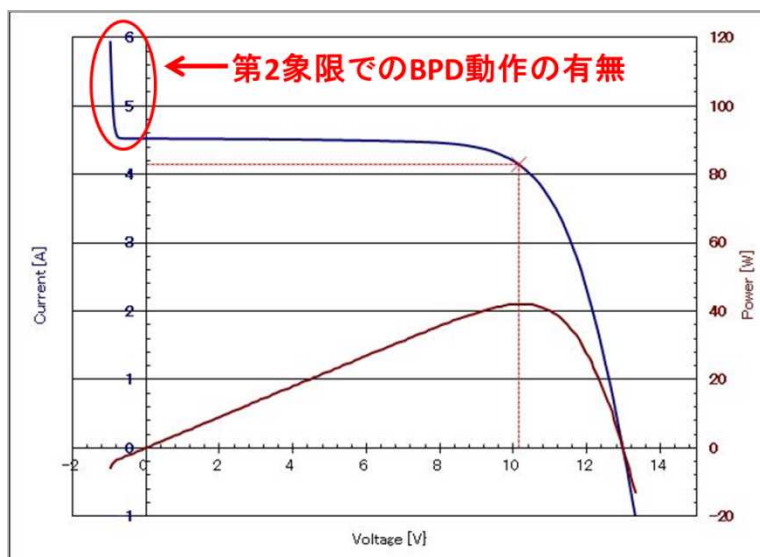
そこで、本事業では移動式 PV ラボによる出力測定、EL 画像検査の結果から、間接的に BPD 健全性の確認を行った。バイポーラ電源方式の IV テスターを搭載した移動式 PV ラボでは、太陽電池モジュールの発電の第 2 象限(逆電圧象限)まで測定が可能であるため、出力測定と同時に、BPD の動作有無の確認が可能となる。

図Ⅲ-2-⑤-(2)-12 に BPD が正常動作している場合(グラフ)上側と BPD が正常に動作していない場合(下側)の IV 特性を示す。BPD が開放故障している場合、この第 2 象限での電流立ち上がりが消滅するため、電圧に拠らない定電流挙動を示す(太陽電池セルを半導体と見なした場合における、逆方向飽和電流領域に相当する)。

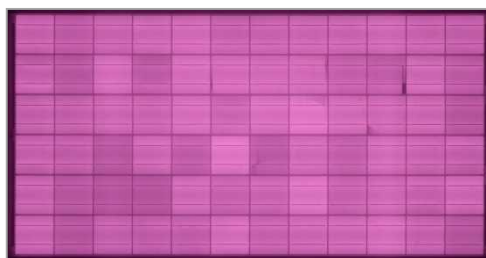
BPD が正常なモジュールの EL 画像を図Ⅲ-2-⑤-(2)-13 に BPD が短絡故障している EL 画像を図Ⅲ-2-⑤-(2)-14 にします。BPD が短絡故障している場合、EL 検査にて短絡した BPD が発光のための電流をバイパスするため、当該のセルストリングが発光しなくなる。また、IV 特性においても、そのストリングでの発電が寄与しなくなるため、開放電圧や最大出力が約 2/3 になる(※BPD3 個搭載の太陽電池モジュールの場合)。

以上の理由により、移動式 PV ラボを用いた今回の On-Site 分別判定では、BPD 健全性の確認のための追加測定は不要となり、効率的な判別が可能となった。

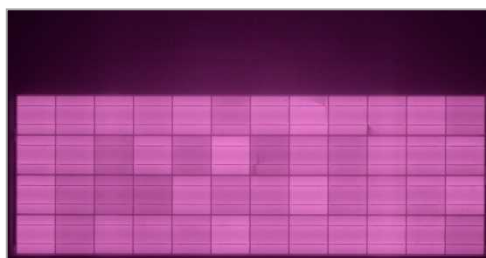
ランク判定基準を表Ⅲ-2-⑤-(2)-6 に示す。ランク判定は、開放、短絡を問わず、BPD の故障がひとつでもあれば不合格(ランク C)と判断し、リユース不適合品として取り扱う。



図III-2-5-(2)-12 IV測定によるBPD開放故障検出
(第2象限での電流立ち上がりの存在は、BPDが全数正常動作していること示す)



図III-2-5-(2)-13 正常なモジュールのEL画像

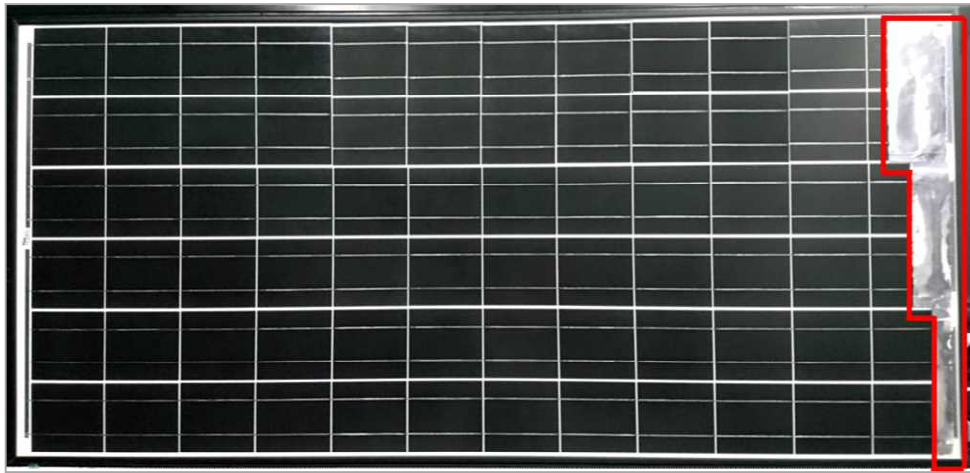


図III-2-5-(2)-14 BPD短絡故障モジュールのEL画像

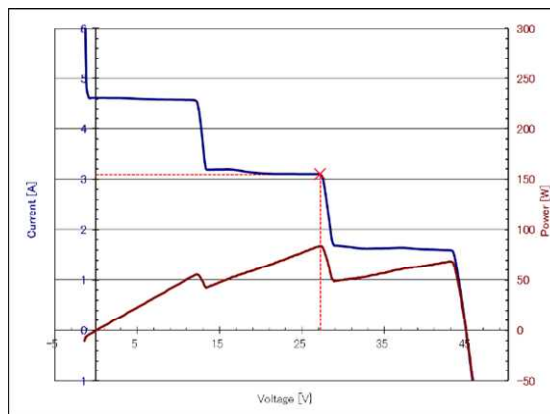
表III-2-5-(2)-6 バイパスダイオードのランク分け

ランク	モジュールの状況	出力測定結果
ランク A	劣化事象の発生無し	バイパスダイオード故障無し
ランク B	微小・軽微な劣化事象	—
ランク C	明確な劣化事象	バイパスダイオードの故障が1つ以上有り

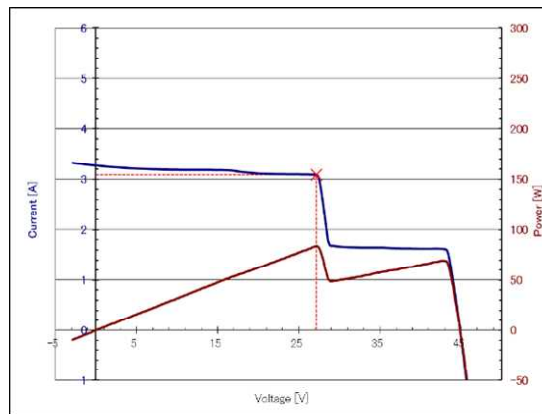
また開放故障した BPD がセルストリングのどの部分を担当するかの調査が求められた場合は、セルストリング毎に異なる面積を遮光した最大出力測定により不具合 BPD を特定する手法を考案した。図 III-2-5-(2)-15 に示すようにセルストリング毎に異なる遮光を行い、最大出力測定を行うと、正常なモジュールの場合は図 III-2-5-(2)-16 に示すように遮光面積に応じて階段状の IV 曲線を描く。この時 BPD が開放故障している場合は、故障した BPD でのセルストリングでの発電量がモジュール全体の律速となるため、図 III-2-5-(2)-16 に示すようにモジュール全体の短絡電流が遮光量に応じた値となる。この短絡電流値は遮光したセル面積に依存しているため、遮光量を段階的に変化させた IV 測定を行うことで開放故障 BPD の特定が可能となる。



図Ⅲ-2-⑤-(2)-15 セルスリング毎に遮光量を調整した BPD 開放故障個所の検出例



図Ⅲ-2-⑤-(2)-16 段階的遮光時の IV 曲線(正常なモジュール)



図Ⅲ-2-⑤-(2)-17 段階的遮光時の IV 曲線(中断セルスリングの BPD が開放故障時)

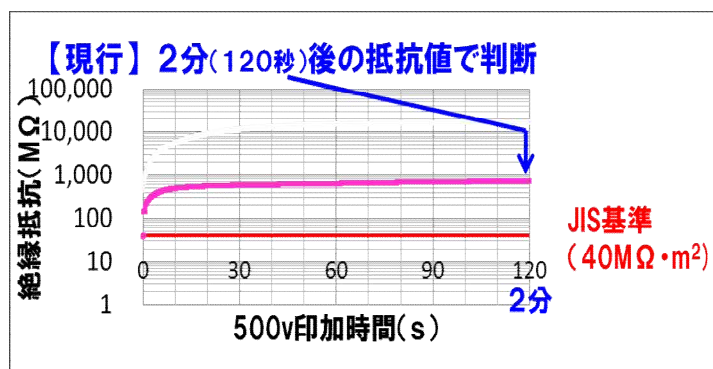
⑥ 絶縁性能測定

太陽電池モジュールの絶縁抵抗値の測定方法として、気中または湿潤の 2 つの方法が存在する。1.1 で前述した通り、関連試験の結果から気中試験で湿潤試験を代替することは困難であると判断されたため、On-Site での湿潤試験方法の時間短縮についての開発を行った。

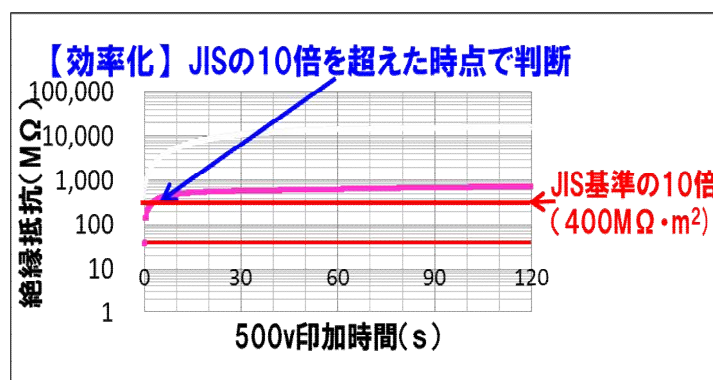
正常な太陽電池モジュールの湿潤試験の通常測定方法を図Ⅲ-2-⑤-(2)-18 に示す。JIS C 8990 10.14 項の湿潤漏れ電流試験の合格要求は、試験開始 120 秒後の絶縁抵抗値が $40\text{M}\Omega\text{m}^2$ 以上であることが求められていることから、測定時間が 120 秒かかる。しかし、迅速な処理が必要とする On-Site の測定においては、判定時間の短縮が求められているため、新方式の検討を行った。

正常な太陽電池モジュールの湿潤試験の新方式を図Ⅲ-2-⑤-(2)-19 に示す。試験開始後最初の 10 秒間で大きく抵抗値が上昇し、その後試験終了まで徐々に絶縁抵抗値が増加する傾向を示していること、測定値においても試験開始後 10 秒後に数百 $\text{M}\Omega\text{m}^2$ ～数 $\text{G}\Omega\text{m}^2$ となるのがわかる。この絶縁抵抗値

は JIS C 8990 10.14 項の合格条件を大きく超えるものである。このことから、安定に抵抗値が上昇するモジュールにおいては、120 秒間試験を継続する必要性は薄いと判断できる。そこで、今回の開発では「試験開始後 10 秒後以降に抵抗値が $400\text{M}\Omega\text{m}^2$ 以上であれば、そこで試験を終了(合格)」とする新たな基準を設けた。これにより、測定時間短縮の実現を可能にした。なお、絶縁性のランク分けの表を表Ⅲ-2-⑤-(2)-1-7 に示す。



図Ⅲ-2-⑤-(2)-18 従来方式での絶縁抵抗試験合格判定基準



図Ⅲ-2-⑤-(2)-19 開発した新方式での絶縁抵抗試験合格判定基準

表Ⅲ-2-⑤-(2)-1-7 絶縁性能のランク分け

ランク	モジュールの状況	出力測定結果
ランク A	劣化事象の発生無し	試験開始 10 秒後以降で絶縁抵抗値が $400\text{M}\Omega\text{m}^2$ 以上
ランク B	微小・軽微な劣化事象	—
ランク C	明確な劣化事象	試験開始 120 秒後の絶縁抵抗値が $40\text{M}\Omega\text{m}^2$ 以下

⑦ 出荷品質ランク判定

これまで報告してきたように、On-Site の分別判定を各項目でランク分けを行った。各項目のうち 1 つでも A ランク基準を満たさない場合(例：出力性能の劣化は A ランクであるが、表面に損傷がある or BPD が故障している等)は、A ランクとして出荷できない(再利用に適さないと判断)。そこで、表Ⅲ-2-⑤-(2)-1-8 に示すように、中古モジュールの出荷品質ランクは、「各項目のうち最も悪いランクを総合判定ランク」とした。

表Ⅲ-2-⑤-(2)-1-8 出荷品質ランク分け

出荷品質ランク	モジュールの状況	ランク判定条件
ランク A	劣化事象の発生無し	各測定ランクのすべてがランク A
ランク B	微小・軽微な劣化事象	各測定ランクのうち、ひとつでもランク B がある
ランク C	明確な劣化事象	各測定ランクのうち、ひとつでもランク C がある

1.4 リユース業界との連携

中古太陽電池モジュールリユースの事業化に向けて、リユース業界の商習慣等を理解する必要がある

ため、リユース業界の知見者をアドバイザーとしてリユースモジュール分別方法検討委員会に参加してもらい、意見交換を行い連携した。

第1回委員会を2016年9月に開催し、2019年2月の事業終了までに合計10回の委員会を開催し、意見交換を行った。前項で述べた、On-Siteでの分別技術開発の状況報告を行い、太陽電池の測定に知見のある方からの技術的な意見、また反対に技術的な内容には明るくないユーザー側からの視点からの意見など、多方面からの検討を行った。

中古太陽電池モジュールのリユースについて、リユース業界でも少数ながら現在既に取りが行われている。しかし、中古リユースモジュールの安全性や信頼性についての指針が現在十分とは言えず各事業者の裁量によるところが大きいことが懸念事項として挙げられている。本事業で開発した内容は、まだリユース業界の指針として適用するまでは至っていないが、今後も継続的に検討を重ねていく。

1.5 コスト目標

「1.3.2 リユース判別時間短縮の検討」で述べた通り、分別測定に要する時間を「目標の7分/1枚」から更に短縮する「6分10秒/1枚」を達成した。これにより、以下のコスト目標を達成した。

- (1) 分別処理コスト 1,900 円/枚
- (2) 分別処理ランニングコスト 650 円/枚（設備償却費は除く）

また、これにより、2030年に使用済み太陽電池モジュールの分別処理ランニングコスト 180 円/枚を達成する見込みを得た(詳細は「実用化見通し」を参照)。

2.実用化見通し

リユース事業の事業環境はますます厳しさを増しているが、リユース事業は社会的使命であり、大量廃棄時代を見据えて長期スタンスで取り組んでいく。

- ① 開発したオンサイト判別技術を用いたリユース事業を、小規模事業から開始する。
- ② 事業を進めながら、低コスト化を実現し事業拡大を図る。
2030年までにランニングコスト 180 円/枚を達成する。
- ③ 今回、開発した判別基準の「活用」の検討をすすると共に判別基準を「確立」させる
(リユース機構の会員企業から判別基準の早期確立を望む声が多い)。
- ④ 大量廃棄時代の3Rの在り方を検討、そのための技術課題の抽出を行う。

実用化の見通しを表Ⅲ-2-⑤-(2)-1-9に示す。

表Ⅲ-2-⑤-(2)-1-9 実用化の見通し

開発項目	年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2030年度
リユース事業推進		→				
低コスト化		→				
ランニングコスト		650円/枚				180円/枚
判別基準活用の検討		→				
次世代技術開発		→				

上記「②低コスト化」については、図Ⅲ-2-⑤-(2)-1-20に示す通り、大量の使用済みモジュールが発生することが予測される2030年をターゲットとし、2019年現在の650円/枚から2030年には180円/枚に低減することを目標として進める。そのために以下の取組を行う。

- (1) 分別処理時間の更なる短縮：

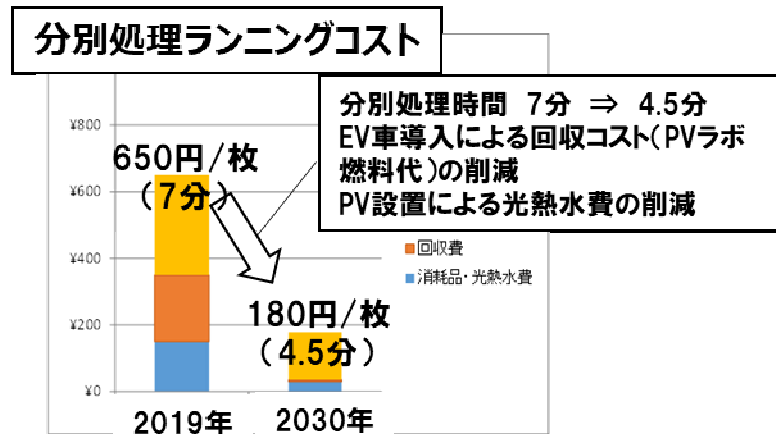
機械洗浄による洗浄時間の短縮や、各測定に関する計測器の性能アップによる時間短縮等により2018年度の7分を4.5分までの短縮が可能と思われる。

- (2) 光熱水費の削減：

移動式PVラボの車体を2kW程度のPVパネルを搭載した電気自動車(トラック)へ置き換えることにより測定器の電源を電気自動車の蓄電池やPVパネルとすることによる燃料代の削減が可能と思われる。

(3) 労務費の削減：

事業規模の拡大に伴い、習熟度を上げることにより技術者 2 名の対応から、技術者 1 名、補助員 1 名の体制等を検討することにより削減が可能と思われる。



図Ⅲ-2-⑤-(2)-1-20 分別処理ランニングコストの推移

分別処理ランニングコストの目標内訳を表Ⅲ-2-⑤-(2)-1-10 に示す。

表Ⅲ-2-⑤-(2)-1-10 分別処理ランニングコストの目標内訳

		2019年	2030年	備考
目標リユースコスト		650 [円/枚]	179 [円/枚]	
年間処理量		20,000 [枚]	21,000 [枚]	
処理時間		7分 (リユース不可品 1分)	4.5分 (リユース不可品 1分)	新技術導入・習熟等により処理時間短縮
リユース率		50%	80%	
リユース品出荷量		10,000 [枚]	16,800 [枚]	
分別、修復コスト		450 万 [円]	290 万 [円]	設備償却費は含まない
内訳	消耗品費	50 万 [円]	30 万 [円]	処理数増大による一括多量購入など
	光熱水費	100 万 [円] (主に移動式 PV ラボのガソリン代)	20 万 [円] (主に移動式 PV ラボのガソリン代)	計測に必要な電力はトラック屋根設置 PV と蓄電池を用意し賄う
	人件費	300 万 [円] (2 名×150 日×10,000 円/日)	240 万 [円] (150 日×(10,000 円+6,000 円/日))	技術者 1 名と補助員 1 名で作業にあたる
回収・運搬コスト		200 万 [円]	10 万 [円]	2018 年経費は、償却費を含む
燃料費		200 万 [円]	10 万 [円]	トラックは EV 車を使用

3.波及効果

開発したリユースモジュール分別技術は、リユースモジュール分別のみならず、太陽光発電システムの低コスト診断にも活用できる。特に、外観マニュアルは PV システムの簡易的な診断にとって極めて有効と思われ、低コストが求められる O&M(Operation and Maintenance)に有効である。

3. 成果発表の件数

各研究開発項目の成果発表件数を表Ⅲ-3-1 に示す。

表Ⅲ-3-1. 成果発表の件数

研究開発項目	特許登録		論文 (査読付)	学会発表 ・講演	新聞・雑 誌等掲載	受賞 実績	展示会 への出展
	国内	外国					
①低コスト撤去・回収・分別技術 調査	0	0	0	0	0	0	0
②低コスト分解処理技術 FS (開発)	3	0	0	5	1	0	0
③低コスト分解処理技術実証	4	0	2	19	12	1	3
④太陽光発電リサイクル動向調査	0	0	0	9	4	0	0
⑤使用済み太陽電池モジュールの 低コストリユース技術の開発	0	0	0	7	1	0	1
合計	7	0	2	40	18	1	4

添付資料

プロジェクト基本計画

「太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト」基本計画

新エネルギー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

①政策的な重要性

「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」の附帯決議において、「耐用年数経過後において大量の廃棄物の発生を防ぐ観点から、設備のリサイクルシステム構築等、早急に必要な措置を講ずること」が求められている。

②我が国の状況

近年のエネルギーセキュリティや地球環境問題への意識の高まり、東日本大震災後の電力供給不足への懸念により、太陽光発電は、平成10年に住宅用太陽光発電システムの国内導入件数が1万件に到達、平成16年に国内累積導入量1GWを達成、平成24年には住宅用太陽光発電システムの国内導入件数が100万件を突破、累積導入量も6.6GWに達するなど、着実に導入拡大が続いている。さらに、平成24年7月より再生可能エネルギーの固定価格買取制度が実施されたことで、今後さらに大幅な普及拡大が見込まれる。

一方、大量導入が実現すると、使用済みの太陽光発電システムが大量発生することが予想され、太陽光発電の健全な普及拡大には、使用済みのシステムを適正に処分可能な手段や社会システムを確保することが重要である。

これに対し、我が国ではリサイクル処理技術に関する取り組みが一部存在するものの十分ではなく、NEDOにおいても「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」において、大量かつ様々な種類の太陽電池モジュールに対応した低コスト汎用リサイクル処理技術の開発をしているところである。しかし、太陽光発電のさらなる普及を図るためには、リサイクル処理技術の実用化を着実に進めるとともに、撤去・回収・分別・リユース関連技術の開発も必要である。

③世界の取組状況

ヨーロッパでは、欧州の太陽電池モジュールのリサイクルを担う機関として、平成19年にPV CYCLEが設立され、ガラスリサイクルを主としたリサイクル事業を展開している。また、平成24年のWEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) 指令の改定において太陽電池モジュールも対象製品と位置付けられた。

④本事業のねらい

本プロジェクトでは、低コストのリサイクル処理技術に加え、撤去・回収関連技術等、使用済み太陽光発電システムの適正処分を実現する技術を開発・実証し、また使用済みの太陽電池モジュールをリユースするための技術も開発し、リサイクルに関する社会システム構築に貢献することを目的とする。

(2) 研究開発の目標

使用済み太陽光発電システムの適正処分に関する技術の確立を図るために、リサイクル処理

技術や、撤去・回収・分別・リユース関連技術など、大量かつ様々な種類の使用済み太陽電池モジュールのリサイクルコストの低コスト化につながる技術を開発し、リサイクルコストの低減効果を実証する。

①アウトプット目標（平成30年度末）

- ・使用済み太陽電池モジュールのリサイクル処理に係わる低コスト分解処理技術を確立し、その効果を実証する。

研究開発項目①「低コスト撤去・回収・分別技術調査」

【最終目標】

- ・回収・分別、それぞれの低コスト化技術の実現可能性と有効性を見極め、有望な技術については、課題と目標コストを明確化する。

研究開発項目②「低コスト分解処理技術F S（開発）」

【最終目標】

- ・低コスト汎用分解処理技術、低コスト専用分解処理技術など、年間200MW処理時の分解処理コスト5円/W以下に資する技術を確立する。
- ・分解処理コストを試算する。

研究開発項目③「低コスト分解処理技術実証」

【中間目標】

- ・低コスト汎用分解処理技術、低コスト専用分解処理技術を適用した試作プラントを構築する。
- ・使用済み太陽電池モジュールの供給と、リサイクル処理により得られる回収物の提供に関して、一時的ではない体制・仕組みを確保する。
- ・様々な運転条件下における分解処理コスト低減効果を実証可能な実験計画を策定する。

【最終目標】

- ・分解処理コスト：5円/W以下（年間200MW処理時）

研究開発項目④「太陽光発電リサイクル動向調査」

【中間目標】

- ・国内の太陽光発電システム導入分布を考慮した排出量予測をまとめる。
- ・撤去、回収から分解処理に至るまで、各技術の効果の横断的な評価方法を確立する。

【最終目標】

- ・国内外の各種動向を調査し、本プロジェクトへのフィードバック情報をまとめる。

研究開発項目⑤「使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発」

【最終目標】

- ・使用済み太陽電池モジュールの回収・運搬、分別、修復コスト180円/枚を達成する技術を開発する。

例えば、分別技術であれば出力検査、絶縁検査、外観検査、バイパスダイオード検査等の一連の分別工程を精度よく5分以内で行うことが可能な技術を開発する。

上記以外の技術開発の場合、具体的な開発目標及び実施内容は、採択テーマごとにNEDOと実施者との間で協議の上個別に設定することとする。

研究開発項目⑥「使用済み太陽電池モジュールの用途開拓検討」

【最終目標】

- ・導入可能量、市場規模や導入課題等を明らかにする。

②アウトカム目標

平成24年までに累積導入された太陽電池モジュールが廃棄される過程において、

- ・埋立費用の削減：79～132億円
 - ・CO₂排出量の削減：66,000t
 - ・鉛など有害物質が含まれるため埋立が不可能な廃棄物の適正処分
- 2030年にリユース市場9億円を創出

③アウトカム目標達成にむけての取組

- ・本プロジェクトで取り組む技術確立以外の実用化・事業化の大きな課題としては、ロジスティックスや法規制など社会システムの構築が挙げられるが、これらは経済産業省や環境省で検討、策定されると想定している。そこで、策定される社会システムに関する情報を的確にキャッチアップし、本プロジェクトにフィードバックしていくことで、構築された社会システムに最適な技術の確立を可能とし、早期実用化を図る。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

【委託事業】

研究開発項目①「低コスト撤去・回収・分別技術調査」

本調査は、現時点では不透明となっているリサイクルシステムとも大きく関連する、撤去・回収・分別などを対象に、分解処理以外のリサイクルコスト低減の実現可能性や課題の見極めのために行う調査であり、経済産業省や環境省などの動向にも影響を受ける公共性の非常に高い事業であるため、委託事業として実施する。

【委託事業】

研究開発項目②「低コスト分解処理技術F S（開発）」

本研究開発は、社会負担の少ないリサイクルシステムを構築する上で非常に重要となる要素の一つである、分解処理コスト低減に関して、目標処理コストの達成目処やコスト削減効果を見極めるために行うF Sであり、国民経済的には大きな便益がありながらも、研究開発成果が直接的に市場性と結び付かない公共性の高い事業であり、委託事業として実施する。

【共同研究事業（NEDO負担率：2／3）】

研究開発項目③「低コスト分解処理技術実証」

本研究開発は、社会負担の少ないリサイクルシステムを構築する上で非常に重要となる分解処理技術の実用化に向けて、コスト削減効果を実証するために実施する研究開発であり、共同研究事業として実施する。

【委託事業】

研究開発項目④「太陽光発電リサイクル動向調査」

本調査は、研究開発した技術が社会親和性の高い技術であることが求められることから、国内外の技術、普及、政策などの動向や、実施事例などについての調査するものであり、社会的に大きな便益のある公共性の高い事業のため、委託事業として実施する。

【委託事業】

研究開発項目⑤「使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発」

本研究開発はリサイクル技術開発と同じく、社会負担の少ないリサイクルシステムを構築する上で非常に重要な要素である。使用済みの太陽電池モジュールをリユースするための技術開発であり、国民経済的には大きな便益がありながらも、研究開発成果が直接的に市場性と結び付かない公共性の高い事業であり、委託事業として実施する。

【委託事業】

研究開発項目⑥「使用済み太陽電池モジュールの用途開拓検討」

本研究開発はリサイクル技術開発と同じく、社会負担の少ないリサイクルシステムを構築する上で非常に重要な要素である。使用済みの太陽電池モジュールを有効活用するための可能性検討事業であり、国民経済的には大きな便益がありながらも、研究開発成果が直接的に市場性と結び付かない公共性の高い事業であり、委託事業として実施する。

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDOが、単独ないし複数の企業、大学等の研究機関（原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業等の特別な研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点からの国外企業との連携が必要な場合はこの限りではない。）から公募によって研究開発実施者を選定し実施する。

NEDOは、研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルを検討し、これを最大限活用することにより効率的な研究開発を図る観点から、必要に応じて研究開発責任者（プロジェクトリーダー）を委嘱又は指名し、その下に効果的な研究を実施する。

(2) 研究開発の運営管理

① 研究開発の進捗把握・管理

NEDOは、主としてプロジェクトリーダーをとおして研究開発実施者と緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握するとともに、本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運

営管理を実施する。また、外部有識者で構成する技術検討会を組織し、定期的に技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努める。

② 技術分野における動向の把握・分析

NEDOは、プロジェクトで取り組む技分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、技術の普及方策を分析、検討する。なお、調査等を効率的に実施する観点から委託事業として実施する。

3. 研究開発の実施期間

「低コスト撤去・回収・分別技術調査」の実施期間は、採択決定から1年間とする。

「低コスト分解処理技術F S（開発）」の実施期間は、採択決定から1年間とする。

「低コスト分解処理技術実証」の実施期間は、平成27年度から平成30年度の4年間とする。

「太陽光発電リサイクル動向調査」の実施期間は、平成26年度から平成30年度までの5年間とする。

「使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発」の実施期間は、平成28年度から平成30年度までの3年間とする。

「使用済み太陽電池モジュールの用途開拓検討」の実施期間は、採択決定から1年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成28年度、事後評価を平成31年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じ研究開発の加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

5. その他重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

① 成果の普及

本研究開発で得られた研究成果についてはNEDO、委託先とも普及に努めるものとする。

② 知的基盤整備事業との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備との連携を図るためデータベースへのデータ提供を積極的に行う。

③ 知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

(2) 基本計画の変更

NEDOは、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発動向、政策動向、評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) 根拠法

「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1号イ」

6. 改訂履歴

(1) 平成26年3月、基本計画制定。

(2) 平成28年3月、研究開発項目⑤「使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発」、研究開発項目⑥「使用済み太陽電池モジュールの用途開拓検討」を新たに制定。

(別紙1) 研究開発計画

研究開発項目①「低コスト撤去・回収・分別技術調査」

1. 研究開発の必要性

使用済み太陽光発電システムのリサイクルコストの低減のためには、分解処理に関するコストを低減するだけでなく、リサイクルの全工程においてコスト低減を図ることが有効である。そこで、撤去、回収、分別の工程について、コスト低減に資する技術の実現可能性を検討するとともに、課題を明確化することが必要である。

2. 研究開発の具体的内容

使用済み太陽光発電システムの撤去コストや回収コスト、分別コストを低減する低コスト撤去技術、低コスト回収技術、低コスト分別技術について、実現可能性や有効性を検証し、課題や目標コストを明確化する。

3. 達成目標

【最終目標】

- ・撤去・回収・分別、それぞれの低コスト化技術の実現可能性と有効性を見極め、有望な技術については、課題と目標コストを明確化する。

研究開発項目②「低コスト分解処理技術F S（開発）」

1. 研究開発の必要性

現在、販売・導入・運用されている太陽光発電システムでは、様々な種類の太陽電池モジュールが導入されている。これらの太陽電池モジュールが使用後に、使用済み太陽電池モジュールとしてリサイクルの対象となる。そのため、太陽電池モジュールの種類に依存せず、様々な種類の太陽電池モジュールを低コストで処理可能となる低コスト汎用分解技術を確立する必要がある。一方、リサイクルコストの低減を実現する上では、導入されている太陽光発電システムの大半が結晶シリコン太陽電池である事実も鑑みると、分解処理可能な太陽電池モジュールの種類を限定することで低コスト化を図る方策も有効と考えられるため、低コスト専用分解処理技術についても確立する必要がある。

2. 研究開発の具体的内容

太陽電池モジュールをガラスや封止材、金属類などに分解する工程に関して、様々な太陽電池モジュールを対象とした低コスト汎用分解技術に加え、結晶シリコン太陽電池や薄膜系太陽電池など、太陽電池モジュール種類に応じた専用の分解工程とすることでさらなる分解コストの低減を図る低コスト専用分解処理技術を開発し、処理コストを明確化する。

また、太陽電池モジュールを分解することで回収された有価物について、リサイクルコストの低減に寄与するため、有価物の回収率向上や、価値が高い状態での回収を可能とする、有価物高付加価値化技術を開発し、処理コストの低減効果を明確化する。

3. 達成目標

【最終目標】

- ・低コスト汎用分解処理技術、低コスト専用分解処理技術など、年間200MW処理時の分解処理コスト5円/W以下に資する技術を確立する。
- ・分解処理コストを試算する。

研究開発項目③「低コスト分解処理技術実証」

1. 研究開発の必要性

公共性が高く、当初は対象となる使用済み太陽電池モジュールの発生量も十分でないことから大量処理によるコスト削減効果が見込めないこともあり、技術確立した低コスト分解処理技術の採算性や事業性についての評価や判断を民間主導で実施することは、非常に困難である。そこで、早期実用化を実現するためには、実用化時に近い規模、対象に対する実証を通して、処理コストやコスト削減効果、安全性など実運用に重要なデータを蓄積・提供することが有効である。

2. 研究開発の具体的内容

目標分解処理コストの達成目安や、十分なコスト削減効果が確認された技術については、コスト削減効果を実証する。

3. 達成目標

【中間目標】

- ・低コスト汎用分解処理技術、低コスト専用分解処理技術を適用した試作プラントを構築する。
- ・使用済み太陽電池モジュールの供給と、リサイクル処理により得られる回収物の提供に関して、一時的ではない体制・仕組みを確保する。
- ・様々な運転条件下における分解処理コスト削減効果を実証可能な実験計画を策定する。

【最終目標】

- ・低コスト汎用分解処理技術、低コスト専用分解処理技術の分解処理コストが5円/W以下となることを実証する。

研究開発項目④「太陽光発電リサイクル動向調査」

1. 研究開発の必要性

リサイクル関連の技術のスムーズな実用化には、社会親和性の高い技術であることが求められる。これに対し、経済産業省や環境省など他の省庁の動向をはじめ、国内外の技術開発や普及、政策に関する動向や最新データを常に把握しつつ、それらを的確に技術開発にフィードバックしていくことが必要となる。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 動向調査

太陽電池光発電システムの適正処分に関わる国内外の技術開発動向、普及動向、政策動向、実施事例などを調査する。

(2) 排出量予測

国内の太陽光発電システムの分布調査を行い、分布に基づいた排出量予測を行う。

(3) 横断的評価手法の確立

上記の研究開発項目①～③を横断的に評価する手法について検討し確立する。

3. 達成目標

【中間目標】

- ・国内の太陽光発電システム導入分布を考慮した排出量予測をまとめる。
- ・撤去、回収から分解処理に至るまで、各技術の効果の横断的な評価方法を確立する。

【最終目標】

- ・国内外の各種動向を調査し、本プロジェクトへのフィードバック情報をまとめる。

研究開発項目⑤「使用済み太陽電池モジュールの低コストリユース技術の開発」

1. 研究開発の必要性

使用済み太陽電池モジュールのリユースを普及するためには、使用済み太陽電池モジュールの回収・運搬、分別、修復等を低コストに行う技術の開発が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

使用済み太陽電池モジュールを低コストにリユースできる技術の開発を行う。例えば、以下のような技術開発を行う。

- ・使用済み太陽電池モジュールを効率的かつ精度よくリユース可能か見極める分別技術（外観検査、出力検査、絶縁検査やバイパスダイオード検査等）
- ・使用済み太陽電池モジュールを設置現場から損傷させず、効率的に回収、運搬する技術
- ・不具合（PIDによる出力低下等）が生じた太陽電池モジュールを修復する技術

3. 達成目標

【最終目標】

- ・使用済み太陽電池モジュールの回収・運搬、分別、修復コスト180円/枚を達成する技術を開発する。

例えば、分別技術であれば出力検査、絶縁検査、外観検査、バイパスダイオード検査等の一連の分別工程を精度よく5分以内で行うことが可能な技術を開発する。

上記以外の技術開発の場合、具体的な開発目標及び実施内容は、採択テーマごとにNEDOと実施者との間で協議の上個別に設定することとする。

研究開発項目⑥「使用済み太陽電池モジュールの用途開拓検討」

1. 研究開発の必要性

使用済み太陽電池モジュールのリユースを促進するためには、その用途を開拓していくことが必要となる。

2. 研究開発の具体的内容

リユースモジュールを活用すべき用途（例えば、すでに製造中止されたメーカー、型番等のモジュールのメンテナンス・交換用途、短期間の太陽電池モジュールの使用を想定した環境での用途等）について、リユースモジュールを活用すべき理由を明確にした上で、導入した場合の市場規模、導入課題等について調査し、有望な市場となり得るか判断するための導入可能性検討調査を実施する。

3. 達成目標

【最終目標】

導入可能量、市場規模や導入課題等を明らかにする。

