

太陽光パネルの高度循環に向けた 実証事業の概要

1. 背景・経緯等
2. 目指すべき循環の姿
3. 将来排出量の推計
4. カバーガラスの簡易分析法
5. 収集運搬の最適化
6. 現場実証
7. 分離濃縮技術
8. 製品・部品の使用
9. ガラスのリサイクル
10. ライフサイクルアセスメント
11. 情報共有

1 背景・経緯等

(1) 背景

- 固定価格買取制度（F I T）開始以降、都内への太陽光発電設備の設置件数が増加したが、ゼロエミッション推進の観点から、今後も拡大する見込み
- 中長期的に、都内から大量に廃棄されることが見込まれる太陽光発電設備の3 Rに向けた取組が課題

(2) 経緯

- 平成30年度、大学研究者による事業提案制度において、早稲田大学の所教授による「太陽光パネル高度循環利用に対する東京モデルの提案」を採択
- 令和元年度、早稲田大学及び東京大学を中心に、太陽光パネルの高度循環に係るスキームの検討、太陽光パネルの組成分析、処理・リサイクル情報の整理、処理技術開発など研究調査を実施
- 令和2年度及び3年度、研究調査の成果を踏まえ、太陽光パネルの高度循環に係る仕組みの社会実装に向け、主にフィールドにおける実証試験を実施
 - 太陽光パネルの高度循環を支える仕組みに係る方法論の検討
 - データ収集、効果等の検証
 - ホットナイフ法を用いた処理を中心にしたリサイクルルートの構築など

(3) 実施体制

- 早稲田大学、東京大学、太陽光パネル処理等に関わる事業者やリサイクラー

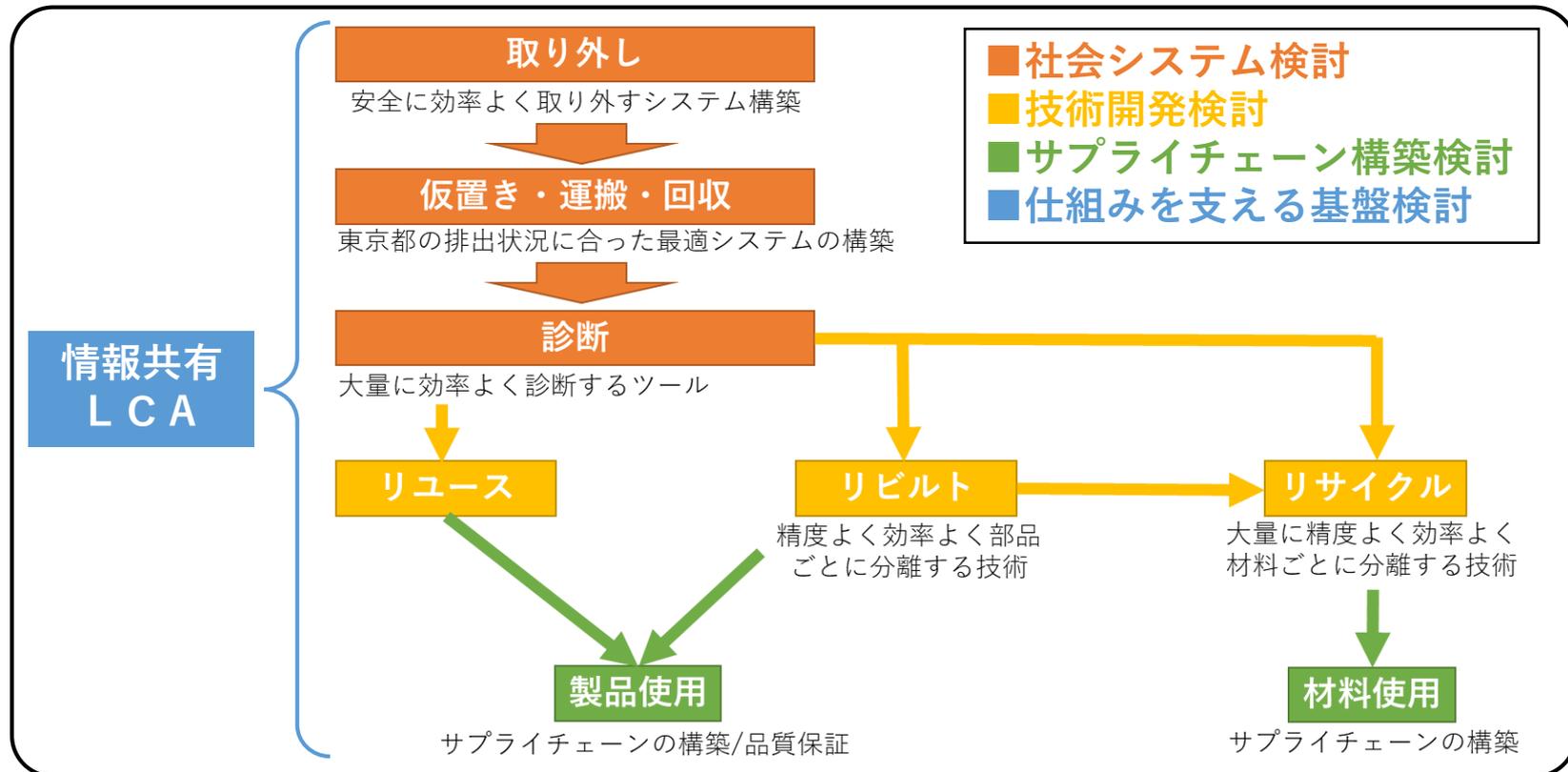
(4) 実施期間

- 令和元年度から3年度までの3年間

1 背景・経緯等

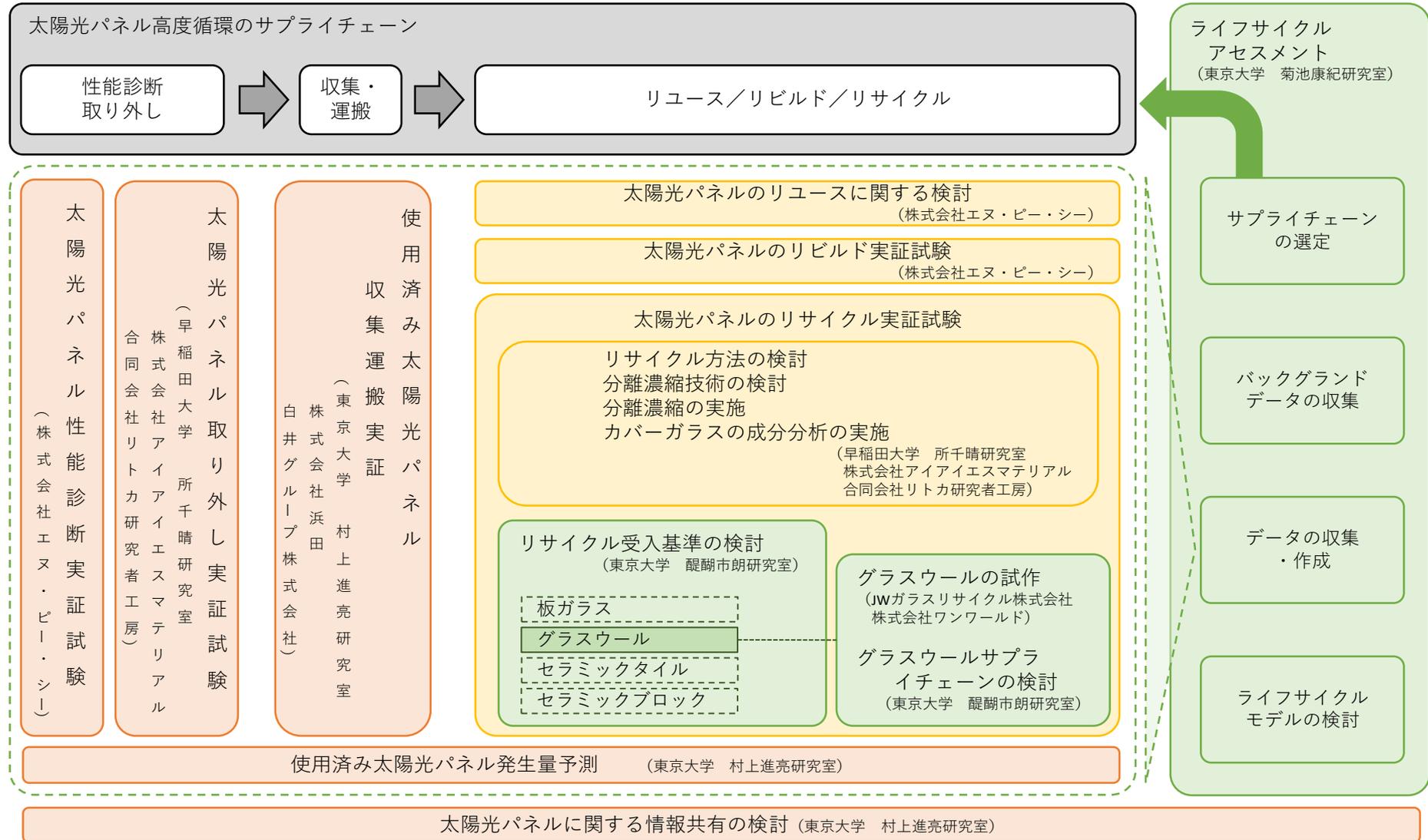
(5) 事業構成

- 使用済みの太陽光パネルを高度に循環するためには、以下の項目について検討し、実現することが必要
 - i) 最適な社会システム構築
 - ii) リユース・リビルト・リサイクルに係る技術開発
 - iii) 再使用や再生利用に係るサプライチェーン構築
- 上記3つの事項に加え、プロセスの適切性を評価する方法や情報共有の仕組みなどを検討



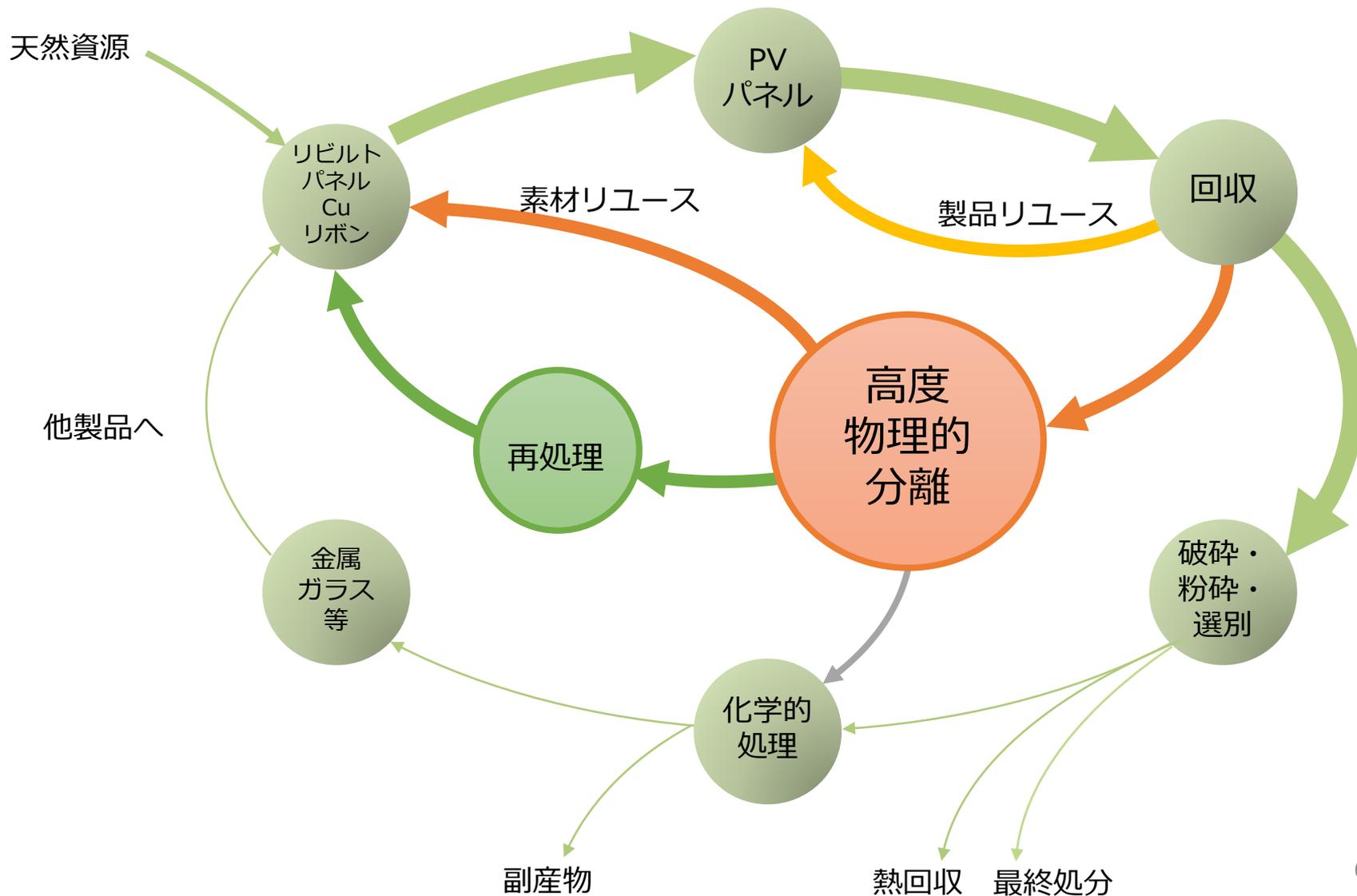
1 背景・経緯等

(6) 事業の全体像



2 目指すべき循環の姿

■ 従来型の処理（天然資源投入→部材→製品→回収→破碎→最終処分）から、**小さな太い多重ループによる循環**へ



ポイント

・太陽光パネルを設置している都民へのアンケートや文献調査により、以下1～3の排出要因を定量化

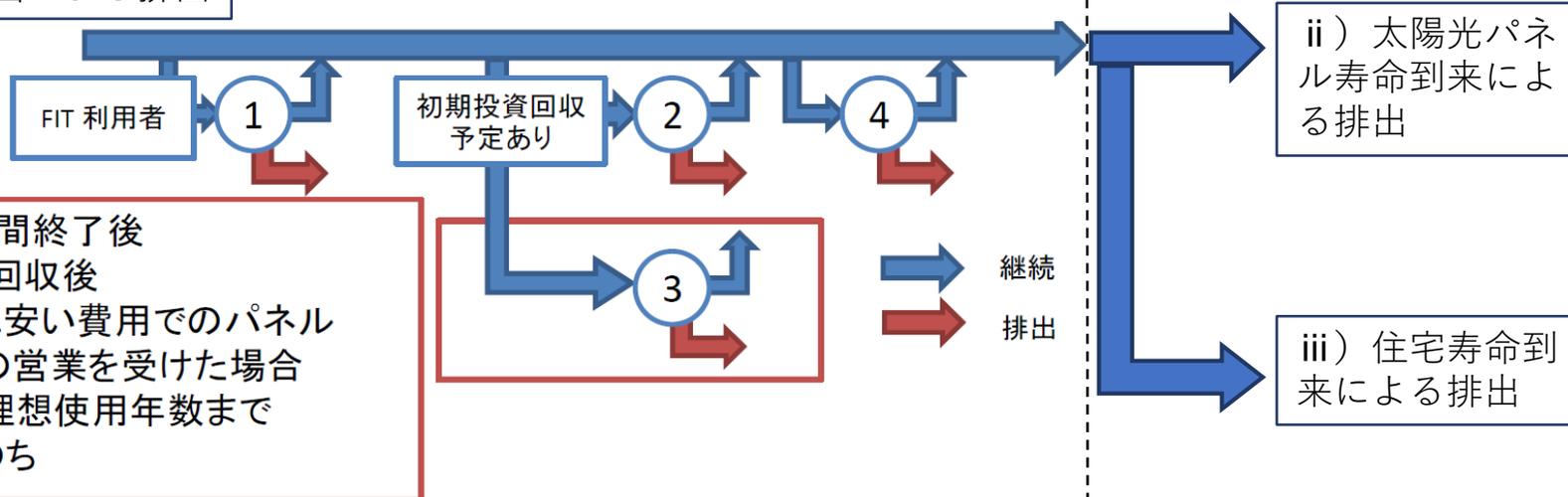
【排出要因の定量化について】

i) 所有者意図による排出
計算方法：アンケート結果より推測（カイ2乗検定、フィッシャーの正確確率検定、Welchのt検定）

ii) 太陽光パネル寿命（機械寿命）による排出
計算手法：ワイブル分布
短寿命：30年（IRENAより）、長寿命：57年（ヒアリング結果より）

iii) 住宅寿命（建物の解体）による排出
計算手法：ワイブル分布（アンケートでパネル所有者の築年数を確認）
平均寿命65.03年（木造専用住宅）

i) 所有者意図による排出



3 将来排出量の推計 ～イ 推計結果～

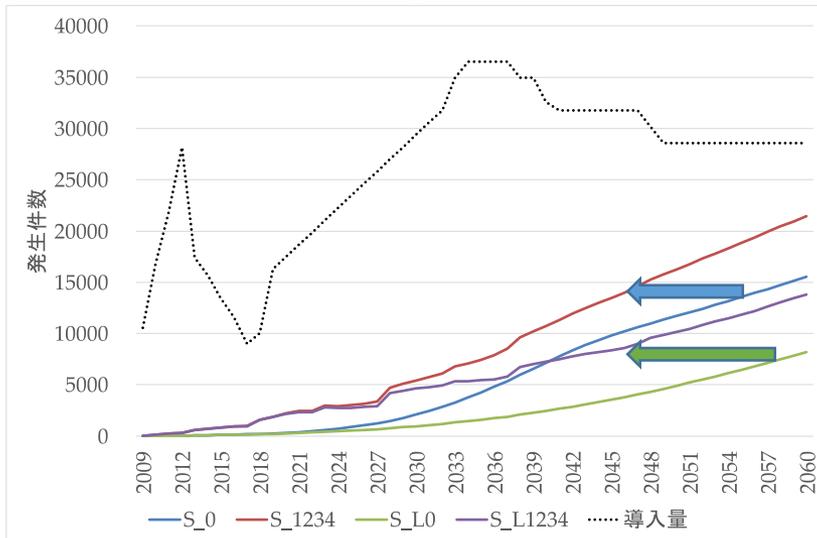
ポイント

- ・シナリオによっては排出が10年程度早まる可能性が示唆
- ・2060年頃になっても故障前に発生するパネルは一定量あり、将来的に、リユースパネルやリビルトパネルの普及拡大の可能性

【所有者意図に基づくシナリオ】

Scenario ID	0	4	14	34	1234	L0	L4	L14	L34	L1234	※0とL0はパネルと住宅の寿命のみを考慮したベンチマークシナリオ
①FIT終了後	×	×	○	×	○	×	×	○	×	○	1234は前スライドの4つのすべての消費者の意図を考慮したもの
③パネル買替営業	×	×	×	○	○	×	×	×	○	○	
④理想使用年数後	×	○	○	○	○	×	○	○	○	○	
PV平均寿命[年]	30	30	30	30	30	57	57	57	57	57	

【シナリオ別排出量】



<リユース可能性について>

- ・左図の排出量から分かるように、初期段階ではS_0と1234の違いである「使用者の意図による排出」がほとんど。つまり故障していないものになる。
- ・使用後の年数としても極めて短いものが多く、リユースの可能性は高いと言える。

ポイント

・簡易分析法には一長一短があり、また分析精度に差があるものの、非破壊で迅速に分析することが可能

【ガラスの簡易分析手法の確立】

- カバーガラスを用途別に再利用するためには、ガラス成分を予め把握しておくことが非常に重要
- カバーガラスのリサイクルに必要な成分情報を得るため、オンサイトで比較的簡単に分析する手法を検討
- 卓上型XRFによる半定量分析法、卓上型FT-IRによる定性分析法について、分析精度を比較検討するとともに、オンサイトでの分析法の確立を目指し、ハンドヘルド型XRFの適用可能性を調査

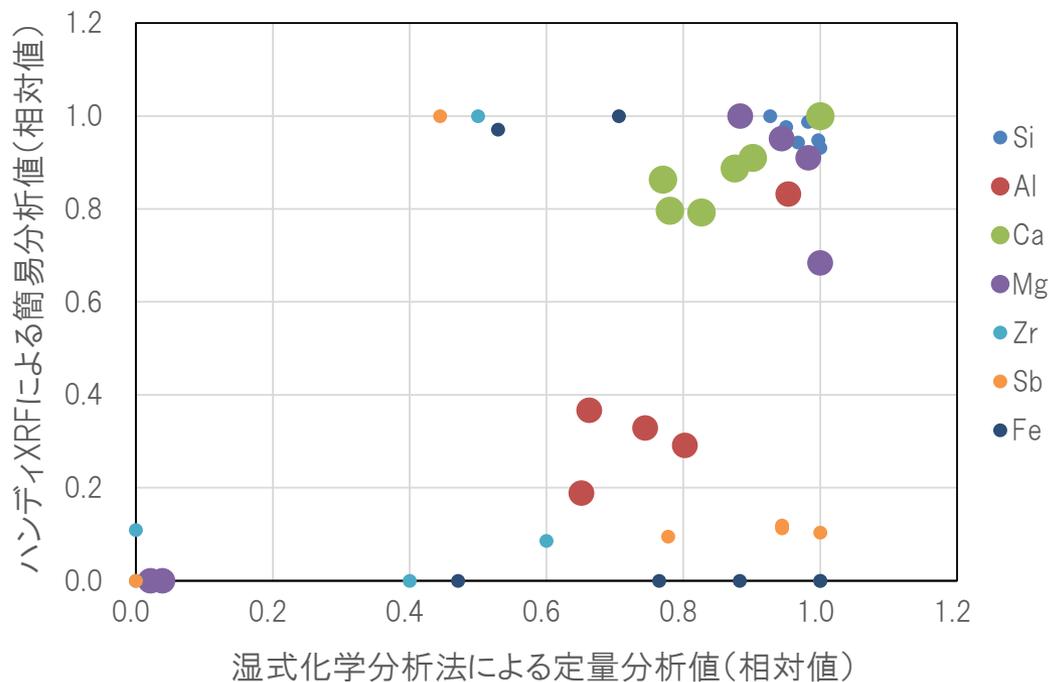


図 湿式分析とハンドヘルドXRF分析の相関

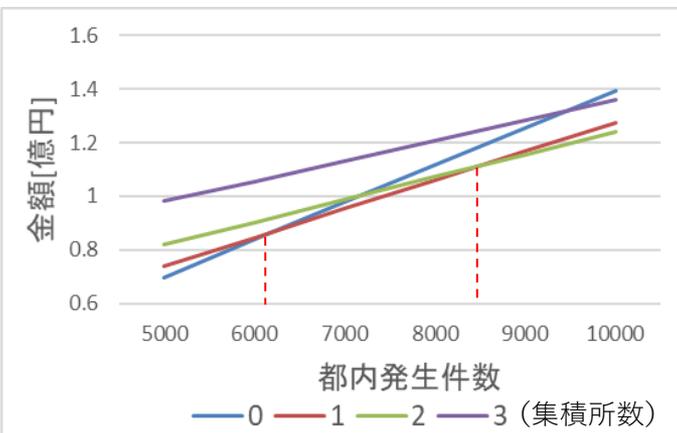
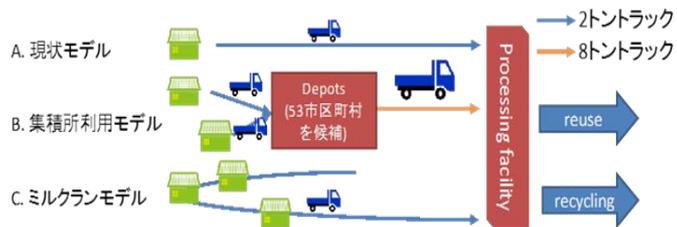
5 収集運搬の最適化

ポイント

- ・年間6000件を過ぎたところでモデルAに対してモデルBが優位
- ・ある程度の量が担保されればモデルCへ。更に、多摩地区では中間集積所と併用、更に収集事業者間の連携などが効果的

【数値最適化による効率的な収集方法の検討】

- ・現状のモデルAに比べて、モデルBやモデルCが優位性を持つ状況について検討



【実際に事業者が用いている配車システムでの地域別試算結果: 2030年ごろの発生量を想定】

23区			
	対象区	1件あたり 走行距離 [km]	1件あたり 走行時間[hr]
各地域内でミルクラン回収	中央域(15区) (高速道路使用)	35.6	2.7
	江戸川区 (高速道路使用)	32.3	2.8
	板橋区	32.7	2.6
	練馬区	48.3	3.8
多摩地区で言う手法 1 (C)	杉並区	37.3	3.1
	葛飾区 (高速道路使用)	39.3	2.9
	大田区	27.7	2.5
	足立区	38.7	3.2
	世田谷区	30.8	2.7
	平均	35.5	2.8

23区では発生が密かつ比較的均等なため地区を分けミルクラン収集で十分
多摩地域は不均一に発生するため、集積所や事業者連携が必要

多摩地区				
手法	詳細 (計算は事業者のAI配車システムによる)	総走行距離(上) 1件あたり(下) [km]	総走行時間(上) 1件あたり(下) [hr]	必要台数
0 (A)	すべての発生点に1事業者が専用便を出す	4,007 95.4	340 8.1	42
1 (C)	1事業者がミルクラン的に収集(23区のパターンに近い)	1,506 35.9	139 3.3	15
2 (Bの発展系)	上に対し、6事業者がそれぞれの立地を考え近くを収集するように連携収集する。	1,304 31.0	127 3.0	14
3-1 (BCハイブリッド)	2に対して中間集積を行う。事業者間の回収場所の割り当ては地域で割り当てる。	799	99	15(1次)+ 6(集積以降)
		19.0	2.4	
3-2 (31を更に最適化)	3-1に対して割り当てをAI配車システムにより最適化する。	788	93	14(1次)+ 5(集積以降)
		18.8	2.2	

ポイント

- ・足場の有無、屋根へのアプローチの仕方、架台取付用ベース板撤去の有無などが、工数及びコストに大きく影響
- ・ハンディXRFによる分析は、オンサイト分析に有効

【取外し実証試験】

- 取外し時の課題等を把握するため、家屋（3件）からの取外し作業を詳細に計測

【標準的な取外し作業フロー】

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

【総作業量比較】

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

※監督者は含まない

【ガラスのオンサイト分析】

- 上記取外し現場において、ハンディXRFによりカバーガラスの組成分析を実施



ポイント

- ・太陽光パネルの劣化状態を簡易的に判断するための性能診断方法を検討し、太陽光パネルを設置している住宅等で実証試験実施
- ・実際の現場で性能診断の有効性を確認

【手順】

- 第一フェーズ：絶縁不良、内部抵抗不良の検査を行い、パネルの不具合を確認
- 第二フェーズ：不具合の状況を詳細に診断するため、I-V検査、ドローンIR検査、遠隔監視システムが設置されていればデータ解析を実施

【性能診断】

- 一般住宅（13件）及び東京大学生産技術研究所COMMAハウスに設置してある太陽光パネルを対象に性能診断実証試験を実施
- 一般住宅のパネルの一部で電路断線等の不具合を発見

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

ポイント

- 処理条件により分離濃縮状況が変化することを確認
- 特に、銀及び銅の濃縮が顕著

【従来型技術の実証】

- 一次粉砕として、ハンマーミル及びオリエントミルを用いて分離濃縮状況を検証
- 2 mm以上の粒群について二次粉砕として、インテンシブミキサー、粉砕容器を高速振動して試料を粉砕する振動ミルを用い、処理条件を変化させて分離濃縮状況を検証

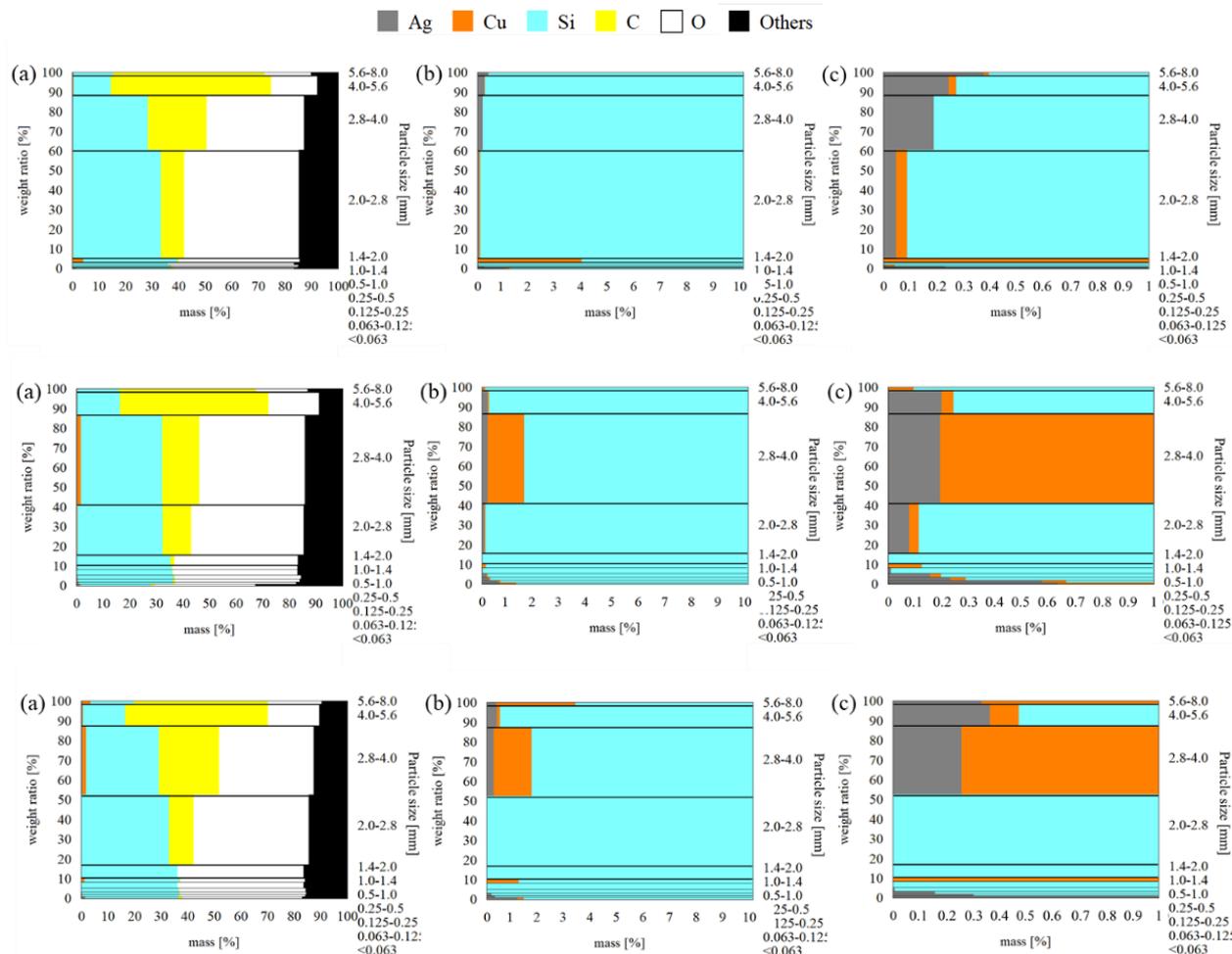
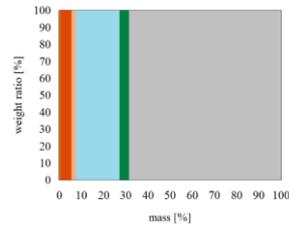


図 インテンシブミキサーによる破砕の粒度分布 (上段 1分処理、中段 3分処理、下段 5分処理) (a) 全体表示、(b) 10%表示、(c) 1%表示

7 分離濃縮技術 ～ウ 新規電気パルス法～

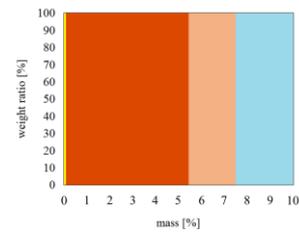
ポイント

・電極位置や電圧、抵抗、パルス幅などの制御により、分離精度を高めることができる新規電気パルス法の有効性を確認



【粒群ごとの元素分布割合（全体）】

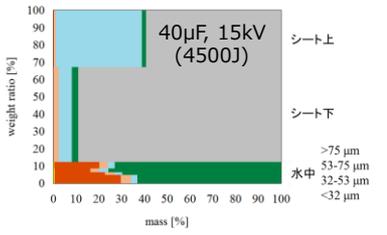
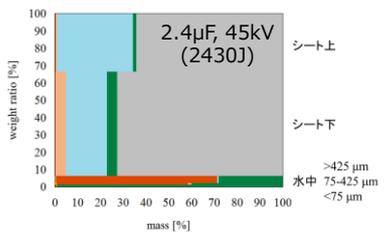
Original
 Ag Cu Al Si others IL



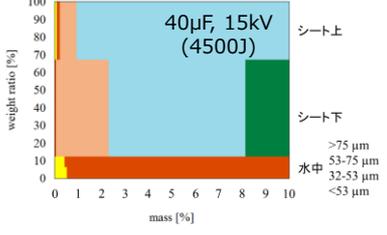
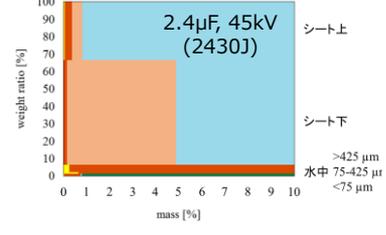
【粒群ごとの元素分布割合（微量元素）】

Original
 Ag Cu Al Si others IL

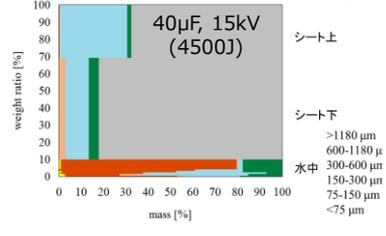
水中にて銅線に電極設置 (30mm幅)



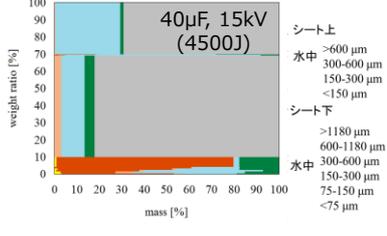
水中にて銅線に電極設置 (30mm幅)



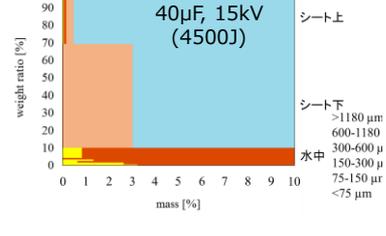
水中にて銅線に電極設置 (150mm幅)



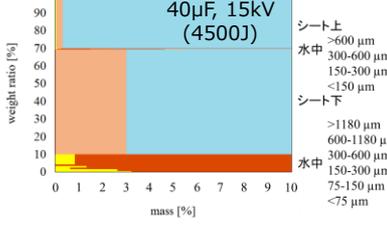
水中にてさらにシート上に電極設置



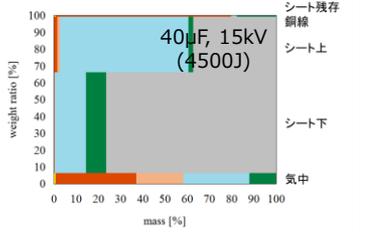
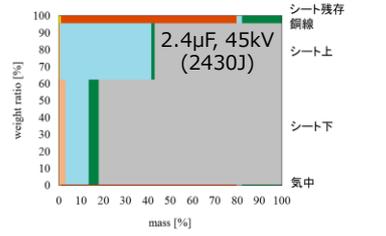
水中にて銅線に電極設置 (150mm幅)



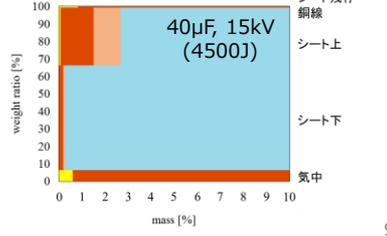
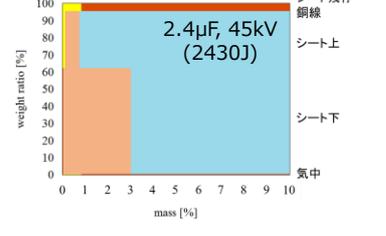
水中にてさらにシート上に電極設置



気中にて銅線に電極設置 (150mm幅)



気中にて銅線に電極設置 (150mm幅)



ポイント

- ・リビルドパネル（3直列4並列）を作成し、発電性能試験、高温高湿試験を実施
- ・一部で外観に気泡がみられたが、性能上は問題ないことが判明

【リビルドパネルの作成】

【高温高湿試験】

- 試験温度：85°C ± 2°C
- 相対湿度：(85 ± 5)%
- 試験時間：3000時間
- 試験項目
(1000時間毎に実施)
 - ・最大出力測定
 - ・E L画像検査
 - ・絶縁抵抗試験
 - ・湿潤リーク電流試験



両面に分離後ガラスを使用したパネルに気泡発生

【E L 検査結果】

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

ポイント

- ・性能診断の実証試験を踏まえ、リユース基準を設定
- ・カバーガラス及びアルミフレームは再利用可能

【リユース基準】

- 性能診断実証試験の結果をもとに、リユース基準を検討

試験項目	判定基準
絶縁不良（直流地絡）測定	電路使用電圧300V以下 対地電圧150V以下：0.1MΩ以上 150V以上：0.2MΩ以上 電路使用電圧300V以上：0.4MΩ以上
開放電圧測定	ストリング毎に測定した電圧の平均値よりも各ストリングの測定電圧がパネル1枚の1/3（1クラスタ相当）を下回らないこと
パネル抵抗値測定	他のストリングと比較して、抵抗値(インピーダンス(直列抵抗成分))が大きくなっていないこと
I-V特性曲線測定	I-V特性曲線形状に異常が無いこと
外観検査	太陽光パネル構成部材の損傷、焼け焦げ、膨らみ、剥離、極端な変色等が無いこと

【分解部品の品質評価】

- 再利用できるのはカバーガラス及びアルミフレームのみ
- ジャンクションボックス及びセルシートは分離時の破損等により再利用不可

9 ガラスのリサイクル ～ア ガラスカレット受入基準～

ポイント

- ・有機物は溶解プロセスにおいて熱分解されるが、大きなサイズは熱分解に時間が掛かり、発生する気体がトラブルの原因
- ・一部の金属は周りのOやSと反応し、製品への影響が懸念

【ガラスの受入基準の検討】

- 一部カバーガラスにはAsやSbが用いられているものがあり、リサイクル上の懸念
- 板ガラス、ガラスびん、用途として期待されるグラスウール、タイル、セラミックブロックについて、受入基準に関する情報を集約

【板ガラス向けガラスカレット原料】

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

【グラスウール向けガラスカレット原料】

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

ポイント

- ・試作したグラスウールは既存のものと同等の性能であることを確認
- ・溶解試験及び繊維化試験の結果、現状ではカレットを希釈して熔融時の黒煙、異臭等の発生を抑制することが必要

【熔融・繊維化試験】

- カレット400kgを使用し、メーカーにて熔融性試験を実施
- カレット中にEVA等の有機物が多く混じると熔融の際、黒煙、異臭、煤の発生、熔融炉内の温度上昇、気泡の発生がみられたため、スピナーへの供給速度が不規則となり、繊維化への影響を確認
- カレットを希釈することで上記の影響を軽減し従来の原料と同様に熔融・繊維化できることを確認
- 採取した繊維の成分分析の結果は既存原料とほぼ同一の成分比であった。

【グラスウールの試作】

- カレットを使用して、希釈条件を変えてグラスウールを試作
- 試作した出荷基準を満たすグラスウールを採取して成形し、外部機関による品質性能試験を実施
- 既存のものと同等の断熱性能であることを確認

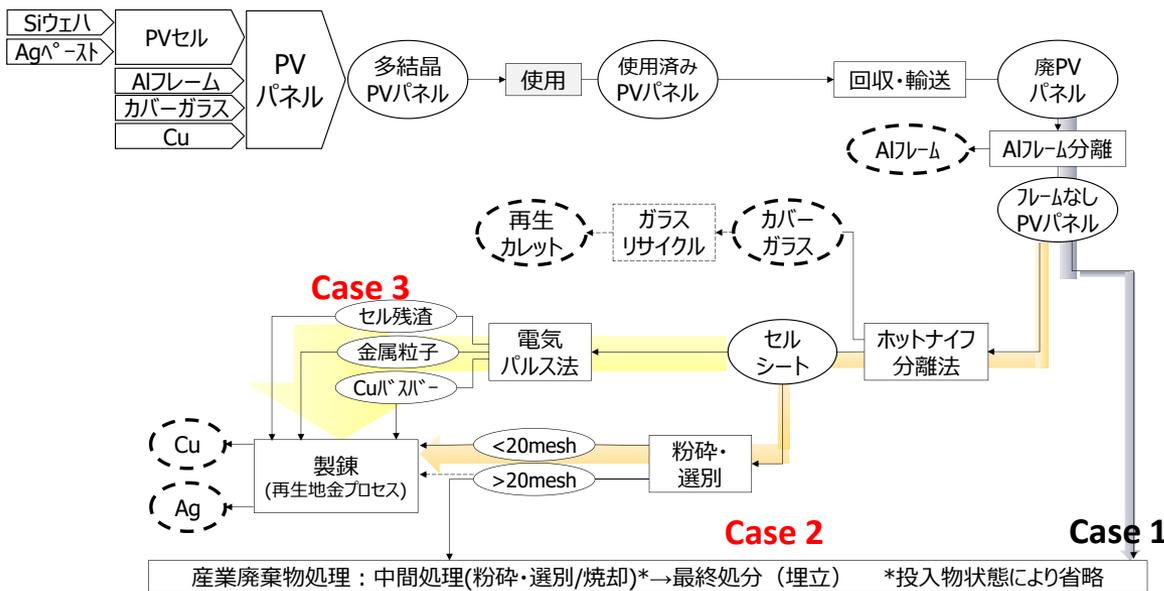


ポイント

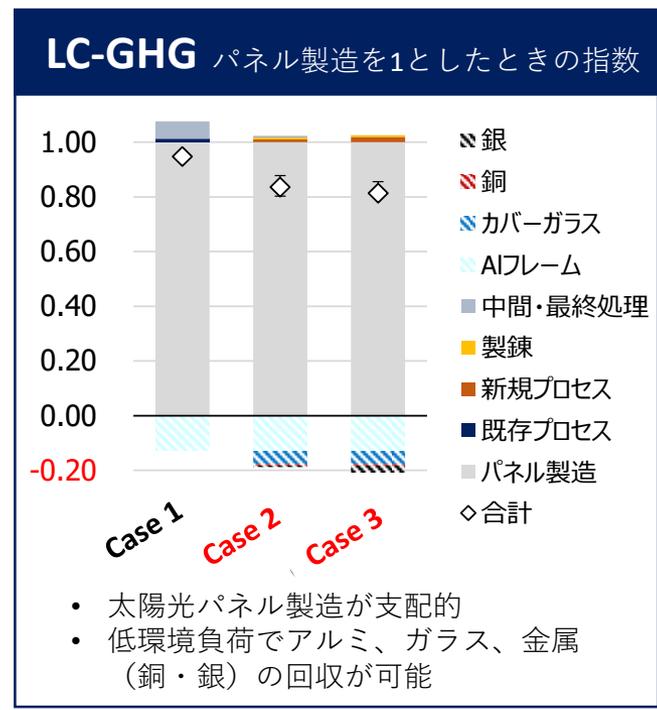
● 本事業で実証している高度処理に係るLCAを行い、既存の処理方法と比べて、環境負荷を低減できることを確認

【LCA】

- 製造、回収・輸送、前処理、高度分離法、素材リサイクルに係る調査を実施し、フォアグラウンドデータを収集するとともに、バックグラウンドデータを収集
- 複数シナリオを設定したLCAの結果、既存処理と比べて12~14%削減可能



- Case1 AI回収 + 産廃・埋立
- Case2 AI回収 + ホットナイフ法 (ガラス回収) + 粉碎処理 (金属回収)
- Case3 AI回収 + ホットナイフ法 (ガラス回収) + 電気パルス法 (金属回収)



- 太陽光パネル製造が支配的
- 低環境負荷でアルミ、ガラス、金属 (銅・銀) の回収が可能

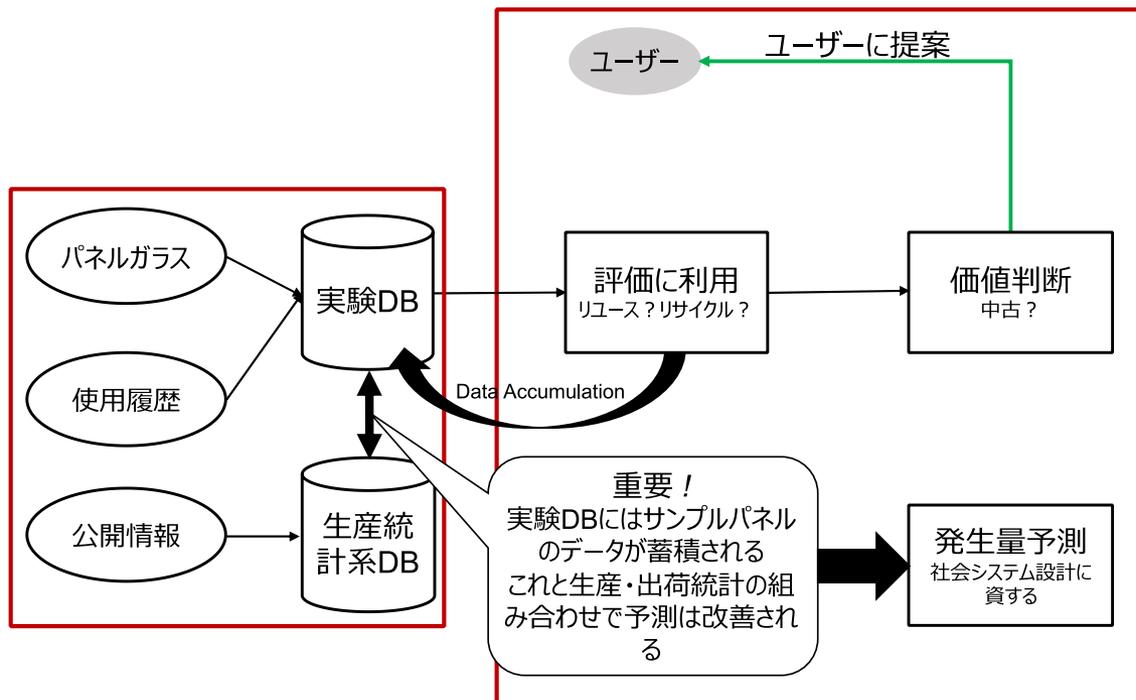
ポイント

・太陽光パネル高度循環の実現には、関連するデータを一括して管理することが極めて重要

【設計の考え方】

- データ蓄積による新たな利用可能性を踏まえ、太陽光パネルの基礎的情報から、実際の処理や試験的な分析等から得られた情報をすべて柔軟に取り込むことが出来るよう設計
- 拡張性の容易さにも考慮

【データベースの利用イメージ】



■ 本事業は以下の大学、事業者の御協力のもとで実施

- 早稲田大学 所千晴研究室
- 東京大学 村上進亮研究室
菊池康紀研究室
醍醐市朗研究室
- みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社
- 株式会社エヌ・ピー・シー
- 株式会社浜田
- JWガラスリサイクル株式会社
- 白井グループ株式会社
- 株式会社アイアイエスマテリアル
- 合同会社リトカ研究者工房
- 株式会社ワンワールド