太陽光パネルリサイクル技術動向と研究開発事例紹介

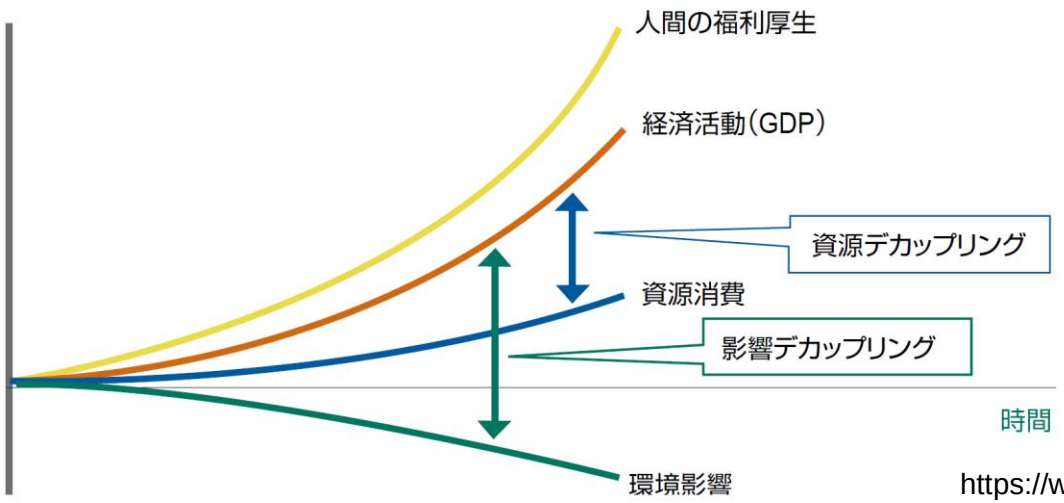
2022年8月10日　14:50～15:10

第19回　エコプレミアムクラブ　シンポジウム

早稲田大学理工学術院　創造理工学部環境資源工学科
東京大学大学院　工学系研究科システム創成学専攻
所　千晴
tokoro@waseda.jp
http://www.tokoro.env.waseda.ac.jp/

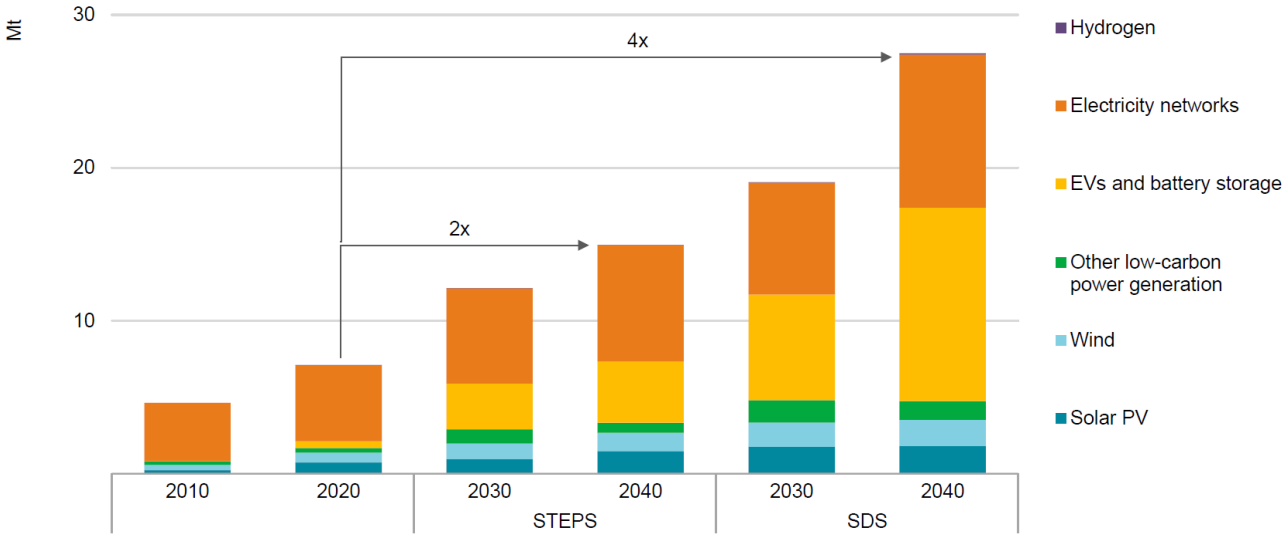
資源循環の位置づけ

図1: 資源消費と環境影響のGDP成長からの切り離し（デカップリング）



出典: UNEP (2011a). Figure 1. p. xiii

https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7585/Resource_Efficiency_SPM_JP.pdf?sequence=4&isAllowed=y

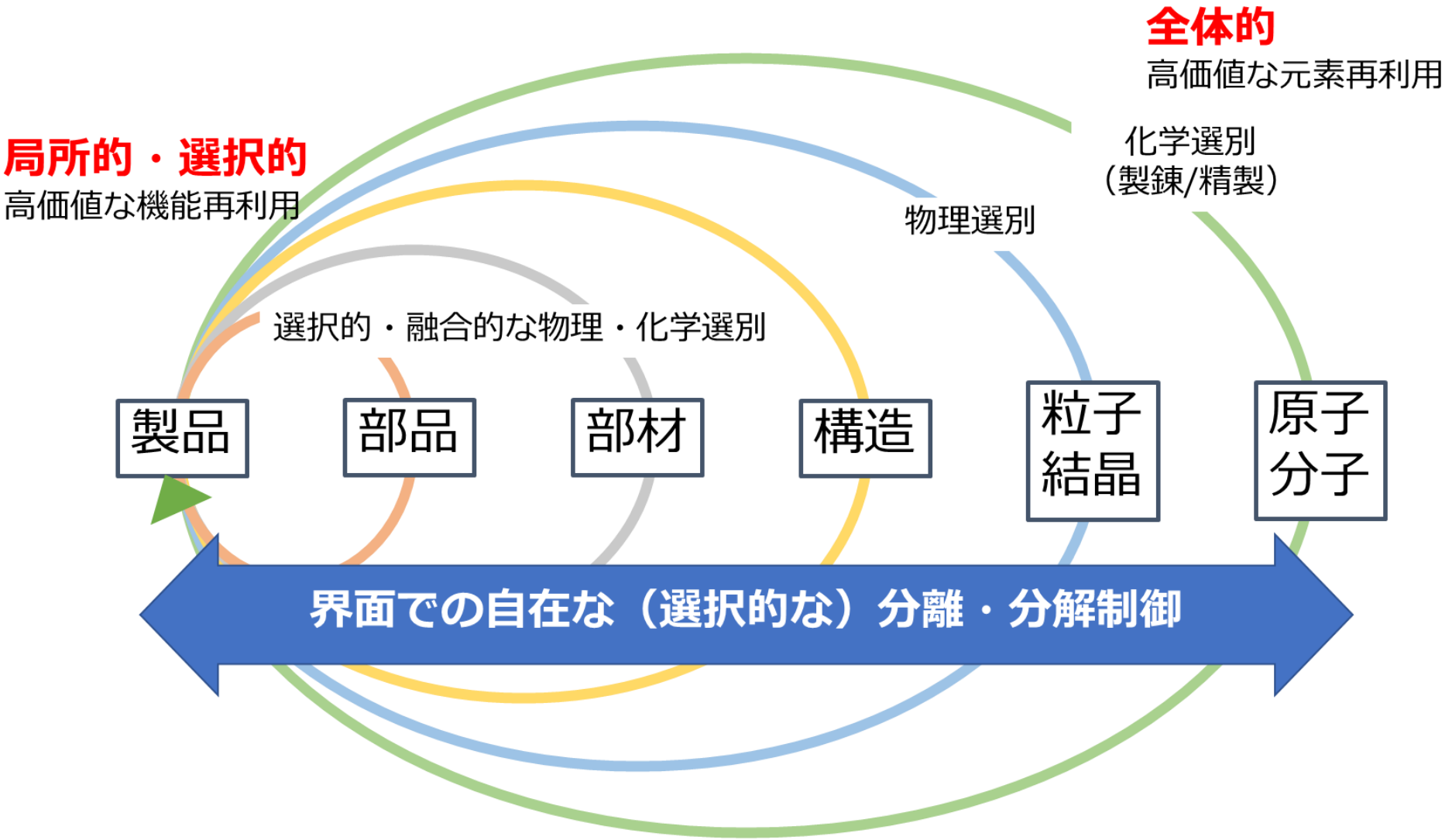


https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions

IEA. All rights reserved.

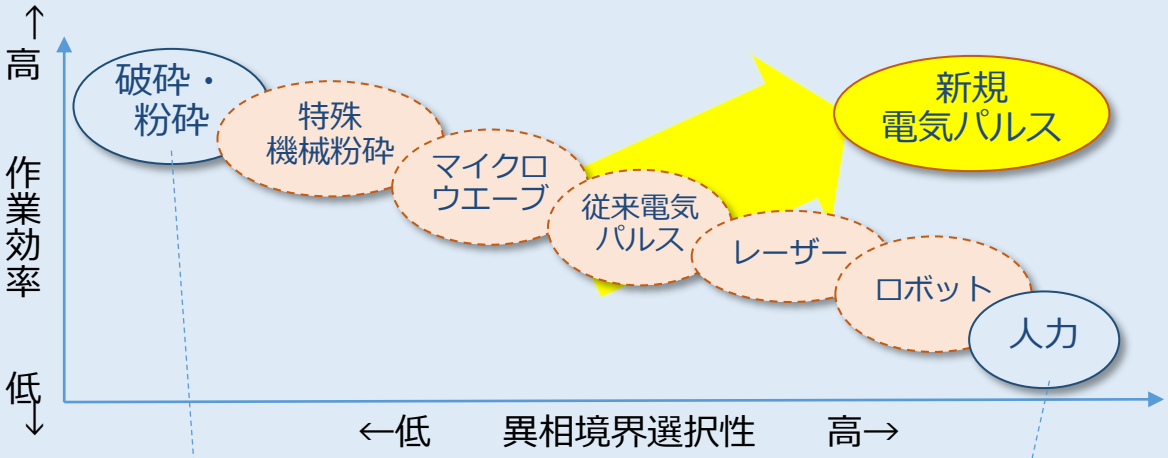
Notes: Includes all minerals in the scope of this report, including chromium, copper, major battery metals (lithium, nickel, cobalt, manganese and graphite), molybdenum, platinum group metals, zinc, REEs and others, but does not include steel and aluminium (see Annex for a full list of minerals). Mt = million tonnes.

資源循環のための省エネルギー型分離技術



資源循環型社会構築に向けた課題認識

現状の解体技術には、破砕・粉砕または手解体しか実用化されておらず、
リユース/高度リサイクルに柔軟に対応できる高度分離技術が確立されていない。



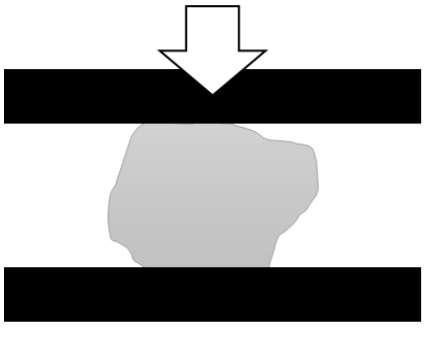
- **破砕・粉砕**：機械的弱部を利用した選択性の低い処理法。
- **人力解体**：リサイクル技術が労働集約的で、高効率化されておらず、大量処理に対応できない。

製品から得たい部位を選択的に取り外すことを可能とする
革新的な物理的分離技術の確立

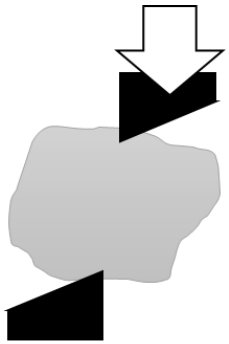
自動車のシュレッダー処理の様子

家電の人力解体の様子

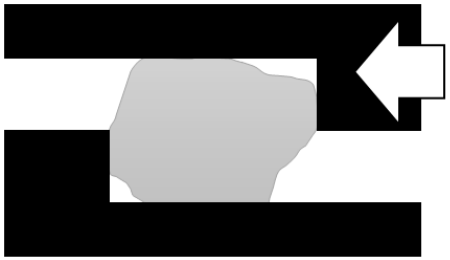
粉砕の種類



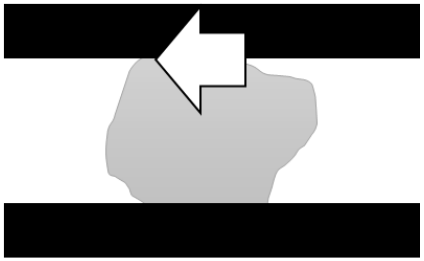
圧縮
（くるみわり）
粗砕・中砕



衝撃
（かなづち）
粗砕・中砕・微粉砕

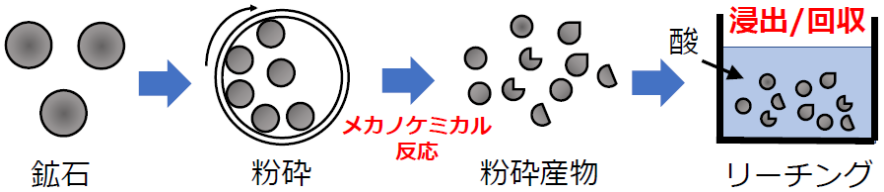


せん断
（はさみ）
中砕・微粉砕

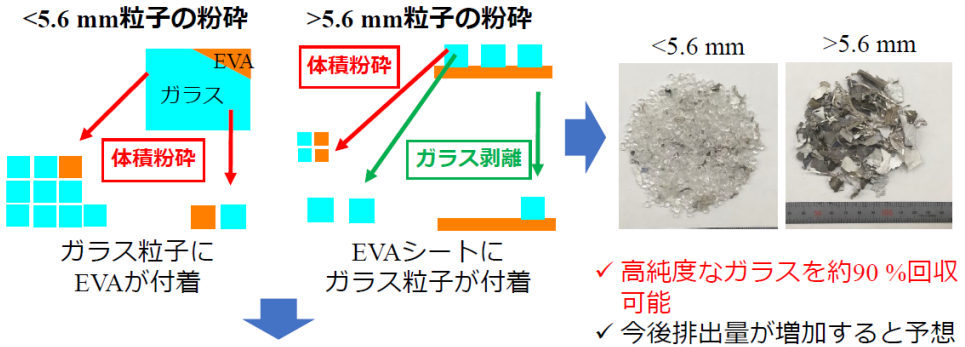


摩擦
（やすり）
微粉砕・超微粉砕

メカノケミカル反応を用いて，
難処理鉱石からの有価物の選択的浸出を促進させる



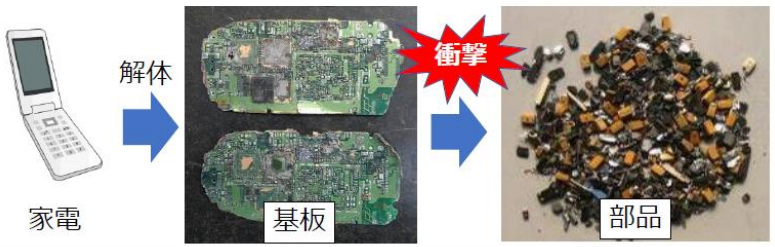
太陽光パネルからのガラス回収のメカニズム

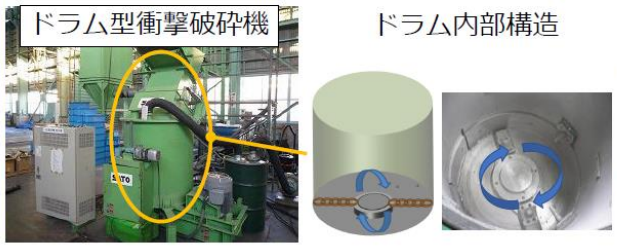


✓ ガラスが選択的に細かくなり,EVAと剥離
✓ EVA部分とガラスを分級により分離可能

✓ 高純度なガラスを約90 %回収可能
✓ 今後排出量が増加すると予想される太陽光パネルの処理法の一つとして期待される

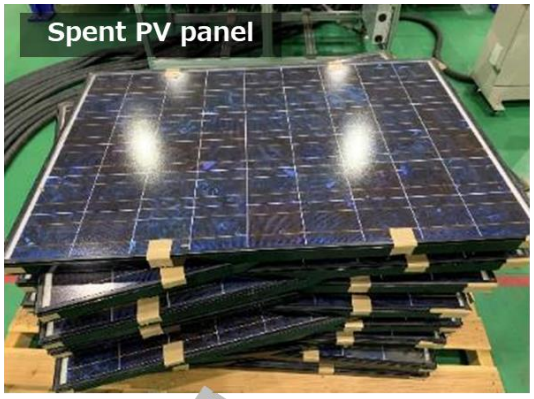
家電由来の基板からの部品剥離



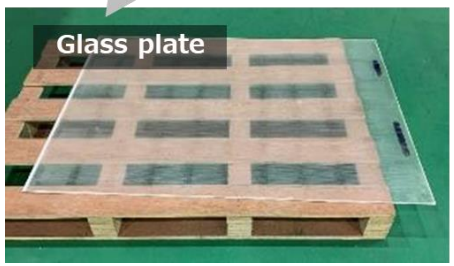


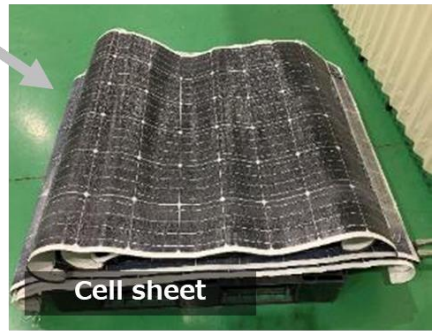
✓ ドラム型衝撃破砕機により衝撃を加えることで製品からの基板脱離と部品剥離を達成。
✓ 部品は種類によって，比重選別・静電選別・磁選等で選別可能。
✓ 部品回収によりタンタル等のレアメタル元素を濃縮可能。

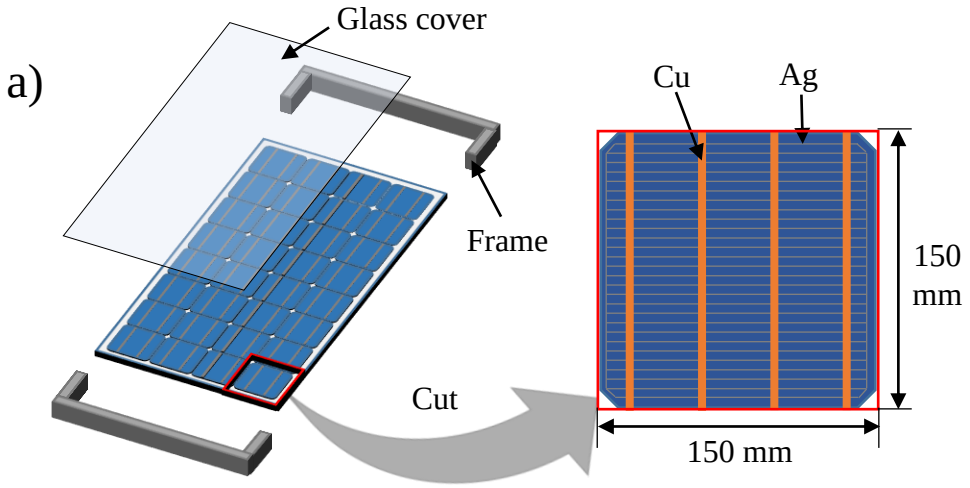
解体系リサイクルフローからの金属回収

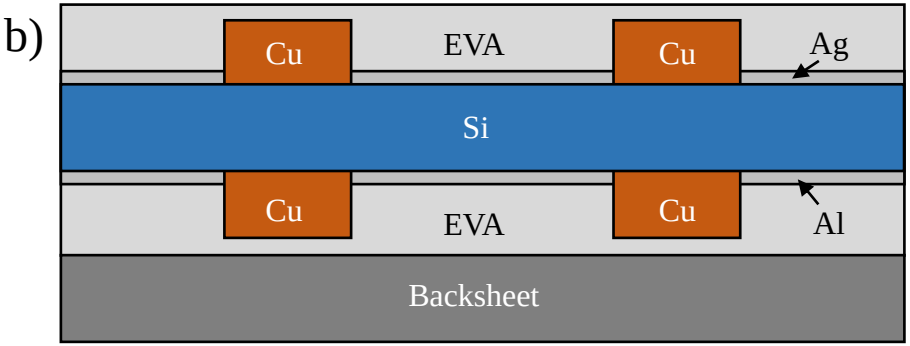


Conventional mechanic separation









セルシートからの金属回収

単体分離：界面での選択的な分離・分解をもたらす外力

力学的作用　**熱的作用**　**質量作用**

これらの作用をバルクではなく界面に集中させる

密度　大きさ　強度　音響インピーダンス　導電率　融点　沸点

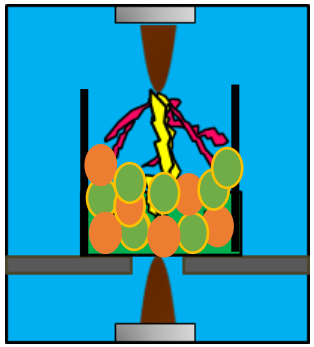
線膨張係数　粘性　亀裂　比熱　抵抗　誘電率　透磁率

製造時に設計できる・設計すべき物性は何か？

新規電気パルス法の提案

新規電気パルス法による高選択性・高効率な部品・素材分離

従来電気パルス法



衝撃波の影響大

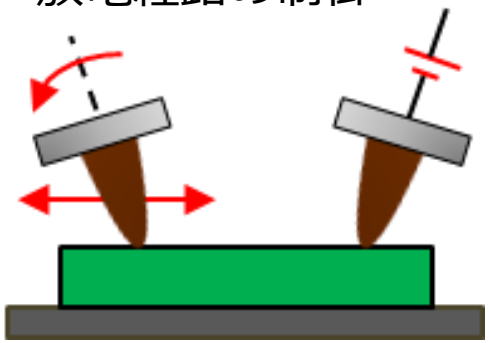
集合破砕的

衝撃波だけでなく、大電流やプラズマ化によるジュール熱の機能も最大限活用

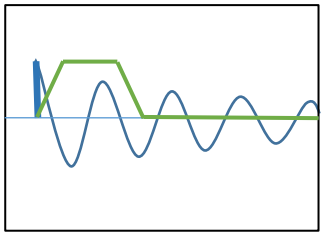
選択的な加熱
選択的な反応
選択的な剥離 を可能に！
選択的な破壊

新規電気パルス法

放電経路の制御



波形の制御



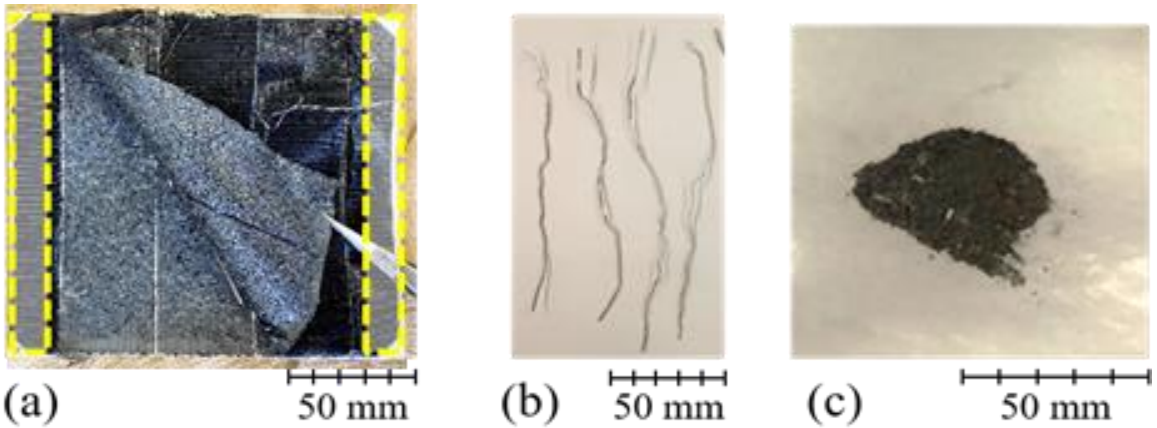
精緻な制御
- 放電経路
- 電流・電圧波形
- 繰り返し回数・頻度

ジュール熱と衝撃波の発生割合と場所を制御

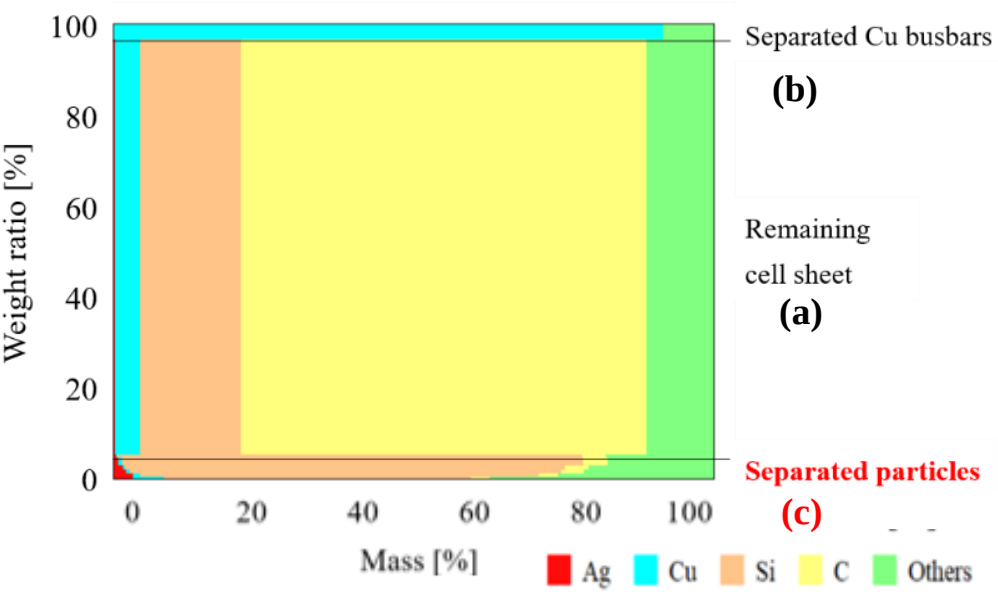
多種多様なリユース/リサイクルの目的に合わせた**選択的**な**剥離**を可能に

電気パルスによる分離の様子

電気パルス放電が起こらなかった部分(26%)



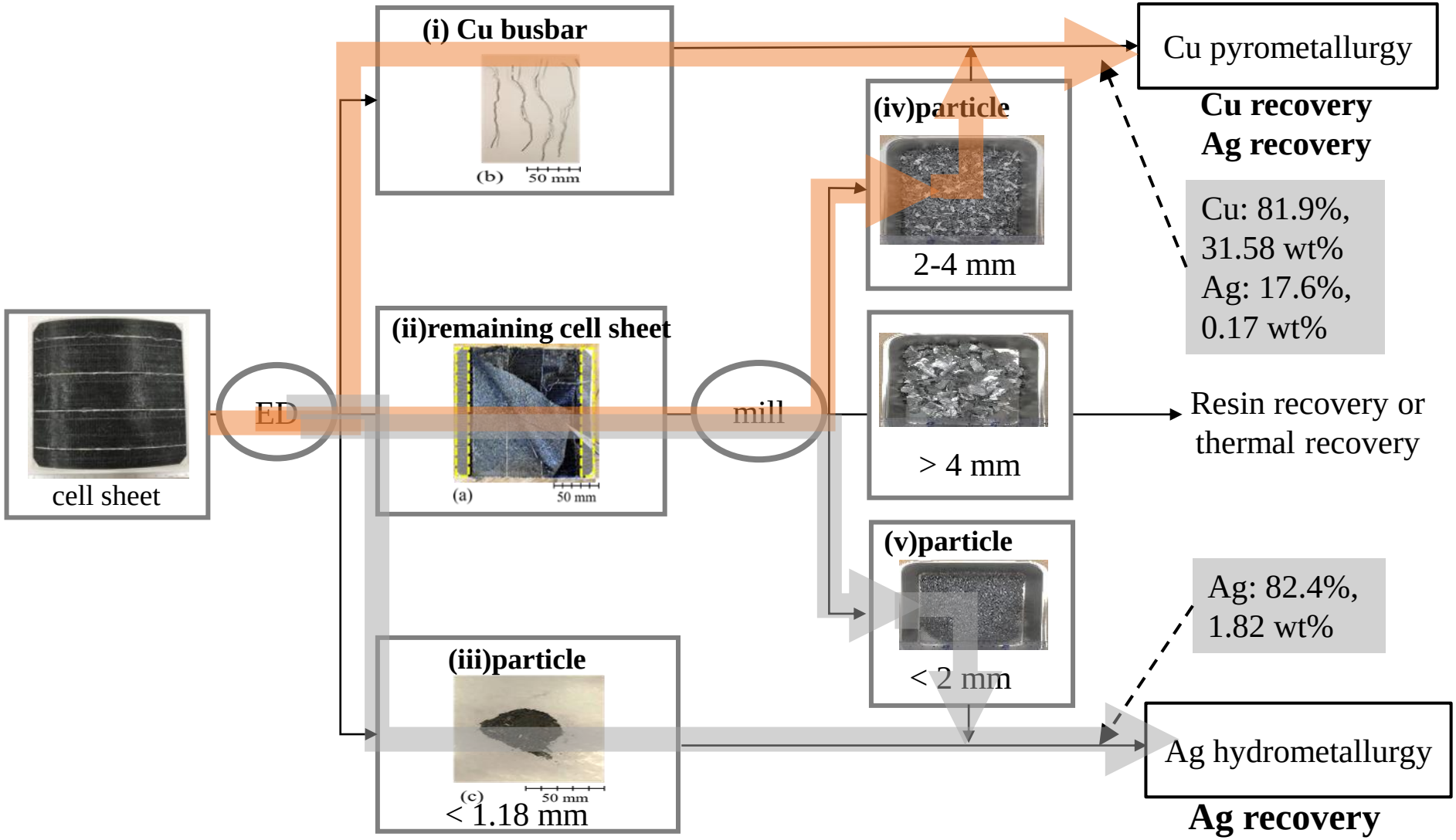
<Appearance of separated materials >



- 銀線が細線爆発した際に生じた衝撃波によって、銅線はそのままの形状で分離
- 銀線と一部シリコン粒子は、粒子として回収
- ただし、銀線の端部には電気パルス放電が起こらず、セルシートに残存

電気パルス＋粉砕による金属回収

早稲田大学
WASEDA University



東京都提案事業：１　背景・経緯等

（１）背景

- 固定価格買取制度（ＦＩＴ）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３Ｒ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**

東京都提案事業：　1　背景・経緯等

（5）事業構成

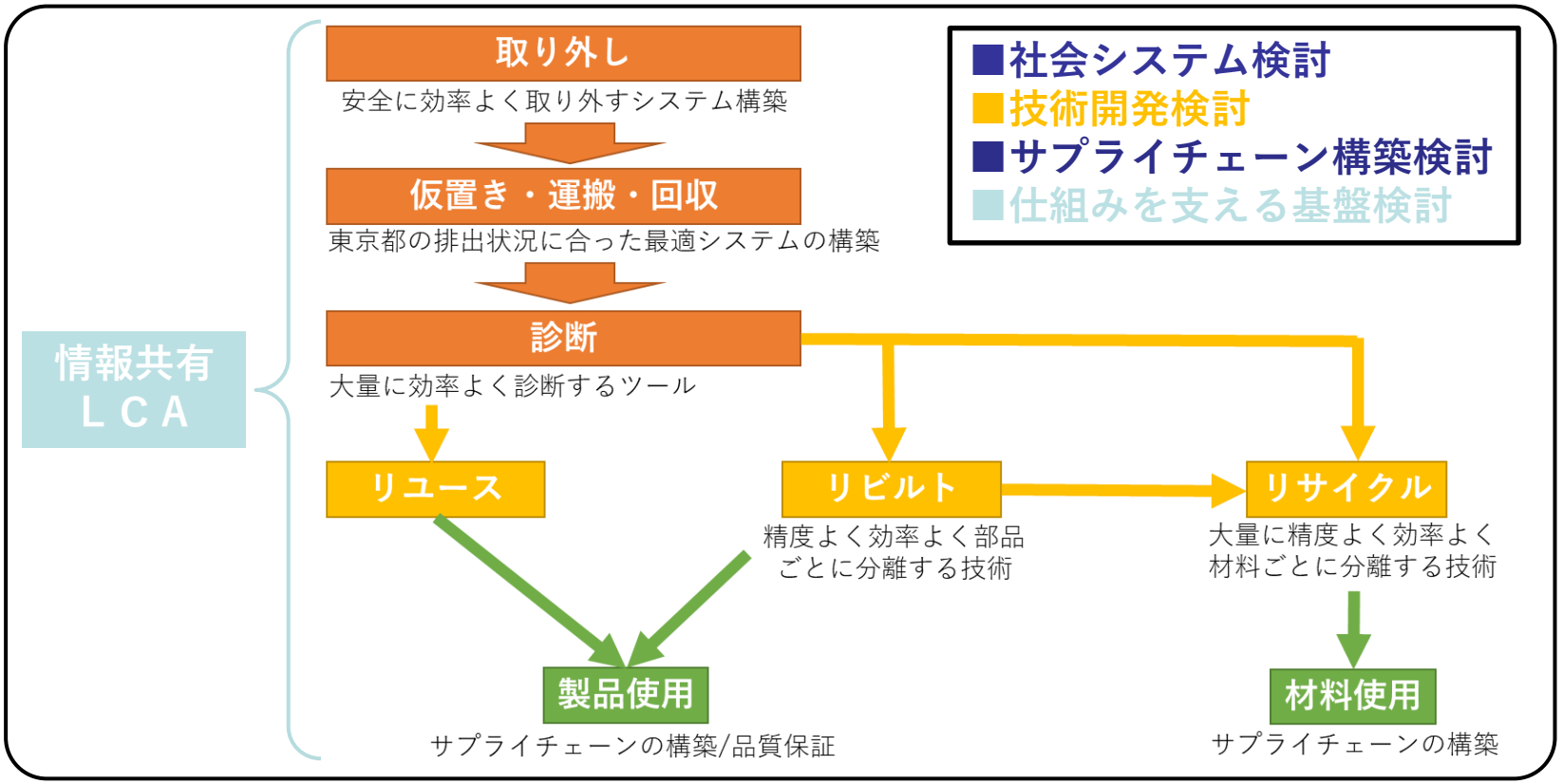
- 使用済みの太陽光パネルを高度に循環するためには、以下の項目について検討し、実現することが必要

ⅰ）最適な社会システム構築

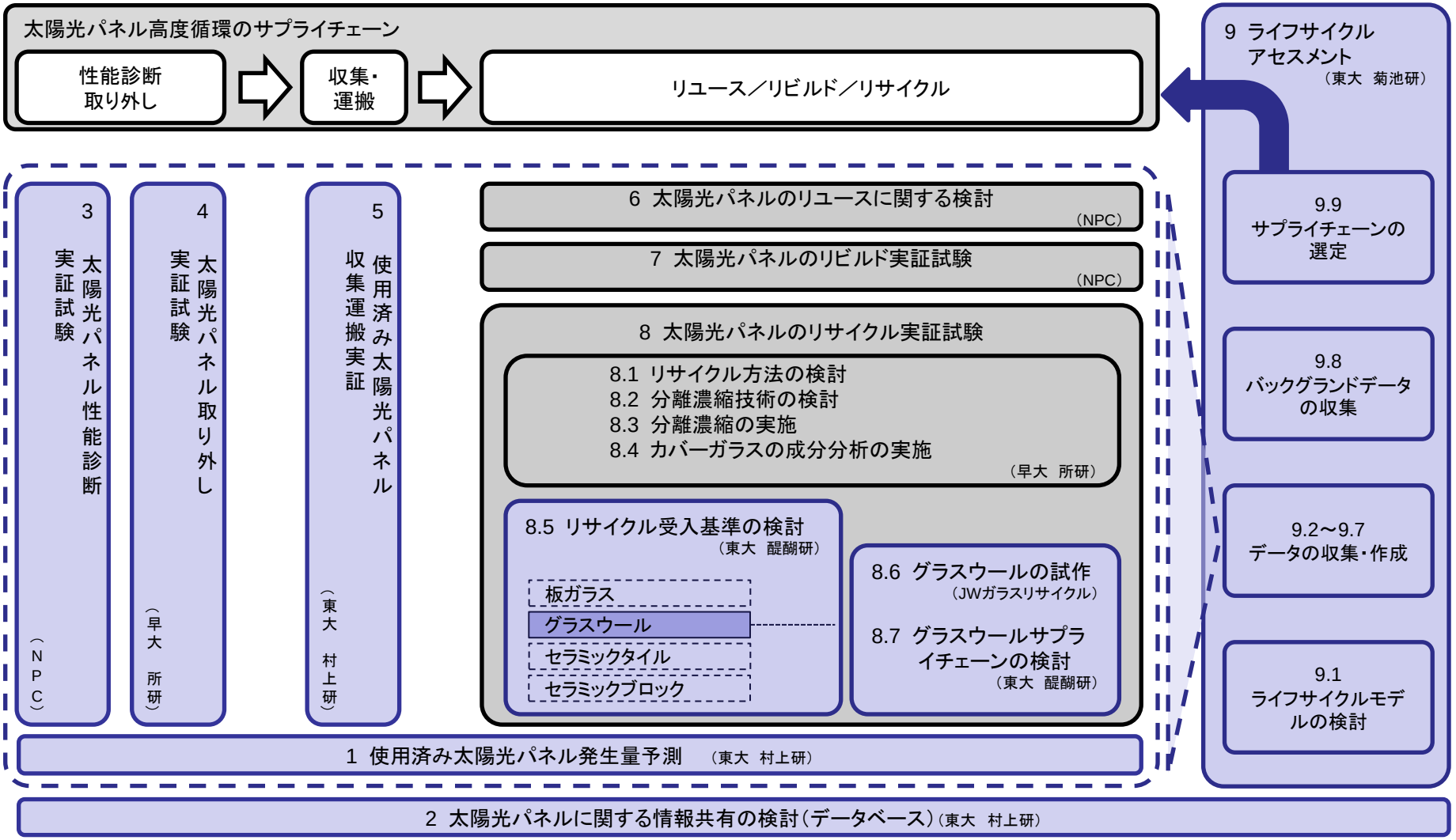
ⅱ）リユース・リビルト・リサイクルに係る技術開発

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



（6）事業の全体像


太陽光パネル高度循環のサプライチェーン
性能診断 取り外し
収集・運搬
リユース／リビルド／リサイクル
9 ライフサイクルアセスメント（東大　菊池研）
9.9 サプライチェーンの選定
9.8 バックグランドデータの収集
9.2～9.7 データの収集・作成
9.1 ライフサイクルモデルの検討
3 太陽光パネル性能診断実証試験（NPC）
4 太陽光パネル取り外し実証試験（早大　所研）
5 使用済み太陽光パネル収集運搬実証（東大　村上研）
6 太陽光パネルのリユースに関する検討（NPC）
7 太陽光パネルのリビルド実証試験（NPC）
8 太陽光パネルのリサイクル実証試験
8.1 リサイクル方法の検討
8.2 分離濃縮技術の検討
8.3 分離濃縮の実施
8.4 カバーガラスの成分分析の実施（早大　所研）
8.5 リサイクル受入基準の検討（東大　醍醐研）
板ガラス
グラスウール
セラミックタイル
セラミックブロック
8.6 グラスウールの試作（JWガラスリサイクル）
8.7 グラスウールサプライチェーンの検討（東大　醍醐研）
1 使用済み太陽光パネル発生量予測　（東大　村上研）
2 太陽光パネルに関する情報共有の検討（データベース）（東大　村上研）

東京都提案事業：事業参加者

■ 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　　所研究室
- 東京大学　　村上研究室
  菊池研究室
  醍醐研究室
- 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

東京都使用済太陽光発電設備リサイクル検討会　資料
https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/resource/recycle/solarpower3r/solar-power-commision.html

課題の認識

- 使用済み太陽光パネルを回収する仕組み作り
- 既存の技術を活用した高度循環の基礎作り（現状における対応）
- 高度循環に資する技術への研究開発支援（将来を見据えた対応）
- 公共施設における使用済み太陽光パネルを循環利用した製品の活用
- サプライチェーンでの連携支援
    - ① 情報共有の仕組みづくり
    - ② 各主体間で情報交換する機会の提供
- 太陽光パネルの循環利用を進めるための情報提供・発信
    - ① 太陽光発電に関するワンストップ問い合わせ窓口の設置
    - ② 各主体への情報発信（ホームページ等による）
- 太陽光発電設備の更新の支援

課題の認識

	太陽光パネル	家電4品目（テレビ、エアコン、冷蔵庫、洗濯機）
保守管理	● 大型、野外に設置のため、個人の制御ハンドリング、故障判断、取り換え判断がしづらい	● 日常的に家電を使用しており個人でも故障の判断が容易
製品の寿命	● 長い（20～30年程度）	● 短い（～10年程度）
設置形態	● 建造物の一部となっているため、建設廃材となりやすい	● エアコンを除き家電が独立して設置されており、廃棄時の搬出が容易
廃棄等に関わる主な法制度	● 廃棄物処理法 ➢ ガラス・コンクリート・陶磁器くずなどと同じ取り扱い（処理）が必要	● 家電リサイクル法＋廃棄物処理法 ➢ 製品に合わせた取り扱い（処理）が可能
製造メーカ	● 海外メーカの製品が主流	● 国内メーカの製品が主流

Circular Value Chain Consortium

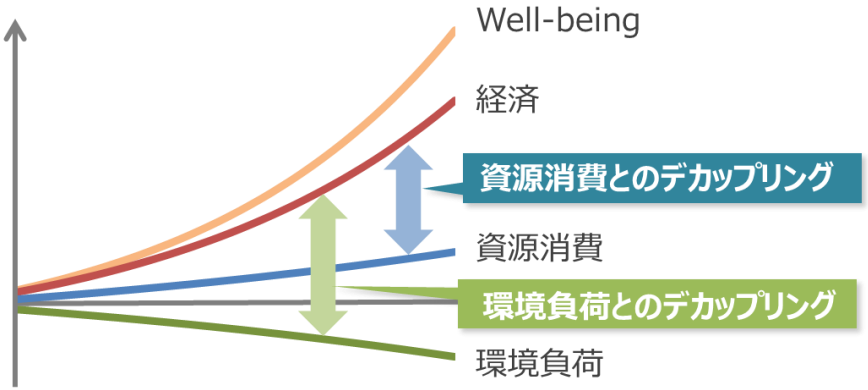
循環バリューチェーンコンソーシアム

2022年7月

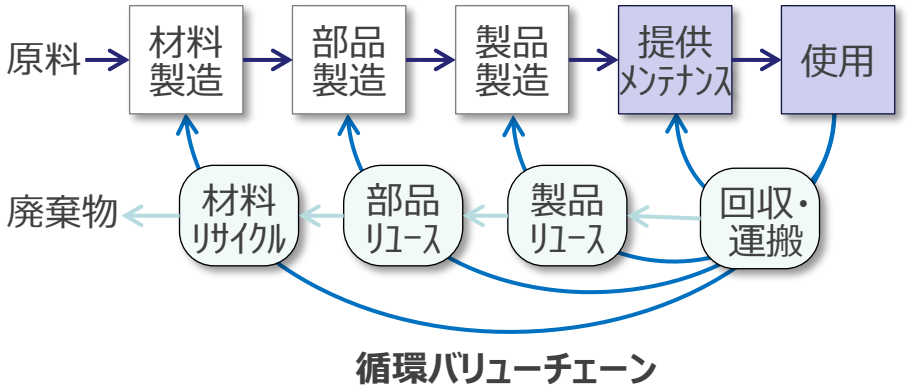
早稲田大学オープンイノベーション戦略研究機構
革新的資源循環技術研究所

CVCコンソーシアムが目指す資源循環技術

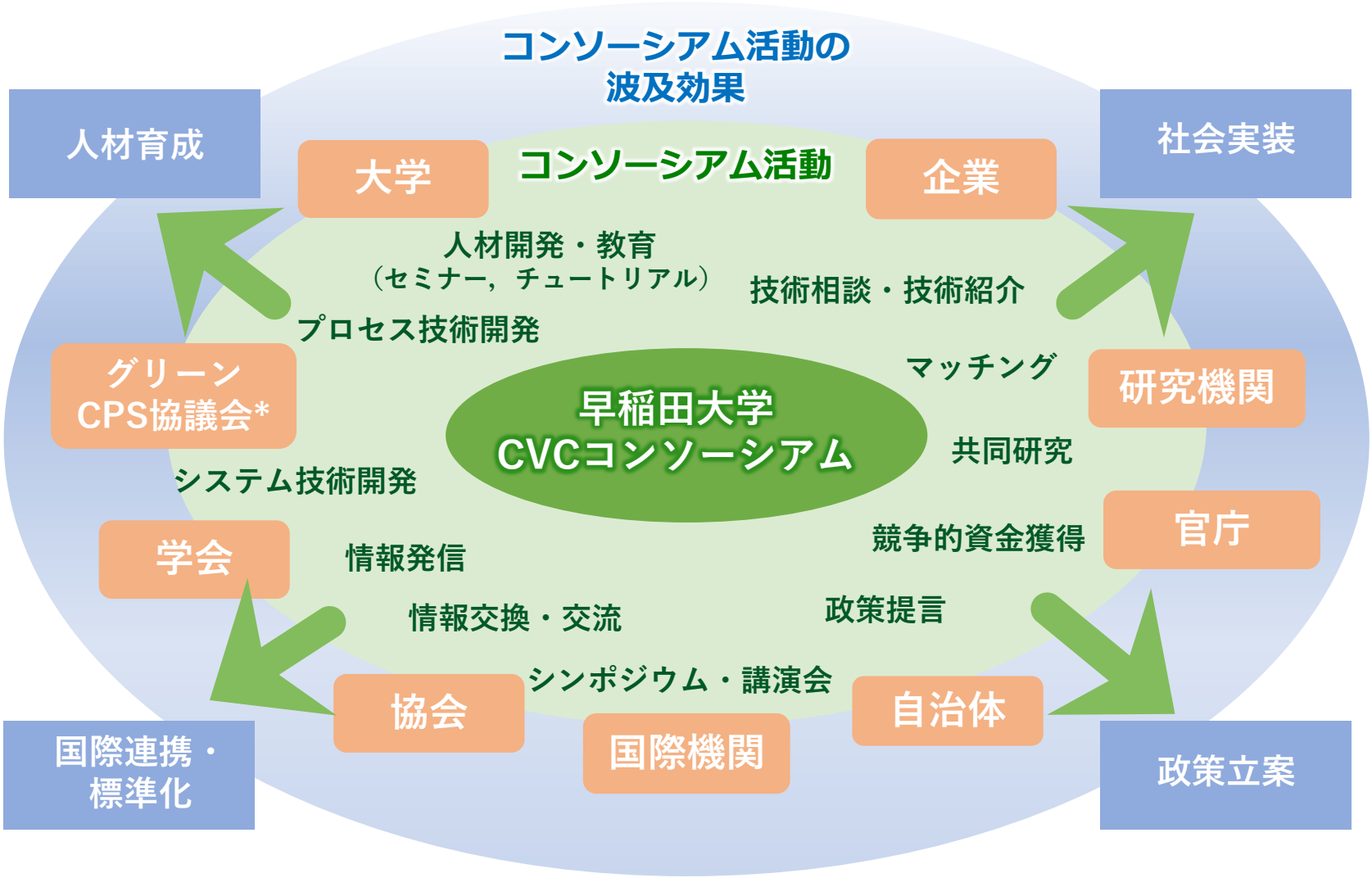
- CVCコンソーシアムでは，持続可能な社会の実現に向けて，Well-beingの向上と共に，生産・消費分野における**資源消費と環境負荷の低減**を目指し，**資源循環技術の研究・開発と社会実装**のための活動を行います．
- 資源循環を可能にするコンセプトは，「**ものの提供から機能の提供へ**」です．
- ユーザにとっての価値は機能の実現であり，ものはその媒体です．ものは要求された機能を発揮できるかどうかで評価されるべきで，新造品か再生品かは問題ではないはずです．
- このように考えることで，資源循環技術が，**資源消費・環境負荷低減とWell-being向上**を両立させるキー技術であることが分かります．
- CVCコンソーシアムでは，産官学連携して資源循環の実現に取り組むための**情報交換・議論・研究開発の場**を提供します．



UNEP (2011) Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth, A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel.



CVCコンソーシアムの活動



＊ 一般社団法人グリーンCPS協議会と連携して活動を推進します

© Circular Value Chain Consortium, Waseda University

コンソーシアム発起人

所　千晴
早稲田大学
理工学術院 教授
博士（工学）

革新的資源循環技術研究所所長．持続可能な資源循環型社会の実現を目指し，革新的再生・分離・選別技術，および易分解・易処理設計などの研究に従事．

中村 昌弘
レクサー・リサーチ代表取締役
博士（工学）

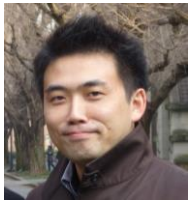
ものづくり日本大賞・経済産業大臣賞受賞．次世代モノづくりへ向けてシミュレーション技術の活用を社会に発信するとともに，海外各国へも普及を展開．

伊坪 徳宏
東京都市大学
環境学部 教授
博士（工学）

総合研究所環境影響評価手法研究センター長．ライフサイクルの観点から、気候変動，資源消費、生物多様性の影響を定量的に評価する手法LIMEを開発，事例分析を展開

梅田　靖
東京大学大学院
工学系研究科 教授
博士（工学）

人工物工学研究センター．エコデザイン，ライフサイクル工学，製品ライフサイクル設計等を専門とし，サーキュラエコノミ実現のための次世代ものづくり研究に従事．



菊池 康紀
東京大学 未来ビジョン研究センター 准教授
博士（工学）

プロセスシステム工学に基づく技術・システムのモデル化とシミュレーションにより，ライフサイクルの先制的な評価と設計，社会実装に向けた活動を展開．

福重 真一
早稲田大学
理工学術院 教授
博士（工学）

設計工学やシステム工学の視点から，製品とそのライフサイクルを総合的に設計し運用していくための方法論や計算機支援システムの研究に従事．

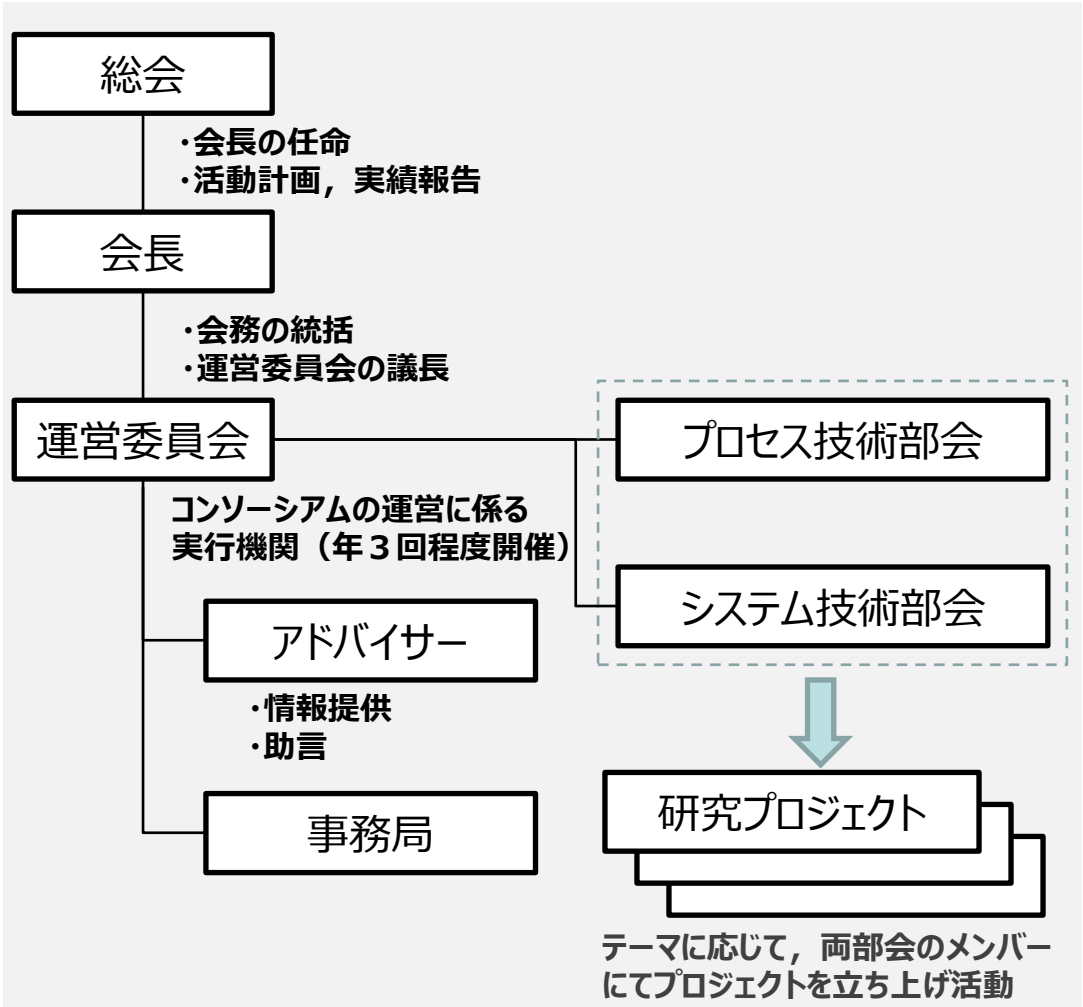
山口 勉功
早稲田大学
理工学術院 教授
博士（工学）

高温プロセスを基本とした素材プロセッシング技術で，非鉄製錬と貴金属分野の課題解決にあたるとともに，新たな金属資源循環プロセスの研究と開発に従事．

髙田 祥三
早稲田大学 名誉教授
工学博士

ものづくりの立場から，循環型生産システムの計画・運用・メンテナンスなどとそのコンピュータ支援に関するライフサイクル・エンジニアリングの研究に従事．

CVCコンソーシアムの組織



会員区分

①正会員　企業

②学術会員　大学・国・自治体等の研究機関

会　費

会員区分	年会費
正会員	400,000円
学術会員	無料

（注1）年度途中入会の会費
- 4～9月入会：全額
- 10～3月入会：半額

（注2）グリーンCPS協議会会員の優遇措置
- CVCコンソーシアム会員がグリーンCPS協議会に入会した場合：入会した次年度から会費を20%割引きます
- グリーンCPS協議会会員がCVCコンソーシアムに入会した場合：入会初年度から会費を20%割引きます
- CVCコンソーシアムとグリーンCPS協議会へ同時入会した場合：両団体とも入会初年度から会費を20%割引きます

早稲田大学循環バリューチェーンコンソーシアム事務局
（早稲田大学オープンイノベーション戦略研究機構内）　早稲田大学121号館　1階101事務所内
TEL:　03-5286-8219　Email:　cvc-contact@w-as.jp（長嶋，小山）

循環バリューチェーンコンソーシアム
早稲田大学オープンイノベーション戦略研究機構

Circular Value Chain Consortium

キックオフシンポジウム

循環バリューチェーン構築が拓く 環境・経済・社会の調和

資源循環を実現するためには、多様な循環方式の中から適切な組み合わせを選択し，製造・再生・分離・選別などのプロセスを有機的に統合することで、効果的・効率的なバリューチェーンを実現する計画・運用技術の確立が必要です。この大きな課題に取り組むためには、産官学の連携が重要になります。そこで、産学官で情報交換・議論・研究開発の場を持つために、この度「循環バリューチェーンコンソーシアム」を設立しました。キックオフシンポジウムにて今後の活動内容をご紹介しますので、多くの皆様のご参加をお待ちしております。

参加費 無料

日 時 2022年 9月 27日(火) 13:30～17:10

形 態 ハイブリッド開催（Zoomウェビナー または 会場）
会場：早稲田大学コマツ100周年記念ホール
(東京都新宿区早稲田鶴巻町513 早稲田大学リサーチイノベーションセンターB1F)

定 員 ●ウェビナー：先着1,000名　●会場：先着50名様

予 約 要事前予約 Peatixにてチケット申込み https://cvc-kickoff.peatix.com/

お申込URL

主 催 早稲田大学オープンイノベーション戦略研究機構
革新的資源循環技術リサーチ・ファクトリー

共 催 早稲田大学持続的環境エネルギー社会共創研究機構

講演者

田中 将吾
経済産業省 循環経済課 課長

所 千晴
循環バリューチェーンコンソーシアム会長
早稲田大学 理工学術院 教授

Circular Value Chain Consortium

キックオフシンポジウム

循環バリューチェーン構築が拓く環境・経済・社会の調和

第1部	13:30	開会挨拶 早稲田大学 副総長　早稲田大学オープンイノベーション戦略研究機構 機構長
	13:40	基調講演 田中 将吾　経済産業省 産業技術環境局 資源循環経済課長
	14:00	サーキュラーバリューチェーンによる 新しい資源循環創成を目指したコンソーシアム設立について 所 千晴　循環バリューチェーンコンソーシアム 会長　早稲田大学 理工学術院 教授
	14:20	休憩
第2部	14:30	資源循環への取り組みとコンソーシアムへの期待 （調整中）
	14:45	ADEKAの取り組みとコンソーシアムへの期待 小川 亮　株式会社 ADEKA　機能高分子開発研究所 材料技術研究室 室長
	15:00	DOWAエコシステムの取り組みとコンソーシアムへの期待 （調整中）
	15:15	JX金属の取り組みとコンソーシアムへの期待 谷 明人　JX金属戦略技研株式会社　代表取締役社長
	15:30	資源循環への取り組みとコンソーシアムへの期待 （調整中）
	15:45	レクサー・リサーチの取り組みとコンソーシアムへの期待 中村 昌弘　株式会社レクサー・リサーチ 代表取締役
	16:00	休憩
第3部	16:10	コンソーシアムにおける取組紹介 山口 勉功　早稲田大学 理工学術院 教授
	16:25	コンソーシアムにおける取組紹介 福重 真一　早稲田大学 理工学術院 教授
	16:40	資源循環システムの実現に向けて踏みだすには 高田 祥三　早稲田大学 名誉教授
	17:00	閉会挨拶 中谷 義昭　早稲田大学オープンイノベーション戦略研究機構 副機構長

お問い合わせ・コンソーシアム申込み

循環バリューチェーンコンソーシアム
早稲田大学オープンイノベーション戦略研究機構

早稲田大学オープンイノベーション戦略研究機構
循環バリューチェーンコンソーシアム事務局
(CVC: Circular Value Chain Consortium, Waseda University)
cvc-contact@w-as.jp

参考文献

- 所 千晴."電気パルス分離技術が拓く未来の資源循環"クリーンテクノロジー. 2022, Vol.32, No. 1, pp. 1-4.
- 所 千晴."金属資源循環とサーキュラーエコノミー"化学工学, 2022, Vol.86, No. 2, pp. 61 - 64.
- 所 千晴."太陽光パネルのリサイクルプロセス"材料の科学と工学, 2021, vol. 58, No. 4, pp. 130 - 133.
- 所 千晴."スマートエネルギーを支える資源循環の現状と課題"金属, 2021, vol. 91, No. 1, pp. 61 - 66.

- S.Lim, C.Tokoro, et al. "Recovery of silver from waste crystalline silicon photovoltaic cells by wire explosion"IEEE Transactions on Plasma Science. 2021, , Vol.49, No.9, pp. 2857 - 2865.
- C.Tokoro, et al. "Selective grinding of glass to remove resin for silicon-based photovoltaic panel recycling“,Advanced Powder Technology. 2021, Vol.32, No. 3, pp. 841 - 849.
- C.Tokoro, et al. "Copper/Silver Recovery from Photovoltaic Panel Sheet by Electrical Dismantling Method“, Int. J. of Automation Technology. 2020, Vol.14, No. 6, pp. 966 - 974.

ご清聴ありがとうございました

所　千晴
tokoro@waseda.jp
http://www.tokoro.env.waseda.ac.jp/index.html

自己紹介(所千晴)

1998年3月	早稲田大学　理工学部　資源工学科　卒業
2000年3月	東京大学大学院　工学系研究科　地球システム工学専攻　修士課程修了
2003年3月	同上　博士課程　修了　(博士(工学))
2004年4月	早稲田大学　理工学部　助手　(環境資源工学科)
2007年4月	同　理工学術院専任講師　(創造理工学部　環境資源工学科)
2009年4月	同　准教授　(創造理工学部　環境資源工学科)
2015年4月	同　教授　(創造理工学部　環境資源工学科)　現在に至る
2016年9月	早稲田大学創造理工学部/研究科　教務主任(～2019年9月)
2016年11月	東京大学生産技術研究所　特任教授　現在に至る
2017年10月	日本学術会議　第三部会員　現在に至る
2018年9月	早稲田大学ダイバーシティ推進室長　現在に至る
2020年9月	早稲田大学理工学術院長補佐　現在に至る
2021年4月	東京大学大学院工学系研究科　教授(クロスアポイントメント)　現在に至る

所属学会:
資源・素材学会・環境資源工学会・粉体工学会・化学工学会・日本金属学会・
日本エネルギー学会・廃棄物資源循環学会・日本化学会・ACS・IEEE

委員歴:
経済産業省・環境省・JOGMEC・東京都・横浜市・川崎市等
Advanced Powder Technology・Minerals・Scientific Reports
粉体工学会誌・資源・素材学会誌等

主な研究テーマ:
新規資源循環創出のための分離技術の高度化および分離機構解明
界面工学に基づく廃水・汚染水からの有害金属イオン除去メカニズムの解明
粉体シミュレーションによる粉体プロセスの機構解明および高度化
プロセスミネラロジーに基づく環境浄化・資源循環プロセスの高度化