



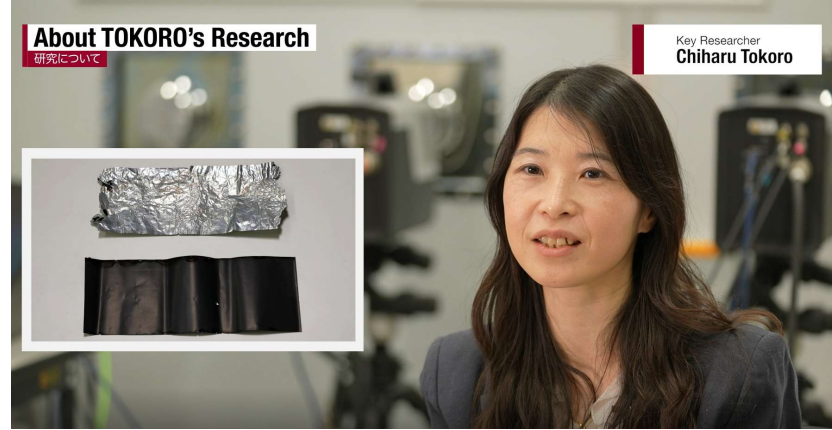
WASEDA University

サーキュラーエコノミー実現のための分離プロセス戦略と研究事例

2024年3月6日(火) 14:25~14:55

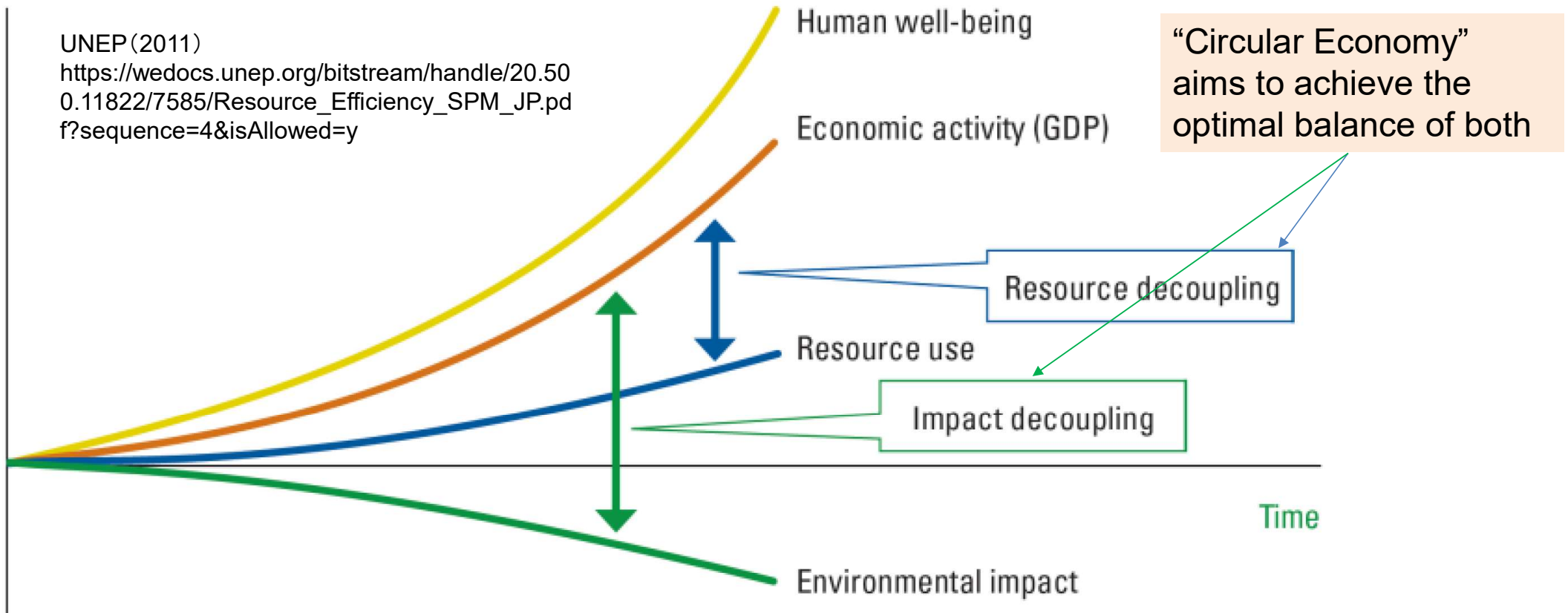
早稲田大学 理工学術院
東京大学大学院 工学系研究科
所 千晴

自己紹介



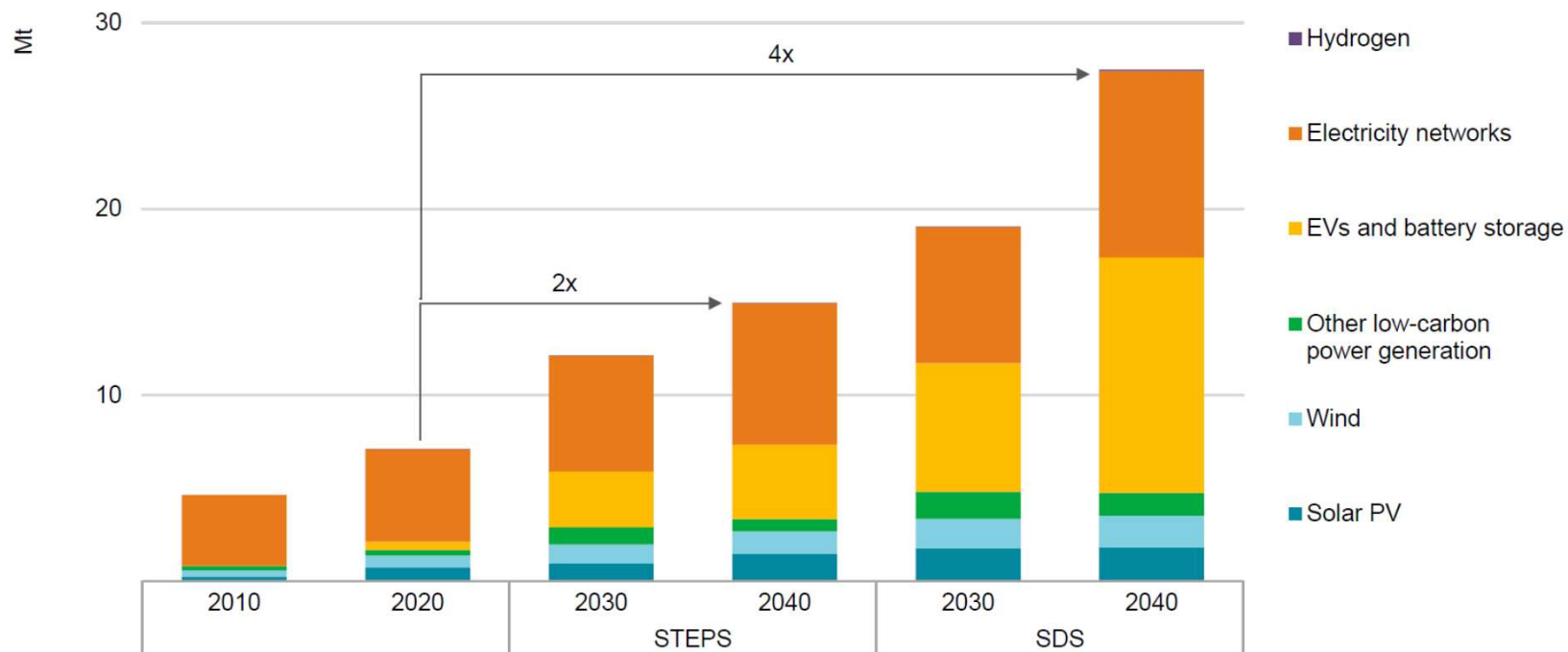
1992年 リオデジャネイロ地球サミット

経済成長と資源消費と環境負荷のデカップリング



Numerous reports express concern about increased “resource” requirements relative to GHG reductions (one of “impact”)
-UNEP-IRP (2016): Estimates for the energy supply side, UNEP-IRP (2017): Estimation of energy demand side
-IEA (2021): Estimate of increase in mineral resources due to carbon neutrality promotion policy

カーボンニュートラルに伴う所要鉱物量の増加



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.

STEPS: IEA Stated Policies Scenario

世界各国が公表している政策シナリオ

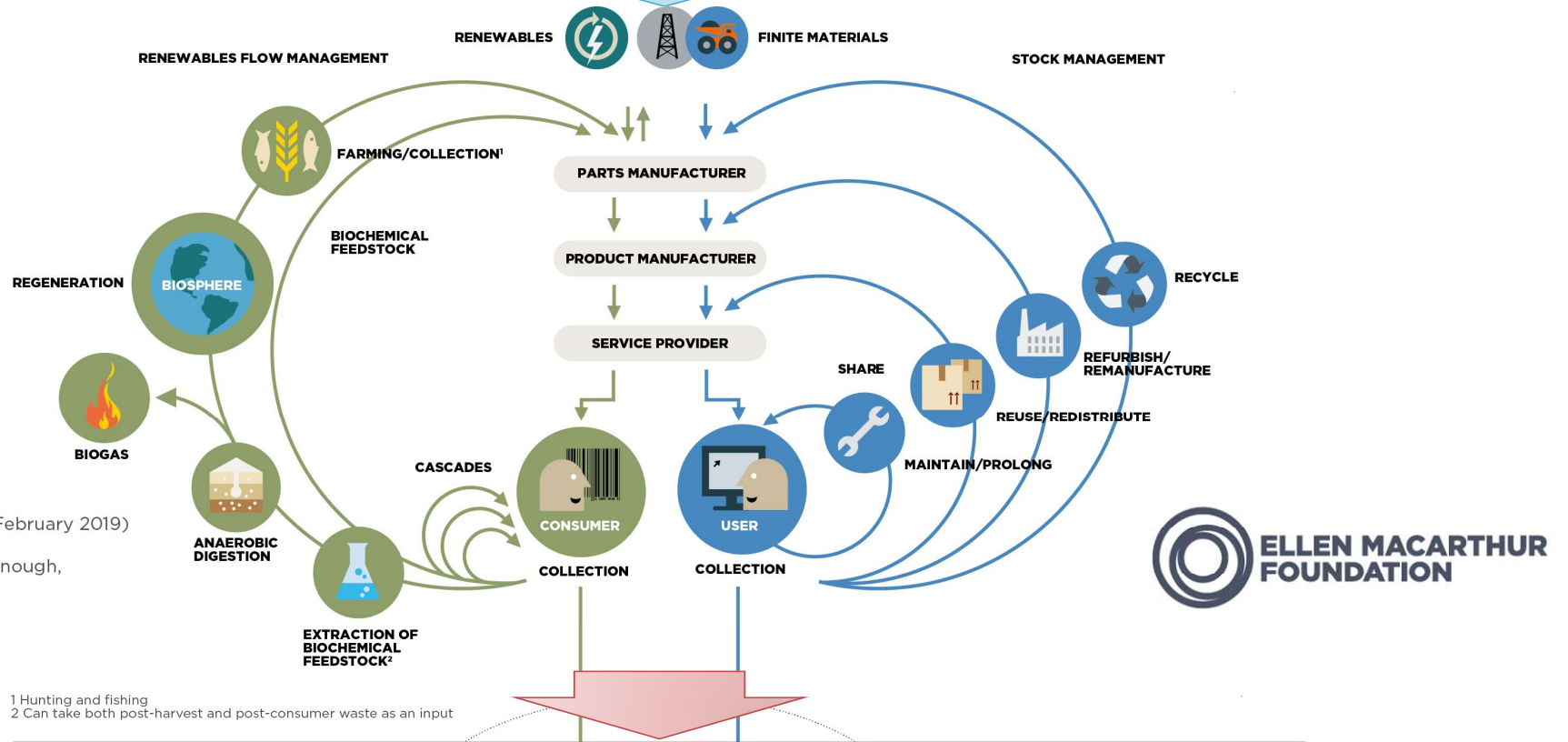
SDS: IEA Sustainable Development Scenario

パリ協定に基づきカーボンニュートラル施策を進めるシナリオ

IEA, World Energy Outlook Special Report, IEA Publications, 2021.

環境・資源制約の中で成長を志向するサーキュラーエコノミー

環境制約(カーボンニュートラル・生物多様性・デュエリジェンス)
 資源制約(資源安全保障・資源ナショナリズム)



SOURCE
 Ellen MacArthur Foundation
 Circular economy systems diagram (February 2019)
 www.ellenmacarthurfoundation.org
 Drawing based on Braungart & McDonough,
 Cradle to Cradle (C2C)

1 Hunting and fishing
 2 Can take both post-harvest and post-consumer waste as input

成長(産業競争力の強化・Well-beingの向上)
 地方創生(雇用の創出・地域経済活性化)



CEの内側のループの効果－自動車の例

自動車の資源循環

図7. 物質効率性戦略を講じる場合と講じない場合のG7諸国、中国およびインドにおける2050年の自動車の全ライフサイクル排出量

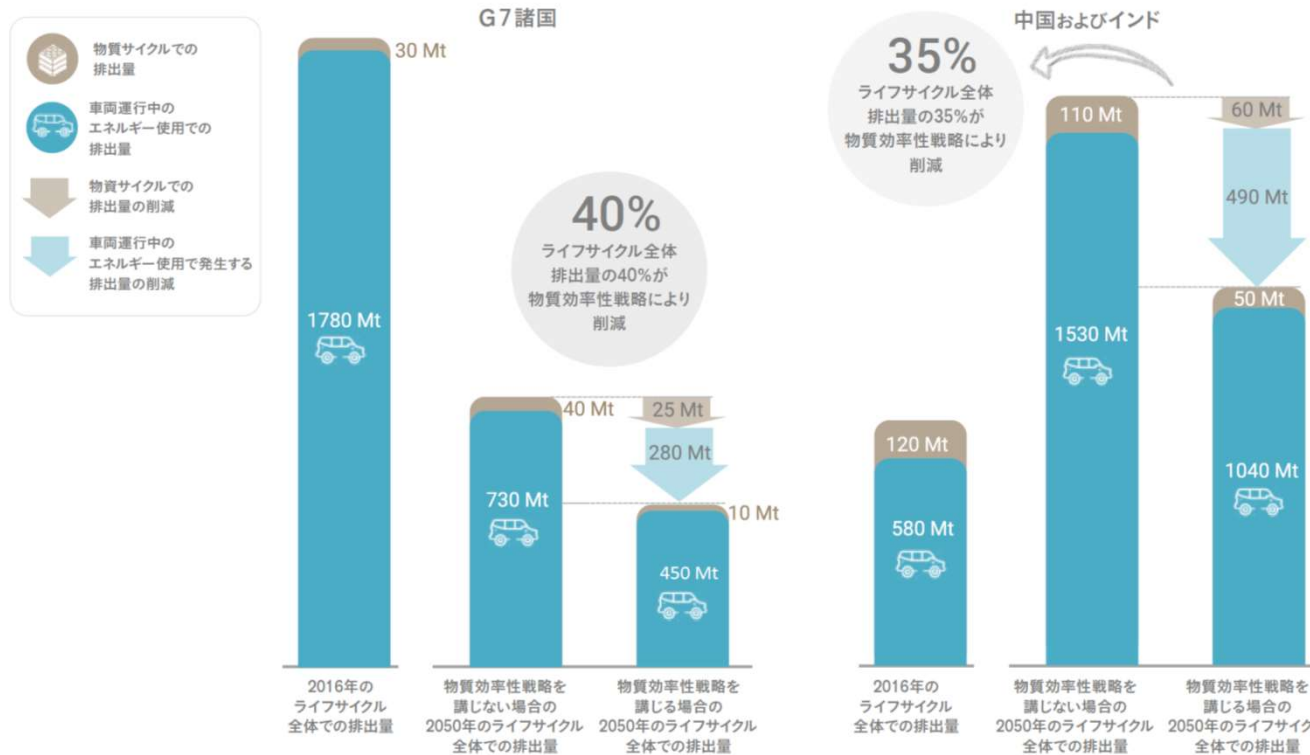
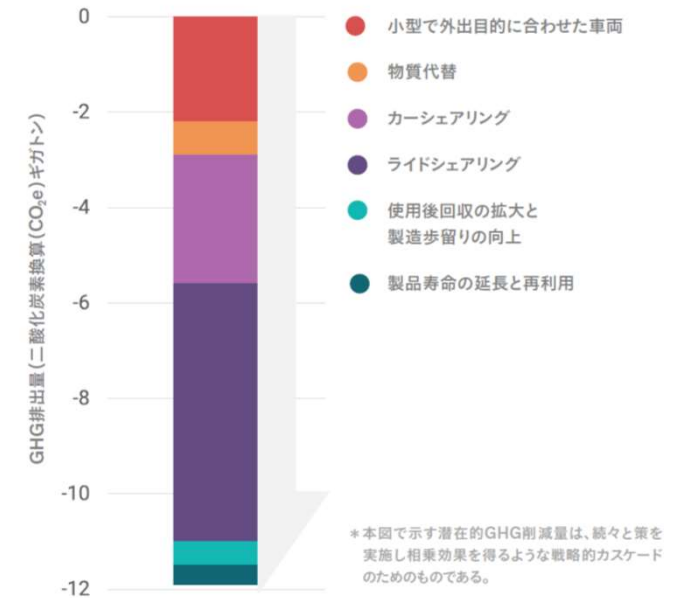


図8. G7における自動車に対する物質効率性戦略による潜在的GHG削減量 (2016年～2060年)



UNEP-IRP: Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future, Report of International Resources Panel (2020).

再生材需要の高まり—EUによる戦略的な規制化

■ EU 電池規制

(2023年7月電池および廃電池に関する規則施行)

- 2031年8月より, 再生Co 16%, 再生Li 6%, 再生Ni 6% 利用

■ EU ELV規制

(2023年7月自動車設計・廃車管理での持続可能性要件に関する規則案)

- 2030年ごろまでに, 再生プラスチック25% 利用

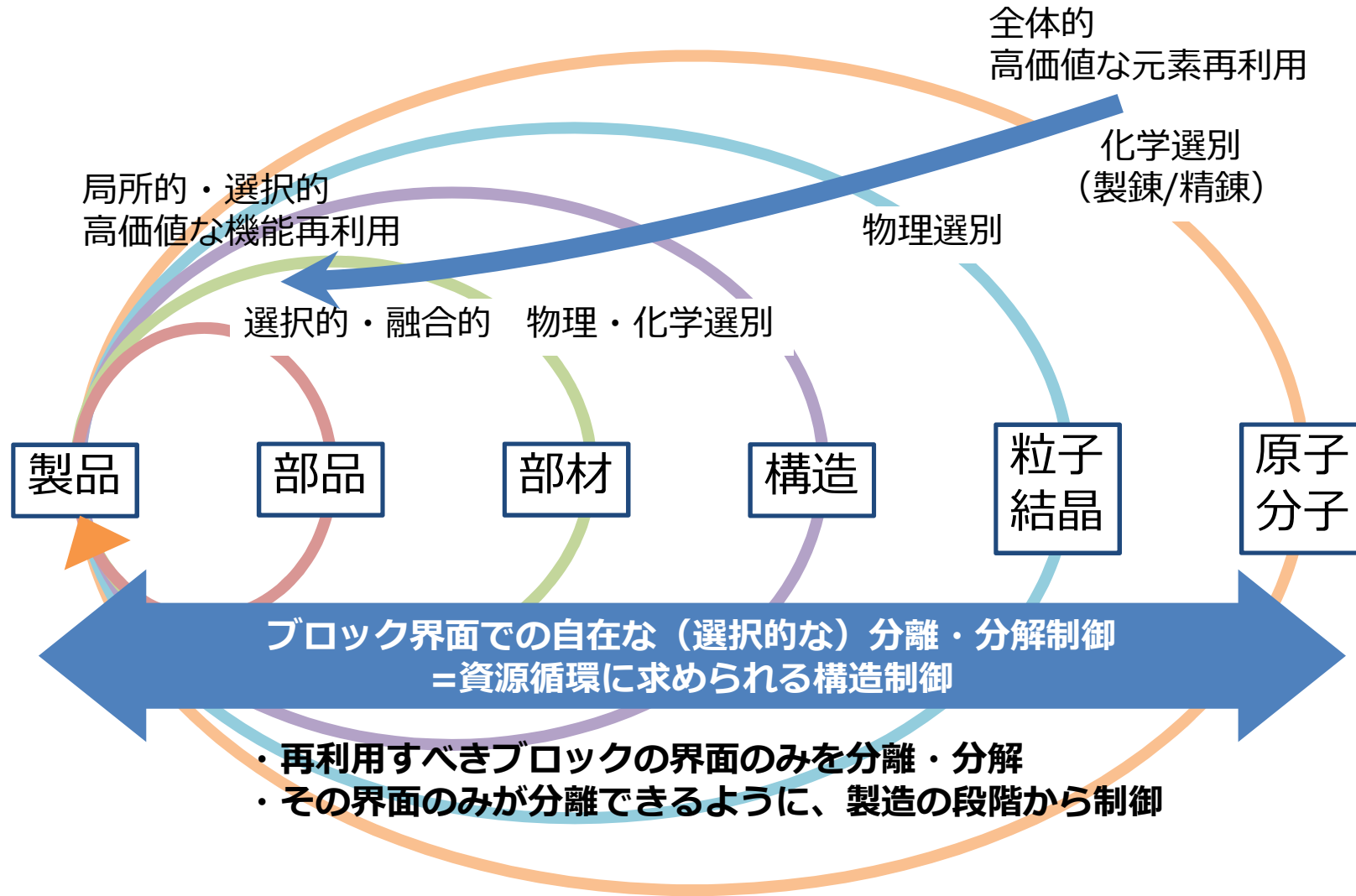
■ EU 容器包装規制

(2022年11月包装材と包装廃棄物に関する規則案)

- 2040年までに, 再生食品トレイ 50%, 再生飲料ボトル65%, その他の再生容器包装65%, 利用

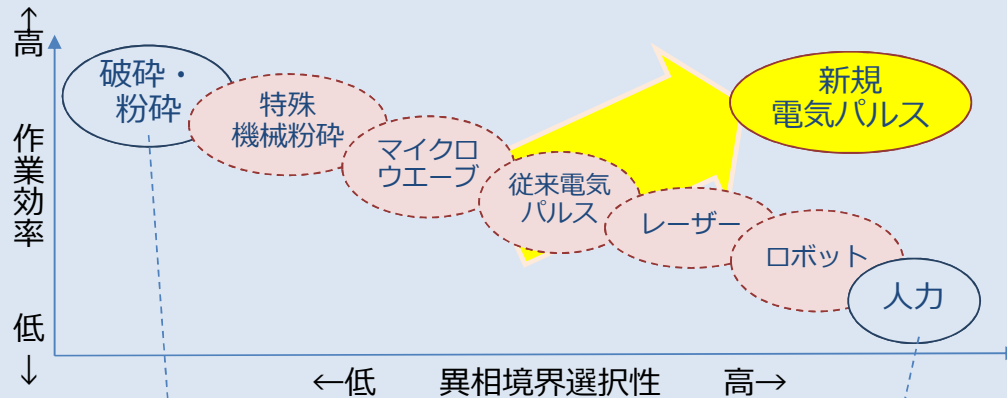
**単なるリサイクルではなく、リソーシング（＝再生材を生み出す）技術とプロセスが必要。
できるだけ内側のループ（製品に近いループ）で機能を循環させると効果的。**

CEの内側のループを創成するための分離技術



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、破碎・粉碎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。

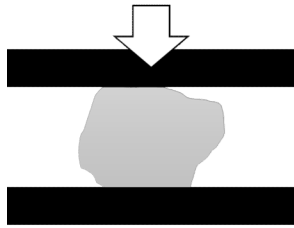


- **破碎・粉碎**：機械的弱部を利用した選択性の低い処理法。
- **人力解体**：リサイクル技術が労働集約的で、高効率化されておらず、大量処理に対応できない。

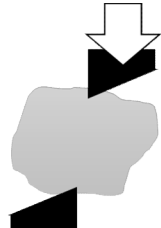
製品から得たい部位を選択的に取り外すことを可能とする
革新的な物理的分離技術の確立



粉碎の種類



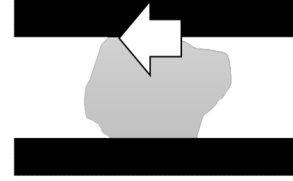
圧縮
(くるみわり)
粗砕・中砕



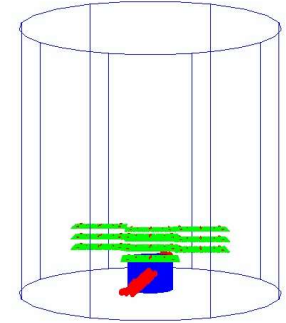
衝撃
(かなづち)
粗砕・中砕・微粉碎



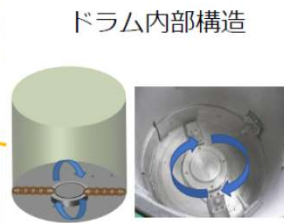
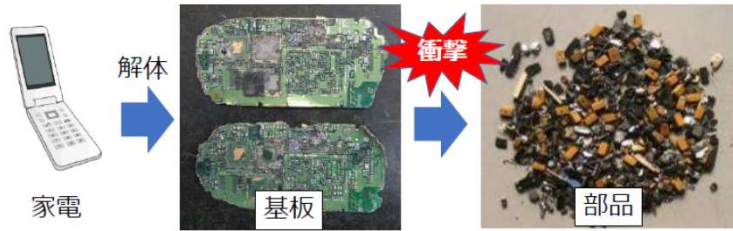
せん断
(はさみ)
中砕・微粉碎



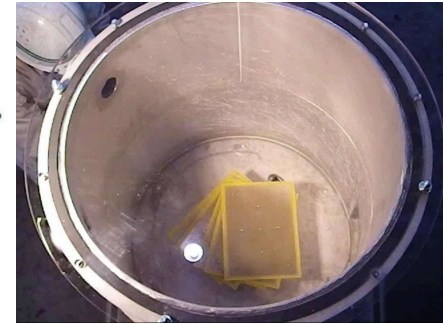
摩擦
(やすり)
微粉碎・超微粉碎



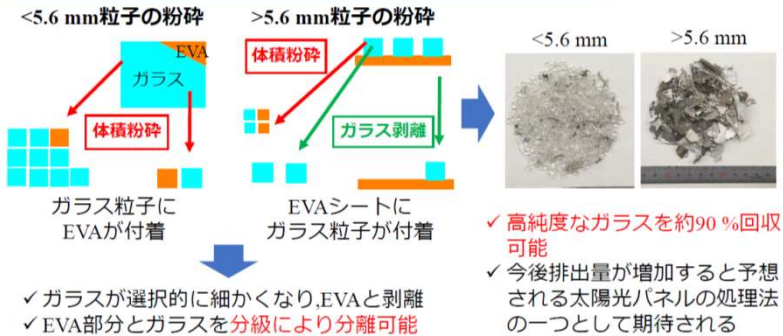
家電由来の基板からの部品剥離



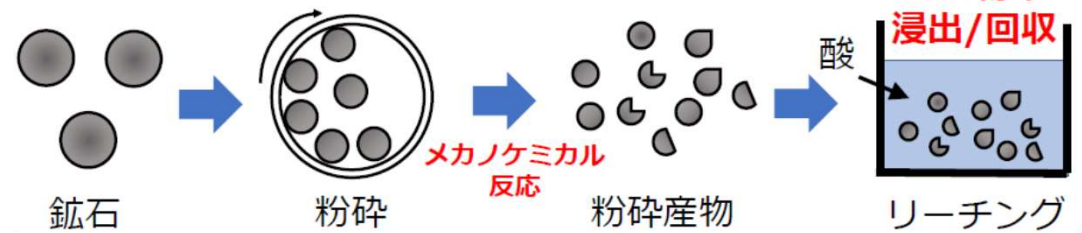
- ✓ ドラム型衝撃破碎機により衝撃を加えることで製品からの基板脱離と部品剥離を達成。
- ✓ 部品は種類によって、比重選別・静電選別・磁選等で選別可能。
- ✓ 部品回収によりタンタル等のレアメタル元素を濃縮可能。



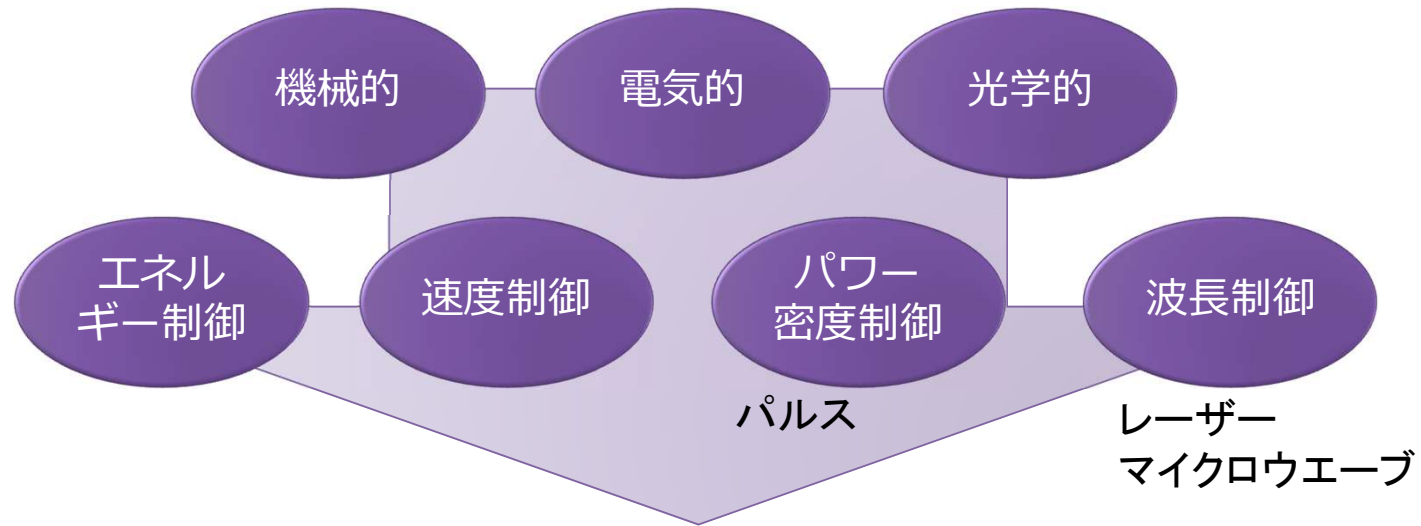
太陽光パネルからのガラス回収のメカニズム



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



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

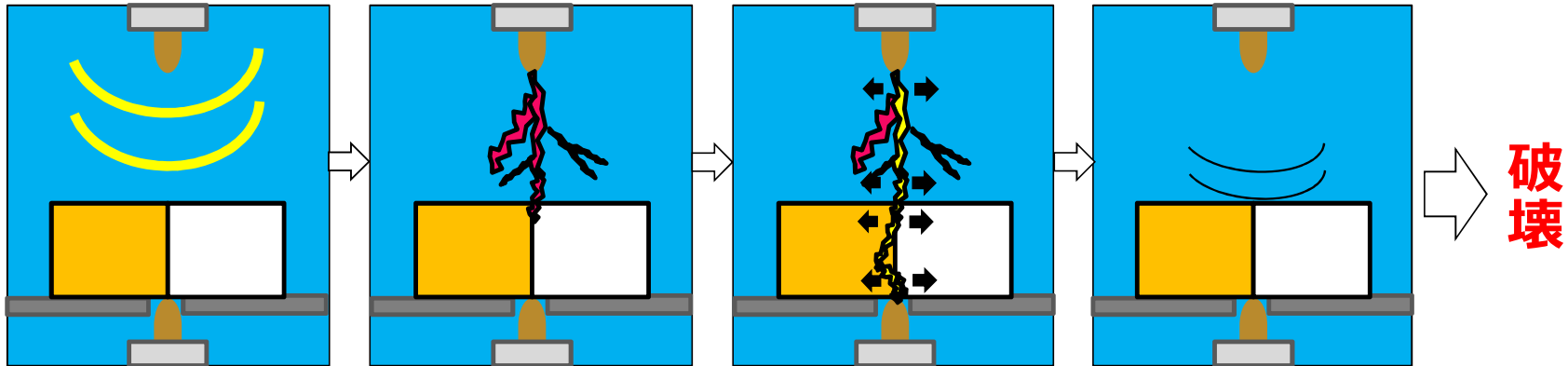
抵抗

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？

電気パルス分解/破碎のメカニズム



試料に高電圧を印加
→電極間に試料を置き、高電圧を印加して強電解をかける。

ストリーマ放電の発生
→強電解によって、ストリーマと呼ばれるプラズマ柱が発生する。電気力線に沿って陰極に進展していく。陰極に到達すると、絶縁破壊を引き起こす。

アーク放電に伴うマイクロ爆発の発生
→到達したストリーマ経路にアーク放電が生じる。アーク放電によって生じたジュール熱による昇華で、電流付近にマイクロ爆発が発生し、界面での引っ張り力が粉碎に寄与する。

水の衝撃波の発生
→アーク放電による水中でのマイクロ爆発によって、衝撃波が発生。試料に衝突し、圧縮力として粉碎に寄与する。

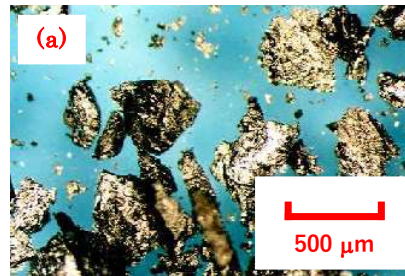
破壊



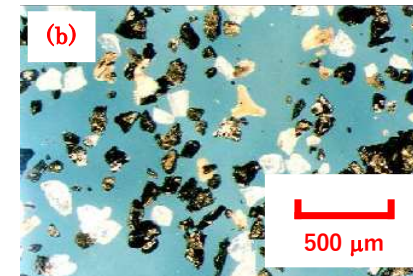
製造：SEIFRAG AG
輸入販売：
ハルツォク・ジャパン



10t/hの連続機

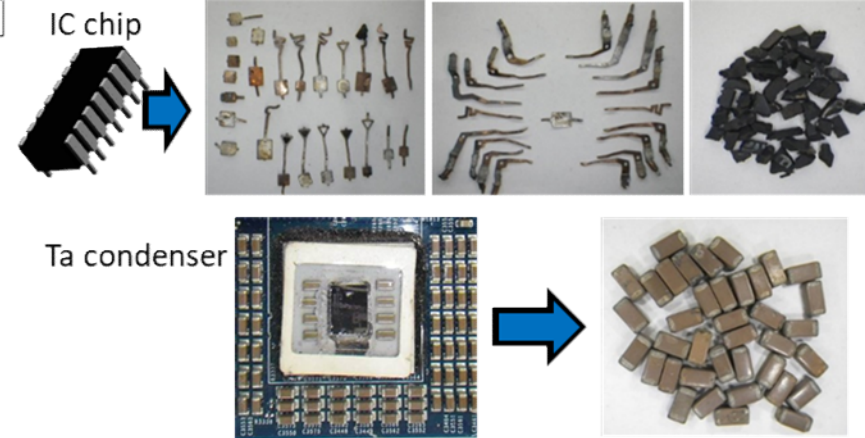
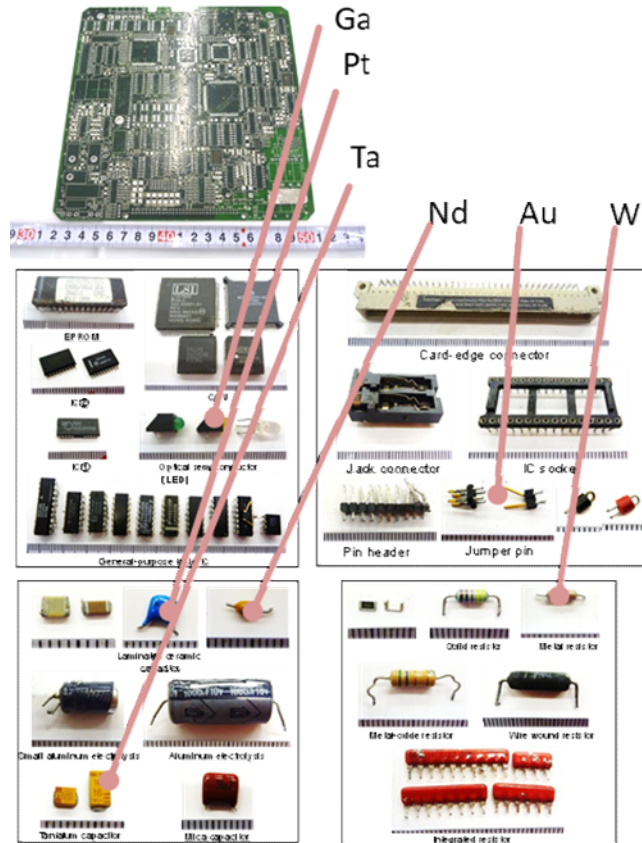


石炭
(a)ジョークラッシャー粉碎



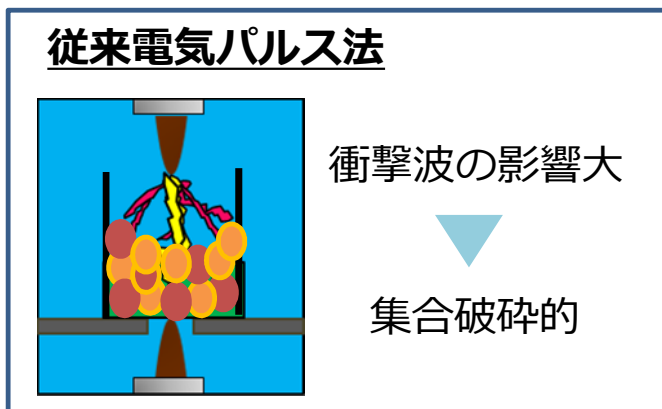
(b)電気パルス粉碎

従来電気パルスの効果



既存法から新規電気パルス法へ

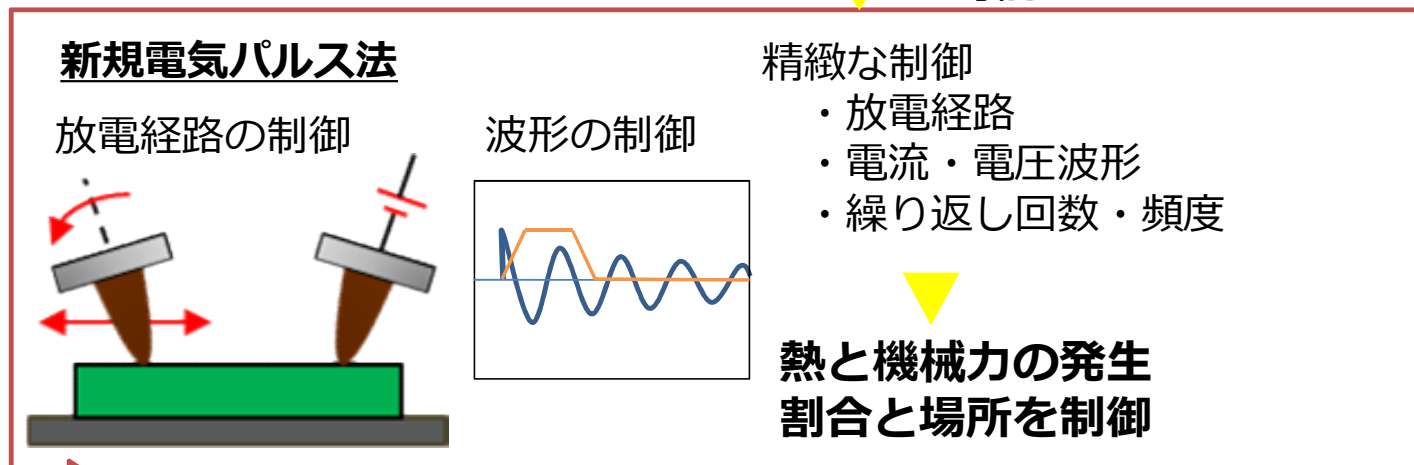
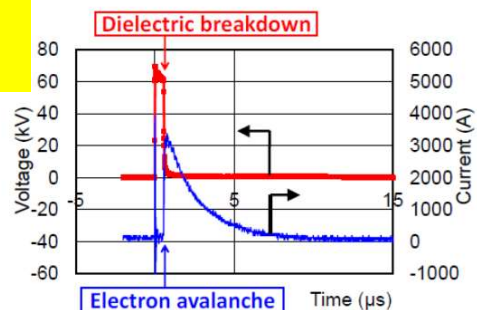
新規電気パルス法による高選択性・高効率な部品・素材分離



衝撃波だけでなく、
大電流やプラズマ
化の機能も最大限
活用

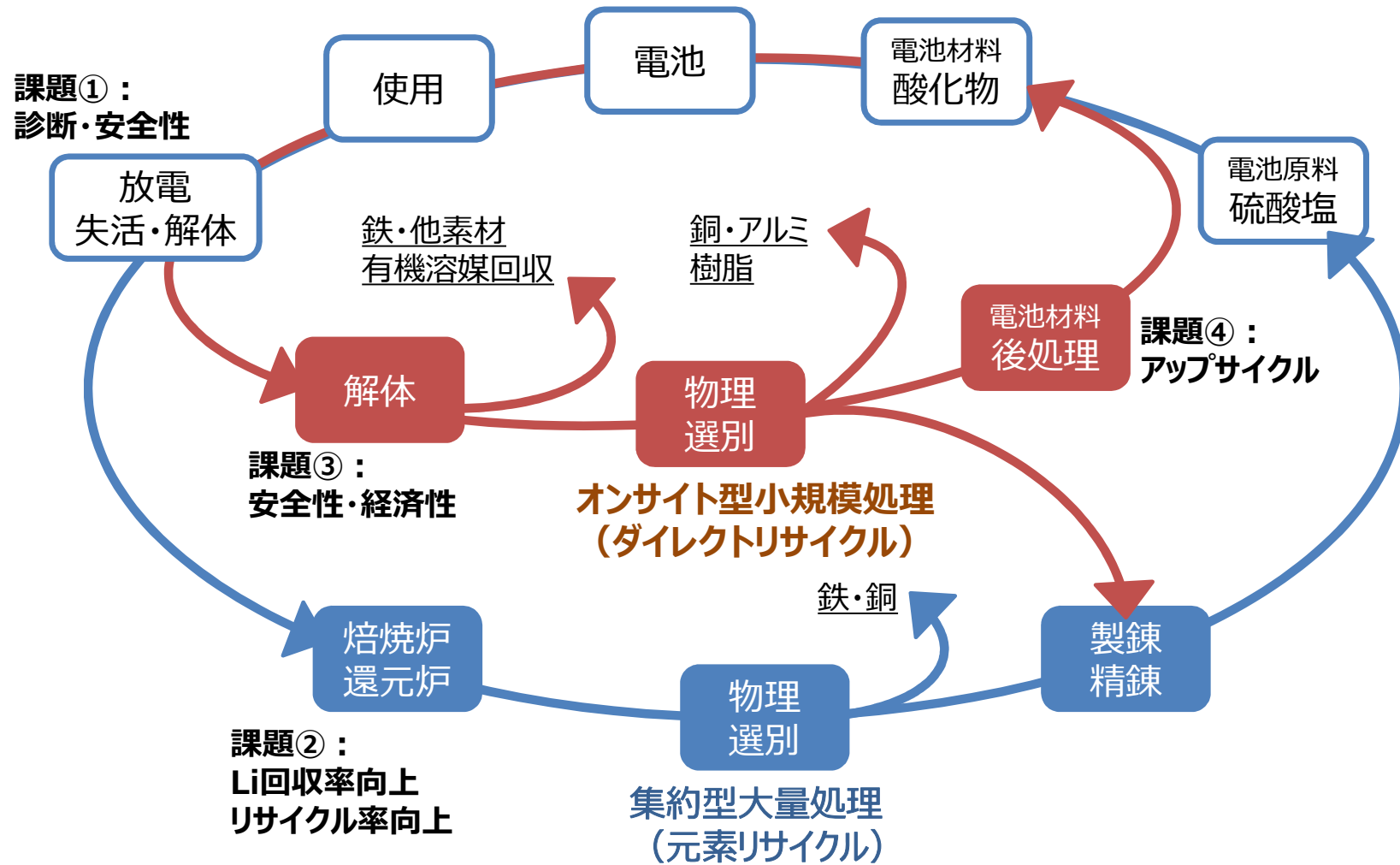
選択的な加熱
選択的な反応
選択的な剥離
選択的な破壊

を可能に



▶ 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

リソーシング技術開発ーリチウムイオン電池の例



LiB正極材の選択的な電気的分離



液系LiBセル



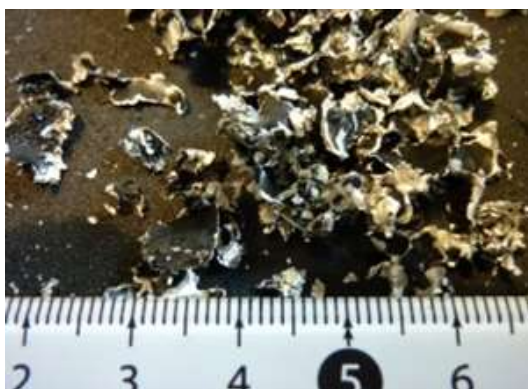
正極材捲回体



機械的分離

従来の電気的分離

→箔状材料に対する選択的分離は困難



新規電気パルス法*

→Al集電箔への電気パルス照射

ジュール熱による界面加熱

+表皮効果による界面への集中

+選択的プラズマ化による界面膨張

+ローレンツ力によるAl箔の伸縮



Al集電箔

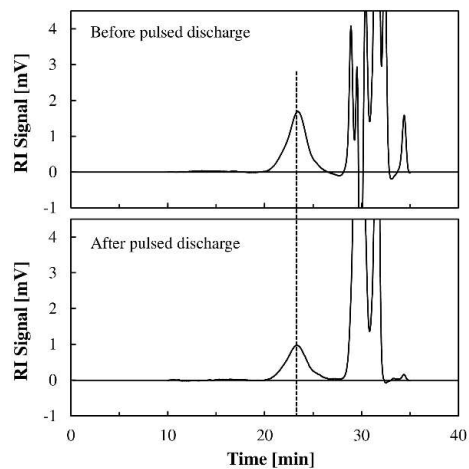
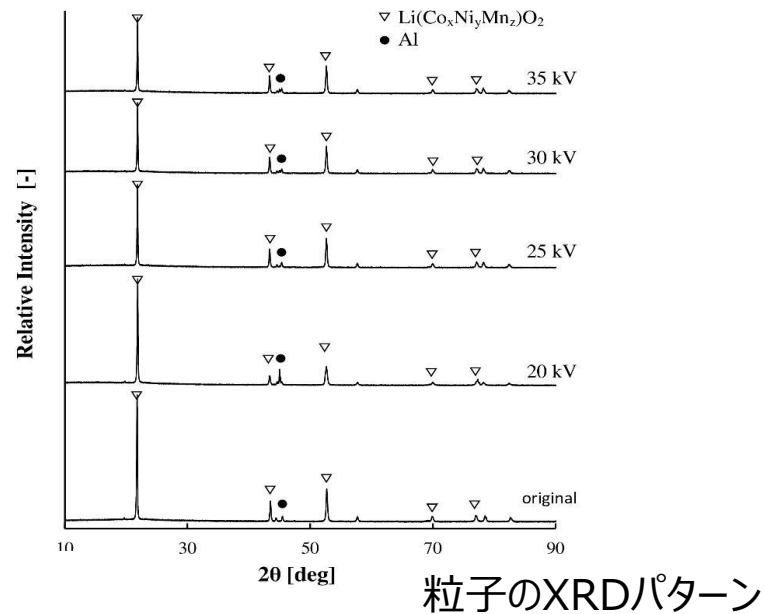
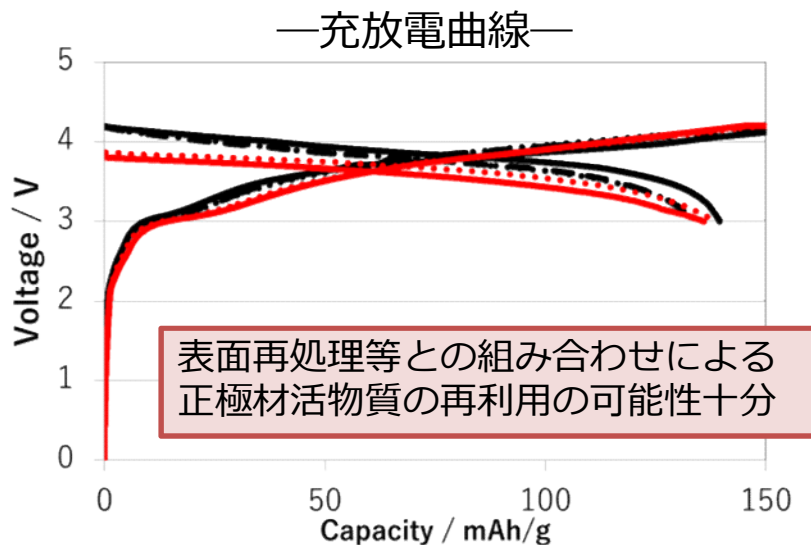


正極活物質粒子層

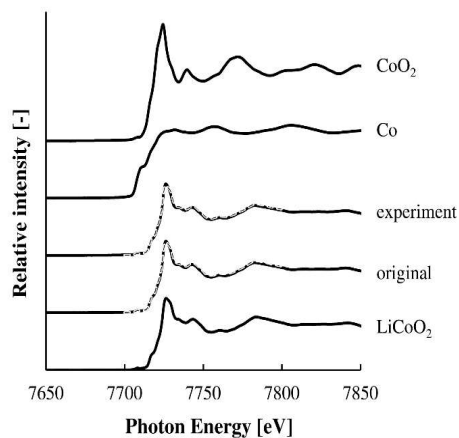
*JST未来社会創造事業JPMJMI19C7「製品ライフサイクル管理とそれを支える革新的解体技術開発による統合循環生産システムの構築」



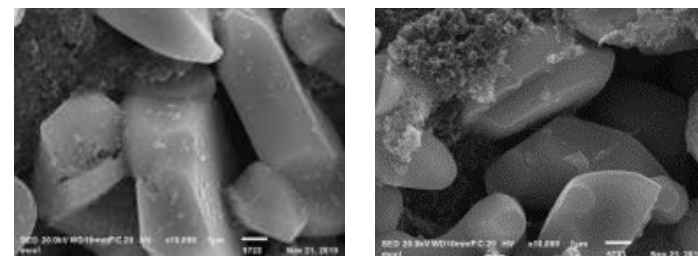
分離後の正極活物質粒子の特性



バインダーのGPC分析

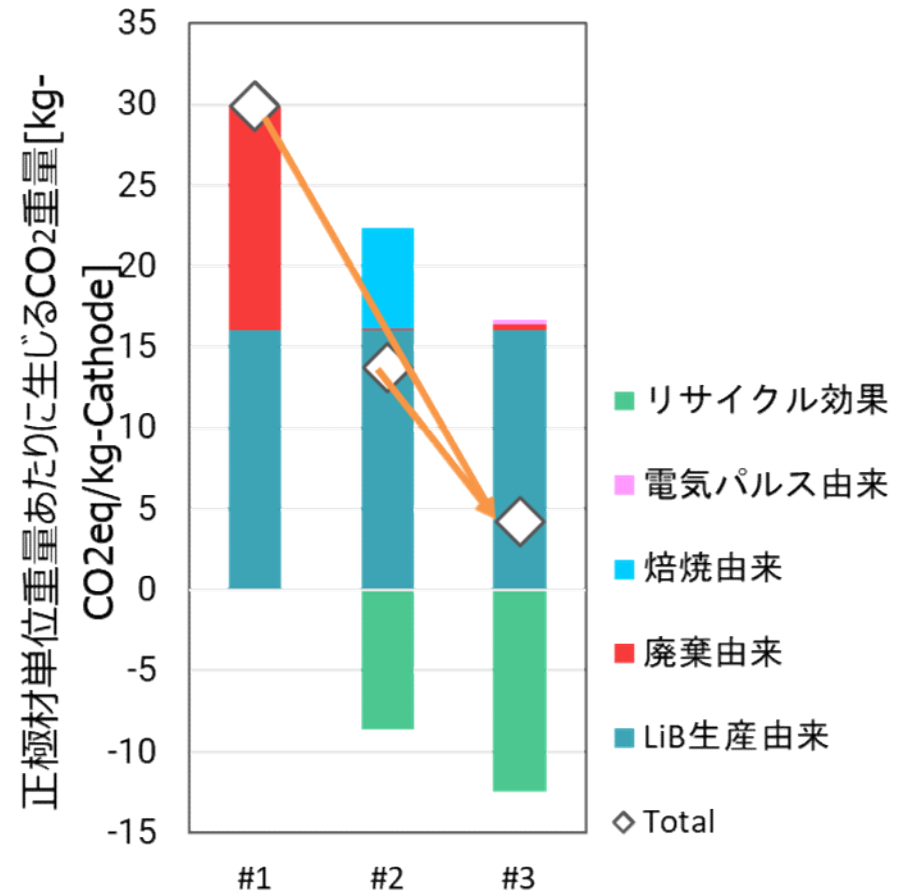
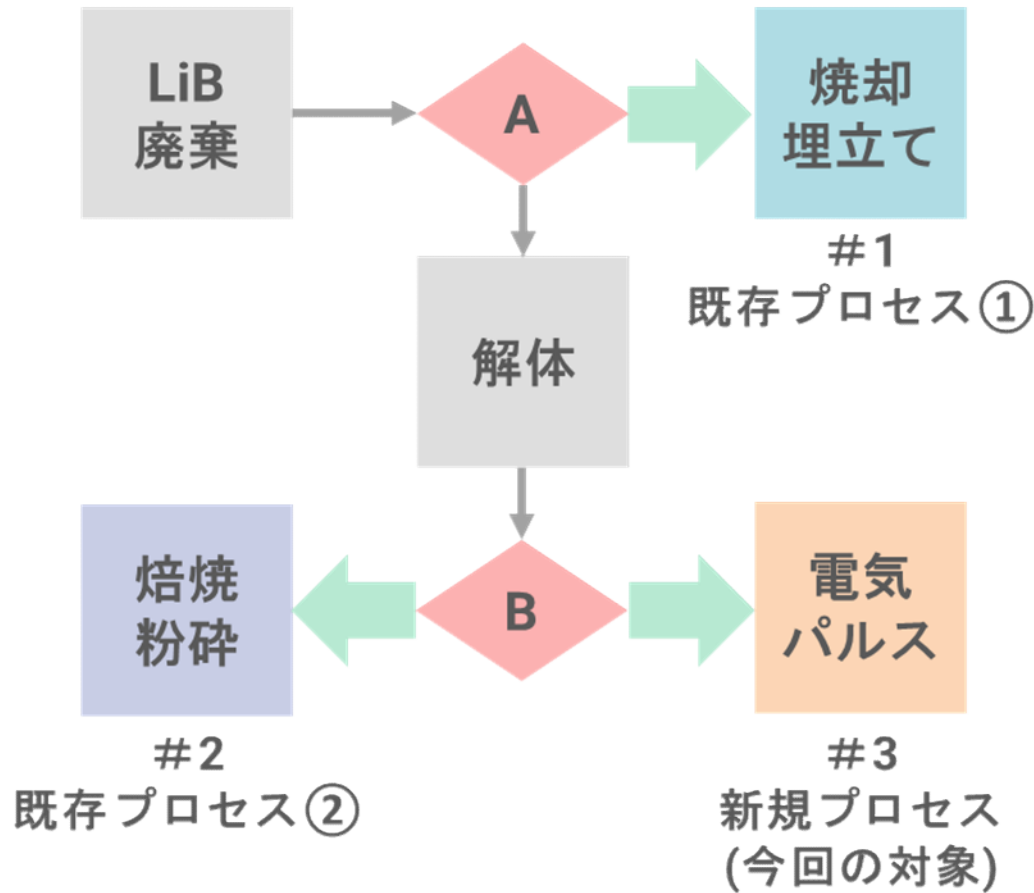


粒子のXAFSパターン



SEM像による粒子観察

LCAによる新リソーシング技術評価

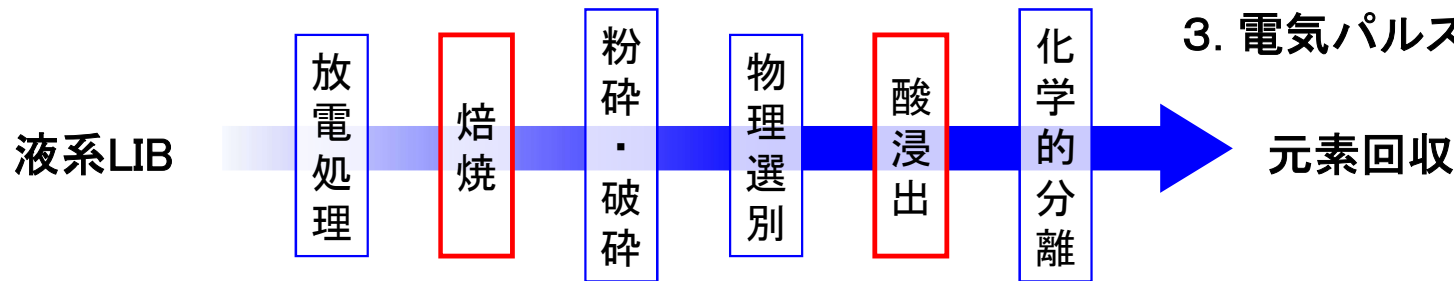


既存プロセスより#3(新規電気パルス法)がLCAから優位だと示された

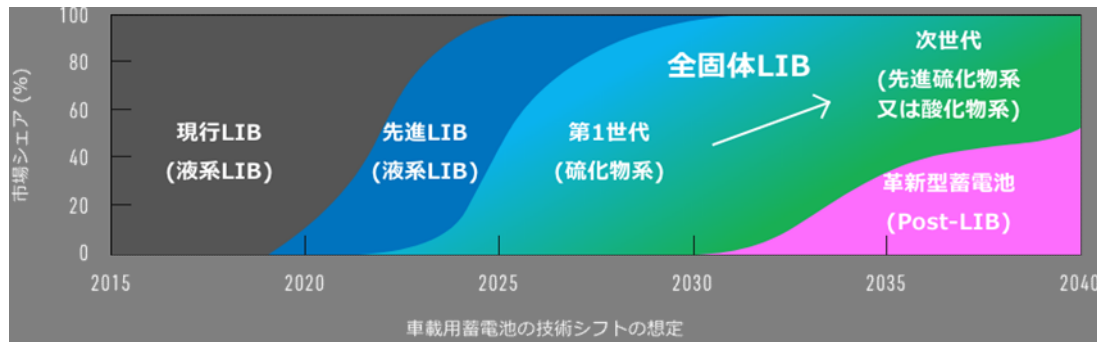
* Kikuchi, Y., et al. (2021). よりデータを再構成

全固体電池のリサイクルプロセス検討 (製品化前からリサイクルプロセスを検討した初の例)

液系LIBリサイクルで想定されるプロセス



1. 焙焼条件の検討
2. 金属の酸抽出条件の検討
3. 電気パルス法による活物質分離に関する検討



LIBTECホームページより
<https://www.libtec.or.jp/consignment-business/2nd-term/>

エネルギー密度
 $ED_{Al} = 1.10 \text{ J/mm}^3$
 充電電圧17.7 kV
 推定Al箔温度：484 °C
 推定SUS箔温度：29 °C

<電気パルス後>

Al箔

正極層+SE層+負極層+SUS箔

正極塗工膜(Al箔)が正極層から界面剥離

エネルギー密度
 $ED_{SUS} = 3.96 \text{ J/mm}^3$
 充電電圧6.30 kV
 推定SUS箔温度：867 °C

<電気パルス後>

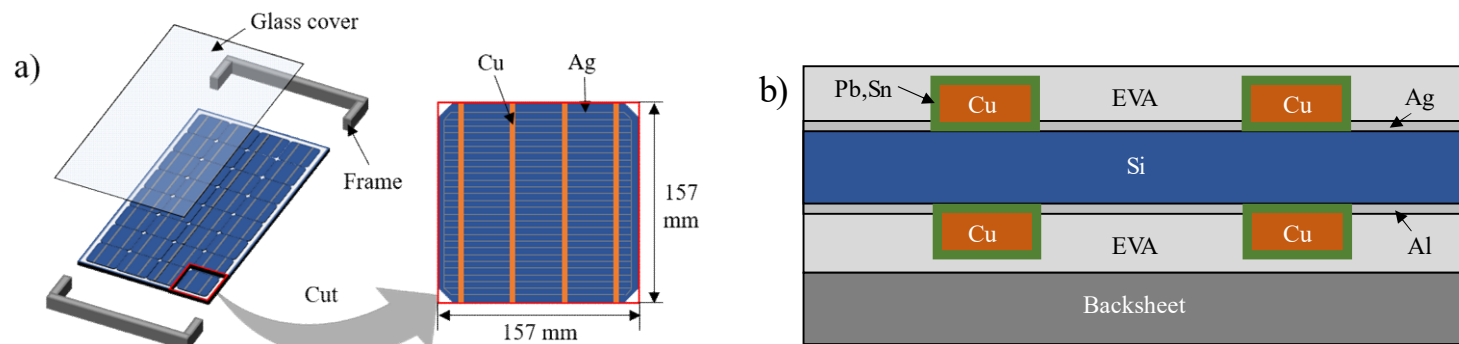
SUS箔

正極層+SE層+負極層

負極塗工膜(SUS箔)が負極層から界面剥離

太陽光パネルリサイクル技術の概要

シリコン系のほかに、化合物系(CIS系、CIGS系、CdTe系)、有機物系

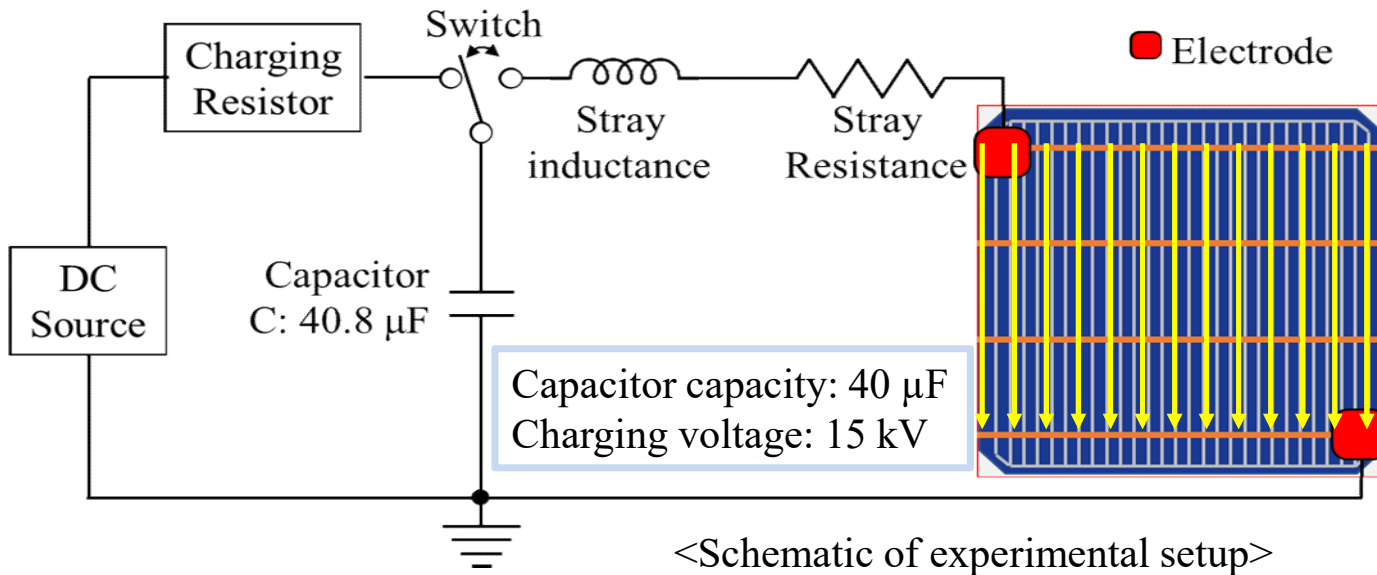
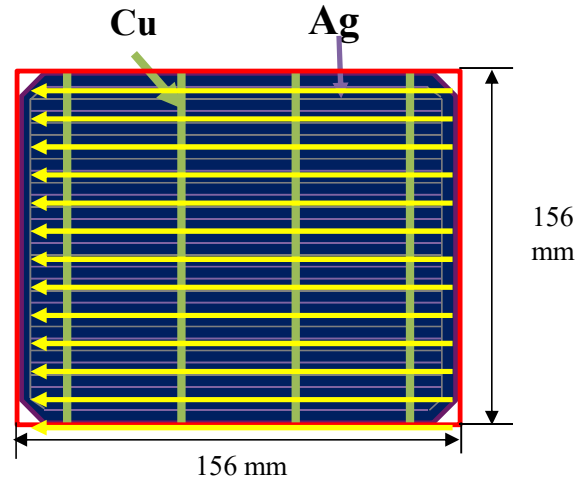
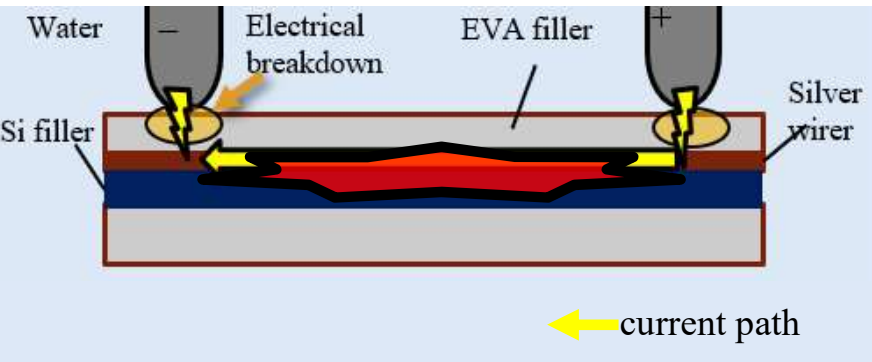


成分例 (wt%)

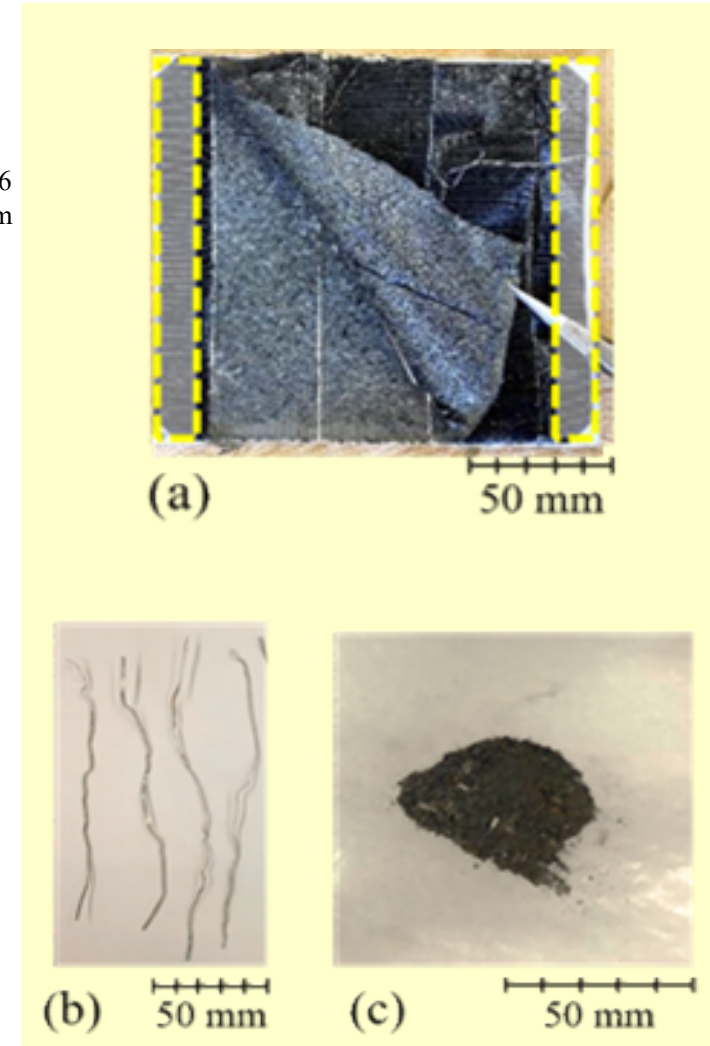
C	Si	Na	Mg	Al	Ca	Cu	Ag	O	Others
2.40	42.22	7.29	1.42	1.68	13.82	0.70	0.028	28.15	2.29

プロセス	単位操作	長所	短所
選別系	破碎・物理選別	大量処理 低コスト	低精度
解体系	機械的解体 (ホットナイフ, 削り出し)	高精度	低処理量
化学系	加熱・加圧・浸出	高精度	高コスト

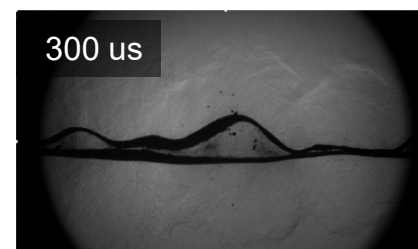
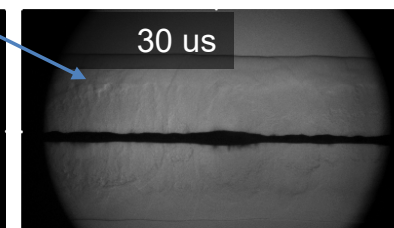
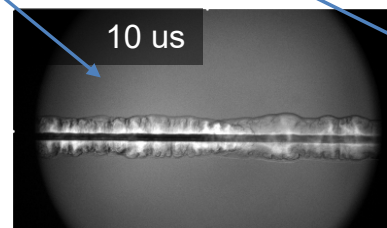
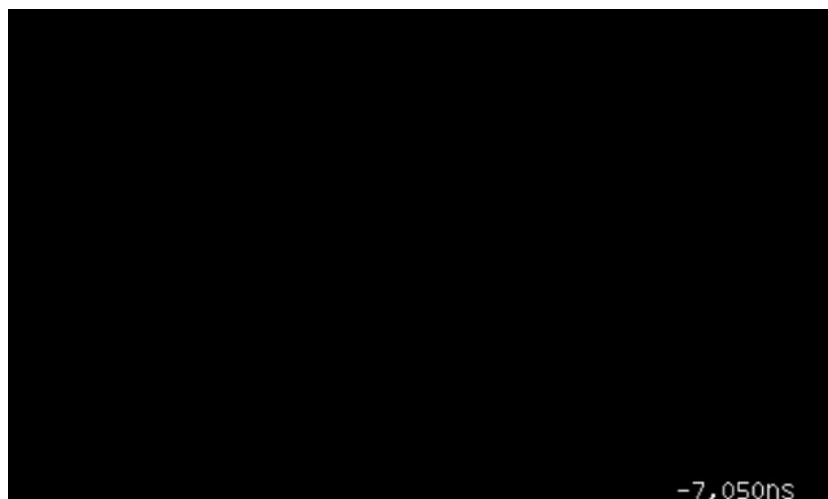
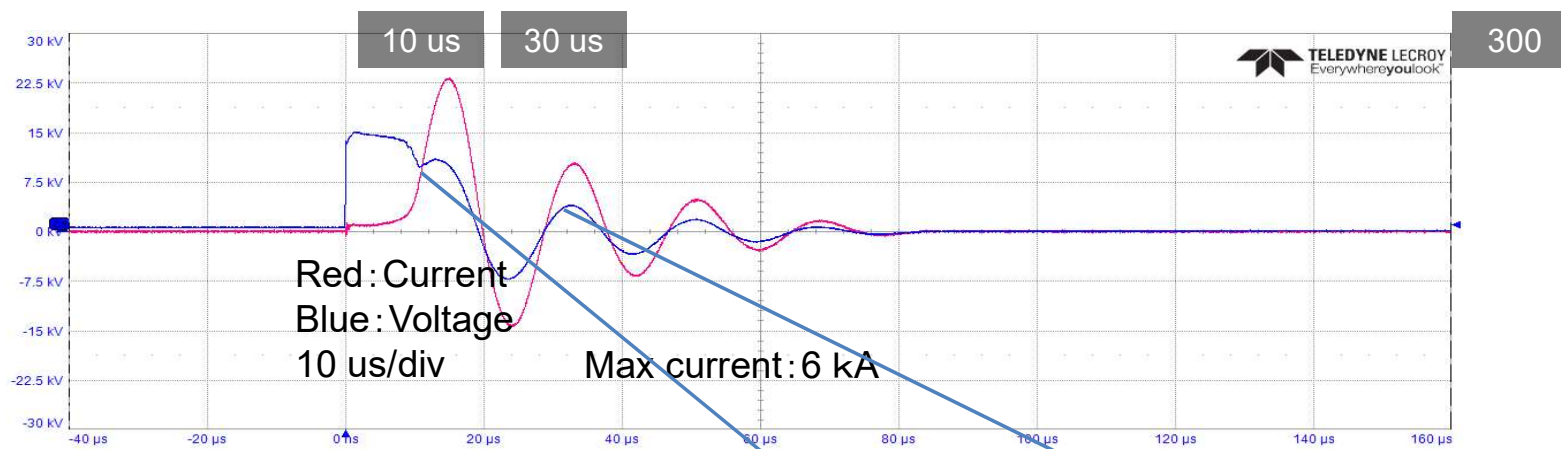
太陽光パネルセルシートへの電気パルス印加方法と分離の様子



<Schematic of experimental setup>



電気パルス放電現象の観察



CFRPと鋼板の積層体分離への電気パルスの適用

自動車車体の
マルチマテリアル



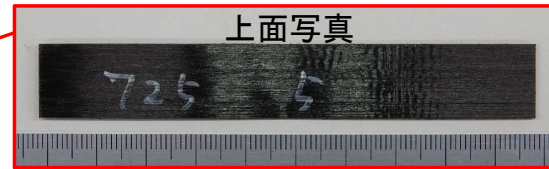
<https://www.lexus.com/bh/lexus-lc-performance-multi-material-body>

風力発電用の
風車ブレード



<https://www.adeka.co.jp/develop/laboratory/polymer/>

積層体(鋼板の上にCFRPが積層) ADEKA殿提供

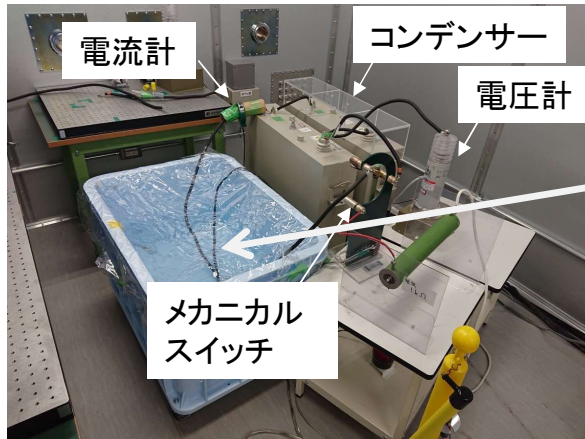


CFRP: 0.3 mm
鋼板: 1.0 mm

電気パルス試験

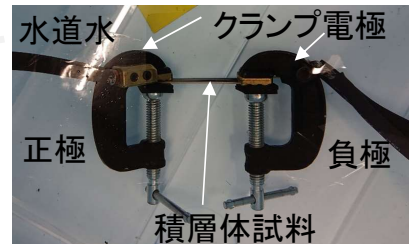
目的: 電気パルスにより鋼板とCFRPの界面での分離

電気パルス条件 周囲: 水中, コンデンサー容量: 40 μ F, 充電電圧: 10 kV

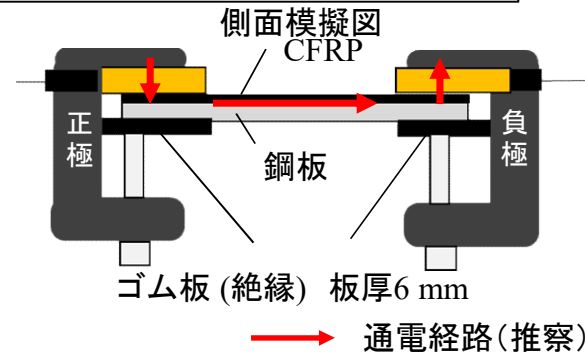


電気パルス試験の様子

CFRP表面のみに電極を接触
→ CFRPと鋼板の界面に通電(通電制御)

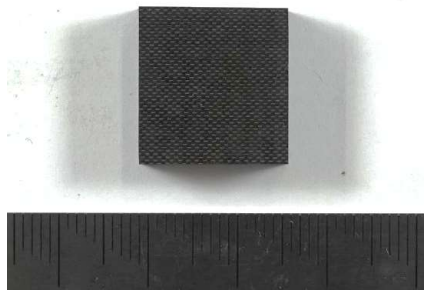


クランプ型電極に
設置された積層体試料

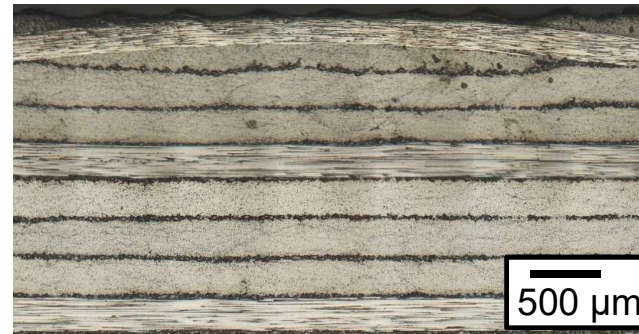


電気パルスによるCFRP積層体解体

CFRP積層体試料

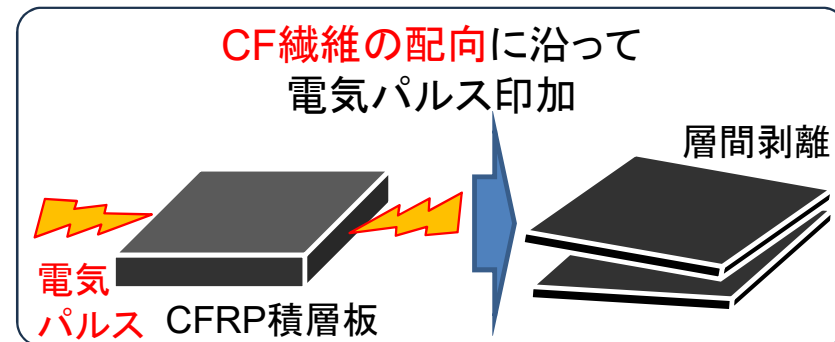
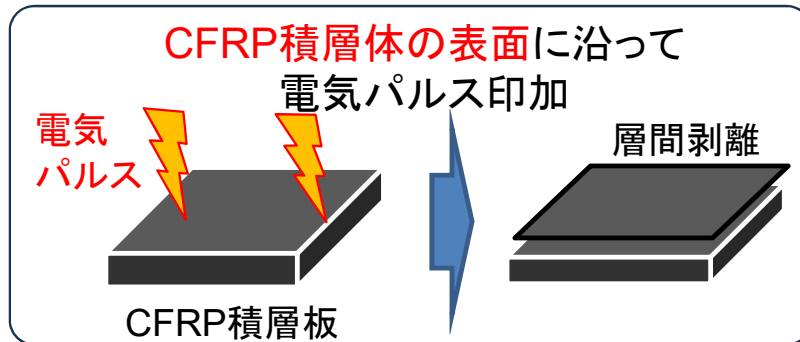


◆ 試料側面顕微鏡写真(倍率200倍)



← 平織
← 0° 方向(奥行方向)
← 45° 方向
← 90° 方向(横手方向)
← 45° 方向

表面の1層目は繊維が平織されており、
2層目からは繊維の並ぶ角度が45° ずつ変化



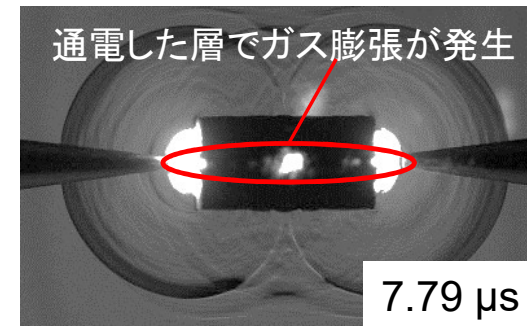
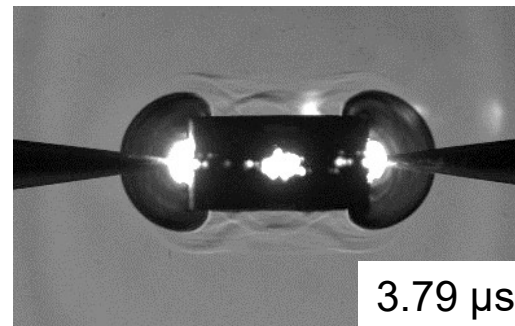
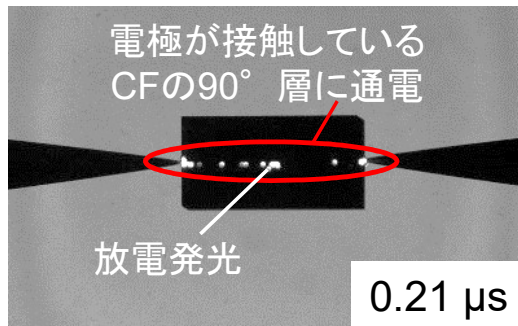
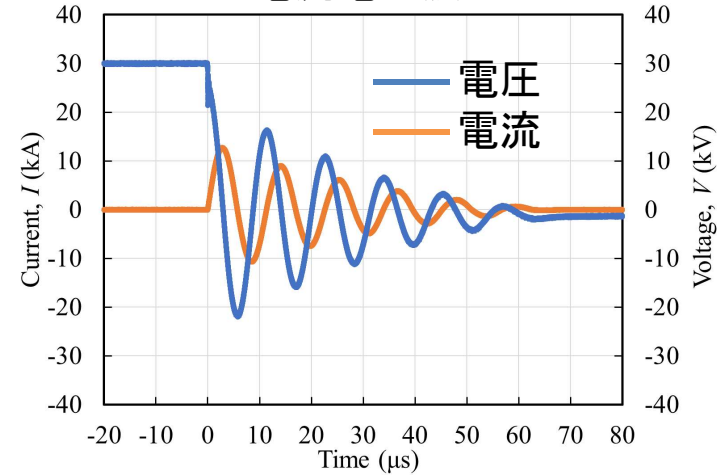
- ✓ 電気パルスを用いたCFRP積層板の層間剥離による強度の弱体化
- ✓ (曲げ試験を実施中) 弱体化指標としての曲げ強度のエネルギー依存性データの把握

CFRP積層体ブロックへの電気パルス印加高速ビデオカメラによる可視化

撮影間隔1 μs , $C=0.8 \mu\text{F}$, $V_c=30 \text{ kV}$



電流電圧波形



電極を接触させた90°層へ通電し、炭素繊維でジュール発熱が発生することで樹脂が温度上昇し、気化・膨張したことで層間剥離が発生したと考えられる

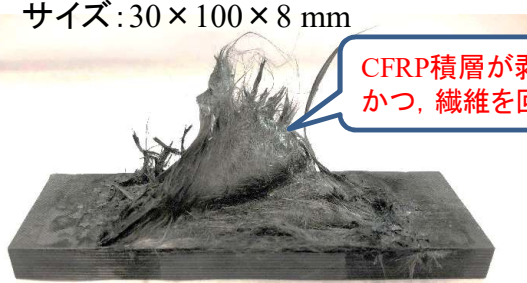
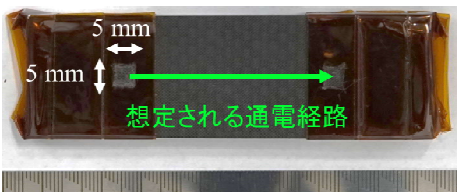
CFRP積層体からの繊維剥離

＜電気パルス前＞

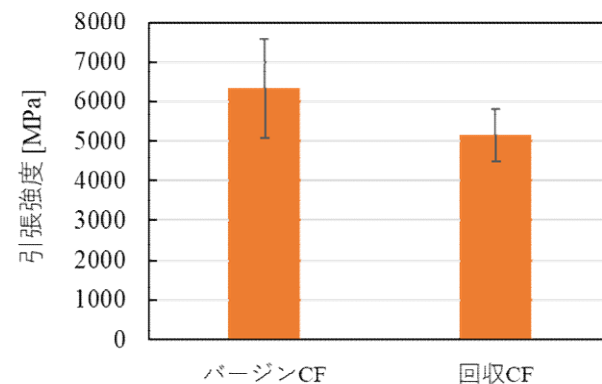
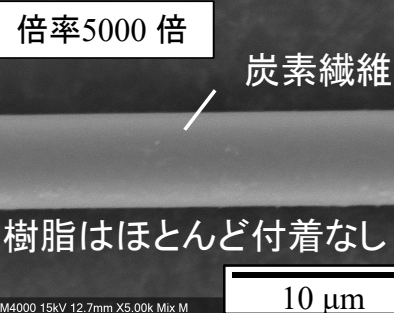
＜電気パルス後＞

サイズ: 30×100×8 mm

CFRP積層が剥離、
かつ、繊維を回収



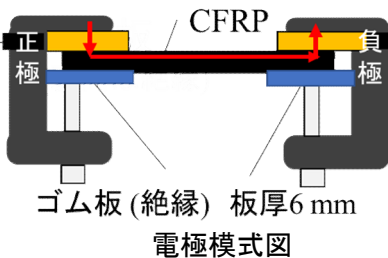
回収繊維のSEM観察



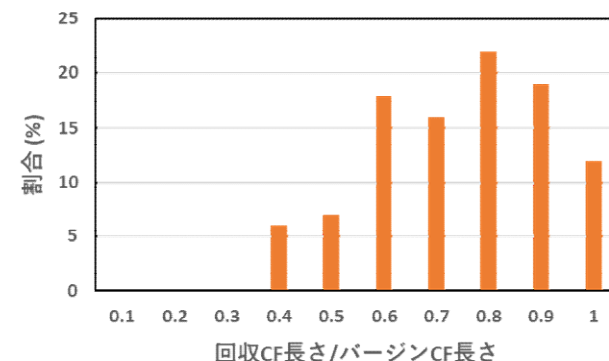
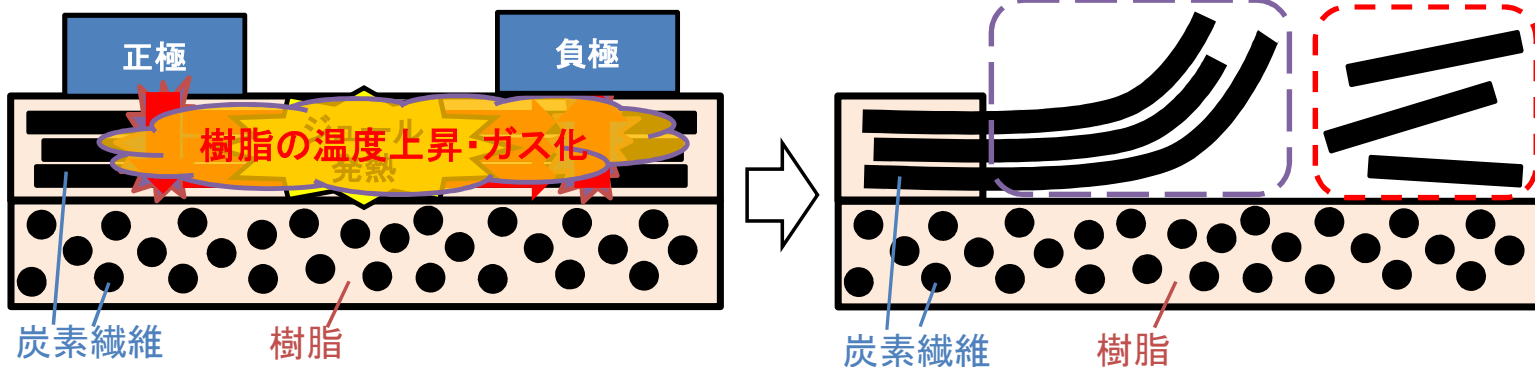
回収CFの強度: バージンCFの80%以上を維持 (熱分解では50%程度まで減少)

＜想定剥離機構＞

電気パルス時の接着剤の熱膨張 (ガス膨張) により層剥離

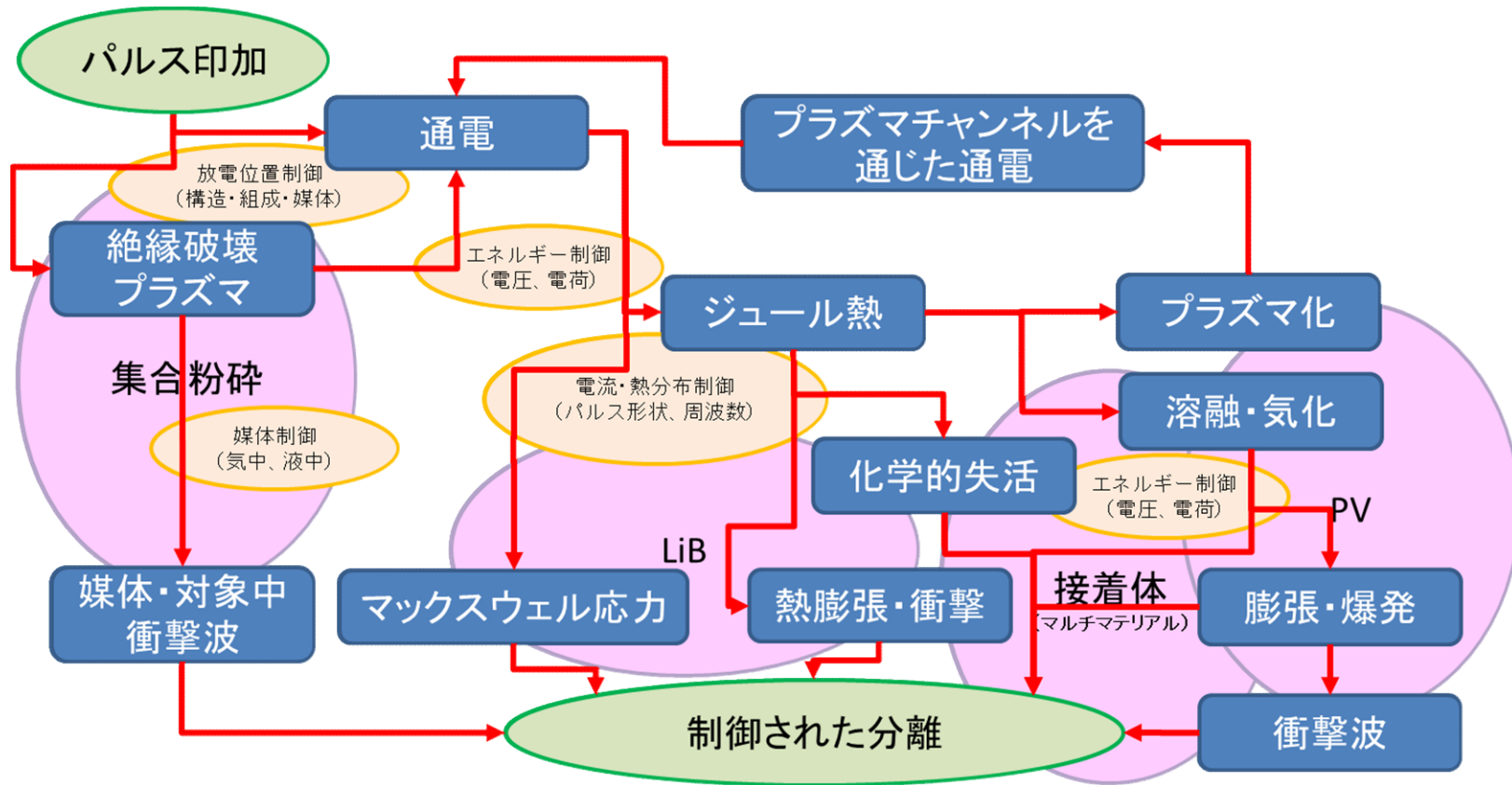


電気パルスによるCFRP層間剥離の推定メカニズム



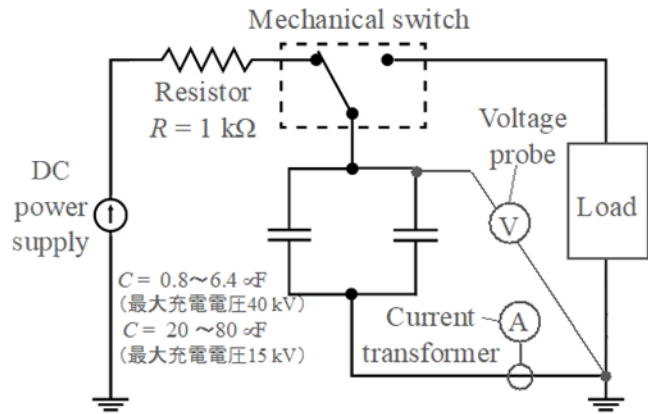
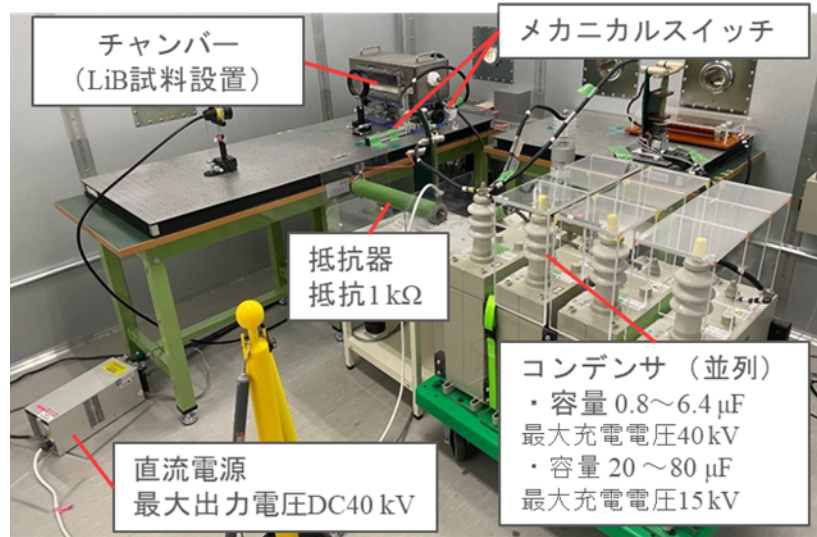
回収CFの長さ: 半数以上がバージンCFの長さの80%以上を維持

電気パルス刺激による分離現象への寄与

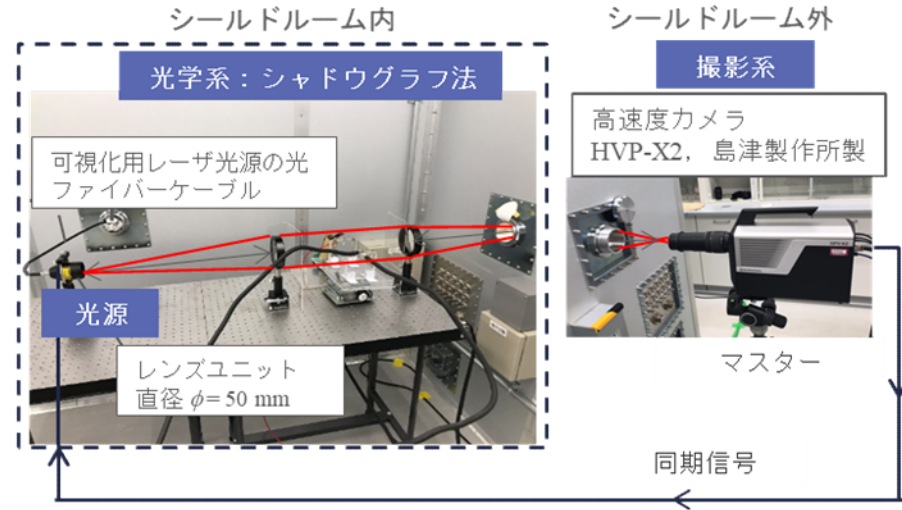


新規電気パルス法の技術開発

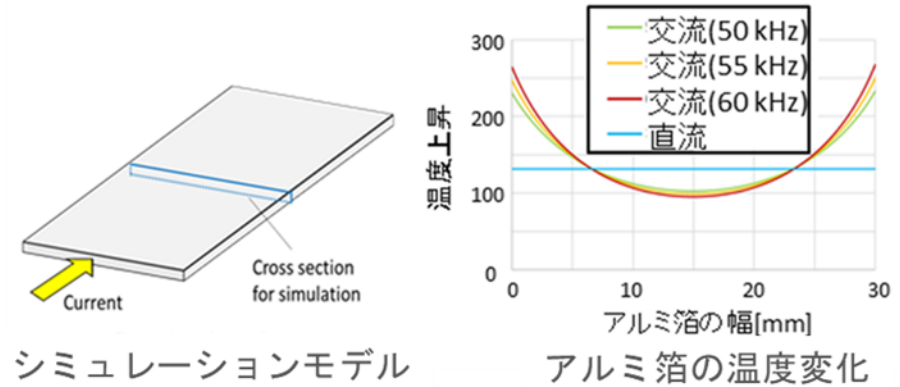
電気パルス装置の外観・回路図



光学的可視化手法



電磁界シミュレーションによる評価

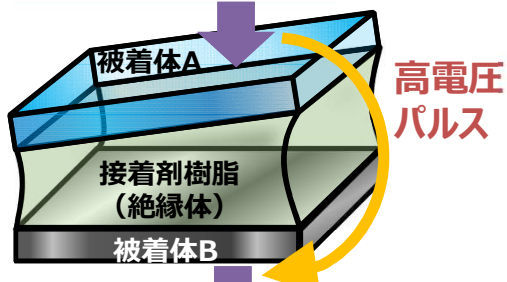


電気パルス外部刺激による接着易分解設計

市販エポキシ系接着剤 (自動車構造材用)

接着剤抵抗 $> 3 \text{ M}\Omega$

- 接着力 ($> 30 \text{ MPa}$)
- ✕易分解性

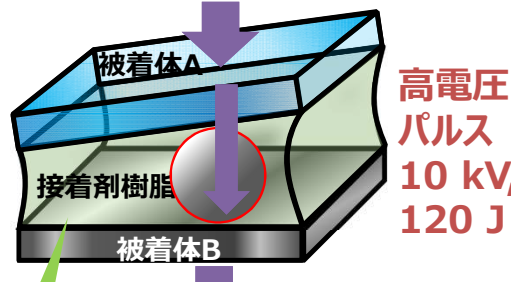


絶縁耐力：樹脂内 $>$ 空气中
沿面放電が起こり分離せず

市販エポキシ系接着剤に 300 μm 金属球添加

接着剤抵抗 $< 50 \Omega$

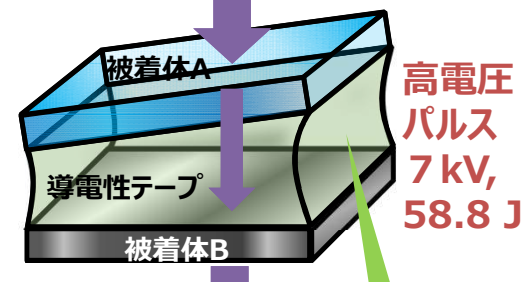
- ▲接着力 (16 MPa)
- 易分解性



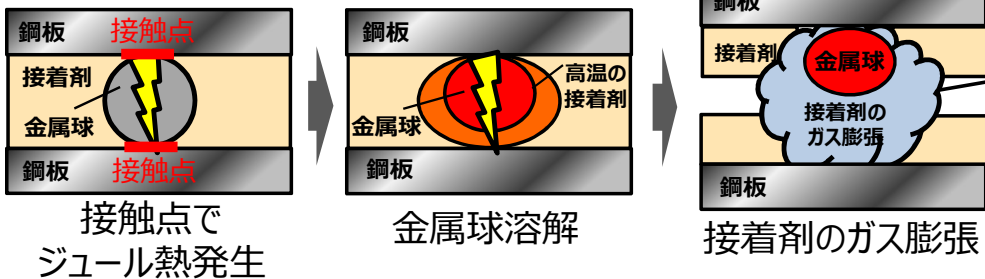
接着層内で放電
接触点接着層のプラズマ化 \rightarrow ガス膨張によって分離

市販導電性接着テープ 接着テープ抵抗 0.042Ω

- ▲接着力 (2 MPa)
- 易分解性

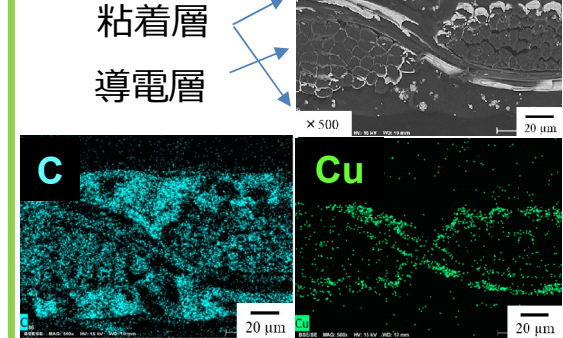


剥離メカニズム



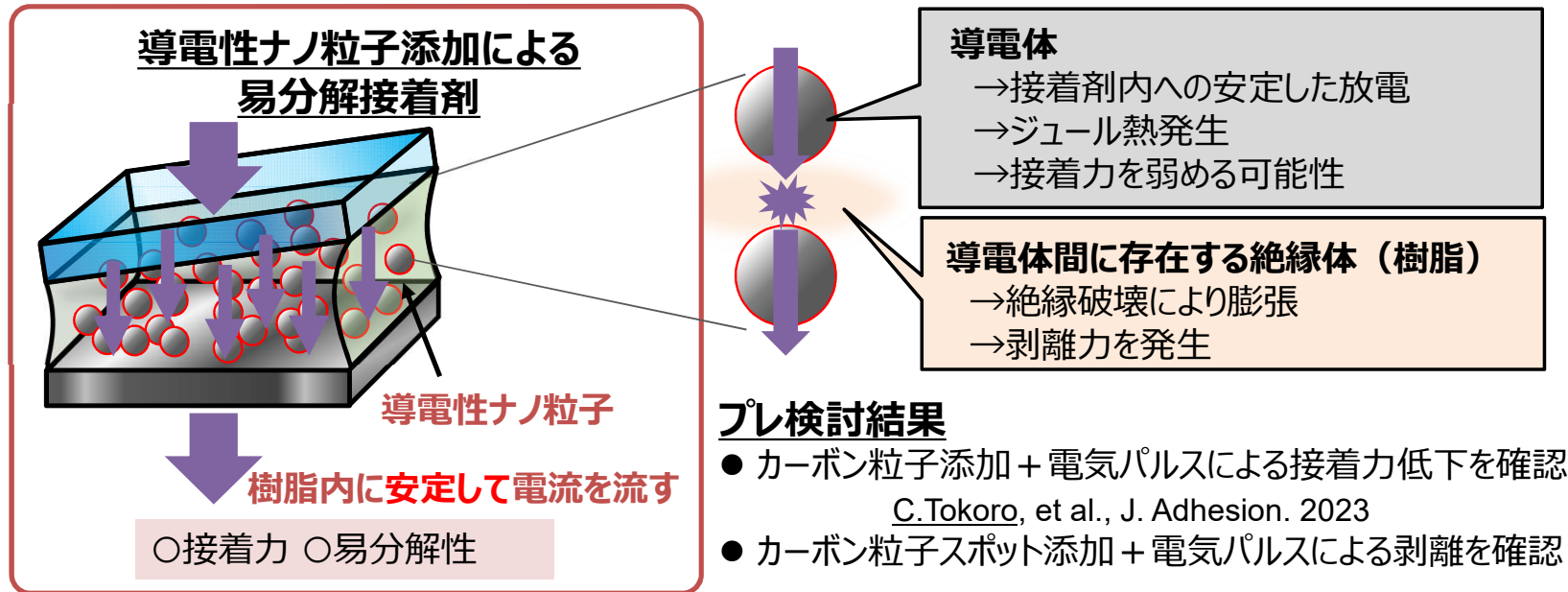
T. Koita, C.Tokoro, et al., IEEE Trans. Plasma Sci. 2022

テープ断面像



接着材内部の構造が放電および剥離に影響

電気パルス外部刺激で目指す接着易分解設計 (CREST)



- ナノ粒子によって沿面放電を防ぎ、樹脂内に安定して電流を流す
- 凝集分散制御した導電性ナノ粒子の存在によって放電経路が決定され絶縁体 (接着剤) 内で**安定した放電**がもたらされる
- 導電体を電流が流れることでジュール熱を発生し、界面接着力が弱められると同時に接着剤が**絶縁破壊によって膨張し、剥離**が引き起こされる (易分解性)
- ナノ粒子による**高接着力**の維持 (粒子径が大きいと接着力低下が予想される)

**ナノ粒子凝集分散制御による
導電性と絶縁性を兼ね備えた
接着層内の構造を形成**



接着強さと易分解性を両立

マテリアルまで戻さず
低コスト、省エネ、短時間で
高価値の部材リサイクル

循環バリューチェーンコンソーシアム（CVC）：オープン領域での産官学連携の場



循環バリューチェーンコンソーシアム

Circular Value Chain Consortium (略称：CVC)

会長：所千晴 早稲田大学理工学術院 教授

持続可能な社会の実現に向け、
Well-beingの向上と資源消費・環境負荷低減を両立させる、
資源循環技術の研究・開発と社会実装のための活動を
産官学協力して行う場の創出を目指しています。



■ コンソーシアムの活動事例

会員限定セミナー

- ◆ 業界を超えた会員間の課題共有
- ◆ 事例・最新動向共有
- ◆ 現状分析
- ◆ 課題解決に向けた議論
- ◆ ネットワーキング交流会
- ◆ 学生ポスターセッション

会員企業施設見学

公開シンポジウム

- ◆ 産官学 最新動向共有
- ◆ ネットワーキング交流会



発起人／アドバイザー

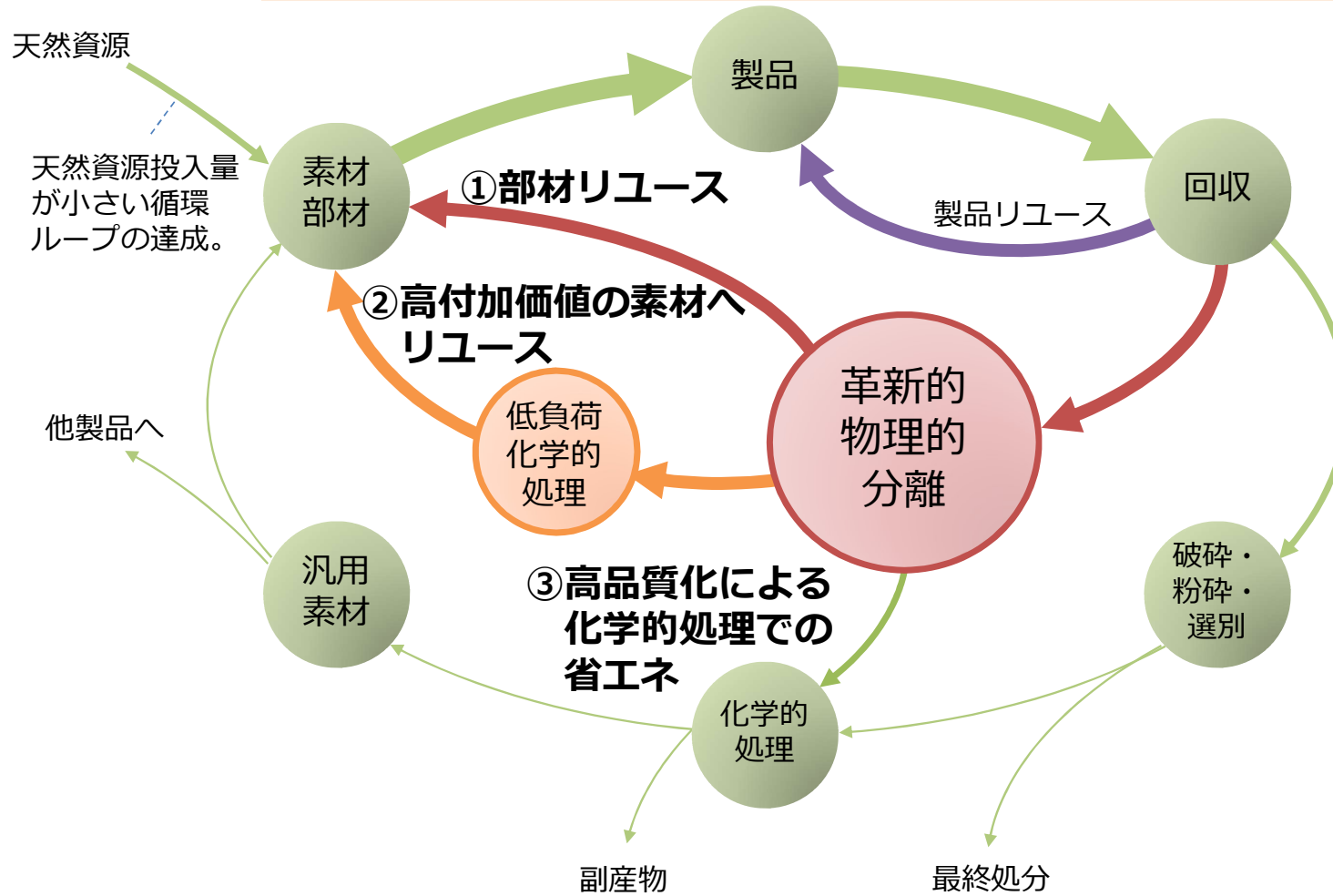
それぞれの技術に造詣の深いアドバイザーの協力を得ながら、事業者間の交流を推進します。

 会長 所千晴 早稲田大学 教授	 伊坪 徳宏 早稲田大学 教授	 梅田 靖 東京大学大学院 教授	 小野田 弘士 早稲田大学 教授	 神谷 秀博 東京農工大学 理事・副学長	 菊池 廉紀 東京大学 准教授	 小林 英樹 大阪大学大学院 教授
 高田 祥三 早稲田大学 名誉教授	 中村 昌弘 レクサー・リサーチ 代表取締役	 福重 真一 早稲田大学 教授	 松本 光崇 産業技術総合研究所 研究部門長	 森本 英香 早稲田大学 教授	 山口 勉功 早稲田大学 教授	

正会員・賛助会員

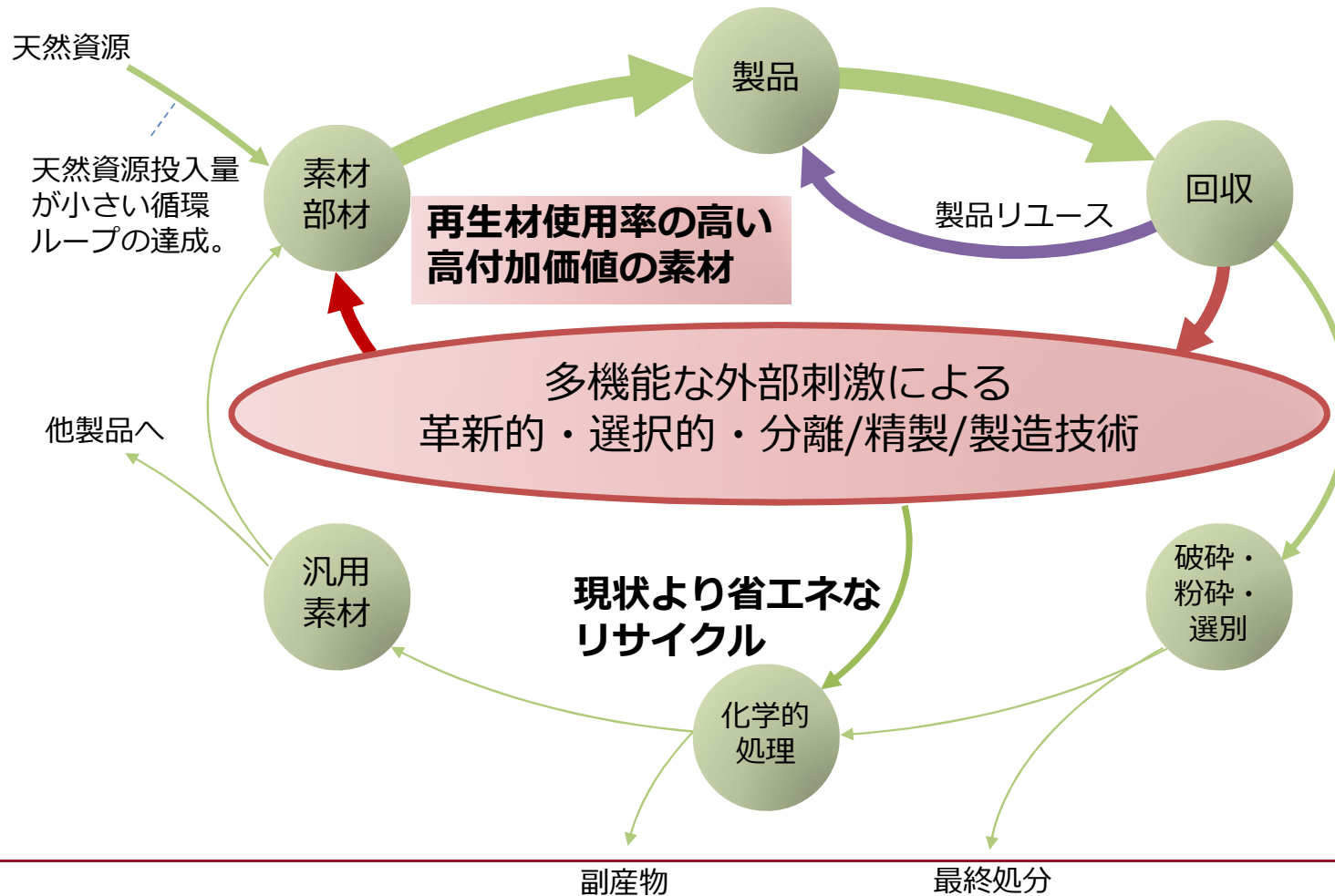
当研究室が目指す資源循環型社会

太く短い多重ループによる循環生産システムの構築



当研究室が目指す資源循環型社会：将来展望

選択性を有するワンプロセス分離・精製・製造技術，多機能な外部刺激による経済性を有する資源循環技術の新規開発



まとめ

◆世界の資源循環に対する重要性は増しており、**サーキュラーエコノミー（循環経済）**は、カーボンニュートラルとネイチャーポジティブにならぶ重要課題であり、**新たな人類のWell-beingと経済性との両立**をもたらすものとして期待

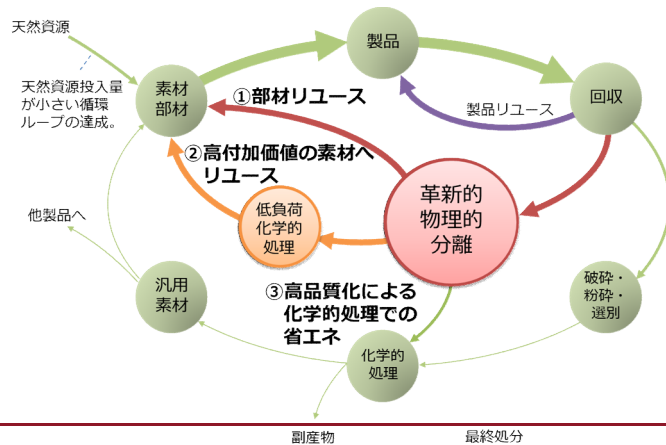
現状

■国内の高機能再生材産業の不足

・先端素材・製品のグローバル産業ほど再生材利用率の高い最先端・高機能な素材・製品が求められている。しかし、現在国内にはそのような素材を創成する技術・仕組み・産業が圧倒的に不足しており、**極端な供給不足**である

■モノづくりと資源循環に大きな隔たり

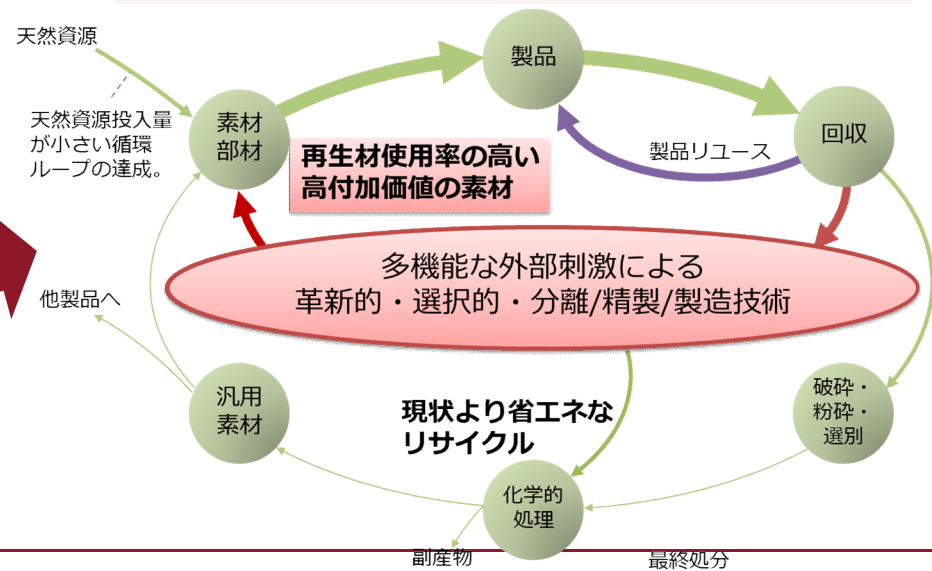
・これまで資源循環といえば高度「処理」だけを追求し、一方でモノづくりはピュアな原料から最先端かつ高機能な素材や製品を生み出すことが主であった。



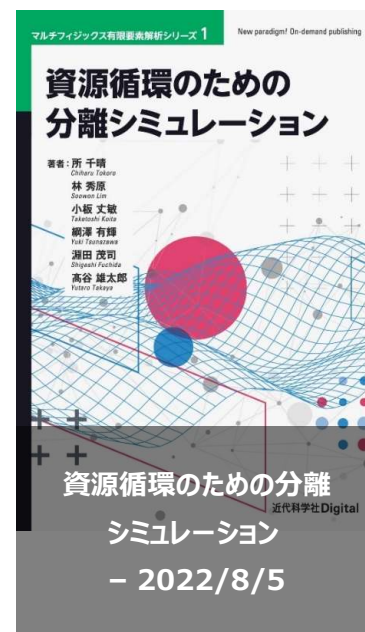
今後

■新たな戦略目標の必要性

・「再生材を利用した最先端素材・製品を創成するための革新的技術・プロセス・仕組み」を促進する新たな戦略目標が必須となっており、リサイクルではなく、**リソーシング**（＝使用済み素材・製品から新たな最先端素材・製品を生み出す）が重要あり、**資源循環は最先端・新規モノづくりのインフラ**であるという認識が必要である。



参考図書



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>

所千晴 自己紹介

早稲田大学工学部卒業。
東京大学大学院工学系研究科にて博士(工学)を取得。
専門は資源循環工学・化学工学・粉体工学。

早稲田大学理工学術院助手、専任講師、准教授を経て2015年より教授。
早稲田大学では創造理工学部教務主任、理工学術院長補佐、ダイバーシティ推進室長を歴任。
カーボンニュートラル社会研究教育センター副所長、高等研究所副所長。

クロスアポイントメントにて東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻教授、
東京大学生産技術研究所特任教授を兼任。
JX金属株式会社社外取締役・株式会社トッパンフオトマスク社外取締役を兼任。

日本学術会議第24期・第25期会員、第26期連携会員。
経済産業省、環境省、文科省、人事院、東京都、NEDO、JOGMEC等の各種委員を歴任。
化学工学会、粉体工学会、資源・素材学会、環境資源工学会、エコデザイン推進機構理事。

現在、JST未来社会創造事業・CREST等の研究代表者、20を超える企業との共同研究実施中。
循環バリューチェーンコンソーシアム会長。

