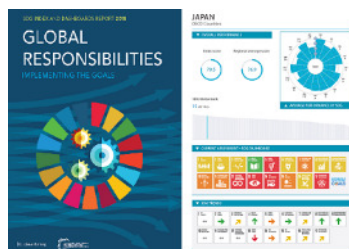


電気パルスによる分離技術が拓く 未来の資源循環

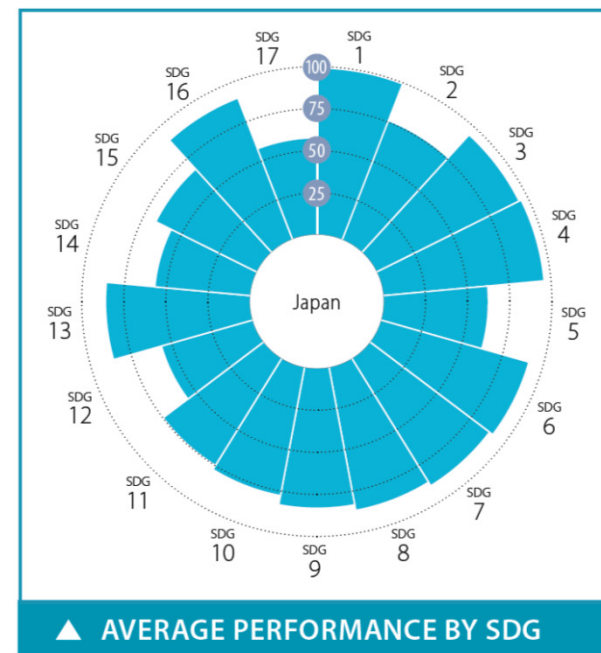
2021年5月28日

早稲田大学 理工学術院
創造理工学部 環境資源工学科
所 千晴
tokoro@waseda.jp





SDG INDEX AND DASHBOARDS REPORT 2018
“IMPLEMENTING THE GOALS GLOBAL RESPONSIBILITIES”
The Bertelsmann Stiftung and the Sustainable Development Solutions Network (SDSN)



日本(15位) 評価が低い項目群

- 「目標5: ジェンダー平等を実現しよう」
- 「目標12: つくる責任つかう責任」
- 「目標13: 気候変動に具体的な対策を」
- 「目標14: 海の豊かさを守ろう」
- 「目標17: パートナリーシップで目標を達成しよう」

評価高 ← → 評価低

▼ CURRENT ASSESSMENT - SDG DASHBOARD





空飛ぶクルマ



多目的EV自動運転車



二次電池、蓄電池



電気自動車



航空機

高機能材

製品の小型軽量化・省エネ化・環境対策

特殊鋼



ニッケル、
クロム、
タングステン、
ニオブ 等

電子部品
(IC, 半導体, 接点等)



タンタル、
ガリウム 等

希土類磁石



レアアース
(ネオジム、
プラセオジム、
テルビウム) 等

リチウムイオン電池



リチウム、
コバルト、
ニッケル 等

超硬工具



タングステン、
バナジウム 等

排気ガス触媒



白金族
(プラチナ、
パラジウム、
ロジウム) 等

展伸材

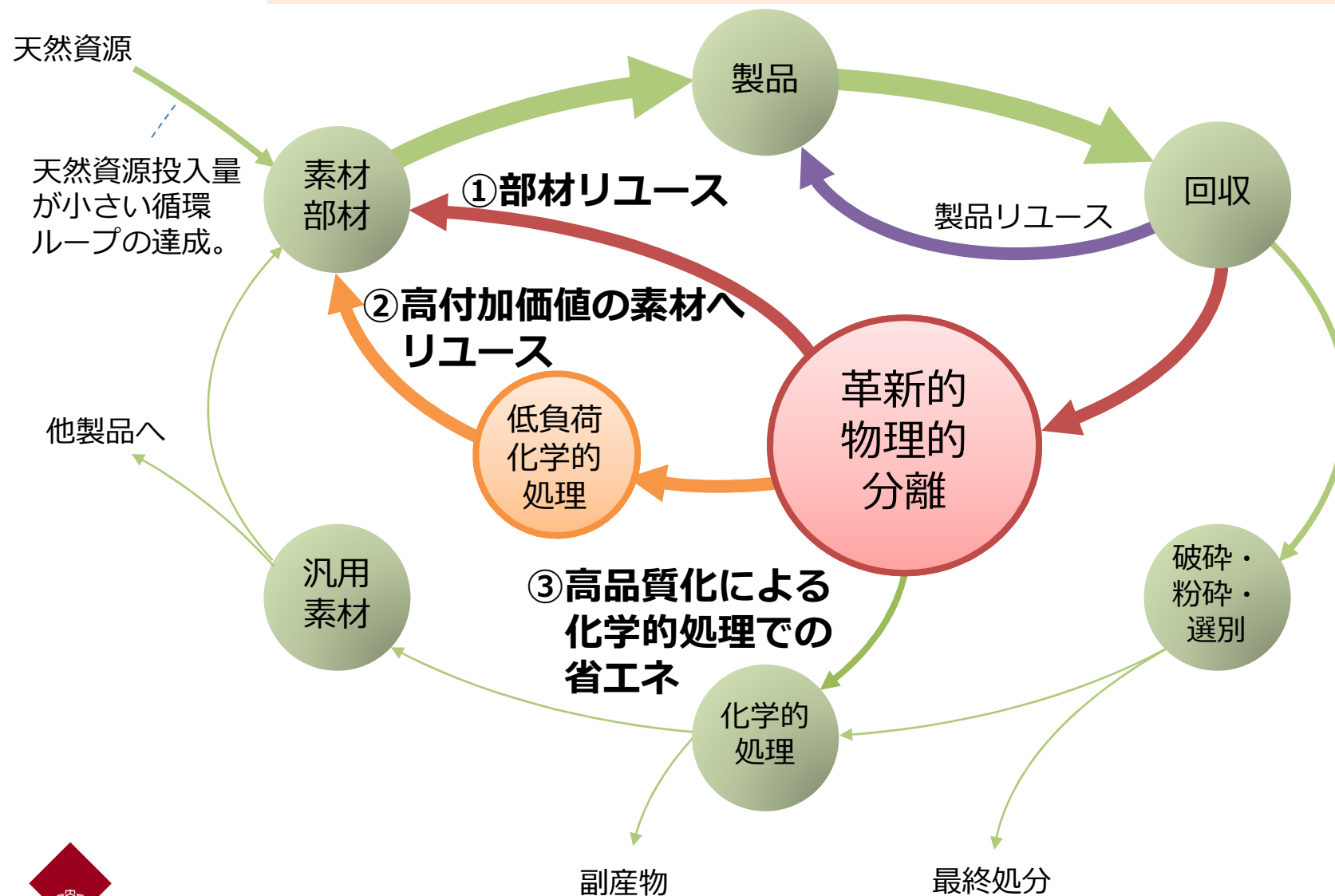


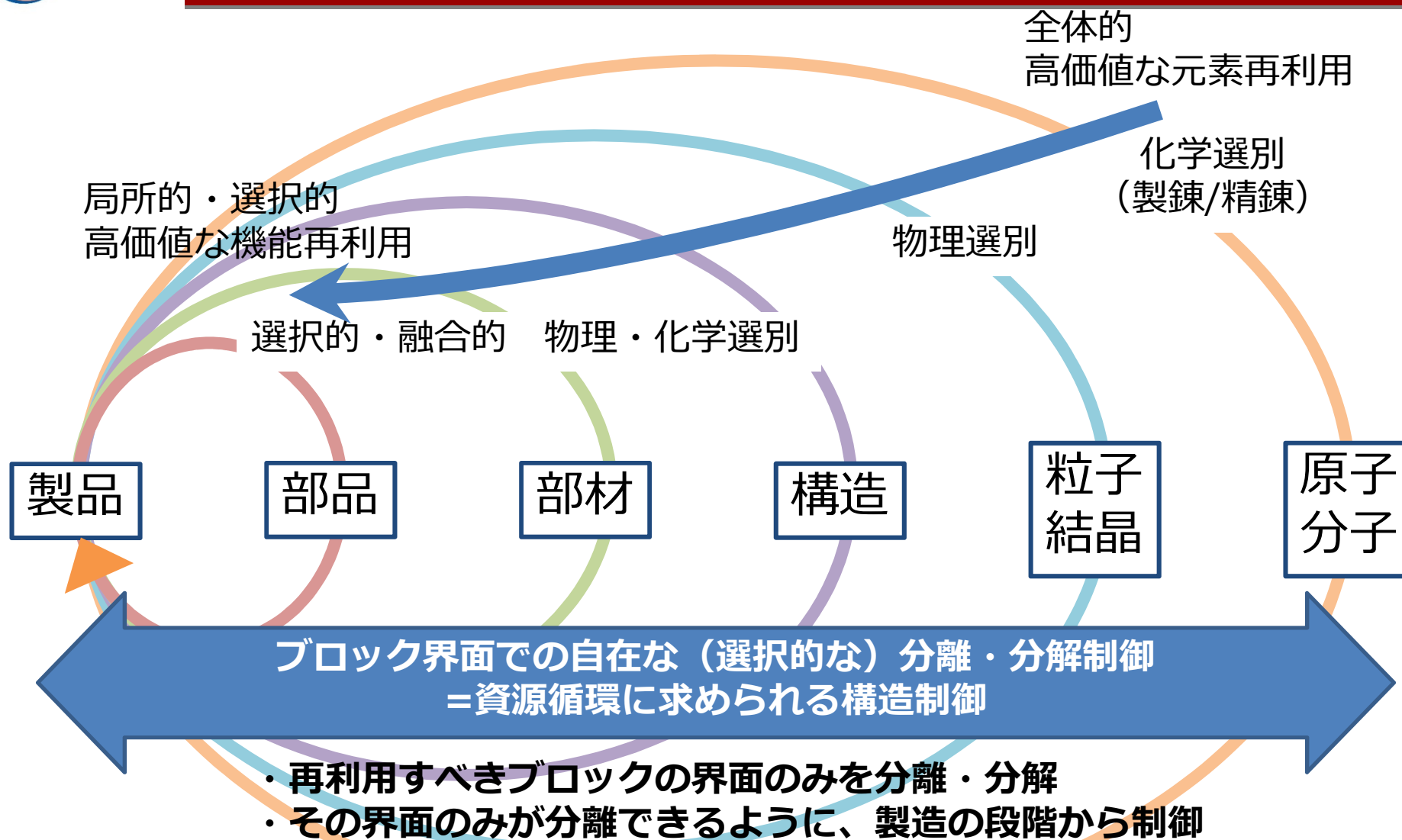
チタン 等

2021年2月15日 経済産業省資源エネルギー庁資源・燃料部作成
第7回鉱業小委員会資料より

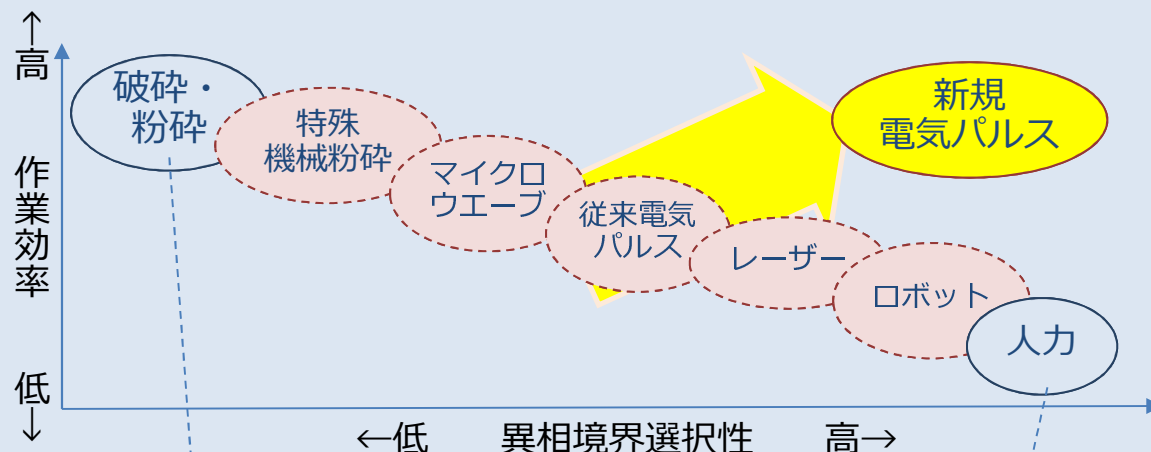


太く短い多重ループによる循環生産システムの構築





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。

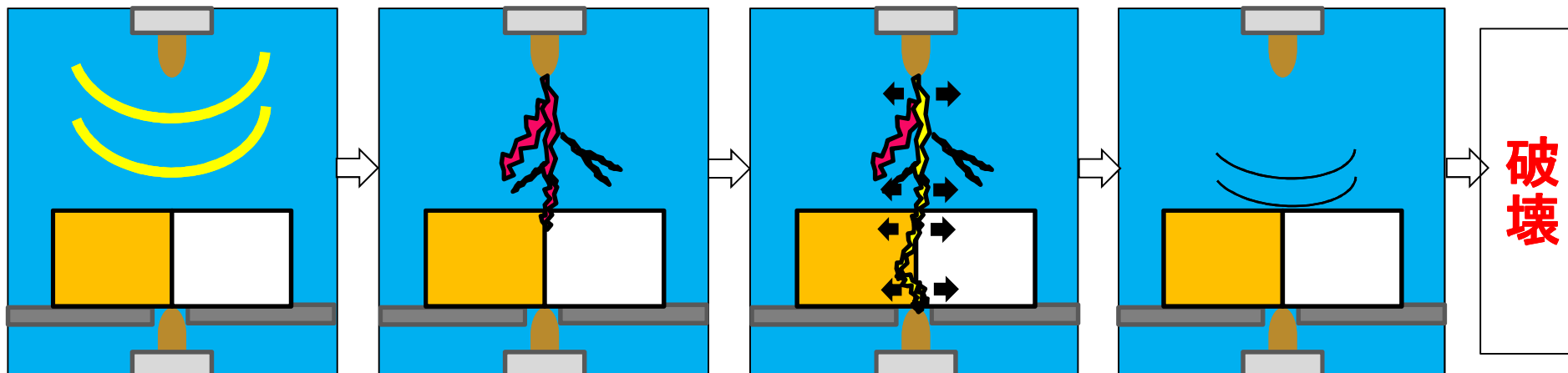
製品から得たい部位を選択的に取り外すことを可能とする
革新的な物理的分離技術の確立



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



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。



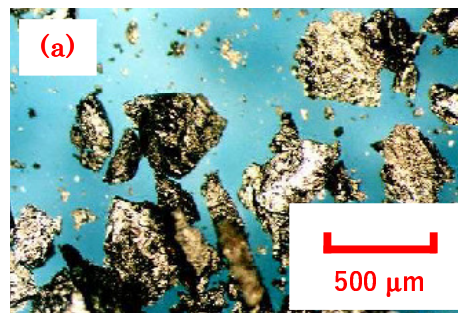
製造：SELFRA AG
輸入販売：
ハルツォク・ジャパン

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。



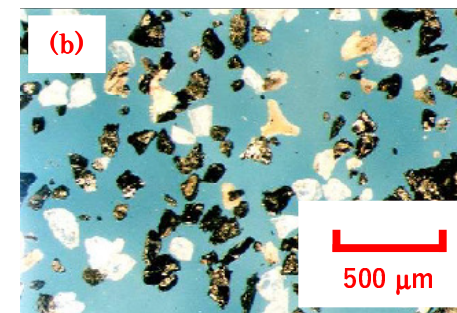
10t/hの連続機

**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。



石炭 (a)ジョークラッシャー粉碎

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。



(b)電気パルス粉碎

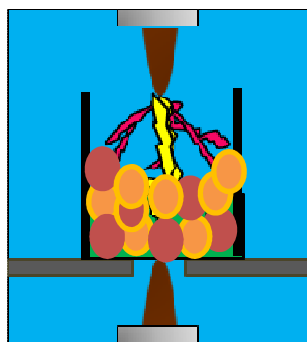


- 従来の物理分離法：効率・環境負荷・コストの面で要改善
 - シュレッダー等：選択性が低い
 - 人力による選別解体：効率が低い
- 電気パルス法：大きなパワーを対象に与えるポテンシャルを持つが、
 - 全粉碎から部分選択分離への展開が必要
 - 製品に応じた制御が必要



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



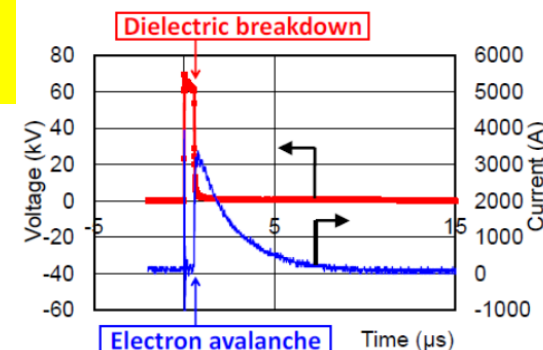
衝撃波の影響大

集合破碎的

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

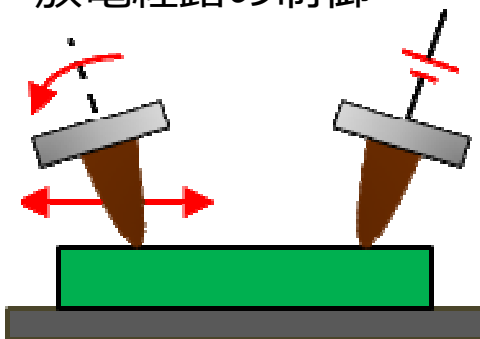
選択的な加熱
選択的な反応
選択的な剥離
選択的な破壊

を可能に

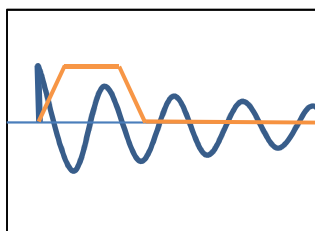


新規電気パルス法

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

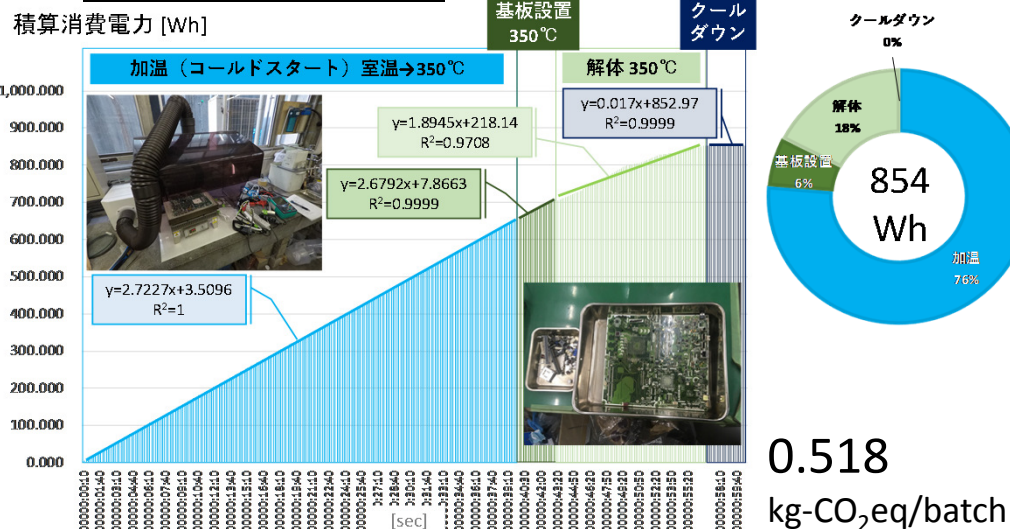
熱と機械力の発生
割合と場所を制御

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

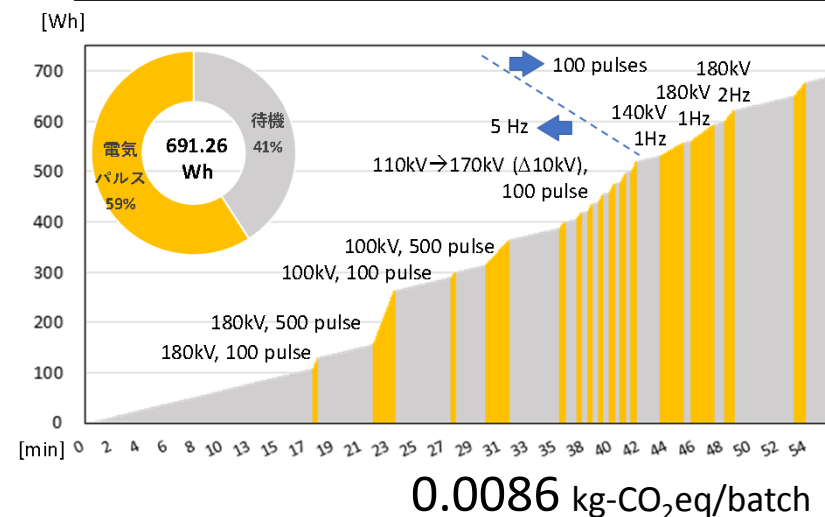


LCA*による 基板からの部品はんだ外しに要する電力消費量を比較

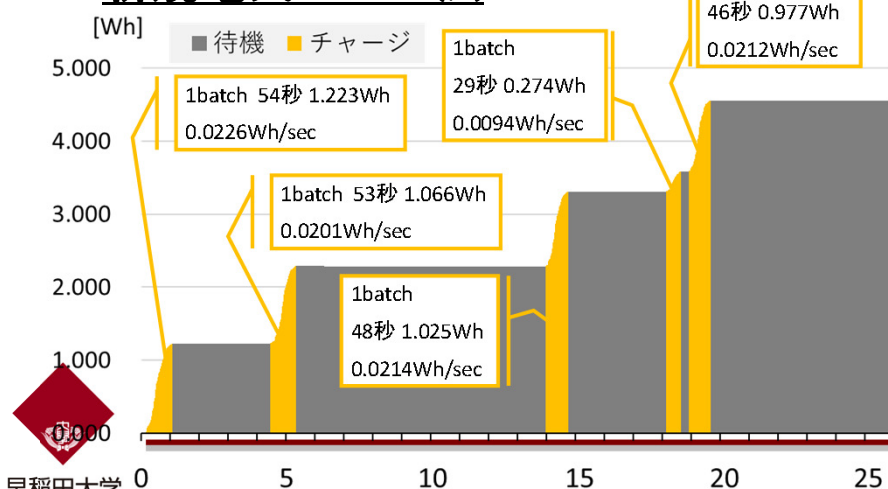
・ サンドバス加熱法



・ 従来型電気パルス法(セルフラッグ社)



・ 新規電気パルス法



0.00065* kg-CO₂eq/batch

*計装類、搬送類、安全対策なし

*LCA: Life Cycle Assessment
東京大学・菊池康紀先生 提供

リチウムイオン電池に対するEU法の改正案提出(2020年12月)

✓ EU内のすべての電池を対象

EU市場内の産業用、自動車用、電気自動車用、ポータブルの全ての電池を対象とする。

✓ 回収率目標

産業用・自動車用・電気自動車用は完全回収

ポータブルは2025年には65%、2030年には70%回収率

✓ コバルト、ニッケル、銅のリサイクル率目標

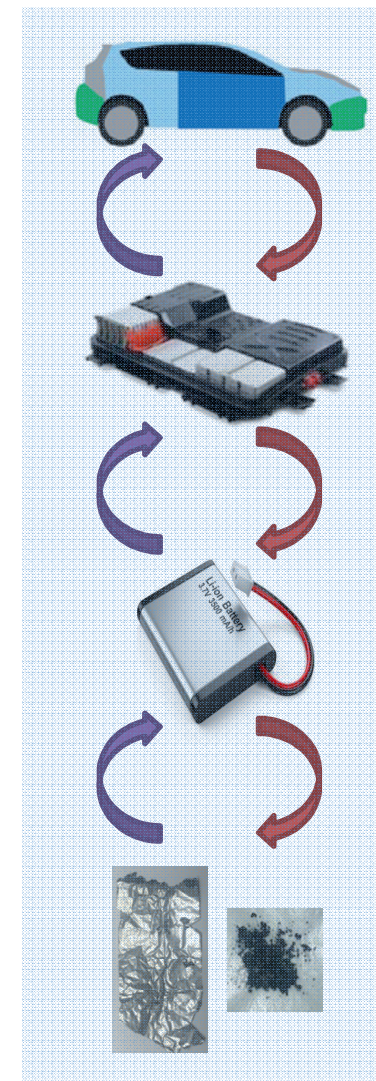
2025年までに90%、2030年までに95%

✓ リチウムのリサイクル率目標

2025年までに35%、2030年までに70%

✓ カーボンフットプリント申告の義務化

カーボンフットプリント申告を済ませた充電可能なもののみEU市場に導入を可能とする。

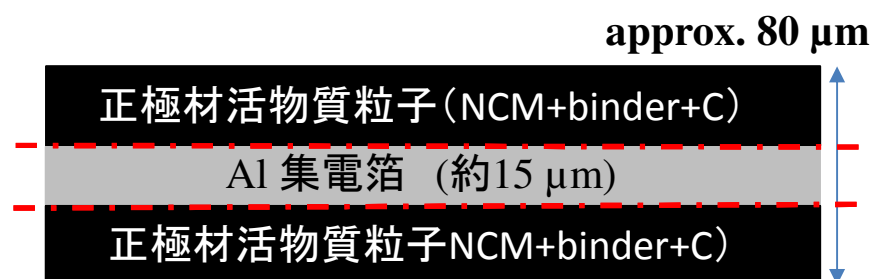




液系LiBセル



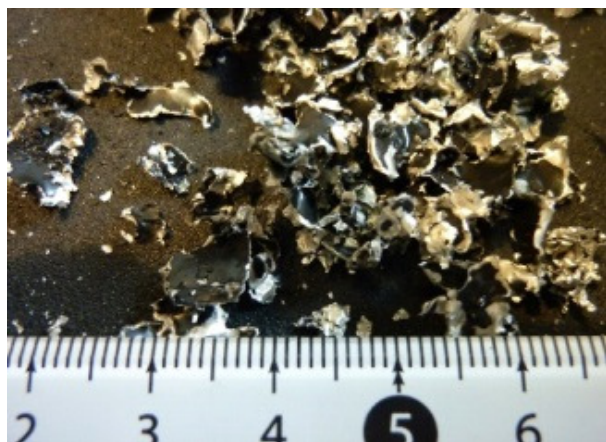
正極材捲回体



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

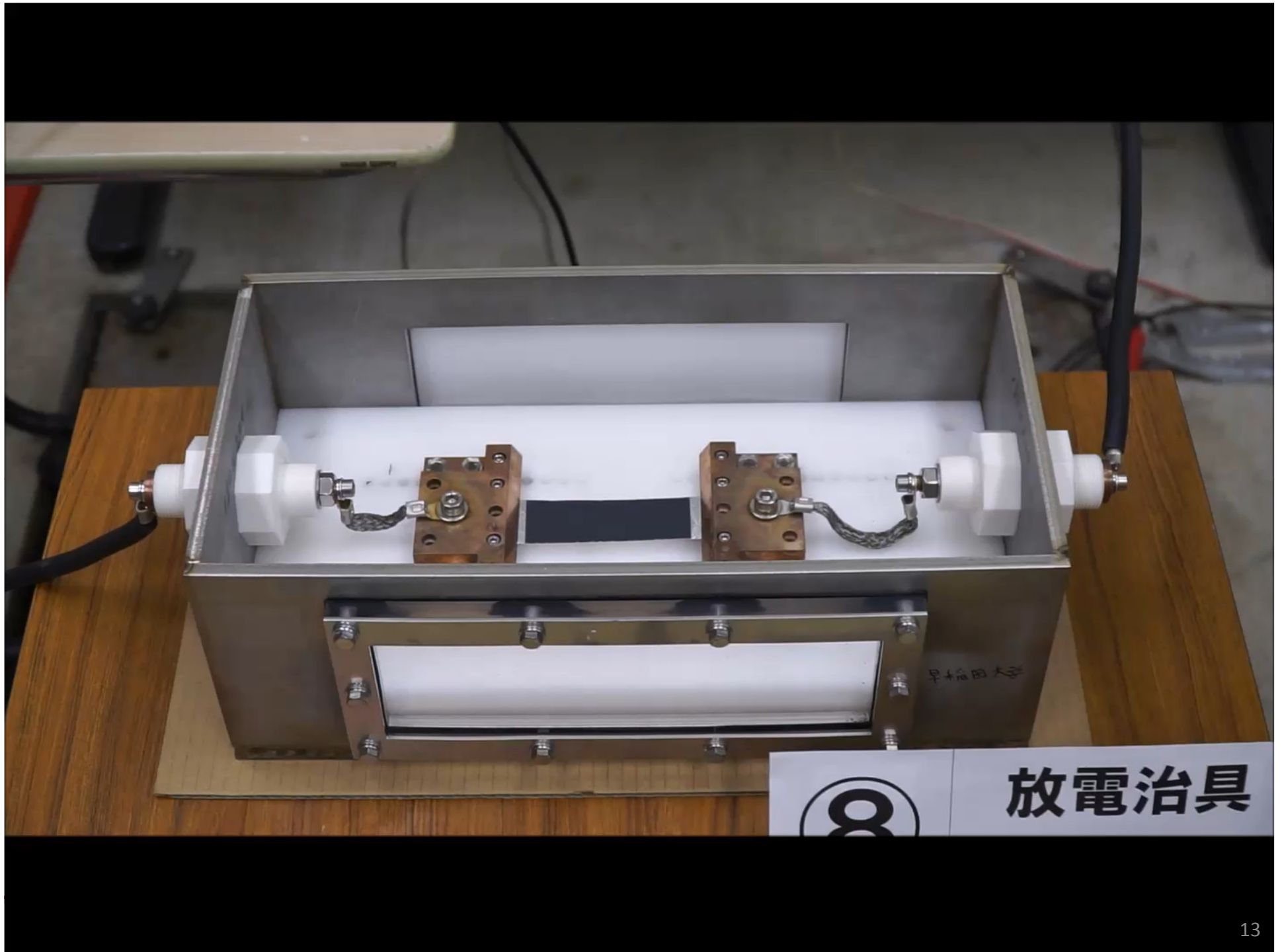


Al集電箔



正極活物質粒子層

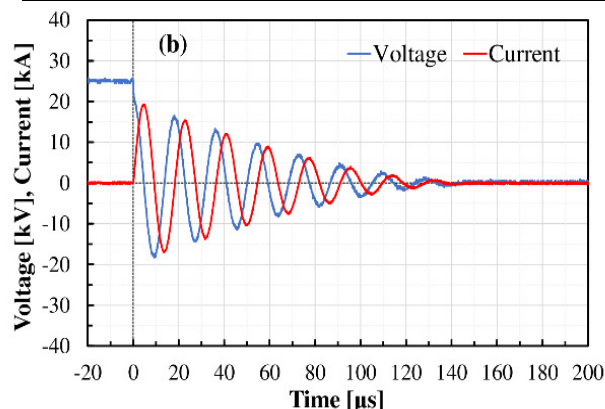




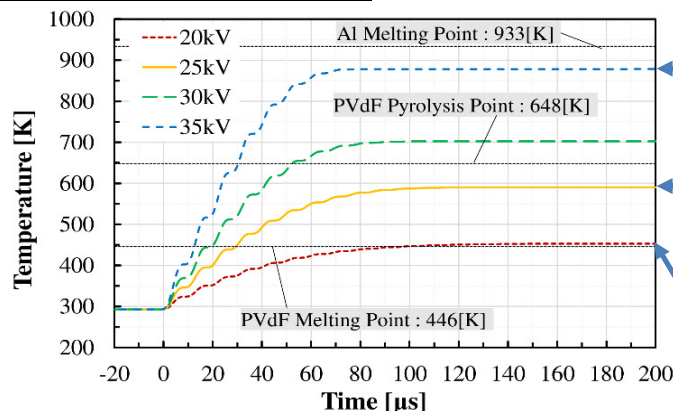
⑧

放電治具

新規電気パルス法におけるAl箔温度と剥離の相関



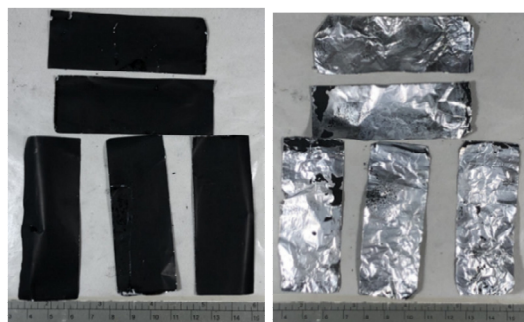
電流・電圧波形からのジュール熱算出
→アルミ箔の加熱のみに使用されたと仮定した温度推定



30, 35 kV:
アルミ融点 (933K) 以下

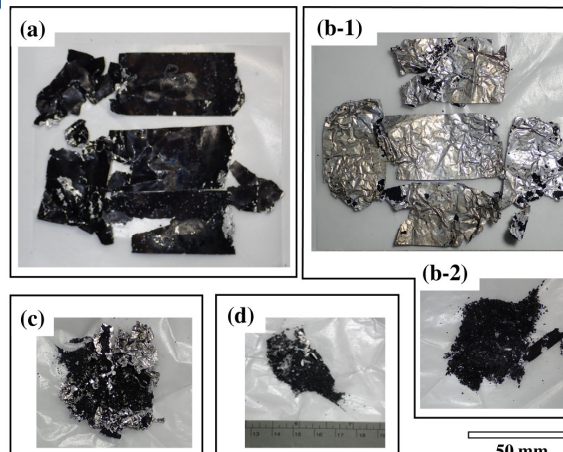
25kV:
バインダー(PVdF)熱分解
点 (648K) 以下

20kV:
PVdF融点 (446K) 程度



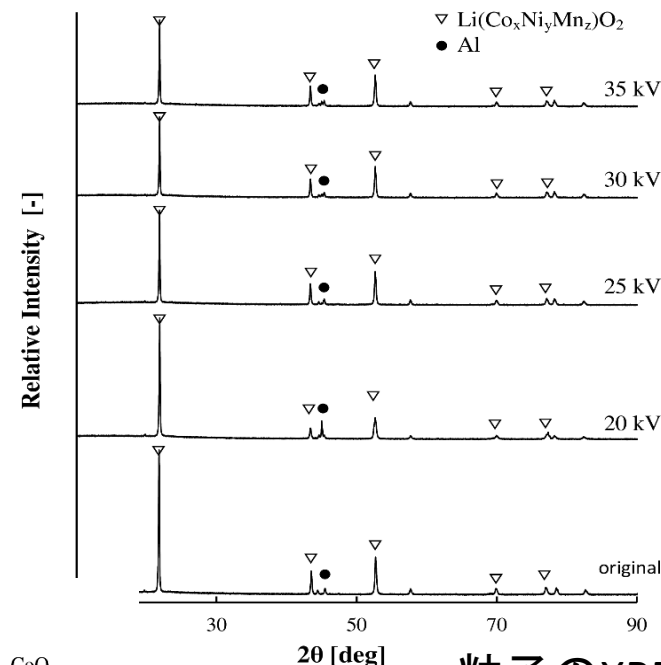
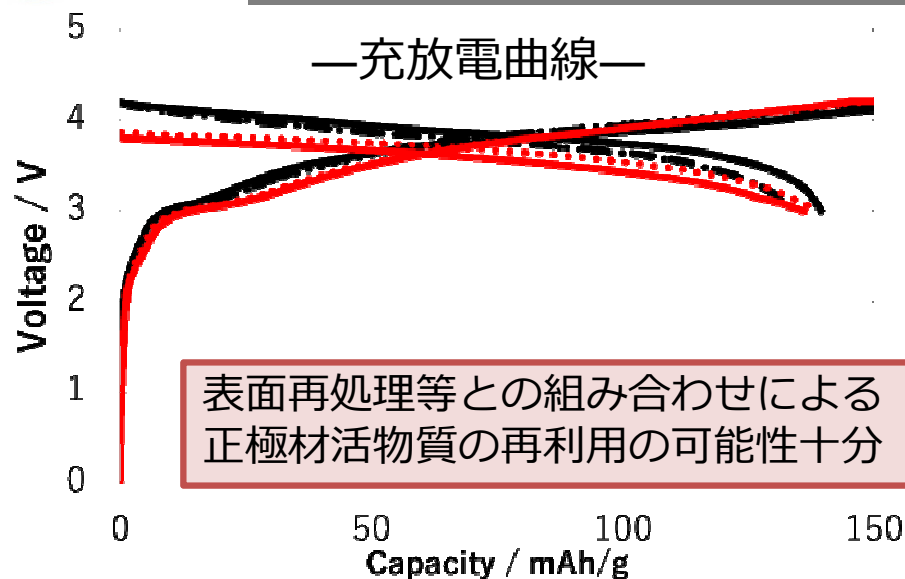
電気炉での加熱試料

(左) 573K加熱
+ 超音波処理
では剥離せず
(右) 653K加熱
+ 超音波処理
で剥離

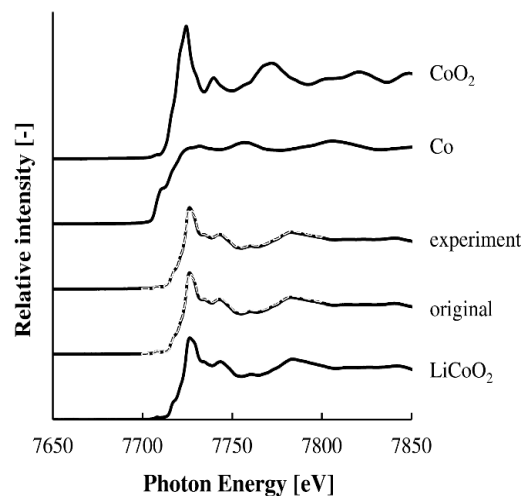
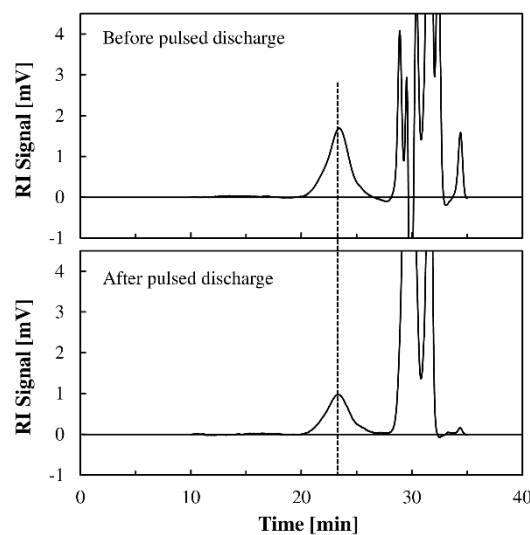


パルス処理後試料

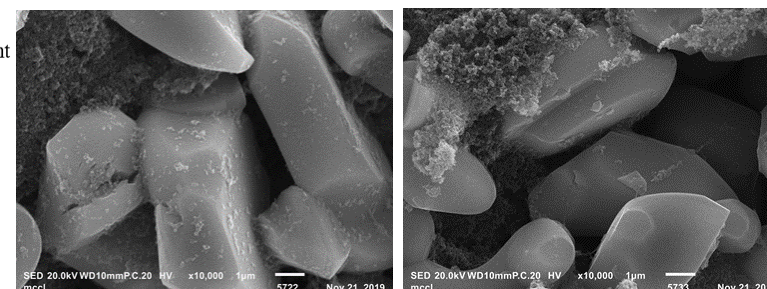
(a) 20 kV
剥離は認められない
(b) 25 kV
良好な剥離
(b-1)アルミ箔
(b-2)正極活物質
(c) 30 kV
アルミ箔も微細化
(d) 35 kV
アルミ箔も微細化



粒子のXRDパターン



粒子のXAFSパターン

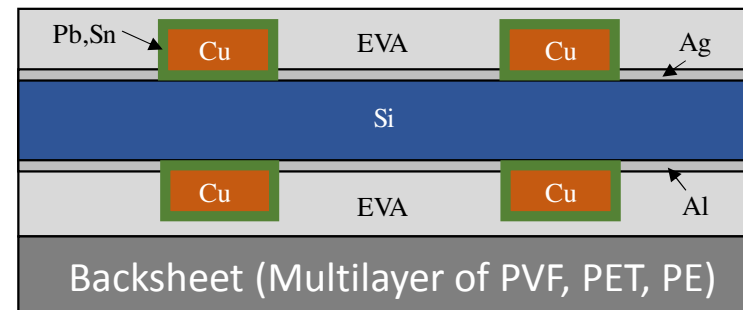
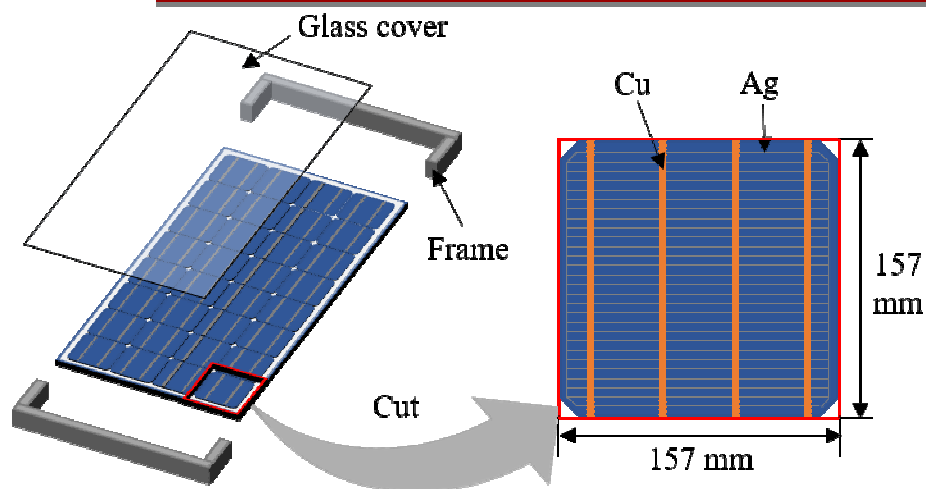


分離前

分離後

SEM像による粒子観察



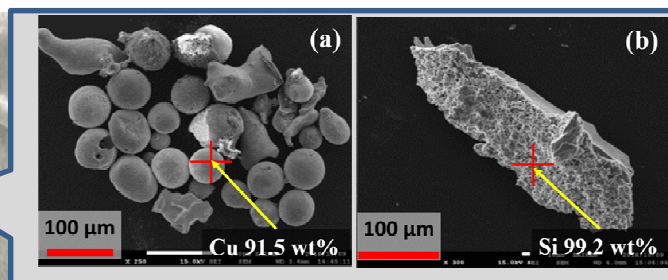
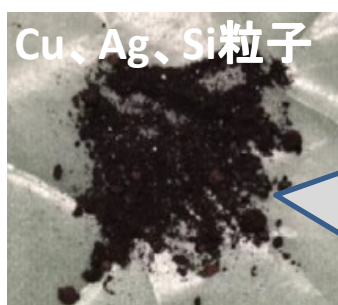
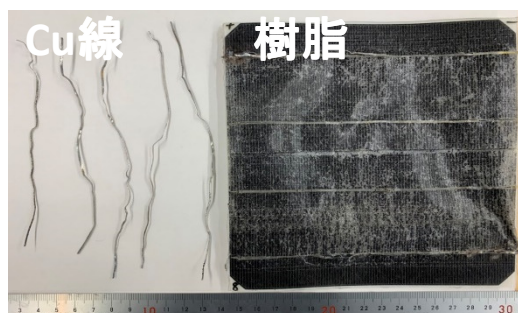


物理的分離（カッティング粉碎） → ガラスや金属線による刃のダメージが大きい

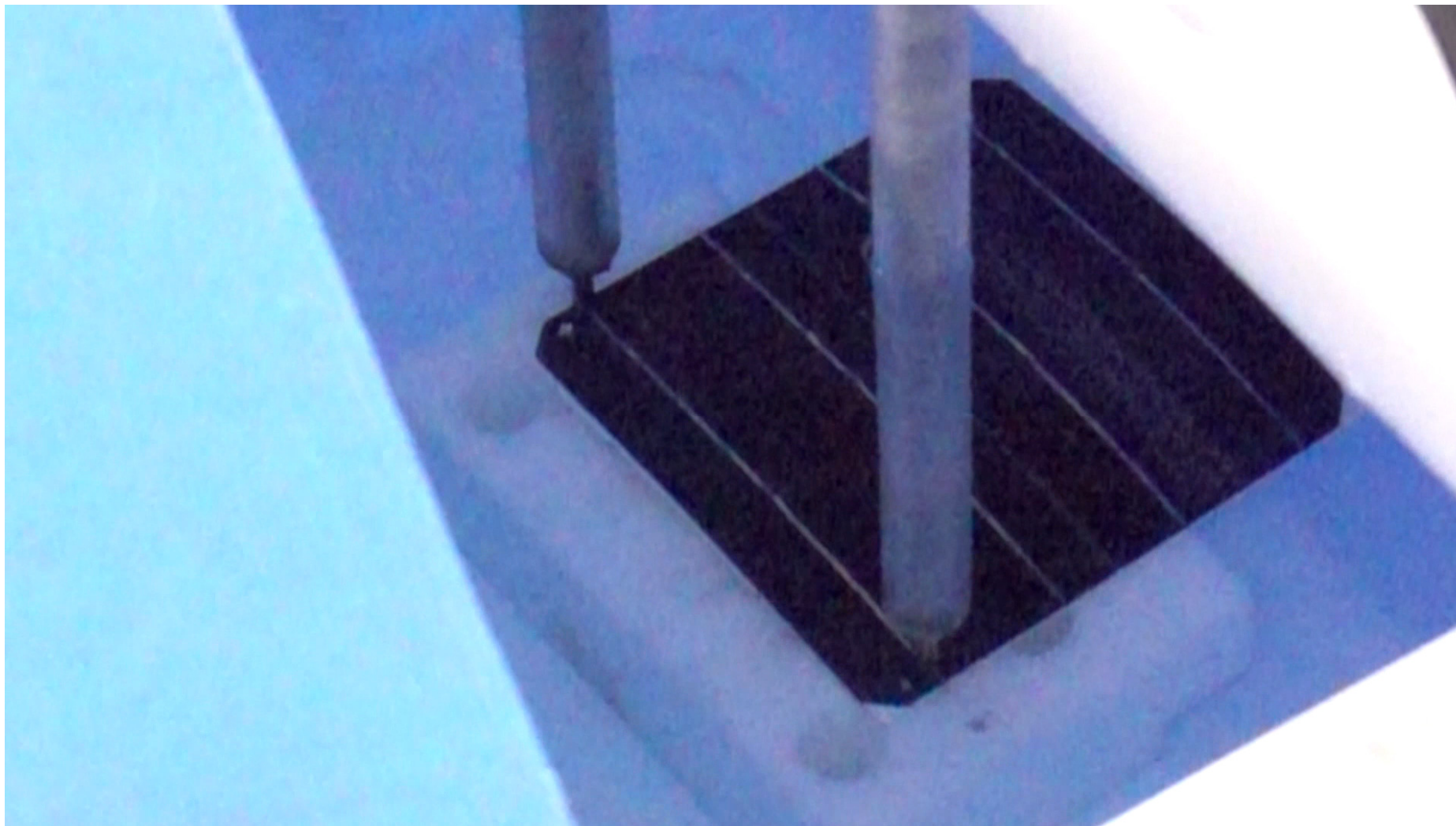
化学的分離（加熱） → 樹脂の割合が高く、このままでの金属製錬利用は困難

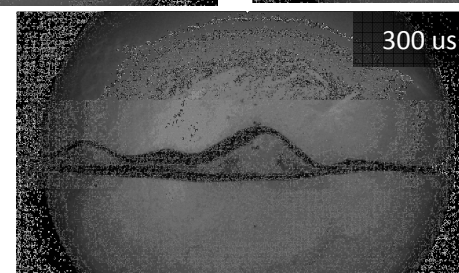
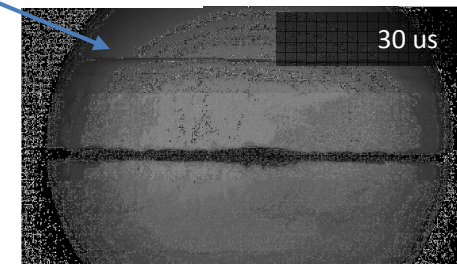
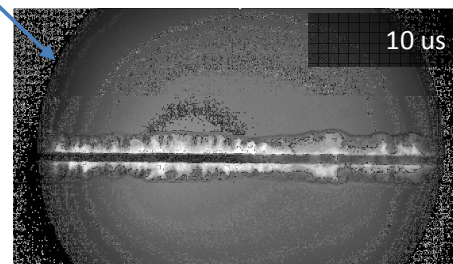
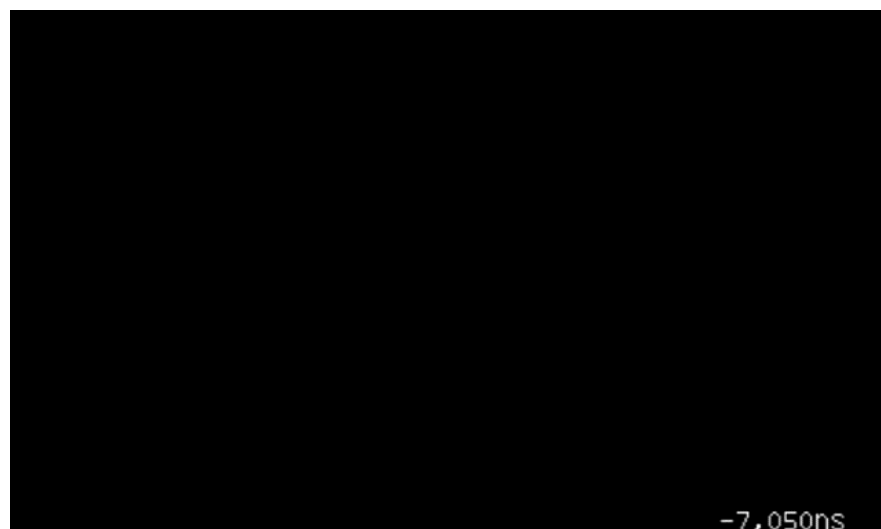
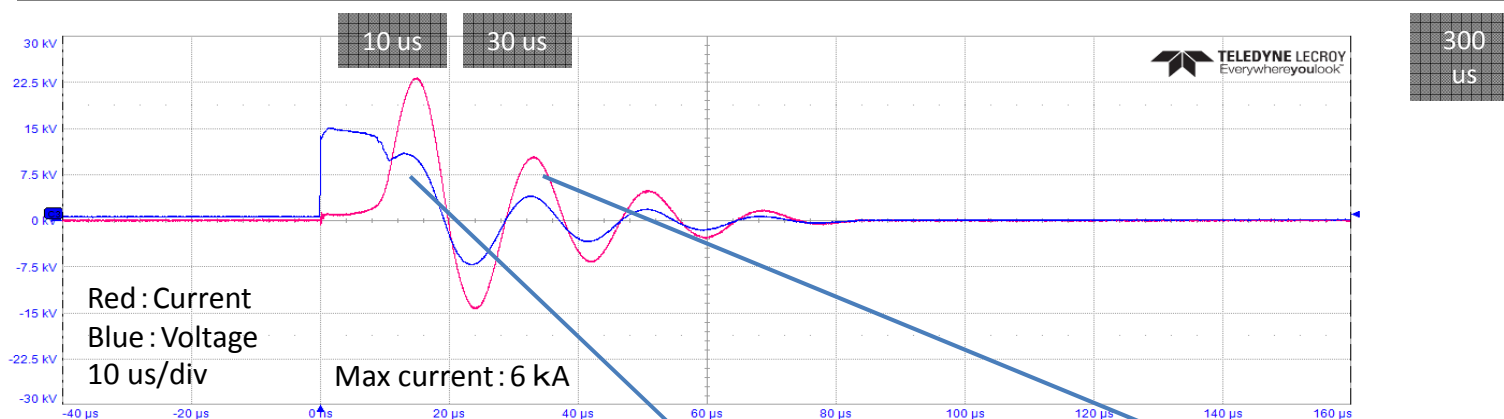
→ CO₂発生、エネルギー有効利用（省エネ）に工夫が必要

新規電気パルス法*（物理的・化学的分離融合） → 金属線の上に電気パルスを照射し、昇華回収



Cu線の一部、Ag線は電気パルスにより溶融・プラズマ化 → （気中冷却により）球形粒子として分離
Cu線、Si粒子：プラズマ化の衝撃により樹脂より分離



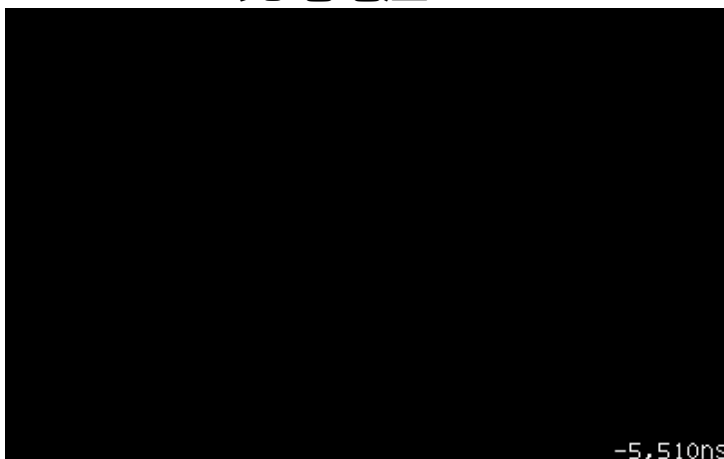


1. 電気パルスの通電により銀細線は爆発し、体積膨張することで気中に第1衝撃波が伝播する。
2. 銀細線の体積膨張により、ガス化した銀が気中を占領する。
3. ガス化した銀の絶縁破壊電圧以上の高電圧印加時に、気中のガス化した銀にリストライク現象（アーク放電）が発生する。
4. リストライク現象（アーク放電）により第2衝撃波が気中を伝播する。
5. 第2衝撃波は第1衝撃波と干渉し、1つの衝撃波に成長する。

鋼板接着体の分離

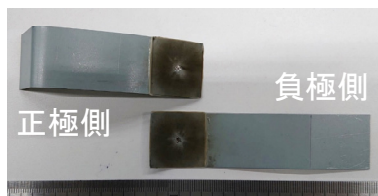
シャドウグラフ法, 撮影間隔5 us, 全体撮影時間640 us (撮影枚数128枚)

充電電圧7.5 kV



<放電経路の観測>

中心で放電発光を観測→接着剤内での放電を誘導可能
<現象の考察> 通電時の接着剤のプラズマ化(高温)による接着剤のガス膨張が発生し, ガス膨張に起因する気中への衝撃波を観測



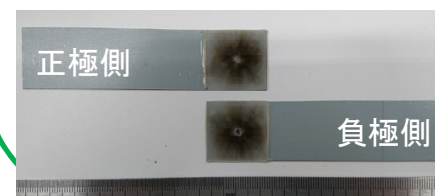
- ・接着剤の凝集剥離が発生
- ・母材の大きな塑性変形が発生

充電電圧5 kV



<分離機構の考察>

- ・気中を伝播するガス膨張由来の圧縮波が観測されたことより, 接着剤内でガス膨張が発生していると考えられた
- ・通電時の接着剤のプラズマ化(高温)による接着剤のガス膨張が分離機構の因子である可能性が高い



- ・接着剤の凝集剥離が発生
- ・母材の大きな変形なし

実用化への有効性

- ・接着剤のガス膨張が分離の因子と推測された
- ・放電電圧の制御により、大きな変形のない接着体分離を可能にできる





Honda
Step-Wagon
Fuel injection Parts



30 kV 28 times discharge
Discharge points automatically
moved along with bonding parts



- 本技術の特徴：
 - 時間、エネルギー面で高効率
 - 階層構造の物理的分離が可能
 - 気中でも液中でも可能
 - 部品、部材のリユース、高度リサイクルに適している
 - 小規模分散型の処理設備に適している
 - LCAの裏打ち（本PJの共同研究：東大G）
- 従来技術の問題点であった、低選択性と低効率を解決できる。
- 製品に応じて適切な媒体（気中、液中）を選択できる。



- 本技術では、高温処理を必要とする大規模プロセスを省くことが可能と考えられ、LiBなどの2次電池のリサイクルに効果を発揮すると考えられる。
- 今後、移動体の軽量化に向けて、増加するであろう各種接着体、マルチマテリアルのリサイクル適用に効果が期待できる。
- 原理的に、物性が異なる異種材界面の剥離に適した技術であるため様々な製品に個別の適用開発が可能である。
- また、製品の設計・製造の段階から分離を前提にした考慮をすることで、資源循環型社会に親和性が高い製品を産みだすことができる。



- 技術の現状：
 - 新規電気パルスを用いた物理分離の機構は基礎的な大枠をとらえている。
 - パルス技術、測定分析技術の高度化が進んでおり、ノウハウの蓄積もできている。
 - LCAによる有効性の裏付けを可能とする。
- 今後の展開と課題：
 - 実際の工業製品に適用する段階。
 - 対象とする製品そのもののデータや、ロジスティックス、リサイクルプロセスを含んだバリューチェーン上のデータが必要。
 - そのためには具体的な製品への適用開発が必要で、実施者との協働が不可欠。



- 資源循環へのとりくみを加速させようとする企業との協働を期待する。
 - 本PJ内での共同研究
 - And/orスピニアウトした企業開発への発展
 - オープン思考で知財を活用
- 既存のビジネスの発展、あるいは新たな概念のビジネス開発においては、本PJの成果の導入は有効と考えられる。
- 特に以下の点が、個々の工業製品ごとに今後重要と考えている
 - 設計・製造にフィードバック
 - LCAに裏付けられた循環設計

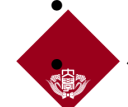


- 発明の名称：電気パルス解体方法
- 特許6857363（特願2018-206987）
- 特許権者：早稲田大学, 熊本大学
- 発明者：所 千晴, 浪平 隆男

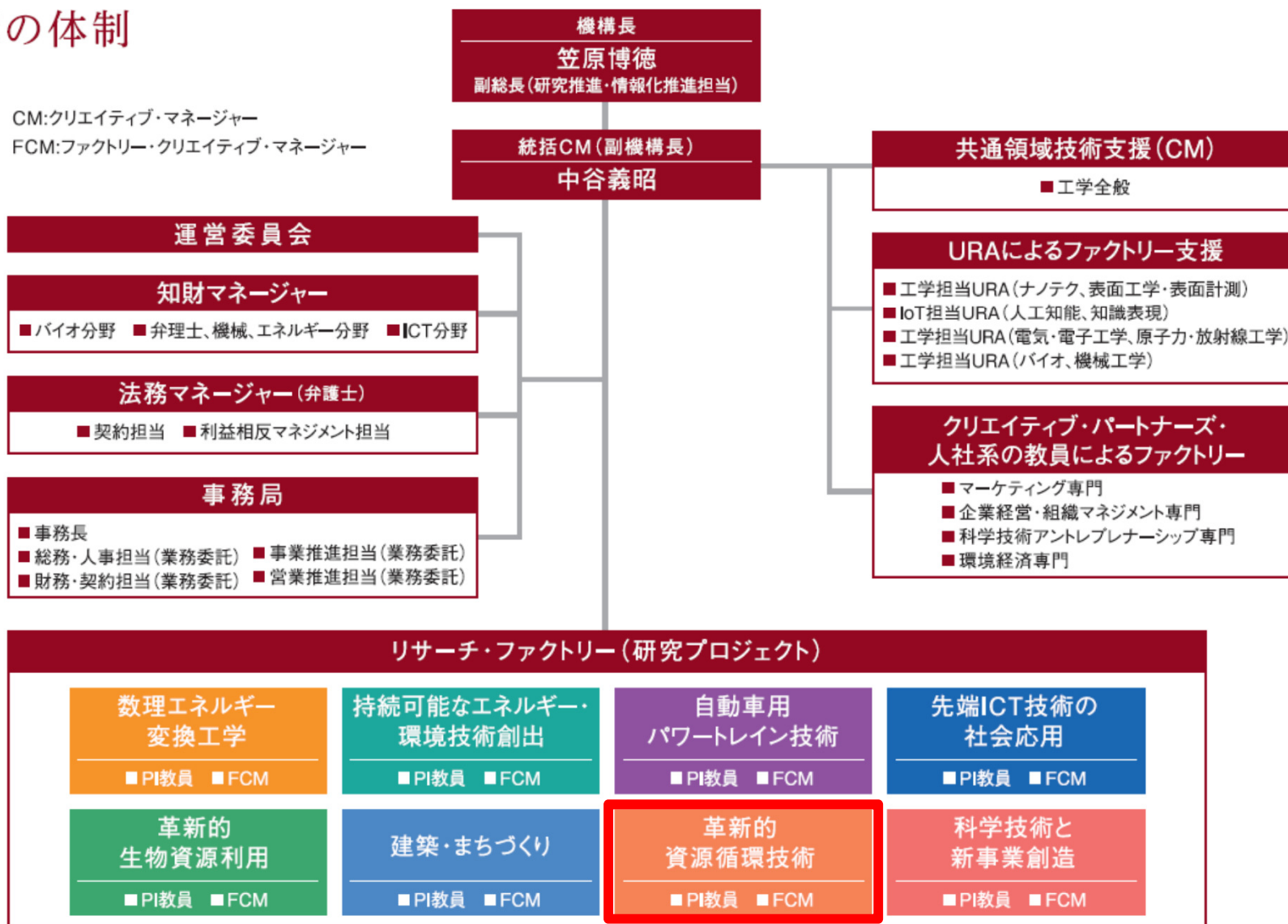
その他、当研究室の電気パルス関連知財（出願中）あり

- R1-5 JST 未来社会創造事業 「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」 (本格研究)
- H29-R1 JST 未来社会創造事業 「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」 (探索研究)
- H27-H28 科研費挑戦的萌芽研究 「プロセスミネラロジーに基づいたスラグからのマグネタイト回収プロセスの構築」
- H24-H26 科研費基盤研究(C) 「XAFSによる水酸化物・硫化物処理法における不均一・不可逆反応機構の解明」
- H22-H23 科研費挑戦的萌芽研究 「海洋性微細藻類及び貝類をバイオリアクターとした無機ヒ素含有廃水処理および無害化」
- H20-H21 科研費若手研究(B) 「酸性坑廃水処理への赤泥の適用に関する研究」
- H17-H18 科研費若手研究(B) 「希薄廃水からの有害元素の選択除去法の確立を目的とした動的シミュレータの開発」

-
- R1 東京都・民間企業「太陽光パネル高度循環利用に向けた東京モデルの構築事業」
 - R1 JOGMEC・民間企業「HPGRによる銅鉱石中の不純物鉱物の単体分離と浮選等による分離」
 - R1 資源環境センター・民間企業「解析評価を用いた坑廃水処理の調査研究／坑廃水処理予測シミュレーション」
 - R1 民間企業「廃棄物の再資源化プロセスの研究開発」
 - R1 JOGMEC「平成31年度休廃止鉱山における坑廃水処理の高度化調査研究事業」
- 他、年間数十件の多数実績あり



機構の体制



早稲田大学リサーチイノベーションセンター
知財・研究連携支援セクション

TEL: 03 5286 9867

FAX: 03 5286 8374

email: contact-tlo@list.waseda.jp



ご清聴ありがとうございました

