

# 新規電気パルス法による リチウムイオン電池の高精度分離技術開発

2022年10月14日(金) 13:45-14:00  
3R先進事例発表会

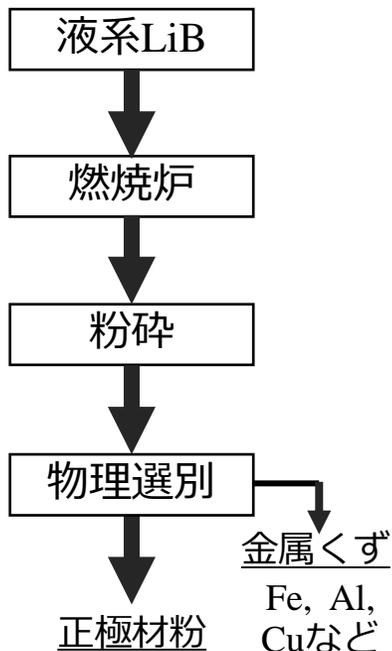
早稲田大学理工学術院 創造理工学部 環境資源工学科  
東京大学大学院 工学系研究科 システム創成学専攻  
所 千晴

tokoro@waseda.jp

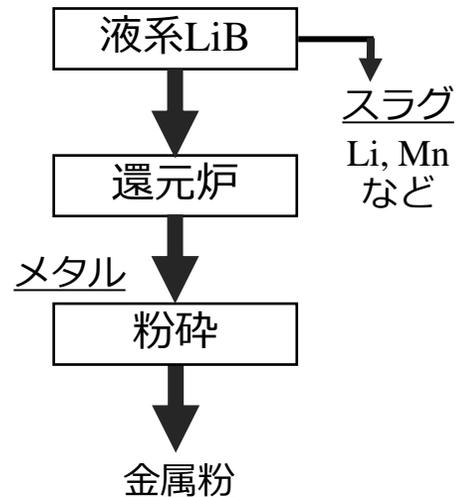


# LiBのリサイクルフロー

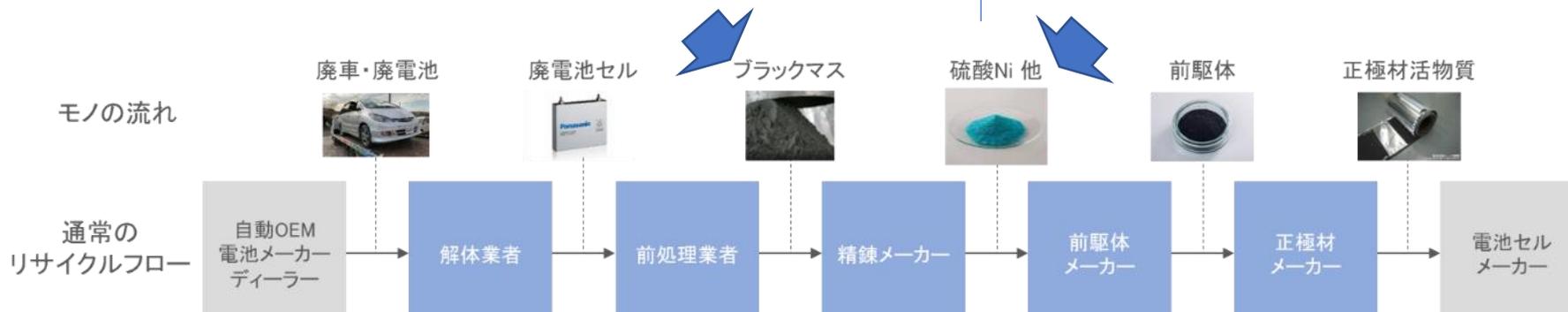
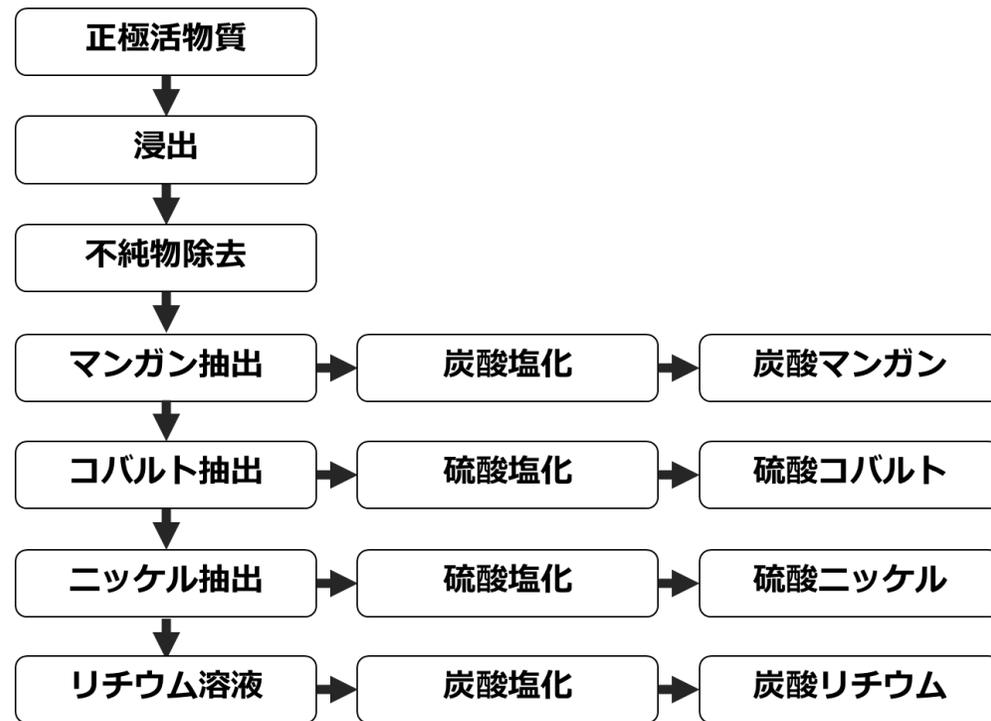
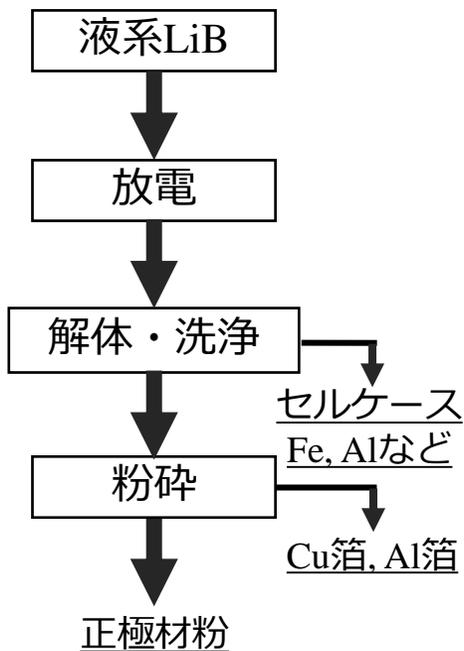
(ア)：焼却・加熱炉の利用



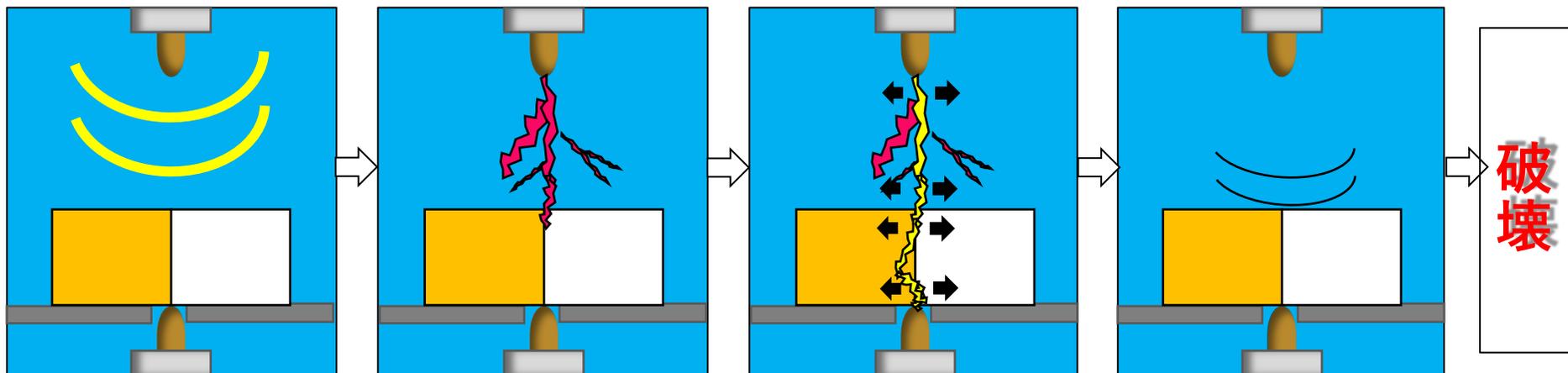
(イ)：還元炉の利用



(ウ)：湿式処理の利用



# 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。

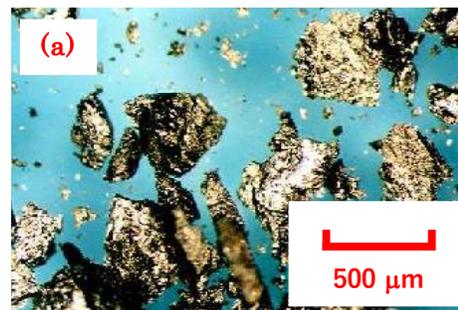
**水の衝撃波の発生**  
→アーク放電による水中でのマイクロ爆発によって、衝撃波が発生。試料に衝突し、圧縮力として粉碎に寄与する。



製造：SELF FRAG AG  
輸入販売：  
ハルツォク・ジャパン

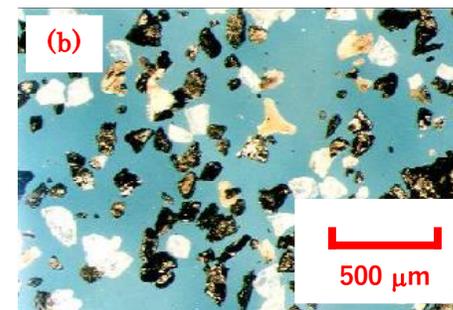


10t/hの連続機



石炭

(a)ジョークラッシャー粉碎

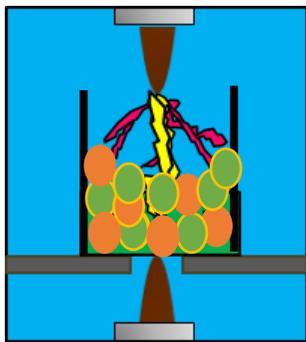


(b)電気パルス粉碎

# 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

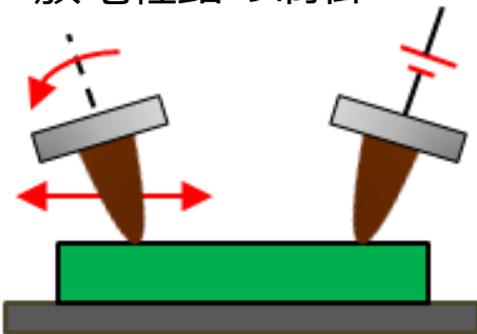
集合破碎的

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

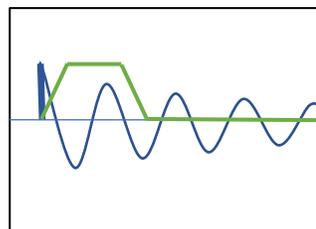
選択的な加熱  
選択的な反応  
選択的な剥離 を可能に！  
選択的な破壊

## 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

# LiB正極材の選択的な電気的分離



液系LiBセル



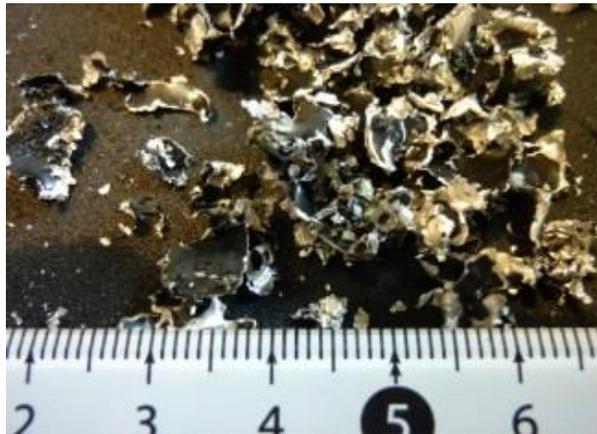
正極材捲回体



## 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



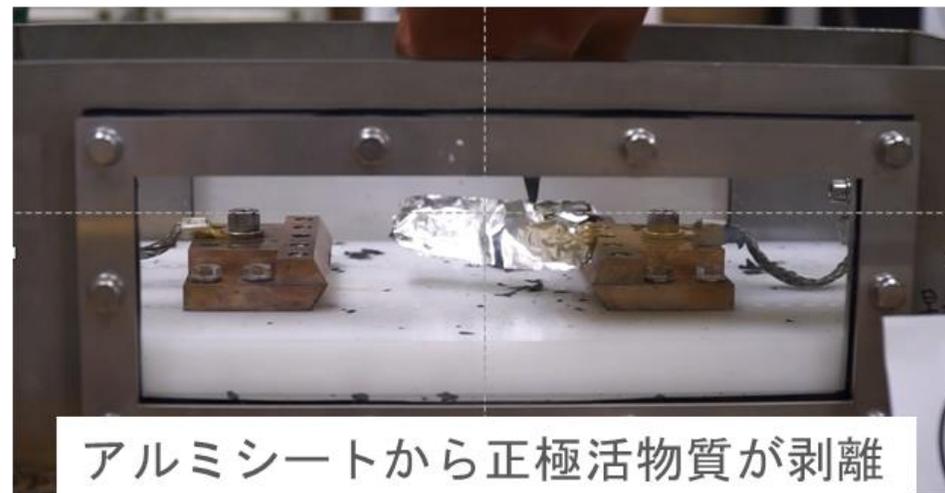
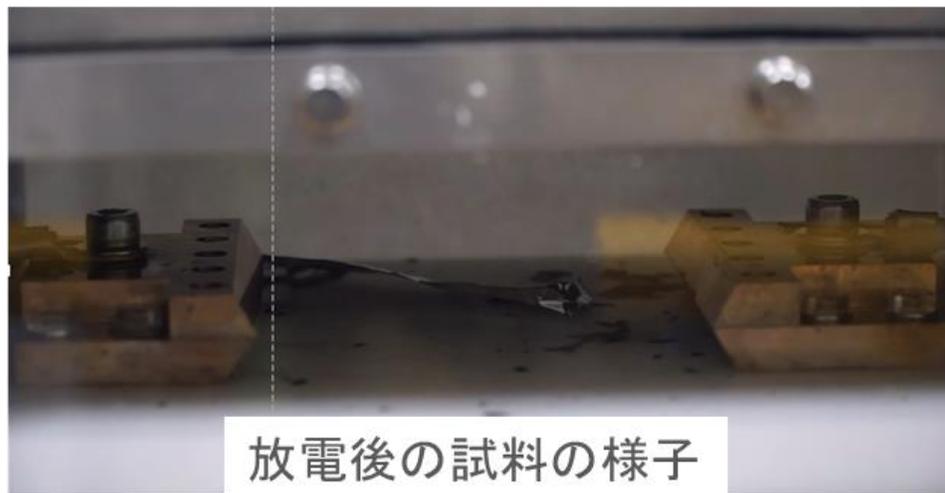
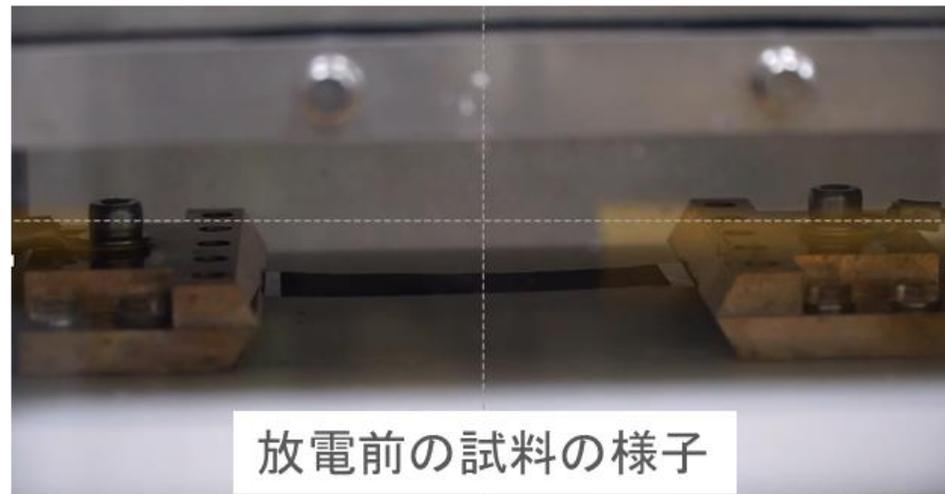
Al集電箔



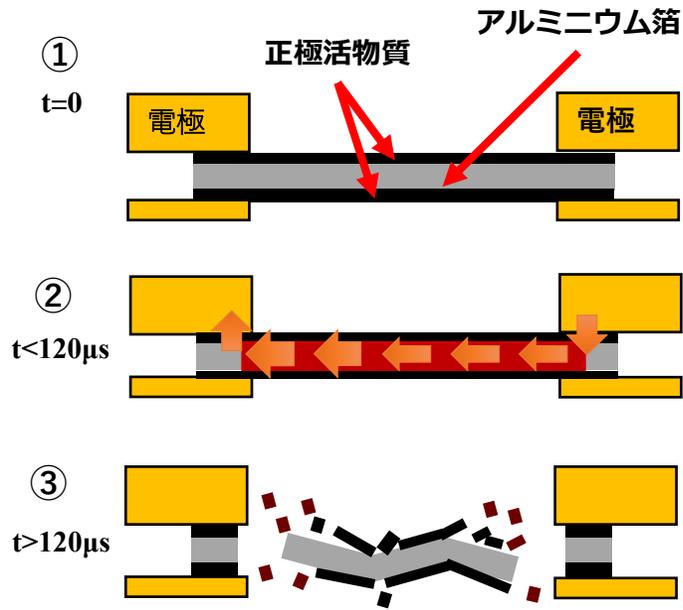
正極活物質粒子層

# 新規電気パルス法による正極活物質分離

一回の放電でLiB正極材のアルミシートから正極活物質の剥離が可能である



# アルミ箔から正極活物質が剥離する原理

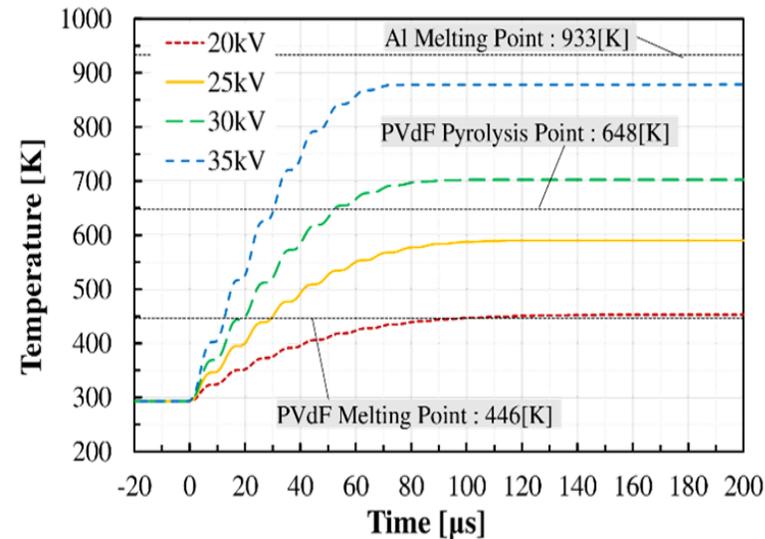
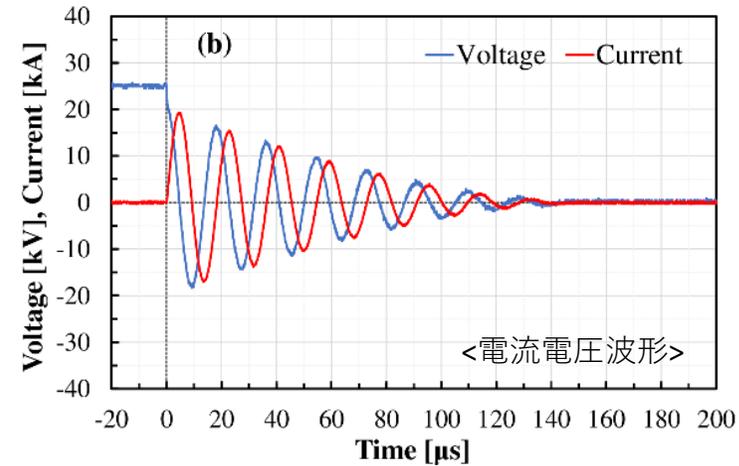


①高電圧（25kV）を印加

②大電流（19kA）でアルミ箔への通電によりアルミニウムの温度が有機接着剤(PVdF)の分解温度 $375^{\circ}\text{C}$ 以上に上昇

よって、アルミ箔表面付近のPVdFが分解され、アルミ箔と正極活物質層の界面で接着力が失われる

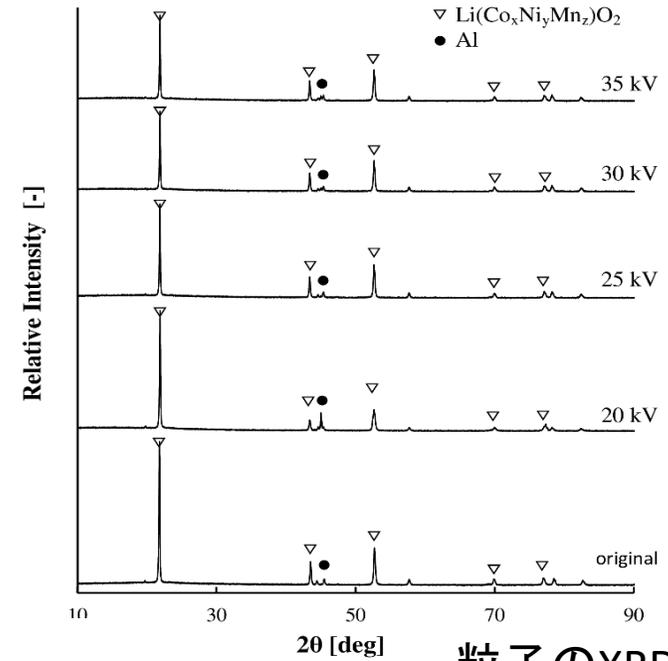
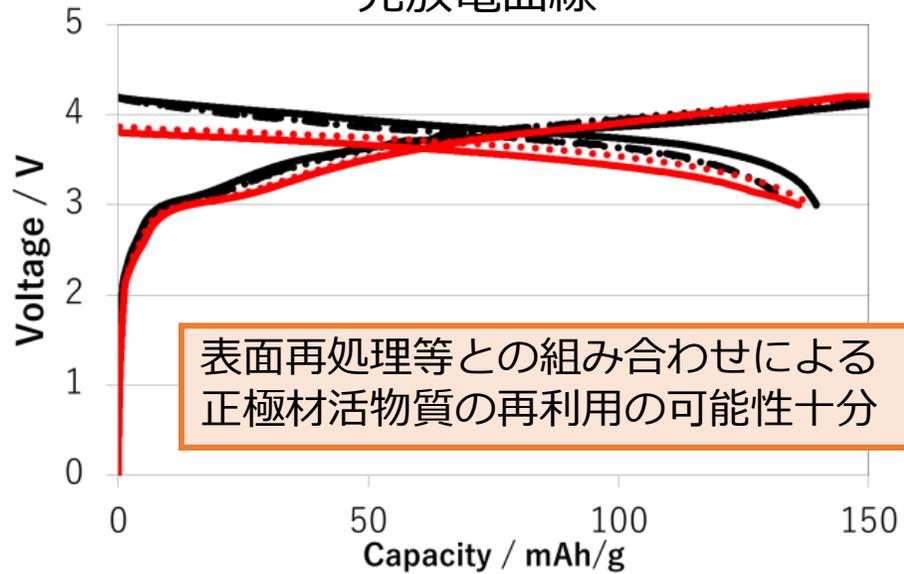
③アルミ箔からの正極活物質層の剥離



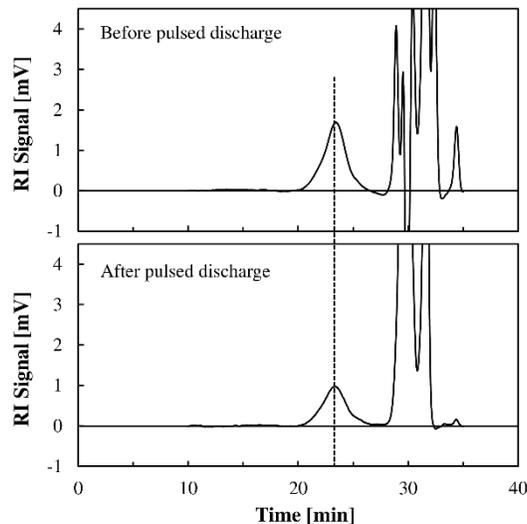
<電流電圧波形から算出した温度変化>

# 分離後の正極活物質粒子の特性

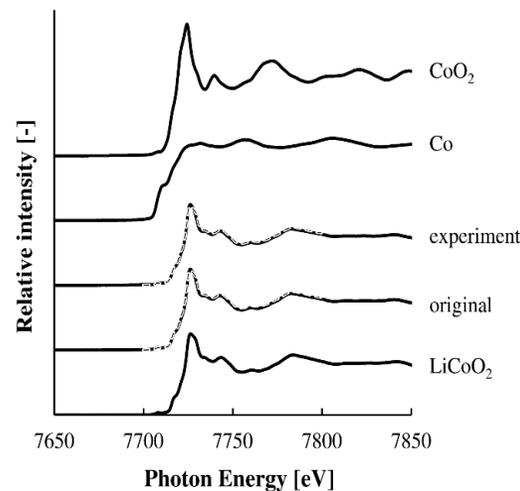
—充放電曲線—



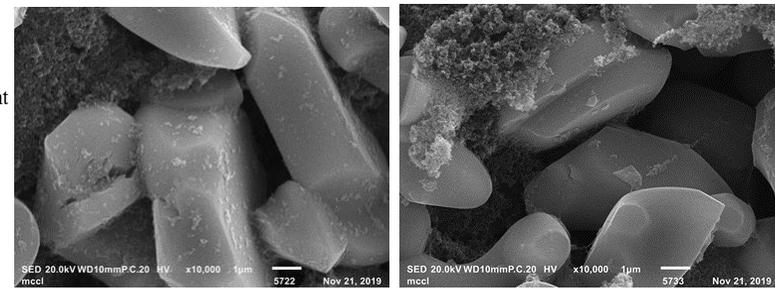
粒子のXRDパターン



バインダーのGPC分析



粒子のXAFSパターン

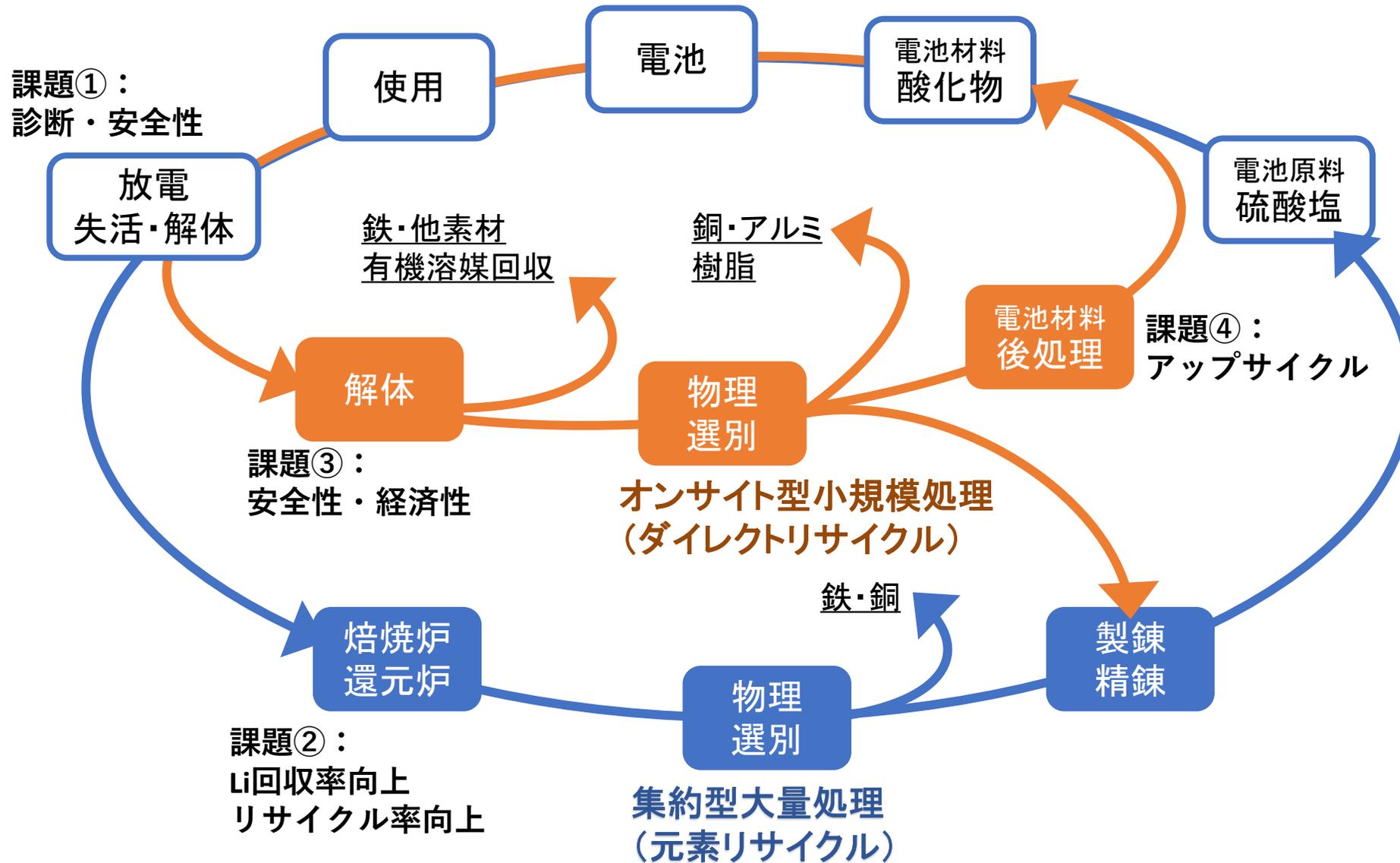


分離前

分離後

SEM像による粒子観察

# LiB正極材の資源循環の方向性とその課題



# リチウムイオン電池の新規循環ループの創成

## グリーンイノベーション基金事業／次世代蓄電池・次世代モーターの開発

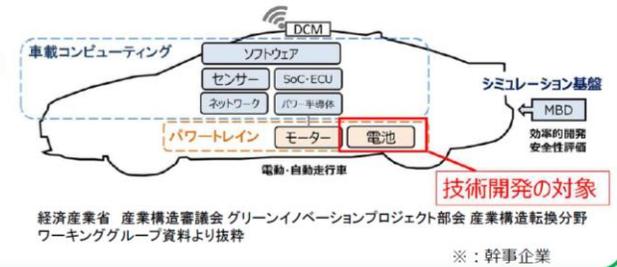
別紙2

### 研究開発項目1-1 高性能蓄電池・材料の研究開発、研究開発項目1-2 蓄電池のリサイクル関連技術開発

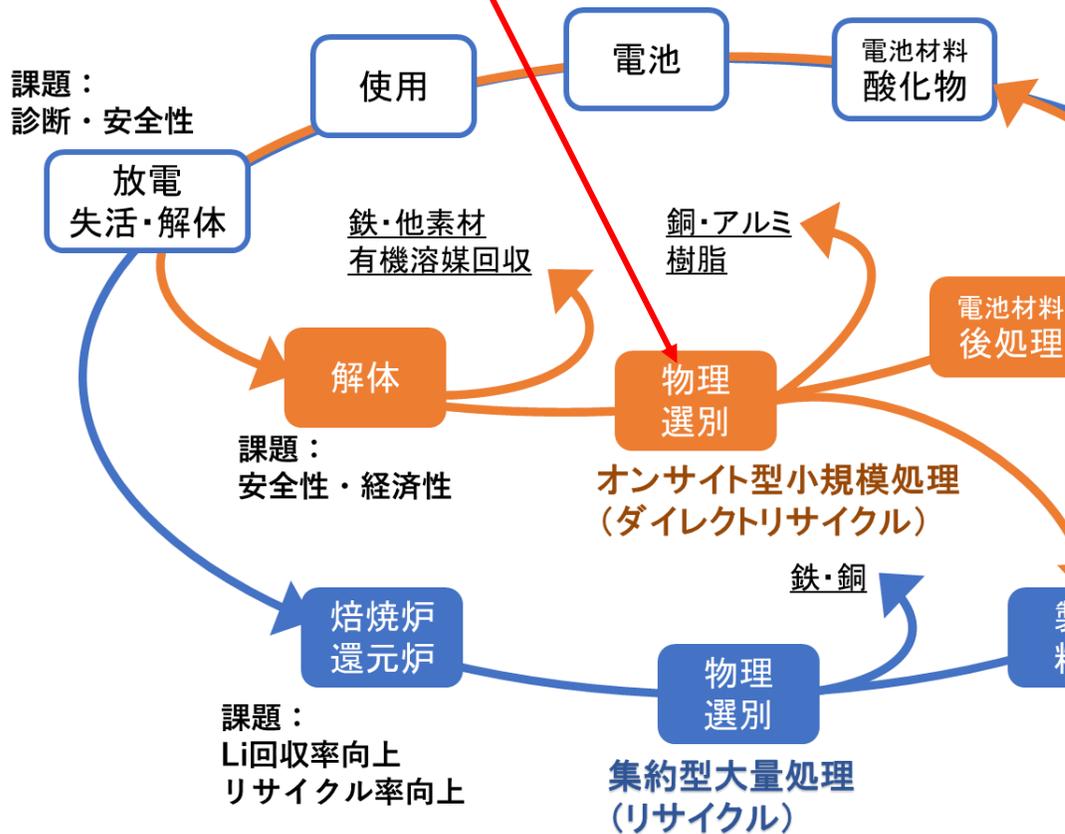
#### 事業の目的・概要

- 全固体電池などの**高性能蓄電池**やその**材料**の開発  
目標：航続距離などに影響するエネルギー密度が現在の2倍以上 など
  - 省資源材料**（コバルト（Co）や黒鉛など）や材料等の**低炭素製造プロセス**開発
  - 低コスト、高品質なレアメタル回収を実現する**蓄電池リサイクル技術**の開発  
目標：リチウム70%、ニッケル95%、コバルト95%の回収
- 事業規模：約2,132億円  
 支援規模\*：上限1,205億円  
 \*インセンティブ額を含む。今後ステージゲートなどで事業進捗などに応じて変更の可能性あり。
- 事業期間：2022年度～2030年度  
 補助率など：2/3補助→1/2補助→1/3補助（インセンティブ率は10%）

#### 事業イメージ



電気パルス法の適用が期待されている



#### 高性能蓄電池（研究開発項目1-1）

- ◆全固体電池の早期実用化  
様々な技術アプローチで開発加速。有望技術の見極めを進めていく。
- ◆**本田技術研究所**：本邦初の全固体電池実用化に向け、将来の材料進化にある全固体電池量産を目指す。
- ◆**日産自動車(株)**：全固体電池の特徴を最大限に活かすための電池設計、高品質量産に挑戦。
- ◆**(株)GSユアサ**：独自開発の高性能固体電解質材料と表面加工技術を活用し、多様な正極材・負極材の組み合わせで性能向上を目指す。
- ◆**液系LIBや樹脂電池の高性能化**  
◆**パナソニック エナジー(株)**：液系LIBの更なる高容量化。Coフリー正極活用や高容量充満バック電池設計。
- ◆**マツダ(株)**：高入出力・高容量を両立する液系LIB開発。Coフリー正極・高性能負極活用。
- ◆**APB(株)**：正極材、負極材、樹脂の性能向上等を通じ、高容量な樹脂電池を開発。

#### 蓄電池材料（研究開発項目1-1）

- ◆次世代蓄電池の材料技術の開発  
正極、負極、電解質など、全固体電池を含む高性能リチウムイオン電池の材料技術の開発を支援。
- ◆**住友金属鉱山(株)**：高性能正極材料  
高容量材料組成検討・粒子特性制御、表面加工技術、製造段階のCO<sub>2</sub>削減を可能とする新規製造プロセス開発
- ◆**(株)アルバック**：リチウム金属負極生産技術  
全固体電池を見据え、独自の真空蒸着技術を活用した薄膜リチウム金属負極の生産技術開発
- ◆**出光興産(株)**：固体電解質  
結晶形状の制御された固体電解質の大規模製造技術開発
- ◆**(株)大阪ソーダ**：超高イオン伝導性ポリマー  
次世代負極（シリコン、リチウム金属）のデメリットである体積変化を緩和する全固体電池用超高イオン伝導性ポリマーを開発

#### リサイクル技術（研究開発項目1-2）

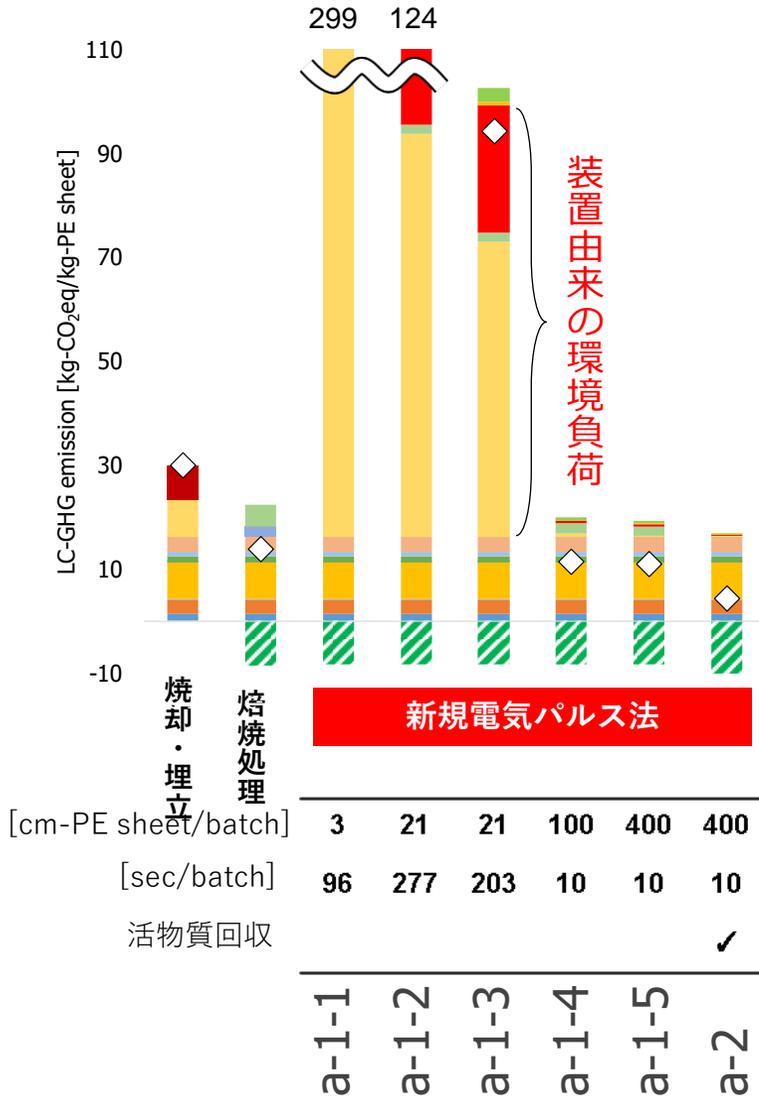
- ◆レアメタル回収技術の高度化研究  
乾式処理<sup>(1)</sup>や湿式処理<sup>(2)</sup>、ダイレクトリサイクル<sup>(3)</sup>など、多様なアプローチでリサイクル技術を高度化。
- (1) 熱処理による金属分離
- (2) 水溶液中で処理による金属分離
- (3) 回収した材料を金属ごとに分離することなく、直接電池材料に戻す技術
- ◆**住友金属鉱山(株)**※・**関東電化工業(株)**  
：乾式・湿式を組み合わせた独自の製錬技術を開発し、高回収率・低コスト化を実現
- ◆**JX金属(株)**：無害化前処理技術並びに湿式処理による金属回収技術の高度化
- ◆**(株)JERA**※・**住友化学(株)**：非焙焼方式の材料分離回収技術および回収した正極材のダイレクトリサイクル、アップサイクルの研究開発
- ◆**日産自動車(株)**：特定電極のみをリサイクルすることで、電池ライフサイクルでのCO<sub>2</sub>排出量を低減する技術開発

/https://www.nedo.go.jp/content/100945458.pdf

# LiB-LCA結果

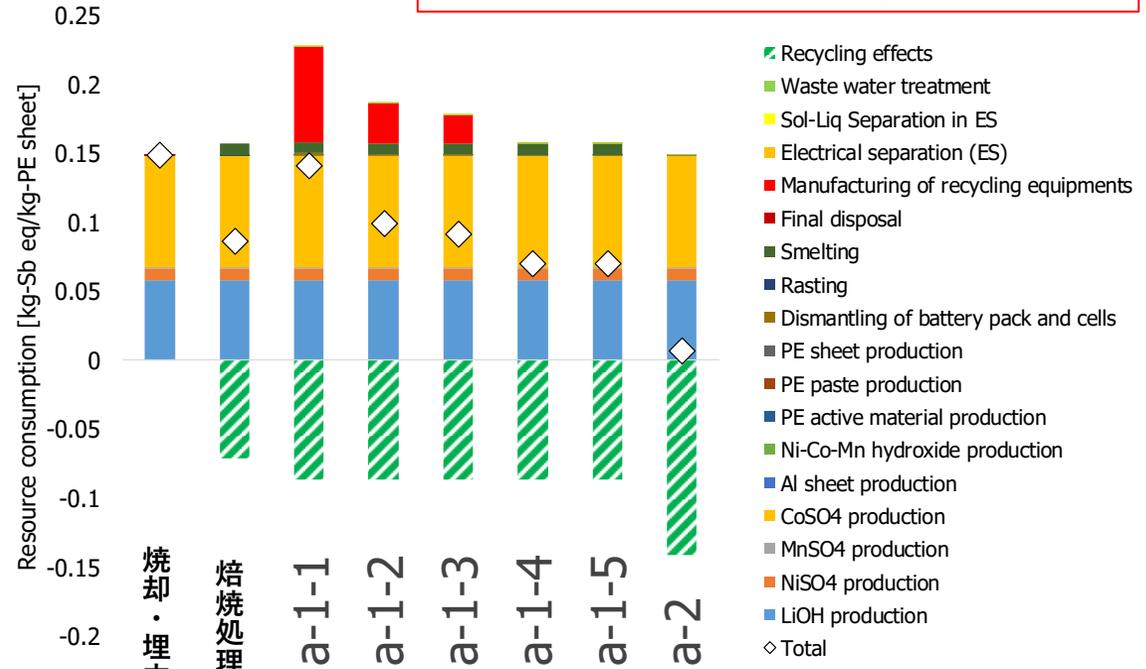
東京大学・菊池康紀先生提供

## 気候変動



## 資源消費

LCAにおいて、資源消費インパクトはアンチモンをベースに算定(kg-Sbeq)



- 活物質回収によって環境影響が低減
- 処理条件による環境影響が変動

### 装置由来の環境負荷

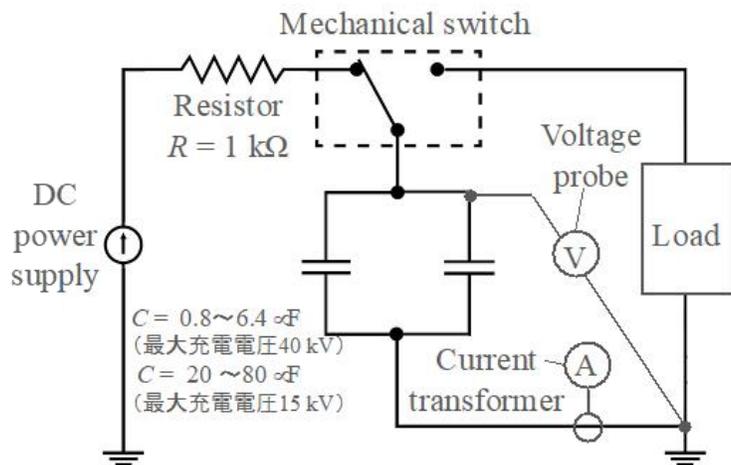
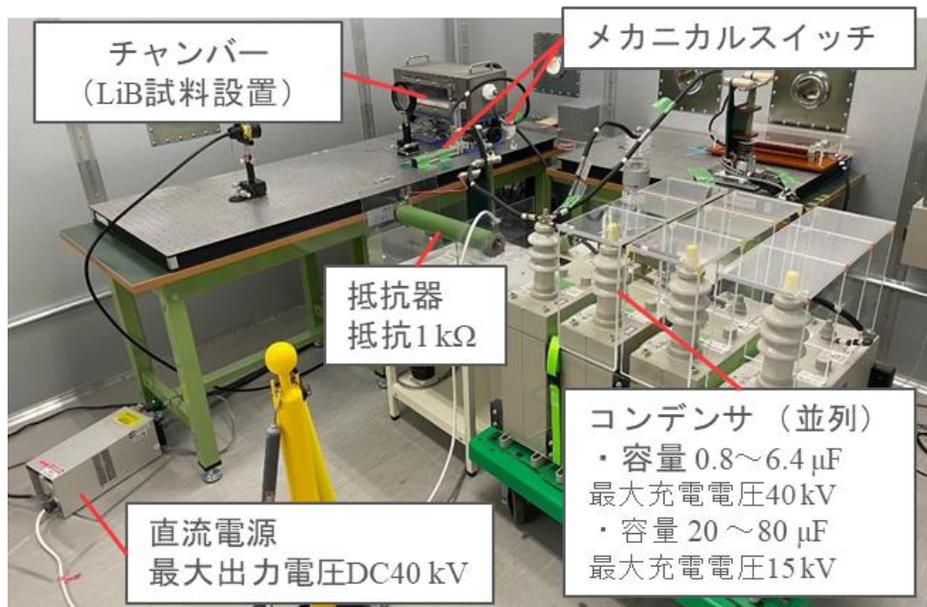
$$= (\text{装置由来} + \text{稼働由来}) / (\text{電気パルス処理量})$$

$$\text{電気パルス処理量} \propto \text{単位処理量 [cm-PE sheet/batch]}$$

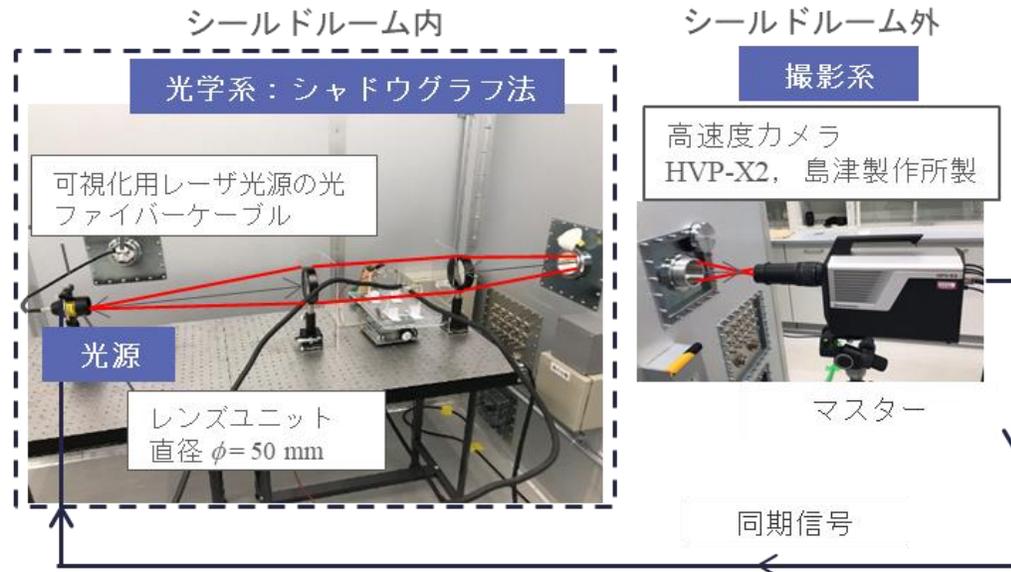
$$\propto 1 / \text{単位処理時間 [sec/batch]}$$

# 新規電気パルス法の技術開発

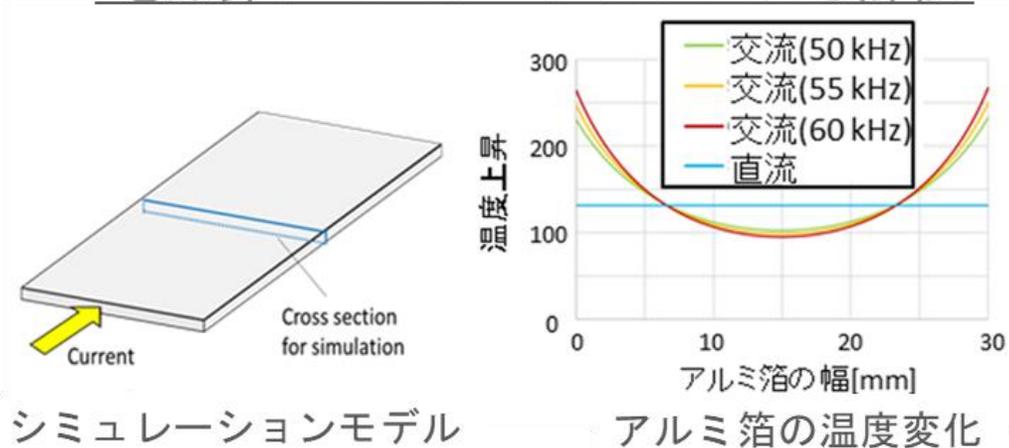
## 電気パルス装置の外観・回路図



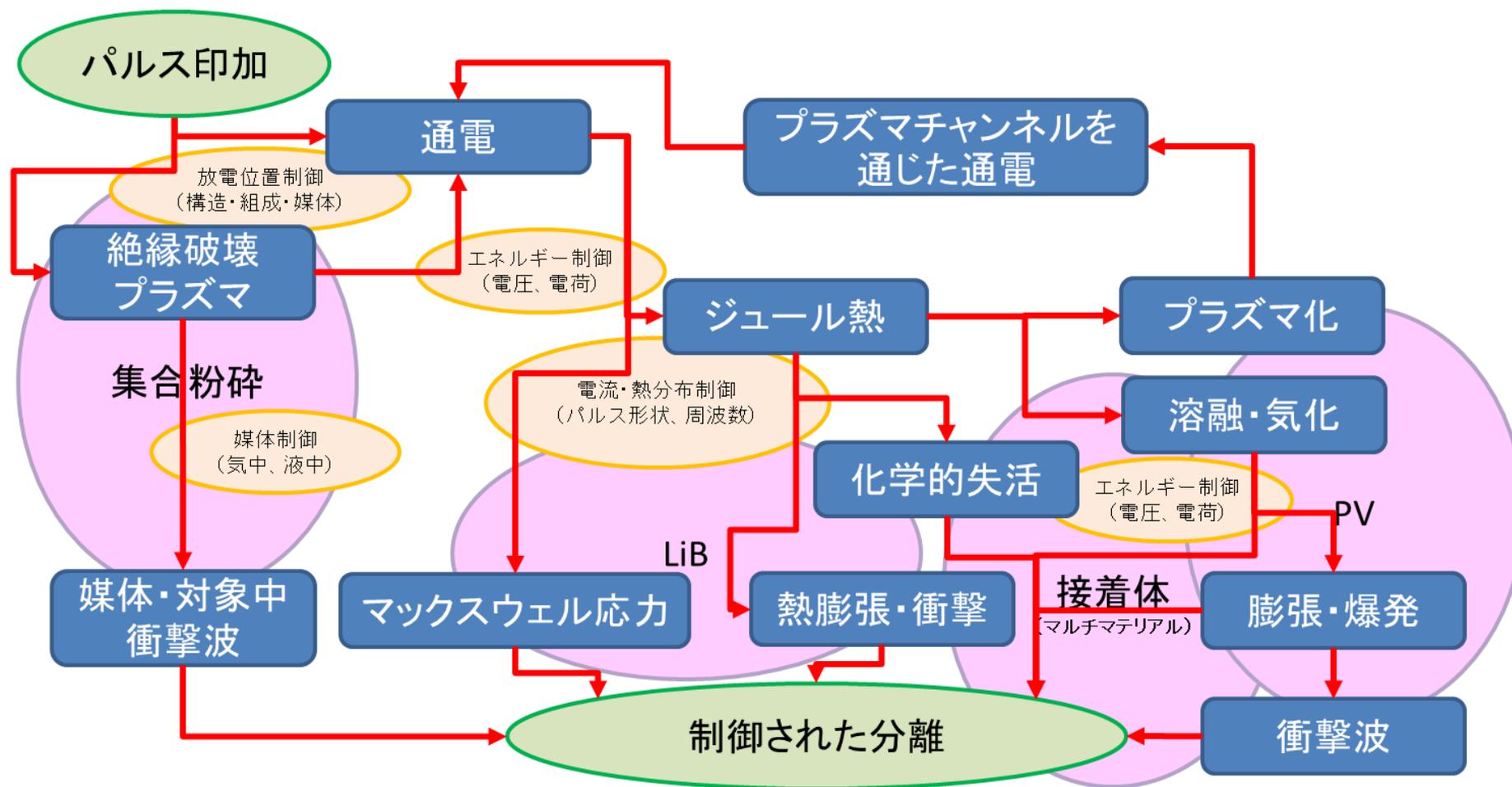
## 光学的可視化手法



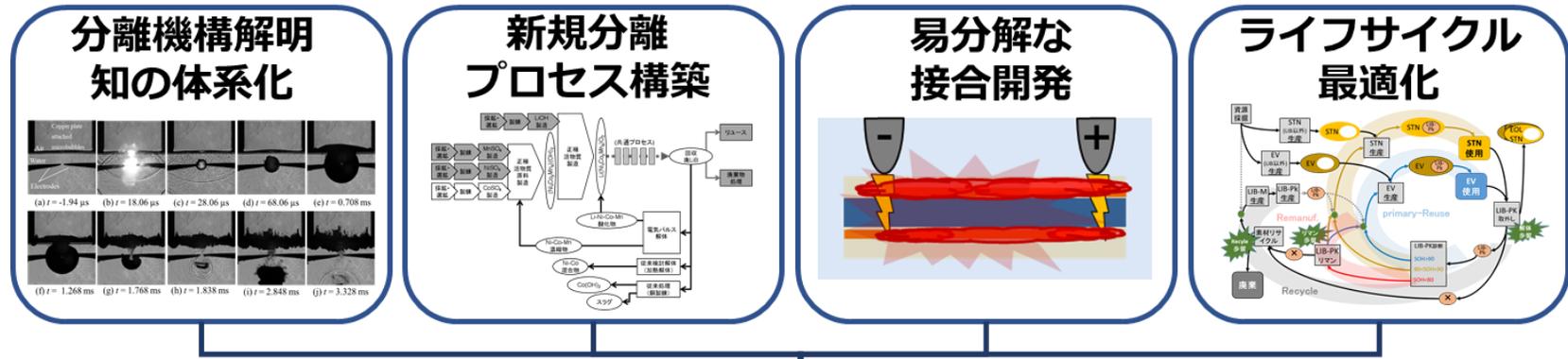
## 電磁界シミュレーションによる評価



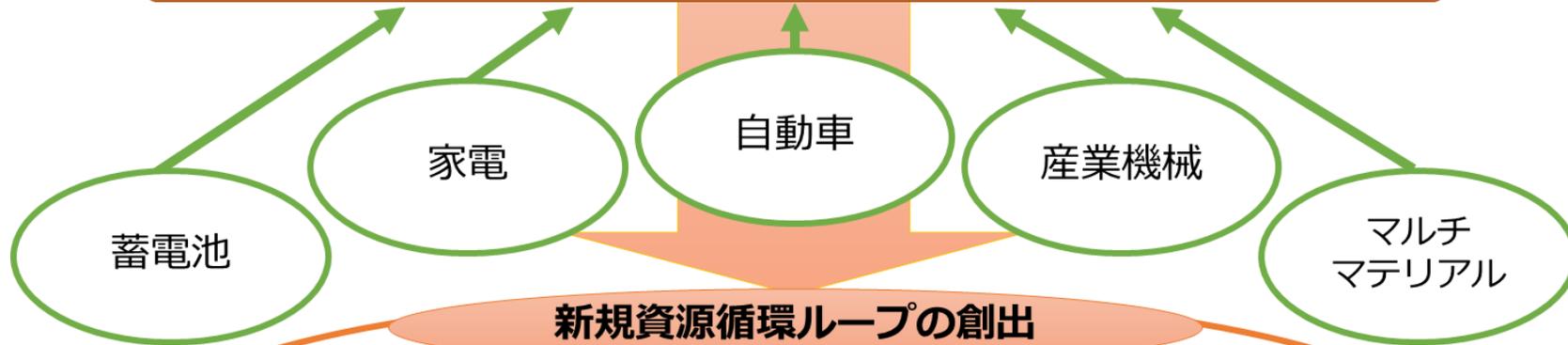
# 電気パルス刺激による分離現象への寄与



# JST未来社会創造事業： 新たな資源循環サイクルを可能とするものづくりプロセスの革新



『新規電気パルス法』を主軸とした新規分離技術の確立



新規資源循環ループの創出

元素回収のみならず、機能の再利用を可能に  
あらゆるマルチマテリアルの分離を可能に  
易分解な製造への提案

『資源循環型社会の構築』

軽量化・低炭素化を目的とした未来型製品開発と資源循環を両立する製造の実現



# Circular Value Chain Consortium

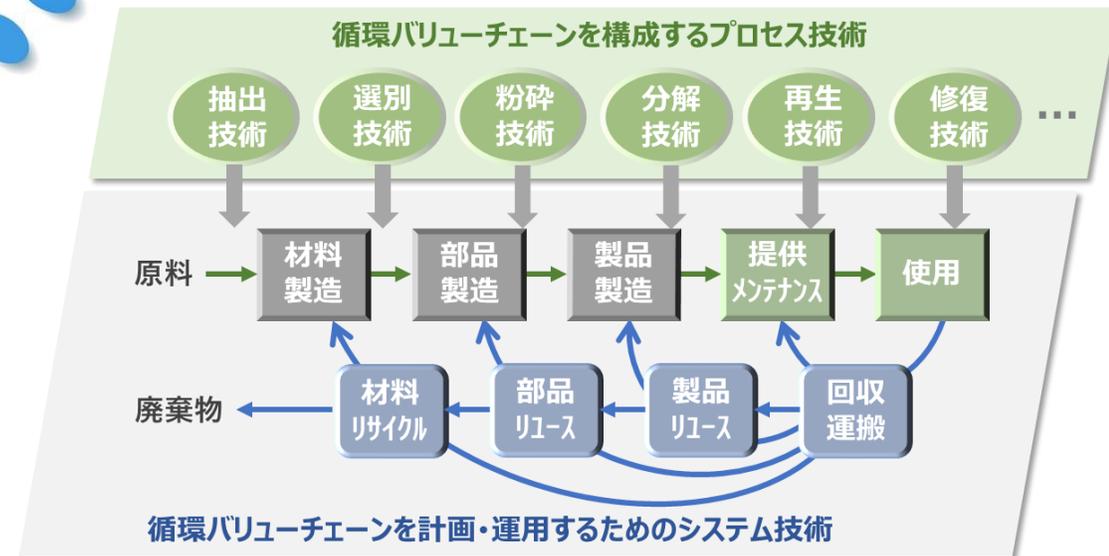
循環バリューチェーンコンソーシアム

2022年7月設立

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

<https://www.waseda.jp/inst/oi/news/1389>



# 謝辞



早稲田大学  
WASEDA University

所千晴研究室の皆様  
オープンイノベーション戦略研究機構  
持続的環境エネルギー社会共創研究機構  
理工学術院総合研究所



熊本大学  
Kumamoto University

熊本大学 浪平 隆男 准教授  
浪平隆男研究室の皆様



東京大学  
THE UNIVERSITY OF TOKYO

東京大学 菊池 康紀 准教授  
菊池康紀研究室の皆様

- 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」
- JSPS基盤研究B「電気パルスを用いた高選択性分離技術確立のための機構解明」
- GTIE 2022年度GAPファンド「新規電気パルス法によるリチウムイオン電池の新規循環バリューチェーン創成」
- グリーンイノベーション基金事業／次世代蓄電池・次世代モーターの開発
- その他各種共同研究