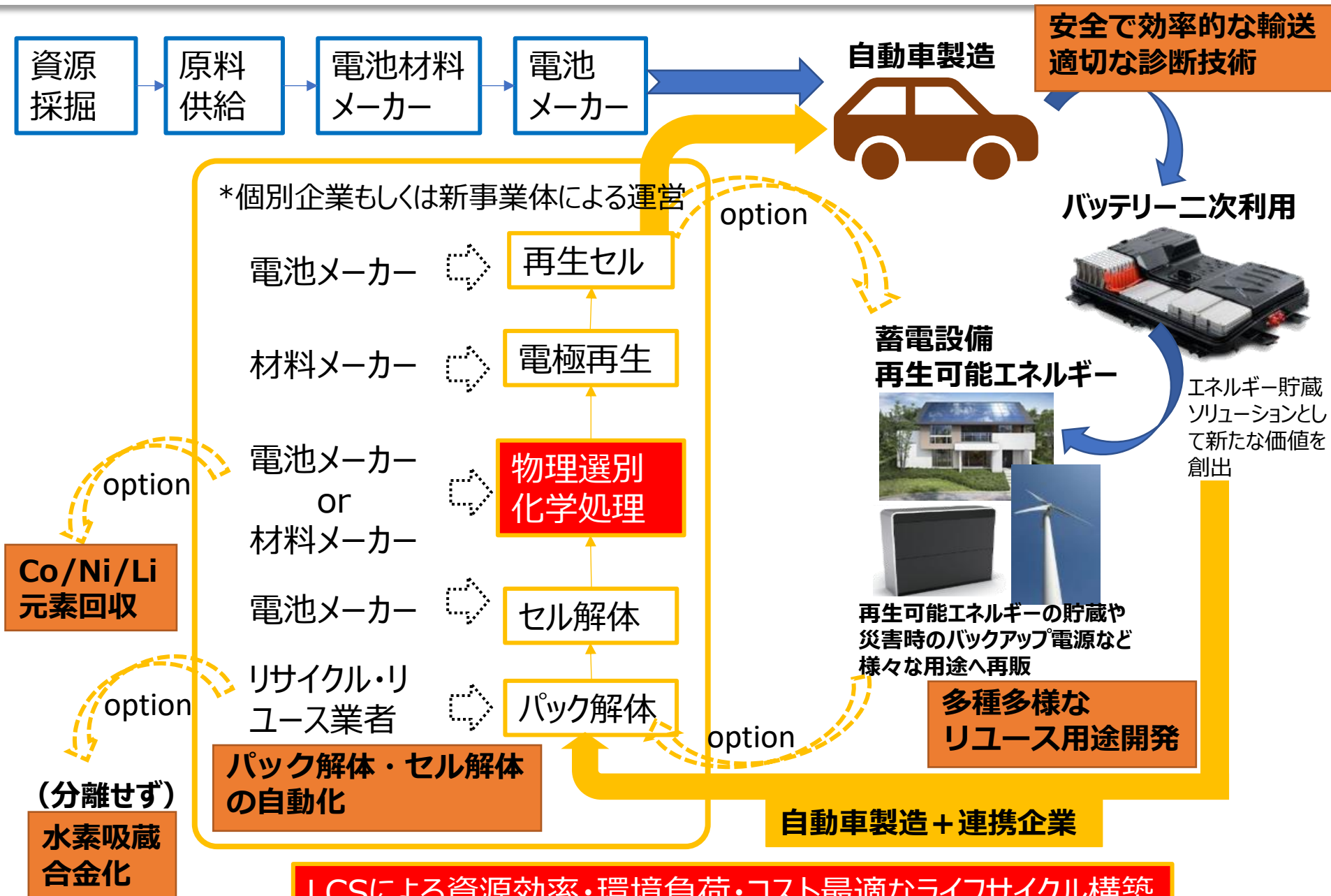


リ・バッテリー・アカデミー
キックオフシンポジウム
2026年8月3日(月)

早稲田大学 理工学術院 所 千晴 研究室
蓄電池リサイクル研究のご紹介
ー 資源循環型社会の構築に向けた前処理・分離技術の開発 ー

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

リチウムイオン電池のライフサイクル



LiBのリサイクルフロー：蓄電池リサイクルの鍵を握る「前処理」の高度化

解体



解体手順	時間
①ネジ外し	2分40秒
②スナップフィット外し	30秒
③ワイヤーハーネス切り	1分10秒
④姿勢制御	2分40秒
⑤絶縁処理	1分20秒
⑥部品外し後、箱への投げ入れ	2分50秒
⑦その他部品外し（制御盤/コンタクタ等）	50秒
合計	約12分

前処理

ブラックマス処理

正極活物質

浸出

不純物除去

マンガン抽出

炭酸塩化

炭酸マンガン

コバルト抽出

硫酸塩化

硫酸コバルト

ニッケル抽出

硫酸塩化

硫酸ニッケル

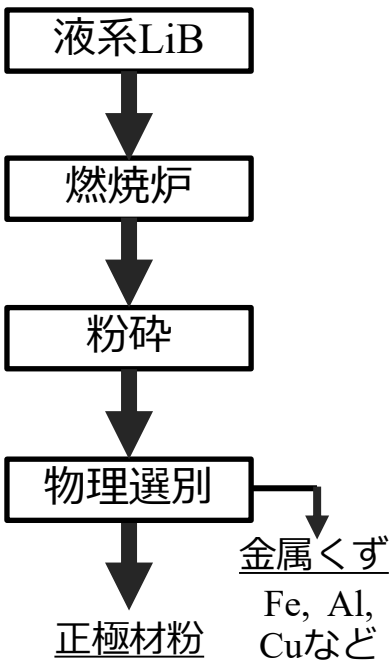
リチウム溶液

炭酸塩化

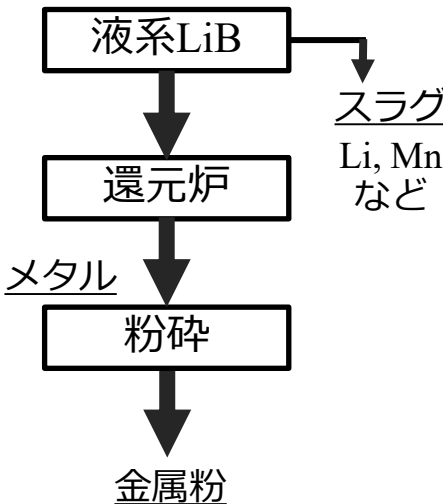
炭酸リチウム

安全性
分離性
低コスト性 が重要

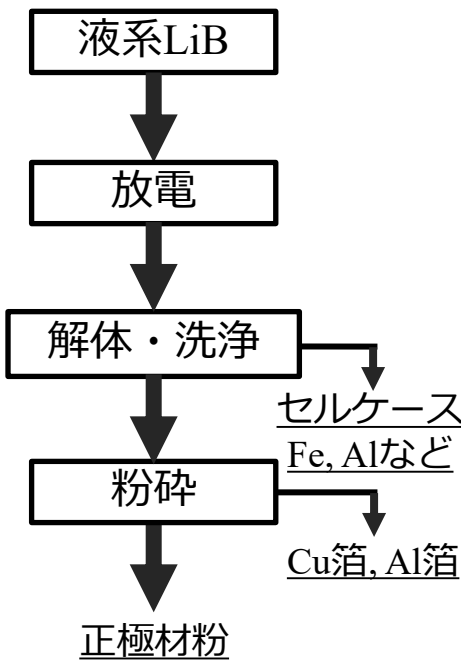
(ア)：焼却・加熱炉の利用



(イ)：還元炉の利用



(ウ)：湿式処理の利用



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

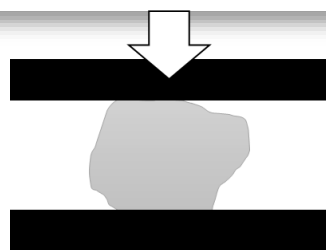


自動車のシュレッダー処理の様子

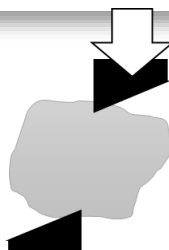


家電の人力解体の様子

粉碎の種類：粉碎のスマート化



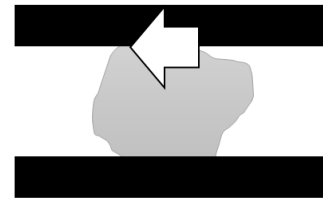
圧縮
(くるみわり)
粗砕・中砕



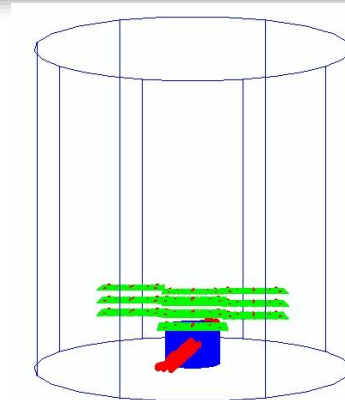
衝撃
(かなづち)
粗砕・中砕・微粉碎



せん断
(はさみ)
中砕・微粉碎



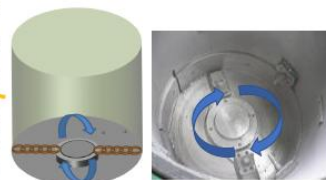
摩擦
(やすり)
微粉碎・超微粉碎



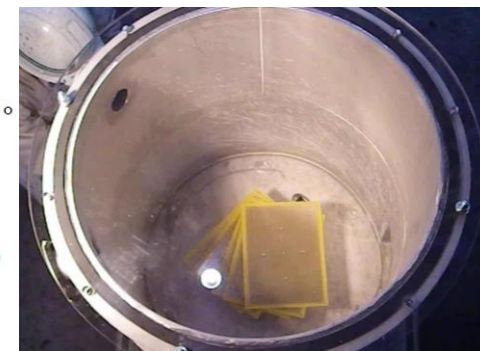
家電由来の基板からの部品剥離



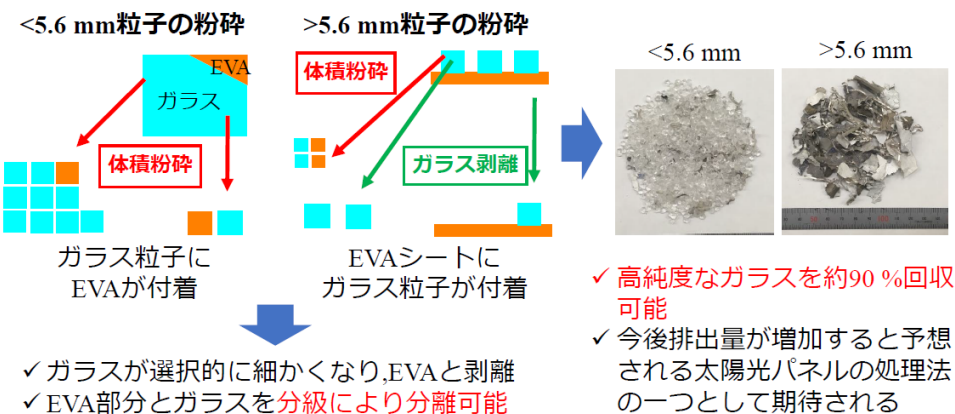
ドラム内部構造



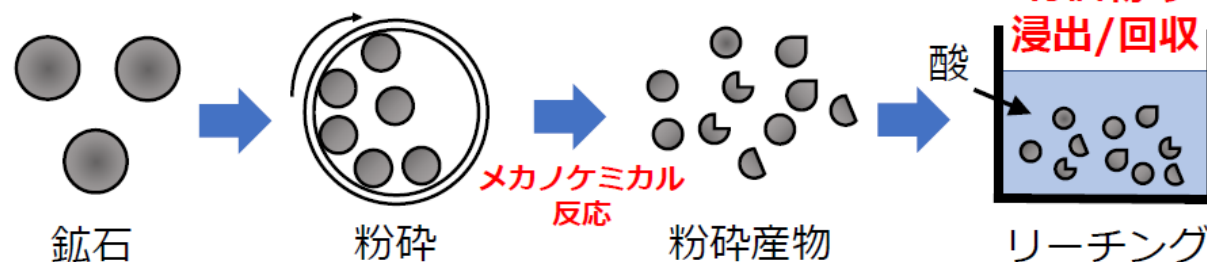
- ✓ ドラム型衝撃破砕機により衝撃を加えることで製品からの基板脱離と部品剥離を達成。
- ✓ 部品は種類によって、比重選別・静电選別・磁選等で選別可能。
- ✓ 部品回収によりタンタル等のレアメタル元素を濃縮可能。



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



粒子法シミュレーションによる粉砕の高度化



- 3 μm の壁
- 重力支配から付着力支配へ

超微粉砕

- ・媒体攪拌ミル
- ・遊星ミル
- ・ビーズミル

微粉砕

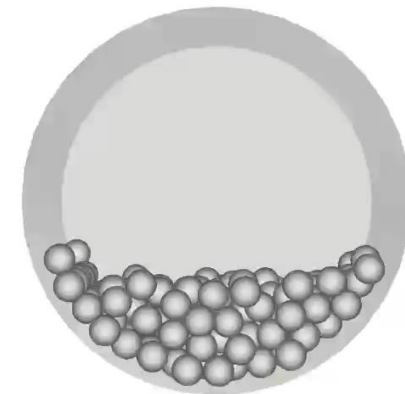
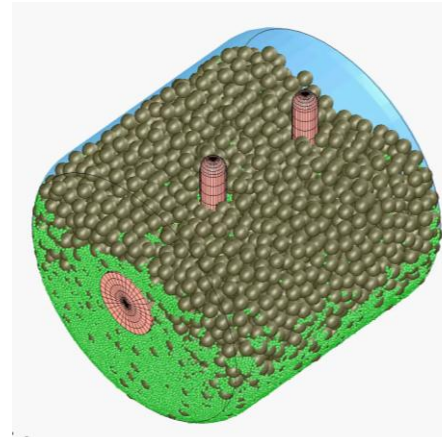
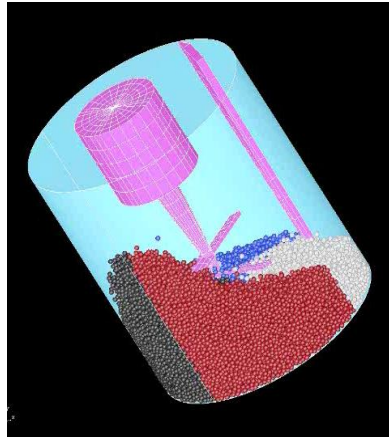
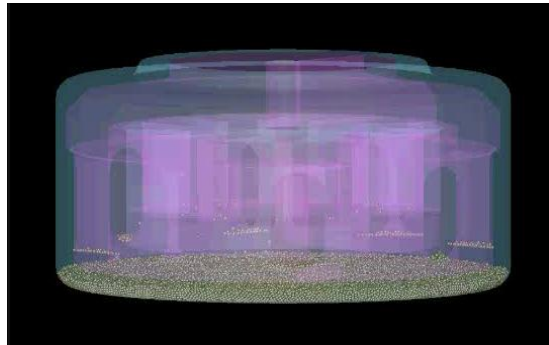
- ・コーンミル
- ・ボールミル
- ・ピンミル
- ・振動ミル
- ・回転ミル
- ・高速攪拌ミル
- ・ジェットミル

中砕

- ・コーンクラッシャー
- ・ロールクラッシャー
- ・ハンマーミル
- ・カッターミル
- ・(半)自生粉砕ミル
- ・スタンプミル
- ・リングミル

粗砕

- ・ジョークラッシャー
- ・ジャイレトリクラッシャー
- ・インパクトクラッシャー
- ・チェーンクラッシャー



電磁誘導加熱（IH）による選択的分離

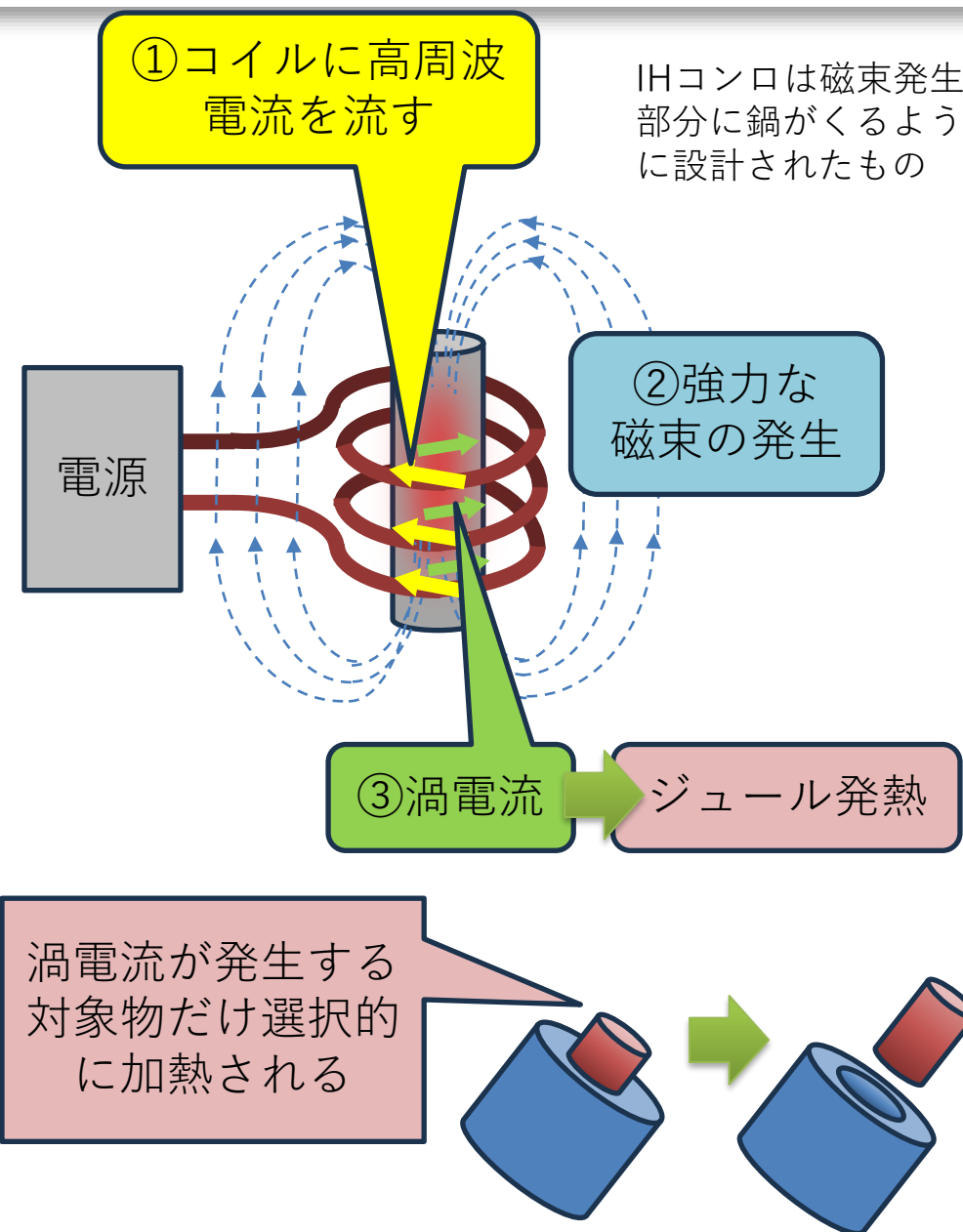
電磁誘導加熱による非接触での局所加熱

金属部分を局所的に加熱

- ⇒ 分離が困難な金属－樹脂界面の剥離に有効
- ⇒ 不要な加熱をしないことで消費エネルギーを削減
- ⇒ 放射・熱伝導より迅速な加熱

非接触加熱が可能

- ⇒ 複雑な形状にも対応可能
- ⇒ 無人化や自動化へ向けた設計が容易

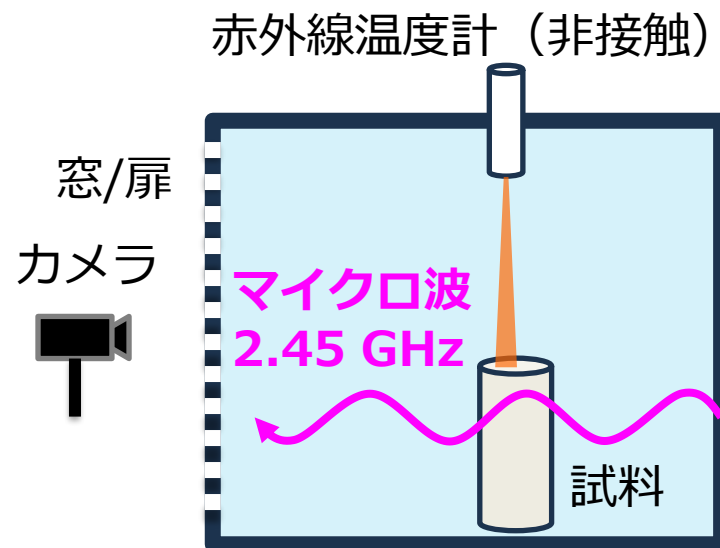


マイクロ波照射による選択的分離

装置：μReactor Ex

マグネトロン：1000 W × 1機、背面

内寸280W × 280D × 250H

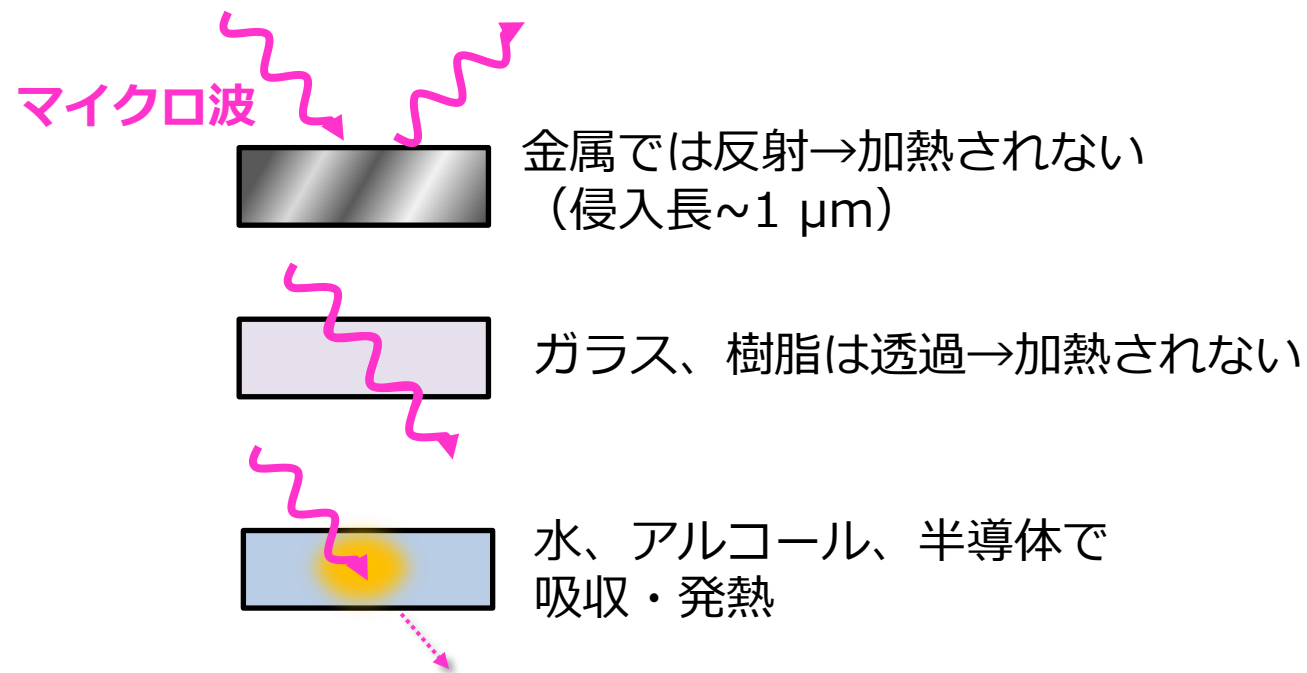


マイクロ波加熱の式

$$Q = \frac{1}{2} \sigma |E|^2 + \frac{1}{2} \omega \varepsilon'' |E|^2 + \frac{1}{2} \omega \mu'' |B|^2$$

Q : 加熱率 E : 電界 B : 磁界 ω : 角周波数

σ : 導電率 ε'' : 損失誘電率 μ'' : 損失透磁率

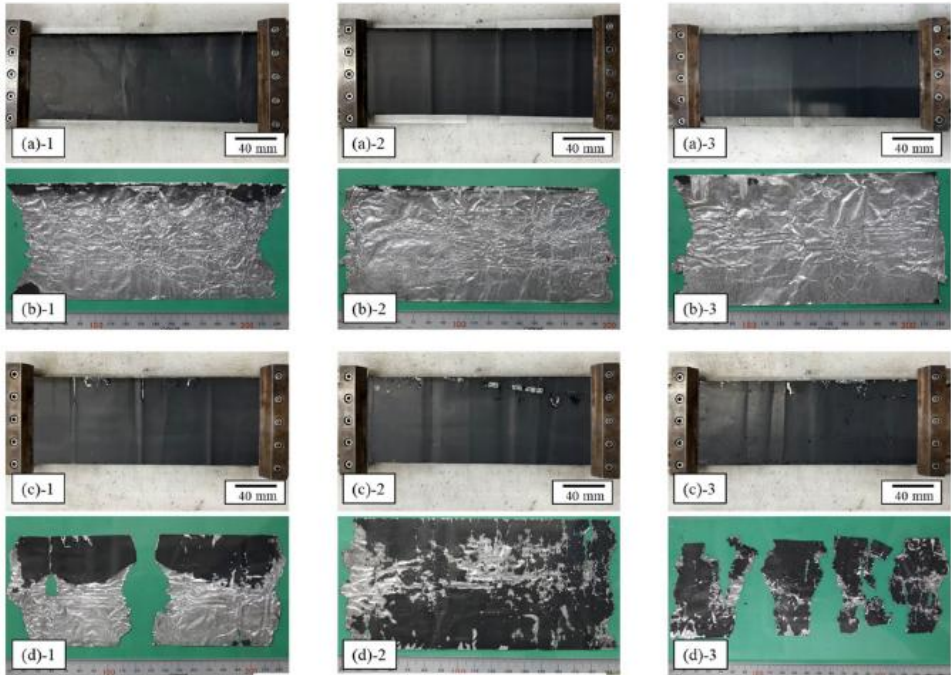


導電率・損失誘電率が高い物質を選択的に加熱可能

Localized degradation influences the separation of cathode active materials from aluminum foil by direct electrical pulsed discharge

Chiharu Tokoro^{1,2} · Takatoshi Kurihara³ · Asako Narita¹ · Taketoshi Koita¹

Received: 4 February 2025 / Accepted: 27 May 2025 / Published online: 11 June 2025
© The Author(s) 2025



Research Paper

Primer coatings enhance the separation of cathode active materials from lithium-ion battery cathode sheets during direct electrical pulsed discharge

Chiharu Tokoro^{a,b,*}, Moe Nakahara^c, Taketoshi Koita^a, Nobuhiro Tsuji^d

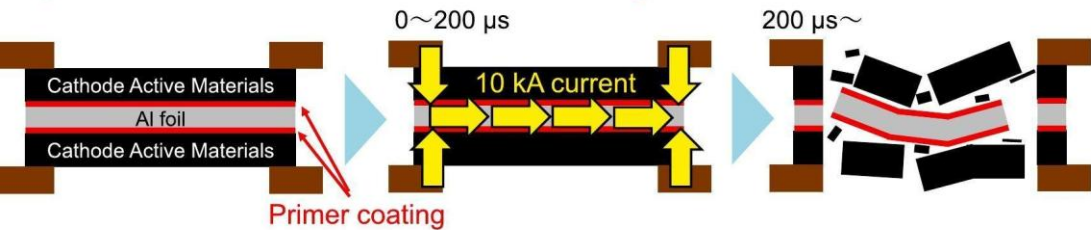
^a Faculty of Science and Engineering, Waseda University, Tokyo 169-8555, Japan

^b Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan

^c Graduate School of Creative Science and Engineering, Waseda University, Tokyo 169-8555, Japan

^d R&D Center, Nippon Graphite Industries, Co., Ltd., 520-2151, Japan

Experimental Methods : Pulsed Discharge



Results

	Without primer coating	With primer coating A	With primer coating B
Input energy [J/mm ³]	2.0	1.7	1.1
Delamination rate [%]	99	93	100
Fragmentation rate [%]	37	8.0	4.4

Conclusions

Primer coating determine the feasibility and efficiency of spent LiBs recycling.

Separation mechanism;

- Joule heating which caused adhesive deactivation
- Plasma expansion
- Horizontal and bending thermal stress

よりロバストな処理技術開発に向けて (粉体プロセッシングによる電気パルス後処理)

JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN
2025, VOL. 58, NO. 1, 2495820
<https://doi.org/10.1080/00219592.2025.2495820>



RESEARCH ARTICLE

OPEN ACCESS Check for updates

Liberation of Nickel-Cobalt-Manganese-Based Active Materials from Cathode Composites by Dry Grinding Using a Calcium Oxide Grinding Aid

Kento Izumi^a, Yutaro Takaya^{b,c}, and Chiharu Tokoro^{b,c}

^aGraduate School of Creative Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555, Japan; ^bFaculty of Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555, Japan; ^cFaculty of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan

ABSTRACT

The demand for lithium-ion batteries (LIBs) is expected to increase with the expanding efforts in achieving net-zero emissions. Various recycling processes are being considered for the proper disposal of LIB waste. In recent years, direct recycling has been developed as an environmentally friendly and less expensive recycling process, whereby cathode active materials (CAMs) are recovered in their material form. In this study, a dried cathode slurry was used as a sample to investigate the liberation of CAMs by dry grinding using a calcium oxide (CaO) grinding aid, which was found to improve the grinding efficiency. The chemical and image analyses showed that CaO facilitated liberation because the CaO was adsorbed on the polyvinylidene difluoride binder and maintained the dispersibility and flowability of the ground material. A basic study was performed to confirm the possibility of direct recycling. As a result, the CaO grinding aid did not affect the crystallinity or the fraction of CAMs that could be broken. It was also shown that CaO can be separated from the fine fraction side by simple air sorting, and CaO could be partially removed by water washing, without leaching the critical transition metals.

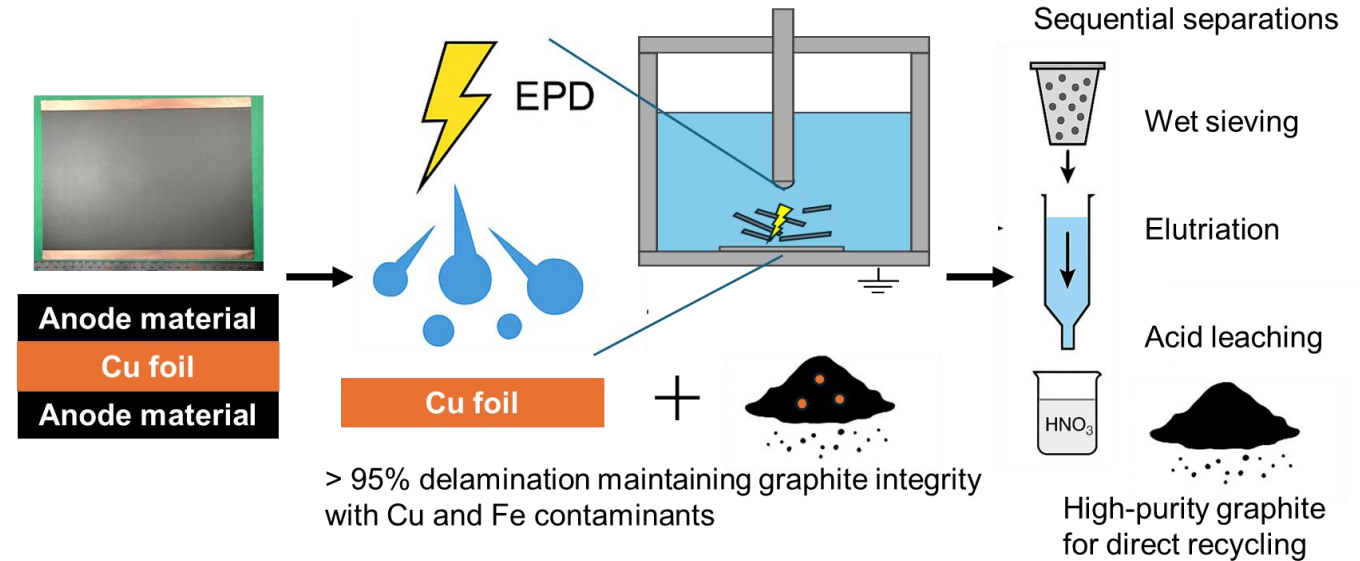
ARTICLE HISTORY

Received 11 February 2025
Accepted 16 April 2025

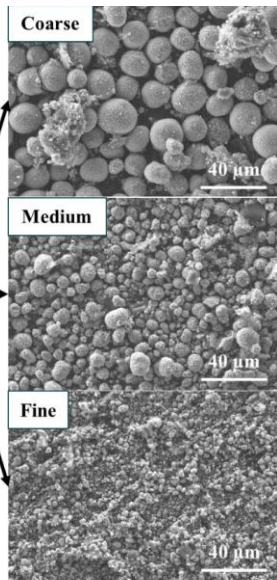
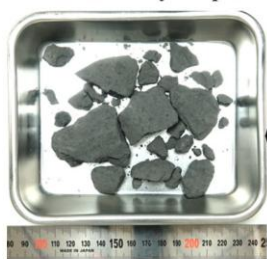
KEYWORDS

Lithium-ion battery; Direct recycling; Cathode active material; Grinding aid; Calcium oxide

Graphite Anode Delamination and Cu Removal via Electrical Pulsed Discharge (EPD)

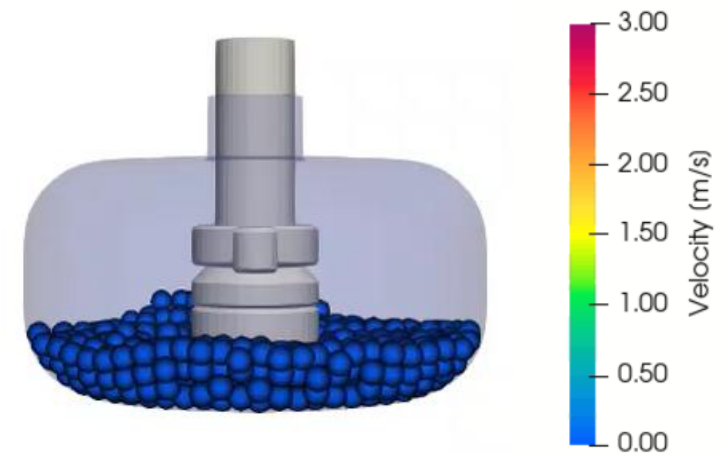
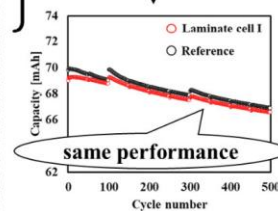


Manufacturing scrap of Cathode slurry sample



Making **laminated cell**

Charge-discharge test



焙焼条件は後段のrocessing効率化の前処理としても非常に重要



湿式処理：リチウムの選択的回収

Separation and Purification Technology 322 (2023) 124280

Contents lists available at ScienceDirect

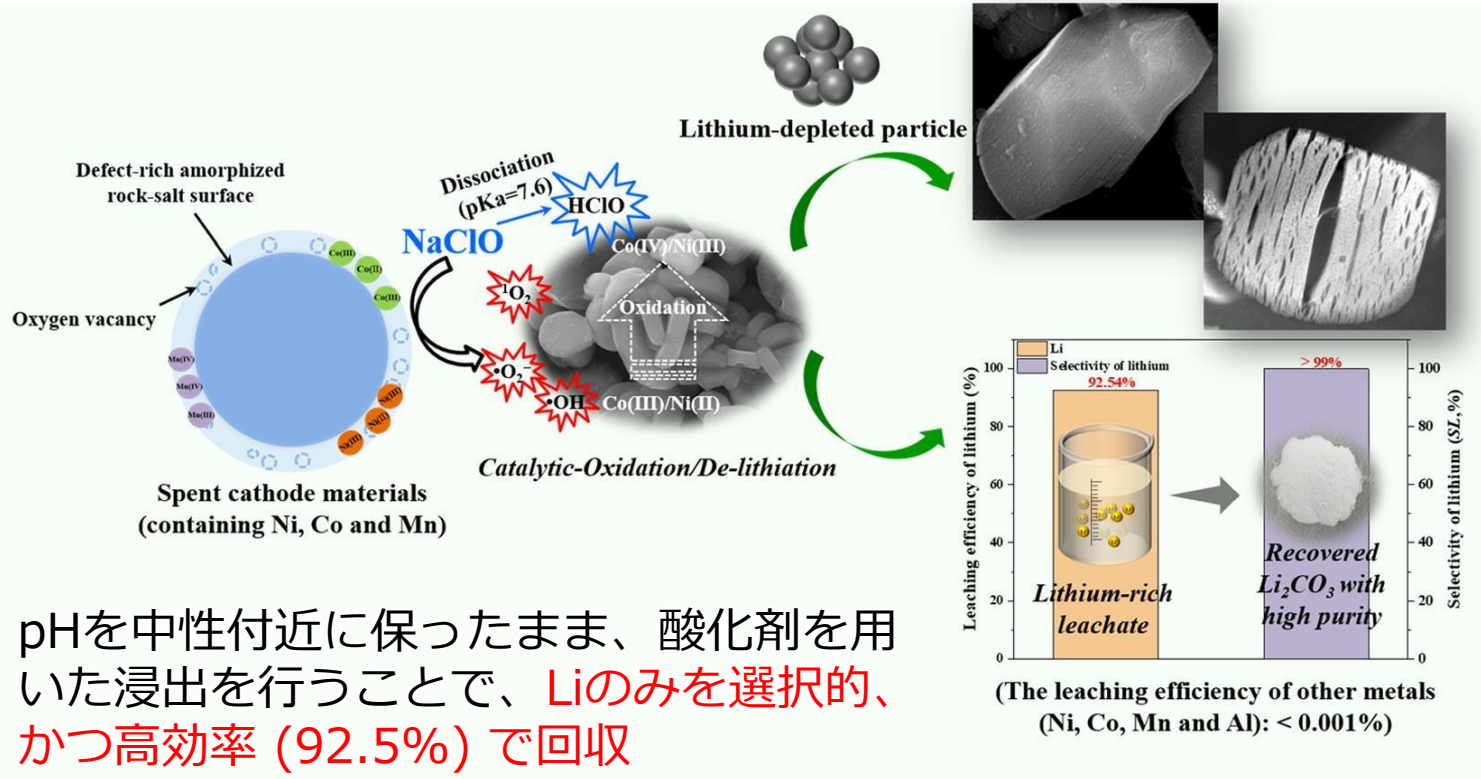
Separation and Purification Technology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/seppur

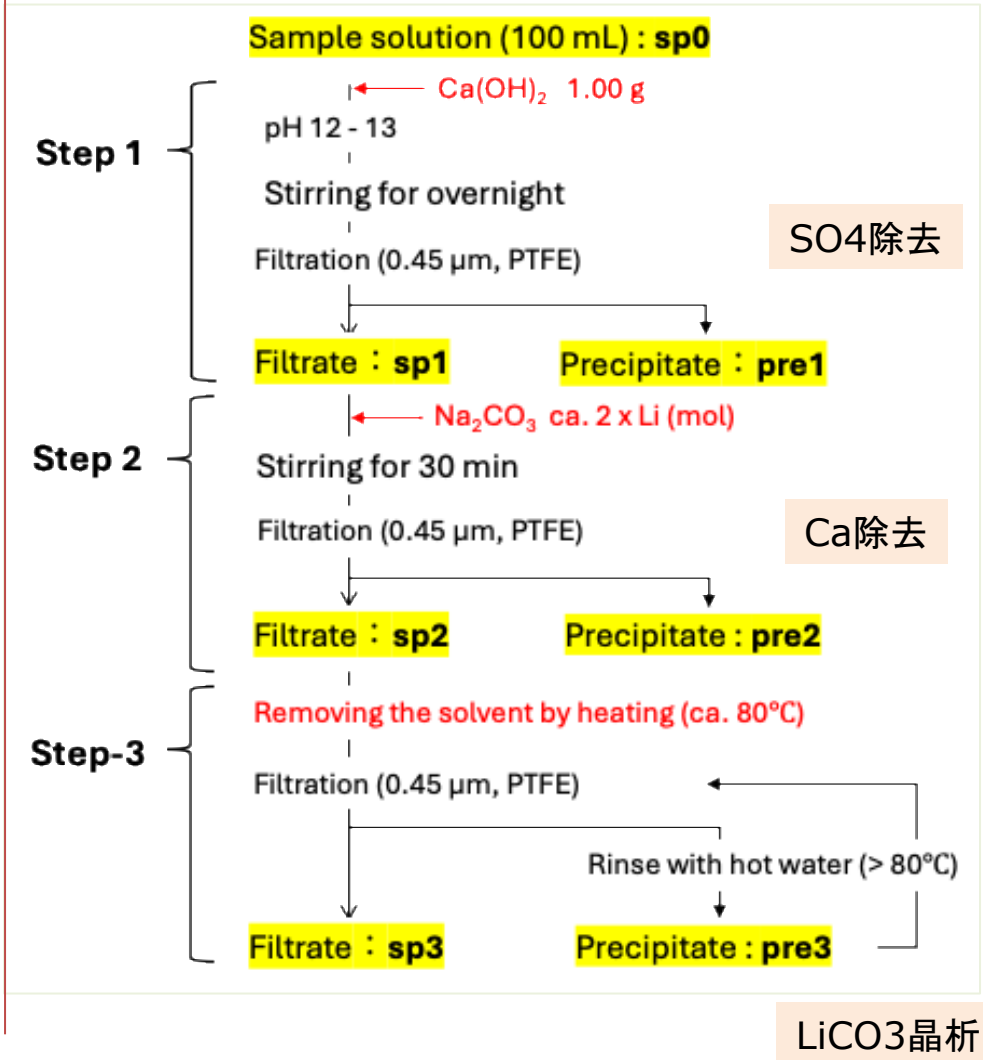


Simple and efficient selective extraction of lithium from spent ternary lithium-ion batteries via oxidation/de-lithiation using NaClO

Yanhui Kong^a, Yutaro Takaya^{b,d}, Mauricio Córdova-Udaeta^c, Chiharu Tokoro^{b,d,*}

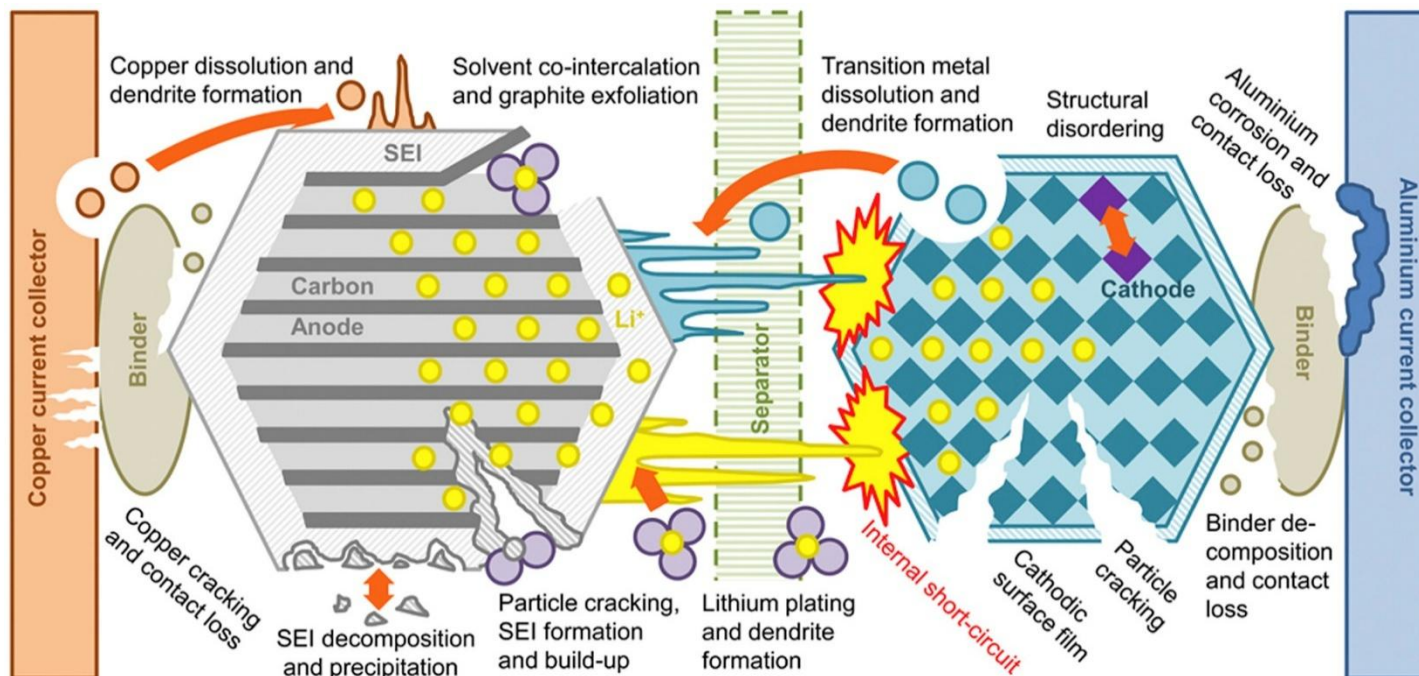


逐次沈殿法によるLiの選択回収



ダイレクトリサイクルに向けた検討(分離+再生)

Degradation mechanisms in Li-ion cells



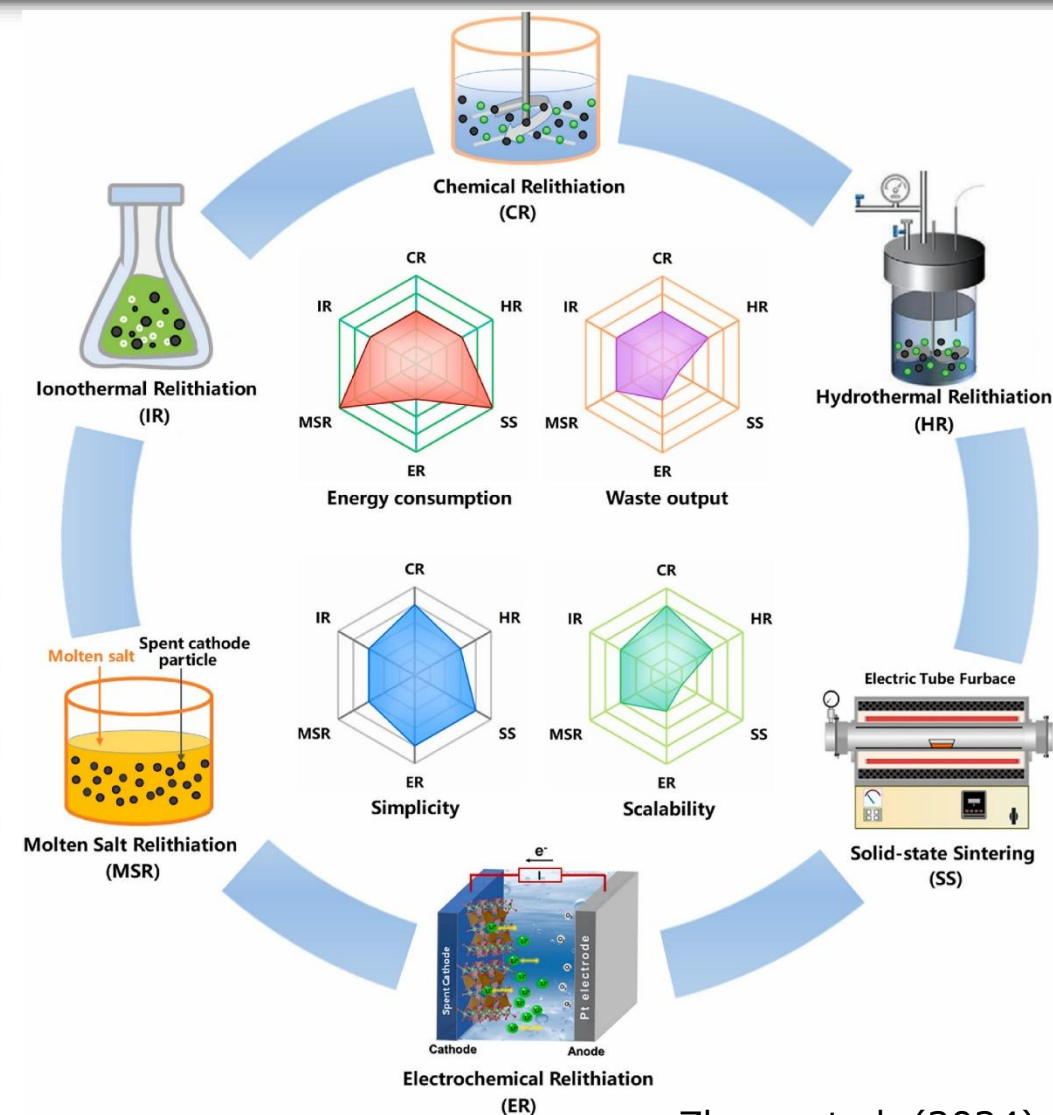
Birkel et al. (2017)

Journal of Power Sources

活物質そのもののダメージ

充放電に伴うLiの移動 (正極から負極への移動)

⇒ 再生のプロセスが必要

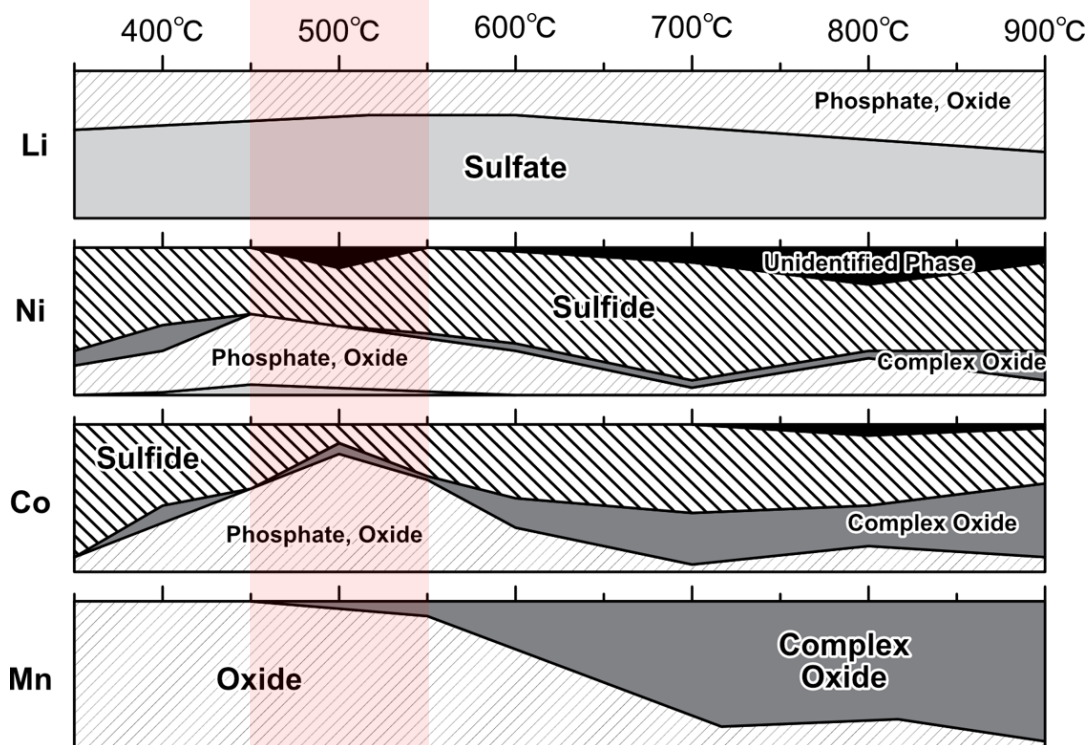
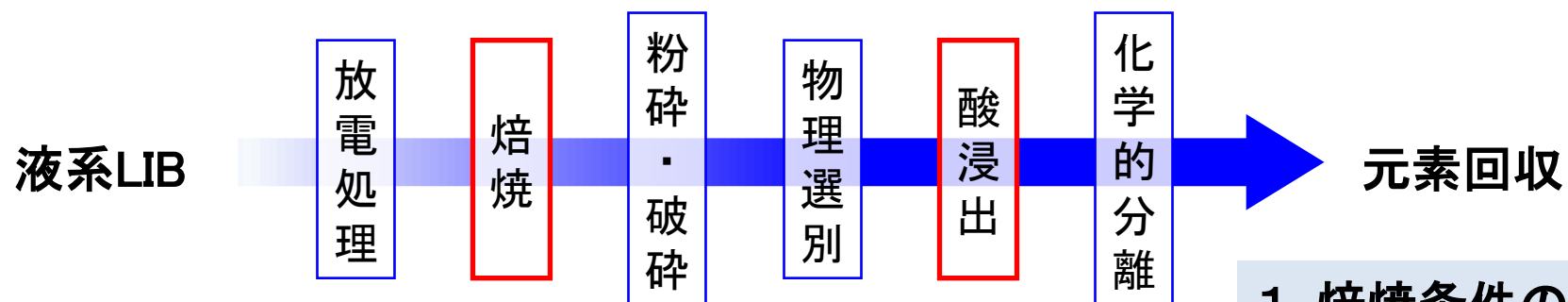


Zhang et al. (2024)

Journal of Power Sources

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）

液系LIBリサイクルで想定されるプロセス



optimal condition

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

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>

150 100 50 0



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>

100 50 0



SUS箔

正極層 + SE層 + 負極層

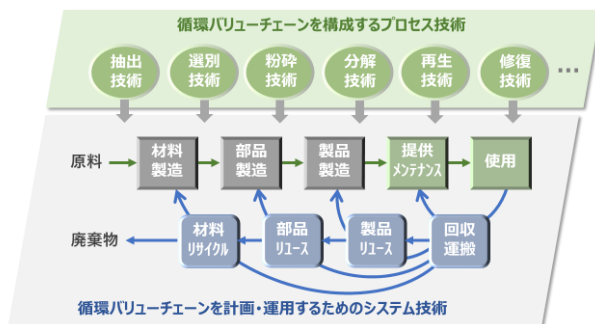
負極塗工膜(SUS箔)が
負極層から界面剥離

場の構築：循環バリューチェーンコンソーシアム Circular Value Chain Consortium (略称：CVC)



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。

プロセス技術とシステム技術の
両面で取組み、
循環バリューチェーンの構築、
運用を目指します。



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
- ◆ チュートリアルセミナー
- ◆ 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

(五十音順)

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



天沢 逸里
早稲田大学 准教授



大東 学
早稲田大学 准教授



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



加茂 徹
早稲田大学 大学院教授



神谷 秀博
東京農工大学 名誉教授
早稲田大学 大学院教授



菊池 康紀
東京大学 准教授



小林 英樹
大阪大学大学院 教授



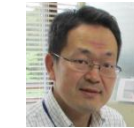
高田 祥三
早稲田大学 名誉教授



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

企業：61 国体：6 2025年3月現在 順不同



参考図書 - 著書紹介（所千晴） -

粉体精製と湿式処理 — 基礎と応用 — 2012 ● 小林 誠、大木 達也、中澤 廣、日下 英史、藤田 豊久、大和田秀二、古澤伸次郎、新藤 正和、渡田 敏次、所 千晴、田中 幹也、小山 和也 RPSJ 環境資源工学会	初心者のための PHREEQC による反応解析入門 所 千晴 著	最近の化学工学 69 バリューチェーンと単位操作 から見たリサイクル 化学工学会 関東支部編 化学工学会 環境部会リサイクル分科会著 化学工学会	マルチフィジックス有限要素解析シリーズ 1 New paradigm! On-demand publishing 資源循環のための 分離シミュレーション 著者：所 千晴 Chiharu Tokoro 林 秀原 Shoemon Lin 小坂 丈敏 Takemichi Koba 網澤 有輝 Yuki Tsunemura 湘田 茂司 Shigehi Fuchida 高谷 雄太郎 Yutaro Takaya 近代科学社 Digital	資源循環論 から考える SDGs 所 千晴 Chiharu Tokoro	Circular Value Chain Consortium 循環バリューチェーン で拓く サステナブル社会 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 所 千晴 福重 真一 高田 祥三 田所 秀之 近代科学社 Digital
粉体精製と湿式処理 -基礎 と応用 — 2012/11/1	初心者のためのPHREEQCに よる反応解析入門 — 2016/3/25	バリューチェーンと単位操 作から見たリサイクル (最近の化学工学69) — 2021/1/8	資源循環のための 分離シミュレーション — 2022/8/5	資源循環論から考えるSDGs — 2022/11	循環バリューチェーンで拓 くサステナブル社会 — 2026/06

“循環バリューチェーンで拓くサステナブル社会”
所千晴他監修，CVCコンソーシアム著，2026年春刊行。
60を超える産官学の取り組み例をコラムとして紹介。

循環バリューチェーンコンソーシアムでの産学官連携活動から見えてきたCEへの課題



早稲田大学
循環バリューチェーンコンソーシアム
2022年7月発足
CE実現に課題感を有する16アドバイザー、61企業、9団体にて、
CEに関するセミナー・シンポジウム・
勉強会・ネットワーキングを毎月開催

<https://cvc.smartcore.jp/>



日本におけるCEの課題

- ・設計段階の未対応
- ・再生プロセスのミスマッチ
- ・情報・制度の非接続
- ・市場・経済性の不成立

ほぼすべての企業が言及

- ・コストが合わない
- ・回収量・供給の不安定
- ・品質のばらつき
- ・既存サプライチェーンとの不整合

実装段階の企業が言及

- ・規制・制度の制約
- ・トレーサビリティ不足
- ・解体・分離の難しさ
- ・再生材の市場評価が低い
- ・社会受容性（価格許容）
- ・人材不足
- ・データ共有の困難

2026年6月発刊予定（60を超える事例をコラムとして紹介）

所 千晴

早稲田大学理工学部卒業。

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、高等研究所副所長を歴任。

2024年9月より創造理工学部長・研究科長。

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・株式会社テクセンドフォ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。

経産省、環境省、文科省、国交省、人事院、東京都、JST、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、
資源環境センター、近藤記念財団等理事を歴任。

現在、JST・CREST，東京都事業，NEDO先導事業等の研究代表者、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。



TOKORO LABS[®]

RESEARCHERS

- TOP
- 研究内容
- 研究業績
- メンバー
- 進路
- インターン
- インタビュー
- 講演会
- 講義資料
- 実験動画
- GR研究会関連論文集

top

Language: Japanese/[English](#)



所千晴 mail: tokoro@waseda.jp

所研究室 URL :
<http://www.tokoro.env.waseda.ac.jp/>

コンソーシアムお問い合わせ



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）

〒162-0041 東京都新宿区早稲田鶴巻町513 早稲田大学121号館 1階101事務所内

Email: cvc-contact@list.waseda.jp （早稲田大学 所研究室内 藤平）

HP: <https://cvc.smartcore.jp/>