

統合循環型ものづくり実現のための革新的分離濃縮技術開発

研究代表者 所 千晴
(創造理工学部 環境資源工学科 教授)

1. 研究課題

資源循環型社会の構築は、持続可能な開発目標（SDGs）の12番目の目標に明記されるように、世界的な課題のひとつとなっている。資源循環を促進するためには、所要エネルギーは小さいが現状では分離精度の低い物理的分離濃縮技術を革新的に高度化することが重要である。

本プロジェクトでは、新規電気パルス法を軸とした革新的な分離濃縮技術を開発する。開発の課題は、対象に最適化した電気パルスの条件を見出すことであり、そのためには分離機構の解明と機構に基づく適用性評価を必要とする。また、それらの技術がコスト、環境負荷、資源効率の観点から評価・フィードバックし、最適化することで社会実装につなげていく。

2. 主な研究成果

自動車等の軽量化を考え検討されている、ボルト等の締結材に代わり鋼板を接着した系において、接着面に突起を設けた構造により電気パルス放電を誘導し、放電に伴うプラズマ発生によるガス化及びその膨張が、分離に有効であることが分かった（図1）。

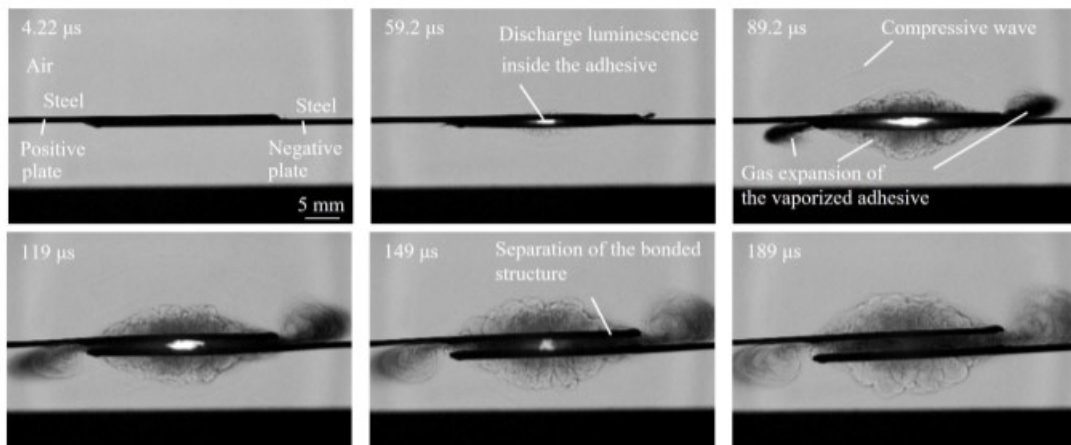


図1 電気パルスを印加した突起付接着体の分離の様子（時間変化）

廃棄太陽光発電（PV）セルからの有用金属回収に適用するため、電気パルスを印加に伴う銀線の爆発とそれに伴うプラズマの膨張により銀・銅が回収される機構を明らかにした（図2、3）。

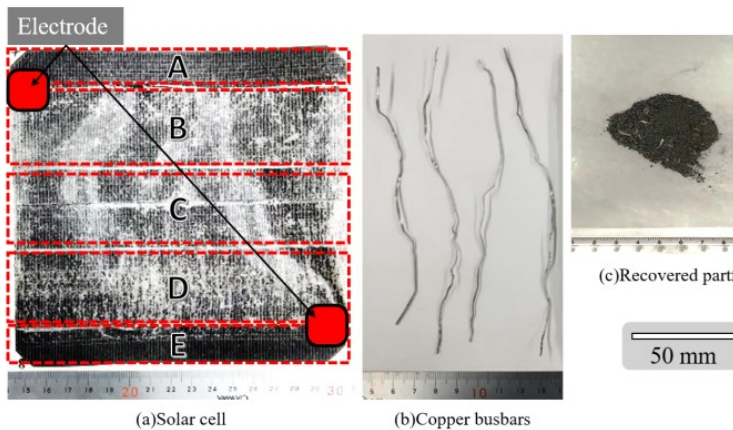


図2 電気パルスを印加した PV セルの状態
(a) セル上電極位置 (b) 銅バスバー
(c) 銀（集電線）を多く含む粒子

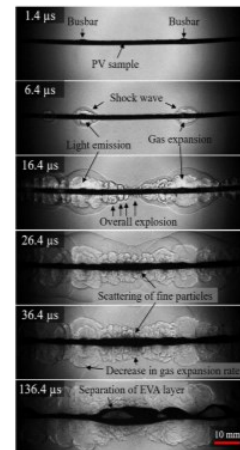


図3 PV セル銀線の爆発と樹脂カバー剥離

電気パルス法による LIB 正極リチウムイオン電池 (LIB) からの正極材剥離機構理解に基づき、スケールアップに重要な、試料の大きさに対応して Al 集電箔に適切に温度上昇を可能とするエネルギーを投入するための制御方法を明らかにした (図4、5)。

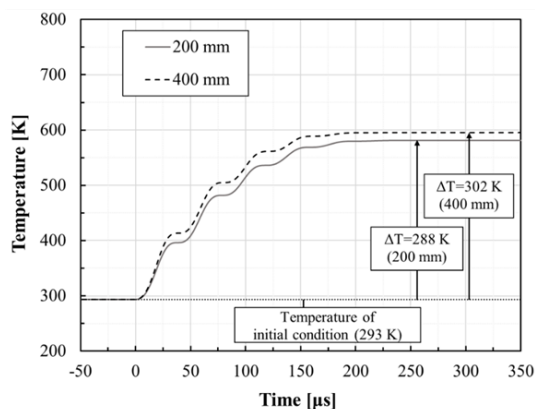


図4 LiB 正極材 Al 箔温度の時間変化 (計算値)

LiB 正極長さ 200 mm、400 mm に適切に対応し、約 300K の温度上昇 (活物質バインダーの失活に必要な温度上昇) をともに可能とした

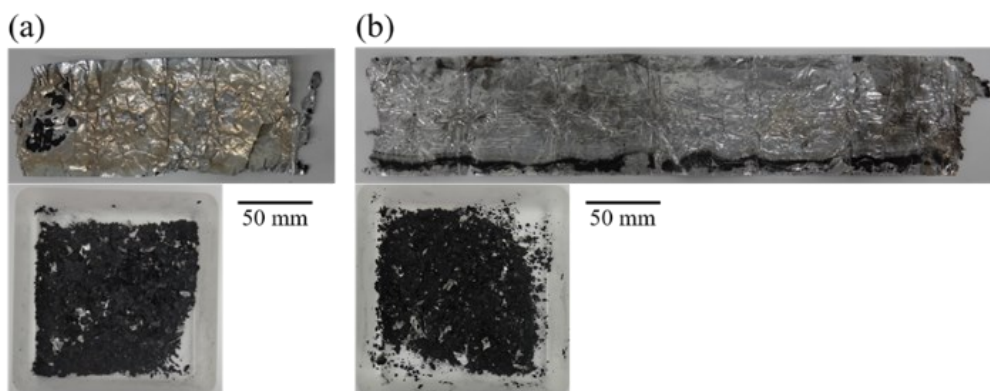


図5 電気パルス分離後の LiB 正極材外観 (a) 200 mm、(b) 400 mm

LiB 正極長さ 200 mm、400 mm に適切に対応し、Al 箔と活物質の分離が同様に可能となる

3. 共同研究者

小板 丈敏（主任研究員）、林 秀原（次席研究員）、
Cordova Udaeta Edwin Mauricio（次席研究員）、小山 恵史（次席研究員）、
樋口 真一（研究助手）、淵田 茂司（理工学術院講師）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- 1) K. Teruya, C. Tokoro et al., “Utilization of underwater electrical pulses in separation process for recycling of positive electrode materials in lithium-ion batteries: Role of sample size”, *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*, **16**(1), e01003 (2022).
- 2) T. Koita, C. Tokoro et al., “Application of simple notch to selective separation of adherend bonded with resin adhesive by pulsed discharge in air”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, **49**(12), 3860-3872 (2021).
- 3) M. Kondo, C. Tokoro et al., “Application of electrical pulsed discharge to metal layer exfoliation from glass substrate of hard-disk platter”, *Results in Engineering*, **12**, 100306 (2021).
- 4) S. Lim, C. Tokoro et al., “Recovery of silver from waste crystalline silicon photovoltaic cells by wire explosion”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, **49**(9), 2857-2865 (2021).
- 5) 近藤正隆, 所千晴 他, “電気パルス法によるガラス基板からの白金族金属含有金属層分離の検討”, 『粉体工学会誌』, **58**(9), 474-480 (2021).

4.2 総説・著書

- 1) 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』, **32**(1), 1-4, 2022.
- 2) 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』, **86**(2), 61-64, 2022.
- 3) 所千晴, “持続可能な社会に向けた新リサイクル技術の開発”, 『工業材料』, **69**(10), 20-24, 2021.
- 4) 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』, **58**(4), 130-133, 2021.
- 5) 所千晴（分担執筆）, 『車載用 LiB のリユース／リサイクル技術と規制動向』, 情報機構, 112-121, 2022.
- 6) 所千晴（特別寄稿）, 『EV 用リチウムイオン電池のリユース・リサイクル 2021～特性、規格、安全性とビジネス動向～』, シーエムシー・リサーチ, 217-226, 2021.

4.3 招待講演

- 1) 所千晴, “リチウムイオン電池リサイクルの現状と課題”, 第 13 回国際二次電池展春, 東京ビッグサイト, 東京, 3 月 16 日, 2022.
- 2) 所千晴, “新たな資源循環ループ創成のための分離への外部刺激の検討”, 化学工学会第 87 年会, オンライン, 3 月 16 日-18 日, 2022.
- 3) 所千晴, “Advanced separation technology for rare metal recovery to support carbon neutrality”, 9th Japan-U.S. Bilateral Meeting on Rare Metals (NEDO 主催), オンライン, 3 月 10 日, 2022.
- 4) C. Tokoro, “Advanced Recycling Technology and Energy-saving Processes”, PACRIM14, オンライン, 12 月 13 日-16 日, 2021.

- 5) 所千晴, “都市鉱山利活用の現状と課題”, 第 11 回 CSJ 化学フェスタ, オンライン, 10 月 19 日-21 日, 2021.
- 6) C. Tokoro, “Advanced liberation technologies for resources recycling”, The 8th Asian Particle Technology Symposium, オンライン, 大阪, 10 月 11 日-14 日, 2021.
- 7) 所千晴, “リチウムイオン電池リサイクルのための物理的分離濃縮技術”, 技術情報センターオンラインセミナー, オンライン, 8 月 24 日, 2021.
- 8) 所千晴, “College Summit for Peace in WASEDA 2021～ “誰一人取り残さない” 世界実現のために、いま私たちにできること～”, 「早稲田大学」×「新宿区」×「SDGs」(College Summit for Peace in WASEDA 2021 実行委員会主催), オンライン, 7 月 11 日, 2021.
- 9) 所千晴, “SDGs のための資源・材料循環”, ガラス再資源化協議会 DX 勉強会, オンライン, 7 月 9 日, 2021.
- 10) 所千晴, “Advanced Separation/ Purification Technologies for the sound material-cycle society”, 2021 Japan-America Frontiers of Engineering Symposium, オンライン, 6 月 24 日-26 日, 2021.

4.4 受賞・表彰

- 1) 所千晴, 2021 年度早稲田大学リサーチアワード(大型研究プロジェクト推進), 早稲田大学, 2021.
- 2) C. Tokoro, The Science Breakthrough of the Year, Engineering and technology category Finalist, Falling Walls 2021, 2021.

4.5 学会および社会的活動

- 1) 所千晴, “資源循環、環境修復、分離濃縮”, 国際女性デー特別企画「女性の工学キャリア促進: 東大教員と女子中高生のパネル討論」(東京大学工学部主催), オンライン, 3 月 13 日, 2022.
- 2) 所千晴, “新たな資源循環ループ創成のための物理的分離技術開発”, 法政大学第 21 回環境応用化学セミナー, オンライン, 1 月 20 日, 2022.
- 3) 所千晴, “SDGs のための資源循環・環境修復技術の現状と課題”, 千葉県立千葉高等学校模擬講義, オンライン, 12 月 14 日, 2021.
- 4) 所千晴, “なぜ SDGs?～資源・材料循環における SDGs とカーボンニュートラル～”, 日本学術会議公開シンポジウム (SDGs のための資源・材料の循環使用検討分科会主催), 東京大学生産技術研究所, ライブ web 配信, 11 月 26 日, 2021.
- 5) 所千晴, “分級の基礎と理論”, 2021 年度第 3 回粉体技術者養成講座分級 (日本粉体工業技術協会主催), オンライン, 11 月 11 日, 2021.
- 6) 所千晴, “SDGs のための革新的分離技術開発の現状と課題”, 早稲田大学高等学院模擬講義, オンライン, 早稲田大学高等学院, 10 月 27 日, 2021.
- 7) 所千晴, “資源開発と環境対策”, 資源・素材塾 2021, オンライン, 8 月 24 日, 2021.
- 8) 所千晴, “学術フォーラム「気候変動等による地球環境の緊急事態に社会とどう立ち向かうかー環境学の新展開ー」”(日本学術会議主催), オンライン, 7 月 3 日, 2021.

5. 研究活動の課題と展望

電気パルス法を主軸とした革新的な分離技術開発が順調に進んでいる。得られた成果を引き続き積極的に論文や学会発表等の成果として発出するとともに、より精緻な制御を目指して化学的な知見および分析、観察手法を取り入れることを構想している。