

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が必要であり、その取組を継続している。また、それらの技術をコスト、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。そのひとつの取組として電気パルスを活用した易解体接着剤開発に向けた基礎検討を実施した。

2. 主な研究成果

自動車分野ではCO2削減に向け車体を軽量化すべく構成するパーツのマルチマテリアル化が進んでいる。いっぽうで異種材料を強固な接着剤で接合されており、サーキュラーエコノミーの観点からは、これらの解体の困難さが課題であった。そこで、接着強度を保ったまま易解体を実現すべく、電気パルス法適用の基礎研究を進めた。本研究では、接着面中央にカーボンブラック (CB) 含有スポットを配したパターン接着界面を導入し、放電位置の制御による、被着体の再利用に注目した剥離可能性と、そのメカニズムの解明を行った。

図1 試料構成を示す。2枚の亜鉛メッキ鋼板 (100×25×t1.6mm) を、加熱硬化型エポキシ接着剤で接合。接着面 (25×25mm) の中央に5×5mmのCB含有接着剤のスポットを配置し、周囲を未充填の接着剤で囲むことで、放電の中央スポットへの誘導を図った。図2に電気パルス試験装置の概要を示す。最大15kVのDC電源と正味2.4μFのキャパシタを用いパルス放電を印加した。図3に高速カメラで捉えた分離挙動を示す。観察および衝撃波の定量的な解析の結果、衝撃波圧(約0.2MPa)

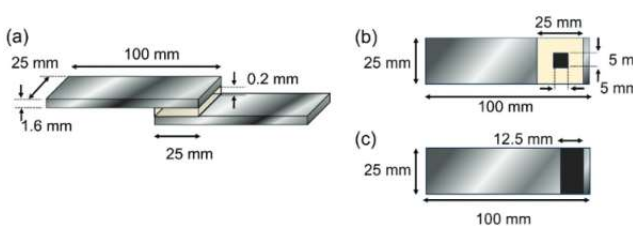


図1 CB含有スポットを配した試料構成

(a) a test piece consisting of two metal plates and an epoxy adhesive layer, (b) the patterned adhesion surface of the adhesive with a conducting spot of CB-added adhesive and surrounding neat adhesive area, and (c) fully coated CB-added adhesive in a previous

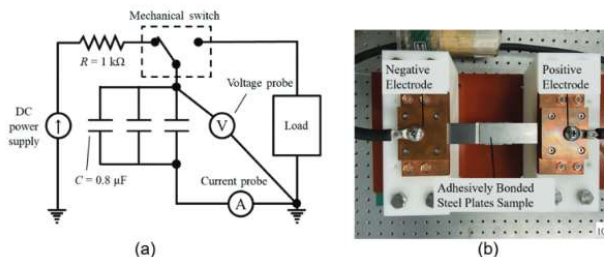


図2 電気パルス試験装置の概要

(a) Schematic circuit diagram for pulsed discharge and (b) top view of the sample setting with electrodes for the pulsed discharge method.

は接着強度に対して十分に小さく、主たる剥離駆動源は材料のガス化に伴う急激な体積膨張（内圧）であることが示唆された。CB濃度 3.4 vol%のスポットを設けることで、再現性良く上記の分離を実現した。

本研究により、接着界面への導電スポット導入が、電気パルス法による易解体性を実現する有効な方法であることが確認された。現在、成果をさらに発展させて、導電粒子を接着剤に含有した易解体接着剤と電気パルス解体方法の研究を CREST のプロジェクトにて推進、社会実装へ歩みを進めている。

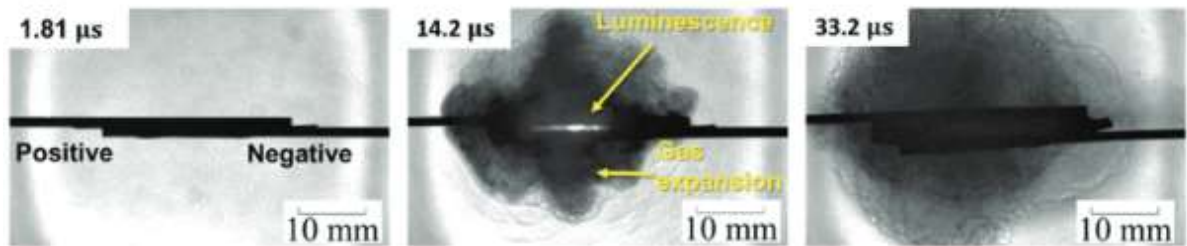


図 3 高速カメラで捉えた分離挙動

分離機構解明と適用性評価の研究例として、使用済みリチウムイオン電池のダイレクト・リサイクルにおいて重要課題である正極活物質 (CAM) とアルミ集電体の高効率かつ低損傷な分離を目的とした研究を紹介する。本研究では、電気パルス放電 (EPD) 処理前に微量の水を電極表面へ塗布する簡便な手法を提案・検証した。従来の EPD では、ジュール加熱に起因する熱応力によって界面剥離が生じると理解されてきたが、剥離挙動は電極の劣化状態や電流分布に強く依存し、再現性に課題

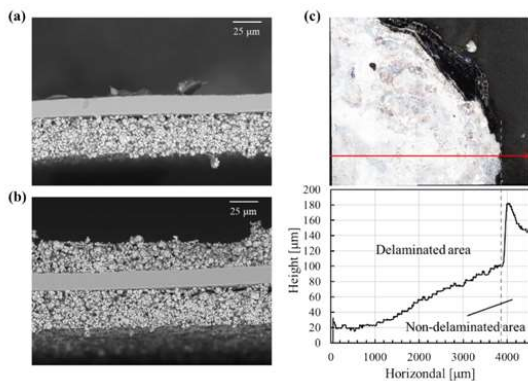


図 4 CAM/Al 界面 EPD 後の断面SEM画像
(a) Cross-sectional SEM image of the water-coated area, (b) cross-sectional SEM image of the water-uncoated area, and (c) optical cross-section at the delamination boundary.

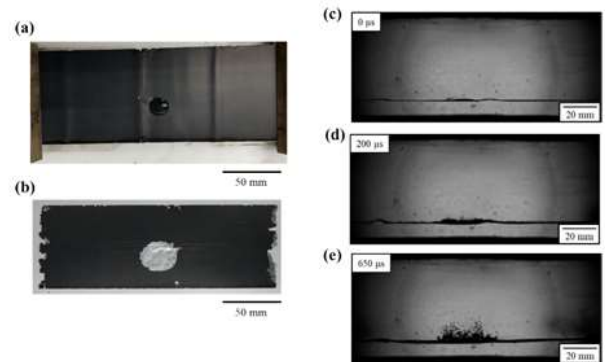


図 5 水塗布 EPD 時の CAM/Al 界面剥離の挙動
(a)(b) Representative EH5 cathode sheet before and after EPD with a partially applied surface water coating, and (c)-(e) sequential high-speed images showing the temporal evolution of CAM/Al interfacial delamination.

があった。本研究では、水塗布により剥離挙動が大きく改善され、低エネルギー条件においても 90% 以上の安定した剥離率を達成しつつ、図 4 に示すようにアルミ箔の微粉化を抑制できることを示した。特に、剥離は水塗布領域から優先的に発生し、外側へ伝播する特徴的な挙動を示した。

さらに本研究の重要な貢献は、剥離機構の学術的解明にある。高速度カメラによる可視化により、水がCAMの多孔構造を通じて界面に到達し、放電時の急速加熱により瞬時に蒸発する様子が示唆された(図5)。加えて、熱伝導解析および熱応力解析では、水の有無による応力差は小さく、熱応力単独では観測された剥離促進を説明できないことが明らかとなった。一方で、蒸気膨張シミュレーションにより、界面近傍で100 MPaを超える過渡的圧力が発生し、その圧力がCAM層内部にも伝播して剥離を駆動することが示された。これにより、剥離の主因は熱応力ではなく、水の急速蒸発に伴う膨張圧であることが明確になった。

以上の結果は、単純な水塗布という操作が、界面でのエネルギー変換メカニズムを大きく変化させ、安定かつ高効率な剥離を実現することを示している。本手法は化学薬品や高温処理を必要とせず、環境負荷を低減しながら材料特性を保持した回収を可能にする点で、リチウムイオン電池のダイレクトリサイクル実用化に向けた有力なアプローチである。

3. 共同研究者

成田麻子 (創造理工学部/研究科 助教)、犬束 学 (カーボンニュートラル社会教育センター 准教授)、中村一人 (SEES 機構 研究助手)、久保田明紀子 (SEES 機構 研究助手)、高谷雄太郎 (招聘研究員)、樋口真一 (SEES 機構 招聘研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- 1) Chiharu Tokoro, Takatoshi Kurihara, Asako Narita, Taketoshi Koita, "Localized degradation influences the separation of cathode active materials from aluminum foil by direct electrical pulsed discharge", *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2025. vol.27, pp.2723-2735. DOI: 10.1007/s10163-025-02278-5, <https://doi.org/10.1007/s10163-025-02278-5>
- 2) Chiharu Tokoro, Moe Nakahara, Taketoshi Koita, Nobuhiro Tsuji, "Primer Coatings Enhance the Separation of Cathode Active Materials from Lithium-Ion Battery Cathode Sheets During Direct Electrical Pulsed Discharge", *Waste Management*. 2025, vol.204, 114958. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.114958, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114958>
- 3) Kosei Matsuo, Manabu Inutsuka, Keisuke Ota, Tomoki Honda, Ryo Ogawa, Takao Namihira, Ryo Sasamoto, Chiharu Tokoro, "Controlled pulsed discharge debonding of epoxy adhesives with conductive spots for enhanced recyclability", *The Journal of Adhesion*. 2025, vol.102, Issue6. pp.518-532. DOI: 10.1080/00218464.2025.2536683, <https://doi.org/10.1080/00218464.2025.2536683>
- 4) Takuji Kirihara, Asako Narita, Chiharu Tokoro, "High-purity copper recovery from polyimide-enameled wires using pulsed discharge with a grinding pre-treatment", *Waste Management*. 2025, vol.206, 115044. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.115044, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.115044>
- 5) Chiharu Tokoro, Masaki Horiuchi, Asako Narita, Akiko Kubota, Yutaro Takaya, "Optimization of graphite anode delamination and contaminant separation via electrical pulsed discharge for direct recycling", *Advanced Powder Technology*. 2025, vol.36, Issue 11, 105066. DOI: 10.1016/j.apt.2025.105066, <https://doi.org/10.1016/j.apt.2025.105066>
- 6) Chiharu Tokoro, Moe Nakahara, Takatoshi Kurihara, Akiko Kubota, Mauricio Córdoba-Udaeta,

Asako Narita, Yutaro Takaya, "Low-Capacitance Pulsed Discharge Enables Heat- and Solvent-Free Delamination of Lithium-Ion Battery Cathodes", RSC Advances. 2025. DOI: 10.1039/d5su00304k, <https://doi.org/10.1039/d5su00304k>

- 7) Chiharu Tokoro, Masaki Horiuchi, Yuki Murata, Akiko Kubota, Asako Narita, Hidehiro Kamiya, Yutaro Takaya, "Attritor Milling Mechanisms and Optimization for Selective Separation of Aluminum Foil from Cathode Materials Recovered by Electrical Pulsed Discharge", Minerals Engineering. 2025, vol.237, 1099998. DOI: 10.1016/j.mineng.2025.109998, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109998>.
- 8) Chiharu Tokoro, Mutsumi Sayama, Takatoshi Kurihara, Takuji Kiriara, Akiko Kubota, Asako Narita, "Water-assisted delamination of cathode active materials from aluminum foil during electrical pulsed discharge for direct lithium-ion battery recycling", Waste Management 2026, vol.211, Issue 30, 115267. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.115267, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.115267>
- 9) Moe Nakahara, Shinichi Higuchi, Asako Narita, Chiharu Tokoro, "Effect of Cathode Active Material Layer Thickness on Separation in Lithium-Ion Batteries via Pulsed Discharge", IEEE Transactions on Plasma Science. 2025, vol.54, Issue 3, pp.1026-1033. DOI: 10.1109/TPS.2026.3656425, <https://doi.org/10.1109/TPS.2026.3656425>
- 10) Chiharu Tokoro, Takatoshi Kurihara, Asako Narita, Yutaro Takaya, Shohei Suzuki, "Delamination of lithium iron phosphate from aluminum foil using electrical pulsed discharge without heat, water, or chemicals", Scientific Reports. 2025. DOI:10.1038/S41598-026-39469-5, <https://doi.org/10.1038/S41598-026-39469-5>

4.2 総説・著書

- 1) Editors: Shinichi Fukushige, Tomomi Nonaka, Hideki Kobayashi, Chiharu Tokoro, Eiji Yamasue, EcoDesign for Circular Value Creation: Volume II, Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2025. ISBN: 978-981-97-9076-0, <https://doi.org/10.1007/978-981-97-9076-0>
- 2) Editors: Shinichi Fukushige, Tomomi Nonaka, Hideki Kobayashi, Chiharu Tokoro, Eiji Yamasue, EcoDesign for Circular Value Creation: Volume I, Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2025. ISBN: 978-981-97-9068-5, <https://doi.org/10.1007/978-981-97-9068-5>
- 3) 所 千晴 (分担執筆), リチウムイオン電池 (LiB) リサイクル技術, 情報機構, 2025. ISBN: 978-4-86502-285-8, <https://johokiko.co.jp/publishing/BC250401.php>
- 4) 若林 一民(監修), 所 千晴(分担執筆), 持続可能な社会を目指す 易解体性接着剤 接着技術の開発、要求特性、評価、その応用, 第2章第3節 "電気パルス法による接着解体技術とその応用・可能性", 株式会社 AndTech, 2025, pp.50-64. ISBN: 978-4-909118-83-7, <https://andtech.co.jp/books/1f069054-d15d-6210-8289-064fb9a95405>
- 5) 犬束 学, 所 千晴, "電気パルス法による接着解体技術", 高分子学会 会誌「高分子」. 2025, 6月号特集, vol.74, pp.304-305.
- 6) 犬束 学, 所 千晴, "物理的外部刺激を用いた接着の剥離", 日本接着学会誌. 2025, vol.61, No.8, pp.7-11.

4.3 その他

- 1) "ペロブスカイト電池再生推進 早大、シンポジウム開催", 日刊産業新聞. 2026, 1月28日.
- 2) 赤松健 (文科省大臣政務官), "(漫画)「リチウムイオン電池の捨て方改革」に向けて!", 文部科学省 note . 2025, 4月18日, <https://mext-gov.note.jp/n/n2d20fd229783>, <https://x.com/mextjapan/status/1913126600578941063>
- 3) "リチウムイオン電池処理への電気パルス法の適用", 環境新聞. 2025, 6月18日.
- 4) 特許第7721082号 (登録日2025年8月1日)「易解体方法および易解体可能な構造体」

4.4 受賞・表彰

- 1) 2025年度化学工学会研究賞 (實吉雅郎記念賞), 所 千晴, "電気パルス刺激を活用した異材界面の精密分離機構の解明と持続可能資源循環プロセスへの展開に関する研究", 公益財団法人 化学工学会 (3月17日, 京都). 2026. <https://www.scej.org/award/scej-awards>
- 2) Springer Nature Author Service Award, Chiharu Tokoro, Springer Nature, May, 2025.
- 3) Springer Nature Editorial Contribution Award, Chiharu Tokoro, Springer Nature, May, 2025.

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、2022年度に設立した循環バリューチェーン・コンソーシアムを通じ社会実装の道筋をつけていく。また、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ていき、さらに電気パルス法以外の方法の可能性も探ることを構想している。