

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。

2. 主な研究成果

自動車、航空機等の軽量化を考え使用が始まっている炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の層間分離や炭素繊維 (CF) のリサイクルに関し、その可能性を引き続き検討している。

図 1 に CFRP 積層体試料の写真と顕微鏡による断面画像を示す。この試料は CFRP 層が 45 度ずつ配向され積層され、層間は樹脂で接着されている。水中において、コンデンサ充電エネルギー 360 J の電気パルスで 1 回印加させることでブロックを上下 2 つに分割することができ、電気パルスは前処理としての分割に有効であることが示された。分割された CFRP 積層体の X 線 CT による観察結果を図 2 に示す。電極を設置した層以外にも通電痕が観測され、亀裂が発生していることが分かった。電気パルス時の電界シミュレーションの電界分布の解析結果を図 3 に示す。CFRP 層と層の間の樹脂層で電界が集中しており、電気パルス時に樹脂が絶縁破壊したと考えられた。

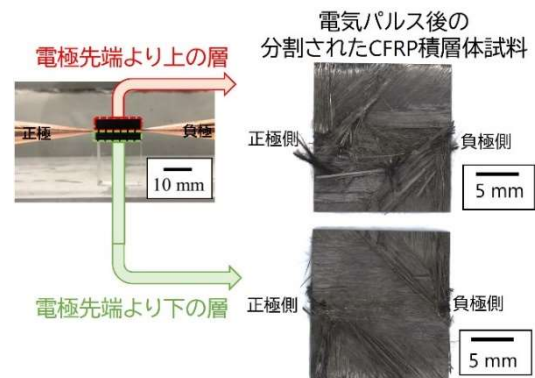


図1 電気パルスによる CFRP 積層体ブロックの分割

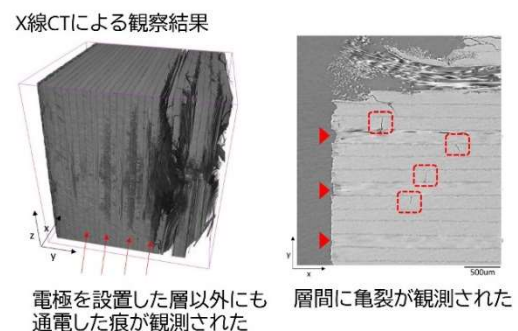


図2 分割された CFRP 積層体ブロックの X 線 CT による観察

電気パルス法によるリチウムイオン電池（LIB）正極からの活物質剥離機構理解を引き続き進めている。正極集電箔の Al 箔に与えるエネルギー密度を制御することで、走行距離、SOH の違いも含めて大きく影響を及ぼさないで最適な電気パルス条件を与えられることがこれまでわかっている。しかしながら、セル開封した後に密封・冷蔵庫保管したものと、空气中・室温に置いたものを比較した結果、顕著な差が見られた。空气中・室温に置いたものは、密封容器から出して 1 週間で表面に腐食が観測され剥離性が劇的に低下した。これは、空气中の酸素や水分に触れると同時に温度が高くなることで六フッ化リン酸リチウムのアニオン分解がより速く進んだと考えられる（図 4）TG-DTA 測定の結果から、空气中・室温に置くことで、残存していた揮発成分が減少することが示された（図 5）。これより、フッ素を含む成分の分解、もしくは残存する電解液の揮発により PVDF 等バインダーの接着強度が増強し、より剥離しにくくなった可能性が考えられた。

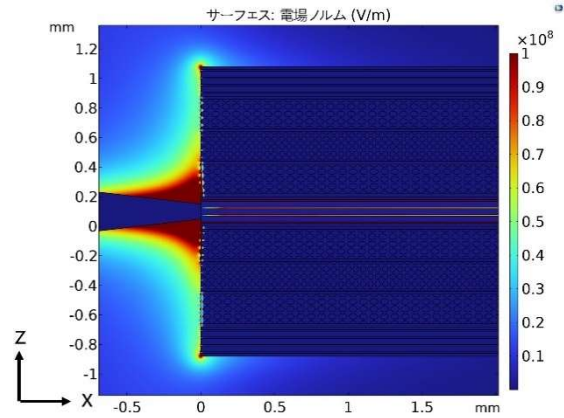


図 3 電界シミュレーションによる電気パルス印加時の CFRP 積層体ブロックの電界分布

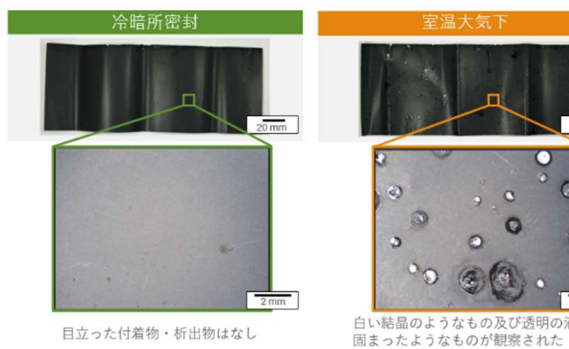


図 4 保管方法による表面の違い

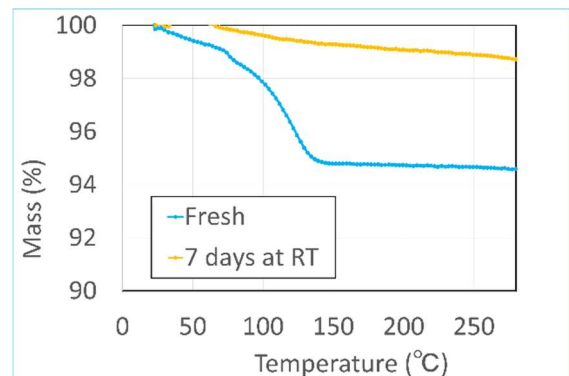


図 5 保管方法による揮発性成分含有量の違い

3. 共同研究者

小板丈敏（創造理工学部 講師）、小山恵史（創造理工学部 講師）、犬束 学（カーボンニュートラル社会教育センター 准教授）、成田麻子（持続的環境エネルギー社会共創研究機構 研究院講師 次席研究員）、Cordova Mauricio（研究院講師 次席研究員）、樋口真一（研究助手）、中村一人（研究助手）、久保田明紀子（研究助手）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- 1) Yuto Imaizumi, Soowon Lim, Takatoshi Koita, Kazuhiro Mochidzuki, Yutaro Takaya, Takao Namihira, Chiharu Tokoro, "Silver Recovery from Spent Photovoltaic Panel Sheets Using Electrical Wire Explosion", EcoDesign for Sustainable Products, Services and Social Systems I, 2024, 365–380.

- 2) Taketoshi Koita, Yoshiki Egawa, Yutaro Takaya, Keishi Oyama, Soowon Lim, Takao Namihira, Chiharu Tokoro, "Comparison of size distributions of recovered particles generated from Ag wire in air by pulsed wire discharge and electric explosion of wire methods", *Advanced Powder Technology*, 2023, Vol34, No.11, 104227.
- 3) 佐藤啓太, 小山恵史, 小板丈俊, 久保田明紀子, 所千晴, "接着接合の易解体における浸漬前処理の有効性評価", *環境資源工学会誌*, 2023, 70 巻, 2 号, pp. 65-72.
- 4) Yanhui Kong, Yutaro Takaya, Mauricio Córdova-Udaeta, Chiharu Tokor, "Simple and efficient selective extraction of lithium from spent ternary lithium-ion batteries via oxidation/de-lithiation using NaClO", *Separation and Purification Technology*, Volume 322, 1 October 2023, 124280.

4.2 総説・著書

- 1) 小板文敏, 所 千晴, "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", *月刊 車載テクノロジー*, 2023, 9 月号, pp.20-25.
- 2) 所 千晴, "持続可能な資源循環型社会構築のための分離技術開発の重要性", *静電気学会誌*, 2023, Vol.47, No.5, pp.174-179."
- 3) 所 千晴, "【特集】二次電池・燃料電池関連技術の動向>粉体プロセス技術の高度化による資源循環", *JETI (Japan Energy & Technology Intelligence)*, 2023, 第 71 巻, 6 月号, pp.9-15.
- 4) 所 千晴. (分担執筆), *EV 用電池の安全性向上、高容量化と劣化抑制技術*, "第 9 章第 1 節リチウムイオン電池リサイクルの現状と課題". 技術情報協会, 2023, pp. 431-436, ISBN: 978-4-86104-992-7.
- 5) 所 千晴. (分担執筆), *CFRP リサイクル・再利用の最新動向*, "第 2 章第 3 節電気パルスを用いた CFRP の解体および炭素繊維の回収", エヌ・ティー・エス, 2023, pp. 61-66, ISBN: 978-4-86043-846-3.
- 6) 所 千晴 (分担執筆), *車載用リチウムイオン電池リサイクル：技術・ビジネス・法制度.*, 第 7 章リチウムイオン電池からの金属回収のためのミネラルプロセッシング技術, シーエムシー・リサーチ, 2023, pp.98-112, ISBN: 978-4-910581-41-5.
- 7) 所 千晴, "工学部系統◇資源工学 何を学ぶ？資源工学", *蛍雪時代*. 2023, 4 月臨時増刊, pp. 619-620.

4.3 その他

- 1) 所 千晴, "モノづくり 循環経済の時代", *読売新聞*. 2024, 2 月 28 日, 紙面.
- 2) 所 千晴, "大学から事業提案 都、課題解決に活用 早大▶リチウム電池安全に処理", *日刊工業新聞*. 2024, 2 月 21 日, 紙面.
- 3) 所 千晴, "大学×SDGs_サーキュラー・エコノミーの実現に向けた、資源循環のための分離技術", *エイビ進学ナビ*. 2023, 9 月, p.33.
- 4) 所 千晴, "サーキュラーエコノミーを創る", *生産性新聞*. 2023, 8 月 25 日, 紙面.

4.4 受賞・表彰

- 1) Chiharu Tokoro, Jubilee Global Diversity Award, The American Ceramic Society, 2024. (<https://ceramics.org/event-subpage/icacc-2024-award-and-plenary-speakers/>)

2) 所 千晴, 会員増強功績賞、公益社団法人化学工学会, 2023.

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、昨年度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ることを構想している。