

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（2期目）

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) の持続可能な利用のためには、使用済み CFRP 製品からの炭素繊維 (CF) の効率的な回収とそのリサイクルが求められている。本研究では、CFRP 試料を迅速かつ低コストで解体し、CF を分離するために、高電圧による直接パルス放電を適用した。

図 1 に電気パルスによる CFRP 積層体ブロック分割試験セットアップの概要を示す。電気パルス印加時の高速度ビデオカメラによる観察結果を図 2 に示す。CFRP 層間の CF に発光がみられ CF に大電流が流れたことが分かった。図 3 に電気パルス後 CFRP 積層体の X 線 CT 画像を示す。直接通電した層だけでなくそこから離れた同じ方向に配向された CF の層にも破壊の跡が見られる。図 4 に CF を粗視化した電界シミュレーション結果を示す。直接通電した層以外にも電界が発生しており、X 線 CT 画像の結果を裏付けている。

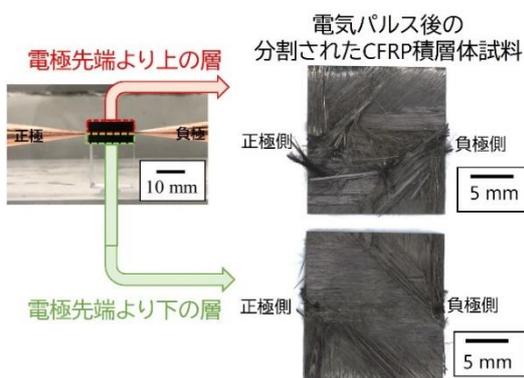


図1 電気パルスによる CFRP 積層体ブロックの分割

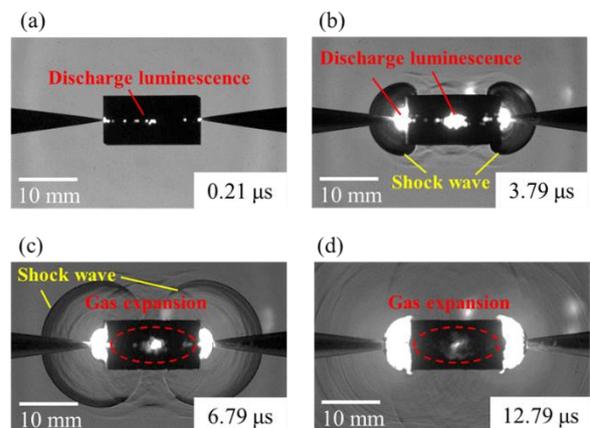


図2 高速ビデオカメラによる電気パルス印加時の状態の観察 (a) 0.21 μ s, (b) 3.79 μ s, (c) 6.79 μ s, (d) 12.79 μ s.

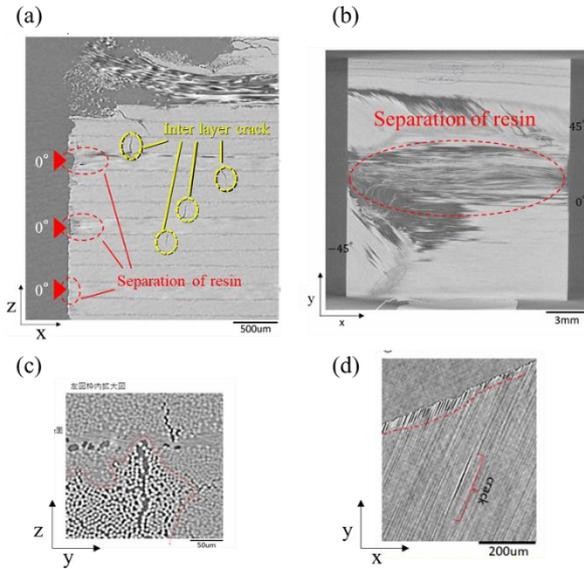


図3 電気パルス後 CFRP 積層体ブロックの X-CT 画像 (a) xz plane at positive side and (b) xy plane at 0° layer, (c) yz plane surface contacted with positive electrode, (d) xy plane at 45° layer

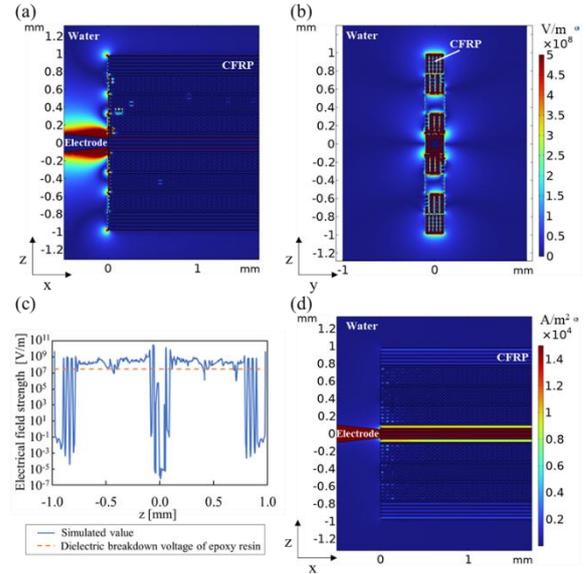


図4 CFRP 積層体中の電界シミュレーション結果(a) xz plane ($y = 0$ mm) and (b) yz plane ($x = 0$ mm), (c) simulated electrical field strength at yz plane ($x = 0$ mm), (d) distribution of current density at xz plane ($y = 0$ mm).

以上から、電気パルス電極を設置した CF に流れる大電流から発生するジュール熱により周囲の樹脂が急速にガス化し CFRP が破壊され、同時に CF が電流と平行な方向に整列している部分でも顕著な破壊が起こることがわかった。このことは、パルス放電が積層 CFRP の粗解体方法として有望であることを示している。

電気パルスの適用範囲拡大検討の一環として、図5に示すメタルハニカム触媒 (MH 触媒) への適用を検討した。触媒である貴金属微粒子は、SUS 製のハニカム構造に付着しているセラミックの粒子に担持されている。本触媒に対し水中で電気パルス電極を 5 mm、10 mm 離し

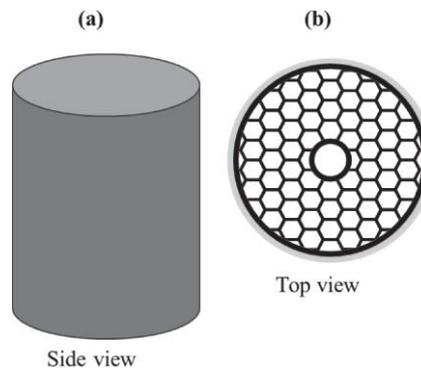


図5 MH触媒外形図

て設置し、複数回パルスを印加した後の写真を図6に示す。回収物を固液分離し、篩により粒度分布を測定した後、XRF, SEM-EDS 測定を行い、粒径 0.032mm 以下に Pd, Ph が濃縮していることが分かり、また全体の回収率として、Pd79wt%以上, Rh87wt%以上が得られた。電気パルスの適用は、適切な後工程と組み合わせることで有効な回収手段となるといえる。

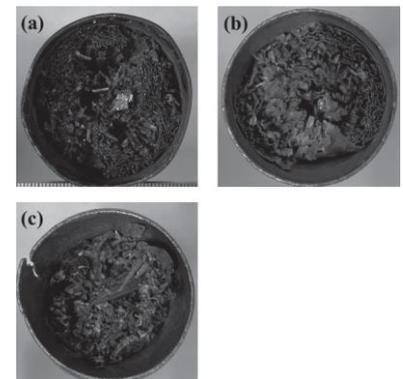


図6 パルス後MH触媒の概観写真 (a) 120 pulse shots at a distance of 5 mm, (b) 120 pulse shots at a distance of 10 mm., (c) 240 pulse shots at a distance of 10 mm.

3. 共同研究者

小板丈敏 (創造理工学部/研究科 講師)、成田麻子 (創造理工学部/研究科 助教)、犬東 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) Keita Sato, Taketoshi Koita, Manabu Inutsuka, Koji Yamaguchi, Masao Kimura, Chiharu Tokoro, "Disassembly of Laminated CFRP using Direct Pulsed Discharge", Composites Part B: Engineering, Manuscript Number: JCOMB-D-24-06589R1.
- 2) 犬東 学, 所 千晴, "電気パルス刺激を利用した CFRP の粗解体", プラスチック成形加工学会 成形加工. 2025, Vol.37, No.1, pp.10-13.
- 3) Chiharu Tokoro, Keita Sato, Manabu Inutsuka, Taketoshi Koita, "Efficient recovery of carbon fibers from carbon fiber-reinforced polymers using direct discharge electrical pulses", Scientific Reports, 2024, Volume 14., DOI:10.1038/s41598-024-76955-0
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-76955-0>
- 4) Chiharu Tokoro, Yuto Imaizumi, Taketoshi Koita, Akiko Kubota, Yutaro Takaya, Keishi Oyama, Md. Mijanur Rahman, "Separation of Palladium and Rhodium from the Spent Metal-Honeycomb Catalysts by Pulsed Discharge without Chemical Additives", MATERIALS TRANSACTIONS. 2024, Vol.65, No.8, pp.961-968., DOI: 10.2320/matertrans.M-M2024808
<https://doi.org/10.2320/matertrans.M-M2024808>
- 5) Yutaro Takaya, Yuto Imaizumi, Taketoshi Koita, Cordova Udaeta Edwin Mauricio, Chiharu Tokoro, "Effect of electric pulse treatment on silver recovery from spent solar panel sheet by acid-leaching", Journal of Material Cycles and Waste Management. 2024, Vol.26, pp.2591-2598., DOI: 10.1007/s10163-024-01951-5
<https://doi.org/10.1007/s10163-024-01951-5>

4.2 総説・著書

- 1) Editors: Shinichi Fukushige, Hideki Kobayashi, Eiji Yamasue, Keishiro Hara, EcoDesign for Sustainable Products, Services and Social Systems I, Yuto Imaizumi, Soowon Lim, Taketoshi Koita, Kazuhiro Mochidzuki, Yutaro Takaya, Takao Namihira, Chiharu Tokoro, Chapter 25 "Silver Recovery from Spent Photovoltaic Panel Sheets Using Electrical Wire Explosion", Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2024, pp. 365-380, ISBN: 978-981-99-3817-9.
- 2) 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～ 電池材料のサプライ、諸規制とビジネス対応 ～, 第 9 章 リチウムイオン電池のリサイクル技術開発動向, シーエムシー・リサーチ, 2024, pp.256-267, ISBN: 978-4-910581-55-2.
- 3) 高谷雄太郎, 所 千晴 (分担執筆), リチウムイオン電池からのレアメタル回収・リサイクル技術, 第 3 章 リチウムイオン電池からのレアメタル回収技術, エヌ・ティー・エス, 2024, pp.67-73, ISBN: 978-4-86043-884-5.
- 4) 所 千晴, 成田 麻子, "サーキュラーエコノミー構築に向けて～分離技術「直接電気パルス法」～",

自動車技術会 中部支部報「宙舞」. 2024, No.95, pp.17-21.

- 5) 所 千晴, “特集◇ サークュラーエコノミーを支える資源循環技術 サークュラーエコノミー実現のための分離技術開発戦略と開発事例”, 化学装置. 2024, 8月号, Vol.66, No.8 pp.2-7.

4.3 その他

- 1) Chiharu Tokoro, ” Direct discharge electrical pulses for carbon fiber recycling” , AlphaGalileo. 2025, Jan.15, News Release.
<https://www.alphagalileo.org/en-gb/Item-Display/ItemId/253961?returnurl=https://www.alphagalileo.org/en-gb/Item-Display/ItemId/253961>
- 2) Chiharu Tokoro, ”Direct discharge electrical pulses for carbon fiber recycling”, EurekAlert!. 2025, Jan.14, News Release.
<https://www.eurekalert.org/news-releases/1070273>

4.4 受賞・表彰

- 1) 第 68 回生活と環境全国大会 環境大臣表彰 (令和 6 年度廃棄物・浄化槽研究開発功労者)
所 千晴, 一般財団法人日本環境衛生センター, 2024, 10 月 31 日
- 2) 廃棄物資源循環学会 令和 5 年度著作賞, 所 千晴, "資源循環論から考える SDGs" (エネルギーフォーラム社, 2022) , 廃棄物資源循環学会, 2024, 5 月 31 日.
- 3) 「NEDO 懸賞金活用型プログラム／リチウムイオン蓄電池の回収システムに関する研究開発／NEDO Challenge, Li-ion-Battery 2025／発火を防ぎ、都市鉱山を目指せ！」テーマ 2：リチウムイオン蓄電池の発火危険性の回避・無効化装置 2 位 電気パルス破碎機能つき LiB 失活システム 株式会社電知 学校法人早稲田大学 所研究室, <https://www.nedo.go.jp/content/800019927.pdf>

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。