

次世代型超省エネルギーリサイクル技術開発

研究代表者 大和田 秀二
(創造理工学部 環境資源工学科 教授)

1. 1 研究課題

適正な資源循環プロセスの構築において、有価物回収と有害物除去を達成する分離技術の重要性は言うまでもないが、その中でも、各種成分を、固体レベルで分離する物理的分離法（分離精度が低いが省エネルギー的である）と分子原子レベルで分離する化学的分離法（高エネルギー消費的だが分離精度が高い）を適切に組み合わせて、高精度かつ省エネルギー的・経済合理性の高いプロセスを確立することが重要である。両分離技術は互いに相互補完的な特性を持つが、前者の技術開発は発展途上の段階にあり、今後、持続的な資源循環型社会を構築するには、それを強化することが必要である。本研究では、この目的を達成するために、物理的分離法の核となる粉碎・選別の両技術について、それらのさらなる高度化を図るとともに、それら技術の人工（廃棄物）資源への適用性を検討する。

2. 主な研究成果

2.1 物理的分離における分離結果評価法の一考察

基本的に対象が固相（粒子）である物理的分離では、その分離挙動, Behavior, は各粒子の特性, Property, によって決まるが、そのPropertyは各粒子を構成する複数成分の構造, Structure, によって決まることとなる。つまり、各粒子Behaviorはある程度Structureによって決定され则认为てよい。本研究では、各粒子のStructureを着目成分の1粒子中での体積割合（部分比）の全粒子中での分布とし、それをシグモイド関数で近似することによりBehaviorを推測するモデルを作成した。これにより、上記とは逆にBehaviorからStructureが、また分離閾値がいずれであったかを推定することも可能となった。

2.2 電気パルス粉碎による PV パネルからの高純度ガラス回収（環境省・ハリタ金属・ガラス再資源化協議会共同）

昨年度に引き続き、廃 PV パネル中のガラス成分を高純度ガラスとして回収するプロセスを開発した。本年度は、特に異相境界面での優先破壊が顕著である電気パルス粉碎に着目し、その PV パネルシュレッダ破碎産物への適用性を検討した。その結果、昨年度のインテンシブミキサに比べて格段に優れたガラスの選択粉碎性を示し、細粒側に得られるガラス濃縮物の品位・回収率ともに向上した。この手法は世界的にもまだ実績が少なく、実装業に適用するにはエンジニアリング的な課題を残しているが、シュレッダー破碎→電気パルス選択粉碎プロセスが今後の要素技術として確立されたと言える。

2.3 焙焼基板からの有価金属回収および製錬忌避成分除去（経産省 JOGMEC・DOWA エコシステム・東北大学・産総研共同）

廃電子機器中の部品実装基板を加熱により、基板部と部品部に分離し、その後、焙焼→二段選択粉碎→物理選別することにより、金・銅等の有価金属を濃縮するとともに、アルミ・臭素・アンチモン等の製錬忌避成分の分離・分解・除去を目的とする。本年度は、基板部の銅・アルミ（ガラス繊維中に存在）の分離に適する焙焼温度および二段選択粉碎の各条件を決定するとともに、部品部の金含有金属部とその他金属・プラスチック類との選択粉碎を可能とする電気パルス粉碎の適用性について検討した。特に部品部の電気パルス粉碎では、ほぼすべての金属部がプラスチック類と非破壊状態で単体分離し、金成分の濃縮に効果のあることが判明した。

2.4 電気パルス粉碎による CFRP からの CF の回収（太平洋セメント共同）

カーボン繊維強化プラスチック類（CFRP）は、今後の大幅な需要増加が期待されるが、その硬さからリサイクル困難物とされている。本研究では、太平洋セメントが開発した低温脆化処理によりプラスチック類を脆化させた試料に、導電体（ここではカーボン繊維、CF）の非破壊単体分離に効果のある電気パルス粉碎を適用し、カーボン繊維をなるべく長繊維として回収することを検討した。その結果、ある種の条件下ではそれが達成され、CF とプラスチック類はその後の静電選別により効果的に分離できることが判明した。また、電気パルス粉碎の進行に伴う CFRP の破壊機構についても明らかにした。

2.5 低温加熱・LIBSソータによるミックス金属の相互分離（太平洋セメント共同）

各種廃棄物のシュレッダ破碎・物理選別処理から得られるミックス金属（ステンレス・銅・真鍮・亜鉛等の混合物）は国内での処理では経済合理性が低いため多くが輸出されてきたが、昨年末の中国の廃棄物輸入禁止政策により、それらの国内循環が必須となった。ここでは、当研究室で世界に先駆けて開発したLIBS（レーザー誘起ブレークダウン分光）ソータを利用して、それらの相互分離を検討した結果、それぞれの金属類がその他との分離効率95%以上で回収できることを発見した。また、それらの分離機構、特に、各種金属類の基礎物理特性がLIBSで発生する適正プラズマの生成に以下に影響するかを明らかにした。

2.6 電気パルス粉碎による石炭の単体分離性向上（NEDO・電力中央研究所共同）

石炭はその埋蔵量の豊富さから継続的な主要エネルギー資源の一つとして重要であるが、燃焼後に大量に発生する石炭灰の再利用は行き詰りの傾向を見せている。そこで本研究では、石炭灰の発生源である原炭中の灰分（鉱物質）を電気パルス粉碎によって単体分離し事前に徹底的に除去するプロセスを考案する。本年度は、原炭中の各種鉱物質の単体分離性が電気パルス粉碎の進行によっていかに変化するかを、産物の粒群ごとに明らかにするとともに、石炭質中に分散して存在する微粒鉱物質が同粉碎によって、表面への露出→異相境界面優先破壊の経路を辿るとの仮説を立てたて、今後の詳細研究の基礎を築いた。

2.7 パクトカラム浮選機内の流れの解析

パクトカラム浮選は、浮選機中のある種の構造物を挿入（パック）することにより、機内の水流を制御できる優れた浮選法の一つだが、その機内での懸濁液の流動状態の解析はほとんど進んでいない。本研究では、同浮選機内での水および気泡の流動解析、CFD (Computational Fluid Dynamics) を行い、それにより気泡・懸濁粒子との衝突・付着・脱着それぞれの確率が通常浮選とどのように

異なるかを明らかにした。さらに、上記3種確率を用いたパクトカラム浮選モデルを作成し、それから算出した浮選速度定数・浮遊率が、グラファイトを用いた実験値と整合することを示した。

3. 共同研究者

所 千晴（創造理工学部・環境資源工学科・教授）

4. 研究業績

4.1 国際会議・海外講演等

1. S. Owada: Next Generation Recycling Process, Invited Lecture, Guangxi Univ., pp. 1-21, Dec. 3, 2019
2. S. Owada: “Smart Comminution” and “Smart Sorting” for Sustainable Recycling, Plenary Lecture, Special Symposium on Living Waste Recycling Carbon Value System in the 15th Int. Symp. East Asian Resources Recycling Technology, EARTH 2019, Keynote Lecture, Pyeongchang, Korea, pp. 3-24, Oct 15, 2019
3. Mariko Ohnishi, Shuji Owada, Hiroyuki Takano, Yasuyuki Ishida, Tomohisa Yoshikawa, Kou Takizawa: Fundamental Study on the Recovery Process of Heavy Metals and Precious Metals from Municipal Waste Incineration Bottom Ash, 15th Int. Symp. East Asian Resources Recycling Technology, EARTH 2019, Pyeongchang, Korea, pp. 397-402, Oct 15, 2019
4. Y. Matsumoto, S. Omi, S. Owada, M. Harita, H. Terasaki, S. Kato: Production of High Purity Glass from Wasted Photovoltaic Panels by Electrical Disintegration, 15th Int. Symp. East Asian Resources Recycling Technology, EARTH 2019, Pyeongchang, Korea, pp. 347-351, Oct 15, 2019
5. T. Senga, S. Maruyama, S. Omi, S. Owada, T. Namihira: Preferential Breakage Mechanism at Phase Boundary in the Electrical Disintegration -in case of an artificial conductor/insulator binary sample-, 15th Int. Symp. East Asian Resources Recycling Technology, EARTH 2019, Pyeongchang, Korea, pp. 337-341, Oct 15, 2019
6. T. Sugisawa, T. Seo, K. Tsutsumi, S. Owada, T. Chiharu, S. Kawakami, S. Tahata: Proposal of Novel Process to Concentrate Valuable Metals and to Remove Impurity Elements from Wasted PCBs, 15th Int. Symp. East Asian Resources Recycling Technology, EARTH 2019, Pyeongchang, Korea, pp. 67-72, Oct 14, 2019
7. S. Owada, C. Tokoro, Y. Matsumoto, S. Omi, M. Nishi, M. Harita, and S. Kato: Novel Process of Glass Recycling in Wasted PV panels, Invited Lecture, 2nd Int. Conf. & Expo. Recycling, Osaka, p.26, Oct. 7, 2019
8. S. Owada: Next Generation Recycling Process, Chulalongkorn Univ., Invited Lecture, pp. 1-23, Aug. 7, 2019
9. 大和田秀二: 次世代型リサイクリングプロセス--Smart Comminution and Sorting--, 日高洋行・バンコク, pp.1-51, Aug. 9, 2019
10. S. Owada, T. Suwa, and N. Sasai: Concentration of Cathode Materials from Post-Consumer Lithium ion Battery by Roasting, Selective Grinding and Physical-Physicochemical Separation, Plenary Lecture, 2nd Inter Conf & Expo on Recycling and Waste Management, Rome, May 22, 2019

11. S. Owada: Smart Comminution and Smart Sorting --Next Generation Recycling Process--, Invited Lecture, Liberty, Phoenix, pp. 1-49, Apr. 12, 2019

4.2 国内講演・学会発表・研究報告等

1. 大和田秀二：太陽光発電パネルリサイクル技術の動向, JX 金属定時特別講演 via Zoom, 0326, 2020
2. 伊藤輝, 大和田秀二, 綱澤有輝, 張田真, 寺崎英樹, 樹世中：廃直管型 LED 蛍光灯からの LED 素子の非破壊剥離を目的とした最適粉砕方法の検討, MMIJ 春季大会, pp. 1-4, 0317, 2020
3. 久保裕幹, 米山基樹, 大和田秀二, 田透, 枇榔竜二：LIBS ソータを用いたミックスメタルの相互分離および各種金属基礎物性が LIBS 分析挙動に与える影響, MMIJ 春季大会, pp. 1-6, 0317, 2020
4. 小川貴大, 大和田秀二：粒子の部分比に着目した新たな選別結果推定方法の提案, MMIJ 春季大会, pp. 1-4, 0317, 2020
5. 梅津えみ, 松本祐一郎, 尾見苑子, 大和田秀二, 張田真, 寺崎英樹, 加藤聡：廃太陽光パネルからの高純度ガラス回収における電気パルス粉砕の適用性およびその機構解明, MMIJ 春季大会, pp. 1-6, 0317, 2020
6. 堤和真, 小川貴大, 大和田秀二, 川上智, 田畑奨太：物理選別による非鉄製錬忌避元素の除去を目的とした廃電子基板の焙焼・粉砕プロセスの検討, その 2 - 基板部の粉砕挙動と中品位素子の粉砕・選別挙動-, MMIJ 春季大会, pp. 1-5, 0315, 2020
7. 近藤弦, 大和田秀二：産業廃棄物焼却主灰からの物理選別による有価金属の回収と忌避成分の除去, MMIJ 春季大会, ポスター発表, 0316, 2020
8. 大西真理子, 大和田秀二：低温加熱と電気パルス粉砕による CFRP からの炭素繊維回収の検討, MMIJ 春季大会, ポスター発表, 0316, 2020
9. 中川将和, 大和田秀二：物理選別によるシュレッダーダストからの金属回収および塩素除去の可能性, MMIJ 春季大会, ポスター発表, 0316, 2020
10. 島田祐輔, 大和田秀二：MW-SIBS に関する基礎研究及びソーティング適用可能性の検討, MMIJ 春季大会, ポスター発表, 0316, 2020
11. 尾見苑子, 大和田秀二：電気パルス粉砕における不良導体同士の異相境界面優先破壊機構解明, MMIJ 春季大会, ポスター発表, 0316, 2020
12. 有山広大, 大和田秀二：電気パルス粉砕による石炭の単体分離性向上に関する研究, MMIJ 春季大会, ポスター発表, 0316, 2020
13. 築瀬公平, 大和田秀二：CFD によるパケットカラム浮選の挙動解析および浮選確率論の適用, MMIJ 春季大会, ポスター発表, 0316, 2020
14. 大和田秀二：大量廃棄時代に向けた太陽光発電パネルリサイクル技術の動向, ～大量廃棄時代に向けた太陽光発電パネルリサイクルの最新動向と展望, 技術情報センター, 連合会館, 0221, 2020
15. 大和田秀二：日本における太陽光パネルリサイクル技術最新動向, 太陽光パネルリサイクルセミナー～国内外の技術動向と最新の取り組み～, 中部経済産業局, AP 名古屋, pp. 1-15, 0218, 2020
16. 大和田秀二：都市ごみ焼却主灰からの金属濃縮技術, 技術情報センターセミナー, 「灰【焼却灰, 石炭灰, バイオマス灰】の有効利用への取り組みと技術／研究開発動向」, お茶の水・連合会館, pp. 1-21, 1212, 2019
17. 大和田秀二：賢く壊して賢く分けるー太陽光(PV)パネルのリサイクル等ー, エコプロ 2019・環境再生保全機構サイエンスカフェ, pp. 1-15, 1206, 2019

18. 大和田秀二：環境調和型資源循環プロセスと破砕・選別技術，第 19 期フォーラム環境塾，pp. 1-44，1204，2019
19. 大和田秀二：センサー選別技術の最新動向—SBSC(Sensor Based Sorting & Control)の動向を中心に—，素材プロセッシング第 69 委員会，第 3 分科会(資源・環境関連技術)[第 16 回]研究会，「廃プラスチックの動向から見た最近の資源循環とリサイクル」，pp. 19-28，1119，2019
20. 大和田秀二：人類に未来はあるか？—環境調和のための資源循環—，早稲田祭教育学院，pp. 1-13，1103，2019
21. 大和田秀二：素材循環技術の現状と課題，「SDGs のための資源・材料の循環使用に関するシンポジウム」，日本学術会議 材料工学委員会・総合工学委員会・環境学委員会，日本学術会議講堂，0805，2019
22. 大和田秀二：地球環境と資源循環，早大理工オープンキャンパス，環境資源工学科模擬講義，pp.1-12，0804，2019
23. 伊藤輝，大和田秀二：廃 LED からの Ga 回収に関する研究，資源・素材学会関東支部「第 16 回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会」，ポスター発表，0802，2019
24. 久保裕幹，米山基樹，大和田秀二：LIBS ソータを用いたミックスメタルの相互分離，資源・素材学会関東支部「第 16 回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会」，ポスター発表，0802，2019
25. 松本祐一郎，尾見苑子，梅津えみ，大和田秀二，張田真，寺崎英樹，加藤聡：電気パルス粉砕による太陽光パネルからの高純度ガラス回収，資源・素材学会関東支部「第 16 回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会」，ポスター発表，0802，2019
26. 近藤弦，大和田秀二：物理選別による産廃焼却主灰からのクロム分の除去，資源・素材学会関東支部「第 16 回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会」，ポスター発表，0802，2019
27. 有山広大，大和田秀二，所千晴：電気パルス粉砕による石炭の単体分離性向上の検討，資源・素材学会関東支部「第 16 回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会」，ポスター発表，0802，2019
28. 小川貴大，杉澤建，大和田秀二：粒子部分比分布からの選別結果推定法の検討，資源・素材学会関東支部「第 16 回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会」，ポスター発表，0802，2019
29. 堤和真，小川貴大，大和田秀二，所千晴，Widyawanto Prastistho，川上智，田畑奨太：非鉄製錬忌避元素の除去を目的とした廃電子基板の焙焼・粉砕・選別プロセスの検討，資源・素材学会関東支部「第 16 回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会」，ポスター発表，0802，2019
30. 丸山修平，澤村幸宏，西麻依子，近藤正隆，大和田秀二，所千晴，Soowon Lim，浪平隆男：新規電気パルス法を用いたリチウムイオン電池からの正極活物質の分離，資源・素材学会関東支部「第 16 回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会」，ポスター発表，0802，2019
31. 大和田秀二：リサイクル技術の最先端：—リチウムイオン電池から都市鉱山メダルまで—，第 12 回環境教育講演会「電池とその利用に関する環境問題と化学教育の実践」，日本化学会 環境・安全推進委員会，化学会館，pp.4-23，0801，2019
32. 大和田秀二：次世代型資源循環プロセスの提案，招待講演，J&T 環境，pp.1-24，0712，2019
33. 大和田秀二：循環型社会構築のための次世代型リサイクル技術—「東京 2020」都市鉱山メダル製造を含む—，招待講演，「TIRI クロスミーティング 2019」，東京都立産業技術研究センター本部，0705，2019
34. 大和田秀二：サーキュラーエコノミーにおける金属リサイクル技術の動向，廃棄物処理・リサイクル IoT 導入促進協議会，令和元年度第1回廃棄物処理・リサイクル IoT ビジネスセミナー，TKP 虎ノ門駅前カンファレンスセンター，0620，2019
35. 大和田秀二：「東京 2020」と「都市鉱山メダル」—小型家電リサイクルの現状—，早大環境資源工学会総

会・講演会, 早大理工, pp. 1-16, 0615, 2019

36. 大和田秀二: 令和時代の日本の循環型社会に望むこと, 招待講演, IRRSG 2019 年度第 4 回例会, 令和時代の循環型社会とリサイクルビジネス・リサイクルシンポジウム DX2019, 学士会館, pp.26-34, 0529, 2019
37. 大和田秀二: 次世代型リサイクルプロセス, 啓愛社特別講演, pp.1-60, 0514, 2019
38. 西麻依子, 綱澤有輝, 加藤聡, 張田真, 大和田秀二, 所千晴: 偏心型攪拌ミルによる廃太陽光パネルからのガラス粉砕の速度論的考察, 粉体工学会春季大会, 早大国際会議場, 0509, 2019

4.4 受賞・表彰

1. International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology (EARTH2019) にて Best Paper Award
T. Senga, S. Maruyama, S. Omi, S. Owada, T. Namihira: Preferential Breakage Mechanism at Phase Boundary in the Electrical Disintegration -in case of an artificial conductor/insulator binary sample-, 15th Int. Symp. East Asian Resources Recycling Technology, EARTH 2019, Pyeongchang, Korea, pp. 337-341, Oct 15, 2019
2. 資源・素材学会「資源・素材・環境の交流会」にて, 優秀ポスター賞を受賞
丸山修平, 澤村幸宏, 西麻依子, 近藤正隆, 大和田秀二, 所千晴, Soowon Lim, 浪平隆男: 新規電気パルス法を用いたリチウムイオン電池からの正極活物質の分離, 資源・素材学会関東支部「第 16 回「資源・素材・環境」技術と研究の交流会」, ポスター発表, 0802, 2019

4.5 学会および社会的活動

経産省「産業構造審議会産業技術環境分科会廃棄物・リサイクル小委員会小型家電リサイクルWG」座長
経産省「産業構造審議会産業技術環境分科会廃棄物・リサイクル小委員会容器包装リサイクルWG」座長
経産省リサイクル推進課「平成 26 年度エネルギー使用合理化技術開発費補助金（資源循環実証事業）審査委員会」委員
経産省リサイクル推進課「平成 26 年度エネルギー使用合理化技術開発費補助金（省エネ型リサイクルプロセス実証支援事業）審査委員会」委員
経産省 NEDO 技術委員
経産省 JOGMEC「湿式製錬技術開発委員会」委員長
経産省 JOGMEC「深海底鉱物資源探査等検討委員会」委員
環境省「平成 26 年度低炭素型 3R 技術・システム実証事業評価検討会」委員
環境省「平成 28 年度二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金（省 CO2 型リサイクル高度化設備導入促進事業）審査委員会」委員
自動車リサイクル高度化財団 理事
自動車リサイクル高度化財団「選考委員会」委員長
産業環境管理協会「資源循環技術・システム表彰審査委員会」委員
日本産業機械工業会「優秀環境装置表彰事業審査委員会」委員
日本産業機械工業会 環境ビジネス委員会「3R リサイクル研究会」アドバイザー
環境資源工学会 理事
東京大学 客員教授

東北大学 客員教授
秋田大学 客員教授，等

5. 研究活動の課題と展望

本研究では，既述のように，物理的分離の核をなす粉碎・選別両技術の改善により，資源循環プロセスの更なる高度化と省エネルギー化を目指している。我々はこのような技術を”Intelligent Comminution”，”Intelligent Separation”と呼んでおり，今後，これらの各種技術開発および適用性の拡大に尽力し，真の環境調和型資源循環型社会を構築したいと考えている。