

# 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. 研究課題

本研究課題では、人工（廃棄物）資源の有効利用を念頭に置き、省資源・エネルギー的な分離技術である物理選別（固相分離）を各種廃棄物に適用して、従来、未利用あるいは利用困難であった廃棄物の人工資源化を目指す。特に、中には有価成分とともに有害成分あるいは後段の精製段階における各種の忌避成分が含有されており、その人工資源化には、有価成分を濃縮し有害・忌避成分を前除去することが求められている。以下にその具体的な研究成果の概要を記す。

## 2. 主な研究成果

### 2.1 使用済み割れ PV パネル焙焼産物からの有価金属・ガラスの回収（環境省・新菱との共同）

(株)新菱は、使用済み PV パネルを二段焙焼し、その残渣から金属およびガラスを濃縮するプロセスを開発中であり、本研究は、特に使用済み割れガラスの上記焙焼産物を対象として、その構成成分である銅・銀・ガラスの各成分を物理選別によって回収するプロセスを開発した。上記 PV ガラス中には、①銅線、②銀を含む Si セル、③カバーガラスが含まれており、ふるい分け粗粒産物に①を、風力選別軽産物に②を、エアテーブル重産物に③を、それぞれ高純度で回収することができ、①、②は非鉄製錬原料として、③はグラスファイバー原料として、それぞれ有価で売却できることが判明した。また、風力選別とエアテーブル選別に関する Si セルとガラスの分離機構を、そのサイズ・密度・形状の点から流体力学的に考察し、特に形状の影響に関する分離モデルを構築した。次年度への課題としては、焙焼後の各種成分の粒度制御および③に微量に含まれる半田微粒子の除去、が挙げられた。

### 2.2 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 エコシステムとの共同）

廃電子機器特に基板中には各種の Au、Cu 等の有価金属とともに Al、Br 等その後の非鉄製錬における忌避元素が含まれており、事前に前者を濃縮し後者を除去することが必要である。このプロセスでは、加熱、焙焼後に実装部品類を基板から剥離したのちに、基板には、二段粉碎、ふるい分けを、部品類には電気パルス粉碎、高磁場磁選を施すことにより、ふるい分け細粒産物および高磁場磁選磁着物中に Au、Cu 等の有価金属が濃縮し、それ以外の産物に Al、Br 等の忌避元素が除去されることが分かった。また、このプロセスが、基板をこのプロセスを経ずに直接非鉄製錬に供給する場合と比較して、大いなる経済効果があることも判明した。本研究では、上記プロセスにおける各成分の各工程における分離機構について詳細な検討を行い、本プロセスの技術的合理性を証明した。

### 2.3 電気パルス粉碎による CFRP からの CF の回収（経産省 NEDO・太平洋セメントとの共同）

廃コンクリートからの骨材回収はこれまでも行われてきたが、本研究では、主としてセメントペースト分を回収し、これを、セメント製造時に発生する CO<sub>2</sub> を用いて炭酸化することにより、天然資源である石灰石代替原料とすることを目的とする。このプロセスが確立すれば、セメント製造における大幅な CO<sub>2</sub> 削減が可能となり、コンクリート製造における脱炭素化を実現することが可能となる。本研究では、廃コンクリートからセメントペーストを高純度で骨材から分離するために、電気パルス粉砕（ED）と攪拌型粉砕（ATG）を適用してその効果を比較した。その結果、ED に比べて ATG ではセメントペースト選択粉砕が進行すること、そしてその機構の一部が明らかとなった。今後の課題としては、①ED および ATG におけるセメントペーストと骨材の単体分離性の比較、②粉砕後に実施する微粒子の比重選別における両粉砕産物の適性の比較、が挙げられた。

## 2.4 LIBSソータによるシュレッター磁着物中の鉄とステンレスの分離（環境省・三菱UFJ R&Cとの共同）

シュレッタープラントにおける磁着物中には普通鋼のほかに400番台およびマルテンサイト変態した300番台のステンレスが混入しており、これらを分離回収することが必要である。本研究では、当研究室にて開発したLIBS（レーザー誘起ブレイクダウン分光）ソータを利用して、この目的を達成した。まずは各種ステンレス標準試料および実際の各種磁着物についてその組成をLIBSハンドヘルドにて確認し、その後LIBSソータに供したところ、標準試料では直線性・相関性の高い検量線が得られるが、磁着物ではいずれも低く、その原因が、各粒子表面のメッキ・塗装・汚れそして不規則な形状にあることが判明した。ただし、磁着物のLIBSソーティングにおける普通鋼のステンレス類に対する分離効率と比較的広いCr/Fe比の閾値範囲において97%以上であり、実用性においてもLIBSソータの信頼の高さが証明された。なお、課題としては、既述のように、実際の磁着物に対する検量線の不正が挙げられ、次年度はこの影響について検討することとした。

## 2.5 電気パルス粉砕による石炭の単体分離性向上（経産省NEDO・電力中央研究所との共同）

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）を電気パルス粉砕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した。本年度は、電中研から送付されたMLB産原炭中の各種鉱物質の粒群別分布を明らかにし、その電気パルス粉砕産物の同測定結果と比較して、各鉱物質の選択粉砕性の差を見出した。その他の結果としては、①原炭中には、kaolinite、quartzは石炭質とほぼ同様の粉砕挙動を示しAl分やSi分のふり分けによるC分との分離は困難であること、②calcite、pyriteは石炭質とは異なる粉砕挙動を示しいずれも石炭質に比べて最終側に濃縮すること、③ただし、calciteは原料中では石炭質とほぼ同様の粒群に存在するが選択的粉砕されて細粒が濃縮すること、④pyriteはもともと原料中で細粒側に存在しておりそれらが選択的に粉砕されるのではないこと、等が判明した。来年度は、より高灰分の石炭を用いて、電気パルス粉砕における鉱物質と石炭質の明確な挙動の違いを検討することとした。

## 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 著書

1. 大和田秀二： センサー選別, バリューチェーンと単位操作から見たリサイクル—最近の化学工学 69—, 化学工学会, pp.71-83, 1月, 2021年

### 4.2 国際会議・海外講演等

1. S. Owada: Application of LIBS to Sensor Based Sorting, 11<sup>th</sup> Int. Conf. LIBS (LIBS2020), Invited Lecture, pp. 1, Sept. 21, 2020

### 4.3 国内講演・学会発表・研究報告等

1. 大和田秀二： センサー選別技術の最新動向 —SBSC (Sensor Based Sorting & Control) の動向を含む—, JX 金属招待講演, p.1-28, 2021年3月
2. 大和田秀二： 次世代型資源循環プロセス, 鈴木商会招待講演, p.1-20, 2021年3月
3. 大西真理子, 伊藤輝, 大和田秀二, 瀧澤洗, 一坪幸輝, 吉川知久, 石田泰之： 高度粉砕による炭酸化廃コンクリートからの骨材・セメントペーストの相互分離, 資源・素材学会春季大会, p.1-6, 2021年3月
4. 堤和真, 小川貴大, 笹木雄大, 大和田秀二, 川上智, 田畑奨太： 有価金属濃縮と非鉄製錬忌避元素除去のための廃電子基板の焙焼・粉砕・選別プロセス開発, 資源・素材学会春季大会, p.1-6, 3月 2021年
5. 梅津えみ, 阿部優香里, 大和田秀二, 守谷大輔, 村山彰宏： 使用済み割れ PV パネルからの高純度ガラス回収プロセスの開発, 資源・素材学会春季大会, p.1-6, 2021年3月
6. 大和田秀二： PC 基板処理フローの薄型 TV 基板への適用性および4年間のまとめ, JOGMEC・物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発事業推進委員会, p.1-13, 2021年2月
7. 大和田秀二： リサイクルにおける物理選別の最前線, 「バリューチェーンと単位操作から見たリサイクル」最近の化学工学講習会 69, 化学工学会関東支部, p.1-39, 2021年1月
8. 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—, 鈴木商会招待講演, p.1-23, 2020年12月
9. 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【石炭灰, バイオマス灰, 焼却灰(ゴミ・汚泥)】の有効利用への取り組み—, p.1-25, 2020年12月
10. 大和田秀二： リサイクル技術の将来像, 阪和興業招待講演, p.1-40, 2020年12月
11. 大和田秀二： 廃電子基板の焙焼・物理選別による有価金属回収と製錬忌避成分除去, エコ計画招待講演, pp.1-16, 1-31, 1-16, 1-15, エコ計画招待講演, 2020年11月
12. S.Owada: Next Generation Recycling Process by using “Intelligent Comminution” and “Intelligent Sorting”, Webinar on Recycling and Waste Management, p.1-21, Nov., 2020
13. 大和田秀二： PC 基板処理フローからの総合産物選択法および同フローの薄型 TV 基板への適用可能性, JOGMEC・物理選別による廃電子基板からの製錬忌避元素の低減技術の開発事業推進委員会, p.1-15, 2020年11月
14. 大西真理子, 大和田秀二： CFRP からの炭素繊維回収における低温加熱および電気パルス粉砕の適用性, 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, p.1, 2020年10月
15. 有山広大, 藤波晃, 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, p.1, 2020年10月
16. 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, p.1, 2020年10月

17. 堤和真, 小川貴大, 笹木雄大, 大和田秀二, 川上智, 田畑奨太: 有価金属濃縮と非鉄製錬忌避元素のための廃電子基板の焙焼・粉碎プロセス, 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, p.1, 10 月, 2020 年
18. 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: 電気パルス粉碎による廃太陽光パネルからの高純度ガラス回収構築, 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, p.1, 2020 年 10 月
19. 近藤弦, 原田大世, 大和田秀二, 水上正善: 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, p.1, 2020 年 10 月
20. 小川貴大, 大和田秀二: 物理選別プロセス最適化のための選別結果推定法, 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, 優秀ポスター賞受賞, p.1, 2020 年 10 月
21. 尾見苑子, 大和田秀二: 電気パルス粉碎における不良導体人工二成分系試料の異相境界面優先破壊機構, 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, p.1, 2020 年 10 月
22. S.Owada: Application of LIBS to Sensor Based Sorting, Invited Lecture, LIBS 2020, p.1, 1-14, Sept., 2020
23. 大和田秀二: 未来の天然鉱山・都市鉱山パネルディスカッション・パネラー, 資源・素材学会秋季大会 (Web), 2020 年 9 月
24. 大和田秀二: 日本産業機械工業会・環境装置部会・循環ビジネス交流会セミナー・講評, p.1-3, 2020 年 7 月
25. 大和田秀二, 所千晴, 張田真: PV・液晶等積層型難処理パネルの合理的リサイクル技術の開発, 環境省環境研究総合研究費最終報告会, p.1-5, 2020 年 7 月
26. 大和田秀二: 廃電子機器からのレアメタル回収, エコ計画招待講演, p.1-40, 2020 年 7 月
27. 大和田秀二: 石炭の電気パルス粉碎, クリーンコール技術開発／石炭利用環境対策事業／石炭利用環境対策推進事業／石炭灰の削減と用途拡大のための石炭高品位化技術開発キックオフ MTG, p.1-10, 1-9, 2020 年 6 月
28. 大和田秀二: 次世代型リサイクルプロセス, エコ計画招待講演, p.1-21, 2020 年 6 月

#### 4.4 受賞・表彰

1. 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  
小川貴大, 大和田秀二: 物理選別プロセス最適化のための選別結果推定法, 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, 2020 年 10 月

#### 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 代表理事

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。