

## 所 千晴

Tokoro Chiharu

早稲田大学 理工学術院 教授 / 東京大学 大学院工学系研究科 教授  
2019年より未来社会創造事業 研究開発代表者

カーボンニュートラルの実現に向けて、二次電池や電気自動車(EV)の導入が進めば、リチウムイオン電池(LIB)や複合素材で構成された車が市場にあふれ、レアメタルなどの特定資源の需要が高まると予想される。その際に、効率的な資源循環を可能にする技術の重要度が増してくる。早稲田大学理工学術院の所千晴教授は、こうした複合素材の使用済み製品から有用な資源を低負荷・低コストで分離し、再利用を可能にする分離技術の開発に挑んでいる。

特集

OVERVIEW

# 資源循環型の社会目指し新技術を開発 低負荷・低コストで完全分離を実現

## 新規電気パルス法を開発 循環経済への展開後押し

リチウムイオン電池の正極材活物質をアルミ(Al)集電箔の両面に接着剤でつけた試料に、瞬間的に高電圧をかけると、「バチン！」という大きな音と共に真っ黒な粒子が剥がれ落ちる。この分離は「新規電気パルス法」という技術を用いて実現される。黒い粒子となった正極材活物質は、元素としての有用性が高いニッケル(Ni)やコバルト(Co)などの酸化物で、再利用もできる。

研究開発を進めるのは、早稲田大学の所千晴教授だ。現状のリサイクルは、廃棄物を破碎・粉砕・選別し、化学的な処理で金(Au)などの高価な

ものを取り出して再利用している。しかし、これだけだと元素として経済的に価値のあるものしか資源循環できないのが実情だ。「そこで、より精度の高い革新的な分離技術が必要だと思いました」と開発のきっかけを語る。

所さんが目指すのは、サーキュラーエコノミー(循環経済)への展開だ(図1)。これは、いわゆる3R「リデュース」・「リデュース」・「リサイクル」に加え、廃棄物を原料として再利用することで、循環的に資源を使い続けるようにする経済モデルのことだ。従来は自然資源を使い捨てにして、廃棄物を排出していたところを、処理する流れに沿って物の価値を余すことなく使う。

LIBも現状、その循環を可能にする良い分離技術はないという。正極材活物質を抜き出すには、焼却・粉砕後に物理的に選別するか、あるいは解体・洗浄した上で粉砕するかのどちらかになる。いずれにしても、環境負荷は大きく、コストもかかる(図2)。これに対して所さんが目指すのは、回収以降のプロセス変革である。革新的な物理的分離を経て、素材・部材にまで至る道筋を作るのが目標だ。これを後押しする技術こそ、冒頭で紹介した新規電気パルス法なのだ。

現状の分離技術は、大きく分けて作業性と選択性の2つの軸がある。機械を用いた破碎・粉砕は、作業効率が高いが、必要なものだけを抜き出す選択性に欠ける。一方で、人力の選別

では作業効率は低いが、選択性は高い。その両極の間に、水中に固定された電極に試料を挟み、放電により衝撃波を与えることで、界面を選択的に破壊する従来の電気パルス法が位置する。新規電気パルス法は、従来の電気パルス法の作業性と選択性の向上を図った手法で、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の排出量も抑えられる点が革新的である。

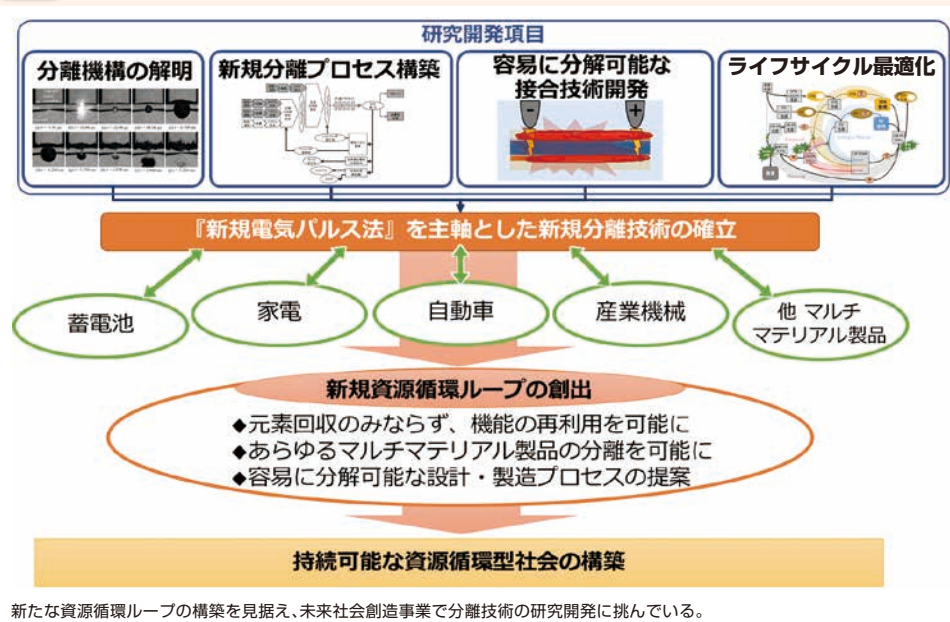
研究開発を進めるにあたり、JSTの未来社会創造事業を利用した。重点公募テーマである「新たな資源循環サイクルを可能とするものづくりプロセスの革新」に採択され「製品ライフサイクル管理とそれを支える革新的解体技術開発による統合循環生産システムの構築」の研究開発を開始した。所さんは2017年11月から探索加速型研究を進め、19年からは社会実装に向けた本格研究に取り組んでいる。

### 厄介なマルチマテリアル化 分解しやすい設計を意識

所さんは、製造側にも資源循環を重要な課題として認識してもらい、最終的には設計概念の変容のきっかけを作れるのではないかと考えて事業への応募を決めた。「産業界では今、高機能・低コストが求められる中で、製品のマルチマテリアル化が進んでいます。分離する過程で、必要なエネルギー・コストが増えるので循環利用は困難です」。マルチマテリアル化が進むほど拍車がかかる既存工程は、環境と経済双方の観点から好ましくない。

一方で、時代の要請に応じて、企業側の姿勢にも変化が見え始めていると所さんは感じている。「SDGsの達成やカー

図1 未来社会創造事業(所課題)のロードマップ



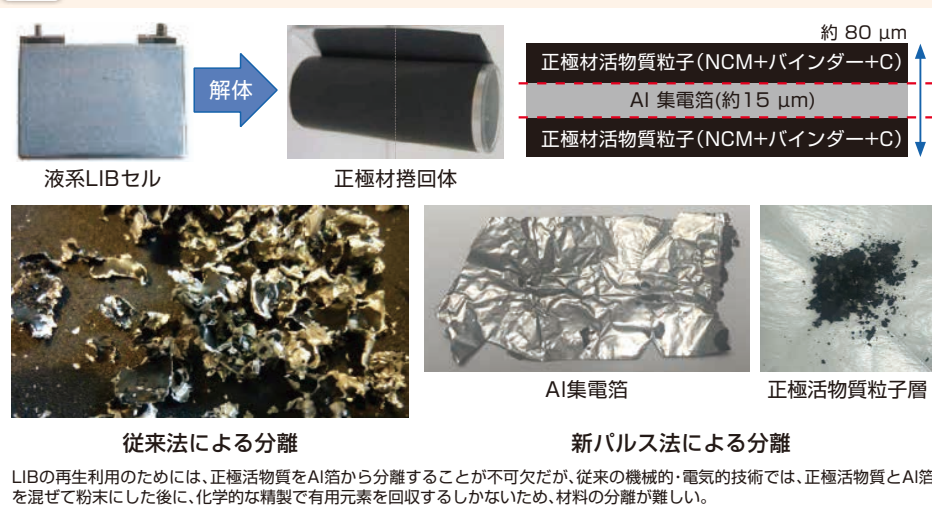
新たな資源循環ループの構築を見据え、未来社会創造事業で分離技術の研究開発に挑んでいる。

ボンニュートラルの実現、サーキュラーエコノミーの構築が求められる中、企業側にも資源循環に対する意識が芽生え始めています。あらかじめ分解しやすい製品を作ることの重要性が認識され始めているのです。こうした意識の変化は「インバース・マニュファクチャリング」という言葉にも表れている。これは、使用済み製品の「回収・分解・選別・再利用」という流れを踏まえた上で、設計・製造することを意味する。これこそまさに、所さんが実現したい「容易に分解可能

な設計・製造プロセス」だ。企業側は、「環境」「経済」の判断軸だけでなく「社会」という判断軸からも生産活動を捉えるようになってきたのだ。

単なる処理側の技術開発だけではなく、企業側の設計・製造概念の見直しや新たな資源循環ループの創出につなげたい。全国各地の大学だけでなく、大手企業が参画する研究体制の構築にも、その思いは表れている。実現するには、技術という視点以外からの評価が欠かせない。「新技術を用いたプロセスやシステムをライフ

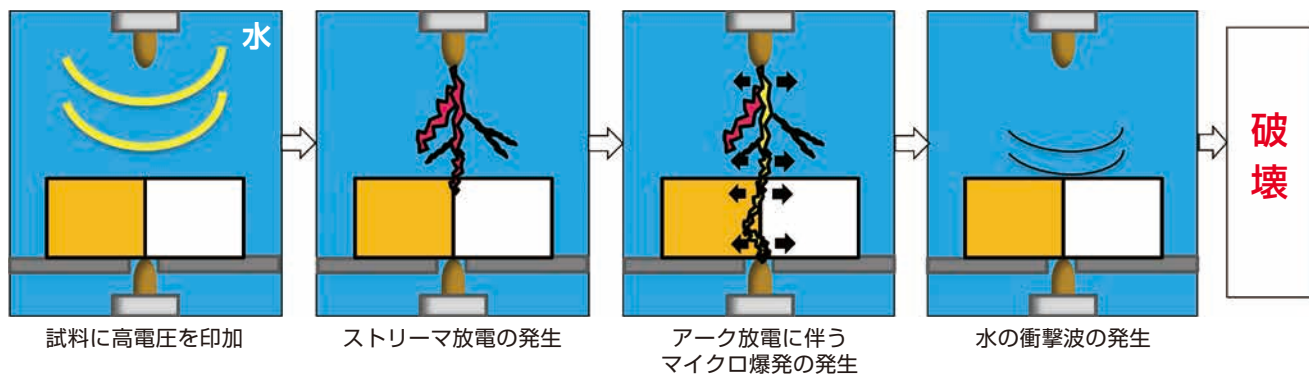
図2 LIB正極材の選択的な分離



LIBの再生利用のためには、正極活物質をAl箔から分離することが不可欠だが、従来の機械的・電氣的技術では、正極活物質とAl箔を混ぜて粉末にした後に、化学的な精製で有用元素を回収するしかないため、材料の分離が難しい。



図3 従来の電気パルス法



数十億分の1秒～0.1秒の短い時間で、数ギガワット～数百ギガワットの大きなパワーを物体に与えることで絶縁破壊、プラズマ化、通電などを生じさせ、そこで起こる衝撃波、高温化、相変化、爆発などで分離を促す。目的に応じて精緻に制御することで、複数の物質の物理分離を高効率・低エネルギーで行うことができる。

サイクルでシミュレーションしたり、評価したりできる専門家との協働は譲れませんでした」と所さんは体制構築に向けたこだわりを明かす。

### 試行錯誤で精緻な制御を実現 メカニズム解明は苦難の連続

資源循環のための技術開発で所さんが重視したのは「環境」「経済」「社会」という3つの視点だ。環境負荷が抑えられ、経済性が高く、時代ごとの社会からの求めにも応える技術こそが、これからの循環型社会の構築に欠かせない。「環境・経済・社会の調和を達成した分離技術があれば、現状では廃棄しているものから高機能の素材を取り出すことも可能です」と所さんは強調する。

では、所さんは、新規電気パルス法にどのように行き着いたのか。当初から念頭に置いていたのは社会課題だった。LIBを始めとした、資源循環を図る上で困りそうな製品から必要な資源だけを高い作業効率で抜き出す手法を探し求めた。その結果、対象に高電圧を加え、衝撃、加熱、反応などのさまざまな現象を生じさせ、それによ

て分離を実現する電気パルスに思い至ったという。高電圧だが瞬間的な通電のため、エネルギー利用は比較的少ない(図3)。

しかし、従来の電気パルス法では発生させる衝撃波を主に使用するため、分離精度が低かった。LIBの例で言えば、Al箔と正極材活物質の界面で、両者を完全に分離することは困難であった。もっと精緻な分離を実現するには、放電経路、電流・電圧波形、電圧を加える印加頻度なども、従来の方法以上に細かく制御する必要がある。言い換えると、衝撃に頼らず他の現象も生かせれば、選択性の高い界面での分離も実現可能だ。

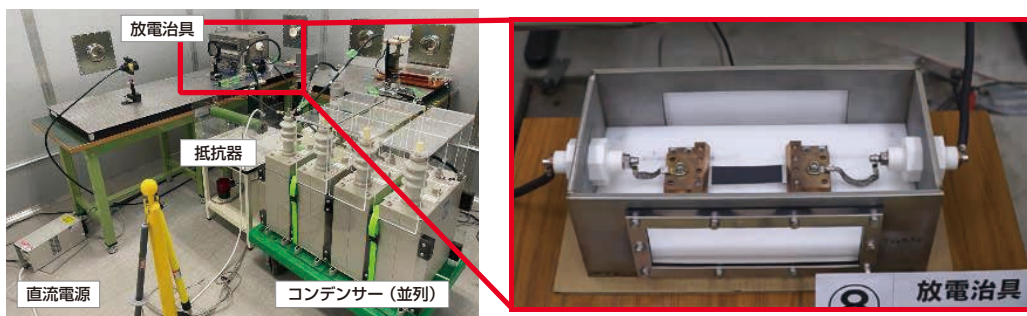
適用条件として、分離の対象はAl箔と正極材活物質のように電気を通すもので、しかも電気的な特性が異なっている必要がある。一方で、従来の方法と違って、水中だけでなく気中でも実施可能というメリットも

あった。試行錯誤を経て、新規電気パルス法の可能性は実験室レベルで確認された(図4、5)。「運転条件を精緻に制御すれば界面での分離が生じることは、理論上はわかっていました。早い段階でその現象に出合えて幸運でした」と所さんは振り返る。

ただ、そこからは苦難の連続だった。まず、目の前で起きた正極材活物質が剥離する現象を科学的にどう説明するか、という関門が立ちはだかった。そこで本格研究では、メカニズムの解明に欠かせない分析機器を調達し、剥離現象を高速度カメラやサーモグラフィーカメラで撮影するなどの作業を進めた。現時点では、通電で生じるジュール熱によって界面上の接着剤が分解され、電磁場のローレンツ力によってAl箔が膨張し、剥離が促されることが明らかになった。

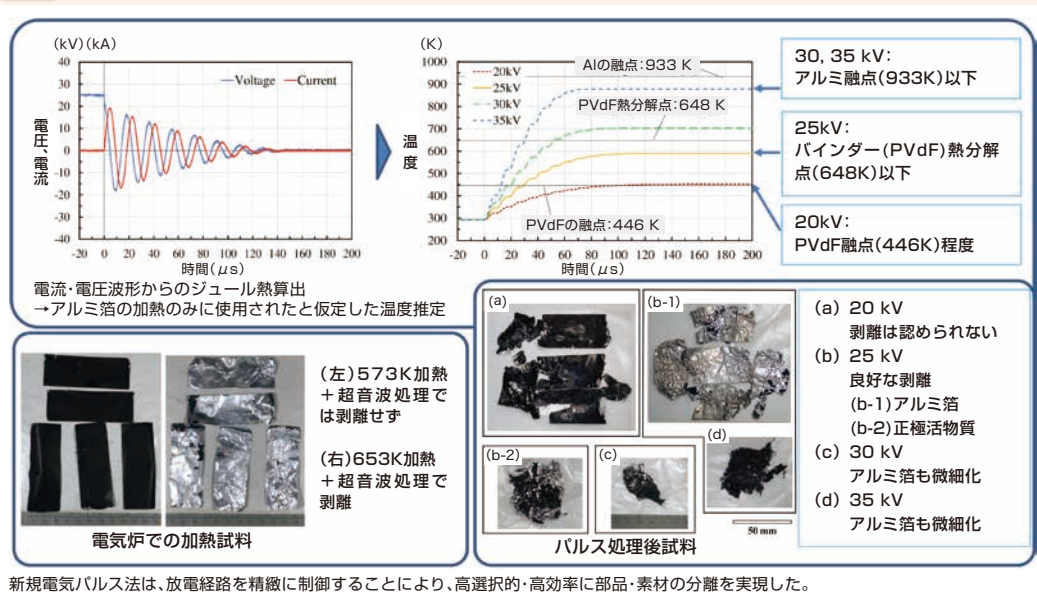
このままメカニズムの解明が順調

図4 新規電気パルス法の材料分離実験装置



装置奥の放電治具に電流を流し、その際に生じる衝撃波や爆発を制御することで、精密な材料分離を行う。

図5 新規電気パルス法による材料分離



術の適用を想定するならば、こうした設計が求められる、と定性的に提案することも可能です」と所さんは新技術の現在地を語る。事業最終年度では、社会実装に向け、企業と共に実験装置のスケールアップに挑む。LIBの材料分離をする実験装置には、LIBの搬送部や正極材活物質の回収スペースも組み込み、本格的な分離装置に近づけた。

に進むかと思われたが、その後、多種多様なLIBに対しては、剥離現象が安定しないという壁にぶつかった。「どのようなLIBでも剥離現象を再現できるように、まず仮説を立てて実験を重ね、その結果を定量的に分析することで、メカニズムの解明につなげていきたいと考えています」と所さんは今後を見据える。

### 変わる企業側の問題意識 装置をスケールアップへ

もう1つの難題は、マルチマテリアル化への対応だ。具体的には、分解しやすいEVの車体への適用可能性の検討である。EVの車体は軽量化を突き詰めるため、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)などさまざまな素材を適材適所で組み合わせる。それらの異種素材を互いに分離したり、CFRPから炭素繊維だけを分離したりする技術として、新規電気パルス法の可能性を探るというものだ。

特に苦労したのは、実験材料の提供における企業との交渉だったという。どのような物質がどのような科学的な形態で存在するのか、その情報があれば、素材の検討がしやすくなる。しかし、企業と守秘義務契約を

交わしていても、機密保持の観点から製品情報の開示を断られることもあった。「このような状況では、分離技術は育ちません」と所さんは懸念を語る。

とはいえ、所さんが自ら指摘するように、資源循環に対する企業側の問題意識は大きく変わってきている。「今こそ、インバース・マニファクチャリングやサーキュラーエコノミーを達成するための取り組みを始めるラストチャンスです」と今後に望みをかける。本格研究から約3年半。新規電気パルス法は、メカニズムの解明にはまだ課題を残しつつも、一定の成果を上げている。

すでに実験室のレベルでは、定量的にどのようなものの分離に適しているかを判断できるまで、分離技術として確立できているという。「分解しやすい設計を促すという観点では、この技

研究開発で所さんが重要視しているのは、研究シーズから出発するのではなく、社会ニーズを理解することだ。「サプライチェーン全体を見渡した上で、分離技術やプロセスとしてのボトルネックはどの部分にあるのか、正確に理解してから研究開発に取り組むことが大事です。初期段階の課題設定を間違わないように注意したいですね」。新規電気パルス法とさまざまな分離技術を組み合わせながら、循環型社会の構築に向けた所さんの取り組みは続いていく。

(TEXT:茂木俊輔、PHOTO:石原秀樹)



今後は、所要エネルギーや精度に関する透明性を高め、製造側の設計によって分離が困難な点を補うことにより、製造の後追い処理ではない資源循環を目指したいと思っています。