

「持続可能な社会に向けた サーキュラーエコノミーへの期待」 —第68回生活と環境全国大会 特別講演から—

ところ ちはる
所 千晴早稲田大学 理工学術院 創造理工学部
環境資源工学科 教授

早稲田大学・所千晴教授

本日はこのような貴重な機会をいただき、ありがとうございます。私はサーキュラーエコノミーのための分離技術、廃棄物と呼ばれる使用済みの物をできるだけ新しく再生できるように分離する技術を研究しています。今日はその背景も含めてご紹介いたします。

経済成長と資源消費・環境負荷の デカップリング

まず、サーキュラーエコノミーに対する期待です。

本日の大会のテーマもウェルビーイングの向上と伺っていますが、10年以上前に世

界で発表された歴史ある図があります(図1)。人類のウェルビーイングの向上と、それと強くリンクしている経済的な成長を時間軸で見えています。私たちはこれらを永遠に向上させていきたいと願うのですが、これまでの人類の活動は、残念ながら、これらが時間とともに右肩上がりになるに連れて、環境影響もやはり右肩上がりになり、資源消費も右肩上がりになっていくのが常であったと言って過言ではありません。

昨今、「プラネタリー・バウンダリー」という考え方が出てきました。地球は私たちにとってそれほど大きくなく、このまま人類がやみくもに汚してしまえば、地球がプラネタリー・バウンダリーを超えて悲鳴を上げるといったような警鐘が鳴らされるようになりました。そのような状況では、「デカップリング」と言いますが、環境影響を小さくする。資源をできるだけ使わないようにする。資源消費は弱いデカップリングと言われますが、今ある資源のなかで何とか頑張る。こういったデカップリングをしていくことが重要だというのが、今、私たちが置かれている現状です。

ただ、デカップリングは、概念的には総論賛成ですし、非常に重要なことだと理屈

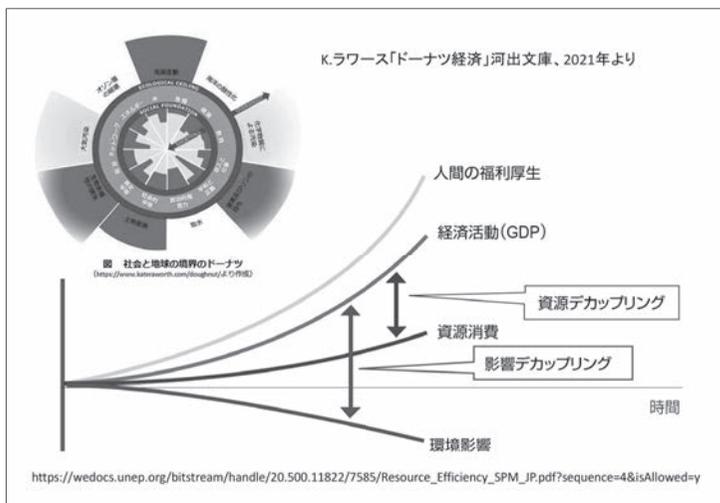


図1 経済成長と環境負荷のデカップリング

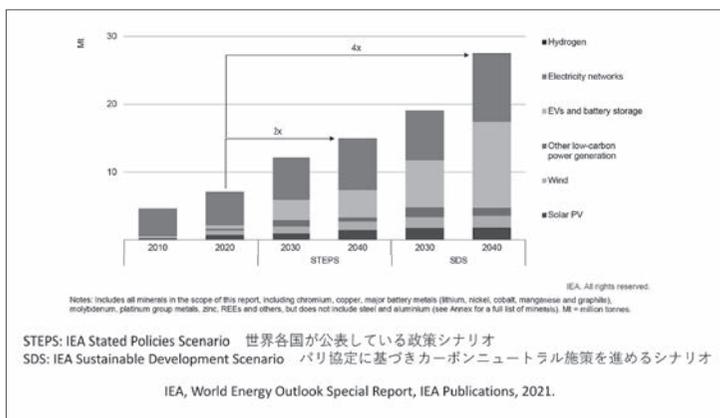


図2 カーボンニュートラルに伴う所要鉱物量の増加

ではわかりませんが、実際にやろうとすると非常に難しいのが現状です。

その難しさを示す統計があります。いわゆるカーボンニュートラル、温室効果ガスを減らすために、再生可能エネルギーを導入したり、電化やデジタル化を進めたりすると、一部の鉱物資源は今以上に必要になるという物です(図2)。環境影響を下げようとして新しい技術を導入すると、資源消費が今以上に増えてしまう。両方をデカップリングするのは非常に難しいことを示しています。

この統計では、電力ネットワークや電気

自動車と蓄電池に関する資源が非常に目立っています。われわれは電気を持ち歩く生き物と化してしまったと言っても過言ではないと思いますが、そのための蓄電池が必要で、それがどんどん新しく導入されていくと、ベースメタルである銅のみならず、リチウム・コバルト・ニッケル等もこれまで以上に必要になります。いろいろな所要鉱物量の増加が懸念されています。

環境・資源制約のなかで成長を志向する サーキュラーエコノミー

その一つの解決策として「サーキュラーエコノミー」という概念があります(図3)。私たちにはいろいろな環境制約・資源制約があります。日本はかなりの資源を輸入に頼り、安全保障の面でもいろいろな懸念が

生じたりしており、少しリスクもあるなかでいろいろな資源を使っています。こうした制約があるなかでも、ウェルビーイングの向上も含めて経済的に成長していき、あるいは地方創生のような新しいバリューを生み出していくことを指向しています。サーキュラーエコノミーは、さまざまな循環に価値を見だし、経済性を持たせるといふ経済政策であり、日本語では「循環経済」と呼ばれます。

循環に経済性を持たせ、制約があるなかで資源消費と環境影響を少なくして、目一杯成長し、新しいバリューを得ようという

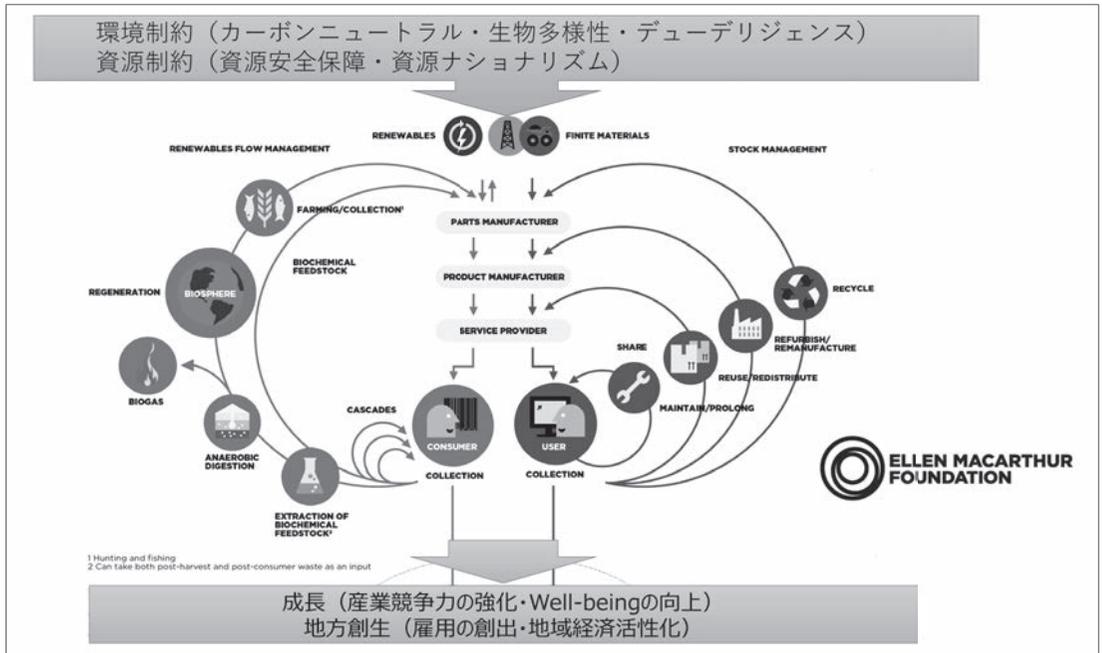


図3 環境・資源制約のなかで成長を志向するサーキュラーエコノミー

ことですが、もちろんこれを達成していくにはいろいろな課題があります。

図3の一番外側の資源循環ループは、「リサイクル」と書かれていますし、適正処理もこのループに入りますが、本日お集まりの皆さまが非常にご苦労されているところだと思います。物をいったん作って使えば、必ず最後はリサイクルあるいは適正処理をしなければいけませんので、ものづくりの、そして生活を支えるインフラの、非常に大事な絶対にやらなければいけないループですが、同時に循環のなかで最もエネルギーと労力がかかるループでもあります。これが循環経済の最も難しい点だろうと思います。

リニアエコノミーでたくさん作り、外側のループでリサイクルや適正処理するのは、循環はしていますが、経済や環境負荷の低減とは必ずしも相補的ではありません。ここが一つ目の非常に難しいところです。ただし、これは絶対にしなければならないので、私たちはここに十分な労力とエネルギーとコストをかけるように、全体最

適化をしていく必要があります。

もう一つは、それではどこに経済性を持たせていくかです。もう少し内側のループに経済性を持たせ、少ない資源でできるだけ環境負荷も低くして、経済性を得て、新たなバリューを得ていくことが必要ですが、この部分も、まだまだ日本ではうまくいっていません。内側になればなるほど、物を作って消費者に渡すという売切り型のビジネスをしてきた製造業が、循環に価値を見いだすビジネスモデルに変換しなければいけないのですが、ビジネスモデルはそう簡単には変えられませんので、そこが非常に難しいのです。これから取り組むべき課題ですが、なかなかすぐには実現できません。

さらに、内側のループは消費者を巻き込んだループになりますが、私たち消費者は、便利で安い新しい物に価値を見だし、どんどん消費するという価値観を持っています。この価値観を、ビジネスモデルの変容とともに変えていくことは、そう簡単にはいきませんので、この内側のループを作る

ことがなかなか難しいのです。

内側のループでは、これまでは消費者を挟んで、物を作る人と、消費者が使用済みにした後に処理する人が、役割分担してきましたが、循環するためには、そこが連携や融合をしていく必要があります、ここも今まではそうした価値観がなかったのでもう進んでいません。

いろいろな理由によって、シェアリング・メンテナンス・リユースといった内側のループが、経済性を持って大きな流れになるまでには、まだまだ課題があります。

さらには、それぞれのループが最適化するだけではなく、全体最適をしなければいけないという課題があり、サーキュラーエコノミーの非常に難しいところです。これさえ守っていればいいと、一つで片付く目標や指標を立てにくいと言い換えてもいいかもしれません。ステークホルダーが多く、いろいろな立場の人が関与していますが、全体最適になって、サーキュラーエコノミーというバリューを、皆で作って皆でゴールを切らなければいけないところが、今までの課題とは非常に異なっています。

いろいろ難しいのですが、これまでものづくりで豊かになってきた日本にとっては、相補的なモデルであろうと思いますので、日本版の強みのあるサーキュラーエコノミーを指向してやっていくべき時にきていると思います。

内側のループを作れば、カーボンニュートラルと資源循環がウィンウィンの関係になり、先ほど難しいと申し上げたデカップリングができるというレポートも出ています。自動車を例にとると、できるだけ内側のループを作り、シェアリングをしたり、小型の自

動車を作ったり、あるいは最後に出てきた物も資源循環するといった、トータルな物質効率性戦略を講じれば、温室効果ガスも削減でき、また資源循環も達成できます。このような試算をしたレポートもありますので、方向性としては間違っていないと思います。

資源効率の向上でサーキュラーエコノミーを実現する

この難しさをものづくりに落とし込んでみると、このような指標になると思います(図4)。サーキュラーエコノミーは、多重のループの全体で資源効率を上げていきます。私たちのウェルビーイングを向上させるための機能はどんどんアップさせながら、必要な資源やエネルギーは少なくしていくということです。これを使って頭のなかを整理するとわかりやすいのですが、難しさも見えてきます。

私たちのウェルビーイング向上のための機能アップの方法には、今まで日本のものづくりが一生懸命やってきたことがすべて入っています。高純度な素材で製品を長寿命化する、あるいは集約化・多機能化・高機能化といったことは、サーキュラーエコノミーの局面でなくても、日本のものづくりが一生懸命やってきたことです。

また、必要な資源やエネルギーを減らす

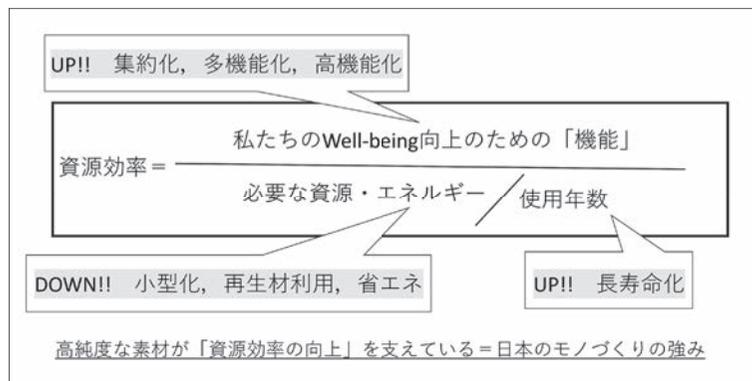


図4 資源効率の向上でサーキュラーエコノミーを実現

方法でも、小型化・省エネ化などは既に一生懸命やってきました。ただ、ここに新たに加わり、これらと相補的になるかどうか考えなければいけないのは、再生材料です。資源循環をし、再生して、もう1回製品に使っていくことは、インフラ的で絶対に必要なところ。しかし、集約化・多機能化・高機能化で機能アップを支えてきた高純度な素材にまで再生するところが、日本ではまだ育っていません。そうした価値観が今まではなかった産業ではないかと思えます。

今のままではコストもかかり、エネルギーもかかってしまうので、知恵を出して、高純度な新しい再生材を作っていくことが、これから日本でもやっていくべきところ。これができれば、他はまさに日本のものづくりの強みなので、ものづくりがさらに盤石な強い物になっていくと思えます。

こうした観点は、戦略を立てるEUから先んじて発信されています。既にEUでは、バッテリー規制やELV規制、容器包装規制等で、再生材利用率を主張するような規制案が出てきています。グローバルで動いている日本としても、これを見据えて、単なるリサイクルではなく、そこから高機能材を生み出すリソーシングの技術とプロセスを構築して、できるだけ内側の、製品に近いループで機能を循環させることをしていけば、サーキュラーエコノミーが日本の強みになっていくのではないかと思います。

**俯瞰的な視野を育てる人材育成：
早稲田大学の取組み**

大学では今まで、材料・機械・資源といっ

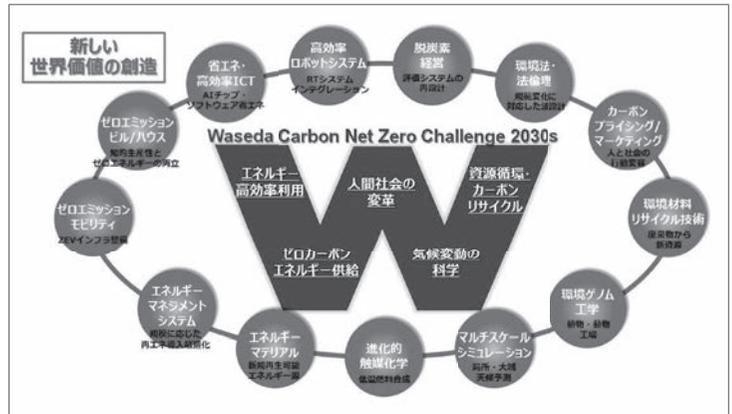


図5 最先端研究：全学の研究力をカーボンニュートラルに結集

たディシプリンごとに人材を育ててきましたが、サーキュラーエコノミーの実現のためには、いろいろなことを俯瞰的に見られる人材を育てることが必要だと考えています。大学やアカデミアも少しずつ変わってきていますので、早稲田大学の例をご紹介します(図5)。

早稲田大学もカーボンニュートラルやサーキュラーエコノミーという側面に対して、文理融合を超えた俯瞰的な人材を育成するために、横串的な研究教育センターを作り活動しています。もちろん大学として貴重な人材である博士人材をしっかり育てていくことも視野に入っていますが、博士人材の支援も、これまでは分野ごとに支援していた物を、横串を通して、グリーン・イノベーション、ライフ・イノベーション、デジタル・イノベーション、ソーシャル・イノベーションというカテゴリーのなかに、文理もディシプリンもごちゃ混ぜにして、横断的に博士人材を育てる取組みをしています。学生はどこに応募すればいいのか迷うこともあるようですが、横串を通して支援しています。

そうした学生を育てるためには、われわれ研究者・教員も、横串を通して連携する必要があります。私は環境材料やリサイクル技術が専門分野ですが、このなかで法律・

経営・ロボット・建築・機械・マネジメントシステム・シミュレーション・ゲノム工学に至るまで、とがった研究をしている方々を集め、知恵を出す仕組みを作ってきています。

文科省・内閣府の取組み

文科省は、より促進していくべき分野を戦略目標として決めています。そのなかにも「資源循環」という言葉が入ってくるようになりました。これも横串的だと思えますが、2021年度には「資源循環の実現に向けた結合・分解の精密制御」という目標が入りました。循環をもっとスムーズにできるように、自在に物質を変換する、簡単に分解・再生あるいは結合がもっと低コスト・低エネルギーでできるようにする学術研究の分野です。

さらにこれが発展されて、2024年には「選択の物質科学～持続可能な発展型社会に貢献する新学理の構築～」となり、今までのディシプリンを構築し直した新しい学理が必要という考え方も出てきています。

内閣府のSIPでも、サーキュラーエコノミーの構築のために、いろいろな分野の研究者が集結して、デジタル・プラットフォームを作ったり、動静脈・静動脈連携ができたりする処理技術を研究するプラットフォームができつつあります。

再生材を得るための資源循環の課題

ここからは、私自身に取り組んできた研究をご紹介します。

私は再生材を得るための分離技術が専門ですので、使用済みになった物を自在にバラバラにするところに

研究課題を持って活動しています。これまでも、いろいろな物を壊す、分離する研究をしてきました。

高度な素材・高度なものづくりを支える高純度な素材を作るために、製品から最も遠い外側の循環に当たる、原子・分子レベルで分離あるいは材料創成する技術は、長年の歴史があり、既に確立した物を含めていろいろな技術があります。ただ、これをサーキュラーエコノミーに落とし込んで対象を広げ、雑多な使用済み廃棄物を化学的なコンセプトで溶かして、原子・分子レベルで分離しようとする、全然エネルギーが足りないのが現状です。エネルギーが見合わない・コストが見合わない・エフォートが見合わない、いろいろな言い方ができますが、それが到底無理であるならば、高純度な再生材を得るために、エネルギーをかけずに分離する方法を、知恵を出して考えていかなければいけません(図6)。

どこに一番エネルギーがいるかを原理原則で考えると、システム的には回収やその後の溶かすところ。そこで私は溶かさずに高精度に物を分ける研究をしています。つまり、より製品に近い内側の循環である、粒子・結晶レベルで分ける、構造を残す、部材のまま分けるといったコンセプト

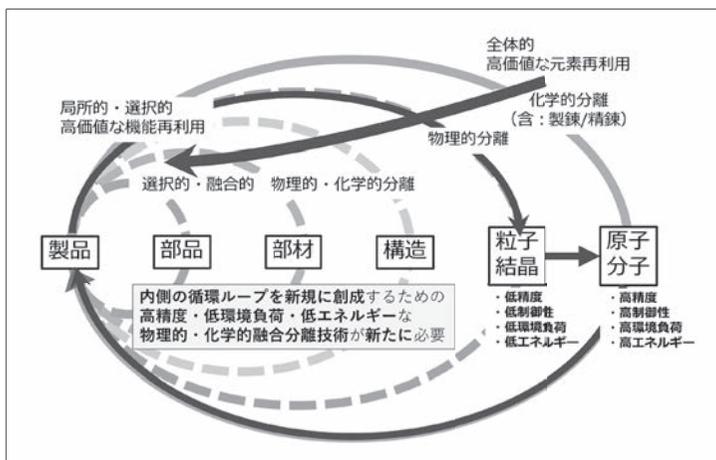


図6 資源循環に求められる構造制御

トです。今までは、粒子・結晶レベルでの分離は、均一性・安定性が得られず、精度が出ませんでしたので、原子・分子レベルでの分離の前処理的な位置付けで発展してきました。前処理だったので、より高精度・高機能にするというインセンティブが働きづらかったのですが、これからは高精度・低エネルギーを指向します。

サーキュラーエコノミーの課題も、できるだけ製品に近い内側のループを作ることでしたが、分離技術も全く同じで、できるだけ内側のループを実現する技術を作っていくことが、今の私たちの課題だと思っています。

資源循環型社会構築に向けた課題認識

現場では、まだまだそういったことがあまり考えられずに前処理が行われ、破碎・粉碎をしたり、人手で分けたりしています。これを高精度化するには、局所加熱のような物が必要です。異材を接合している部分や物が付いている部分だけにエネルギーをかけ、そこだけを溶かす・破碎するといったエネルギーの使い方になります。

そのようなエネルギーの使い方ができる物として、レーザー・電気パルス・マイクロウェーブがあります。また、機械的な破碎・粉碎でも、モードを精緻にコントロールして、分けたい界面だけにエネルギーを集中することができないかといった研究をしています(図7)。

機械的な外力も長年の歴史があります。機械的に物を壊すことには、私たちは食品の分野も含めて非常に多様な知恵を持って

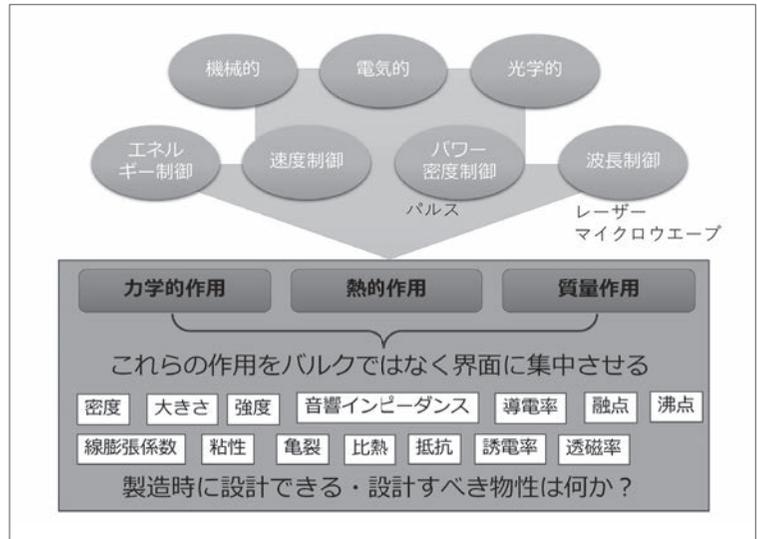


図7 界面での選択的な分離・分解をもたらす外力

います。粉碎にはいろいろなモードがあって、これを洗練させて組み合わせるだけでも、分かれ方が随分変わってきます。食品の世界でもこれをうまく応用して、おいしいチョコレートやコーヒーを作っていますが、それと全く同じことが廃棄物でもできるとしています。

例えば、大きな圧縮力をかけ続けることで、「メカノケミカル」と言われる選択的な反応を起こせます。また、ドイツでよくリサイクルに使われていますが、ただだけでなく金属・ガラス・樹脂を大きさで分ける、物質の展性・延性・脆性を使った方法もあります。あるいは、人工物は衝撃を受けると界面で割れやすい特徴があるので、スマホの一代前前の携帯電話に衝撃を与えて、部品ごとにバラバラにする方法もあります。

新規電気パルス法の可能性

ただ、機械的なことは、どうしても化学的な反応ほど精密にはできないので、さらに精密にしようとする、化学反応と物理的分離の融合を考えなければいけません。そこで私たちが今やっているのが、電気パ

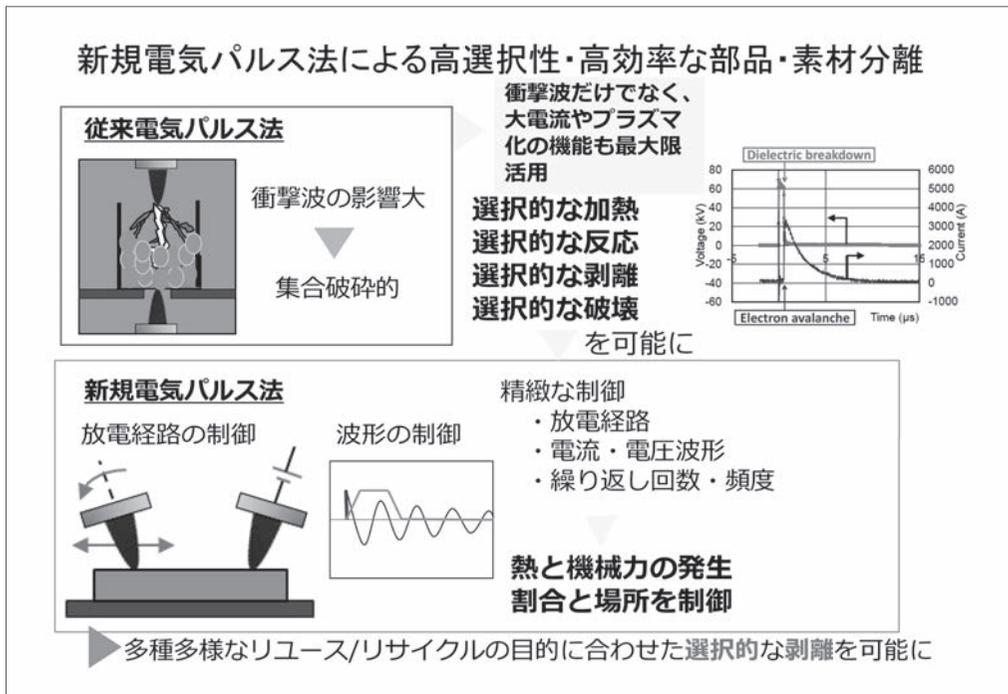


図8 既存法から新規電気パルス法へ

ルスと呼ばれる雷を与える方法です(図8)。雷が通ったところには大きな衝撃波が生じたり、大きな発熱をしたりします。そしてこれは雷の通ったところでしか起こらないという特徴があります。そこで、製品のなかにこの雷のような物を与えれば、その周辺だけを溶かしたり壊したりできるのではないかという発想で、いろいろな物を精緻解体しています。

一つの例がリチウムイオン電池です。ここから銅・アルミニウム・コバルト・ニッケル・リチウム等をバラバラに回収することは非常に重要ですが、そのためにはアルミニウムに付いているニッケル・コバルト・リチウムの粒子をきれいに剥がす必要があります。今までは高温処理をしたり、薬剤を使ったりしていましたが、エネルギーが見合いません。そこで私たちは、アルミニウムに雷を与えて壊す研究をし、使用済みリチウムイオン電池を解体して、アルミニウム集電箔と黒い正極活物質粒子をきれい

に剥がして、それぞれをリサイクルする実験をしています(図9)。

わかってしまえば非常に簡単な原理で、アルミニウムに電気パルスが走ると、その周辺だけがちょうどよい温度に一瞬、熱せられるからです。反応は100マイクロ秒程度で終わりますから、投入エネルギーは非常に小さいのです。電力量(Wh)の時間部分が短いので、電気を使ってはいますが、非常に少ないエネルギーで剥がすことができます。

剥がしたいところだけを剥がし、溶かしたいところだけを溶かします。全体を温めているわけではないので、黒い正極活物質粒子は化学的にも変質していません。つまり、内側の製品に近い循環で戻せるということです。内側のループで、エネルギーを省いて循環と製造を融合していけるので、私たちはこれを「ダイレクトリサイクル」と呼び、これによってサーキュラーエコノミーが実現できるのではないかと主張して

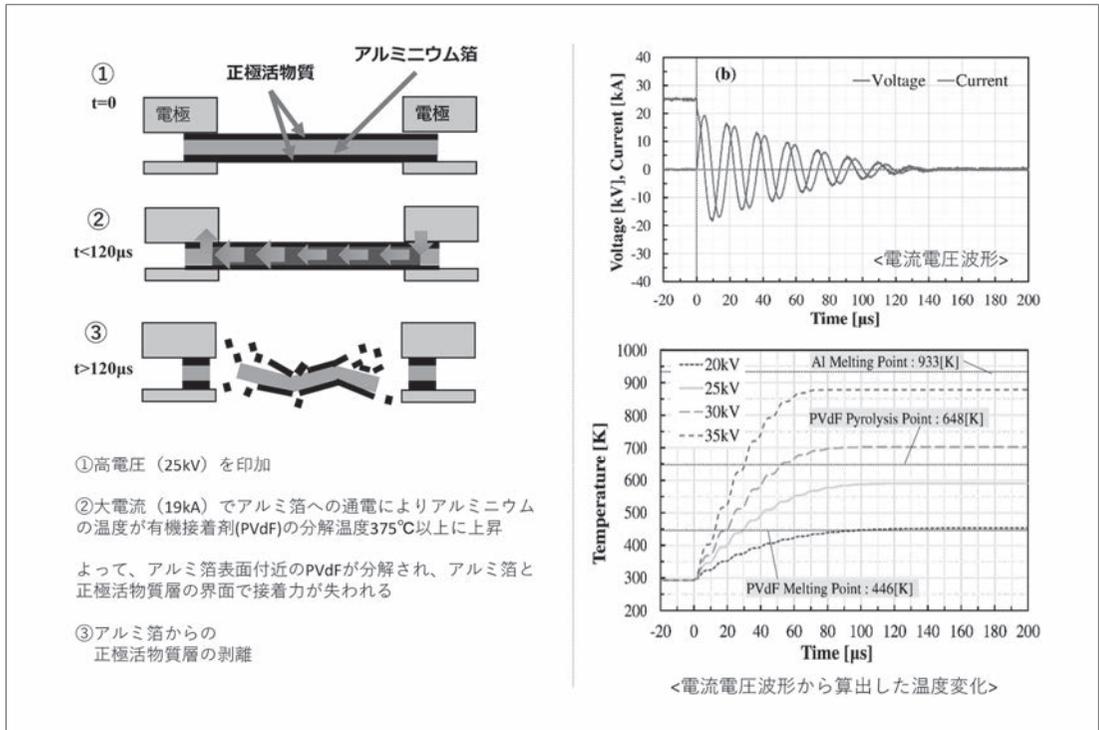


図9 アルミ箔から正極活物質が剥離する原理

います。

LCA (ライフサイクル評価) は、トータルでどのぐらい循環できて、それにどのぐらいエネルギーがいるかという評価です。ダイレクトリサイクルは、少ないエネルギーで資源循環できますので、こうした技術開発が一つの方向性だと思っています。

電気パルス法は、太陽光パネルシートのなかに埋まっている金属やシリコンを取り出すのにも使えます。なかに埋まっている銀の線に雷を当てます。すると細線爆発が起こり、その勢いで、ぴったり封止されていた物が開き、銅と銀の粒子とシリコン樹脂とを分けることができます。普通、樹脂と金属の分離には燃やす方法を使いますが、これは銀線だけを燃やして、樹脂は燃やさずに分離するというユニークな方法です。

これからは物を軽量化し、強くしていく

時代なので、金属だけではなく、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) のように、樹脂を炭素繊維あるいはガラス繊維で強化したプラスチックも多用されていきます。製品そのものの省エネ化や、使用中の省エネ化には非常に重要な材料ですが、残念ながら資源循環はどんどん難しくなります。そこで、できるだけ資源循環で困らないように分離処理技術を確認する必要がありますが、私たちはこれにも雷のようなものを与えて、CFRPを小さい層間で分ける、あるいは繊維を取り出すといったことをしています。

易分解設計概念の導入

これにはまだまだ課題があります。これまでの製品は、電気パルスで壊すとか、後に破碎・粉砕することを想定せずに作られています。製品に応じて、どの方法がいいかを検討していますが、今後は皆でサー

キュラーエコノミーを実現するのであれば、製品に易解体設計という概念があってもいい時代になってきていると思います。一部の先進的なメーカーは、既にこういうことを考えていると聞いています。

例えば、電気パルスを使った易解体設計であれば、壊したいところに電気の通り道を作っておくとか、導電性ナノ粒子の添加などで電気が通るところを作っておけば、強固な構造材接着も瞬時にきれいに剥がす・壊すことができます。

精緻に作られた製品が、できるだけ長寿命で使われ、しかも使い終わればきれいにバラバラになるという世界が来ればいいと思って、日々、研究しております。

CRESTと呼ばれるアカデミアの枠組みでは、いろいろな大学でチームを組み、易解体接着剤を作る研究をしています。

当研究室が目指す資源循環型社会

サーキュラーエコノミーにはできるだけ製品に近い内側のループを作ることが大事ですが、私どももできるだけエネルギーを使わず、できるだけ物を溶かさないうで高精度に分ける研究を一生懸命やっています。

これまでは前処理に力を入れてきましたが、今はしっかりと再生材にしていかなければいけないと思っています。このあたりを融合して、使用率の高い高付加価値の素材を作っていくべきだろうと思っており、今後もこのような研究をしていきます。

今日は短い時間でしたが、改めていろいろ



講演会場の様子

ろなディスカッションをさせていただけるなら、ホームページにコンソーシアムの案内やいろいろな研究を載せておりますので、ご覧いただければと思います。本日はご清聴ありがとうございました。

参考文献

- 図 1, 2, 3, 6, 7
所 千晴.資源循環論から考えるSDGs.エネルギーフォーラム, 2022.ISBN: 978-4-88555-529-9
- 図 4
所千晴, サーキュラーエコノミー実現に必要な分離技術, 月刊技術士, 1月号, 掲載予定
- 図 5
早稲田大学カーボンニュートラル社会研究教育センター <https://www.waseda.jp/inst/wcans/>
- 図 8, 9
Chiharu Tokoro, Soowon Lim, Kaito Teruya, Masataka Kondo, Kazuhiro Mochidzuki, Takao Namihira, Yasunori Kikuchi. "Separation of Cathode Particles and Aluminum Current Foil in Lithium-Ion Battery by High-voltage Pulsed Discharge Part I: Experimental Investigation" Waste Management. 2021, Vol.125, pp.58-66. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.01.008