

自動車サーキュラーエコノミーを支える解体技術の 課題と展望

早稲田大学 理工学術院 教授 創造理工学部長・研究科長

東京大学 大学院工学系研究科 教授

所 千晴

1. サークュラーエコノミーへの課題

サーキュラーエコノミーは、さまざまな資源制約や環境制約に対応しつつ、ウェルビーイングを向上させ、経済成長や地方創生を目指すために、循環に経済性を持たせることで、新たな価値を創出する経済政策である。総論賛成が得やすい概念であり注目も集めているが、その実現には多くの課題があり、日本においても思うように進んではいない。

課題の一つとして挙げられるのは、リサイクルへの偏重である。日本では2000年当初より、適正処理や最終処分場の逼迫への対応として、製品ごとに精密に設計されたリサイクル法が整備され、廃棄物行政において重要な役割を果たしてきた。その結果、リアエコノミーにおける優れた製品づくりと、それが使用済みになった後の可能な限りのリサイクルというイメージが強く、このビジネスモデルからの新たな革新が起こりにくい状況が生まれている。リサイクルはサーキュラーエコノミーの概念図における最も外側の資源循環ループであり、製品が最終的に必ず到達するプロセスであるため、サーキュラーエコノミーにとってなくてはならない重要な存在である。しかし同時に、リサイクルは回収と分離に最もエネルギーとコストを要する資源循環ループでもある。したがって、サーキュラーエコノミーの実現には、このリサイクル資源循環ループをいかに省エネルギーかつ省コストにするかの工夫を続けるとともに、リサイクルに必要なエネルギーとコストを他の資源循環ループでどのように補い、分配するかという考え方が重要である。

すなわち、循環に経済性をもたせるためには、メンテナンスやシェアリングを含む、可能な限り内側に位置する資源循環ループを創成することが必要である。UNEPのレポートなどでは、自動車や住宅を例に、シェアリングによる稼働率向上や小型化、物質代替といった資源循環戦略によって内側の資源循環ループを創成することで、カーボンニュートラルとサーキュラーエコノミーが相補的に実現可能であることが報告されている¹⁾。しかし、それを実現するには、これまでの売り切り型のビジネスモデルからの変容や、消費者行動の変容が必要であり、なかなか思うようには進んでいない。さらに内側の資源循環ループを創成するためには、製造と処理との融合や連携が重要となるが、これも思うように進んでいないのが現状である。

多重の資源循環ループの新たな創成が進まないもう1つの理由として、サーキュラーエコノミーの概念や目標の複雑さが挙げられる。サーキュラーエコノミーは経済、環境、社会の調和を目指す広い概念であり、カーボンニュートラルもネイチャーポジティブをも包含する。そのため、GHG削減のようなわかりやすい数値目標を立てるのが難しい。また、サプライチェーン全体で協力し、エネルギーとコストを分配しながら全体最適を目指すなければならない概念であるにもかかわらず、その目標値を設定し共有することが困難であることも、進展が思うように進まない大きな理由の一つである。

図1はサーキュラーエコノミーの目標値の1つとなり得る資源効率の概念を示したものである。このように、資源効率1つをとっても、これまで日本のモノづくりが大切にしてきた省エネルギー、省コスト、省資源に長寿命で高機能な製品を、集約化、小型化、多機能化して製造するという概念が既に含まれていることがわかる。したがって、目標値を適切に設定してアピールすることができれば、サーキュラーエコノミーの概念そのものは、そもそも日本のモノづくりに強みのある概念ではないかと筆者は考えている。しかし近年、これらの概念に新たに急速に追加されているのが「再生材利用」である。概念先行型のEUではその動きが速い。2023年施行のバッテリー規則はその一例であり、製品製造時に再生材の一定割合の使用を義務化し、さらにバッテリー内のカーボンフットプリント表示や、リチウムやコバルトなど特定素材のリサイクル率引き上げも求められている。また、ELV（End-of-Life Vehicles）指令の見直しも進められており、2030年までに自動車製造に使用されるプラスチックのうち25%をリサイクル材とすることが提案されている。図1に示した資源効率の高いモノづくりが高純度な素材に支えられてきたことを鑑みると、再生材もまた、単なるリサイクルではなく、高純度な「リソーシング」となるように、使用済み製品から高純度な再生材を生み出す産業の醸成が急務であると考えられる。

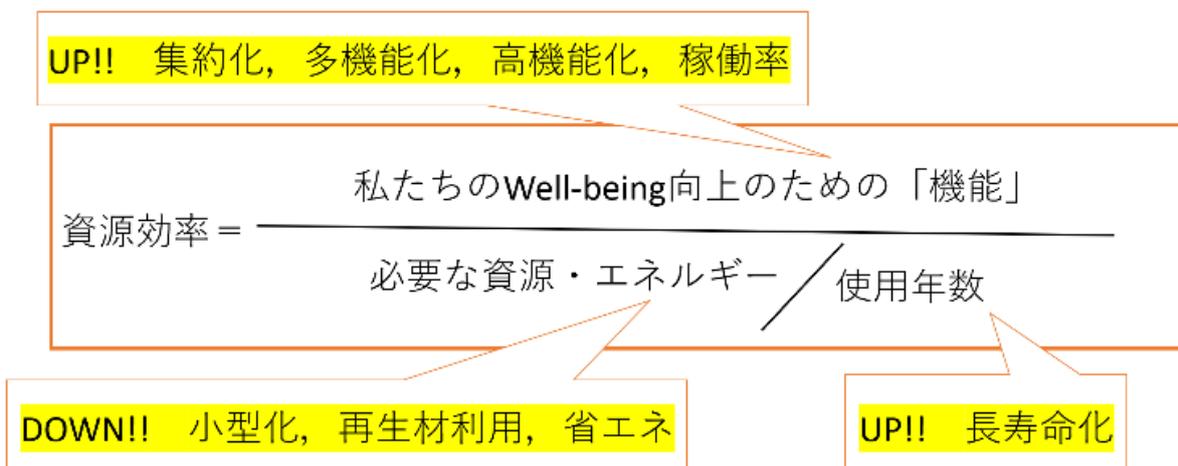


図1 サーキュラーエコノミーの目標値「資源効率」の概念²⁾

2. リソーシングの重要性

使用済み製品から再生材を得るための分離技術を考えて、最終的にはサーキュラーエコノミーの概念と同じような図式となる。これまでは、大量回収した材料を低コストで分離し、その中から経済的に採算の合うものだけを、バージン材と同様の化学・素材プロセスによって再利用する、グレーの矢印で示されるリサイクルのための分離技術が主流だった。この既存の分離技術では、物理的分離技術は前処理として位置づけられ、低コストで低環境負荷ながら、精度は低い。一方、化学的分離技術は原子や分子レベルで分離して高精度な再生材を得るが、高エネルギーを要し、高コストであり、環境負荷も高い。今後、樹脂を含むリソーシング技術を確立するためには、これらの資源循環ループの高度化が求められる。物理的分離技術では粉体プロセッシングを活用して精度を高めること、化学的分離技術では異材界面だけを選択的に溶解するような低エネルギー・低環境負荷の技術を確立することが必要であると考えられる。

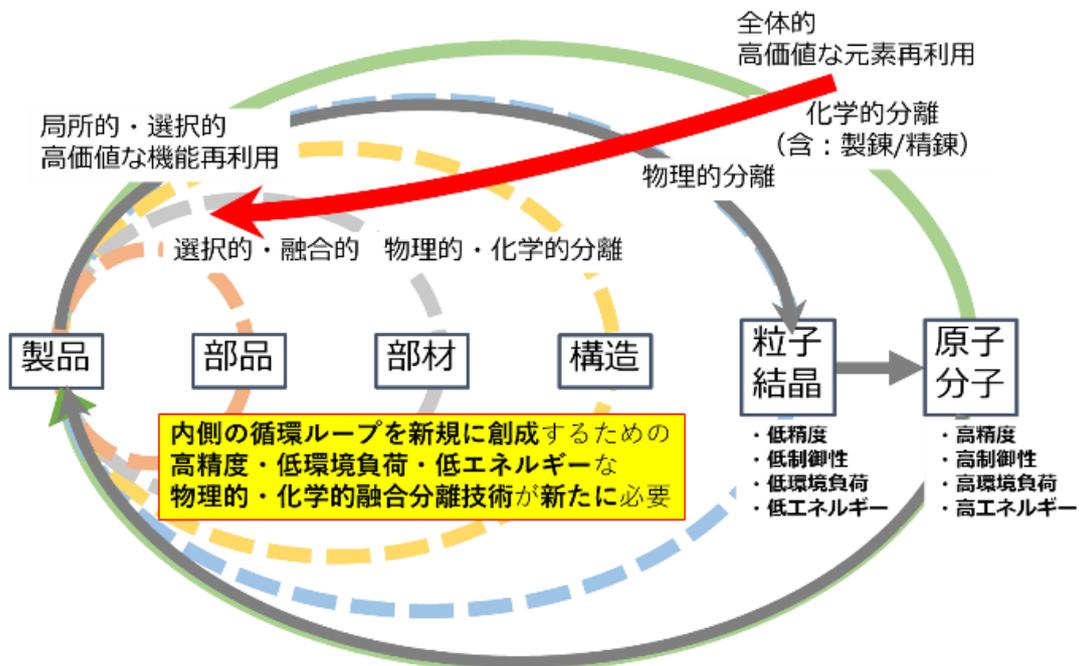


図2 リソーシングのための分離技術³⁾

リソーシングを促進するためには、より内側の資源循環ループを創成する必要があり、そのためには製品自体を易解体設計にすることが重要となる。これまでは、分離技術として機械的な破碎や人手による解体程度しか存在せず、機械的破碎を前提とした易解体設計はほとんど現実的ではなかった。その結果、人手解体を想定したネジの本数を減らす、ネジの方向を統一する、といった限られた範囲での易解体設計が行われてきた。これらの易解体設計はすでに製品設計に取り入れられているが、今後、上述の通り異材界面のみを選択的に分離する技術が開発されれば、ドライバーの代わりにそれらの外部刺激ツールを活用したロボ

ットを開発することも可能となる。その結果、易解体設計の概念が大きく拡張され、解体プロセスの効率化と精度向上が期待される。

従来の機械的破碎法に代わる異材界面の選択的分離方法としては、電気パルス、誘導加熱、誘電加熱、レーザーなどが挙げられる。これらは、それぞれの物性の違いに応じて選択的に加熱や反応を促すことが可能であり、選択性が異なるため、対象物に応じて適切な手法を選択することで、その特性を最大限に活用できる。

3. 電気パルス法による精緻解体の開発事例

水中で電気パルスを印加すると、瞬時に水が絶縁破壊を起こし、大きな衝撃波が発生する。この衝撃波を活用した集合粉碎法は、難処理鉱物、コンクリート、使用済み電子機器の処理に応用されており、スイスの Selfrag 社やドイツの ImpulseTec 社が商用装置を開発している。電気パルスによる分離技術は、マイクロ秒程度の短いパルスを利用することで消費電力が低く、エネルギー効率が高いという特長を持つ。

筆者らは、この電気パルス法をさらに改良し、分離対象内部の放電経路や分離現象を精密に制御することで、異材界面を選択的かつ精密に分離する技術の開発を進めている。たとえば、リチウムイオン電池の分離では、集電箔と活物質層の接着界面に瞬時にジュール熱を発生させると同時に、熱応力や衝撃力といった機械的力を付与することで、水中だけでなく気中でも集電箔と活物質粒子の高精度な分離を実現している⁴⁾。この方法により、薬剤や加熱を用いることなく、化学的变化を抑えたまま活物質粒子を分離することが可能であり、ダイレクトリサイクルへの応用が期待される。電気パルス法を活用したダイレクトリサイクルが実現すれば、GHG 削減と資源効率向上の両面で優れた効果をもたらすことが、ライフサイクルアセスメントによっても確認されている。

筆者らはさらに、高強度かつ軽量という特性から、自動車のみならず航空機や風力発電など幅広い分野で利用されている炭素繊維強化プラスチック（CFRP）に対しても、電気パルス法による解体を試みている。CFRP のリサイクル法としては破碎法や加熱法が検討されているが、そのリサイクルは一般に困難であり、資源循環型社会の実現に向けた重要な課題である。筆者らは、電気パルス直接放電法を用いて、CFRP から炭素繊維を効率的かつ高純度に回収する新技術を開発している⁵⁾。この手法は、従来の電気パルス水中破碎法と比較して、ジュール熱の発生と絶縁破壊による樹脂の気化および膨張力を活用することで、炭素繊維の長さや強度をほぼ維持したまま回収可能であることを示した。さらに、新規法はエネルギー効率が従来電気パルス法の約 10 倍に達することも確認された。この技術は、CFRP から炭素繊維を分離するだけでなく、CFRP と鋼板の分離や CFRP の層間剥離にも適用可能であり、幅広いリサイクル用途に対応できる可能性を示している。

以上のように、電気パルス法では、対象物内部に金属の細線や箔などジュール熱や熱応力を発生させる導電経路が存在する場合、それを起点として高効率に分離を実現できることが示されている。しかし、一般

的な製品には必ずしもそのような適切な導電経路が備わっているとは限らない。そこで筆者らは、幅広い製品に対して電気パルス法による精緻解体を可能にするため、導電性ナノ粒子を分散させた易解体接着材の開発に取り組んでいる。ナノ粒子を採用した理由は、接着強度を低下させないためである。しかし、実際にどのようなナノ粒子の凝集分散構造を接着材内部に構築すれば、電気パルスの印加時に沿面放電を抑制しつつ、安定的かつ効果的な導電経路が形成され、分離が可能となるのかについては、未解明の部分が多い。これに対し、筆者らは基礎研究を重ね、接着材内部におけるナノ粒子の挙動や導電経路形成のメカニズムを解明することで、電気パルス法のさらなる高効率化と応用拡大を目指している。

参考文献

- 1) UNEP IRP. (2020). Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future. Hertwich, E., Lifset, R., Pauliuk, S., & Heeren, N. A report of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.
- 2) 所千晴. (2025). 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
- 3) 所千晴. (2022). 資源循環論から考えるSDGs, エネルギーフォーラム社.
- 4) C. Tokoro, S. Lim, K. Teruya, M. Kondo, K. Mochidzuki, T. Namihira, Y. Kikuchi. (2021). "Separation of Cathode Particles and Aluminum Current Foil in Lithium-Ion Battery by High-voltage Pulsed Discharge Part I: Experimental Investigation" Waste Management. Vol.125, pp.58-66.
- 5) C. Tokoro, K. Sato, M. Inutsuka, T. Koita. (2024). "Efficient recovery of carbon fibers from carbon fiber-reinforced polymers using direct discharge electrical pulses" Scientific Reports, Volume 14.