



## 粉体プロセス技術の高度化による資源循環

### Resources Circulation through Advanced Powder Processing

所 千晴

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

Chiharu TOKORO

Professor, Faculty of Science and Engineering, Waseda University, JAPAN  
Professor, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, JAPAN

#### 抄 録

SDGs そしてカーボンニュートラル時代を迎え、サーキュラー・エコノミーをはじめとする資源循環型社会構築に対する社会の関心はますます高まっている。資源循環のための粉体プロセス技術には、物理的、物理化学的、化学的な種々の分離技術が存在するが、いずれも省エネルギーかつ省資源という大きな制約を満たすことが大前提であり、カーボンニュートラルなどの環境負荷低減と資源循環との両立のために、サーキュラー・エコノミーのような多重資源循環ループを支える多様な分離技術開発が必要とされている。本稿ではそのような取り組み例として、カーボンニュートラル促進による需要の指数関数的な増加が見込まれるリチウムイオン電池に対し、サーキュラー・エコノミーの概念図にある一番外側のリサイクル技術開発と、その内側の正極活物質粒子ダイレクトリサイクル技術開発の例を紹介した。

#### ABSTRACT

Society's interest in building a resource-recycling society, including circular economy, is increasing nowadays in SDGs and carbon net zero era. Although there are various physical, physicochemical, and chemical separation in the powder process technology for resource recycling, all of them must meet the major constraints of energy and resource conservation. To balance the reduction of environmental load such as carbon neutrality with resource recycling, it is necessary to develop various separation technologies that support multiple resource recycling loops in the concept of circular economy. As an example of such an approach, this paper introduces the development of recycling technology for lithium-ion batteries, for which demand is expected to increase exponentially because of carbon neutrality promotion. We introduce examples of the development of recycling technology for the two different recycling loops; one is separation technology for outermost loop of the circular economy concept, and another is the direct-recycling technology of cathode active material particles in the inner layer of the circular economy concept.

## 1 はじめに

SDGs やカーボンニュートラルをはじめ、環境対応に対する社会からの要請が高まっている。図 1 のように、UNEP-IRP は 2011 年に、人類の Well-being とそれに正の相関を有する GDP の右肩上がりの成長を持続的に達成しながら、温室効果ガスなどの環境負荷は減少させ、資源消費は可能な限り増加させない「デカップリング」の重要性を提案している (Fischer-Kowalski M. et al., 2011)。近年、新しい資本主義といった言葉も聞かれるようになり、モノからコトへ、有形資産から無形資産へ、といった価値変容のもとで新しい経済効果を生み出す考え方が盛んに議論されているが、種々の社会要請の中でも資源や環境の制約がそれらの考え方へ及ぼす影響は大きいと考えられる。

K. Raworth は「ドーナツ経済」の著書の中で以下のように述べている。「経済成長せずに、国民の窮乏に終止符を打った国はこれまでに一国もない。経済成長によって、自然環境の悪化に終止符を打った国もこれまでに一国もない」。このことは、これまで経済成長と環境負荷が強い正の相関を有していたことを示している。したがって、それらのデカップリングは相当に容易ではない。K. Raworth が提唱する「ドーナツ経済」とは、図 2 に示すように、社会のインフラが内側の領域に存在する場合には不足しているので、それを成長させてドーナツの可食部を目指し、逆にプラネタリーバウンダリーを超えて外側へ超過している領域に存在する場合には、それをドーナツの可食部にまで戻すことを目指すというものである。

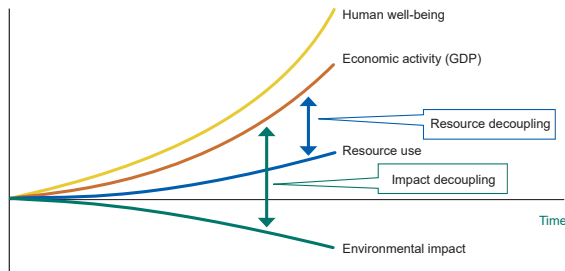


図 1 経済活動と環境影響・資源消費のデカップリング  
Fig. 1 Decoupling of economic activity from environmental impact and resource consumption. (Fischer-Kowalski M. et al., 2011)

このように、容易ではない経済成長と環境負荷と資源消費のデカップリングであるが、とりわけ環境負荷低減と資源消費低減の両立は、非常に困難である。UNEP-IRP は 2016 年にエネルギー供給側 (Hertwich E.G. et al., 2016), 2017 年にエネルギー需要側 (Suh S. et al., 2017) から、カーボンニュートラル促進と資源消費との関係を整理した報告書を出版している。それらの報告書では、カーボンニュートラル促進のための、太陽光発電、風力発電といった創エネルギー導入や、LED、電気自動車といった省エネルギー型製品の導入によって、温室効果ガス低減と、大気や水質浄化といった項目は相補的に改善するものの、資源消費は逆に現状以上に指数関数的に増加する可能性を示唆している。また、図 3 に示すように、IEA は再生可能エネルギーや電気自動車の導入に伴う所要鉱物資源量について、カーボンニュートラルに対する 2 つの導入シナリオ (図中の STESP と SDS) に基づいて試算しているが、いずれも指数関数的な所要鉱物資源量の増加を推測している。中でも電力ネットワーク強化や電気自動車導入による影響は大きく、リチウムイオン電池への影響の大きい鉱物種では、2020 年と 2040 年の鉱物所要量を比較すると、リチウムで 13~42 倍、コバルトやニッケルで 6~20 倍、ベースメタルである銅においても 1.7~2.7 倍、と推察されている。

以上の状況から、カーボンニュートラル導入に伴う資源循環をどのように両立させるかという点は、喫緊の人類の大命題となりつつある。それに対する

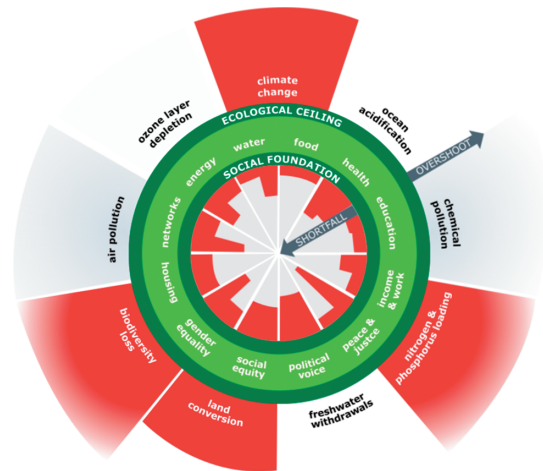


図 2 ドーナツ経済の概念 (Raworth K., 2021)  
Fig. 2 Concept of doughnuts economics.

The relative demand growth is particularly high for battery-related minerals

Growth in demand for selected minerals from clean energy technologies in 2040 relative to 2020 levels

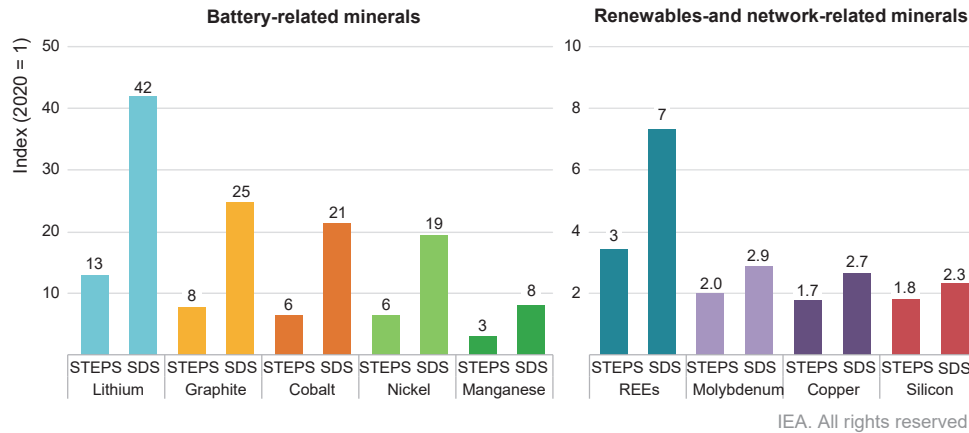


図3 カーボンニュートラル導入に伴う所要鉱物量 (IEA, 2021)

Fig. 3 Growth in demand for selected minerals from clean energy technologies.

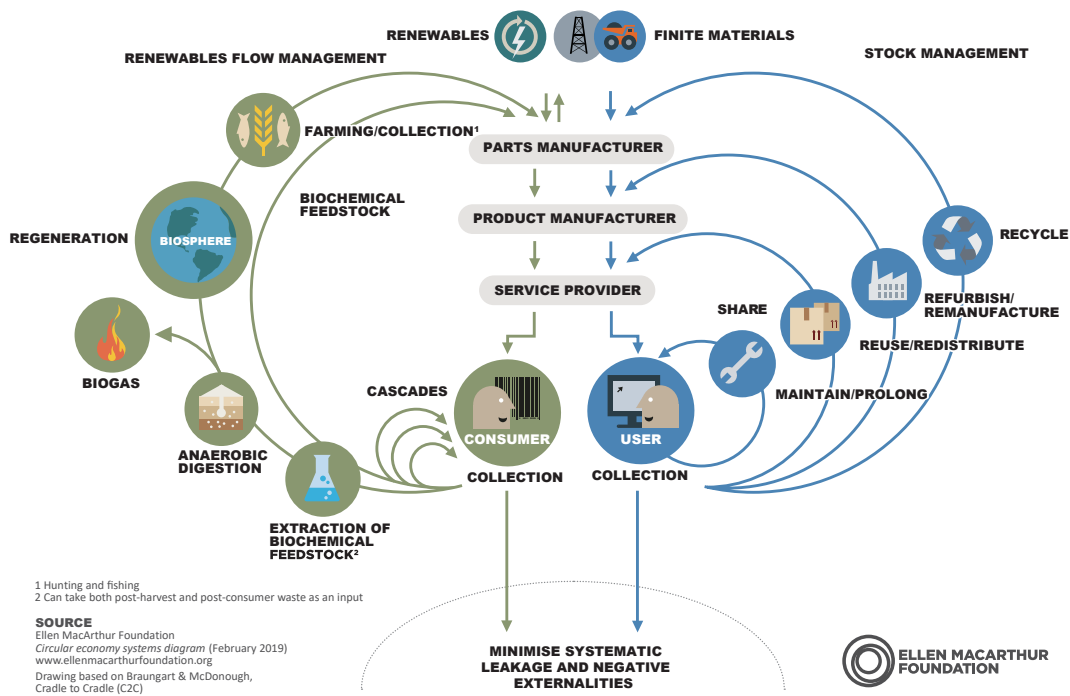


図4 サーキュラー・エコノミーの概念 (Ellen MacArthur Foundation, 2013)

Fig. 4 Concept of circular economy.

EUの提案は、図4に示すサーキュラー・エコノミーの概念であるが、この図を達成するには種々の課題を解決しなければならない。まず、中心の従来型のリニアエコノミーの資源量を低減させることがデカップリングの目的であるので、大量に製造・使用してそれを大量に循環させることはその目的に反するため、少量の資源でこの多重ループをどのように

循環制御するのかという、非常に難しい課題を解決しなければならない。GX(グリーントランスフォーメーション)やDX(デジタルトランスフォーメーション)といった技術革新に期待されているが、内側のループを充実させるためのインセンティブとなる大きな価値変容をもたらす技術が必要になると考えられる。また、左側のループの外側には再生可能

エネルギーの生物圏での循環が記載されているが、その時間スケールは何億年にも及ぶと考えられ、右側の枯渇性資源の循環や左側の再生可能エネルギーの内側の資源循環の時間スケールとは全く見合わない。したがって、これら人間活動の時間スケール内での循環は、再生可能エネルギーの範囲内で実施することが不可欠であり、回収、運搬、分離、といったあらゆる循環経済活動には省エネルギーへの大きな制約がある。

このように状況を整理すると、資源循環には省エネルギー、省資源という大きな制約があり、本誌の主題である粉体プロセス技術としては、その範囲内で革新的技術を研究開発する必要がある。まず、現状でも一定の技術が研究開発されている中央のリニアエコノミーを支える各種粉体プロセス技術と、一番外側のリサイクルを支える分離を中心とする粉体プロセス技術については、今まで以上の省エネルギー化が求められる。反応や分離へのエネルギー分配率を可能な限り高め、余計な熱や騒音、あるいは不要成分へのエネルギー分配を抑えた選択性の高い粉体プロセス技術が必要となる。一方、サーキュラー・エコノミーの内側のループになればなるほど、取り扱う対象は粉体から部品、製品へと大きくなり、それらを微細化せずとも反応や分離の目的を達成できるような、選択性、局所性の高い技術開発が必要となる。このような技術は未確立と言えるので、これから発展の余地が大きいと考えている。また、内側のループになればなるほど、製造技術と処理技術との垣根が低くなっていくため、それらを融合させて、より内側の資源循環ループを創成することが、全体として省エネルギー化につながる可能性が高い。このような発想がまさに新規バリューチェーン構築、あるいは新規サプライチェーン構築ということであろうと考えられる。

資源循環のための分離という観点から、求められる技術を改めて整理すると図5のようになる。この図は図4に示したサーキュラー・エコノミーの多重資源循環ループに対して、分離技術がボトルネックとならないように、様々な選択性と分離精度を達成する技術が必要となることを示したものである。右側のループになるほど大量処理型で均一性の高い分離を省エネルギーに達成することが求められ、左側のループになるほど、局所的に界面のみに

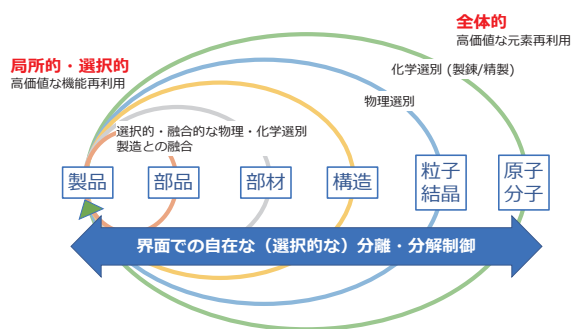


図5 多様な資源循環に求められる分離技術 (Tokoro C., 2022a)

Fig. 5 Separation technology required for diverse resource recycling.

分離力を集中させ、元素以外の物性や大きさなどの機能を残して分離することが求められる。左側のループになればなるほど製造との区別がなくなり、製造プロセスと融合することや、初めから易分解を想定した分解スイッチを仕込んでおくなど、単位操作の開発のみではない融合的な技術開発が必要となる。例えば文部科学省では、2021年度の戦略目標及び研究開発目標に「資源循環の実現に向けた結合・分解の精密制御」を選定し、JSTではCRESTやさがきげなどの事業が開始されている。

分離のための外部刺激には、破碎・粉砕や人手といった機械的なものから、電気的、光学的、化学的、生物的なものがあり、対象に応じてそれらのエネルギー、速度、波長、パワーを精緻に制御するとともに、今後は製造時に、分離時に利用する外力をある程度決めておき、その分離プロセスをあらかじめ想定した易分離設計をすることが好ましく、また社会がそれを強く求めるインセンティブ作りが必要である。

以下では、カーボンニュートラル促進に向けて需要の急激な拡大が予想され、環境負荷や資源消費への影響が大きいと考えられるリチウムイオン電池について、資源循環達成のために進められている種々の分離技術開発の例を紹介する。

## 2 リチウムイオン電池の分離技術

### 2.1 リチウムイオン電池リサイクル技術の概要

リチウムイオン電池には、巻回型や積層型など数種が存在するが、いずれにしても正極材と負極材がセパレータを介してセットされ、それが液体の有機

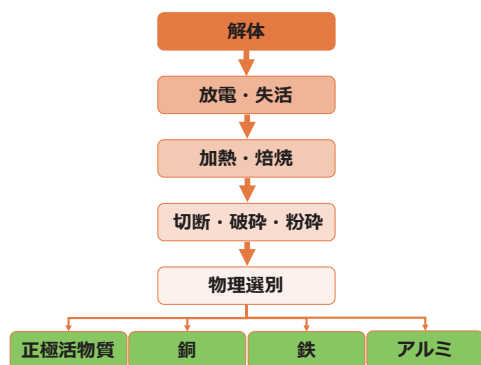


図6 リチウムイオン電池のリサイクル前処理プロセスの例 (Tokoro C., 2022b)

Fig. 6 Example of separation process for recycling lithium-ion batteries.

電解質に浸された構造となっている。正極材はアルミニウム箔にコバルト、ニッケル、マンガンなどから成る正極活物質がカーボンと混合され、PVdFなどの接着剤で塗布されている。負極材は銅箔にカーボンが塗布されており、セパレータは樹脂である。リサイクルの際にはまず、図6に示すように電池筐体の鉄やアルミニウムと、銅箔、アルミニウム箔、そしてブラックマスと呼ばれる正極活物質を分離濃縮する。

回収されたブラックマスからは、図7に示すように、さらに酸浸出や溶媒抽出、分別沈殿を経て、コバルト、ニッケル、リチウムなどを分離回収する。

国内外では、これらの全体的な分離プロセスの所要エネルギーを可能な限り削減し、分離精度を向上させる技術開発が継続されている。例えば、加熱・焙焼プロセスには、有機電解質を燃焼させて分離プロセス内での爆発の危険性を下げ、セパレータを燃焼させて金属分を濃縮させ、ブラックマスとそれ以外の金属粒子や箔との物理選別性を向上させ、ブラックマス内の不純物を可能な限り低減させ、かつコバルトやニッケルを酸溶出しやすくするという、複数の目的を同時実現させる最適プロセスが選定される。300°C ぐらいの低温で加熱した場合には、集電箔が箔のまま残存し、粒子であるブラックマスとの分級などの分離特性が向上するが、未燃カーボンが残存し、別途分離のプロセスが必要となるほか、有機電解質が残存すると後段の破碎・粉砕プロセスでの安全性への懸念が残る。また、ブラックマス中のコバルトやニッケルの酸浸出に添加剤が必要と

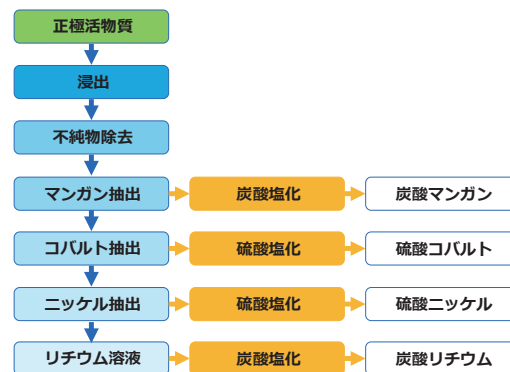


図7 JX 金属株式会社のリチウムイオン電池リサイクルプロセス (Tokoro C., 2022b)

Fig. 7 Lithium-ion battery recycling process at JX Nippon Mining & Metals Corporation.

なったり、時間が必要となったりするという懸念も生じる。800°C ぐらいの高温で加熱した場合は、上述の裏返しとなるが、すべての成分が微粉化して、物理選別性が低減するほか、昨今、回収への要請が日々増しているリチウムが一部気化してロスする可能性がある。さらに混在するフッ素がコバルトやニッケルと反応して難溶性の塩を形成する可能性もある。これらを回避するために、昇温時間を制御したり、加熱雰囲気ガスを工夫したりする検討が行われている。筆者らは緩昇温プロセスを検討したところ、コバルトやニッケルの確実な分解と粒成長によって、後段の分級や磁選の分離精度が向上することを確認している (Horiuchi K. et al., 2017; Matsuoka M. et al., 2016)。

また、一部の企業では、加熱や焙焼ではなく、還元炉を導入して、銅、コバルト、ニッケルといった有価な金属だけを確実に分離する専用炉を開発している。この方法では、上述の金属を精度良く確実に分離できる一方、リチウムをはじめとする他の成分はスラグとなり回収できない。したがって、例えばリチウムを回収するために、別途プロセスが検討されている。

以上のプロセスは、サーキュラー・エコノミーの概念図でいうところの一番外側のリサイクルループであり、資源セキュリティの観点からも、必ず国内に確立されるべきプロセスである。しかし現状ではそれほど経済性が高いプロセスではないことから、技術と仕組みの双方で安定した経済性を担保できるように、知恵を出さなければならない状況にある。

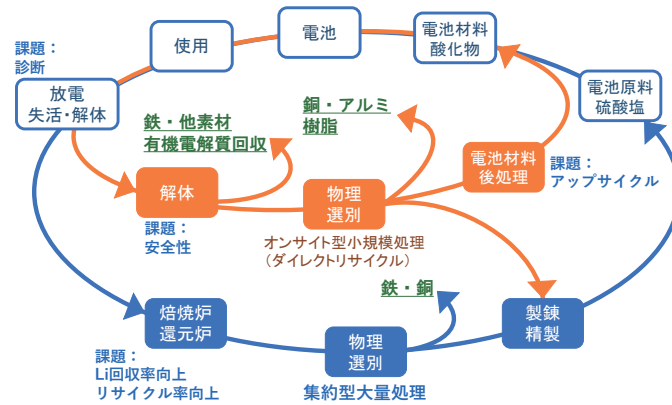


図8 リチウムイオン電池正極材の資源循環の方向性 (Tokoro C., 2022b)  
 Fig. 8 Direction of resource recycling of cathode materials for lithium-ion batteries.

2.2 ダイレクトリサイクルへの試み

サーキュラー・エコノミーの観点からすれば、一番外側のリサイクルループの確立の次には、さらに内側の資源循環ループ創成を目指すことになる。そのような取り組みはダイレクトリサイクルとして検討されている (図8)。

ダイレクトリサイクルとは、ここではブラックマスをそのまま電池の正極活物質粒子へと再合成することを示している。したがって、可能な限り化学的に変質させずにブラックマスを分離濃縮することが求められ、加熱や燃焼、還元などはせずに、水など化学的に変質させない最小限の媒体のみを用いて分離濃縮することになる。このとき課題となるのは、爆発性を有する有機電解質の取り扱いである。このプロセスでは、完全無人化など、安全に対する最大限の配慮が必要となり、少しでも安全上の懸念のある破損電池などは取り扱うことは困難である。また、回収されたブラックマスは、分離や使用の過程でそれなりに劣化していると予想されるので、それを電池として回復させるヒーリングプロセスが必要となる。海外では数社がこのようなコンセプトのもとに、湿式処理のみでの分離回収プロセスを提案しているほか、ヒーリングプロセスとの組み合わせも提唱している。国内では、グリーンイノベーション基金事業「次世代蓄電池・次世代モーターの開発」の中で、検討が始まっている。その中では、ダイレクトリサイクルのための前処理技術として、電気パルス法を用いた正極材分離が期待されているので、以下で簡単に紹介する。

電気パルスとは、数十～百 kV 程度の高電圧を、

数ナノ秒あるいは数マイクロ秒のパルス状で印加するものであり、それに伴う様々な現象を分離に活用することが可能である。例えば、金属細線や金属箔に電気パルスを印加すると、過大電流が発生して金属がプラズマ化するので、樹脂などと混在している金属だけを選択的に溶解して分離することも可能となる。また、その際に衝撃波と強い発光を伴った爆発的な現象も引き起こすため、その衝撃波を利用して分離を達成することも可能となる。印加エネルギーを制御すれば、金属がプラズマ化するほどではないものの、大電流によるジュール熱でその周辺が選択的に加熱されるため、接着などの力を弱め、接着界面での分離をもたらすことも可能である。一方、絶縁体に電気パルスを印加すると、絶縁破壊を起こしてその放電経路がプラズマ化するため、やはりその経路での分離を達成することが可能であるほか、その際に生じる衝撃波を用いた分離も可能となる。

図9は、リチウムイオン電池内の正極材シートから、電気パルス印加によってアルミニウム集電箔と正極活物質粒子を剥離した際の様子である (Tokoro C. et al., 2021; Teruya K. et al., 2022)。この例では、電気パルスによる印加エネルギーを調節し、アルミニウムに大電流が流れた際のジュール熱による発熱を、アルミニウムが溶解するほどではないがアルミニウム箔と正極活物質粒子の接着剤が失活する程度の範囲にとどめている。その際、大電流によるローレンツ力の発生や、電極接触部の抵抗によるプラズマ化に起因する膨張や衝撃波によって、剥離力がもたらされる。ジュール熱による発熱は、アルミニウム箔と正極活物質の界面のみで発生するた

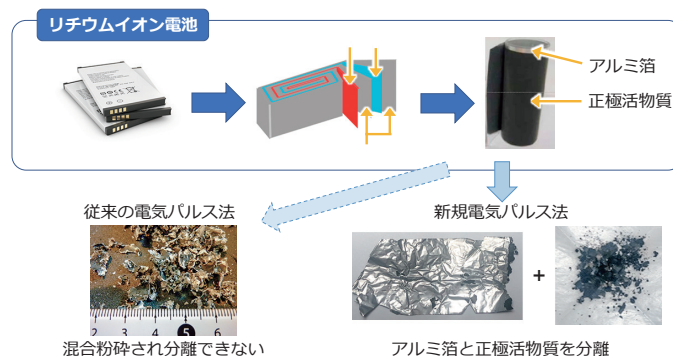


図9 電気パルスによるリチウムイオン電池正極材内の分離 (Tokoro C., 2022c)

Fig. 9 Separation in lithium-ion battery cathode material by electrical pulse.

め、大部分の正極活物質粒子を化学的に変質させずに剥離することが可能である。一般に、箔状の材に塗布された粒子を、箔を微粉化させることなく粒子だけを分離することは困難であるが、電気パルスはむしろ箔であることによって界面に熱発生を集中させることができ、高効率で省エネルギー型の分離を実現することができる (Kikuchi Y. et al., 2021)。

電気パルスで剥離されたブラックマスは、電池としての機能を維持しており、リチウムやカーボンなどの不足分を補えば、電池として再利用できることを確認している。ただし、電池としての安定した機能を維持するためには、回収したブラックマスを安定した正極活物質粒子へ再生するヒーリングプロセスの開発が必須であり、その技術開発はまだ始まったばかりである。このような技術開発は、むしろ正極活物質粒子の製造技術のノウハウが生かされるため、処理技術だけでなく、製造技術との融合による技術開発が期待される。

### 3 おわりに

資源循環のための粉体プロセス技術には、省エネルギーかつ省資源という大きな制約を満たすことが大前提であることを示し、カーボンニュートラルなどの環境負荷低減と資源循環との両立のためには、多重資源循環ループを支える技術開発が必要であることを述べた。またそのような取り組み例として、昨今カーボンニュートラル促進によって需要の指数関数的な増加が見込まれるリチウムイオン電池に対し、サーキュラー・エコノミーの概念図にある一番外側のリサイクル技術開発と、その内側のダイレク

トリサイクル技術開発が進みつつあることを示した。リサイクル技術開発では、他のリサイクル技術と同様に、省エネルギーかつ高精度な分離技術開発が継続して求められる一方、ダイレクトリサイクル技術開発では、製造技術との融合も求められる段階にあることを示した。このように、少しずつではあるが、静脈と呼ばれる処理技術と、動脈と呼ばれる製造技術との距離感が少しずつ縮まっていることは、好ましい方向である。また、リチウムイオン電池に対する製造技術は日進月歩であるが、昨今は新規開発中の電池に対しても、開発中からそのリサイクル性を懸念して相談を受ける機会が増加しており、製造が開発中から循環を意識し始めた結果として喜ばしく感じている。今後はさらに一歩進んで、開発中から易分離設計が進み、易分離な製品が正当に社会から評価されて選ばれる時代となることを強く願っており、また今後もそのための技術開発を継続したいと考えている。

### References

- Ellen MacArthur Foundation, Towards the circular economy Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition, The Ellen MacArthur Foundation, 2013. <<https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>> accessed 07.07.2022.
- Fischer-Kowalski M., Swilling M., von Weizsäcker E.U., Ren Y., Moriguchi Y., Crane W., Krausmann F., Eisenmenger N., Giljum S., Henricke P., Romero Lankao P., Siriban Manalang A., Sewerin S., Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth, A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel, UNEP (United

- Nations Environment Programme), 2011. <<https://www.resourcepanel.org/reports/decoupling-natural-resource-use-and-environmental-impacts-economic-growth>> accessed 03.07.2022.
- Hertwich E.G., Aloisi de Lardere J., Arvesen A., Bayer P., Bergesen J., Bouman E., Gibon T., Heath G., Peña C., Purohit P., Ramirez A., Suh S. (eds.), Green Energy Choices: The benefits, risks and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production, A report of the International Resource Panel, UNEP (United Nations Environment Programme), 2016. <<https://www.resourcepanel.org/reports/green-energy-choices-benefits-risks-and-trade-offs-low-carbon-technologies-electricity>> accessed 03.07.2022.
- Horiuchi K., Matsuoka M., Tokoro C., Owada S., Usui S., Investigation of heating conditions for cobalt recycling from spent lithium ion batteries by magnetic separation, KAGAKU KOGAKU RONBUNSHU, 43 (2017) 213–218. 堀内健吾, 松岡光昭, 所千晴, 大和田秀二, 薄井正治郎, 磁選による使用済みリチウムイオン電池からのコバルト回収に適した加熱条件の検討, 化学工学論文集, 43 (2017) 213–218. <https://doi.org/10.1252/kakoronbunshu.43.213>
- IEA (International Energy Agency), The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, World Energy Outlook Special Report, IEA Publications, 2021. <<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>> accessed 03.07.2022.
- Kikuchi Y., Suwa I., Heiho A., Dou Y., Lim S., Namihira T., Mochidzuki K., Koita T., Tokoro C., Separation of cathode particles and aluminum current foil in lithium-ion battery by high-voltage pulsed discharge Part II: prospective life cycle assessment based on experimental data, Waste Management, 132 (2021) 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.016>
- Matsuoka M., Horiuchi K., Tokoro C., Owada S., Usui S., Study on heating and grinding process on classification for cobalt recycling from spent lithium ion battery, Journal of Smart Processing, 5 (2016) 358–363. 松岡光昭, 堀内健吾, 所千晴, 大和田秀二, 薄井正治郎, 使用済みリチウムイオン電池からの分級によるコバルト回収に適した加熱プロセスおよび粉砕プロセスの検討, スマートプロセス学会誌, 5 (2016) 358–363. <https://doi.org/10.7791/jspmee.5.358>
- Raworth K. (Au.), Kurowa A. (Tr.), Doughnut Economics, Kawade Shobo Shinsha, 2021, ISBN: 9784309467351. ケイト・ラワース (著), 黒輪篤嗣 (訳), ドーナツ経済, 河出書房新社, 2021, ISBN: 9784309467351.
- Suh S., Bergesen J., Gibon T.J., Hertwich E., Taptich M., Green Technology Choices: The Environmental and Resource Implications of Low-Carbon Technologies, A report of the International Resource Panel, UNEP (United Nations Environment Programme), 2017. <<https://www.unep.org/resources/report/green-technology-choices-environmental-and-resource-implications-low-carbon>> accessed 03.07.2022.
- Teruya K., Lim S., Mochidzuki K., Koita T., Mizumoto F., Asao M., Namihira T., Tokoro C., Utilization of underwater electrical pulses in separation process for recycling of positive electrode materials in lithium-ion batteries: role of sample size, International Journal of Plasma Environmental Science and Technology, 16 (2022) e01003 (13 pp). <https://doi.org/10.34343/ijpest.2022.16.e01003>
- Tokoro C., Current status and issues of separation technology for recycling lithium-ion batteries, The Separation Technology, 52(4) (2022b) in press. 所千晴, リチウムイオン電池リサイクルのための分離技術の現状と課題, 分離技術, 52(4) (2022b) 掲載予定. [http://www.sspej.gr.jp/publications/back\\_number.html](http://www.sspej.gr.jp/publications/back_number.html)
- Tokoro C., Lim S., Teruya K., Kondo M., Mochidzuki K., Namihira T., Kikuchi Y., Separation of cathode particles and aluminum current foil in Lithium-Ion battery by high-voltage pulsed discharge Part I: experimental investigation, Waste Management, 125 (2021) 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.008>
- Tokoro C., Metal resources circulation and circular economy, Chemical Engineering of Japan, 86(2) (2022) 61–64. 所千晴, 金属資源循環とサーキュラー・エコノミー, 化学工学, 86(2) (2022a) 61–64. <<https://magazine.scej.org/articles/5624/>> accessed 07.07.2022.
- 所千晴, LiB からの高効率元素回収のための分離濃縮技術, 『車載用 LiB のリユース/リサイクル技術と規制動向』, 情報機構, 2022c, pp. 112–121, ISBN: 978-4-86502-233-9.

## 著者紹介



## 所 千晴 Chiharu TOKORO

〔経歴〕 2003年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士（工学）取得。早稲田大学助手、専任講師、准教授を経て、2015年から現職の早稲田大学理工学術院教授。また、2021年よりクロスポイントメントにて現職の東京大学大学院工学系研究科教授。

〔専門〕 資源循環工学、粉体工学、化学工学。資源循環や環境浄化のための分離技術高度化。

〔連絡先〕 tokoro@waseda.jp