リチウムイオン電池のリサイクル - 現在の技術および世界的な動向のレビュー

CAS
A division of the
American Chemical Society

はじめに

1991年に初めて商業的に導入されたリチウムイオン電池（LIB）（図 1）は、自動車、家電製品、電動工具、医療機器そしてバックアップ電源などに使用され、現代技術に欠かせないものになっています。しかし、リチウムイオン電池の製造と廃棄は、さまざまな政治的、経済的、環境的な懸念をもたらしてきました。

EV（電気自動車）の爆発的な人気に伴い、バッテリーのサイズは拡大する一方です。これに歩調を合わせるようにして拡大しているのがスマートフォンやその他の電子機器の埋め立て廃棄処分で、これによりエネルギー浪費は拡大し、そして再生不能な資源への依存も高まっています。リチウムイオン電池使用の増加と、それが廃棄される割合の高さを見れば、リチウムイオン電池とそのコンポーネントや材料をもっと積極的にリサイクルしなければならないことは明らかです。

現在、リチウムイオン電池のリサイクルの方法は、金銭的なインセンティブと連動しています。電池をリサイクルすることのメリットは、そのコンポーネントの材料とその価値に依存しています。使用済み電池に価値のある物質が含まれている可能性が高いことは確かである一方、一様にそうであるとは限りません。電池の設計に大きなばらつきがあり、技術的な収束が見られないことが、リサイクルで直面する課題の一因となっています。

設計の多様性はリサイクル工程の自動化を困難にするほか、高いコストの一因にもなっています。さらに、リサイクルすることのメリットは多くの場合公共の利益であって、個人や企業が直接恩恵を受けるものにはなっていません。しかしながら、リチウムイオン電池のリサイクルには物質的安全と環境的な利点の両方があります、例えば、採掘に伴う水の消費量と汚染の減少、エネルギー消費と温室効果ガスの排出の削減、汚染と安全性のリスクの低減などです。これらのメリットは簡単には収益化することはできません。

電池のリサイクルにかかるコストは、施設における処理量と技術力に大きく左右されます。こういった制約があるということは、コストを最小化するためには、広範囲に実施されているリチウムイオン電池リサイクルの方法を標準化する規制が必要であることを意味しています。リサイクル能力の開発には、行政の方針が重要な役割を担います。しかしリサイクル施設の建設には、リサイクルの経済性と電池製造に必要な材料要件も寄与するということに注意する必要があります。

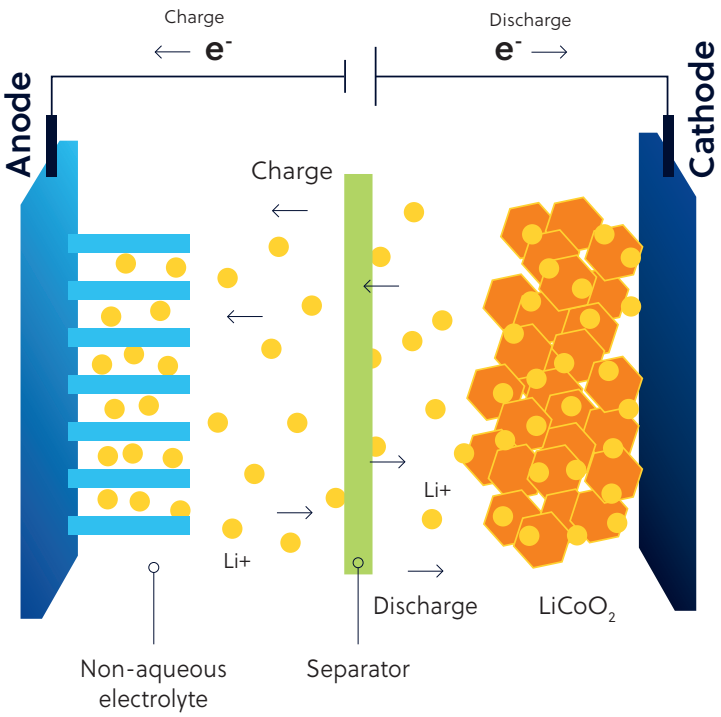

図 1. リチウムイオン電池の模式図。電池は電流を流すことで充電され、電解液を介して正極から負極へと電流が流れます。放電の際は、負極からリチウムイオンが離れ、正極に移動することで電流が流れます。

このホワイトペーパーでは、**湿式製錬、乾式製錬**、そして正極材料のリサイクルに焦点を置いた**ダイレクトリサイクル**といった、リチウムイオン電池リサイクルの方法について考察します。図 2 は、これら 3 つの方法それぞれのプロセスを示したものです。

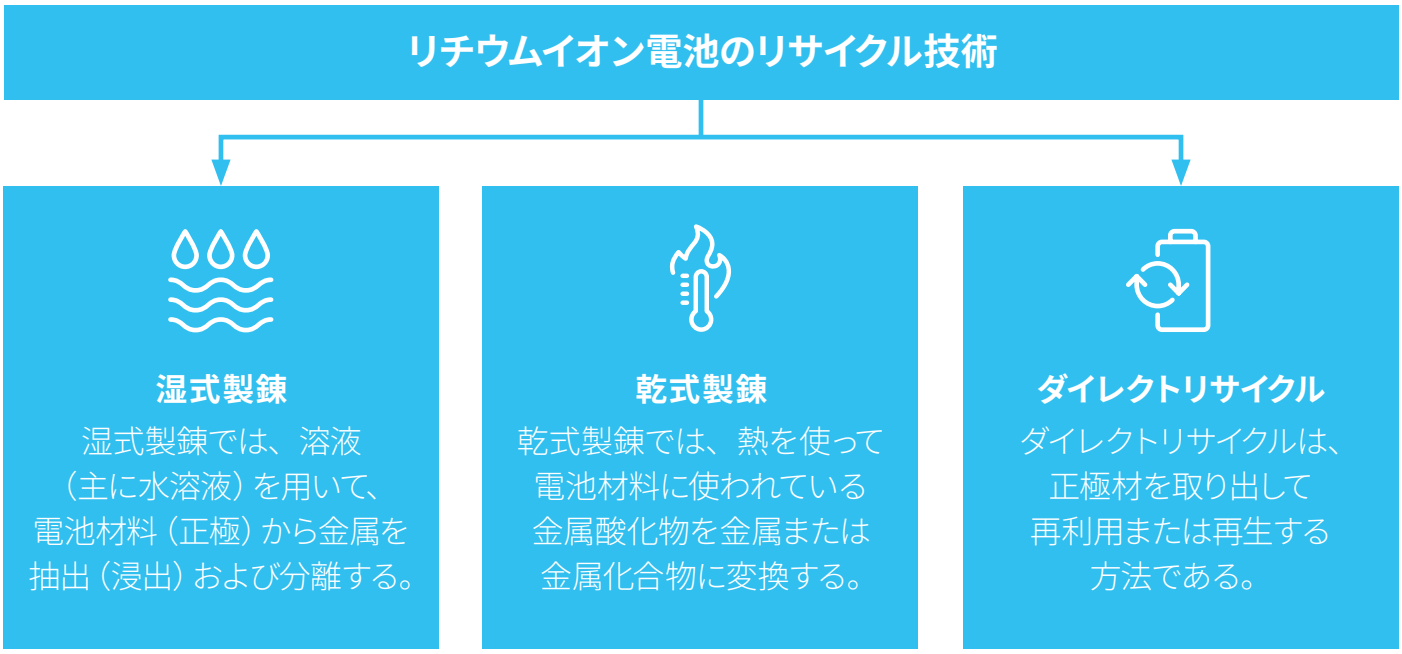

図 2 LIB リサイクルの 3 種類の方法の概要

産業界と学術界において、LIB リサイクルがどのように進んでいるのか、その全体像を把握するため、CAS コンテンツコレクション™ のデータを用いて、2010 年から 2021 年までの学術文献と特許文献の両方における LIB リサイクルの方法と材料を分析しました。また、LIB リサイクルの経済的および規制面での利点と課題のほか、既存および計画されている世界のリサイクル施設とその報告されている処理能力の概要などにも触れていきます。

世界における LIB リサイクル

大抵の場合、LIB の処理には湿式製錬法と乾式製錬法の組み合わせが用いられます（図 3）。例えば、Retriev社（旧 Toxco 社、4500 トン/年）、住友・ソニー社（150 トン/年）、Inmetco社（6000トン/年）は主に乾式製錬法を、Recupyl社（110トン/年）は湿式製錬法を、そして Akkuser 社（4000トン/年）、Umicore Valeas社（7000トン/年）、Glencore社（3000トン/年）は乾式製錬法と湿式製錬法の両方をそのリサイクル方法に使用しています。

乾式製錬法が採用される理由として、電池材料に柔軟性があり（ユミコア製法ではリチウムイオン電池とニッケル水素電池両方に使用される）、また設備に多額の固定投資が行われたためと考えられます。その一方、現在開発中の方法の多くは、湿式製錬法です。その一因として、この方式を実施するための設備のコストが比較的少なく済むことが考えられます。Lithorec 社およびアールト大学（フィンランド）では、ともに湿式製錬法で考案しています。それに対し、Accurec 社、Battery Resources 社、そして OnTo 社などは湿式製錬法と乾式製錬法の両方を採用しています。

前処理

放電
電位を経済的な方法で回収・保存できれば、LIB を電気的に放電することことができます。

不活化
放電しない場合は、電池材料を取り外せるよう電池を不活化する必要があります。これは多くの場合、LIB を塩水溶液に浸すことで行います。こうすることで、電荷と放電熱を速やかに除去し、有機副産物の燃焼を防ぐことができるからです。不活性の気体によって燃焼を防ぐこともできます。液体窒素も燃焼を抑制するため、および同時に LIB を冷却して加熱や発火を起こしにくくするために使われます。電池の不活化用の非反応性ガスとして、二酸化炭素を工程で使用する場合もあります。

分解 – マニュアル作業
マニュアル作業で分解された電池は、電池材料を得るために更なる工程が必要になります。溶媒処理、焼成、NaOH 水溶液への溶解、または超音波処理のいずれかを実施します。

分解 – 細断
最も単純な方法は、電池を細断、粉砕または細かく分解することです。細断は不活性気体下で行うことで、不活化ステップと分解ステップを統合できます。

分離
電池材料は、ふるいを使ってサイズ別に、溶液や気流を使って密度別に、あるいはろ過を使って選別することができます。

ダイレクトリサイクル
ダイレクトリサイクルは、正極材を取り出して再利用または再生する方法である。リチウムリチウムイオン電池をダイレクトリサイクルするには、電池を分解し、分離されたコンポーネントを取り出す必要がある。

乾式製錬
乾式製錬は、熱を使って（ほとんどの場合は炉を使用して）電池材料に使用されている金属酸化物を金属または金属化合物に変換する方法です。

- **製錬**
  還元焙焼（製錬）では、（前処理後の）電池材料を真空または不活性気体下で加熱し、金属酸化物を（電池の組成に応じて）コバルト、ニッケル、銅、鉄を含む混合金属合金と、リチウムとアルミニウムを含むスラグに変換します。還元焙焼後は、分離された金属を得るためには混合金属合金を浸出する必要があり、またリチウムをリサイクルする場合は、リチウムを含んでいるスラグを処理する必要があります。

- **塩化焙焼**
  電池材料に塩化アルミニウムなどの塩を加えて焙焼することで、金属酸化物を塩化コバルトなどの塩に変換することもできます。

湿式製錬
湿式製錬法では、溶液（主に水溶液）を用いて電池（正極）材料から金属を抽出（浸出）および分離します。前処理された電池材料（事前に除去されたアルミニウムや銅など）は、多くの場合、酸性の水溶液で抽出されます。無機浸出試薬で最も一般的に使用される組み合わせは硫酸と過酸化水素（過酸化水素は還元剤として作用する）ですが、塩酸と硝酸も一般的に使用されています。有機酸も使用されており、その場合クエン酸やシュウ酸が最もよく使われています。

硫酸アンモニウムまたは炭酸アンモニウムを含んだアンモニアの塩基性溶液を使用することもできます。金属が溶液中に抽出されたら、溶液から選択的に抽出する必要があります。pH の変化を利用して金属塩を選択的に沈殿させるか、ジアルキルリン酸塩やホスフィン酸塩などの抽出剤を含む有機溶媒を使って抽出します。バクテリアやその他の生物を使った金属抽出（バイオリーチング）も研究されています。

図 3　一般的なリサイクル方法のフローチャート。LIB はほとんどの場合前処理が必要であり、その後、湿式製錬や、乾式製錬、ダイレクトリサイクル、またはそれらを組み合わせた方法が使われています。前処理には、放電または不活化、分解、分離の 3 つのプロセスがあります。

LIB リサイクルにおかるコストおよびメリット

リチウムイオン電池のリサイクルは、経済的にも環境的にもメリットがあります。さらに、そのリサイクル経路で具体的にどんな工程を使用するのかによって、コストとメリットも変動します（表 1）。

表 1. 一般的なリサイクル方法の利点および制約。リサイクル経路で使用される工程によって、実用面、経済面、そして環境面で、それぞれ異なった利点や制約があります。

プロセス	長所	制約
分解 – 細断	• 最もシンプルな分解方法	• 集電体やケーシングを損なわずに分離できない
分解 – マニュアル作業	• コンポーネントを完全なまま分離できる	• 作業員が電池材料にさらされる • 労働集約的である
乾式製錬法	• 電池をリサイクルするための前処理方法がより簡素化されているほか、組成、形状、サイズが異なる LIB でもより少ない数の方法でリサイクルできる • 湿式製錬法よりも試薬の使用量が少なくて済む可能性が高い（確実ではない） • 乾式製錬では LIB のコンポーネントの多くは全く回収できない • LIB の有機コンポーネントを燃やすための汚染緩和対策が必要	• 湿式製錬やダイレクトリサイクルに比べより大きい投資が設備に必要 • 他の電池リサイクル法よりも遥かに高い温度と膨大なエネルギー消費が必要
湿式製錬 – 有機酸	• 無機試薬よりも再生可能性が高く、選択される可能性が高い	• 試薬の使用や製造により多くのエネルギーを必要とし、コストが高く、また無機試薬に比べ二酸化炭素の発生量も多い
湿式製錬	• 乾式製錬よりも湿式製錬のほうが、新しい LIB を製造するのに扱いやすくて使いやすい形態の金属を提供するほか、より多くの電池の材料を容易に回収できる。 湿式製錬では必要とされる温度が低いため、エネルギー使用量が低減する。 湿式製錬設備は、乾式製錬よりも必要な資本コストが低く済む	• 大量の水を（また金属化合物を分離するのに溶媒抽出を行う場合は有機溶媒も）必要とする。湿式製錬では相当な廃水処理（中和を含む）が必要となる。湿式製錬を行うのに必要な前処理は、乾式製錬よりも労働集約型である。最後に、電池材料の二次汚染を避けるために、金属を分離する方法を選択する必要がある。
湿式製錬 – バイオリーチング（バクテリアやその他の生物を用いた金属抽出）が研究されている。	• 他の湿式製錬に比べて、水、試薬、エネルギーが少量で済む	• 金属の抽出に時間がかかるため、同量の金属を生産するためにはより大規模な設備が必要である
ダイレクトリサイクル	• 他の方法よりもエネルギーコストと試薬コストが低くなる可能性がある • エネルギー必要量は乾式製錬や湿式製錬よりも少なくなる可能性がある • 他の方法よりも固定設備コストが低い • 試薬や溶媒の使用量が湿式製錬よりも少ないと考えられる • リサイクル業者は LIB のすべてのコンポーネントを回収できるほか、結晶構造に損傷もなく、LIB での使用に適した状態で正極材料の回収ができる場合がある	• この方法でのリサイクルには良好な状態の LIB が必要 • 電池の再構成には、電池の種類と組成に応じてそれぞれ異なる技術が必要とされる • 複数の種類の電池に対応するための施設および複雑性に起因するコストを削減するため、受け入れ可能な電池の選択肢を減らすか、投入された LIB をリサイクルするための施設および労働力を増やす必要がある • 他の方法と比較して、より多額の人件費が必要

電池のリサイクルに経済的メリットが見込める場合、大規模なリサイクルの可能性が高まります。電池リサイクルから得られる材料の価値が、その経済的メリットを決定するのです。

経済的メリット

リチウムイオン電池原料の世界的な埋蔵量は限られており、その採掘には多大なエネルギーと労力が必要とされます。多くの場合、その発見または産出場所は特定の地域に絞られているため、原料は大幅な価格変動の影響を受ける可能性があります。加えて、自然災害、戦争、資源配分の決定なども、利用可能性を低下させる可能性があります。

現在リサイクルの時期を迎えている初期の電池には、供給制限のある原料のひとつ、コバルトを多く含んでいる可能性があります。これをリサイクルすることにより、電池コンポーネントの国内の安全保障を高め、供給元が価格を操作することを制限できます。代替供給源、特に生産調整と価格調整が行われる可能性が低い供給源を確保することで、リサイクルは製造業者を短期的な価格変動から保護できるはずです。

2019 年に世界で生産されたリサイクル可能な推定 50 万トンのバッテリーから回収できる資源は、アルミニウムが 1 万 5,000 トン、リンが 3 万 5,000 トン、銅が 4 万 5,000 トン、コバルト 6 万トン、リチウム 7 万 5,000 トン、そして鉄が 9 万トンにもなります。リサイクルにより新しい原料採掘の必要性を減らし、輸入への依存を減らすことができるのです。全体として、現在の LIB リサイクル市場規模は約 17 億ドルと推定されており、今後 10 年間で大幅に増加するとも予想されています。

バージン原料の採掘と使用済み電池のリサイクルは、環境コストを必要とします。例として、1 トンのバージン原料のリチウムを生産する環境コストを図 4 に示します。かん水の精製は、リシア輝石の精製よりも少ないエネルギーで済むものの、18 ～ 24 か月を要し、得られるリチウムのグレードも低く、かん水に含まれるリチウムの回収量は、鉱石から回収する場合よりも少なくなります。さらに、かん水の精製では水が消費されます。輸出市場の半分以上を鉱業が占めるチリでは、国内の水のほとんどが鉱業によって消費されています。

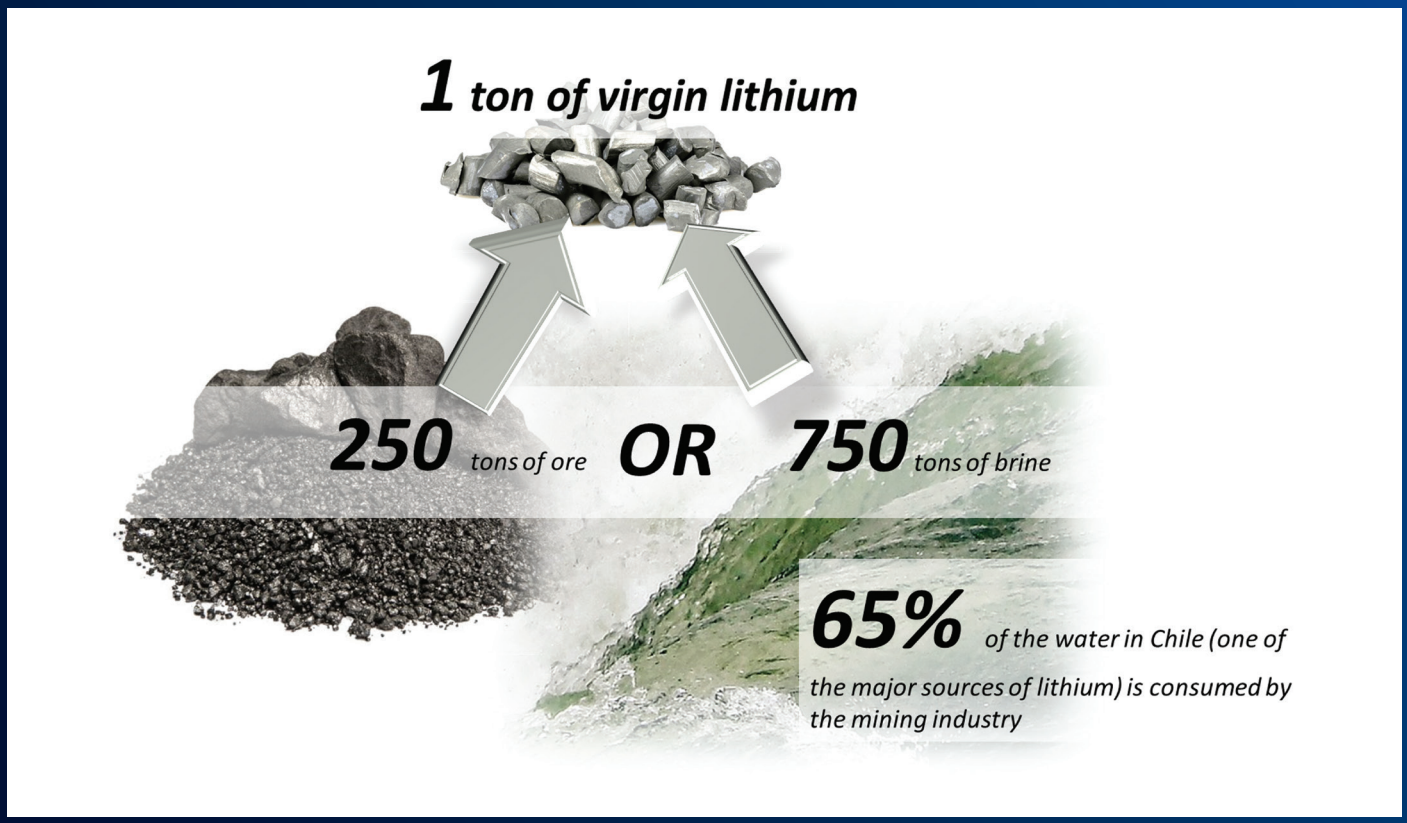

図 4.1 トンのバージン原料のリチウム生産に必要な環境コスト

使用済み電池を処分場からリサイクル施設まで輸送する場合、特に長距離輸送や国際輸送が必要な場合は、多額の費用がかかることがあります。こういったコストの大きさは、距離や人件費など、いくつかの要因により大きく変動します。採用したプロセスの違いも、コストに多大な影響を及ぼします（表 1 を参照）。

環境面のメリット

温室効果ガスの排出削減など、LIB リサイクルの環境上の利点に関する評価は非常に多様です。使用される方法や、エネルギーコストの変動、バッテリー構成の変化、モデリングでの改善などにより、時とともに変化する傾向があります。LIB リサイクルの環境上の利点を決定する重要な要因は、技術です。ある評価では、古い技術と低処理量の組み合わせは、最新の技術を使用した最大処理量の施設と比べて 10 倍のエネルギーを消費することがあることがわかっています。一方で、排出量とエネルギーの節約はかなりのものになる可能性があります。同評価では、正極材と集電体をリサイクルすることでエネルギー使用量を 50% 削減でき、また LCO をリサイクルすることで二酸化炭素排出量を最大 75% 削減できるとしています。

ある議論では、LIB の製造、使用そしてリサイクルにかかる環境コストは、はたしてその LIB で実現するとされる化石燃料使用の削減を本当に上回るのかが疑問視されています。プラグイン EV に搭載されているリチウムイオン電池の利点は、充電に使用される電気の供給源に左右されます。石炭依存の電力源を使えば、再生可能エネルギーで発電された電力を使用した場合より EV のメリットは低下します。例えば、ある評価では、内燃機関（ICE）駆動の自動車は、プラグイン EV やハイブリッド EV に比べて、20 ～ 25%多くのエネルギーを使用し、15 ～ 50%多くの温室効果ガスを排出すると結論付けています。一方で、電気自動車も制約がないわけではありません。電池の製造時に、ICE 駆動の自動車の最大 3 倍もの硫黄酸化物を排出します。これは、LIB をリサイクルすることで改善させることができます。

リチウムイオン電池の研究トレンド

リチウムイオン電池のリサイクルに関連する論文をCASコンテンツコレクションで検索し、出版物の種類と出版年に基づいて分析を行いました（図 5）。この 10 年間で世界的な科学出版物の量は着実に増加しているものの、このテーマに関する出版物の年間増加率（32%）は、科学出版物全体（年間4%）をはるかに上回っており、特にここ4年間で、このテーマに対する関心が高まっていることを示唆しています。また、特許申請が全体の 74%を占めているのに対し、特許件数は CAS コンテンツコレクション全体の 33%であることもわかりました。これは LIB リサイクルをめぐる技術や発見の商業的価値が高いことを示しています。これらの文献の所属組織と関連づけられている国と地域の分析では、論文と特許の両方において、中国の出版量が最も多いことがわかります（図 6）。

リチウムイオン電池リサイクルの出版物

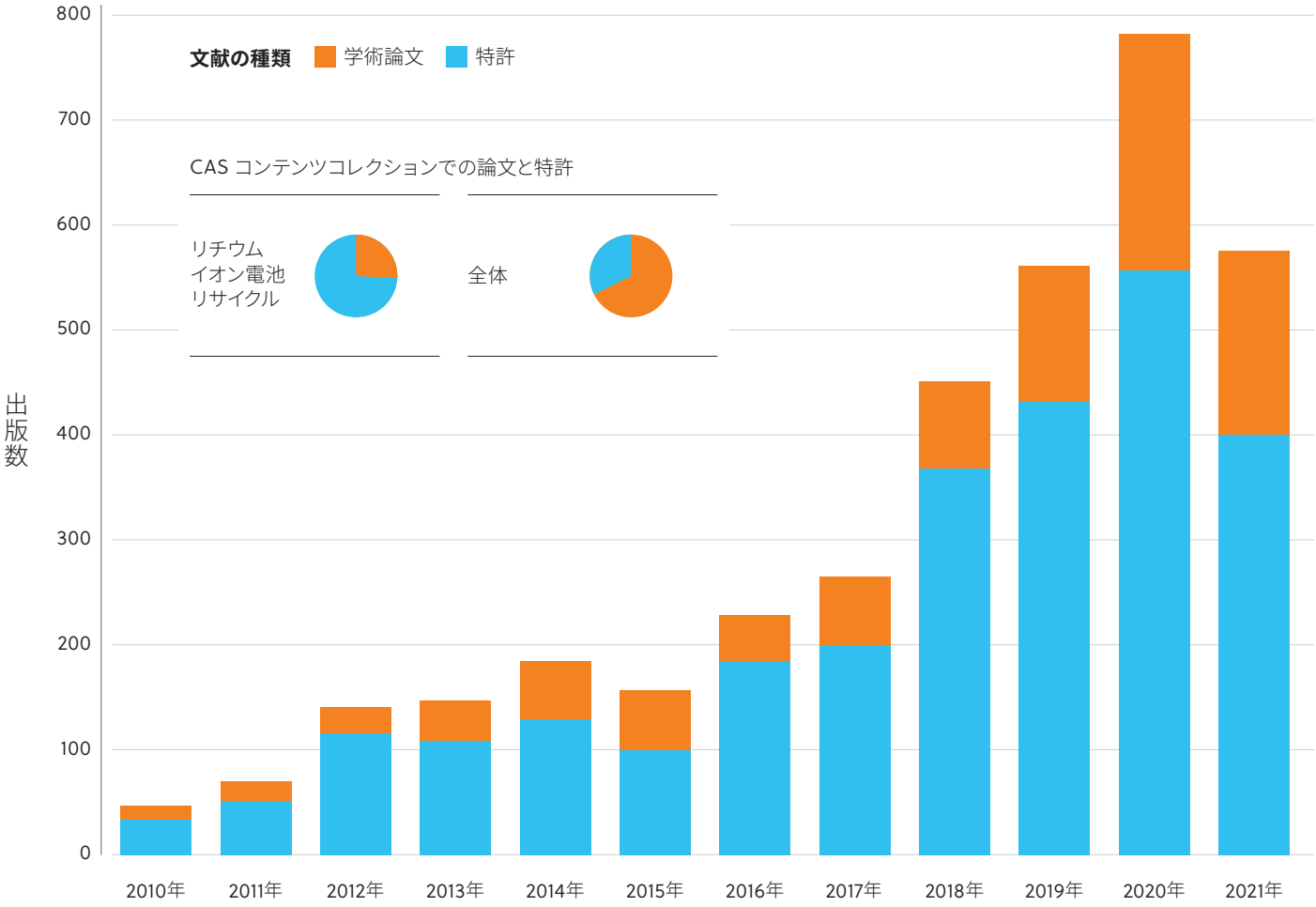

図 5. リチウムイオン電池のリサイクルに関する学術論文と特許出版物（2021 年のデータは一部のみ）

国 / 地域別のリチウムイオン電池リサイクルの出版物

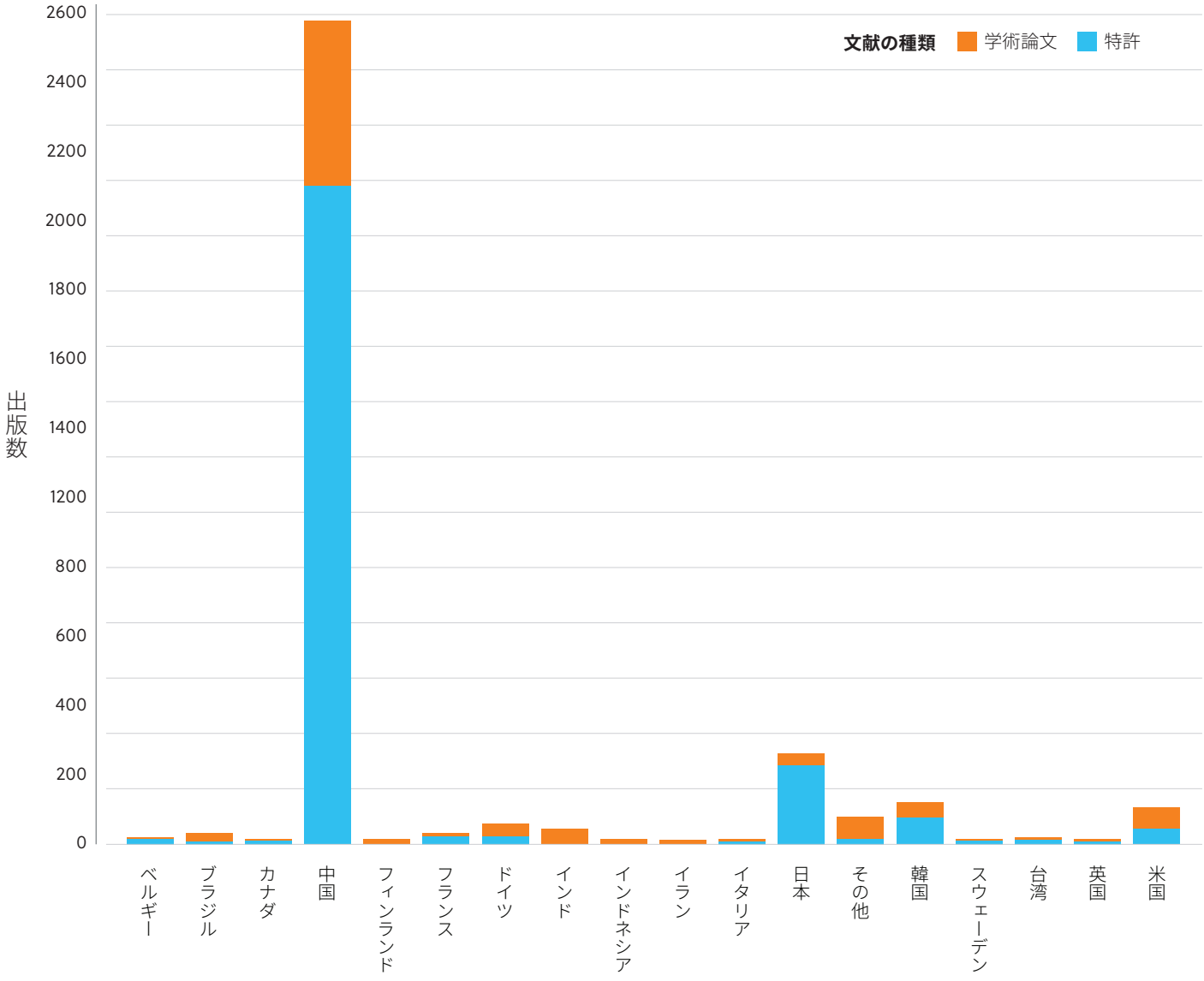

図 6. 国/地域別のリチウムイオン電池リサイクルの出版物、2010 ～ 2021 年

また、過去 10 年間の湿式製錬、乾式製錬、ダイレクトリサイクルを年間論文数でランク付けし、さまざまなリサイクル方法の論文トレンドを評価しました。図 5 に見られる全体的な観測結果と同様、3 つの方法すべてに関係する出版物は全体的に増加し、特にここ数年で著しく伸びています (図 7)。

湿式製錬が 2015 年以降乾式製錬を大幅に上回っており、これは設備コストの低さから湿式製錬が新規開発において好まれるためと思われます。ダイレクトリサイクルも近年、大幅に増加しています。

年別のリチウムイオン電池リサイクル方法

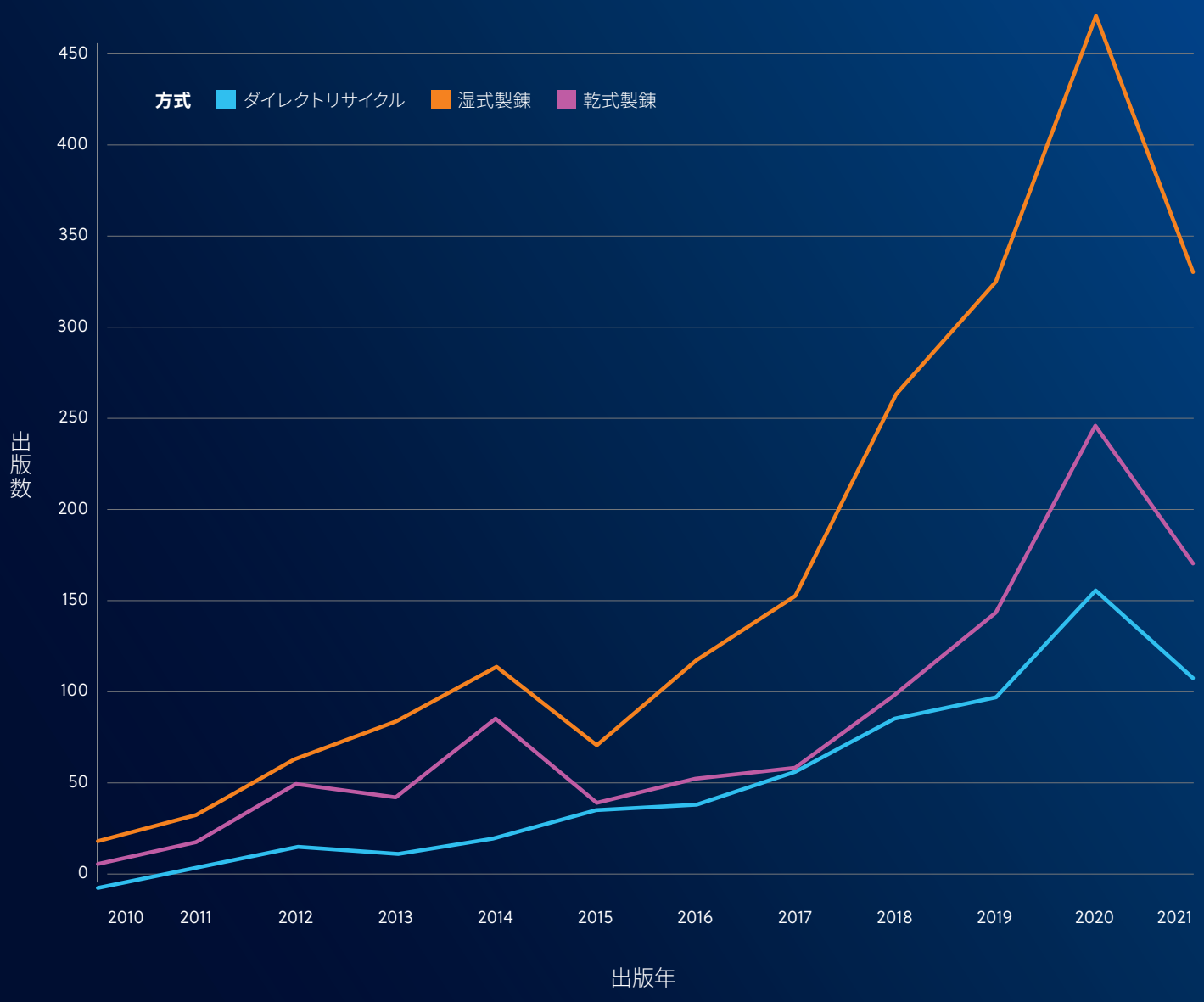

図 7. リサイクル方法別の出版物の発行部数、2010 ～ 2021 年

ここで、より掘り下げた視点を得るため、過去 10 年間の出版数に応じて、抽出された各金属とそれぞれで採用されたリサイクル方法（湿式製錬または乾式製錬）の人気度を評価しました。その結果、リチウムが最も多く回収される傾向があることがわかりました。これは、あらゆるリチウムイオン電池の正極にはリチウムが多く含まれていることがその一因と考えられます。リサイクル方法に関しては、どの金属もほぼ同じパターンになっており、複数の方法の組み合わせがほとんどの研究で使われています（図 8）。

リチウムイオン電池からの金属の回収

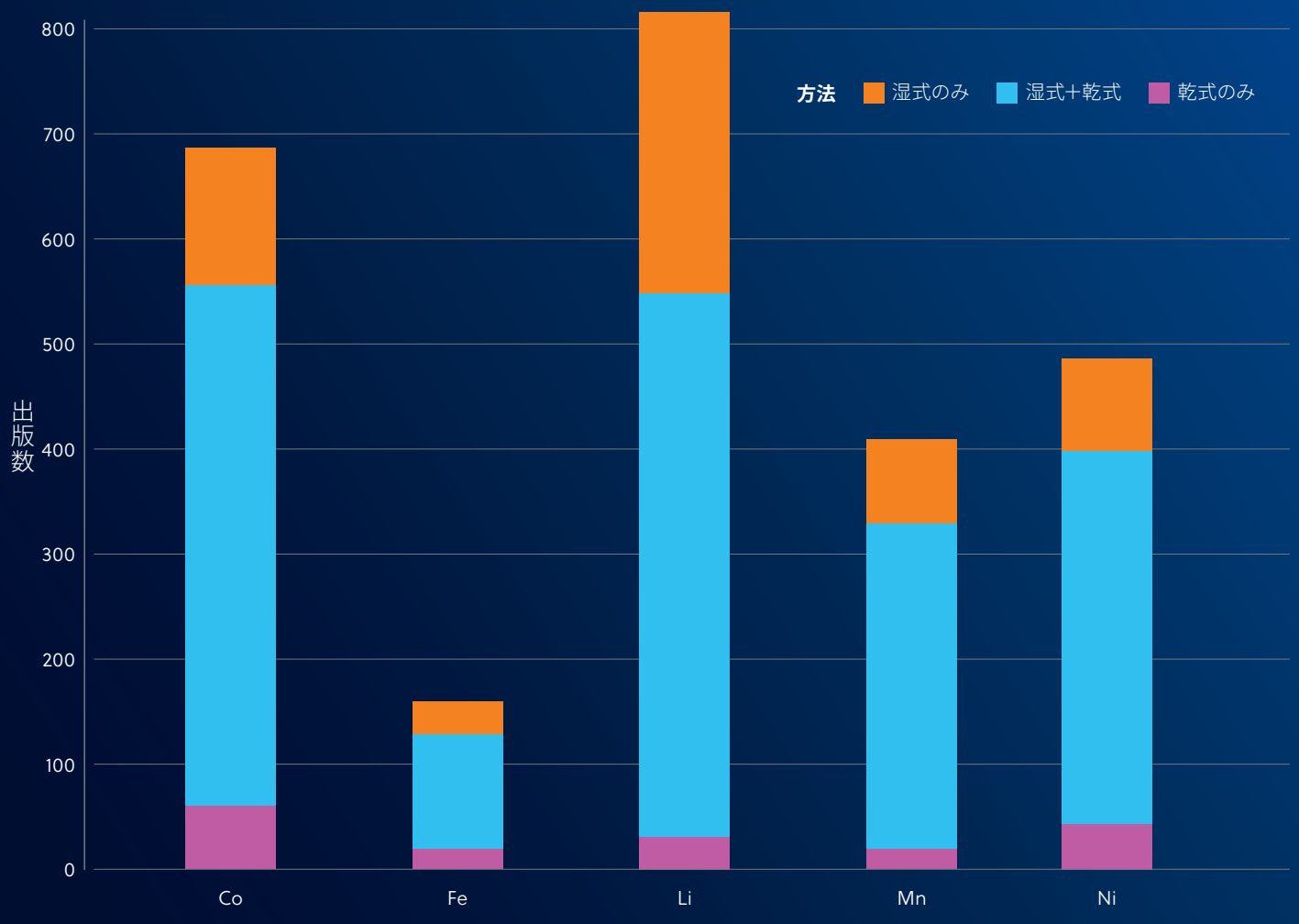

図 8. 湿式製錬および / または乾式製錬について論じている文献における回収金属の割合

正極材を取り出して新しい電池に再利用または再生するダイレクトリサイクルは、他のリサイクル方法よりエネルギーコストと試薬コストが低く済む可能性があります（表 1 参照）。最大の価値が得られるのは正極のリサイクルである一方、より包括的でサステナブルなアプローチとしては、リチウムイオン電池すべてのコンポーネントを対象とするべきです。そうすることで、寿命が来た電池からより多くの廃棄物を回収し、環境への影響を減らすことができます。そこで、ダイレクトリサイクルによって得られるコンポーネントで、これまで研究の少なかったものに焦点を当てている出版物の数をグラフ化してみました。この分野における研究の進捗状況に対するインサイトが得られます(図 9)。正極でないコンポーネントで最も研究されているのは負極でした。そして電解液、集電体、セパレーターと続きます。また、リチウムイオン電池リサイクルに関する具体的なプロセスも評価しました。リサイクル可能な物質の量を最大限にするには、リチウムイオン電池は粉砕するより分解するほうが望ましいわけですが、CAS の調査では、分解のための研究努力が相当なされているという勇気づけられる結果が示されています（図 9）。

その他のコンポーネントのリサイクルとプロセスに関する調査

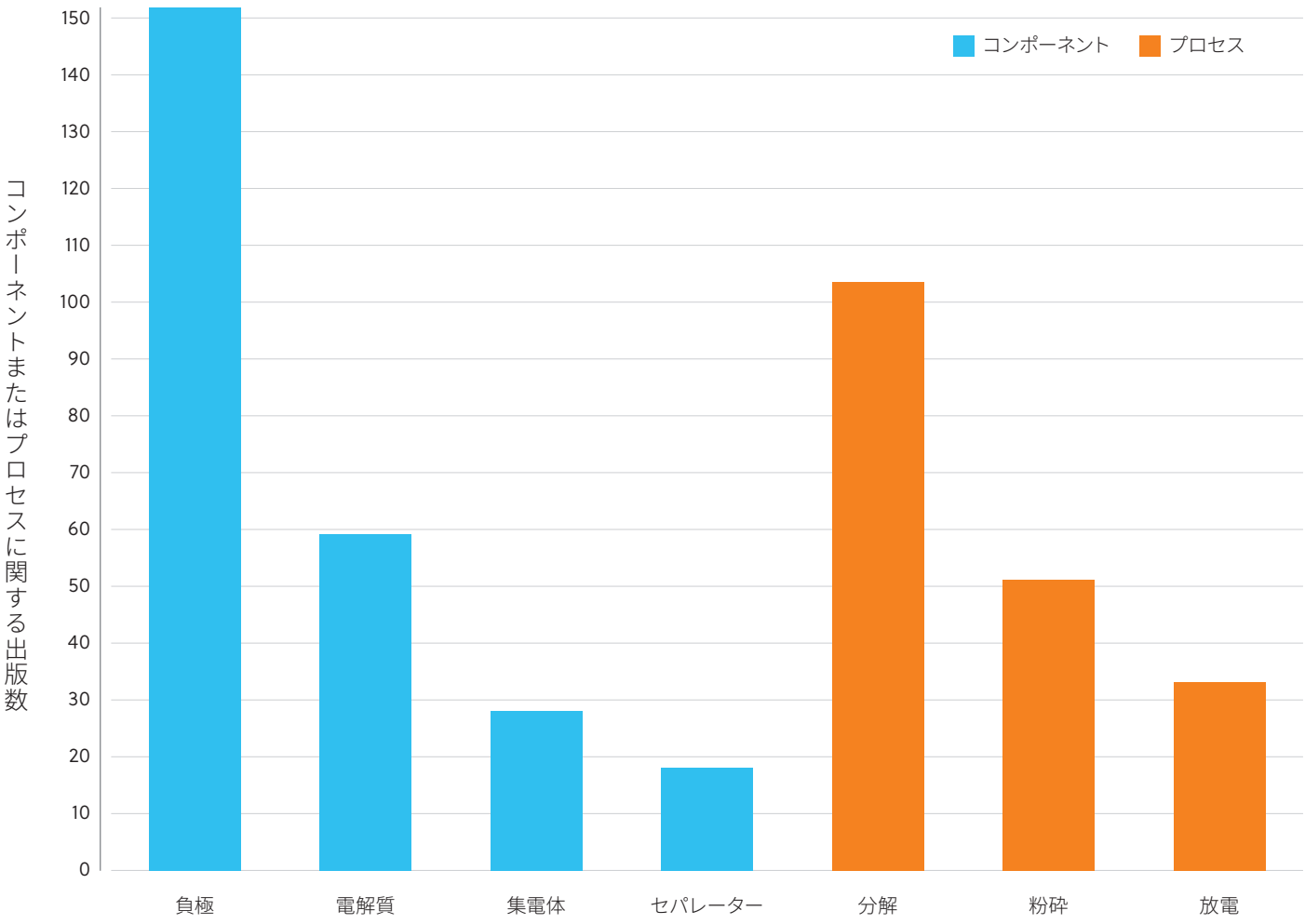

図 9. 非正極材料の回収とリサイクル工程の最適化を研究している出版物

世界の規制と政策

リチウムイオン電池のリサイクルに関する規制は増加しています。多くの国が LIB リサイクル方法の研究に資金を提供しています。さまざまな国でリチウムイオン電池のリサイクル法が制定されている中、中国と欧州連合は LIB リサイクルに関する包括的な規制フレームワークを有するか、または制定中です（図 10）。

- リチウムイオン電池リサイクルの法規制がある国
- リチウムイオン電池リサイクルの法規制がない国
- リチウムイオン電池リサイクルの法規制を策定中の国

英国

- リチウムイオン電池に関する明確な規制はない

米国

- 連邦政府、州政府、地方政府が権限を有している
- 連邦政府レベルでは、電池エネルギー貯蔵システムの廃棄に直接的に対処する政策や、リチウムイオン電池の再利用と回収を義務付けたり、奨励したりする政策はない（2020 年現在）
- 今後のリチウムイオン電池のリサイクル規制は、鉛蓄電池のリサイクルが潜在的なひな型になる可能性あり
- LIB の内容物は有害廃棄物規制の対象となる可能性が高い
- 連邦レベルでは、LIB リサイクルに特化した州法や地方法は存在しない

ヨーロッパ

- LIB リサイクルに関する規制はないが規制案が現在提案されている
- これが電池、特にリチウムイオン電池の設計、販売、使用、そしてリサイクルに関する包括的な枠組みを提供する
- これらは EU に環境および原料の安全保障の両方をもたらすことを目的としている。ただし一部の要件は電池メーカーにとって不利に働く可能性がある

ドイツ

- リサイクル法、電池リサイクル法、廃棄自動車リサイクル法により、製造業者、消費者、リサイクル業者のリチウムイオン電池リサイクルの責任を規定している

日本

- 基本法、包括法、および特別法のすべてで電池のリサイクルを規制している
- 新車メーカーはバッテリーに対する責任を負い、リサイクル工程に組み込めるよう、バッテリーリサイクル技術に関する知見を維持しなければならない
- 電池のリサイクルは非営利団体によって管理されている
- 家庭用の非常用電源として電池を再利用する活発なプログラムが存在する

中国

- さまざまな法律で電池のリサイクルに関する国の運用基準を定めており、その中にはリチウムイオン電池に直接関連する内容もある
- さまざまな法律によって電池に関する規制が存在している。これには、安全対策、手順、保管、管理、外観、極性、電圧や充放電電流と残留エネルギーの決定方法、一意的な識別方法と仕様などが含まれている
- 2018 年、中国は電池リサイクルの試験的計画である「新エネルギー自動車における動力電池リサイクルの試験的取り組みに関する通知（2018 年）を制定した
- 2020 年には、中華人民共和国固形廃棄物汚染防止管理法により、リチウムイオン電池を含む固形廃棄物汚染防止管理制度が制定された
- 重要な注意点は、鉛蓄電池の過去の遵守状況に基づき、リサイクル法への最適なコンプライアンスではないこと

インド

- 電子廃棄物に関する規制はあるが、LIB リサイクルの枠組みはない

オーストラリア

- LIB リサイクルに関する政策はない

図 10. 世界中の主な LIB リサイクルの枠組み

現在の LIB リサイクル能力は東アジアに集中しており、中国が世界のリサイクル能力の半分以上を占めています。残りはほぼヨーロッパです。現在提案されている LIB リサイクル施設が稼働すれば、今後リサイクル能力は約 25% 増加します。そのうち、確定している新リサイクル能力のほとんどは北米に集中することになります（図 11）。現在のリサイクル能力が存在している場所は、LIB リサイクル規制がもたらしている影響と一致している一方、将来のリサイクル施設の場所は、経済的要因と沿った形になります。

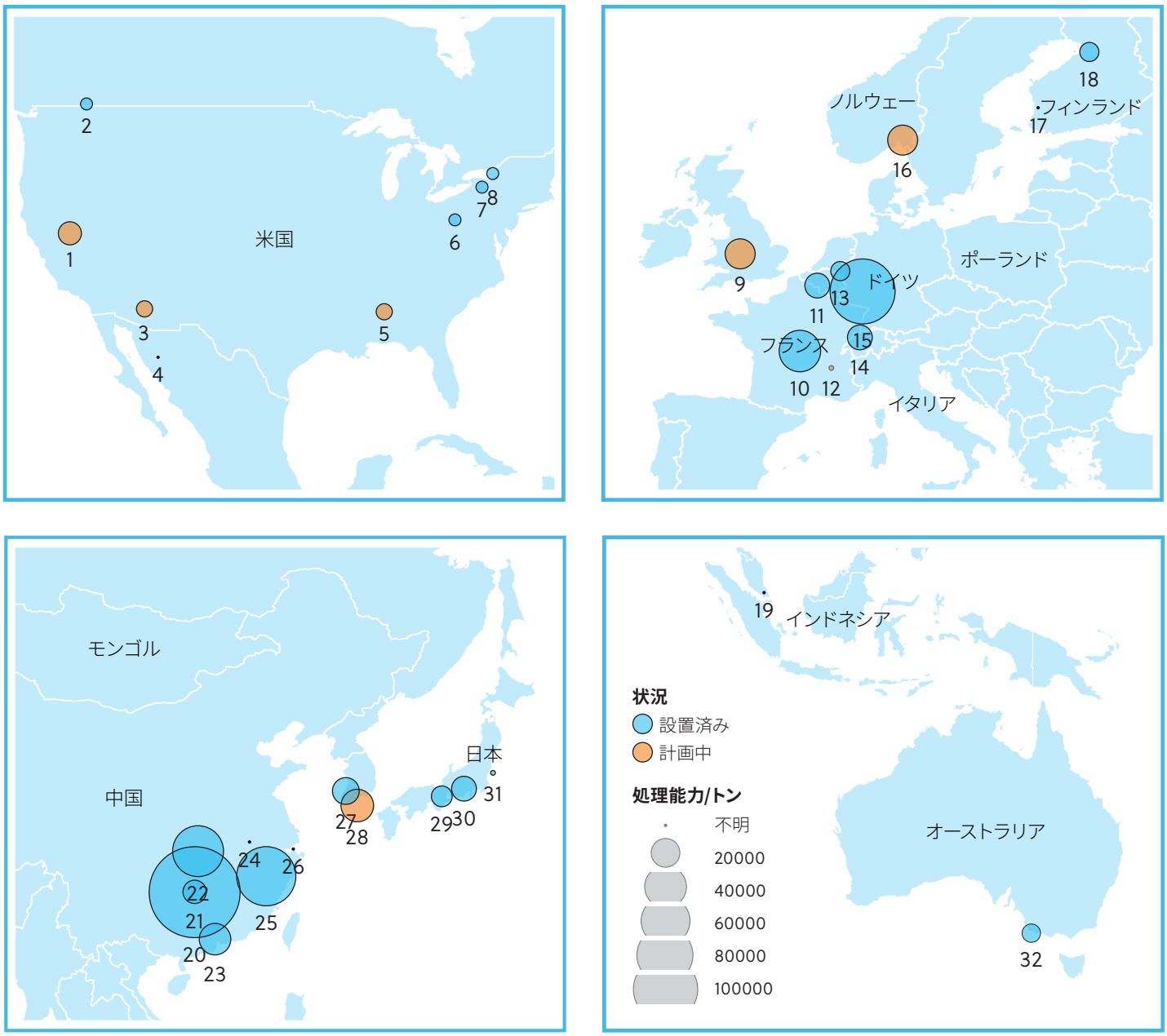

図 11. 設置済みおよび計画中の世界のリチウムイオン電池リサイクル施設、2021 年 11 月現在

現在および将来の LIB リサイクル能力は、規制の見通しと一致しているのでしょうか。現在のリサイクル能力と、想定される将来のリサイクル能力からすると、リサイクル能力が最も集中しているのは東アジア（特に中国）であり、次いでヨーロッパになります。現在のリサイクル能力の集中は、規制のレベル（または規制が反映しているところの政府の優先事項）と一致しています。中国には LIB に関する相当な規制構造がある一方、EU 加盟国には相当なリサイクル規制があり、また EU 全体でも LIB リサイクルの包括的枠組みを策定中です。

将来的なリサイクル能力（能力が表明されているもの）で提案されているもののうち最大なのは、北米、特に LIB リサイクルに関する国の規制がほとんど制定されていない米国となっています。米国における LIB リサイクルの発展は、将来的な潜在的規制も影響するかもしれないが、EV の販売台数の増加とそれに伴う電池製造量の増加、そしてこれらがもたらす廃棄コストや利益によって左右される可能性のほうが高いと思われます。北米のリサイクル能力は限られていることから、他の地域ではなくこの地域内での能力増強は当然と言えます。

政府の政策がリチウムイオン電池のリサイクル能力の発展に寄与することは明らかである一方、LIB リサイクル施設の建設には、その他の要因（例えばリサイクルの経済性や LIB 製造に必要な原料など）も影響します。

結論

このホワイトペーパーでは、CAS コンテンツコレクションのデータに基づき、以下を含む LIB リサイクルのトレンドをいくつか確認できました。

- 全体的な観測結果と同様、LIB リサイクルの 3 つの方法に関係する出版物はすべて最近 10 年間で全体的に増加し、特にここ数年で著しく伸びている。
- 中国は論文と特許の両方で最も出版件数が多くなっている（出版物の約 90%）。
- 2015 年以降、湿式製錬は乾式製錬を大幅に上回り、ダイレクトリサイクルも最近大幅に増加している。
- リサイクルされた LIB から最も多く回収される金属はリチウムで、他のすべての抽出金属に関しては、使用されているリサイクル方法は似たようなパターンになっている。
- リチウムイオン電池の各コンポーネントで、これまで研究が少なかったものに対する研究への取り組みも多く見られる（これはよりホリスティックなリサイクル管理視点の出現を示唆している）。また、分解に関する研究の取り組みも増えている。これはリサイクル可能な材料の量を最大化させるという点で望ましいと言える。

なお、今回のこの調査を、さらに世界的な LIB リサイクル管理の現状と将来についての評価で補足しました。その結果、ほとんどの場合で、LIB の処理には湿式製錬法と乾式製錬法の組み合わせが用いられていることがわかりました。現在の LIB リサイクル能力は東アジアに集中しており、中国が世界のリサイクル能力の半分以上を占めています。そして残りはほぼヨーロッパになっています。

現在提案されている LIB リサイクル施設が稼働すれば、今後 LIB リサイクル能力は約 25%増加します。そのうち、確定している新リサイクル能力のほとんどは北米に集中することになります。現在のリサイクル能力が存在している場所は、LIB リサイクル規制がもたらしている影響と一致している一方、将来のリサイクル施設の場所は、経済的要因と沿った形になります。

全体として、リチウムイオン電池のリサイクル規制は増加傾向にあり、多くの国が LIB リサイクル方法の研究に資金を提供しています。さまざまな国で LIB リサイクル法が制定されている中、中国と欧州連合は包括的な規制フレームワークを有するか、または制定中になっています。CAS のレビューでも見られるように、LIB リサイクル管理に対する関心の高まりと相まり、LIB の応用が爆発的に増加している現在の世界にあって、こういった調査結果は LIB の将来にとって非常に心強いものです。

リチウムイオン電池のリサイクルの発展に関する詳細については、次のCASの出版物を参照してください。
https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsenergylett.1c02602

CAS は、世界中のイノベーターと提携し科学の進歩を加速する科学情報ソリューションのリーダーです。CAS では、未知との関連性を明らかにするために、1400 人の専門家が科学的知識を精選、連結、分析しています。100 年以上にわたって、科学者や特許専門家、そしてビジネスリーダーは、hindsight（過去分析）、insight（洞察）、そして foresight（先見の明）を獲得し、過去の知識を基盤としたより良い未来に向けて、CAS のソリューションとその専門知識を信頼しています。CAS は、米国化学会の情報部門です。

詳細は cas.org をご覧ください。

CAS
A division of the
American Chemical Society

© 2021 American Chemical Society. All rights reserved.

CASGENENGWHP100560230803-A4