



## ハンドヘルドXRF分析を使ったリチウムイオン電池リサイクルの最適化

### はじめに

低炭素経済への移行と電気自動車の普及により、リチウムイオン電池の需要が急増すると予想されています。国際エネルギー機関 (IEA) は、今後20年間で主要な金属の需要が大幅に増加すると予測しています。具体的には、銅 (Cu) の需要は40%以上、ニッケル (Ni) とコバルト (Co) はそれぞれ60~70%、リチウム (Li) は約90%増加すると見込まれています<sup>1</sup>。これにより、採掘活動が増加し、有害廃棄物の量も増える可能性があります。

環境への影響を減らし、希少な金属への依存を減らすために、いくつかの国では生産者の責任に関する規制を導入しています<sup>2</sup>。これらの規制は、リチウムイオン電池や電気自動車の製造業者に対するインセンティブと責任を定めており、リサイクルが重要な原材料の供給に貢献する循環経済の実現を目指しています。

リチウムイオン電池は複数の部品で構成されており、その中で最も重要なのはカソードです。カソードは電池の総価値の40%から70%を占めており、その正確な化学組成によって価値が異なります。2023年現在、電気自動車用リチウムイオン電池のカソード活性材料の66%はリチウムニッケルコバルトマンガン酸化物 (NCM) が占めており、次いでリチウム鉄リン酸塩 (LFP) が24%、リチウムニッケルコバルトアルミニウム酸化物 (NCA) が残りの10%を占めています<sup>3</sup>。

### リチウムイオン電池リサイクルの流れ

リチウムイオン電池をリサイクルするには、熱処理や機械的処理、高温処理 (ピロメタルルギー) や湿式冶金 (ハイドロメタルルギー) など、さまざまな方法を組み合わせる必要があります。

一般的なリサイクルの流れは、まず電池を放電し、バッテリーパックとモジュールを分解してバッテリーセルを取り出します。次に、バッテリーセルを粉砕し、ふるい分け、密度や磁気による分離を行います。この段階では、アルミニウムや銅の箔でできた集電体が、カソード (NCM、LFP、NCA) やアノード (グラファイト) からの活性材料を含む粉末 (ブラックマス) から分離されません。

その後、ブラックマスは化学薬品を使って処理され、リチウム、ニッケル、コバルト、マンガンの純粋な塩を回収する湿式冶金プロセスが行われます。あるいは、ブラックマスを直接熔融 (ピロメタルルギー) して、コバルト、ニッケル、場合によっては銅を金属合金の形で回収し、リチウムはスラグ相に移行させることもできます。最後に、ピロメタルルギーを使用した後、得られた合金は簡略化された湿式冶金プロセスを使用して純粋な塩に精製されます。全てのカソード材料に対して経済的に実行可能なプロセスが存在するわけではないことに注意が必要です。

## リサイクルプロセスでの迅速な化学分析の必要性

リチウムイオン電池のリサイクルは、入力材料の変動性が高く、複数のプロセスステップを経るため、非常に複雑です。回収された材料は各主要ステップの後に分析され、純度を確認したり、次のステップのための適切な組成を確保したりする必要があります。さらに、ブラックマスを回収する企業は、下流のリサイクル業者に出荷される使用済み電池材料の市場価値を見積もる必要があります。これらの材料を実験室で分析する場合、時間がかかり、費用も高額になることがあり、その費用は分析された材料自体の価値を超えることもあります。これにより、リサイクルプロセス中に迅速でリアルタイムの意思決定を可能にするための費用対効果の高い現場分析の必要性が生じます。

## ハンドヘルド蛍光X線分析

ハンドヘルド蛍光X線分析計 (HHXRF) は、スクラップメタルや自動車触媒コンバーターなどのリサイクル分野で費用対効果の高い元素分析技術として実証されています。HHXRFは、金属や合金、非金属無機材料 (セラミックス)、鉱石、プラスチックなどのさまざまな種類の材料中のマグネシウム (Mg) からウラン (U) までの元素を測定できます。Thermo Scientific™ Niton™ XL2およびThermo Scientific™ Niton™ XL5 PlusハンドヘルドXRF分析計は、リアルタイムで正確な元素分析を提供し、リチウムイオン電池リサイクルの複数のステップでほとんどサンプル準備なしで実行できます。HHXRFはリチウムを検出しませんが、リチウムイオン電池の中でリチウムよりもはるかに高い価値を持つことが多いニッケルやコバルトなどのほとんどの元素を測定できます<sup>4</sup>。

HHXRFは主にリサイクルプロセスの上流で使用されます：

- HHXRFは、ギガファクトリーからのカソードスクラップフィルムの種類を識別できます。これはバッテリーリサイクルの原料の約70%<sup>4</sup>を占めます。カソード材料の種類を識別することは (図1)、適切なリサイクルルートを選択するために重要です。ピロメタルルギー (溶融) は、NCMカソードフィルムからニッケルとコバルトを回収するのに非常に効率的ですが、LFPカソードフィルムには適していません。これは、LFPカソード材料で高価値の唯一のコモディティであるリチウムがスラグ相に移行し、さらに湿式冶金プロセスで回収するのに非常に高額になるためです。
- 使用済み段階のバッテリーに対して、HHXRFはリサイクルプロセスの開始時に分解された使用済みバッテリーから得られたバッテリーハウジングを分類するために使用できます。ハウジングは通常、さまざまなグレードのステンレス鋼またはアルミニウム合金で作られています。HHXRFは、使用済みバッテリーセルの粉砕、磁気分離、密度分離、およびふるい分けの後にも使用され、得られた製品を分析します。これらの製品は、銅やアルミニウムの箔からブラックマスまでさまざまです。各製品の分画をHHXRFで分析することで、リスク評価 (例：有害金属の不在を確認)、適切な材料処理、およびプロセス効率に関する情報が提供されます。最も価値のある製品であるブラックマスは、最小限のサンプル準備でニッケル、コバルト、マンガンなどの元素の量を分析できます。分析は、迅速な半定量測定のために袋の中で直接行うことも (図2a)、サンプルカップとテストスタンドを使用してもより正確な測定を行うこともできます (図2b)。後者のアプローチでは、ニッケル、コバルト、マンガン、銅、鉄に加えて、リン、シリコン、アルミニウムなどの元素も定量化できます。

HHXRFは、溶融 (ピロメタルルギー) からの主製品を簡単かつ正確に分析し、合金中のニッケル、コバルト、銅の量を測定するためにも使用できます。



図1. HHXRFを使用してカソードスクラップフィルムの種類を識別し、生産スクラップを分類



図2. ブラックマスの迅速な分析のワークフロー：(a) Niton XL2 XRF分析計を使用した袋内のブラックマスの半定量分析（銅、ニッケル、コバルト、マンガンなどのベースメタル）；(b) Niton XL5 Plus XRF分析計を使用したサンプルカップ内のMgからUまでの全元素範囲の定量分析

## 結論

リチウムイオン電池をリサイクルするための理想的なプロセスは、低環境影響、高金属回収率、および経済的実行可能性を同時に組み込むものではありません。使用される技術や材料の多様性のため、リチウムイオン電池のリサイクルは複雑な旅であり、複数の可能な経路があります。HHXRFは、リアルタイムでラボ品質のデータを生成することでリサイクル業者を支援し、プロセスを最適化し、迅速な意思決定を可能にして大きな利益をもたらします：

- 鉛やカドミウムなどの有害金属を含む不要な材料がリサイクルワークフローの次のステップに入るのを防げます。
- 材料を正確に分類し、材料の種類に応じた適切な回収プロセスを選択できます（例：LFP対MCM）。
- 入在庫材料の経済的価値をより正確に見積もることができます。

## 参照

1. International Energy Agency, The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, March 2022, [www.iaea.org](http://www.iaea.org).
2. Robert Bird, Zachary J. Baum, Xiang Yu, Jia Ma, The Regulatory Environment for Lithium-Ion Battery Recycling ACS Energy Lett. 2022, 7, 736–740
3. Heiner Heimes et al., Recycling von Lithium-Ionen-Batterien, 2. Edition, Dec 2023, PEM RWTH Aachen University & VDMA, ISBN: 978-3-947920-43-3
4. Julia Harty, Six key trends in the battery recycling market, June 2023, Fastmarkets <https://www.fastmarkets.com/insights/six-key-trends-battery-recycling-market/>

■ 詳細はこちらをご覧ください [thermofisher.com/niton](https://thermofisher.com/niton)

研究用에만使用できます。診断용에는使用いただけません。

© 2024 Thermo Fisher Scientific Inc. All rights reserved.

All trademarks are the property of Thermo Fisher Scientific and its subsidiaries unless otherwise specified.

実際の価格は、弊社販売代理店までお問い合わせください。

価格、製品の仕様、外観、記載内容は予告なしに変更する場合がありますのであらかじめご了承ください。

標準販売条件はこちらをご覧ください。 [thermofisher.com/jp-tc](https://thermofisher.com/jp-tc) **POA504-A24100B**

サーモフィッシャーサイエンティフィック株式会社

お問い合わせはこちら [thermofisher.com/contact](https://thermofisher.com/contact)

thermo scientific