



持続可能なリチウムイオン電池： 投資家向けブリーフィング

MUFG ファースト・センティア
サステナブル投資研究所

レポートを読む 

| 目次

01 | 2分で分かる
本レポートのポイント

02 | 本研究所について

03 | エグゼクティブ
サマリー

04 | はじめに

05 | 電池の役割

06 | リチウムイオン電池の
バリューチェーン

07 | 規制動向

08 | 電池の未来

09 | 投資家への示唆と
取り得る行動

10 | 注記

6.1 重要鉱物の採掘

6.2 精製・加工

6.3 セルおよびパック製造

11 | 略語一覧

12 | 用語一覧

13 | 参考文献

01 | 2分で分かる本レポートのポイント

リチウムイオン電池市場は急速に拡大している。その背景には、**電気自動車(EV)**と**エネルギー貯蔵**の需要の高まりがあり、これらは共に輸送・エネルギーセクターの脱炭素化に不可欠で、化石燃料依存からの脱却に寄与している。

電池のサプライチェーンは、特に原材料採掘、精製・加工、使用済み電池の管理において**サステナビリティリスク**を抱えている。こうしたリスクには、表1a(次ページ)に記載されているような汚染、資源の枯渇、人権問題が含まれる。

業界は**循環経済原則**を採用し、電池のリサイクルおよび二次利用の拡大を促進している。リサイクルは長期的な視点では不可欠になるものとみられるが、2030年代より前に商業規模で本格的に拡大することは難しいとみられる。今後5~10年間では、**電池生産はバージン原料(新たに採掘された一次原料)に大きく依存する状態が続く**ことが予想される。

01

02

03

04

05

06

こうしたセクターの拡大に伴い、**2040年までにリチウムおよびニッケル需要は40倍、コバルトおよび黒鉛(グラファイト)需要は20倍超へと急増**が見込まれており、サプライチェーンの迅速なスケールアップが求められる。

各国政府は**規制を強化**しており、中でも**EUのバッテリー規則とバッテリーパスポート**は、**透明性の高い責任ある調達**に向けた取り組みを主導している。しかし、こうした**取り組みはなお発展途上**であり、現実的な目標、データプライバシーに関する保護措置、規制の標準化に向けた国際協力が求められている。

一部の課題は、既存のサプライチェーンの中に深く根付いている。こうした課題に対応し、サステナビリティと効率性を高めるためには、**直接リチウム抽出(DLE)などのイノベーションや、セル・トゥ・パック(CTP)技術**などのより効率的な製造技術が不可欠になるだろう。

複雑なバリューチェーンにおいて、投資家は以下の行動を取ることができる。

- 企業に対し、より適切なデューデリジェンスの実施やより効果的な報告を促すことで、サステナビリティの配慮事項の情報開示拡充を働きかける
- 企業に対し、バリューチェーンの全段階におけるサステナビリティリスクに取り組むよう促す
- 企業、他の投資家、政府、NGOとの連携を深め、イノベーション、サステナビリティ、知識共有を後押しする

本レポートは投資家向けに、リチウムイオン電池のバリューチェーンにおけるサステナビリティのリスクと機会について包括的に分析したものである。



出所: IEA、Child Labour Platform、ILO、Harvard International Review、S&P Global Market Intelligence、Benchmark Minerals、Nature Reviews Earth & Environment、Reuters、USGS、Centre on Global Energy Policy、Global Battery Alliance、National Minerals Information Center、Global Witness、Financial Times、Bloomberg、Rainforest Rescue、RAID、Amnesty International、Faraday Institution、Geneva Center for Business and Human Rights、Human Rights Watch、WEF、IIEDなど、および PwC Strategy&による分析

i) ここでいうリスクとは、企業価値に対するリスクではなく、組織が社会にもたらす影響を反映したものである。これは、CSRDが実施を義務付けているダブルマテリアリティ評価での「インサイドアウト」の視点である。この視点では、企業の活動がサステナビリティ要素に与える影響を評価する。これとは反対に「アウトサイドイン」の視点では、外部のサステナビリティ要素が企業の財務業績に与える影響を評価する。

| 本研究所の支援企業について



ファースト・センティア・インベスターズグループについて

ファースト・センティア・インベスターズグループ(旧ファーストステート・インベストメンツ)は、クオリティの高い長期的な運用戦略をお客さまに提供する、グローバルな資産運用グループである。当グループは責任投資とスチュワードシップの原則に対するコミットメントを共有する、複数の独立したアクティブ運用スペシャリストチームを擁している。これらの原則は、経営全般と企業文化に不可欠なものである。また、自社ブランドおよび個別サブブランドの運用チームの区別なく、全ての運用チームは投資の自主性を確保し、各自の運用哲学を実践している。以下サイトの内容は香港証券先物委員会(SFC)の審査を受けたものではない。

<https://www.firstsentierinvestors.com>

MUFGについて

三菱UFJフィナンシャル・グループ(MUFG)は、世界有数の金融グループである。東京に本社を置くMUFGは、360年以上の歴史を誇り、世界40カ国以上に約2,000拠点というグローバルなネットワークを有している。グループ全体の従業員数は約14万人にのぼり、銀行、信託、証券、クレジットカード、コンシューマーファイナンス、資産運用、リースなどのサービスを提供している。傘下の事業会社間の緊密な連携によって「世界で最も信頼される金融グループになる」こと、顧客のあらゆる金融ニーズに柔軟に対応することを目指し、社会に貢献するとともに、より良い世界に向けたサステナブルな成長の共有を促進している。MUFGは、東京証券取引所、名古屋証券取引所、ニューヨーク証券取引所に上場している。

<https://www.mufig.jp/english>

三菱UFJ信託銀行について

三菱UFJ信託銀行は、MUFGの中核企業として、大手信託銀行ならではの専門性の高い機能を活かし、お客さまに総合的な金融ソリューションを幅広く提供している。そうしたソリューションには、銀行業務に加えて、不動産、証券代行、資産運用・投資家サービス、相続関連サービスなどがあげられる。「Trust(信頼・信託)」を通じ、「安心・豊かな社会」「お客さまとともにある未来」を創造できる信託銀行でありたい、というビジョンの実現を目指し、「Create a Better Tomorrow」をキーコンセプトとして掲げている。

<https://www.tr.mufig.jp/english>

02 | 本研究所について

MUFG ファースト・センティアサステナブル投資研究所(以下研究所)は、サステナブル投資を推進するテーマに焦点を当てたリサーチ情報の提供を目指している。研究所における調査・研究は、三菱 UFJ フィナンシャル・グループ(以下 MUFG)の連結子会社である三菱 UFJ 信託銀行とファースト・センティア・インベスターズグループが協働で支援している。MUFG とファースト・センティア・インベスターズグループはともに、投資家としての社会的責任を共有しており、投資判断を行うにあたっては現在および将来のコミュニティに配慮する義務を負っている。

そうした考えから、研究所ではサステナビリティの問題に関する調査を外部機関に委託し、特定のテーマをさまざまな視点から掘り下げて考察している。今や、投資家はサステナビリティやサステナブル投資を巡る問題について、これまで以上に掘り下げ、焦点を絞って熟考するようになってきている。これらの問題は往々にして複雑であり、原因を解明するには詳細な分析が必要となる。投資家として問題の原因をより深く理解できれば、より適切に投資判断の検討を行い、自らの影響力を用いてサステナビリティの向上に資するポジティブな変化を促すことができるだろう。

研究所における調査・研究は、MUFG の連結子会社である三菱 UFJ 信託銀行とファースト・センティア・インベスターズグループが協働で支援しており、両機関の代表者が、研究所の活動に情報を提供する。

また、研究所には、サステナビリティおよびサステナブル投資に関連する研究について助言を行うアカデミック・アドバイザリー・ボードが設置されている。アカデミック・アドバイザリー・ボードは、責任投資、気候科学、関連するサステナビリティの各分野における学術界、産業界、非政府組織の第一人者で構成されており、独立した監督機関として、研究所の調査・研究成果が学術的厳密性において最高水準を満たしていることを確認している。

ご連絡先

Institute@Firstsentier.com

www.firstsentier-mufg-sustainability.com

www.mufg-firstsentier-sustainability.jp

謝辞

本レポートの執筆における PwC Strategy& の Matt Alabaster 氏、Alastair Scott 氏、Avinash Rao 氏、James Fulker 氏、Luke Thomson 氏、Harry Spirit 氏、Ellen Huang 氏、Mathieu Lefeuvre 氏に謝意を表す。

本稿の作成にあたっては、リサーチパートナーとして PwC Strategy& の協力を受けた。

PwC は世界149カ国に370,000人以上のスタッフを擁し、世界最大規模のプロフェッショナルサービスを提供している。また、同社は高品質な監査、税務、アドバイザリーサービスの提供を通じて、組織および個人が求めている価値を創出できるよう支援している。

Strategy& は、PwC のプロフェッショナルサービス・ネットワークに属する、グローバルな戦略コンサルティング会社である。世界各国に75以上の拠点を構え、3,000人以上のコンサルタントを擁している。Strategy& は、PwC 全体の幅広い専門知識および国際的なネットワークの恩恵を受けている。

03 | エグゼクティブ サマリー

リチウムイオン電池はエネルギー転換において重要な役割を担っており、電気自動車を動かし、再生可能エネルギー発電を支える役割に加え、家電や医療機器にも幅広く使用されている。これらの用途分野の拡大に伴い、リチウムイオン電池の世界的需要も急増する見込みである。一方で、電池のサプライチェーンにはサステナビリティ課題があり、責任ある対応が求められている。投資家はこうしたリスクを理解し、軽減策を検討しなくてはならない。

リチウムイオン(Li-ion)電池は、化石燃料から再生可能エネルギーへの移行を進める上で不可欠である。世界の温室効果ガス(GHG)排出量の60%を占める輸送および電力セクターにおけるエネルギー転換を支える基盤技術となるためである。¹ 一般的に電気自動車(EV)は、ライフサイクルを通じてみると従来の内燃機関自動車よりGHG排出量が少ない。² また、定置型エネルギー貯蔵システムでは、リチウムイオン電池が風力や太陽光など出力が変動しやすい再生可能エネルギー源の変動を吸収し、送配電システムを安定化できる。リチウム電池の活用がエネルギーの需給調整を可能にし、再生可能エネルギーの送配電システムへの統合を促し、化石燃料依存からの脱却を後押しする。

リチウムイオン電池の主流は、リン酸鉄リチウム(LFP)系と、高ニッケル系(リチウム・ニッケル・マンガン・コバルト酸化物(NMC)系など)である。現在、EVの半分以上に搭載されている高ニッケル系電

池は、高いエネルギー密度、軽量性、急速充電への対応能力で人気を集めている。² 一方、2024年に市場シェア40%を獲得したLFP電池は、低コスト、高い安全性、長寿命が評価され、市場での選好が一段と高まっている。² 電池の重量や大きさがあまり重視されない定置型エネルギー貯蔵システムでは、NMC電池よりLFP電池が好まれており、2023年の新規導入設備の80%でLFP電池が採用された。¹ LFP電池の採用拡大は、サプライチェーンで人権侵害がたびたび指摘されるコバルトへの依存軽減にもつながる。³

電池需要は、主にEVの販売拡大およびエネルギー貯蔵システムの普及を背景に急増している。国際エネルギー機関(IEA)の見通しによると、2030年までに世界のEV販売台数は3~5倍増加し、蓄電池導入容量は9~14倍増加する。² こうした需要を満たすには、リチウム、コバルト、ニッケル、黒鉛の採掘活動を大きく増強する必要がある。2023年、リチウムとニッケルの電池向け需要は30%急増し、コバルト需要は15%増加した。² 2040年までにリチウムとニッケルの消費量は40倍以上に膨れ上がり、コバルトと黒鉛も20倍超拡大するとみられている。² 足元では、規制変化や価格面の課題などの逆風がみられるものの、EVの普及が長期的な成長トレンドにあることに変わりはない。自動車メーカーはこうしたトレンドを見据えて、より低価格帯の新モデルを市場に投入し、生産能力を拡大している。

電池バリューチェーンの各段階、とりわけ鉱物採掘段階は、サステナビリティ課題を引き起こす。世界の重要鉱物の産出地域は、政治的安定性やサステナビリティに関する規制の水準が大きく異なっていることが多い。採掘に関する規制が不十分であれば、森林破壊、土壌浸食、土壌および水路の汚染につながり、すでに逼迫している水資源の状況をさらに悪化させる。こうした状況は南米で確認されており、リチウム採掘によって地下の貯水機能が損なわれ、地域コミュニティは水不足に直面した。⁴



精製と製造も、廃棄物処理および炭素排出の点で大きな課題がある。これらのプロセスはどちらもエネルギー集約的であり、炭素排出量の多い電力供給網に依存していることが多い。特に中国とインドネシアは主要なエネルギー源が石炭であり、課題が深刻である。さらに、精製段階では副産物として二酸化硫黄や酸性廃棄物が発生することがあるため、管理がずさんであれば人の健康および環境に悪影響が及ぶ。

現代奴隷制および児童労働などの社会的リスクは、電池バリューチェーン全体で広く見られ、とりわけ規制監督の弱い地域で顕著である。採掘では、有毒な粉塵の吸入、陥落事故、保護具の不備などの危険な労働環境が労働者の深刻な健康リスクとなっている。中でも状況が深刻なのがコンゴ民主共和国(DRC)であり、零細・小規模採掘(ASM)における人権侵害や労働搾取の報告が相次いでいる。³ DRCで現代奴隷制の犠牲になっている人数は40万人以上に上る。⁵ 採掘だけでなく、精製と製造にも危険がある。労働者は有害な化学物質にさらされる場合があり、安全対策の不備が死亡事故につながっている。規制環境が整った地域でも、露天掘りにより地域住民が強制移住を余儀なくされたり、地域の生態系が損なわれたりすることがある。

本レポートでは以上のようなリスクを分析し、表1bにまとめた。LFPとNCMの両系統のリチウムイオン電池について、バリューチェーンを通じた各影響領域における高い発生可能性と影響度を明らかにしている。

表1b:電池バリューチェーンの各段階におけるサステナビリティリスクの概要⁶

			原材料採掘				材料の精製・加工		セルおよびバック製造		電池の設置		使用済み電池の管理	
			リチウム、ニッケル、コバルト、黒鉛などの主要鉱物の採掘				熱処理および化学処理による 原材料の精製		正極、負極、セパレータ、 電解液を用いたセルの組み立て		EVなどの製品への 電池パックの設置		使用済み電池の再利用、 リサイクル、または処分	
			リチウム	ニッケル	コバルト	黒鉛								
環境的リスク														
大気	GHG排出		H	H	H	H		H		H		M		H
	大気汚染		M	M	H	H		H		M		L		H
水	水質汚染		H	H	H	H		H		M		L		H
	取水		H	H	H	M		M		L		L		M
土壌	土壌汚染		M	H	H	H		H		L		L		H
	土地劣化		H	H	H	H		M		L		N		H
生物多様性	生物多様性の減少		H	H	H	H		M		L		N		M
	森林破壊		M	H	H	M		N		N		N		N
資源の枯渇	資源の枯渇		M	M	H	M		L		L		L		L
有害物質	放射性物質		L	L	L	L		N		N		N		N
社会的リスク														
公平な労働条件	児童労働または強制労働		L	H	H	H		M		L		N		H
	公平な賃金と労働条件		M	M	H	M		M		M		L		H
	労働者の健康と安全		M	M	H	H		H		H		L		H
地域社会	地域コミュニティの権利の保護		H	H	H	H		L		L		L		L
リスクがもっとも高い														
凡例： H 高い M 中程度 L 低い N 文献上の証拠が不十分														

出所:IEA、Child Labour Platform、ILO、Harvard International Review、S&P Global Market Intelligence、Benchmark Minerals、Nature Reviews Earth & Environment、Reuters、USGS、Centre on Global Energy Policy、Global Battery Alliance、National Minerals Information Center、Global Witness、Financial Times、Bloomberg、Rainforest Rescue、RAID、Amnesty International、Faraday Institution、Geneva Center for Business and Human Rights、Human Rights Watch、WEF、IIEDなど、およびPwC Strategy&による分析

各国政府はこうしたリスクへの認識を高めつつあり、EUは規制対応を主導している。EUは2023年に導入したバッテリー規則など、さまざまな対策を通じて責任ある調達を促している。同規則は性能、耐久性、リサイクルに関する基準を定めるもので、相手先ブランド名で販売される製品を販売するメーカー（OEM）にEUの幅広いサステナビリティおよび環境基準に沿ったデューデリジェンス義務を課している。⁶ また、EUバッテリーパスポート導入に向けた土台にもなった。バッテリーパスポートとは電池の性能、管理、サステナビリティに関する包括的な情報を収載するデジタル記録である。²

しかし、この種の規制導入には課題が伴う。例えば、バッテリーパスポートは、膨大なデータの収集および検証が必要であり、標準化、コンプライアンスの負担、データプライバシーに関する懸念が持ち上がっている。さらに、法域を超えて規制の足並みを揃えることも容易ではなく、規制の一貫性と実効性を確保するには一層の国際協力が必要である。

米国、日本、オーストラリアなどもサステナビリティ、地政学的、経済的要因を背景に同様の規制措置の導入を検討している。現在、バリューチェーンは中国に大きく集中しているため、EUや米国、さらに日本やオーストラリアを含むアジア太平洋の国・地域は、国内生産を強化するための政策準備を進めている。⁷ こうした規制措置は、サプライチェーンのレジリエンスを強化し、地域経済の便益をもたらすことを目的としている。そのために、国内生産に対する財政的インセンティブ、責任ある原料調達、イノベーションを活用するほか、消費者需要を喚起する税額控除も併せて実施する。

技術の進歩は、サステナビリティを高めながら、商機への扉を開いている。企業は電動式の設備・機器や再生可能エネルギーを導入し、GHG排出量の削減および大気汚染の抑制に務めている。代替的な採掘手法の検討も進め、資源回収率の向上、エネルギー消費量の低減、土地劣化の防止を目指している。また、精製・加工および製造施設を需要地に近づけるローカライズにより、サプライチェーンを一層短縮し、流通過程に伴うGHG排出量を削減している。これと並行して、リチウム硫黄電池、固体電池、ナトリウムイオン電池など代替電池の研究も進んでいる。リチウムイオン電池と比べると商業展開は始まったばかりだが、こうしたイノベーションは長寿命および高いエネルギー密度を実現し、稀少物質への依存を軽減すると期待されている。

電池バリューチェーンでは、必要とされる原材料量を削減し、廃棄物を最小化し、製品寿命を延ばすために循環経済の原則が採用されつつある。資源の循環利用は、製品のライフサイクルを伸ばすことで負の影響を緩和し、ガバナンスや規制の弱い国々への依存を低減する。また、規模の経済が働けば新たな資源を使うよりもコスト面で有利になる可能性がある。使用済み段階の域内化（ニアショアリング）により、輸送に伴うGHG排出量を低減し、コストを削減し、リサイクル効率を向上させることができるため、こうしたメリットを一層高めることができる。その結果、地域経済の強化、ならびにサプライチェーンのレジリエンス強化につながる。

EVの普及が進めば、使用済み電池の量も増える。埋め立て処分は、安全性、環境面、（規制の厳しい国では）規制面の懸念から現実的ではないため、電池は回収して、有害物質の処理施設に運ぶ必要がある。ⁱⁱ 各国政府も資源循環の推進策を導入している。EUは、リサイクル材の使用割合および使用済み材料の回収率について2030年を目標とする野心的な数値を設定しⁱⁱⁱ、同時に拡大生産者責任要件を導入した。⁶ こうした取り組みは世界の電池リサイクル市場の成長を後押ししており、2030年までに市場は5倍に拡大するとみられる。リサイクル処理能力の70%は中国に集中しており、米国とEUがそれぞれ10%となっている。⁸

リサイクルだけでなく、電池を二次利用する用途転換（リパーパス）にも注目が集まっている。例えばEVの電池は、エネルギー密度が低くても支障がないバッテリーエネルギー貯蔵システム（BESS）で二次利用できる。使用済み電池の増加に伴い、2030年代には二次利用の普及が進むとみられている。しかし、実用性や安全性に関する基準を確実に満たすよう改善が必要である。また、電池パックの設計段階から循環性を組み込むことで、循環経済の実現に寄与すると期待されている。

ii 該当するのは厳格な環境規制およびガバナンスを有する国。環境規制の弱い国は今も埋め立て処理に依存している可能性がある。

iii 市場に投入される新たな電池は、リサイクル材の使用割合基準を満たすよう義務付けられる。2030年以降、リサイクル材の使用割合基準は、コバルト12%以上、リチウム4%以上、ニッケル4%以上、鉛85%以上となる。この基準は2035年までに、コバルト20%、リチウム10%、ニッケル12%に引き上げられる。鉛は引き続き85%。

複雑なバリューチェーンにおいて、投資家は以下の行動を取ることができる。

01

倫理および環境面を含むサステナビリティの配慮事項に関する企業開示の一層の拡充を企業に対して働きかける。

- **デューデリジェンス慣行の強化**
 - 原材料の調達場所
 - 包括的なライフサイクルアセスメント(LCA)
 - 標準化されたツールおよびフレームワーク
 - 第三者の監査
- **効果的な報告の推奨**
 - 透明性の高いプロセスおよびプラットフォーム
 - EUバッテリーパスポートなどの報告制度

02

バリューチェーンの全段階におけるサステナビリティリスクに取り組むよう企業に促す。

- **原材料採掘**
 - 倫理的な調達に向けた採掘慣行の監視強化
- **サプライチェーン**
 - サプライチェーン全般における透明性およびトレーサビリティの改善
- **製造**
 - より厳格なサステナビリティ基準の採用による排出量および廃棄物の削減
- **ライフサイクル終了時**
 - リサイクルおよび再利用の優先による循環経済原則の支援

03

企業、他の投資家、政府、NGOとの連携を深め、イノベーション、サステナビリティ、知識共有を推進する。

- **企業間のパートナーシップ**
 - 自動車メーカーとテクノロジー企業のパートナーシップによる、電池のクローズドループ型リサイクル計画の拡大
- **官民の連携**
 - EUバッテリーパスポート導入に向けた報告基準および報告体制
- **マルチステークホルダーによる取り組み**
 - グローバル・バッテリー・アライアンス(GBA):世界経済フォーラム(WEF)が設立。企業、政府、NGO、学術機関を結集し、持続可能なバッテリー生産を推進

04 | はじめに

本レポートは、電池のバリューチェーンにおけるサステナビリティのリスクと機会について投資家に説明する目的で作成したものである。本レポートは、サステナブル投資を推進するテーマについて調査・分析を提供するという本研究所の幅広いミッションの一環として位置づけられるものである。投資業界が建設的な役割を果たす上で対応すべき市場動向や慣行の検討なども含まれている。

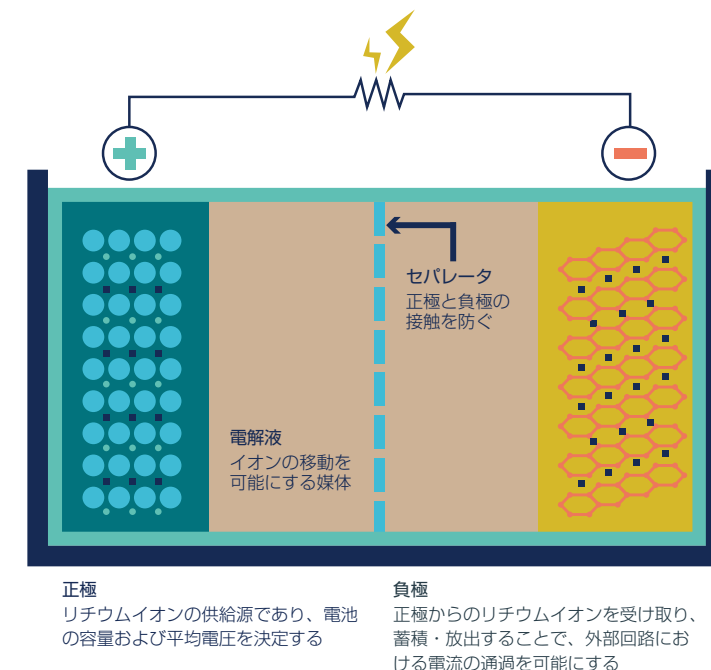
本レポートの主な3つの目的：

- リチウムイオン電池のバリューチェーンにおける現在の技術、電池の化学組成、主要なステークホルダーについての概要を示す。
- 電池バリューチェーンに存在するサステナビリティ上の影響およびリスクに対する、投資家の問題意識を高める。
- 電池バリューチェーンにおけるサステナビリティの向上に投資家がどのように貢献できるかについての指針を提供する。

研究所は、投資家が投資戦略および意思決定プロセスに電池関連のリスクおよび機会を反映できるよう本リサーチを行った。このテーマをめぐる投資家間の協調的エンゲージメントを促進することも目的としている。本リサーチは、リチウムイオン電池を主題としており、エネルギー転換が牽引する成長領域の対象外である鉛酸蓄電池のような旧式技術は除外する。また、チタン酸リチウム系や、バナジウムレドックスフロー電池のような長時間蓄電ソリューションも対象外とした。

電池とは、電気を受け取り、蓄え、放出する装置を指す。電池はエネルギーを化学エネルギーとして蓄え、必要に応じて放出する。100年以上にわたり、家電製品から輸送や電力セクターまで幅広い用途で欠かせない存在として貢献してきた。電池はエネルギーを持ち運び可能かつ安定に供給できることから、現代テクノロジーと日常生活の双方で不可欠な存在となっている。

図1: 電池は負極(アノード)、正極(カソード)、電解液の3つの要素で構成されており、電解液が2つの電極間のイオンの流れを可能にすることで電気エネルギーが生まれる。通常はセパレータと電池ケースもここに加わる。



出所: Green Finance Institute (2024) GFI Battery Handbook

05 | 電池の役割

電池は世界のエネルギーシステムに欠かせない存在であり、最も成長の速いエネルギー技術の1つである。2019年以降、電池の導入量は毎年ほぼ2倍ずつ増加している。^{iv} 特にユーティリティスケールの蓄電プロジェクト、需要家側に設置される蓄電池^v、ミニグリッド、家庭用太陽光発電システムの成長が際立っており、世界全体で85GWの蓄電容量が追加された。¹ EV用電池需要も、1,600万台の新規EV販売を背景に45%と急増しており、エネルギーセクターで使用されている電池の大半を占めている。² リチウムイオン電池は、個人向け電子機器で広く使われているものの、現在は年間需要の90%以上をグリッド向け蓄電およびeモビリティ用途が占めており、2016年の50%から大幅に上昇している。¹

COP29の目標を達成するには、2030年までに電池の導入量を7倍に増やさなくてはならない。^{vi} 電池は化石燃料からの脱却のカギを握っており、電化に加え、太陽光や風力などの再生可能エネルギーの利用拡大を後押しする。IEAは、2030年までに世界のEV販売は3～5倍増加し、石油需要を1日当たり800万バレル分削減すると予想している。^{1,2} これは、現在の世界的な石油消費量のおよそ8%に相当する。2030年までに再生可能エネルギーの発電容量を3倍にするには、エネルギー貯蔵容量を6倍増やす必要があり、電池による蓄電はこの増加分の90%をまかなうとみられる。¹ そのためには、2030年まで電池導入量を毎年25%ずつ増やす必要がある。

^{iv} 2019年から2023年にかけて世界の電池の蓄電容量は、年平均約91.28%増加している。
(出所:IEA、PwC Strategy&による分析)

図2:エネルギーシステムにおける電池の役割



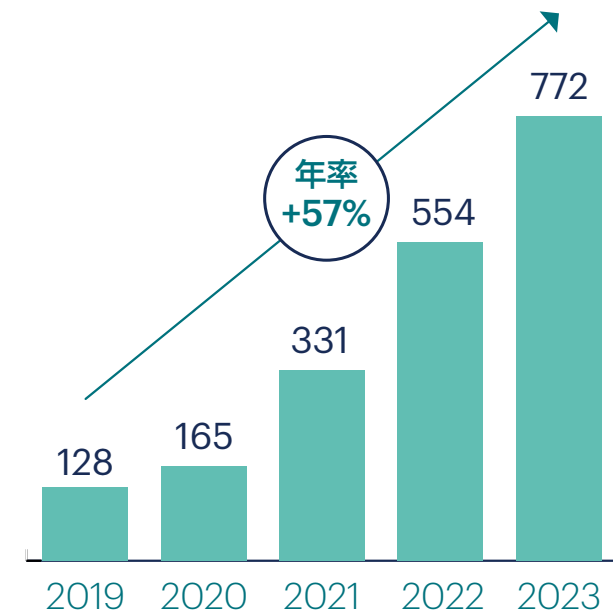
出所:PwC Strategy&による分析

^v 需要家側に設置 (Behind-the-meter:BTM) される蓄電池とは、電力メーターの消費者側に設置される、電気を生成し、蓄え、管理するシステムを指し、これにより消費者は送配電システムに依存せず電気を生成、蓄電、制御できる。

^{vi} COPとは締約国会議を意味しており、国連気候変動枠組み条約(UNFCCC)の気候に関する国際会議を指すことが多い。パクーで開催されたCOP29では、2030年までに再生可能エネルギーを3倍増加させるというCOP28の目標を後押しするために世界エネルギー貯蔵・送配電システム誓約が立ち上げられた。(出所:COP29世界エネルギー貯蔵・送配電システム誓約)

EV販売に牽引され、電池需要は増加し続けている。2023年のEV用電池需要は750GWhを超え、前年比40%増となった。増加ペースは2021～2022年に比べやや鈍化したものの、依然として高い伸びを示している。² EVは電池需要の95%を占め、2024年に販売台数が1,700万台に達すると、世界で販売される新車の5台に1台以上がEVという計算になる。²

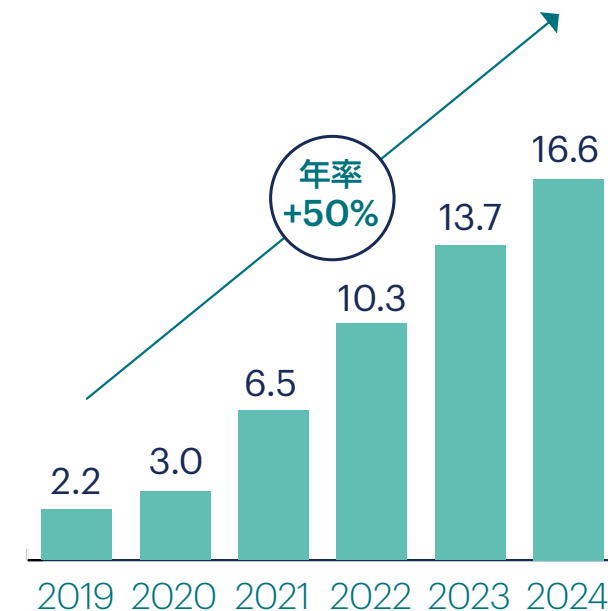
図3: 世界のEV電池需要の推移
単位: GWh、2019年～2023年



出所: IEA

EVに対する補助金や税制優遇がない地域では初期費用の高さがネックとなり、EVの普及状況には地域差がみられる。しかし、低い利益率、変動しやすい電池用金属価格、高いインフレ率、一部地域での購入補助制度の縮小などの懸念材料にもかかわらず、世界の販売実績は堅調さを失っていない。^{vii}

図4: 世界のEV販売の推移
単位: 100万台、2019年～2024年

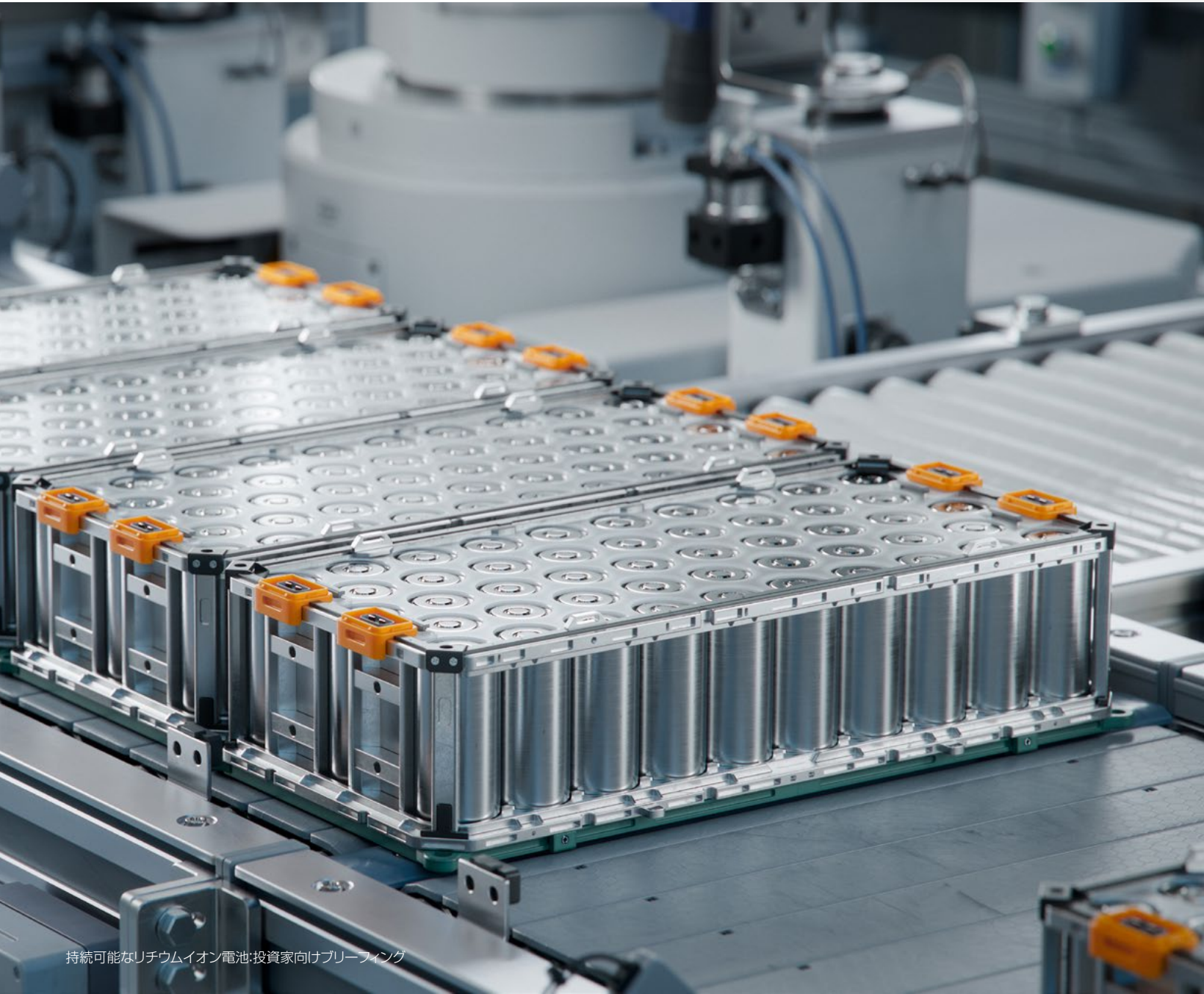


出所: IEA

vii 2024年12月、EV販売は前年同月比でおよそ25%増加した。(出所: [Rho Motion](#), [Reuters](#), 2025年2月に参照)

政策支援がEVへの業界投資を後押ししている。

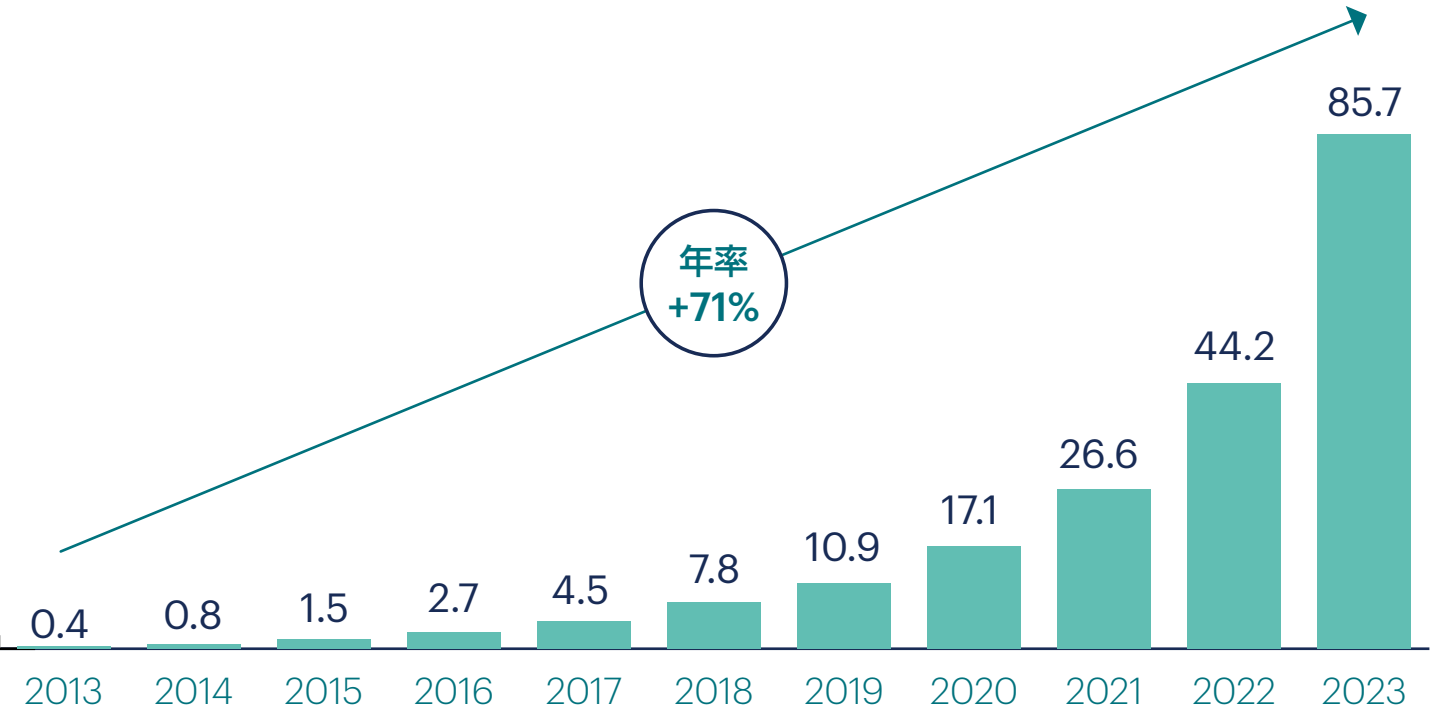
2024年のEVの市場シェアは、中国が約45%、欧州が25%、米国が11%強だった。現行の政策に基づいたIEAの予測では、2035年には販売される自動車の2台に1台がEVになる。² 最近の政策はこのペースをさらに加速させている。例えば、カナダ、EU、米国で新たに導入された排ガス規制のほか、EUのネットゼロ産業法や中国の第14次5カ年計画などの産業振興策は、EVサプライチェーンの発展と雇用創出を促進している。こうした成長見通しを受け、EVおよび電池製造への大規模投資が相次いでおり、2023年の投資額は5,000億ドル近くに到達した。² 一方で、業界の成長に伴い政府の優先順位、規制、財政支援が変化中、追い風と向かい風の両方に直面することになるだろう。政策転換、補助金の変更、景気低迷が先行きを不透明にし、投資サイクルや成長軌道に影響を落とす可能性がある。



EVへのシフトが従来の自動車業界を一変させつつあり、いくつかの大手自動車メーカーは目標達成に向け増産に乗り出している。2023年に世界の販売シェアの9割超を占めていた主要自動車メーカー20社以上が電動化目標を設定しており、これらの目標を合計すると2030年の電気自動車販売台数は4,000万台を超える見込みだ。² こうしたEVシフトに合わせ、製造工程、サプライチェーン、労働力のスキルの変革が必要となる。さらに、電池のリサイクルと持続可能な原材料調達への関心も一段と高まっている。サステナビリティを求める声が高まる中、OEMは電池バリューチェーン全体のサステナビリティリスクを管理して、ブランドの訴求力を維持しなくてはならない。従来は互いに独立していた業界同士が、近年は連携を深めている。自動車メーカーは電池メーカーと合併事業を立ち上げ、鉱山会社とはオフテイク契約を確保している。こうした動きが、垂直統合と業界横断の協業に対する革新的アプローチを促している。

コストの低下に伴い、電池は蓄電手段として、さらに柔軟なエネルギー利用を可能とするコスト面で優れた選択肢となっており、太陽光や風力のような出力が断続的な再生可能エネルギー源の統合を後押ししている。太陽光および風力などの再生可能エネルギーの均等化発電原価(LCOE)は一般的に従来のエネルギー源よりも低く、電池エネルギー貯蔵システム(BESS)を導入すれば供給の変動を緩和し、再生可能エネルギーの実用性を高めることができる。安定した電力供給を支えるためには、電力の需要と供給のバランスを常に維持する必要がある。そのため、出力が断続的な再生可能エネルギー源の導入には、システムの安定性の維持とバックアップ支援に資する系統規模の蓄電ソリューションが必要になる。リチウムイオン電池は、技術的成熟度とコスト面の優位性から短時間蓄電で主流の選択肢となっているが、熱電池や圧縮空気エネルギー貯蔵(CAES)といった長時間蓄電の選択肢についても検討が進められている。

図5:世界のBESS容量の推移
単位:GW、2013年~2023年



出所:IEA

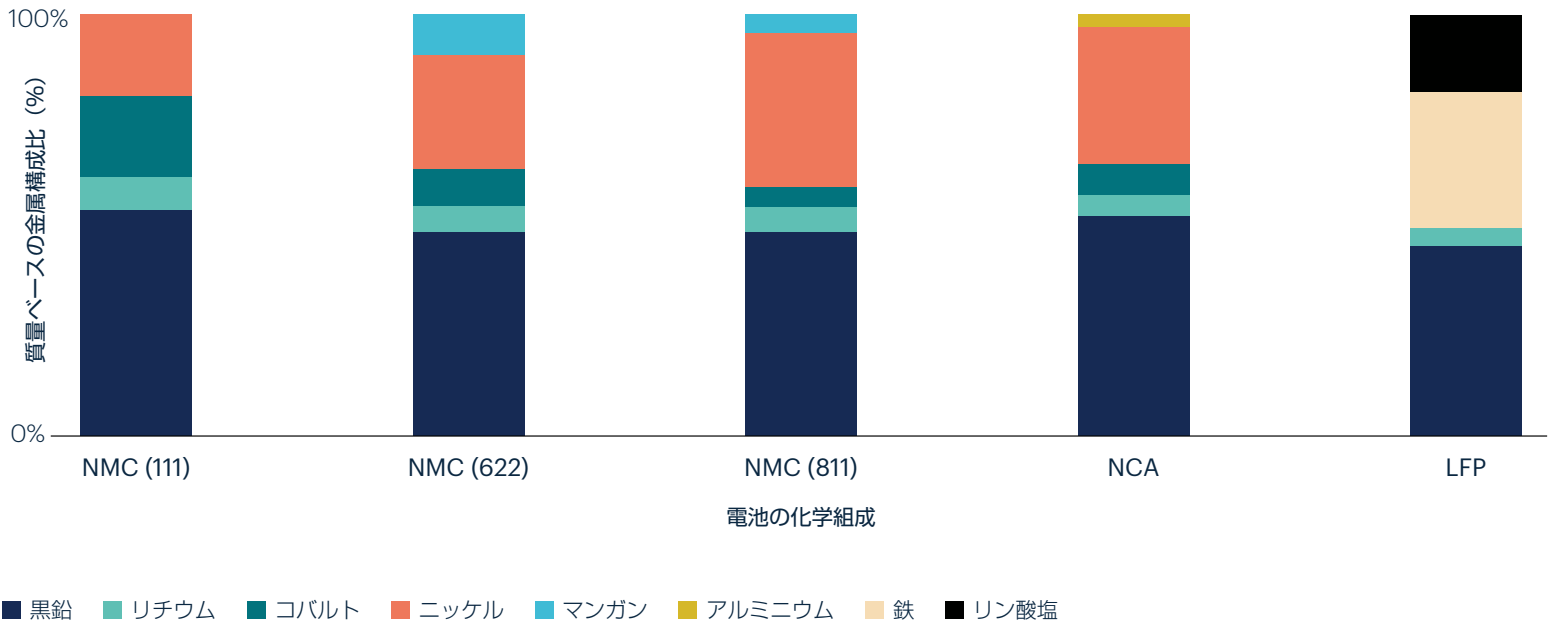
この10年間で、世界の電池の蓄電容量は飛躍的に増加した。2013年にはほんの1GWだった導入済み BESS 容量は、2023年には85GWを上回るまでに増加し、¹ 今や世界のリチウムイオン電池需要の約15%を占めている。¹⁰ 2023年単年でも BESS 容量の増加量は40GWを超えており、前年から2倍以上の増加ペースとなっている。成長を大きく牽引したのは、中国、米国、EUであり、中国がBESS 導入容量をリードしている。中国では2023年に23GWの蓄電容量が追加され、その3分の2はユーティリティスケール(大規模)であり、太陽光発電と蓄電設備の併設を義務付ける政策がこの増加を後押しした。米国は世界第2位の BESS 市場であり、2023年に追加された容量のうち約9割を電力系統接続型(ユーティリティスケール)のプロジェクトが占めた。

産業、商用、住宅セクターでは、BTM 型(需要家側に設置される)リチウムイオン電池の導入が急速に広がっている。成長の推進力となっているのは、オンサイトの太陽光発電をはじめとする分散型発電の普及であり、これにより送配電系統への依存が軽減している。電池は、山火事に見舞われた際のカリフォルニア州など、安定した電力供給が見込めない地域では極めて重要なバックアップ電源となる。冷暖房や車両の充電用などを中心に電化需要が増加する中、電池の活用は柔軟な電力消費およびコスト管理を可能にする。2023年にEUで追加された蓄電容量6GWのうちBTM 型蓄電池向けが90%近くを占めた。蓄電容量拡大の大半を担ったのは、小売電力需要とエネルギー価格の高騰に直面するドイツとイタリアであり、屋上太陽光発電システムと蓄電設備の併設を促す税制優遇措置や低金利ローンなどの支援策が寄与した。BTM 型蓄電市場は、2023年から2032年にかけて年平均23.9%で成長する見込みである。¹⁰

電池の化学組成は、性能、寿命、コストのバランスを考慮して選択され、ターゲットとする市場および用途によって決まる。

リチウムイオン電池では、負極(負極)には一般に黒鉛(グラファイト)が用いられる一方、正極(正極材)は多様で、電池特性に大きな影響を与える。電池の化学組成は、OEMやセルメーカーがさまざまな組み合わせを試す中で、継続的に進化している。ある化学組成は高いエネルギー密度によってEVの航続距離を伸ばし、携帯電子機器の電池パックの小型化に寄与する一方、別の化学組成は、安全性や寿命に優れる。こうした継続的なイノベーションは、サプライチェーンにおける原材料の入手可能性とコスト管理の必要性とのバランスの上に成り立っている。

図6:一般的なリチウムイオン電池の原材料構成



出所:Green Finance Institute (2024) GFI Battery Handbook

高ニッケル系およびLFP系の電池は最も普及率が高く、市場を牽引している。ニッケル・マンガン・コバルト酸化物(NMC)などの高ニッケル系電池は、EVにとって理想的な高いエネルギー密度と高速充電性能を備えているため、採用が進んでいる。一方で、LFP電池は優れたコスト効率と安全性が特徴であり、中国を中心に採用が急増しており、系統用蓄電やバックアップ電源システムに使用されている。NMC電池は、LFP電池と比べて特定のBESS用途に不向きとされる場合がある。表2で、各電池の主な特徴について説明している。

表2: 主要な正極材のコストと性能(2024年)

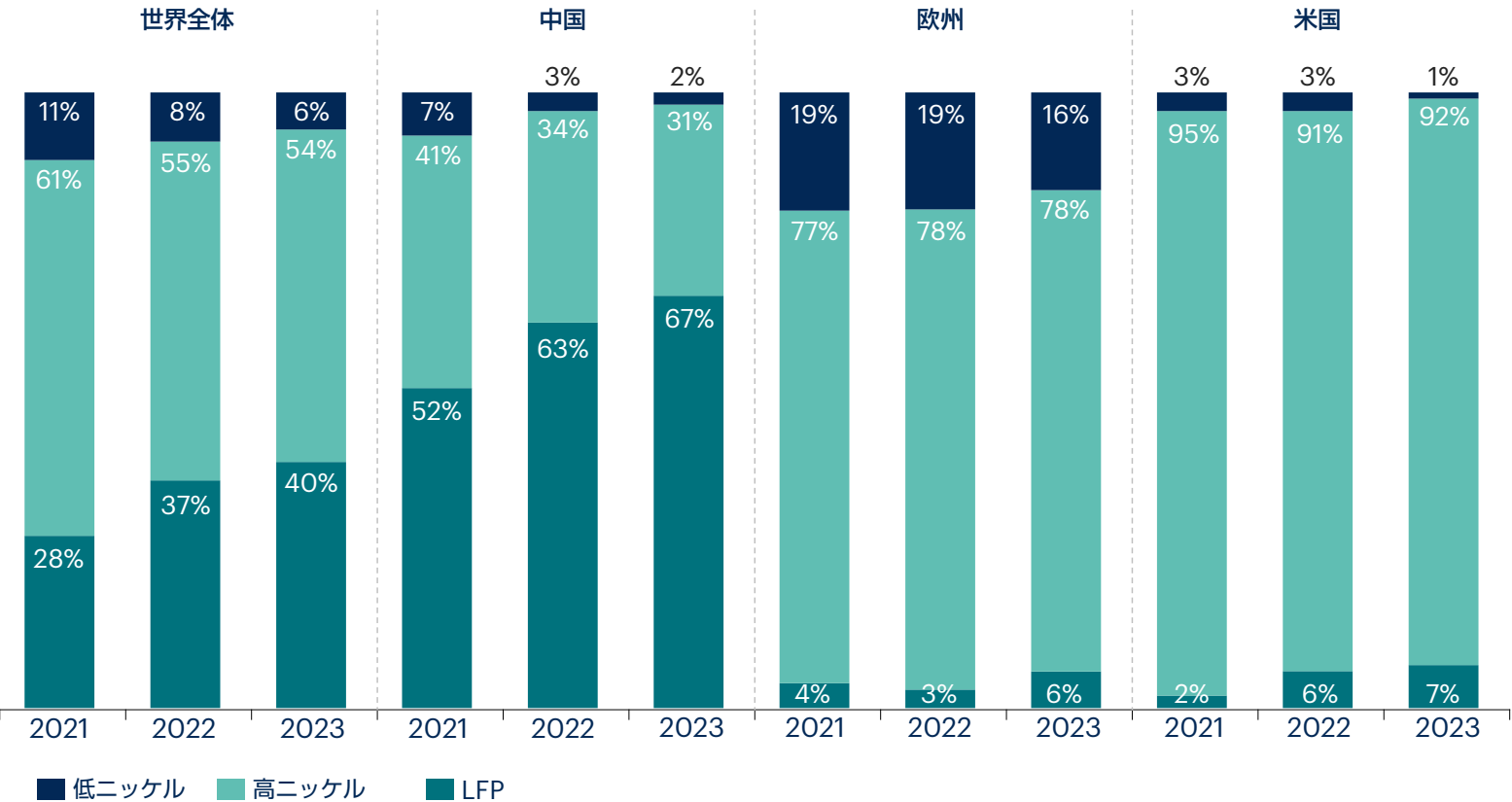
正極材の種類	主要材料	エネルギー密度 ¹	出力密度 ²	寿命	コスト	熱安定性 ³
リン酸鉄リチウム (LFP)	リチウム、鉄、リン酸塩	90 ~160Wh/kg	約2,000 ~4,500W/kg	2,500+サイクル	約70 ~100ドル/kWh	約270°C
リチウム・ニッケル・マンガン・コバルト酸化物 (NMC)	リチウム、ニッケル、マンガン、コバルト	150 ~220Wh/kg	約1,500 ~3,000W/kg	1,000 ~2,000サイクル	約100 ~130ドル/kWh	約210°C

注記: 1) 電池が質量あたりで蓄えられるエネルギーの量を指す(Wh/kg)。重量エネルギー密度とも呼ばれる。
2) 電池が供給できるエネルギーの速度。出力密度の高い電池は、EVの加速など、瞬間的な高出力が求められる用途に適している。
3) 電池が熱暴走し大量の熱を放出し始める温度。

出所: LG Energy Solution RESU Blog, CleanTechnica, PowerTechSystems, Battery University, PNNL, UFine Batter

電池業界ではLFP電池が脚光を浴びている。2023年、LFP電池は容量ベースで世界のEV需要の40%を占め、2020年から市場シェアは2倍以上増加した。² LFPの生産および採用は主に中国に集中しており、2023年に中国で販売されたEVの3分の2にLFP電池が搭載されていた。² その一方、欧州と米国ではEV販売のうちLFP電池の搭載は10%未満だった。欧米市場では、EVのエネルギー密度の最大化と高速充電性能が重視されるため、引き続き高ニッケル系電池が主流となっている。従来、中国は有利な条件で知的財産契約を締結していた影響で、LFP電池の大規模生産を独占していた。しかし、LFP電池のコア特許が2022年に切れたことをきっかけに、世界最大のリン資源を有し、欧州と自由貿易協定を結んでいるモロッコへの投資が活発化した。² 対モロッコの投資金額は計153億ドルに上り、GotionやLGなどの大手電池メーカーも投資に乗り出している。² フォルクスワーゲン、ダイムラー、テスラなどのOEMもLFP電池に注目し始めている。

図7:地域別EV販売における各電池の市場シェアの推移、2021年～2023年



出所:IEA

図8:リチウムイオン電池のバリューチェーン



世界の電池バリューチェーンは、他の製造業のバリューチェーンと同様に重大なサステナビリティリスクに直面しており、これらのリスクは今日までの急激な拡大と今後予想される成長によって悪化している。詳細な文献調査を通じて、バリューチェーンの各段階が抱えている鉱物別のサステナビリティ課題の事例を特定した。電池がメリットをもたらすことは明らかだが、サステナビリティへの影響を考慮しながら責任ある形でバリューチェーンを拡大することが重要である。投資家はこうしたリスクを認識し、投資先企業がリスクに的確に対応できるよう支援することが望ましい。

特に、電池に欠かせない鉱物の採掘は、重大なサステナビリティリスクを伴う。採掘は大量のエネルギーを消費し、大気汚染、GHG排出、水資源の枯渇、土地劣化など環境上の問題を引き起こしている。鉱物ごとにリスクは異なるが、共通して有害な尾鉱の管理が懸念事項となっている。尾鉱とは鉱山採掘後に残る廃棄物を指す。尾鉱を適切に処分しなければ、周辺の水源に重金属汚染を引き起こし、生態系および人の健康を危険にさらす可能性がある。採掘段階には、現代奴隷、児童労働、劣悪な労働環境といった重大な社会的リスクも存在する。特にサプライチェーン内で零細・小規模採掘(ASM)が行われている場合に顕著である。³ 貴重資源の採掘は、汚職や不正行為を招くだけでなく、先住民を含む地域住民との紛争の原因にもなっている。

リチウムイオン電池のバリューチェーンの中心に位置する、エネルギーを大量に消費する精製工程にも環境をめぐる重大な課題がある。精製は、化学および熱処理の工程で鉱物を3,000°C以上に熱し、化学薬品を用いることが多いため、最も炭素負荷が大きい段階となっている。こうした化学薬品の使用は、酸性雨の原因物質である硫酸などの有害な副産物も発生させる。精製段階では社会的リスクの発生は比較的少ないものの、一部では強制労働が指摘されており、米国は関与した企業からの輸入を禁止している。¹²

OEMの間では、リチウムイオン電池のセルおよびパックの製造を現地化し、サステナブルな取り組みを強化する動きが出ている。電池製造の後半工程に伴う主なサステナビリティリスクに対処することが目的である。環境的リスクに関しては、再生可能でないエネルギーの大量使用がGHG排出を増やす一方で、廃棄物の発生と資源の消費が汚染を悪化させ、生態系への懸念をさらに深刻化させている。社会的リスクに関しては、労働者の搾取や危険な労働条件という課題があり、これらは製造における倫理基準を損なう可能性がある。製造の後半工程は、精製段階と比べると集中リスクは低いものの、中国がセル製造の主導権を握っているため、サプライチェーンの混乱リスクを高めており、地政学的リスクも懸念されている。OEMは製造を現地化することで、こうしたリスクを軽減し、サステナビリティを促進し、サプライチェーンのレジリエンスを強化しようとしている。

図9:電池バリューチェーンが直面しているさまざまなサステナビリティ課題^{viii}



出所:IEA、Child Labour Platform、ILO、Harvard International Review、S&P Global Market Intelligence、Benchmark Minerals、Nature Reviews Earth & Environment、Reuters、USGS、Centre on Global Energy Policy、Global Battery Alliance、National Minerals Information Center、Global Witness、Financial Times、Bloomberg、Rainforest Rescue、RAID、Amnesty International、Faraday Institution、Geneva Center for Business and Human Rights、Human Rights Watch、WEF、IIEDなど、およびPwC Strategy&による分析

viii ここで取り上げた電池バリューチェーンのサステナビリティリスクは、OECDの責任ある企業行動指針に沿った内容となっている。

6.1 | 重要鉱物の採掘

電池は採掘によって入手する多種多様な原材料に依存しており、採掘過程には複雑なサステナビリティ上の影響が伴う。

リチウム、ニッケル、コバルト、黒鉛は電池製造に欠かせない原材料であり、その需要は今後も大幅に拡大するとみられている。2023年、電池向けのリチウムおよびニッケル需要は30%増加し、コバルトは15%増加した。² 2040年までに、リチウムおよびニッケル需要は40倍以上、コバルトおよび黒鉛需要は20倍以上拡大する見込みである。² しかし、現在予定されている全ての増産プロジェクトが本格稼働したとしても、世界の重要原材料の供給能力ではこうした需要を満たせないと予測されている。一方、黒鉛およびニッケルの供給に限っては、現在の各国の気候目標が示唆する必要量を満たせる見通しである。²

こうしたギャップを埋めるために鉱物資源の採掘を拡大する場合、サプライチェーンの複雑な動向を踏まえて責任ある形で進めなくてはなら

ない。鉱物資源はサプライチェーンの混乱に対して深刻な脆弱性を抱えており、資源不足、地政学的緊張、倫理的かつ持続可能な原材料調達など、サステナビリティに関連する重大な課題を引き起こす。

速やかなエネルギー転換と、リチウム、コバルト、ニッケル、黒鉛の責任ある採掘の両立が極めて重要であり、本章ではこの点を重点的に取りあげる。

リチウムイオン電池は銅およびマンガンにも依存しており、LFP電池の製造では、鉄とリンも使用される。しかしこうした鉱物は「副次的」材料に分類されている。なぜなら、世界的需要からみると電池に使用される割合はごく一部にとどまるためである。例えば、世界のマンガン需要のうち電池使用の占める割合はおおよそ1%にすぎない。¹³ これら副次的材料のサプライチェーンは、将来の電池需要の影響を受けにくいいため、本レポートでは詳細な検討は行わない。さらに、これらは相対的に豊富であることから、調達・入手可能性に関するリスクも抑えられている。²

紛争鉱物について

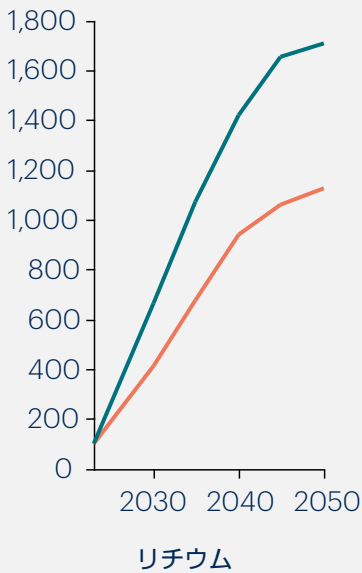
紛争鉱物とは、武力紛争、人権侵害、環境悪化を伴う状況下で採掘された鉱物を指す。代表的な例として、タンタル、スズ、タングステン、金(4鉱物の頭文字をとって3TGと呼ばれる)があり、その多くはコンゴ民主共和国やその近隣地域を中心とする紛争地帯で採掘されている。電池での使用は、世界的需要の中ではごくわずかである。

しかし、電池サプライチェーンでも、コバルト、リチウム、ニッケルをめぐる懸念が高まっている。アフリカの一部地域を中心とする鉱山が武装勢力に支配されているケースもあり、鉱物の販売収入が暴力的活動の資金源となっている。不正行為、密輸、違法採掘は、脆弱な国家をさらに不安定化し、治安や人道状況のさらなる悪化を招く。

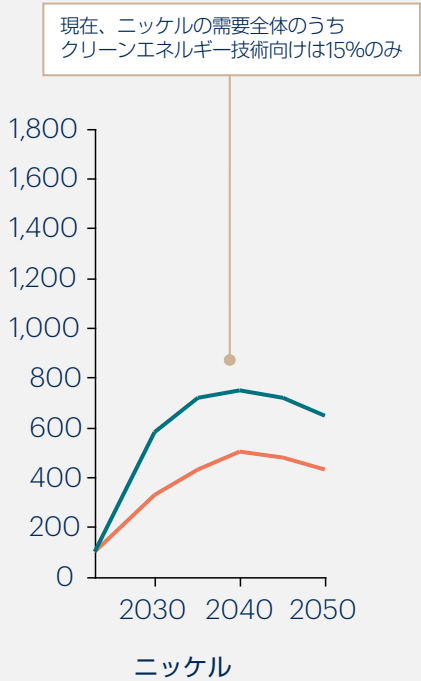
図10:クリーンエネルギー技術向け重要鉱物の需要予測
(2023年=100の基準化指標/2023年~2050年)

— 低位予測 — 高位予測

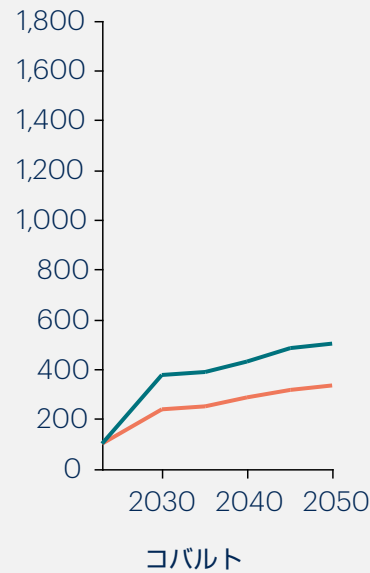
指標
基準年(2023年) = 100



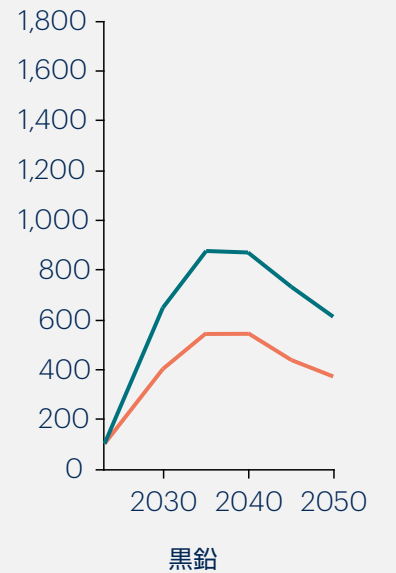
出所:IEA



出所:IEA



出所:IEA



出所:IEA

リチウム

リチウムはリチウムイオン電池の主原料であり、リチウムイオンが正極と負極の間を行き来することでエネルギーが充放電できる仕組みとなっている。

世界のリチウム採掘を牽引しているのは電池製造であり、需要全体の85%を占めている。² リチウムは電気化学的電位が高く、密度が低いいため、他の金属と同じサイズまたは重量であっても、より多くのエネルギーを蓄えられる。そのため、特に輸送分野で使用する場合にはメリットが大きく、電池パックの軽量化により車両の走行に必要なエネルギーを減らし、効率性と性能を高めることができる。

リチウムは主に、かん水とスポジューメン鉱石から採取される。かん水からの抽出は南米に集中しているが、中国西部でも行われている。抽出プロセスでは、塩原からポンプでかん水を汲み上げて蒸発池に送り、太陽光を使用して不純物を除去し、リチウム塩を取り出す。世界のリチウム生産のうち約40%がこの方法を採用している。²

世界のリチウムのおよそ50%はスポジューメンから抽出されている。スポジューメンは主にオーストラリアの露天掘り鉱山で採掘される硬岩鉱石由来の鉱物である。² スポジューメン鉱石からの抽出は、かん水からの抽出よりも精製の手間は少ないが、その反面、特にオーストラリアではエネルギーを大量に消費し、人件費も高い。かん水からの抽出は、太陽光を使用するものでエネルギー集約的な工程は少ないが、不純物の除去には高額な薬剤が必要であり、スポジューメン鉱石と比べると費用は倍近くになる。¹³

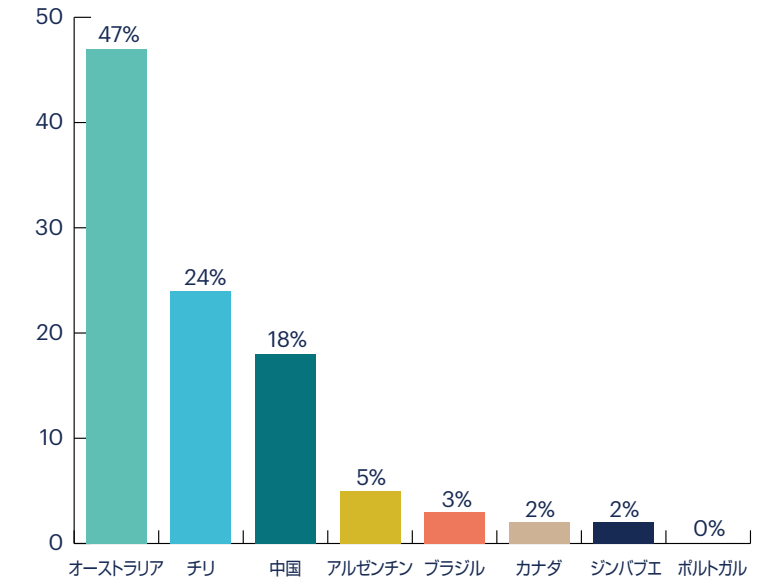
供給に占める割合は限定的だが、リチウムはレピドライトからも抽出されている。レピドライトの採掘は主に中国に集中している。中国政府は、電池材料の国内供給を確保しようとしているため、生産能力は急速に拡大している。

スポジューメン鉱石

現在、スポジューメン鉱石の主要な供給国はオーストラリアである。世界最大級のスポジューメン採掘サイト11か所のうち7か所がオーストラリアにある。これら7か所から採れる鉱石は、酸化リチウム(Li₂O)の含有率が高いことで知られている。採取プロセスでは、露天掘り鉱山から鉱石を採掘した後、粉碎して細かい粒子にし、機械的工程と浮遊選鉱によって特定の不純物を分離する。得られた精鉱は、通常オーストラリアから中国に送られ、そこでさらなる精製が行われる。

スポジューメン採掘はエネルギーを大量消費するため、環境に重大な影響を与える。スポジューメン鉱石は露天掘り鉱山で採掘されるが、露天掘りは地域の生態系を損ない、電動化が進んでいない重機による作業が中心となっている。さらに、リチウム精鉱を得るための鉱石の精製・加工には大量のエネルギーを要し、しばしば追加の精製を行うために中国へと輸送されるため、結果としてカーボンフットプリントが一段と大きくなる。そのため、スポジューメン採掘は、かん水からの抽出に比べて約3倍の二酸化炭素(CO₂)を排出している。¹⁴

図11: 国別のリチウム生産比率、2023年



出所: IEA

スποジューメン採掘では、大量の廃棄物(となる副産物)も発生する。1トンのリチウムを採掘するたびに、ウランなどの有害な放射性鉱物を微量に含む尾鉱が7～10トン発生する。¹⁵ スポジューメンの採掘場所は遠隔地にあるため、人口密集地域に化学物質が流出する可能性は低く、他の鉱石採掘と比べると廃棄物に起因するリスクは相対的に低い。しかし、遠隔地においては、その土地に現在または歴史的に結びつきや権利主張を有する地域コミュニティや先住民グループが存在するため、採掘会社がこうした住民たちと効果的なエンゲージメントを行うことは、ステークホルダーにとって重要である。このエンゲージメントは、採掘活動に伴う社会的影響やリスクに先んじて対処し軽減する上で不可欠である。

電池需要が増え続け、新たなリチウム探査を促していることから、スποジューメンの低品位鉱山が開発される可能性があることに留意すべきである。酸化リチウムの含有率が低い(4%未満)鉱石からリチウムを抽出する場合、高品位鉱石の場合よりはるかに多くの選鉱工程が必要になる。選鉱とは、不純物を取り除いて鉱石の品位と価値を高め、精鉱の生産量を一定に保つための処理工程を指す。そのため、CO₂排出量の抑制、またはエネルギー消費量に対する精鉱回収率の向上を実現する革新的技術が登場しない限り、新たに開発されたリチウム採掘事業は、サステナビリティの観点で既存の操業に劣る可能性がある。

図12: スポジューメン採掘におけるサステナビリティリスク



出所: IEA, Child Labour Platform, ILO, Harvard International Review, S&P Global Market Intelligence, Benchmark Minerals, Nature Reviews Earth & Environment, Reuters, USGS, Centre on Global Energy Policy, Global Battery Alliance, National Minerals Information Center, Global Witness, Financial Times, Bloomberg, Rainforest Rescue, RAID, Amnesty International, Faraday Institution, Geneva Center for Business and Human Rights, Human Rights Watch, WEF, IIED など、および PwC Strategy&による分析

かん水採掘

かん水鉱床は主にチリ、アルゼンチン、ボリビアに存在しており、「リチウムトライアングル」と呼ばれている。この3カ国は世界のリチウム生産量の約30%を占めているが、⁶ 中国チベット高原もかん水からのリチウム生産において高いシェアを有している。² かん水採掘は、スポジューメン採掘に比べてリチウム1kg当たりのCO₂排出量が少ない(炭酸リチウム1トン当たりで、かん水採掘は3～8トン、スポジューメン採掘は10～20トン)が、抽出には時間を要する。かん水は、塩原の地下水から汲み上げられ、石灰(水酸化カルシウム)を加えることでマグネシウム不純物を取り除く。その後、屋外の蒸発池にかん水を送り、9～18カ月かけて天日で乾燥させる。時間とともに水分が蒸発し、さまざまな塩類が析出していく、リチウム濃縮液が残る。濃縮液が十分な純度に達すると、さらに精製・加工され炭酸リチウムとなる。

かん水採掘は、自然蒸発によって成り立っており、スポジューメン採掘よりエネルギー消費量は少ないが、かん水採掘特有の課題がある。かん水採掘は資源集約型手法であり、かん水および淡水を含む帯水層資源を大量に消費する。炭酸リチウム1トンを抽出するには、100～800m³の水が蒸発によって失われる。¹⁶ 乾燥地帯のアタカマ地域では、もともと乏しい水資源の最大65%がかん水採掘に使われていると推計されており、⁴ 深刻な水不足を引き起こし、脆弱な塩原の生態系を脅かしている。淡水の水源も、有害な廃棄物(となる副産物)やかん水の漏えいによる汚染のリスクにさらされており、適切に管理されない場合、地域の生物多様性の損失につながるおそれがある。

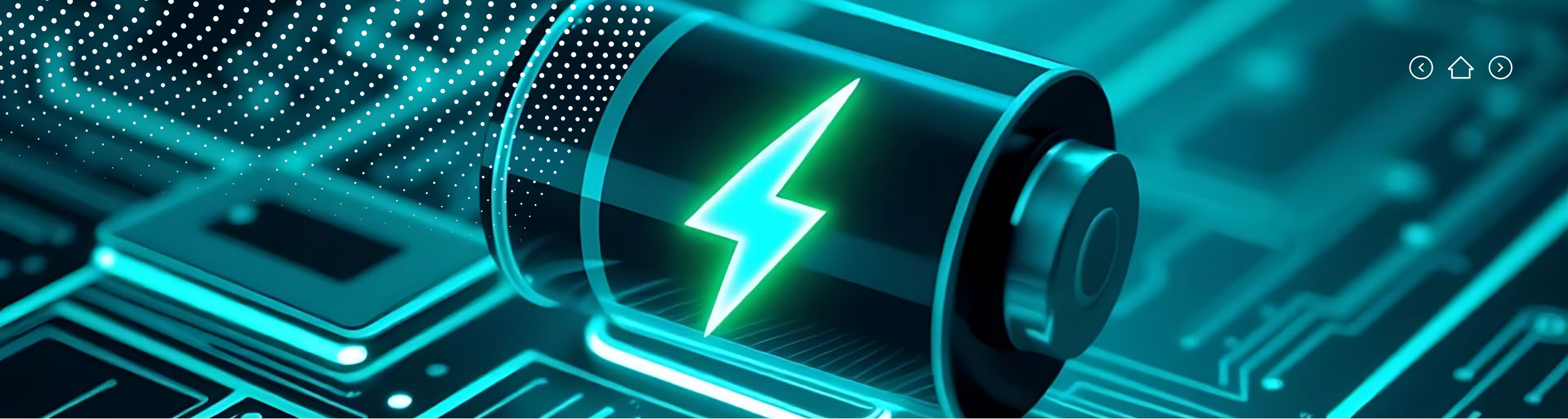
リチウムトライアングルでのかん水採掘は、地域コミュニティと先住民に多大な影響を及ぼす。かん水事業が水不足を悪化させ、地元の社会経済の安定を支える農業を危機に追い込む場合がある。また、産業活動は、従来の土地利用や文化的慣習、先祖代々の土地を利用することを妨げ、しばしば採掘会社と住民の対立を招く。地下水位の変化や将来的な汚染リスクなどの環境悪化は、こうした課題をさらに深刻化させ、生態系の持続可能性と周辺住民の社会経済的な安定を脅かす。

かん水鉱床は世界のリチウム供給の70%を占めており、世界的な需要拡大に伴い、かん水採掘プロジェクトも大幅に増加するとみられる。¹⁷ アルゼンチン、ボリビア、カナダ、チリ、中国、米国などの国々では新規探査が進められており、¹⁸ すでに水資源がひっ迫している地域にさらなる圧力をかけるだろう。例えば、チリは国家リチウム戦略で、既存のリチウム事業からの生産拡大を主要目標に掲げている。¹⁹ すでに深刻な水不足に陥っている地域では、追加のプロジェクトや増産がその地域の生態系とコミュニティにとって重大な脅威となりかねない。こうしたリスクを軽減し、新規プロジェクトの存続可能性を確保するためには、ステークホルダーと投資家がサステナビリティを優先し、地域社会と積極的に対話していくことが不可欠である。

図13: かん水からのリチウム抽出時におけるサステナビリティリスク



出所: IEA, Child Labour Platform, ILO, Harvard International Review, S&P Global Market Intelligence, Benchmark Minerals, Nature Reviews Earth & Environment, Reuters, USGS, Centre on Global Energy Policy, Global Battery Alliance, National Minerals Information Center, Global Witness, Financial Times, Bloomberg, Rainforest Rescue, RAID, Amnesty International, Faraday Institution, Geneva Center for Business and Human Rights, Human Rights Watch, WEF, IIED など、および PwC Strategy&による分析



リスク軽減および投資機会

リチウムの生産国および主要市場国双方の政府は、リチウム採掘に伴う環境への影響および社会的影響の低減に向けた施策に取り組んでいる。2023年、チリは塩原の生態系保護策を強化し、保護対象とする塩原を8%から30%に引き上げた。²⁰ 一方、EUなどの市場ではリサイクル規制を新たに導入しており、鉱物の新規探査需要の抑制につながるとみられる。²¹ EUのバッテリー規則は、新たなリチウム探査の需要を減らす取り組みとして、2030年までに全ての電池にリサイクルしたリチウムを4%以上含めるよう義務付けている。

民間セクターもサステナブルな事業慣行を求める消費者の声に答えている。電池メーカー、自動車メーカー、採掘会社は官民パートナーシップの枠組みで協力し、電池バリューチェーンの課題に対応している。例えば、グローバル・バッテリー・アライアンス(GBA)の下で、企業、政府、NGOなど170を超える団体が集まり、協働してバッテリーパスポートを策定した。²²

採掘会社は、リチウム採掘に伴う環境への影響および社会的影響を軽減すると期待される、**直接リチウム抽出法(DLE)**などの革新的技術を取り入れている。DLEとは、従来のかん水採掘よりもGHG排出量を抑えながら、短時間でリチウムを抽出する新たな手法である。DLEにはいくつかの抽出法があるが、通常はかん水を吸着剤または吸着膜に通して選択的にリチウムイオンを抽出する手法が用いられ、数カ月かかっていた抽出が、数時間から数日に短縮されている。DLEはより気候にやさしく、従来法のCO₂排出量はリチウム1トン当たり3～8トンだったが、0～5トンまで削減している。⁶ 商業的な効率性も高く、従来法と比べてリチウム回収率を2倍にできる可能性がある。⁶ その反面、DLEでは膨大な量の水資源を消費するため、水不足に陥っている地域では現実的ではないかもしれない。現在、稼働中のDLEプロジェクトは13件で、その多くが中国にあるが、プロジェクト数は今後急増するとみられている。

DLEの技術成熟度(TRL)はレベル7～8であり、^{ix} 2035年までに世界のリチウム生産量に占める割合は約14%になると予測されている。²³

既存のかん水採取やスボジューメン採掘に代わる新たな選択肢として、粘土鉱床からのリチウム採掘が台頭しており、かん水採取に比べてGHG排出量を2～3分の1に抑えることを目指している。⁶ スボジューメン採掘同様に露天掘りで採掘されるが、リチウム粘土鉱床は地表近くに存在し柔らかい地質であるため、比較的採掘しやすく、エネルギー負荷も小さい。²⁴ しかし、リチウム粘土鉱床の採掘技術はまだ初期段階であり、商業的な成立可能性や環境への影響が懸念されている。通常、精鉱の品位は低いため、電池グレードの品位要件を満たすにはさらなる処理工程が必要となり、その過程で有害な化学薬剤が用いられることも少なくない。

ix TRLとは技術成熟度を指す。特定の技術の成熟度を評価するものである。1から11までの11段階評価で、レベル1は基本原理が観測されている初期段階の技術、レベル11は確立された市場で用いられている成熟技術を指す。詳細は本レポート巻末の脚注を参照のこと。

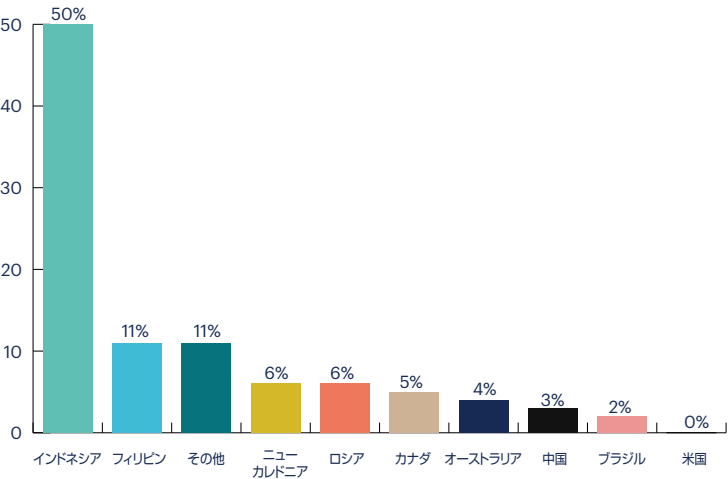
| ニッケル

ニッケルは、複数のタイプのリチウムイオン電池で用いられる主要な正極活物質の一つであり、エネルギー密度を高める能力から、電池メーカーに重視されている。

高ニッケル電池は、世界需要の50%以上を占めている。2023年の電池用途向けニッケル消費量は約37万トンと、前年から30%増加した。² 同年の世界のニッケル需要に占める構成比は、電池用途が15%、ステンレス鋼が約70%である。⁸ なお、電池用途の比率は2030年に35%に上昇すると見込まれている。²⁵ こうした比率の上昇は、コバルトが高価でサステナビリティリスクも大きいことから、電池メーカーがNMC811などの高ニッケルNMCを採用し、コバルトへの依存度を引き下げようとしているためである。

ニッケルは主にラテライト鉱石と硫化ニッケル鉱床から産出されており、世界のニッケル埋蔵量のうち、ラテライト鉱石が54%、硫化ニッケル鉱床が35%を占めている。ニッケルは海底のマンガン団塊にも含まれているが、これらの資源からの採掘はまだ初期段階にあり、環境への影響に対する懸念が大きい。²⁶ 純度99.8%以上²⁷ のものはClass1の電池グレードニッケルと呼ばれ、Class1ニッケルの多くは高品位の硫化鉱床に由来する。しかし、商業的に成立する硫化ニッケル鉱床の採掘は次第に困難になっており、これを受け、電池用途では、品位は低いもののラテライト鉱床へのシフトが進んでいる。ラテライト鉱石は、電池用途に適した品質に仕上げるために多くの処理工程が必要であり、これが環境面でより大きな負荷を伴うことが多い。それでもラテライト鉱の比重は今後高まると見込まれる。とりわけ、現在のニッケル生産で世界をリードするインドネシアが、ラテライト系のニッケル埋蔵量で世界最大の資源量を保有していることがその主因である。その他の主なニッケル生産国には、世界の生産量の11%を占めるフィリピンと、同6%のロシアなどがある。²⁶

図14: 国別のニッケル生産比率、2023年



出所: IEA

硫化鉱床の採掘

世界で生産される電池グレードニッケルの60～70%は、硫化鉱床に由来する。世界のニッケル埋蔵量の多くはラテライト系が占めるものの、より高い純度ゆえに硫化鉱床由来のニッケルが好まれる傾向にある。ニッケル硫化鉱の主な採掘国はカナダ、ロシア、オーストラリアであり、露天掘りまたは坑内掘りで採掘されている。²⁶ 採掘した鉱石は、処理しやすいように破碎・粉砕して細かい粒子にし、その後、さまざまな機械的選鉱工程によって不純物を取り除く。続いて浮遊選鉱にかけ、純度6～12%の精鉱として回収される。²⁸

硫化ニッケル鉱石の精製プロセスは比較的単純で必要とするエネルギー消費量も少ない一方、大量の尾鉱と二酸化硫黄を発生させる。硫化ニッケル鉱石は品位が高いため、ラテライト鉱石の精製ほどエネルギーを要さず、工程も複雑ではない。その結果、硫化ニッケル鉱由来のニッケルは、酸化ニッケル1トン当たりのCO₂排出量が10トンであるのに対し、ラテライト鉱由来の場合は19トンに達する。²⁹ もっとも、この精製プロセスでも大量の尾鉱と二酸化硫黄が発生し、環境的リスクを伴う。

露天掘りによる硫化ニッケル鉱の採掘は、土地を著しく劣化させ、地域の生態系を攪乱する。さらに、硫化ニッケル鉱石が大気中の酸素や水分に曝されると、酸性坑廃水（AMD）と呼ばれる硫酸による汚染の原因となる場合がある。北米、インドネシア、パプアニューギニアではAMDが激しい論争の的となっている。

採掘現場におけるニッケルへの長時間暴露は、職業性気管支炎、ぜんそく、肺がんなどの呼吸器疾患との関連が指摘されている。カナダ・オンタリオ州の大手ニッケル・銅生産企業のニッケル関連業務に従事する男性作業者を対象とする調査において、肺がん罹患率および死亡率の有意な増加が確認された。この傾向は、就労期間が長い者や操業初期に採用された者でとりわけ顕著であった。この調査結果は、適切な換気装置の設置、定期的な空気の質のモニタリング、作業者の健康診断の実施を含む厳格な安全策を導入し、職業上の有害要因から作業者を保護することの重要性を浮き彫りにしている。³²

図15：硫化ニッケル鉱採掘におけるサステナビリティリスク



出所:IEA、Child Labour Platform、ILO、Harvard International Review、S&P Global Market Intelligence、Benchmark Minerals、Nature Reviews Earth & Environment、Reuters、USGS、Centre on Global Energy Policy、Global Battery Alliance、National Minerals Information Center、Global Witness、Financial Times、Bloomberg、Rainforest Rescue、RAID、Amnesty International、Faraday Institution、Geneva Center for Business and Human Rights、Human Rights Watch、WEF、IIEDなど、およびPwC Strategy&による分析

ラテライト鉱石

ニッケル需要の増加に伴い、資源量の豊富さに加え、未開発で商業的に成立し得る硫化ニッケル鉱床の残存余地が縮小していることから、ラテライトの採掘は今後一層拡大すると見込まれる。ラテライト鉱石は、ニッケルを含む火成岩が強い風化作用を受け、ニッケルが溶脱・再配分され、層状の鉱床を形成して生じる。ラテライト鉱石は硫化ニッケル鉱石よりもニッケル品位は低いが、主に地表近くに分布するためアクセスしやすいという特徴がある。そのため露天掘りやストリップマイニングの手法でコストを抑えながら効率よく採掘できる。³³ インドネシア、特にスラウェシや北マルク地域は、世界最大のラテライト鉱石供給源となっており、ニッケルのグローバルサプライチェーンにおいて重要な存在となっている。硫化ニッケル鉱石は通常、精鉱に濃縮してから溶錬されるのに対し、ラテライト鉱石は電池グレードの品位を満たすニッケルを得るために湿式製錬プロセスが必要となる。^x

低品位のラテライト鉱石から電池グレードのニッケルを得るプロセスでは、有害な酸性副産物が発生し、硫化ニッケル鉱からの抽出プロセスの2倍のCO₂を排出する。ラテライト鉱石からのニッケル抽出では、最も一般的に用いられているのが高圧硫酸浸出(HPAL)法である。

HPALは、約225°C 50バールという高温・高圧条件下で行われるエネルギー多消費型プロセスである。³⁴ ラテライトプロジェクトの大半が集中するインドネシアでは、HPAL プロセスの多くが石炭火力を使用しており、オーストラリアより5倍多くCO₂を排出している。³⁵ HPAL プロセスのCO₂排出量は、電力、酸の中和、物流と薬剤使用を合せた項目に均等に分散されている。³⁶ そのため、再生可能エネルギー源に切り替えれば、HPAL プロセスの炭素強度を大幅に削減できる。

酸の使用が有害な廃棄物(となる副産物)を生み出す。パプアニューギニアのラム鉱山でのHPAL 事業は、この課題を象徴している。ラム鉱山は、尾鉱の深海投棄(DSTP)の慣行をめぐり長年にわたり反発を受けており、海洋に有害廃棄物を放出して海洋生態系に深刻な影響を及ぼしているとの指摘もある。ラム鉱山の周辺住民は、こうした投棄慣行に対し52億ドルの集団訴訟を起こした。³⁷ 水質の悪化は、沿岸住民の生計手段を損なうだけでなく、食料不足を深刻化させ、有毒物質へのばく露によって健康被害を引き起こしている。

x 湿式製錬法とは、高温高圧の条件下で鉱石を硫酸で浸出させ、ニッケルを抽出する手法。酸の流出、有害廃棄物の発生、大量のエネルギー消費、管理が不適切な場合の土壌および水への汚染などにより、環境破壊につながる可能性がある。



インドネシアなどニッケル資源の豊富な地域におけるラテライト採掘は、地域コミュニティの健康問題、生活基盤の喪失、土地の権利侵害などの重大な社会的リスクをもたらしている。ニッケル採掘業界では、労働者の安全確保と労働違反の問題が深刻な課題となっている。米国労働省は、強制労働によって生産された物品に関する年次レポートに、不当な採用慣行、強制残業、体罰の証拠を理由にインドネシア産ニッケルを掲載した。^{38, 39} 労働者は、二酸化硫黄(SO₂)など深刻な呼吸器系疾患につながる可能性のある有毒物質へのばく露など、日常的に危険な状況に置かれている。2023年にモロワリ鉱業団地で発生し、13人の作業員の命を奪った製錬炉の爆発は、安全手順の不備がもたらすリスクを浮き彫りにしている⁴⁰

複数のNGOは、環境被害および人権侵害が疑われるとして、インドネシアのニッケル産業への投資を抑えるよう、米自動車メーカーに要請した事例もある。⁴¹ インドネシアの労働組合も劣悪な労働安全衛生基準について問題提起したが、その後、採掘会社から報復措置を受け、労働組合のリーダーは解雇されている。^{41, 42} 鉱山地域では、環境保護活動に取り組む人々を標的にした暴力行為が増えており、その一方で、先住民は、重要な生物多様性を破壊し、文化遺産を損なう土地収奪に直面している。⁴⁴ こうした課題は、ニッケル産業に対する監視を強化し、説明責任を徹底することが急務であることを強く示している。

図16: ラテライト鉱石採掘におけるサステナビリティリスク



出所: IEA, Child Labour Platform, ILO, Harvard International Review, S&P Global Market Intelligence, Benchmark Minerals, Nature Reviews Earth & Environment, Reuters, USGS, Centre on Global Energy Policy, Global Battery Alliance, National Minerals Information Center, Global Witness, Financial Times, Bloomberg, Rainforest Rescue, RAID, Amnesty International, Faraday Institution, Geneva Center for Business and Human Rights, Human Rights Watch, WEF, IIED など、および PwC Strategy&による分析





リスク軽減および投資機会

ニッケル生産国および主要な最終市場国双方の政府は、ニッケル採掘に伴う環境への影響および社会的影響に対する規制導入を進めている。ニッケル生産地域では、汚染や生態系への被害を低減するための防止施策が導入されているが、その施行の実効性には依然として課題が残る。⁴⁵ カナダでは、連邦政府が脱炭素インセンティブプログラム（DIP）を通じて、民間企業グレンコアによるオンタリオ州の Onaping Depth ニッケル・銅プロジェクトで進めるバッテリー式採掘装置への移行を支援している。⁴⁶ 一方、サプライチェーンのより下流にある国々も、持続可能で倫理的なニッケルサプライチェーンの確立を目指し対策を講じ始めている。米国は、現地の労働者が直面する労働問題への認識を高めるため、2024年にインドネシアを強制労働ウォッチリストに掲載した。

コモディティ市場は、責任あるニッケル調達の推進に向けた支援体制を強化している。ロンドン金属取引所および Metalshub は協力して、市場原理に基づいた低炭素ニッケルのプレミア価格導入を促進している。^{xi} 市場データおよび分析の提供会社も、ニッケルのサプライチェーン内の透明性向上に寄与しており、価格情報提供会社のベンチマーク・ミネラル・インテリジェンスは、炭素排出を含む79の指標に基づいて評価した「グリーンニッケル」価格を採用している。⁴⁷ この取り組みは、買い手が調達するニッケルが自社のサステナビリティ目標や規制要件を満たしていることを確かめられるようにするとともに、売り手が責任ある方法で生産されたニッケルを市場で差別化できるようにすることを意図したものである。しかし、買い手側は原材料価格の差異に敏感であるため、持続可能な形で生産されたニッケルに上乗せされるプレミアムは高くなりにくい⁸

xi ロンドン金属取引所は、低炭素ニッケルを、ニッケル換算量1トンあたりのCO₂排出量が20トン未満のニッケルと定義している。

代替的な採掘法にはラテライト鉱のニッケル採掘に伴う環境負荷を軽減し得る可能性があり、ラテライト鉱床を対象とする新規ニッケルプロジェクトが大半を占める現状を踏まえると、これは重大な進展である。大気浸出法は、比較的低圧低温で処理できるため、HPAL に比べてエネルギー消費が少ない方法である。この方法は、設備投資および運用コストも低いため、商業的に有利である。さらに、処理工程で出る有害廃棄物が少ないため、尾鉱管理がそれほど難しくなく、環境的リスクも軽減できる。しかし、HPAL と比較すると回収率が低く、効率性と採算見込みの点で見劣りすることから、普及は進んでいない。⁴⁸

低炭素のニッケル抽出手法の中で注目を集めているのが直接ニッケル（DNi）法である。HPAL よりも低圧低温で処理できるため、エネルギー消費が少ない。DNi では硫酸ではなく硝酸を使い、使った硝酸の99%は回収され再利用される。また、必要とする酸の量をHPAL の5%未満に抑えることができるうえ、有害な尾鉱も発生しない。現在、商業規模に拡張可能な解決策としての有望性を評価するための実現可能性調査が進められている。⁵⁰

I コバルト

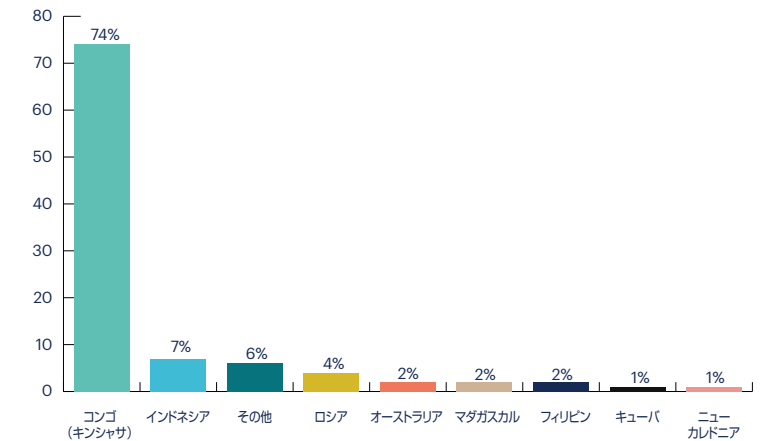
コバルトは高ニッケルのリチウムイオン電池に欠かせない材料だが、採掘には重大なサステナビリティリスクが伴う。

コバルトの採掘・抽出プロセスにおける課題が、低コバルトまたはコバルト不使用の代替技術へのシフトを促しており、その結果、コバルトの長期的な成長は、他の電池用金属と比べて抑制されている。コバルトは一般的な正極材であり、電池の熱安定性とエネルギー密度を高めることで、電池性能、寿命、安全性を向上させる。こうしたメリットにもかかわらず、コバルト採掘は、コストの高さ、限定的な供給量、倫理的懸念からますます厳しい監視の対象となっている。現在、世界のコバルト需要のうち電池用途が約70%を占めているが、こうした懸念を受けて電池メーカーは低コバルトまたはコバルト不使用の代替技術へのシフトを進めており、その結果、コバルト需要の伸びは他の重要鉱物と比べて鈍化している。⁵¹ こうした市場の慎重な見方にもかかわらず、IEAは、コバルト需要が2030年までに3倍増加すると予想している。¹

コバルトの大部分は、主に銅-コバルト(Cu-Co)鉱床およびニッケル-コバルト(Ni-Co)ラテライト鉱床の2種類の鉱床から副産物として抽出されている。銅-コバルト鉱床は、主に銅の採掘を目的として開発されているが、世界のコバルト生産の50%以上を占めている。⁵² これらの鉱床は、中央アフリカの銅ベルトに見られるような、シェールや砂岩起源の地層に多く分布する。一方ニッケル-コバルト鉱床は、熱帯地域の地表近くの地層に形成されており、鉱物を豊富に含む岩石が浸食されてできたもので、コバルトはニッケル採掘の副産物として抽出される。銅-コバルト鉱床の方が確立された手法があるため処理の点では有利だが、コンゴ民主共和国に集中しており、これまでの不安定な政治情勢から供給懸念がある。⁵³ 銅-コバルト鉱床とニッケル-コバルト鉱床は、採掘の複雑さ、環境への影響、地政学的リスクにおいて違いはあるが、どちらもコバルト供給には不可欠である。

コンゴ民主共和国は世界最大のコバルト生産国であり、世界のコバルト採掘のおよそ4分の3を占めている。⁸ また、同国は世界の埋蔵量の70%以上を保有しており(主にカタンガ地域に集中)、²⁶ 8つの世界最大規模のコバルト鉱山を有する。⁵⁴ コンゴ産コバルトの約12%は零細・小規模採掘(ASM)によるもので、こうした操業は多くが非公式な形態で行われており、大部分を手作業で行う危険な労働条件が特徴である。^{54, 4} 近年は、インドネシアが世界第2位のコバルト供給国として台頭しており、2023年は豊富なニッケル-コバルト・ラテライト鉱床から5,000メートルトン超のコバルトを抽出した。この数字は、主に中国からの投資を背景に、今後は大きく増加すると見込まれている。⁵⁵

図17: 国別のコバルト生産比率、2023年



出所: IEA

コバルト抽出

銅-コバルト鉱石とニッケル-コバルト鉱石の抽出プロセスは似ている。どちらも鉱石を粉砕して細かい粒子にしてから、不純物を除去するために浮遊選鉱にかける。その後、精鉱が泡として表面に浮上する。この初期工程は通常、鉱山近くで行われる。

コンゴ民主共和国における銅-コバルトの採掘・抽出にはサステナビリティ課題があり、電池全体のステークホルダーにとって重大なリスクとなっている。同国での採掘は、深刻な大気、土壌、水の汚染を引き起こしている。70を超える学術研究が、銅、コバルト、鉛、ヒ素、カドミウム、ウラン、マンガン、水銀、硫酸といった汚染物質が有害な濃度で存在することを報告している。^{5, 44} こうした汚染物質が地域コミュニティの健康と暮らしに深刻な影響を及ぼしており、生殖、呼吸器、皮膚系疾患が日常的に見られるとの報告もある。農業および漁業も打撃を受けており、調査対象となった世帯の99%が^{xii}、収穫・漁獲量の減少を訴えた。^{5, 44}

政府機関はリソースが不足しており、説明責任を確保する専門的知見も欠いているため、規制当局の監視は依然として不十分である。汚染は一般的に、有害な粉塵が公共の水源に混入することで発生する。また、これらの水源は、鉱山事業での利用によって枯渇傾向にある。採掘会社は、尾鉱処理施設の設置や水へのアクセスの改善などに取り組んでいるが、汚染問題は解消されていない。掘削井戸やポンプ施設が設置されているものの、WHOと現地政府が定める1日当たりの水供給基準を満たしていない。⁵⁶

コバルト生産国、特にコンゴ民主共和国で労働者の権利侵害がまん延しているとの指摘が上がっている。鉱山作業員は、低賃金、賃金の不払い、保護具の不備、危険な労働環境など搾取的な労働条件に直面しており、こうした問題は、大規模な産業用鉱山であっても見られる。⁵⁷ 鉱山拡張が進む地域では、強制退去、性的暴力、暴行の発生も報告されている。⁵⁸ 世界的な電池需要の拡大がさらなる搾取を招き、回復不能な生態系の被害と、地域コミュニティの長期的な生活基盤の脅威につながっている。

図18: コバルト採掘におけるサステナビリティリスク



出所: IEA, Child Labour Platform, ILO, Harvard International Review, S&P Global Market Intelligence, Benchmark Minerals, Nature Reviews Earth & Environment, Reuters, USGS, Centre on Global Energy Policy, Global Battery Alliance, National Minerals Information Center, Global Witness, Financial Times, Bloomberg, Rainforest Rescue, RAID, Amnesty International, Faraday Institution, Geneva Center for Business and Human Rights, Human Rights Watch, WEF, IIED など、および PwC Strategy&による分析

xii RAIDおよびAFREWATCHが2022年7月から2024年2月までの19カ月間に実施した、172回のインタビュー調査結果に基づいたもの。

コバルト供給における零細採掘の役割

世界のコバルト供給の約10%は、零細鉱山に由来するとみられている。⁵⁹ こうした小規模採掘場は一般的に大規模な採掘現場の近くにあることが多く、作業は非公式な形態で営まれているため、正規の監視が行き届いていない。規制枠組みの対象ではないため、安全性の高い露天掘りではなく、換気が悪く構造的にも不安定な坑道で採掘が行われている。鉱山作業員は、つるはしやショベルなどの簡易な道具で作業しているだけでなく、素手で鉱石を掘り出すことさえある。

コンゴ民主共和国では、採掘作業だけでなく、その周辺の関連事業においても児童労働がまん延している。わずか6才の子どもが家計を助けるために働き始めており、教育を受ける機会や採掘以外の収入を得る機会が狭まることで状況が一層悪化している。同国の児童労働監視改善システム(CLMRS)⁶⁰ には5,346人の児童が登録されているが、実際には4万人近くの児童が働いているとみられる。⁷³ 直接的な採掘作業にとどまらず、鉱山地域では子どもたちが労働者向けの周辺サービスに従事しており、その一部には性搾取に至る事例もみられる。³

電池バリューチェーン全体で零細採掘由来のコバルトの混入を減らす取り組みが進められているが、2030年には、零細採掘でのコバルト生産は世界需要の5%以上を占める見通しである。⁸ 零細・小規模採掘(ASM)は鉱山業のエコシステムに深く組み込まれており、約20万人の雇用を支えている。⁶² ASMの拡大は、公式な市場と並行して機能する地下経済によって支えられている。地下経済では、中間業者が大規模鉱山由来のコバルトに零細採掘産のコバルトを混ぜて公式市場に送り込むため、トレーサビリティが複雑化し、透明性向上に向けた取り組みを阻害している。

企業は、ASMを完全に除外しようとするのではなく、制度の枠内に組み込み、責任ある採掘を促す取り組みを進めるべきである。コンゴ民主共和国におけるコバルトの過剰採掘が、コバルト価格を下落させ、他の市場の多くのプロジェクトを商業的に成立しない状況に追い込んでいく。⁶³ 結果として、世界の電池サプライチェーンでは当面、コンゴ産コバルト依存が続くとみられている。ASMを制度の枠内に組み込むことで、政府および企業の監視の目が届くようになり、責任ある環境管理、および規制遵守の強化を実現できる。こうした制度化により、鉱山作業員および地域住民の安全性を高めると同時に、公正な賃金と正規雇用を通じて経済の安定性を高めることができる。これに対し、ASMを除外すれば、ASMで生計を立てている地域住民に深刻な悪影響を及ぼすことになるだろう。

ASMの制度化により、親世代の安定した雇用機会を確保できるようになり、そのことが児童労働の削減に寄与する。⁶⁴

コンゴ民主共和国、企業、NGOはASMの制度化に取り組んできた。2019年、コンゴ民主共和国政府は、零細採掘由来のコバルトの調達、精製・加工、輸出を統括する国営企業、Entreprise Générale du Cobalt(EGC)を立ち上げた。EGCは、2021年にASMセクターの制度化を促す指針として、責任ある調達基準を公表したが、いまだ本格稼働には至っていない。2018年、同政府は鉱山企業、コモディティリーダー、地元協同組合、ASM関連の非営利団体Pactと連携し、ムトシ鉱区での操業を制度の枠内に組み込む取り組みを進めた。ドバイを拠点とする鉱山グループであるChemafが操業管理を引き受けた結果、危険な地下掘進作業は、より安全な露天採掘用機材の導入により露天掘りへと置き換わり、現場の安全衛生基準は大幅に改善した。⁶⁵ またこの取り組みにより女性の就労も増え、家計所得が倍増したことで、子どもが学校に通えるようになり、児童労働は著しく減少した。制度化の取り組み実施期間中、同鉱区では休業災害は発生せず、死亡事故も報告されなかった。しかし、制度化の取り組みが2020年3月に停止して以降、同鉱山では労働災害による死亡事故が7件発生し、その多くは坑道(トンネル)の崩落によるものだった。^{65, 5}



リスク軽減および投資機会

政府、産業界、学術機関、そしてNGOが連携し、より持続可能かつ倫理的なコバルトの世界供給を促進するために、各種イニシアチブを立ち上げている。フェア・コバルト・アライアンス(FCA)は、零細鉱山を禁止すれば地元住民の生計に影響が及ぶことを認識し、禁止するのではなく、労働環境の改善に向けた投資および提唱活動を行っている。その一環として、鉱山作業者に機材を提供し、研修を実施している。さらに、児童労働の事例を把握するための監視体制も整備しており、加盟団体であるSave the Childrenと協力して、児童労働に巻き込まれた子どもたちに教育、医療、心理社会的支援へのアクセスを提供している。フェア・コバルト・アライアンスにはさまざまな団体が加盟しており、NGOのほか、テスラ、LG、グレンコア、Cobalt Instituteなどバリューチェーン全体にわたる企業が名を連ねている。

企業は、自社のサプライチェーンを最上流である鉱山レベルまでさかのぼって把握し、サプライチェーンにおける課題解決に積極的に取り組むべきである。その場合、データ共有や自発的な透明性向上への取り組みが不可欠である。学術機関、NGO、政府といった多様な情報源からコバルトの採掘データを集約するプラットフォームであるDelveは、政策形成の判断材料を提供するとともに、制度化に向けた取り組みを方向付ける役割を果たしている。Delveのデータは、企業が自社の調達慣行を評価し、さらにASMをどのように安全にサプライチェーンへ統合できるかについての理解を深める上でも役立つ。

グローバル・バッテリー・アライアンス(GBA)などの団体も組織されている。GBAは、バッテリーパスポートなどの取り組みを提唱し、鉱山コミュニティにおける児童労働の防止に向けて資金調達を行っている。175以上の団体が加盟するGBAとその下部組織は、バリューチェーン全体にわたりマルチステークホルダーの連携を促進し、サステナビリティリスクを共同で軽減するとともに、透明性を高める役割を果たしている。

電池のリサイクルは新規に採掘されるコバルトへの需要の伸びを大幅に鈍化させ、ASMの拡大を抑制するだろう。コバルトの回収率は大幅に増加しており、リサイクルで回収されたコバルトが、利用可能な投入原料に占める割合は2018年の約10%から2023年には40%に上昇した。⁶⁶ 回収率が増加し続ければ、2050年にはリサイクルで回収されたコバルトの割合は世界の電池用鉱物需要の20~30%に達する可能性がある。⁶⁷ こうした移行を規制が後押ししている。EUは、電池にリサイクル由来の鉱物を最低一定割合以上使うよう義務付けている。具体的には、EUでは、2021年時点で、電池に使用されるコバルトの最低12%をリサイクル由来とすることが義務付けられていた。この要件は、2036年までに20%に引き上げられる予定である。⁶⁸ これにより、採掘圧力が緩和され、脆弱な地域でのコバルト採掘がもたらす環境への影響および社会的影響が軽減されるとみられる。

| 黒鉛

1990年半ば以降、負極材料として選好されてきた黒鉛は、リチウムイオン電池に欠かせない重要な構成要素である。

黒鉛は、リチウムイオン電池の重量の約30%を占めており、負極の主材料であることから、電池需要の成長に伴い、その使用量は顕著に増加してきた。⁶⁹ 電気伝導性、化学的安定性、層間にリチウムイオンを出入りさせる能力などの特性を持ち、電池には理想的な材料となっている。2023年では、リチウムイオン電池の負極のうち約70%が黒鉛のみで構成されたものだったが、シリコンと黒鉛の複合負極の採用が着実に広がり、より選ばれるようになってきている。黒鉛は電池だけでなく、潤滑剤、鉛筆、プレーキライニング、コーティング剤にも用いられている。その熱伝導性と電気伝導性により、電子機器や半導体にも欠かせない材料となっている。現在、黒鉛の総需要のうち電池用途は33%だが、2040年には65%に増加する見通しである。⁸

世界の黒鉛生産は中国に集中している。中国は世界の天然黒鉛の90%以上、合成黒鉛の95%以上を供給しており、黒鉛精製についてはほぼ独占状態にある。¹ しかし、地政学的な緊張とサプライチェーンリスクを受けて、各国政府は国内の生産体制を強化させ、中国以外の調達ルートを模索している。こうした動きは、最近の米中の貿易摩擦に象徴される。中国は最近、米国に対する黒鉛輸出規制の強化を決定した。米国は黒鉛について輸入依存度が高く、国内の天然黒鉛の埋蔵量はごくわずかである。そのため、米国はマダガスカルやモザンビークなどの天然黒鉛の主要生産国に調達先を広げており、モザンビークからの黒鉛輸入は2021年から2023年にかけて8倍に増加した。⁷⁰

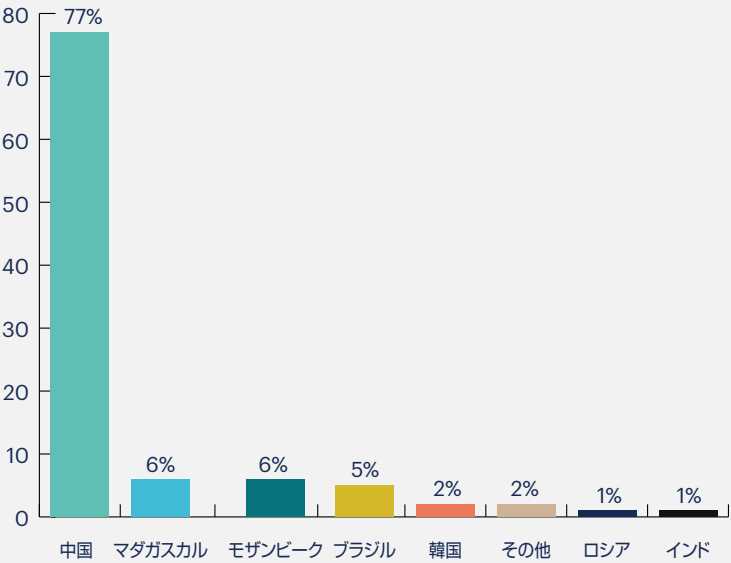


表3:天然黒鉛と合成黒鉛の比較

	天然黒鉛	合成黒鉛
調達源	自然界に存在（非晶質、フレーク状、脈状）	石油コークスおよびコールタールピッチなど炭素含有量の高い原料から人工的に製造
形状	非晶質、フレーク状、脈状（採掘された黒鉛の 95%がフレーク状、脈状は純度が高いが稀少）	該当せず（製造工程で形状・特性を制御可能）
コスト	一般的に比較的安価	製造はエネルギー集約的であり比較的高コスト
エネルギー消費	初期段階のエネルギー消費は少ないが、電池グレードの純度を得るには多大なエネルギーを要する	製造では大量のエネルギーを消費
純度	電池グレードの純度にするまで精製が必要	当然ながら完成品の純度はかなり高い
構造の一貫性	構造には自然のばらつきがある	構造的に一貫性に優れている
性能	合成に比べ、イオンの挿入（インターカレーション）能力は低い	イオンのインターカレーション能力は高く、電池の性能も向上する



図19: 国別の黒鉛生産比率、2023年



出所:IEA

天然黒鉛

変成岩に存在するフレーク状黒鉛は、80～95%の炭素含有量を有し、世界の黒鉛採掘量の約半分を占めている。⁷¹ 鉱床の含有成分や深さに合わせて、坑内採掘または露天採掘のいずれかの方式が用いられる。坑内採掘鉱山では爆薬やドリルを用いるが、露天掘り鉱山ではそのまま堆積物から掘り出すことができる。採掘後、黒鉛原鉱は後工程を容易にするために粉碎され、不純物除去のために浮選にかけられる。その後、化学精製または熱精製によって高純度化される。

黒鉛採掘は、他の鉱物と同じ環境面の課題を数多く抱えている。中国の黒竜江省では、黒鉛採掘事業から排出される粉じん(微粒子)が周辺の空気、水、土壌を汚染している。住民は、不作や飲料水の汚染、広範な健康被害がこうした採掘事業に起因すると訴えている。⁷² 黒鉛は、電池用途に求められる99.95%の純度に仕上げるために、さらなる精製が必要となる。精製では塩酸やフッ酸などの有害化学物質を用いるため、流出水や廃水が責任をもって適切に管理されない場合、周辺の生態系にリスクをもたらす。また、エネルギーも大量に消費され、最大3,000°Cの高温でシリカ酸化物や金属酸化物などの不純物を除去する必要がある。それにもかかわらず、中国では、天然黒鉛を用いた負極の製造によるCO₂排出量は、合成黒鉛に比べておよそ55%少ない。⁷³

黒鉛採掘には、重大な社会的リスクも伴う。中国北東部の黒鉛採掘場の周辺コミュニティでは、汚染が住民の健康や生活の経済的安定に悪影響を及ぼしているとの懸念が広がっている。しかし、サステナビリティリスクは中国に限ったものではない。2025年までにモザンビーク産黒鉛の約96%が北部のカーボデルガド州で採掘されるとみられている。⁷⁴ 豊富な資源を有するこの州は、2017年以降、モザンビーク政府と地元反乱勢力との紛争により不安定な状態が続いている。その結果、住民の安全が脅かされるだけでなく、鉱山労働者の死亡事例も発生している。^{73, 3} さらに、マダガスカルの前住民コミュニティでは、昔から持つ土地の権利が法で十分に保護されておらず、新規の鉱山開発に伴い立ち退きを強いられるケースも発生している。⁷⁵

図20:天然黒鉛採掘におけるサステナビリティリスク



出所: IEA, Child Labour Platform, ILO, Harvard International Review, S&P Global Market Intelligence, Benchmark Minerals, Nature Reviews Earth & Environment, Reuters, USGS, Centre on Global Energy Policy, Global Battery Alliance, National Minerals Information Center, Global Witness, Financial Times, Bloomberg, Rainforest Rescue, RAID, Amnesty International, Faraday Institution, Geneva Center for Business and Human Rights, Human Rights Watch, WEF, IIED など、および PwC Strategy&による分析

合成黒鉛

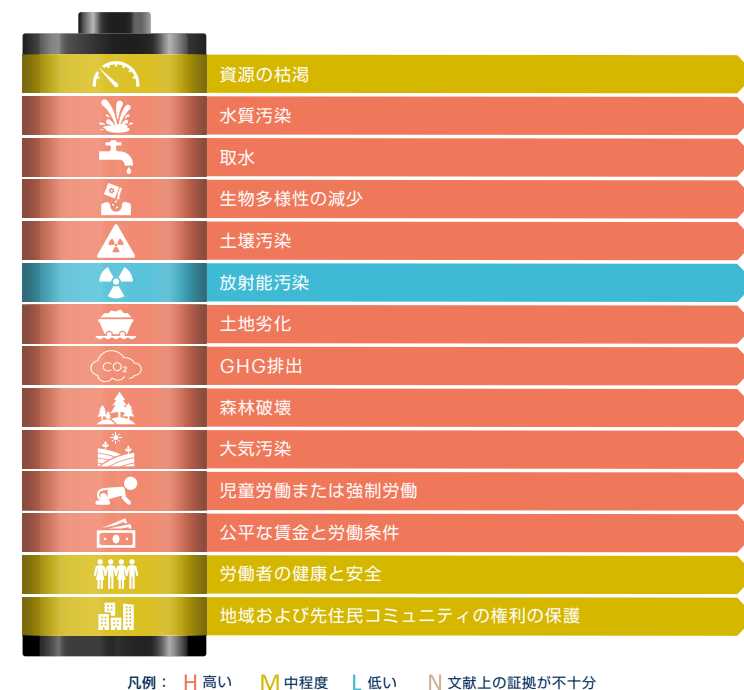
合成黒鉛は信頼性と長寿命性を理由に広く使用されており、負極材の約80%を合成黒鉛が占めている。⁷⁶ 製造工程は、まず石油コークスやコールタルピッチなどの高炭素原料を焼成して不純物を除去し、バインダーと混合して所定の形状に成形する。続いて、不活性雰囲気下で2,800℃を超える高温で熱処理を施し、炭素原子の配列を結晶性黒鉛構造へと再配列させる。最終段階である黒鉛化により、合成黒鉛は高純度と熱安定性を得る。これらの特性によって電池用途で広く使用されている。

合成黒鉛は電池用途に適しているが、その製造には環境面での重大な課題がある。黒鉛化工程では、前駆体(原料)を2,800℃～3,000℃で最長20日間加熱する必要があり、天然黒鉛の精製工程に比べエネルギー消費量のはるかに多く、コストもかさむ。⁷⁷

合成黒鉛の負極材の販売価格は1キロ当たり12～13ドルだが、天然黒鉛の負極材は4～8ドルである。⁷⁸ また合成黒鉛の製造は、原料(多くは石油精製の副産物)の点でも、炉の加熱の点でも化石燃料に大きく依存している。例えば、中国の黒鉛化施設の大半は内モンゴルにあるが、この地域の送配電系統は石炭火力発電に依存している。⁷⁹ そのため、合成黒鉛の製造では黒鉛1トン当たり平均25～35トンのCO₂を排出しており、天然黒鉛の平均量を10トン前後上回っている。⁸⁰



図21: 合成黒鉛生産におけるサステナビリティリスク



出所: IEA、Child Labour Platform、ILO、Harvard International Review、S&P Global Market Intelligence、Benchmark Minerals、Nature Reviews Earth & Environment、Reuters、USGS、Centre on Global Energy Policy、Global Battery Alliance、National Minerals Information Center、Global Witness、Financial Times、Bloomberg、Rainforest Rescue、RAID、Amnesty International、Faraday Institution、Geneva Center for Business and Human Rights、Human Rights Watch、WEF、IIED など、および PwC Strategy&による分析



リスク軽減および投資機会

黒鉛の生産を中国が支配していることを受け、米国、欧州、中国以外のアジア太平洋の国々は、自国での持続可能な採掘体制の構築を進めている。黒鉛は重要鉱物に指定されており、各国政府は国内生産体制の整備に向け資金を確保している。その代表例が、アラバマ州でのWestwater Resourcesの黒鉛プロジェクトである。同プロジェクトは2026年までに12,500トンの高純度黒鉛を生産する計画で^{xiii}、採掘施設と加工施設を備えており、こうした国内化の取り組みを象徴している。⁸² このような取り組みはサプライチェーンの安全性を強化するだけでなく、採掘から加工までの輸送距離を短縮することで環境面にもメリットをもたらす。

xiii 参考までに、米国が12,500トンの天然黒鉛を2023年に生産していたとすると、世界第7位の生産国となっていた。実際には、2023年の米国の天然黒鉛生産量はゼロであった。

黒鉛100%の負極の代替として、シリコン・黒鉛の複合負極の採用が広がっている。シリコンを含む複合負極材^{xiv}は、2023年時点で世界の負極需要の約20%を占めた。⁸³ シリコンは、地殻中で2番目に豊富な元素であり、黒鉛よりも資源供給面で持続可能性が高く、容易に入手できる。また、その構造により、黒鉛の最大10倍のエネルギー貯蔵容量を持つ。ライフサイクルアセスメントでは、シリコン100%の負極は黒鉛の負極と比べてGHG排出量を最大85%削減できる可能性があるとの結果が出ている。⁸³ しかし、シリコンはリチウム化の過程で体積が大幅に膨張するため、機械的劣化や容量低下を引き起こすなど、依然として技術的な課題がある。より効率的で環境負荷の小さい電池の実現に向け、こうした課題を解消するシリコン・黒鉛複合負極の研究開発が進められている。

xiv 最も一般的なシリコン・黒鉛の混合割合は、シリコンが5%または10%、残りを黒鉛で構成するというものである。

木材から製造されるバイオ黒鉛は、原料の木材が豊富に利用でき、低コストであるため、従来の黒鉛生産に代わる新たな選択肢である。管理された条件下で木材チップを熱分解して高炭素の材料を得て、これを精製して高純度黒鉛へと仕上げる。バイオ黒鉛は、石油系原料への依存を低減し、コストを削減し、サプライチェーンのリスクを軽減することができる。環境面からみると、バイオ黒鉛の生産は、天然黒鉛および合成黒鉛の生産手法と比べて、GHG排出量を大幅に削減できる。ニュージーランドを拠点とするバイオ黒鉛メーカーは、カーボンネガティブな生産プロセスにより、すでに99.999%超の高純度黒鉛の生産に成功している。その技術は、従来の黒鉛化工程に比べてエネルギー効率がより高い新たな代替手法として注目されている。同メーカーは、林業の副産物である低コストの木材チップを原料として活用しており、2026年に初となる商業規模プラントの建設を予定している。⁸⁴

バリューチェーンにおけるその他の素材

表4:

	電池の化学組成	機能	主要採掘地	採掘量に占める電池用途の割合	サステナビリティリスクと外部性	投資機会と検討材料
マンガン	NMC	正極材	- 南アフリカ - ガボン - オーストラリア - 中国	2〜3%	- 生息地破壊 - 土壌汚染 - 水質汚染 - 取水 - 土地劣化	マンガンのみの正極材
銅	NMC, LFP, NCA	集電体	- チリ - ペルー - コンゴ民主共和国	5%未満	- 生息地破壊 - 土壌汚染 - 水質汚染 - 取水 - 土地劣化	- 水回収率の改善 - GHG 排出量の削減
鉄	LFP	正極材	- オーストラリア - ブラジル - 中国	1%未満	- 生息地破壊 - 土壌汚染 - 水質汚染 - 取水 - 土地劣化	- Biolron - 水素供給基盤の電解槽
リン	LFP	正極材	- 中国 - モロッコ - 米国	5%未満	- 水質汚染 - 土壌汚染 - 大気汚染 - 放射能汚染	- 水回収率の改善 - インフラからの排出量削減

鉱物採掘会社との対話

投資家が鉱物採掘会社にたずねるべきサステナビリティ関連の主な質問を表5にまとめている。

表5: 鉱物採掘会社との対話における質問例

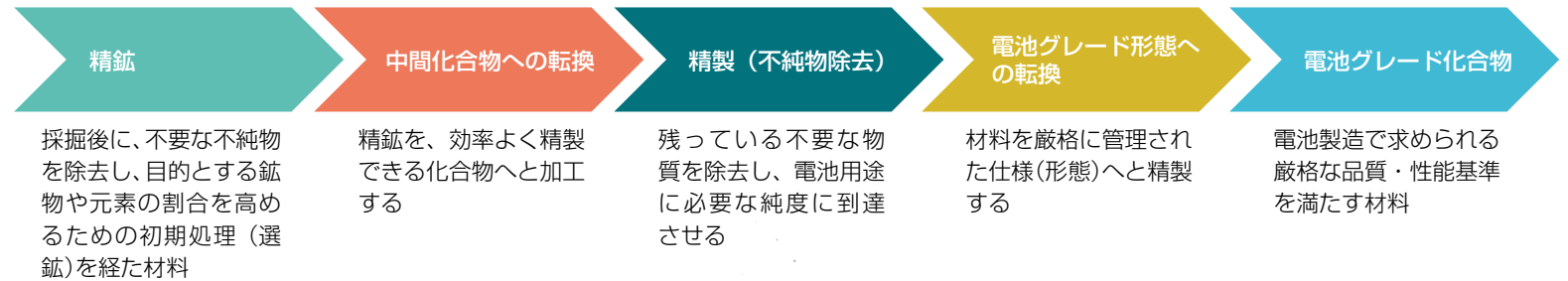
カテゴリー	最初の質問	追加質問 (必要に応じて)	望ましい取り組み例 (ベンチマークとなる基準)
サステナビリティパフォーマンス	鉱山事業に起因する環境への影響および社会的影響をどのような方法で管理していますか	- 取り組み方針の形成にあたり、地域コミュニティを含むステークホルダーとどのように対話していますか - 現地の法規制の遵守に加えて、どのようなサステナビリティ方針、基準、ガイドラインを採用していますか	- ドッド・フランク法1502条(米国) - 責任ある企業行動のためのOECD デュー・ディリジェンス・ガイダンス
	サステナビリティパフォーマンスをどのように計測し報告していますか	- どのような報告基準を採用していますか - どのような関係者が報告にアクセスできますか	- グローバル・レポーティング・イニシアチブ(GRI)基準 - EUの企業サステナビリティ報告指令(CSRD) - 気候関連財務情報開示タスクフォース(TCFD)
	サステナビリティリスクを最小化するため、廃棄物の管理と保管をどのように行っていますか	潜在的な不具合に備えた予備計画はありますか	- EU 廃棄物枠組み指令 - バーゼル条約
	サプライチェーンにおけるコンプライアンスを監視し、順守を強化するためにどのような仕組みを設けていますか	- サプライヤーによる違反が発生した場合、どのように対処しますか - グローバル・バッテリー・アライアンス(GBA)や責任ある鉱物調達(RMI)などの責任ある調達を促進している業界イニシアチブに参加していますか	- 責任ある企業同盟(RBA)行動規範 - 英国現代奴隷法
	資源効率またはエネルギー効率を改善するための技術またはプロセスを検討していますか	- どのようなイノベーションやパートナーシップを活用してサステナブルなイノベーションを推進していますか - サステナビリティを推進する技術開発に、どの程度の投資を当てていますか	- 米国エネルギー独立安全保障法(EISA) - EU エコデザイン指令
	現在の電池用重要鉱物に代わる、より持続可能な代替材料を検討していますか	サステナブルな新しい化学組成の電池に対する需要拡大に伴う影響を評価していますか	EU 重要原材料法
規制遵守	EU バッテリー規則などの規制への遵守をどのように徹底していますか	バッテリーパスポート、再生材含有率、責任ある調達などの変化する要件に対応するため、具体的にどのような措置を講じていますか	- EU バッテリー規則(EU)2023/1542 - EU 廃棄物枠組み指令(2008/98/EC) - EUの化学物質の登録、評価、認可、制限に関する規則(REACH 規則)
技術革新と今後の動向	特にサステナビリティおよび責任ある調達に関して変化する規制環境にどのように対応していますか	EU 電池規則などの規則にどのように対応していますか	- ISO14001 - 英国2015年現代奴隷法 - 国際労働機関(ILO)条約

6.2 | 精製・加工

重要原材料は採掘後、電池用途向けの純度に達するまでにさまざまな精製工程を経る必要がある。



図22: 鋳物の精製・加工



出所:PwC Strategy&による分析

鋳物によって具体的な精製技術は異なるが、一般に熱処理や化学処理を経て電池用途に必要な純度まで仕上げられる。しかし、これらの処理工程は、現在、環境に重大な影響を及ぼしている。熱処理は3,000°Cを超える高熱で行われるが、天然ガスや石炭などの再生不能エネルギーに依存していることが多い。また、化学処理で硫酸などの有害で汚染を引き起こす副産物が発生することが多い。

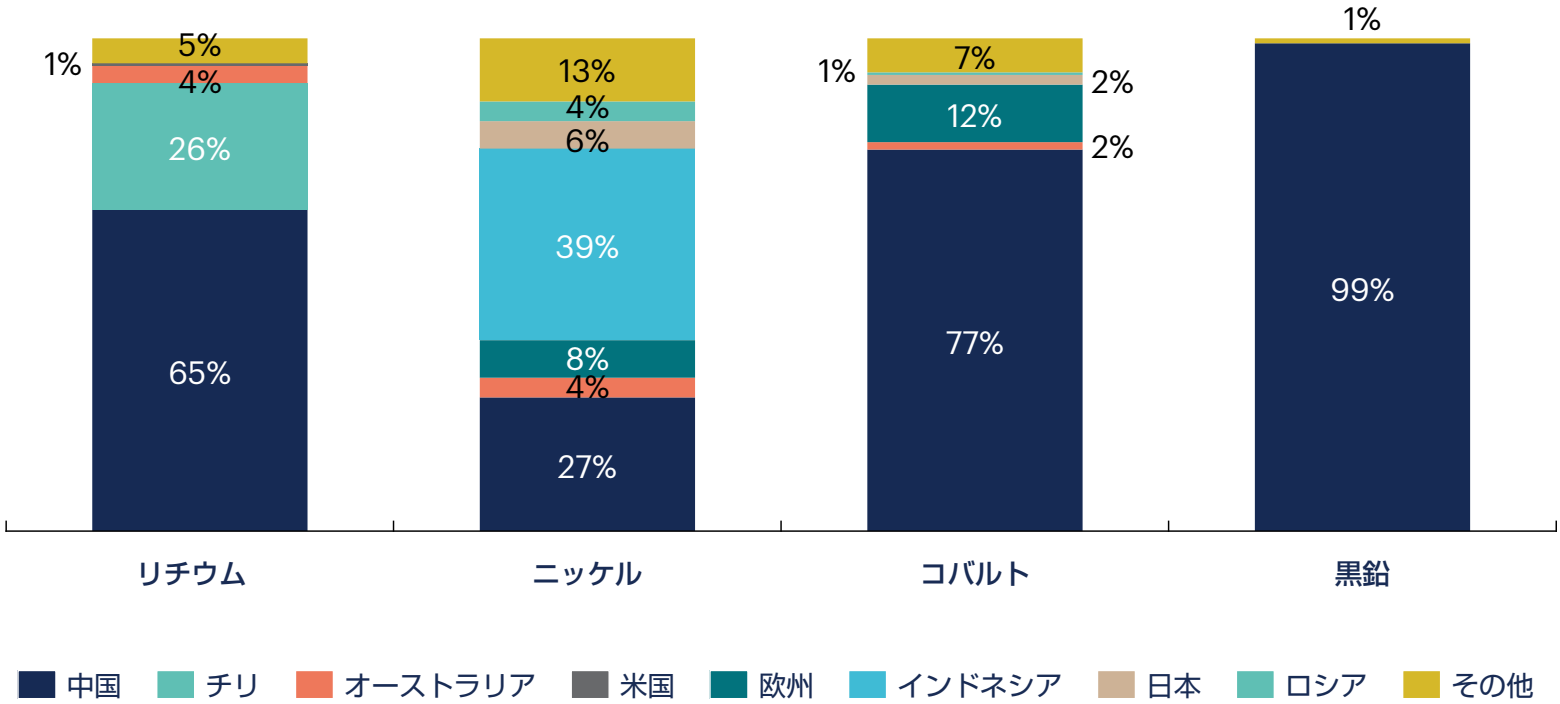
こうしたリスクはコミュニティおよび生態系に悪影響を及ぼし、大気汚染⁸、酸性雨、水質汚染などの環境問題を引き起こす⁸。精製・加工段階では、鋳物採掘ほど社会的リスクが顕在化しているわけではないが、中国では強制労働に関する指摘がなされているほか、有害ガスおよび微細な鋳物粒子へのばく露が労働者の健康・安全を脅かしている^{1, 85}。

世界の電池用重要鉱物の精製は大部分が中国で行われており、リチウム、コバルト、黒鉛については65%以上が中国で精製・加工されている。¹

こうした一極集中は、サプライチェーンの混乱や地政学的動向の影響を受けやすく、輸出入規制、自然災害、あるいは地政学的対立により重要鉱物の供給が停止するリスクを高めている。例えば中国は最近、高純度・高強度・高密度の黒鉛品目および天然のフレーク状黒鉛品目の輸出を許可制にした。⁸ その結果、中国からの輸出が減少し、欧州市場では価格が上昇する一方、供給過剰気味だった中国の国内市場には下押し圧力がかかっている。⁸⁶

現在、中国の精製・加工手法は、世界平均の2倍の炭素を排出する送配電系統に依存しているため、排出量が増大している。^{1, 87} これを受けて各国政府は、国内の精製・加工能力の整備・強化に取り組んでいる。米国はIRA(インフレ抑制法)などの政策を通じて、EUは重要原材料法を通じて、地域内の精製・加工インフラを支援し中国への依存低減を図っている。

図23: 2023年の重要原材料別の精製・加工拠点分布



出所: IEA

正極活物質

リチウム

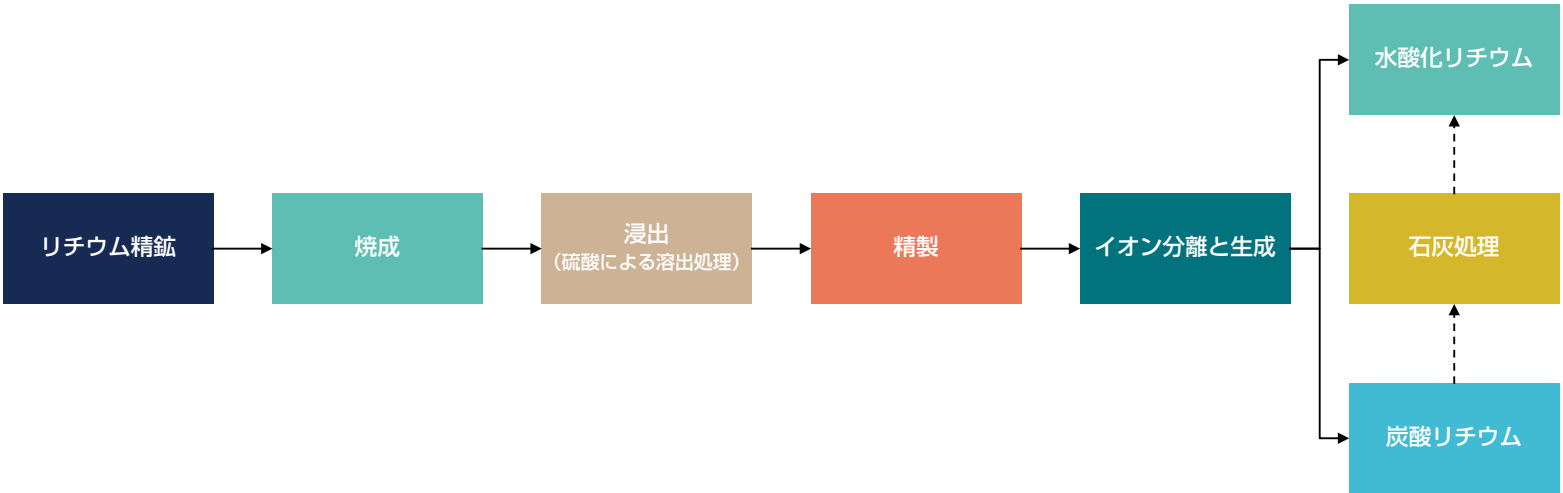
リチウム精鉱を電池グレードの炭酸リチウムまたは水酸化リチウムに精製する工程では、エネルギーを多く消費し、有害な副産物(廃棄物)を生じる。炭酸リチウムは通常、かん水から抽出して得られ、水酸化リチウムは硬岩鉱床のスボジュメン鉱石を原料に製造される。水酸化リチウムは、反応性および効率性の高さから高ニッケル正極の製造で好まれており、炭酸リチウムは純度および反応性がそれほど重視されない低ニッケルまたはLFP正極に用いられる。炭酸リチウムまたは水酸化リチウムを得るにあたっては、まずリチウム精鉱を焼成し、硫酸で浸出させて硫酸リチウムを得る。その後、硫酸リチウムを炭酸ナトリウムと反応させて炭酸リチウムを生成するか、石灰でさらに処理して水酸化リチウムを得る。精製工程には主に以下のようなリスクがある。

- 化学処理および熱処理はエネルギー集約的であるため、エネルギー消費量および排出量が多い。
- 硫酸などの有害化学物質を使用するため、重大な安全上のリスクがある。
- 有害廃棄物も発生する。

出所:PwC Strategy&による分析

持続可能なリチウムイオン電池:投資家向けブリーフィング

図24: リチウム精製工程のフロー図



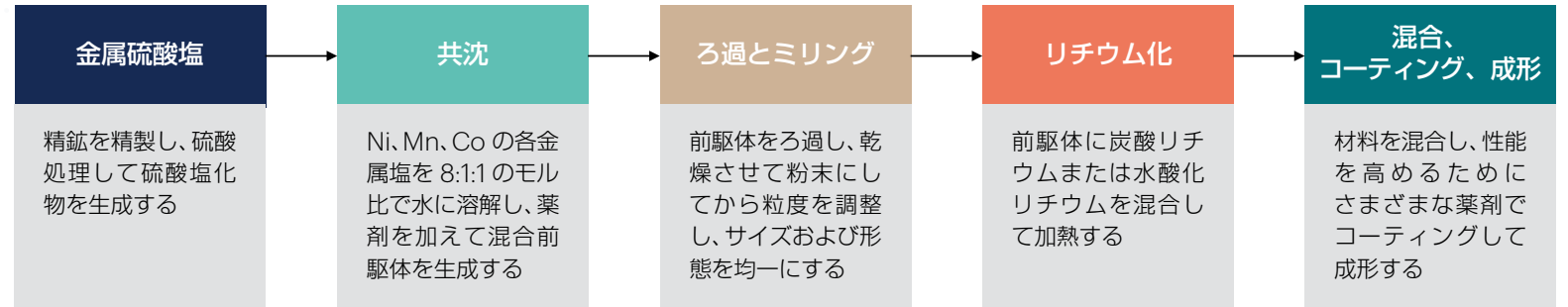
高ニッケル電池

NMC 正極材の生成では、ニッケル、マンガン、コバルトの精鉱を硫酸と加熱して硫酸塩を生成し、これをリチウムと混合して再加熱することで酸化物を形成する。

NMC の精製工程のうち、サステナビリティ上の最も大きなリスクを伴う主な段階は以下のとおりである。

- 硫酸を加えた精鉱の加熱工程。エネルギー集約的でありCO₂の排出量が多くなる。
- 工程中に発生する二酸化硫黄の排出。酸性雨や呼吸器系への影響を引き起こすおそれがある。
- 硫酸塩を多く含む廃水など、精製工程で生じる副産物に伴う廃棄物の管理および処理の課題。⁸⁸

図25:NMC811の精製工程



出所:PwC Strategy&による分析



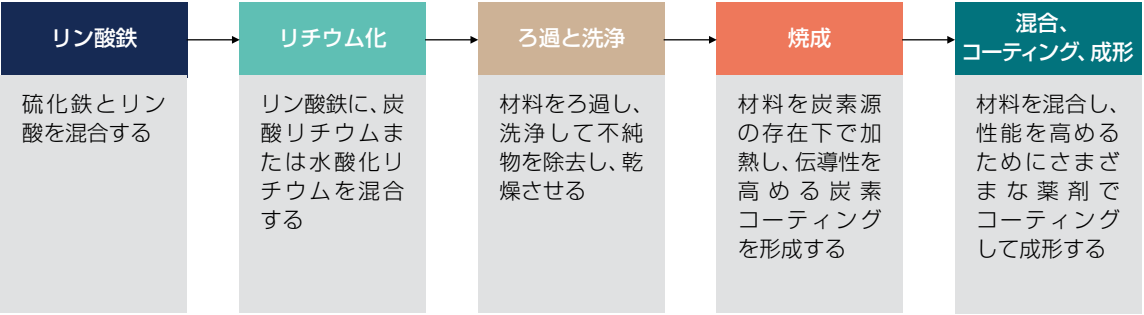
リン酸鉄リチウム

LFP 正極材は一般的に、リチウム塩と鉄塩の混合物にリン酸を加えて加熱することで生成される。LFP 正極材の基本的な製造工程には、リン酸鉄前駆体の生成、湿式ボールミリング、スプレー乾燥、焼結が含まれる。

表6:LFP製造工程の比較

方式	湿式法	乾式法
説明	リン鉱石を硫酸と反応させるプロセスであり、環境負荷は低いが、生成されるリン酸の純度は低い。 ⁸⁹	主に中国で採用されており、高温固相反応および炭素熱還元によるプロセス。 ⁸⁹
メリット	- 均一な混合 - 製品の優れた一貫性 - 高い品質	- シンプルな工程 - 量産化が容易 - 安価な鉄イオンの使用 - 熱分解炭素コーティングによる高い導電性
デメリット	- 高い反応条件が求められる - 複雑な製造装置が必要 - 大量生産が困難	- 混合ムラが生じやすい - 粒径分布が広い - 品質の一貫性に欠ける

図26:LFPの精製工程



出所:PwC Strategy&による分析



負極活物質

黒鉛

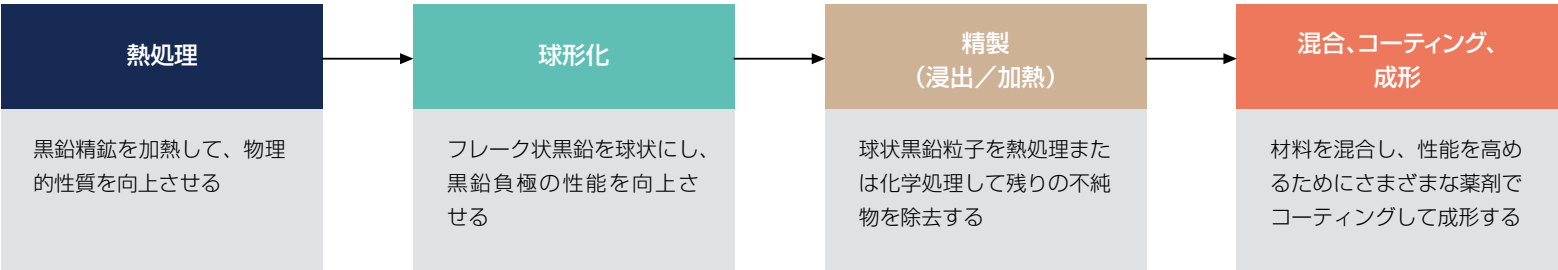
合成黒鉛はさらなる精製・加工は必要ないが、天然黒鉛は電池用途に求められる純度を得るための精製・加工が必要となる。天然黒鉛は、球形化、精製、コーティングなどのさらなる段階を経て、電池用途に求められる厳しい純度および性能基準を満たすために処理される。球形化とは、電池性能を高めるために、フレーク状黒鉛を球状の粒子にすることである。球形化の後に粒子を精製して不純物を除去し、高い純度(99.95%を超えることが多い)を実現する。最後に黒鉛粒子に薄い炭素コーティングを施して、電池用途における伝導性および効率性を向上させる。

サステナビリティ上の最も大きなリスクを伴う段階は以下のとおりである。

- ・ 熱精製:エネルギー集約的であり、最大3,000°Cまで加熱する必要があるため、多量のGHGを排出する。
- ・ 塩酸やフッ酸を用いる化学精製:廃棄物が適切に管理されない場合、水質汚染につながる可能性がある。
- ・ 強制労働に関する懸念:特に新疆や内モンゴルなどでは、黒鉛のサプライチェーンにおける体系的な人権侵害や労働搾取が報告されている。^{81, 1}

図27: 黒鉛の精製工程

天然黒鉛



出所:PwC Strategy&による分析



合成黒鉛製造における イノベーション

新たな独自の黒鉛化炉技術は、合成黒鉛製造を大きく前進させている。従来法と比べ、より効率的で環境配慮に優れた手法を提供する。従来の手法では、数週間にわたり最大3,000°Cの高温処理が必要であり、化石燃料に大きく依存していたが、この技術ではたった3日で工程が完了する。さらに、使用エネルギーのうち57%をカーボンフリー、15%を再生可能エネルギーとすることでエネルギー消費量を削減し、効率性と持続可能性の双方を大幅に高めている。⁹⁰

また、この技術は、エネルギー効率を高めるだけでなく、フッ酸や塩酸などの有害物質を用いた精製プロセスを不要にする。高純度のニードルコークスを投入材とすることで、化学物質の侵出や流出、労働者のばく露、有害廃棄物の処分に伴うリスクを回避し、安全性と環境パフォーマンスの向上に寄与している。⁹¹

環境への影響は極めて大きい。ライフサイクルアセスメント(LCA)では、中国の内モンゴルで採用しているような従来の合成黒鉛製造技術と比べて、地球温暖化係数(GWP)が60%削減されることが示されている。⁹³ 天然黒鉛の精製と比べてもGWPが30%削減されており、エネルギー利用の高効率化と再生可能エネルギーの活用によって、サステナビリティ上の明確なメリットが得られている。

この最先端技術は、合成黒鉛業界に大きな変革をもたらす見込みであり、電池材料の需要拡大に応える、よりクリーンで安全かつ持続可能なソリューションを提供することが期待されている。



サステナビリティリスク

正極および負極材の鉱物精製ではエネルギー集約的な熱処理や化学処理が行われるため、環境には重大なリスクとなっている。こうした処理は大量の電力を消費するが、その電力の多くは化石燃料由来である。硫酸やフッ酸などの化学物質の使用もさらなる問題を引き起こしている。硫酸は酸性雨や大気汚染の原因となる二酸化硫黄を発生させる可能性があり、フッ酸は、毒性が極めて高く、取り扱いを誤ると水環境や土壌を汚染するおそれがある。また、尾鉱やスラグなどの副産物の管理の不備は、このような事態をさらに悪化させ、水資源や土壌に長期的な汚染をもたらす可能性がある。

バリューチェーンの精製・加工段階では熟練労働者が必要とされるため、人権や労働権の侵害は比較的少ないものの、安全衛生上のリスクは依然として大きい。硫酸ガスおよび空中の鉱物粒子へのばく露は、深刻なリスクをもたらす。硫酸ガスを吸い込むと、慢性気管支炎、肺水腫、その他の肺疾患など呼吸器系疾患を引き起こす可能性がある。

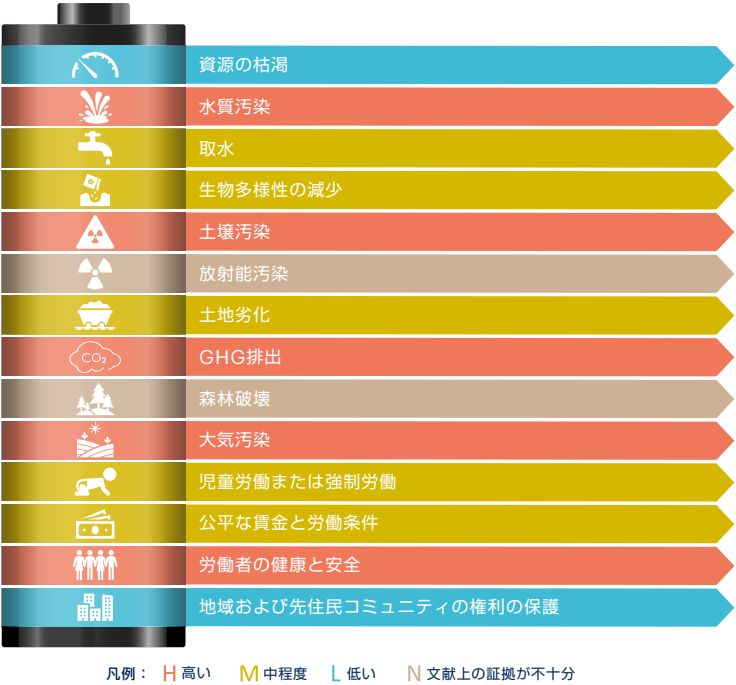
同様に、微細な鉱物粉じんは、特に換気が不十分な環境において、けい肺(珪肺)症やその他の粉じん関連疾患のリスクを高める。酸性物質または有害物質への接触は、化学やけいどや皮膚炎を招くおそれがあり、厳格な労働安全衛生対策の重要性を浮き彫りにしている。

規制の枠組みと執行体制が脆弱であれば、こうした危険性はいっそう高まる。中国が所有するインドネシアのモロワリ鉱業団地(IMIP)は、世界最大のニッケル精製拠点だが、多数の死亡事故案件および保護具の不備を含む安全衛生違反が継続的に報告されている。⁹² 強制労働に関する疑義も依然として続いており、特に中国では、ウイグルを含むトルコ系ムスリム少数民族が、重要鉱物の精製に関連するサプライチェーンにおいて強制・威圧的な動員にさらされていると報じられている。^{85, 5}

透明性は、もう一つの喫緊の課題である。精製工程における環境・倫理基準に関するデータが限られているため、とりわけ社会面の懸念についてリスクの特定が難しくなっている。投資家は、事業運営の可視性の一層の向上を求め、潜在的なリスクの把握と軽減を図るべきである。

精製・加工

図28: 正極および負極の精製・加工に伴うサステナビリティリスク



出所: IEA, Child Labour Platform, ILO, Harvard International Review, S&P Global Market Intelligence, Benchmark Minerals, Nature Reviews Earth & Environment, Reuters, USGS, Centre on Global Energy Policy, Global Battery Alliance, National Minerals Information Center, Global Witness, Financial Times, Bloomberg, Rainforest Rescue, RAID, Amnesty International, Faraday Institution, Geneva Center for Business and Human Rights, Human Rights Watch, WEF, IIED など、および PwC Strategy&による分析

リスク軽減および投資機会

電池材料の精製・加工における中国の圧倒的優位性は、中国に依存する国際的な電池産業に重大な地政学リスクをもたらしている。これは、中国による黒鉛の輸出禁止(規制)が、OEM 各社の供給不足と価格急騰を招いた事例にも表れている。各国政府は、中国の市場支配がもたらす課題と、さらなる貿易紛争の可能性を認識しており、国内の精製・加工体制を強化するための大規模投資を行っている。例えば、米国では、超党派インフラ法により、既存の IRA 資金に加えて70億ドルが国内の鉱物採掘・精製・加工プロジェクト向けに追加措置された。一方 EU では、イノベーション基金や重要原材料法(CRMA)を通じて、域内の精製・加工への投資拡充を進めている。こうした政策には輸入依存から段階的に脱却する狙いがあるが、世界のサプライチェーンにおいて中国の影響力は依然として大きく、完全な自給の達成はなお困難である。



各国政府がサプライチェーンの確保に力を入れる中、民間企業は、電池材料の精製において効率性およびサステナビリティを向上させるための革新的な技術開発を進めている。一部企業は、尾鉱から電池製造に不可欠な鉱物を回収している。例えば、ある企業では、環境配慮型の湿式製錬法を用いたニッケル鉱山廃棄物の再資源化プロセスによりニッケルを抽出しており、従来の乾式(高温)法と比べてCO₂排出量を削減している。⁹³ さらに、この手法は、廃棄物の発生と資源使用を最小限に抑え、環境面の懸念に対処しつつ費用対効果に優れた解決策を提供する。

精製会社との対話

投資家が精製会社にたずねるべき主な質問を表7にまとめている。

表7: 精製会社との対話における質問例

カテゴリー	最初の質問	追加質問（必要に応じて）	望ましい取り組み例（ベンチマークとなる基準）
サステナビリティ パフォーマンス	精製事業に起因する環境への影響および社会的影響をどのような方法で管理していますか	精製事業においてどのようなカーボンフットプリントの削減方法を採用し、サプライヤーのカーボンフットプリントをどのように評価していますか	- EU 産業排出指令(2010/75/EU) - OECD 多国籍企業行動指針
	サステナビリティパフォーマンスをどのように計測し報告していますか	- どのような報告基準を採用していますか - どのような関係者が報告にアクセスできますか	- グローバル・レポーティング・イニシアチブ(GRI)基準 - EUの企業サステナビリティ報告指令(CSRD) - 気候関連財務情報開示タスクフォース(TCFD)
	サステナビリティリスクを最小化するため、廃棄物の管理と保管をどのように行っていますか	潜在的な不具合に備えた予備計画はありますか	- EU 廃棄物枠組み指令 - バーゼル条約 - 資源保護回復法(RCRA)
	サプライチェーンにおけるコンプライアンスを監視し、順守を強化するためにどのような仕組みを設けていますか	- サプライヤーによる違反が発生した場合、どのように対処しますか - グローバル・バッテリー・アライアンス(GBA)や責任ある鉱物調達(RMI)などの責任ある調達を促進している業界イニシアチブに参加していますか	- 責任ある企業同盟(RBA)行動規範 - 英国現代奴隷法
	資源効率またはエネルギー効率を改善するための技術またはプロセスを検討していますか	- どのようなイノベーションやパートナーシップを活用して持続可能なイノベーションを推進していますか - サステナビリティを推進する技術開発に、どの程度の投資を当てていますか	- 米国エネルギー独立安全保障法(EISA) - EU エコデザイン指令
規制遵守	特にサステナビリティおよび責任ある調達に関して変化する規制環境にどのように対処していますか	EU バッテリー規則などの規則にどのように対応しており、倫理的な労働慣行を確保するためにサプライチェーンの多様化をどのように進めていますか	- EU グリーンディール - OECD 紛争地域および高リスク地域からの鉱物の責任あるサプライチェーンのためのデュー・ディリジェンス・ガイダンス
技術革新と 今後の動向	精製工程のコスト削減、効率改善、環境フットプリントの削減に寄与する革新的な技術を導入していますか	どのようなイノベーション戦略を採用しており、その中にサステナビリティへの配慮は組み込まれていますか	グローバル・バッテリー・アライアンス(GBA)
	特定の精製材料の需要に影響を及ぼす可能性のある、ナトリウムイオン電池などの代替電池技術の登場に伴うリスクと機会にどのように対応していますか	新興技術がもたらし得る市場・事業環境の攪乱の可能性についてどのような見通しを持っており、進化する電池の化学組成への対応をどのように計画していますか	N/A

6.3 | セルおよびパック製造

セルおよびパック製造とは、個々のリチウムイオンセルを製造し、それを電池パックに組み立てる工程を指す。

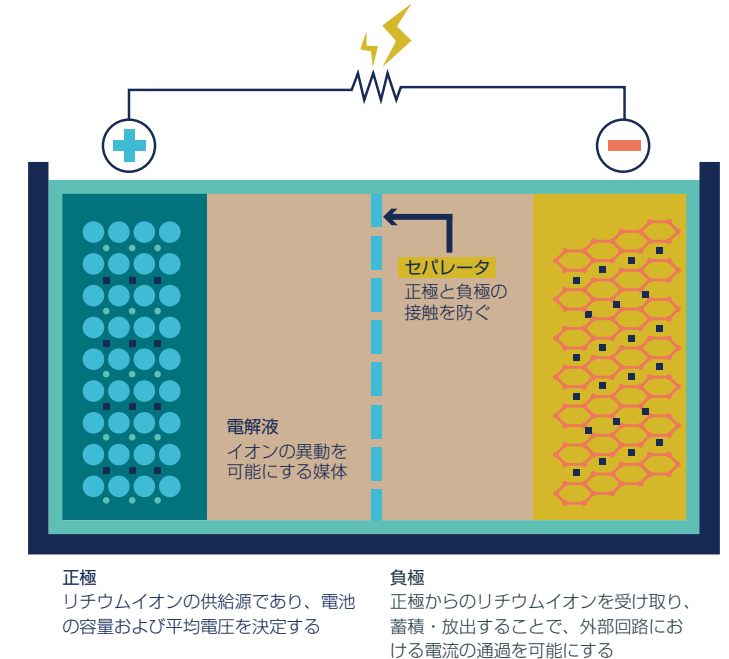


セル製造では、正極、負極、電解液、セパレータから成る電池セルを製造する。この工程では、まず電極および電解液用の材料を準備し、電極のコーティングおよび乾燥を経てから、セルを積層して封止する。

パックの製造段階ではセルを選別・試験した上で、モジュールに構成する。EV用電池パックは、一般的に5,000～9,000のセルで構成されている。セルをモジュールに構成し、セラミック筐体に収容して、熱暴走から保護する。

モジュールは、バッテリー・マネジメント・システムやその他の構成要素とともにパックに統合される。最終組立後のパックは、性能、安全性、信頼性に関する厳格な試験を受ける。

図29:セルの構成要素



出所:Green Finance Institute (2024) GFI Battery Handbook

図30:複数のセルでパックを構成

電気自動車は、数千個のリチウムイオン電池セルで駆動される



正極および負極などの電極の製造は、大手セルメーカーが主に担っている。同様に、電解液やセパレータも、こうした企業が製造するか、または外部から調達したものがセル製造プロセスに組み込まれる。

世界のセル製造能力の85%以上は、中国に集中している。¹ これを大きく支えているのが、日本、中国、韓国を拠点とする6社のサプライヤーである。⁶ 現在の中国への集中は、規模の経済によるコスト優位性、製造ノウハウ、効率性に加え、継続的な技術の進歩によって下支えされている。⁶

世界の電池需要に歩調を合わせるため、2030年までにリチウムイオン電池の製造能力は4倍近く拡大すると見込まれている。¹ 世界のサプライチェーンにおける中国の重要性は今後も続く見込みだが、欧州および米国などの他の地域でも、地域内生産能力拡大に向けた取り組みが急速に進んでいる。欧州はEV需要の増大を背景に、電池セル製造の新たな有力拠点として浮上している。韓国および中国の大手サプライヤーは、欧州や米国での製造拠点の構築を積極的に進めている。その代表的例として、スペインにおけるCATLのステランティスとの協業、LGのハンガリーでの製造拠点設立、LGとGMの米国での合併事業が挙げられる。²



正極は一般的に、正極活物質を含むスラリーでアルミホイルをコーティングして作られる。コーティングされたホイルは120℃を超える高温で乾燥させ、圧縮して厚みを均一にして適切なサイズに裁断した後、電池セルに組み込まれる。⁹⁴

電解液とセパレータは、より成熟したサプライチェーンの恩恵を受け、拡張性が高い。電解液は、一般的にリチウム塩を有機溶媒に溶解させて作るもので、電極間のイオンの移動を可能にする。セパレータは、通常ポリエチレンまたはポリプロピレンからなる薄い多孔質膜であり、正極と負極を物理的に隔てて短絡を防止しつつ、イオンの流れを許容する。電解液やセパレータの製造は高度に技術集約的なプロセスを要し、精密な工程設計と熟練した技能が必要とされる。

電池パックの組み立てや最終的なEVまたはBESSへの組み込みは、セル製造拠点または最終需要地近くで行われる。電池をセルの状態で輸入し、EV生産国で最終組み立てを実施しているケースもある。中国は依然として電池パック製造の分野をリードしているが、他の地域でEV製造が拡大するにつれ、この状況は変化していく可能性がある。

電池製造が環境に及ぼす影響のうち、特に懸念されているのがエネルギー消費とGHG排出である。電極の乾燥や溶剤の蒸発といったエネルギー集約的な工程が、GHG排出の主要な要因となっている。送配電システムの炭素強度がこれらの課題を悪化させる。化石燃料由来の電力の使用は、欧州のクリーンな送配電システムと比べて排出量が大幅に多い。

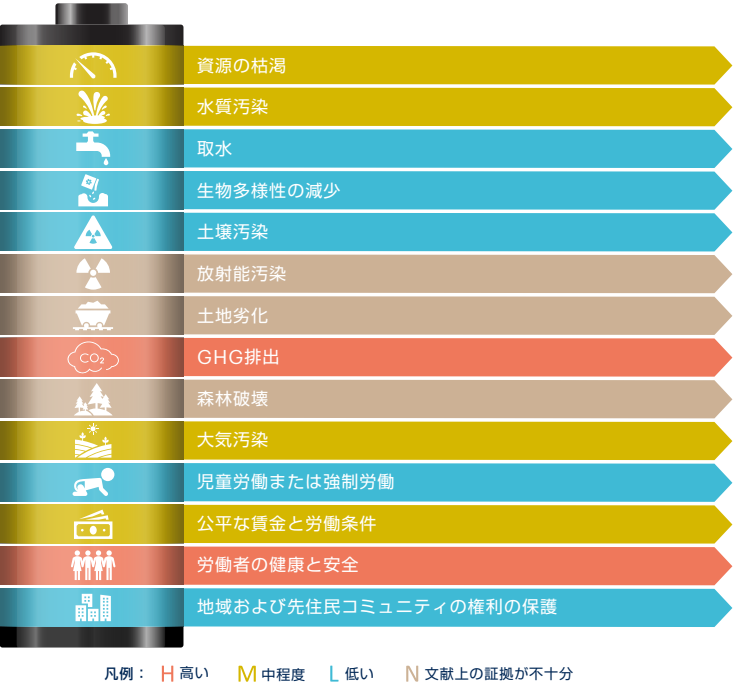
セル製造に要求される低湿度条件を維持するドライルームの運用は、もう1つのエネルギー集約的なプロセスである。⁹⁵

特に、広東省や福建省を含む中国の亜熱帯モンスーン地域のように湿度の高い地域では、除湿負荷が大きく、この課題が一段と深刻化する。さらに、新興参入国では、ドライルーム設備の確保自体が難しく、セル製造能力の拡大に対する大きな障壁となっている。

電池製造は、大気と水の汚染の原因にもなる。製造時に放出される揮発性有機化合物(VOC)や粒子状物質(PM)が大気汚染につながり、高い用水需要および化学物質を含む排水が水質汚染を引き起こす。

セルおよびパック製造における社会的リスクは、主に労働者の健康・安全に関連している。例えば、電解液の成分であるLiPF₆へのばく露は、適切な安全手順が確保されていない場合、深刻な呼吸器、皮膚、目の損傷を引き起こすおそれがある。⁹⁶ 同様に、N-メチル-2-ピロリドンなどの溶媒へのばく露は、皮膚炎を引き起こすおそれがあり、長期的なばく露は、生殖能力の低下を招くおそれがある。電池製造に伴う危険性は、25才の作業員の命を奪った、ノースボルトのSkellefteå工場での爆発事故によって悲劇的な形で浮き彫りになった。⁹⁷

図31: セルおよびパック製造に伴うサステナビリティリスク



出所: IEA, Child Labour Platform, ILO, Harvard International Review, S&P Global Market Intelligence, Benchmark Minerals, Nature Reviews Earth & Environment, Reuters, USGS, Centre on Global Energy Policy, Global Battery Alliance, National Minerals Information Center, Global Witness, Financial Times, Bloomberg, Rainforest Rescue, RAID, Amnesty International, Faraday Institution, Geneva Center for Business and Human Rights, Human Rights Watch, WEF, IIED など、および PwC Strategy&による分析

リスク軽減および投資機会

米国、欧州、アジア太平洋地域の各国政府は、中国製の電池および電池部材への依存を低減するため、国内の製造を拡大する大規模な投資を進めている。米国 IRA は、EV 税額控除 7,500 ドルのうち半額を受けするためには、バッテリー部品価値の 50% 以上が米国内、または自由貿易協定 (FTA) を締結している国で製造または組み立てられていることを条件としている。この基準は、2029 年までに 100% に引き上げられる予定である。⁶ 同様に EU 重要原材料法は、2030 年までに加工済み原材料の 40% を EU 域内から調達することが義務付けられる。⁶ 日本も国内の生産能力拡充を後押ししており、政府は最大 3,500 億円の助成金措置を講じ、電池の年間製造能力を 80 GWh から 120 GWh に引き上げる計画である。⁹⁸ こうした政策には、国内のレジリエンス (供給網の強靱性) を強化し、持続可能な製造慣行を促進する狙いがある。例えば、低炭素電力を用いれば、電池製造に伴う排出量を 38% 削減できる。² しかし、こうした取り組みに多額の資金が投じられる一方で、世界の電池製造能力は飽和状態に近づきつつあり、過剰生産や設備の低稼働に陥るリスクも生じている。⁶

電極製造の新技术に関する研究では、製造に伴う排出および副産物 (廃棄物) を削減できる見通しが立つことが示されている。新たに台頭している電極製造プロセスは、溶媒を不要にしたもので、エネルギー消費を約 30% 削減しながら、水の使用量と廃棄物の発生を最小化できるとの報告がある。^{6, 99, 100} また、このプロセスは、製造コストを削減し、スループットを高めるため、特に大規模生産にとって魅力的である。⁶ また、乾式製造法は CO₂ 排出量を大幅に削減し、環境面でのサステナビリティ向上に寄与する。この技術はまだ規模拡大の段階にあるものの、欧州および北米の先行導入企業は、既存のギガファクトリーに同製法 / プロセスを組み込み、よりクリーンでコスト効率の高い製造を求める規制や市場の要求に応えている。¹⁰¹

「セル・トゥー・パック」(Cell-to-pack: CTP) のようなイノベーションにより、製造に伴う CO₂ 排出量のさらなる削減が期待されている。CTP 設計では、セルをパック構造に組み込むことで、中間モジュールが不要になる。これにより体積効率^{xv} を向上させ、軽量化およびコスト削減を実現する。⁶ 材料および製造工程を削減できるため、GHG 排出量も大幅に削減できる。しかし、パックに組み込むことでリサイクルが困難になるため、分解および材料回収が課題となっている。

xv 体積効率とは、エネルギー貯蔵という点で電池パック内の空間がどれだけ有効活用され、決まった体積に対してどれだけ多くのエネルギーを蓄えられるかを示す。

| 4680 リチウムイオン セル

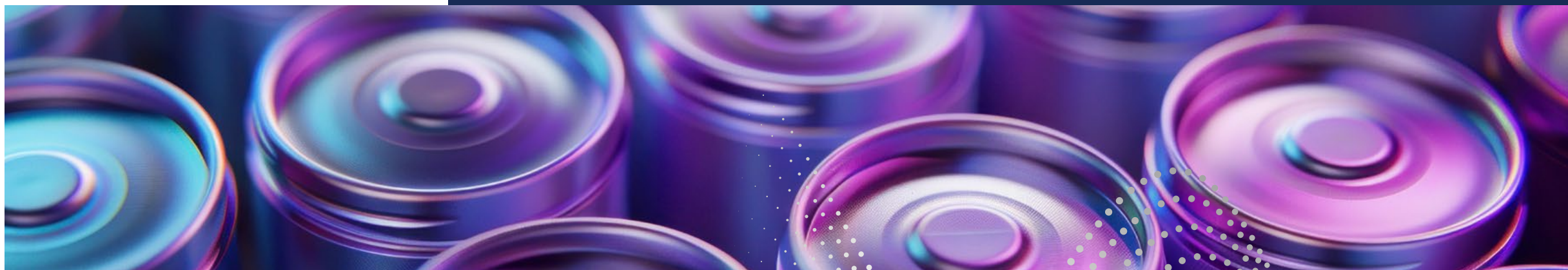
4680リチウムイオンセルは、電池技術を大きく進展させた。¹⁰² 直径46mm、高さ80mmの4680セルは、従来の2170セルと比べるとかなり大きい。¹⁰⁸ EV向けに設計されており、従来セルの5倍のエネルギー容量を持つ一方で、電池の組立工程は簡素化されている。サイズを大きくしたことで、少ないセルで同じエネルギー容量を実現し、生産工程の効率化につながっている。

もうひとつの重要なイノベーションが、タブレス電極である。^{xvi} タブレス構造により放熱性能および熱管理性が改善され、過熱リスクの低減や電池寿命の延長につながっている。

xvi 4680セルのタブレス構造では、電極と外部回路を接続していた従来の金属タブが不要になる。代わりに、電極自体が別体のタブを用いずに外部回路と接続・機能するように設計されている。

さらに、組み立てに必要なセルの数が減ったことで製造工程が簡素化し、コスト削減につながっている。

4680セルの製造施設は、太陽光や風力などの再生可能エネルギー源を使用することで製造に伴うGHG排出量も削減している。¹⁰⁸ こうした製造面での進展により、4680セルは、大規模用途向けの電池利用においてより効率的で持続可能な選択肢となっている。



製造会社との対話

投資家が製造会社にたずねるべき主な質問を表9にまとめている。

表9:製造会社との対話における質問例

カテゴリー	最初の質問	追加質問(必要に応じて)	望ましい取り組み例(ベンチマークとなる基準)
イノベーションと技術	- 新たな電池技術への投資や研究を実施していますか - 新たな製造技術を導入していますか	- どのような研究開発戦略を採用していますか - 新興技術の将来性をどのように評価していますか - この分野の進展を、長期的な目標や市場トレンドとどのように整合させていますか	EU 電池イノベーションロードマップ
リサイクル	使用済み電池の管理に伴う課題にどう対応していますか	- EU バッテリー規則などの規則にどのように対応していますか - リサイクル効率の向上に向けて、どのような協業や技術を検討していますか	- 米国電池および重要鉱物リサイクル法 - EU バッテリー規則(EU 2023/1542)
カーボンフットプリント	製造プロセスのカーボンフットプリント削減に向けて、どのような戦略をとっていますか。	- エネルギー消費量、GHG 排出量、廃棄物の削減についてどのような取り組みを実施していますか(またその詳細について) - 再生可能エネルギーは事業運用にどのように位置づけられており、カーボンニュートラル達成までのタイムラインはどう設計されていますか	- ISO14067 - 米国大気清浄法(CAA)
規制遵守	変化する規制への遵守をどのように徹底していますか	- どのような研究開発戦略を採用していますか - 新興技術の将来性をどのように評価していますか - この分野の進展を、長期的な目標や市場トレンドとどのように整合させていますか	- EU バッテリー規則(EU 2023/1542) - EU 廃棄物枠組み指令(2008/98/EC) - EU の化学物質の登録、評価、認可、制限に関する規則(REACH 規則)
社会・倫理面の考慮事項	- 電池製造に伴う社会および倫理的問題に対し、どのような対策を講じていますか - 責任ある材料調達について、どのようなアプローチをとっていますか	- サプライチェーン全体の透明性と倫理的慣行をどのような仕組みで確保していますか - 公正な労働および環境基準の遵守を立証するために、どのような認証または第三者検証が導入されていますか	- OECD 紛争地域および高リスク地域からの鉱物の責任あるサプライチェーンのためのデュー・ディリジェンス・ガイダンス - ILO 強制労働条約(C029 & C105)

07 | 規制動向

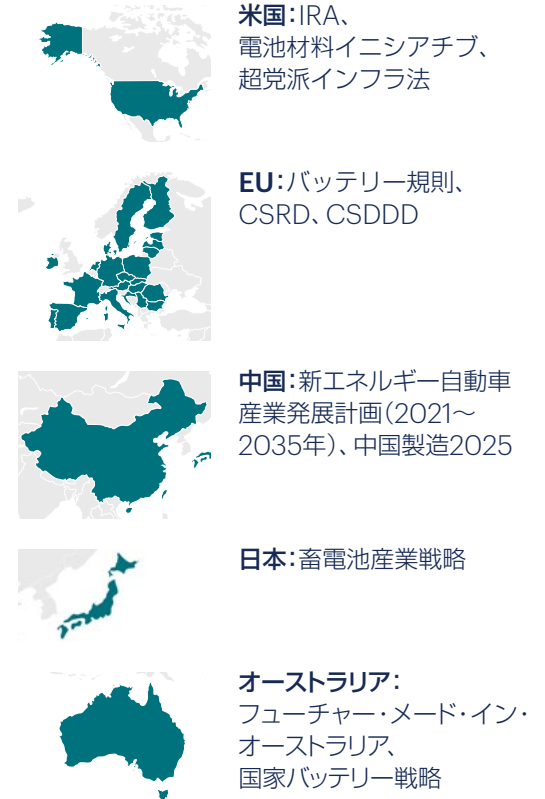
各国がエネルギー転換目標と責任ある産業成長の両立を目指すにつれて、世界各国の規制当局は、電池バリューチェーン全体におけるサステナビリティへますます焦点を当てるようになってきている。EUは、報告および透明性に関する包括的な基準に向けた道筋を公表し、この分野を主導している。一方、米国は、リサイクル能力を含む国内の電池セクターの増強を優先してきた。

規制当局は倫理的調達を促進を目指しているものの、一部では規制の執行が不十分な状況にある。規制措置は多様だが、環境保全、透明性の向上、経済発展の支援をおおむね目的としている。しかし、いくつかの国は、十分な法執行を担保しないままサステナビリティ基準を策定しているとしてこれまで批判を受けてきた。特に発展途上市場において、この課題が顕著である。

出所: IEA、Child Labour Platform、ILO、Harvard International Review、S&P Global Market Intelligence、Benchmark Minerals、Nature Reviews Earth & Environment、Reuters、USGS、Centre on Global Energy Policy、Global Battery Alliance、National Minerals Information Center、Global Witness、Financial Times、Bloomberg、Rainforest Rescue、RAID、Amnesty International、Faraday Institution、Geneva Center for Business and Human Rights、Human Rights Watch、WEF、IIED など、および PwC Strategy&による分析

とりわけ EU および米国における規制の動向や変化が、サプライチェーンの現地化と透明性の向上を促している。

図32: 主要な電池市場における代表的な規制



クリックして地域別
の詳細を見る →

課題と機会

サステナビリティ規制の台頭は、電池バリューチェーンのステークスホルダーに機会をもたらしている。デューデリジェンス強化やデータ共有の各種措置により、企業は不正行為やサステナビリティ上のギャップをよりの確に特定できるようになり、政府や消費者が企業に説明責任を問えるようになる。この透明性は、サステナブルな事業運営に対する経済的インセンティブを創出し、バリューチェーンの各段階に利益をもたらす。さらに、リサイクル関連法制は、バリューチェーンで最も環境負荷の大きい工程であり、しかも特定少数国に集中している新規鉱物採掘への依存を低減することを目的としている。国内でのリサイクル事業の進展は、地域経済を活性化し、資源に乏しい国においては重要鉱物の供給確保を図ることができる。こうした規制の施行により、透明性、監査、コンプライアンス対応に特化した、投資対象として成立し得るサービスおよびソフトウェアのエコシステムも立ち上がるだろう。

しかし、新たな規制とは完全なものではなく、欠陥がないわけでもない。電池の重要鉱物に過度に焦点を当てることで、規制の対象範囲が狭まり、その結果、マイカのようにASMで調達されることの多い高リスク鉱物が規制の網から漏れるおそれがある。デューデリジェンス要件を単なる形式的対応に終わらせず、実質的な成果につなげるためには、政府が業界と連携することが極めて重要である。

電池のバリューチェーン全体でみられる透明性の向上がサステナビリティの推進を後押ししているが、責任ある調達に関する基準や報告枠組みについて、国際的に広く受け入れられたものが存在しないことが、依然として課題となっている。

この状況の典型的な例となるのがEUバッテリーパスポートであり、効果的に実施されれば、電池のトレーサビリティおよび透明性は大幅に改善するだろう。しかし、2027年の運用開始が見込まれているにもかかわらず、データ収集に関する標準化された指標や運用方法はいまだ明確になっておらず、データの統合や性能を一貫して比較することは困難な状況にある。製造会社からは、企業ごとにデータシステムや形式が異なるため、直接的な比較が困難となり、内部抵抗など電池の健全性を示す重要なパラメータの取得および追跡が難しいとの声が上がっている。

国際的なサプライチェーンの複雑さと不透明さにより、サプライチェーン上の一部のデータは収集が困難になっている。特に、バリューチェーンの各段階における排出量データは、関与する主体が多岐にわたるため把握が難しい。コバルトがASM由来か工業的鉱山由来かを区別するなど、原材料の出所をたどるといった基本的な作業さえも、中間業者がASM産鉱物を責任ある調達による鉱物に混合することがあるため、容易ではない。さらに企業は、競争上および機密保持の懸念からデータ共有に消極的であり、電池性能に関する情報を戦略的資産と位置付けていることも、その一因となっている。こうした障壁を克服するには、データアクセス権に関する明確な保証について、その内容を明確化する必要がある。

08 | 電池の未来

1990年半ば以降、負極製造の第一選択肢とされてきた黒鉛は、リチウムイオン電池の主要な構成要素の1つである。



新たな電池技術

電池技術の進歩には、サプライチェーンとサステナビリティリスクを大幅に軽減し、事業コストを削減するとともに、市場需要を高める可能性を有している。世界的な電池需要の急増が、革新的なセルの構成要素技術の研究を後押ししている。他方で正極活物質の進展は、現行技術が陳腐化して資産が座礁化するリスクを踏まえると、投資家に慎重姿勢を促し得る。とはいえ、セルの構成要素が持つ本源的な価値に支えられ、製造施設は、再投資が必要となる前に通常は減価償却を完了する。イノベーションは、既存の投資への脅威ではなく、電気自動車用電池市場を前進させるための機会として捉えるべきである。

「ギガファクトリーの運営に多額の資本および操業コストを要するということは、設備・施設投資が全面的な刷新ではなく、生産ラインの段階的な変化に向かう傾向にあることを意味する。大規模電池メーカーは、必然的に常に巨額の設備投資が必要になるため、高いリスクを伴う全面刷新よりも、時間をかけて設備資産のごく一部を更新し、漸進的に改善していく方向を目指す。」

UKBIC マネージングディレクター、Jeff Pratt氏
(出所:GFI Battery Handbook)



ここでは、次世代技術の例を取り上げる。

リチウム硫黄電池:

重量、コスト、エネルギー密度において顕著な利点を有し、現行の電池技術の2倍のエネルギー密度を達成できる可能性がある。¹²⁵ この技術は、大型車、近距離航空機、定置型エネルギー貯蔵にも適合し得る。リチウムイオン電池と化学的には近いものの、リチウム硫黄の製造は依然として初期段階であり、産業規模での量産を可能にするまでには相当程度の開発がなお必要である。

コバルトフリーの正極:

NMC系の正極材料は、ニッケルの比率を高めつつ、マンガンとコバルトの含有を低減する方向へと着実に進化してきた。例えばNMC811は、組成としてニッケル80%、マンガン10%、コバルト10%からなる。業界の長期的な目標は、コバルト使用をさらに最小化することであり、NMC9XX(ニッケル90%台)セルの開発も視野に入れている。

ナトリウムイオン電池:

この新規な技術動作原理は、リチウムイオン電池に近いが、電荷担体にはリチウムではなくナトリウムを用いる。すでに研究段階を終え、ナトリウムイオン電池の製造拠点が約30件、稼働、計画、または建設中であり、その多くは中国に集中している。広範な普及にとっての主な障害は、産業規模のサプライチェーンを構築するのに要する時間であることに変わりはない。一方でナトリウムイオン電池にはいくつかのメリットがある。リチウムイオン技術と類似しているため、大規模な改造を伴わずに既存の製造ラインへシームレスに統合できる。エネルギー密度が低く、そのため用途は、比較的航続距離が短い都市向け車両や定置型エネルギー貯蔵システムに限られるものの、ナトリウムイオン電池はコスト効率の高い代替手段となり得る。ナトリウムは資源量が豊富で価格的にも入手しやすいうえに、稀少な原材料への依存を軽減できるという点が魅力となっている。

固体電池:

固体電池は、従来のリチウムイオン電池に代わる有望な選択肢として注目を集めつつある。液体ではなく固体の電解質を用いることで、エネルギー密度や安全性を向上させるとともに、電池寿命の長期化を実現している。固体電解質は、負極と正極を隔てるセパレータとしても機能するため、多様な活物質の利用が可能となり、安全性や性能、コスト効率のさらなる向上につながる可能性がある。さらに、固体電池の製造では、既存のリチウムイオン電池の製造設備の最大70%を再利用できるため、座礁資産のリスク軽減につながる。こうした可能性にもかかわらず、固体電池の採用には、高い製造コスト、複雑な製造プロセス、量産化や生産規模の拡大が難しいといった課題がある。しかし日本や米国などの国々は、大手企業とともに固体電池技術の開発を進めている。

| 電池の リサイクル技術と 材料の回収

電池リサイクルにおける画期的な進展が、使用済み自動車用電池のリサイクルの在り方に大きな変革をもたらしている。EV製造では、重要な材料を再利用する持続可能なモデルが確立されつつある。このモデルでは、リチウム、ニッケル、コバルト、銅といった価値の高い金属を使用済みリチウムイオン電池から回収し、電池製造のサプライチェーンに再び組み込んでいる。2023年だけでも約10万台の車両に供給できる規模に相当する10GWh分の電池がリサイクルされる見込みであり、新たな採掘需要の減少、環境への影響の軽減、循環経済の促進に寄与すると期待されている。¹²⁶

このリサイクル技術は多様な材料を回収できるため、EV業界のサステナビリティ向上に寄与している。特に北米では効果をあげており、この技術によってリチウムイオン電池の70%以上がリサイクルされている。¹²⁷ 重要材料の安定した国内供給が確立され、北米電池サプライチェーンのレジリエンスと安定性強化につながっている。

この技術はリサイクルにとどまらず、高品質な正極活物質の製造にも貢献している。再生材および新規原料由来のリチウム、ニッケル、コバルトを組み合わせることで、年間100万台以上のEVを駆動する正極の製造を可能にしている。こうした材料は、厳格な業界基準に適合しており、持続可能な電池製造を量産規模へと拡大していく上で不可欠となっている。

この技術は、電池材料の回収と再投入に向けた持続可能な解決策を提供することで、従来の採掘に伴う環境負荷を軽減し、電池サプライチェーンを強化するとともに、再生可能エネルギーを基盤とする将来への移行を加速させている。



循環型のバリューチェーン

電池需要の急増に伴い、原材料への需要も飛躍的に拡大すると見込まれる。こうした中、政府や消費者からは、企業に対し、新規採掘や枯渇が進む天然資源への依存を抑え、材料を持続可能な形で調達するよう求める圧力が強まっている。特に注目を集めつつあるのが、使用済み電池からの資源回収である。原材料消費の抑制を目的とした各種規制により、循環型バリューチェーンへの移行が加速している。これを受けて企業は、マテリアルフットプリントの削減と、新たな規則に沿った事業運営の構築に取り組んでいる。

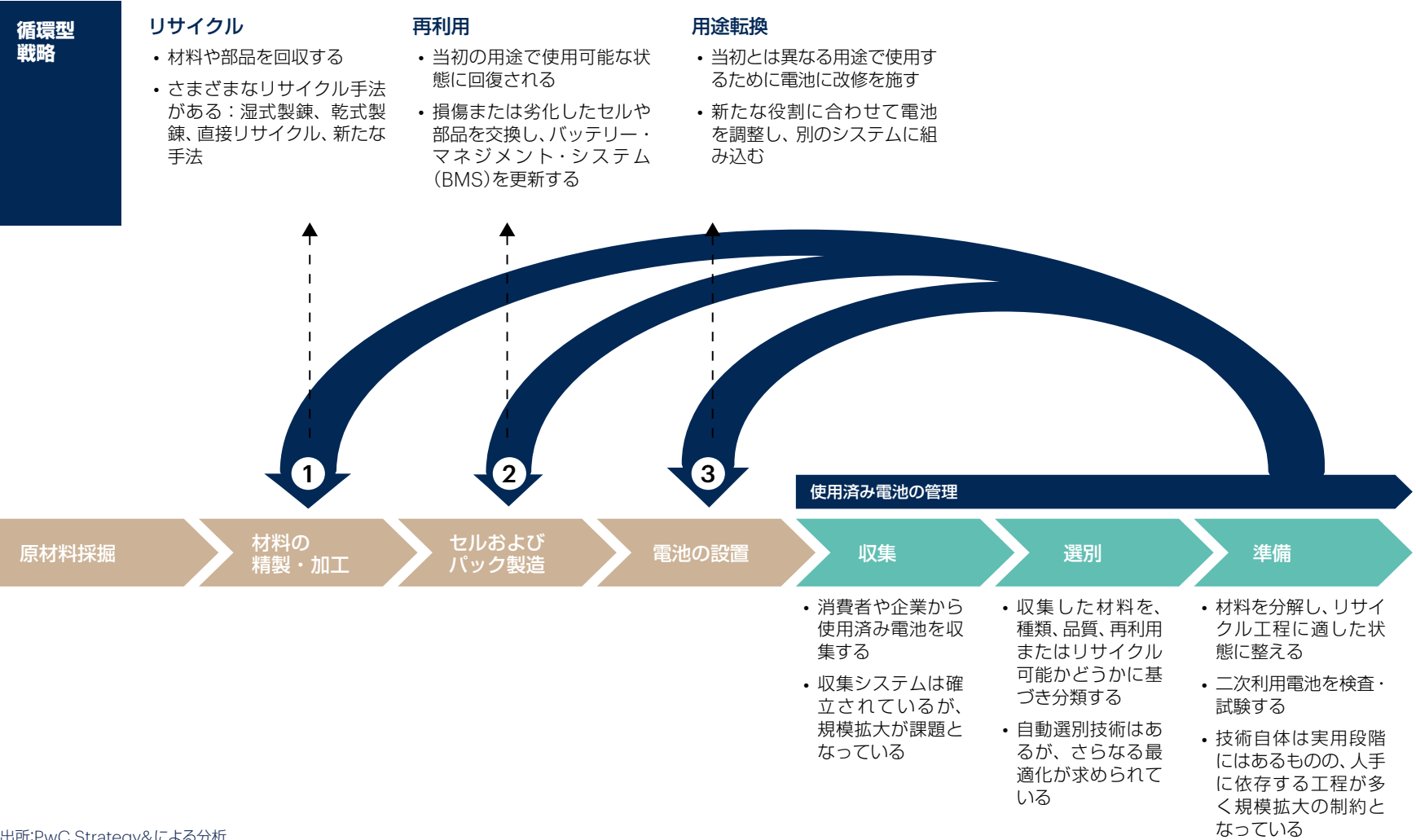
現在、回収された電池がサプライチェーンで用いられている割合はごくわずかである。使用済み電池の回収率はおよそ5%~60%とかなりばらつきがある。¹²⁸ こうした回収率の違いにかかわらず、リチウムイオン電池の流通量が増加することで、リサイクル可能な材料の量は、今後確実に拡大していく。EVおよびBESS向け電池の使用済み品が回収可能になる量の増加に伴い、リサイクル能力は3倍以上に増えると期待されている。^{xvii}

リサイクル材使用の拡大は、電池製造に伴う環境負荷の低減に寄与するとともに、電池産業を持続可能な形へと転換していく上で、重要な役割を果たす。

使用済み電池の回収に向けては、さまざまな循環型戦略が存在する。電池の扱いは、リサイクル、再利用、用途転換（リパーパス）といった選択肢の中から、残存容量や性能、経済性、規制や市場のニーズを踏まえて決定される。電池は分解して部材をリサイクルし、新たな電池の製造に活用することができる。また、修理や改良を施した上で再投入することも可能であり、こうした運用はProduct-as-a-Service（PaaS）モデルにおいて一般的である。稼働したEV電池は8~10年の使用を経ると、一般的に初期容量の20~30%を失い、走行距離の低下を招く。¹²⁹ もっとも、この程度の容量低下は定置型蓄電用途では大きな問題とはならず、用途転換（リパーパス）を経た電池でも十分に機能する。

xvii 2024年時点の世界的な電池リサイクル能力は450GWh。IEAは2030年までに1550GWhに達すると予想している。

図33:使用済み電池のバリューチェーン



出所:PwC Strategy&による分析

表10:電池材料のリサイクル工程

	乾式製錬法	湿式製錬法	直接リサイクル
説明	電池を高温で熔融処理し、ニッケル、コバルト、銅からなる合金を生成する	- 電池を破砕し、正極材(「ブラックマス」)を他の構成部材から分離する - 分離した正極材に溶液を用いて金属を浸出させる	- 他のプロセスでは一般的な製錬や浸出を行わず、「ブラックマス」から正極材を回収する - 機械的処理を中心に実施する
メリット	- 商業規模で実証済み - ニッケルおよびコバルトの回収では非常に効果的 - セルの化学組成が変わっても影響は限定的	- 材料の選択的な回収 - 製品の純度が高い - ニッケル、銅、コバルト、鉄に加え、リチウムと黒鉛の回収も可能	- 高価値の正極活物質の回収 - リサイクルプロセスの簡素化
デメリット	- カーボンフットプリントが大きい。エネルギー消費量と炭素排出量が多い - リチウムおよびマンガンがスラグに多く移行し、回収損失が大きい	- すべての鉱物で高い回収率を実現する手法だが、商業規模での導入には至っていない - 薬剤(酸、水、溶媒など)を大量に使用し、排水処理が必要 - 複雑な多段階のプロセス	- 商業的に実証されておらず、商業規模での実用性は確立していない - 正極の化学組成が変化すると技術が陳腐化する可能性がある

電池バリューチェーン上の各段階で、事業運営に循環性(サーキュラリティ)を組み込む技術や戦略の採用が進んでいる。循環性は設計段階から始まり、企業は効率的なリサイクルと再利用を可能にするために、分解が容易で材料の回収がしやすい電池を開発している。CATLの交換式EV電池「choco-swap」や、BYDのバッテリー交換に対応した電池パックに代表されるモジュール化設計は、電池の修理を容易にし、車両の修理時間を短縮するとともに、部品の互換性を向上させている。これにより、OEMはプロセスの標準化を図ることができ、バリューチェーンの複雑性が低減される。一方、EUバッテリー規則など規制面からも、設計へのリサイクル性の組み込みを求める要請が強まっている。同規則は、2030年までにリチウムイオン電池の回収率を最低70%以上とすることを義務付けている。¹ OEMはこれを受け、リサイクル業者や供給業者と契約してクローズドループ型システムを導入し、新規採掘資源への依存からの脱却を進めている。



電池業界は、使用済み電池のより良い管理を目指してイノベーションを積極的に活用している。使用済み電池の処分では、電池を有害廃棄物専門の処理施設に搬送し、安定化および物理的破壊を行った上で、環境汚染を防ぐため、安全な処分場への埋立または管理された焼却によって処分されている。バッテリーパスポートやブロックチェーンなどのデジタル追跡技術は、電池の性能、品質、取り扱いに関する詳細データを提供するため、使用済み電池の管理に役立つ。電池業界では、コスト削減に向けたイノベーションの活用も進んでいる。例えば、外観的特徴に基づいて電池を自動識別・選別するAIシステムが、非効率な手作業による選別手法に取って代わりつつある。¹³⁰ 材料組成に基づいて電池を効率的に識別・分離する磁気共鳴(磁気特性)システムも試験段階にある。¹³¹

各国政府が循環性を高める政策を導入しており、その結果、使用済み電池の市場が拡大している。この取り組みをリードするのが中国であり、使用済みEV電池から、リチウムは最低90%、ニッケル、コバルト、マンガンはそれぞれ98%の回収を義務付ける厳格なリサイクル規制を導入している。¹³² 中国は、EVセクターおよびリサイクル能力への早期投資を背景に、世界初の循環型電池バリューチェーン構築を実現する可能性が高い。これは、リチウムおよびニッケルでは欧州および米国に先行して約10年、コバルトでは約7年早く、このマイルストーンを達成することを意味する。¹³³ 今後が期待される中国のリサイクル能力の拡大見通しは、電池製造工場の近くにリサイクル施設を戦略的に設置していることによってさらに下支えされている。加えて、今後10年間は製造スクラップを主要な投入材として活用する方針である。同国は依然として世界最大の電池生産国であり、製造工場への近接立地は中国のリサイクル業者に競争優位性をもたらしている。

EUも画期的なバッテリー規則により循環性を推進している。バッテリー規則は、EV電池を含む電池全般の収集、資源回収、リサイクルに関する義務を明確に定め、持続可能な生産の促進、環境負荷の低減、そしてEUの国際競争力強化を目指している。2031年以降、EU域内で販売される電池には、再生材(リサイクル材)の最低含有率が義務付けられ、当初はコバルト16%、リチウム6%、ニッケルについては段階的に基準が適用される。また、同規則では、2030年までにリチウムイオン電池のリサイクル効率を70%とすることを目標に定めるとともに、EUの重要原材料の供給についてその多様化と安定確保を図っている。

構想段階から循環性の考慮を設計に組み込んだ電池パックは、分解、修理、リサイクルが容易な製品を実現する。こうした設計アプローチは、持続可能な材料、モジュール化設計、標準化された部材の活用を重視し、効率的なリサイクル工程と再用途化を促進する。循環原則を設計に組み込むことで、製造会社は廃棄物を最小限に抑え、資源を保全するとともに、より持続可能でレジリエンスの高い経済に貢献できる。この設計は、使用済み電池パックの効果的な再用途化(リパーパス)と、貴重資源の回収を可能にし、循環経済の発展を支える。

EVの普及加速に伴い、2030年代のリサイクル市場は大幅に拡大するとみられる。EV用電池の平均寿命は約10年であり、現在のEV販売台数の急増を踏まえると、2030年代に使用済みとなるEV用電池の発生量は大幅に増加する。この急増に対応するため、世界のリサイクル能力は2023年の300GWhから2030年には1,500GWh超へと拡大すると予測されている。中国は、世界最大のEV製造国・消費国という規模を背景に、約70%のシェアで市場をリードすると予測される。欧州と米国はそれぞれ約10%を占める見込みである。¹³⁴

電池の用途転換 (リパーパス)

使用済み EV 電池を電動三輪自動車(リキシャ)の動力源へと転用するアプローチが試験的に実施されている。¹³⁵ ある自動車メーカーは、試験用 EV で使用した電池モジュールを電動リキシャに用いる試験的プロジェクトを開始した。サステナビリティと循環経済(サーキュラーエコノミー)を促進する試みである。同メーカーはスタートアップ企業と提携し、電動 SUV に搭載されていた電池モジュールを、インドでリキシャの動力源として活用している。

このような取り組みは、電池のライフサイクルを延ばす。すなわち、EV 用途では実用性を失いつつある電池であっても、航続距離や出力要件が比較的低い軽量車向けであれば依然として相応のエネルギー貯蔵能力を有している点に着目し、その残存容量を活用するという取り組みである。ライフサイクルを延ばし、資源活用を最適化し、発展途上地域での持続可能な輸送を促進することで、本取り組みは、排出量の削減および都市部の大気質改善に寄与している。

本取り組みは、低炭素型の電動リキシャの普及を支援することで、都市部の汚染低減にも寄与している。具体的には、従来の汚染を伴う車両の代替として設計された太陽光リキシャの電力要件を満たすよう、使用済み EV 電池モジュールの試験および再設定を行っている。その後の段階では、最終的なリサイクルに先立ち、残存する電池容量を LED 照明などの用途に充てる可能性も想定されている。

用途転換の3つのメリット

原材料・エネルギーの節減

電池のライフサイクルが延びるため、新規の電池生産に対する必要性が低下する。これにより、新規生産に伴う原材料およびエネルギーの使用が節減される。

GHG 排出量および カーボンフットプリントの低減

新たに電池を製造する代わりに既存の電池モジュールを用途転換することで、高いエネルギー需要や GHG 排出に由来する電池製造に伴うカーボンフットプリントを大幅に低減できる。

電子廃棄物の低減

自動車用途では不適合となった電池の有用な用途転換を見いだすことで、深刻化する電子廃棄物の問題やそれに伴う環境的リスクを緩和できる。



09 | 投資家への示唆と取り得る行動

エネルギー転換を加速させる取り組みは、業界の健全で倫理的な成長とのバランスを取り、サステナビリティへの配慮を損なわないようにするとともに、長期的な株主価値を確保する必要がある。

投資家は、電池サプライチェーンのサステナビリティを確保する上で中核的な役割を担う。変化する消費者意識、規制圧力、気候リスク、そして技術の進歩は、サステナビリティを「倫理的要請」から「事業上の必然」へと転換させつつある。投資家は資産を戦略的に配分することで、サステナビリティを高めつつ長期的価値を創出する変革を後押しできる。具体的には、業界の環境フットプリントを縮減する企業への資金提供や、サステナビリティを損なう慣行に結びつく資産からの投資撤退（ダイベスタメント）などが考えられる。直ちに行動すべき理由は明白である。電池バリューチェーンにおけるサステナビリティの重要性を軽視する投資家は、市場および社会の期待の双方に後れを取るリスクを負う。

新たな投資家も既存投資家も、以下の行動を取ることができる。

01 | 倫理面・環境面を含むサステナビリティ関連事項について、企業開示の一層の拡充を働きかける

02 | バリューチェーンの前段階におけるサステナビリティリスクへの対応を企業に求める

03 | 企業、他の投資家、政府、NGOとの連携を深め、イノベーション、サステナビリティ、知識共有を推進する



01

倫理面・環境面を含むサステナビリティ関連事項について、**企業開示の一層の拡充を働きかける**

透明性と標準化の確立された サステナビリティ報告は、サステナビリティ重視の投資を呼び込む上で不可欠であり、電池バリューチェーン全体での説明責任の確保につながる。投資家は、先行企業と出遅れ企業を見分け、グリーンウォッシュを防ぐことができるよう、明確で比較可能かつ信頼性の高い開示を求めるべきである。透明性が確保されれば、サステナビリティ重視の投資家は、グリーン実績に優れた企業を見極められる一方、他の投資家も、サステナビリティを損なう慣行を不用意に支持することなく、エネルギー転換に不可欠な企業を支援できるようになる。主に以下のような機会がある。:

• デューデリジェンスの強化

- 企業に対し、ライフサイクル全体を対象とするライフサイクルアセスメント(LCA)の実施を求めるとともに、誰もが利用できる形式で結果を公表することを促す。これにより、社会に対する説明責任の履行と信頼の向上につなげる。
- 政府、他の企業、NGOと連携し、標準化されたデューデリジェンス枠組みの策定を働きかけ、企業横断での比較可能性を高める。
- 厳格なデューデリジェンスを実施するリーディング企業に対するインセンティブの導入を後押しする。
- 定期的な第三者監査(保証)の実施を働きかけ、開示内容の正確性と真正性を確保する。

• 報告基準の強化

- 要件や手順が可視化されたプロセスおよびプラットフォームの開発を促し、ステークホルダーによるデータ収集、報告、コンプライアンス対応を簡素化する。
- EUでは、官民協力体制によるバッテリーパスポート導入の加速化を支援する。
- 世界的には、企業に対し、グローバル・バッテリー・アライアンスのバッテリーパスポートなどの取り組みや広く認知されている報告枠組みへの対応を促す。
- 企業と対話し、自主的なバッテリーパスポート導入に向けて明確な目標設定を促す。



02

企業に対し、バリューチェーンの全段階におけるサステナビリティリスクに取り組むよう促す

投資家は、電池バリューチェーンのあらゆる段階にある企業に、サステナビリティへの取り組み強化を促すことができる。報告を強化すれば、サステナビリティ対応が遅れている企業が明らかになり、改善に向けた圧力が働く一方、先行する企業は市場から評価される。

バリューチェーンで優先すべき主な領域

- **原材料の採掘および精製・加工:**採掘慣行に対する監視を強化することにより、環境劣化を最小化し、労働者および地域住民の権利を擁護する倫理的な調達を確保する。
- **サプライチェーンの可視化(透明性):**サプライチェーン全体のトレーサビリティを強化し、人権侵害や高炭素プロセスなどのサステナビリティリスクを特定して対処する。
- **製造工程:**電池製造により厳格なサステナビリティ基準を導入し、排出量および廃棄物を削減しつつ、公正な労働慣行を推進する。
- **使用済み電池の管理:**リサイクルおよび再利用を優先することで、環境負荷を低減し、循環経済(サーキュラーエコノミー)の原則を支援する。
- **物流(輸送・配送):**電池材料や製品の輸送・配送に伴うカーボンフットプリントを特定し、管理・低減するとともに、低炭素な輸送・配送オプションの採用を重視する。

投資家が企業に推奨すべき一般的原則

- サステナビリティリスクをビジネス上の重要課題と認識し、企業戦略に組み込む。
- 責任ある調達を確約し、ポリシースタートメントや同等の形式で明文化する。
- 以下に関して期限付きの目標を設定する。
 - バッテリーパスポートなどの規則に整合した、サプライチェーン全体のトレーサビリティを確保する。
 - サプライヤーが自身のサステナビリティ関連の影響を管理し、対応できるよう支援する。
- 計画の実行・進捗状況を監督するガバナンス枠組みを構築する。
- 責任ある調達を目指す確約および目標に対する進捗状況を測定・評価する。

表11:投資家がバリューチェーン上の企業に投げかけることができる、サステナビリティへの取り組みを評価し、行動を促すための質問を示している

表11:企業にサステナビリティリスクの最小化を促すための一般的な質問

	最初の質問	追加質問
認識	• 自社の事業活動に伴うサステナビリティリスクを理解し、重要課題として認識していますか	
コミットメント	• 事業のサステナビリティを高めるための正式なコミットメントを設けていますか	• そのコミットメントは実行可能で達成可能な内容ですか • そのコミットメントは期限付きですか • そのコミットメントは第三者による検証を受けていますか
リスク評価および管理	• 事業活動に伴うサステナビリティ関連の影響を管理するため、現在どのような戦略を採っていますか • 企業のフットプリントをさらに削減するため、どのような取り組みを進めていますか	• これまでに実施している具体的な対策と、その測定可能な影響について例を挙げて説明できますか • 影響管理の取り組みを進めるにあたり、地域コミュニティやその他のステークホルダーをどのような形で関与させていますか
ガバナンス	• 戦略の実行・進捗状況を監督するガバナンスの枠組みについて概要を示していますか	
報告	• 環境への影響を追跡し、報告していますか • 労働者および地域コミュニティに対する社会的影響を追跡し、報告していますか	• どのような報告基準を採用していますか • 報告内容にアクセスできるのは、バリューチェーン上のどの関係者ですか

ボックス A – 鉱物採掘会社との対話

サプライチェーンの複雑性、特定地域における透明性の欠如、そして大手採掘会社の規模と影響力は、投資家が実質的な改革を実現しようとする際の重大な課題となっている。採掘産業におけるサステナビリティを促進するため、投資家は絞った戦略を採用し、透明性を促進するとともに、投資家間の連携による行動を梃子として用いる必要がある。

投資家ができること：

- ・ 尾鉱および廃棄物管理の実務について、尾鉱管理に関する国際産業規格 (Global Industry Standard on Tailings Management: GISTM) に整合させた開示を促す。
- ・ すべての採掘資源を追跡・証明するための管理システムの導入を促す。
- ・ 土地修復を通じた生物多様性の保全に関する確約を促す。
- ・ 資源消費量および炭素排出量を低減する技術への投資を支援する。
- ・ 明確な脱炭素目標の設定、およびそれを実現する戦略の策定を支援する。

投資家が鉱物採掘会社にたずねるべき主な質問は**43ページ**を参照のこと。

ボックス B – 精製会社との対話

革新的な技術や手法の開発および商業化には多額の設備投資が必要となるが、投資家は、精製会社による段階的な改善の実行を促すことで進展を後押しできる。

投資家ができること：

- ・ 化石燃料駆動のシステムを電化にすることを促す。
- ・ 再生可能エネルギーソリューションが最も実行可能で効果的な地域・事業においてその組み込みを促す。
- ・ 資源利用の最適化と環境へ影響の最小化を目的として、実証済みの技術・手法への投資を奨励する。

投資家が精製会社にたずねるべき主な質問は**53ページ**を参照のこと。

ボックス C – 製造会社との対話

製造会社は、自社の操業においてはサステナビリティへの確約と取り組みを一層強化しているが、その責任の範囲はバリューチェーン全体に及ぶ。上流では責任ある調達を徹底する一方で、下流ではリサイクル性を織り込んだ製品設計を行い、製品が効果的に再資源化されるよう、回収・選別・再資源化の仕組みを積極的に支援すべきである。

投資家ができること：

- ・ 倫理的調達基準の遵守および原材料の起源 (例: 鉱山・国・地域) に関する透明性を確保するため、製造会社に対し定期的なサプライチェーン監査の実施を求める。
- ・ 材料の回収率目標を設定し、リサイクルのイノベーションを支援することで、リサイクル可能性を高める製品設計への改善を促す。
- ・ 投資判断を、使用済み製品の回収・リサイクルを効果的に行うための仕組み導入に関する製造会社の進捗状況と連動させる。

投資家が製造会社にたずねるべき主な質問は**59ページ**を参照のこと。

03

企業、他の投資家、NGO、政府機関との連携を通じて、イノベーションを促進し、持続可能な慣行を支援するとともに、知識共有を後押しする

投資家は、持続可能な電池バリューチェーンの推進に注力する他の投資家と連携し、リソースや知見を結集することで、自らの投資ポートフォリオの枠を超えて影響力を高めることができる。

投資家は、実効性のある投資家間の共同の取り組みを始めるために、以下の行動を検討すべきである。

- 共通の目標の設定:電池バリューチェーンにおけるサステナビリティ向上に向けて、明確で共有された目標を定め、参加メンバー間の方向性の一致を確保することで、連携による影響力の最大化を図る。

- 連携による影響力の活用:参加主体が結集した資金力と影響力を活用し、企業や政策立案者に働きかけることで、サステナブルな取り組みの促進とサステナビリティに関する基準の引き上げを後押しする。
- リソースと専門知見の共有:サステナビリティの実装を強化するために、メンバー間の知識交換を促す。具体的には、デューデリジェンス、リスク評価、インパクト測定におけるベストプラクティスの共有を図る。
- 共同アドボカシーの実施:政府、業界団体、ステークホルダーに対し、メッセージを統一した上でキャンペーンを調整・展開し、バッテリーパスポートや持続可能な調達要件などの規制措置を促進する。
- 進捗の監視および報告:標準化された指標および報告の仕組みを構築し、企業間でインパクトを横断的に把握できるようにすることで、透明性と説明責任を担保しながらサステナブル投資のビジネス上の妥当性を示す。

ボックスD:Climate Action 100+

Climate Action 100+は、持続可能な事業慣行の推進に注力する投資家イニシアチブである。世界最大規模のGHG排出企業に対し、気候変動への影響についての説明責任を果たすよう要求する。同イニシアチブは、地域ワーキンググループによる協働体制で運営されており、これらのグループは、各地域の実情に即したリソース、ガイダンス、(企業への)働きかけ戦略を参加投資家に提供している。主な目的は、企業に対し、実効性のある気候ガバナンスの採用を促し、2050年までに(可能であればそれ以前に)ネットゼロ実現を確約させ、気候関連財務情報開示タスクフォース(TCFD)などの枠組みに沿った開示の強化を促すことである。Climate Action 100+は、参加投資家の連携による影響力を活かし、企業との実効性のある対話を促進して、世界全体で進む低炭素経済への移行に合致する事業運営を促している。

Climate Action 100+は、株主提案、ネットゼロ評価、政策アドボカシー、企業エンゲージメントなどさまざまな手段を用いて、企業のGHG排出量削減を目指している。具体的には株主提案を活用し、企業が気候リスクに対処し、持続可能な事業慣行を採用するよう促している。また、詳細なネットゼロ評価を実施し、企業の気候目標に対する進捗状況を評価することで、投資家にとって行動に結びつく示唆を提供している。さらに、より強力な気候関連の政策・規制の整備を積極的に提唱するとともに、政府や業界のステークホルダーと連携し、企業の事業慣行が世界的な気候目標と整合するよう働きかけている。Climate Action 100+は、一貫性があり協調的な企業エンゲージメント(企業との対話)を通じて、説明責任と透明性を高め、企業が環境負荷の低減に向けて実効性のある対応を確実に講じるよう促している。

その他の主要なグリーン投資家イニシアチブおよび企業行動を促す団体には、P80 Group、カーボン・ディスクロージャー・プロジェクト(CDP)、国連環境計画・金融イニシアチブ(UNEP FI)、責任投資原則(PRI)ネットワーク、ネットゼロ・アセットオーナー・アライアンス、気候リスクに関する投資家ネットワークなどがある。

10 | 注記

重要なお案内

本資料は、香港およびシンガポールを含む配布先の法域において定義される、プロフェッショナル投資家(Professional investors)、洗練された顧客(Sophisticated clients)、ホールセール顧客(Wholesale clients)、または機関投資家(もしくはこれに相当する者)のみを対象としたものであり、その他の者は、本資料に依拠すべきではない。本資料は情報提供のみを目的として提供されるものであり、投資または財務に関する助言、資産運用サービスの提供または申込み、有価証券の購入、保有、もしくは売却に関する推奨、募集、勧誘を行うものではなく、また、これらのいずれかに関連して作成されたものではない。

本資料は、いずれかの国の居住者または市民、あるいは特定の種類の個人のうち、当該者による本資料へのアクセスを許容するために、ファースト・センティア・インベスターズグループが当該国の法令・規制要件に従うべく登録、届出、ライセンスまたは承認の申請、その他の手続きを要する場合を対象として作成・配布されたものではなく、また、これらの者による閲覧を意図したものでもない。

本資料は、投資リサーチに該当しない。従って本情報は、独立した投資リサーチを促進する法令上の規定に従って作成されたものではなく、投資リサーチの公表前に取引を行うことを禁止するいかなる規制の対象にもならない。本資料に含まれるリサーチは、ファースト・センティア・インベスターズグループが自社の目的のために取得したものであり、同社が当該リサーチに基づき行動している可能性がある。

個別銘柄の言及(言及されている場合)は例示のみを目的としており、当該銘柄の売買または保有の推奨とみなされるべきではない。本資料に記載のすべての有価証券は、いずれかの時点でファースト・センティア・インベスターズグループおよび三菱UFJ信託銀行(以下、「当信託銀行」)、または三菱UFJフィナンシャル・グループ(以下、「MUFG」)のポートフォリオの保有銘柄であった、または保有銘柄ではなかった可能性があり、保有銘柄はその後変更される可能性がある。

本資料に記載の情報は、信頼できかつ信用のおける情報源から入手したものであるが、ファースト・センティア・インベスターズグループ、当信託銀行およびMUFGは、本資料に含まれるいかなる情報の正確性、完全性(網羅性)または信頼性についていかなる種類の表明または保証も行わない。本資料に記載された情報および見解は、作成者のものであり、必ずしもファースト・センティア・インベスターズグループ、当信託銀行またはMUFGのものではない。本資料に記載された意見は予告なく変更される可能性がある。本資料の情報への依拠および利用は読者自身の判断に委ねられる。法律により認められる範囲において、MUFG、

ファースト・センティア・インベスターズグループおよびそれらの関連会社は、本資料への依拠または使用に起因して生じるあらゆる損失または損害について一切の責任を負わない。

本資料は、ファースト・センティア・インベスターズグループ、当信託銀行、ならびに該当する場合には第三者の知的財産権を有するものである。これらの者は、本資料に含まれるすべての情報およびコンテンツ(文章、データ、図表、ロゴを含むが、これらに限定されない)の知的財産権その他一切の権利を留保する。

「当社」または「当グループ」とは、MUFGを最終親会社とするグローバルな資産運用グループであるファースト・センティア・インベスターズグループを指す。ファースト・センティア・インベスターズグループは複数の法域に所在する複数の法人から構成されている。

英国の読者向けには、本資料は、英国金融行動監督機構(FCA)の認可および規制を受けるFirst Sentier Investors (UK) Funds Limited(ファースト・センティア・インベスターズグループ)により発行されている。登録所在地:Finsbury Circus House, 15 Finsbury Circus, London EC2M 7EB。

11 | 略語一覧

ASM	零細・小規模採掘
BESS	バッテリーエネルギー貯蔵システム
CDP	カーボン・ディスクロージャー・プロジェクト
COP	締約国会議
CSDDD	企業サステナビリティ・デューディリジェンス指令
CSRD	企業サステナビリティ報告指令
DRC	コンゴ民主共和国
EV	電気自動車
FSI	ファースト・センティア・インベスターズグループ
GHG	温室効果ガス

IEA	国際エネルギー機関
INCR	気候リスクに関する投資家ネットワーク
IRA	インフレ削減法
LFP	リン酸鉄リチウム
MUFG	三菱 UFJ フィナンシャル・グループ
NMC811	ニッケル・マンガン・コバルト酸化物 (Ni:Mn:Co = 8:1:1 のモル比)

OEM	相手先ブランド名で販売される製品を製造するメーカー
PRI	責任投資原則
TCFD	気候関連財務情報開示タスクフォース
TRL	技術成熟度
UNEP FI	国連環境計画・金融イニシアチブ

12 | 用語一覧

本資料で使用している主な用語の定義

電池の化学組成

電池の性能、エネルギー密度、コスト、寿命を規定する、電池材料の組成・体系。

バッテリーエネルギー貯蔵システム (BESS)

電池に電気エネルギーを貯蔵し、後に利用するためのシステムであり、主に電力システムの安定化や再生可能エネルギーの導入・活用を支える目的で用いられる。

電池のライフサイクル

電池が製造されてから使用され、用途転換(再利用)やリサイクルを含め、電池としての役割を終えるまでの一連の過程。

バッテリー・マネジメント・システム (BMS)

電池の性能、安全性、充電状態を監視および管理する電子システム。

バッテリーパスポート

電池の製造、性能、管理、サステナビリティに関する情報を収載する電子記録。

ブラックマス

電池リサイクル工程で、電池を破砕・選別した際に回収される粉末状の混合物で重要金属を多く含む。

カーボン・ディスクロージャー・プロジェクト (CDP)

企業に対して環境への影響、および排出管理に関する情報開示を支援する国際的な非営利団体。

精鉱

採掘後の選鉱・初期処理によって、脈石や不純物を除去し、目的とする鉱物(または元素)の割合を高めた中間産物。

企業サステナビリティ・デューディリジェンス指令 (CSDDD)

企業に対し、自社の企業活動およびサプライチェーン全体におけるサステナビリティおよび人権への影響に対応するよう義務付けるEUの指令。

企業サステナビリティ報告指令 (CSRD)

企業に対してサステナビリティ関連の情報開示を義務付けるEUの指令。

電化

化石燃料を使用する技術を、電力を用いる技術へと置き替えるプロセスであり、主に輸送分野や産業分野で進められている。

電解液

正極と負極の間で電荷の移動を可能にする電池内の化学的媒体。

使用済み電池

使用寿命を迎えた電池であり、一般的にリサイクル、再利用(用途転換)、または処分される。

エネルギー密度

電池がその重量または体積に対して蓄えられるエネルギー量を指し、キログラム当たりのワット時(Wh/kg)単位で示されることが多い。

拡大生産者責任 (EPR)

リサイクルや処分を含む製品のライフサイクル全体に対して生産者が責任を負うという政策アプローチ。

フレーク状黒鉛

変成岩から採掘される、天然に産出する黒鉛の一形態であり、主に電池の負極に使用される。

浮遊選鉱

鉱石に薬剤を加えて攪拌し、気泡を発生させて分離する方法。目的とする金属(鉱物)は上昇する気泡に付着し、不要な物質は沈降する。

黒鉛化

炭素系材料を加熱処理し、電池用途向けの合成黒鉛を生成するプロセス。

GWh

ギガワット時

HPAL

高圧硫酸浸出

湿式製錬法	水溶液を用いた化学プロセスにより、鉱石、精鉱、またはリサイクル材から金属を回収する手法。	レアアース(REE)	一部の電池を含む多様なハイテク分野で不可欠とされる、化学的性質が類似した17種類の元素の総称。	球形化	電池製造におけるプロセスのひとつであり、黒鉛を球状の粒子にして電池性能を高めるもの。
インフレ削減法(IRA)	電池を含むクリーンエネルギー技術に対し、税制優遇措置や補助金を提供する米国の法。	リサイクル材の使用割合要件	新たな電池の材料に関して、一定の割合のリサイクル材の使用を義務付けるもの。	尾鉱	採掘および精製工程で発生する廃棄物であり、有害物質を含んでいることが多い。
出力が断続的な再生可能エネルギー	太陽光や風力など、継続的に発電できない再生可能エネルギー源であり、エネルギー貯蔵ソリューションを必要とする。	リサイクル効率	リサイクル工程中に、使用済み電池に含まれる材料から実際に回収できた割合。	熱暴走	温度上昇により電池内部で自己持続的な反応が生じ、火災や爆発に至るおそれのある危険な状態を指す。
インターカレーション	イオン(電池のリチウムイオンなど)が黒鉛などの素材の層状構造の間に、構造を大きく乱さずに可逆的に挿入・離脱されること。	二次利用	当初用途の性能基準は満たさなくなった電池を、定置型エネルギー貯蔵など負荷の低い用途で再利用すること。	熱安定性	さまざまな温度において、電池が性能および安全性を維持できる能力。
国際エネルギー機関(IEA)	エネルギー安全保障およびサステナビリティに関する政策助言、データ、分析を提供する国際的組織。	セパレータ	電池内部にある薄い多孔質膜であり、負極と正極を分離する一方でイオンの移動を許容する。	揮発性有機化合物(VOC)	電池の製造工程で放出される物質であり、大気汚染や健康リスクをもたらすおそれがある。
ライフサイクルアセスメント(LCA)	ある製品の原材料採掘から処分に至るまでのライフサイクル全体における環境への影響を包括的に分析する手法。	製錬	鉱石を高温加熱し、金属を取り出す冶金的工程。	体積効率	電池がその物理的サイズに対して、どれだけ効率的にエネルギーを蓄えられるかを示す指標。
リチウム化	材料にリチウムイオンを導入するプロセス。主にリチウムイオン電池の製造において、電極材料内でリチウム化合物を形成するために用いられる。	比エネルギー	電池が重量当たりに蓄えられるエネルギー量を指し、重量が制約要因となる電気自動車などの用途では重要となる指標。	湿式ボールミリング	原材料に水を加えて混合・粉碎し、スラリーを得る電池材料の製造工程。

13 | 参考文献

¹ IEA (2024a). Batteries and Secure Energy Transitions – Analysis. [online] IEA. Available at: <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>.

² IEA (2024b). Global EV Outlook 2024 – Analysis. [online] IEA. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>.

³ Child Labour Platform (2019). Child labour in mining and global supply chains. [pdf] International Labour Organisation. Available at: <https://www.ilo.org/media/406936/download> [Accessed 11 June 2024].

⁴ Harvard International Review, 2024. Lithium Triangle. Available at: <https://hir.harvard.edu/lithium-triangle/> [Accessed 3 December 2024].

⁵ Walk Free (2024). Global Savery Index [online]. Available at: <https://www.walkfree.org/global-slavery-index/map/>.

⁶ Roland Berger (2023). Battery Monitor 2023: The Value Chain Between Economy and Ecology. Roland Berger. Retrieved from: <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Battery-Monitor-2023-An-assessment-of-the-current-and-future-battery-value.html>

⁷ IEA (2023). Policy developments – Global EV Outlook 2023 – Analysis. [online] IEA. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/policy-developments>

⁸ IEA (2024c). Global Critical Minerals Outlook 2024. [online] Available at: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ee01701d-1d5c-4ba8-9df6-abeaac9de99a/GlobalCriticalMineralsOutlook2024.pdf>.

⁹ Mackenzie, W. (2020). Will Volkswagen become the world's largest EV manufacturer? [online] www.woodmac.com. Available at: <https://www.woodmac.com/news/feature/will-volkswagen-outpace-tesla/>.

¹⁰ GMI (2023) Behind the Meter Stationary Battery Storage Market Size by Battery (Lithium-Ion, Lead Acid) By Application (Electricity Consumers, System Operations, Mini Grids) & Forecast, 2023 – 2032 [online] available at: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/behind-the-meter-stationary-battery-storage-market>

¹¹ Nert, T.D. (2024). INSIGHTS | Ironclad future: LFP powers past patent expiration - Appian Capital Advisory LLP. [online] Appian Capital Advisory LLP. Available at: <https://appiancapitaladvisory.com/insights-ironclad-future-lfp-powers-past-patent-expiration/> [Accessed 20 Dec. 2024].

¹² Tokar, D. (2024). US Adds Three Chinese Companies to Blacklist Over Forced Labor Allegations. [online] WSJ. Available at: <https://www.wsj.com/articles/u-s-adds-three-chinese-companies-to-blacklist-over-forced-labor-allegations-a43d0616?>

¹³ S&P Global Market Intelligence, 2023. Battery chemistry innovation to increase manganese demand. [online] Available at: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/battery-chemistry-innovation-to-increase-manganese-demand-82622881>

¹⁴ Benchmark Minerals (2024). Hard rock vs. brine: How do their carbon curves compare? [online] Available at: <https://source.benchmarkminerals.com/article/hard-rock-vs-brine-how-do-their-carbon-curves-compare> [Accessed 20 December 2024].

¹⁵ Safari, A & Lim, H 2023, 'The benefit of delithiated beta spodumene to reduce the carbon footprint of cemented paste backfill', in GW Wilson, NA Beier, DC Sego, AB Fourie & D Reid (eds), Paste 2023: Proceedings of the 25th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings, University of Alberta, Edmonton, and Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 82-97, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2355_06

¹⁶ Vera, M.L., Torres, W.R., Galli, C.I. et al. Environmental impact of direct lithium extraction from brines. Nat Rev Earth Environ 4, 149–165 (2023). <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00387-5> [Accessed 3 December 2024].

¹⁷ Gershgorn, D., & Lombrana, L. M. (2024, July 10). Global lithium sector eyes Argentina's salt flats tech test run. Reuters. Retrieved from <https://www.reuters.com/markets/commodities/global-lithium-sector-eyes-argentinass-salt-flats-tech-test-run-2024-07-10/>

¹⁸ US Geological Survey. (2024). Mineral Commodity Summaries 2024: Lithium. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-lithium.pdf>

¹⁹ Barreto Vieira do Prado, V., Moerenhout, T., & Jobet, J. C. (2024) Chile's state-centric lithium policy may deter investment, Centre on Global Energy Policy, 15 August. Available at: <https://www.energypolicy.columbia.edu/chiles-state-centric-lithium-policy-may-deter-investment/> (Accessed: 4 December 2024).

²⁰ Reuters Staff (2024). Chile opens lithium salt flats for investment, saves two for state control. Reuters. [online] 27 Mar. Available at: <https://www.reuters.com/markets/commodities/chile-opens-lithium-salt-flats-investment-saves-two-state-control-2024-03-27/>.

²¹ Rac.co.uk. (2024). New 'battery passport' set to impact EV market in the UK | RAC Drive. [online] Available at: <https://www.rac.co.uk/drive/news/electric-vehicles-news/new-battery-passport-set-to-impact-ev-market-in-the-uk/>.

²² Global Battery Alliance (2024). Policymakers to bridge the cooperation gap in critical battery minerals with harmonised data and transparency. [online] Global Battery Alliance. Available at: <https://www.globalbattery.org/media/publications/gba-cmag-communique-final-june24.pdf> [Accessed 4 Dec. 2024].

²³ Benchmark Mineral Intelligence (2024, 23 July) 'Rise of DLE will open up new sources of lithium supply this decade', Benchmark Source. Available at: <https://source.benchmarkminerals.com/article/rise-of-dle-will-open-up-new-sources-of-lithium-supply-this-decade> (Accessed: 4 December 2024).

²⁴ Srk.com. (2024). Novel Sources of Lithium Clay | SRK News | Battery Metals. [online] Available at: <https://www.srk.com/en/publications/novel-sources-of-lithium-clay> [Accessed 13 Dec. 2024].

²⁵ Chen, L. and Yarham, S. (2021). Electric vehicles and the nickel supply conundrum: Opportunities and challenges ahead. [online] www.spglobal.com. Available at: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/blogs/metals/123121-nickel-supply-electric-vehicle-demand>.

²⁶ www.usgs.gov. (2024). Mineral Commodity Summaries | US Geological Survey. [online] Available at: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>.

²⁷ Huber, I. (2021). Indonesia's Nickel Industrial Strategy. [online] Center for Strategic and International Studies. Available at: <https://www.csis.org/analysis/indonesias-nickel-industrial-strategy>.

²⁸ Britannica (2019). Nickel processing - Extraction and refining. In: Encyclopedia Britannica. [online] Available at: <https://www.britannica.com/technology/nickel-processing/Extraction-and-refining>.

²⁹ IEA (2021). GHG emissions intensity for class 1 nickel by resource type and processing route, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/ghg-emissions-intensity-for-class-1-nickel-by-resource-type-and-processing-route>, Licence: CC BY 4.0

³⁰ Tamarack (2024). Tamarack Water Alliance Talon Tamarack High Sulfide Nickel Mine Project <https://tamarackwateralliance.org/>. [online] Available at: <https://tamarackwateralliance.org/docs/TamarackMineConcerns-Consolidated.pdf> [Accessed 20 Dec. 2024].

³¹ Johnson, B. (2024). The whole truth about Talon Metals and Rio Tinto. [online] MinnPost. Available at: <https://www.minnpost.com/community-voices/2024/04/the-whole-truth-about-talon-metals-and-rio-tinto/> [Accessed 20 Dec. 2024].

³² Lightfoot, N., Berriault, C. and Semenciw, R. (2010). Mortality and cancer incidence in a nickel cohort. Occupational Medicine, 60(3), pp.211–218. DOI: <https://doi.org/10.1093/occmed/kqp197>.

³³ National Minerals Information Center (2024). Nickel Statistics and Information | US Geological Survey. [online] www.usgs.gov. Available at: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/nickel-statistics-and-information>.

³⁴ KLAREN (2024). Mitigate fouling and scaling in HPAL process and heat exchanger in nickel extraction. [online] Available at: <https://klarenbv.com/high-pressure-acid-leach-process-nickel-and-cobalt/>.

³⁵ Scheyder, E. and Desai, P. (2024). Insight: Western miners push for higher metals prices to ward off Chinese rivals. Reuters. [online] 22 Jul. Available at: <https://www.reuters.com/markets/commodities/western-miners-push-higher-metals-prices-ward-off-chinese-rivals-2024-07-22/>.

³⁶ Geiger, M. (2021) The great laterite challenge: why scaling class 1 nickel production won't be easy, cheap, or environmentally friendly. [online] The Assay. Available at: <https://www.theassay.com/articles/investor-insight/the-great-laterite-challenge-why-scaling-class-1-nickel-production-wont-be-easy-cheap-or-environmentally-friendly/> [Accessed: 16 December 2024].

³⁷ Fox, L. (2020). PNG landowners take legal action to stop Chinese-owned mine dumping waste into the sea. [online] ABC Pacific. Available at: <https://www.abc.net.au/pacific/programs/pacificbeat/png-landowners-sue-chinese-owned-mine/11942160> [Accessed 14 Dec. 2024].

³⁸ US Department of Labor (2024). Labor Exploitation Drives Production in China 2024 TVPRA List of Goods Driving Global Accountability. [online] Available at: https://www.dol.gov/sites/dolgov/files/ilab/child_labor_reports/tda2023/2024-tvptra-list-of-goods.pdf.

³⁹ Lee, A. (2024). Indonesian Nickel Lands on US Labor Department Forced Labor List. [online] Bloomberg.com. Available at: <https://www.bloomberg.com/news/newsletters/2024-09-26/indonesian-nickel-lands-on-us-labor-department-forced-labor-list> [Accessed 14 Dec. 2024].

⁴⁰ Reuters Staff (2023). Indonesia nickel smelter furnace fire kills 13 workers, injures 46. Reuters. [online] 24 Dec. Available at: <https://www.reuters.com/world/asia-pacific/smelter-furnace-blast-kills-12-indonesias-morowali-nickel-industrial-park-media-2023-12-24/>.

⁴¹ Decena, K. (2023). Indonesia emerging as major cobalt supplier amid lingering ESG concerns. [online] www.spglobal.com. Available at: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/indonesia-emerging-as-major-cobalt-supplier-amid-lingering-esg-concerns-76472560>

⁴² Cornelissen, S. (n.d.) Labour right violations and the crucial role of labour unions in Indonesia's Nickel Sector. CNV International. Available at: <https://www.cnvinternationaal.nl/en/topics/value-chains/outsourcing-metals-supply-chain/nickel>

⁴³ Rainforest Rescue (2023) Philippines: Violence against peaceful blockade of illegal nickel mine. [online] Rainforest Rescue. Available at: <https://www.rainforest-rescue.org/updates/11436/philippines-violence-against-peaceful-blockade-of-illegal-nickel-mine> [Accessed: 19 December 2024].

⁴⁴ Global Witness (2024). How mining threatens Indigenous defenders in the Philippines | Global Witness. [online] Global Witness. Available at: <https://www.globalwitness.org/en/campaigns/environmental-activists/how-militarisation-mining-threatens-indigenous-defenders-philippines/>.

⁴⁵ Fransiska Nangoy and Fathin Ungku (2021). Exclusive: Facing green pressure, Indonesia halts deep-sea mining disposal. Reuters. [online] 5 Feb. Available at: <https://www.reuters.com/article/world/exclusivefacing-green-pressure-indonesia-halts-deep-sea-mining-disposal-idUSKBN2A50VG/>.

⁴⁶ Moore, P. (2024). Glencore Canada gets federal funding boost for all electric mining fleet at Onaping Depth - International Mining. [online] International Mining. Available at: <https://im-mining.com/2024/05/11/glencore-canada-gets-federal-funding-boost-for-all-electric-mining-fleet-at-onaping-depth/> [Accessed 10 Dec. 2024].

⁴⁷ Mining.com (2024) Benchmark to launch green nickel prices on Thursday. [online] Mining.com. Available at: <https://www.mining.com/web/benchmark-to-launch-green-nickel-prices-on-thursday/> (Accessed: 19 December 2024).

⁴⁸ Pandey, N., Tripathy, S.K., Patra, S.K., et al. (2023) Recent Progress in Hydrometallurgical Processing of Nickel Lateritic Ore. [online] Transactions of the Indian Institute of Metals. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02706-2>.

⁴⁹ Queensland Pacific Metals (2024). DNI Process. [online] Queensland Pacific Metals. Available at: <https://techproject.com.au/tech-project/dni-process/> [Accessed 10 Dec. 2024].

⁵⁰ Altium Group (2024). The DNI Process. [online] Altium Group. Available at: <https://altiumgroup.com/the-dni-process/> [Accessed 10 Dec. 2024].

⁵¹ Cobalt Institute, 2024. Cobalt Market Report 2023. [pdf] Cobalt Institute. Available at: https://www.cobaltinstitute.org/wp-content/uploads/2024/05/Cobalt-Market-Report-2023_FINAL.pdf [Accessed 17 Dec. 2024].

⁵² Cobalt Institute (n.d.), Types of deposit. [online] Available at: <https://www.cobaltinstitute.org/about-cobalt/types-of-deposit/#:~:text=These%20deposits%20are%20primarily%20worked,lagoonal%20environment%2C%20under%20reducing%20conditions> (Accessed: 20 December 2024).

⁵³ S&P Global Market Intelligence, 2024. Indonesia emerging as major cobalt supplier amid lingering ESG concerns. [online] Available at: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/indonesia-emerging-as-major-cobalt-supplier-amid-lingering-esg-concerns-76472560> [Accessed 11 Dec. 2024].

⁵⁴ RAID, 2024. Beneath the Green: Pollution in the DRC. [pdf] RAID. Available at: <https://raid-uk.org/wp-content/uploads/2024/03/Report-Beneath-the-Green-DRC-Pollution-March-2024.pdf> [Accessed 11 Dec. 2024].

⁵⁵ Mining Technology, 2024. Ten largest cobalt mines. [online] Available at: https://www.mining-technology.com/marketdata/ten-largest-cobalts-mines/?utm_source=chatgpt.com&cf-view [Accessed 11 Dec. 2024].

⁵⁶ Shaw, A. (2024). Global cobalt rush drives toxic toll near DRC mines. [online] Mongabay. Available at: <https://news.mongabay.com/2024/03/global-cobalt-rush-drives-toxic-toll-near-drc-mines/> [Accessed 19 Dec. 2024]

⁵⁷ Dempsey, H. (2023) Artisanal mining: the struggle to clean up a murky industry. [online] Financial Times Available at: <https://www.ft.com/cobalt1> [Accessed 14 Dec. 2024].

⁵⁸ Amnesty International (2016) 'This is what we die for': Human rights abuses in the Democratic Republic of the Congo power the global trade in cobalt. [pdf] Amnesty International. Available at: https://www.amnestyusa.org/wp-content/uploads/2017/04/this_what_we_die_for_-_report.pdf [Accessed 14 Dec. 2024]

⁵⁹ Buxton, A. (2023), Mining cobalt better. [online] International Institute for Environment and Development. Available at: <https://www.iied.org/mining-cobalt-better> [Accessed: 20 December 2024].

⁶⁰ US Department of Labor (2023). Findings on the worst forms of child labor: Democratic Republic of Congo. [online] US Department of Labor. Available at: <https://www.dol.gov/agencies/ilab/resources/reports/child-labor/congo-democratic-republic-drc> [Accessed 11 Dec. 2024]

⁶¹ Wilson Center, 2023. DRC mining industry: Child labor and the formalization of small-scale mining. [online] Wilson Center. Available at: <https://www.wilsoncenter.org/blog-post/drc-mining-industry-child-labor-and-formalization-small-scale-mining> [Accessed 11 Dec. 2024].

⁶² Reuters. (2024). Western miners push for higher metals prices to ward off Chinese rivals. Retrieved December 20, 2024, from <https://www.reuters.com/markets/commodities/western-miners-push-higher-metals-prices-ward-off-chinese-rivals-2024-07-22/>

⁶³ Reuters, 2023. Is it time to embrace Congo's artisanal cobalt miners? [online] Reuters, 4 April. Available at: <https://www.reuters.com/markets/commodities/is-it-time-embrace-congos-artisanal-cobalt-miners-2023-04-04/> [Accessed 17 Dec. 2024].

⁶⁴ Howard, M. and Gifford, S. (2023). Building a Responsible Cobalt Supply Chain. [pdf] Faraday Institution. Available at: https://www.faraday.ac.uk/wp-content/uploads/2023/01/Faraday_Insights_7_Jan23_Final.pdf [Accessed 11 Dec. 2024].

⁶⁵ Baumann-Pauly, D. (2023). Cobalt Mining in the Democratic Republic of Congo: Addressing Root Causes of Human Rights Abuses. [pdf] Geneva Center for Business and Human Rights. Available at: <https://gcbhr.org/backoffice/resources/cobalt-mining-drcroot-causes.pdf> [Accessed 11 Dec. 2024].

⁶⁶ International Energy Agency. (2022). End-of-life recycling rates for selected metals. Retrieved December 20, 2024, from <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/end-of-life-recycling-rates-for-selected-metals>

⁶⁷ IEA (2023). Recycling of critical minerals. [pdf] IEA. Available at: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/3af7fda6-8fd9-46b7-bede-395f7f8f9943/RecyclingofCriticalMinerals.pdf> [Accessed: 11 Dec. 2024].

⁶⁸ IEA (2023). EU Sustainable Batteries Regulation. [online] IEA. Available at: <https://www.iea.org/policies/16763-eu-sustainable-batteries-regulation> [Accessed 11 June 2024].

⁶⁹ Reuters (n.d.) Deep Sea Mining: A Climate Solution or Environmental Threat? Available at: <https://www.reuters.com/graphics/MINING-DEEPSEA/CLIMATE/zjpqezqzlpz/> [Accessed: 11 June 2024].

⁷⁰ Bown, C. (2024) The new risking rather than de-risking: Challenges to US efforts to reduce dependence. [online] Peterson Institute for International Economics. Available at: <https://www.piie.com/blogs/realtime-economics/2024/new-risking-rather-de-risking-challenges-us-efforts-reduce-dependence> [Accessed: 11 Dec. 2024].

⁷¹ Qizhong, Z. and Damm, S. (2020) Natural graphite – demand, supply and outlook. Deutsche Rohstoffagentur (DERA). [online] Available at: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/Studie%20Graphite%20eng%202020.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [Accessed: 11 Dec. 2024].

⁷² Whoriskey, P. (2016). Graphite mining pollution in China. Washington Post [online] Available at: <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/graphite-mining-pollution-in-china/> [Accessed 11 Dec. 2024].

⁷³ Benchmark Minerals. (2022). ESG of Graphite: How do synthetic graphite and natural graphite compare? [online] Available at: <https://source.benchmarkminerals.com/article/esg-of-graphite-how-do-synthetic-graphite-and-natural-graphite-compare> [Accessed 11 Dec. 2024].

⁷⁴ Benchmark Minerals. (2023). ESG of graphite: How do synthetic graphite and natural graphite compare? [online] Benchmark Minerals. Available: <https://source.benchmarkminerals.com/article/esg-of-graphite-how-do-synthetic-graphite-and-natural-graphite-compare>

⁷⁵ Vyawahare, M. (2023). Madagascar: What happens to villagers when a graphite mine comes knocking? Mongabay News. Available at: <https://news.mongabay.com/2023/04/madagascar-what-happens-to-villagers-when-a-graphite-mine-comes-knocking/> [Accessed 11 Dec. 2024].

⁷⁶ Rystad Energy (2022). Fake it till you make it: Synthetic graphite holds the key to meeting battery demand surge, despite ESG concerns. Rystad Energy. [online] Available at: <https://www.rystadenergy.com/news/fake-it-till-you-make-it-synthetic-graphite-holds-the-key-to-meeting-battery-dema> [Accessed 11 Dec. 2024]

⁷⁷ Future Battery Industries Cooperative Research Centre (FBICRC). (2023). Graphite Purification Report. FBICRC. [online] Available at: https://fbicrc.com.au/wp-content/uploads/2023/11/FBICRC_Graphite-Purification-Report-VFINAL-Sept22.pdf [Accessed 11 Dec. 2024].

⁷⁸ Dolega, P., Buchert, M. and Betz, J. (2020). Graphite and Lithium: Environmental, Social and Economic Challenges. Oeko-Institut. [online] Available at: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Graphite-Lithium-Env-Soc-Eco-Challenges.pdf> [Accessed 11 Dec. 2024].

⁷⁹ Minviro (2022). Wired article: The surprising climate cost of the humblest battery material. Minviro [online] Available at: <https://www.minviro.com/resources/blogs/wired-article-the-surprising-climate-cost-of-the-humblest-battery-material> [Accessed 11 Dec. 2024].

⁸⁰ Carbonscape. (n.d.). BioGraphite – A sustainable alternative to synthetic graphite. Carbonscape. [online] Available at: <https://www.carbonscape.com/biographite> [Accessed 11 Dec. 2024].

⁸¹ US Department of Homeland Security (DHS) (2024) DHS adds PRC-based seafood, aluminum, and footwear entities to Uyghur forced labor list. DHS [online] Available at: <https://www.dhs.gov/news/2024/06/11/dhs-adds-prc-based-seafood-aluminum-and-footwear-entities-uyghur-forced-labor> [Accessed: 11 December 2024].

⁸² Westwater Resources (2023) Annual report 2023. [online] Available at: https://westwaterresources.net/wp-content/uploads/2024/03/WESTWATER_RESOURCES_INC_2023_10-K_AS-FILED.pdf [Accessed: 11 December 2024].

⁸³ LeydenJar (2023) LCA study on LeydenJar’s silicon anode. LeydenJar. [online] Available at: <https://leyden-jar.com/lca-study-on-leydenjars-silicon-anode/> [Accessed: 18 December 2024].

⁸⁴ CarbonScape (n.d.) Our story. CarbonScape. [online]. Available at: <https://www.carbonscape.com/our-story> [Accessed: 18 December 2024].

⁸⁵ Wormington, J. (2024). Asleep at the Wheel. Human Rights Watch. [online] Available at: <https://www.hrw.org/report/2024/02/01/asleep-wheel/car-companies-complicity-forced-labor-china>.

⁸⁶ Fastmarkets. Accessible at: <https://www.fastmarkets.com/insights/markets-largely-adjusted-to-chinas-germanium-gallium-graphite-export-controls-one-year-on/>.

⁸⁷ PwC. Net Zero Economy Index. Accessible at: <https://www.pwc.co.uk/services/sustainability-climate-change/insights/net-zero-economy-index.html>

⁸⁸ Cloona, H. (2023). CAM—Cathode Active Materials Wastewater Options. [online] Saltworks Technologies. Available at: <https://www.saltworkstech.com/articles/cam-wastewater-options/> [Accessed 17 Dec. 2024].

⁸⁹ BM Review (2022). Identifying the pinch points in the LFP supply chain - Battery Materials Review Ltd. [online] Battery Materials Review Ltd. Available at: <https://www.batterymaterialsreview.com/identifying-the-pinch-points-in-the-lfp-supply-chain/> [Accessed 9 Dec. 2024].

⁹⁰ NOVONIX. (2023). NOVONIX Finalizes US\$100 Million Grant Award from US Department of Energy - NOVONIX. [online] Available at: <https://www.novonixgroup.com/novonix-finalizes-us100-million-grant-award-from-u-s-department-of-energy/> [Accessed 9 Dec. 2024].

⁹¹ Brookman, D. (2024). NVX Company Information. [online] Available at: <https://corporateconnect.com.au/wp-content/uploads/2024/11/NOVONIX-November-2024-final-AP.pdf> [Accessed 18 Dec. 2024].

⁹² Mariska, D. and A. Anantha Lakshmi (2024b). ‘Production first, safety later’: inside the world’s largest nickel site. [online] @FinancialTimes. Available at: <https://www.ft.com/content/56013ee9-f456-4646-895c-aeb65a685f85>.

⁹³ Revextech.com. (2024). Home | Revex. [online] Available at: <https://revextech.com/> [Accessed 9 Dec. 2024].

⁹⁴ Zhang, Y.S., Bailey, J.J., Sun, Y., Boyce, A.M., Dawson, W., Reynolds, C.D., Zhang, Z., Lu, X., Grant, P., Kendrick, E., Shearing, P.R. and Brett, D.J.L. (2022). Applications of advanced metrology for understanding the effects of drying temperature in the lithium-ion battery electrode manufacturing process. Journal of Materials Chemistry A, [online] 10(19), pp.10593–10603. DOI: <https://doi.org/10.1039/D2TA00861K>.

⁹⁵ Emilsson, E. and Dahllöf, L. (2019b). Lithium-Ion Vehicle Battery Production Status 2019 on Energy Use, CO 2 Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling. [online] Available at: <https://www.ivl.se/download/18.694ca0617a1de98f473464/1628416191286/FULLTEXT01.pdf>.

⁹⁶ Koratkar, N. (2022). Toxicity of Lithium-Ion Batteries. [online] Alsym Energy. Available at: <https://www.alsym.com/blog/lithium-based-batteries-are-toxic-from-start-to-finish/>.

⁹⁷ Hazardex (2023). Two workers die in separate incidents at Northvolt battery gigafactory. [online] Hazardexonthenet.net. Available at: <https://www.hazardexonthenet.net/article/203084/Two-workers-die-in-separate-incidents-at-Northvolt-battery-gigafactory.aspx> [Accessed 19 Dec. 2024].

⁹⁸ Reuters (2024). Toyota, Nissan support Japan’s battery production capacity. Original link: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/toyota-nissan-support-japans-battery-production-capacity-nikkei-reports-2024-09-05/>

⁹⁹ Jin, W., Song, G., Yoo, J., Jung, S., Kim, T. and Kim, J. (2024). Advancements in Dry Electrode Technologies: Towards Sustainable and Efficient Battery Manufacturing. ChemElectroChem. DOI: <https://doi.org/10.1002/celec.202400288>.

¹⁰⁰ Merano, M. (2023). Volkswagen to adopt Tesla’s dry coating process for battery production. [online] TESLARATI. Available at: <https://www.teslarati.com/volkswagen-tesla-dry-coating-battery-cell/> [Accessed 10 Dec. 2024].

¹⁰¹ Benchmark (2024). Revolutionising battery production: how dry electrode manufacturing promises to cut costs | Benchmark Source. [online] Benchmark Source. Available at: <https://source.benchmarkminerals.com/article/revolutionising-battery-production-how-dry-electrode-manufacturing-promises-to-cut-costs>.

¹⁰² Panasonic Newsroom Global. (2024). Panasonic Energy Ready to Commence Mass Production of 4680 Automotive Lithium-ion Batteries | Automotive Equipment | Products & Solutions | Press Release. [online] Available at: <https://news.panasonic.com/global/press/en240909-7>.

¹⁰³ Benchmark Minerals, 2023. What the EU's new Corporate Sustainability Directive means for the battery supply chain. [online] Available at: <https://source.benchmarkminerals.com/article/what-the-eus-new-corporate-sustainability-directive-mean-for-the-battery-supply-chain> [Accessed 19 December 2024].

¹⁰⁴ CEPS, 2024. Implementing the EU digital battery passport: In-depth analysis. [online] Available at: <https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/2024-03/1qp5rxiz-CEPS-InDepthAnalysis-2024-05-Implementing-the-EU-digital-battery-passport.pdf> [Accessed 19 December 2024].

¹⁰⁵ European Court of Auditors (2023) 'The EU's industrial policy on batteries: new strategic impetus needed', Special Report 15/2023. Available at: https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2023-15/SR-2023-15_EN.pdf (Accessed: 20 December 2024).

¹⁰⁶ Carnegie Endowment for International Peace. (2024). Winning the battery race: How the United States can leapfrog China to lead next-generation battery technologies. Available at: <https://carnegieendowment.org/research/2024/10/winning-the-battery-race-how-the-united-states-can-leapfrog-china-to-lead-next-generation-battery-technologies?lang=en> (Accessed: 19 December 2024).

¹⁰⁷ International Energy Agency (IEA). (n.d.). New Energy Vehicle Industry Development Plan (2021-2035). Available at: <https://www.iea.org/policies/15529-new-energy-vehicle-industry-development-plan-2021-2035> (Accessed: 19 December 2024).

¹⁰⁸ World Economic Forum (WEF). (2023). Digital Battery Passport 2023. Available at: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Digital_Battery_Passport_2023.pdf (Accessed: 19 December 2024).

¹⁰⁹ International Energy Agency (IEA). (2024). Specifications for the comprehensive utilisation of waste EV batteries 2024. Available at: <https://www.iea.org/policies/24987-specifications-for-the-comprehensive-utilisation-of-waste-ev-batteries-2024> (Accessed: 19 December 2024).

¹¹⁰ US Department of Energy. (2024). Biden-Harris Administration announces over \$3 billion to support America's battery supply chain. Available at: <https://www.energy.gov/articles/biden-harris-administration-announces-over-3-billion-support-americas-battery> (Accessed: 19 December 2024).

¹¹¹ Solis, J. (2022). NV lithium extraction and battery manufacturing facilities get \$107M federal boost Nevada Current. [online] Nevada Current. Available at: <https://nevadacurrent.com/2022/10/21/nv-lithium-extraction-and-battery-manufacturing-facilities-get-107m-federal-boost/> [Accessed 11 Dec. 2024].

¹¹² US Department of the Treasury. (2024). The Inflation Reduction Act modifies apprenticeship requirements. Available at: <https://home.treasury.gov/news/press-releases/jy1830#:~:text=The%20Inflation%20Reduction%20Act%20modifies%20proportion%20of%20qualified%20apprentices%20from> (Accessed: 19 December 2024).

¹¹³ US Department of Energy. (2024). Bipartisan Infrastructure Law: Battery materials processing and battery manufacturing & recycling. Available at: <https://www.energy.gov/mesc/bipartisan-infrastructure-law-battery-materials-processing-and-battery-manufacturing-recycling> (Accessed: 19 December 2024).

¹¹⁴ The White House. (2024). Fact Sheet: President Biden takes action to protect American workers and businesses from China's unfair trade practices. Available at: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2024/05/14/fact-sheet-president-biden-takes-action-to-protect-american-workers-and-businesses-from-chinas-unfair-trade-practices/> (Accessed: 19 December 2024).

¹¹⁵ US Department of Energy. (2024). Biden-Harris Administration announces nearly \$74 million to advance domestic battery recycling. Available at: <https://www.energy.gov/articles/biden-harris-administration-announces-nearly-74-million-advance-domestic-battery-recycling> (Accessed: 19 December 2024).

¹¹⁶ Argus Media. (n.d.). Japan approves \$2.4bn for EV battery projects. Available at: <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2605605-japan-approves-2.4bn-for-ev-battery-projects> (Accessed: 19 December 2024).

¹¹⁷ Nikkei Asia. (n.d.). Japan to require disclosure of CO2 emitted by EV battery production. Available at: <https://asia.nikkei.com/Spotlight/Environment/Climate-Change/Japan-to-require-disclosure-of-CO2-emitted-by-EV-battery-production> (Accessed: 19 December 2024).

¹¹⁸ Argus Media. (n.d.). Japan unveils subsidy to incentivise battery production. Available at: <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2415123-japan-unveils-subsidy-to-incentivise-battery-production> (Accessed: 19 December 2024).

¹¹⁹ Batteries Europe. (2023). Battery Innovation JAPAN release. Available at: https://batterieseurope.eu/wp-content/uploads/2023/06/Battery-Innovation-JAPAN_release.pdf (Accessed: 19 December 2024).

¹²⁰ Australian Government Department of Industry, Science and Resources. (n.d.). National Battery Strategy: Strategy at a glance. Available at: <https://www.industry.gov.au/publications/national-battery-strategy/strategy-glance> (Accessed: 19 December 2024).

¹²¹ International Energy Agency (2024) 'Future Made in Australia - Renewable Energy Superpower (Clean Energy Technology Manufacturing)'. Available at: <https://www.iea.org/policies/20165-future-made-in-australia-renewable-energy-superpower-clean-energy-technology-manufacturing> (Accessed: 8 December 2024).

¹²² Australian Government Department of Industry, Science and Resources. (n.d.). National Battery Strategy. Available at: <https://www.industry.gov.au/publications/national-battery-strategy> (Accessed: 19 December 2024).

¹²³ Utility Dive. (2023). Battery sustainability supply chain passport: Tesla's approach. Available at: <https://www.utilitydive.com/news/battery-sustainability-supply-chain-passport-tesla/642541/> (Accessed: 19 December 2024).

¹²⁴ Australian Government Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water. (2018). National Waste Policy 2018. Available at: <https://www.dcceew.gov.au/environment/protection/waste/publications/national-waste-policy-2018> (Accessed: 19 December 2024).

¹²⁵ University of Nottingham (2023, March) Next generation battery research strengthened with £5m funding. <https://www.nottingham.ac.uk/news/next-generation-battery-research-strengthened-with-5m-funding>

¹²⁶ Research Contrary (2017). Report: Redwood Materials Business Breakdown & Founding Story | Contrary Research. [online] Contrary.com. Available at: <https://research.contrary.com/company/redwood-materials>.

¹²⁷ Redwood (2024). Recovering lithium-ion batteries after unexpected events. [online] Redwoodmaterials.com. Available at: <https://www.redwoodmaterials.com/news/responding-recovering-and-recycling-lithium-ion-batteries-after-accidents-and-natural-disasters/> [Accessed 20 Dec. 2024].

¹²⁸ Gaines, L., Zhang, J., He, X., Bouchard, J., and Melin, H. E. (2023) 'Tracking flows of end-of-life battery materials and manufacturing scrap', Batteries, 9(7). Available at: <https://doi.org/10.3390/batteries9070360> [Accessed 13 Dec. 2024].

¹²⁹ National Grid, (2022)What happens to old electric car batteries? [online] Available at: <https://www.nationalgrid.com/stories/journey-to-net-zero-stories/what-happens-old-electric-car-batteries> [Accessed 20 December 2024].

¹³⁰ Zheng, P., Young, D., Yang, T., Xiao, Y., and Li, Z. (2023) Powering battery sustainability: a review of the recent progress and evolving challenges in recycling lithium-ion batteries. [online] Frontiers in Sustainable Resource Management. Available at: <https://doi.org/10.3389/fsrma.2023.1127001>

¹³¹ LINEV Innovations (2024) Battery sorting: how does it work? [online] LINEV Innovations. Available at: <https://linevinnovations.com/articles/battery-sorting-how-does-it-work/> (Accessed: 20 December 2024).

¹³² S&P Global. (2024). China unveils new used EV power batteries rules; recycling market remains gloomy. [online] S&P Global Commodity Insights. Available at: <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/metals/081624-china-unveils-new-used-ev-power-batteries-rules-recycling-market-remains-gloomy> [Accessed 19 December 2024].

¹³³ Wessellkämper, J., Dahrendorf, L., Mauler, L., Lux, S., von Delft, S., (2023) A battery value chain independent of primary raw materials: Towards circularity in China, Europe and the US [pdf] Resources, Conservation & Recycling vol. 201. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092134492300352X#sec0021>

¹³⁴ IEA (2024d). Outlook for emissions reductions – Global EV Outlook 2024 – Analysis. [online] IEA. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/outlook-for-emissions-reductions>.

¹³⁵ Second-life use: Audi e-tron battery modules power electrify rickshaws in India (no date) Audi MediaCenter. Available at: <https://www.audi-mediacycenter.com/en/press-releases/second-life-use-audi-e-tron-battery-modules-power-electrify-rickshaws-in-india-14745> (Accessed: 07 February 2025).

ご留意事項

MUFG ファースト・センティア サステナブル投資研究所は、三菱UFJ 信託銀行およびその傘下にあるファースト・センティア・インベスターズグループが共同してサステナブル投資に関する調査・研究・レポート作成などの業務を対外的に行う際の呼称です。本資料は、三菱UFJ 信託銀行サステナブルインベストメント部が発行しています。本資料は、MUFG ファースト・センティアサステナブル研究所の活動の一環としてファースト・センティア・インベスターズグループが発行した「Sustainable Lithium-ion batteries : Investor Briefing」(英語版)を、三菱UFJ 信託銀行が日本語にご紹介するものです。最大限、内容に忠実に日本語訳しておりますが、万が一かかる両言語の内容に相違がある場合には、英語版が正となることを予めご了承ください。本資料は、お客さまに対する情報提供のみを目的としたものであり、三菱UFJ 信託銀行およびファースト・センティア・インベスターズグループが特定の有価証券・取引や運用商品を推奨または勧誘するものではありません。本資料に記載されているデータ、意見などは本資料作成時点で信頼できるとされる情報に基づき作成したものです。三菱UFJ 信託銀行およびファースト・センティア・インベスターズグループは、その正確性、完全性、情報や意見の妥当性を保証するものではなく、また、当該データ、意見などを使用した結果についてもなんら保証するものではありません。また、本資料に関連して生じた一切の侵害について、三菱UFJ 信託銀行およびファースト・センティア・インベスターズグループは責任を負うものではありません。本資料に記載されている情報および見解は著者のものであり、必ずしも三菱UFJ 信託銀行およびファースト・センティア・インベスターズグループのものではありません。本資料の著作権その他の知的財産権は三菱UFJ 信託銀行および First Sentier Investors (Australia) Services Pty Limited に属し、その目的を問わず無断で引用または複製することを禁じます。