

※ 本仮訳は、駐日英国大使館主催ウェビナーシリーズのために用意されたものです。  
原文をご覧になりたい方は、[royalsociety.org/climate-science-solutions](https://royalsociety.org/climate-science-solutions) をご参照ください。

# THE ROYAL SOCIETY

気候変動：科学と解決策 | 報告 6

## 気候変動とバッテリー： 未来の電力貯蔵ソリューションを求めて

### 概要

ネットゼロの世界における低炭素輸送と安定的電力供給のためには、よりパワフルで寿命が長く、素早く充電できるバッテリーが必要となる。持続可能なバッテリーは、豊富にある材料を用い、ゼロカーボンの工程で製造する必要がある。充電可能なバッテリーは、再生可能電力貯蔵の最も効率的な方法だが、重量、体積、コストの点で応用が実用的でない場合もある。充電式バッテリーは、電力網の安定を図るために、脱炭素化が進んでいるマイクログリッドやより規模の大きい電力網で短期的に電力を蓄える目的だけでなく、電気自動車、ドローン、軽飛行機の動力源としての需要があり、大型車に使用され

ることも増えてきた。現時点では、例えば、季節ごとの電力網の供給量の変動を安定させるための大量のエネルギー貯蔵をバッテリーが実現させる可能性は低いと考えられている。リチウムイオンバッテリー（LIB）は、現在のところ、これらの用途では短期的に最も実現性の高いバッテリー技術である。LIB 関連の研究では、エネルギー高密度化、コスト削減、寿命延長、バッテリーのリサイクルと再使用に重点が置かれている。研究者は、長期的には、経済のより幅広い電化を可能にするため、他の素材と技術を用いた次世代バッテリーの開発を目指している。

### 知見

- リチウムイオンバッテリーに関する研究により、電気自動車（EV）および電力網用バッテリーのコストが下がり、寿命が延び、エネルギー密度と安全性が高まり、充電時間が短くなると考えられる。
- 研究と規制が、より持続可能でリサイクルしやすく、寿命の長いバッテリーの製作につながる可能性がある。
- 国際的な協調的取組みは、コストを削減し、バッテリーの用途を広げ、バッテリー生産による環境影響を最小化するために、地球上に豊富に存在する新しい物質の特定とテストに重点を置くべきである。
- すでに十分な重点的取組みがなされていることから考えて、さらに低コストでエネルギー密度が著しく高まった、劇的に新しいタイプのバッテリーが開発されるだろう。

# 1. バッテリーのエネルギー貯蔵と気候変動

2010年の時点でキロワット時 (kWh) 当たり 1,000 ドル以上だったバッテリーセルのコストは 150 ドルに下がっている。

## 1.1 背景

世界のゼロカーボンエネルギーの主な調達源として、再生可能エネルギー源による電力生産が占める割合がさらに増すだろう。バッテリーを使って、そうしたエネルギーを貯蔵する能力は、ゼロカーボン・エネルギーシステムの重要な部分である。バッテリーは、脱炭素化されたマイクログリッドや近隣規模のコミュニティに電力を供給する自給自足型電力システムのための主たる貯蔵手段として機能するだけでなく、輸送の脱炭素化においても、また、大規模電力網を安定化させるための手段としても重要な役割を果たすだろう。また、バッテリーは、モーター、ヒーター、コンプレッサおよび機械類を動かす目的で、工業の分野でもより広く使われるようになるだろう。

輸送は、燃料燃焼による CO<sub>2</sub> 直接排出の 24% を占める<sup>1</sup>。バッテリーに蓄えられた電力を動力とするモーターは、さまざまな形の自動車や軽量自動車において化石燃料式エンジンに取って代わる有力な競争相手である。燃料電池車さえもが補助バッテリーを備えるようになるだろう。バッテリーの種類を問わず重要なパラメータとされるのがエネルギー密度（重量または体積単位当たりでどれだけのエネルギーを蓄えられるか）と寿命である。寿命は、サイクル寿命（何回充放電できるか）と、カレンダー寿命（貯蔵できる期間を年数で測る）で測定される。

新たな用途に使われる充電式バッテリーの市場を現在支配しているのはリチウムイオンバッテリー (LIB) である。LIB は元々、携帯電池とノートパソコン用として開発されたが、現在は電気自動車 (EV)、衛星その他のデバイスで広く使われている。LIB は、ますます多くの電気自動車の動力源として使われるようになってきた。世界の EV 自動車（ハイブリッドとフル EV を含む）の台数は 2019 年の時点で 700 万台を超えており、2030 年には 1 億 5,000 万～2 億 5,000 万台に増加するとみられている<sup>2</sup>。バッテリー

セル価格（パッケージングコストを除く）は、2010 年の時点でキロワット時 (kWh) 当たり 1,000 ドル以上だったが現在は 150 ドル/kWh となっており<sup>3</sup>、一部のレポートによれば 100 ドル/kWh まで下がっている<sup>4</sup>。100 ドル/kWh 未満は、バッテリーが内燃エンジン (ICE) との間で競争力を持ち始める価格と広く推定されている。最近のレポートによれば、一部の部門ではこのコスト目標がすでに達成されている。

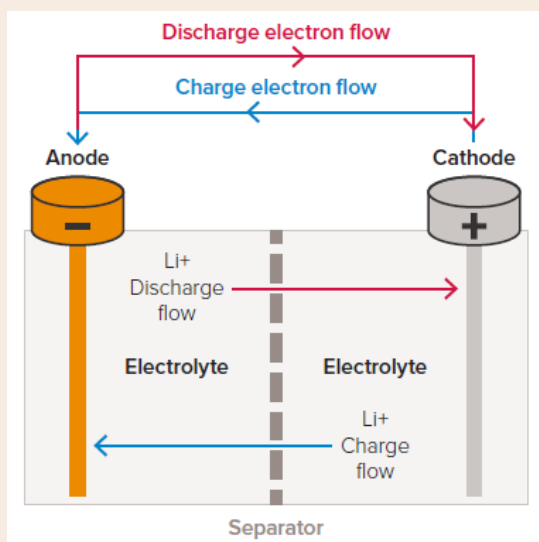
新型 EV の典型的な走行距離は現在 200 マイル前後だが<sup>5</sup>、さらに大型のバッテリーの高速充電能力とコストは今なお課題である。実験室では大きな進歩が起きている。例えば、充放電サイクルを 1 万回繰り返せると予想されるバッテリーが研究者から報告されている。これは、走行距離にして約 200 万マイルに相当するが<sup>6</sup>、大型バッテリーパックでは廉価でありながらエネルギー密度の高い市販セルとともにカレンダー寿命の長さも保証する必要がある。

電力網においては、再生可能エネルギー発電のバックアップとして、ピーク需要時間帯<sup>7</sup>に短時間（一般に 90 分未満）余剰電力を供給するために必要な規模とコストのバッテリーが利用できるようになった。2030 年には定置用バッテリー容量が現在の 11 GWh から 420 GWh に増えると予想される<sup>8</sup>。米国では大規模発電用のバッテリーのコストが 2015 年より約 70% 低下している<sup>9</sup>。しかしながら、グローバルレベルでは、コストの課題のみならず、エネルギー密度、さらには水力発電や圧縮空気などの代替手段と競合するために必要な巨大な規模という課題が、（24 時間を超える）長時間蓄電用としてのバッテリーの使用を妨げている。電力自動車におけるバッテリー使用は、マイクログリッドと全国電力網の両方のグリッドストレージ（電力網の内部で電力を備蓄するシステム）の一翼を担っている。電力網から電力を引き出すだけでなく、電力網に電力を供給する手段としても

利用できるからである。こうした動向は、より多くのエネルギーを供給するための電力網の拡張という課題を示すと同時に、グリッドストレージとグリッドバランシング（電力網への電力供給量調整）による追加的電源にアクセスする機会を示している。

## コラム1

### リチウムイオンバッテリーセルの働き



陰極で電子が与えられることを還元、陽極で電子が奪われることを酸化と呼ぶ。この反応全体は「レドックス（酸化還元）」プロセスと呼ばれている。

LIB バッテリーに金属リチウムは含まれていないので知っておいていただきたい。リチウムイオン (Li+) は固体電極に急速に、可逆的に、幅広い電圧でインターカレーション（または挿入）能力を持つため、高圧セルの構築が可能である。一般に陰極は、リチウムニッケルマンガンコバルト酸化物 (NMC) やリン酸鉄リチウム (LFP) などのリチウム遷移金属複合酸化物でできている。一般に陽極はグラファイトでできている。グラファイトが使われるのは、コスト競争力があり、しかも多くのリチウムイオンを劣化させることなく可逆的に貯蔵する能力を持つためである。陰極と陽極では、電子の取り出しまたは挿入を行うため、一般にそれぞれアルミニウムと銅の集電体が使われる。これらはバッテリーの外で電子につながる。

リチウムイオンバッテリー (LIB) の主なコンポーネントは2つの電極（陽極と陰極）、電解質（液体、半固体または固体）、電解質に浸された多孔質ポリマ・セパレータである。一般に電解質は有機溶剤にリチウム塩を溶かしたものである。安全性と性能を高めるために、さまざまな添加剤が電解質に加えられる。

使用時または放電時には陽極（負極）が電子を放出し、この電子がモーターなどの外部のデバイスを通して流れてからバッテリーの陰極（正極）側に戻る。この電子の流れをバランスよく行うために、正電荷を持つイオン（陽イオン）が陽極から電解質とセパレータを通して陰極までバッテリーの中を流れる。イオンは陰極で再び電子と結びつく。充電時はこの流れが逆になり、イオンは陽極に戻る。

1回のサイクルでバッテリーが提供するエネルギーの量（エネルギー密度、すなわち容量×セルの電圧）によって、例えば、EVの走行距離やグリッドバランシングに対するバッテリーの貢献度が決まる。質量エネルギー密度はキログラム当たりワット時 (Wh/kg) で表される。EVバッテリーセルの典型的なエネルギー密度は、1990年の時点では100 Wh/kgにも満たなかったが、現在は250 Wh/kgを超えている<sup>10,11</sup>。

ネットゼロの最終目標は、ゼロカーボン製造プロセスで組み立てられたリサイクルコンポーネントでバッテリーを作ることである。

## 1.2 バッテリー導入への高度な課題

エネルギー利用の脱炭素化を図るためにバッテリーを導入するにあたっては、いくつかの高度な課題が存在する。

- **コスト**：費用は最も重要な課題である。EVバッテリーのコストは下がっているが、多くの消費者にとってそれなりの走行距離を持つ電気自動車はまだ高価である。グリッドストレージに関しては、大規模発電用のバッテリーのコストは下がっているが、世界的に見た場合は、ガスタービンや、水素またはアンモニアを使用した電力の化学的貯蔵などの選択肢と競合するにはまだ高すぎる。しかしながら、バッテリーは、電圧や周波数制御といった短時間の電力網支援において重要な役割を果たしている。さらに、LIBコストの低下は非常に大きいため、現時点ではレドックスフローやナトリウムイオンバッテリーなどの最新のバッテリー技術を進歩させようとする経済的動機が往々にして働きにくい。大量生産されていないという理由もあって、現在のところ価格はやや高いが、間もなく価格が下がり、より持続可能になる可能性がある。
- **エネルギー密度**：LIBのエネルギー密度は発明以来2倍以上に高まったが、重量自動車や航空機で使用するにはまだ不十分である<sup>12</sup>。電力網規模のバッテリーでは、質量エネルギー密度はそれほど重要でないが、バッテリーの利用を阻む障害としては、圧縮水素やアンモニアと比べた場合のコスト、容積エネルギー密度の低さ、電力網上での電力大量貯蔵に必要な大型バッテリーに付随する、リソース調達能力による（経営組織への）影響が挙げられる。しかしながら、バッテリーは重要な補助的電源として、またマイクログリッドの主たる貯蔵手段として引き続き使用されるだろう。
- **寿命**：研究の焦点は、サイクル寿命とカレンダー寿命の改善に絞られている。どちらも、コンポーネント、特に陽極、陰極、電解質の漸次劣化によって決定される。
- **スケーラビリティ（拡張性）**：LIBバッテリーは小型のセルで構成される。これらを組み立てることにより大型バッテリーパックが出来上がる。セルの中でエネルギー伝達を担うイオンの大きさはわずか0.2ナノメートル前後である。これらのイオンが、ミクロン単位の大きさを持つ粒子（髪の毛の太さの70分の1）を出たり入ったりする。これらを実用化するとすれば、ますます効率化・自動化された製造工程で、このごく小さな粒子を扱うプロセスをスケールアップし、次第に大型のセルとバッテリーパックで機能するようにする必要がある。ヘクター単位で測定されるほどのスケールとフットプリントである。
- **持続可能性**：持続可能性に関する課題としては、限りある原料、採掘作業員の労働条件、製造のカーボンフットプリント、再使用とリサイクル可能性の限界が挙げられる（パネル参照）。ネットゼロの最終目標は、ゼロカーボン製造プロセスで組み立てられたリサイクルコンポーネントでバッテリーを作ることである。
- **高速充電**：充電の高速化は、ドライバーの「走行距離への不安」の払拭を可能にすることにより、EVの採用を促進する。現在は多くの新型EVが1回の充電で約200マイル走行できるようになったが、現時点で最速の技術でも、20～40分かけて自動車充電を80%しか行うことができない<sup>13</sup>。寿命を縮めることなく、より安全な高速充電を可能にするためには、より高性能の電極設計と、今後発見が期待される新素材が必要である。さらに、充電インフラへの巨額の投資も必要となる。
- **技術移転**：イノベーションは、発見から導入まで7～10年（あるいはそれ以上）の年月を要する傾向にある。例えば、LIBが1991年に商業化されるまでには約20年のインキュベーション期間があった。2050年の目標を達成するには、今アクションが必要である。

## 2. 進歩と導入の機会

さらに強力な長寿命バッテリーの研究には2つの主な領域があり、それぞれが次のように独自の焦点を定めている。

- **短期的** – LIB バッテリー技術を最適化する。
- **長期的** – さまざまな重要用途でのバッテリー配備の可能性を持つ次世代バッテリーを開発する。

### 2.1 リチウムイオンバッテリーの最適化

#### 2.1.1 進歩を阻む障害

十分にコストが低く、高圧セル電位に適した酸化還元活性を示し、複数のサイクルにわたってリチウムの取り出しと再挿入が行われたときに十分な安定性を持つ電極で使用できるリチウム化合物はほとんど存在しない<sup>14</sup>。最も高価なコンポーネントは陰極である。これは、コバルトやニッケルのような酸化還元活性のある金属のコスト、また、そこまで大きな割合を占めるわけではないがリチウムのコストにも起因する。これらの原料はすべて採掘したのち、加工してバッテリー電極として組み立てる必要がある<sup>15</sup>。バッテリー・コンポーネントの安定性の向上は非常に重要である。バッテリーを組み立てるとき、コンポーネントは一般に安定し、エネルギー準位が低い状態だが、バッテリーの充電が行われるときは、多数の電極材が「準安定状態」となり、最も安定した（「平衡」）状態より高いエネルギーを持つ。

現在の LIB は、通常の作動中は劣化と副反応を最小限に保ちながら準安定状態を維持できるが、熱によって熱力学的に安定した物質への構造変化が引き起こされ、バッテリーの経時劣化故障に至る。陰極材の構造がごく短時間のうちに変化して熱を発生し、酸素が発生した場合には火災の危険が生ずる。これはバッテリーの短絡が起きた場合に特に深刻な作用である。陰極側での劣化は一般に構造変化によって生じる。構造変化によって容量が小さくなり抵抗が増加する。一因として、陰極電解質界面（CEI）の形成と、表面・浅層における構造的再配列が挙げられる。陽極側では、バッテリーが保護層またはパッシベーション層を形成する。この層は固体電解質界面（SEI）と呼ばれ、諸刃の効果を持つ。SEI は電解質の劣化を防ぎ、陽極の激しい還元状態から電解質を守ることから動作に欠かせないが、時間の経過とともに SEI の成長が、陽極材と陰極材への挿入と取り出しが可能な活性リチウムを消費し、減少させるとともにセルの抵抗を増加させる。

LIB のエネルギー密度を、現時点で究極の限界と考えられている 350 Wh/kg まで高める余地が存在するが、ネットゼロ経済は、そのうちにこれらの限界を超えるバッテリーを要求することになるだろう。将来的に新しい陰極材が手に入るとしても、急速に劣化せず、安全上の潜在的危険要因を持たない材料を探すことが課題である。進歩を阻む最終的な障害は急速充電にある。急速充電はバッテリーの過熱につながるおそれがあり、結果としていくつもの劣化プロセスを引き起こす。また、短絡が起きる可能性もあり、結果的に火災や爆発に至るおそれもある。

長期的な課題は、「リチウムを超えて」本質的に高いスケーラビリティと持続可能性を持つ高エネルギー密度のバッテリーを作製することである。

### 2.1.2 進歩の可能性

バッテリー化学は、研究・開発・導入の分野で着々と進歩が見られる分野である。LIBが徐々に進歩を遂げる可能性はいくつも存在する。その中から数例をここで紹介する。

- **陽極技術**：グラファイトの代わりにシリコンまたはシリコン合金もしくは化合物を使用することによって理論上、エネルギー密度は約40%高まる<sup>16</sup>。しかしながら、シリコン陽極を有するバッテリーは容量低下が速い。これは陽極の電解質分解産物にリチウムが捕まるためである。グラファイトにごく少量のシリコンまたはシリコン酸化物(SiOx)を加える方法で、若干容量を増加させることが可能である<sup>17</sup>。リチウム金属は陽極化学物質の究極点である。リチウム金属デンドライトの形成を防ぐための戦略を考案するためかなりの研究が行われている。デンドライトは、電力喪失や短絡、深刻な安全上の問題を引き起こすおそれのある針状構造である。
- **陰極技術**：ニッケルマンガンコバルト酸化物陰極は、エネルギー密度の理論的境界に近いところで作用している。一部のEVではリン酸鉄リチウムが使われる。これは、原料が豊富で比較的成本が安く、バッテリーパックの全体のサイズと重量を小さくできるためである<sup>18</sup>。現在研究と最適化が進められているその他の構造としては、不規則岩塩<sup>19</sup>、安定性の問題が解決されれば(陰極の)エネルギー密度を最大50%高める可能性のある化合物が挙げられる。電極粒子の形態または微細構造の最適化により、例えば、粒子のクラッキング防止に役立つことにより、性能を高めるためのもう一つの方法が示される。
- **液体電解質技術**：電解質は進歩へのさらなる選択肢を提供する。それぞれの輸送特性と安定性を理解するために、さまざまな溶剤、塩、添加剤の化学的性質が検

証されている。これらの改良は、セルの動作電圧とエネルギー密度を高め、寿命を延ばし、安全性を向上させる可能性がある。「デザイナー」SEI(ほぼ制御不能な電解質分解反応に頼らず、カスタムメイドのコーティングで作製されたSEI)が生まれる可能性もある。

### 2.2 次世代バッテリー

多くの研究は向こう10年間のLIB改良に焦点を当てているが、長期的な課題は、「リチウムを超えて」本質的に高いスケーラビリティと持続可能性を持つ高エネルギー密度のバッテリーを作製することである。

- **ナトリウムイオンバッテリー(SIB、NIBと呼ばれることもある)**：ナトリウムは、地球上で6番目に豊富な元素であり、資源としては比較的廉価だが、リチウムに近い電荷輸送特性を持つ。SIB陰極は、ナトリウムが比較的豊富で廉価な酸化鉄と酸化マンガンと結合してできた化合物からなる。一般にSIBのエネルギー密度はLIBより低い、コストを下げられるならば電力網での大規模な導入の可能性は排除できない。E-バイクなど、走行距離よりもコストが重視されるEV用途に適した材料にもなりうる<sup>20</sup>。中国は、100 kWhのNIBシステムを使用した世界初のエネルギー貯蔵施設を研究センターですでに導入している<sup>21</sup>。
- **多価陽イオンバッテリー**：天然存在度が高く廉価な金属を使用する動きを背景に、マグネシウム、カルシウム、亜鉛、アルミニウムバッテリーに関する多数の研究活動が活況を呈している(研究の難度の低い順)。これらを総称して多価バッテリーと呼ぶ。そうしたイオンを使用するバッテリーは基本的にエネルギー密度が高い。この分野はまだ初期段階である。ハードルは高いが、より持続可能なバッテリーに対するニーズは、たどるべき研究の糸が多数存在することを意味する。

- **レドックスフローバッテリー (RFB) :**  
フローバッテリーには2種類の化学成分（例えば、異なる酸化状態のバナジウムイオン）を使用する。これらを別々のタンクに入れた液体で溶解する。電力を蓄えるために、これらの液体を電気化学セルを通してポンプで2つの新しいタンクに注入する。このセルは、溶液の「クロスオーバー」を最小限に抑えるために薄膜で隔てられた陽極と陰極を含んでいる。放電時には、液体がセルを通して元のタンクにポンプで送り返される。その際、液体は（電極に電流を起こして）元の状態に戻る。RFBが有望なのは、貯蔵（タンク内）と発電（電気化学セル内）が切り離されているという点である。これは、単純にもっと大きなタンクを使って容量（MWh）を増やすか、あるいはもっと大きな電気化学セルを使って出力（MW）を増やすことによって簡単にスケールアップできることを意味する。バナジウム RFB はサイクル寿命が非常に長く、安全な水性電解質を使用する。中国の大連で、バナジウムフローを使用した初の大型（200 MW/800 MWh）バッテリーが現在建設されている<sup>22</sup>。ただし、バナジウム RFB のエネルギー密度は LIB より劣る。また、毒性があり、大規模に使用した場合には資源の問題が起きる可能性がある<sup>23</sup>。キノンなど、持続可能性が高く、廉価な有機化学品を含むバッテリーはかなり有望だが、コンポーネントの長期的安定性という問題が今後の活発な研究の課題として残されている。

- **ソリッドステート (全固体) バッテリー :** 固体電解質を使用するバッテリーも、今後が期待される方法として検証されている。特に陽極でグラファイトに代えてリチウム金属を使用した場合、安全性とエネルギー密度が高まる可能性がある。ソリッドステートバッテリーは主にセラミックコンポーネントで作られている。陽極が充放電で大きくなったり小さくなったりする間、電極と電解質の良好な接触を維持しながら、リチウムイオンを伝導できなければならない。セルに高圧がかけられない場合、これは大きな課題となる。柔らかい硫化物系電解質はリチウムイオン伝導性が非常に高い。これは強電流バッテリーには重要なポイントだが、（陰極材と陽極材のどちらもが水分と空気に対して）反応性が高い。電解質にはポリマーが使用される。これは加工がしやすく安全性も高まるためだが、イオン導電性が液体電解質より低いという点で今後の研究が待たれる。

- **長期的な選択肢**：持続可能性への配慮から、エネルギー密度が非常に高く、低コストを実現する可能性のあるリチウム・硫黄電池と金属空気電池に関してかなりの研究が行われてきた。リチウムと酸素が反応するリチウム空気電池（LAB）は、エネルギー密度の究極点だが、電解質の激しい劣化の問題や、二酸化炭素と水分レベルをコントロールするための空気処理の必要性など、大きな課題がこの技術の前に立ちはだかっている。これらの課題は技術を複雑化させ、結果としてコストを押し上げる。しかし、最近の技術は、空気処理を含め、**600 Wh/kg** のリチウム空気電池の見通しが立つところまで進歩した。航空機の電化にはこの数字が不可欠と思われる。充電式空気亜鉛電池

が、かなりの有望性を見せ始めている。例えば、亜鉛金属を可逆的にメッキする能力に関して進歩があった。理論的なエネルギー密度が LAB と LIB の中間に位置する金属硫黄電池も商業化に近づいているが、LAB と同じくリチウム金属陽極を保護する必要がある。また、副反応（シャトリング）も防がなければならない。最終的に、科学者は未知の「未来のバッテリー」を開発する必要があるかもしれない。それは、バッテリーと燃料電池を組み合わせたようなものかもしれない。廉価で持続可能性の高いさまざまな化学物質を「エネルギーベクトル」または燃料として可逆的に使用し、一連の酸化還元反応を通じて電力を作るのである

## コラム 2

### 持続可能性

再使用とリサイクルに関する循環型経済の原則が LIB にも適用され始めた。現在のバッテリーは、有限の鉱物の採掘からリサイクル可能性に至るまで、一連の持続可能性問題を提起する。素材の点では、ニッケルとコバルトの将来的な可用性や、コバルト採掘作業員<sup>24</sup>の健康・労働条件・人権、ニッケル採取の汚染リスクを巡る問題が存在する。現在のところリチウムは豊富だが、バッテリー市場が予想通り成長し、しかもバッテリーがリサイクルされなければ、既知のサプライヤーは需要に応えられなくなるか、あるいは数十年以内に材料が枯渇するかもしれない<sup>25</sup>。また、採取の時点で環境上の懸念も存在する。バッテリーのライフサイクルカーボンフットプリントは、ほぼすべて製造の過程で生じる。その約半分を生産に必要な電力が占める<sup>26</sup>。バッテリーのみに焦点が絞られた研究は稀だが、この分野の研究は、今日のバッテリーがゼロカーボンの選択肢でないことを示している。ある研究によれば、典型的な欧州の環境で、自動車用 LIB 製造による排出は、キロメートル当たり二酸化炭素 **27 グラム (g/km)** のライフタイムフットプリント（バッテリー

をアジアで生産した場合は **50 g/km<sup>27</sup>** に上昇）を生ずる。これは EV の全体的なフットプリント **109 g/km** の一部を構成する。ちなみに、平均的なガソリン車のフットプリントは **258 g/km** となっている。新技術が登場するときには、起こりうる新たな資源の重要課題を考慮に入れ、完全なライフサイクル分析を取り入れなければならないという点を強調しておく。製造に関するその他の要因の点では、より環境に優しいバインダーによる水性プロセスが陽極に使用されるようになってきてはいるものの、多くの電極は毒性を持つ可燃性スラリーから作られている<sup>28</sup>

毒性の気体が放出されるおそれがあるため、バッテリーを開くことは一般に安全とは言えない。また、火災の危険があり、さまざまなコンポーネントを分離することが難しいといった理由で、リサイクルはハードルが高い。英国のファラデー研究所をはじめとする全世界の多数の研究所が、ロボットを使用する方法を含め、バッテリーを安全に解体する方法や、再使用可能な材料を回収する研究を進めているが<sup>29</sup>、未来のバッテリーの設計にはリサイクルを組み込むことが不可欠である。



### 3. 今後のバッテリー開発の主な分野

既存の LIB バッテリーシステムを最適化し、未来のバッテリーに必要な解決策を生み出すために、さらなる開発を要する分野が多数存在する。

- **特性評価**：実際の環境下で作動するバッテリーの正常性を分析するためにさらなるツールを開発する必要がある。また、バッテリー内の材料相互作用の特性評価を行うための優れたツールも必要である。
- **コンピューテーションとモデリング**：バッテリーの性能と劣化を理解するためには、原子レベル、バッテリーのコンポーネントレベル、バッテリーパックレベルでのコンピューテーションを結び付けるためのモデリングが必要である。AI またはディープラーニング方式は、研究を加速させ、大型システムのモデリングと、発生する大きなデータセットの処理を可能にするが、本質的に、さまざまなプロセス自体を慎重にモデリングすることも必要である。
- **準安定状態にある物質の制御**：準安定性はバッテリーの動作に欠かせない。そこで、例えば、高温に耐えられる物質や本質的に自己回復作用のある物質の発見が一つの課題となる。
- **分野横断的研究協力**：バッテリー研究においては、持続的かつ長期的な財政的支援を伴う分野横断的研究協力が不可欠である。学術界と産業界の研究協力は、例えば、Batteries Europe<sup>30</sup>、中国の Tianmu Lake Institute of Advanced Energy Storage Technologies<sup>31</sup>、ドイツの Batterie 2020<sup>32</sup>、米国の Joint Center for Energy Storage Research<sup>33</sup>、英国の Faraday Institution（ファラデー研究所）<sup>34</sup>等の取り組みにも明らかに表れているが、全世界の利益に寄与するこうした国際的パートナーシップをさらに増やす余地がある。

#### 3.1 導入の観点では 2030 年と 2050 年までに何が達成可能か

2030 年までには、コストを押し下げ、寿命を延ばし、エネルギー密度を高め、充電速度を速めるさまざまな漸進的改良が LIB 技術に寄与するはずである。一方で、今日の技術を超えた長期的目標に向けての前進も続いている。例えば、グラファイト陽極全体をシリコンに代える（未だにきわめて困難だが）など、個々の改良は軽微なものかもしれないが、これを積み重ねれば、最大 40% の容量増強につながる可能性がある。複数の分野で性能が向上すれば、結果としてより実質的な進歩が実現し、導入が広がるだろう。

2050 年までには画期的な進歩があり、電力網用蓄電のための大型バッテリーのスケールアップが実現しているはずである。それには、ナトリウムイオンや、レドックスフローバッテリー（RFB）、あるいは未知の「未来のバッテリー」など、在来型充電式を超える新技術が使われる可能性がある。重量物運搬車（HGV）と航空機の電化に対する要請が、LIB バッテリー技術を超える技術をもたらすだろう。一方、2050 年のネットゼロの世界では同時に、持続可能な材料でできた、100% リサイクル可能なバッテリーが主役になっているはずである。新たな化学的性質が発見され、最適化され、劣化の問題が解決されれば、コバルトとニッケルに代わって鉄とマンガンが使われるかもしれない。

---

LIB 技術は、コストを押し下げ、寿命を延ばし、エネルギー密度を高め、充電速度を速めるさまざまな漸進的改良の恩恵を受けるはずである。

---

## 結論

バッテリーは今後も、デジタル世界において電力網、輸送、動力の脱炭素化の鍵を握り続けるだろう。短期的にはリチウムイオンバッテリーのさらなる開発を進め、バッテリーを必要とする用途の多くを満たすことが重要である。しかしながら、高エネルギー密度の必要性、原料のコストと可用性の問題、さらには安全上の考慮事項がもたらす本質的な課題が、既存の LIB を補完

し、さまざまな市場セグメントの成長を可能にする新しいバッテリー化学成分の開発を今後も促していこう。これらは、集中的な国際的協力・協調があつて初めて、必要とされる期限内に実を結ぶ。これらの研究協力と開発は、電化の促進により脱炭素化のスピードを加速させる可能性をもたらす。

この報告資料は、排出ネットゼロを実現させ、気候変動に適応するための世界的な取り組みを、科学と技術がいかに後押しできるかを検討する一連の資料の一つである。この報告資料集は、各国が 2050 年までのネットゼロに向けた自国のロードマップを策定するにあたり、科学的情報が状況の理解とアクションを助けることができる 12 の課題に関して全世界の政策決定者に情報を提供することを目的としている。

全資料をご覧になりたい方は、[royalsociety.org/climate-science-solutions](https://royalsociety.org/climate-science-solutions) をご参照ください。

この著作物の文章は、クリエイティブ・コモンズ表示ライセンスの条件のもとで認可されています。原作者および出所のクレジットが表示される限り、無制限の使用が認められます。

ライセンス入手先：[creativecommons.org/licenses/by/4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0)

発行：2021 年 5 月 DES7287\_9 © The Royal Society

## 参考文献

1. The IEA. 2020. *Tracking transport 2020*. See <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2020> (accessed 22 April 2021).
2. The IEA. 2020. *Global EV Outlook 2020*. See <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020> (accessed 22 April 2021)
3. Bloomberg NEF. 2019 *Battery Pack Prices Fall As Market Ramps Up With Market Average At \$156/kWh In 2019*. See <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-as-market-ramps-up-with-market-average-at-156-kwh-in-2019/> (accessed 22 April 2021).
4. Bloomberg NEF. 2020 *Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh*. See <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/> (accessed 22 April 2021).
5. Tom Lusher. 2019 *Average electric vehicle range exceeds 200 miles*. Cornwall Insight.
6. Chris Randal. 2020 *Tesla researchers present battery with 2 million mile lifecycle*. Electrive.com. Oct 19, 2020 See <https://www.electrive.com/2020/10/19/tesla-researchers-present-battery-with-2-million-mile-lifecycle/> (accessed 22 April 2021).
7. National Grid ESO. *Electricity Explained: Battery storage*. See <https://www.nationalgrideso.com/news/what-battery-storage-and-how-do-batteries-help-us-balance-grid> (accessed 22 April 2021)
8. IRENA. 2019. *Utility-scale batteries innovation landscape brief*. See [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA\\_Utility-scale-batteries\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Utility-scale-batteries_2019.pdf) (accessed 22 April 2021).
9. The US Energy Information Administration. 2020 *Utility-scale battery storage costs decreased nearly 70% between 2015 and 2018*. See <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=45596&src=email> (accessed 22 April 2021)
10. Crabtree G, Kocs E & Trahey L. (2015). *The energy-storage frontier: Lithium-ion batteries and beyond*. MRS Bulletin. 40.1067-1078. (doi:10.1557/mrs.2015.259).
11. Faraday Institute. 2020. *High-energy battery technologies*. See <https://faraday.ac.uk/wp-content/uploads/2020/01/High-Energy-battery-technologies-FINAL.pdf> (accessed 23 April 2021).
12. Crabtree G, Kocs E & Trahey L. (2015). *The energy-storage frontier: Lithium-ion batteries and beyond*. MRS Bulletin. 40.1067-1078. (doi:10.1557/mrs.2015.259).
13. ZAP Map (*Connectors and speeds*). See <https://www.zap-map.com/charge-points/connectors-speeds/> (accessed 23 April 2021)
14. Crabtree G, Kocs E & Trahey L. (2015). *The energy-storage frontier: Lithium-ion batteries and beyond*. MRS Bulletin. 40.1067-1078. (doi:10.1557/mrs.2015.259).
15. Bloomberg Green. 2020. *Why building an electric car is so expensive, for now*. See <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-10-22/why-building-an-electric-car-is-so-expensive-for-now-quicktake> (accessed 23 April 2021)
16. Obrovac, M. N.; Chevrier, V. L. *Alloy Negative Electrodes for Li-Ion Batteries*. Chem. Rev. 2014, **114** 11444–11502. (<https://doi.org/10.1021/cr500207g>).
17. Berhaut C et al. 2020. *Prelithiation of silicon/graphite composite anodes: Benefits and mechanisms for long-lasting Li-Ion batteries*. Energy Storage Materials **29** 190-197. (<https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.04.008>).
18. Clean Technical. *Tesla's Efficiency Advantage: Cheap & Abundant LFP Batteries Will Power Mass-Market EVs*. See <https://cleantechnica.com/2020/07/23/teslas-efficiency-advantage-cheap-abundant-lfp-batteries-will-power-mass-market-evs/> (accessed 23 April 2021)
19. R.J. Clement et al. *Cation-disordered rocksalt transition metal oxides and oxyfluorides for high energy lithium-ion cathodes*. Energy Environ. Sci. 2020,**13**, 345-373 (DOI: 10.1039/C9EE02803J)
20. For example, the Xubaka from Sodium Cycles. See <https://www.xubaka.com/en/the-bike/> (accessed 23 April 2021)
21. Chinese Academy of Sciences 2019. *China First Demonstrates the 100 kWh Na-Ion Battery System for Energy Storage*. See [http://english.cas.cn/newsroom/research\\_news/201904/t20190401\\_207399.shtml](http://english.cas.cn/newsroom/research_news/201904/t20190401_207399.shtml) (accessed 23 April 2021)
22. S&P Global. 2018 Green Globe: *China starts building world's largest vanadium flow battery*. See <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/trending/1sgv2yl4jn3r-18pibt0g2> (accessed 23 April 2021)
23. Forbes. 2020. *Why Vanadium Flow Batteries May Be The Future Of Utility-Scale Energy Storage*. See <https://www.forbes.com/sites/rpapier/2020/10/24/why-vanadium-flow-batteries-may-be-the-future-of-utility-scale-energy-storage/?sh=498c07d52305> (accessed 23 April 2021)
24. Banza Lubaba Nkulu C et al. 2018. *Sustainability of artisanal mining of cobalt in DR Congo*. Nat Sustain. **1** 495-504. (doi:10.1038/s41893-018-0139-4).
25. Parakram Pyakurel. 2019. *Lithium is finite – but clean technology relies on such non-renewable resources*. The Conversation. See <https://theconversation.com/lithium-is-finite-but-clean-technology-relies-on-such-non-renewable-resources-109630> (accessed 23 April 2021)
26. Carbon Brief. 2020. *Factcheck: How electric vehicles help to tackle climate change*. See <https://www.carbonbrief.org/factcheck-how-electric-vehicles-help-to-tackle-climate-change> (accessed 23 April 2021)
27. Carbon Brief. 2020. *Factcheck: How electric vehicles help to tackle climate change*. See <https://www.carbonbrief.org/factcheck-how-electric-vehicles-help-to-tackle-climate-change> (accessed 23 April 2021).
28. Li J, Lu Y, Yang T, Ge D, Wood DL 3rd, Li Z. *Water-Based Electrode Manufacturing and Direct Recycling of Lithium-Ion Battery Electrodes – A Green and Sustainable Manufacturing System*. iScience. 2020. **23**. (doi:10.1016/j.isci.2020.101081)
29. Faraday Institute. *Relib: recycling and reuse of ev lithium-ion batteries*. See <https://faraday.ac.uk/research/lithium-ion/recycle-reuse/> (accessed 23 April 2021)
30. European Commission, *Batteries Europe is the technology and innovation platform of the European Battery Alliance*. See [https://ec.europa.eu/energy/topics/technology-and-innovation/batteries-europe\\_en](https://ec.europa.eu/energy/topics/technology-and-innovation/batteries-europe_en) (accessed 23 April 2021)
31. Tianmu Lake Institute of Advanced Energy Storage Technologies Co. See <http://en.aesit.com.cn/#page2> (accessed 23 April 2021)
32. German Federal Ministry of Education and Research. *Batterie 2020*. See <https://batterie-2020.de/foerderinitiative/foerderungen-der-batterieforschung-durch-das-bmbf/> (accessed 29 April 2021)
33. Joint Center for Energy Storage Research. See <https://www.jcesr.org/> (accessed 29 April 2021)
34. The Faraday Institution. See <https://faraday.ac.uk/> (accessed 29 April 2021)