SCIENTIFIC INSTRUMENT NEWS
Technical Magazine of Electron Microscope and Analytical Instruments.
2026 Vol.69 No.2 SEPTEMBER
コラム
2026 Vol.69 No.2

電池産業の次なる飛躍を支える「見える化」技術への期待
―リチウム硫黄電池、イオン液体電池、キャパシタの研究から―



関西大学　化学生命工学部　教授
関西大学　イノベーション創生センター長
石川 正司 工学博士

1. 「量」から「質と多様性」へ向かう電池産業

電池はいま、携帯機器や自動車のための部品という従来の位置づけを超え、社会のエネルギー基盤そのものになろうとしている。電気自動車の普及に加え、再生可能エネルギーの変動を吸収する定置用蓄電システム、データセンターの非常用・負荷平準化電源、航空・宇宙、医療、防災など、その用途は急速に広がっている。国際エネルギー機関（IEA）によれば、電気自動車および定置用蓄電を合わせた世界の電池需要は、2024年に初めて1 TWhに達した[1)]。電池産業は今後も成長を続けると考えられるが、その競争軸は単純なエネルギー密度の向上だけではない。

安全性、寿命、急速充電性能、低温・高温特性、資源制約、製造時の環境負荷、リサイクル性、そしてシステムとしての信頼性が同時に問われている。用途によって求められる性能は異なり、リチウムイオン電池、全固体電池、ナトリウムイオン電池、リチウム硫黄電池、さらにスーパーキャパシタとの組合せを含む、多様な蓄電デバイスの適材適所化が進むであろう。電池を単体で評価する時代から、電池と電力制御を一体として設計する時代への移行でもある。高性能な材料を発見するだけでなく、それを安定して製造し、長期間安全に使用し、使用後には資源として循環させる技術体系が必要である。研究室で優れた性能を示した材料でも、電極を厚くする、電解液量を減らす、セルを大型化するといった実用条件では、その性能を維持できない場合が少なくない。この材料研究と製品開発の隔たりを埋めることが重要な課題となる。

2. 蓄電デバイスの性能を決める「界面」

私はこれまで、電気二重層キャパシタ、イオン液体を電解液に用いるリチウム二次電池、そしてリチウム硫黄電池の研究に携わってきた。一見すると異なるデバイスであるが、本質的な問題は共通している。それは、電極と電解液が接する「界面」で、何が、いつ、どのように起きているのかという問題である。

例えばキャパシタでは、電極表面に形成される電気二重層の構造が出力特性や耐電圧を左右する。単純な静電吸着として説明されることも多いが、実際には細孔径、表面官能基、イオンの大きさ、溶媒和状態などが複雑に関係する。平均的な比表面積や細孔分布だけを測っても、充放電へ寄与している空間を必ずしも特定できない。

イオン液体電池についても同様である。私たちは、FSIアニオンを含むイオン液体が、溶媒や添加剤を用いなくても黒鉛負極の可逆的な充放電を可能にし、高粘度でありながら優れた電極反応速度を示すことを見いだしてきた[2)]。さらに、この系を宇宙環境で使用する電池へ展開した。ここでは「粘度が高ければ性能は低い」という単純な物性論では説明できず、電極近傍のイオン配列、溶媒和構造、電荷移動、界面被膜を総合的に理解する必要がある。

リチウム硫黄電池では、この問題はさらに動的になる。硫黄正極は理論容量が1,672 mAh g^{-1}と大きく、硫黄が軽量、安価で資源的にも豊富であることから、高比エネルギー型次世代電池として魅力的である。一方、充放電中には固体硫黄から可溶性の多硫化リチウムを経て硫化リチウムへ至る複雑な反応が起こり、活物質の溶出、シャトル現象、細孔閉塞、リチウム金属負極の不均一反応などが容量低下を引き起こす。私たちの研究では、直径2 nm以下の微細孔を有する活性炭に硫黄を担持し、多硫化物の溶出を抑制する方法を検討してきた。例えば微細孔性炭素正極をもちいた系では、充放電電圧範囲

© Hitachi High-Tech Corporation All rights reserved. 2026

が劣化挙動を大きく左右することを示した[3]。しかしながら、電圧曲線や充放電容量から推測できることには限界がある。細孔内部で硫黄種がいつ生成・消失するのか、電解液がどこまで浸透し、反応生成物が電子・イオン輸送経路をどう変えるのかを、時間と空間の両面から捉える必要がある。

蓄電デバイスの性能を決めるのは、材料の組成や平均的な物性だけではなく、局所的かつ時間とともに変化する界面である。この界面を理解するには、充放電試験に加えて、電子顕微鏡や分光分析による「見える化」が不可欠である。

3. 電子顕微鏡・理化学機器に求める四つの進化

ここに、電子顕微鏡をはじめとする理化学機器への大きな期待がある。ただし、電池研究者が求めているのは、単に倍率や空間分解能が高い装置ではない。今後は、次の四つの方向で装置と測定技術が進化することを期待している。

第一の要望は、試料の「本来の姿」を保ったまま観察できることである。リチウム金属、界面被膜、多硫化物、イオン液体を含む電極は、大気、水分、真空、電子線に極めて敏感である。セルを解体・洗浄して観察した像が、作動中の電池内部を反映しているとは限らない。観察操作によって、本来の物質が失われたり、新たな生成物が生じたりする可能性もある。したがって、大気に触れずに試料を移送できる仕組み、クライオ電子顕微鏡、低線量観察、液体電解液を保持できる密閉型セルの高度化が重要になる。オペランド電子顕微鏡は、充放電中の変化をナノメートル領域で捉えられる一方、観察用セルと実用電池との構造差、電子線による反応誘起、観察領域の狭さが課題である[4]。像が実電池の反応をどこまで代表しているかを検証できる装置設計が必要である。

第二の要望は、形を見る機能と化学状態を測る機能の統合である。SEMやTEMによる形態観察に、EDS、EELS、ラマン分光、赤外分光、X線光電子分光、X線吸収分光、質量分析などを相関させ、同一位置・同一履歴の情報として解析したい。特に硫黄系では、硫黄の存在を確認するだけでなく、S_8、多硫化物、Li_2S_2、Li_2Sなどを識別しなければ反応機構には迫れない。キャパシタやイオン液体系でも、ナノ細孔内のイオン分布や局所的な溶媒和状態を、電位と対応づけて測定する技術が望まれる。

第三の要望は、ナノスケールの観察と実用セルの診断をつなぐことである。電池の不均一性は、原子・分子、活物質粒子、電極層、セル、モジュールという階層をまたいで現れる。電子顕微鏡、X線CT、超音波、熱画像、ガス分析、電気化学インピーダンスなどを組み合わせ、「どこで異常が始まり、それがセル全体へどう波及したか」を追跡する必要がある。そのためには、試料履歴、充放電条件、観察位置を共通のメタデータで結ぶ仕組みが不可欠である。

第四の要望は、熟練者だけが扱える装置から、産業現場で再現よく使える装置への進化である。AIによる画像解析や自動計測は有効であるが、結果のブラックボックス化は避けたい。装置間差、測定者差、試料調製差を評価できる標準試料と手順を整備し、粒径、亀裂率、被膜厚さ、析出物分布などを定量化する必要がある。発熱、膨張、微小短絡へ至る前駆現象を安全に検出できる設備も重要である。

4. 「見える化」から「共創」へ――今後のための提言

これからの分析機器には「より小さいものを見る」ことに加え、「動いているものを乱さずに見る」「異なる尺度の情報をつなぐ」「多数の試料を同じ基準で比較する」という三つの方向性が必要だと考えている。電池開発では、材料の発見から実用化までの間に、厚膜電極化、電解液量の削減、大型化、製造ばらつき、安全性という厳しい関門がある。分析装置がこの谷間を埋め、観察結果を材料設計や製造条件へ迅速にフィードバックできれば、日本が強みとしてきた材料、製造、計測の連携は、大きな競争力となり得る。そのためには、装置メーカーが完成品を研究者へ提供する一方向の関係から、電池研究者、材料メーカー、電池メーカー、装置開発者が、研究の初期段階から測定課題を共有する関係へ進むことが重要である。標準的な観察手順の共同策定、複数機関によるラウンドロビン試験、測定条件と元データの蓄積も有効であろう。

電池の中で進む反応は、多くの場合、直接には見えない。しかし、見えないからこそ測り、仮説を立て、装置を工夫して確かめるところに電池研究の面白さがある。リチウム硫黄電池、イオン液体電池、キャパシタのいずれにおいても、性能を決めるのは平均値だけではなく、局所的で一過性の界面現象である。電子顕微鏡と理化学機器が、単なる「静止画」から、

© Hitachi High-Tech Corporation All rights reserved. 2026

電池内部で進む「反応の物語」を描き出す装置へ進化することを期待したい。そして、電池研究者、装置開発者、材料メーカー、電池メーカーが専門領域を越えて測定課題を共有し、次世代の計測技術を共創することを提言したい。

参考文献

1) International Energy Agency, *Global EV Outlook 2025—Electric Vehicle Batteries*, IEA, Paris (2025). https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/electric-vehicle-batteries
2) 石川正司,「イオン液体リチウム二次電池の実現と応用」, *オレオサイエンス*, **18**, 185–190 (2018). DOI: 10.5650/oleoscience.18.185
3) T. Tonoya, Y. Matsui, H. Hinago and M. Ishikawa, "Performance Stabilization of Lithium-Sulfur Batteries Containing Sulfolane-based Electrolyte and Microporous Cathode by Controlling Working Voltage Range," *Electrochemistry* (2023). DOI: 10.5796/electrochemistry.23-00037
4) S. Tao *et al*., "In Operando Closed-cell Transmission Electron Microscopy for Rechargeable Battery Characterization: Scientific Breakthroughs and Practical Limitations," *Nano Energy*, **96**, 107083 (2022). DOI: 10.1016/j.nanoen.2022.107083
5) 経済産業省,「蓄電池産業戦略」(2022). https://www.meti.go.jp/policy/economy/economic_security/battery/index.html

会員制サイト“S.I.navi”では，S.I.NEWSのバックナンバーを含む全内容をご覧いただけます。https://biz.hitachi-hightech.com/sinavi/

© Hitachi High-Tech Corporation All rights reserved. 2026