

2.1.2 蓄電デバイス

(1) 研究開発領域の定義

電気エネルギーを入力して、それを一定期間保持したのちに、電気エネルギーとして出力するデバイスが蓄電デバイスである。エネルギーの保持のために、静電エネルギーとして蓄積するもの（キャパシタ）、電流（＝静磁）エネルギーとして蓄積するもの（超伝導コイル）、運動エネルギーとして蓄積するもの（フライホイール）、重力（位置）エネルギーとして蓄積するもの（揚水発電）、化学エネルギーとして蓄積するもの（二次電池）などがある。ここでは、従来の携帯機器用電源から発展し、自動車等のモビリティのパワーソース、再生可能エネルギーをグリッドに適合させるためのバッファなどで、急速に用途が拡大し、価格も低下している二次電池を中心に取り上げる。先端リチウムイオン電池のほか、次世代電池候補の最右翼であるリチウム金属を負極として使用するリチウム遷移金属酸化物電池、リチウム硫黄電池、リチウム空気電池、リチウム全固体電池を対象とする。

(2) キーワード

二次電池、蓄電池、リチウムイオン電池、次世代電池、ビヨンドリチウムイオン電池、ポストリチウムイオン電池、革新電池、リチウム遷移金属酸化物電池、リチウム硫黄電池、リチウム空気電池、リチウム全固体電池、エネルギー密度、パワー密度、安全性、寿命、使用温度範囲、コスト

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

2019年ノーベル化学賞が「リチウムイオン電池の開発」による功績でJohn B. Goodenough、M. Stanley Whittingham、吉野彰の三氏に授与されたように、現代社会を支えるさまざまな電子・電気機器のエネルギー源としてのリチウムイオン電池は、欠かすことのできない基幹デバイスとなっている。リチウムイオン電池は1991年にソニー社が商品化して以来30年になるが、年間出荷量は電力量で約200 GWh、年間売上高は約5兆円に達し、金額ベースでは鉛蓄電池を抜いて最大の蓄電デバイスにまで成長した。また、環境調和社会に向けた環境保全・地球温暖化対策として自動車の電動化（EV化）が世界的に急速に進められており、2017年以降、民生用途（3C; Computer, Communication, Consumer electronics）を上回るほどまでに、EV用途の急成長が見込まれている。さらに、EVとともに地球温暖化対策としての太陽光や風力など気象により変動しやすい再生エネルギーの有効活用の観点から、グリッド電力貯蔵（Energy Storage System: ESS）用途も普及しつつあり、リチウムイオン電池が再生可能エネルギーを有効利用するための電力貯蔵用途として定置型でさらに大きな容量をもつ蓄電デバイス用途に期待されている。しかしながら、EVやESS用途などの中大型リチウムイオン電池の市場拡大には、さらなるエネルギー単価の低コスト化が必須である。

一方、リチウムイオン電池の性能向上の余地はまだ残されているものの、エネルギー密度向上の限界（350 Wh/kg）も見えてきており、リチウムイオン電池の性能を凌駕するいわゆる次世代電池（ビヨンドリチウムイオン電池、ポストリチウムイオン電池、革新電池などとも称される）の必要性が強調され、500 Wh/kgのエネルギー密度を達成できる二次電池を目標にした研究開発が全世界的になされている。その有力候補としてリチウム金属を負極として使用するリチウム遷移金属酸化物電池、リチウム硫黄電池、リチウム空気電池などが注目を浴びている。

さらに、二次電池の、高エネルギー密度化・大容量化が進むほど充放電時の発熱が顕著となって放熱が難しくなるため、安全性の確保も喫緊の課題となっている。この要請を満たすために可燃性の電解質を不燃性の無機固体に替えた全固体電池もさかんに研究されている。

[研究開発の動向]

・リチウムイオン電池

二次電池に対する要求性能は、①高エネルギー密度、②高パワー（入出力）密度、③長寿命、④高安全性、⑤広使用温度領域などであるが、これらの間には互いにトレードオフの関係にあるものが含まれている。こうした要求に対して、材料、電極板、セルの各レベルでの研究開発がなされている。構成要素である①正極材、②負極材、③電解液、④セパレータ、⑤その他（導電材、バインダー、集電体、接着テープ、外装ケースなど）の材料開発は主に素材メーカーが担当し、それらを使用した電極板製造、セル組立の最適化開発を電池メーカーが担当している。

小型電池の最大の用途であるスマートフォン用パウチ型（ラミネート型）電池においては、従来からの黒鉛負極とコバルト酸リチウム（ LiCoO_2 ：LCO）正極の組み合わせには変化はないが、スマートフォンの大型薄型化、高機能化に伴い、高エネルギー密度化、急速充電対応化およびそれに伴う高安全・信頼性化が継続的に要求されている。具体的には、①正極材：LCOの高電圧化と電極高密度化による比容量、容量密度の向上（満充電状態の正極電位：4.2 V vs. Li/Li⁺、電流容量 135 mAh/g → 満充電状態の正極電位：4.5 V vs. Li/Li⁺、電流容量 200 mAh/g）、②負極材：人造黒鉛の低膨張化と電極高密度化による容量密度の向上、③電解液：低粘度カルボン酸エステル副溶媒による含侵性の改善と数種類の添加剤による寿命向上、④セパレータ：薄膜化とアルミナコートによる安全性の向上、⑤導電材：高価なカーボンナノチューブの極少量添加による活物質間の導電性確保などが採用されており、そのエネルギー密度は290 Wh/kg、720 Wh/lにまで向上している。

一方、EV用途には、角型あるいはパウチ型で、安全性重視の観点からマンガン酸リチウム（ LiMn_2O_4 ：LMO）正極が初期に採用されたが、航続距離延長の要請からニッケルコバルトマンガン三元系酸化物（ $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$ ：NCM）正極に移行しており、さらなる低コスト、高エネルギー密度化の要請から、Co削減/フリー化、Niリッチ化の開発が推進されており（NCM333 → NCM523 → NCM622 → NCM712 → NCM811）、エネルギー密度も民生用途に近づいている。特筆すべき事柄としては、テスラ社はEV開発で最も安価なPC用円筒型18650電池（直径18 mm、長さ65 mm）を数千個使用するという奇抜なアイデアで創業した。現在では専用の2170電池（直径21 mm、長さ70 mm）を採用し、この電池を搭載したModel 3が約15%のEV新車市場を獲得し、ベストセラーEVとなっている。使用正極材はニッケルコバルトアルミ酸化物（ $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$ ：NCA）正極であり、NCM系と同様にさらなるCo削減/フリー化、Niリッチ化を推進している（ $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2 \rightarrow \text{LiNi}_{0.9}\text{Co}_{0.05}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ ）。さらに、バスやトラックなどの商用大型車には低コストで安全性の高いリン酸鉄リチウム（ LiFePO_4 ：LFP）正極が使用されており、普及帯価格の中国内専用Model 3にもモジュールを介さない新たな設計手法であるCell-to-Pack技術を用いた蓄電池システムのセルとして、LFP正極が採用される予定である。

また、負極材に関しては、人造黒鉛系が主流であるが、安価な天然黒鉛の配合比の向上が課題となっている。容量向上のため、シリコン（Si）あるいは一酸化ケイ素（SiO）を担持した黒鉛の開発が推進されているが、充放電時の膨張収縮による劣化という本質的課題は解決されておらず、Si/SiO含有比率は10%未満で、物理的に膨張を抑制できる小型円筒型電池での採用にとどまっている。チタン酸リチウム（ $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ：LTO）負極も高パワー密度（高入出力）、高安全性、高耐久性など長所を活かして、マイルドハイブリッド車

への採用が進んでいる。

電解液に関しては、従来からの六フッ化リン酸リチウム (LiPF₆) を炭酸エステル (EC、PC、DMC、EMC、DEC) の混合溶媒に溶解した有機電解液が使用されているが、少量の添加で電池性能を向上させることができる添加剤の開発およびそれらの配合が主たる開発となっている。

セパレータに関しては、薄膜化が進行しているが、安全性確保の観点から従来の乾式法PP(ポリプロピレン)/PE(ポリエチレン)/PP3層膜から、湿式法PE微多孔膜にシフトする傾向にあり、アルミナやアラミドのコーティング品の比率が増加している。

上記のように、リチウムイオン電池は各材料系の特徴を活かした多様化が進みながらも、大量生産による低コスト化とともにその用途を拡大しつつある。この市場の拡大を受けて、高性能材料、新技術の研究開発も依然として継続されている。

• リチウム金属電池

リチウム金属を負極として使用するリチウム二次電池は、リチウムイオン電池が登場する直前に一時的に商品化されたことがある。しかし、リチウムデンドライト析出に起因する製品の発火事故の影響で、市場が大きく広まることはなく、代わりにリチウム金属を含まないリチウムイオン電池の方に開発の中心が移り、今日の普及にいたっている。

しかしながら、リチウム金属は最も負の電位 (標準電極電位 -3.04V)、高い比容量 (3860 mAh/g) を有し、エネルギー密度的に究極の負極材となりうる材料であるので、その活用に再挑戦することは、ポストリチウムイオン電池候補の最有力と考えられている。正極材として、①リチウムイオン電池に使用されているものと同じ遷移金属酸化物を使用するリチウム遷移金属酸化物電池 (Transition metal oxide: Li/TMO)、②もっとも比容量の高い硫黄 (1672 mAh/g) を使用するリチウム硫黄電池 (Li/S)、③あるいは空気中の酸素 (1675 mAh/g) を使用するリチウム空気電池 (Li/O₂) の3種類の論文が2010年頃から増加している。いずれのリチウム金属電池系も有機電解液が使用されるが、各電池反応が異なるため、リチウムイオン電池とは異なった電解液材料が必要であり、高濃度電解液やイオン液体のような電解液系も検討されている。また、燃えやすい有機電解液を難燃性の有機ポリマー固体電解質や無機セラミック固体電解質に置き換えることによって、電池安全性を向上させることができるので、固体電解質材料の研究開発も積極的に推進されている。各電池系に関する詳細を下記に示すが、多くは材料レベルの研究にとどまっておき、実用電池レベルの評価にまではいたっていない。

• リチウム遷移金属酸化物電池

もともとリチウムイオン電池の登場直前まで開発されていた系であるとともに、材料構成はリチウムイオン電池の正極材探索時に使用するコイン型ハーフセルと同一である。リチウム金属は反応性が高いため有機電解液中での電気化学的溶解、析出のクーロン効率が低いためサイクル寿命が短い。また、リチウムデンドライトの成長によって短絡するので、安全性に劣るといふ本質的課題が存在する。その課題解決のための研究開発がさかんになっており、フッ素元素を多量に含む電解液でLiFを含む強健な固体電解質皮膜 (Solid-Electrolyte Interphase: SEI) を形成する、あるいは、リチウム金属上に人工SEIを形成するなどの対策技術が開発されている。近年、米国スタートアップ会社を中心にNiリッチ正極、薄膜Li保護負極、高F含有電解液などを採用した実用的なパウチ型電池の開発が進んでいる。また、リチウムデンドライト抑制などのため、低レート (0.5C以下) の充電にしか耐えられないが、Sion Power社 (米国) では480 Wh/kgのエネ

ルギー密度で、350サイクル以上の寿命を達成しており、EV用途のほかに、電気垂直離着陸車（electric Vertical Take-off and Landing Vehicle : eVTOL）や無人航空機（Unmanned Aerial Vehicles : UAV）などの特殊用途への適用に焦点を合わせている。

• リチウム硫黄電池

金属リチウムを含む二次電池としては古典的な系であり、1980年代に米国スタートアップを中心に開発されたが、その際に障害となった、硫黄の放電中間生成物であるポリスルフィドアニオンの電解液への溶出、そのレドックスシャトル効果による自己放電、サイクル寿命劣化という本質的課題に再挑戦している。2009年にメソポーラスカーボン(host)を宿主材として、その細孔内に硫黄を固定化することによって、その溶出を防止するという新技術が発表されてから研究開発が再燃し、さまざまな見地から研究されているもっとも論文数が多いリチウム金属電池系である。活物質である S_8 およびその放電生成物である Li_2S は電子伝導性、 Li^+ 伝導性がないので、正極内での電子および Li^+ 移動を促進させるためには、大量(>30 wt%)の多孔質炭素を必要とする。また、作動電圧が約2Vと低いため、高エネルギー密度化のためには、正極の面積比容量(mAh/cm²)をより大きくする必要があるが、正極内の硫黄の充填量を多くするとその利用率が低下するだけでなく、正極の体積変化によるサイクル劣化が顕著になるという本質的課題が存在する。Oxis Energy社(英国)では約400 Wh/kgのエネルギー密度で、数十サイクルの寿命を達成しており、EV、eVTOL、UAV、自立型潜水艇(Autonomous Underwater Vehicle : AUV)などへの適用を検討している。

• リチウム空気電池

1996年にポリマー電解質中で $2Li + O_2 \rightleftharpoons Li_2O_2$ の充放電反応が起こることが発見された。酸素極は活性サイト表面上で、 Li_2O_2 を生成・収納あるいは分解を触媒し、 Li^+ と O_2 を輸送する細孔チャンネルが必要なので、電子伝導性が高く、表面積が大きく、密度の低い多孔質炭素が使用される。当初はリチウムイオン電池用の電解液を使用して検討されたが、系内で発生するスーパーオキシドラジカルアニオンが電解液を分解し、上記の充放電反応ではなく、溶媒が分解することで電気が生成しているという事実が解明され、安定な溶媒系の探索の結果、グライム溶媒が比較的安定であることが確認された。しかしながら、スーパーオキシドラジカルアニオン以上に活性の高い一重項酸素が発生することも確認され、これら活性酸素種に電解液および多孔質炭素が安定でないため、サイクル劣化が著しいという本質的課題が存在する。また、絶縁性の放電生成物 Li_2O_2 や副生成物である Li_2CO_3 を分解する際の過電圧が高く、エネルギー効率が悪く、パワー密度も低いという課題も存在するが、レドックスメディエータによって、副反応を抑制することで性能が改善されている。まだ、実用的なセルで評価できる技術レベルにはいたっていないが、放電電圧は約2.7V、約400 Wh/kgのエネルギー密度で2サイクル程度の実力である。ほとんどの試験は純酸素下で実施されており、空気から酸素を分離供給するシステムや空気中の水分、窒素、二酸化炭素などの影響といった基本的事項を検討できる段階にはないのが現状である。

• リチウム全固体電池

可燃性の有機電解液を難燃性の有機ポリマー固体電解質や無機セラミック固体電解質に置き換えることによって、電池安全性を向上させることができるので、上記、3種類のいずれのリチウム金属電池系にも適用されている。しかしながら、もっとも注目を浴びているのはリチウム遷移金属酸化物電池に無機セラミック固体電解質を適用する研究開発である。その大きな理由は、①リチウム dendrite による短絡の抑制、②リチウ

ム金属の充放電効率の向上、③5 V級の高電圧正極の使用という有機電解液系で達成困難な課題を解決できる可能性を秘めているからである。

無機固体電解質は硫化物系と酸化物系に大別できるが、硫化物系固体電解質を用いた全固体電池の開発が先行している。硫化物系の特徴は、第一にリチウムイオン伝導度が酸化物系に比べて高いことであり、ものによっては有機電解液をも凌ぐ。これは硫化物イオンとリチウムイオンとの結合が酸化物イオンとの結合に比べて弱いため、リチウムイオンが動きやすいことに起因していると考えられる。また、同じく硫化物イオンとの結合が弱いことから硫化物系固体電解質は全般に柔らかい材料であり、圧粉成形だけで高密度かつ低抵抗なペレットが得られ、焼結過程なしでも電池を形成できる利点がある。硫化物系固体電解質では活物質との接合時に、特に酸化物である正極活物質との界面が高抵抗になる問題があるが、正極活物質と同じ酸化物でリチウムイオン伝導性があり電子伝導性のない緩衝層を挟むことで、抵抗が劇的に下がることがわかっているため、硫化物系の全固体電池ではLiNbO₃等の酸化物を被覆した正極活物質粒子が用いられている。

一方の酸化物系固体電解質では、酸化物イオンがリチウムイオンを強く束縛していることからリチウムイオン伝導度が硫化物系に比べて1~2桁低い上に、硬くて扱いづらい材料ではあるものの、大気中でも安定なため製造上では大きな利点がある。これは、大気中のわずかな水分と反応して有毒な硫化水素を発生する硫化物系固体電解質とは対照的である。このように、安全性の観点からは酸化物系固体電解質を用いた全固体電池が理想的だが、低抵抗な酸化物系固体電解質ペレットを作るにしても酸化物は全般に高融点の材料であるため1000°Cを超えるような高温の焼結過程が必要である。活物質との接合をこのような高温で行うと不要な界面反応が起き、活物質が活性を失ったり固体電解質が伝導性を失ったり、界面に高抵抗相が形成されるなどして電池動作しなくなるという大きな問題がある。現在は、微粒子化や助剤添加による焼結温度の低温化、低温焼結性や可塑性のある酸化物系固体電解質材料の開発、界面反応を抑制できる新奇な焼結プロセスの開発等により、低抵抗な界面を得る接合技術の開発が進められている。

多数のスタートアップ会社や研究機関がマスコミにぎわせているが、室温で安定的に作動する高エネルギー密度電池の立証にはいたっていない。その理由として、固体電解質自身の電気伝導率や電気化学的・化学的安定性が不十分である場合も多いが、固体電解質と電極との接合における界面抵抗が大きいという本質的課題が存在する。一方で、大手電子部品各社(TDK、FDK、村田製作所、太陽誘電)が省電力化の進むIoT機器やウェアラブル機器用途に表面実装型(Surface Mount Device: SMD)の薄膜型全固体電池(酸化物系固体電解質)を開発中であり、一部量産化が始まっている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• リチウムイオン電池

寿命や安全性を担保しながら、正極材から高価なCoを削減する開発がEV用途で最大の課題であるが、CATL社(中国)、SKI社、LG Chem社(韓国)はNCM811(LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂)を使用した電池を出荷し、NIO ES6、Kia Niro、Tesla Model 3などに採用され始めている。同様に、Envision AESC社(中国/日本)はSi/黒鉛複合負極、NCM811正極を使用して、エネルギー密度が292 Wh/kg、容量が75 Ahのパウチ型EVセルの開発に成功した。さらなる低コスト化のための脱Co化の技術開発が注目される。

マサチューセッツ工科大学発の米国ベンチャーである24M Technologies社が提供する半固体リチウムイオン電池技術を使用したクレイ型リチウムイオン電池を京セラ社が住宅用ESS向けに開発した。あらかじめ電解液を練り込んだ粘土状の電極材料を厚塗する構造によって、高安全性、長寿命、低コストを実現した。同様

に、三洋化成社が出資するAPB社も全樹脂電池を開発中である。民生、EV用途のように体積エネルギー密度を重視しない定置用ESS用途に、電極の厚膜化による容量向上、製造法の簡素化による低コスト化からのアプローチであり、今後の進展が注目される。

• リチウム金属電池

米国立研究所Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) は、電解液量が少ない条件下での故障原因はLiデンドライト形成による短絡ではなく、電解液の消費による液枯れによる抵抗増加であることを報告した。そして、加圧下ではあるが、エネルギー密度350 Wh/kgの2.5 Ahパウチ型セルで350サイクルの寿命を達成した。局所的Li⁺配位構造の電解液を使用することでリチウム金属負極との反応性を抑制することに成功した。

リチウム金属電池に関する研究の多くが、実用的な電池設計を考慮せずに誇大性能を発表しているとの意見がある。特に、リチウム量や電解液量がエネルギー密度に大きな影響を及ぼすにもかかわらず、大過剰のリチウム、電解液を使用して、リチウムイオン電池よりずっと低いエネルギー密度の条件下で実験しているケースがほとんどである。物質・材料研究機構 (NIMS) は現行のリチウムイオン電池技術を転用した場合のパウチ型電池のエネルギー密度をシミュレーションし、新技術の適用なしには500 Wh/kgのエネルギー密度の達成は困難であることを立証した。それと同時に500 Wh/kgのエネルギー密度を達成できる電解液量では二次電池として機能しないとの報告も現れ始めた。

• 全固体電池

開発が先行する硫化物系固体電解質の全固体リチウムイオン電池は、有機系電解液を凌駕する高いリチウムイオン伝導度の実現と、正極-固体電解質との界面抵抗の問題の解決により、実用化に近づいている。耐久性や信頼性等、商品としての性能確認ができれば早期の市場投入が期待される。また、流動性のある電解液と異なり正極側と負極側で異なる固体電解質が使えることから活物質の選択肢が広がり、高電圧のために電解液が電気分解してしまう5V級のスピネルやオリビン酸正極材料等の実用による高エネルギー密度化の可能性もある。

一方、酸化物系固体電解質のリチウムイオン伝導度に大きな向上はないが、硫化物系固体電解質とは異なり酸化物同士となる正極と固体電解質の界面は潜在的には低抵抗となり、実際に薄膜型では数秒で充放電ができる内部抵抗の小さい酸化物固体電解質型全固体電池が作製できている。バルク型電池で低抵抗な接合を達成するための1つの方策として界面反応を抑制するための低温焼結化がある。単に材料を微粉化して焼結温度を下げることに加え、リチウムイオン伝導度は高いものの高温焼結が必要な酸化物固体電解質粒子 (例えばガーネットの $\text{Li}_{7-x}\text{La}_3\text{Zr}_{2-x}\text{M}_x\text{O}_{12}$: M=Nb, Ta等) を、比較的低温で焼結できるガリチウムイオン伝導度はそれほど高くない Li_3BO_3 や Li_2CO_3 でコーティングしたコアシェル構造の粒子を用いた低温焼結化が試みられている。また、酸化物でありながら、硫化物ほどではないものの柔らかい固体電解質 (例えば Li_3BO_3 や Li_2SO_4 等) を混ぜ込んで圧粉形成により低抵抗な界面を形成することも試行されている。

また、リチウムイオン電池においても有効な高エネルギー密度化の方策の1つとして、高容量かつ卑な負極材料として期待されているSiの実用化があげられる。しかしながら、Li挿入・脱離時の3倍にも及ぶ体積膨張・収縮によって、リチウムイオン電池では集電極から剥がれる問題があるため、現状では現行のグラファイト負極に少量を混ぜ込むことで高容量化をめざしている。一方、全固体電池では電解液中よりも大きな拘束圧がかけられるため、特に可塑性のある硫化物系固体電解質型全固体電池ではSi単体での使用も検討されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

2030年頃の実用化を目標に、EV次世代電池プロジェクトが世界中で国家プロジェクトとして進行中である。研究対象の電池系は各国ともほぼ同様であるが、以下に示すように、その重点の置き方は国ごとに異なる。

[日本] JSTのALCA-SPRING (Li硫黄、Li空気、Li全固体、Mg電池)、約150億円 (2013～2022)。

NEDOのRISING2 (フッ化物シャトル、亜鉛空気、コンバージョン、硫化物電池)、約150億円 (2016～2020)。

NEDOのSOLiD-EV (全固体リチウムイオン電池)、約100億円 (2018～2022)。

[米国] エネルギー省のBattery500 (Li/TMO、Li硫黄、Li全固体)、50Mドル (2016～2020)。

[中国] 国家重点研究開発計画「新エネルギー車」重点項目内 (先端リチウムイオン電池、Li/TMO、Li硫黄、Li空気、Li全固体電池)、110M元 (2016～2020)。

[欧州] Horizon 2020 (2014～2020) 内次世代電池、90Mユーロ (2020)、Battery 2030+が継続。ASTRABAT (Li全固体電池)、7.8Mユーロ (2020～2023)。

SOLiDIFY (Li全固体電池用材料)、7.8Mユーロ (2020～2023)。

[韓国] 次世代リチウム金属二次電池核心源泉技術開発、24.3Bウォン (2018～2023)。

(5) 科学技術的課題

• リチウムイオン電池

さらなるエネルギー密度の向上を目的とする正負極材の研究開発が必要である。具体的には、①インタカレーション反応の層状酸化物 (Niリッチ、Liリッチ、カチオン無秩序岩塩構造)、高電圧スピネル酸化物、高電圧ポリアニオン錯体の高性能化、②遷移金属元素あたり多電子移動可能なコンバージョン反応の金属フッ化物、金属酸化物などの基礎探索、③Siを有効に利用するための材料開発と電極板設計、などがある。特に、後者2つはいずれも充放電に伴う体積変化が大きく、サイクル特性の良くない系であり、ナノテクノロジー (ナノカーボン材料の利用も含む) を利用して電極内の空間制御をする方法論の確立が必要である。

また、リチウムイオン電池の普及に伴う廃棄リチウムイオン電池のリサイクル、および資源再利用の研究開発も必要である。

• リチウム金属電池

リチウム金属を負極とする電池はリチウムイオン電池の発火事故の教訓から鑑みても、電池安全性に不安があり、それを払拭できるだけのリチウム金属負極制御技術の確立が必須である。また、無機セラミック固体電解質を利用したフレキシブルな無孔セパレータ膜が開発されれば、正負極間のクロスオーバー反応を防止することができるので、電解液系電池の寿命や安全性を飛躍的に改善できる可能性がある。

現時点では、リチウム遷移金属酸化物電池がエネルギー密度を含め全ての性能面で、リチウム硫黄およびリチウム空気電池を上回っている。後者2つの短所は、平均作動電圧がリチウム硫黄2.1V、リチウム空気2.7Vとリチウム遷移金属酸化物電池3.8Vよりかなり低いことである。それを補うためには正極を厚膜化して、面積比容量を向上させることの可能な3D集電構造の技術確立が必須である。リチウム硫黄およびリチウム空気電池は、各国の国家プロジェクトの結果をみても、リチウムイオン電池の質量エネルギー密度を超えることは可能であるが、体積エネルギー密度はリチウムイオン電池より低くなる。したがって、EV用途への適用は現実的ではなく、軽量化を最重要視するeVTOL、UAV、AUVなどの用途をめざすべきである。

EV用途にはリチウム全固体電池が望ましいので、界面接合の本質的課題を重点的に研究開発する必要がある。

(6) その他の課題

大学が次世代電池を研究するには、現行のリチウムイオン電池の知識や技術が必須である。同様に、産業界もリチウムイオン電池の改良のためには、大学での新しい解析技術などが必須である。現行のリチウムイオン電池の延長上の研究は産業界で、公的資金は次世代電池のみという厳密な区分は国家全体の利益を考慮すると好ましくなく、弾力的運用が必要である。電池材料と電池設計が電池研究の両輪であるが、どちらかを軽視している場合、科学的進歩にも実社会にも寄与しない中途半端な研究にとどまってしまうことになる。大学がブレーク技術を生み出すための基礎研究に、産業界がそれを実業利用に、国立研究所が大学と産業界を仲介する役割分担で、産官学連携できるような運営が好ましい。そのためには諸外国並みに本分野における人材の流動化が起こる環境を整備することが望まれる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	・ALCA-SPRING、RISING2などで、継続的に推進。特に、全固体電池の活動が顕著
	応用研究・開発	○	↘	・素材、電池、セットメーカーの市場シェア低下より、全固体電池以外は低調
米国	基礎研究	◎	→	・DOE、DODの資金で多数の大学、国研が参画。Li空気電池は低調。
	応用研究・開発	◎	→	・PNNL、Sion Power、SolidEnergyなどで、Li/TMO電池で顕著な性能向上 ・DOE資金でリサイクル研究
欧州	基礎研究	◎	↗	・Battery 2030+ initiativeで、大規模、長期の研究計画策定。2020年9月から7プロジェクトが開始
	応用研究・開発	○	↗	・韓国・中国系の生産拠点新設、その依存脱却を目指す欧州バッテリー同盟（EBA）、欧州バッテリー連合（EBU）などの活動が活発化
中国	基礎研究	○	↗	・全世界的なネットワークでほとんどの電池系で論文数がNo.1、指導的地位に
	応用研究・開発	◎	↗	・中国科学院が怀柔、瀋陽、東莞に大研究センターを設立し、産官学が混然一体となって推進
韓国	基礎研究	○	↗	・リチウム金属負極に特化した国家プロジェクトが発足進行
	応用研究・開発	◎	↗	・LGC、SDI、SKIのEV市場シェア上昇により活況。コアシェル型Ni-rich正極の実用化

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・電気エネルギー利用 (電力貯蔵) (環境・エネ分野 2.1.9)

参考・引用文献

- 1) Martin Winter, Brian Barnett and Kang Xu, "Before Li Ion Batteries", *Chemical Reviews* 118, no. 23 (2018) : 11433-11456. doi : 10.1021/acs.chemrev.8b00422
- 2) Matthew Li et al., "30 Years of Lithium-Ion Batteries", *Advanced Materials* 30, no. 33 (2018) : 1800561. doi : 10.1002/adma.201800561
- 3) Ghassan Zubi et al., "The lithium-ion battery : State of the art and future perspectives", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 89 (2018) : 292-308. doi : 10.1016/j.rser.2018.03.002
- 4) Wontae Lee et al., "Advances in the Cathode Materials for Lithium Rechargeable Batteries", *Angewandte Chemie International Edition* 59, no. 7 (2020) : 2578-2605. doi : 10.1002/anie.201902359
- 5) Yingchun Lyu et al., "An Overview on Advances of LiCoO₂ Cathodes for Lithium-Ion Batteries", *Advanced Energy Materials* (2020). doi : 10.1002/aenm.202000982
- 6) Richard Schmich et al., "Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries", *Nature Energy* 3 (2018) : 267-278. doi : 10.1038/s41560-018-0107-2
- 7) Arno Kwade et al., "Current status and challenges for automotive battery production technologies", *Nature Energy* 3 (2018) : 290-300. doi : 10.1038/s41560-018-0130-3
- 8) Xiaoqiao Zeng et al., "Commercialization of Lithium Battery Technologies for Electric Vehicles", *Advanced Energy Materials* 9, no. 27 (2019) : 1900161. doi : 10.1002/aenm.201900161
- 9) Wangda Li, Evan M. Erickson and Arumugam Manthiram, "High-nickel layered oxide cathodes for lithium-based automotive batteries", *Nature Energy* 5 (2020) : 26-34. doi : 10.1038/s41560-019-0513-0
- 10) Gavin Harper et al., "Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles", *Nature* 575, no. 7781 (2019) : 75-86. doi : 10.1038/s41586-019-1682-5
- 11) Bin Liu, Ji-Guang Zhang and Wu Xu, "Advancing Lithium Metal Batteries", *Joule* 2, no. 5 (2018) : 833-845. doi : 10.1016/j.joule.2018.03.008
- 12) Makoto Ue and Kohei Uosaki, "Recent progress in liquid electrolytes for lithium metal batteries", *Current Opinion in Electrochemistry* 17 (2019) : 106-113. doi : 10.1016/j.coelec.2019.05.001
- 13) Makoto Ue, Ken Sakaushi and Kohei Uosaki, "Basic knowledge in battery research bridging the gap between academia and industry", *Materials Horizons* 7 (2020) : 1937-1954. doi : 10.1039/d0mh00067a
- 14) Shuru Chen et al., "Critical Parameters for Evaluating Coin Cells and Pouch Cells of Rechargeable Li-Metal Batteries", *Joule* 3, no. 4 (2019) : 1094-1105. doi : 10.1016/j.joule.2019.02.004

2.1

- 15) Chaojiang Niu et al., "Self-smoothing anode for achieving high-energy lithium metal batteries under realistic conditions", *Nature Nanotechnology* 14, no. 6 (2019) : 594-601. doi : 10.1038/s41565-019-0427-9
- 16) Rudra Kumar et al., "Recent research trends in Li-S batteries", *Journal of Materials Chemistry A* 6, no. 25 (2018) : 11582-11605. doi : 10.1039/c8ta01483c
- 17) Yin Hu et al., "Strategies toward High-Loading Lithium-Sulfur Battery", *Advanced Energy Materials* 10, no. 17 (2020) : 2000082. doi : 10.1002/aenm.202000082
- 18) Won-Jin Kwak et al., "Lithium-Oxygen Batteries and Related Systems : Potential, Status, and Future", *Chemical Reviews* 120, no. 14 (2020) : 6626-6683. doi : 10.1021/acs.chemrev.9b00609
- 19) Shangqian Zhao et al., "Failure analysis of pouch-type Li-O₂ batteries with superior energy density", *Journal of Energy Chemistry* 45 (2020) : 74-82. doi : 10.1016/j.jechem.2019.09.029
- 20) Shuixin Xia et al., "Practical Challenges and Future Perspectives of All-Solid-State Lithium-Metal Batteries", *Chem* 5, no. 4 (2019) : 753-785. doi : 10.1016/j.chempr.2018.11.013

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用