

2.1.1 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として、それを短期～中期（数日）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に関する研究開発領域である。ここでは、静電エネルギーとして蓄積するキャパシタ、化学エネルギーとして蓄積する二次電池を対象とする。モビリティ、グリッドなど拡大する用途に応じて、容量、エネルギー密度、充放電速度などに関して様々な材料やデバイスの開発課題が存在する。先端リチウムイオン電池のほか、次世代電池候補であるリチウム金属負極電池、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、ナトリウムあるいはカリウムイオン電池、フッ化物電池、マグネシウム金属電池などを主に扱う。

(2) キーワード

リチウムイオン電池、リチウム金属負極、リチウム硫黄電池、リチウム空気電池、ナトリウムイオン電池、カリウムイオン電池、フッ化物イオン電池、マグネシウム金属二次電池、全固体電池、革新電池、エネルギー密度、出力密度、安全性、寿命、リサイクル

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

リチウムイオン電池に代表される蓄電池は、スマートフォンやノートパソコンなどの小型携帯機器や、家庭用蓄電池、グリッド電力貯蔵、電気自動車などに使用され、現代の生活に不可欠なデバイスとなっている。特に、2050年カーボンニュートラルの実現に向けては、蓄電池を用いたエネルギー貯蔵システムの構築や、運輸部門における内燃機関自動車から電気自動車への転換が政策的に強く推進されており、蓄電池の需要や世界市場は今後急拡大すると予想されている。

エネルギー貯蔵や電池自動車などの用途において共通して要求される性能として、大きなエネルギー密度を有すること、十分な出力密度を有すること、低価格であることなどがあげられる。

これまでは、蓄電池のエネルギーシステムでの利用は限定的であったが、今後再生可能エネルギーが主流となると、蓄電池の需要が格段に増加することとなり、資源量の観点からもリチウムイオン電池のみでその需要に応えることが困難な状況なることが懸念されている。また、リチウムイオン電池のエネルギー密度は理論的な限界に近付きつつあるため、飛躍的な高エネルギー密度化を目指し、次世代二次電池の研究開発も活発に行われている。

次世代二次電池としては、エネルギー密度と資源量の観点から、リチウム金属電池、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、ナトリウムあるいはカリウムイオン電池、フッ化物電池、マグネシウム金属電池、レドックスフロー電池の改良や新規開発が急がれる状況にある。今後はこれらの蓄電池が用途に応じて利用されていくと想定される。エネルギー密度の観点からはリチウム金属電池、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が重要であり、これら以外の電池は資源量の観点から重要である。

このように、本研究開発領域は、カーボンニュートラルに向けた必須技術としてだけでなく、生活への不可欠性という観点や市場価値という観点からも経済安全保障上の最重要課題として位置づけられ、その意義は非常に大きい。

[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。

リチウムイオン電池の高エネルギー密度化が進められている。正極ではニッケル含有量が多い三元系の正極 ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$, $x+y+z=1$) が中心に開発が進められている。最近では、 x の値が0.88程度で、230 mAh/gを超える容量密度を示す正極の開発が行われている。高エネルギー密度化の要求が高い電気自動車用途においてますます重要性が高まっている。

低コスト化、長寿命化、高安全性化に資する正極材料の研究開発も着実に進展している。具体的には、NiやCoなどの金属を使用しない正極材料に注目が集まっている。現在三元系と並んで最も用いられるリン酸鉄リチウム正極については、作動電圧の向上等を目的として、リン酸マンガンリチウムに関する開発も活発になっている。

負極に関しては黒鉛材料を中心に研究開発が展開されている。例えば、リチウムイオンの挿入脱離を促進するために非晶質構造を形成する炭素材料の開発が進んでいる。容量向上のため、SiやSiOなどの材料の利用も積極的に進められている。ただし、Siを単体で使用すると充放電に伴って体積の膨張収縮が生じ安定したサイクル特性が得られない。そのため、現時点では炭素とSiを複合した材料が用いられている。

このような正極・負極の高エネルギー密度化や上限電位の引き上げは電解液の分解による性能劣化という問題をもたらしており、この解決に向けた電解液材料の探索が進んでいる。リチウムイオン電池では、負極・正極の双方において、特に初回充電時に電解液の還元・酸化分解が起こり、その分解生成物が電極表面に堆積し、電子絶縁性かつリチウムイオン伝導性の不動態被膜（負極：solid electrolyte interface (SEI)、正極：cathode electrolyte interface (CEI)）として機能することが知られているが、良質なSEI/CEIを形成する電解液の研究開発が近年重点的に行われている。

リチウムイオン電池用有機電解液の基本組成は、エチレンカーボネート (EC) と鎖状カーボネート (ジメチルカーボネート (DMC)、ジエチルカーボネート (DEC)、エチルメチルカーボネート (EMC)) の混合溶媒に LiPF_6 塩をイオン伝導度が最大となる 1 mol/L 程度溶解したものである。この組成を基本として、前述のようなSEI/CEIの改良のため、様々な添加剤の検討が行われてきた。特にSEI組成に強く影響を与えるものとして、ビニレンカーボネート (VC) やフッ素化エチレンカーボネート (FEC) 等が研究されており、Si系負極や高電位正極に対しても有効であるとして、現在でも研究例は非常に多い。

一方、近年の電解液研究の動向をみると、上記の基本組成から大きく逸脱した材料系が多く報告されてきている。特に有望な方向性として挙げられるのは、高濃度電解液及び局所高濃度電解液である。高濃度電解液は非常に多様な電解液設計が可能になるという特徴を有している。通常、黒鉛負極はECやVCなどの特定の環状カーボネート溶媒を含む電解液でなければ可逆的な充放電はできないが、高濃度電解液では、その特殊な配位状態によってリチウム塩由来の無機系SEIの形成によって黒鉛負極及びフルセルの可逆的な充放電が達成されている。特に、リチウム塩としては $\text{LiN}(\text{SO}_2\text{F})_2$ (LiFSI) を用いた研究が大多数であり、他の塩と比べて高安定かつ低抵抗のSEIを形成すると考えられている。この研究を契機として、2015年頃から環状カーボネート以外の溶媒を採用した高濃度電解液の報告例が数多くなされている。例えば、高電位正極との適合性もある高酸化耐性を有するスルホン系やフッ素化溶媒系、難燃性を発現し電池の火災リスクを低減できるリン酸エステル系などが報告されている。一方、高濃度電解液の課題は、高粘度、低イオン伝導度、リチウム塩の大量使用による高コストである。ただし、高濃度電解液の特徴を低濃度におけるリチウムイオンの配位状態制御によって発現させるという局所高濃度電解液というコストの課題の解決につながる概念が提唱されたことにより、企業における研究開発例も増えてきている。

新規正極材料および負極材料の開発に伴って、導電補助剤やバインダーに関する研究開発も増えている。CNTなどのナノ炭素の利用やポリイミドなどの新規バインダーの利用が検討されている。

・リチウム金属電池・リチウム空気電池

リチウム金属電池は、リチウム金属を負極に用い、正極などはリチウムイオン電池と同じ材料を用いた電池である。既存のリチウムイオン電池の黒鉛負極 (372 mAh/g) を大きく超える 3,860 mAh/g の理論容量を

有し、かつ極めて低い標準電極電位を有することから、理想的な負極の一つである。リチウム金属電池は、1980年代に商品化されたが、充電時のリチウムのデンドライト析出に伴う内部短絡により発火事故が相次いだため普及には至らなかった。しかし、リチウムイオン電池のエネルギー密度が理論的限界に近づいていることから、近年再び脚光を浴びている。

リチウム金属負極の問題は、(i) デンドライト析出による信頼性低下と (ii) 低クーロン効率である。これらの問題を解決するため、リチウム金属の析出反応場の設計、リチウム金属表面コーティング (人工被膜) の開発、新規電解液の開発、電解液添加剤の検討、新規セパレータの開発、充電・放電電流の調整などが検討されている。

リチウムイオン電池同様、新規電解液の探索による上述の課題解決に進展がみられる。高濃度電解液の概念や新たなリチウム塩 LiFSI の登場により、世界的に研究が活発化し、特に2015年以降には99%を超えるクーロン効率を示す電解液が米国を中心として次々と報告されている。組み合わせる溶媒としては、従来から検討されている THF や DME などのエーテル系溶媒や FEC などのフッ素系溶媒が主である。さらに、低濃度でも高濃度電解液と同様の Li⁺ 局所配位状態となる局所高濃度電解液の概念を活用した材料開発が進んでいる。これにより、高濃度電解液の欠点であった粘度と塩由来の価格については大幅に低減されたが、イオン伝導度に関しては大きな改善はみられていない。2019年頃には、溶媒として液化したガスを採用する電解液 (liquified gas electrolyte) も報告され、クーロン効率は99.9%が達成されている状況である。2020年頃からは、有機合成研究者の参画もあり、高クーロン効率を示す新たな溶媒分子の設計・合成に関する研究例も多くなってきている。

以上のように、新たな電解液の設計を中心として、クーロン効率の大幅な上昇が達成されたことを受け、初期状態 (放電状態) の負極としてリチウムの析出場 (集電体) のみを置いたアノードフリー二次電池の研究が米国やカナダを中心として報告されている。リチウム源は正極内にしか存在しないため、リチウム析出溶解のクーロン効率が容量劣化に直結し、現時点では充放電特性は100サイクル程度にとどまっているが、高エネルギー密度の二次電池として有望な概念である。

リチウム空気電池は、正極は空気中の酸素を利用し、負極は金属リチウムを利用した電池である。高いエネルギー密度と軽量性を備えるため、自動車用途だけでなく、ドローンなどの飛翔体への応用も期待されている。負極に関してはリチウム金属電池と同様の課題を有している。正極に関しても、気体活物質の電極反応の可逆性の向上によるサイクル特性の向上が課題となっている。

近年 NIMS らのグループにより初期サイクル特性 500Wh/kg を超えるリチウム空気電池の開発が報告されており、さらなる材料探索によるサイクル寿命の増加が期待されている。

• リチウム全固体電池

現行のリチウムイオン電池が有する安全性や高エネルギー密度化という課題へのアプローチとして、固体電解質を使用する全固体電池の研究開発が活発化している。キャリアとしてはリチウム系を対象とするものが多いが、ナトリウム系に関しても製品発表がされるなど研究開発が広がりを見せている。固体電解質として硫化物を用いるものと酸化物を用いるものを中心となっている。硫化物系固体電解質では、現行リチウムイオン電池に採用されている有機溶媒電解質を上回る 10^{-2} S/cm を超えるリチウムイオンの伝導度が達成され、このような固体電解質を用いた全固体電池の性能はリチウムイオン電池を凌駕するまでに至ったとされている。この高い性能を背景に、硫化物型全固体電池は車載用途を目指した開発段階にあり、いくつかの自動車メーカーからは、全固体電池を搭載した実車テスト、試作生産設備の公表も行われており、社会実装を間近にひかえた段階にいたっている。一方でアカデミアを中心とした研究では、全固体リチウム硫黄電池やシリコン負極などのように、エネルギー密度向上を目指した材料開発に力がそそがれている。

酸化物系固体電解質でも 10^{-3} S/cm 台のイオン伝導度が達成されており、リチウムイオンの伝導性に関しては有機溶媒電解質とほぼ同等の水準となっているが、酸化物型全固体電池では固体電解質のこの材料物性が

ら期待される電池性能は達成されていない。硫化物系固体電解質の長所は高いイオン伝導性を示すことに加え、高い可塑性を示すことである。そのため、室温での加圧成型で材料間を接合し、全固体電池を作製することが可能であるが、酸化物系固体電解質、特に 10^{-3}S/cm 台のイオン伝導度を示すものは可塑性をほとんど示さず、機械強度の低さが大型化の障壁となっている。一方で、小型のIoTデバイス用途を中心として、電子部品メーカーから積層セラミックコンデンサの技術を応用した小型電池の量産が発表されるようになっていく。

• その他のキャリアを使用した電池

ナトリウムあるいはカリウムイオン電池は元素戦略の観点から重要なイオン電池である。リチウムの枯渇やそれによる価格高騰が心配される中で、ナトリウムあるいはカリウムを使用することで資源的な問題を解決できると期待される。リチウムイオン電池と基本的な反応および電池構造は同じであり、正極活物質あるいは負極活物質に関する研究開発が中心的に進められている。ナトリウムイオン電池はセル作製のレベルまで開発が進んでいるが、材料の信頼性やセルの安全性などの観点でさらなる研究開発が必要である。カリウムイオン電池はナトリウムイオン電池と同じように正極、負極、電解液に関する研究が進められている。この二つの電池のエネルギー密度は、リチウムイオン電池よりは小さくなるが、 200 Wh/kg を達成することが研究開発の一つの目標となっている。

フッ化物電池はフッ化物イオンが正極を行き来することで充放電が行われる電池であるが、電極反応が不均化反応であり、反応制御とその可逆性の向上が課題となっている。フッ化物イオン伝導性固体電解質を利用する電池も報告されており、液系と固体系の両方を対象として電池の基本構成も含めた検討が進んでいる。

マグネシウム金属二次電池では、正極にマグネシウムイオンが挿入・脱離できる酸化物正極や硫化物正極が用いられる。マグネシウム金属を負極に使用する場合、酸化耐性を有しマグネシウム金属を可逆的に溶解・析出することができる電解液の開発が重要な研究課題となっている。セル作製は可能であるが十分な特性を有する電池の開発には基礎研究と応用研究の両面からのアプローチが重要となっている。エネルギー密度は、リチウムイオン電池並みか少し大きくなると予想される。

レドックスフロー電池に関する研究の多くは、実電池の改善のための材料、部材、システムに関するものである。エネルギー密度は大きくないが大量の電気を貯蔵できるため、現状においても研究が継続されている。

特徴的なエネルギーデバイスとしてキャパシタとリチウムイオン電池の中間的な特性を有するキャパシタが開発されている。電極反応はリチウムイオン電池と同じであるが、ナノ粒子を利用して、イオンの拡散距離を短くした材料を用いて実現されている。出力密度はリチウムイオン電池よりも大きく、エネルギー密度はキャパシタよりも大きくなる。

(4) 注目動向

【新展開・技術トピックス】

• リチウムイオン電池

リチウムイオン電池の研究開発においては、パッケレベルでの高温耐性の向上、パッケレベルでのエネルギー密度の向上に関する研究開発が企業を中心に進展している。モジュールレスな電池パッケの構造が大きな電池メーカーから続々と提案され、量産化の計画も相次いでいる。特に、中国CATL社はCell to Pack技術を革新し、高い体積効率を実現した電池の2023年からの量産を発表している。

新規正極として、リチウム過剰固溶体正極や酸素のレドックスを利用する正極材料が提案され活発な基礎研究がなされている。これらの材料は 300 mA h/g 以上の放電容量を示すため、注目されている次世代正極である。一方で、サイクル特性や充電電位の高さなどいくつかの問題があり、実用化に向けてはさらなる研究開発が必要である。

革新的な水系電解質を用いたリチウムイオン電池が注目を集めている。難燃性の水系電解液を用いたリチ

ウムイオン電池は、既存の非水系リチウムイオン電池と比べて安全性は高いが低電圧であるという短所を有していた。2019年に、特定の水系電解液中でのみ可逆的に起こすことができる4 V級の新規正極反応が米国で発見された。黒鉛とLiCl, LiBrの混合物を正極として用い、LiClやLiBrが溶解しない高濃度の水系電解液と組み合わせることで、黒鉛層間にCl⁻とBr⁻の可逆的な挿入反応を実現している。可逆容量は約250 mAh/g、反応電位は4.0~4.5 Vとなっている。電位窓という観点から原理的に非水系リチウムイオン電池には劣ると考えられていた水系リチウムイオン電池で、逆にそれを凌駕するエネルギー密度化の可能性が見いだされたことで大きく注目されている。

また、このような電解液設計技術の進歩が可能にする新規電極反応を開拓する研究は、非水系リチウムイオン電池においても活発化している。従来は活物質として機能しないと思われていた物質が、電解液の工夫によって有望な活物質となり得ることが実証されてきており、材料探索が既に網羅的になされたと思われていた電極活物質の進化の可能性を示すものである。

• 全固体電池

全固体電池に用いられる固体電解質は、硫化物、酸化物がほとんどであったが、近年はこれらに加えて、水素化物、ハロゲン化物を採用する全固体電池の報告もなされるようになってきた。これらの固体電解質は、硫化物系固体電解質と同様に材料間を室温で接合することのできる高い可塑性を示すことに加え、ハロゲン化物は溶液法でも合成可能であり、さらに2018年にLi₃YCl₆やLi₃YBr₆で10⁻³ S/cm近いイオン伝導が達成されたことから注目されている固体電解質であり、未だ耐還元性に課題を有するものの、この固体電解質を採用した5 V級をはじめとする全固体電池の報告も行われている。

• その他の電池

ナトリウムイオン電池の研究は世界的に活発になっている。中国のCATL社はナトリウムイオン電池を搭載したパック電池の量産化に関する発表を行っている。カリウムイオン電池を含めて非リチウム系のイオン電池に対するファンディングは各国ともに行われているが、研究者の広がりは大きくない状況である。特に、材料メーカーの寄与が少ない状況にある。電池の基本構成としては成立している革新電池ではあるので、実電池としての特性を緻密に解析することが望まれており、企業とアカデミアが協力して研究を進める必要がある。

リチウム硫黄電池に関しては、硫黄中間体の溶解を抑制することができる電解液の開発と細孔構造を制御した炭素材料の開発が進展した。また、固体電解質の利用も検討されている。硫黄中間体の溶出が完全に制御されている状況にはないが、技術的に大きく進展しており、実セルの完成に大きな期待が寄せられている。リチウム硫黄電池に対してはアカデミアを中心にファンディングが行われ、ベンチャー企業設立に至っているが、一部には撤退の動きもみられる。リチウム空気電池に対してもアカデミアが中心となって研究を継続している状況で、ファンディングは世界的に見ても減少傾向にある。

リチウム金属電池に関するファンディングが増加しているが、日本での研究者は少ない状況である。米国や欧州では多くの研究者がリチウム金属電池の研究に従事している。リチウム金属負極を使いこなす技術であり、電解液の開発やセパレータの開発、中間層と呼ばれるリチウム金属と電解液の界面制御などの技術が提案されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

蓄電池はカーボンニュートラル社会の実現、経済安全保障確保のためのキーデバイスとして世界中で位置づけられており、研究開発、産業政策を含めた国家プロジェクトが世界中で進行している。

[日本]

- ・ JST-ALCA-SPRING (Li硫黄、Li空気、Li全固体、Mg電池)、約190億円 (2013~2022)
- ・ NEDO-RISING3 (フッ化物シャトル、亜鉛負極) (2021~2025)

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

[米国]

- ・ DOE-Battery500 Phase 2、7500万ドル (2021～2025)
- ・ DOE-Long Duration Storage Earthshot (2021～2030)
- ・ JCESR (Joint Center for Energy Storage Research)、約2400万ドル/年 (～2023年)。革新電池を幅広く研究。

[欧州]

- ・ Horizon Europeの構想の下、BATT4EUが設立 (2021～)。18.5億ユーロ。原料～材料～セル～パックモジュール～エンドユーザー～リサイクルを含めたサプライチェーン全体に関する研究開発
- ・ ASTRABAT (Li全固体電池)、7800万ユーロ (2020～2023)
- ・ SOLiDIFY (Li全固体電池用材料)、7800万ユーロ (2020～2023)

[中国]

- ・ 新エネルギー自動車産業発展計画 (2021～2035) を発表

[韓国]

- ・ 次世代リチウム金属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に関しては、エネルギー密度の向上を目指して新規正極および負極の研究は継続されるべきと考えられる。また、革新電池については電極反応を可逆的にかつ円滑に進めることができる材料研究とセル設計に関する研究が求められる。

リチウムイオン電池では、次の課題がある。(1)低コスト化のためにNiあるいはCoフリー正極の開発、(2)60℃でサイクルできるセルの作製のための電解液の開発、(3)セルインピーダンスを低減する導電補助剤(CNTなど)やバインダーの開発(ポリアクリル酸など)、(4)長寿命化と高安全性を可能とする技術(均一細孔構造を有するポリイミド系セパレータの応用など)などが挙げられる。革新電池系では、イオン電池系の固体電池では、充放電サイクルにおける活物質と固体電解質に接触不良が活物質の膨張収縮に伴って生じることが最大の問題であり、材料の機械的な性質に関する情報がより必要となっている。リチウム金属系の全固体電池では、さらにリチウム金属と固体電解質の界面接触の問題を解決し、可逆な充放電が可能となるための中間層の設計や集電体の工夫が必要となっている。リチウム金属負極を液系の電解液で使用するリチウム金属電池、リチウム硫黄電池、リチウム空気電池では電解液とリチウム金属の反応とセパレータとリチウム金属の接触界面に関する研究が重要となっている。セル内部の電流分布を制御し電解液バルクおよび界面における電気化学反応の均一性を確保することが必須となる。

上のような問題の解決に向けて、電解液材料設計の見直しが進んでいる。キャリアイオンの溶媒和・配位状態の積極的制御による電解液機能の開拓が重要な研究開発の方向性としてあげられる。

硫黄あるいは空気を正極に使用する場合には、充放電の可逆性に問題がある。大きな体積変化を伴う電極系の充放電の可逆性を担保するための研究が求められており、体積変化による電極構造変化のその場観察技術の構築や機構解明が重要となる。元素戦略的に重要となるナトリウムイオン電池やカリウムイオン電池に関しては、材料特性の向上が必要である。基本的な材料に関する研究は進展しているが、サイクル特性や安全性に関する基礎的な研究が不足している。マグネシウム金属二次電池では、蓄電池と呼べる特性を有するセルの作製が困難な状況にある。マグネシウム金属負極と正極を可逆的に駆動させることができる電解液が少ないことと、マグネシウムイオンの挿入・脱離が円滑に行える正極活物質の開発が不十分な状況である。

様々な革新電池が提案されているが、それぞれについて概念実証から実用化に至るまで、研究開発に多くの時間を要する点が課題である。今後は計算科学やデータ科学的な手法を用いて電池開発を加速する方法論

の開拓が必要である。例えば、電気自動車用のパック電池に要求される性能からバックキャストしてセル特性を決め、次に電極特性に落とし込むことで、要求される材料特性を決めることができる。一方で材料の正確な物性を取得し、計算科学を用いて電極性能を予測することができれば、セル評価のプロセスを短縮して材料評価を行うことが可能になる。材料研究から電池システム研究までを一気通貫で行うことが重要であり、その基盤的なデータを提供する計算科学や精密な物性測定に関する基礎研究がより一層重要となる。

カーボンニュートラルに資する技術として、電池の安全性と寿命に資する知見を蓄積していくことも重要である。二酸化炭素の削減に向けて電池製造時の二酸化炭素の排出を抑制することが求められる。電池の長寿命化はその解決の1つの方向性であり、二酸化炭素排出に関するLCAの計算も重要である。

特に欧州を中心としてリチウムイオン電池のリサイクルに関する法規制が整備されつつあり、今後全世界に波及していく可能性がある。このような状況を鑑み、リチウムイオン電池のリサイクル技術、あるいはリサイクルまでを見据えた電極・電解液材料開発が今後ますます重要になってくるであろう。

(6) その他の課題

日本は古くより蓄電池に関して高い研究力を有していたが、アカデミア、産業界ともにその優位性が失われつつある。一方で、非常に高いレベルの基礎研究を展開する研究機関がまだ多く存在するが、必ずしも直接的に電池の改善や革新電池の創成に結びついていない。現在日本では国のプロジェクトにおける蓄電池におけるファンディングがさらに活発化しており、そこで得られる成果が電池性能の向上に貢献できるようなシステム構築を深めていく必要がある。そのためには、より一層の産学連携を構築するとともに、分野横断的に材料探索ができるようにすることが不可欠である。産学連携の推進により、電池材料として必要な特性をより明確化することが可能となり基礎学術の成果が電池開発に貢献できるようになる。アカデミアが有する高度な計算科学技術や解析技術は材料開発に有用と考えられるが、産学連携の推進によって、よりニーズを明確化していくことが必要となる。

人材育成に目を向けると、研究開発面では、電池研究と材料研究を結びつけることができる人材の育成が重要であろう。また、「蓄電池産業戦略」では電池産業を支える人材の育成への取り組みを最優先課題として掲げている。現在関西圏を中心として人材育成の取り組みが始まりつつあるが、そのグッドプラクティスを全国に広げていく取り組みが必要になると考えられる。

(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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ALCA-SPRINGプロジェクトによる革新電池に関する基礎研究が進展（2022年度で終了）。 全固体電池に関するプロジェクトが多数進展中。 MEXTデータ創出・活用型プロジェクトにおいて、インフォマティクスを駆使した拠点型研究開発が開始（2022年度～）。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> NEDO-SOLiD-EVが全固体電池の応用研究として大きく進展。 JST「共創の場」、NEDOグリーンイノベーション基金等による各種電池の高性能化やリサイクル技術の研究が進展。 「蓄電池産業戦略」を発表し、シェアが低下する液系LIBの生産能力の拡大を図る。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> Battery500 Phase2が2021年より進行中（5年、7500万ドル程度）。 JCESR（Joint Center for Energy Storage Research）が2023年まで稼働。次世代蓄電池を幅広くカバー（年間予算2400万ドル）。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 超党派のインフラ投資法が成立し（2021年11月）、70億ドル超の投資予定。電池・電池材料の製造、リサイクル支援がターゲット。 Li-Bridgeプロジェクトが、基礎研究（大学・国研）から応用研究への橋渡しをミッションとして稼働中。サプライチェーンの構築までをターゲット次世代蓄電池全般をカバー。予算規模は209百万ドル。

欧州	基礎研究	○	→	ABSTRABATが2020年1月～2023年6月の期間で活動中。PolymerとLLZのハイブリッド固体電解質を中心に全固体電池の研究開発がメイン。EVをターゲットとし、1回の充電で500kmの走行距離が目標値。
	応用研究・開発	◎	↗	Horizon Europeの構想の下、BATT4EUが設立。予算18.5億ユーロ。原料・材料・セル・パック・モジュール・リサイクルまで一連のサプライチェーンの研究開発を支援。
中国	基礎研究	○	↗	CATL社が上海交通大学にクリーンエネルギー共同開発センターを設立(2億ドル寄付)。同じく廈門大学にCATL廈門新エネルギー研究所を設立。
	応用研究・開発	◎	↗	新エネルギー自動車産業発展計画(2021-2035)を発表。自動車向けの全固体電池、燃料電池などがターゲット。
韓国	基礎研究	○	→	KIST、ソウル大学などを中心に継続的にレベルの高い基礎研究が行われている。
	応用研究・開発	△	→	K-Battery発展戦略を2021年に発表。研究開発費用の最大50%、施設の設備投資の最大20%を税額控除。2025年にLi-S電池の、2027年に全固体電池の実用化を目指す。民間企業が約40兆ウォン投資予定。

(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

・蓄エネルギー技術（環境・エネ分野 2.2.1）

参考・引用文献

- 1) Languang Lu, et al., "A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles," *Journal of Power Sources* 226 (2013) : 272-288., <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.060>.
- 2) Yaosen Tian, et al., "Promises and Challenges of Next-Generation "Beyond Li-ion" Batteries for Electric Vehicles and Grid Decarbonization," *Chemical Reviews* 121, no. 3 (2021) : 1623-1669., <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00767>.
- 3) Tobias Placke, et al., "Lithium ion, lithium metal, and alternative rechargeable battery technologies: the odyssey for high energy density," *Journal of Solid State Electrochemistry* 21 (2017) : 1939-1964., <https://doi.org/10.1007/s10008-017-3610-7>.
- 4) Wei He, et al., "Challenges and Recent Advances in High Capacity Li-Rich Cathode Materials for High Energy Density Lithium-Ion Batteries," *Advanced Materials* 33, no. 50 (2021) : 2005937., <https://doi.org/10.1002/adma.202005937>.
- 5) Yiyao Han, et al., "Interface issues of lithium metal anode for high-energy batteries: Challenges, strategies, and perspectives," *InfoMat* 3, no. 2 (2021) : 155-174., <https://doi.org/10.1002/inf2.12166>.
- 6) Yi Chen, et al., "Advances in Lithium-Sulfur Batteries: From Academic Research to

Commercial Viability,” *Advanced Materials* 33, no. 29 (2021) : 2003666., <https://doi.org/10.1002/adma.202003666>.

- 7) Changhong Wang, et al., “All-solid-state lithium batteries enabled by sulfide electrolytes: from fundamental research to practical engineering design,” *Energy & Environmental Science* 14, no. 5 (2021) : 2577-2619., <https://doi.org/10.1039/D1EE00551K>.
- 8) Yu Li, et al., “Interface engineering for composite cathodes in sulfide-based all-solid-state lithium batteries,” *Journal of Energy Chemistry* 60 (2021) : 32-60., <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.12.017>.
- 9) Zao-hong Zhang, et al., “Practical development and challenges of garnet-structured $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ electrolytes for all-solid-state lithium-ion batteries: A review,” *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 28, no. 10 (2021) : 1565-1583., <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2239-1>.
- 10) Linchun He, et al., “Synthesis and interface modification of oxide solid-state electrolyte-based all-solid-state lithium-ion batteries: Advances and perspectives,” *Functional Materials Letters* 14, no. 3 (2021) : 2130002., <https://doi.org/10.1142/S1793604721300024>.
- 11) Jiayao Lu and Ying Li, “Perovskite - type Li - ion solid electrolytes: a review,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 32, no. 8 (2021) : 9736-9754., <https://doi.org/10.1007/s10854-021-05699-8>.
- 12) Robert Usiskin, et al., “Fundamentals, status and promise of sodium-based batteries,” *Nature Reviews Materials* 6 (2021) : 1020-1035., <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00324-w>.
- 13) Ali Eftekhari, Zelang Jian and Xiulei Ji, “Potassium Secondary Batteries,” *ACS Applied Materials & Interfaces* 9, no. 5 (2017) : 4404-4419., <https://doi.org/10.1021/acsami.6b07989>.
- 14) Wenchao Zhang, Yajie Liu and Zaiping Guo, “Approaching high-performance potassium-ion batteries via advanced design strategies and engineering,” *Science Advances* 5, no. 5 (2019): eaav7412., <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav7412>.
- 15) Rongyu Deng, et al., “Recent Advances and Applications Toward Emerging Lithium-Sulfur Batteries: Working Principles and Opportunities,” *Energy & Environmental Materials* 5, no. 3 (2022) 777-799., <https://doi.org/10.1002/eem2.12257>.

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用