

技術動向レポート

蓄電池技術はどこに向かうのか？

—次世代・革新型蓄電池技術の現状と課題—

サイエンスソリューション部 グローバルイノベーション&エネルギー部 環境エネルギー第1部
チーフコンサルタント コンサルタント チーフコンサルタント
茂木 春樹 佐藤 貴文 吉田 郁哉

2019年のノーベル化学賞は、リチウムイオン電池開発に貢献した吉野彰旭化成名誉フェローら3名が受賞した。リチウムイオン電池は既に、スマートフォンやパソコンをはじめとする電子機器、通信などの産業機器を中心に世界的に普及しており、このような世界的な貢献が評価されたものである。これまでもノーベル賞受賞候補として期待されてはいたが、改めて心より祝福したい。

蓄電池はその高性能化、低コスト化により、いままでの小型機器への搭載からモビリティを含む大型機器への展開が急速に進みつつあり、近年改めて多くの関心を集めている。一方で蓄電池は技術に難しい点が多く、将来的な技術進展も見通しにくい。また、用途毎に要求される仕様や特性が大きく異なることも、蓄電池技術を理解するにあたっての障壁となっている。

そこで本稿では、改めてリチウムイオン電池を含む現状の蓄電池技術の適用先に関する技術動向、および次世代・革新型蓄電池の研究開発動向についてまとめ、それらが実用化されるにあたって必要となる共通の技術的課題について考察した。

1. はじめに

電気エネルギーを化学エネルギーとして貯蔵する技術を電池と呼び、電池のなかでも充電により電気を蓄えることができ、繰り返し使用可能な電池を蓄電池⁽¹⁾と呼ぶ。現在、リチウムイオン電池を筆頭とする小型の蓄電池は、スマートフォンやノートPCをはじめとする情報端末に多く搭載されており、現代人の多くが日常的にその恩恵を受けている。ほとんどの人は、外出中に情報端末の電池残量を気にかけたり、充電可能な店舗を探したり、持ち歩いている予備の蓄電池を活用する、といった思考や行動を日常的に行っているのではないだろうか。また、近年蓄電池を搭載した自動車であるハイブリッ

ド自動車(Hybrid Electric Vehicle; HEV)や電気自動車(Electric Vehicle; EV)を街中で見かけることが多くなった。一昔前と比較しても、蓄電池は私たちの生活になくってはならない身近な存在になったと言える。

また最近、蓄電池に関係する報道を目にする機会が増え、様々な新しいタイプの蓄電池が登場するとともに、従来の蓄電池と何が違うのか、どのような用途に使えるものなのか、などといった疑問も増えていることだろう。一言に「蓄電池」といっても、様々な仕組みのものがあるうえに、同じ種類の蓄電池であっても構成材料が変わるだけで特性がまったく変化してしまうものもあるなど、非専門家にとっては難しい点も多い。また、報道によっては読者に誤解を与え

かねない表現がみられることもある。たとえば、最近では自動車の電動化、特にEVへの関心が高いことから、新しい蓄電池が出るとEVに結び付けた報道がされていることも多いが、必ずしもすべての蓄電池がEVをはじめとした自動車に向いている訳ではない。

蓄電池は種類によってそれぞれ作動原理、特徴、課題が異なるため、技術進展の仕方は蓄電池の種類毎に異なる。蓄電池の種類毎に異なるとしても、構成する材料やその組み合わせにその特性が大きく左右されることから、個別の技術進展について見通しを立てることも難しい。半導体の集積率向上を予測したムーアの法則のような経験則が、蓄電池技術について存在しないことも、蓄電池技術の進展が見通しにくいことを示している。

蓄電池技術の進展について見通しを立てることが難しくても、自動車の電動化、電力自由化、再生可能エネルギー（再エネ）やスマートコミュニティ（スマコミ）⁽²⁾の社会実装拡大などを背景として、今後蓄電池の役割と需要が大幅に拡大することはほぼ間違いないだろう。しかしながら、すべての用途に使える万能な蓄電池は現時点では存在せず、用途に合わせた蓄電池の更なる性能向上が不可欠であり、各国が産学官の総力を挙げて研究開発や実証事業に取り組んでいる状況にある。

本稿では、技術進展の見通しが困難な蓄電池技術について、蓄電池の適用先に関する技術動向、および次世代・革新型蓄電池を主な対象とした研究開発の動向について述べる。また、次世代・革新型蓄電池が実用化されるにあたって解決が必要となる共通の技術的課題について考察した。

2. 蓄電池適用先毎の技術的要求事項と現状

現在、様々な蓄電池が存在しているが、性能、特性、コストなどの観点からすべての用途に向く万能な蓄電池は現時点では存在しないことは既に述べた。ここでは、蓄電池の適用先として今後更なる普及拡大が期待される車載用および電力貯蔵用に注目して、蓄電池へ要求される性能や特性などの技術的な要求事項と現在の技術動向を、適用先毎に整理した。

(1) 車載用蓄電池

車載用蓄電池としては、エンジンの始動や車室内の電力を担う目的で鉛蓄電池が古くから採用されているが、近年では駆動用としての蓄電池が搭載された車両が増加している。ここではEVやプラグインハイブリッド自動車(Plug-in Hybrid Electric Vehicle; PHEV)などの、モーターのみによる電動走行が可能な自動車に適用する蓄電池を対象として、技術的な要求事項と現状の技術動向について述べる。

① 技術的な要求事項

車載用蓄電池に要求される事項を以下にまとめる。ここに掲げた蓄電池の要求事項すべてに応えることが理想的ではあるが、すべてを満たす蓄電池の実現は現時点では見通せない。ただし、自動車はシステムとしてユーザーの利便性と安全性を確保すればよいため、他の手段によって蓄電池への要求事項を緩和することができる可能性がある。これら蓄電池以外の電動車に関係する技術動向にも注視する必要がある。

A. 高いエネルギー密度

詳細は後述するが、電動車両の電力消費率⁽³⁾は走行抵抗に大きく依存し、走行抵抗の

大部分は車重に大きく左右されることから、搭載される蓄電池の重量は可能な限り軽いことが望ましい。自動車に搭載される蓄電池の容量を維持して重量を軽くするためには、蓄電池の単位重量あたりの容量を大きくする必要がある。また、重量以外にも自動車内の限られたスペースになるべく多くの蓄電池を搭載しなければならないため、蓄電池そのものがコンパクトであることも必要である。そのためには、単位体積あたりの容量を大きくする必要がある。前者を重量エネルギー密度、後者を体積エネルギー密度といい、それぞれ蓄電池の研究開発目標として掲げられる重要な指標である。

B. 充電時間が短い

ガソリンの給油と比較して、蓄電池の充電時間が長い傾向にあることは電動車の課題であることは周知の通りである。航続距離延伸を目的として搭載蓄電池の高容量化が進むにつれ、充電時間がより長くなってしまいう傾向があることから、充電時間短縮のため更なる大電力による充電も検討されている。ただし、大電力による充電では発熱量が大きくなるため、蓄電池内部の抵抗を低減する必要がある。

C. 温度変化が充放電特性に与える影響が小さい

蓄電池は化学反応を利用しているため、一般的に温度が低くなると性能が低下する。外気温より高い作動温度が要求される場合、起動時に加温などで時間がかかってしまうとユーザー利便性が低くなってしまふ。また、高温になると蓄電池内部の副反応(劣化反応)が進行し、性能や容量が低下する場合もある。これらの課題を、冷却システムや充放電の制御によって解決する手段もあるが、ユーザーの利便性と安全性を確保するためには、蓄電

池そのものが温度変化に対して今以上に強靱になることが望ましい。実際、CHAdeMOなどの現在の充電規格では充電時に蓄電池側の温度を監視しており、低温時と高温時で充電が停止される。

D. 寿命が長い(サイクル、カレンダー)

自動車はユーザーによっては、10年以上使用される場合があり、使用期間中にユーザーの利便性が損なわれるレベルでの劣化が起きないことが望ましい(カレンダー寿命が長い)。長期間に渡って運用されると同時に、走行距離としては10万 km 程度使用される場合もある。走行時には、加速時は放電、減速時は充電などと負荷サイクルがかかっても、劣化量が小さいことが望まれる(サイクル寿命が長い)。

コストによっては、蓄電池の定期的な交換という手段も想定されるものの、安全性などを考慮するとユーザー自身が交換するより、専門の技術者による交換が望ましいため、少なくとも車検の期間まではユーザーの利便性が損なわれるレベルでの劣化が起きないことが求められるだろう。

E. コストが低い

現状では、蓄電池のコストが高いため、EVやPHEVは従来車より価格が高い傾向にある。特にEVでは蓄電池のコストが大半を占めているとされており、従来車と同等の価格とするためには蓄電池の低コスト化が必要となる。自動車を駆動させるための電源としては、蓄電池のセル⁽⁴⁾を複数直並列接続してモジュールを構成し、このモジュールを複数接続し冷却システムや制御システムまで含めたパックとする必要がある。現状では、これらセルとパックのコスト差も大きいとされてお

り、この差分を小さくすることも重要である。自動車メーカー各社や各国の研究開発プロジェクトの目標としては、電池パックで約1万円/kWh以下が目安として掲げられている。

F. 高い安全性の確保

衝突時に圧壊した場合、電池の内外で短絡が起きた場合においても、発火や爆発はもちろん、発煙などの異常が起こらないことが要求される。本質的な安全確保のためには、これらのリスクがない蓄電池が求められるが、適切な安全対策やシステムによる制御によって安全性を確保することも想定される。

また、車載用としては複数の蓄電池セルを直並列接続することから、各蓄電池セルの状態をリアルタイムに把握する技術が安全性確保や性能維持の観点から必要となる。

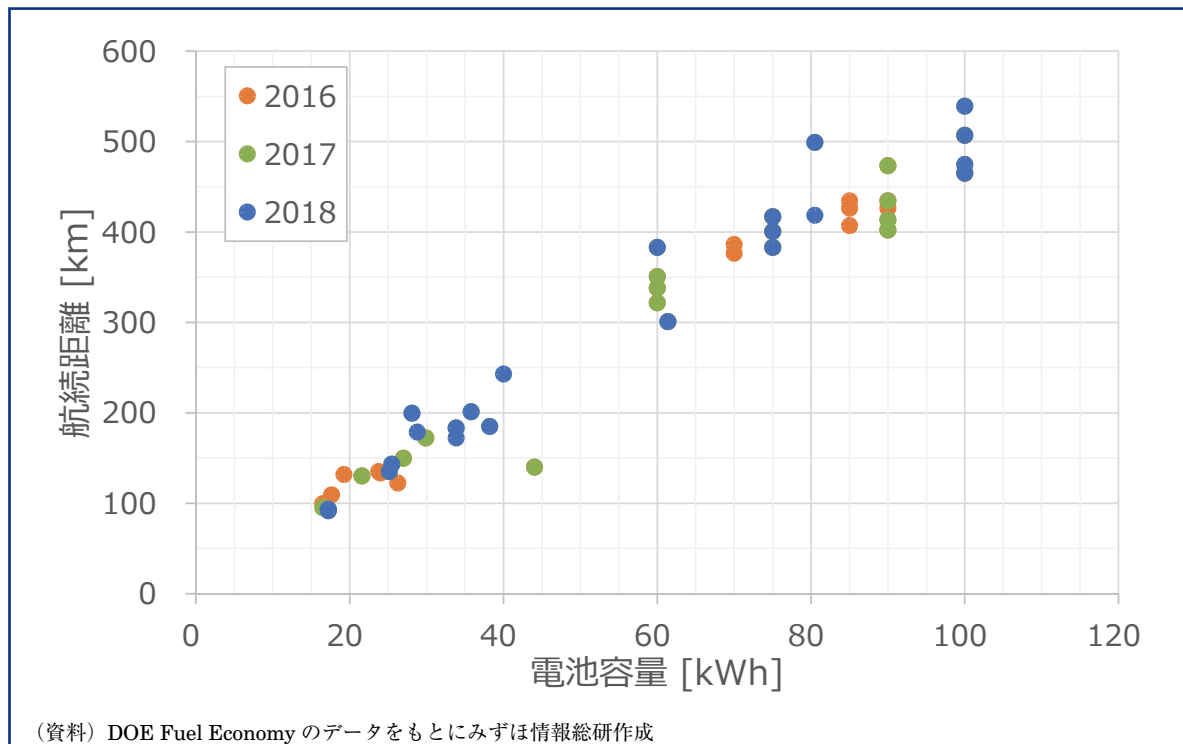
②現状の技術動向

現在市販されている電動走行が可能なEVとPHEVの技術動向を調べるため、航続距離、搭載されている蓄電池容量、および車両重量に関する情報を抽出した。航続距離と蓄電池容量は、米国エネルギー省(Department of Energy; DOE)とアメリカ合衆国環境保護庁(United States Environmental Protection Agency; EPA)が共同で運営しているデータベース Fuel Economy⁽⁵⁾から、2016年～2018年までの3年分のデータを抽出、車両重量は各社のカタログなどの公知情報から可能な限り抽出して、整理した。

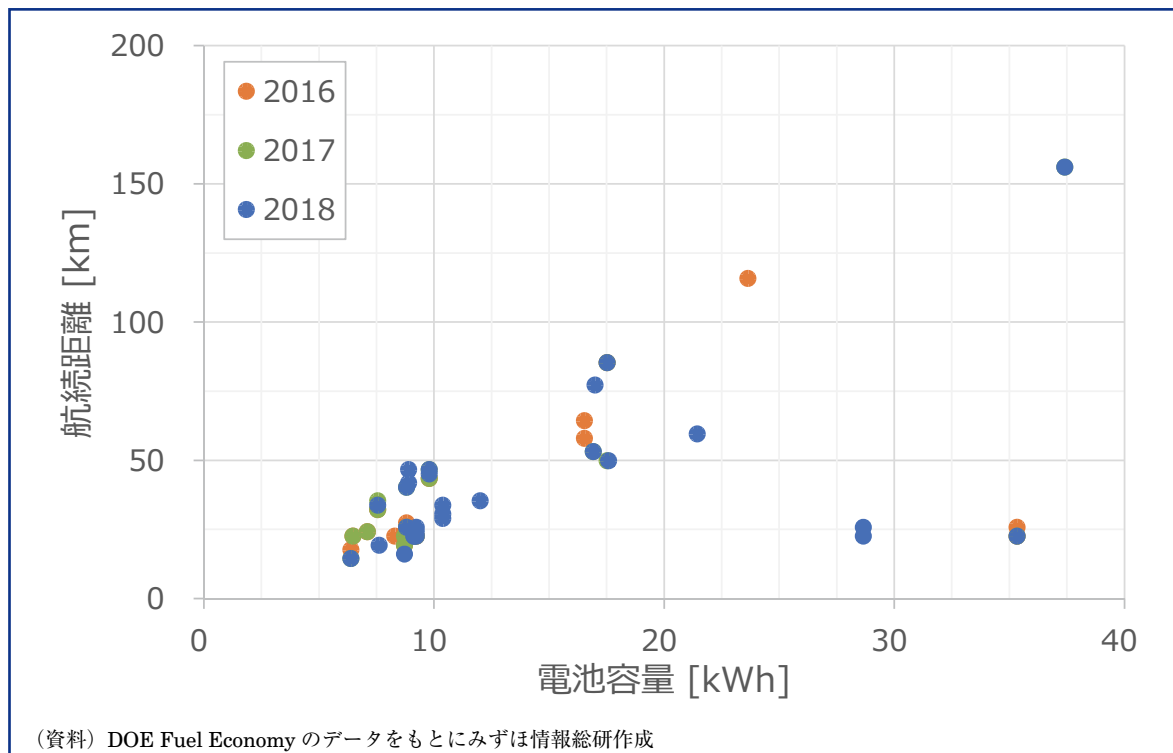
図表1、図表2は、それぞれEVとPHEVにおける航続距離と搭載されている蓄電池容量の相関である。EVとPHEVで航続距離に大きな差異があるため、縦軸と横軸のレンジが異なるが、比率は揃えてグラフ化した。

図表1より、EVは搭載している電池容量と航

図表1 EVの電池容量と航続距離の相関



図表2 PHEVの電池容量と航続距離の相関



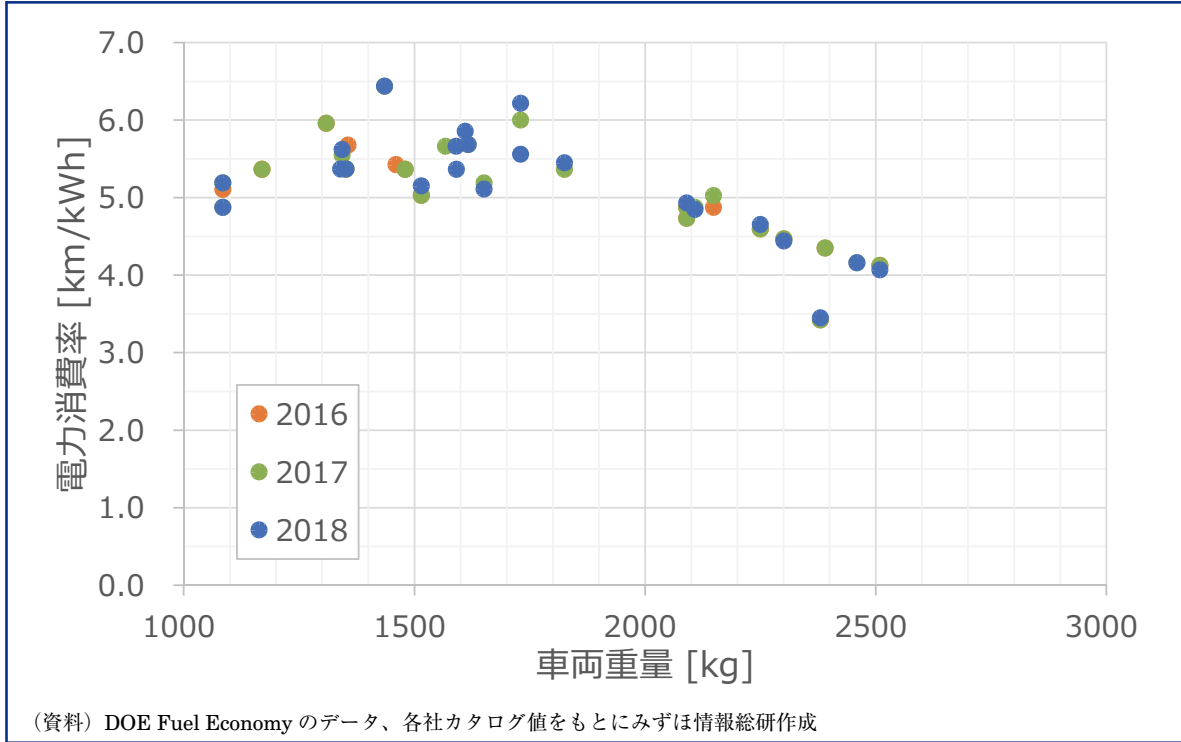
航続距離の関係が正の相関関係にあることがわかる。このことは、搭載される電池容量に比例して航続距離が長くなり、車両効率に大きな違いはないことを示唆している。これに対してPHEVでは図表2に示す通り、電池容量と航続距離の関係がEVと比較して相関性が低いことがわかる。また、図表1、2の傾きは電力消費率に相当するが、EVでは約5 km/kWhであり、PHEVでは2~3 km/kWh程度であることがわかった。これらのことは、PHEVはEVと異なり、電動走行だけでなくハイブリッド走行にも対応する必要があること、様々なタイプの車両が存在しており、搭載している蓄電池の容量が小さくても重量の大きい自動車があること、などが背景にあるものと考えられる。

このことを考察するために、車両重量と電力消費率の相関を取ったものを、図表3 (EV)、および図表4 (PHEV)に示した。双方とも車両重

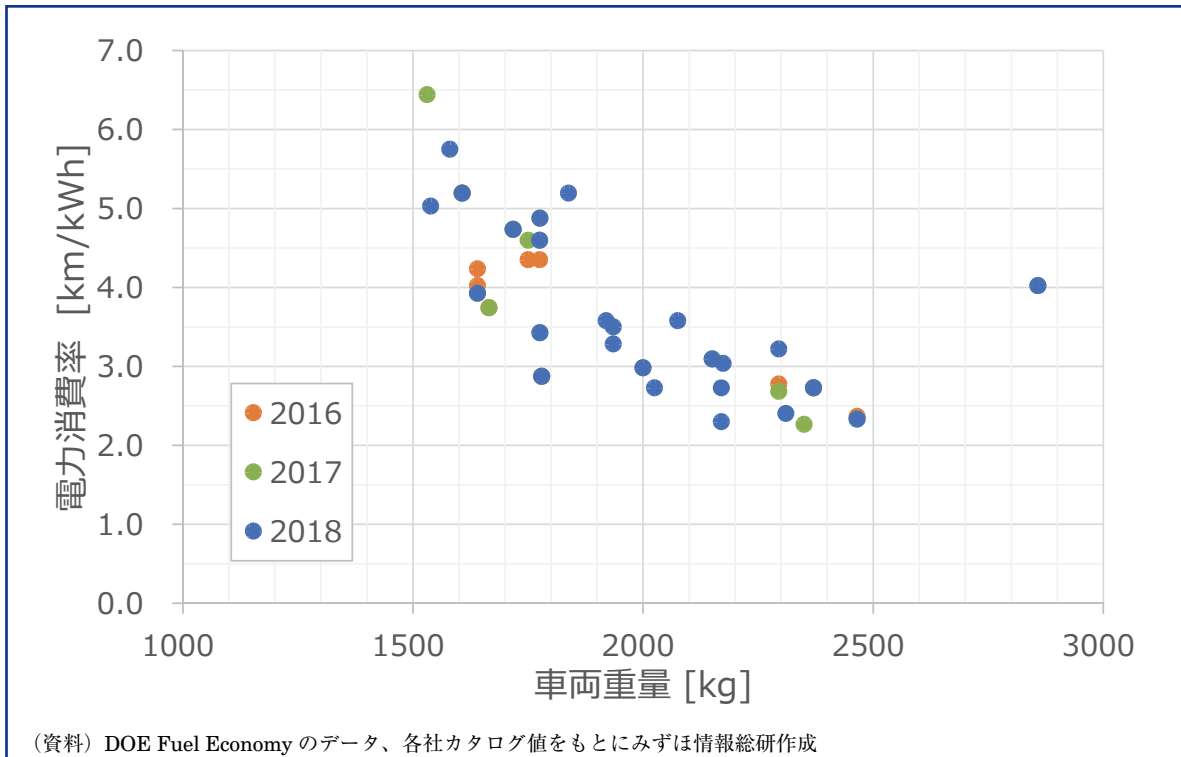
量が増大するにつれ、電力消費率が低下する傾向がみられた。

図表3をみると、EVは車両重量が1,800kg以上になると車両重量が増加するにつれて、電力消費率がほぼ線形に低下していることがわかる。電力消費率は走行抵抗に依存することは既に述べたが、走行抵抗は、①空気抵抗、②転がり抵抗、③加減速抵抗、④勾配抵抗によって決まることが知られており、このうち②、③、④は車両重量に比例する。蓄電池の搭載容量を単純に増加させると、現時点では車両重量の増加にもつながり、走行時の抵抗増大を招く結果、電力消費率の低下を招くこともあるだろう。蓄電池の重量エネルギー密度の向上は、同じ容量の蓄電池を搭載しても車両重量が軽くなることから、図表3で電力消費率が線形に低下している部分の傾きを改善する効果が見込める。

図表3 EVの電力消費率と車両重量の相関



図表4 PHEVの電力消費率と車両重量の相関



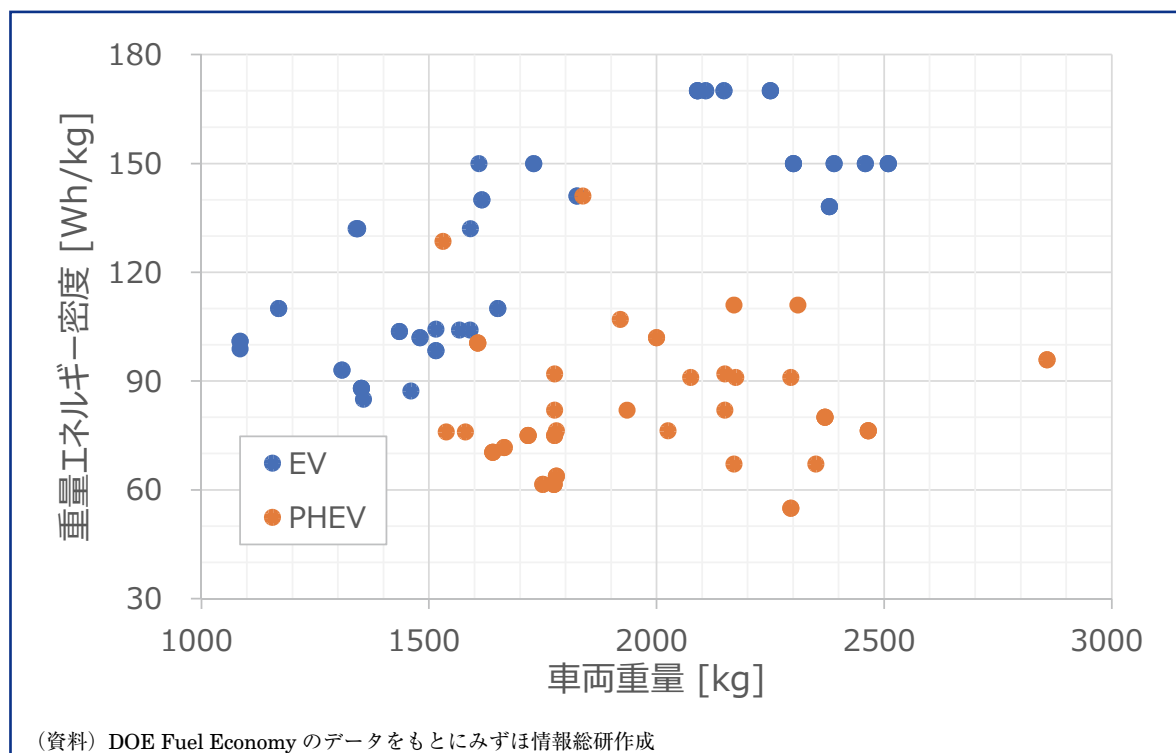
これに対して図表4に示した PHEV では、線形関係がみられなかった。この原因については、前述の考察通り PHEV ではハイブリッド走行にも最適でなければならないことによる違いや様々なタイプの車両が存在していることが表れているものと考えられる。蓄電池の特性に注目して考察すると、ハイブリッド走行では出力が重視されることから、搭載されている蓄電池の容量が小さい PHEV では、蓄電池そのものの出力密度を高める必要がある。一般的に、蓄電池の出力密度とエネルギー密度はトレードオフの関係にあることから、PHEV ではハイブリッド走行に対応するためエネルギー密度を犠牲とし、出力密度を高めた蓄電池が採用されている可能性が高い。

このことを確かめるために、EV と PHEV で採用されている蓄電池の重量エネルギー密度を抽出し、車両重量との相関を調べたものを図表

5に示す。なお、重量エネルギー密度は、航続距離と同様のデータベースから抽出したものである。図表5より、車両重量が1,500kg 程度を超える範囲では、PHEV に搭載されている蓄電池より EV に搭載されている蓄電池の方が、重量エネルギー密度が高いことがわかる。これらの事実は、前述の考察と矛盾せず、EV と PHEV では異なる諸元の蓄電池が使われていることがわかった。

ここでのデータ分析で得られた考察や示唆は、現状の EV や PHEV の技術動向の一面を捉えているものと推測されるが、自動車には様々な設計点が存在するため、個々の詳細な分析が必要であることも言及しておきたい。特に EV や PHEV は、まだ普及の初期段階であり、挑戦的な設計による自動車も含まれていることも想定される。

図表5 EV と PHEV に用いられている蓄電池の重量エネルギー密度比較



(2)電力貯蔵用蓄電池

電力自由化、再エネの導入量拡大、災害対応、スマコミの社会実装などを背景として、今後電力系統内で電力貯蔵を行う必要性が増していくことだろう。電力貯蔵には既に活用されている揚水式水力発電などの他に様々な方法があるが、電気エネルギーを化学エネルギーとして貯蔵する蓄電池にも一定の役割が期待されている。ここでは、電力貯蔵用に適用される蓄電池を対象として、技術的な要求事項と現状の技術動向について述べる。

①技術的な要求事項

NEDO 技術戦略研究センターがまとめたレポート⁽⁶⁾によれば、蓄電池に期待される役割として主に3つ挙げられている。ここでは、蓄電池に期待される役割毎に技術的な要求事項について述べる。また、期待される役割によらず電力貯蔵用に共通して求められる要求事項についても、最後に言及する。ここで、電力分野では出力に対して「容量」という言葉がしばしば用いられるが、本稿では蓄電池の容量との混乱を避けるため、出力容量 [kW] と蓄電容量 [kWh] (= 定格出力における放電時間 [時間]) のように区別して用いることとした。

なお、蓄電池に期待される役割が同じでも、電力系統内のどの領域に設置するかによっても技術的な要求事項は異なる。具体的には、発電の上流側から発電領域、送配電領域、需要家領域と大きく3領域あるが、どの領域でどの程度の電力貯蔵が必要となるかは、再エネを含む電源の地域差、電力市場における価値を含めた経済合理性などに大きく左右されることから、ここでは可能な範囲で言及するにとどめた。

A. 中小規模の余剰電力への対応

太陽光発電や風力発電のように、気象条件

によって出力が変動する再エネの導入が拡大すると、気象条件によっては供給が需要を上回り余剰電力が発生する。たとえば、春から初夏にかけては、日射量が多いものの気温が低く半導体での損失が少ないため、太陽光発電の発電量が一年で最も多い。一方で、春から初夏にかけては電力需要が少ないため余剰電力の発生頻度が高くなる傾向にある。余剰電力を蓄える観点からは、電力系統内の位置によらず設置スペースは可能な限り小さく、蓄電容量を大きくすることが重要となるため、エネルギー密度が重要となるだろう。要求される蓄電容量としては、再エネの余剰電力への対応を考慮すると、数時間から半日程度の時間で充放電に対応することが求められる。なお、要求される出力容量については、電力系統安定化および需要変動への対応にて後述する。社会全体で見た場合に、蓄電より出力制御に経済合理性がある、また、蓄電池は余剰電力を十分に吸収するためには規模が小さすぎるといった意見もある一方で、太陽光発電等の自家消費を行っている個々の需要家の受益で見れば、蓄電池の価格が十分に低下すれば余剰電力貯蔵のメリットがあるとされ、いずれの場合においても蓄電システムの価格低減が求められる。

B. 見かけの需要変動への対応

見かけの需要変動とは、需要家が保有する自家発電量や蓄電量をトータルの需要から差し引いた需要量の変動である。たとえば、太陽光発電では朝夕の出力変動速度が大きく、火力や水力などの出力制御可能な大規模発電設備の出力調整では対応が困難である。これらに対応するためには、発電領域、送配電領域、需要家領域のそれぞれにおいて、負荷を平準化(ピークカット、ピークシフト)するこ

とが必要となる。

発電領域においては、出力変動の大きい再エネ由来の発電設備に蓄電池を併設し、出力を安定化させることが期待される。太陽光や風力発電設備の出力は、短時間で定格出力からゼロまで変動する可能性もあることから、発電設備と同等の出力容量をもつ蓄電池が望ましいものと考えられる。蓄電容量については、30分以下の比較的短時間で変動する出力に対して大規模発電設備の出力調整で対応することが困難であることから、30分程度の放電時間に相当する蓄電容量を有していることが望ましい。これに対して送配電領域、および需要家領域においては、送電電力や消費電力より小さい出力容量で、数時間から半日程度の充放電に対応可能な蓄電容量をもつ蓄電池が必要となるだろう。しかしながら前述の通り、これらは再エネを含む電源の地域差、電力市場における価値などによって要求仕様が変わる可能性が高いことに注意が必要である。

C. 電力系統安定化への対応(調整力)

見かけの需要変動への対応でも述べた通り、再エネ電源は気象条件の変化などに応じて予測困難な出力変動を生じやすい。これらは、電力系統の需給バランスを崩し、周波数に影響を与える潜在的なリスクがあり、最悪の場合は停電に至る可能性もある。通常、これらの周波数調整は、火力や水力などの出力制御可能な大規模発電設備の出力調整で対応しているが、再エネ電源による発電の出力容量が増加すると、これら出力制御可能な大規模発電設備の出力が抑制され、周波数調整能力が小さくなってしまう問題が発生し得る。この周波数調整能力としての役割が蓄電池に期待されており、欧米では導入が進められている。

この役割に対しては、蓄電容量より出力容量が優先される傾向にあると考えられるが、特に送配電領域においては系統の出力容量と同程度の出力が必要となるため、数秒から数分程度の時間であっても、大きな蓄電容量が必要となることが想定される。

D. 蓄電池への共通要求事項

電力貯蔵用として蓄電池を活用するにあたっては、電力系統内での役割や領域によらずインフラ機器として連続運用される必要があることから、安全性、信頼性(低故障率)、コスト、設置性(設備サイズが小さい)、長期耐久性、および蓄電池の状態診断・監視技術が重要である。特に状態診断・監視技術は、安全性や耐久性を確保する上でも重要である。たとえば、メンテナンス時に蓄電池を交換するためには、各蓄電池の劣化状態を正確に診断する技術が必要となる。また、出力容量と蓄電容量が大きいものでは多数の蓄電池を直並列接続することから、運転状況下において蓄電池の充電状態や劣化状態を把握する技術も重要である。一般的に、蓄電池は初期性能が均一に製造されていた場合でも、運用中における劣化量の違いから性能にバラツキが生じることが多いため、蓄電池の劣化状態を把握し均等な充放電を行うことが必須となる。

本稿では、大規模な電力系統における蓄電池の役割に注目したが、電力系統に接続されていない地域において再生可能エネルギーと組み合わせた自立型電源システム、いわゆるマイクログリッドの構築においても蓄電池の役割は重要となることを最後に言及しておきたい。

②現状の技術動向

電力貯蔵用途における蓄電池の現状の技術動

向として、蓄電池を用いた電力貯蔵システムの定格出力と持続時間の関係をプロットしたものを図表6に示す。図表6は、米国 DOE 主導のもとで構築されたデータベース「Energy Storage Database⁽⁷⁾」より、現在電力貯蔵に比較的多く適用されているリチウムイオン電池、フロー電池、NAS[®](⁸)電池の3つを対象としてデータを抽出し、グラフを作成した。図表6の具体的な作成方法を以下に示す。尚、各蓄電池の作動原理や技術動向については、次章を参照されたい。

- 1) DOE Energy Storage Databaseにおいて“Technology Type”から“Electro-chemical”を選択し、蓄電池に関するデータを抽出
- 2) 抽出したデータの“Technology Type”、および“Technology Type Category”から、リチウムイオン電池、フロー電池、NAS電池を抽出

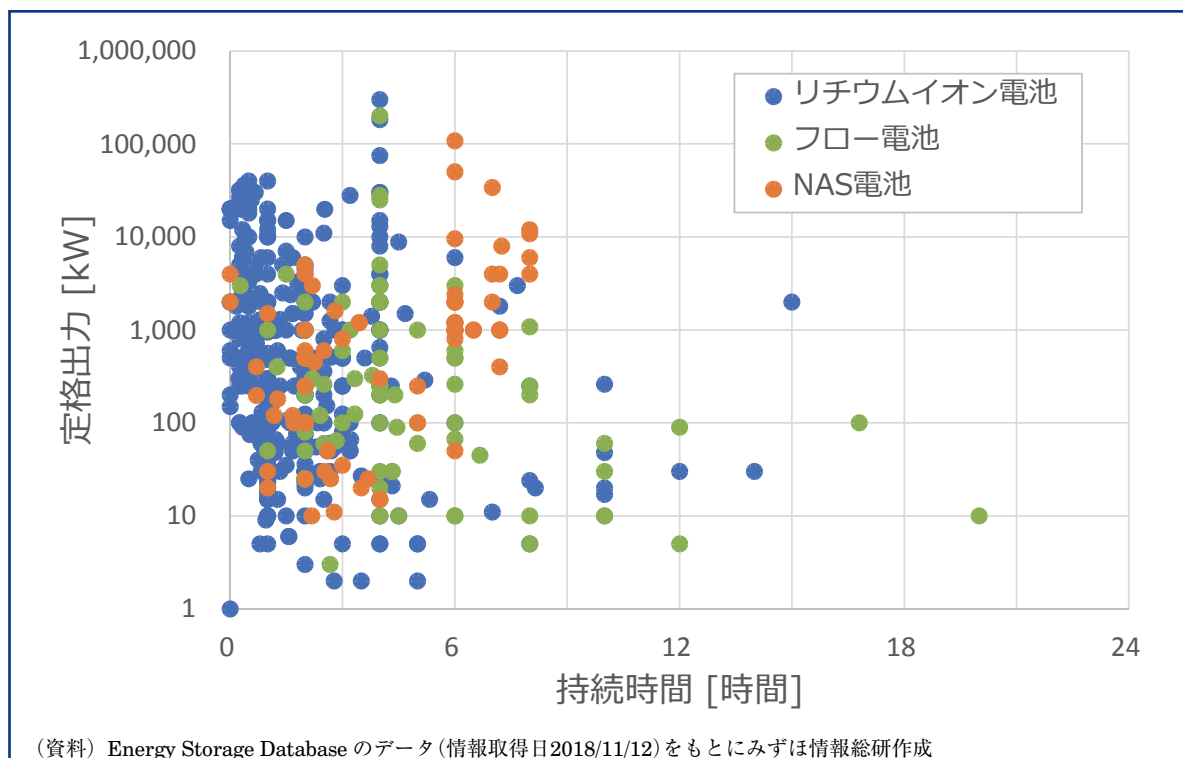
- 3) 抽出したリチウムイオン電池、フロー電池、NAS電池に対して、定格出力と持続時間をプロット

備考：

- ・データベースからの情報取得日は2018年11月12日
- ・複数の蓄電池やキャパシタを組み合わせた電力貯蔵システムは除外した⁽⁹⁾
- ・フロー電池は、電解液の違い(バナジウム系、亜鉛-臭素系、など)まで特定したデータも存在するが、今回のプロットでは全てフロー電池として分類した

図表6より、電力貯蔵用途に適用されたリチウムイオン電池、フロー電池、NAS電池の適用状況やその特徴についてまとめる。

図表6 蓄電池を電力貯蔵に適用したシステムにおける出力と放電時間の関係



A. リチウムイオン電池

リチウムイオン電池は普及が進んでいる蓄電池であり、高出力タイプや高容量タイプなど様々な性能の蓄電池が市場に投入されている。これらは、材料や蓄電池の最小単位であるセルの設計変更、およびセルの直並列接続によって実現されており、出力、放電持続時間(容量)ともに、様々なシステムが存在していることの一因となっているものと考えられる。また、他の蓄電池と比較して、放電時間が1時間以下と比較的容量の小さいシステムが多い傾向にある。これは、リチウムイオン電池の高速な充放電特性を活かし、周波数変動への対応を志向した電力貯蔵システムであると推測される。

B. フロー電池

フロー電池では、周波数調整の役割を担うシステムが少ない一方で、放電持続時間が12時間以上と蓄電池としては長いシステムがみられるところに特徴がある。フロー電池は、作動原理的に電解液のタンク容量を増やすことで高容量化できることから、様々な放電持続時間を実現できる。出力についても、電解液や蓄電池本体の設計などによって様々な出力を実現可能である。また、出力が高いものは放電時間が短く(蓄電容量が小さい)、出力が低いものは放電時間が長い(蓄電容量が大きい)傾向がみられた。

C. NAS 電池

NAS 電池では、放電持続時間は数時間以内に留まるが出力は幅広く試されており、負荷平準化から調整力を志向したシステムまで幅広く対応しているものと推測される。また、フロー電池とは異なり、周波数調整の役割を担っているものと推測される放電持続時間1

時間以下のシステムが2件みられた。

現状、NAS 電池を製造可能なメーカーは日本ガイシ株式会社1社のみであり、製造されている NAS 電池のセル(蓄電池の最小単位)が限定されている可能性が高く、セルの直並列接続によって出力と容量が調整されているものと推測される。放電持続時間が数時間以内のシステムしかみられないのは、システムとして成立させるための要請(熱自立、均等充放電制御、など)から、接続可能なセル数が限定されていることが一因となっている可能性も考えられる。

3. 次世代、革新型蓄電池の技術動向

現在広く普及し、さらなる発展も期待されているリチウムイオン電池は、このまま技術開発が進めば、さらに高性能(高容量、高電位、高サイクル寿命)となっていくように見える。しかしながら、リチウムイオン電池の改良を重ねても高性能化には限界があることがわかっており、たとえば重量エネルギー密度の理論的限界値は、およそ662Wh/kgと算出されている⁽¹⁰⁾。一方でガソリンの重量エネルギー密度は12,000Wh/kg以上⁽¹¹⁾もあり、ガソリン車なみの蓄エネルギー性能を電池に求めることはいかに困難かが分かる。

また、限られた資源量の問題も重要である。現在のところリチウムイオン電池をめぐる資源問題は大きく顕在化していないが、地球上で採掘できる金属の資源量には限界がある。よく話題に挙がるのは正極に用いられているコバルトであり、その調達リスクや需給見通しに、しばしば注目が集まっている⁽¹²⁾。また、電池内部で電荷の移動を担っているリチウム金属においても、同様に資源量の限界がある。地殻中の元素存在量を表現する数値として「クラーク数」があるが、蓄電池内を移動するイオンとして利用できる金属のクラーク数は、マグネシウムが約

2、アルミニウムが約7.5、ナトリウムが約3であるのに対し、リチウムは0.006しかない。今後、電気自動車をはじめ蓄電池のニーズが爆発的に高まることが予想されるなか、いずれリチウム金属の枯渇問題が顕在化する可能性もある。

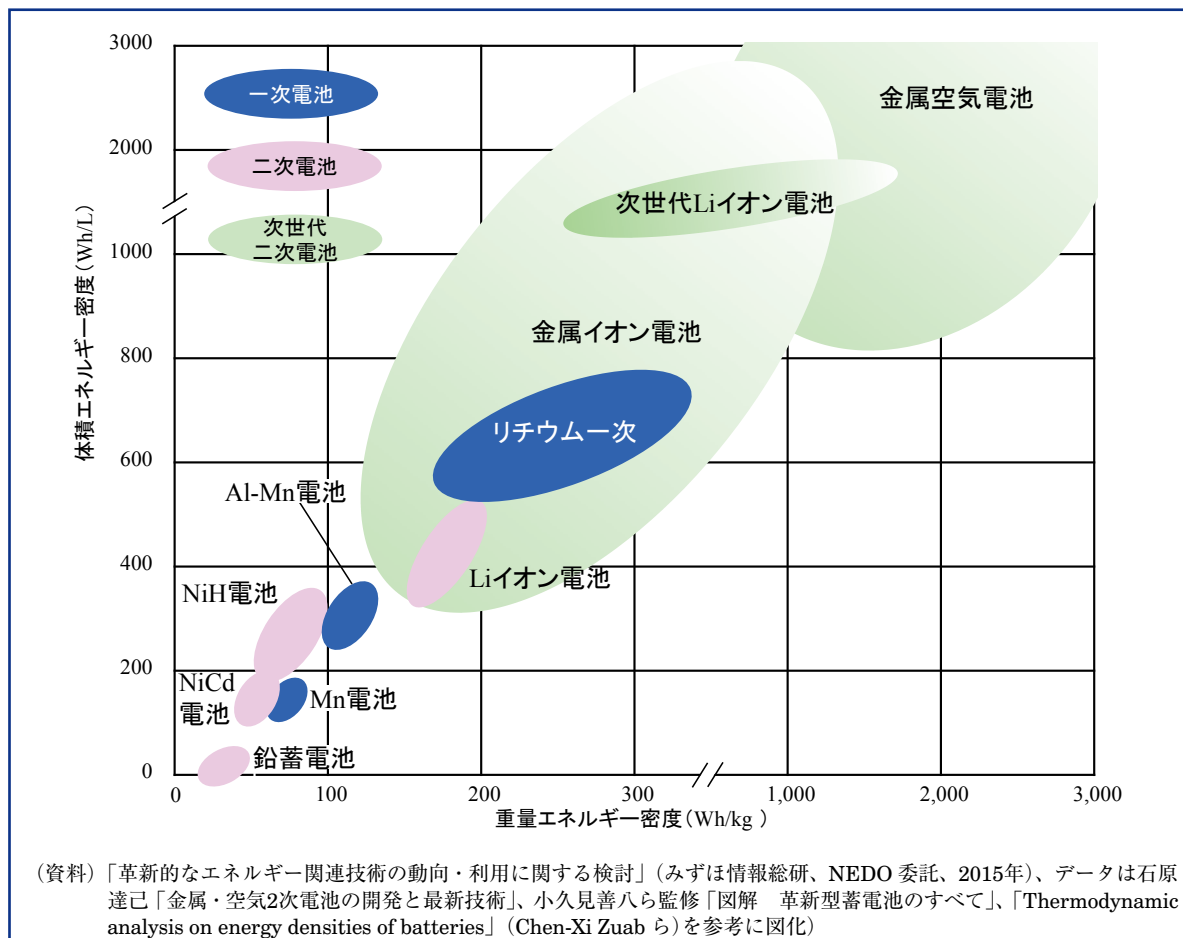
それでは、リチウムイオン電池を凌ぐ他の金属イオンを用いた蓄電池は実現できないのだろうか。あるいは、蓄電池そのものの構造を変えた新しい蓄電池は実現できないのだろうか。

NEDO「二次電池技術開発ロードマップ2013」によると、現在のリチウムイオン電池を凌ぐ高容量・高出力の革新的蓄電池の実現には、2030年頃に“ブレークスルーが必要”との記載があるものの、どの蓄電池技術がブレークスルーと

なるのかについては明示されていない。これについて、「革新的なエネルギー関連技術の動向・利用に関する検討」（みずほ情報総研、NEDO委託、2015年）によると、現行のリチウムイオン電池のエネルギー密度をはるかに凌ぐ革新的電池としては、次世代リチウムイオン電池、金属イオン電池、金属空気電池といった蓄電池が挙げられている（図表7）が、どの蓄電池がポストリチウムイオン電池を担う主役となるかについては、現時点では明らかでない。

本節では、これらのポストリチウムイオン電池となりうる次世代・革新型蓄電池を中心に、その特徴や課題、研究開発動向のトピックを述べていく。

図表7 重量エネルギー密度と体積エネルギー密度の関係



(1)全固体電池

全固体電池は、最近で最も報道を賑わせた蓄電池ではないだろうか。一言で説明してしまえば、従来型リチウム電池で使用される液体の電解質を固体の電解質で代替した電池である。しかしながら、報道されている全固体電池にはいくつか種類があることに注意が必要である。

まず、固体電解質には大きく無機系固体電解質と高分子系固体電解質が存在する。最近話題となっていたのは、前者の無機系固体電解質であり、粉状の物質をイメージすればよい。また、同じ無機系固体電解質を用いても、薄膜型とバルク型の2種類の全固体電池が存在する。前者は既に実用化されているが、この薄膜型全固体電池は小型・小容量向けであり、自動車の駆動用蓄電池としては用いることができない。自動車の駆動用蓄電池として期待されているのはバルク型全固体電池であり、両者はまったく別の技術と言っても過言ではない。ここでは、このバルク型全固体リチウムイオン電池に着目して技術動向をまとめる。

全固体電池は1970年代から研究され始めたが、元々は内部抵抗が高いため高出力化に課題がある蓄電池とされていた。しかしながら現在では液系リチウムイオン電池より高出力化が可能とされており、全固体電池がここまでの注目を集めるに至った要因のひとつとなっている。全固体電池の高出力化を実現するにあたっては、大きく2つのブレークスルーが挙げられる。1つは、固体電解質の研究開発の進展である。従来の固体電解質では、液系電解質と比較してリチウムイオン伝導度が室温で一桁以上低く、蓄電池に適用しても高速な充放電ができない状況にあった。しかし、2011年に室温でも液系電解液と同等のリチウムイオン伝導度をもつ硫化物系固体電解質 $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ が、東京工業大学のグループによって発見されたのを皮切りとして、2016年

には同グループによって室温で液系電解質を凌駕する $\text{Li}_{9.54}\text{Si}_{1.74}\text{P}_{1.44}\text{S}_{11.7}\text{Cl}_{0.3}$ が発見された⁽¹³⁾。固体電解質には、他にも課題があるものの、室温におけるリチウムイオン伝導度が液系と同等かそれ以上になったことは、全固体電池の実用化に向けた大きな進展となっている。

2つ目のブレークスルーは、電極活物質と固体電解質の界面に数ナノメートル程の緩衝層を設けることで、全固体電池内部の反応に起因する内部抵抗を低減し、高出力化を実現したことが挙げられる。全固体電池で高速な充放電を行うためには、固体電解質のイオン伝導度向上だけでは不十分であり、化学反応が起こる電極活物質と固体電解質の界面における抵抗が問題であることを国立研究開発法人物質・材料研究機構の研究グループが突き止め、界面をニオブ酸リチウム LiNbO_3 などのリチウム酸化物で修飾して緩衝層を設けることで、内部抵抗を低減、高出力化を実現した⁽¹⁴⁾。どちらも国内の研究グループの手によって成し遂げられたことは、世界に誇るべき成果であるといえる。

それでもなお、全固体電池にはまだ様々な課題が残っており、現在も国の研究開発プロジェクトを通じて、産学官の総力を挙げて研究開発が進められている。たとえば、全固体電池は粉状の材料によって構成されることから、従来のリチウムイオン電池の製造プロセスをそのまま適用できないため、量産可能な製造プロセスを開発する必要がある。また、充放電によって電池内部の構造が壊れないよう高い圧力⁽¹⁵⁾による加圧拘束が必要であったり、固体電解質中で金属リチウムの析出が報告されたりするなど、全固体電池特有の課題も報告されている。

これらの課題を考慮すると、今後数年で実用化されたとしても、全固体電池のメリットを最大限に活かし、液系リチウムイオン電池を超えた性能および信頼性に達するまでには、まだ相

当な時間がかかるのではないだろうか。今後も研究開発動向を注視し、実用化に向けた動向を詳細に追っていく必要がある。

(2)次世代リチウムイオン電池

次世代を担う蓄電池として、やはりリチウムイオン電池の技術動向を取り上げない訳にはいかないだろう。リチウムイオン電池の研究開発により、今後さらに高エネルギー密度化が進むことが予想されるが、これとトレードオフの関係にあるのが安全性の確保である。一般的なリチウムイオン電池では、有機電解液と負極に広く採用されているカーボンおよびセパレータは可燃性であり、金属酸化物で構成される正極からは材料によっては熱分解によって燃焼を助ける酸素が放出されるため、内部短絡等により充電されたエネルギーが一気に放出されると電池の破裂や場合によっては発火から火災に至る恐れがある。

現在では、バッテリーマネジメントシステムによる電池の状態監視・制御技術の向上や製造プロセスにおける異物混入の排除、熱暴走しにくい電極材料である LiFePO_4 や $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ の採用、耐熱性の高いセパレータの開発等、研究機関とメーカーの不断の努力により、安全性は飛躍的に向上してきている。しかしながら、それでもリチウムイオン電池搭載製品の普及拡大、ユーザーの使用過誤、海外無名メーカーの安価な製品の流通などを背景として、発火や火災に至る事故はいまだに発生し続けている⁽¹⁶⁾。また、毎年発生している大規模地震・災害や事故による圧壊、外部の火災など外的要因で発火、破裂が起こる可能性は、可燃性材料を用いる限り、どんなに安全性を追求しても最後まで残ることになる。

一方で、約4Vというリチウムイオン電池の高い電圧に耐えることができ、発火性を持たず高

いイオン伝導性を示す電解液の存在が東京大学らの研究グループによって明らかにされ、安全性向上に資する発見として注目を集めている。

従来、リチウムイオン電池の電解液にはリチウム塩を溶解した炭酸エステル類が主として採用されており、これらは幅広い電位で安定であることや安価であることから広く採用されているが、発火点が低くリチウムイオン電池が熱暴走した際に発火する要因となっている。水系の電解液を用いれば可燃性という課題は解決できるが、最大4Vという高電圧に起因する水の電気分解や、水とリチウム金属の反応により水素ガスが発生するために水系の電解液は使えないというのがリチウムイオン電池の常識であった。

しかしながら、2016年には水をベースとしたリチウムイオン伝導性液体、水の電気分解される電圧を超える3V以上で作動するリチウムイオン電池が実現された⁽¹⁷⁾ほか、2017年には①発火点を持たない、②200℃以上への温度上昇時で蒸気が発生し自己消火性を示す、③優れた電極反応耐久性を示す電解液が発表され大いに注目を集めた⁽¹⁸⁾。

このような電解液の急速な研究進展により、前述の全固体電池に劣らない安全性を示す液体系リチウムイオン電池の実現が可能性を帯びてきた。液体の電解質を利用するということは、既に導入済みの量産ラインでも軽微な改変により適用できる可能性があり、製造コストを低く抑えつつ安全性を飛躍的に高めることができるポテンシャルがあるとも言える。負極にシリコン、セパレータにフッ素系樹脂、そして前述の電解液を利用すれば、原料価格が高くなる傾向はあるが、全体的に可燃性を示す材料を利用しない、全固体電池と同レベルの安全性を備え持つリチウムイオン電池を近い将来実現できるかもしれない。

(3)ナトリウム硫黄電池

リチウムと同じアルカリ金属であるナトリウムを用いた蓄電池として、既に商用化し広く普及しているものの代表格が、大規模な電力貯蔵用に開発されたナトリウム-硫黄電池(NAS電池)だろう。NAS電池は日本ガイシ株式会社によって2002年から事業化されている蓄電池で、正極に硫黄、負極に金属ナトリウム、電解質には固体電解質である β -アルミナが用いられている。放電時には、負極のナトリウムが Na^+ となり、 β -アルミナ中を伝導して正極まで Na^+ が輸送され、正極の硫黄によって Na^+ が還元されて多硫化ナトリウムとなる。作動中はナトリウムと硫黄を溶融させ、 β -アルミナでの Na^+ 伝導度を高く保つために、 300°C 程度の高温条件が必要となる。高温条件での作動が必須であることから、ヒーターでの加熱や放電時の反応熱を活用して、作動温度を維持(熱自立)する必要がある。

鉛蓄電池と比較すると3倍のエネルギー密度をもち、耐久年数も約15年と長寿命であるため、電力貯蔵用途に適した蓄電池である。更に構成材料が資源的に豊富に存在することから、他の蓄電池と比較してコスト競争力が高いとされており、この観点からも経済合理性が重要視される電力貯蔵用途での活用が期待される。

NAS電池は、過去に発火事故が発生したことがあるが、金属ナトリウムが用いられているため、消火にあたっては通常の水系の消火液を用いることができない。当時の発火原因は既に究明されており、単電池(蓄電池の最小単位)の破壊から短絡が生じ、隣接するモジュールに延焼が拡大したものとされている。これらの原因に基づき、現在では短絡防止策や延焼防止策などが図られており、安全性が向上しているものと考えられる。

既に普及が進んでいるNAS電池であるが、次

世代で更に活躍が期待される蓄電池として本稿でも取り上げた。今後の動向が注目される。

(4)リチウム硫黄電池

リチウム硫黄電池は、通常のリチウムイオン電池で用いられる金属系正極の代わりに、地球上に豊富に存在し、NAS電池でも電極として実用化されている硫黄を封入した次世代型リチウムイオン電池である。正極としての硫黄は、通常のリチウムイオン電池と比較すると電圧が $2\sim 2.5\text{V}$ 程度と低いものの、電気エネルギーを貯蔵する電極活物質が軽量であることから従来型のリチウムイオン電池セル比で $2\sim 3$ 倍の重量エネルギー密度が可能になると期待される。従来型のリチウムイオン電池の正極に含有されるコバルト、ニッケル、マンガンのような価格の高い金属を低価格の硫黄で代替できることから原料コストの大幅な削減も期待される。

実用化にあたっての課題は、硫黄が電解液に溶解し易いことに起因する充放電容量の急速な劣化や、正極に用いる硫黄の電気伝導性が低く、充放電のエネルギーロスが大きい点などがある。これらの課題解決に向けた研究開発は徐々に進められており、たとえば固体電解質を適用して、正極の硫黄が溶出することを防ぐ試みなどがある。

リチウム硫黄電池は、大学や研究機関のみに限らず日本企業でも研究されており、複数の企業が過去にプレスリリースを行っているほか、海外では英国のベンチャー企業OXIS Energyが先行している。これらの企業や研究機関では、ラボレベルではリチウムイオン電池のエネルギー密度を超えるセルの作成に成功した事例もみられ、OXIS Energyでは既に 450Wh/kg のエネルギー密度を実用的なサイズのセルで達成したとしており、空気電池や多価イオン電池よりも研究開発が進んでいると推測される。

現状では長期耐久性の確認やスケールアップの可能性について検討されているが、既にコイン電池やコンデンサの代替として日本企業により実用化され、大型用途でもサンプルセルの出荷が行われている全固体電池と比較すると、リチウム硫黄電池の実用化にはまだ時間がかかるとみられる。

(5)レドックスフロー電池

化学反応を利用したすべての蓄電池に共通する事項として、電気エネルギーと化学エネルギーの変換に酸化還元反応を用いていることが挙げられる。還元は英語で Reduction、酸化は Oxidation であることから、両者を短縮して酸化還元反応を Redox (レドックス) 反応と表現することが多い。この“レドックス”を名前に冠したレドックスフロー電池も、電解液中に存在するイオンの酸化還元反応を利用した蓄電池の一種である。

レドックスフロー電池では、酸化還元反応を担うイオンを含んだ溶液を、ポンプを駆動力とした流動(フロー)によって循環させるという点に特徴がある。充放電時には、蓄電池本体の電極における酸化還元反応によって、電解液中にあるイオンの価数が増えることなどによって電気の充放電を行う。電極が変化せずに、電解液が変化するという点にも特徴があるといえる。

レドックスフロー電池は、タンクやポンプが必要となることからシステム全体が大きくなるためエネルギー密度は小さいが、電解液によっては劣化がないため耐久年数が10~20年以上と長寿命であり、不燃性または難燃性の材料から構成されるため、安全性が高く電力貯蔵用途に適している。また、蓄電容量を増やすためには主にタンクを増設すればよいため、大規模な電力貯蔵用途に適用可能である。

国内では、既に住友電気工業株式会社が全バ

ナジウムレドックスフロー電池を開発、事業化しており、コンテナ型とすることで設置性の向上も図られている。その他にも、大企業からベンチャー企業まで、電解液の組成や電池本体の構造が異なる様々なレドックスフロー電池が開発されている。

研究開発の動向としては、電池本体の性能向上を目指して、より化学反応にかかる抵抗を小さくする取り組みが多い。具体的には、電池内部の流動を改善するための流路構造や電極の微細構造の検討、電解液の改良などがある。特に電解液の改良としては、新たな電解液の開発だけでなく、酸化還元媒体(Redox Mediator)という酸化還元反応を助ける物質を電解液中に導入し、化学反応に伴う抵抗を低減する取り組みもみられる。また、近年では高エネルギー密度化を目指した電解液の研究開発として、固体粒子を懸濁させた電解液を用いたスラリー型レドックスフロー電池というタイプの蓄電池も提案されている。一般に従来のレドックスフロー電池では金属イオンの溶液を用いるため、エネルギー密度が他の蓄電池と比較して低いが、溶液よりも固体中のほうが酸化還元反応を担う金属イオンの密度が高くなるという特徴を利用することで、体積エネルギー密度の向上が見込まれる。スラリー型レドックスフロー電池はセミソリッドフロー電池と呼ばれることもある。

一般的には、電力貯蔵用途が想定されているレドックスフロー電池であるが、電気自動車へ適用する試みもみられる。これまで、レドックスフロー電池を車載用として適用するには、大量の電解液を搭載するための大容量タンクが必要となり、システム全体を車両に搭載できないという課題が存在した。しかし、2013年に設立されたスイスのベンチャー企業である nanoFlowcell[®]により、新たに開発された電解液を用いたレドックスフロー電池は、出力密度、エネルギー

密度ともに従来のレドックスフロー電池のみならず、リチウムイオン電池をも大きく上回るものとされ、既に電気自動車で複数モデルを商品化しているという。フロー電池の車載への適用を可能とした電解液についての詳細は明らかにされておらず、リチウムイオン電池を上回るエネルギー密度を達成しているかどうかは現時点では確認できないが、今後も動向に注目していきたい。

(6)多価イオン電池

リチウムイオン電池はリチウム金属がイオンとなって正極と負極の間を出入りすることで充放電が可能となる。リチウムは電極に1個の電子を渡しイオンとなる(Li^+)ことで、電極間を行き来することができるが、もし、より多くの電子を渡すことができるイオンがあれば、より容量の大きな蓄電池が実現する可能性がある。このような、より多くの電子の受け渡しのできるイオン(多価イオン)となりうる金属を用いた電池を、多価イオン電池という。多価イオンになりうる金属としては、例えば、マグネシウムイオン(Mg^{2+})、アルミニウム(Al^{3+})、鉄(Fe^{2+})、亜鉛(Zn^{2+})などが挙げられる。

多価イオン電池としての代表格は、最近国内外の研究機関から次々と新たな研究成果が発表されているマグネシウムイオン電池が挙げられるだろう。マグネシウムは、蓄エネルギーの性能としては理論的には重量エネルギー密度が最大約2,000Wh/kg、体積エネルギー密度が最大約6,000Wh/L、電圧も最大約4Vにも達し、実用化されているリチウムイオン電池の性能をはるかに凌駕する⁽¹⁹⁾。しかし、多価であるがゆえ、結晶中でも溶液中でも移動速度が遅くなり、また相互作用が弱く電極における反応も鈍いという課題がある。また、負極にマグネシウムを用いると、デンドライトが析出⁽²⁰⁾し反応が著しく鈍

くなる課題もある。さらに、安定かつ安全に充放電を行うためのマグネシウム電解液が存在していないことも課題である。このように、実用化に至るまでには様々な困難な課題が山積しており、我が国の研究グループをはじめ世界各国の研究グループがしのぎを削って研究開発が行われているが、ポストリチウムイオン電池として製品化・量産化される状況には至っていない。ポストリチウムイオン電池を目指し、製品化・量産化に向けたもう一段の技術革新が求められる。

また同様に、アルミニウム、鉄、亜鉛といった多価金属を用いた蓄電池も、理論的には可能性はあるが、マグネシウムと同様にデンドライト析出によるサイクル寿命の課題が大きい。一部の企業で蓄電池の製品化までこぎつけた例はあるが普及しておらず、根本的な課題解決には至っていないと言わざるを得ないだろう。

(7)ナトリウムイオン電池

ナトリウムは、リチウムと同じアルカリ金属でありながら海水中をはじめ豊富に存在し、また化学的特性がリチウムと似ていることから、リチウムに代替する蓄電池材料として期待されており、ポストリチウムイオン電池としてナトリウムイオン電池の研究開発も進められている。

金属イオン電池材料としてのナトリウムは、標準電極電位⁽²¹⁾がリチウムより0.3V高い分、電池としたときの電圧が低下してしまうことから、リチウムイオン電池ほどエネルギー密度を大きくできないという問題がある。また、ナトリウムはリチウムよりも活性であるため過充電するとデンドライトが形成されてショートや爆発する可能性がある点も大きな課題である。これら課題を克服すべく、日本、アメリカ、欧州、中国、韓国など世界各国で研究開発が行われており、そのなかでも我が国の研究機関による研究

開発レベルは世界トップレベルにある。実用化に向けた動向としては、2015年にはフランスの国立科学研究センターが中心となって、民生用で普及している18650サイズのナトリウムイオン電池のプロトタイプを開発し、2017年にTiamat Energyというベンチャー企業を立ち上げている。

また、先述したようにナトリウムはリチウムと化学的特性が似ていることから、量産化段階でリチウムイオン電池のノウハウを多く転用できる可能性がある。今後の研究開発動向が注目される。

(8)金属空気電池

金属空気電池とは、負極においては金属が活物質として出入りする一方、正極には空気中の酸素を活物質として用いる電池である。既に一次電池(一度放電するのみで充電が不可能な電池)としては亜鉛空気電池が広く商用化されており、ボタン電池などで我々にもなじみがある電池である。

金属空気電池は、正極で空気(酸素)を活物質とするため、高いエネルギー密度が可能で、理論的には重量エネルギー密度で1,000Wh/kg以上、単位重量あたりの容量が大きいリチウムであれば10,000Wh/kg以上にもなる⁽¹⁰⁾。先述したリチウムイオン電池の理論的限界値(662Wh/kg)と比べても、ガソリンに匹敵する圧倒的なエネルギー密度である。しかし、これはあくまで理論的な値であり、充放電を繰り返す蓄電池の実現には大きな課題がある。

まずは、負極における金属イオンの出入りに関しては、充電時にデンドライトが生成される問題、また高電圧に伴い電解液から水素が生成するなどの問題がある。また、正極においては、酸素の発生・還元を繰り返しが著しく電極を劣化させ、蓄電池の性能上重要となるサイクル寿

命が極めて短くなる。正極はまた、一方は電解液に浸りながら一方は空気に触れることから、撥水性と反応性の両立が必要であり、開発のハードルが極めて高い。

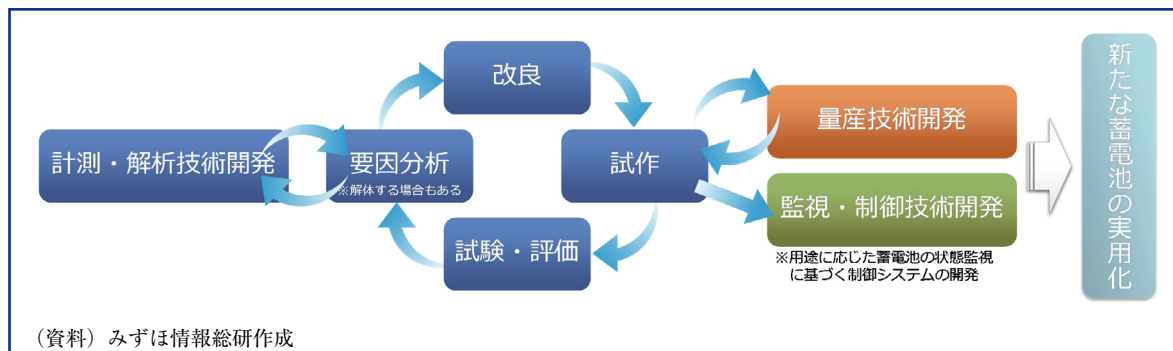
以上の課題解決に対し、有機系電解液の開発、正極の機能分離化(第三電極方式と呼ばれる)などの技術開発が進められている。金属イオンとしては、資源枯渇問題のあるリチウムイオン以外の、例えば亜鉛、鉄、アルミニウムといったありふれた金属も用いることができ、これでも十分なエネルギー密度が取れるため、特に系統向け、電気自動車向けなどの中型～大型の蓄電池として大きなポテンシャルがあると考えられるが、現在のところ実用化に耐えうる金属空気蓄電池は実現していない。その他の蓄電池と同様、もう一段の技術革新が期待される。

4. 次世代・革新型蓄電池の実用化にあたっての技術的課題

ここまで述べてきたように、いずれの次世代・革新型蓄電池も、ポストリチウムイオン電池として主役となりうるポテンシャルは有しているものの、すぐに代替として期待できるレベルには至っていないと考えられる。本節では、それぞれの蓄電池が有する個別の技術課題ではなく、蓄電池が実用化されるときに解決されるべき共通の技術的課題について考察した。

新たな蓄電池が実用化されるために解決が必要な技術的課題を考察するために、蓄電池が実用化されるまでに必要な開発プロセスの概念図を図表8に示す。図表8より、次世代・革新型蓄電池が実用化されるためには(1)量産技術開発、(2)蓄電池の監視・制御技術開発、(3)計測・解析技術開発、の3つの技術的課題が存在するものと考えられる。以下にそれぞれの課題について、リチウムイオン電池を例に挙げながら解説する。

図表8 新たな蓄電技術実用化に向けた開発プロセスの概念図



(1) 量産技術開発

新たな技術を実用化し広く普及させるためには、高い信頼性をもちつつ、可能な限り安価に大量生産を可能とする技術が必要となる。蓄電池もこの例外ではないが、量産技術には制約が多いため、試作段階から量産技術を意識した開発が必要となる。リチウムイオン電池は現在広く普及しているが、その歴史は、1979年の Goodenough 博士(2019年、吉野彰氏とともにノーベル化学賞を受賞。当時は、東大から留学していた水島公一氏も共同研究。)らの正極材料としてのリチウム系酸化物の発見、その後の吉野彰氏のリチウムイオン電池の原型の完成まで遡る。しかし、普及へのブレークスルーは、1991年にソニー株式会社の西美緒氏ら(当時)によって成し遂げられた製品化によるものと言っていだらう。ソニーにおける開発には多くの苦勞を要しており、有機電解液を用いた蓄電池すら存在しなかった時代、多くの試行錯誤を繰り返したという。すなわち、新たな蓄電池が広く普及するためのブレークスルーは、実験室の研究成果でポテンシャルを見出すことだけでなく、その後の量産化の道筋が見えて初めて成り立つといえる。

(2) 蓄電池の監視・制御技術開発

蓄電池は電気を充放電する機能を担う以上、

外部回路からの要請に対しては常に「受け身」の状態である。蓄電池を適切に活用しないと安全性が著しく損なわれることは、リチウムイオン電池において周知の事実である⁽²²⁾。安全性が高いと言われている蓄電池でも、適切な使用条件は必ず存在するため、蓄電池の状態を監視し、適切な使用条件の範囲で運用する必要があるだろう。また、蓄電池の性能を長期間に渡って維持する観点からも、適切な充放電の制御は重要である。

蓄電池を適切に制御するためには、蓄電池の状態を監視する必要があり、これら状態監視と制御を担うシステムをバッテリーマネジメントシステムと呼ぶ。蓄電池の状態監視は、即時性(リアルタイム性)のある計測技術と内部の作動原理に基づいた状態推定技術の2つが必要であるため、新しい蓄電池にはその特性や作動原理に応じたバッテリーマネジメントシステムの開発が用途毎に必要となる。たとえば、リチウムイオン電池のバッテリーマネジメントシステムでは、用途に応じて必要とされる技術水準が異なるだけでなく、蓄電池の構成材料によっても適用される監視・制御技術が異なる。同じリチウムイオン電池でも、中身が異なると共通のバッテリーマネジメントシステムを適用できないことから、蓄電池の素性に応じた監視・制御技術の必要性がわかるだろう。

(3)計測・解析技術開発

蓄電池の開発において、試行錯誤にかかる負荷は大きな課題のひとつである。図表8に示す通り、要求仕様や開発目標を満たす新たな蓄電池の開発では、まず研究室レベルで試作し、性能や特性を試験によって評価することが必要となる。性能を評価した後、性能発現や劣化の要因を分析し、改良方針を定め、再度試作と評価を行うという試行錯誤を繰り返すことになる。このとき、試験では劣化特性のように評価が完了するまでに長い時間⁽²³⁾を要するものもあるため、開発にかかる負荷が大きいことは想像に難くないだろう。これらは、蓄電池の性能発現メカニズムや劣化メカニズムが完全には解明できていないことが一因である。蓄電池の開発指針となるメカニズムを解明するためには、計測技術やシミュレーションなどの解析技術の開発、実証が必要であり、実用的な計測技術や解析技術が開発されれば、蓄電池開発における試行錯誤の負荷を軽減することが期待される。

最後に、技術が関係する課題について、もうひとつ言及しておきたい。次世代・革新型蓄電池の実用化に向けた共通の課題として量産技術やシステム技術を挙げたが、新しい蓄電池技術の実用化にあたっては、ユーザーや社会的、制度的な課題も重要な因子であることは言うまでもないだろう。蓄電池の技術進展にあわせて、そのようなユーザー側の課題と各蓄電池技術の特長とのマッチングについて分析を行うことは、技術開発の方針を決める上でも今後いっそう重要となっていくものと考えられる。

5. おわりに

今後どの蓄電池がポストリチウムイオン電池になるのか、あるいは現在のリチウムイオン電池の発展系が主役になり続けるのか、現時点で

断定することは難しい。いままでの蓄電池をみても、広く普及しているタイプは数種類しかないことも事実であることから、基礎研究段階から量産化段階にステップを進めることは極めて難しく、これこそが生き残る必須条件であることは確かである。リチウムイオン電池やNAS電池をはじめとして、蓄電池は我が国が得意とする技術分野でもあることから、今後いっそうの技術開発が期待される。

なお、本稿では紙面の都合上、取り上げることができなかった蓄電池もある。それらの蓄電池にも一長一短あり、用途毎の要求仕様にあわせて実用化に向けた研究開発が進んでいくだろう。今後も当社では、蓄電池技術とその適用先に関する技術動向について情報整理、分析を継続するとともに、当社の特色でもある解析技術を駆使した蓄電池の研究開発支援^{(24), (25)}を通じて、少しでも我が国の蓄電池関連産業の一助となることができれば幸いである。

注

- (1) 充放電可能な電池を示す技術用語としては“二次電池”も用いられるが、本稿では“蓄電池”で統一して述べる。なお、一般的には“充電電池”と呼ばれることもある。
- (2) 街や地域など特定の範囲において、電力をはじめとしたエネルギーを有効活用する社会システムのこと。近年では、交通システムも含めた検討が行われている。
- (3) 蓄電池の容量1kWhあたりで、走行可能な距離。エンジン車の燃費と同様で、値が大きい程効率が高い。なお、海外では100kmまたは100マイルを走行する際に必要な容量で表される。
- (4) 蓄電池の最小単位。単電池と表現される場合もある。
- (5) DOE Fuel Economy, <https://www.fueleconomy.gov>
- (6) NEDO 技術戦略研究センター TSC Foresight, vol.20 2017年7月「電力貯蔵分野の技術戦略策定に向けて」
- (7) National Technology & Engineering Sciences of Sandia, LLC, DOE Global Energy Storage Database, <https://www.energystorageexchange.org>
- (8) 「NAS」は日本ガイシ株式会社の登録商標です
- (9) 単一の蓄電池についての技術動向把握が目的である

- ため今回の分析では除外したが、複数の蓄電池を組み合わせたシステムを否定するものではないことに注意されたい。特性が異なる蓄電池を複数組み合わせたシステムでは、互いに苦手な部分を補うことができる点などにメリットがある。
- (10) 小久見善八ら監修「図解 革新型蓄電池のすべて」オーム社、2011年
- (11) 「高電圧・高安全性蓄電池を実現するフッ素系電解液」ダイキン工業、関西大学、(NEDO プレス発表資料) 2010年。ただし、ガソリンの熱量のうち実際の動力に利用できるエネルギー効率は一般に50%以下であることに注意(蓄電池から電力を取り出す際のエネルギー効率は90%以上)。
- (12) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、「EV 電池および電池材料(Ni, Co, Li)の市場動向 —Battery Materials 2019 参加報告—」、<http://mric.jogmec.go.jp/reports/current/20190604/113521/>
- (13) Y. Kato, S. Hori, T. Saito, K. Suzuki, M. Hirayama, A. Mitsui, M. Yonemura, H. Iba, R. Kanno, High-power all-solid-state batteries using sulfide superionic conductors, *Nature Energy*, **1**, 16030 (2016)
- (14) N. Ohta, K. Takada, I. Sakaguchi, L. Zhang, R. Ma, K. Fukuda, M. Osada, T. Sasaki, LiNbO₃-coated LiCoO₂ as cathode material for all solid-state lithium secondary batteries, *Electrochem. Commun.*, **9**, 1486 (2007)
- (15) 数十 MPa (数百気圧)以上の加圧拘束を必要とする場合もある。
- (16) (独)製品評価技術基盤機構、「5年で2倍以上に！リチウムイオンバッテリー搭載製品の事故～モバイルバッテリーは購入時にPSEマークを確認しましょう～」、<https://www.nite.go.jp/jiko/chuikanki/press/2018fy/prs190124.html>
- (17) Y. Yamada, K. Usui, K. Sodeyama, S. Ko, Y. Tateyama, A. Yamada, Hydrate-melt electrolytes for high-energy-density aqueous batteries, *Nature Energy*, **1**, 16129 (2016)
- (18) J. Wang, Y. Yamada, K. Sodeyama, E. Watanabe, K. Takada, Y. Tateyama, A. Yamada, Fire-extinguishing organic electrolytes for safe batteries, *Nature Energy*, **3**, 22 (2018).
- (19) C. X. Zu, H. Li, Thermodynamic analysis on energy densities of batteries, *Energy Environ. Sci.*, **4**, 2614 (2011).
- (20) 金属が樹状に析出する現象。電池内部で発生すると内部短絡などの問題を引き起こす。
- (21) 水素の酸化還元反応の電位を基準とし、反応物の活量が1のときの酸化還元電位。電池電圧の理論値を算出する際などに用いる。
- (22) (独)製品評価技術基盤機構、「急増！ノートパソコン、モバイルバッテリー、スマホの事故～リコール製品や誤った使い方に注意しましょう～」、<https://www.nite.go.jp/jiko/chuikanki/press/2017fy/prs170727.html>
- (23) たとえば、蓄電池のサイクル劣化試験では数100～数1000回の充放電試験を行う。充電と放電にそれぞれ1時間かけるとしても、数1000時間(数ヵ月)程度の時間が必要となる。期間短縮のために、高温状態での加速劣化試験なども行われるが、実際の劣化挙動と異なる場合があるなどの課題もある。
- (24) 茂木春樹, 高山務, 米田雅一, 電池開発現場での活用を目指した二次電池シミュレーション技術開発(1), *みずほ情報総研技報*, **8**, 15 (2016).
- (25) 茂木春樹, 仮屋夏樹, 高山務, 米田雅一, 電池開発現場での活用を目指した二次電池シミュレーション技術開発(2), *みずほ情報総研技報*, **10**, 22 (2019).