

リチウムイオン電池の現状と未来

Current Situation of a Lithium Ion Battery and Future

吉野 彰

Akira YOSHINO

技術研究組合リチウムイオン電池材料評価研究センター (LIBTEC)

理事長 博士 (工学)

President

Lithium Ion Battery Technology and Evaluation Center (LIBTEC)

Ph. D.



リチウムイオン電池は小型・軽量化を実現した二次電池であり、現在のモバイルIT社会の実現に大きな貢献をしてきた。このリチウムイオン電池の仕組み、特徴、構成材料、電池構造、電極構造を解説する。モバイルIT用途分野(小型民生用途)における25年以上の市場実績とともに、電池性能の向上、信頼性の向上、コストダウンの実現がなされてきた。そして現在、車載用(電気自動車用)という次の転換期を迎えている。単に車が電動化されるということだけではなく、リチウムイオン電池がIoT, AI, 5Gといった未来技術と融合した時に起こる大きな社会変革が予想される。この未来の車社会についても述べてみたい。

A lithium ion battery is small and lightweight secondary batterie, and has greatly contributed to the realization of the current mobile IT society. The mechanism, features, constituent materials, battery structure and electrode structure of this lithium ion battery are explained. Along with 25 years of market results in mobile IT applications (small consumer applications), improvements in battery performance, improved reliability, and cost reduction have been realized. And now we are facing the next turning point of automotive (for electric vehicles). Not only that cars will be motorized, but also significant social change that will occur when lithium ion batteries merge with future technologies such as IoT, AI, 5G. I would like to talk about this future car society.

はじめに

リチウムイオン電池は小型・軽量化を実現した二次電池であり、現在のモバイルIT社会の実現に大きな貢献をしてきた。現在ではほぼすべてのモバイルIT機器の電源として世界中で用いられている。このリチウムイオン電池の市場状況、電池の仕組み、特徴、構成材料、電池構造、電極構造を解説する。こうしたモバイルIT用途分野(小型民生用途)における25年以上の市場実績により、電池性能の向上、信頼性の向上、コストダウンの実現がなされてきた。こうした市場実績によりリチウムイオン電池は車載用(電気自動車用)という次の転換期を迎えている。このリチウムイオン電池の現状と未来について述べる。

リチウムイオン電池とは

まずはリチウムイオン電池の特徴、仕組みと構成材料、構造について簡単に紹介したい。

電池の分類

リチウムイオン電池の説明の前に電池の分類について述べたい。現在、世の中で実用化されている電池の大半はTable 1に示すように4種類に分類される。

Table 1 Classification of batteries

	水系電解液	非水系有機電解液 (高エネルギー・ 高容量・高電圧)
一次電池 (再使用不可)	マンガン乾電池 アルカリマンガン乾電池	金属リチウム一次電池
二次電池 (充電再使用可)	鉛蓄電池 ニカド電池 ニッケル水素電池	リチウムイオン電池 (LIB*)

*Lithium Ion Battery

一つ目の分類軸は一次電池と二次電池である。一次電池とは、一度使い切ると再使用できない使い捨ての電池である。二次電池とは一度使い切った後、充電することにより再使用可能な電池である。二つ目の分類軸は電解液である。電解液とはイオンを含んだ溶液のことであり電池を機能させ

るのに必須の材料である。これまでの電池では、この電解液の溶媒として水が用いられてきた。これを水系電解液という。例えば我々が身近に使用している乾電池は水系一次電池である。また、昔から用いられてきている鉛蓄電池、ニカド電池、ニッケル水素電池などは水系二次電池である。水という溶媒は塩を良く溶かし、溶解したイオンが速く動くので電解液として理想的な溶媒であった。しかしながら、この水系電解液には致命的な問題点があった。それは水という化合物は約1.5 V以上の電圧がかかると水素ガスと酸素ガスに電気分解してしまうという点であった。電池を小型・軽量化しようとしたときに電池の起電力(電池の電圧)を高くすることが必須の条件となる。したがって、水系電解液を用いた電池の小型・軽量化には限界があったのである。この点を改良するものとして提案されたのが非水系電解液である。非水系とは水の代わりに有機溶媒を用いた電解液である。この非水系電解液にすることにより約5 Vまでの高電圧に耐えるようになった。この非水系電解液が最初に実用化に至ったのは非水系一次電池であった。金属リチウムを負極に用い、起電力が約3 Vの非水系金属リチウム一次電池が1970年初頭に商品化された。この商品化により一次電池については小型・軽量化が実現した。次に二次電池の小型・軽量化が必要となり、非水系二次電池の研究開発が盛んに行われたが、その商品化は困難を極めた。その困難を乗り越えて1991年に商品化に成功したのがリチウムイオン電池である。このリチウムイオン電池は4 V以上という従来の水系電池の約3倍の起電力を有するものであり、この商品化により待望の二次電池の小型・軽量化が実現した。

リチウムイオン電池の特徴

リチウムイオン電池の最大の特徴は小型・軽量である。小型というのは同じ電気を蓄えるのに必要な体積を小さくでき、体積エネルギー密度(単位はWh/L)が高くなることを意味する。1 Lの体積の電池に蓄えることが可能な電力量(Wh/L)を示す。軽量というのは同じ電気を蓄えるのに必要な重量を小さくできることであり、重量エネルギー密度(単位はWh/kg)が高くなることを意味する。1 kgの重量の電池に蓄えることが可能な電力量(Wh/kg)を示す。リチウムイオン電池の体積エネルギー密度と重量エネルギー密度を他の二次電池と比較するとFigure 1のとおりである。

リチウムイオン電池の体積エネルギー密度も重量エネルギー密度もともに、従来の水系電解液二次電池であるニカド電池、ニッケル水素電池に比べて約3倍となっている。こうしたリチウムイオン電池の小型・軽量という特徴がモバイルIT機器の電源として用いられている最大の理由である。

リチウムイオン電池の仕組みと構成材料

それではリチウムイオン電池とはどのようなものであろう

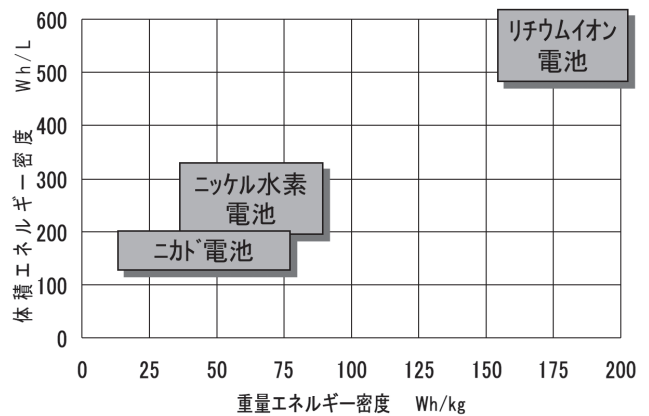


Figure 1 Energy density characteristics of secondary batteries

か。リチウムイオン電池の狭義な定義は“カーボン材料を負極活性物質にし、リチウムイオン含有遷移金属酸化物(LiCoO₂など)を正極とする非水系電解液二次電池”である。電池の基本構成要件は正極材料と負極材料の組合せである。リチウムイオン電池の重要な要素技術の一つとして負極にカーボン材料を用いるという点が挙げられる。これまで乾電池等でもカーボン材料が用いられているが、この場合のカーボン材料は電気導電性を付与する補助的な材料であって、電池反応に直接機能しているものではなかった。リチウムイオン電池の場合には負極カーボン材料そのものが負極材料として機能する初めての電池である。

Figure 2を用いて簡単に説明すると、正極に存在するリチウムイオンが充電により負極カーボン材料の中に入り(層間挿入反応)、逆に放電によりリチウムイオンが負極カーボン材料の外に出ていくこと(層間脱離反応)が電池基本反応となっている。このように化学的反應ではなく、リチウムイオンの挿入・脱離反応が起こるだけなので充電放電を繰り返しても副反応が起こらない。このことは二次電池のサイクル寿命(充電放電を繰り返すことができる回数)を大幅に長くできることにつながる。さらに重要な点は化学反

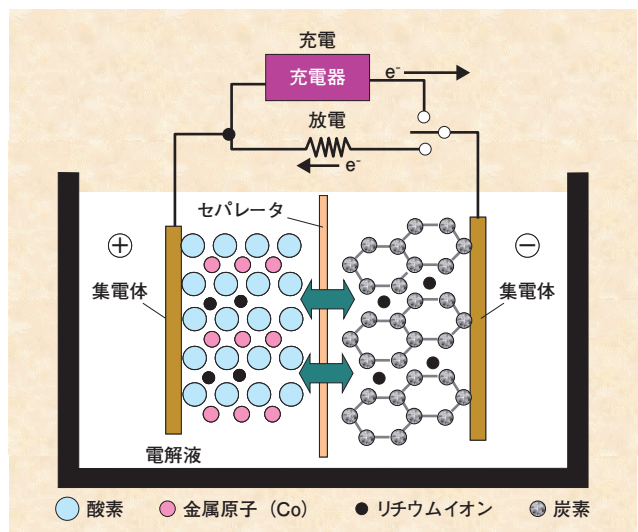


Figure 2 Electrochemical mechanism of lithium ion battery

応性の高い金属リチウムではなく、安定なリチウムイオンのみが機能するので安全性を実用レベルに到達させたことである。もう一つの重要な要素技術は正極材料にリチウムイオン含有遷移金属酸化物(LiCoO₂など)を用いる点である。リチウムイオン含有という要件が重要であり、この正極に含まれているリチウムイオンが充放電中に重要な役割を果たしている。リチウムイオンを含んでいない正極材料とカーボン負極を組み合わせても、当然のことながら電池としては機能しない。また、リチウムイオン含有遷移金属酸化物を正極に用いることで4 V以上の起電力を生み出すことが可能となっている。

リチウムイオン電池の構造

次にリチウムイオン電池の主要構成材料と構造について説明する。Figure 3に示す正極材料、負極材料、セパレータ、電解液の4つがリチウムイオン電池の主要構成材料である。正極材料、負極材料ともに平均粒径1~10 μmの粉末である。

この粉末状の材料を集電体の両面に塗布して電極として用いる。正極の集電体にはアルミ箔が用いられ、一方、負極の集電体には銅箔が用いられる。集電体に金属箔を用いるのはリチウムイオン電池独特の電極構造であり、小型・軽量化の実現に大きな貢献をしている。この正負電極の間にセパレータを挟んで捲回(けんかい)する。セパレータは電気絶縁性とイオン透過性が両立することが必要であり、0.1 μm以下の微細孔を有するポリエチレンフィルムが用いられている。この捲回体を電池缶に挿入した後に電解液を注入してリチウムイオン電池ができあがる。電解液はセパレータの微細孔に含浸され、リチウムイオンがセパレータを透過できるようになる。リチウムイオン電池で用いられる電解液は炭酸エチレン、炭酸プロピレンなどの環状炭酸エステルと炭酸ジエチルや炭酸ジメチルのような鎖状炭酸エステルとの混合溶媒にLiPF₆のようなLi塩を溶解したものである。誘電率の高い環状炭酸エステルはリチウムイオンの解離に重要な役割を果たしている。また、粘度の低い

鎖状炭酸エステルを混合することにより、解離したリチウムイオンの移動速度を速める役割を果たしている。

モバイルIT機器を支えるリチウムイオン電池

小型・軽量性を特徴とするリチウムイオン電池は商品化以降これまで主として小型民生用途(Mobile-IT Market)分野で広く使われてきている。小型民生用の2016年時点での用途別生産数量はFigure 4に示すとおりである。

現在、リチウムイオン電池は小型民生用途で約40億個も生産販売されている。その中で最も多いのはスマートフォンを含む携帯電話である。ここで携帯電話の歴史を簡単に振り返り、その普及にリチウムイオン電池が如何に大きな貢献をしてきたかについて述べる。1985年に登場したショルダーホンと称される通信機器が携帯電話の原点である。その名のとおりに、携帯電話というよりも、元々は据え置き型の自動車電話を肩に掛けて携帯するというもので、重量は約3 kgもあった。その後、1991年に当時のNTTのムーバを皮切りに現在の携帯電話につながる製品が発売されるようになった。これが第一世代携帯電話(1G)と称されている。このとき電源として用いられていたのは主にニッケル水素電池であったが、ごく一部の機種に市販されたばかりのリチウムイオン電池が初めて搭載されている。この第一世代の携帯電話はアナログ方式で、用いられていたIC回路の駆動電圧は5.5 Vであった。したがって、電源は起電力1.2 Vのニッケル水素電池の場合には5本直列で設計され、起電力4.2 Vのリチウムイオン電池では2本直列で設計されていた。その後、数年間はニッケル水素電池とリチウムイオン電池が併用され続けてきたが、携帯電話が第二世代(2G)に移行すると状況が一変した。第二世代では方式がアナログからデジタルに変わるとともにIC回路の駆動電圧が5.5 Vから3 Vに低電圧化された。したがって、電源はニッケル水素電池の場合には3本直列、リチウムイオン電池では1本で設計されることになった。リチウムイオン電池1本で電源設計できるのは極めて大きな利点であり、これを契機に携

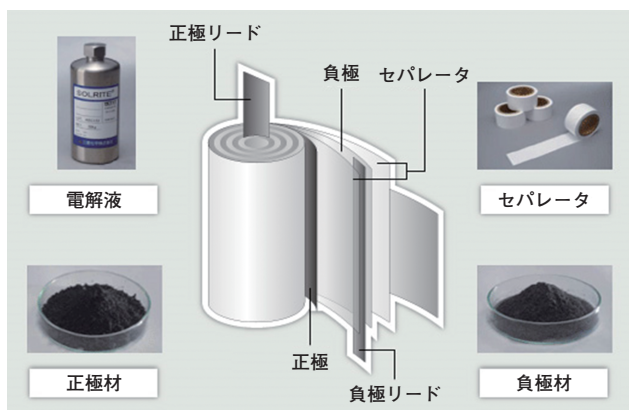


Figure 3 Main components and structure of lithium ion battery

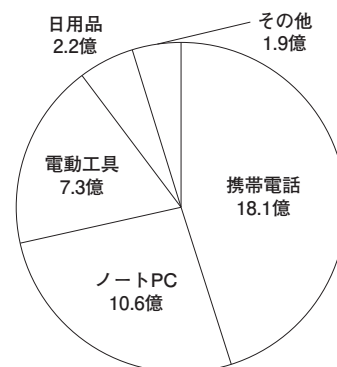


Figure 4 Production volume of small type consumer lithium-ion batteries

携帯電話の電源がすべてリチウムイオン電池に置き換わっていった。こうして携帯電話は小型軽量化が実現し、IT変革のスタートの年となる1995年以降本格的普及していった。さらに第三世代携帯電話(3G)への進化、スマートホンの登場を経て現在に至っている。このように小型軽量を特徴とし、4.2Vという高起電力を有するリチウムイオン電池は携帯電話の普及、さらにはIT社会の実現に大きな貢献をしてきたのは間違いのない。

車を変えていくリチウムイオン電池

車載用リチウムイオン電池の市場の現状分析を行い、未来に向けてどのように動いていくかについて述べたい。

車載用リチウムイオン電池市場の現状

Figure 5はリチウムイオン電池のモバイルIT向けと車載向け(xEV)の市場実績(単位はGWh)の推移を示す。

2010年頃からリチウムイオン電池の車載用途への展開が始まったが、しばらくは本格化しなかった。当初期待されていたほどには普及が進んでこなかったというのが現実である。その理由としてコストの問題、1充電あたりの走行距離の問題があげられ、2014年時点でNissan Leaf, Tesla Model Sなど限定されたメーカー、車種しか市販されていなかった。少し変化が見え始めたのが2015年であり、この年から急激に伸び始めた。その背景として2018年から車に対する厳しい環境規制が課せられることになったという点が挙げられる。中国ではPM2.5などの環境対策として電気自動車の普及を国策的に進めてきたこと、またこれまで消極的であった欧州の自動車メーカーが車の電動化に大きく舵を切ったのが大きな変化である。そして2017年には僅差であるが車載用がモバイルIT用途を逆転した。2018年以降も急激な増大を示しており、2025年には車載用がモバイルIT用途の7-8倍の市場になるであろうと予測されている。

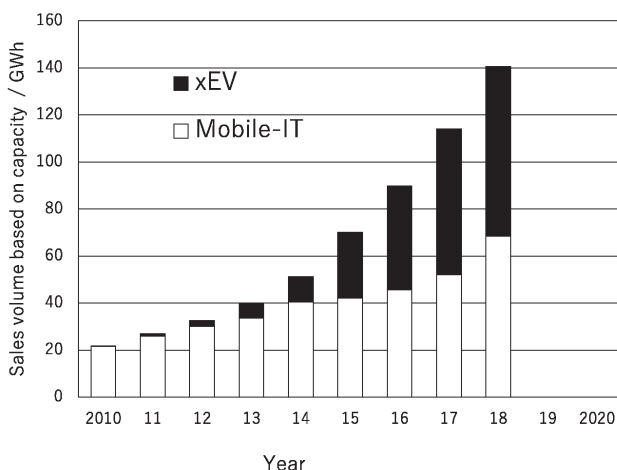


Figure 5 Sales trend of automotive lithium ion batteries

このような状況から将来の車社会を示唆するキーワードを以下に示す。

- ① 中国のEV市場が定着するかどうか
- ② 米国EVメーカーTeslaなどの新興勢力の行方
- ③ Industry4.0とも称される第4次産業革命との融合

AI, IoT, 5Gなどの新技術がEVとの連動であり、特に注視すべきは Tesla Model S 以降の車種では自動運転機能が標準装備されているという点である。現在の法規では完全な無人自動運転は認められていないが、このModel Sで将来の完全自動運転に向けた壮大な実証試験が行われているという見方もできる。キーワードの一つはこの無人自動運転技術である。2025年から2030年に本格的普及を目指して開発が進められている。

未来の車社会に向けた二つのシナリオ

未来に向けて車の技術は大きな進化を遂げていくと予想されている。そうした車の技術進化と融合しながら電動化が進んでいくと見られており、二つのシナリオが描かれている。

前述したようにリチウムイオン電池の技術改良が進み、走行距離の問題、コストの問題が解決され車の電動化が進み、最終的に電動化率が100%になっていくというのがシナリオ1である。近年、上記シナリオ1と異なる別のシナリオ2が囁かれている。車の知能化が進み無人自動運転が実現することにより、車の個人所有が無くなり共有化されていく、これと車の電動化とが融合しAIEV(Artificial Intelligence Electric Vehicle)という概念の車社会が生まれるというのがシナリオ2である。これが実現すると地球環境への貢献と共有化による画期的な費用負担低減が両立するという世界が描かれている。シナリオ2で大事なことは社会的メリットと個人的メリットが両立するという点にある。一般的に地球環境に貢献できる技術、製品は消費者負担、即ちコストアップが伴うというのが宿命であった。しかしながら、シナリオ2では地球環境への貢献と画期的な価格破壊が両立する。さらに過疎化対策、少子高齢化対策、事故の激減、渋滞の激減などの大きな社会的メリットがもたらされる。

将来、この二つのシナリオのいずれが実現していくのかは現時点では判断できないが、車の技術は未来に向けて驚くような進化を遂げていくと考えられる。その中で、更なる電池技術の進化が要求されていくであろう。

おわりに

リチウムイオン電池の現状と未来について述べてきた。ここにきてリチウムイオン電池は次のステージを迎えつつある。リチウムイオン電池は商品化以降、携帯電話やノートPCなどの小型民生用途分野で25年以上の市場実績を積み

重ね、この間にさらなる性能、信頼性の向上、価格低下の実現がなされてきた。この市場実績からリチウムイオン電池の車載用途分野への展開が始まっている。リチウムイオン電池は将来的に車を大きく変えていくであろう。