

第2章

負極材料

1. 負極材料の動向¹⁾

負極材料(負極活物質)は、2018年における世界生産量が約20万トンで、販売金額が約2,300億円と見込まれる(図1)。負極材料には、グラファイト(黒鉛)、ハードカーボン、ソフトカーボン、チタン酸リチウム(Li₄Ti₅O₁₂)、合金系などが流通している。現在の負極材料市場の約9割はグラファイト系材料で構成され、モバイル機器の他、車載や定置用などのほぼ全ての用途で使用されているが、電池用途の多様化に伴い、様々な負極材料が開発されている。負極材料は、電池のエネルギー密度と出力特性、サイクル特性の他、温度特性や安全性などの重要なパラメータに大きな影響を及ぼす。

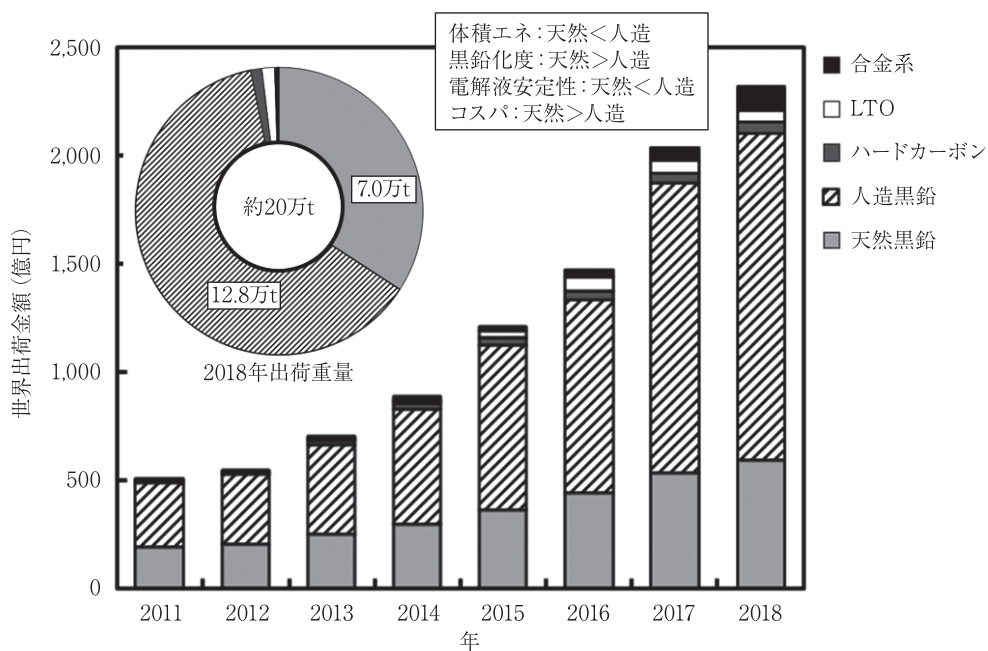


図1 負極材料の市場

2. グラファイト系負極

現行のリチウムイオン電池には、主にグラファイト系負極が用いられている。図2に、グラファイト系負極の充放電曲線を示す。グラファイトは、ファンデルワース力により積層されるグラフェン層間にリチウムイオンが吸蔵または放出されることでステージ構造変化が生じる。

このステージ構造変化が0.1～0.2 V vs. Li/Li⁺の電位領域に多段階の充放電プラトーとして観測される。そのため、0.3 V vs. Li/Li⁺を超える電位で充電(リチウム吸蔵)される電気容量は、電解液の分解に由来する不可逆容量である。大概の有機溶媒がグラファイトの充電電位(0.2 V vs. Li/Li⁺以下)に到達する前に分解される。EC系の電解液も充電時に分解されるが、分解物としてグラファイトの表面を安定化させるSEI(厚さ20～200 nmの被膜)が形成される。これによってグラファイトの活性を低下させ、安定な充放電を可能にしている。

グラファイトに吸蔵されるリチウムの最大量は、炭素原子6個につきリチウム原子1個であり、質量当たりの電気容量は金属リチウムの約10%であるが、体積当たりの電気容量は金属リチウムの約40%になる。実効の可逆容量としては340～360 mAh/gであり、既に理論容量372 mAh/g(855 mAh/cc)に近い値を示している。

グラファイト系材料は、天然黒鉛と人造黒鉛に分類できる。天然黒鉛は、採掘された天然黒鉛鉱石(石墨)を粉砕し、浮遊選鉱後、フッ酸処理を行って黒鉛純度を高めることで製造される。人造黒鉛は、原材料としてピッチやタールなどを混ぜたコークスを2,800～3,600℃で焼成することで製造される。販売価格帯としては、天然黒鉛粉末が500～1,000円/kg、人造黒鉛粉末が1,000～2,000円/kgであり、天然黒鉛の方が安価となる。ただ、天然黒鉛は、歪な粒子が多く含まれ、充電時に電解液が分解されやすいため、電池の不可逆容量が大きくなる。そのため、天然黒鉛の表面に耐分解性に優れた人造黒鉛を被覆造粒して対策がなされている。

グラファイトは、エネルギー密度、サイクル特性、出力特性などのバランスに優れた材料ではあるが、前述したように低温環境や高温環境では、安定した動作がしにくいという欠点があるため、電池の温度管理が重要になる。

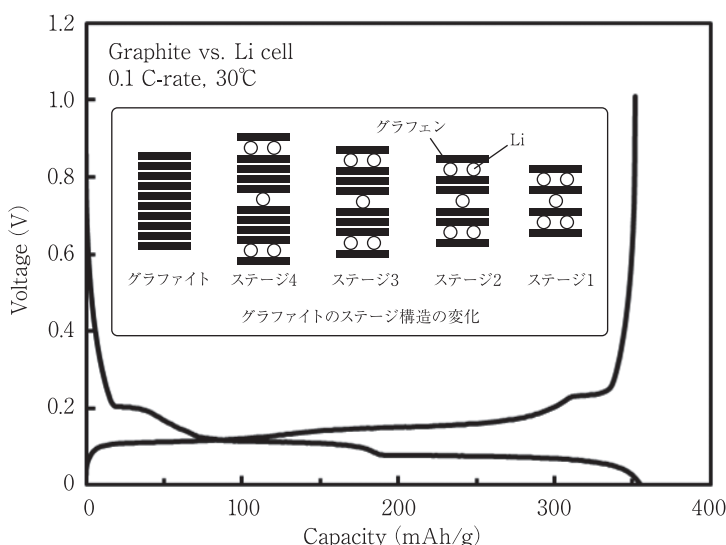


図2 グラファイト系負極の充放電曲線

第4章



電極バインダ

1. 電極スラリーの製造技術の動向

電極バインダは、活物質や導電助剤などを集電体に結着させるために用いられている。従来、負極や正極にはポリフッ化ビニリデン(PVdF)系バインダが用いられてきたが、負極ではスチレンブタジエンゴム(SBR)系バインダが用いられるようになってきた。電極バインダには、溶媒に溶かした液体状のものを用いる「溶液型」と、固形分を溶媒中に分散させて用いる「分散型(エマルジョン・ラテックス型)」に分類することができる。また、バインダに用いる溶媒種によって水系(水性)と有機溶媒系(非水性)に分けることができる。その他、主体となっている元素で、樹脂系(有機系)バインダと無機系バインダに大別することもできる。例えば、PVdF系は溶液型の樹脂系バインダであり、電極スラリー作製時にはN-メチル-2-ピロリドン(NMP)などの有機溶媒が使用される。SBR系は分散型の樹脂系バインダであり、水中に数十～数百 nm のSBR微粒子を分散して用いられている。他方、無機系バインダは炭素を主体としない化合物からなるバインダであり、セメントやリン酸塩、ケイ酸塩などが挙げられる。

1.1 負極用バインダ

グラファイト負極ではSBR系バインダが広く用いられている。しかし、水を吸湿しやすいハードカーボンが含まれる場合では、PVdF系バインダが利用されることもある。SBR系バインダは、数十～数百 nm のSBR微粒子が水に分散された状態で市販されている。このバインダは、スラリーの乾燥工程により、SBR微粒子同士が融着してフィルム化し、PVdF系バインダよりも高い結着性を示す。このフィルムは、電気伝導性とイオン伝導性に乏しく、わずかな使用量の違いで電池の出力特性や寿命特性に大きな影響を及ぼすため、負極では少量のSBR系バインダを用いて作製される。一般的な黒鉛系負極では、全体固形分に対してSBR系バインダが0.5～3 wt.%となるように調整されたスラリーを塗工して作製される。ただ、SBR系バインダにはスラリーの増粘機能がないため、カルボキシメチルセルロース(CMC-Na)などの増粘剤を併用して作製される。負極用バインダは、2017年における世界生産量が約3,000トンで、販売金額が約80億円と見込まれる。

リチウムイオン電池の高エネルギー密度化を図るため、負極材料としてシリコン系やスズ系などが注目されている。しかし、従来のPVdF系やSBR系では充放電に伴う大きな体積変化で安定したサイクル特性が得られにくい。そこで、高結着性のアクリル系やポリイミド(PI)系、無機系などのバインダが検討されている¹⁻³⁾。図1に、負極用バインダの開発マップを示す。

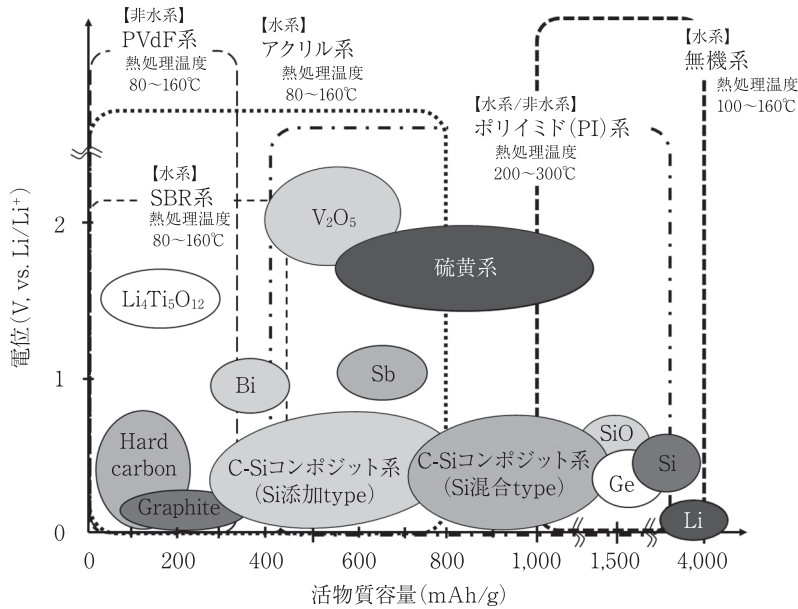


図1 負極用バインダの開発マップ

アクリル系バインダには、溶液型や分散型がある。溶液型ではバインダに増粘性があるため、スラリーの粘度調整が難しくなるが、増粘剤との併用をしなくても電極化が可能になる。分散型では、従来のSBRと同様に増粘剤の種類や添加量でスラリーの粘度調整ができる。アクリル系バインダは、従来のPVdF系やSBR系バインダと比べて、優れた結着性を示すことから、シリコン系材料とカーボン系材料とを混合・複合化した負極やSiO₂負極への適用に検討されている。電極化に必要なバインダ量は、シリコン系材料の種類や含有量、電極容量密度などの条件によって大きく異なるが、スラリーの固形分に対して2~20 wt.%となるように調整される。

PI系バインダは、ほとんど全ての溶媒に溶けないため、ポリアミック酸(ポリアミド酸)などのPI前駆体として溶媒に溶解または分散させて用いられている。したがって、電極スラリーの作製には、PI前駆体を用い、200°C以上で加熱処理することでイミド化(脱水環化)反応を進めてPIを得ている。このイミド化反応後に、さらに高い温度で熱処理することでバインダに架橋反応を起こし、機械的強度の高いPIが得られる。ただ、200°Cを超える加熱処理は、電極製造のコスト上昇の要因となるため、低温の熱処理でも強度の高いPIが得られるバインダの開発が進んでいる。また、NMPを溶媒としたPI系バインダだけでなく、水を溶媒としたPI系バインダの開発も積極的に進められている。PI系バインダを用いた電極は、高い結着性を示し、体積変化の大きい活物質を用いても、安定したサイクル特性を得ることができる。

第5章



電極スラリーの製造技術

1. 電極スラリーの製造技術の動向

リチウムイオン電池の正極または負極は、スラリーの混合方法や均質性によって電極特性が大きく変わる。現行の電極スラリーの混合方法では、バッチ(回分)式の多軸プラネタリーミキサーが広く用いられている(図1)¹⁾。プラネタリーミキサーとは、2つ以上の門字(杵型)のブレードが自転と公転することによる遊星運動をして攪拌する装置である。この運動により、均一な攪拌軌跡を描いて、ブレード同士とブレードとタンク内壁間でシアを発生させて捏和混練により混合が行われる。電池やキャパシタの電極スラリー以外の用途では、磁気テープの磁性体、ディスプレイの液晶、接着剤などの混合に利用されてきた。電極スラリーは、固形比を高めたスラリーを固練りした後、適正粘度となるまで溶媒を徐々に加えて混練することで作製される。電池の量産工場においては、電池メーカーや電極材料などによって混練条件が異なるが、①電池材料(粉体)を全量投入し、②バインダ所定量のおよそ半分または増粘剤を投入して固練りを行い(一次固練り)、③バインダ全量を投入して固練りを行い(二次固練り)、④溶媒を徐々に加えて希釈混合し、⑤脱泡することによって電極スラリーが製造されている。固形比を高めたスラリーは、高粘度で、混練時に高い剪断力を付与することができる。スラリーをあらかじめ固練りすることにより、粉体の凝集をなくし、スラリーの分散性を高めることができる。ただ、高粘度スラリーではブレードの回転によるスラリーの供回り(スラリーの転がり移動)が起りやすく、これを防ぐためにひねり羽根構造や多角断面構造に改良したミキサーブレードを用いるのが一般的である。

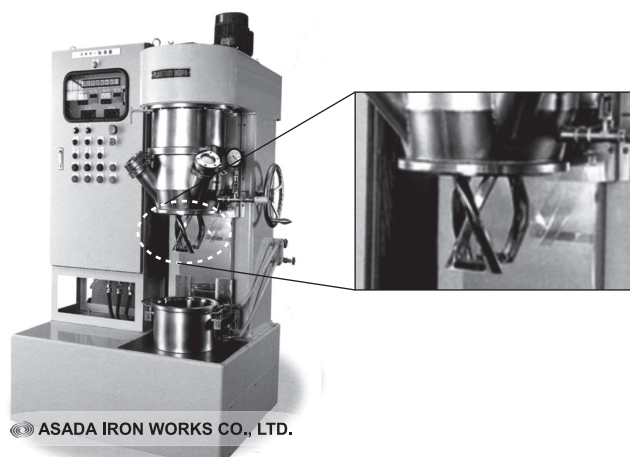


図1 プラネタリーミキサーの外観(浅田鉄工(株)製)

式1に示したように、高い剪断力をスラリーに与える場合は、相対速度(周速)やスラリー粘度を上げるか、平板の間隔(シエア部のクリアランス)を狭くすることで達成することができる。

$$T = F/S = \mu \times (U/h) \quad (\text{式1})$$

T：剪断力(Pa)

F：液系と板の間に発生する力(N)

S：平板面積(m²)

μ ：粘度(Pa·s)

U：相対速度(m/s)

h：平板の間隔(m)

リチウムイオン電池が商品化された当初では、プラネタリーミキサーのタンク容量が50～200 Lの製造装置が多く販売されたが、電池生産量の増加に伴って、最近ではタンク容量1,000～2,500 Lへと拡大してきた。しかし、製造されるスラリーの実量としては、タンクに粉体を投入するため、タンク容量の5～6割程度になるのが現状である。今後の電池生産量の増加を見込んで、さらに大きなタンク容量の混合装置が要求されるが、機械重量の増加や大掛かりなモーターが必要になる。例えば、タンク容量2,000 Lの装置で、機械重量が約30トン、総動力60～200 kWのモーターが必要になる。バッチ式ミキサーの設置数を増やすことにより生産量について対策することも可能であるが、広い敷地面積の工場を確保しなければならない課題がある。

近年、電池の出力特性や高温耐久性などを改善すべく、活物質としてナノ粒子化した活物質の造粒や表面コートした複合体などが用いられている。また、電極バインダは高性能化や低コスト化、環境負荷低減などの観点から、各種の水系バインダが検討されている。ただ、代表的な導電助剤であるカーボンブラックは疎水性であるため、水に対する濡れ性が悪い。スラリーに大きな剪断力を与えることで、分散性を改善することができるが、電極材料が破壊されやすく、スラリー粘度の著しい変化や結着強度の低下、電極特性の低下などが起こる課題がある。

このような背景から、様々な分散装置メーカーから連続(ノンストップ)式混合装置と水系スラリーに適した新しい分散装置が開発されている²⁻⁴⁶⁻²²⁾。従来のバッチ式混練方法では、スラリーの固練り、混合、脱泡などの一連の工程を1つのタンク内で処理していたため、スラリーの生産量がタンク容量に依存するところが大きい。

連続式混練方法では、並行して連続的に処理するため、生産量の変動や品種変更に対応しやすくなり、加えて大量製造時のバラツキやランニングコスト、電力消費量の低減が図られる。各社の分散装置によっても異なるが、主として周速と送液速度などを変えて、電極材料にダメージを与えずに、均一に混合したスラリーを得ることを目的としている。

第1章



車載用リチウムイオン電池の業界動向と
日系電池・部材メーカーの今後の戦略

3. トップブランド参入で超激戦を迎えるEV市場

3.1 自動車業界に迫る環境規制

表3は2018年、およびそれ以降に発効する各種の環境規制を示す。この中で、ZEV規制、そして2019年に発効した中国新エネルギー車(NEV)規制で、HEVはクレジットの対象外とされている。これは取りも直さず、HEVではトヨタ自動車社とホンダ社が2トップとして市場を席卷していることから、HEVをクレジット対象としても恩恵を受けられない自動車各社が大半であることが、規制枠設定で影響したと考えるべきである。

表3 自動車業界を取り巻く環境規制

環境規制	規制内容	合理性
米国ZEV規制強化	2018年クレジット換算4.5% (ZEV2%Min./TZEV2.5%Max.) ⇒段階的に数値拡大, HEVはクレジット対象外 2025年クレジット換算22% (ZEV16%Min./TZEV6%Max.) 対象企業: GM, Ford, FCA, トヨタ, ホンダ, 日産, Daimler, BMW, VW, Hyundai/Kia (2018年から追加)	○～△
欧州CO ₂ 規制	2021年導入, 以降もさらなる強化 (世界で最も厳しい) 2021年95 g/km⇒2025年70～80 g/km⇒2030年<60 g/km	◎ 手段は自由
中国NEV規制	2019年導入: ⇒EV/PHEV/FCVが対象, HEVはクレジット対象外 ⇒3万台以上/年のメーカーを対象に, 2019年10%, 2020年12%の エコカー販売を強制 ・エコカー補助金制度は2020年までで終了予定 ・7月に中国政府はHEV優遇へ大きく転換	× EV偏重 ↓ ○ ↓

中国でのCO₂低減効果はHEV>PHEV, EVはPM2.5を拡散

そのような意味から、ZEV規制もNEV規制も合理性に欠けると感じられ、特にNEV規制では内燃機関を含まないEVに著しく偏重していることに疑問を感じる。中国の発電システムを低効率な石炭発電に委ねている現状では、CO₂およびPM2.5の削減は、全くといって良いほど期待できない状態である。しかし、2019年7月には中国政府がNEV規制の κατηγοリーを良い方向に見直した。これに関しては後述する。

一方、欧州が進めるCO₂規制は2021年から適用されるが、これは地球温暖化を抑止する政策としての合意事項である。そしてその規制を満たす自動車的手段は問わず、自動車各社の都合で設定できるものであり、合理性が高いといえよう。

そのSK イノベーション社はLIBへの大投資に加えて、2018年10月7日、中国江蘇省常州にLIB用従来セパレータとセラミックコーティングセパレータの生産工場を新設すると発表した。SK イノベーション社によると、今回の常州工場建設は素材事業では初の海外進出とのことである。目的は、中国市場でのEV用LIBの需要を見込んだもので、投資総額は約400億円、2020年第3四半期の量産化を目指すとのことである。

いずれにしてもこのような投資戦略は、中国市場における中国政府の政策とリンクするもので、常に政策と良循環で同期する戦略が求められている。中国の電池産業界の育成も、エコカーと同様に、外資の力が必要なのは明白である。だからこそ外資排除ではなく、外資との共存を描いた中国側の戦略が進行しつつある。

5. EVが減速する中国，加速する欧州

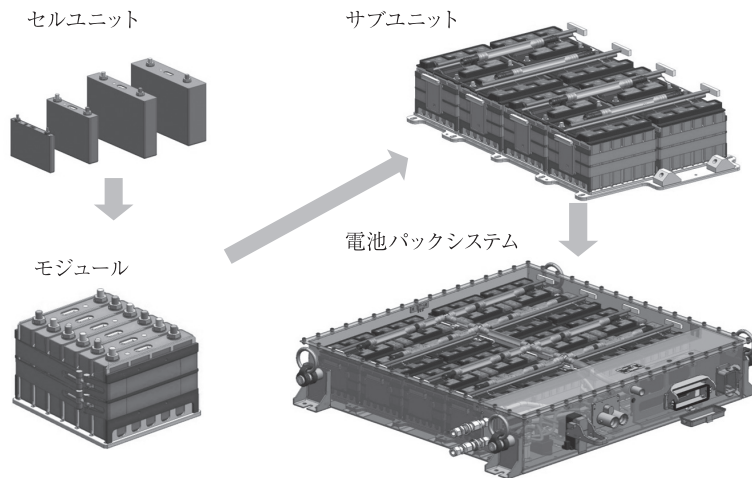
5.1 VW社の抜きんでた電動化投資

2018年11月18日の日本経済新聞は、VW社がEV企業へ変身する準備に入ったことを報じた。それによると、同社は2023年までの5年間で、電動化の分野に約3兆8,500億円を投資するという。2025年には欧州生産分の17～20%をEVにするという積極的なEV路線をとる。電動化に加えて、自動運転とデジタル化の3分野に約5兆6,000億円を投資するとのことであり、電動化だけの投資は全体の約70%を占めることになる。これまでの投資計画から比較すると30%の投資増に相当する。

この投資とは別に、中国での電動化対応として5,000億円強の投資を行い、2020年までに30車種のEVとPHEVを市場に供給する計画とのことである。同社は既に、2018年10月から上海市でEV生産工場建設に着手している。電動化投資では、先行する各社に対して断トツの投資額を示しているが、2015年に発生させたディーゼル排ガス不正問題の払拭につなげるべく、かなり積極的に取り組んでいる様子が窺える。

この一連の計画に伴い、電池生産についても触れている。ジャーマン3(VW社、ダイムラー社、BMW社)は、近年、セルユニットの集合体であるモジュール(図5)以降の開発を自社内で推進する体制を整えてきた。

今回のVW社での計画では、SK イノベーション社と合併でセルを生産する可能性があるという。SK イノベーション社自体は元々、200億円の投資で韓国瑞山工場のLIBの生産キャパを2018年内に3.9 GWhまで拡大する計画を持ち、ハンガリーには850億円規模の投資で7.5 GWhの生産キャパを構築し、2020年に稼働することを目標としている。さらには、中国での生産拠点を構える方針である。今回のVW社との合併はどこで実現させるのかは定かではないが、



欧米自動車各社は従来のTier 1依存から、自社開発型へ転換：3~4年前から
 ⇒Tier 1からのバッテリーパックシステム調達方式から、モジュール以降を自社開発に
 ⇒セルメーカーからモジュール調達：モジュール以降に大きな付加価値、コストダウン

図5 車載用電池のセルからパックまで

今後のサプライチェーンに大きな影響を及ぼすものと考えられる。

VW社が2019年から量産を開始したEV「I.D.」シリーズは、一充電走行距離が550 kmにまで達する。EV専用プラットフォーム「MEB」を適用することで、価格もディーゼル車と同等レベルにした。EVの量産は、独東部のツウィッカ工場、北部エムデン工場、そしてハノーバー工場の3拠点で、年間100万台規模の生産を計画推進中とのことである。

5.2 日系各社に迫るEV戦略

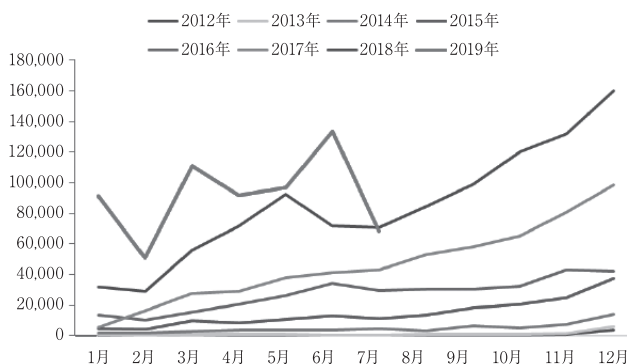
日系自動車各社でのEV戦略も動き出している。スペイン政府は、2040年までにガソリン車、ディーゼル車、さらにはHEVまでも販売を禁止する方針を示した。純然たる内燃機関自動車の制限は理解できなくもないが、電動化で燃費向上を実現しているHEVまで制限するのは現実的ではない。ディーゼル車規制の代替として位置づけられるHEVの価値に理解を示していないといえる。

消費者目線で考えれば、PHEVと違って家庭内に充電器を設置しなくても良いHEVは、燃費特性でも内燃機関自動車を上回ることで価値が高い。その価値を否定する考えは、欧州自動車各社がHEVではなくPHEVやEVを積極的に推進していることで、仮にHEVを市場から締め出しても欧州勢にとっては痛くもない。むしろ、HEVを制限することは、HEVで強いビジネスを進めているトヨタ自動車社とホンダ社の2トップに対する牽制そのもので、欧州自動車業界の保護政策とも見える。

第2章



中国のバッテリー関連企業の動向



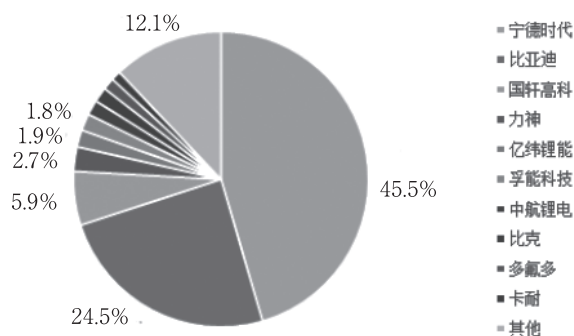
資料来源：乘联会、华金证券研究所

Source：华金证券

図2 2012～2019年NEV月別販売台数²⁾
(カラーの図は巻頭ページに掲載)

2. 中国バッテリーメーカーの動向

2019年上半期(1～6月)の動力電池のシェアを図3に示す。CATL(寧徳時代新能源科技)社が13.6 GWhでシェア45.5%，BYD(比亞迪股份有限公司)社が7.4G Whでシェア24.5%となっており、この2社だけで70%のシェアを占めている形となっている。部材メーカーの視点で考えると、今後のNEV市況も見据えとこの2社へのアプローチが集中することは避けられず、あれだけ盛り上がっていた中国EVが車載バッテリーメーカーとして見た場合、CATL社とBYD社しか残らないという悪い冗談のような話が、この図のみを見ると現実味を帯びてくる。



Source：太平洋証券

資料来源：高工锂电，太平洋研究院整理

図3 2019上半期 動力電池シェア³⁾
(カラーの図は巻頭ページに掲載)

中国のLIBメーカーとしてはもはやCATL社抜きでは語れない状況になっているのは周知の事実である。中国国内では地場OEMとの提携でプレゼンスを高め、海外においても戦略的な業務提携で販売先や供給体制を整えた。CATL社は車載バッテリーの研究・開発・生産から、資材の調達、車載バッテリーの国内外問わない提供に至る、一連の車載バッテリーサプライチェーンを急速に構築している。

グローバルなNEV市場として見た場合、主要なOEMとの関係構築はもちろんのこと、各々のアライアンス戦略や安定供給のためのエコシステムの構築が重要となる。その意味においては、CATL社は中国OEMだけでなく、ダイムラー社、VW社、BMW社、トヨタ社、ホンダ社および日産社のようなグローバルOEMとの関係構築に成功し、車載バッテリー市場の牽引役となっている。補助金カットが間違いなく今後の業績にインパクトを与えるが、NEV産業のエコシステム創造主として、CATL社はグローバルにおいて成長する可能性を多大に持っているだろう。

また、CATL社の陰に隠れがちだがBYD社もLFP(リン酸鉄リチウム)正極と三元系正極を並行する戦略を取り、LFPについては大型バスでの採用をメインに着実に進めている。同社は江蘇省常州市にEVの新工場を建設すると報じられている。総投資額は100億元(約1,700億円)で、将来は年間40万台の生産体制を整える予定である。乗用車として4カ所目となるEV工場を立ち上げる形となり、その攻勢は外資勢や地場の新興メーカーなどに先行しており、グローバルOEMとの戦略的協業も見ても決してCATL社に負けていない。BYD社の2019年1~6月期決算は、売上高が前年同期比15%増の621億元(約9,400億円)だったと報じられている。約半分を占める自動車関連事業でEVの販売が好調だった。ただ足元は中国政府の補助金減額の影響で失速しており、BYD社に限った話ではないと思われるが、2019年通期の業績として見るとスローダウンすると予想されている。

3. 中国EV部材メーカートレンド

中国の調査会社ResearchInChina社によると、中国国内の三元系正極材料の出荷量と市場規模は、2017年に約8万6,000トン(前年比58.6%増)および172億3,500万人民元(111.83%)に達したとされる。この市場の急成長の背景には、NEVの生産台数の増加や、政府の積極的支援などが挙げられる。このトレンドは2019年も継続しており、正極材についていうと、乗用車においては相変わらず三元系材料が主流となっている。ニッケルを多く含有させて航続距離を延ばすという、安全性のリスクはあるものの、エネルギー密度を高める方法として好んで採用されるアプローチであり、政府も奨励しているという実情もある。

4. 中国のバッテリーリサイクルトレンド

EVの普及にはいくつかの課題があるが、最も重要な課題の1つとして、バッテリーのリサイクルが挙げられ、後回しにされがちだが、これがEV普及の鍵といてもいい。バッテリーには寿命/ライフがあり、いくらEVが排気ガスを出さず環境に優しいといっても、バッテリーの廃棄物が無尽蔵に出てくるのでは本末転倒だろう。Nikkei Asian Reviewでも取り上げられていたが、イギリスのコンサルティング会社であるCircular Energy Storage社によるとリチウムイオン電池のリサイクルにおいて中国が最も大きな市場になることが想定されている(図7)。中国政府は、2020年に200万台、2025年に700万台のNEVの販売を目標としているが、これは中国の自動車販売全体の約5分の1に相当しており、これだけリサイクルしなければならないバッテリーが増えていくことを意味している。中国自動車技術研究センターによると、中国の使用済みバッテリーの量は、2018年から2020年に合計で120,000トンから200,000トンになり、地元メディアによるとこの数字は2025年に350,000トンに増加するとされている。

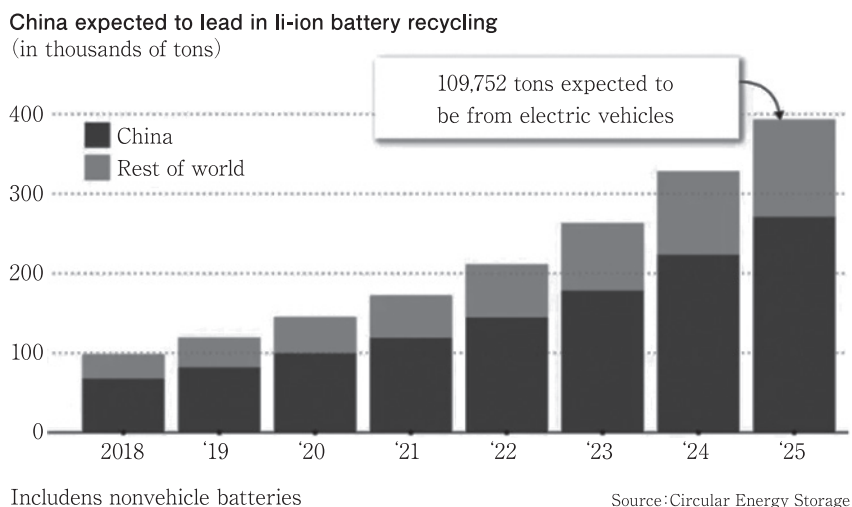


図7 リチウムイオン電池リサイクルボリューム⁷⁾

中国のバッテリーリサイクルに対する取り組みは遅いといわれるが、EV普及のための補助政策が目立つのであって、リサイクル管理に対する取り組みが行われていないわけではない。工業和信息化部は「新エネルギー自動車用動力蓄電池のリサイクル管理に関する暫定弁法」を公告している。「暫定弁法」では、全国統一の「トレーサビリティプラットフォーム」を構築し、動力蓄電池の生産、販売、使用、廃棄、回収、リサイクルの全過程の情報を収集・管理する。各プロセスで回収・