未来の人工物を支える全樹脂電池

堀 江 英 明*

1. はじめに

[新デザイン思想の必要性和方向性]

電池の誕生以来続いてきた設計・製造の概念を変える、新たな電池デザイン思想の構築を目指し、研究を進めてきた。具体的には、バルク（塊）の金属電極を基盤に、電池構成材料を載せ組み立ててゆく従来の電池とは異なり、電極を含む全ての構造体を樹脂材料で構成する電池デザインである。開発の礎となる構想を“LSiP” (Large Scale integrated Polymer) と名付けた。樹脂構成を主軸に据えることで、これまでの電池の設計思想では包含し得ない、幾つかの重要な特性を獲得できるようになると期待される。例えば電池の構造体が物理的に柔軟になることで、電池を搭載する人工物のデザインの自由度が飛躍的に増し、可撓性や形状や、例えば遙かに大きなセルの実現も可能となる。金属集電箔を基にした既存の電池技術では、大幅な大型化や任意形状の造形は、エンジニアリングの観点から現実的とは言えなかった。金属集電箔と電極材料を積層した構造の場合、外力の印加や充放電に伴って生じる内部応力・歪みは大きくなり、構造力学的にみて成立性は困難となるためである。また、しばしば発火/爆発事故の主因では無いかと推定されてきた、製造時における金属片混入のリスクは、本技術においては大幅に減ることが期待される。そして更に、仮に外部から金属片が電池内部に入り込んでも、内部に（大電流を流し得る）バルクの金属部材が存在しないことから、内部短絡等の異常時を想定しても、短絡電流として大電流が流れることは無い。短絡時の発熱は、短絡電流に伴うジュール発熱が主な原因であるが、電流値が抑えられることから、発熱を原理的に大幅に抑制することができ、異常時の信頼性が格段に高まると期待される。このように、信頼性構築に全く新たな手段を提供し得ると期待される。

また、電池構造が大幅にシンプルになることから、生産プロセスも大幅に簡素化でき、製造ラインはコンパクトになると期待される。将来的には、よりフレキシビリティを有し、かつ大変スループットの高い生産方式を構築できると

考えている。この通り、これまでの電池の概念を変革することで、大型化のみならず、従来では想像し得なかった幅広い様々な用途に向けての途（みち）が拓けると期待される。

2. 現行の Li イオン電池生産プロセスと潜在的課題

2.1 生産性の課題

現行のリチウムイオン電池の生産技術は 1990 年代初頭に極めて短期間に確立された。これは現在も続く世界のリチウムイオン電池の基本的かつほぼ唯一の製造プロセスであり、この成功無くして現在のリチウムイオン電池の興隆は無いと言えるであろう。一方、今後更なる生産性向上や用途拡大を期待するなら、改善すべき潜在的課題を内包しているとも考えられる。図 1 は、電極塗布工程の概略を示したものである。電極層を構成する活物質と導電助剤、及びバインダーを溶媒と混練したインクを金属集電箔に塗布し、ヒーターで溶媒を乾燥させ、一気にバインダーを析出・固化することでハードタイプの電極層を形成する。しかしながら、インキ調整と乾燥工程という化学工学的プロセスは、極めて微妙で適正にコントロールするための許容幅は大変狭い。電極塗布層には厚みの制限（～約 120 μm ）が実質的にはあり、また塗工速度も制限され、これが生産性を大きく律していると考えられる。

更に図 2 には、電極形成後、セルになるまでの電極積層、電池組み立て等のプロセスのあらましを示す。電極を切断、積層し、電池として組み立てた後、電解液を充填し、充電によるエージング処理を行う。このように機械工程が続いた後、電気化学的なプロセスを経て電池となるが、様々な複雑な工程が集積された製造プロセスを経て、現行のリチウムイオン電池は生産されていることが分かる。また、こ

図1 現行の Li イオン電池の生産工程（電極塗工）¹⁾

All Polymer Battery for Future Ubiquitous Artifacts

* Horie, Hideaki

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

藤沢市遠藤 5322 (〒252-0882)

2019. 8. 5 受理

図2 現行のLiイオン電池の生産工程
(電極加工・積層, セル化)

図3 集電体を介した短絡電流とジュール発熱

の電極切断やプレス等の機械的プロセスは、導電性材料からなる硬度の高い微粉や金属のバリを発生させてしまい、工場生産性の低下に大きく係わることもなっている。

2.2 異常時における信頼性の課題

冒頭で触れた通り、電池内部で何等かの異物（例えば、金属片）等で短絡が発生した場合、短絡を引き起こした金属異物のみで無く、電流経路である金属集電箔にも大電流が流れ、大きなジュール発熱が生じる。図3には、模式的にこれを示した。この急激な発熱に伴い、様々な化学反応モードが電池内部で惹起される。ところで、これら各々の反応は大変高い温度下で進行するものであり、もしこの最初のジュール発熱による急速昇温モードをくい止めることができるなら、引き続き異常化学反応モードを根本的に抑制することができると期待される。しかし、金属集電箔等のバルク状の導電部材が、電池内部に存在する限りにおいては、根本的には短絡時での、このような高温状態の発生を排除することはできないとも考えられる。換言すれば、電池内部に大電流を流し得る部材が何ら存在しない、つまり体積抵抗率の高い部材のみしか存在しないなら、内部短絡等を起こしても、異常（高温）モードを抑えられると考えられる。電流とはループであって、混入金属部材の抵抗値が小さく電流を流し得るとしても、電流を集めるべき周りの電池構造体の抵抗値が高いため、大電流のループを構成し得ないからである。もし、抵抗値を上げた樹脂製の集電体を、この金属集電箔に置き換えることができるなら、このような課題を根本から絶つことができると期待される。

3. 新しい電池デザイン思想：全樹脂電池の構築

3.1 デザインの方向性

以上説明した通り、従来の電池構造を維持したまま、電池の高性能化、あるいは生産性の大幅向上を目指すのは、特に中・大型セルを想定した場合には、複雑な生産工程であり、またエネルギー量も増し、より困難になると推定される。

図4 高性能電池のデザイン要素

高性能電池を志向する場合、システム構築に向けて、2つの観点から工学的デザインへのアプローチが必要となる。一つ目は反応の側面である（図4参照）。電池反応が要求性能通りに行われるためには、正負極材料は必要十分な容量を有することは勿論として、電荷輸送の観点から適切に電子伝導経路とイオン伝導経路を配置し、副反応なく可逆的に化学反応が行われる必要がある。

二つ目の観点として、電池とは高度に機能層を集積・構造化したシステムそのものであることから、材料・構造的な視点からの工学的設計も必須になる。通常の工業製品では、動作中に材料組成そのものが変化することは殆ど無いと言えるが、電池においては、充電と放電で、正極と負極は全く異なる物質に変化するため、体積も密度も物性も変化する。固体の体積が変われば、大きな内部応力が伴うが、このように電池においては充放電する度に、大変大きな力が内部に印加されサイクリックな応力実験を行っているとも喩えられる。

このような認識に基づき、高性能電池の設計として、内部応力を緩和すべく、樹脂材料を基本骨格として据える。同時に、集電体も樹脂材料とすることで、金属に比して応力を大幅に下げることが可能になる。また、集電体の電子伝導性を自由にコントロールできるようになる。やや大袈裟かもしれないが、電池の歴史始まって以来、当然とされてきたバルクの金属集電体を廃止し、代わりに樹脂材料を基本骨格とし、パイポラ構造とすることで、全く新しい電池デザイン思想を構築することができる。こうすることで、電池構造、信頼性デザイン、電池生産プロセスを根底から変革し得ると期待されている。以下では、3つの観点から、この全樹脂電池に関しその特色を述べたい。

3.2 樹脂構造・機能化

図5は、活物質の周りを模式的に示したものである。機能性樹脂により様々な特性を付与したインターフェース層が構成されている。この層には電子伝導性とイオン伝導性が共に付与されている。

図6は、この多機能を有する樹脂インターフェースを表面に設置した活物質粒子を、樹脂集電体に積み重ねたものである。各活物質粒子同士は、樹脂インターフェースを介して接触するが、この電子伝導性を有する機能性樹脂層が連結することで3次元ネットワークを構成し、電子を樹脂集電体に導くことになる。また、樹脂でできているため、

図5 活物質の周りに配置された機能性樹脂層

図6 3次元樹脂ネットワークとその機能

図7 従来の電池構造とバイポーラ構造の比較

高い弾性構造等、様々な特性を付与できる。

3.3 樹脂骨格をベースとしたバイポーラ構造

電池の出力性能を確保するには、電池トータルとしては、抵抗値は十分に小さい必要がある。集電体に対して体積抵抗値の大きい樹脂材料を採用した場合、電池の出力特性の低下が懸念されるかもしれない。この想定される課題は、バイポーラ構造を採用することで解決できる。図7には、今までの電池とバイポーラ構造の電池の違いを模式図で示した。従来の電池では、電流は電極に垂直な方向（つまり電極に沿った方向）に流れることになる。これに対してバイポーラ電池では、電解質中のイオンの流れと同様に、電流は電極に垂直に流れることになる。

バイポーラ構造における抵抗の考え方を以下に示す。図8の抵抗 R の公式の ρ は体積抵抗率、 L は導体の長さ、 A は導体の断面積である。

図9では、同じサイズの集電体（ここでは寸法として、長さ $1[\text{m}] \times 1[\text{m}] \times 1 \cdot 10^{-5} [\text{m} (\text{i.e. } 10 \mu\text{m})]$ ）の、(1)従来の電池システム、(2)バイポーラシステムに関して、その抵抗を公式に従って求めてみたものである。

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

図8 抵抗の公式

- (1) 集電体に平行に電流が流れる場合（従来の電池構造） (2) 集電体に垂直に電流が流れる場合（バイポーラ電池構造）

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{1}{1 \times 10^{-5}} = \rho \times 10^5$$

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{10^{-5}}{1 \times 1} = \rho \times 10^{-5}$$

図9 集電体の抵抗値の比較

図10 各種樹脂製造技術の活用

図中で示す通り、集電体部分の抵抗値は、従来の電池の場合 $\rho \times 10^5$ であり、バイポーラ構造の場合には $\rho \times 10^{-5}$ となっており、その抵抗値の差は 10^{10} 倍にも及んでいる。もし同じ材質（つまり同じ ρ の値）であるならば、バイポーラ構造の方が遙かに抵抗値は小さい。これはある意味当然でもあって、バイポーラ構造の場合、全く同じ集電体を用いていても、従来電池とは電流方向が90度異なり、電流の通り路（図9で L ）は、 $10 [\mu\text{m}]$ と大変短く、かつ電流の経路における断面積（図9で A ）は $1 [\text{m}^2]$ と大変大きい。なお、図9では電流を矢印で表現し、矢印の大小で電流値の大きさを模式的に示したが、バイポーラ構造では電流密度は均一となるのに対し、従来型の電池では電流密度は場所によって大きな差がでる。

いずれにしても、バイポーラ構造の採用により、原理的に大きく抵抗を下げられることが分かったが、これは換言すれば、バイポーラ構造を採用するならば、体積抵抗 ρ が 10^{10} 倍程度大きい材質の集電体を採用しても、電池トータルの抵抗値としては変わらないことを示す。

異常時の信頼性のところで触れたように、電池内部から大電流を流す経路を完全に排除し、にもかかわらず、性能的に凌駕する事が可能となる。このように樹脂材料とバイポーラ構造を融合することで、初めて高いエネルギー密度を確保しつつ、同時に異常時に対する信頼性も満たせる。

図 11 生産プロセスの比較

未来の高性能電池を考えた時、この概念は基本的な設計思想になると思われる。

3.4 新生産システムの構築

構造的に樹脂で骨格を構成することから、既存の樹脂系の各種製造プロセスは、全樹脂電池製造に向けた基盤技術として活用される事が期待される (図 10 参照)。

このように全樹脂電池は最も簡単な構造であり、これは生産プロセスの観点からも、大きな優位性をもたらす。

図 11 に、従来の Li イオン電池の生産プロセスと、全樹脂電池の生産プロセスの比較を示す。従来の Li イオン電池の製造のプロセスでは、材料調整、化学的过程による電極塗工プロセス、機械工学的プロセスによるセル化、その後電気化学的过程と続き、各々のプロセスも多数の工程からなっている。一方、全樹脂電池においては、一段目の材料調整過程で電気・化学工学的プロセスが完全に終了し、第二段目の機械工学的プロセスでセルの構造化が完了することになる。化学的过程と機械的过程が完全に分離され、製造プロセス的に、大変に簡素化されることになる。

4. ま と め

電池は、正極、負極のエネルギーを貯める 2 つの部分と、この両者を繋ぐイオンは通すが電子は通さない電解質 (セパレータ) と同じく両者を繋ぎ電子は通すがイオンは通さない集電体部分の計 4 つの基本的要素から成る。全樹脂電池は、余分な部分は削ぎ落した、ほぼこの 4 部分のみからなる電池と言え、構造をみても構成パーツ数をみても、これ以上簡素化できない、最もシンプルなセル構築を実現できると期待される。特に、組電池構築の観点からみても、バイポーラ構造は、壁部分がそのまま隣の電池と接することから、バスバー等接続のための付加的なパーツは必要無く、組電池にもかかわらず単電池とほとんど同様の構造であり、究極のシンプルな電池システムが実現されたものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) Horie, H.: *Future Lithium-ion Batteries*, Royal Society of Chemistry (Ed. Eftekhari, A.), 163 (2019)