

早稲田大学 理工学術院／ナノ・ライフ創新研究機構
門間聰之 教授

高密度蓄・発電デバイスの開発と評価が研究テーマ。1995年、早稲田大学院博士後期課程修了。同大学理工学部応用化学科助手、米国ミネソタ大学の博士研究員を経て、早稲田大学に赴任。2001年に、電気化学会進歩賞・佐野賞、2007年には「Electrochemical Communication Award 2007」を受賞。



CO2低排出社会、IoT社会に求められる新しい電池の開発

端的に言うならば、革新的な蓄電デバイス・システム、健康福祉に役立つ電気化学センサーの開発、これが私の研究テーマです。

電池は、一次電池と二次電池に大きく分類できますが、それ自体が電気をつくるのではなく、化学エネルギーを電気エネルギーに変換する電気化学反応をエネルギー源としています。言い換えるなら、電気化学反応の構造やその材料の研究が、新しい電池を開発することに繋がるといえます。具体的には正極・負極の材料・構造開発や、副反応を制御する界面の設計などに力を入れています。

例えば、エネルギー密度の高いリチウムイオン電池。負極には黒鉛（人造、天然）、ハードカーボン、ソフトカーボンなど、炭素材料が使用され、理論容量は372mAh/gです。電極密度を上げるなどして電池容量の向上に努めてはいますが、すでに容量のほとんどを使用しており、限界に近い。神様が悪戯をしない限り、理論容量を超えることは難しいでしょう。

それなら発想を転換し、材料自体を変えればよい。そこで私が注目し試したのが、シリコン。リチウムイオン電池の負極にシリコンの反応を利用すると、理論容量が1000mAh/gと、炭素材料の3倍近くにまで増えます。これ自体はすでに報告されていたのですが、問題は充放電の繰り返し回数。これまでは、100回程度だったのが、開発したシリコン素材を使用することで7000回以上と大幅に寿命を延ばすことができました。ナノメートルサイズのシリコン粒子が埋まった複合体の新しい合成法として、複合材料を一挙に電気化学還元析出で、従来副反応と捉えられていた電解液分解を積極的に利用しつつ金属析出を同時に行う方法を考えました。二つの異なる反応を同時に行うということは、制御が難しくなることにつながりますが、ラッキーなことにシリコンやスズの析出を電解液分解と同時に行うことで、大きな充放電容量を持つ負極としてうまく作動しました。あとは、低コストで、長時間使用しても副反応を制御しながら、電気が無駄に流れないような効率的な電池に結び付けられるか。それが今後の研究課題です。他にも「アニオンの動きを制御した新しい電極構造を

持つ蓄電池の開発」なども行っています。これは、充電反応で生成するエネルギー状態の高い正極材料が、電解液へ溶出して自己放電してしまうことを防ぐ構造を電極に作りこむ研究です。

ただ、個人的に気になるのは、一般的に電池の研究自体が電極反応に偏ってしまいがちで、セパレーター用のフィルムの開発や、酸素だけを透過させる保護膜の研究など、こうした周辺部の必要な機能の材料開発がニーズに追いついていないということ。研究者と企業側の間にギャップがありますので、こうした部分でも意見交換ができると嬉しいですね。

もちろん、簡単ではありませんが、こうした新しい電気系が製品化されれば、電気エネルギーを効率よく使用するためのバッファーになりますので、最終的には電気を必要とする業界全体に影響を与えることができます。まずは自動車業界といった付加価値の高い産業に浸透させ、「大量生産×低コスト」の仕組みをつくれるかどうか。量が増えれば、中古産業も参入してくるでしょうから、自然と市場規模は膨らんでいきます。

こうした社会システムの構築はとても重要です。特にIoT社会では、少なくと

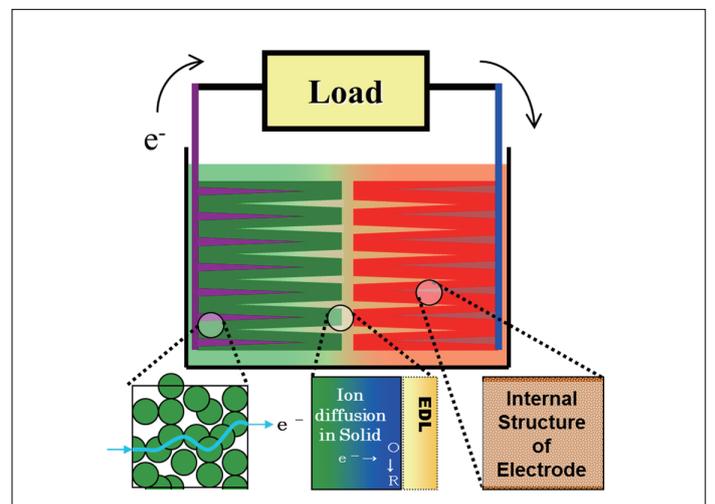


図1 リチウムイオン蓄電池の作動と素反応



も時間がミリ秒単位で同期しますので、電力の平均化がキーワードになります。人間の生活にある一定のリズムがある以上—冬になれば朝から暖房を入れる、出社時間に会社のパソコンを立ち上げるなど—これまで人の手でOn-Offされてきた電力使用が、自動化されることで、瞬間的に消費電力が跳ね上げることは想定できます。コンピュータが制御するように組み込まれるでしょうが、それでも需給のバランスの取れない時間が生じる可能性が

“ゼロ”とは言い切れない。そうした刹那的に不足するかもしれない電力を、電池が補完できるのではと考えています。

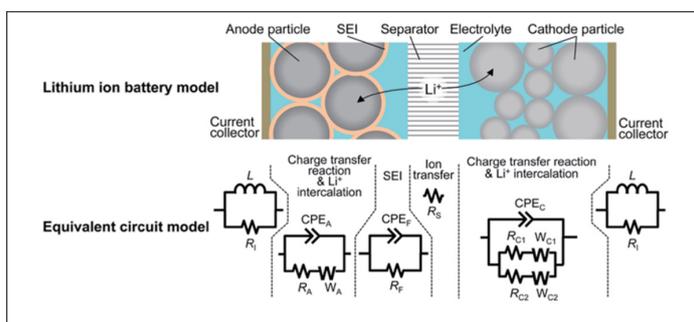


図2 リチウムイオン蓄電池の各要素のモデル図と解析用に設計された等価回路

と5年はかかるでしょう。裏を返せば、アイデアと材料の開発次第で、チャンスはいくらでもあるということ。挑戦する価値のある分野とも言えるのではないのでしょうか。

電気化学は電池だけではなくバイオセンシングも

電池の研究として電気化学反応を理解し、反応場を作りこんでいくと、電池ばかりではないその他の電気化学デバイスにも考え方が応用展開できます。現在進めている電池以外のシステムとして、IoT社会のための情報収集デバイスとなるセンサがあります。これまでも、糖尿病患者の血糖値制御のための血糖値センサは電気化学センサを用いて実用化されていますが、界面を精密に設計することで、今までにないセンサの実現を目指しています。特に人や動物の健康状態を診断する、病気を診断するためのセンサも電気化学系で作ることができ、従来の診断測定手法よりも小型簡便、ポータブルなセンサシステムが実現できる可能性があります。

企業へ向けて

新しい電池開発の研究と、電池の評価システムの構築、これらを相互に補完し合わせることで研究の質を高めていく、これが私の研究室の強み。ドライルーム、クリーンルーム、グローブボックスがあるので、さまざまな実験ができるのも魅力です。

電池の評価システムが、新しい電池開発の手助けに

新しい電池の開発と並行して研究しているのが、電池の測定・診断システムの構築。いわゆる健康診断です。簡単に言うと、使用済みの電池としてまだ中古車に乗せて利用できる電池はリサイクルに回す。また、大きな出力が必要となる車載用の使用は難しいけど、オフィスビルや商業施設、また太陽光発電などで電気エネルギーの変動を抑える目的なら十分利用価値があるものはリユースするか、そもそも使用自体が危険なので、一度、電池を分解して元素ごとに資源として取り出し、新しい電池を作り直す、そういった評価・判断ができます。この診断のためには、電池を非破壊で、また作動状態もしくは休止状態で評価することが必要になりますので、電池を壊さず、また蓄えた電力を無駄にしないような方法として、微小振幅の交流やパルスを用いる診断法の開発を進めています。発火・発煙事故に至る前に、電池の交換や使用停止を前もって知らせてくれる診断システムの開発が大事であると考えています。

研究室にはドライルームとグローブボックスを連結した部屋がありますので、水分を除去したアルゴン雰囲気を保ったままリチウムイオン二次電池を作り、そのまま内部を分析しながら評価手法を開発しています。また、リチウムメタルは、アルゴン雰囲気と比べ、微量の水と二酸化炭素があったほうが質の良い保護被膜が形成されることもわかってきました。こうした比較の研究にも取り組むことができるのも魅力です。

このように新しい電池の開発と測定・診断システムの両輪を回しながらの研究は、検証、改善の好サイクルを生みますので、効率の良い研究につながっていきます。電池には、硫黄電池、空気電池など、さまざまな種類があり、将来、どの電池系が優位なのか、まだその方向性は決まっていません。少なくともあ

参考文献

- [1] T. Momma, M. Matsunaga, D. Mukoyama, T. Osaka, Ac impedance analysis of lithium ion battery under temperature control, *J Power Sources*, **216** (2012) 304-307, 10.1016/j.jpowsour.2012.05.095.
- [2] T. Momma, H. Nara, S. Yamagami, C. Tatsumi, T. Osaka, Effect of the atmosphere on chemical composition and electrochemical properties of solid electrolyte interface on electrodeposited Li metal, *J Power Sources*, **196** (2011) 6483-6487, 10.1016/j.jpowsour.2011.03.095.
- [3] Y.W. Wu, T. Yokoshima, H. Nara, T. Momma, T. Osaka, A pre-lithiation method for sulfur cathode used for future lithium metal free full battery, *J Power Sources*, **342** (2017) 537-545, 10.1016/j.jpowsour.2016.12.101.
- [4] N. Nakamura, T. Yokoshima, H. Nara, T. Momma, T. Osaka, Suppression of polysulfide dissolution by polypyrrole modification of sulfur-based cathodes in lithium secondary batteries, *J Power Sources*, **274** (2015) 1263-1266, 10.1016/j.jpowsour.2014.10.192.
- [5] T. Momma, S. Aoki, H. Nara, T. Yokoshima, T. Osaka, Electrodeposited novel highly durable SiOC composite anode for Li battery above several thousands of cycles, *Electrochem Commun*, **13** (2011) 969-972, 10.1016/j.elecom.2011.06.014.