

グリーンナノ企画特集＜第 18 回＞

自動車が求める電池の将来像と その実現に向けて

トヨタ自動車株式会社 東富士研究所 電池研究部部長
射場英紀氏に聞く



1. はじめに

持続可能な社会を実現するには、化石燃料の消費が少なく二酸化炭素（CO₂）の排出の少ない自動車が必要である。今日それに向けてハイブリッド車、プラグインハイブリッド車、電気自動車、燃料電池自動車などが次々と開発され話題になっているが、これらの車にとって電池はいうまでもなくコア技術であり、電池の革新がそのままこれら自動車の革新につながっているといっても過言ではない。そこで、“自動車が求める究極の電池とはどのようなものか又その実現に向けてどのように取り組んでいるのか”と大上段に構えた質問を抱いて、2009年12月22日、この分野の学会・研究会・各種委員会で広く活躍しておられるトヨタ自動車株式会社東富士研究所電池部 射場英紀（いば ひでき）部長を訪問した。

早めに着いたので、同研究所の展示室を見せて頂いた。入口近くに“これら展示物は、当研究所の使命である次世代技術の研究・開発が主要開発技術に発展しかつトヨタの製品につながったものである。毎年、当研究所で検討しバージョンアップしている”旨のことが書かれてあった。全部で約20件の展示物があった。ハイブリッド自動車のための先行開発技術、排ガス処理用三元触媒など私の興味を大いにそそった。東富士研究所の使命が「次世代技術の研究・開発」であることを強く受け止めたころ、予約時刻通りに射場部長にお目にかかり、部屋にご案内頂き、お話を伺った。

射場氏は、著述・公演等で以下の主旨の発言をされている [1][2][3]：

- ① 持続可能な社会実現のためには、CO₂ 排出量の約 19% を占めるモビリティ関係をサステナブルモビリティにしなければならない。
- ② サステナブルモビリティにおいて電池はコア技術であり、電池の革新がそのまま自動車の革新につながる。
- ③ 自動車の求める電池の将来像「夢の電池」は、「佐吉の電池」である。

④ この夢実現のためには新しい原理や材料が不可欠である。夢に近づくものとして「全固体電池」と「金属空気電池」を考えている。

⑤ そして、夢実現のためには、サイエンスに基づく創造的・萌芽的研究が不可欠であり、これより生まれた研究シーズとエンジニアリングによる開発ニーズの間には大きなギャップがあるのが常であるがこれを埋める必要がある。

⑥ ここに、サイエンスに基づく研究シーズとエンジニアリングによる開発ニーズの両方を理解する目利き人材が求められる。

以下、この流れに沿ってお話を伺った。

2. サステナブルモビリティに向けての現状

化石燃料の消費と CO₂ 排出量の低減を目指し、車両の小型・軽量化やエンジンの低燃費化等多くの取り組みが行われてきた。

ハイブリッド車（HV）（図 1（a））は低燃費と走行性能の両立という観点から、1997 年のプリウスの発売以降、車種と台数を増やしてきている。現在の HV はガソリンを給油して、電池との間での効率的なエネルギーのやり取りをすることにより低燃費化（プリウスの場合 38km/l）を実現している。

これに続くものとしてクローズアップされているプラグインハイブリッド車（PHV）（図 1（c））は、住宅などの電源から車両に搭載された電池に充電することにより、従来のガソリンのみを給油する HV に比べて一次エネルギーの多様化に対応できると共に、CO₂ の排出やエネルギーコストの低減も期待できる。図 2（a）は、PHV で 25km 走行（内 13km は電池の電気エネルギーによる走行）した場合の CO₂ 排出削減効果を示したものである。充電による電気をどのような発電手段で得ているかによって、その効果は変わる。フランスのように約 90% を原子力と水力でまかなっているところでは（図 2（b））、削減効果は大きい（プリウスに対して約 40% 削減）。又、同じ走

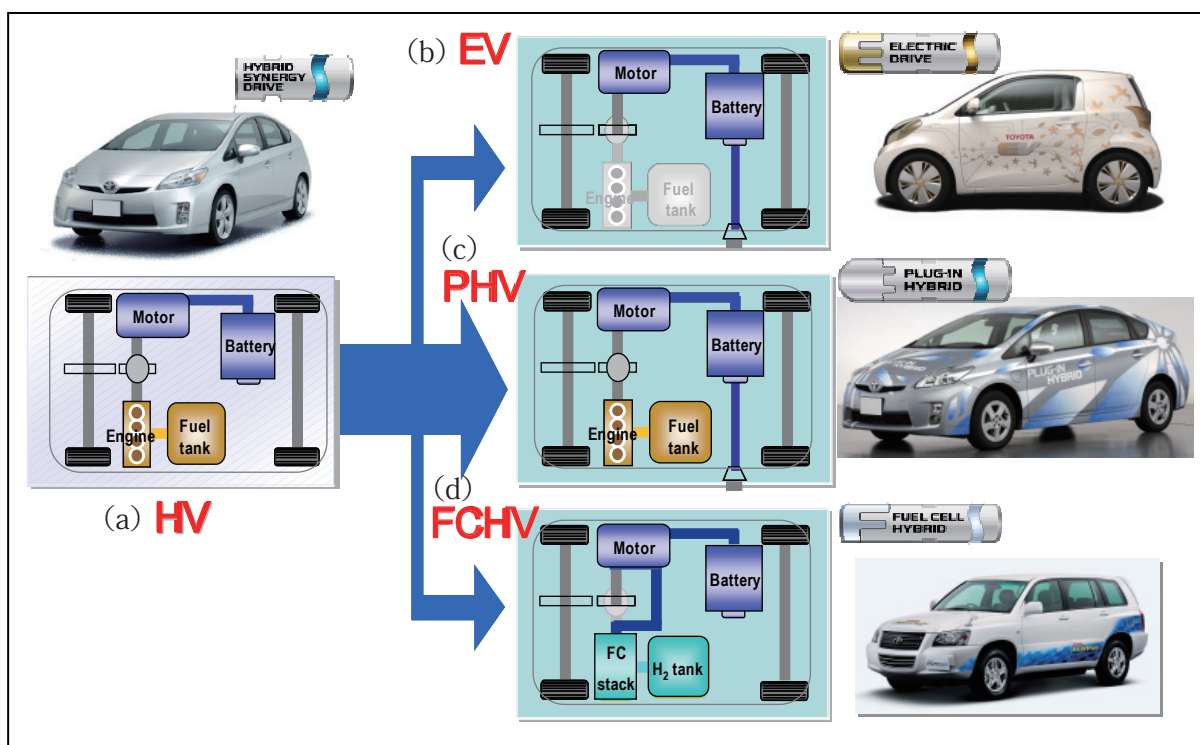


図1 サステナブルモビリティを目指す自動車（提供：トヨタ自動車）

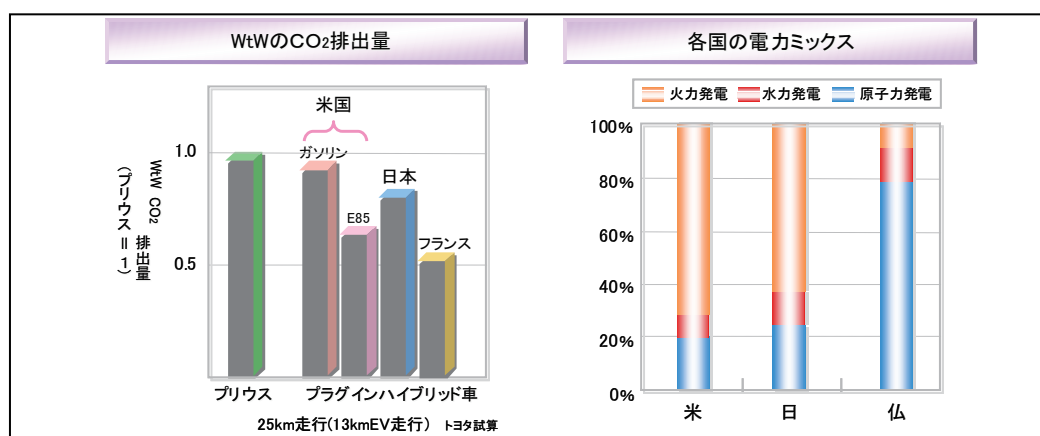


図2 プラグインハイブリッド車 (PHV) のCO₂ 排出低減効果（提供：トヨタ自動車）

行パターンでの日本におけるエネルギーコストは、充電を深夜電力で行うとプリウスに比べて41%の低減ができる（図3）。

電気自動車（EV）（図1（b））は、古くからフォークリフトやゴルフカートなどの実用例があるが何れも一充電での走行距離が短く、普通乗用車に大量普及させるためには電池の性能向上による航続距離の延長が最大の課題である（三菱自動車工業製のi-MiEVは一充電当たり160km）。ここに新型高エネルギー密度の電池の出現が強く待たれている。

一方、これまで長い間研究・開発されてきている燃料電池を用いる電気自動車（FCHV）（図1（d））は、ガソリン車並みの実用走行距離500kmを達成しており、今で

はコストと長期信頼性を除けば、手の届くところに来ている。

このように現状では、HV、PHVはガソリン車と同様の長距離走行が可能であるが、EVは小型車でも一充電当たり150km位である。一方、車の使われ方であるが、図4に示すように1日当たりの走行距離20km以下のユーザが約3/4を占める（現状のEVの大きな出番であり、かつ大きなマーケットである）。この1回の走行（ワントリップ走行）距離が20kmの場合、PHVの平均燃費はプリウスの2倍、ガソリン車の4倍向上することが実証試験で示されている（図5）。地球環境の観点から、現状のPHV、EVの早い普及が望まれる。

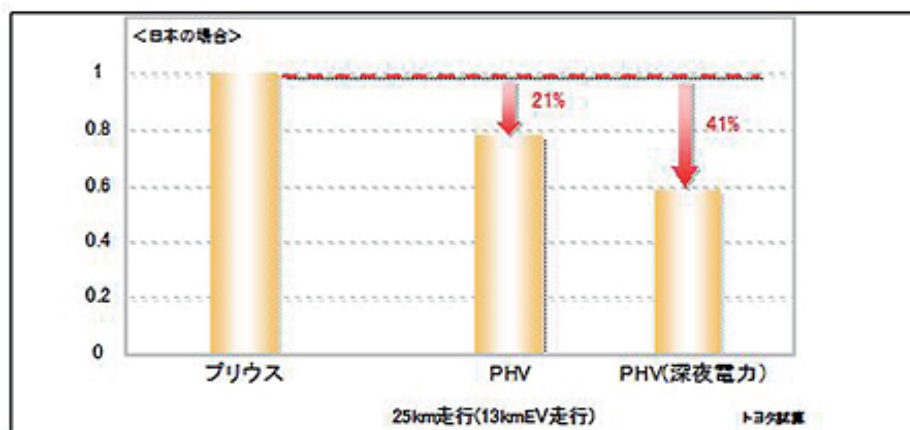


図3 プラグインハイブリッド車（PHV）のエネルギーコスト低減効果（提供：トヨタ自動車）

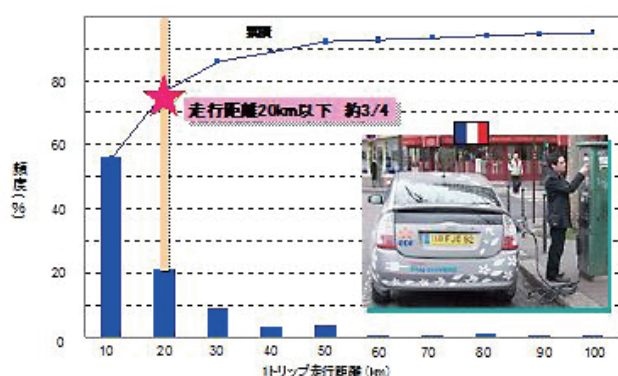


図4 自動車の使われ方：1トリップの走行距離（提供：トヨタ自動車）

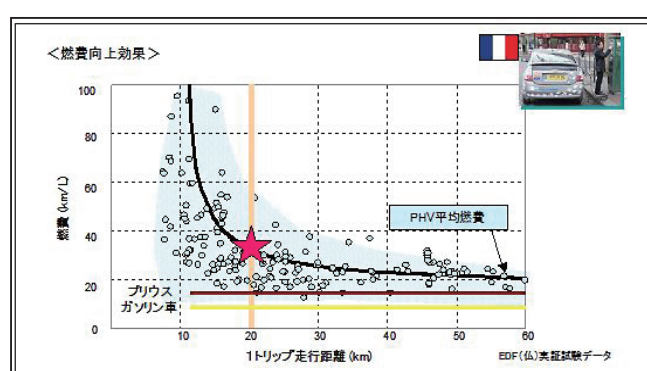


図5 PHVの1トリップ走行距離と燃費との関係（提供：トヨタ自動車）

3. 自動車が求める電池の将来

我が国では、過去2回電気自動車（EV）実用化に向けての大きな盛り上がりがあった。第1回目（1970年代前半）：米国 Muskie Act（NOX, SOX 対策）--- 三元触媒・エンジン電子制御で解決。第2回目（1990年代前半）：米カリフォルニア州 Zero Emission Vehicle 法 --- 低排出ガス車販売で解決し、第1回目同様EVの普及に至らなかった。そして第3回目の今回は、CO₂ 排出削減（気候変動）と燃料源不安定要素（石油ピークアウト）、更にはスマートグリッド体系（次世代送電網：電力の流れを供給側・需要側の両方から制御し最適化できる送電網、日本では再生可能エネルギー導入に関して注目されている）におけるエネルギー貯蔵・調整関係が加わり、政府・主要企業から一般市民まで強い問題意識を持ち、また対策が求められている。このような中であって、既に過去のことになるが、経済産業省は2006年8月『次世代自動車用電池の将来に向けた提言』を発表し、電池開発のガイドラインを示した。これによると2010年までに“性能現状・コスト現状の1/2”，2015年までに“性能1.5倍・コスト1/7”，2030年までに“性能7倍・コスト1/40”を達成しようというものであり、このマイルストーンは今も健在であるといえる。

佐吉の電池

このような電気自動車および電池開発の歴史の中に、「佐吉の電池*1）」というものがあることを射場氏は紹介してくれた。それは驚くことに自動車が求める電池の将来像そのものであった。豊田佐吉翁は言うまでもなく、トヨタ自動車株式会社の母体となった豊田自動織機の創始者である。射場氏によれば「佐吉翁は1925年、当時100万円（当時の初任給：75円）の賞金をかけ、ガソリン以上のエネルギー量の蓄電池の公募を行った。「佐吉の電池」は85年経過した現在でも実現していないが、そのビジョンは現在社会でもそのまま適用できるものである。即ち、図6に示すように日本には資源がない液体燃料に代わるものとして、当時国内で豊富であった水力による電力を電池に蓄え、自動車の動力源とするところに佐吉翁の発想の原点があり、これは翁の念願でありビジョンであった。」そして射場氏は、さらに「EVは、佐吉の電池が求めるエネルギー量の5分の1程度あれば航続距離も伸びて、極めて実用性が高まると考えている。しかし

* 1) 佐吉翁が出された電池への要求仕様： ①出力：100馬力 ②36時間連続運転 ③質量：60貫以下 ④体積：10立方尺以下

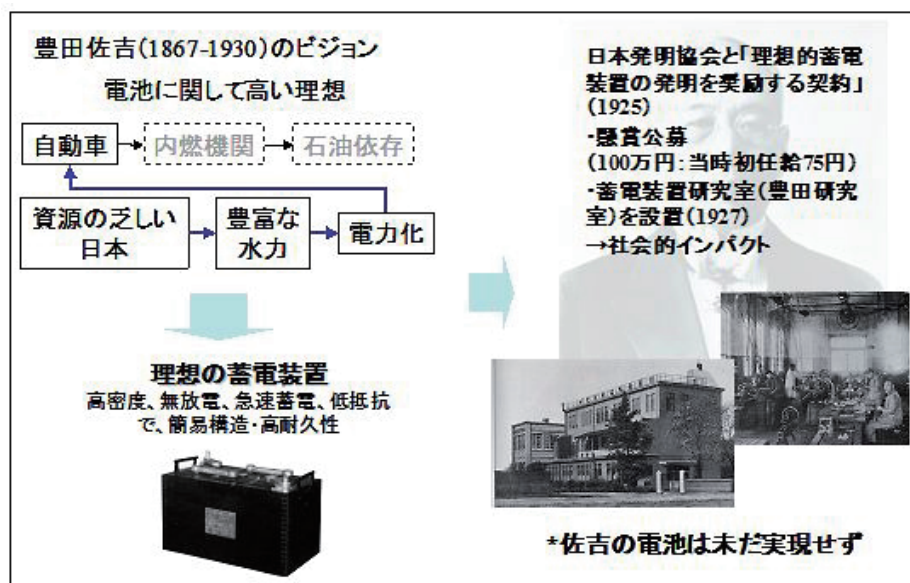


図6 豊田佐吉翁のビジョン:「佐吉の電池」(提供:トヨタ自動車)

ながら現状のニッケル水素電池(Ni-MH)やリチウムイオン電池(LIB)では、その理論容量でもこのエネルギー量には及ばない(LIBの理論容量:240Wh/kg)。これまでの電池の開発経緯が示す通り、画期的にエネルギー量の大きい電池開発のためには新しい原理や材料が不可欠である。電池は電極と電解質が基本構成である。現在、新原理として電解質を従来の液体から固体にした全固体電池や、電極に金属をそのまま用いる金属空気電池などがその候補だが、実現のためには課題も多く長期の研究によるブレークスルーが必要である」と語った。

図7は、これまでに開発されてきたNi-MHおよびLIBの国プロ開発目標と佐吉の電池との関係を示したものである。佐吉の電池にはまだ遠く及ばないが、射場氏は次世代技術の研究・開発を担う東富士研究所電池研究部部长として全固体電池、金属空気電池の実現に向けて、サ

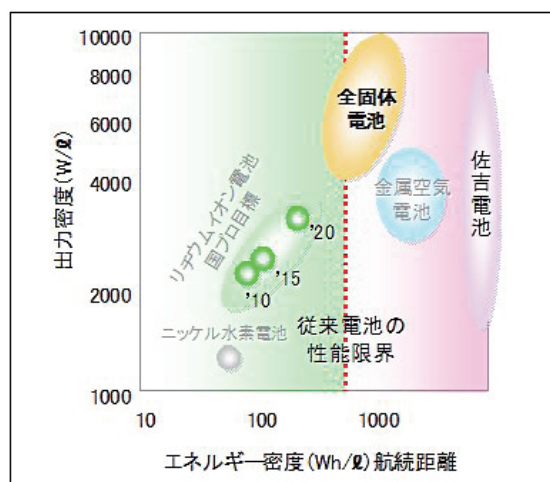


図7 現行電池と佐吉電池との関係:佐吉電池に近づくには(提供:トヨタ自動車)

イエンスに基づく基本的なフェーズから、チャレンジしている。

全固体電池

射場氏は「従来のLIBに一般的に使われている電解液を、固体の電解質に置き換えることにより、コンパクト化、部品点数や工程の削減、充放電条件の拡大などの可能性があり、それらを総合して高容量化が期待できる」点に注目している。また氏は「電解質に固体を用いた場合、その出力性能が開発課題となるが、その解決策として、固体内のリチウム伝導性が高い種々の材料が固体電池の候補材として提案されている[4][5][6]。ただし、電池の出力は、電解質のバルク内のリチウム伝導だけでなく、電解質の粒子間の伝導や電極活物質と電解質の界面、さらには、正負極の活物質内でのリチウム伝導と電子伝導が影響しており、それに関連して多くの研究課題がある。金属材料の固体内の拡散は、古くから研究され、既に確立した学問分野であるが、材料が異なっても、固体内の拡散の原理や解析手法などは共通する部分は多く、これ

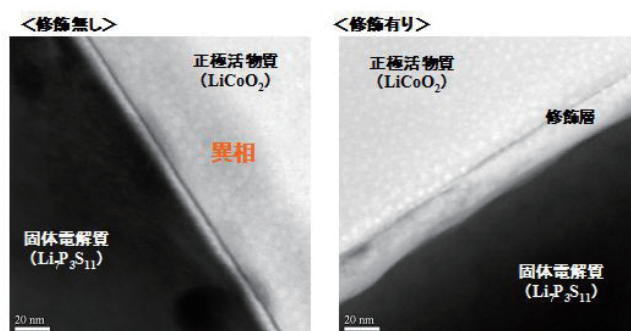


図8 全固体電池の界面設計:界面の修飾による特性向上(提供:トヨタ自動車)

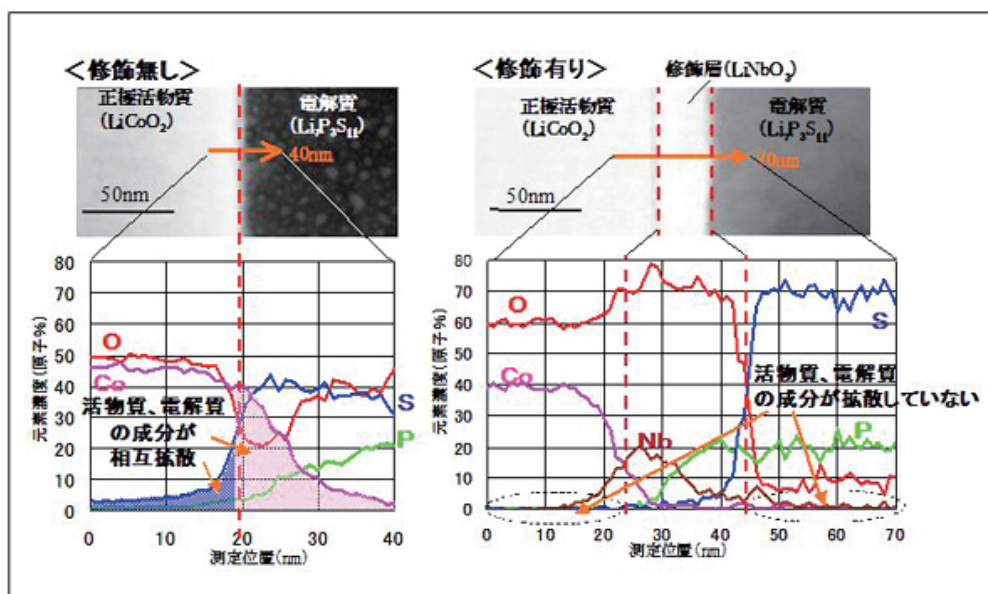


図9 全固体電池の界面設計：界面修飾の効果（提供：トヨタ自動車）

らの知見が、電池の研究課題の解決に応用できる」との考えに立って、具体的に研究を推進しているとのこと。

2009年11月30～12月2日、京都で開催された第50回電池討論会でこの固体電池を含め9件の研究成果を発表している[7]。これらの発表から伺えるのは、“基礎研究に立ち返り、粒子と粒子、電極と電解液といった界面の反応を解明することで、リチウムイオン電池（LIB）の新規材料や、全固体電池、リチウム空気電池などの開発につなげたいという姿勢”である[7][8]。射場氏自身も「革新電池の反応機構」と題した特別講演をされ「トヨタが電池研究部を設立して約1年半に分かった基礎的な研究成果を、今回の電池討論会で9件発表した」と述べている。

この電池討論会での発表で、LIBについては、正極材料としてLiMnPO₄や、アモルファス構造を備えるポリアニ

オン系材料Li-M-P-B-O、負極材料としてSiO-C複合材料などについて報告した。全固体電池では、正極材料の構造によって固体電解質（Li₇P₃S₁₁）との界面反応に違いがあることを報告した。正極材が層状構造のLiCoO₂とスピネル構造のLiMn₂O₄とでは、固体電解質との界面抵抗はそれぞれ1.4kΩ、84kΩと大きく異なるが共に大きい。この違いはLiMn₂O₄がより表面酸素を欠損しやすいため、LiCoO₂よりも固体電解質への酸素拡散が進行しやすいためであるとしている。図8、9はLiCoO₂の表面をLiNbO₃で修飾することによって界面抵抗層の生成を抑制・改善した例である。

金属空気電池

射場氏は、金属空気電池については「この電池（図10）は、負極で金属の溶出、正極では溶出した金属が空

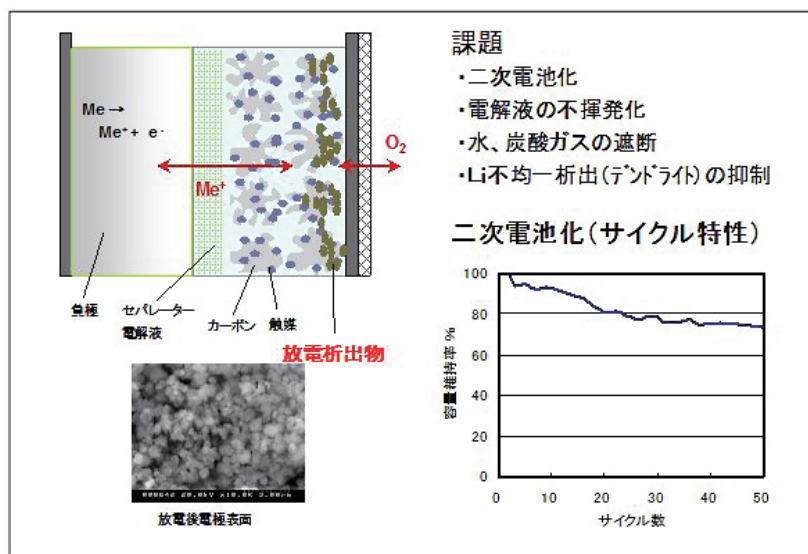


図10 金属空気電池（提供：トヨタ自動車）

気中の酸素と反応して放電析出物となることで放電することは古くから知られており、垂鉛空気電池などは一次電池として既に実用化されている。従来その逆反応による充電は難しいとされてきたが、最近の研究事例で、充電が可能なものはいくつか報告されている [9][10][11]。充電反応は、負極での金属の析出と、正極での放電析出物の還元という反応が予想されるので、負極では、平坦に金属を析出させること、正極では低エネルギーで還元反応を起こすような触媒の探索が研究課題となる。これらは、非常に困難な課題で、長期の研究期間が必要と考えるが、例えば、負極の課題は金属メッキ技術と、正極の課題は湿式精錬の技術と共通基盤の分野であり、これらの分野の融合による新しい手掛かりが生まれることが期待できる」との考えの上に立ち、基礎的面に立ち回り研究を推進している。前述の京都の電池討論会では、「リチウム空気電池では、充電反応が従来言われていた理論通りに起きていないことを示した。正極内の析出物が Li_2O_2 ではなくて、電解液に由来するカーボネート系化合物であるとして、充電時には酸素ではなく CO_2 が発生している」という基本的な知見を明らかにした。

4. 夢実現のために：産学官連携の強化

4.1 シーズとニーズの結合

「必要なブレイクスルーのためには、サイエンスに基づく創造的・萌芽的な研究が不可欠と考える。このような研究は内容の学術レベルが高いだけでなく、長期の研究期間が必要でかつその成功率も小さいため民間企業が単独で行うことは難しく、大学や公的研究機関での研究と産学連携によるその成果の受け渡しに対する期待が大きい。例えば、ナノテクノロジーに関連する研究はここ数年間、文部科学省や経済産業省のプロジェクトで数多く

の成果が得られているが、これらは、電池の研究に直接つながるものがある半面、シーズとニーズのギャップが大きいものが多い。これらのギャップを埋めるためには、サイエンスに基づく研究シーズとエンジニアリングによる開発ニーズの両方を理解する目利き人材が期待されるが、なかなかそういう人はいないのが実情である。これを解決するためには大学の研究と企業のエンジニアとが、研究成果の受け渡しの条件やギャップを埋めるために必要な研究開発は何かを議論し実行する「場」や「しくみ」を設けることが、成果の有効活用や人材育成につながる」との考えに立って、トヨタではニーズに基づくシーズを求めて産学官連携を積極的に進めていると射場氏は言う。

具体的には、トヨタでは、トヨタの企業としての技術ニーズを大学や各種国公立研究所に説明し、共同研究を募っている。その数は約 300 件に達している（図 11）。これらは、商品開発直結のものではなく次世代技術準備のためのものである。その代表的なものはナノテクノロジーの進歩によるナノ材料の開発であり、ナノサイズ of the material によって多くの新機能が発現している。ただ、それをスケールアップすることが今もってうまくいっていない場合があり、これではナノテクノロジーの成果は無に等しい。

射場氏の場合は、生体のエネルギーの流れ、生化学的变化が運動エネルギーにつながる現象（生化学エネルギーの運動エネルギーへの変化）のメカニズム解明を早稲田大学の先生に依頼研究を出し、その後先生をトヨタに招き入れ、今、創造的シーズと企業ニーズとの架け橋になる研究開発を推進しているとのことである（図 12）。

また、直近の例として、2008 年 7 月 8 日「(独)物質・材料研究機構－トヨタ次世代自動車材料研究センター」を開設した。次世代自動車材料を生み出すために必要な、基本現象メカニズムの解明と基盤技術開発（シミュレーション、キャラクターゼーション（解析、評価）、アプリケー

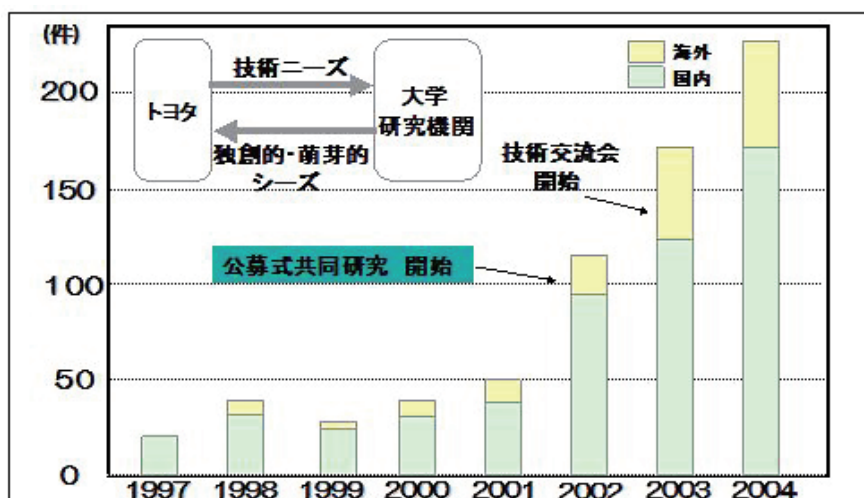


図 11 大学その他研究機関との共同研究強化（技術ニーズを発信することにより共同研究を加速）
（提供：トヨタ自動車）

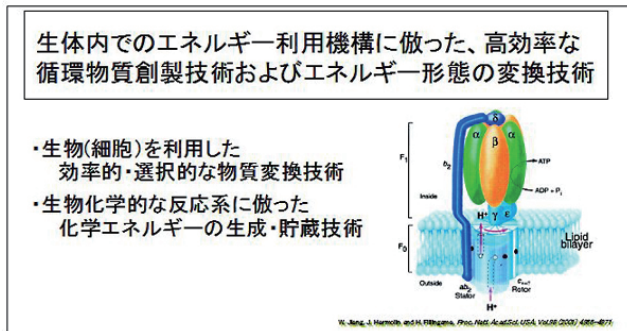


図 12 生化学的物質・エネルギー変換技術 (提供: トヨタ自動車)

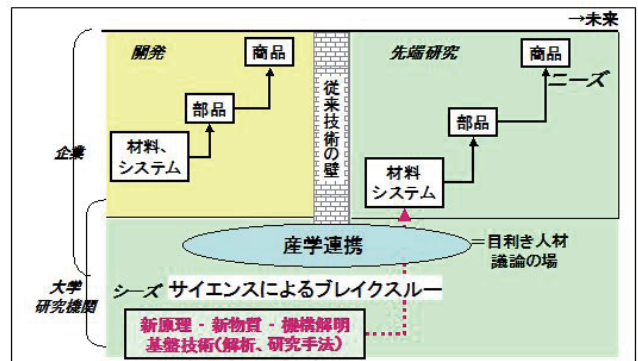


図 13 産学連携・人材育成 (提供: トヨタ自動車)

ション(材料合成)を、原子オーダーの微視サイズから巨視サイズまでの広範囲にわたって行う総合研究手法)の研究を行い、材料開発における技術の壁のブレークスルーを目指す。具体的には、次世代車載用二次電池に関する研究から開始する。先述の射場氏が力を入れている全固体電池、金属空気電池では、正極活物質/電解質/負極活物質の界面に高抵抗層を形成することなく高いイオン導電性を実現しなければならない。このためには界面でどのようなことが起こっているのかその実態の解明や界面のナノオーダーの修飾層形成、ナノオーダー触媒の最適配置等々のナノテクノロジーを取り入れた技術開発が必要であり、本センターに期待するところ大である。本研究センターは、第三研究機関の参加を視野に入れた研究開発活動をするに加え、この連携研究を通じて材料開発に必要な基本技術を習得した研究人材の育成・輩出も図ることにしている。

4.2 共通基盤技術の活用

いずれの研究にも共通する多くの基盤材料技術がある。例えば、SPRING8(大型放射光施設)など放射光を用いた分析技術は、電池の材料開発においてその構成材料の構造解析や反応プロセスのin-situ解析などにおいてニーズは多い。また、J-PARC(大強度陽子加速器施設)に代表される中性子を用いた水素やリチウムを含む材料の構造解析は、電池用新材料探索のための有力なツールとなっている。

これらの基盤共通技術は、電池の研究においては、本年度から京都大学に設立されたNEDOの革新型蓄電池の基礎研究拠点*2)において、その高度化と革新型電池の

研究開発への適用が進められる予定であり、このコンソーシアムにトヨタはメンバーとして参加している。

以上のように、多くの連携研究・開発を巧みにに行っている。図13に示すように、企業の技術ニーズとそれら研究機関との技術シーズを結びつけるわけであるが、その結び付け役としては双方に通じた目利きの存在が極めて重要である。電池部門に関しては、射場氏がその役を担っていると実感した。

5. 終わりに

現状のHV、これからのPHVに搭載される電池は、Ni-MH、LIBであるが、そのエネルギー密度の理論的限界は大きい方のLIBの場合でも240Wh/kgであり、佐吉の電池が求める要求仕様の50%にも達しない。しかし今は、Ni-MH、LIBが現実的であり、電池メーカーはこれらに重点を置いて研究・開発を進めているが、トヨタの次世代技術の研究・開発を使命とする東富士研究所電池部ではそれらを凌駕する全固体電池、金属空気電池に基礎的フェーズから敢えて挑戦している。リチウム/空気電池を試作しその理論的電池反応と実態との差異を分析的・解析的に明らかにしようとしているのである。これが次へのブレークスルーにつながる手掛かりになるとの信念からであり、一見遠回りと見えるかもしれないが、それら電池の可能性を化学的基礎から追及していることに、日本の産業界における科学技術の力強さ・頼もしさを強く感じた。そして、このような基礎研究・萌芽研究重視の風潮が日本全国に広がることを期待したい。

参考文献

- [1] SciencePortal, オピニオン, "革新電池への期待", 2009年5月13日
- [2] 射場英紀: "サステナブルモビリティ実現のための材料技術", ふえらむ, Vol.141, No.12, pp.74-77 (2009).
- [3] 射場英紀: "未来の電池", 電気化学セミナー "最先端電池技術-2010", pp.21-25(2009).

* 2) NEDO, 2009年度から開始するプロジェクト「革新型蓄電池先端科学基礎研究事業」の共同研究先として、京都大学を中心とする22法人から成るコンソーシアム。2030年以前の早期実用化を念頭に、現行技術水準の3倍以上(2013年までに)、5倍以上(2030年までに)のエネルギー密度を備える二次電池の開発を目指す。

- [4] M.ITOH, Y.INAGUMA, W-H.JUNG, L.CHEN, T.NAKAMURA "High lithium ion conductivity in the perovskite-type compounds $\text{Ln}_{1/2}\text{Li}_{1/2}\text{TiO}_3$ ($\text{Ln}=\text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$)", Solid State Ionics Vol.70/71, No.Pt 1, pp.203-207 (1994.05)
- [5] R.KANNO, M.MURAYAMA:"Lithium Ionic Conductor Thio-LISICON. The $\text{Li}_2\text{S}-\text{GeS}_2-\text{P}_2\text{S}_5$ System", J.Electrochem. Soc., Vol.148, pp A742-A746 (2001).
- [6] F.MIZUNO, A.HAYASHI, K.TADANAGA, M.TATSUMISAGO: "New, Highly Ion-Conductive Crystals Precipitated from $\text{Li}_2\text{S}-\text{P}_2\text{S}_5$ Glasses", Adv.Mater., Vol.17, pp.918-921 (2005).
- [7] 第50回電池討論会公演予稿集：講演番号 1B27, (2B01), 2B04, 2B05, 2B18, 2C11, 2C19, 3C23, 3C24, 1D18(2009).
- [8] NIKKEI ELECTRONICS, "第50回電池討論会から", 2009年12月14日号, p.16.
- [9] K.M.ABRAHAM, Z.JIANG "A Polymer Electrolyte-Based Rechargeable Lithium/Oxygen Battery", J.Electrochem. Soc. Vol.143, pp.1-5 (1996).
- [10] J.Read: "Characterization of the Lithium/Oxygen Organic Electrolyte Battery" J.Electrochem.Soc. Vol.149, pp.A1190-A1195 (2002).
- [11] T.OGASAWARA, A.DEBART, P.BRUCE, M.HOLZAPFEL, P.NOVAK: "Rechargeable Li_2O_2 Electrode for Lithium Batteries", J.Am.Chem.Soc., Vol.128, pp.1390-1393 (2006).
- (真辺俊勝)
-