

第7回 Advanced Automotive Battery & Ultracapacitor Conference 報告書 —次世代車両用蓄電システム技術の最新動向—

東京大学工学系研究科電気工学専攻 博士 2 年

博士 2 年 河島 清貴

1 はじめに

2007 年 5 月 14 日から 18 日まで、第 7 回 Advanced Automotive Battery & Ultracapacitor Conference (AABC) が California 州 Long Beach の Hyatt ホテルにて開催された。併設会議として第 3 回 Large Lithium Ion Battery Technology and Application (LLITBA), Large Ultracapacitor Technology and Application (UCAP) も開催された。AABC は 2001 年に第 1 回が行われ、一年ごとにアメリカを中心に開催されている自動車用電池の会議である。関係者の話によれば、情報収集の場としてこれほどの大規模のものは他にないとのことである。

約 10 年前に電池工業会などを中心としていくつかの電池の会議が開かれていた。しかし電池分野で世界をリードする日本が不況に陥ったことから、一時的に EV や HEV の活動が停滞していたと見られる。

そこでアメリカ Advanced Automotive Batteries 社長である Menahem Anderman 博士が自動車企業中心に声をかけ 2001 年に AABC 第 1 回が開催された。

自動車用電池に関するこの他の学会としては、電気自動車シンポジウム (EVS: Electric Vehicle Symposium) があり、2006 年 10 月横浜で開かれた EVS22 には AABC 主催者の Anderman 氏をはじめ、Sanyo の米津氏、A123Systems の Andy Chu 氏、カリフォルニア大学 Davis 校 Andrew Burke 先生など世界の蓄電装置開発を率いている人物の発表があったので、こちらも参考にしたい [1]。

はじめに参加者データから見た AABC の概要を述べ、今回のキーワードと国ごとの動向をまとめるので会議の全体像をつかみたい方は第 2,3,4 章を参照頂きたい。シンポジウムの発表について第 5 章に各企業のポイントをまとめたのでより詳細な情報が必要な方はこちらをご覧ください。

表 1: AABC これまでの開催地と参加人数

開催年	開催地	参加者	併設会議
2001	Las Vegas	250	—
2002	Las Vegas	315	—
2003	Nice (France)	330	—
2004	San Francisco	270	—
2005	Honolulu	310	LLIBTA,UCAP
2006	Baltimore	560	LLIBTA,UCAP
2007	Long Beach	720	LLIBTA,UCAP
2008	Tampa	—	—

示している (括弧内は参加者数)。米国でも最も環境への関心が高い西海岸での開催であったことからアメリカ企業が 6 割を占めた。その次に多いのが現在電池業界の牽引役である日本企業である。世界各国の研究者達が、日本企業の優れた研究者の講演を聞きに来ているという構図となっている。

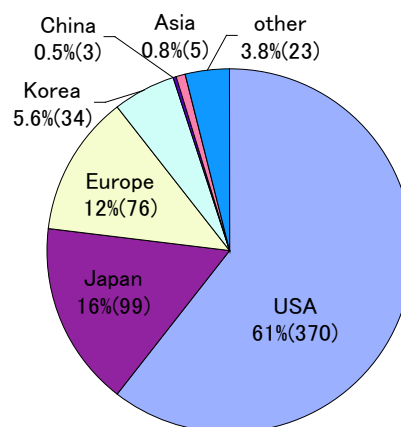


図 1: 参加者の国別構成

2 AABC 参加者の構成

年々参加者が増加しており、今回は 23 カ国から 720 名が参加した (表 1)。図 1 は今回の参加者の国別構成を

図 2 は参加企業の業種構成である。第 1 回が自動車メーカー中心で開催されたのに対し、電池メーカーのことも、セバレータ、カーボンなどの素材メーカーの参加

が著しく増えている。興味深いのは、石油会社の電池研究者やコンサルティング、投資会社などの参加もあり、次世代電池が幅広い業界から注目を集めていることである。発表を行った米国企業の多くは DOE(エネルギー省) の FreedomCAR や先進バッテリーコンソーシアム (USABC: United States Advanced Battery Consortium) などから援助を受けており、PHEV 早期導入へ国全体で盛り上げていた。

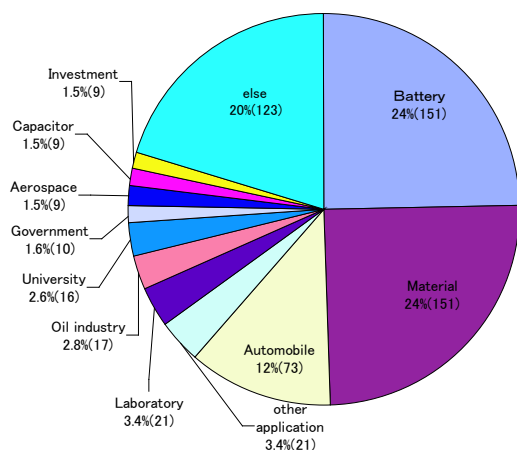


図 2: 参加企業の業種構成

3 今回のキーワード

今回参加を通してキーワードがいくつかあったので 5 つに絞って要点をまとめる。

3.1 プラグインハイブリッド (PHEV)

現在自動車業界で最も注目されているのがプラグインハイブリッド (PHEV) で一般的な HEV の電池を大幅に増加させ外部からの充電も可能としている。電池のみの電気自動車としての走行も可能であり、HEV よりも出力/容量の面で電池は高いレベルが要求される。今回 PHEV の市場への投入がいつになるかが焦点を集めた。

アメリカ、カナダでは数年前より Li イオン電池を HEV に載せて PHEV 化するサービスを始めている (Hymotion が A123Systems の電池を利用して事業を展開)。カリフォルニア ZEV 規制で PHEV がどの程度のクレジットを得られるか如何によっては市場投入がさらに促進される可能性がある。

トヨタ自動車や今回発表のなかったホンダも早期 PHEV 化を目指していると見られ日産自動車、三菱自動車もそれぞれ NEC トーキン (2007 年 4 月 13 日付)、ジーエスユアサ (2007 年 5 月 8 日付) と合併会社を設立し Li

イオン電池開発、量産への体勢をととのえつつある。

これに対し欧州主要メーカでは鉛蓄電池によるフリート走行などの試験運用やアイドリングストップ技術報告に留まっていたが、Saft などの電池メーカの著しい成長によっては今後巻き返してくる可能性がある。

一般的に PHEV に求められている指標は一充電 40mile(約 56km) である。すでにこの容量を達成している企業もあるが、安全性の問題によって市場の本格的な活性化は時間が必要で、2015 年まで PHEV の市場投入は考えにくいとしている (Advanced Automotive Batteries: M. Anderman 図 3)。

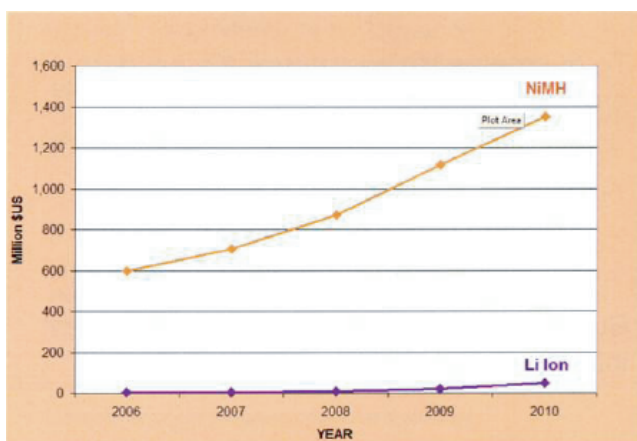


図 3: NiMH と Li イオン電池の市場規模

3.2 LiFePO_4

LiFePO_4 は Li イオン電池の正極剤に使われている素材として重要視されており、低温特性が悪い、電圧範囲が狭く容量が少ないなどの欠点があるものの安全性の高さとコストの低さからこれまでの NiCoMn 系やこの三種混合系に迫る可能性がある。熱暴走過程においても、発火の主要因となる正極による酸素発生が少ないため安全性が高いとされている。実際に多くの発表、展示で LiFePO_4 系が議論されており期待が寄せられている。A123Systems は LiFePO_4 技術を使った製品を発表しているが、残念ながら今回詳しい技術発表はなかった。一方で日本企業はこの動きを冷静に受け止めており、新しい素材の研究に力を入れていると考えられる。

3.3 A123Systems

A123Systems とは MIT の Yet-Ming Chiang 教授を中心に 2001 年に設立されたベンチャー企業である。発表 2 件、展示デモも行い、参加者数も 10 名を超え力の入れようがうかがえた。論文集にも資料を開示しないほどの情報管理の徹底ぶりであり、名刺と交換に発表資料を送

るというベンチャーならではの抜け目ない営業戦略を取った。LiFePO₄系を製品化しハンドドリルや電動鋸などの小型パワーツールで実用化しており信頼性も着々と高めつつある。すでに GM や Hymotion(カナダで HEV を PHEV 化する事業を展開) に製品提供が決定しておりベンチャーながら信頼性、安全性、コストの壁をやぶった数少ない企業の一つである。まもなく大規模量産化にうつるものと考えられ今後の動向に注目が集まっている。

3.4 リスク指標の数値化

米国三大自動車メーカーが主導している USABC として電池の新しい安全評価手法 HMRMA(Hazard Modes & Risk Mitigation Analysis) について発表があったので詳細をまとめる。

危険因子の重大性 (Severity)、発生確率 (Likelihood)、可制御性 (Controllability)、検出の容易性 (Indicator) の四項目をそれぞれ数値化し、各因子の危険度を明確化している。

図 4 は横軸に発生確率 (L)、縦軸に重大性 (S) をとって左下の緑の部分が許容範囲である。例として、あ

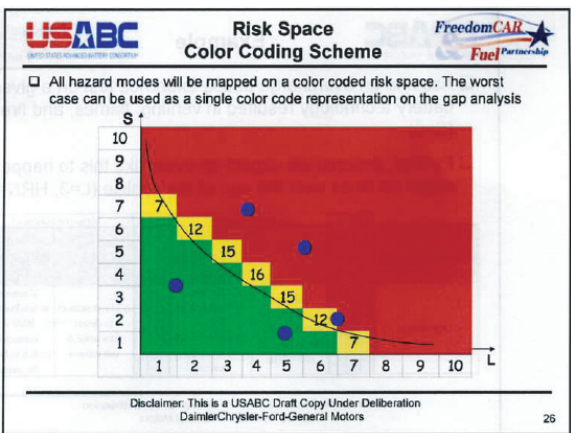


図 4: リスクスペースの許容範囲 (緑)

るシステムにおける過充電の危険度について取り上げる (図 5)。何も対策を取らない場合 ($C=1.0$) HRN(Hazard Risk Number: $S \times L \times C$) は 18 となるが、温度センサ (Indicator) を取り付けた場合は、HRN は 9 に減少し、電圧センサを取り付けた場合は 5 まで減少する。危険因子それぞれにこの HRN を計算し危険度を推定する。

非常にシステマチックで USABC として各自動車メーカーが導入し、そして最終的には標準化を目指していると考えられる。現在は各社がそれぞれの指標で危険度を算出していると考えられるが、これが標準化された場合、米国を市場とする企業は対応を求められる可能性がある。

□ Assume an overcharge abuse tolerance test on a given battery technology resulted in venting, flames, and fire (S=6)

□ Further, assume we expect an event like this to happen about 50 times over the age of the vehicle (L=3; HRN=18)

Potential Hazard	Mitigation Scheme #1			Mitigation Scheme #2		
	S	L	HRN	S	L	HRN
Overcharge	6	3	18	6	3	18

図 5: HRN 算出法の一例 (過充電の危険度)

3.5 熱暴走の仕組みとその対策

昨今ニュースでは Li イオン電池の発火が取り上げられているが、どうやってもえるのか、何が危ないのか、そして対処技術はどうなっているのか、これらについてまとめた。

基本的に Li イオン電池に入っている、正極剤、負極剤、セパレータ、電解液全て (程度の差はあれ) 可燃性である。燃える直前には必ず温度暴走 (Thermal Runaway) が起きる。

ものが燃えるには燃えるもの、酸素、着火という 3 つの要素が必要となり、これらがそろってはじめて燃えることになる。

そのメカニズムの一例は以下の通りである。

まず過電圧もしくは内部短絡→電解液加熱→負極の Li 加熱でさらに全体加熱促進→正極の Li も加熱→電気分解により正極分解が進行→酸素発生→セルが膨れる→セルが破れ水蒸気等を含む空気が流れ込む→Li が発火→爆発、という流れである。

このようないくつかの過程を経ているため、どここの段階で熱暴走過程を食い止めるか研究の課題となっている。

今回のキーポイントであった FePO₄ 系は、NiCoMn 系に比べリンと酸素の結びつきが強く高温になっても正極分解反応が進みにくくなっているため安全性が高いとされている。

また今回シミュレーション技術の発展もめざましく熱暴走過程を細かく解析することで安全性を高めようとする動きも見られた (National Renewable Energy Laboratories、三菱化学、TIAX 等)。

東燃 (ExxonMobil Chemical と共同) から従来のものよりも燃えにくいセパレータを開発し、量産化へ移るとの発表があった。

熱暴走への過程は「経年変化により進行する電池の劣化」に起因するものと「設計者が意図しないユーザによ

る酷使」に起因するものの二つがあり、両方からのアプローチが必要となっている。

4 国ごとの動向

4.1 アメリカ

PHEV 早期実現へ向け国、企業、研究機関が一丸となって進んでいるが、やや過熱気味のところもある。政府・ベンチャーに煽られた印象が強い [2]。Anderman 氏が「Li イオン電池を搭載した PHEV 本格量産化は 2015 年以降」とコメントすると多く投資家が落胆していた。それでも A123Systems、Valence や JCI-Saft などの企業が着実に力をつけてきており今後の動向に注目が集まっている。

4.2 欧州

表面的には Li イオン電池や PHEV への動きは本格化しているようには見えない。現状のディーゼルエンジンや鉛蓄電池の改良、回生電力回収とアイドリングストップ技術など着実な技術革新の発表にとどまった。

4.3 日本

前述のように大手自動車メーカはそれぞれ大手電池メーカと合併会社を設立し、PHEV 市場投入、量産化へ最終段階へ入った。今回の技術テーマの一つである LiFePO_4 も冷静に捉えており、三種混合型やバナジウムやチタンやその他の新しい正極材料の研究も進めていると考えられる。政府が次世代電池について高い数値目標を設定 [3] しているが、表立っている技術では現実的に不可能に近いことから、世界をリードする日本の今後の技術革新が期待される。

4.4 韓国

SK Corporation やサムソンなどが力をつけてきている。Anderman 氏は日本、中国と比較し、価格面と性能面で一番バランスが取れていてこれから魅力的なマーケットであるとコメントしていた。

5 会議の構成

本会議は 3 つのチュートリアルと 3 つのシンポジウム (AABC, LLIBTA, UCAP) に加え、ポスターセッション及

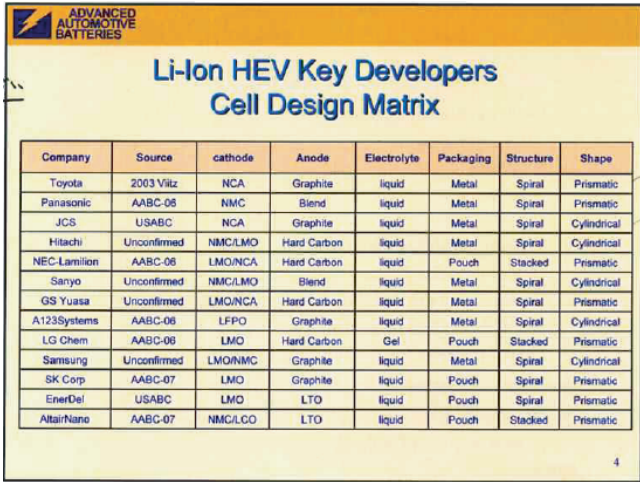
び展示会から成り立っている。

5.1 チュートリアル

14 日に開かれたチュートリアルには、以下のような 3 つの発表 (大型 Li イオン電池設計、Li イオン電池材料、Li イオン電池の課題) があった。著者はこのうち「Li イオン電池の課題」 (Advanced Automotive Batteries: M. Anderman) を聴講したのでその要点について述べる。

— セル設計について —

図 6 を見ても分かるように、正極/負極材料に大きな違いが見られ各社最適材料の模索中であることが伺える。実際にシンポジウムやポスター発表でも、今まで使われてきた CoMnNi 系やこの混合系、また安全性が高く材料コストが低い FePO_4 系など多岐に渡る材料が取り上げられていた。パッケージングについてはメタルカン型 (トヨタ自動車、Sanyo 他) と平たいラミネート型 (NEC ラミリオン、LG Chem、SK Corporation 他) の二種類がある。前者は高密度化や安全性の利点があるが、高性能な製造機械が必要で、重量も重くなってしまう。後者は軽くて、設備投資も製造コストも低く抑えられるのだが、電気分解で生じた気体や極剤によってセルに圧力がかかる可能性があり安全性の問題をいかにクリアするかが課題である。



Company	Source	cathode	Anode	Electrolyte	Packaging	Structure	Shape
Toyota	2003 Vitz	NCA	Graphite	liquid	Metal	Spiral	Prismatic
Panasonic	AABC-06	NMC	Blend	liquid	Metal	Spiral	Prismatic
JCS	USABC	NCA	Graphite	liquid	Metal	Spiral	Cylindrical
Hitachi	Unconfirmed	NMCLMO	Hard Carbon	liquid	Metal	Spiral	Cylindrical
NEC-Lamilton	AABC-06	LMO/NCA	Hard Carbon	liquid	Pouch	Stacked	Prismatic
Sanyo	Unconfirmed	NMCLMO	Blend	liquid	Metal	Spiral	Cylindrical
GS Yuasa	Unconfirmed	LMO/NCA	Hard Carbon	liquid	Metal	Spiral	Prismatic
A123Systems	AABC-06	LFPO	Graphite	liquid	Metal	Spiral	Cylindrical
LG Chem	AABC-06	LMO	Hard Carbon	Gel	Pouch	Stacked	Prismatic
Samsung	Unconfirmed	LMO/NMC	Graphite	liquid	Metal	Spiral	Cylindrical
SK Corp	AABC-07	LMO	Graphite	liquid	Pouch	Spiral	Prismatic
EnerDel	USABC	LMO	LTO	liquid	Pouch	Spiral	Prismatic
AltairName	AABC-07	NMCLCO	LTO	liquid	Pouch	Stacked	Prismatic

図 6: 主要メーカのセルデザイン

— HEV と HEV 用 Li イオン電池の市場 —

2006 年 HEV 市場は 384,000 台で 2010 年までは年 3 割の増加で推移すると予測。Strong HEV は少なくとも 2015 年あたりまで主流でトヨタ自動車シェアも 6 割と予測。2006 年 HEV 用電池市場は 6 億ドル (5%) であるのに対し 2015 年は 2300 億ドル (36%) となる。トヨタ自動車の今後 4 年間の電池採用動向が Li イオン電池市場に大

大きく影響する。

NiMH についても言及して、現在 Ni の市場価格は石油に追従するように上昇している (図 7)。Li イオン電池のメタル材料費は NiMH よりも低いのだがその外の構成材料の価格が高く Ni の価格上昇がすぐに Li イオン電池に有利に働くとは考えにくい。二次電池全体の市場 (モバイル等含む) は NiMH よりも大きいのだが、高出力長寿命が求められる HEV 用では Li イオン電池のシェアは 2010 年でも 5%、2015 年でも 36%にとどまり本格的な PHEV 市場活性化もそれ以降だとしていた。

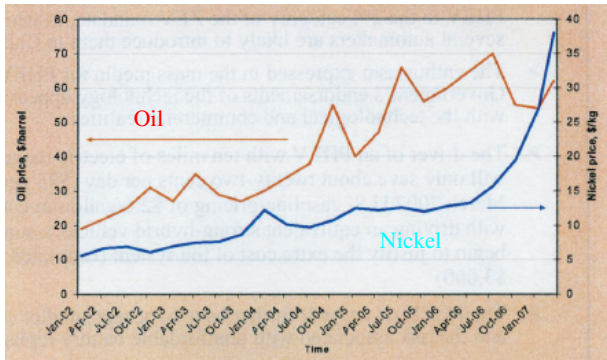


図 7: Ni と石油の価格上昇

5.2 シンポジウム

- AABC より市場調査、Moderate/Strong HEV 用途、PHEV 用途等の 5 セッション
- LLIBTA より電極・電解液材料、安全性、高出力用途の 4 セッション
- UCAP より性能改善、セルパフォーマンス、パックデザインと応用技術の 3 セッション

がそれぞれ行われた。

5.2.1 AABC

【Session 1 HEV 用電池市場動向】

「次世代代替燃料への消費者の関心調査」(Synovate Motorresearch: S. Miller)

「カリフォルニアの ZEV 規制」(California Air Resource Board: T. Andreoni) ZEV 規制とその成功。FCEV、BEV、PHEV、水素内燃自動車、乗り合い EV で ZEV クレジットを策定。AABC の一週間後にサンディエゴで開かれる委員会で各委員が報告。

「HEV 用電池技術の変遷」(Advanced Automotive Batteries: M. Anderman) 詳細はチュートリアル参照。

「今後の HEV 用 Li イオン電池市場/技術」(Institute of Information Technology: H. 竹下) 昨今のリコール問題は高容量、高出力が要求されている電池メーカーがかなり無理な設計をしていることが原因の一つ。しかし安全回帰へシフトしたので長期的に見ればよいのではとコメント。HEV 用 Li イオン電池市場はモバイル用を凌ぐことはない。その割に要求は高いので電池メーカーは厳しい立場にある。カソードとセパレータの価格がまだ高く、特にセパレータは少数企業により独占状態。

【Session 2 Moderate & Strong HEV 用電池】

「Li イオン電池の自動車分野参入にむけての課題」(Ford Motor Company: T. Miller) なぜ Li イオン電池か? ここ一年で Ni 価格が 3 倍に跳ね上がったから。特にデータの開示無くフォードとしてのコメントも無し。USABC の今後の課題と電池メーカーへの要望 (重量半減、体積 30% 減、寿命 15 年、150kmile、安全性、700-1000 ドル/kWh、低温特性改善) に始終した。

「Mild/Strong HEV のエネルギー管理技術」(General Motors Corporation: M. Verbrugge, J. Lo-Grasso) 新コンセプト電気自動車 Volt の紹介。フレックス車は現在 16 車種で 200 万台販売、ブラジルで強い。HEV 用電池への要望 (寿命 10 年以上、150kmile 以上の走行)。電池メーカーとの連携強化を強調。等価モデルを意用いた Li イオン電池状態推定アルゴリズムの紹介。

「HEV 電装機器の開発」(トヨタ自動車: K. 目黒) THS の電気まわりの進歩に関する発表。"プリウス" 販売 10 周年累計 96 万台。BMU ボード最適化により 40 % の小型化 (DENSO)。電圧検出方式の変更 (抵抗分圧式から計測器でよく用いられるフライングキャパシタ方式へ)、リレーやサービスプラグの素子も高電圧のアークを防止するなど工夫をしている。Li イオン電池の開発は十分に行っているとコメント。

「HEV 用先進 Li イオン電池の開発」(Automotive Energy Supply Company/Nissan: N. 吉岡) 日産自動車、NEC、NEC トーキンの新合併会社の戦略、電池開発概要発表。新会社が製造するラミネート型マンガン系電池は、NEC が小型携帯機器用、電動自転車用にいち早く開発してきたマンガン系活物質の技術とラミネートの技術の集大成である。自動車用にラミネートを採用した理由は、放熱が良いこと、および材料と製造プロセスが安い。ラミネートでは寿命を懸念する声があるが、実電池での試験によって 10 年 150kmile に耐える寿命を確認している。また、セルの膨張は、電極剤と電解液の材料選択で克服している。自動車用はコストが最重要課題となるので、セル、モジュールを標準化し、自動車以外を

含む多用途すべてに同じものを使っていく。セルは高出力用とエネルギー用の2種を持つ予定。

「HEV 用超格子合金を用いた NiMH 電池の開発」(Sanyo: I. 米津) Sanyo が民生用の小売 Ni-MH 電池 (Eneloop) に用いている AB5-AB2 系の超格子合金を用いた HEV 用電池を開発。これにより、低温特性 (0 での入出力が 2 倍) と高温自己放電特性の改善ができた。Ni-MH 電池も着実に進歩している。

「Nano リン酸 Li イオン電池技術と自動車分野への応用」(A123Systems: A. Chu) 開発した HEV 用 LiFePO_4 の紹介。同社の材料は独自であることを強調。しかし技術詳細を明かさずその内容にみるべきものがなかった。

【Session 3 PHEV に求められる性能】

「米国エネルギー省 PHEV 推進活動の最新動向」(US DOE: T. Duong) USABC のプロジェクト目標と予算。EV 走行距離目標は 10mile と 40mile の二本立て。予算は 2006 年 24.5 億ドル、2007 年 40.8 億ドル、2008 年 42.9 億ドルと年々増えている。日本の PHEV の国家プロジェクトは、2007 年度予算 17 億円と米国の 1/3 程度であるが、制度の違い等もあり単純に金額比較は出来ない。同程度のプロジェクトと考えて良いと思われる。目標値を見ると日本は、3 kWh-60 kW の電池を目指しており、これは上記 10 miles の 3.4 kWh-50/45 kW とほぼ同等であると思われる。

「PHEV 用エネルギーストレージとサイクル寿命」(AhmadPesaran, National Renewable Energy Laboratories: T. Markel) 実際のドライブパターンによる燃費の計測。

「PHEV 用電池への要求と初期試作品の評価」(Argonne National Laboratory: A. Rousseau) PHEV における電池要求と試作品の評価。

「プラグイン技術を取り入れた Hybrid Sprinter におけるけん引用蓄電装置」(Daimler Chrysler: D. Portmann) DC/EPRI の PHEV 走行試験である "Sprinter Project" が紹介された。Cargo/Wagon を PHEV に改造。Saft の Li イオン電池を 12 kWh (170kg) を搭載。燃費の 45 % 改善が実証できた。PHEV に関する発表は他にも 5 件あったが、何れも開発のフェーズが若く、机上検討、単なるデモ試作のレベルに留まっていた。その点では、DC 社のこの発表が最も先行している。ただし、それでも可能性確認実験の段階である。

「Li イオン電池システム: 自動車業界導入への向けて」(Johnson Controls-Saft: M. Andrew) 新会社の電池ラインアップの紹介。22 ~ 45Ah のエネルギー密度タイ

プ、30 ~ 60Ah の高出力タイプをそろえている。高出力タイプは 50%SOC 時に 3000W/kg。正極が NiCoAl 系、負極がグラファイト、電解液は LiPF_6 系を採用。DC をはじめ様々な自動車メーカーに (各社のプレゼンにあるように) 採用されており、試験結果のフィードバックを受けている。PHEV 用は 7Ah のものを用意している。40 10 年の寿命が期待できる。特長は低温特性の良さ。2008 年には Mild HEV にも実用化予定。GM と契約済み。プレゼン資料は当日見せるだけで、論文集にも非公開。ポスターも鉄系の電池に関するニュースリリースのみ [4]。

「PHEV 用電池のサイクル寿命」(Southern California Edison: L. Gaillac) DC と共同研究している "Sprinter Project" について、充放電試験による寿命評価。現在 20ヶ月目、2100 サイクル目で 8% の容量低下、6% の出力低下 (3000 サイクル、150kWh を目指す)。

「マグネシウムリン酸系 Li イオン電池の PHEV 適用」(Valence Technology: M. Kohler) プリウスに同社のマグネシウムリン酸系 Li イオン電池 "Saphion" を搭載して走行評価。

【Session 4 Micro & Mild HEV 用電池】

「HEV 用鉛蓄電池の可能性、限界、今後」(Ford Research and Advanced Engineering Europe: E. Karden) 回生電力も取れ、Micro HEV のニーズに応えられる。SLI (Starting, Lighting and Ignition) 用電池としてカーボンを添加して寿命を改善した Absorptive Glass-fiber Mats が高級車で使われている。

「BMW Efficient Dynamics powered by intelligent Energy Balancing」(BMW Group: Christian Diegelmann) BER (Brake Energy Regeneration) と ASSF (Auto Start Stop Function) を実現した HEV2 車種の紹介。キャパシタと組み合わせるとサイクル寿命改善。ICE がまだ可能性を持つのでさらに開発を進めると同時に Mild/Full HEV も開発する。

「パワーアシスト HEV 用鉛蓄電池の設計」(International Lead Zinc Research Organization: P. Moseley) Enersys, Effpower, 古河の鉛蓄電池を Mild/Medium HEV の電池として評価。HRPSoC (High Rates Partial State of Charge) で使用すれば十分機能を果たせる。

「HEV 用バイポーラ鉛蓄電池」(Effpower: B. Wahlqvist) 1999 年に Volvo と Gylling Optima Batteries の合併会社として設立。バイポーラ鉛蓄電池 (低コスト, Homogeneous Current Distribution, 低抵抗, 大電流流せる, 高電圧使用に向いている) をホンダインサイトに搭載し、燃費の評価。

「Graphite-Powered Batteries: Reinvigorating Lead-Acid Chemistry」(Firefly Energy: K. Kelley) 高出力可能な鉛蓄電池。同社の「3D cell」は温度上昇しにくく温度分布も拡散しやすい。鉛蓄電池はまだまだ可能性を秘めている。

「StARS 14+X のためのスーパーキャパシタ」(Valeo: B. Soucaze-Guillous) フランス政府の援助を受け、ルノー、GM、Volvo などの HEV 適用に向け EDLC を開発、加速テストを実施中。

【Session 5 特殊車用電池】

「HEV 用蓄電装置のクロニクル」(BAE Systems: T. Apalenek) 鉛蓄電池はまだ改善の余地がある。価格、安全性などトータル面から見ても今後も必ず残ってゆく。

「HEV 用 Li イオン電池パックの開発」(Magna Steyr: P. Pichler) BMU、空・液体冷却システム、ハウジング全てを自社で開発、トータルストレージソリューションを提案。2009 年に新たな Li イオン電池を発表予定。

「Long Beach におけるウルトラキャパシタシステムを搭載したハイブリッドバス運用報告とその評価」(ISE Corporation: T. Bartly) Maxwell の「Boostcap」を用いてハイブリッドバスを CA 中心に 12 年間運用。今年中に 270 台が CA を走る。DOD 半分まで使用し、容量は 244Wh。総自動車台数の 6.7%が Heavy duty 車であり、総エネルギーの 50%を使用し、80%の排気をしている。これをキャパシタハイブリッドによって改善する効果は普通車の HEV 化よりも非常に大きい。

「HEV 用蓄電装置への要求」(General Electric Global Research: R. King) 同社の HEV、EV 事業の歴史。10 年前に HEV 車、バスをすでに開発。現在は電車の回生システムを適用しているが要求は車よりも高い(年間 8,328 時間、温度環境・耐振動、寿命 20 年、250kmile)。

5.2.2 LLIBTA

【Session 1 最近の Li イオン電池素材の進歩】

— Part A 電解液 —

「安全性に対する電解液の役割」(宇部興産: Y. 牛越) 基本的に Li イオン電池内に入っているものは全て可燃性。難燃性の電解液開発努力は続けているが難しい。

「高性能塩と電解液添加物を用いた Li イオン電池の改善」(Argonne: K. Amine)

「電解液添加物による安全性と安定性の向上」(Chemetall Foote Corporation: J-C. Panitz)

「StabiLifeTM」の電解液塩」(Air Products and Chemicals: B. Casteel) StabiLife の商品説明。フッ素添加物濃度が高いとサイクル寿命良。

LiBOB、LiC₂O₄BF₂、LiB₁₂F_{12-x}H_x などの塩が検討され、長寿命、高い安全性、低価格をうたい FreedomCAR らの適用を売り込んでいる。しかしいまだ発展途上と思われる。

— Part B 正極剤 —

「LiFePO₄ の特性」(Sanyo: I. 米津) LiFePO₄ が次世代正極材料として注目されているが、実用化には Li の拡散を抑える必要がある。拡散層を抑える方法はいくつかあるが、その改善効果の評価方法が必要となるので、Cyclic Voltammetry 法を用いて見掛けの拡散層と電極抵抗を計測する方法を提案。

「カソード素材メーカから見た材料ロードマップ」(Unicore: K. Vandeputte) NiCoMn 系や混合系と LiFePO₄ について長短を解説。素材メーカとして正極材料の選定方法を性能、価格、材料費などレーダチャートで紹介。バランスがよいのは 3 種混合系。LiFePO₄ は材料費低い、大量生産はコスト高い。

「新しい高電圧カソード材料としてのマンガンリン酸」(High-Power Lithium: J. Miners) 2003 年よりトヨタ自動車とパートナー。次世代電池の正極材料として MnPO₄ を取り上げ、高い Co を使わず低価格で安全、かつ耐久性もよい。Nano 構造とカーボンコーティングによって飛躍的に性能向上。

「高性能 LiFePO₄」(Phostec Lithium & Saft America: T. Lars) LiFePO₄ を用いた新商品「VL10Fe」の説明。はじめは軍事向けプログラムから発展。従来品に比べ SOC が低くても出力が落ちない。50C 放電も可能な高出力電池。

「電解液への溶出を低下させた LiFePO₄」(ZSW: M. Wohlfahrt-Mehrens) LiFePO₄ 電極の電解液への Fe²⁺ 溶出の解析。リン酸鉄や三価鉄の純度が問題。最適設計された LiFePO₄ やカーボンコーティングをすると溶出も少なくサイクル寿命も長い。

「次世代素材としてのリン酸」(Valence: Y. Saidi) 次世代の Li イオン用バナジウムリン酸とフルオロリン酸塩の紹介。

リン酸塩系は PO₄ の強い共有結合に基づく酸素との強い親和性により、酸化物系よりも酸素を放出しにくく熱的安定性に優れている。しかし低温特性や電圧の低さ、製法の複雑さなどから総合的な評価が必要となる。

【Session 2 長寿命が求められる用途】

「経年変化と寿命予測」(Saft: M. Broussely) 衛星用 NCA Li イオン電池の寿命予測

「衛星用大容量電池の寿命データと予測モデル」(GS Yuasa Technology: T. 井上) 宇宙航空機用 GYT100Ah セルの容量低下メカニズムとその推定モデルを改良。カレンダー寿命は負極の Li イオン消費により容量低下は時間の平方根に比例。サイクル寿命は正極の抵抗成分増加によりこちらもサイクルの平方根に比例。

「静止衛星のためのライフテストと予測」(Lockheed Martin Corporation: M. Isaacson)

「カレンダー寿命とサイクル寿命のテストのための Path Dependence」(Idaho National Laboratory: J. Belt) Saft HP-12LC Li イオン電池のサイクル/カレンダー寿命テスト。

「正極の役割: 大容量セルのインピーダンス増加」(Argonne National Laboratory: D. Abraham) Freedom-CAR より援助を受けている。高出力用 Li イオン電池の正極に起因する内部抵抗増加メカニズム。経年による抵抗増加は酸化物と電解液との反応で生じた酸素量増加に起因する。

寿命予測技術は宇宙航空用など長期使用電池で先行した研究が進められている。自動車用途とは温度環境など求められる性能も異なるが、このような予測技術は開発の参考になる。

【Session 3 高出力使用時の安全性と耐久性】

「安全性解析とハザードリスクの低減」(Daimler Chrysler: C. Ashitiani) 米国三大自動車メーカーが主導している USABC として電池の新しい安全評価手法 HM-RMA (Hazard Modes & Risk Mitigation Analysis) を策定。詳細については 4 章のキーワードを参照。

「熱暴走のセルモデルにおける熱拡散の解析」(National Renewable Energy Laboratories: G-H. Kim, A. Pesaran) 温度上昇から熱暴走過程への 3D シミュレーション。

「内部短絡による熱シミュレーション」(三菱化学: K. Adachi) 熱暴走過程の 3D シミュレーション。

「安全性の理解」(TIAX: B. Barnett) Li イオン電池における安全性の理解。内部短絡時は 40 から 240 まですべて約 1 秒以内で進行する可能性がある。内部短絡は完全に排除できないので濫用に対するロバスト性が極めて重要となる。

「Abuse Tolerance テストにおける重要パラメータ設

計」(Sandia National Laboratories: P. Roth) Freedom-CAR より援助を受けている。濫用に対するロバスト性テストを行っている。正負極の効果は次第に分かってきており、正極への添加物や改良により温度耐性は高められるがまだ決め手となるものは見つかっていない。反応機構解明の研究継続が重要。

内部短絡による異常発熱はシミュレーションにより半定量的な解析が可能である。

【Session 4 高性能電池の応用】

「台湾における LiFePO₄ を用いた大容量 Li イオン電池開発とその市場」(Industrial Technology Research Institute: M-H. Yang) 台湾における高出力用 LiFePO₄ の開発と市場動向について発表。リン酸金属系の、材料費低さ、安全性、環境負荷低いことを強調。しかし LiFePO₄ は特許問題や大量生産が困難という問題もある。半官半民である ITRI が開発を牽引している。電動二輪車から大型 Li イオン電池投入を実施してゆく。

「商用航空機における Li イオン電池」(Boeing Company: S. Chalasani) 航空業界でも騒音や No_x の排出、また原油高や高出力要求などの問題があり、効率のよい航空機の開発が進められている。Saft やジーエスユアサが供給。連邦航空局 (FAA) がセル温度や圧力、放出ガスや液体を厳しく規定している。温度帯域要求は自動車とよく似ているが、寿命は 5 年から 10 年ほどでよいので少し短い。始動時に 1000A 程度となり、その後 40 秒間ほどは数百 A が必要で高出力用途である。

「パワーツール用製品とその他のアプリケーション」(A123Systems: R. Fulop) 発表資料を論文集に入れない、資料が必要な者は名刺と交換で後日配布などと徹底した情報管理を行っている。GM とのハイブリッドバス向けシステム開発について発表。カナダの Hymotion というプリウスを PHEV 化するシステムを販売する企業にも提供している。またコードレスパワーツール用電池シェア 40%。企業情報については 4 章のキーワード参照。

「EV、HEV 用電池パックの開発」(Tesla Motors: JB Staabel) 2003 年に設立されたスポーツ型電気自動車“Tesla Roadster”を販売するベンチャー企業。販売価格は 92,000 ドルから。3.5 時間の充電で 320km の走行をうたう。185kW の誘導機を搭載。Li イオン電池諸元は 450kg、125Wh/kg、366V。

「HEV、PHEV 用ナノ Li₄Ti₅O₁₂ の負極」(Enerdel: Taison Tan, Altair Nanotechnologies: Vesco Manev) 「安全性、高容量、高出力へと改良した PHEV 用セル」(American Lithium Energy: Jiang Fan) 負極に

Li₄Ti₅O₁₂、正極に LiFePO₄ を使うことにより従来の Li イオン電池よりも出力、寿命の改善を試みて新規性を打ち出しているが、エネルギー密度の低下は避けられない。実用化を目指した観点から本当の解がどこにあるかは総合的に判断しなければならない。

「SK の Li イオン電池システム」(SK Corporation: J-K. Oh) 韓国の石油系財閥である SK グループが従来のセパレータなどの Li イオン電池材料供給企業から Li イオン電池への本格参入を進めており、今回はプリウスを改造した HEV と PHEV を展示していた。韓国ではその他に Samsung、LG 化学が開発を進めているが両者が今回発表がなかったのと対照的に急成長している印象である。

「Active 対 Passive 熱管理手法」(Illinois Institute of Technology: Robert Selman) アクティブとパッシブ温度管理 (PCM) の比較。特にパッシブ温度管理について電池を収納する PCM-Graphite Matrix が熱を拡散して熱暴走状態に陥るのを回避している。

5.2.3 UCAP

【Session 1 EDLC 構成物の進歩】

「現在のウルトラキャパシタ技術」(W. L. Gore & Associates: D. Zuckerbrod)

「スーパーキャパシタと電池用 Nanofiber セパレータ」(Dupont Nonwovens: P. Arora)

「大容量非対称電極ニッケルカーボンスーパーキャパシタ」(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization: R. Newnham)

「大容量キャパシタと管理システム」(Power Systems: H. 中村) 佐賀大学と Power Systems が共同開発した”NSC(Nano Storage Capacitor)”の紹介。自動車のブレーキ・アシスト用途にとどまらず、より電池への依存度の高いハイブリッド車への適用も想定。エネルギー密度は 19.5Wh/kg(体積当たりのエネルギー密度を 30Wh/l 程度) で NiMH の約半分、Li イオン電池の 4.5 分の 1。さらに「将来は 30Wh/kg ~ 40Wh/kg も可能と見ている」(佐賀大学芳尾名誉教授) とコメント [5]。

【Session 2 セル性能】

「新しいウルトラキャパシタと Li イオン電池との比較」(UC Davis: A. Burke) 新しいウルトラキャパシタデバイスと車載用 Li イオン電池の比較。LS Cable(Korea)、BatScap(France)、PS/三井、ApowerCap(Ukraine)、富士重工の製品それぞれに対し定電流充放電特性を計測。

Li イオン電池は A123Systems と GAIA、Altairnano を評価。やはりキャパシタの利点はサイクル寿命、深い DOD、低温特性にあると言及。

「電気化学キャパシタの性能評価」(Sandia National Laboratories: N. Clark) 主に濫用テスト結果を中心に発表。

「Mild HEV への安全で高出力ウルトラキャパシタ”BatScap”の紹介」(BatScap: F. Tertrais)

「ウルトラキャパシタの応用技術」(Nesscap: S. Kim)

【Session 3 パックデザインとアプリケーション】

「車載用二重層キャパシタの展望と技術課題」(Volkswagen: M. Ullrich)

「Hybrid high Energy Electrical Storage (HyHEELS)」(VITO: E. Verhaeven)

「定出力条件下におけるウルトラキャパシタの効率」(Maxwell Technologies: J. Miller) ウルトラキャパシタの電気等価回路を作成し、効率のシミュレーションを行った。Li イオン電池とキャパシタの組み合わせで相互の弱点の補償し、長所同士を生かすことができる。

「Mild HEV の排出抑制のためのウルトラキャパシタモジュール」(BatScap: F. Tertais)

5.3 ポスターセッション

Li イオン電池に関して発表している参加 24 社のうち 12 社が正極材料の発表を行い、正極材料への関心の高さがうかがえた。特に LiFePO₄ 系への注目度が高く Sanyo、Saft、ZSW(独)、Americal Lithium Energy の発表があった。

東燃 (ExxonMobil Chemical と共同) は従来のものよりも燃えにくいセパレータを開発し量産化へ移ると発表していた。

この他の素材で、Valence Technologies 社からエネルギー密度を高めた次世代 Li イオン電池用正極剤として二種類のバナジウムリン酸とマグネシウムリン酸についての発表された。

Altair Nanotechnologies と Argonne National Laboratory から負極剤として Ti を用いた電池の発表が行われた。

5.4 展示会

展示会参加企業は、Lambda Americas や PEC Corporation、Arbin Instruments といった二次電池やキャパシタのテストツールメーカーが 3 割強を占めた。

続いて多かったのが Li イオン電池メーカーで、注目としては A123Systems が Li イオン電池を電動ドリルや電動鋸などの工具に搭載したデモンストレーションがありパワフルな切れ味で人目を引いていた。

さらに SK Corporation、Nilar 各社が現行の”プリウス”の NiMH 電池を各社の Li イオン電池に置き換えた試作車を展示していた。特に SK 社では講演、ポスター発表も行っており、オリジナルプリウスの NiMH では加減速を繰り返すと 50 度まで上昇してしまうのに対し、同社の Li イオン電池であると 40 度までしか上昇しないという実験結果を発表していた [5]。

6 全体のコメント

ガソリンが高い (LA 地区で 1L=約 100 円で以前の 3 倍)。朝夕高速道渋滞緩和のため 2 人乗車していれば走行できる Car Pool Lane がハイウェイに設置されていた。公共電車 (Tram) が Long Beach-LA-Hollywood 間にできていた。一方環境推進派 Catarina 島が大きく変遷していた (30 年前は EVonly だったものが現在はガソリン車に駆逐されていた)。(トヨタ自動車: 寺谷達夫氏)

電池メーカーは米国勢が相当に前面に出て来た印象を受けた。特に A123Systems と JCI-Saft の存在感が圧倒的であった。JCI-Saft は、自動車メーカーの発表にも同社製品の評価報告がなされ、DOE の考え方にもニッケル系を最終型ととらえる節が感じられた。一方、JCI-Saft そのものは、全体セッションでもポスター発表でも多くを語らなかった。A123Systems は、 LiFePO_4 の解析に関する発表であったが、物性的な差に関して明確な証拠は提示されなかった。(GS Yuasa Corporation: 北村雅紀氏)

HEV 用電池として Li イオン電池を使う機運が、自動車メーカーを中心に従来以上に高まってきており、実際にそのような発言がしばしばあった。以前のように安全性を懸念する否定的な発言が見られなくなった。また、HMRMA のような (安全性に対するシステムチックな評価) 提案も出てきた。商品化開発競争の段階に入ってきたと思われる。(日立ピークルエナジー: 堀場達雄氏)

7 おわりに

現地に到着して、さっそく車を借りたのですが、ハイウェイを走っていてもポンコツ車はほとんど見られず、セダンタイプカーのほとんどが日本の自動車メーカーのものでした。ガソリン価格がここ最近 3 倍も値上がりしていることから燃費の悪い車は淘汰されているのでしょう。

その一方で Long Beach 南高速艇で一時間のところに Catarina 島という「30 年前来た時は電気自動車しか走っていない」島があるとの話 (寺谷委員長談) でしたが、実

際行って見るとガソリン車やカート改造車がばんばん走っていて、皆さん落胆していました。坂も多い島なので、島長の方針で変わってしまったとのこと。電池技術者の方たちは電池を改良してより使い勝手のよいものを開発しようと意気込んでいらっやったのが印象的でした。

謝辞

本報告書はトヨタ自動車寺谷様、ジーエスユアサ北村様の報告書を参考にし、筆者自身の 5 日間の参加を通して勉強したことを含めてご報告させて頂きました。

今回の出張は電気学会自動車技術委員会より学会参加費の補助を頂いたことをここに記し、感謝申し上げます。

渡米中にも自動車技術委員会委員長の寺谷様をはじめとしたトヨタ自動車関係者様、ジーエスユアサ北村様には大変お世話になりました。日立ピークルエナジー堀場様、Sanyo エナジー研究所米津様には若輩者である私の質問にも丁寧にお答え頂き大変お世話になりました。ご関係者の皆様に心より御礼申し上げます。



図 8: 右上:プリウスに搭載された Li イオン電池 (米; Nilar 社展示)、左:筆者 (左) と Anderman 氏 (中) と寺谷氏 (左)、下:会場の Hyatt ホテル前で最先端蓄電装置技術者の皆様と共に

参考文献

- [1] EVS22 論文集, パシフィコ横浜, 2006 年 10 月
- [2] トヨタ自動車 寺谷氏報告書
- [3] 「次世代自動車用電池の将来に向けた提言」
<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g60824b01j.pdf>
- [4] GS Yuasa Corporation 北村氏報告書
- [5] 日経 Tech-on! AABC2007 報道特設サイト
<http://techon.nikkeibp.co.jp/NEWS/AABC2007/>