

ウルトラバッテリーの開発

Development of UltraBattery®

中島 秀仁^{*1}
Hidehito Nakajima

本間 徳則^{*1}
Tokunori Honma

緑川 淳^{*1}
Kiyoshi Midorikawa

赤坂 有一^{*1}
Yuich Akasaka

柴田 智史^{*1}
Satoshi Shibata

吉田 英明^{*1}
Hideaki Yoshida

橋本 健介^{*1}
Kensuke Hashimoto

荻野 由涼^{*1}
Yusuke Ogino

手塚 渉^{*1}
Wataru Tezuka

三浦 優^{*1}
Masaru Miura

古川 淳^{*1}
Jun Furukawa

L. T. Lam^{*2}

菅田 純雄^{*3}
Sumio Sugata

概要 制御弁式マイクロHEV (Hybrid Electric Vehicle) 用ウルトラバッテリー (UltraBattery, 以下UB)を開発した。ウルトラバッテリーは鉛蓄電池と非対称キャパシターを同一セル内にハイブリッドしたバッテリーである。従来型の蓄電池と比較し約2倍のサイクル寿命特性を示した。さらにスマートグリッド用途に据置用ウルトラバッテリーを開発した。部分充電状態での駆動において、高いエネルギー効率・長寿命サイクル寿命特性・優れた回復特性を示した。この据置用ウルトラバッテリーは、経済産業省補助事業「北九州スマートコミュニティ創造事業」にて実証試験中である。

1. はじめに

近年地球温暖化対策の一環として、自動車によるCO₂排出低減や再生可能エネルギーの利用のニーズが高まっている。自動車の燃費規制或いはCO₂排出規制は国内をはじめ、米国や欧州においても年々厳しくなっており、世界の各自動車メーカーは燃費改善効果があるアイドリングストップ (ISS) 車、マイクロHEV、フルHEVを次々と市場投入してきている。更に再生可能エネルギーの利用は温暖化対策のみならず、昨今の電力事情による電力逼迫問題やスマートコミュニティによる電力の有効利用の観点からもニーズが高まっている。

そうした中で蓄電池が注目され、その役割もエンジン始動や非常用電源を主とした従来のスタンバイユースから、充放電を頻繁に繰り返すサイクルユースが求められる。

本稿ではそのようなサイクルユース用に開発したUBに関し、車載用及び据え置き用の特性を紹介し、最後に経済産業省補助事業「次世代エネルギー・社会システム実証事業」の1つである「北九州スマートコミュニティ創造事業」に関し紹介する。

2. 車載用ウルトラバッテリー

ISS車とはアイドリングストップ機能を備えた車であり、マイクロHEVとはアイドリングストップ機能に加え制動エネル

ギー回生による充電機能を備えた車をいう。フルHEVとはモータと発電機を備えたHEVであり¹⁾、発進・低速走行時は電気のみで走ることが可能である²⁾。

欧州における自動車・電池事情について述べる。2012年におけるマイクロHEVの販売台数はEU27ヶ国全体の自動車販売台数の約40%を占め、2015年には60%以上に達すると予想されており³⁾、このことからマイクロHEV用の電池市場は今後大きく伸びると考えられる。

マイクロHEVと従来の自動車との間では、搭載されている鉛蓄電池の負荷が大きく異なる。例えば、マイクロHEVではアイドリングストップ中はオルタネータによる発電が行われないため、ライトやオーディオなどの電動装備への電力は全て電池から供給され従来より深い放電が行われる。また従来のシステムに比べてアイドリングストップの度にエンジンを再始動するため、大電流での放電回数も増加する。更に、回生ブレーキによる充電を効率よく受け入れる必要があるため、電池のSOC (State of Charge: 充電状態) を90%前後に下げたPSOC (Partial State of Charge: 部分充電) 状態で運用されるといわれている。このため、マイクロHEV用鉛蓄電池には充電受け入れ性とPSOC状態での耐久性が求められる⁴⁾。これらのことから、制御弁式マイクロHEV用UBの開発を行った。

2.1 制御弁式マイクロHEV用UBの開発

ウルトラバッテリー (UB) とは、同一セル内に鉛蓄電池と非対称キャパシターを組み込んだハイブリッド型バッテリーであり、図1に概観、図2に構成図を示す⁵⁾。このUBは従来の鉛蓄電池では難しいとされたPSOCと大電流パルス充放電が組み合わせられた過酷な条件下で、使用が可能である^{6)~9)}。

今回マイクロHEVに適したUBを開発するために、これまで

* 古河電池 (株) 戦略企画室 UB事業化部

*2 CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization), Division of Energy Technology, Melbourne, Australia

*3 古河電池 (株) 技術開発本部 新事業推進室

にマイルドHEV用として開発した36 V-VRLA (Valve Regulated Lead Acid: 制御弁式鉛蓄電池) の高性能技術を一部取り入れ、更に高性能化を図った。その項目を以下に示す¹⁰⁾。



図1 制御弁式マイクロHEV用UBの概観
Appearance of the valve regulated UltraBattery for micro-HEV applications.

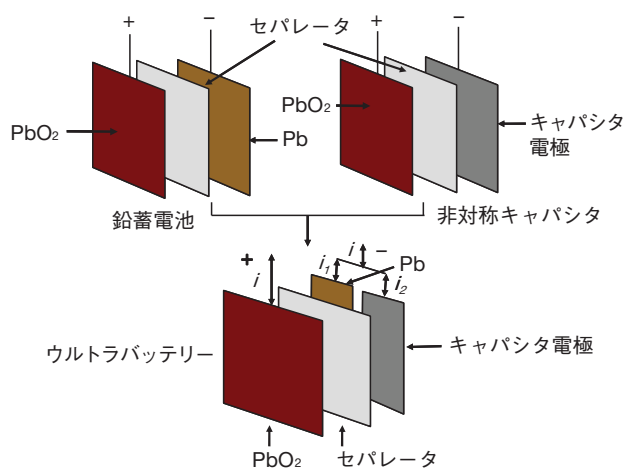


図2 ウルトラバッテリーの構成
Construction of UltraBattery.

2.1.1 正極板

正・負極活物質は充放電時に溶解析出を繰り返す。正極活物質はこの溶解析出により、徐々に元の強固な骨格構造が失われ、軟化を引き起こす。そこで正極活物質の耐久性(軟化抑制)を向上させるため、従来のものより高密度の活物質を採用した。また、正極格子合金には高温環境下での高耐食性、機械的特性の長期安定性を確保するため、弊社が開発した「C-21合金」を採用した¹¹⁾。

2.1.2 正負極格子

出力特性の向上手段として極板構成枚数、格子形状、格子寸法の最適化が挙げられる¹²⁾。活物質の利用効率を上げるには電極の電位分布が均一であることが望ましいので、コンピュータシミュレーションにより格子形状の最適化(補強格子の追加、ファインメッシュ化)を行い、その結果を図3に示す。改善前後で電位分布が改善されていることが確認できる。

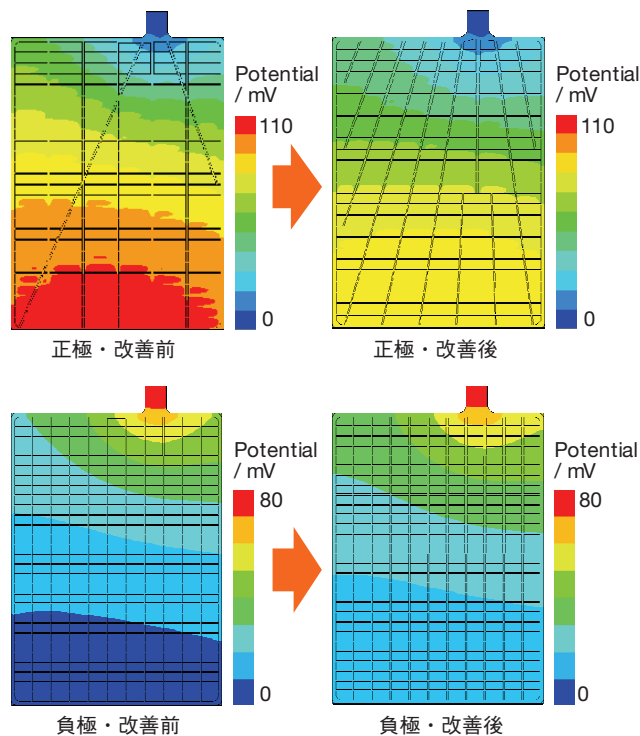


図3 正・負極格子の電位分布解析
Distribution of potential analysis.

2.2 マイクロHEV用UBの寿命試験

2.2.1 試験条件

マイクロHEVでは回生ブレーキによる充電を効率よく受け入れるため、電池のSOCを90%前後に下げたPSOC状態で運用されるといわれている。今回の試験ではSOC90%より厳しいSOC70%の条件で試験を行うと共に、SOCによる電池寿命への影響を調査するためにSOC80%、90%についても試験を行った(試験条件①SOC70%、②SOC80%、③SOC90%)。試験プロファイルは最大放電電流4CAのパルス充放電パターンとした。

2.2.2 試験結果

図4にSOCと容量回転率の関係を示す。試験条件は①～③であり、DOD (Depth of Discharge: 放電深度) が5%の試験である。比較のため同容量の従来型蓄電池のSOC70%での結果も示す。容量回転率とは、電池が寿命になるまでに可能な放電電気量の総和を電池の定格容量で割ったものである。容量回転率を比較することで寿命サイクルの比較が可能である。

まずSOCと容量回転率の関係をみるとSOCが70%、80%、90%と高くなるにつれて容量回転率も大きくなる結果となったものの、SOC70%においてUBと従来型電池を比較すると、UBは従来型の約1.8倍の容量回転率を示した。この結果は、UBの方が従来型バッテリーより長寿命であることを示している。

試験後これらの電池を解体した結果、従来型電池では正極活物質の軟化と負極活物質の顕著なサルフェーションが見られたのに対し、UBでは正極活物質の軟化は確認されたが、目立った負極活物質のサルフェーションはほとんどなかった。

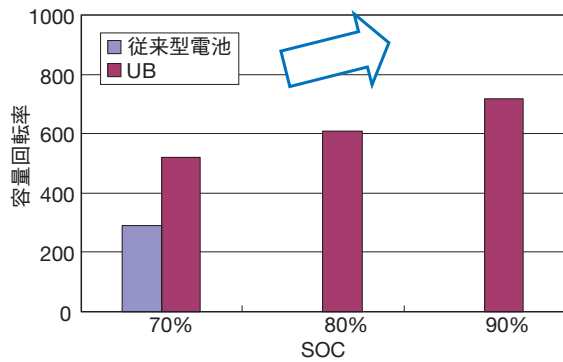


図4 SOCと容量回転率の関係
Relation between SOC and capacity turnover.

3. 据置用ウルトラバッテリー

据置用蓄電池は電力貯蔵や出力平準化のデバイスとして期待されており、大電流充放電、PSOC条件下での長寿命性能が求められている。今回、このような用途に適した据置用UBを開発した。

3.1 PSOC状態における特性評価

3.1.1 Wh効率試験

据置用UBのPSOC状態での特性を報告する。据置用途で利用される場合10年以上の寿命が期待される。そのため、エネルギー効率が重要な焦点となる。

今回、UBのWh効率を算出すべくUB1000 (2 V・1000 Ah/10 h) を用いて表1に示す試験条件で評価を行った。10%毎の設定SOCになるようにSOCを調整し、0.1C₁₀A～0.6C₁₀Aのレートで30サイクルの充放電を行い、その後回復充電を行う。1サイクルの充放電電気量は定格容量の10%に相当する。運用時1日に放電する総電気量を定格容量の50%と仮定すると、5サイクルが1日分の充放電電気量となる。よって30サイクルは6日間の運用に相当する。1週間のうち1～6日まで実運用を行い、7日目に回復充電を行うことを想定した試験条件である。

図5にサイクル試験中のWh効率を示す。図5から分かるように0.1C₁₀Aの充放電の場合、SOCによって差はあるが91%～94.5%という高いWh効率を示した。放電0.6C₁₀A-充電0.45C₁₀Aでサイクルを実施した場合、電圧の分極が大きくなるためWh効率が低下する傾向となったが、それでも尚83%～87%と高いWh効率を示した。

表1 Wh効率試験条件
Condition of Wh efficiency test.

	充放電率 (C ₁₀ A)	SOC (%)	備考
① 放電	0.1	10～100% (10%毎)	SOC調整
② 休止	—	—	10min
③ 放電	0.10 0.20 0.40 0.60	—10%	③④の充放電を30回繰り返す
④ 充電	0.10 0.20 0.40 0.45	10%	
⑤ 休止	—	—	10min
⑥ 充電	0.2	100%	回復充電

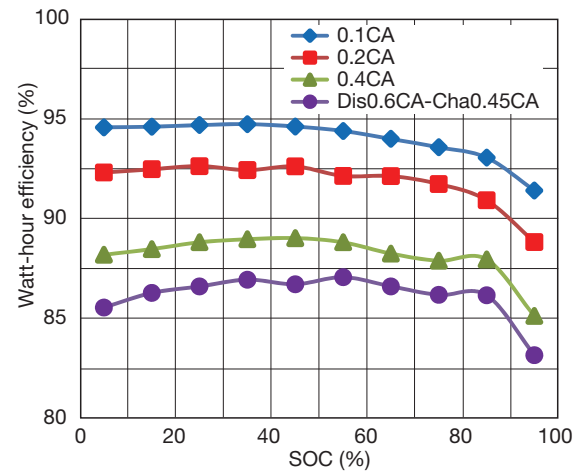


図5 Wh効率試験結果(サイクル試験のみ)
Result of Wh efficiency test (cycle test only).

3.1.2 入出力特性試験

次にPSOC状態において入出力特性試験の結果に関し報告する。図6にSOC50%における入出力試験プロファイル(図6中の赤線で示す)を示す。SOCを50%に調整した後、充放電電流をそれぞれ0.1C₁₀A、0.2C₁₀A、0.3C₁₀A、0.4C₁₀A、0.6C₁₀A、0.8C₁₀A、1C₁₀Aと振り(図6中の青線で示す)試験を行った。環境温度は25℃である。各レートでの充放電を30秒間行い、各充放電後には10分間の休止を設けた。電池電圧の動作可能範囲は1.8 V～2.35 V(図6中のオレンジ線で示す)とした。これは放電電圧が下限1.8 Vを下回ると過放電によって短寿命となる恐れがあり、充電電圧が上限2.35 Vを上回ると電解液中の水分が電気分解により液枯れを促進するためと充電エネルギーの損失につながる恐れがあるためである。

図から分かるように放電電圧はいずれの電流値でも下限電圧1.8 Vを下回ることには無かったが、充電電圧では0.8C₁₀Aと1C₁₀Aにおいて上限電圧の2.35 Vを上回っているのが確認できる。これより、SOC50%の場合最大充放電電流は放電が1C₁₀A、充電が0.6C₁₀Aということが確認できた。この値は従来型電池よりも高い値を示している(当社比)。

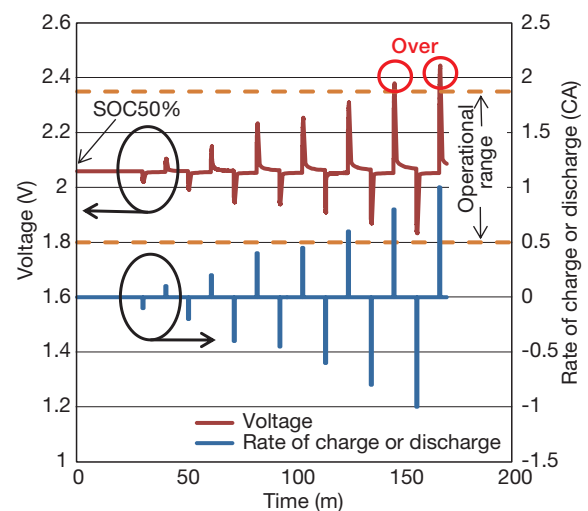


図6 入出力特性試験プロファイル
Input and output characteristic test profile.

3.2 サイクル寿命特性

3.2.1 PSOC サイクル寿命試験

UB1000 (2 V-1000 Ah/10 hr) を用いて長期間PSOC状態で運用した際のサイクル特性を評価した。試験条件を(1)～(3)に示す⁹⁾。

- (1) サイクル条件 (温度: 25℃)
 - ・SOC60%からスタート
 - ・放電: $0.1C_{10}A \times 3 \text{ h}$
 - ・休止: 1 h
 - ・充電: $0.1C_{10}A \times 3 \text{ h}$
 - ・休止: 1 h
- (2) 回復充電条件 (温度: 25℃)
 - ・90サイクル (1ヶ月) 毎に実施
 - ・充電: $0.1C_{10}A$, 充電電圧 2.45 V $\times 20 \text{ h}$
- (3) 回復充電後に10時間率容量試験 (温度: 25℃)
 - ・放電: $0.1C_{10}A$, 終止電圧 1.8 V

この試験はSOC60%⇔SOC30%を1日3サイクル繰り返し、90サイクルごとに回復充電を実施してSOCを100%まで回復させ、その後 $0.1C_{10}A$ 放電容量推移を確認するものである。

通常、鉛蓄電池はこのようなPSOC運用でサイクルを繰り返す場合、硫酸鉛の結晶が成長し放電容量が減少するのを防止するため1週間毎に回復充電 (満充電) を行い、極板に蓄積した硫酸鉛を正極で酸化、負極で還元することで除去しなければならない。この試験では1ヶ月間回復充電を実施しないためPSOC評価としてはより厳しい試験条件と言える。試験電池は従来セルとUBを用いた。

初期容量維持率を図7に示す。縦軸は $0.1C_{10}A$ 容量の初期容量維持率 (%) を示す。従来セルは270サイクル経過後の容量維持率が約93%と緩やかな低下傾向を示している。

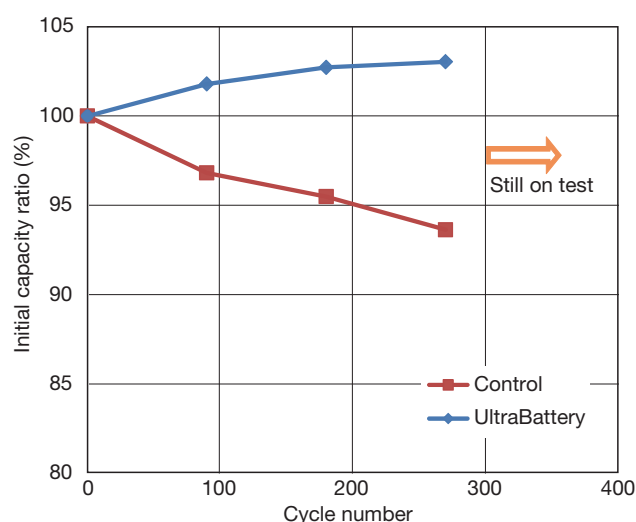


図7 PSOCサイクル試験における初期容量維持率推移
Changes of initial capacity ratio under the PSOC cycle test.

これに対して、UBは270サイクル経過後も103%以上を維持し、PSOC条件でのサイクル特性に優れていることが分かる。また、これは優れた回復充電特性であるとも言える。

図8にサイクル試験180サイクル後の回復充電中の正負極電位推移を、図9に180サイクル後の回復充電中の充電電流と充電容量の推移を示す。

図8の従来セルの負極電位が回復充電開始と共に卑側へ分極しているのが分かる。これはPSOCサイクル試験中、負極活物質中に硫酸鉛の結晶が成長蓄積し抵抗となった為である。UBの負極電位には大きな分極が見られなかったことから、UBではPSOCサイクル試験中における硫酸鉛の蓄積を抑制しているものと考えられる。また負極電位の分極が小さい分、図9から分かるように充電電流の垂下も遅く、それに伴い従来セルよりも充電容量が大きくなっている。またUBは従来セルに対し、優れた充電受け入れ性を有していることが分かる。

UBは従来の鉛蓄電池と比べて大幅に回復充電実施間隔を延長できる可能性を有している。回復充電実施間隔の延長により回復充電電気量削減や運用効率向上、Wh効率向上が期待できる。

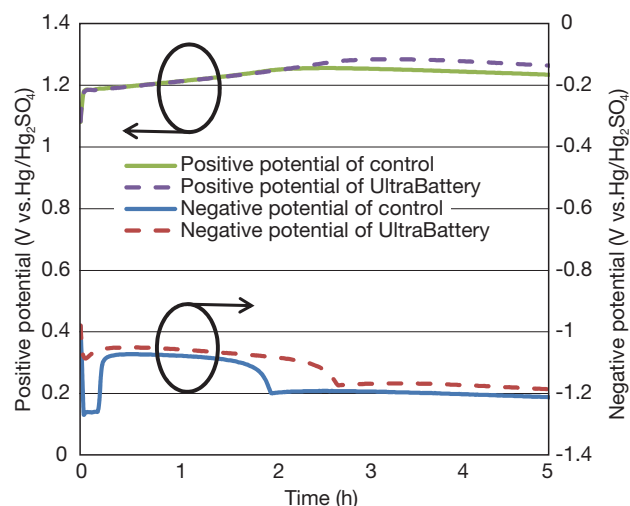


図8 180サイクル後の回復充電中の正負極電位推移
Changes of positive and negative potential during recovery charge after 180 cycle test.

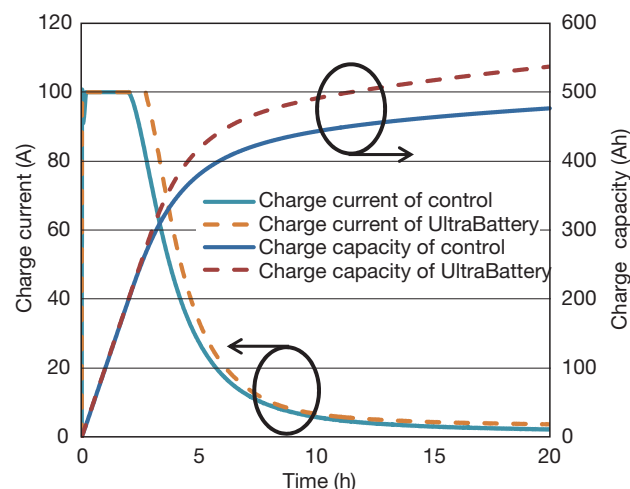


図9 180サイクル後の回復充電中の充電電流と充電容量の推移
Changes of charge current and capacity during recovery charge after 180 cycle test.

3.2.2 HR-PSOC サイクル寿命試験

次にPSOC条件下において、高レートの充放電電流でサイクル試験を繰り返すHR-PSOC (High Rate Partial State of Charge) サイクル試験を行った¹³⁾。評価にはUB500 (2V-500 Ah/10 hr) のUBを用い、比較には同容量の従来型鉛蓄電池を用いた。周囲温度は25℃として、放電電流 $1C_1A$ でSOCを50%に調整した後、放電 $1C_1A \times 6$ 分、休止5分、充電 $1C_1A \times 6$ 分、休止5分のサイクルを1000サイクル繰り返した後、 $1C_1A$ 容量試験を行った。また、サイクル中に充電終止電圧2.45 V、放電終止電圧1.75 Vに到達した場合、 $1C_1A$ 容量試験を行って再度サイクル試験を継続した。

図10にサイクル試験中の放電末期電圧推移、図11に充電末期電圧推移を示す。サイクル試験中の放電末期電圧推移には大きな差はないが、充電末期電圧についてはUBではほとんど充電終止電圧に達することは無いのに対し、従来型蓄電池では電圧が頻繁に充電終止電圧に達している。これは、UBでは充電電圧は安定しており、良好な充電受入性が維持されていることを示している。

図12は $1C_1A$ 初期容量維持率を示す。 $1C_1A$ の容量維持率が80%に低下したところで比較すると、UBは従来型鉛蓄電池の2倍以上の寿命を示している。UBはPSOC条件下、高レート

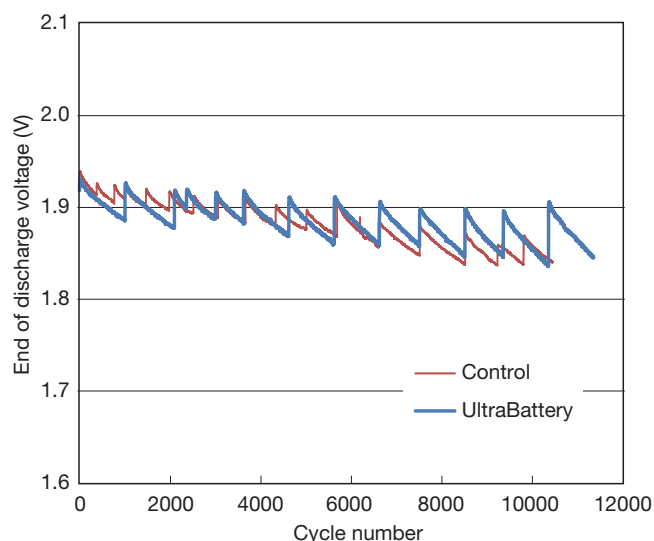


図10 HR-PSOCサイクル中の放電末期電圧推移
Changes of end of discharge voltage
under the HR-PSOC cycle test.

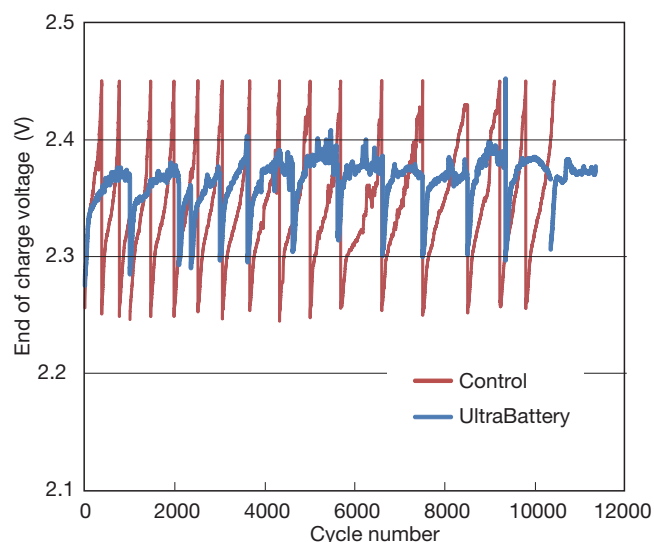


図11 HR-PSOCサイクル中の充電末期電圧推移
Changes of end of charge voltage under
the HR-PSOC cycle test.

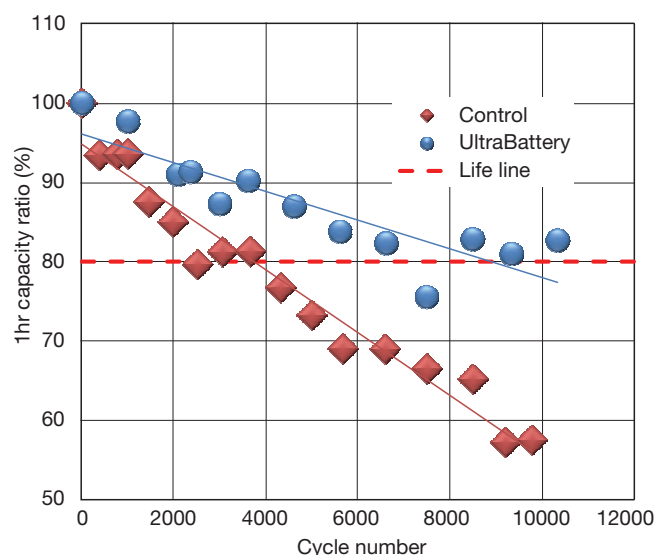


図12 HR-PSOCサイクルにおける初期容量維持率推移
Changes of initial capacity ratio under the
HR-PSOC cycle test.

4. 北九州スマートコミュニティ創造事業参画

経済産業省の次世代エネルギー・社会システム実証を行う4地域の一つに北九州市八幡東田地区が選定され、CO₂の50%削減や、新エネルギー導入時の電力品質維持を目的としたスマートコミュニティ創造事業が行われている¹⁴⁾。

この事業の中で弊社は地域エネルギーマネジメントシステム (CEMS) と連携しエネルギーの需給調整や災害時や大規模停電時の電力供給を目的として、九州ヒューマンメディア創造センターにUB100-6×32個 (図13)、前田地区にUB1000×336個 (168直列×2並列) (図14)、いのちのたび博物館にUB500×192個 (図15)、UB100-6 (6 V-100 Ah/10 hr) ×32個の設置を完了し、2012年度より実証試験を開始した。今後、エネルギー効率や均等充電間隔、蓄電池長寿命化の観点からウルトラバッ

テリーの優位性をより明確にする。

なお、本事業はNEDO共同研究「蓄電複合システム化技術開発」の成果並びに経済産業省補助事業「次世代エネルギー・社会システム実証事業」により実施している。



図13 UB1000 × 336セル 前田地区
UB1000 × 336cells Maeda Area.



図14 UB500 × 192セル いのちのたび博物館
UB500 × 192cells Museum of Natural History
and Human History.



図15 UB100-6 × 32セル 九州ヒューマンメディア創造センター
UB100-6 × 32cells Kyushu Human Media Center.

5. 蓄電池管理システム

蓄電池管理システム-BMS (Battery Management System) は蓄電システム中の蓄電池保護や残容量把握、システムの高信頼性を保持するうえで重要なシステムである。今回、古河電気工業(株)と共同開発のもと北九州スマートコミュニティ創造事業蓄電システムにBMSを設置した。

図16にBMSの概要を示す。BMU-1 (Battery Monitoring Unit) では組電池全体の電流、電圧、温度を管理し、BMU-2では個々の電池に取り付けられたBCW (Battery Condition Watcher) センサーから無線送信される個々の電池の電圧、内部抵抗、電池温度を管理している。BMSはBMU-1および2のデータを集計管理してPCSへSOCやSOH (State of Health: 劣化状態) などの情報を送信する。BMSの設置によって、PSOC条件下での蓄電池の状態判定や、セル毎の内部診断機能による寿命期判定、LAN接続による蓄電池状態データの送信等が可能となる。今回の実証試験にBMSを設置したことにより蓄電池状態のデータを逐次受信し、運用中の蓄電池挙動、改善点、問題点の発見ができ、その対策と改善によって運用システムの最適化が可能となる。

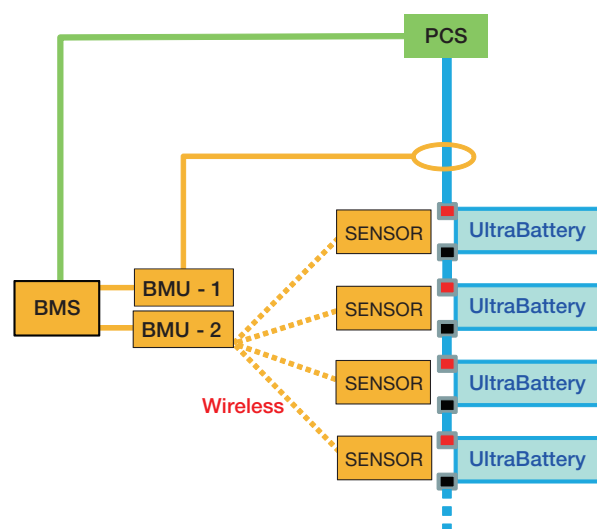


図16 蓄電池管理システム
Battery Management System.

6. おわりに

従来型バッテリーと比べ1.8倍の寿命特性を有するマイクロHEV用UBを開発した。試験後の電池を解体した結果、従来型電池では、正極活物質の軟化と負極活物質の顕著なサルフェーションが見られたのに対し、UBでは正極活物質の軟化は確認されたが、目立った負極活物質のサルフェーションはほとんどなかった。これが、UBが良好な時効特性が得られた一因と考えられる。

据置用UBの開発を行い、以下の成果を得た。

- (1) 据置用UBはSOC30%～90%の範囲内において、0.1C₁₀A充放電でのWh効率が91%～94.5%、放電0.6C₁₀A・充電

0.45C₁₀AでのWh効率が83～87%と低率だけでなく高率の充放電電流においても高いWh効率を示した。

(2) PSOCサイクル試験では90サイクルに1度の回復充電にもかかわらず100%以上という良好な容量維持率を示した。また優れた回復充電特性を確認した。

(3) HR-PSOCサイクル試験では据置用UBは長寿命サイクル鉛蓄電池の約2倍の寿命性能を示した。

以上の結果より、据置用UBはPSOC条件下で高いエネルギー効率や優れたサイクル寿命特性および回復充電特性を有していることが分かった。

実証試験としては、北九州スマートコミュニティ創造事業に参画し、開発した据置用UBを設置、2012年度より実証試験を開始した。

参考文献

- 1) 大聖泰弘：“自動車の環境・エネルギー技術に関わる将来展望～従来車の技術改善から電動化へ～”，TNT TECHNICAL REVIEW，自動車技術，No.79，(2011)2.
- 2) The Boston Consulting Group：“エコカー市場2020年の展望と電気自動車普及への道すじ”，OPPORTUNITIES FOR ACTION，Vol. 3，(2009)
- 3) Dr. G.Fraser-Bell and Dr. R.D.Prengemann：“Market and technology developments of extended cycle life flooded batteries”，European Lead Battery Conference，Istanbul，(2010)
- 4) 横山努，本間徳則，清水博文，高田利通，赤阪有一，柴田智史，川口祐太郎，古川淳，L.T.Lam：FBテクニカルニュース，No.67，(2011)10.
- 5) L.T.Lam，R. Louey：J.Power Sources，158，(2006) 1140.
- 6) 古川淳，高田利通，加納哲也，門馬大輔，L.T.Lam，N.P.Haigh，O.V.Lim，R. Louey，C.G.Phyland，D.G.Vella，L.H.Vu：FBテクニカルニュース，No.62，(2006)10.
- 7) 門馬大輔，高田利通，古川淳，L.T.Lam，N.P.Haigh，O.V.Lim，R. Louey，C.G.Phyland，D.G.Vella，L.H.Vu：FBテクニカルニュース，No.63，(2007)7.
- 8) 赤阪有一，坂本光，高田利通，門馬大輔，土橋朗，横山努，増田洋輔，中島秀仁，柴田智史，古川淳，L.T.Lam，N.P.Haigh，O.V.Lim，R. Louey，C.G.Phyland，D.G.Vella，L.H.Vu：FBテクニカルニュース，No.64，(2008)38.
- 9) 三浦優，手塚渉，吉田英明，柴田智史，古川淳，L.T.Lam：FBテクニカルニュース，No.66，(2011)11.
- 10) 古川淳，坂本光，飯塚博幸：FBテクニカルニュース，No.58，(2002)3.
- 11) 根兵靖之，尾崎正則，本間徳則，古川淳，新妻滋：FBテクニカルニュース，No.59，(2003)8.
- 12) 坂本光，小鍛冶真一，古川淳，緑川淳，中島秀仁，大内久士，瀬尾秋夫，外崎直人：FBテクニカルニュース，No. 66，(2011)17.
- 13) Tom Hund，Nancy Clark，Wes Baca：“UltraBattery Test Result for Utility Cycling Applications”，The 18th International Seminar on Double Layer Capacitors and Hybrid Energy Storage Devices，December，(2008)
- 14) 北九州市HP＞くらしの情報＞ごみ・リサイクル・環境＞環境首都を目指す取組＞北九州スマートコミュニティ創造事業