

レース用 軽量・長寿命バッテリー ～鉛バッテリーとの互換性確保～

Lightweight/Long-Life Battery for Automotive Use (Lead Battery Compatible)

杉山 茂行
Shigeyuki Sugiyama

榎本 つゆ
Tsuyu Enomoto

青木 護
Mamoru Aoki

要 旨

本バッテリーは、自動車レース向けを主たる用途として、鉛バッテリーに対し半減以上の軽量化を達成したバッテリーであり、既存のレース車両に負荷なく導入できるよう、車両に備わっている鉛バッテリー充電用の発電機や電装機器をそのまま使用できるように設計されている。この完全互換を達成するため、本バッテリーでは軽量のリチウムイオン電池をベースとし、その電圧調整用としてニッケル水素蓄電池を逆接に接続している。さらに、バッテリー制御回路として、これら2種類の電池を使いこなすためのバランス補正回路、およびバッテリー保護のための過充電防止、過放電防止回路を搭載することにより、高信頼性と長寿命化を達成している。

Abstract

We have developed a lightweight automotive battery for motor racing. Its weight is reduced to less than half that of a lead acid battery. Our battery is designed for use with the current alternator and other electric components in a race car. Therefore, it can easily be used in place of the current automotive lead acid battery.

Our battery consists of mainly lightweight lithium ion batteries reverse-connected to a nickel metal hydride in order to keep it fully compatible with lead acid batteries. Also, our battery is attached to an electric circuit for balancing the two kinds of batteries and a safety unit to protect against deep discharge and overcharging as a battery management unit. Therefore, our battery has high reliability together with long life.

1. はじめに

F1やMotoGPなどに代表される世界最高峰の自動車・バイクレースでは、その車両部品であるバッテリーにおいても、高性能、特に軽さが強く要求されている。現在、一般的な車載用バッテリーとしては、1世紀以上の歴史をもつ鉛バッテリーが主流であり、レース用としても広く採用されている。近年、鉛バッテリー互換特性をもつ新型・軽量バッテリーの研究開発が、まったく新しい電池系でも行われているが、商品化へは、まだ多くの課題があるのが現状である。

一方、鉛バッテリーよりも軽量の電池としては、すでにニッケル水素電池やリチウムイオン電池といった二次電池が市場に投入されている。これらの電池は、パソコンや携帯電話などのデジタル機器、あるいはハイブリッド自動車や電動ドリルなどのハイパワー市場などにおいて広く使用されており、レース用においても、これらの軽量二次電池を使用したいという要望が多く出ている。しかし、車両の充電システムはすでに鉛バッテリーに合わせて設計されており、それぞれの電池の特性の違いから、充電電圧や充電方法などで鉛バッテリーとの互換性に問題があった。

今回、筆者らはニッケル水素電池やリチウムイオン電池という既存の軽量二次電池を、好適に組み合わせることにより、従来の鉛バッテリーと互換性のある軽量バッ

テリーを開発したので報告する。

2. 開発の経緯

2.1 レース用バッテリーの開発目標

本バッテリーは、特に軽量化が重要視されるレース業界向けに開発した。

開発においてはレース関係者が車両側の充電システムや車載機器設定電圧を変える必要がなく、従来の鉛バッテリーから本開発品に容易に置き換えることができるように、「鉛バッテリーとの完全互換（車載発電機の発生電圧である14.5Vでの定電圧充電が可能）」を目標とした。

2.2 既存技術の鉛バッテリー互換特性

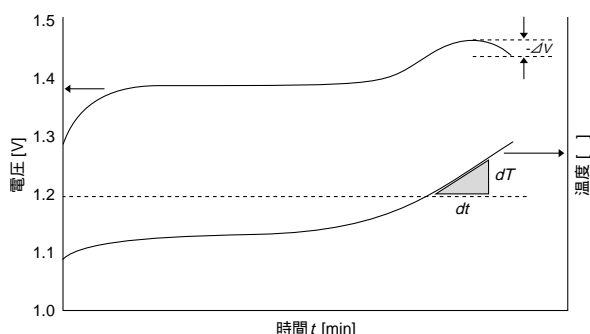
従来の鉛バッテリーに変えて、より軽量のニッケル水素電池やリチウムイオン電池を使用したいとの要望は強く、過去にもその取り組みを行っている。しかし、それらの取り組みはいずれもうまくいかなかった。

従来のニッケル水素電池やリチウムイオン電池、その他の技術による鉛バッテリー互換などの取り組みと課題について、さらに詳細に説明する。

〔1〕ニッケル水素電池での取り組みと課題

1997年以降、ハイブリッド自動車にも採用されているニッケル水素電池は、安全性や信頼性に高い実績がある¹⁾。ニッケル水素電池は水溶液系の二次電池であり、1.2Vの

定格電圧をもっている。この電池は充電を開始すると1.4 Vになり、さらに充電が進んで満充電近くになると電池電圧が1.5 V近くまで上昇した後、電池の発熱により、電池電圧が低下するという特性をもつ（第1図）。しかしながら、ニッケル水素電池は、鉛バッテリーの一般的な充電方式である定電圧充電に必要とされる、「充電が進むとともに充電電圧が上昇していく」という特長を有しないため、定電圧充電は適さない。一般的にニッケル水素電池は、定電流充電方式という方法を用いて、一定の電流で、満充電時の電圧の低下（ ΔV ）や電池の発熱による温度上昇の度合い（ dT/dt ）を検出して充電を制御する²⁾。もしニッケル水素電池を直列にして、14.5 Vにて定電圧充電をしようとする、10直列では、個々の電池の充電電圧は1.45（ $=14.5/10$ ）Vとなり、満充電時に近づくにつれて電池の温度上昇が始まる。それに伴い電池電圧が低下し、定電圧制御がかからずに過充電となり、電池の内部で酸素が発生し、電池内部圧力の上昇を伴って、電池の漏液に至る可能性が高い。また、過充電を防ぐために電池を11直列とすると、個々の電池の充電電圧は1.32（ $=14.5/11$ ）Vとなり、ほとんど充電がされない。



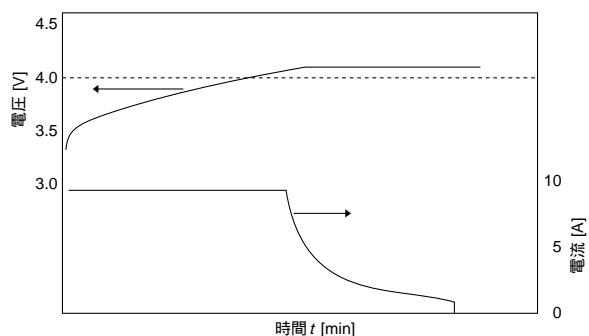
第1図 ニッケル水素電池の充電電圧挙動

Fig. 1 Voltage behavior of Ni-MH battery

【2】リチウムイオン電池での取り組みと課題

リチウムイオン電池は、パソコンや携帯電話用のみならず電動ドリルなどにおいても、すでに広く使用されている。リチウムイオン電池は、ニッケル水素電池と異なり、充電が進むとともに充電電圧が上昇していくという性質をもつ（第2図）。

したがって、定電圧充電が可能であるため鉛バッテリーと充電方式の互換性が高いが、単電池当たりの電圧が3.6 Vきざみとなるため、鉛バッテリーの定格電圧である12 Vと合わない。つまり14.5 Vで充電しようとする場合、リチウムイオン電池3直列では個々の電池の充電電圧は4.83（ $=14.5/3$ ）Vとなり、電圧が高すぎて安全性に課題が



第2図 リチウムイオン電池の充電電圧挙動

Fig. 2 Voltage behavior of Li-ion battery

ある（一般的なリチウムイオン電池の充電電圧は4.2 Vである）。一方、リチウムイオン電池4直列では個々の電池電圧は3.63（ $=14.5/4$ ）Vとなり、ほとんど充電がされない。

【3】DC/DCコンバータの取り組みと課題

リチウムイオン電池を鉛バッテリーの充電電圧に合わせるための方法として、一般的な電圧調整回路であるDC/DCコンバータを用いて電池の電圧を昇降圧させ、鉛互換特性を得る方法も考えられる。しかしながら車載用バッテリーにおいては、車載発電機から発生する（充電）あるいは車載機器により消費される（放電）大電流が、瞬時にかつ頻繁に入れ替わる。そのため電圧調整回路は高い応答性が必要であり、また変換効率によっては変換ロスによる発熱を放熱するための機構も大きくせざるをえないため、信頼性・小型軽量化の観点からDC/DCコンバータの使用には困難があった。

3. 基本原理の工夫

3.1 本開発バッテリーのシステム

車載用バッテリーの開発にあたって求められる特性は、以下の3点である。システム構成図を以下に示す（第3図）。

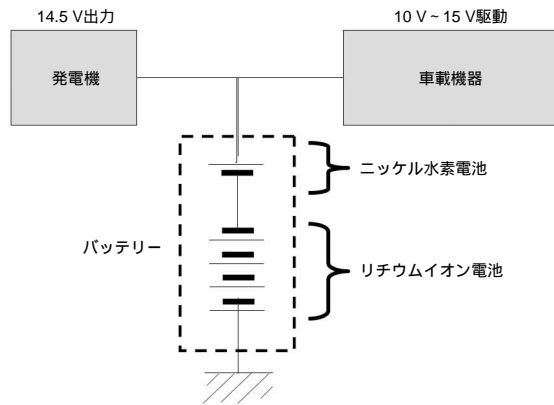
（1）車載発電機からの充電

車体にはオルタネーターと呼ばれる発電機が装備されており、車載バッテリーはこの発電機により充電される。その発電電圧は、おおむね14.5 Vである。したがって、車載バッテリーは14.5 Vにて安全にかつ適切な充電量で充電される必要がある。

（2）車載機器への電力供給

ほとんどすべての車載機器は、12 V系鉛バッテリーにより安定して動作するように設計されており、その動作電圧範囲はおおむね10 V～15 Vである。したがって、バッテリーの電圧もその範囲に収める必要がある。

（3）充放電が瞬時、かつ頻繁に入れ替わること



第3図 発電機とバッテリーと車載機器の関係

Fig. 3 Relationship between generator and battery and parts of automotive usage

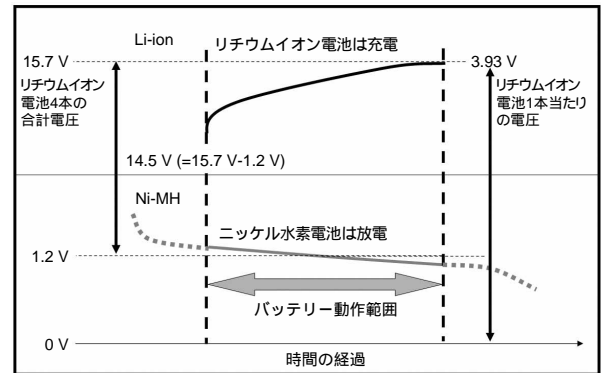
3.2 本バッテリーの開発コンセプト

鉛バッテリーとの互換を考えた場合、充電方式は14.5 Vの定電圧充電であり、車載機器への放電電圧は10 V ~ 15 Vである必要がある。これに加え、電池全体で定電圧充電が可能ないように、充電が進むにつれて充電電圧が上昇していき、ある程度の充電量が得られる充電電圧になる必要がある。そのように考えた結果、本バッテリーは定格電圧が3.6 Vのリチウムイオン電池をベースとして、定格電圧が1.2 Vであるニッケル水素電池をバッテリー電圧の調整に使用することを見いだした。つまり、リチウムイオン電池は4直列とし、これにさらにニッケル水素電池を電圧の調整用として電池のプラスとマイナスを逆に接続するというものである。これによって、充電時に本バッテリーの総電圧の90 %以上を占めるリチウムイオン電池の電圧が徐々に増加していくために、定電圧充電が可能になる。また、そのときニッケル水素電池1単電池当たりの電圧（ニッケル水素電池はバッテリーの極性に対して逆接続されているため、バッテリーの充電は、ニッケル水素電池では放電となる）は-1.2 Vの一定の電圧を保つことができるため、リチウムイオン電池の充電電圧は適切に調整される。

3.3 技術の基本原則と新たな工夫

本電池の基本原則は、以下のとおりである。充電電圧の14.5 Vをリチウムイオンおよびニッケル水素電池にて分担させる。ニッケル水素電池は、充電電気量SOC (State of Charge) が20 % ~ 80 %では、放電電圧は約1.2 Vの平坦な電圧を示す。組電池全体の充電電圧は14.5 Vであるので、ニッケル水素が放電するときの電圧1.2 Vを加算すると、15.7 Vとなる。この電圧がリチウムイオン電池4直列にかかる。つまり、リチウムイオン二次電池の個々

の充電電圧は $3.93 (= (14.5+1.2)/4)$ Vとなる（第4図）。リチウムイオン電池の充電電圧は、通常4.2 Vで充電され、そのときの電池容量を100 %とすると、3.93 Vにて定電圧充電をしたときの電池容量は、73.8 %に相当する。リチウムイオン電池を4.2 Vで充電したときのエネルギー密度と比較すると3割程度低くなるが、3.93 Vで充電したときのリチウムイオン電池の安全性は4.2 Vで充電したときと比較して、その安全性マージンが大きく向上する。また、リチウムイオン電池は充電電圧を低く抑制するほど、保存特性やサイクル寿命特性が向上する。車載搭載時のバッテリーの実際の使われ方は、レースが無い時期のバッテリーの放置や毎日テスト走行するなど、さまざまなケースが考えられるため、保存特性やサイクル寿命特性の向上はいずれも重要なことである。



第4図 バッテリー充電の原理図

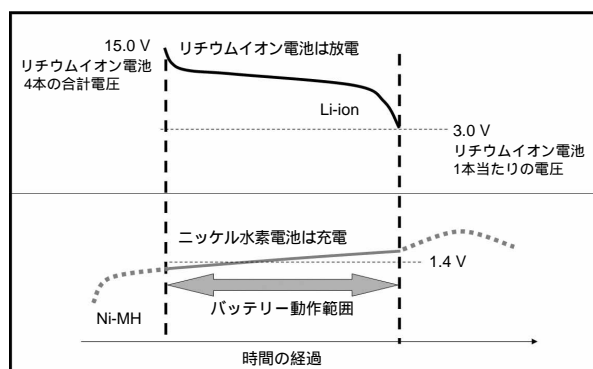
Fig. 4 Principle of charge

また、ニッケル水素電池の容量がリチウムイオン電池よりも小さいとリチウムイオン電池が充電されるよりも先にニッケル水素電池が過放電となるため、ニッケル水素電池の性能低下や漏液が発生するなどの懸念が心配される。そこで、この組電池ではニッケル水素電池の容量をリチウムイオン電池の容量よりも大きく取ることにより、ニッケル水素電池を安定的に電圧調整の役割をもたせることに成功した。すなわち、バッテリーの充電側においては、ニッケル水素電池が完全に放電されて電圧が著しく低下する状態になるよりも前に、リチウムイオン電池が満充電に達するように設計されている。そのため、ニッケル水素電池の放電電圧が一定で推移する部分を利用することができる。これにより、リチウムイオン電池は過充電されることなく、適切にバッテリー全体の充電を終了できる。

同様に、バッテリーの放電側においても基本概念は同じである。リチウムイオン電池は放電され、ニッケル水

素電池は充電される（第5図）。この際にも、ニッケル水素電池の充電可能量をリチウムイオン電池の放電可能量よりも多くとることにより、リチウムイオン電池がその容量すべてを放電しても、ニッケル水素電池は過充電に至らず1.4 Vにて適正に充電される。

また、仮に充放電が頻繁にかつ瞬時に切り替わるような環境であっても、電池はすばやく反応し、瞬停も発生しないため切り替えの応答性も問題がない。



第5図 バッテリーの放電の原理図

Fig. 5 Principle of discharge

3.4 独創的な着眼点と従来の技術にはない特徴

従来、電池業界においては、同じ電池系であっても容量の異なるものや新旧の電池を混在してはいけないとしている。これは、たとえば新旧の電池を混在して1つの機器に使用すると、新しい電池の電圧が高いために機器の使用時に古い電池のみが完全に放電してしまい、そのまま使用を継続すると古い電池が更に放電（逆充電）され、最悪の場合、漏液などの安全性の問題が発生する可能性があるためである。

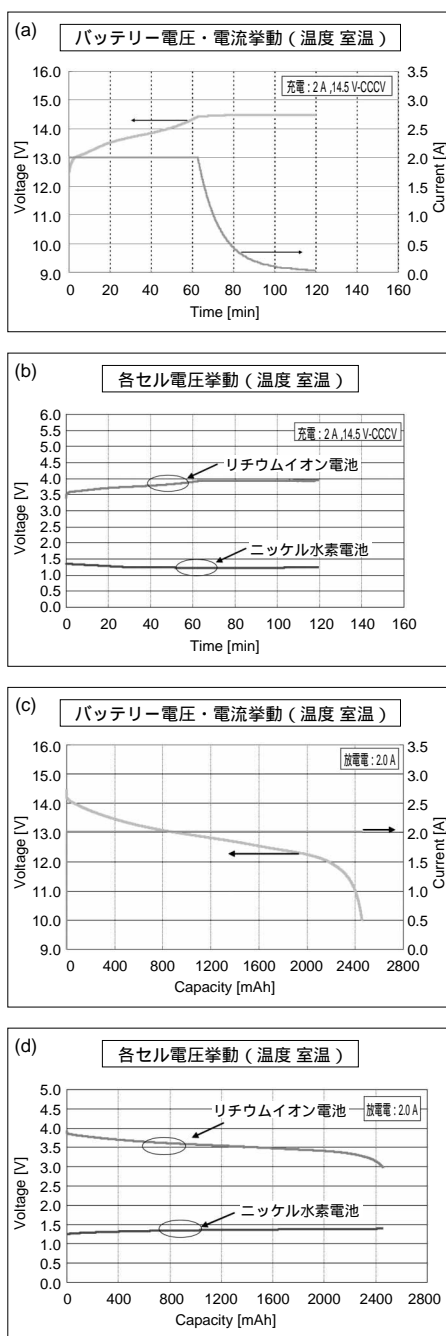
一方で、本バッテリーは容量も電池系も異なる電池を逆接続しているバッテリーであるが、電池のそれぞれの特長を生かし、その特性をうまく組み合わせることにより極めて独創性が高く、従来にない特徴をもたせている。また、従来、リチウムイオン電池は4.2 Vで充電され、その高エネルギー密度である特徴をフルに生かすような使われ方がされてきたが、本技術ではニッケル水素電池の電圧調整により、バッテリーの満充電時でも3.93 V（73.8% VS 4.2 V充電）でとどまるようにマネジメントされている。

4. 技術モデルの検証

この原理を確認するために、実際に量産されており、電動工具などに使用されて市場の実績も十分にある、リチ

ウムイオン電池とニッケル水素電池（逆接続）にて組電池を作製して充放電を行った。

第6図（a）のように、14.5 Vの定電圧充電時において、鉛バッテリーと同様に12 V付近から始まった充電が14.5 Vに達すると定電圧充電に切り替わり、徐々に充電電流は絞られて最後には充電が停止する。バッテリー内部では、第6図（b）のようにニッケル水素電池は1.2 V付近を指しており、またリチウムイオン電池は1本当たり3.93 V



第6図 充放電電圧挙動

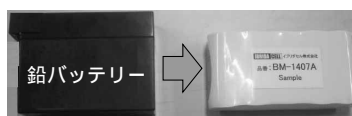
Fig. 6 Voltage behavior of development battery

の充電電圧を指していることがわかる。また、同様にバッテリーを放電した際には、第6図(c)のように、車載機器の動作電圧である10 V～15 Vを発生する。そのとき、バッテリーを構成するそれぞれの電池は第6図(d)のように、ニッケル水素電池は1.4 V付近をさしており、リチウムイオン電池は1本当たり3.6 V付近の放電電圧を指していることがわかり、この原理が正しく機能していることが示されている。

5. 本開発バッテリーと鉛バッテリーとの比較

一般的にニッケル水素電池やリチウムイオン電池はデジタル機器市場において広く使用されているが、それらの電池の耐振動性は十分ではない。そこで、レース向けバッテリーの開発では、耐振動性が要求される市場で十分な実績をもつ電動工具向けリチウムイオン電池やニッケル水素電池を採用することで、耐振動性や信頼性を確保している。それらの電池を組み合わせで開発した電池と従来の自動車用鉛バッテリーとを比較したものが、第7図である。なお、鉛バッテリーの容量は通常10時間率容量で記載される。しかし1時間率容量は60%～70%程度まで低下するのが一般的である。今回の比較にあたっては、レース向けを主たる用途として開発しているため、実使用における容量に近いと思われる1時間率容量を用いて同クラスの容量帯にて比較した。

本開発バッテリーは、従来のモトGP用鉛バッテリーと比較し、体積は15%減、重量は1200 gから490 gと60%減を達成している。また、充電は双方とも14.5 V充電が可能であり、さらに本開発バッテリーは鉛を含まないという特長をもつ。このような技術により開発されたバッテリーは、すでに世界最高峰のF1やモトGPに代表されるレース業界で使用されており、数々の優れた実績を挙げている。



	鉛バッテリー	本開発バッテリー
容量	2.5 Ah (10時間率容量) (1 h率容量は2 Ah程度)	2.0 Ah (1時間率容量)
体積	約110 mm×85 mm×37 mm	約140 mm×70 mm×30 mm 15%
重量	1200 g	490 g 60%
充電	14.5 V 定電圧	14.5 V 定電圧
備考	-	鉛フリー

第7図 鉛バッテリーとの比較

Fig. 7 Comparison lead battery with development battery

6. 実用化への工夫

本バッテリーをレース向け車載用発電機にて充電する場合には、専門のスタッフにより管理され必ず14.5 Vにて充電され、個々のリチウムイオン二次電池の充電電圧は3.93 Vにとどまるために、より安全に使用できる。しかし、レース愛好者向けの市販タイプバッテリーの開発にあたっては、たとえば24 V系システムへの誤挿入とそれに伴う過充電対策や、放電側のバッテリーあがりの課題を解決するために、過充電防止や過放電防止、過電流防止のための保護回路を検討する必要がある。また、本電池は1つの直列の中に2種類の電池が混在しているため、それらの電池が経年使用の中で蓄積されてくる特性差についても補正する必要がある。

6.1 過充電防止、過放電防止回路

従来の鉛バッテリーでは、過放電や過充電に対する保護回路はついていないので、たとえばバッテリーが放電されすぎて使用不能になる、いわゆる「バッテリーあがり」が発生した場合、過放電による容量劣化が起こり、再度充電して再び使用を開始しても、バッテリーがすぐにあがりやすくなる課題があった。それに対し、本バッテリーの市販向け開発品ではリチウムイオン電池を安心してご使用いただくための保護回路をつけており、バッテリーがあがるような使い方をしても過放電防止回路が働くので、鉛バッテリーのような容量劣化は無く、再度の充電で以前と同様に使用することができる。また、さらに過充電防止回路も備わっている。保護回路がなくても通常はリチウムイオン電池の充電電圧は3.93 Vになるように、ニッケル水素電池により調整されているが、予期せぬなんらかの異常使用時にも、この過充電防止回路により保護することが可能である(電池の組み合わせによる電圧調整と電気回路による保護の二重保護になっている)。

6.2 バランス補正回路

この技術においては、1つのバッテリーの中にニッケル水素電池とリチウムイオン電池の2種類の電池を使用している。一般的に、ニッケル水素電池はリチウムイオン電池よりも自己放電が大きく、また充電時に副次反応が発生することから、充電効率も低い。それらの電池の充電効率の差や自己放電特性の差が、充放電の繰り返しにより蓄積されニッケル水素電池の容量が低下していく。初期においてバッテリー全体の容量はリチウムイオン電池の容量にて規定されるように設計されているが、ニッケル水素電池の容量が大きく低下し、リチウムイオン電池

の容量よりも低くなると、バッテリー全体の容量はニッケル水素電池の容量にて規定されるようになり、あわせてバッテリー全体の容量低下が引き起こされる。このニッケル水素電池とリチウムイオン電池の充電効率の差や自己放電特性の差を補うために、制御回路にはこれら2種類の電池の特性差を補正する回路を埋め込んだ。これにより、ユーザーは寿命やバッテリーあがりを鉛バッテリーほど気にすることなく長期間使用することが可能となる。

6.3 開発中の試作機

このような回路を搭載したレース愛好者向けの市販タイプのバッテリーの試作機が、第8図の写真のものである。



第8図 市販レース向け回路搭載品の試作機（右）と従来の鉛バッテリー（左）

Fig. 8 Comparison between development battery with safety unit (Right) and current lead battery (Left)

7. まとめ

以上、レース用として、鉛互換を実現するとともに大幅な軽量化を達成したバッテリー開発の取り組みについて述べてきた。

今後は、軽量化を生かしたレース愛好者向け一般バイク用など、一般車両への展開などが考えられる。また、車両以外にも、たとえば長寿命が求められるバックアップ分野への展開も可能と考えられる。

本開発品は、鉛互換バッテリーとして、現在世界中ですでに多く使用されている鉛バッテリーから、そのまま置き換えができるため、今後広く使われる可能性がある。また、環境の面においても鉛を含有しないため鉛フリー化の推進にお役立ちできると考えられ、さらにバッテリーの軽量化による燃費向上などのエコロジーにも寄与できると思われる。

参考文献

- 1) 佐藤直人 他：HEV用ニッケル・水素蓄電池 Matsushita Tech. Journal 48, No.4, pp.15-20 (2002).
- 2) 川内晶介 他：新しい電池技術のはなし（工業調査会） pp.162-166 (1993).

著者紹介



杉山茂行 Shigeyuki Sugiyama
イブリダセル（株）
Ibrida Cell Co., Ltd.



榎本つゆ Tsuyu Enomoto
イブリダセル（株）
Ibrida Cell Co., Ltd.



青木 護 Mamoru Aoki
イブリダセル（株）
Ibrida Cell Co., Ltd.

会社紹介

イブリダセル株式会社

設立：2007年 社長：青木 護

事業内容：新軽量車載用バッテリーの開発・製造・販売
ビジョン：世界に通じる製品を生産し、社会に貢献するとともに会社と全従業員の繁栄を推進する。

URL：<http://psuf.panasonic.co.jp/ibr/company/>