

シリーズハイブリッド向け小型・軽量・高出力リチウムイオンバッテリーシステム

Smaller, Lighter and Higher-output Lithium Ion Battery System for Series Hybrid

大田 晋志
Shinji Ota

朝倉 淳
Jun Asakura

戸出 晋吾
Shingo Tode

要 旨

ハイブリッド自動車の低燃費を実現する充放電性能に優れたリチウムイオンバッテリーシステムを開発した。自動車メーカーの要望である“運転席下部に格納できる小型・軽量の高出力バッテリーシステム”には、構成部品の大幅な小型化、高性能化が必須である。本開発では、リチウムイオン電池セルの電極体改良による24%低ハイト化と高出力化、電池制御用の専用IC開発による電池ECU (Electronic Control Unit) の46%小型化、バッテリーシステムの筐体(きょうたい)樹脂化や異種金属を溶接する新技術をセル同士の接続に応用することによる16%軽量化などを実現。これにより、従来不可能であった運転席下部へ搭載を可能とし、従来搭載されていた後部座席後ろを新たなスペースとして確保できた。この結果、本バッテリーシステム搭載車の車内スペース拡大という付加価値創出に成功、自動車メーカーの目標を超える車両販売台数に結びつけることに貢献した。

Abstract

We have developed a lithium-ion battery system with excellent charge-discharge performance achieving low fuel consumption of hybrid vehicles. It has been essential to achieve components to be drastically smaller and with higher performance, to develop a smaller, lighter and high-output battery system installable in the space under the driver's seat, required by vehicle manufacturers. The development has achieved a 24%-smaller-in-height lithium-ion battery cell with higher output, 46%-smaller battery Electronic Control Unit (ECU) by development of dedicated IC for battery controls, 16%-lighter battery system by replacing chassis materials with plastics and with application of new technology of welding different metals to the connection of cells, and so on. These developments made it possible to install the battery system under the driver's seat, which has never been believed possible to this point. Consequently, the space behind the rear seat where the battery system was usually installed can be secured for another application, which contributes to a larger interior space of the vehicle. This added value has succeeded in achieving a vehicle sales volume above the manufacturer's target.

1. はじめに

経済社会の基幹産業である自動車産業では化石燃料の高騰・枯渇問題および地球環境変動による環境意識の高まり、米国ZEV (Zero Emission Vehicle) 法や中国NEV (New Energy Vehicle) 法などの環境規制への対応を背景に、HEV (Hybrid Electric Vehicle)、PHEV (Plug-in HEV)、EV (Electric Vehicle) といった環境対応車が急速に増加しており、2020年には年間1200万台規模になると予測されている[1]。環境対応車とは電気エネルギーを蓄えるバッテリーシステムを搭載した車両であり、蓄えた電気エネルギーを動力源とする自動車や停車中の車内の電力をバッテリーで補う機能をもつ自動車などがある。バッテリーシステムの追加で車内空間が狭くなるため、座席下やスペアタイヤ格納部などの限られた空間に格納できる小型・高性能の車載用バッテリーシステムの需要が高まっている。HEVには動力源が2つ(エンジンとモータ)あるタイプが多いが、今回のシリーズHEVの動力源はモータのみであるため、モータを駆動するバッテリーには大きな出力が求められる。

当社は、運転席下部に格納できる小型化と高出力化の要望に応えるべく、主に3つの技術開発(①セル、②セル監視IC、③バッテリーシステム筐体(きょうたい))を行った。

まずは、①セルを小型化しても出力と電池容量を維持する技術を開発した。通常、セルの小型化で出力と電池容量は低下するが、セル材料と合成プロセスの両面から見直すことで最適解を導出した。次に、②従来比2倍のセル数とバッテリーの充放電の監視を可能とするICを新規に開発し、電池ECU(電池を制御するユニット)に組み込んで小型化した。さらに、③車の振動をバッテリーシステム筐体に反映するCAE技術を開発した。金属材料使用で強度を確保してきたバッテリーシステム筐体において、強度確保できる箇所を樹脂材に変更し軽量化した。

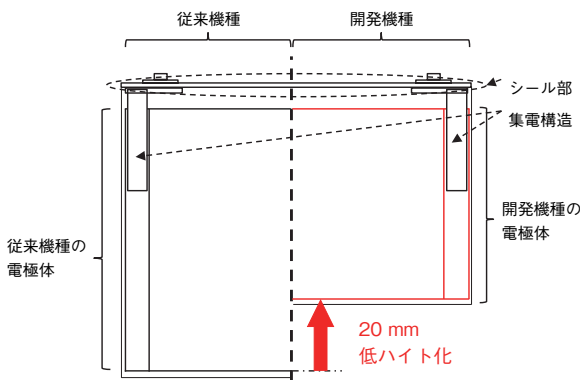
これらの技術により、業界トップレベルの小型・軽量・高出力リチウムイオンバッテリーシステムを開発した。

2. 小型セルの開発

バッテリーシステムの小型化にはセルの小型化が必要

であるが、セル構造全体を小型化すると変化点が多くなる。また、車載電池には10年以上の信頼性、耐久性が必要であり、それらを確認するには開発期間が長くなるため、自動車メーカー要望のスケジュールと整合しない可能性があった。そこで、第1図に示すように本バッテリーシステムに係る小型セル開発では、シール部や集電構造は実績のある従来機種の構造を流用し、電極体（正極極板、負極極板、およびセパレータを組み合わせたもの）の高さのみを低減するセル構造とした。これにより開発期間を約40%短縮し、自動車メーカー要望のスケジュールと整合できた。

第1表に従来機種と今回開発した機種の特性を示す。本報告に係るバッテリーシステムのエネルギー、出力などの性能を達成するために必要なセル性能は、この表に示す開発機種の特性であり、この特性を開発の目標値とした。



第1図 セル構造
Fig. 1 Cell design

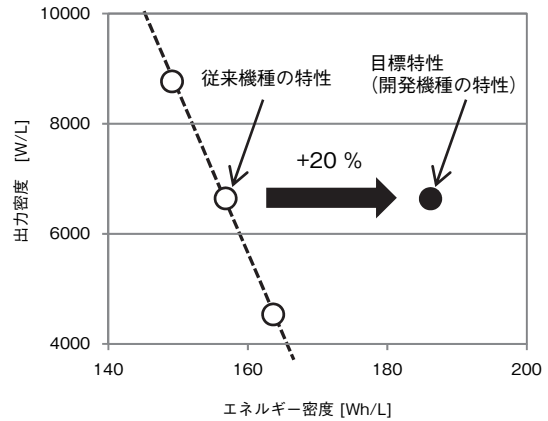
第1表 従来／開発機種の比較

Table 1 Comparison of conventional and development models

項目	従来機種	開発機種 (目標)
セルサイズ [mm]	厚み 12.5 幅 120.0 高さ 85.0	厚み 12.5 幅 120.0 高さ 65.0
体積 [mL]	128 (100%)	98 (76%)
容量 [Ah]	5.5	5.0
エネルギー密度 [Wh/L]	157	186
出力密度 [W/L]	6600	6600

次にバッテリーシステムの目標特性を達成するために必要なセル特性の向上幅の見積もりについて説明する。セルは同じ性能の構成材料を用い、出力を上げる設計をするとエネルギー量が低下し、エネルギー量を高める設計では出力が低下する。この関係は、縦軸が出力密度、横軸がエネルギー密度のラゴンプロットで示されること

が多い。第2図は従来機種の特性と目標特性（開発機種の特性）のラゴンプロットであり、エネルギー量と出力のトレードオフは図中の破線で示される。



第2図 エネルギー密度と出力密度の相関
(ラゴンプロット)

Fig. 2 Correlation between energy density and power density
(Ragone plot)

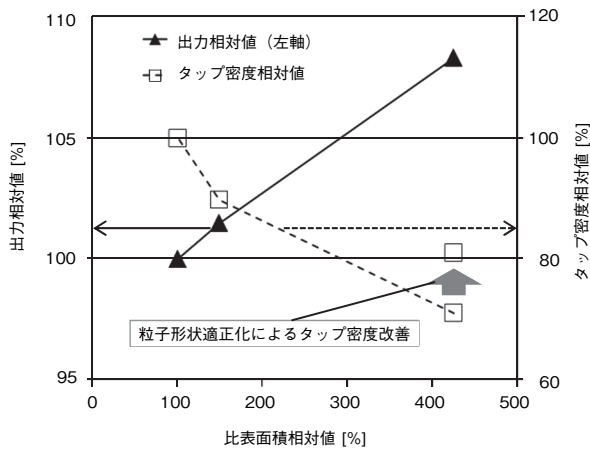
第2図から、今回の目標特性の達成には、トレードオフ直線を右側に移動させるエネルギー密度の増加（約20%）が必要であった。今回、構成材料の性能を改善することにより、出力およびエネルギー密度の両特性の向上を実現させた。以下にこの開発で導入した取り組みの一例を示す。

一般的に、正極活物質の小粒径化により比表面積が増大し、リチウムイオンの挿入・脱離反応が促進され、高出力化が可能となる。一方、正極活物質タップ密度は低下するので、その流動性や極板の充填性も低下し、約10%の充填性改善が必要であった。そのため、正極活物質合成のプロセスを見直し、粒子形状が球形に近づくように、反応中間体、および合成（焼成）条件を適正化した結果、第3図に示すように材料タップ密度を約15%向上させ、電極高充填化と材料流動性確保を達成した。

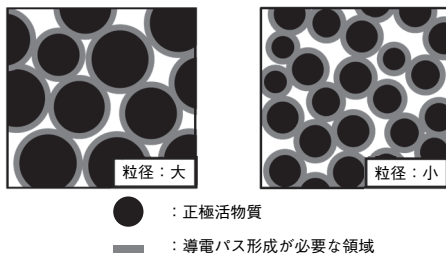
また、正極の活物質自体には導電性がないため、導電材となる炭素などで導電パスの形成が必要であるが、第4図に示すとおり、活物質の小粒径化で極板中の導電パス形成が必要な領域（図中灰色で示される領域）が増える。それに対し導電材を増やすと、導電材自体は充放電反応に寄与しないため、エネルギー密度が低下する。そこで導電剤の形状や量を適正化することで、エネルギー密度を維持しつつ、出力として3%の改善を達成した。

このようにして開発した材料・極板を用い、正負極板の塗布量・極板長をエネルギー密度・出力特性を目標特性となるよう適正化することで、セルを低ハイト化しつ

つ、同等以上の特性を達成した。また、開発した材料は他機種へも展開しており、当社のリチウムイオン電池の出力性能向上につながっている。



第3図 比表面積と出力、タップ密度との相関
Fig. 3 Correlation between specific surface area and power/tap density



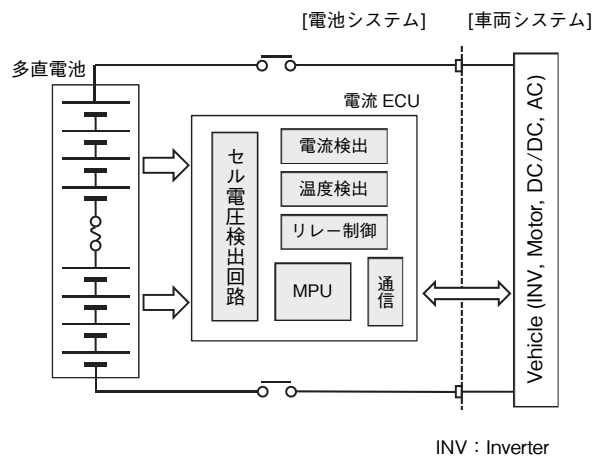
第4図 導電パス概念図
Fig. 4 Conceptual figure about conductive path

3. 小型・低コスト電池ECUの開発

リチウムイオン電池の入出力可能なエネルギーは、電池の充電状態や温度などで変化する。電池性能を車両が最大限利用するためには、刻々と変化する入出力可能なエネルギー量の情報を車両に通知する必要があり、その役割をECUにて実現している。

3.1 電池ECUの機能と構成

第5図はバッテリーシステムのブロック図である。電池ECUは電池の電流・電圧・温度の測定と車両ECUとの通信機能を備えており、MPU (Micro Processor Unit) は電流・電圧・温度情報から入出力可能エネルギーを計算し、車両へ通知する。バッテリーシステムに用いるリチウムイオン電池は過充電／過放電で発熱など異常状態になる可能性があり、電池ECUは1セルごとに電圧監視も行っている。



第5図 バッテリーシステムブロックダイアグラム
Fig. 5 Block diagram of the battery system

また、万が一の故障発生時は、故障箇所を特定し、ディーラーで部品交換が迅速にできるように、すべての機能に故障検出用の回路を備えている。

70 kWの電力が必要となる今回のHEVシステムは、大電流によるシステムの発熱抑制のために高電圧化が求められる。このため、複数の単電池を直列接続（以下「多直」）し、400 Vとなる高電圧電源としている。また、従来機種では、電池ECUは多数の電池の電圧を測定するための電圧測定チャンネルを有し、電池ECU基板に占める電池電圧検出回路の割合は部品点数で約70 %、基板面積の50 %を占有しており、また回路コストに占める割合も非常に大きい。そのため本電池のECU開発ではセル電圧検出回路の見直しにより、部品点数、基板専有面積を削減するとともにコスト半減にも取り組んだ。

3.2 高耐圧IC開発による小型・軽量化

セルの電圧検出には、多直のセル電圧の検出に特化したASIC (Application Specific Integrated Circuit) と呼ばれる専用ICを用いる。ASICは、電池ECUを構成するキーデバイスである。第2表は開発したASICの比較表である。ASICは多直化したセルと接続するため、多直化セルの電圧以上の耐電圧が必要となり、高い耐電圧をもつASICほど多数のセルを接続できる。1つのASICで多数のセル電圧を測定できれば、ASICの数や周辺回路の部品点数を低

第2表 IC (ASIC) 詳細比較

Table 2 Comparison of dedicated ICs (ASICs)

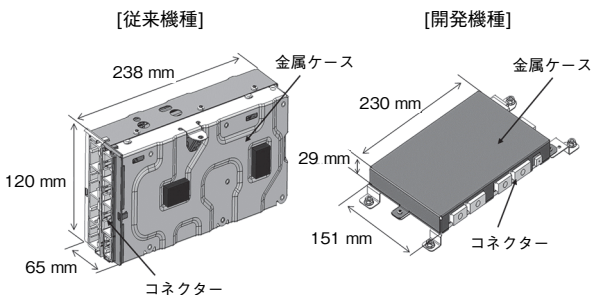
	従来機種	開発機種
最大検出チャンネル	10	20
測定精度	±50 mV	±3 mV
コスト比率 (1chあたり)	1	0.36

減でき、基板の小型・低コスト化に有効である。しかしながら、高電圧対応には、半導体のチップ面積の増大とそれによるコスト増加やデバイスの発熱増加などの課題が伴う。これらの背反する課題を考慮し、ASIC内の低電圧回路部（5V以下の動作部）の微細化と低消費電流化を行い、検出チャンネル数を10チャンネルから20チャンネルに増やし、ASIC個数の削減を図った。従来、外部回路として備えていたセル電圧検出の故障検出機能や電源機能を、ASICのサイズやピン数を変更せず、複数の機能を同一ピンに割り当てた。このような取り組みにより、ASICのセンサ1チャンネルあたりのコストを64%削減した。さらに高温・常温・低温の3温度で、ASIC単品で補正を実施することで、従来機種と比較してセル電圧検出精度を10倍以上に向上させた。

第3表は、今回開発した電池ECU（開発機種）と従来機種を比較しており、第6図はそれらの電池ECUの外観図である。計測チャンネル数は従来機種より増加させたが、前述の多チャンネル・高精度・高耐圧ASICを使用することで、部品点数50%減、筐体サイズ46%減、基板サイズ42%減を達成することができた。さらには電池ECUの部品コストを72%削減することにも成功し、当初掲げた開発目標である電池ECUの小型・低コスト化を実現することができた。

第3表 電池用ECUの進化
Table 3 Evolution of the battery ECU

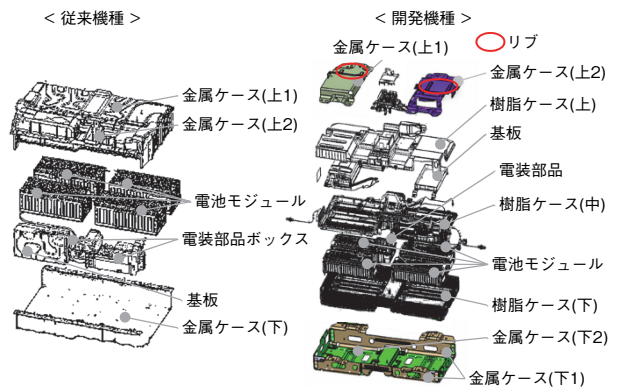
機種	従来機種	開発機種
仕様（検出セル数）	72セル	80セル
部品点数 [点]	3536	▲50% 1758
筐体サイズ [cm ³]	1860	▲46% 1007
基板サイズ [cm ²]	527	▲42% 308
コスト比率	1	▲72% 0.28



第6図 電池ECU外観
Fig. 6 Overviews of the battery ECU

4. 小型軽量バッテリーシステムの開発

自動車用部品では、振動／衝撃環境下で10～20年使用され続ける必要があるため、強度を確保する設計とそれを実現する高強度な金属材料が多く用いられているが、過度な金属材料の採用は重量を増加させ、車両燃費を悪化させる。燃費改善には車両軽量化が必要であり、その実現手段の1つに材料の樹脂化がある。しかし、樹脂材の割合が高い設計では、振動／衝撃環境に対して性能を満足するのは容易ではない。第7図が、従来機種、今回開発機種の分解斜視図である。今回開発したバッテリーシステムでは、リブを追加し強度を最小限の金属フレームで成立させつつ、筐体を樹脂化させた。従来品と同じように電装部品ボックス、電池ECUを上下ケース間に配置させ、求められる形状を実現するため、サイズを18%、重量をシステム全体で12%削減することを目標値とした。サイズを小さくするためのアプローチは後述するが、電池モジュールを従来のねじ締め工法から溶接にすることでねじ部とナット部の高さ方向スペースを削減することを検討した。従来／目標値／開発機種の比較を第4表に示す。



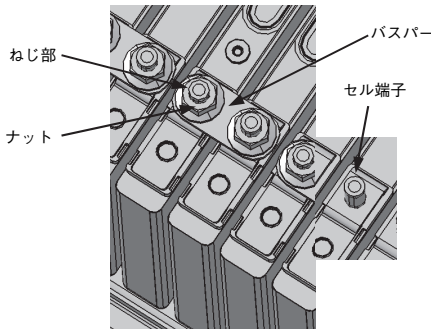
第7図 従来および今回の開発バッテリーシステム分解斜視図
Fig. 7 Exploded view of conventional and development battery system

第4表 従来／目標値／開発機種の比較
Table 4 Comparison between conventional model, target model and development model

項目	従来機種	開発目標	開発機種
サイズ [cm ³]	41580	33960 (従来18%減)	33660 (従来20%減)
重量 [kg]	51.4	45.0 (従来の12%減)	42.8 (従来の16%減)
バスバー接続	ねじ止め	溶接	溶接
筐体	金属	金属 + 樹脂	金属 + 樹脂

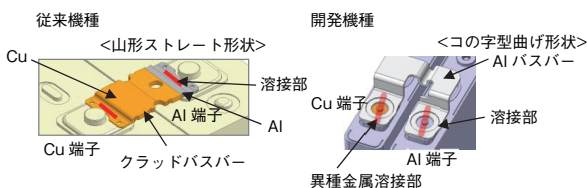
4.1 異種金属溶接バスバー開発による軽量・低コスト化

バッテリー，セル間を電氣的に接続する方式には，①隣接するセル端子と電気接続用のバスバーをねじ部とナットで止める方式（第8図参照）と，②隣接するセル端子を直接バスバーで接続する溶接方式の2つの方式がある．今回，ねじ部とナットが不要になる溶接方式を採用し，目標サイズ1836 cm³ (3.7%)，重量低減320 g (0.6%)，とした．リチウムイオン電池は正極端子にアルミ材，負極端子に銅材を用いており，セル間を直列に接続するには，異種金属であるアルミニウムと銅を溶接する必要がある．一般的には，異種金属を溶接すると接続強度が低下し，強度確保が難しい．そのため，溶接条件（レーザー出力とバスバー材料）とバスバー形状を見直すことにした．



第8図 ねじ止め工法
Fig. 8 Method of screwing

まずは，溶接条件の見直しである．従来はクラッド材（第9図）と呼ばれる銅とアルミニウムを圧接した材料をバスバーとして使用し，同種の金属溶接を実施していた．しかし，クラッド材は銅材やアルミ材に比べ高価であり，低コスト化の課題となっていた．そこで，自動車用バッテリーでは初めて，銅-アルミニウムの異種金属溶接技術を開発し，銅に比べ軽量で安価なアルミ材のバスバーへの置き換えを行った．金属接合には強いレーザー出力が必要になるが，異種金属溶接では発生する脆（も



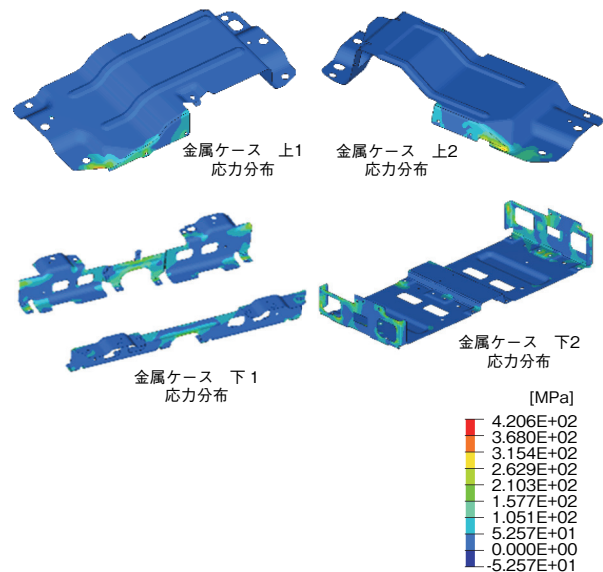
第9図 従来機種（クラッド材）と開発機種バスバー形状比較
Fig. 9 Comparison between conventional model of clad busbar design and development welding busbar design

ろ）い金属の影響で溶接強度が一定のばらつき範囲に収まらないことが課題であった．今回，溶接箇所組成を詳細に解析し，脆い金属の発生が少ない弱いレーザー出力でも適切に溶接できることがわかった．

次は，バスバー形状の見直しである．異種金属溶接でバスバーと端子を溶接する技術を開発したが，それでも剥離強度不足のため溶接部の負荷を1/5に減らす必要があった．開発機種ではバスバー形状を従来の山形ストレート形状から衝撃をさらに吸収できるコの字型曲げ形状（第9図参照）に変更，溶接部への負荷が従来の1/10となり，車載環境で要求される振動衝撃でも溶接強度を実現することができた．また，ねじ止め方式からアルミ単一材料の溶接方式に変更することにより，サイズ2142cm³ (5.2%)，重量344 g (0.7%) 減を実現した．

4.2 システム筐体の樹脂化による小型・軽量化

バッテリーシステムの筐体設計は，セルや電装部品などの内蔵物を保持するだけでなく，車載環境下の振動／衝撃に耐える必要がある．従来設計では厚み1.6 mm～2 mmの高強度のハイテンション鋼材（590 MPa～1200 MPa 級）を筐体材料に使用し強度確保していたが，鋼材使用のため重量増の要因となっていた．そのため，本開発での設計コンセプトは，①セルや電装部品などの内蔵物を樹脂ケースで覆う構造とすること，②強度的に弱い箇所のみを板金で補強する構造とすること，とした．本コンセプトを用い，筐体の重量削減目標である2.6 kg (5.1%) を実現するため，CAEを活用した強度解析（第10図）を行った．その結果，筐体部の金属フレ



第10図 開発品のCAE解析結果
Fig. 10 Result of CAE for this development

ーム厚みを1.2 mm~2 mmに低減でき、強度確保と目標値以上の重量低減4.2 kg (8.2 %)を両立させることができた。

5. まとめ

自動車メーカーの要望である“運転席下部に格納できる小型・軽量の高出力バッテリーシステム”を開発した。具体的には、①セル、②セル監視IC (ASIC)、③バッテリーシステム筐体、の開発を行うことで実現した。①セルは、出力密度維持とエネルギー密度の向上を両立するセル材料とプロセスを確立。同時に電極体改良によりセル高さを24 %低ハイト化した。②従来比2倍の耐電圧となるIC (ASIC)を新規に開発。電池ECUは、多チャンネル・高性能・高耐圧ASICを採用することで46 %小型化した。③バッテリーシステムの筐体一部樹脂化、異種金属溶接技術を採用したセル間接続などにより、従来設計から8.6 kg (16 %)の重量と20 %の体積を削減した。これらの結果、運転席-助手席下に格納できるバッテリーシステムを開発し、同クラスの車両でトップレベルの低燃費達成と本バッテリーシステム搭載車の車内スペース拡大という付加価値創出にも成功、自動車メーカーの目標を超える車両販売台数に結びつけることに貢献した。

これらの開発成果は、今後広まってくる環境対応車用バッテリーへの適用が期待でき、HEV、PHEV、BEVなどのさまざまな商品に積極的に展開していく。

参考文献

- [1] 富士経済, エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望 2017 エネルギーデバイス編, p.51, May, 2014.

執筆者紹介



大田 晋志 Shinji Ota
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 三洋電機 (株) オートモーティブエナジー事業部
Automotive Energy Business Div., Sanyo Electric Co., Ltd., Automotive & Industrial Systemes Company



朝倉 淳 Jun Asakura
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 三洋電機 (株) オートモーティブエナジー事業部
Automotive Energy Business Div., Sanyo Electric Co., Ltd., Automotive & Industrial Systemes Company



戸出 晋吾 Shingo Tode
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 三洋電機 (株) オートモーティブエナジー事業部
Automotive Energy Business Div., Sanyo Electric Co., Ltd., Automotive & Industrial Systemes Company