

論文・解説

40

EV 駆動用バッテリーのリユースに向けた取り組みの紹介 Introduction of Initiatives for Reuse of EV Drive Batteries

楊 殿宇^{*1} 高原 慎二^{*2} 末富 隆雅^{*3}
Tenyu Yan Shinji Takahara Takamasa Suetomi

要約

マツダは、技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言 2030」に基づき、ライフサイクルアセスメント（LCA）の観点から、環境負荷低減に取り組んでいる。その中で、EV 駆動用バッテリーを定置型蓄電池として活用し、地産地消型の再生可能エネルギー利用拡大を目指した取り組みを、中国電力（株）、（株）明電舎と 3 社で行っている。本稿では、その事例について紹介する。まず、複数の EV 駆動用バッテリーを定置型蓄電池としてリユースした実証試験のシステム概要について述べる。次に、リユースバッテリーの課題、課題解決のための考え方とその試験方法を説明する。最後に、実証試験で得られた試験結果から二次利用における今後の課題と高効率な開発に向けた取り組みを提案する。

Abstract

Mazda has been working to reduce burden on the environment from the perspective of life cycle assessment (LCA), based on its long-term vision for technology development, the Sustainable Zoom-Zoom Declaration 2030. In this context, to expand the use of locally produced and locally consumed renewable energy, Mazda has jointly developed EV driving batteries which are used as stationary storage batteries with the Chugoku Electric Power Co. and Meidensha Corporation. Some of the case studies will be presented in this paper. First, we will discuss an overview of the demonstration experiment in which multiple EV drive batteries were reused as stationary storage batteries. Next, we will explain the issues regarding the reused batteries and our approach and test methods to solve these issues. Finally, we will explain future issues for the use of reused batteries that were identified in the demonstration experiment, and propose initiatives for highly efficient development.

Key words : Carbon neutral, Reuse battery, Electronic control

1. はじめに

マツダは、2017 年に「地球」「社会」「人」それぞれの課題解決を目指す新しいチャレンジ「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言 2030」⁽¹⁾を公表した。その中で特に地球環境問題の解決に関しては、温室効果ガスの大幅削減を目指し、再生可能エネルギーの導入などクリーンなエネルギーミックス（電気の発電に使用するエネルギー源の構成）の推進と、更なるエネルギー効率化が重要と考えている。しかし、太陽光、風力などの再生可能エネルギーは天候によって発電量が大きく変動し不安定である。そのため、再生可能エネルギーを最大限導入するためには、発電量の変動を吸収するための蓄電池が必

要となり、需要の増加が予想される。

一方、蓄電池を構成する部材の資源は有限であり、資源不足解消のため有効活用が求められる。その実現手段として、蓄電池の部材リサイクルも重要であるが、その前に長期利用やリユースができるのであれば、更に資源をより有効に活用できる。そこで、中国電力（株）、（株）明電舎及びマツダは、各社の保有技術の強みを活かし、EV 駆動用バッテリーの VPP（Virtual Power Plant＝仮想発電所）リソースとしての可能性を検証するため、実証試験を行い、地産地消型の再生可能エネルギー利用拡大を目指した取り組み⁽²⁾を行った。

本稿では、上記実証試験を通して得られた複数の EV 駆動用バッテリーを定置型蓄電池としてリユースした場合

*1 技術研究所
Technical Research Center

*3 統合制御システム開発本部
Integrated Control System Development Div.

*2 技術企画部
Technology Planning Dept.

の劣化特性の解析評価及びEV駆動用バッテリーのリユースに向けた今後の課題について説明する。

2. 定置型蓄電池システムの構成

2.1 蓄電システムの全体構成

今回の実証試験は、EV駆動用バッテリーのリユースによるコストメリットを最大化するため、ハード的な接続やソフトの変更規模を最小限に留めつつ、8台のEV駆動用バッテリーパック（以降パック）を、2台並列接続して4つの直流電源とした。それぞれの直流電源を、Power Conditioning System (PCS) とつなげる蓄電システム構成とした（Fig. 1）。

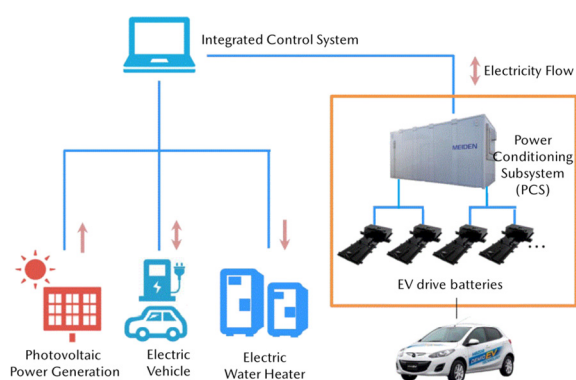


Fig. 1 Storage System Configuration

2.2 システム構成部品の紹介

(1) EV駆動用バッテリー

リユースに用いるEV駆動用バッテリーは、マツダが2012年10月に日本国内でリース販売した電気自動車「デミオEV」に搭載されたリチウムイオンバッテリーを使用することとした⁽³⁾。本パック（Fig. 2）は、総公称電圧346V、容量20kWh、空冷方式を採用している。

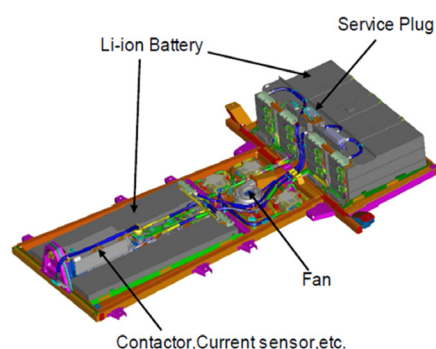


Fig. 2 Configuration of Battery Pack

今回リユースに使われるパックは、自社開発した遠隔操作システム⁽⁴⁾の情報より、パック全体の容量維持率が高いものから選別した。これらのパックは、新品パックほど性能均一ではないものの、バラツキは小さいことが分かった。従って、リユースするのに十分な性能がある

と判断した。

(2) 統合コントローラー

複数のパックを束ねてPCSと通信するため、各パックの状態を監視する統合コントローラーが必要であり、今回新たに作製した。本統合コントローラーは、CAN通信方式を採用しているパックとModbus/TCP通信方式を採用しているPCSを繋ぎ、CAN通信とModbus/TCPとの通信プロトコルを変換し送受信する機能をもつ。今回、その機能を満たすナショナルインスツルメンツ（NI）製PXIeシステムを採用した。

本統合コントローラーの主な仕様をTable 1に示す。統合コントローラーは、起動中にそれぞれのパックのState Of Charge (SOC) や電圧及び充放電可能電力などを読み込み、PCSに送信するとともに、各パックの故障診断を行う。また、各パックの状態及び故障種別をPCSに送信できる機能及び定置用システムとして運用していく中で重要なデータをロギングする機能も併せてもつこととした。

Table 1 Main Specifications of Integrated Controller

Item	Model / Specifications
controller	PXIe-8821
CAN	PXIe-8510, 6+2port
Ethernet	PXIe-8234, 2-Port Gigabit

(3) PCS

PCSの主な仕様をTable 2に示す。今回、リユースバッテリーとつなぐため、リユースするパックの特徴である異なる性能（劣化状態等）を加味し、パックの性能に応じた運用が求められる。そのため、最も望ましいシステム構成として、直流回路の構成では1つのDCDCコンバーター（以降：DCDC）に対し、1つのパックである。しかし、この場合では、DCDCの数が増え、リユースバッテリーの本来のコストメリットが小さくなる。一方で、1つのDCDCに対し複数のパックを繋げるシステムは、性能が最も悪いパックに引っ張られ、システム全体の効率が悪くなる。上記を鑑みて、状態に近い2つのパックを1つのDCDCにつなげる構成とし、効率とコストの両立を図ることとした。また、使用過程でパックに異常が起きてもシステムが稼働可能となるように、DCDC単位の切り離し及び並列する2つのパックの片方の切り離しを可能とした。更に、自然災害などの停電時においても、重要業務の継続ための備えとして自立運転機能も搭載した。

Table 2 Main Specifications of PCS

Item		Rating or Performance
Circuit Method		Voltage type self-excited PWM current control method
Cooling Method		Forced air cooling
AC Rating	Rated Capacity	400kVA
	Phase Number	Three-phase three-wire
DC Rating		240V ~420V

3. リユースバッテリーの特性評価手法の開発

3.1 リユースバッテリーの課題

3.1.1 車両用途と定置用の劣化傾向の把握

車両用途では、バッテリーの電欠に対応するため、低いSOC領域まで使われる頻度は少ない (Fig. 3 上図)。これに対し、定置用途ではさまざまな使われ方が想定される。例えば、ある特定の充放電深度で周期的に充放電を繰り返すような使われ方などが考えられる (Fig. 3 下図)。上記を踏まえると、EV 駆動用バッテリーを定置用としてリユースされる場合、異なる使い方によるバッテリーの劣化傾向を、事前に把握しておくことが重要と考える。

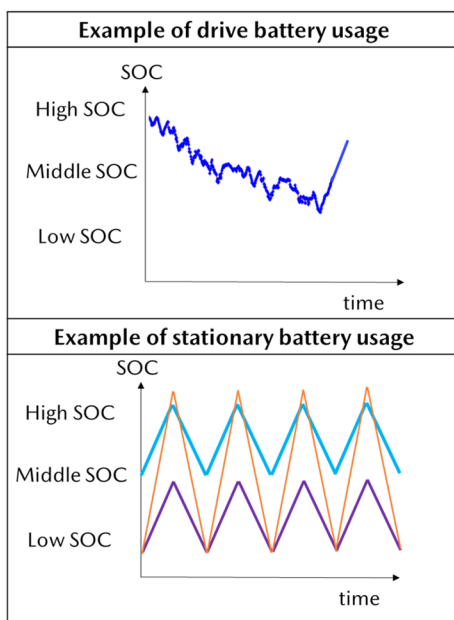


Fig. 3 Example of Battery Usage

3.1.2 有効容量の定量化

一般的に EV 駆動用バッテリーは、使用環境条件などにより同一パックであってもパック内のバッテリーセル (以降セル) 間で容量差が生じると考えられる。そのため、リユースするパックの有効容量を把握するには、リユースバッテリーの特徴であるパックごとの性能バラツキを考える必要がある。また、リユースバッテリーを定

置システムの蓄電池として用いる際に、より大規模な用途へ拡大するため、複数のパックを並列接続して用いることが想定され、このような使い方にも考慮する必要がある。そのため、長期使用したときに、パック内のセルの容量バラツキを踏まえた有効容量の定量化や異なる劣化状態で並列接続されるパックごとの有効容量の定量化を見極めることが、バッテリーをリユースする際の重要課題と考えた。

そこで、今回の実証試験では、パック内のセル容量バラツキと並列されたパックごとの容量バラツキを評価指標とし、定量評価を行った。それぞれの評価指標について以下説明する。

a) パック内のセル容量バラツキ

EV 駆動用バッテリーは、車載用途で充放電を繰り返されるため、リユース時のパック内のセル容量は、初期のように全てのセルは均一な容量を保たれなくなる。これによりパック内で直列接続された多くのセルに容量差が生じる。このようなセルの容量差によって、パックの使用可能なバッテリー容量が減少する (Fig. 4)。そのため、長期使用を想定した二次利用においてパック内セル容量を把握し、セルの容量差を評価指標とし、定量評価して、パック内の容量バラツキを明らかにする。

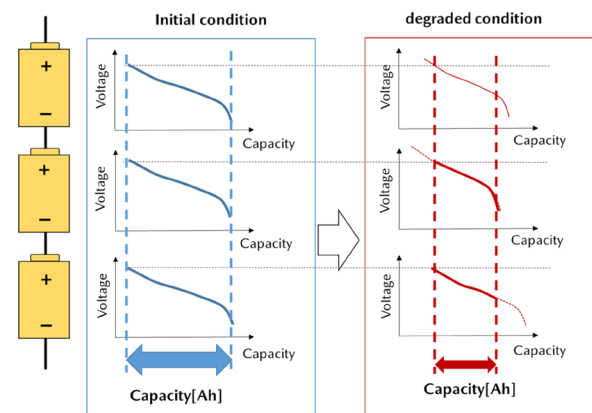


Fig. 4 A Condition of Battery Cell Balance

b) パック間の容量バラツキ

今回のシステムは、1つのDCDCに対し、2つのパックを並列接続して使用した。このように複数のパックで構成されるシステムでは、パックの制御電圧は同じであってもパックの劣化状態が異なるため、両パック間で容量差が生じる。例えば Fig. 5 に示すように容量の多いパック A と容量の少ないパック B を並列につなげて運用したときに、両パックでは、それぞれの受け入れられる充放電の量が異なる。このように、それぞれのパックに異なる負荷がある状態で長期使用した時の、両パックの間で生じる容量差の変化を定量評価して、パック間の容量バラツキを明らかにする。

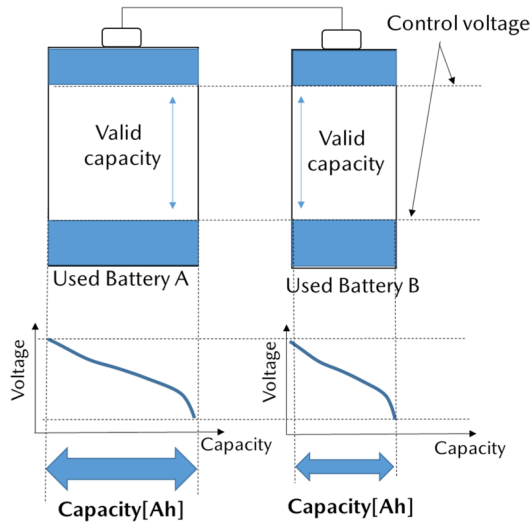


Fig. 5 Example of Parallel Pack Usage

3.2 特性評価試験

特性を明らかにするため、バッテリーの容量について定義を行い、これを基に評価試験及びデータ解析を行う。

3.2.1 バッテリーの容量定義

(1) パックの容量

パックの容量は、Fig. 6 に示すとおり、制御するパック電圧の V_h から放電し始め、 V_l まで放電した容量 (Ah) と定義する。なお、バッテリーは、繰り返し充放電することで容量低下するため、新品パックの容量を 100 とし、その後決められた同制御電圧範囲で測定された容量の相対値を用いてパック容量を算出した。

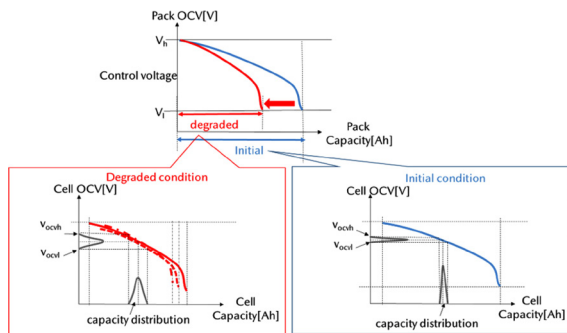


Fig. 6 Battery Pack Capacity

(2) セルの容量

セルの容量は、新品時の Open Circuit Voltage (OCV) と SOC との関係を終始同じとし、OCV から換算された SOC よりセル容量値を算出する。一方で、OCV は電流が流れているときに直接計測できないため、式(1)の端子電圧 V_{batt} と過電圧 V_{ov} から OCV を推定することとする。

$$V_{batt} = V_{ocv} + V_{ov} \tag{1}$$

ここでは、Fig. 6 に示すように、新品時のセルは均一

した OCV をもち、バッテリーセル間の容量バラツキが小さい。しかし、長期使用されることで、パックが同じ電圧であっても、各セル間で使用される OCV の範囲 ($V_{ocvh} \sim V_{ocvl}$) に差が生じる。その結果、各パック内のセル間で使用可能な SOC が異なり、パック内でセル容量が不均一となる。そこで、不均一なセル容量を求めるため、車載されている 96 個のセル端子電圧モニターで計測されたセル端子電圧 V_{batt} の最大/最小値を用いて最大/最小 OCV 推定して容量換算した。その換算方法は、式 (1) より、過電圧 V_{ov} 一定とすると、バッテリーセル端子電圧 V_{batt} の最大/最小値から各セルの OCV の最大/最小値が求められる。そして、換算された OCV から SOC を求め、SOC からセルの容量最大/最小が求まる。

3.2.2 データ解析方法

車載された 96 個のセル端子電圧モニターを用いて計測された V_{batt} からそれぞれの OCV 値を求め、SOC 換算してセルの最大容量 (CAP_{MAX}) とセルの最小容量 (CAP_{MIN}) を算出した。なお、 CAP_{MAX} と CAP_{MIN} の定義は下記のとおりである。

- CAP_{MAX} : OCV 変化が最小時の換算容量
- CAP_{MIN} : OCV 変化が最大時の換算容量

また、パック内のセル容量分布は正規とし、セル最大/最小容量より平均値 (CAP_{ave}) を求めた (Fig. 7)。 CAP_{ave} と CAP_{MAX}/CAP_{MIN} の差をバラツキ幅と呼び、解析評価を行った。

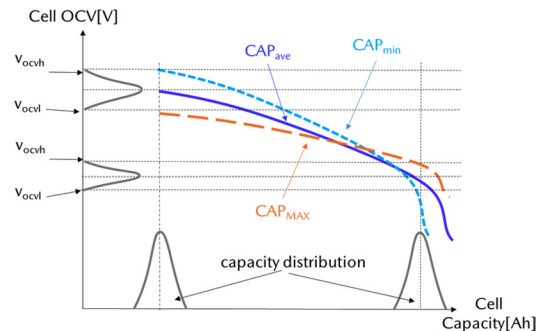


Fig. 7 Definition of Battery Capacity

3.2.3 劣化特性の評価試験条件

バッテリーの劣化特性を評価するため、バッテリーを劣化させる充放電サイクル試験と劣化させた状態での特性試験を実施する必要があり、以下にそれぞれの試験について説明する。

(1) 充放電サイクル試験

定置システムの蓄電池の使い方として、太陽光発電などの再生可能エネルギーによって得られた供給余剰となったエネルギーを蓄え、必要な時に蓄えた余剰エネルギーで仕事させることを想定する。このような用途では、決められた制御範囲において周期的に充放電を繰り返す。そこで、周期的な充放電の使い方を模擬するため、充放

電サイクル試験を 500 サイクルまで実施して、バッテリーを劣化させる試験とした。また、使い方によるバッテリーの性能差を見るため、異なる 3 つのパターンの充放電深度にて充放電サイクル試験を行った (Fig. 8)。

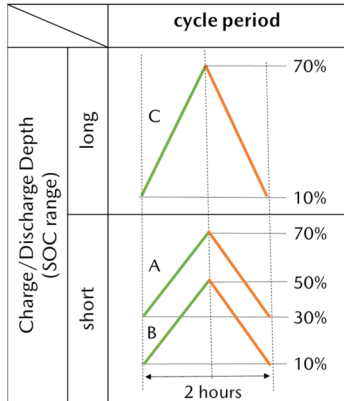


Fig. 8 Cycle Test Conditions

(2) 特性試験

バッテリーの特性を定量評価するため、エネルギー量であるバッテリー容量のほか、過電圧を求めるための抵抗測定を合わせて行った。容量の測定では、パックの制御電圧 $V_h=370V$, $V_l=298V$ とし、Constant Power (CP) 充放電を行った。なお、放電容量を測定する直前では、Constant Voltage (CV) 充電を 30 分ほど行い、放電開始時のバッテリー充電量調整を行った。一方、パックの抵抗測定は、Hybrid pulse power characterization (HPPC) テストマニュアル⁽⁵⁾に基づいた制御サンプリング 1 分、最大パルス電力 80kW の条件で行った。

本特性試験は、充放電サイクル試験の開始 (0 サイクル目) と試験の終了 (500 サイクル目) 及び試験の中間点 (250 サイクル目) で 3 回を実施した。

3.2.4 劣化特性の評価試験結果

(1) 車両用途と定置用の劣化傾向の把握

まず、充放電サイクル試験を 500 サイクルまで実施し、3 回の特性試験の計測データの平均値 (CAP_{ave}) について解析した。その結果、容量低下の平均は 2% であった。電池パックの容量低下の傾向は、マツダが独自に作成した車載用劣化モデル⁽⁶⁾による予測値と同等であった (Fig. 9)。本モデルは、車載用途において容量劣化が \sqrt{t} に比例して減少することが実験的に確かめられていたが、今回のような定置用途のシステムにおいても適用できることが分かった。上記より、パック単位での容量低下は、車載用途と定置用途では大きな差異はなく、従来の車載用途の劣化モデルを用いることで、事前に定置用として二次利用されるバッテリーの劣化特性を予測することが可能と分かった。

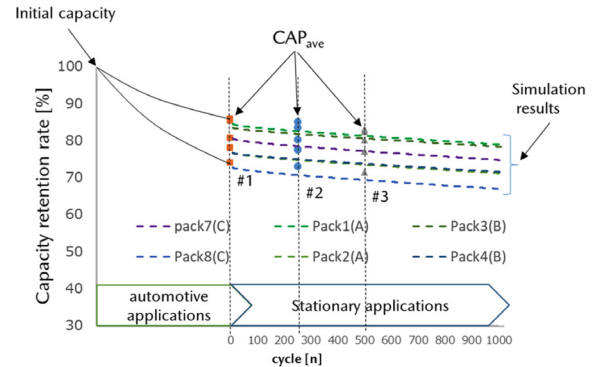


Fig. 9 Evaluation Test and Model Simulation Results

次に、異なる 3 つの充放電サイクルパターンにて、それぞれのパターン (B 及び C) ごとの 2 つのパックの容量バラツキを解析した。その結果、バラツキ幅の最大は B パターン (16%) であり、最小は C パターン (13%) であった (Fig. 10)。また、使い方によらず容量のバラツキ幅は、サイクル数の増加に伴って、増加傾向であった。この結果から定置用途も車載用途と同様、使い方や繰り返し充放電によってパック内の容量バラツキ幅が増加すると示された。

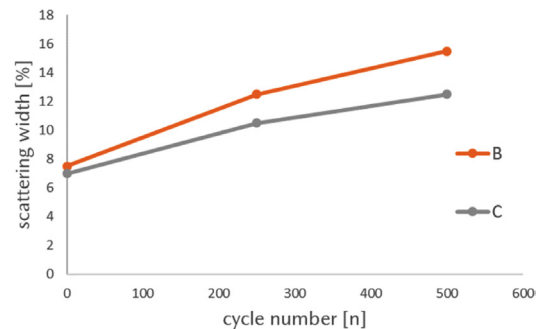


Fig. 10 Results of Variation Depending on Usage

(2) 有効容量の定量化

a) パック内のセル容量バラツキ

Fig. 11 に全ての充放電サイクルパターンのバラツキ幅を示す。パック内のセル容量バラツキ幅は、サイクル数の増加に伴って、増加傾向であった。また、リユース開始時の最大バラツキ幅は 7% であったが、500 サイクルの充放電試験終了後のセル容量の最大バラツキ幅は 12% ~ 17% となった。セル容量の最大バラツキ幅 17% は、最小バラツキ幅 12% の 1.4 (=17/12) 倍の差があった。

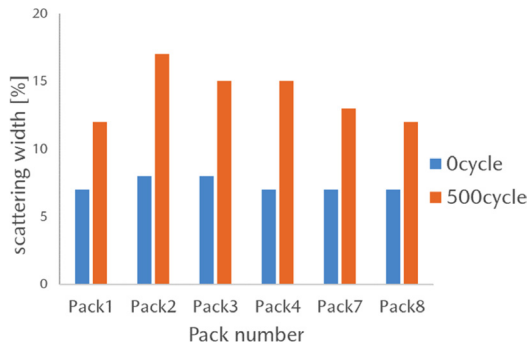


Fig. 11 Results of Variation in Battery Packs

b) パック間の容量バラツキ

Fig. 12 に同じ充放電サイクルパターン異なる 2 つのパックのバラツキ幅を示す。パック間の容量の変化幅も、サイクル数の増加に伴って、増加傾向であった。一方、並列接続された 2 つのパック間でのバラツキについて、リユース始めたときの 2 つのパック (Pack3, Pack4) の容量バラツキはそれぞれ 7%、8% であったが、その後 250 サイクル後は 12% と 13%、500 サイクル後 15% と 15% となり、パック間に大きな差はないと確認できた。

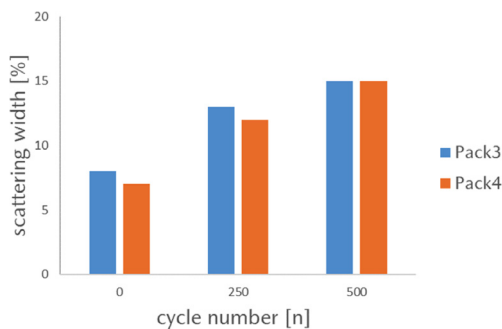


Fig. 12 Results of Variation between Battery Packs

3.3 評価試験結果に対する考察

EV 駆動用バッテリーを定置用システムの蓄電池としてリユースした場合、パック容量の平均値 (CAP_{ave}) について、車載用途も定置用途も同じ劣化傾向であった。また、 CAP_{ave} の劣化推移は、定置用途においても車両用途で構築した劣化予測モデルで予測できることを確認できた。これは、車載用途で構築した劣化予測モデルは、バッテリーの主劣化要因である電圧、温度、電流の物理法則をベースとしたことによる影響が大きいと示唆される。

一方、各パック内のセル容量のバラツキ幅は、繰り返し充放電に伴って大きくなることが明らかとなった。これは、使い方による影響が大きいと考えられる。今回のサイクル試験では、B パターンと C パターンの違いは SOC 範囲以外に、充放電レートの違いがある。一般的に環境温度一定の時は、電流レートが高いバッテリーの方は自己発熱が大きく、自己発熱の影響で劣化が進行しや

すい。しかし、今回の結果 (Fig. 10) は逆であった。その原因について充放電サイクル履歴を調査したところ、今回のような 1 サイクル 2 時間かかる (0.5C 以下) 試験においては、環境温度を一定にすることでバッテリーの自己発熱による劣化への影響が小さいことが分かった。一方、二次利用時のバッテリーの抵抗が大きいため、ゆっくり充放電した B パターンの方は、C パターンより過電圧 V_{ov} による影響が小さく、充放電サイクル中の休止時の電圧値から正極は低い電位、負極は高い電位まで放電したことが伺える (Fig. 13)。これにより、バッテリー電極の活物質の奥まで Li の挿入脱離した B パターンの使い方は、パック内で劣化進行しやすいセルが生じる可能性が高い。そのため、パック内のセル容量バラツキ幅が増加したと推測される。

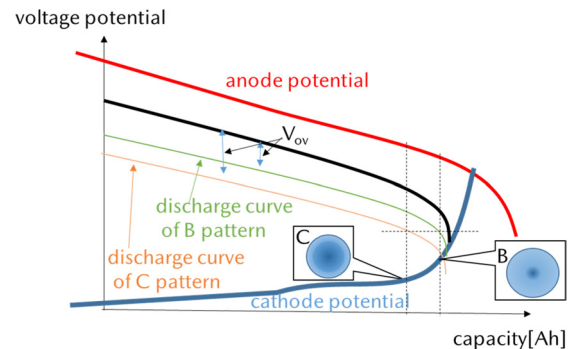


Fig. 13 Results of Variation between Battery Packs

また、並列接続されるパックでのバラツキ幅に大きな差が生じなかったことを確認した。これはバッテリーの劣化に伴って内部抵抗は増加し、相互の抵抗状態に応じてバランスを取りながらパックへ充放電できたと考えられる。その結果、両パックは、仕事分担に応じて劣化するため、それぞれのパックのバラツキ幅の増加も抑えられたと解釈できる。

4. 駆動用バッテリーのリユースに向けて

今回、EV 駆動用バッテリーをリユースして、定置用途の運用におけるバッテリーの劣化特性を把握することができた。今後、今回の実証試験での知見を活かし、より有効にバッテリーを使い切るための運用の仕方などを研究する必要があると考える。また、リユースする蓄電池システム構築のため効率化と低コスト化が必要と考える。そのため、車載部品の設計時に、リユースを想定した設計も求められる。特に、駆動用バッテリーにおいて、大規模な定置用蓄電システムに統合するための統合コントローラーや BMS (Battery Management System) とのインターフェースの統一化、更にフレキシブルなバッテリーの配置を目指した通信の無線化やモジュール単位でのリユース検討などが挙げられる。更に、リユースバッテリーの選別において、低コストかつ高効率で行う必要が

あるため、車両の状態での計測データの活用やモデルベース開発を活用した解析手法の構築など、リユース前により高精度に電池の状態を把握できるような技術構築をしておく必要があると考える。

5. おわりに

本論文では、複数のEV駆動用バッテリーを定置用蓄電池としてリユースした実証実験の概要及びリユースバッテリーの劣化特性について紹介した。実証実験で得られたデータを解析した結果、より有効にリユースバッテリーを活用するための以下の事項を明らかにした。

- ①パックの平均容量の劣化推移は車載用途でも定置用途でも同傾向であり、車載用途で構築してモデルで予測可能である。
- ②使い方と制御SOCの適正化によりパック内の容量バラツキを抑制できる。
- ③パックを並列接続して利用することでパック間のバラツキ幅の増加を抑制できる。

今後、さらなる高効率な開発を目指し、車載する駆動用バッテリーをリユースするための技術開発を加速していく。

謝辞

本論文及び実証試験において終始多大なご協力と支援を賜った中国電力(株)、(株)明電舎、パナソニック(株)には深謝する。

参考文献

- (1) 本橋ほか：サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言2030, [マツダ技報, No.35, pp.3-8 \(2018\)](#)
- (2) EV駆動用バッテリーのリユース技術を活用したパワチャルパワープラント実証試験について, <https://newsroom.mazda.com/ja/publicity/release/2019/201910/191017a.pdf> (2019)
- (3) 松井ほか：デミオEVの高エネルギー密度Liイオンバッテリー開発, [マツダ技報, No.30, pp.125-129 \(2012\)](#)
- (4) 福庭ほか：デミオEVの制御開発, [マツダ技報, No.30, pp.130-134 \(2012\)](#)
- (5) U.S. Department of Energy (DOE): Freedom CAR Battery Test Manual For Power-Assist Hybrid Electric Vehicles. DOE/ID-11069, 40p (2003)
- (6) 藤田ほか：ビルディングブロックを支えるバッテリーモデルベース開発, [マツダ技報, No.32, pp.185-190 \(2015\)](#)

■著者■



楊殿宇



高原慎二



末富隆雅