

交流電化区間に対応した蓄電池電車主回路の開発と 走行試験による蓄電池性能評価

田口 義晃* 門脇 悟志* 仲村 孝行*
三木 真幸* 島田 憲司** 有田 義正**

**Development of a Traction Circuit for Battery-powered and AC Dual Source EMU
and the Running Test Evaluation of the On-board Battery Performance**

Yoshiaki TAGUCHI Satoshi KADOWAKI Takayuki NAKAMURA
Masaki MIKI Kenji HATAKEDA Yoshimasa ARITA

We have converted an existing AC electric train into the battery-powered and AC dual source EMU (test train). The dual source EMU is helpful for the interoperable service from the AC electrified line to the non-electrified line. In this paper, features of the developed traction circuit are described, and the evaluation results of the on-board battery performance are also reported as follows, 1) one charge running distance was approx. 20-30 km fed by on-board lithium-ion battery (1382V-83kWh), 2) the maximum temperature of the battery was 51.5°C with enough margin for the upper limit 65°C, 3) it should be noted that the time required for the quick charge can be extended under the condition of low battery temperature. Based on the running test results, it has been evaluated that the on-board battery has sufficient performance required for the interoperable service between the AC electrified line and the non-electrified line.

キーワード：蓄電池電車，交流電化区間，リチウムイオン電池，走行試験

1. はじめに

非電化路線の旅客輸送はディーゼルエンジンを動力源とした気動車が担っている。一般的に、電車のほうが気動車と比較して環境負荷が小さく、燃料費や検査費用などのランニングコストも小さい。しかし、電車の導入には電化に要する初期コストが課題となる。このような課題を背景とし、2003年には、環境性能などの電車の長所を併せ持つハイブリッド気動車（リチウムイオン電池とディーゼルエンジンのハイブリッド）が登場した。さらには、エンジンを使わず蓄電池によって走行可能であり、架線から充電可能な蓄電池電車（架線・バッテリーハイブリッド電車）の開発も進展した^{1) 2)}。2014年3月には烏山線に蓄電池駆動電車 EV-E301 系³⁾ が導入され、直流電化路線と隣接非電化路線を直通可能な蓄電池電車は実用化に至った。

一方、交流電化路線に隣接する非電化路線も多く、これに対応可能な蓄電池電車は未開発であった。そこで著者らは、交流電化路線と非電化路線を直通可能な蓄電池

電車（試験車）の開発を行った⁴⁾。既存交流電車に蓄電池システムを搭載改造することでコストを抑制した点が特徴的である。本稿では、開発した蓄電池電車の主回路および蓄電池システムについて概説する。さらに、春^{5) 6)}・夏・冬の3期に亘って実施した走行試験を通して、車載蓄電池の性能評価を行ったので報告する。

2. 開発車両の概要

2.1 車両の諸元

開発した蓄電池電車の外観を図1に示す。近郊型電車2両編成を改造し、付随車（Tc車）の床下に主回路蓄電池



図1 蓄電池電車（試験車）の外観

* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室

** 九州旅客鉄道株式会社

特集：車両技術

池箱を搭載した。表1の車両主要諸元に示すように、主回路蓄電池（以下、蓄電池と称す）として、公称1382V-83kWhの高電圧かつ大容量のリチウムイオン電池を搭載した。追加した蓄電池システムはコンパクトに構成したため、改造前後での編成質量の増加量は約3.9tと小さい。

表1 蓄電池電車（試験車）の主要諸元

| | |
|-------|------------------------------|
| 車両形式 | 817系1000代 |
| 編成 | 2両編成 (Mc-Tc) |
| 空車質量 | 改造前：63.2t/編成 改造後：67.1t/編成 |
| 主電動機 | 3相誘導電動機 150kW × 4台 |
| 蓄電池種別 | マンガン系リチウムイオン電池 |
| 蓄電池定格 | 1382V-83kWh (公称値) |

2.2 主回路構成と制御動作

開発した主回路構成を図2に示す。蓄電池システムは既存主回路の直流ステージ部に直結した。蓄電池を充放電するための電力変換器は追加していないが、既存のPWMコンバータで架線からの充電と蓄電池から補機への給電を制御し、駆動用インバータで走行時の充放電を制御可能である。

制御動作モードを図3に示す。蓄電池のみを使用する蓄電池モード（図3 (a)）では、パンタグラフを降下させ、蓄電池のエネルギーのみで走行および補機への給電を行う。架線のみを使用する架線モード（図3 (b)）のうち、従来電車と同等の制御動作を行うのが架線Aモードである。架線Bモードでは直流ステージ電圧を従来電車の1800Vよりやや低い1650Vに制御し、蓄電池システム側の定格に合わせる。架線と蓄電池を併用する架線Cモード（図3 (c), (d)）では、力行中は架線Bモードと同一で、架線からのエネルギーのみで走行する。回生ブレーキ中は架線を接続せず蓄電池に回生する。惰行中と停車中は架線も蓄電池も接続し、蓄電池を充電する。

力行中と回生中に架線と蓄電池を同時使用するハイブリッド制御機能については将来実現すべき機能向上と位置付け、試験車においては省略した。

3. 開発した主回路システムの特徴

3.1 蓄電池直結構成による追加変換器不要化

鉄道車両駆動システムで実績のある600V～700V級の蓄電池の使用を前提とすると1800Vまで昇圧するための電力変換器が必要となる。今回の蓄電池電車化改造に際しては、床下ぎ装スペースの制約が厳しいため電力変換器の追加は現実的でなかった。そこで、電力変換器を追加せずに、車載用に開発した高電圧蓄電池システムを直流ステージ部に直結する主回路構成とした（図2）。蓄電池システムの主要諸元を表2に示す。

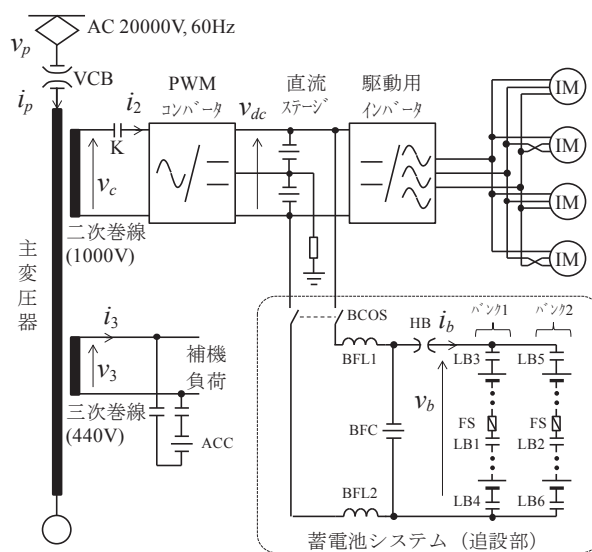


図2 開発した蓄電池電車の主回路構成

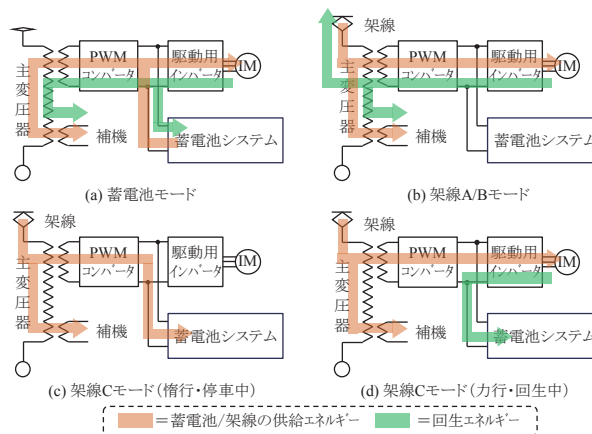


図3 主回路システムの制御動作モード

今回の蓄電池電圧は、ぎ装スペースの制約や現実的な絶縁設計、および目標走行距離30kmに必要なエネルギー量を考慮し、48モジュール直列の1382Vとした。このため、蓄電池走行時の直流ステージ電圧は架線Aモード走行時の1800Vより低下し、主電動機トルク（高速域での駆動・制動トルク）は同モード時より低下する。ただし、既存の一般型気動車（キハ47形）を上回る駆動トルクとなるよう設計した。

3.2 高電圧蓄電池システム

前節の要請から、公称電圧1382Vの高電圧蓄電池システム（表2）を開発した。車載用蓄電池としては格段の高電圧化となった。このため、蓄電池状態監視システムは高電圧化に対応した構成とした。蓄電池側主回路の絶縁設計は総電圧の1/2を基準に行った。これは、主回路（主変圧器2次側）の車体接地が、直流ステージ部の中性点でなされているためである。

蓄電池システムは2バンクの並列で構成され、異常が

生じたバンクを開放して健全なバンクのみで動作継続することが可能である。主な監視項目は、全セル電圧、モジュール温度、バンク電流および通信系の健全性である。また、強制空冷はモジュール背面に備えたファンによって行う。ファンの稼働（ON/OFF）は全モジュール一括で制御され、最大温度が45℃を超えると稼働し、同35℃を下回ると停止する。

3.3 蓄電池保護回路構成のコンパクト化

ぎ装スペースの制約下で最大限の蓄電池を搭載するため、蓄電池の保護回路構成もコンパクト化を図った。すなわち、大型の遮断器（直流高速度遮断器：HB）は1台のみとし、これより外側での短絡・地絡に対しての遮断を担わせる。内側での短絡に対しては、小型のヒューズを各バンク内の適所に配置して電気的な安全を確保した（図4）。具体的には、踏切での衝突等による蓄電池箱のクラッシュとそれによる短絡・地絡をハザードとして想定しており、箱内の上下段間で生じる大規模な短絡は確実に遮断するようにヒューズを配置した。断流器（LB）は比較的大型ではあるが、2バンク個別の投入・開放に必要な数量を確保した。

4. 走行試験による蓄電池性能評価

4.1 走行試験実施概要

蓄電池電車（試験車）の改造工事は2013年3月に完了した。構内走行試験によって制御機能に問題がないことを確認した後、JR九州の営業線において3回の本線走行試験：①2013年5月（春期）、②2013年8～9月（夏期）、③2014年1～2月（冬期）を実施した。走行区間や実施日数を図5に示す。走行試験は筑豊本線にて40日間実施し、実際的非電化路線である日田彦山線でも6日間実施した。標準的な走行試験ダイヤを図6に示す。中間～桂川間においては蓄電池持続試験として、蓄電池による走行距離や蓄電池温度上昇状況を測定した。

表2 蓄電池システムの主要諸元

| | |
|-----------|--|
| 正極活物質 | マンガン酸リチウム |
| 公称電池容量 | 30 Ah / cell |
| 公称セル電圧 | 3.6 V / cell |
| 質量 | 約 2.0 kg / cell |
| 過電圧保護 | 4.3 V（最大セル電圧） |
| 低電圧保護 | 2.5 V（最小セル電圧） |
| 充放電電流保護 | 300 A / バンク（電流レート 10C） |
| 温度上昇保護 | 65℃ |
| 蓄電池システム構成 | 1 モジュール = 8 セル直列接続 1 バンク = 48 モジュール直列接続 全体システム = 2 バンク並列接続 |
| システム定格 | 1382 V - 60 Ah（83kWh）：公称値 |
| 冷却 | モジュール背面ファンでの強制空冷 |

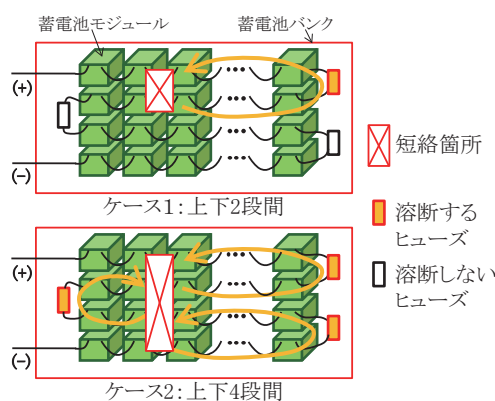


図4 ヒューズで保護可能な大規模短絡の例

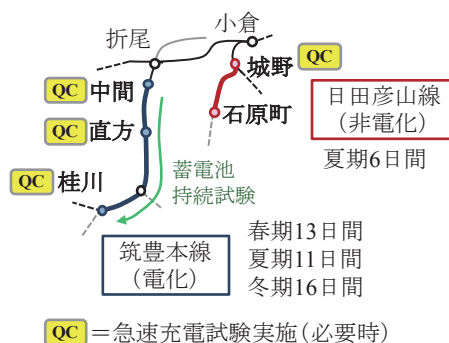


図5 走行試験の実施区間と実施日数



図6 標準的な走行試験ダイヤ

また、QC記号は急速充電（Quick Charge）試験の実施箇所を示し、様々な蓄電池温度における充電時間等を評価した。このほかに、消費電力量は常時測定し、走行条件による差異を分析した。

4.2 消費電力量の傾向

蓄電池電車の運行は1～2時間毎のこまめな充電が前提となり、従来気動車ほど搭載エネルギー量に余裕がない場合が多い。このため、消費電力量の把握は重要項目であり、全試験期間で測定した。電力量の算出点は図7に示す通りであり、駆動消費電力量 W_d および集電電力量 W_p は計測器仮設の空間的制約から直接計測が困難で

特集：車両技術

あったため、実測した電力量の和または差から算定した。パワーフローが双方向となる W_i などの箇所は、力行電力量から回生電力量を差し引いたものを消費電力量と定義する。

春期試験において中間～直方間を各駅停車走行した場合の駆動消費電力量（複数試番の平均）を図8に示す。条件Aは5駅間のうち2駅間を最高速度約90km/hで走行した場合、条件Bは全駅間とも最高速度約60km/hまたはそれ以下で走行した場合である。双方とも、起動加速度を約1.5km/h/s（キハ47形気動車並）とした走行である。条件AとBの駅間所要時分をなるべく揃えるため、条件Aでは90km/h到達直後に一旦減速した。図8での比較から、条件Aは条件Bに対して1.4～1.5倍の消費電力量となっている。一部の駅間のみであっても最高速度を上げると消費電力量に顕著に影響する。

図8の数値は複数試番の平均値であるが、試番によって運転操作の相違によるばらつきが生じている。例として、条件B「上り」の8試番は、平均駆動消費電力量14.5kWhに対して、最小12.7kWh(-11.8%)、最大16.3kWh(+13.2%)であった。

また、上りの駆動消費電力量が下りより小さい主要因は中間駅と直方駅の標高差の影響である。両駅間の標高差 $\Delta h = 5.2\text{m}$ 、車両の編成質量 $M = 70\text{t}$ 、重力加速度 g を用いると、位置エネルギー差 ΔU は次式(1)となる。

$$\Delta U = Mg\Delta h = 3.57[\text{MJ}] = 0.99[\text{kWh}] \quad (1)$$

このため、上りと下りの走行方向によって、約2kWhの差 (ΔU の2倍) が生じる計算となり、概ね実測結果と一致する。

蓄電池の必要搭載量は、本節で述べたような諸条件を考慮して決定する必要がある。本稿では割愛したが、他にも補機消費電力量が重要な要素であるため、測定データを分析していく予定である。

4.3 蓄電池持続特性

中間～桂川間を可能な限り無給電で蓄電池走行する試験を蓄電池持続試験として実施した。蓄電池による走行距離（以下、蓄電池航続距離と称す）をはじめ、蓄電池を残量の下限付近まで使用した際の制御特性、蓄電池温度上昇特性も併せて測定評価した。

図9に蓄電池持続試験実施時の全体波形例を示す。春期の空調を不使用としたデータである。中間駅発車時に蓄電池充電率（SOC: State of Charge）は91.6%であったが、30.4kmの蓄電池走行を経て桂川駅到着時に19.1%となった。目標とした30kmの蓄電池走行が達成された。図10の拡大波形に示すように、時刻1:57付近では蓄電池電圧が下限設定値（この走行では1248V）に到達し、これ以上低下しないようインバータが駆動トルクを低減する下限電圧制御（力行絞込み制御）が有効

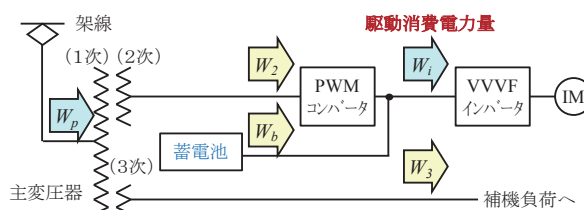


図7 消費電力量の算出点と定義

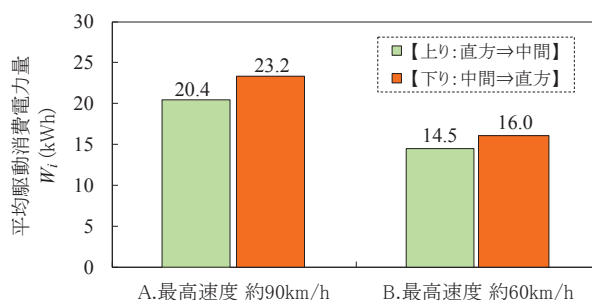


図8 駆動消費電力量の比較（春期）

に機能していることも確認した。この機能は突然の蓄電池保護遮断を防ぐことに役立つが、加速性能が低下して遅延を生じる可能性もあるため常用使用には適さない。

図11には夏期および冬期における蓄電池航続距離と到達駅で残存した充電率（SOC）を示した。蓄電池電圧の下限設定値は春期より低い1152Vとした。夏期の外気温30℃以上、冬期の外気温10℃以下の条件では桂川駅まで到達しない場合が多く見られた。冷暖房による補機電力増大の影響が大きい。航続距離が最短となったのは、外気温が10℃以下であり、かつ大半の駅間で最高速度を80km/h以上とした場合で約20kmであった。4.2節で分析した消費電力量の差異が端的に現れた結果である。

4.4 蓄電池温度上昇特性

今回搭載したリチウムイオン電池の使用最高温度は65℃であり、これを超えると劣化が急速に進展し、著しく超過した場合には安全弁からのガス噴出が生じ得る。一方、極端な低温では内部抵抗が大きいため十分な充放電性能を発揮できない。よって、使用温度範囲の-10℃～65℃のうち、最適な範囲は25～45℃程度となる。

蓄電池の最高温度を記録した日の蓄電池状態推移を図12に示す。最大電池温度が45℃を超えて冷却ファンが稼働しても、外気温が高いため蓄電池の温度上昇は続き、最高51.5℃に至った。夏期全体を通して、冷却ファンによって蓄電池温度は外気温+20℃の範囲内に抑制されることを確認した。仮に外気温が40℃程度まで上昇したとしても、蓄電池最高温度は60℃以下と推定され、上限温度65℃を超えないために十分な放熱性能であった。

冬期には蓄電池箱下部や端部の蓄電池モジュールが低

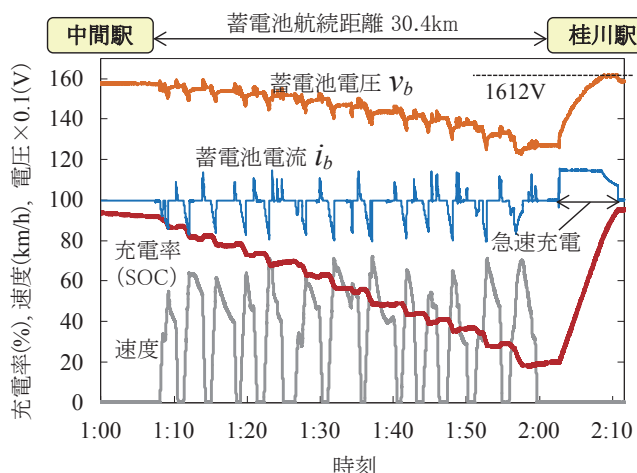


図9 蓄電池持続試験時の全体波形例

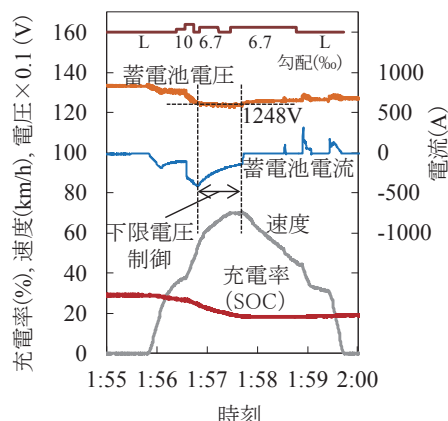


図10 下限電圧制御期間の拡大波形

温となって温度差が10℃程度に拡大する場合があった。保温や温度均一化にも配慮した放熱設計が望ましい。

4.5 急速充電時間の特性

折り返し駅等での充電は、限られた時間内で十分な充電量を確保するために急速充電が必要となる場合がある。急速充電時の電圧、電流波形を図13に示す。蓄電池が高温の場合（図9と同一データ）の所要充電時間は480秒である。しかし、低温の場合には蓄電池の内部抵抗が大きい影響で早期に定電流充電から定電圧充電に移行して電流の絞込みが顕著となり、所要充電時間は715秒に増大した。実運用に向けては、最悪条件を考慮した所要充電時間を予め算定して対策を講じる必要がある。

そこで、所要充電時間の算定手法を検討する。仮定する蓄電池等価回路は、電圧源（蓄電池SOCを変数 x とした場合の開回路電圧 $v_{ocv}(x)$ ）に蓄電池内部抵抗 R_b が直列接続された最も単純なモデルとする。充電電流設定値を $I_{b,cc}$ とし、定電圧制御の蓄電池電圧設定値を $V_{b,max}$ とすると、蓄電池充電電流 i_b は次式(2)で表せる。

$$i_b = \text{MIN} \left\{ I_{b,cc}, \frac{1}{R_b} (V_{b,max} - v_{ocv}(x)) \right\} \quad (2)$$

すなわち、定電流充電中の充電電流値は $I_{b,cc}$ であり、定電圧充電中は第2項の電流値に絞られる。

ここで、SOCが $\Delta x[\%]$ 上昇するのに要する時間 $\Delta t[s]$ は、蓄電池容量を $Q[Ah]$ とすると次式(3)となる。

$$\Delta t = \frac{1}{i_b} (3600Q \times \frac{\Delta x}{100}) \quad (3)$$

よって充電をSOC= $X_s[\%]$ から開始し、 $X_{cv}[\%]$ から定電圧充電に移行して $X_e[\%]$ で終了するまでの所要充電時間 $T[s]$ は式(4)で求められる。

$$T = \int_{X_s}^{X_{cv}} \frac{36Q}{I_{b,cc}} dx + \int_{X_{cv}}^{X_e} \frac{36QR_b}{X_{cv}V_{b,max} - v_{ocv}(x)} dx \quad (4)$$

式(4)の第1項が定電流充電の所要時間、第2項が定

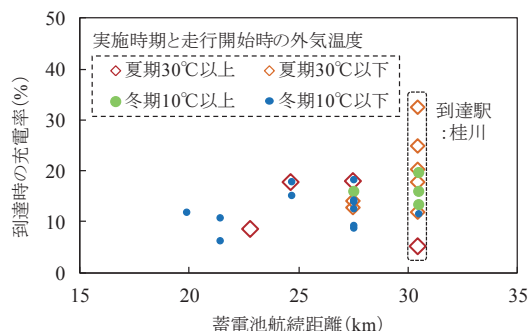


図11 蓄電池航続距離測定結果（夏期・冬期）

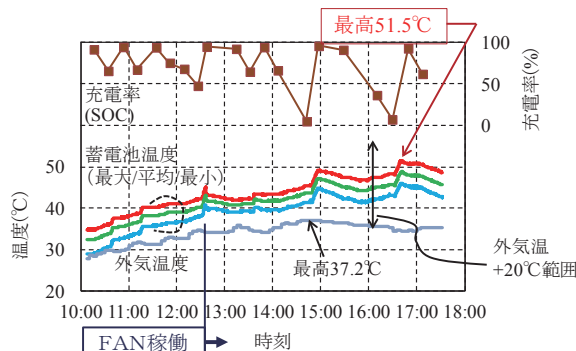


図12 蓄電池状態推移（最高温度記録時）

電圧充電の所要時間である。蓄電池が低温となると、蓄電池内部抵抗 R_b が増大する影響に加えて、 X_{cv} が減少するため、式(4)第2項の定電圧充電時間が増加することが分かる。

所要充電時間 T を式(4)から算定し、実測値と比較したのが図14である。本開発で用いた蓄電池の場合、 $v_{ocv}(x)$ は x の3次式となって複雑なため、式(4)は解析解ではなく数値計算解として求めた。この際、実測値より $I_{b,cc}=367A$ 、 $V_{b,max}=1612V$ とし、電池容量 Q は公称値60Ah、内部抵抗は充電終了時の蓄電池温度における実測値を用いた。蓄電池温度が低い場合には実測よりやや

特集：車両技術

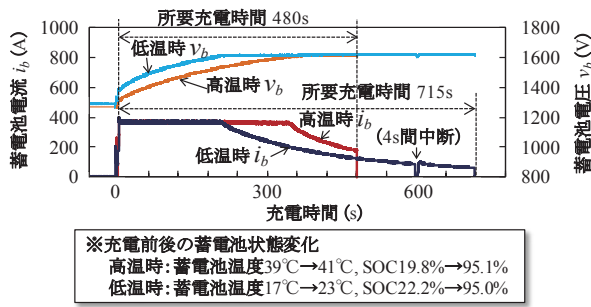


図 13 蓄電池急速充電波形の比較

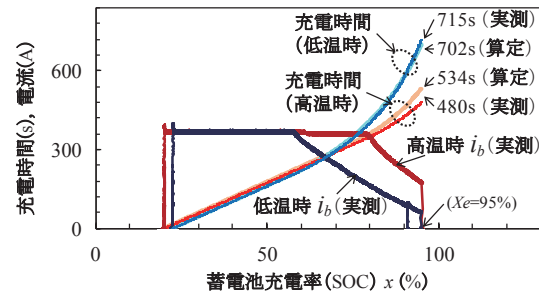


図 14 所要充電時間の算定値評価

短い試算，高い場合には実測より長い試算となって精度向上の余地があるものの，概略の所要時間は算定可能であった。

所要充電時間増大への対策としては，定電圧充電に至らないように低めのSOCで充電を停止する方法が考えられるが，蓄電池残量確保とのトレードオフとなる。冬期の蓄電池起動後に早期に温度上昇させて内部抵抗を低下させることも有効な対策である。

5. まとめ

既存の交流電車の改造により，交流電化路線と非電化路線を直通可能な蓄電池電車（試験車）を開発した。高電圧蓄電池を直流ステージに直結すること等により追加機器をコンパクトに構成した。春・夏・冬の各期に実施した走行試験を通しての蓄電池性能評価結果は以下の通りである。

- (1) 搭載した 83kWh のリチウムイオン電池のみによる走行距離（航続距離）は空調不使用時に約 30km（中間～桂川間）となった。冷暖房負荷が大きく最高速度が 80km/h 以上と高い条件では，最短で約 20km となった。蓄電池残量切れを防ぐためには消費電力量の把握と省エネ化が重要である。
- (2) 蓄電池温度は夏期に最高 51.5℃となり，上限 65℃に対しては十分余裕があった。冬期は過冷却やモジュール間温度差への配慮も必要である。
- (3) 急速充電の所要時間は蓄電池低温時に増大した。蓄電池内部抵抗が低温時に増加し，満充電付近での電流絞込みが顕著となるためである。蓄電池の使用領域や温度管理に留意する必要がある。

これらの試験結果から，開発した蓄電池電車が電化路線と非電化路線の直通に必要な性能を有することを確認した。今後は試験車の現車試験で得られた知見をさらに分析し，量産車の設計につなげる予定である。

謝 辞

本開発の一部は，九州旅客鉄道株式会社が国土交通省の鉄道技術開発費補助金の交付を受けて実施した。共同開発に参画頂いた株式会社日立製作所，株式会社GSユアサの関係各位，および，試験測定に御協力頂いた株式会社テスの関係各位のご尽力に対し謝意を表す。

文 献

- 1) 小笠，田口，大江，廿日出，末包，門脇，仲村：架線・バッテリーハイブリッド LRV の軌道線走行試験結果概要，平成 20 年電気学会 D 部門大会講演論文集，Vol.3, 3-18, pp.187-190, 2008
- 2) 真保，神孫子，菫田，柴沼：蓄電池駆動電車システムの実用化に向けて，平成 25 年電気学会 D 部門大会講演論文集，Vol.4, 4-S7-9, pp.61-62, 2013
- 3) 滝口：蓄電池駆動電車 EV-E301 系の概要，R&M, vol.22, No.5, pp.4-7, 2014
- 4) 畠田，田口，金子，木村：交流電車の改造による蓄電池電車化（蓄電池搭載化改造と走行試験概要），第 20 回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2013）講演論文集，S3-3-5, pp.233-236, 2013
- 5) 田口，三木，小笠，畠田，木村，金子：交流電車の改造による蓄電池電車化（蓄電池システムの構成と走行試験による性能確認結果），第 20 回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2013）講演論文集，S3-1-5, pp.183-186, 2013
- 6) 門脇，仲村，山本，畠田，金子，木村：交流電車の改造による蓄電池電車化（走行時の消費電力量測定結果），第 20 回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2013）講演論文集，S3-1-2, pp.173-176, 2013