

蓄電池駆動電車 システムの 車両システムの評価



藺田 秀樹*



柴沼 健一*



廣瀬 寛*



吉田 耕治**

蓄電池駆動電車システムの実現に向け、2009年にNETレインを改造しシステムを搭載した。蓄電池と蓄電池充電などに使用するDC/DCコンバータ以外は既存の主回路システムの考え方を踏襲している。主な開発目的として、車両に搭載した主回路蓄電池に充電した電力を使用して非電化区間を走行すること、折り返し駅などで主回路蓄電池に急速充電を行うことなどとし、直流区間での実用化を想定して定置試験、走行試験、地上装置との組合せ試験を実施してきた。2012年3月烏山線での走行試験において、計画したすべての試験を終了し、実用化に向けた検証・評価を終了し、営業投入に問題ないことを確認した。

●キーワード：蓄電池駆動システム、リチウムイオン蓄電池、DC/DCコンバータ

1. はじめに

自動車業界におけるハイブリッド車や電気自動車の開発の進展に伴い、近年、蓄電池の性能が著しく向上してきた。鉄道においても、新たな大容量蓄電池を搭載し、架線のない区間も走行可能な車両としてLRV (Light Rail Vehicle) の開発が進められている。

蓄電池の出力（パワー密度）や容量（エネルギー密度）も向上する一方、蓄電池の価格もディーゼルハイブリッド車両開発時と比べて低下してきており、車両に大容量蓄電池を搭載して、非電化区間を蓄電池の電力のみで走行できる可能性が見えてきた。

これらの状況を踏まえ、非電化区間を走行する車両の環境性能をさらに向上するための方策として、架線の下では従来の電車と同様に走行でき、非電化区間ではパンタグラフを下げ蓄電池の電力のみで走行する「蓄電池駆動電車システム」の開発を行った。

2. 蓄電池駆動電車の概要

2.1 車両の構成

車両は、2003年にディーゼルハイブリッド車両の開発のために試作したキヤE991形「NE Train」をベースとし、2006年に燃料電池ハイブリッド車両に改造後、2008年に新たに蓄電池駆動システムへの改造を施した3代目の試験車両E995形である。表1に車両の主要諸元を示す。蓄電池電圧は公称が600Vであり、架線電圧を蓄電池の充放電に対応した電圧に変換するためにDC/DCコンバータを設けており、蓄電池の充電と走行用電源の両方に供給可能な容量としている。

主回路蓄電池容量は開発当初9ユニット（163kWh）を搭載したが、走行試験において適正容量が把握できたことや、将来の営業投入時の機装などを考慮し、2010年8月に4ユニットに変更している。

また、主回路蓄電池は当初室内の縦型のユニット構成としたが、営業投入時の機装条件を踏まえ、2011年に1ユニットのみであるが、座席下への収納を実施している。図1に車両の外観を、図2に主回路蓄電池の搭載状況を示す。

表1 車両の主要諸元

項目	内容
車両寸法（長×幅×高）	1950×2800×4052 mm
車両質量	39.9t
最高速度	100 km/h
パンタグラフ	停車中の大電流通電に対応した試作形を屋根上に搭載
DC/DCコンバータ	架線の直流1500Vと蓄電池用600Vを双方向に変換
主回路蓄電池	リチウムイオン蓄電池4ユニットを室内に搭載：600V、72kWh
制御装置	VVVFインバータ方式 入力電圧600V
主電動機方式及び出力	誘導電動機95kW×2台

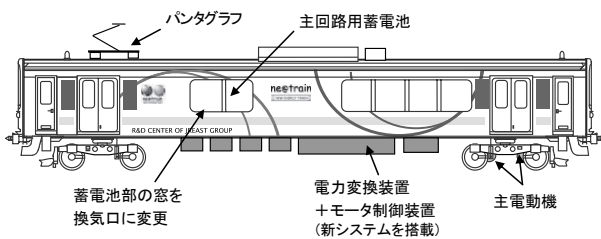


図1 車両の外観



図2 主回路蓄電池の搭載状況
(左：縦型搭載、右：座席下搭載)

2.2 車両制御モード

DC/DCコンバータとVVVFインバータの間で、蓄電池が接続されている600V回路には、電流の流れを切り替えるための接触器などは無く、蓄電池の電圧に対してDC/DCコンバータの出力電圧を調整（充電時は高く、放電時は低く）することで、電力の流れる向きと電流値を制御している。

主電動機駆動用のVVVFインバータは、直流電車と比較し基本の回路構成は変更せず、入力電圧を1500Vから600Vに変えているのみである。走行モードごとの主回路の動作は次のとおりとなっている。

(1) 電化区間

架線電圧をDC/DCコンバータで降圧して走行用電力を供給するとともに、蓄電池のSOC（充電率、State of Charge）が低い場合は蓄電池の充電も行う。ブレーキ時の回生電力は蓄電池の充電を優先するが、SOCが高い場合は架線へ

の回生を併用する。

電化区間で架線電圧が低い場合などは蓄電池からの電力も併用して走行する「アシスト走行」も可能である。また、上り勾配の終端の駅となる場合などは、積極的に蓄電池の電力を使って走行し、その後、勾配を下る際に回生電力を吸収する余地を確保するという運転方法も可能である。

(2) 非電化区間

DC/DCコンバータは運転を停止し、単純に蓄電池からの電力のみでの走行となる。ブレーキ時の回生電力は蓄電池に充電するほか補助電源にも供給される。

(3) 非電化区間内での充電

充電設備のある駅に停車した場合は、パンタグラフを上げ、急速充電を行う。充電終了後は再びパンタグラフを下げて走行を行う。

3. 現車試験

3.1 試験内容とスケジュール

大宮総合車両センター試運転線で基本的な機能評価を実施したのち、2010年1月から本線走行を開始した。力行・ブレーキ・保安装置などの性能確認を経て、蓄電池特性、力行消費電力量、回生ブレーキでの充電、地上設備からの充電特性などの各種評価を実施し、2012年3月までの試験で計画した試験をすべて完了した。

3.2 試験結果

(1) 車両性能

走行試験を通して車両性能、制御が計画どおりであることを確認した。周囲温度により蓄電池の充放電能力が変わることから、夏季、冬季に同区間（東北本線、自治医大～石橋）で走行試験を実施し、基本性能に差異が生じないことを確認した（図3）。

(2) 走行消費電力量

蓄電池駆動電車システムでは、限られた蓄電池でどれだけの航続距離が得られるかの評価が重要なポイントである。図4に非電化区間（烏山線 宝積寺～烏山線間）の約20km（標高差約50m）を、最高速度65km/hで各駅停車走行した際の消費電力の内訳を示す。

烏山線は、上り（烏山→宝積寺）が上り勾配基調であり、下り（宝積寺→烏山）と比較して、力行電力量が多く、回

生電力量が少ないことから、走行消費電力量が約2.6倍必要となる結果となった。しかしながら、上りにおいても、使用した蓄電池4ユニット（72.5kWh）に対し、計画の使用下限であるSOC20%までは18.7kWhの余裕があることが検証された。また、同等の走行条件で冬季における走行試験を実施し、周囲温度による走行消費電力量に差がないことを確認した。

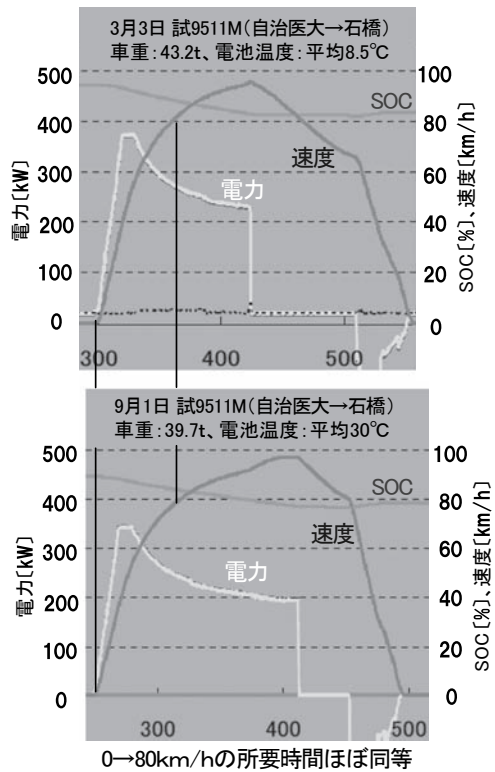


図3 夏期・冬期の力行性能比較

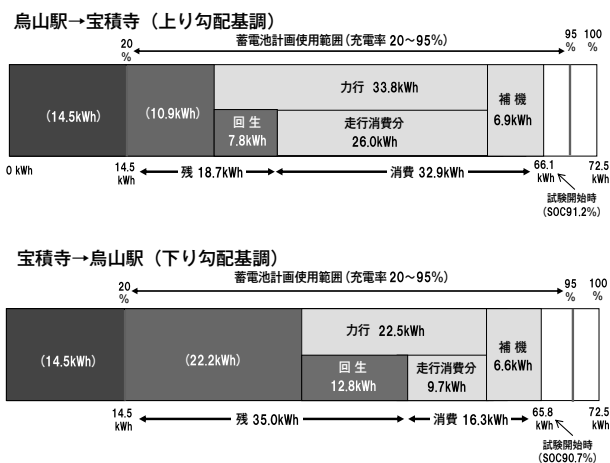


図4 消費電力測定結果 (烏山線)

(3) 蓄電池の回生電力吸収効果

表2に蓄電池の有無による回生率の比較を示す。蓄電池への回生電力の充電を実施すると、架線のみで回生する場合(回生率12.8%)に対し、回生率は16.7%に向上することを確認した。

また、日光線下り勾配において抑速ブレーキによる回生電力吸収状況を確認し、すべての回生電力が蓄電池に充電できることが確認された。

表2 回生電力吸収効果

線区	区間	力行	回生	回生率	備考
宇都宮線	小金井→宇都宮	44.6 kWh	7.5 kWh	16.7 %	蓄電池あり
		42.5 kWh	5.5 kWh	12.8 %	蓄電池なし
日光線	日光→宇都宮	19.3 kWh	23.1 kWh	119.4 %	充電率 19.9→48.5 %
		22.7 kWh	22.4 kWh	98.9 %	充電率 47.7→74.2 %

(4) 力行電力アシスト機能

日光線の上り勾配区間で、架線電力のみの走行と蓄電池からも力行電力をアシスト(アシスト率35%)して走行した場合の比較を図5に示す。アシストありの方が、架線電圧の変動が抑えられており、蓄電池からのアシストにより、力行性能の低下抑制や変電所設備の増設回避といった効果が期待できる。

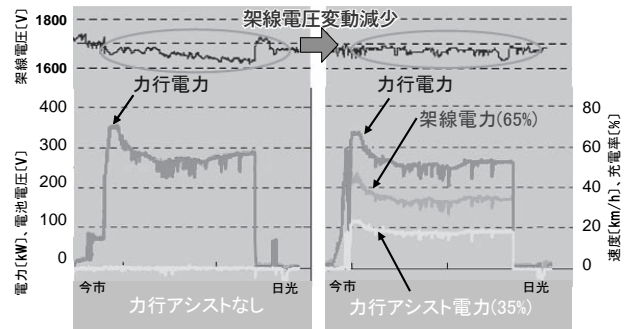


図5 力行アシストの効果

(5) 充電所要時間 (走行時)

走行しながらの充電試験の結果、満充電(充電率: SOC95%)までの所用時間は20分程度であり、非電化区間から電化区間への直通運転の間に、次の非電化区間走行に備えた充電も実施可能であることを確認した(図6)。

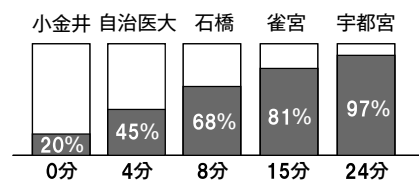


図6 走行時の充電時間

(6) 充電所要時間 (停車時)

地上設備と組み合わせた現車での充電試験の結果、蓄電池の温度によっては充電時間が目標時間内(蓄電池新品時で7分程度)におさまらないことが判明した。図7に示すと

おり、SOCが高い状態では充電時間がかかることから、SOCの使用上限を約5%下げることし、充電試験を行った結果、蓄電池温度15℃程度においても目標時間以内に充電を完了できる見込みが立った(図8)。(SOCの使用上限を下げると使用できる容量が減少するため、蓄電池の容量を5%程度増加することが必要となる。)

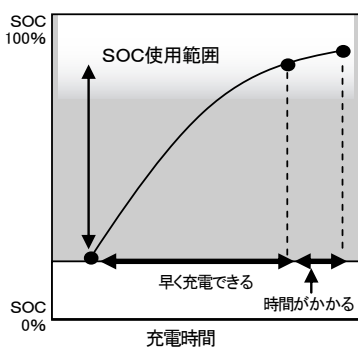


図7 充電時間とSOCの関係

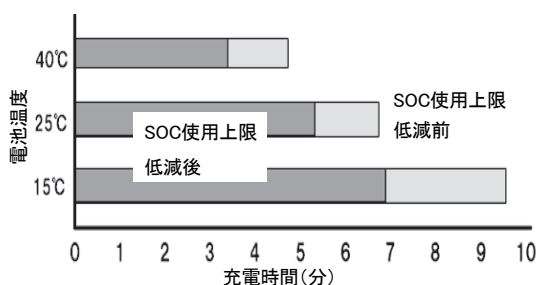


図8 SOC使用上限による充電時間短縮

(7) 蓄電池温度差試験

蓄電池の温度差は充放電頻度が高くなり、寿命短縮の要因となるため、温度環境を考慮した艤装が必要であることを確認した(図9)。

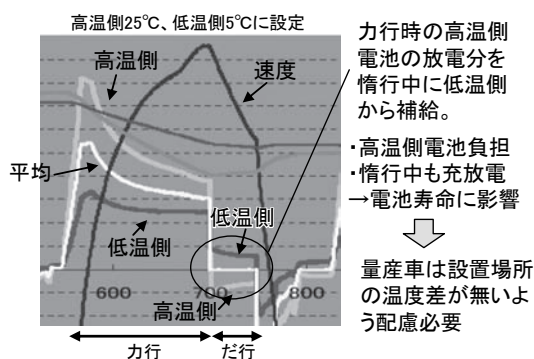


図9 充放電電流の挙動

(8) 蓄電池腰掛下収納の確認

営業投入時の艤装条件を踏まえ、蓄電池を座席下に搭載し、艤装性と温度の確認を行った。密閉構造であるが、烏山線での走行試験の結果、蓄電池温度は仕様の上限值に対して10℃以上余裕があることが分かった。



図10 座席下に収納した蓄電池

(9) 低温時の蓄電池温度の推移

車両を低温下・無加圧で留置した場合に蓄電池温度がどの程度下がるか調査するために、座席下収納状態での蓄電池温度の推移を調査した。実運用を考慮し、蓄電池温度45℃から測定を行ったところ、夜間留置として想定される時間(5時間)経過後の蓄電池温度は27℃であり、蓄電池使用温度範囲内に収まることが分かった。

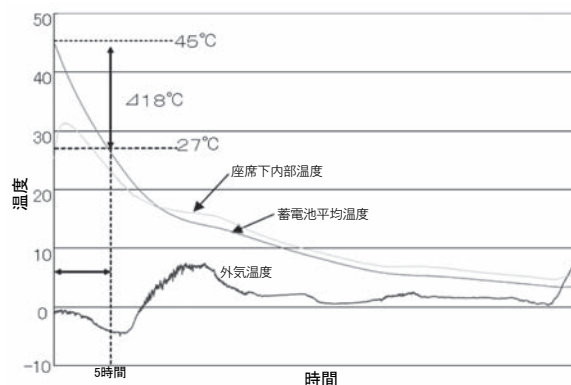


図11 低温時の蓄電池温度の推移

4. おわりに

NETレインに蓄電池駆動システムを搭載し、2009年から走行試験を実施し、蓄電池による走行性能や地上装置を用いた充電時間などの検証を進めてきた。2012年3月までの現車試験で計画した試験をすべて完了し、営業車に採用できることを確認した。

今後の実用化に向けて、営業車に投入する際の仕様について提言を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 柴沼健一, 吉田耕治; 蓄電池駆動電車システムの開発と評価, translog2010, 2010.8.
- 2) 柴沼健一, 吉田耕治, 北中英俊, 小西和紀, 美馬正明, 西田淳; 蓄電池駆動電車システムの開発; translog2011, 2011.12.