

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

車載蓄電池で車両の環境性能を向上する

近年、走行用の蓄電池を搭載した鉄道車両が広まってきました。ここでは、JR九州ほかと鉄道総研が共同開発を行い、2016年から営業運行している蓄電池電車（BEC819系“DENCHA”）に注目し、省エネ性などの環境性能について概説します。まず、従来の電車や気動車と、蓄電池電車の省エネ性を比較します。また、BEC819系の省エネ性能を高めたポイントを、関連する走行試験結果を交えて解説します。さらに、蓄電池の交換回数を減らすことも環境性能の向上ととらえて、蓄電池を長寿命化する方策についても紹介します。



田口 義晃
Yoshiaki Taguchi
車両制御技術研究部
駆動制御研究室
主任研究員
【専門分野】車載蓄電池のシステム構成、特性分析



門脇 悟志
Satoshi Kadowaki
車両制御技術研究部
駆動制御研究室
副主任研究員
【専門分野】車載蓄電技術、車載電機品の信頼性

蓄電池搭載車両の広がり

(1) 最近の蓄電池搭載車両

近年、鉄道車両に駆動用の蓄電池を搭載して、各種性能を高める取り組みが活発に行われています¹⁾。2007年から営業運転を開始したのは、ディーゼルエンジンと蓄電池を組み合わせるディーゼルハイブリッド車両です。ブレーキ時に発生する回生エネルギーを蓄電池に吸収・再利用することと、エンジンを高効率に稼働させることにより、燃料消費の低減、排出ガスの削減を実現しています。

一方、2014年から登場したのは、蓄電池（リチウムイオン電池）のエネルギーによって非電化区間を走行できる蓄電池電車です（図1）。蓄電池の充電は、既存の電化区間や、非電化区間に設置する充電所の架線を利用して行うほか、回生エネルギーによって行います。

このほかに、架線停電などの非常時に限定して蓄電池を利用する車両も登場しています。架線が停電した場合でも、低速・短距離の走行によって乗客を安全な場所に誘導できるため、安全性が向上します。

(2) 蓄電池電車の過去と現在

ここからは、蓄電池電車に注目します。蓄電池電車には、19世紀末からの長い歴史があります¹⁾。登場当時からよく用いられてきたのは鉛蓄電池でしたが、電池が重いことや、充電や保守に費やす時間と労力が課題でした。このため、導入事例は少なく、近年ではほとんど運転されていませんでした。

1990年代に入り、小型・軽量で急速充電も可能なリチウムイオン電池が登場すると、鉄道車両に適用するために多くの研究開発が行われました。鉄道総研でも1999年より研究に着手し、LH02形“Hi-tram（ハイ！トラム）”などの試験車両の開発と実証試験を重ねました²⁾。2014年3月には国内初の本格的な蓄電池電車として、JR東日本の烏山線にEV-E301系“ACCUM（アキュム）”が導入されました。この車両は直流架線から充電する方式です。交流架線から充電する方式については2012年からJR九州ほかと鉄道総研が共同開発に着手し、2013年に既存の817系を改造した試験車（図2）の走行試験を行いました²⁾。その成果を反映して開発したのがBEC819系

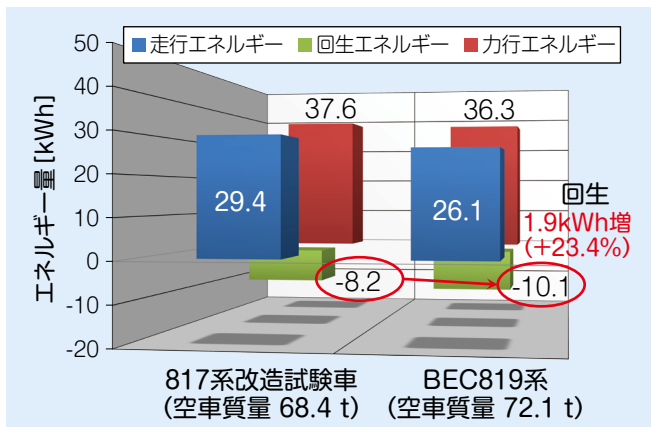


図5 回生性能向上効果の測定例

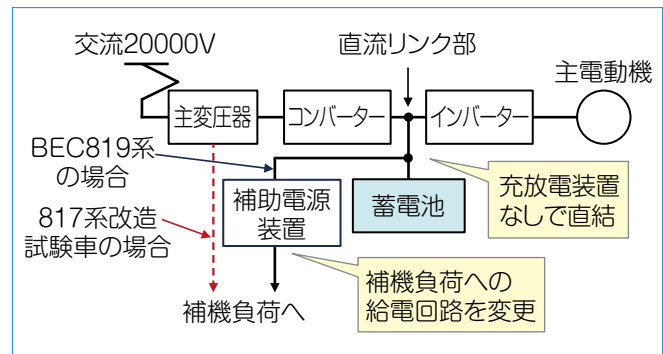


図6 電力変換損失を低減したBEC819系の主回路

は増加しません。一例として、BEC819系に重りを積んで車両質量を約10%増加させた場合の走行エネルギーは、重りを積む前に比べて2~3%しか増加しませんでした。ほぼ平坦な区間で最高速度をそろえた場合の比較です。

以上のように、高頻度運転線区のケース①と比べると、蓄電池電車は車両が重くなる影響で消費エネルギーも増加傾向となります。一方、低頻度運転線区のケース②と比べると、車両が重くなる影響よりも回生絞り込み量を減らす影響が上回る場合が多いと想定され、省エネルギー化が期待できます。

なお、図4は平坦区間で最高速度をそろえて走行した場合の比較イメージです。また、交流電化区間は変電所より上流の電力系統に電力が返せるため、低頻度運転線区でもケース①に近い場合が多いと考えられます。回生電力を有効利用する設備を架線に接続している場合もケース①に近くなります。このように、エネルギー消費には実路線のさまざまな条件が関係しますので、詳細には個別計算が必要です。

蓄電池電車の省エネ性向上方策

(1) 回生性能を向上する

蓄電池が回生エネルギーを十分に吸収できるためには、大きな回生パワーに対応できるように、インバーターと蓄電池を設計することが重要

です。2013年度に走行試験を実施したJR九州817系改造試験車の場合では、蓄電池への回生パワーの最大値は約640kWでしたが、BEC819系では820kWと1.3倍に高めました。その結果、図5に示すように、回生エネルギーが増加し、走行エネルギーが低減しました。

架線に回生する従来の電車では、回生パワーの最大値を増大しても、架線側の負荷が吸収できなければ回生エネルギーは増えません。架線側の制約を受けずに回生パワーの最大値を設計できるのは、蓄電池電車の利点です。

(2) 電力変換損失を低減する

蓄電池の充電や放電を制御するためには、専用の充放電装置を追加することがあります。その場合には、充放電装置で発生する電力変換損失や、質量の増加が課題となります。そこで、交流電車がもともと備える機器を最大限に活用して充放電装置の追加を不要にしたのが、図6に示すBEC819系の主回路構成です。既存のコンバーターに充電制御機能を追加し、蓄電池の電圧を1600Vと高めたことによって実現しました。

さらに蓄電池から補機負荷（空調や照明など）への給電回路にも特徴があります。817系改造試験車では、蓄電池から補機負荷までに二つの機器を経由していたため、機器内の損失が少な

からず発生していました。BEC819系ではこの点を改善し、補助電源装置のみを経由して蓄電池から補機負荷に給電し、損失低減を図りました。この改善には、架線走行と蓄電池走行との切替時に補機負荷を停電させないなどの目的もあります。

(3) 蓄電池の充放電効率を向上する

蓄電池電車が非電化区間を走るためのエネルギーは、蓄電池に一旦蓄えたものを使います。架線から即座にエネルギーが供給される従来の電車に比べると、蓄電池を放電または充電する際に、蓄電池の内部損失が発生し、その分だけ余計にエネルギーが必要となります。充電エネルギーを W_r 、放電エネルギーを W_s 、内部損失エネルギーを W_i と表すと、

$$W_r - W_s = W_i \text{ [kWh]}$$

の関係が成り立ち、充放電効率 η_{cd} は次式で定義されます。

$$\eta_{cd} = W_s / W_r \times 100 \text{ [%]}$$

BEC819系の走行試験データから充放電効率を算出した例を表1に示します。急速充電を行った条件A、電化区間で行うゆっくりとした充電（緩慢充電）を併用した条件B、緩慢充電のみを行った条件Cの順に充放電効率は増大しています。詳細には放電時の電流条件や蓄電池温度の影響も受けていますが、概して急速充電より緩慢充電のほうが充放電効率は大きいといえます。

表1 BEC819系における充放電効率の算出例

条件	充電方法	エネルギー量 [kWh]			充放電効率 η_{cd} [%]	蓄電池平均温度 [°C]
		放電積算 W_s	充電積算 W_r	内部損失 W_i		
A	急速のみ	257.8	273.2	15.4	94.4	38.3
B	急速/緩慢	67.6	70.6	3.0	95.9	27.1
C	緩慢のみ	72.1	73.7	1.6	97.8	24.6

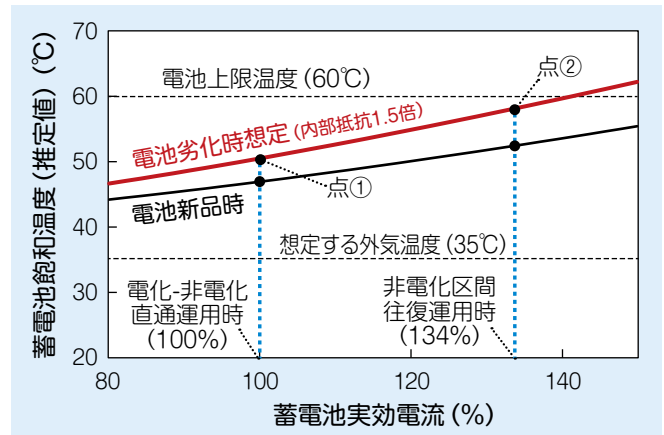


図7 BEC819系の蓄電池飽和温度の推定

蓄電池電車が電化区間に直通運転をしている間に緩慢に充電できれば、急速充電のみで充電するより省エネルギーです。さらには、同じ電化区間を走るほかの車両からの回生エネルギーも充電に利用できるため、他車両の回生エネルギーを従来以上に有効活用できる可能性があります。

蓄電池を長寿命化する方策

(1) 長寿命化のポイント

鉄道車両に適した大型のリチウムイオン電池は、現状では比較的高価であり、リサイクル技術が未確立です。そのため、蓄電池を頻繁に交換することは、コストと環境負荷の面で好ましくありません。そこで、環境性能向上の一環として、蓄電池を長寿命化する方策について紹介します。

現在普及しているリチウムイオン電池の場合、寿命を短くする一般的な要因として、(a) 深い充放電を繰り返す、(b) 高い電圧で長く使う、(c) 高温で長く使うことがあげられます⁴⁾。BEC819系の場合、非電化の若松線を一往復する際には、搭載している蓄電池容量360kWhの20%程度しか消費しないため、(a) の充放電の影響は大きくありません。また、毎回の充電を約80%の充電率で止める設計としているため、(b) の高い電圧の影響も小さいといえます。

(2) 蓄電池の高温を避ける

前節(c)の高温を回避する方策は、蓄電池の使い方に見合った放熱性能を持たせることです。放熱性能の評価は、新車導入時の走行試験のみでは不十分です。蓄電池が将来劣化して内部抵抗が増大すると温度上昇しやすくなりますが、新品の蓄電池ではこのような条件での試験ができないためです。

そこでBEC819系の開発においては、走行試験データに基づいて蓄電池の放熱に関するシンプルな熱モデルを構築しました。これを用いれば、蓄電池の温度推移を簡便に推定することができます³⁾。

この熱モデルの計算条件として、劣化時に想定される蓄電池の内部抵抗を使えば、劣化した蓄電池の温度が推定できます。蓄電池に長時間通電した際に到達する飽和温度の推定結果を図7に示します。蓄電池に流す実効電流の増加および蓄電池の劣化により、蓄電池の飽和温度は増加します。現在若松線で運行するBEC819系はほとんどの時間帯で電化区間に直通運転しています。この場合の実効電流は100%相当ですので、蓄電池の劣化を想定しても飽和温度は約50°C(点①)と試算されます。このような蓄電池の使い方であれば、急激な劣化を招かず、上限温度の60°Cには到達しません。しかし、非電化区間のみで運行する場合は、急

速充電が頻繁になるなどの理由で実効電流は134%相当に増加します。これを長時間継続する運用を仮に行うとすれば、蓄電池の劣化を想定すると上限温度の60°Cに近づく(点②)と試算されます。このような蓄電池の使い方は避ける必要があります。

このように推定計算を併用して将来にわたる放熱性能を評価し、蓄電池の極端な劣化を招かない使い方を行うことが長寿命化につながります。

おわりに

蓄電池電車による環境性能向上についての概要や、さらなる向上のための要点を述べました。蓄電池電車のエネルギー消費と環境負荷がより一層低減し、鉄道車両全体の環境性能改善につながるように、今後さらなる技術開発に取り組んでいく予定です。RRR

文献

- 1) 小笠正道：バッテリー電車の最近の動向，鉄道総研報告，Vol.29，No.9，pp.51-60，2015
- 2) 田口義晃，門脇悟志，小笠正道：架線・バッテリーハイブリッド電車による省エネ化，RRR，Vol.72，No.8，pp.12-15，2015
- 3) 田口義晃，門脇悟志，仲村孝行，吉川岳，皇田憲司，畑中宏文，金子貴志：交流架線式蓄電池電車のための主回路システムの開発と評価，鉄道総研報告，Vol.32，No.1，pp.41-46，2018
- 4) 電気化学会 電池技術委員会：電池ハンドブック，オーム社，2010