

## 架線・バッテリーハイブリッドLRVの軌道線走行試験結果

車両制御技術研究部 駆動制御  
研究室長 小笠 正道

### 1. はじめに

架線・バッテリーハイブリッド電車は、架線または車載バッテリーのいずれか、あるいはその両方から駆動エネルギーを得て走行し、またブレーキ時の回生エネルギーを上記電源のいずれかまたはその両方に返還することでエネルギーの有効活用が可能な、電源ハイブリッド型電車である。バッテリーに回収蓄積されたエネルギーは加速時等に再利用されて消費エネルギー削減に寄与する。バッテリーと充放電器の搭載による質量増に伴う消費エネルギー増加に対し、回生エネルギー増大量が上回れば省エネになる。架線電圧低下の抑制や、回生ブレーキの信頼性向上も可能である。さらに、無架線区間では、バッテリーのエネルギーによる架線レス駆動が可能である。

このような車両の実現に向けて、1つの柱として車載バッテリーのエネルギーのみで無架線区間を連続走行可能とするため、数km間隔の途中駅等で短時間にエネルギー補給を行う、急速充電技術の開発を行なった<sup>(1)</sup>。また、もう1つの柱として、営業線を走行可能なLRV車両「Hi-tram」を製作実現し、実路線走行による1充電走行距離、寒冷地でのバッテリー性能、架線・バッテリーハイブリッド走行時のエネルギー消費削減効果、などのデータ取得を行なった<sup>(2)</sup>。ここでは、後者に目的を絞り走行試験結果を報告する。

### 2. 架線ハイブリッド（架線レス）蓄電型電車で架線区間をハイブリッド走行する意義

架線と車載バッテリーのハイブリッド走行を行なうことによるメリットは以下のとおりである。

#### (1) 環境面

回生負荷に起因する回生失効や回生絞込みを低減し、架線に返せない回生エネルギーを車載バッテリーに蓄電して再利用することで、エネルギーの有効活用による省エネルギー化が図られる。摩擦ブレーキ使用割合の減少による摩耗粉塵低減や不快なきしり音低減も可能である。

#### (2) サービス面・運用面

回生失効や回生絞込みの低減により、回生ブレーキ信頼性の向上が可能となる。摩擦ブレーキ使用割合の減少で、ブレーキシュー（制輪子交換）頻度低減や、車輪熱亀裂、凹摩耗の抑制に役立つ。また、き電抵抗とパンタ点上限電圧制限による架線授受可能パワーを超える電気パワーを車両駆動系に持たせることが可能である。高速域で設計上増大する電気パワー分を車載バッテリーで負担することで、架線と授受するパワーを抑えながら加速アシストによる時分短縮を実現したり、ブレーキ時の高速から停止までの回生ブレーキ分担率を向上したりできる。

変電所のピークパワー低減や地上設備増強なしに架線電圧低下を防止することも可能である。

#### (3) 建設・保守面

電気エネルギーで一元化されており、同じハイブリッドでもエンジン方式や燃料電池方式と異なり、液体燃料（軽油）や気体燃料（水素）を扱わないので保守が容易である。パンタグラフ上昇によって架線からの充電が容易であり、蓄電残量調整によるエネルギー管理を行い易い。将来的には電気バスや電気トラックなどとの充電所の兼用も想定できる。

### 3. 架線・バッテリーハイブリッド LRV 試験電車

車体は、車長 12.9m の単車体で、一般的なボギー台車を用いた部分超低床車両であり、レール面からの乗降口および床面高さは 350mm、超低床部はスロープのないフルフラット構成である。4 軸全てが電動軸で、空転滑走を抑制しつつ高い加減速度を得るとともに、鉄道線走行を見越した速度 70km/h 以上の性能を持つ。

バッテリーは定格電流の 20 倍電流による急速充放電が可能なマンガン系リチウムイオン二次電池を用いており、定格 600V・120Ah (72kWh) で冷却系や遮断器等の保護システムも全て含めて約 2 トンの質量である。車両前後端のスラント部から優先的にモジュールを配置し、残りを乗務員席近傍に配置した。

主回路は、直流 1500V と 600V の複電圧架線、車載バッテリー 600V 対応のコンバータ・インバータシステムとした。コンバータは架線側チョップパとバッテリー側チョップパから成り、中間回路電圧 750V に制御される。そのためインバータおよび SIV 機器は全て低圧用機器の構成とした。

制御は架線優先とし、力行時や回生時には、架線電圧が所定値に達した段階でバッテリーとのパワー授受が開始される。架線と授受する電流をある値以下に抑制する設定も可能である。

また、バッテリー電圧が所定範囲を超えると架線電流 50~100A による調整充電が自動的に行われる。

充電所では乗務員が運転台の急速充電ボタンを押すことでバッテリー充電電流 500A や 1000A での停車中急速充電が可能となる。随所設置の充電所での停車中充電や、既存電化区間走行中の架線からの充電により、非電化区間の架線レス・バッテリー連続走行が可能となる (図 1)。

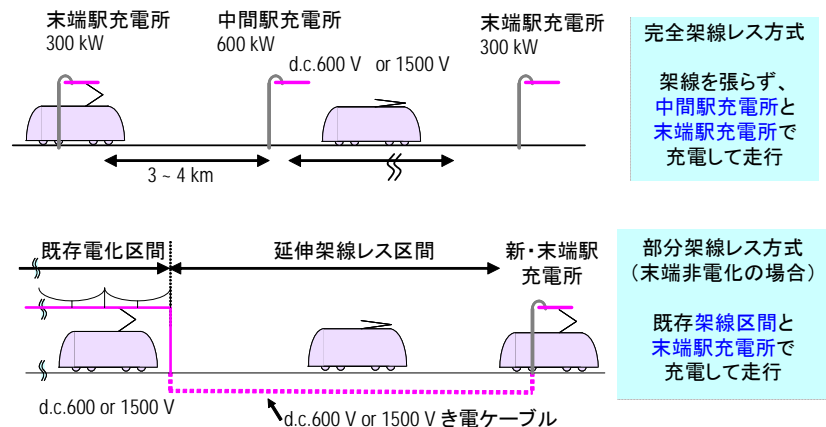


図 1 架線レス走行のイメージ

### 4. 軌道事業者営業線（札幌市交通局軌道線）における走行試験

2007 年 11 月 22 日から 2008 年 3 月 7 日までの間、延べ 40 日に亘り軌道線の本線走行を行った。電車事業所構内も含めた総走行距離は 2,196km、本線走行距離は 2,083km で、うちバッテリー走行分が 413km (約 20%) であった。

片道 8.5km の路線 1.5 往復 (入庫分を併せると 25.8km、約 3 時間走行) を基本単位として 1 日当り 3 往復 (約 6 時間走行) または 4.5 往復 (約 9 時間走行) の試験を行った。架線・バッテリーハイブリッドモード (図 2) を基本とし、架線電流 200A を超えるパワー分は全てバッテリーから供給した。変電所から取る電流を抑制しつつ高加減速を実現している。また、バッテリーのみでの走行も実施した。



図 2 架線・バッテリーハイブリッド走行

#### 4.1 バッテリーのみの無給電走行

バッテリーのみでの1充電走行では、例えば1日の平均外気温度マイナス2℃前後の日に空調暖房温度20℃設定の状態で行った試験を実施した。1.5往復 25.8km の距離を消費電力量 42kWh (バッテリー容量 72kWh の58%)、約3時間で走りきることができた(図3)。

バッテリー温度上昇は5℃で収まった。また、駆動インバータの回生効率(回生電力量を力行電力量で除した値)は41%であり、最も良いとされる山手線なみのエネルギー回収率が実現できている。ブレーキ時のバッテリーへの電力回生の有効性が現れている(図4)。

#### 4.2 低温起動試験

低温降雪環境下で夜間に屋外留置した後の朝に、バッテリー温度マイナス5℃(外気温マイナス10℃)などの低温状態での起動試験を行った。起動直後から主電流通電が可能であった。

#### 4.3 ハイブリッド走行による省エネ効果(バッテリー搭載による回生失効防止の有効性)

複電源回生可能回路であることを考慮して、各機器入力段におけるパワーフローに着目して消費電力量比較を行った(図5)。

架線・バッテリーハイブリッド走行における消費電力量内訳の例を図6に示す。空調暖房20℃設定状況下の走行で、回生効率が34.1%、電源回生率(回生電力量を力行電力量と補機電力量の和で除したもの)が17.0%であった。

バッテリーが搭載されなかったと仮定した場合、電源回生は架線のみとなるため、バッテリーへの回生電力量を除いて算出すると、電源回生率が2.84%、回生効率が5.69%まで低下する。結果的に、1往復での調整充電分を除く架線からの供給電力量48kWhのうち、バッテリー

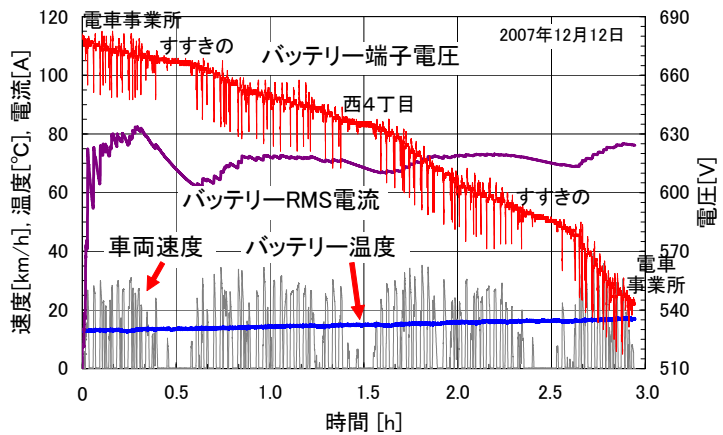


図3 軌道営業線でのバッテリー1充電走行(無給電走行距離1.5往復=25.8km)

#### バッテリー駆動(1.5往復)時の放電内訳

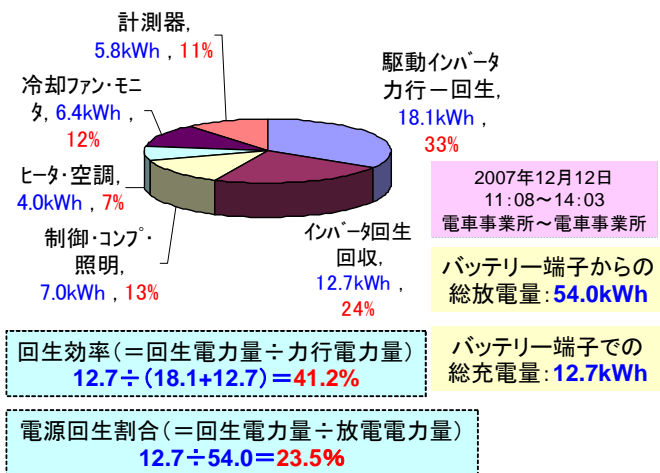


図4 電力回生の有効性

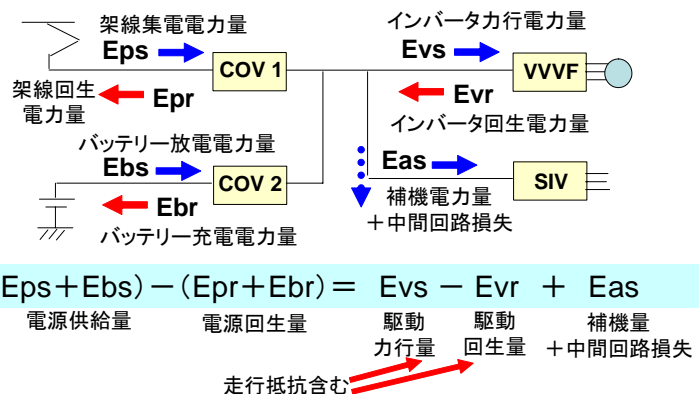


図5 エネルギー消費内訳の分析

への回生電力量 6.8kWh 分すなわち 14%のエネルギー削減が実現されたことになる。バッテリー搭載による回生失効防止効果が得られている。

#### 4.4 試験シリーズ前後での バッテリー容量変化

シリーズ前後でのバッテリー容量測定結果からは有意な差が見られなかった(図7)。約4ヶ月程度では劣化が認められない結果となった。

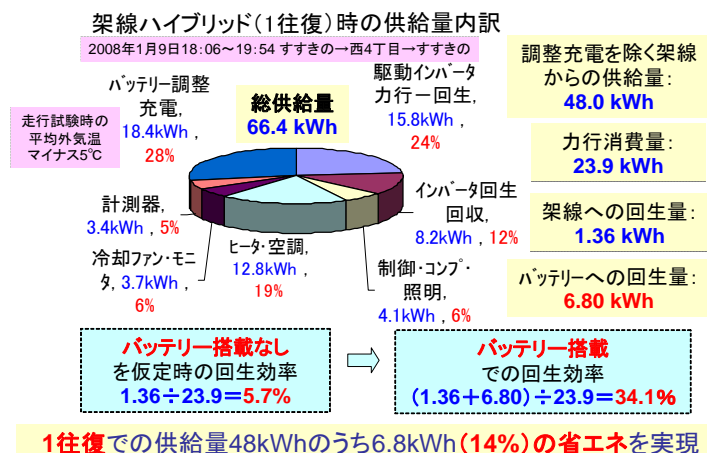


図6 バッテリー搭載による回生失効防止の有効性

#### 5. まとめ

- 直流1500Vと600Vの複電圧架線に対応し、公称電圧600V、エネルギー容量72kWhのリチウムイオンバッテリーを搭載した架線・バッテリーハイブリッドLRVを製作した。
- 開発したLRVを用いて、札幌市交通局の軌道線における走行試験を行った。
- バッテリー1充電走行では、距離25km以上、回生効率40%以上の値を得た。
- 低温降雪環境下における車両起動も問題なく、リチウムイオンバッテリーが寒冷地でも十分使用できることが明らかとなった。
- 架線・バッテリーハイブリッド走行では、バッテリー搭載による回生失効防止の有効性として、バッテリー搭載がなかったとした場合に比べ14%の消費エネルギー量削減例があった。

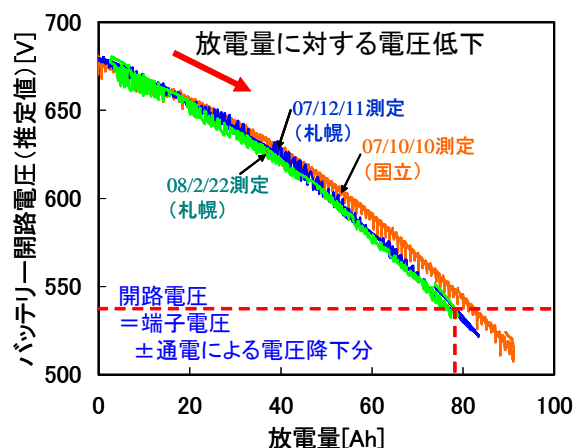


図7 バッテリー容量変化

軌道線における営業ダイヤと同等の走行試験の結果、架線・バッテリーハイブリッドLRVの導入により10%程度の省エネルギー効果が得られることが分ってきた。試験期間中のバッテリー交換等も一切無く、寒冷地における走行においても特段の課題は生じなかった。

今後も、Hi-tramを用いた高速走行試験や急速充電試験の繰返しによる信頼性向上などにより、都市内と都市間の交通改善に寄与できると考えている。

なお、本研究開発は、2005年度から2007年度にかけてNEDO(独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)の委託契約に基づき実施した。

最後に、営業線での試験走行をご快諾頂くとともに多大なご協力を頂いた札幌市交通局殿に、あらためて深く感謝致します。

文献1) 小笠・田口・末包・前橋・兎東・菅原, 「架線レスLRVの停車中急速充電システムの開発」, 鉄道総研報告 Vol.22, No.9, pp.35~40, (Sep.2008)

文献2) 小笠・田口・大江・甘日出・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年電気学会産業応用部門大会 3-18, pp.III-187~190, (Aug.2008)