

バッテリー搭載型電車の展開

Extension of Battery-onboard Rail Electric Vehicles

小 笠 正 道 *

Masamichi Ogasa

Railway Technical Research Institute (RTRI)
2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji, Tokyo. 185-8540, Japan

Abstract

Regenerative brake of railway electric vehicles is effective when the other powering ones, in other words electrical load, exist near the regenerating train on the same electrified line. So, early in the mornings and in the late nights, or in the low density district lines, regeneration cancellation phenomenon often occurs and the regenerative brake force cannot be operated in accordance with the commanded value. Newly appeared high performance energy storage devices press the issues of energy storing and re-use technologies for on-ground and on-vehicles. Hybrid energy source is one effective solution. In this paper, the effectiveness use of regenerating braking and the expected electricity storage technology in the future for further energy conservation in the electric railway vehicles' field will be outlined, with actual examples.

Key words: Regenerative brake; Energy storage; Hybrid; Catenary-free; Lithium-ion battery; Quick charge

1 はじめに

架線下を走行する電車にわざわざバッテリーを搭載することの意義とその具現化例を紹介する¹⁾。

鉄道は他の交通機関に較べて省エネで、単位距離を1人運ぶのに必要なエネルギー量（エネルギー消費原単位）は、403 [kJ / 人・km] で、乗用車の2,583 [kJ / 人・km] の1/6以下である²⁾。まず、走行抵抗が小さくエネルギー損失が少ないという特長がある。例えば質量400トンのほぼ満員の10両編成通勤電車が速度100 km/hまで一旦加速した場合、ブレーキをか

けずに惰行し続けると、半分の速度である50 km/hに減速するまで370秒を要し、その間に7.4 km進むといった実態がある（Fig. 1）。また、ここ10年来のハイブリッド自動車の実用化で社会一般への認知度が高くなってきた“ブレーキ時の電力回生”技術も、電気鉄道では1970年代から広く実用化されていた。国内での下り勾配の抑速回生が最初に実用化されたのは1920年代である。

電気鉄道で電力回生が早くから実用化できた要因は、電気車が架線を媒介に他の電気車とパワーを融通できたことにある。電気エネルギーは本質的に貯めるのが難しく、発生と使用の同時化が基本である。自車の走行用エネルギーを自己搭載する必要がないので軽量化でき、架線から必要なときに所要パワー（電力）

* (公財)鉄道総合技術研究所 車両制御技術研究部
駆動制御研究室長

を取ることが、電気車の最大の強みである。言換えれば、電気車は架線という電源に繋がった、移動するフライホイール装置そのものである。また、架線電圧を高くすれば新幹線のような高速度大量輸送が可能（「電圧×電流＝パワー＝力×速度」の関係から理解できる）になる。

一方、欠点もある。近傍に他の電車がいないときに回生ブレーキがかからなくなる「回生失効」などの課題があり、また現状の車両とき電系は、走行する列車の運動エネルギー全てを回収・再利用できる設計にはなっていない。さらには、電車が来ない時でも長距離に亘って架線に電圧を印加し続けておく必要性、事故時には関連するき電システムを全て停電する必要から駅間で乗客が閉じ込められる例、景観重視地区や電線地中化区域で架線が景観を悪化させている例もある。

このような背景に対し、近年のエネルギー密度やパワー密度、寿命、急速充電性能が向上している高性能バッテリーを用いた蓄電技術を適用することで、上述の欠点を克服できる。また、比較的低速で短編成なら「架線レス電車」も実現できる段階にある。鉄道界においても回生失効防止策を皮切りとして、蓄電技術の開発が盛んにおこなわれている。

本稿では、電気鉄道のさらなる省エネ化をはじめとして多大な利点とシステム変革が見込まれる電車への蓄電技術適用について概説する。使用側から見た各種蓄電媒体の概要と適用事例、特に架線とバッテリーのハイブリッド技術、架線レス走行継続のための急速充電技術、それを具現化したバッテリー搭載型 LRV と営業線での走行結果について概説する。また蓄電バッテリーに対するコスト面を含めた期待について述べる。

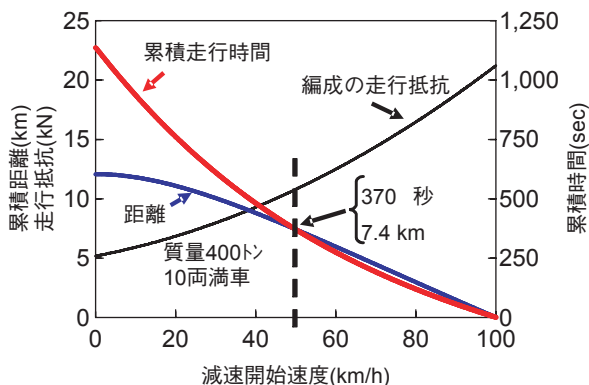


図1 速度 100 km/h からの惰行時間
Fig. 1 Coasting time and distance from the speed of 100 km/h.

2 鉄道における電力回生ブレーキ

鉄道運行に関わるエネルギー消費のうち約 70% と最大なのが車両運行に関わるエネルギーで、この部分の省エネ化が効果的である (Fig. 2)。主に損失低減と運動エネルギー再利用の手法があり、現在までに各種対策が実施されてきた。このうち、電力回生について現行架線方式における原理と課題を以下に述べる。

2.1 架線を介した電力回生ブレーキの原理

現在、一般的な電車のブレーキは、走行する電車の持つ運動エネルギーを電気エネルギーに換えて架線へ返す、“回生ブレーキ”が標準である。回生車が電源、架線がプラス線、近傍で力行中の他電車が電気負荷、レールが帰線（マイナス線）となる大きな電気回路が構成される (Fig. 3, 4)。「電気エネルギーは発生と使用が同時」であることが原則で、架線を介した回生ブレーキはこの原則を忠実に再現したものである。機械摩擦をとまなわない非接触ブレーキのため、熱を発生させず、ブレーキシューの摩耗粉塵が出ないなど、省エネルギーかつ省保守なブレーキシステムである。

架線へ返した電気エネルギーは他の電車が駆動するためのエネルギーとして利用される。つまり架線に繋がった電気車の間で電気エネルギー授受をおこなうことで、電気エネルギーを無駄にせず再利用している。

2.2 回生失効と車両・き電系の設計上の課題

運転時隔の長い閑散線区や早朝深夜など自車近傍に他の電氣的負荷となる電車が在線していない場合には、架線に返そうとするエネルギーが消費されず、回生ブレーキが利かなくなる“回生失効”が生じる。この場合、機械ブレーキが自動的に立ち上がり動作するため安全上の問題はないが、車両は摩擦ブレーキを



図2 鉄道事業に関わるエネルギー消費
Fig. 2 Energy consumption of rail-operation business.

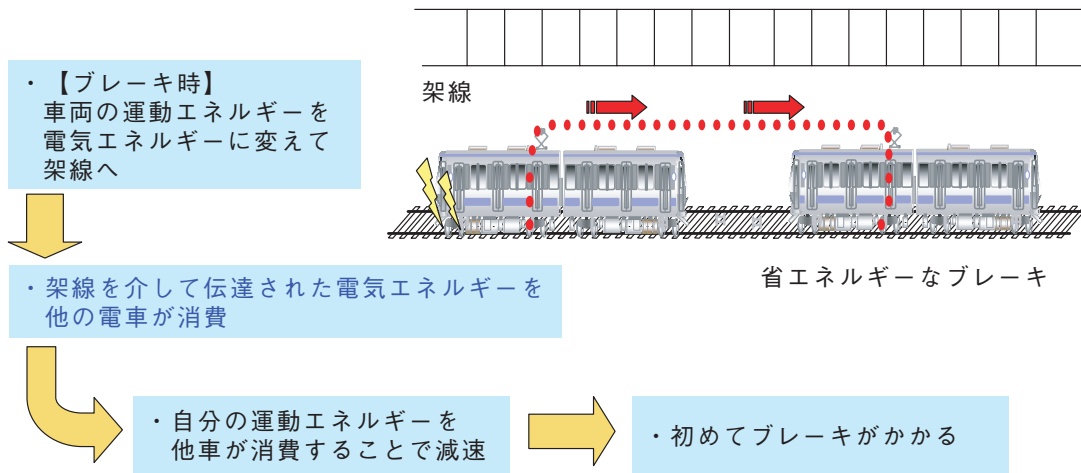


図3 架線へ電気を返す
Fig. 3 How electricity is returned to overhead wire.

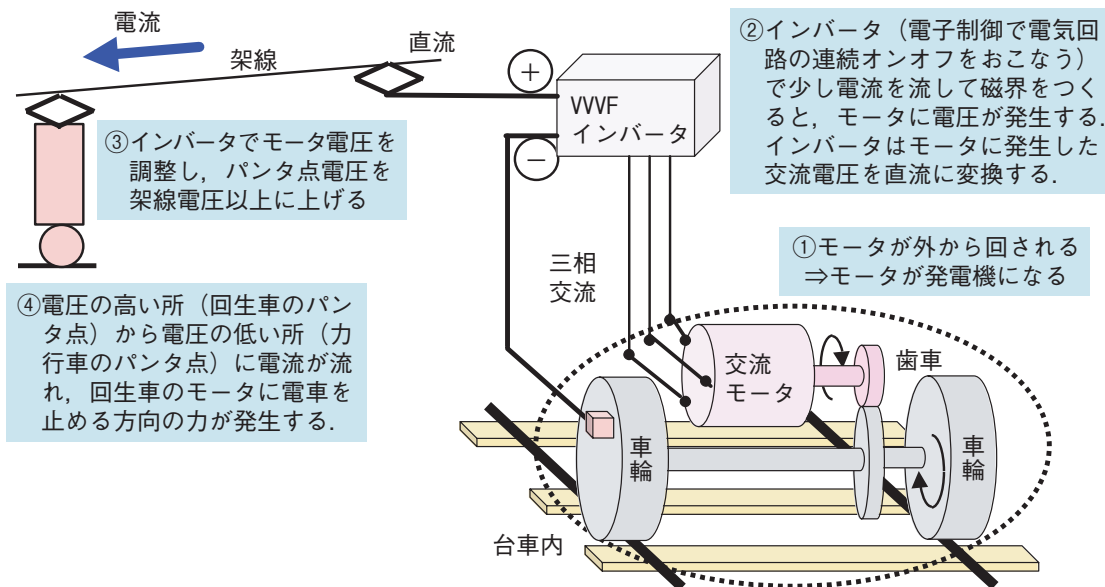


図4 電車の回生ブレーキの動作原理
Fig. 4 Principle of regenerative brake of rail EVs.

用いて停止するためエネルギー回収ができず、さらには部品の消耗や劣化も生じてしまう。本来ならば回収再利用できたはずの運動エネルギーが熱として放散される。回生ブレーキが指令どおりに動作できない回生失効や、そこまで行かなくても運動エネルギーの一部しか電気エネルギーに変換できない“回生絞込”が発生する。電氣的負荷に起因するので“軽負荷回生”とも称されている。

最近のインバータ電車では、架線へ返せるパワーがインバータからの回生パワーより小さくなるとパンタ点電圧が急上昇を始めるので、自車のパワー半導体の

耐圧保護の観点から、ある電圧値以上にならないよう、インバータから架線へ返すパワー（電流）を絞込む制御をおこなう。その結果、回生ブレーキ力が絞られる。全回生パワーが絞込まれた状態が回生失効である。

特に直流電化区間では、変電所整流器のほとんどがダイオードブリッジ型であることから電力系統側への電力返還ができないため、直流側での電気車回生エネルギー処理が必要となる。

近年省エネ車両としてインバータ車両の導入がさらに促進されているが、省エネ型回生車両の割合が増加すると、線区全体としての回生量は増加するため、回

生失効確率はかえって増大する傾向もある。架線下を走る電車であってもさらなる省エネ化のためには回生負荷の確保が重要となってきている。

これ以外にも、架線やレールの電気抵抗によって生じる電圧降下にともない、架線電圧の許容最大値との関連で電車が授受できる最大パワーが制約を受ける。常用最大ブレーキのような強いブレーキを高速からかけた場合には、電車の持つ運動エネルギーの全てを電氣的に回収することは現状では不可能である。

3 バッテリー搭載型電車の意義

そこで蓄電装置を用いた回生エネルギーの回収再利用が望まれるようになった (Fig. 5)。

ところで回生失効を抑制するだけならば、車両質量を増加させないで地上蓄電方式が得策のはずである。それでも車載するだけの意義が存在するのである。

3.1 架線・バッテリーハイブリッド走行の意義

(1) 環境面：

回生負荷環境に起因する回生失効や回生絞込みを抑制できるため、バッテリー搭載による質量増加にともなう消費エネルギー増大に対し、回収再利用できるエネルギー量が上回れば、結果的に省エネとなる。また、常時回生ブレーキが使用できるので摩擦力で作用する機械ブレーキの使用割合が減り、摩耗粉塵や不快なきしり音も減る。

(2) サービス面・運用面：

機械ブレーキ使用割合の減少で、制輪子（ブレーキシュー）交換頻度の低減、車輪熱き裂おおよび踏面の凹摩耗の抑制に役立つ。

また、高速域の駆動インバータと主電動機のパワーを増やし、現行架線システム下では架線電圧上限の制約（具体的には1800V）からもともと架線と授受できない増大パワー分を車載バッテリーで処理すれば、さらなる省エネ設計が可能となる。架線と授受できる電気パワーの上限を超えて回生パワーや駆動パワーを車両に持たせることができるのは車載蓄電方式の大きな利点である。

(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）を扱わないので取扱いが容易である。また、パンタグラフを介しての架線からのバッテリー充放電などバッテリー残量調整によるエネルギー管理をおこないやすい。将来的には電気バスや電気トラックなどとの充電所兼用も想定できる。

3.2 架線レス・バッテリー走行の意義

停留場、駅などの特定箇所、架線または地上設備からの受電でバッテリーを急速充電すれば無架線区間を連続走行することができるようになる。

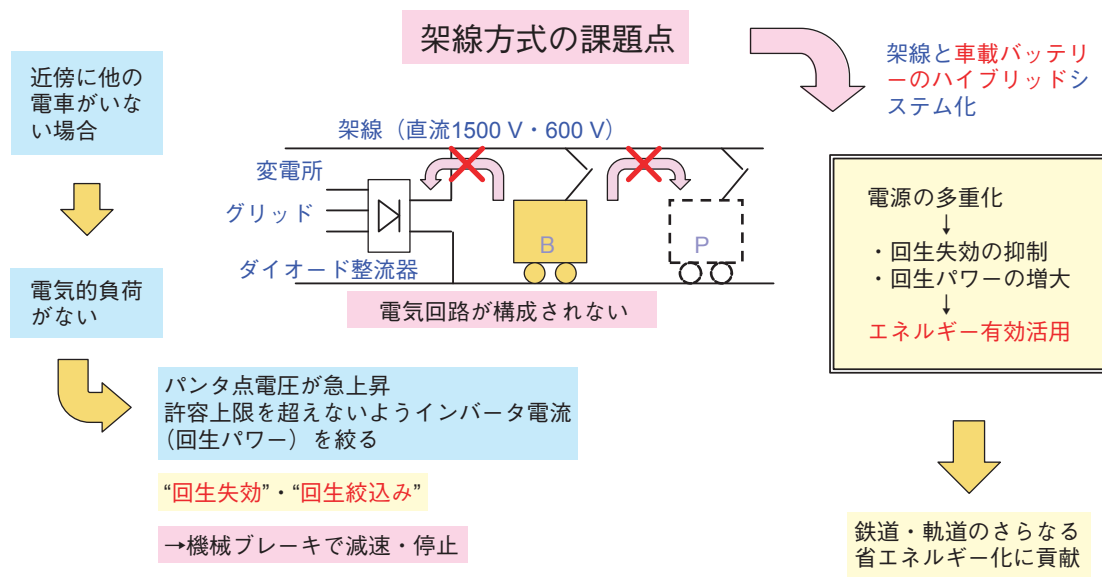


図5 直流電鉄での回生の課題と蓄電による打開策

Fig. 5 Invalidation of regenerative brake and the counter solution with energy storage.

(1) 環境面：

電気駆動のため排ガスを出さず、エンジン方式に比べて街中の低公害化が図られる。パンタグラフ摺動音、架線と帰線レールを流れる高調波による電磁障害などの課題が減る。場所により架線を敷設しないことで都市景観の保全や改善、観光資源価値の向上にも寄与できる。

(2) サービス面・保守面：

無架線区間、交流電化区間、直流電化区間など電源方式の違いを越えた直通運用が可能となり (Fig. 6)、乗換抵抗の低減で旅客利便性が向上する。また、電化区間と非電化区間の直通運用により、運行車種の統一による車両運用の容易化、駅の発着番線の自由度の増加、乗務員免許の統一による手当費用の軽減など、運行事業者側のメリットも大きい。さらに、架線停電などの非常時にも自車バッテリーの電力による自力移動が可能のため、旅客閉じ込めも防止できる。

(3) 建設・保守面：

架線の設置および保守のための費用の低減が見込まれる。上部方向空間が狭小で架線設置に必要な高さが取れず電化できない箇所でも、バッテリー走行を前提とした路線建設が可能となり、公共交通ネットワークの拡充に役立つ。また、道路併用軌道の交差点では、架線設備が大型自動車の走行を妨げている実例もあるため、交差点だけでも架線を外すことは有用である。

3.3 蓄電による電源ハイブリッド化の有効性

回生ブレーキ時の軽負荷状況でパンタ点電圧が上昇し始めた場合に、並列配置したチョッパ装置を動作させて架線電圧上昇を抑え、架線へ返せないパワー分のみを蓄電可能なシステムとすることが可能である。これにより、回生失効防止による回生ブレーキ信頼度向上、力行時の再利用による省エネ化とパワーアシストが可能となる。蓄電搭載量次第で、高速域回生ブレーキ力増大や蓄電エネルギーのみによる無架線区間走行

も可能となる。

この場合、車両質量および製造コスト増加をともなう点に留意する必要がある。車両質量増加にともなう走行エネルギー増分よりも回生吸収再利用によるエネルギー低減分が上回れば、現状に対して運行時の省エネルギー化が可能となる。

4 蓄電媒体の選定

4.1 蓄電媒体の選定にあたって

電気車の回生ブレーキパワーの全部または一部を蓄電することは、蓄電媒体を急速充電することに相当する。鉄道車両の回生パワーを、大きさおよびその継続時間で、あるエネルギーを満たしながら吸収でき、かつ現実的な体積と質量で構成可能な蓄電媒体は限られる。

車載蓄電媒体として現時点で実用的な蓄電媒体としては、フライホイール、電気二重層キャパシタ、高性能蓄電池（ニッケル水素蓄電池やリチウムイオン二次電池などの急速充電可能なもの）があげられる。いずれも長所と短所があり、万能なものはない。

パワーとエネルギーをどの程度のハイブリッド比にするかで決まる設計上の性能を満足させた上で、蓄電媒体に許容される質量や体積、寿命やコストの観点から選定をおこなう必要がある。どのような車両でどういった走行をおこなうかの、車両性能設計次第でもある。

4.2 蓄電媒体に要求されるエネルギー量

ハイブリッド走行だけでなく架線レス走行を想定する際は、搭載するエネルギー量の決定は重要な仕様となる。

電車の走行に必要なエネルギーを何km走行ごとに充電するかを決めると、運転曲線と推定寿命から搭載バッテリー量、充電所パワーと充電電流が決まる。

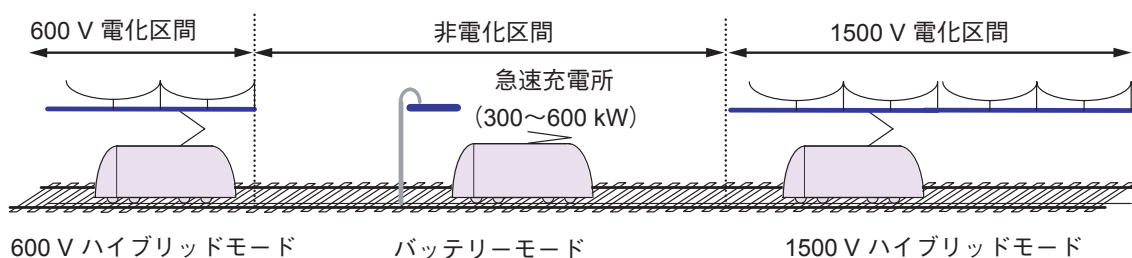


図6 架線レス走行と電化・非電化区間の直通イメージ

Fig. 6 Through running between electrified and non-electrified truck section.

具体例として、質量30トンのLRV (Light Rail Vehicle) が1停留場間距離500 m、路線長12 kmの道路併用軌道を法定最高速度40 km/hで走行する場合を考える (Fig. 7)。参考までに、軌道法では「停留場」と称し、バスの「停留所」とは法律上区別されている。

1停留場間を約1分で走破する場合、ブレーキ時の回生が最大限効くという前提でも少なくとも2.2 MJの駆動エネルギーが必要となる³⁾。蓄電したエネルギーのみで走行する架線レスLRVを想定すると、急速充電所を1停留場ごとに設けるのは設備コストの観点からナンセンスなので仮に6停留場 (3 km) ごとに充電所を設置する場合、走行だけで13.2 MJ 必要である。

これに通常停留場での停車10秒、充電停留場での停車40秒を含む6停留場走行時間分の空調等捕機エネルギーで3.75 MJ 必要である。さらに信号待ちや渋滞により6停留場間で最大10分の遅延を見込むと、充電停留場間の走破に必要なエネルギーは35 MJ (≒9.7 kWh) との計算結果になる。

蓄電システム質量を車両質量の5% (この場合1.5トン) 程度に抑えつつ、35 MJ 以上のエネルギー容量を満たす蓄電媒体が必要となる。

これらを満たす蓄電媒体は今のところ化学反応をとまなう高性能蓄電池のみが現実的である。電気自動車やプラグインハイブリッド自動車で前提となっているリチウムイオン二次電池は、エネルギー密度が高く国内のディーゼルハイブリッド鉄道車両にもすでに搭載されて営業運用に供されている。

4.3 寿命を考慮した搭載エネルギー量の決定

上記で得られた搭載エネルギー量最低値に対し、実際にはバッテリー寿命の観点から35 MJのエネルギー量がDOD20%相当程度となるようバッテリー搭載量

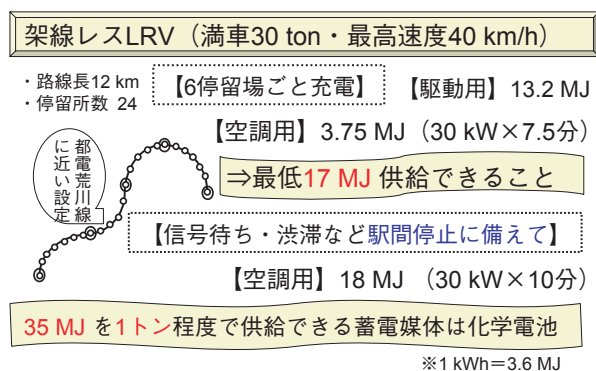


図7 架線レス走行に必要なエネルギー

Fig. 7 Necessary energy for contact-wire-less operation.

を設計する必要がある。鉄道車両では全般検査と呼ばれる工場でのオーバーホールが8年ごとにおこなわれるため、バッテリー交換をそのタイミングでおこなえるよう推定サイクル寿命⁴⁾とカレンダー寿命から逆算して搭載エネルギー量を決定するためである。

その結果、車両として常時は余分のエネルギーを背負って走行することになり、質量が過大に成り過ぎないかが採用の決め手となる。保護機器や設置枠も全て含んだバッテリーシステムとしての質量が車両質量の5%程度以下に収まるかが1つの目安となる。目安値をクリアできた場合には、常時は余剰と思われる搭載エネルギー量は、想定外の停車やダイヤ遅延による折返し充電時間が取れない場合の架線レス走行、あるいは他車救援の際のバックアップエネルギーとして有効に寄与するので無駄にはならない。それでも、エネルギー密度を議論する際に、常時使用するエネルギー量をベースに搭載バッテリーシステム質量からエネルギー密度を再定義すると、その値はかなり低下する点には留意すべきである。

5 国内外での蓄電搭載型鉄道車両の開発例

5.1 蓄電装置の鉄道車両への搭載状況

Table 1に蓄電媒体の特長とあわせて、国内外の鉄道車両における開発状況を一覧比較で示す⁵⁻¹⁷⁾。主エネルギー源に架線、エンジン、燃料電池を、副エネルギー源に蓄電装置を用いる、エネルギー源をハイブリッド化した車両である。

なお、ここで定義するハイブリッドは、例えば、加減速に必要な所要パワーを100%としたとき、ある瞬間において主エネルギー源から60%、副エネルギー源から40%供給または回生するなど、同時協調動作できるものを指す。エンジンとバッテリーを搭載していても切替え使用しかおこなわないものは、ハイブリッドとは称さず、デュアルモードシステムと呼ばれる。

Fig. 8は2007年10月に鉄道総研で公開された架線・バッテリーハイブリッド (架線レス) LRV「Hi-tram (ハイ!トラム)」である。2009年12月にJR東日本から登場した、架線とリチウムイオン二次電池による架線・バッテリーハイブリッド試験電車「スマート電池くん」を含め、いずれも架線区間では回生失効防止機能による回生エネルギー量増大で省エネ走行をおこない、無架線区間では車載バッテリーのエネルギーで景観重視地区の架線レス走行をおこなうことが可能である。

海外では早くからフライホイール蓄電装置を中心に

表1 蓄電媒体の特徴と鉄道車両への車載適用状況 (2011年5月現在)

Table 1 Features of onboard energy storage devices and their application status to passenger rail-EVs installation (as of May 2011).

蓄電媒体	フライホイール	二次電池	電気二重層キャパシタ
特長	高回転により小型でも高エネルギー蓄積可	可動部なし 高エネルギー密度 電圧変動幅小	可動部なし 高パワー密度 ゼロ電圧まで使用可
開発課題	軸受の開発 損失低減 (風損) コリオリカ抑制支持	パワー密度増大 寿命増大 セル間・モジュール間バランス制御	エネルギー密度増大 電圧変動対策 セル間バランス制御
耐久性	約 20,000 ~ 50,000 時間 (補機保守が要因)	2,000 ~ 3,000 サイクル (at DOD = 100%); 約 6 年 (カレンダー寿命)	100,000 ~ 1,000,000 サイクル: 5 ~ 15 年 (使用法と環境に依存)
		Li-ion: 営業走行 (JR 東: ディーゼルエンジン・Li-ion バッテリーハイブリッド気動車「こうみ」2007 年~) [耐久試験「NE トレイン」2003 年~を経て]	
	本線走行試験 (ドイツ鉄道: ディーゼルハイブリッド「LIREX」: 2000 年~)	Li-ion: 本線走行試験 (架線・Li-ion バッテリーハイブリッド LRV「Hi-train (鉄道総研)」at 札幌市交通局: 2007 ~ 2008 年, JR 四国: 2009 年) [耐久試験「りっちい・となみ」架線レス・トラム 2003 年~を経て]	営業試用 (ドイツ・マンハイム交通公社: 架線・キャパシタハイブリッド LRV: 2003 ~ 2008 年): 2008 年にハイデルベルグ開業 (2011 年度以降予定) に向けて営業車両 19 編成発注済み
		Li-ion: 工場構内試験 (三菱重工 架線レス新交通「APM(Advanced People Mover)」2004 ~ 2009 年)	
	本線走行試験 (欧州 ULEV-TAP (Ultra Low Emission Vehicle Using Advanced Propulsion) ディーゼルエンジン/フライホイール・ハイブリッド LRV: 1997 ~ 2001 年, ULEV-TAP II: 2002 ~ 2005 年)	Li-ion: 本線走行試験 (福井鉄道: 架線レス・トラム: 2004 ~ 2008 年, 越前鉄道: 架線レス蓄電池電車 2006 ~ 2008 年)	
開発動向		Li-ion: 構内走行試験 (鉄道総研: 燃料電池・Li-ion バッテリーハイブリッド電車: 2008 年~) [耐久試験: 純燃料電池電車 2005 年~を経て]	本線走行試験 (JR 東海: 架線・キャパシタハイブリッド電車: 2003 ~ 2010 年)
		Li-ion: 本線走行試験 (JR 東: 燃料電池・Li-ion バッテリーハイブリッド電車: 2006 ~ 2008 年)	
	営業走行 (イギリス・セブンバレー鉄道: 架線レス純フライホイールトラム「PPM (パリー・ピープル・ムーバー)」: 2002 年~)	Li-ion: 本線走行試験 (JR 北海道: ディーゼルエンジン・Li-ion バッテリーハイブリッド気動車「ITT」: 2007 年~)	
		Li-ion: 本線走行試験 (JR 東: 架線・Li-ion バッテリーハイブリッド電車「スマート電池くん」: 2009 年~)	
		NiMH: 営業走行 (フランス・ニース: 架線・ニッケル水素バッテリーデュアル型 LRV: 2007 年~) [耐久試験 2005 年~を経て]	本線走行試験 (パリ地下鉄公社: 架線・キャパシタハイブリッド LRV: 2010 年~)
	本線走行試験 (オランダ・ロッテルダム: 架線・フライホイールハイブリッド LRV: 2004 ~ 2006 年)	NiMH: 本線走行試験 (川崎重工「SWIMO」架線・ニッケル水素バッテリーハイブリッド LRV at 札幌市交通局: 2007 ~ 2008 年) [試験 2006 年~を経て]	
		NiMH: 営業試用 (ポルトガル・アマラ交通公社: 架線・ニッケル水素バッテリー・キャパシタハイブリッド LRV: 2008 年~)	

車載ハイブリッド化開発が進められてきたがフライホイール方式では実用に至っていない。キャパシタ方式ではドイツのマンハイム (Manheim) で実用例があるがあくまでもハイブリッド走行のみで架線レス走行の実用例はない。バッテリー方式では、フランスのニース (Nice) で 2007 年 12 月に距離 8.7 km の LRT 路線が開業、途中 2 箇所の 485 m および 435 m の広場区間のみ車載のサフト (Saft) 社製ニッケル水素蓄電池で走行する。バッテリーシステムとして、エネルギー容量 34 Ah の単セルを 10 直列した電圧 12 V のモジュール (型番 NHP10-340, 質量 9 kg) をさらに 68

直列することで、公称電圧 816 V (最大 884 V)、公称エネルギー 27.7 kWh, 最大使用パワー 200 kW, 質量 1,450 kg (9 kg × 68 モジュール = 612 kg およびバッテリー水冷装置 + 充放電チョップ) を実現している。架線集電 (直流 750 V) とバッテリーの切替えによるデュアルモード方式で、車両はアルストム (Alstom) 製である。

6 急速充電の方式

急速充電設備には接触型か非接触型か、また接触型

にもコネクタ型，第3軌条型，剛体架線型が考えられる。6停留場ごとに35 MJのエネルギーを1分間で充電するには583 kWのパワーが必要で，電圧600 Vバッテリーの場合は充電電流972 Aとなる。電流の大きさを考慮すると非接触型は損失が大きく，効率面から採用が難しい。

接触型のうち，コネクタ方式の場合，乗務員がいちいち降車して結合作業をおこなうのは非現実だが，自



・ Hybrid ・ Interoperability ・ Hi !

図8 鉄道総研 LH02 「Hi-tram (ハイ！トラム)」
Fig. 8 Contact-wire/battery hybrid LRV 'Hi-tram'.

動脱着化すると電車停止位置に神わざの精度が要求される。第3軌条方式では旅客が容易に手を触れる箇所裸電部を設置することになり，インターロックを取っても万が一間違えて通電されるリスクを考慮する必要がある。

これに対し，鉄道システムが元来持っている架線方式なら旅客が容易に触れられない高さがあり安全である。通常の架線(カテナリーと称されるトロリ線)では電車停止状態でパンタグラフに大電流を流すと溶断してしまうことから，大電流に対応できる剛体架線方式を採用した。急速充電設備は3相6,600 Vの柱上変圧器の出力を整流しても実現できる(Fig. 9)。柱上変圧器は至る所にある電柱に設備されているので，電気自動車，電気バス，電気トラックなどの充電所兼用も想定できる。

7 バッテリー搭載型 LRV

2007年に竣工したLRV「Hi-tram(ハイ！トラム)」(Table 2)は車長12.9 mで定員44名の国内最小級寸法の部分超低床車両である。国内の路面軌道事業者の半数以上が採用する軌間1067 mm線区に持込み可能である。速度40 km/hまで一定加速度1.0 m/s²以上で，自動車交通の妨げにならない高い加減速度を有してい

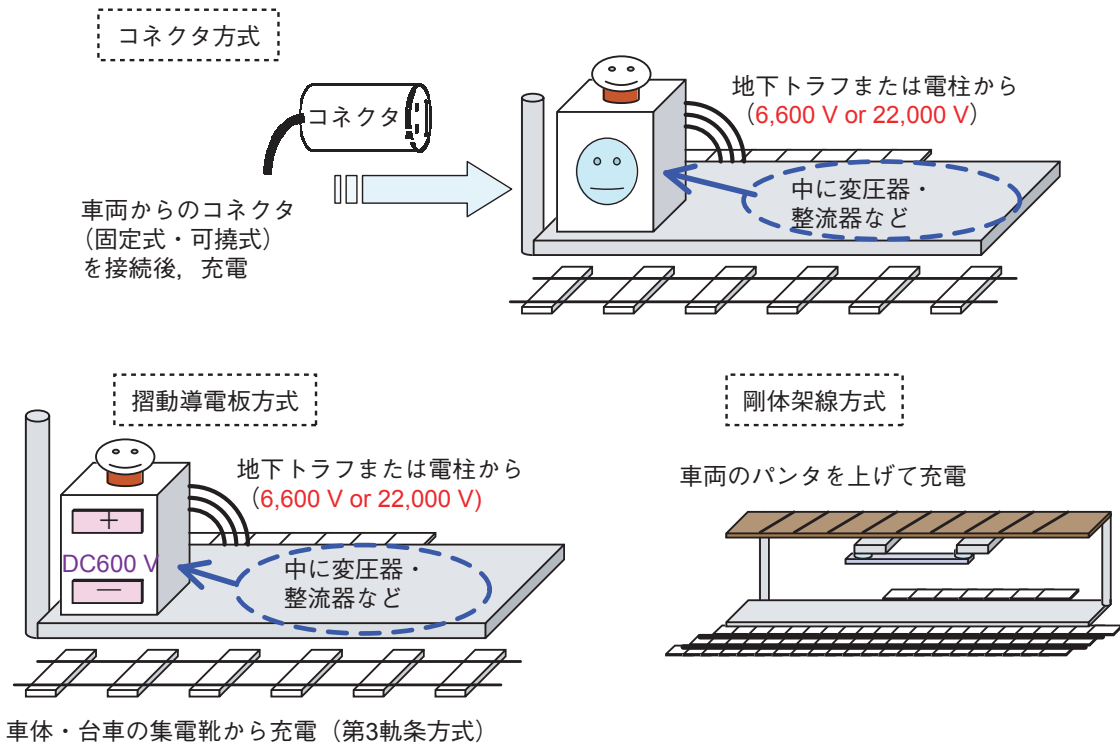


図9 接触型急速充電設備
Fig. 9 Various quick charging equipments of contact type.

表2 バッテリー搭載型 LRV 「Hi-tram」 主要諸元

Table 2 Specifications of contact-wire/battery hybrid low floor LRV (Type LH02) 'Hi-tram'.

項目	鉄道総研 (LH02 形) 超低床 LRV・車両諸元	
定員	44 名 (座席 20 名: 折り畳み座席含む)	
空車質量	27.4 t	
寸法	車体	12,900 mm (L) × 2,230 mm (W) × 3,800 mm (H)
	床面高さ	350 mm (低床部床面高さ)
電気方式	DC 1500 V / DC 600 V / 車載蓄電池 DC 600 V	
電車性能	最高運転速度 40 km/h (軌道線 - 路面併用軌道) 最高運転速度 80 km/h (鉄道線, 軌道線 - 専用軌道) 加速度: 1.0 m/s ² (3.6 km/h/s) [速度 40 km/h まで] 減速度: 常用 1.3 m/s ² (4.6 km/h/s) 非常 1.4 m/s ² (5.0 km/h/s) 保安 1.4 m/s ² (5.0 km/h/s)	
主蓄電池	マンガン系リチウム二次電池 (電圧 DC 605 V, 容量 120 Ah)	
制御装置	IGBT-VVVF インバータ 1C2M (150 kVA) × 2 群 IGBT-充放電制御チョップ (600 kW) × 2 群	
台車 (テコ比 5.14)	コイルばねインダイレクトマウントボルタス台車 ・軌間 1,067 mm ・車輪径 660 mm (一体輪軸)	
ブレーキ方式	回生蓄電併用型電気指令式空気ブレーキ	
主電動機	三相誘導電動機 60 kW × 4 台	
補助電源装置	静止形インバータ方式: ・単相 100 V (3 kVA), ・三相 200 V (28 kVA) ・DC 100 V (2 kW), ・DC 24 V (6 kW)	
集電装置	バネ上昇空気下降式シングルアーム	

る。全軸駆動のため速度 40 km/h から回生ブレーキのみでの減速停止が可能で、高いエネルギー回収率が得られる。また鉄道線に乗入れて最高速度 80 km/h での走行が可能である。

バッテリーは定格電流の 20 倍までの充放電電流を許容できるマンガン系リチウムイオン二次電池 (GS ユアサ製 LIM30H) で、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。定格 605 V-120 Ah (72 kWh)、冷却系や遮断器等の保護システムも全て含めて約 2 トンの質量であり、車両質量の 7.3% に収まった (Fig. 10)。

バッテリー経時劣化にともなう性能低下時にも機能できるよう、コンバータで上限充電電流を 1,000 A に抑制している。直流 1,500 V と 600 V の複電圧架線に対応し、直流 600 V バッテリーとのハイブリッド制御も司る。架線のない所ではバッテリー電車として走行できる。

主回路は、直流 1,500 V と 600 V の複電圧架線に対応し、直流 600 V バッテリーとの電源ハイブリッド構成を取るコンバータ・インバータシステム (Fig. 11) である。

コンバータは架線側チョップ Conv1 とバッテリー側チョップ Conv2 から成り、中間回路電圧は 750 V

基準に制御される。負荷側の駆動用インバータと補機用インバータ (SIV: Static Inverter) は低圧対応である。

力行時や回生時には、架線電圧または中間回路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。架線電流リミッタの設定で、架線と授受する電流を希望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バッテリー電流 100 A 程度による緩慢充電をおこない、バッテリー残量の自動調整をおこなう。これを調整充電と称している。急速充電設備のある駅や停留場では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 1,000 A による停車中充電が可能である。

8 急速充電と営業線走行

停留場に見立てた長さ 3 m の剛体架線下で停車中の LRV へパンタグラフを介して、急速充電をおこなった。

路線途中の停留場での充電を模擬したバッテリー電流 1,000 A で 60 秒間の充電では、空調使用込みで距離約 4 km 相当の走行エネルギーを充電できた。また、折返し駅を模擬した電流 500 A-3 分の充電では、距

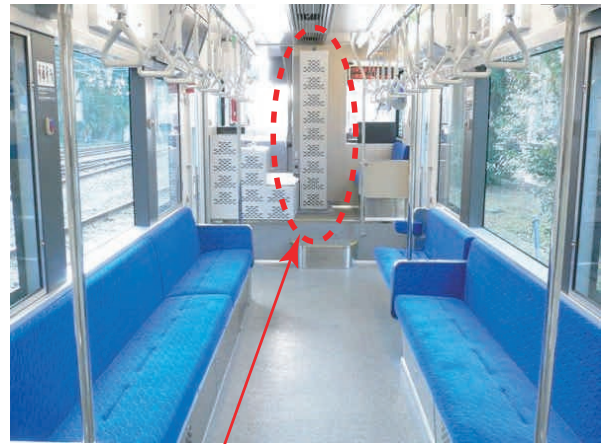
搭載前



搭載後



スラント部へのバッテリー搭載 (引出構造)



超低床の車内と運転室 (高床部) への残バッテリー搭載配置

図 10 リチウムイオンバッテリーの車載
Fig. 10 Onboard installation of lithium-ion battery.

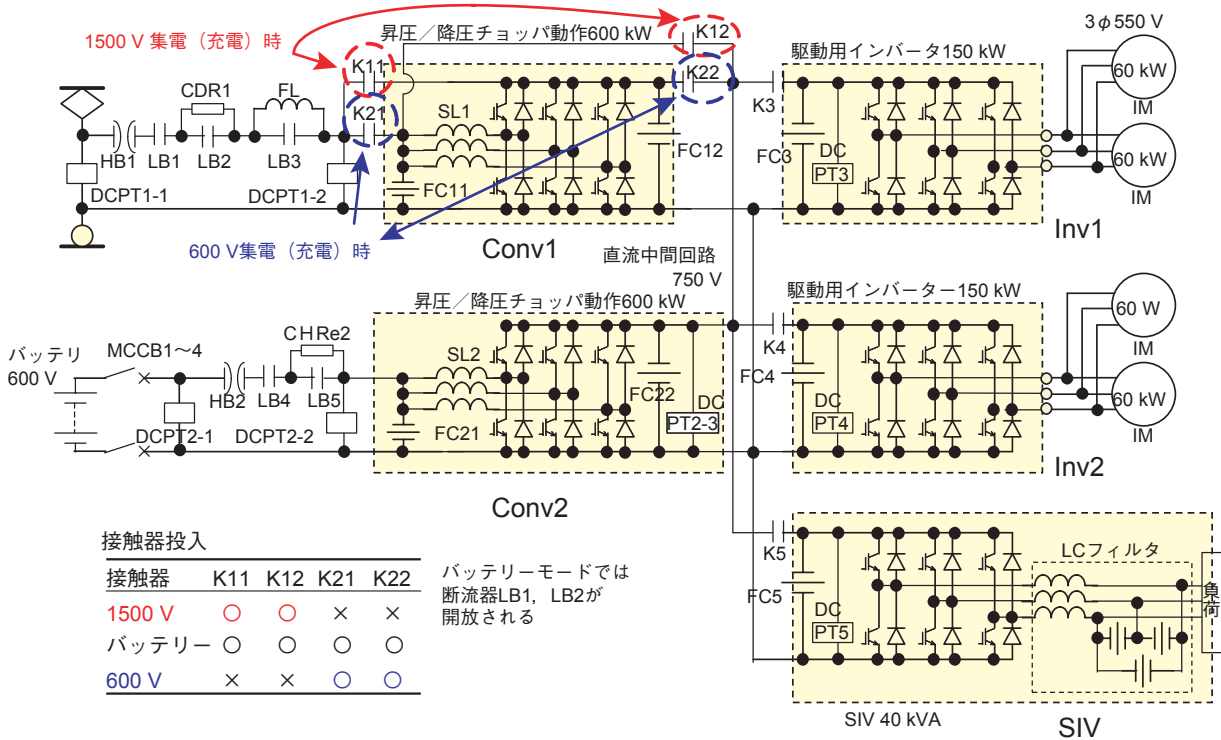


図 11 複電圧架線・バッテリーハイブリッド回路
Fig. 11 Traction circuit of contact-wire/battery hybrid LRV 'Hi-tram'.

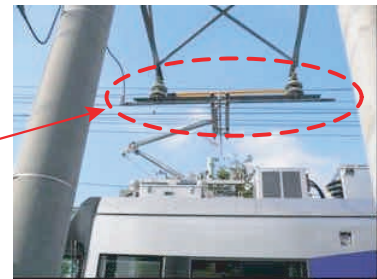
離約 6 km 相当分の充電が可能であった (Fig. 12).

2007年11月から2008年3月まで札幌市交通局市内線で長期試験走行を実施, 片道 8.4 km の路線を最

高速度 40 km/h の営業ダイヤで往復走行を繰り返した. バッテリー完全充電状態からの無給電バッテリー走行では距離 25.8 km を達成した (Fig. 13). 架線・



パンタグラフを介して、
停車中LRVのバッテリーを
急速充電



剛体架線
(3 m長・1500 V)

バッテリー 充電電流と 継続時間	バッテリー端子での 充電エネルギー	1 急速充電当りの 走行距離 (空調なしの場合)	1 急速充電当りの 走行距離 (空調最大負荷時)
1000 A × 61秒	35.6 MJ (容量の13.7%)	7.9 km 相当	4.0 km 以上
500 A × 3分16秒	56.9 MJ (容量の21.9%)	12.7 km 相当	6.4 km 以上

図 12 剛体架線からの 600 kW 急速充電
Fig. 12 Quick charging from rigid contact wire.

バッテリーハイブリッド走行では、車載バッテリーがなかったとした時に比べ 10% 以上の消費エネルギー削減効果が得られた¹⁸⁾。

また、2009 年 10 ~ 11 月にかけて JR 四国予讃線(多度津~坂出間) 11.4 km および高徳線(高松~屋島間 9.3 km) で走行を実施した。予讃線での最高速度 80 km/h の 1 充電走行距離は各停運転で 49.1 km、急行運転で 50.7 km を記録した¹⁹⁾ (Fig. 14, 15)。

なお、「Hi-tram」の営業運行時の充電は、15 kWh のエネルギー(バッテリー容量の約 20%) を 3 分間で充電(充電パワー約 300 kW)し、距離 7.5 km を無給電で走行することを想定している。

9 架線レス電車実現に向けたバッテリー価格

9.1 架線方式と比べた初期コスト増分の回収年数

具体例として、路線長 7 km の新規 LRT 路線を架線方式と完全架線レス方式で整備する際の初期コスト増分、運用コスト減分から、何年で架線レス方式が有利となるかを計算した例²⁰⁾を紹介する。

前提として、質量 30.9 トンの LRV が 380 m (国内路面軌道の平均駅間距離) ごとに設置された停留場に停車しながら走行し、中間充電所では 1 分停車して実質 40 秒の急速充電をおこない、末端駅での折返し時間 5 分、1 日の走行時間 18 時間、バッテリー寿命 8 年となるよう十分なバッテリー量を搭載した場合を想定する (Fig. 16)。

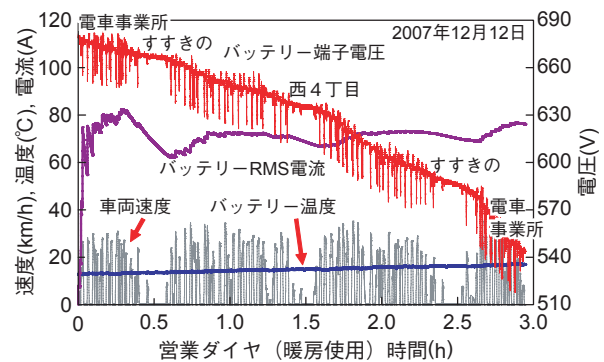


図 13 バッテリー 1 充電走行(札幌市交通局市内線)
Fig. 13 Run with batteries after a full charging.
(Obtained distance of 25.8 km at Sapporo city line)

架線レス方式では架線方式に比べ、例外はあるものの実際には余計に初期投資がかかる。途中の充電所が占める充電設備費、特に各車両に搭載する車載バッテリーの費用が大きい。この初期コスト増分を指標 A とする。

運用コストは、架線レス方式ではバッテリー価格を寿命年数で除した値が単年度に余分にかかるコストとなる一方、再生有効活用による電気料金について若干、架線保守費用については相応に低減可能であり、トータルとして架線方式に比べると低減できる場合が多い。この運行コスト減分を指標 B としている。

架線方式に比べた架線レス方式の投資回収コストの速さは、「指標 B ÷ 指標 A」で表現される。これらを、充電所間隔、運行頻度(列車時隔)、バッテリー価格

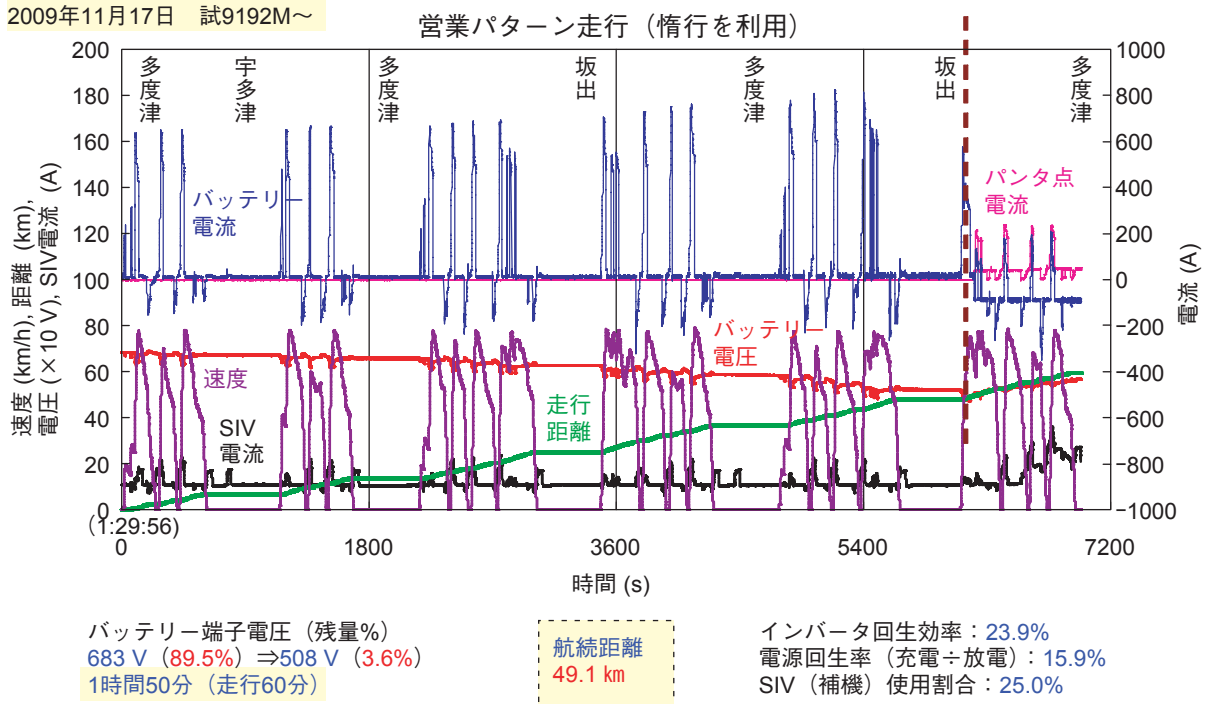


図 14 バッテリー 1 充電走行 (JR 四国予讃線)

Fig. 14 Run with batteries after a spell of charging (Obtained distance of 49.1 km at JR Yosan line).

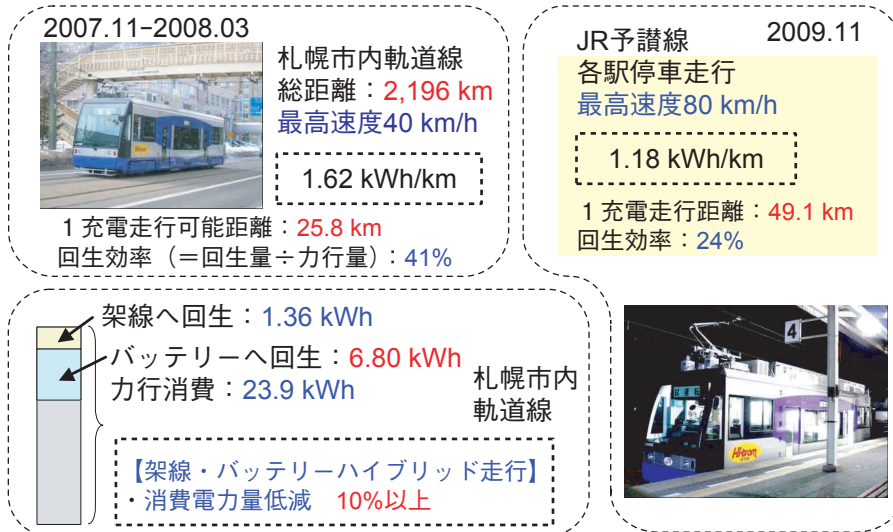


図 15 バッテリー 1 充電走行距離

Fig. 15 Running distance after one spell of charging.

などを振って感度分析した結果、最も感度が高いのがバッテリー単価で、次に感度が高いのが列車時隔との結果になった。目標として「150 円 / Wh」を切れば、充電所の設置間隔 2 km 以上として 20 年前後で架線レス方式が有利になることがわかる (Fig. 17)。

9.2 コスト回収を可能とするバッテリー価格

「150 円 / Wh」が 1 つの目標となることがわかる一方で、現状はまだその数倍高価であり、このままでは採用しようとする鉄軌道事業者は増えない。鉄道総研の試作 LRV「Hi-tram」(2007 ~) で用いた LIM30H は、

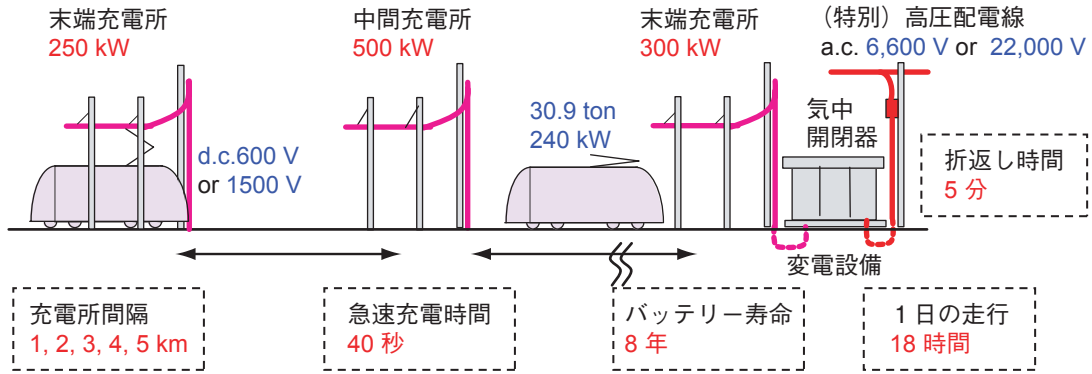


図 16 架線方式と架線レス方式のコスト比較条件

Fig. 16 Condition for comparison with 'catenary system' and 'catenary-free system'.

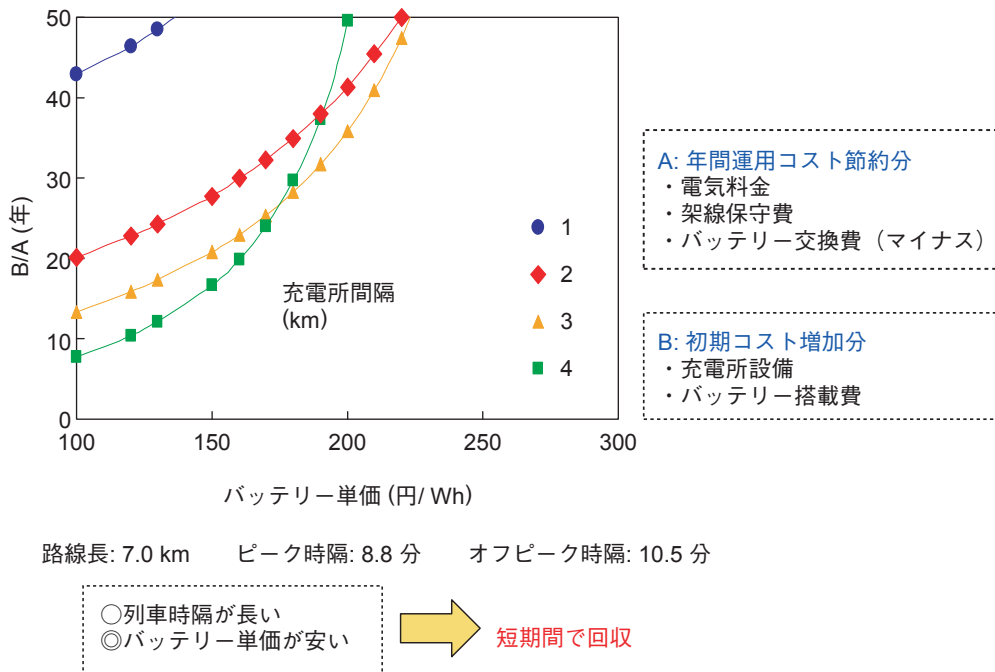


図 17 初期投資増分の回収の速さ

Fig. 17 Initial-added-cost payback time.

ほぼ同様のものがJR 東日本の蓄電池駆動試験電車クモヤ E995 形「スマート電池くん」(2009～), JR 貨物の入換専用ディーゼルハイブリッド機関車 HD300 形 (2010～), 近畿車輛の米国向け架線ハイブリッド先行試作 LRV・LFX300「ameriTRAM」(2010～)で採用されているものの、いずれもまだ旅客営業用には供されていない。

この事実はバッテリー価格がまだ相当に高価であることを意味しており、「150 円/Wh」を切れば本格採用する事業者が現れ、「100 円/Wh」を切れば相当数の事業者が採用動機を得られるものと考えてい

る。自動車に比べるとハードルは低いと思われるので、「まず安くするから大量に使って欲しい」という姿勢でもって、昨今の海外リチウムイオンバッテリー供給者による低価格攻勢への対抗もあわせ、早期の価格低減を望みたいところである。

10 実用化とさらなる展開に向けた期待雑感

これまでの寿命とコストの関係の議論に加え、公共交通の世界でリチウムイオンバッテリーがさらに広く使われるための期待事項²¹⁾をまとめておきたい。

10.1 より安全なバッテリーへ

現時点で鉄道用には専らマンガン系正極が用いられており、かつ今のところ日本製だけである。公共交通である鉄道車両に適用する際には相応の安全を確保した上で搭載する必要がある。リチウムイオン二次電池は電解液が有機系のため発火時の温度も数百度に達する場合があります、危険性は一般にも広く認識されている。だから、より安全性の高い鉄系等の正極が出ればそちらに移行しようとするのは自然である。

鉄道車載用ではエネルギー密度の低下を嫌う観点から、当面は周辺技術の安全対策強化によりマンガン系を使い続けるだろうが、長い目で見るとより安全な鉄系正極に移行する可能性は高い。

10.2 内部抵抗の低減

電池内部の抵抗分（以下、内部抵抗と称する）の低減は、大電流充放電を繰り返す用途では非常に重要である。内部抵抗による発熱にともなう温度上昇はバッテリー寿命に影響する。また、内部抵抗による電圧降下は、過充電や過放電を避けるために設定される端子電圧の上下限保護設定値に対する実際に使える電圧範囲の低下を招く。セル直列数の多い鉄道車両用では、エネルギー容量低下よりも内部抵抗上昇による電圧保護によってバッテリーが使えなくなることが多い。

最も劣化したセルに合わせて保護動作が働くのでセルバランスの崩れを防ぎたいが、配置箇所しただけではセル温度上昇にばらつきを生じると劣化進行が異なってくる。並列接続の場合、健全群から内部抵抗の高い劣化セルの存在する並列群へ横流が流れることもある。

つまりセルバランスを崩さないような温度均一化配置など実際に車両に載せる際の工夫が必要である。バッテリーメーカーは出荷時の内部抵抗ばらつきは気にしてくれるが、搭載後はモジュール単位でのセル間バランス制御がほとんどであり、実際にセル間ばらつきに大きな影響を与えるモジュール間の温度ばらつきについては、搭載設計者側でモジュール配置に責任を持つ必要があるのが現状である。

10.3 感電防止策

バッテリー電圧による作業者の感電という課題がある。電車区や工場では走行距離または走行時間に応じて部品検査や部品交換を実施するが、蓄電池だけは端子間電圧をゼロにすることができない。バッテリー交換を想定した感電防止端子カバーやモジュール数低減による裸電部の減少など対策を講じているが、モジュール取外しの際は必ず接続バーやケーブルに関する端子部作業が発生する。今後バッテリー搭載型車両

の増加と搭載バッテリー量自体の増加を見込むと、この当たりの装備の巧拙しだいで、安全に関する技術基準や法整備の厳格化をどこまで緩和できるかが変わってくる。

必要以上の安全基準は導入展開における競争力を削ぎかねないことから、そのような基準を作らないで済むよう、バッテリー交換作業を鉄軌道事業者側がおこなうことを考慮した端子部接続作業での感電防止策が望まれる。

車両にバッテリーさえ積めばOKという訳ではないこと、機材の装備に関する技術開発の成否も重要であることをご理解頂ければ幸いである。

11 おわりに

国内外の数か所で架線レス電車の開発競争がおこなわれている。国内における営業車の登場もバッテリー価格次第で実現可否が左右される。リチウムイオンバッテリーに対する期待はますます高くなっている。

なお本稿で紹介した開発は2005～2010年度にかけてのNEDO委託により実施した。フィールドを提供頂いた札幌市交通局殿、JR四国殿をはじめ関係各位に感謝致します。

文 献

- 1) 小笠「鉄道における省エネルギーと環境—ハイブリッド車両を例として」、電気学会誌 Vol.127, No.4, pp.222～225, 2007.04.
- 2) 国土交通省情報政策本部_情報安全・調査課_交通統計室「平成22年版交通関連統計資料集国内の輸送機関別輸送量、エネルギー消費量及びエネルギー消費原単位の推移」、<http://www.mlit.go.jp/k-toukei/search/pdf/html/23/23000000x03302.html>, 2010.
- 3) 小笠・田口・前橋・門脇・末包「架線ハイブリッド(架線レス)LRVの新車概要と車両性能」、第14回鉄道技術連合シンポジウム S4-4, pp.119～122, 2007.12.
- 4) 米山・田口・小笠・山本「リチウムイオン二次電池の放電深度による寿命予測法」、平成17年電気学会産業応用部門大会 3-32, pp. III-193～196, 2005.08.
- 5) Alstom. APS wire-free system. http://www.transport.alstom.com/home/elibrary/technical/environment/_files/file_31288_29589.pdf, 2004.

- 6) Bombardier. First catenary-free and contact -less operating tram. <http://www.bombardier.com/en/corporate/media-centre/press-releases/>, 2009.
- 7) Steiner M, Scholten J. Energy Storage in board of DC fed railway vehicles. *PESC conference proceedings*, 2004, 1:666-671.
- 8) Moskowitz J. Alstom Full-tram project, http://www.hydrogentrain.dk/Files/System/Hydrogen_train/Filer/6_Jean-Paul_Moskowitz.pdf, 2006.
- 9) Debruyne M. Some tendencies among others in electric traction. <http://jeea2009.polytech-lille.net/presentation/debruyne.pdf>, 2009, EEA Lille 12-3-09 (in French).
- 10) Francois Lacote. Alstom-Future trends in railway transportation. *Japan Railway and Transport Review*, 2005, **42** : 4-9.
- 11) Sekijima Y, Kudo Y, Inui M, Monden Y, Toda S, Aoyama I. Development of energy storage system for DC electric rolling stock applying electric double layer capacitor. *WCRR*, 2006, **IP3 (7)** : 1-7.
- 12) Ogasa M, Taguchi Y. Power electronics technologies for a lithium ion battery tram. *PCC*, Nagoya, 2007, **LS5-5-2** : 1369-1375.
- 13) Saft. NHP module, technical bulletin, Module characteristics of NHP 10-340, 2005.
- 14) Siemens. Siemens' energy storage system reduces emissions by up to 80 metric tons per year and enables trams to operate without an overhead contact line. Siemens AG, press release material, 2009.
- 15) RATP, Alstom: The Paris Transport Authority and Alstoms' experiment the STEEM project, for a tram again more saving and autonomous. <http://www.ratp.fr/common/ressources/1360.pdf>, 2009 (in French).
- 16) Ogasa M. Application of energy storage technologies for electric railway vehicles-examples with hybrid electric railway vehicles. *IEEE Transactions* 2010 ; **5** : 304-311.
- 17) Ogasa M. Onboard storage in Japanese electrified lines. *EPE-PEMC* 2010 ; **571** : S7_9-S7-16, 2010.
- 18) 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, 2008.08.
- 19) 小笠・田口・門脇・仲村・大江・末包・脇谷「架線レス LRV の JR 線走行時の消費エネルギー」, 平成 22 年電気学会全国大会 5-070, pp.5-119 ~ 120, 2010.03.
- 20) 門脇・田口・小笠・山本・寺内・秦「架線レス LRV 導入へのコスト面のフィージビリティスタディ」, 鉄道総研報告 Vol.22, No.9, pp.47 ~ 52, 2008.09.
- 21) 小笠「バッテリー LRV と架線レス化技術の動向～最新 LRT 技術動向（国内と海外の架線レス・トラム）～その 2」, 鉄道車両と技術 Vol.17, No.2, pp.2 ~ 5, 2011.02.