

# バッテリー電車の最近の動向

小笠 正道\*

## Leading Edge Trend of Battery-driven Railway Electric Vehicles

Masamichi OGASA

Development of the battery mounted type railway vehicle is progressing markedly. This paper overviews a variety of vehicle development cases that have been ongoing at home and abroad to date, and describes the current state of battery and peripheral technology, as well as the direction of future technology development. First, the development examples of the current-collection and storage hybrid vehicles in a new era driven by the storage device which has advanced rapidly since the early 21st century will be presented. In addition, the new trend of battery technology itself indispensable to such vehicle, and the battery peripheral technology that is the fundamental point in the vehicle design will be outlined.

キーワード：電車，バッテリー，蓄電池，ハイブリッド，主回路，充電

### 1. 新時代のバッテリー搭載形鉄道車両

電気鉄道は最初、蓄電池で駆動する模型車両から始まったが、直後から集電方式による電気駆動で営業運用が行われ、現在に至っている。1890年代には鉛蓄電池やニッケル鉄蓄電池による蓄電池電気車の開発が盛んな時期があったが、その後の電気鉄道における主流となることは無く、例外的にドイツの支線で1994年まで鉛蓄電池車が走行していた<sup>1)</sup>程度であった。

近年、特に1990年代半ば以降の高性能かつ実用的なバッテリーの出現を機に、100年を経て再び各国で鉄道車両をバッテリーで駆動するための技術開発が本格的に行われ始めた。1997年末のハイブリッド自動車プリウスの市販開始を含む第3次電気自動車ブームも流れに拍車をかけたと言える。当初は世界的にフライホイールバッテリーやスーパーキャパシターを中心とした蓄電装置の開発競争が進展し、試作鉄道車両が次々登場したが、これらを搭載した鉄道、LRV (Light Rail Vehicle) での実用例は限定的である。一方、当初は蓄電池の採用数自体は少なかったものの、フランスは2007年11月にニースでのニッケル水素蓄電池を搭載した部分架線レス LRV が営業運行で先行し、また日本からはリチウムイオン二次電池を搭載した開発車両群が最初に登場して、2014年3月にはJR 烏山線で営業運行に至っている。最近では日本以外の国でも採用が始まっている。このように、21世紀に入ってからのバッテリー電車の開発競争は激化しており、2010年代に入り開発段階から営業投入段階へと移行してきている。

国内における蓄電装置搭載による純粋な電車（エンジンハイブリッドを含めない）の架線レス走行については、リチウムイオン二次電池を駆動用に使った電車としては

\* 車両制御技術研究部

初となる、2003年公開の架線レスバッテリートラム試験車「りっちい・とらみい」<sup>2)</sup>の構内走行成功を皮切りに、2007年の「Hi-tram」<sup>3) 4)</sup>「SWIMO」<sup>5)</sup>、2010年の「ameriTRAM」<sup>6)</sup>といった、高性能蓄電池を搭載した試験用 LRV による軌道営業線での走行試験が行われた。

在来鉄道車両では2005年の313系近郊電車への電気二重層キャパシター搭載による架線ハイブリッド化と中央本線における試用<sup>7)</sup>(現在は開発停止)、2007年の「NEトレイン」による燃料電池とリチウムイオン二次電池とのハイブリッド化および長野地区での本線走行試験<sup>8)</sup>が行われ、またR291形試験電車による燃料電池ハイブリッド構内走行試験が行われた<sup>9)</sup>。実用に至る開発としては、「NEトレイン」を用いた2010年以降の宇都宮地区での蓄電池電車の本線走行試験<sup>10)</sup>、2013年の223系直流近郊電車による山陽本線走行試験<sup>11)</sup>、2013年の817系交流近郊電車による筑豊本線走行試験<sup>12)</sup>などが行われてきている。そして2014年には、リチウムイオン二次電池を搭載した旅客営業蓄電池電車としては世界初となるEV-E301系「ACCUM (アキュム)」<sup>13)</sup>が烏山線で営業運行に至っている現況である。

### 2. バッテリー搭載形電車の最近の開発事例

ここでは1990年代後半以降の国内外の蓄電搭載形車両のうち、営業線本線での走行結果が公開されているもの、営業運行が間近に予定、または営業開始に至っている事例を紹介する。なお今回は架線方式の電車を対象とし、ディーゼルハイブリッド車両は対象外とした。

#### 2.1 急速充放電が可能な蓄電媒体

バッテリーと称する急速充放電可能な実用的蓄電媒体

特集：車両技術

には、高性能蓄電池、スーパーキャパシター、フライホイールバッテリーの大きく3種類がある。

(1) 高性能蓄電池

放電と充電が可能な化学電池（二次電池と称する）のうち、急速充電可能な実用的な電池を指す。金属のイオン化傾向を利用して各電極で酸化還元電位を発生させ、電極と電解質との間で酸化還元反応による電荷の授受を行うことで、放電または充電を行う。

(a) ニッケル水素蓄電池 (Ni-MH: Nickel-metal Hydride Battery): 正極は水酸化ニッケル, 負極は水素吸蔵合金, 電解液は水系の濃水酸化カリウム水溶液である。定格電圧は1.2Vである。

(b) リチウムイオン二次電池 (LIB: Lithium Ion Battery): リチウムイオンポリマー電池を含んだ総称としている。正極材による分類でコバルト系, マンガン系, ニッケル系, 三元系, 鉄系があり, 負極は炭素系材料が多い。電解液は有機系の炭酸エステル系が多く, 六フッ化リン酸リチウムなどの電解質を添加している。定格電圧は3.2V~3.7Vである。

(2) スーパーキャパシター<sup>14)</sup>

(a) 電気二重層キャパシター (EDLC: Electric Double Layer Capacitor): 正負極とも活性炭等のカーボン系で, 電解液には硫酸水溶液等の水系と, 有機溶媒に電解質を添加した有機系とがある。導電電極と電解質の界面に正負電荷が微小距離で配列(ヘルムホルツ電気二重層と称する)する「静電分極」で静電容量(Electrostatic Capacitance)が出現し, これにより電荷蓄積を行う。使用最大電圧は2.3V~2.7Vで, 単セル当り数千ファラドの商品も存在する。

(b) 疑似容量キャパシター (Pseudo Capacitor): 正負両電極での酸化還元反応, インターカーレーション(導電電極構成層間へのイオン割込み), 電解吸着(電気分解に伴ってイオンが電極表面に吸着されて内部にも吸収される現象)を伴う「ファラデー反応(電極と電解液界面を通して電荷が移動することで電流が流れる)」により疑似容量(Pseudo Capacitance)が出現し, これにより電荷蓄積を行う。EDLCの100倍近いキャパシタンス(静電容量では無く, ファラデー容量)が得られ, また蓄電池と異なり電荷が電極の原子構造に直に接触するため, 蓄電池よりも高い充放電速度が得られることが特長である。レドックスキャパシター(Redox Capacitor: RedoxはReduction/Oxidation酸化還元の意味)など数種類が存在し, 新たな電極導入による開発が進展中である。また蓄電池との明確な区分けが難しくなりつつある。

(c) ハイブリッドキャパシター (Hybrid Capacitor): 上記の(a)静電容量性と(b)ファラデー容量性

のハイブリッド型。「リチウムイオンキャパシター(LIC: Lithium Ion Capacitor)」が有名で, 正極にEDLCと同じ活性炭を, 負極にファラデー反応が起こるリチウムイオン吸蔵可能な炭素系材料を用いる。EDLCと疑似容量キャパシターの中間的なエネルギー容量および寿命特性を持つ。

(3) フライホイールバッテリー: 合金系と複合材系がある。小型で高エネルギーが要求される車載用には, 最高回転数を上げる必要から回転子部材強度が遠心力に耐えられるように, 高価ではあるがカーボン複合材を用いたものが主流である。

2.2 国内外のバッテリー搭載形 LRV, EMU

国内の在来鉄道線における直流充電の営業蓄電池EMU(Electric Multiple Units), 交流充電の試験蓄電池EMUを代表例として図1に示す。

また, 国内および海外の蓄電池, スーパーキャパシター, フライホイールを蓄電装置として使用した, バッテリー搭載形 LRV または EMU の車両構成, 蓄電システム構成, ならびに走行実績と展開を表1~4に示す。

2011年以降に海外LRVを中心に営業運行に至るものが増え, 既に10都市以上で営業運行している。蓄電媒体も電気二重層キャパシターからニッケル水素電池を経て, 架線レス走行(Catenary Free または Independent powered)の距離延長が指向され, リチウムイオン二次電池に移行しつつあることが見て取れる。

国内のバッテリー搭載形電車の開発は世界的にも早く, 試験走行も2003年頃から行われ世界でもほぼトップを走っていた。しかし2015年の現時点では定常営業運行に至っているのはJR烏山線の1例だけで, 後発の諸国に実用化で先行されている。国内事業者は独立採算が基本のため, 比較的高価な蓄電装置を導入しにくかった一方, 海外では自治体が費用負担する例が多いことが要因として大きい。

また最近では海外でもリチウムイオン二次電池の搭載例が急増している。2000年代初頭は高性能で高品質の電池セルを製作できるのはほぼ日本の製造業者だけであっ



図1 国内の蓄電池駆動 EMU

表1 国内の営業線試走段階または営業投入のバッテリー電車代表例

車両名/ 車両形式	プロジェクト名 /開発・製造者	導入箇所 /事業者	車両諸元 (寸法、質量、 形態、対応線区)	蓄電媒体種類	蓄電媒体 の構成	蓄電システム の定格性能	実績性能数値 (1 充電航続距離 /省エネ効果ほか)	運用設定性能 (充電時間、蓄電量、 平均無給電距離)	技術展開先 (導入済/導入予定 /試験走行予定)	文献
(313系 改造)	JR 東海, /東芝, /日本六三	JR 東海 (中央西線)	全長 80.2m (編成), 幅 2.98m, 最高速度 120km/h, 4 両編成, 最小曲線半径 14m, 定員 595 人, 2M2T 編成中 1 両に蓄電搭載, 直流架線 1,500V 対応	電気二重層 電池パック (有機電解液) (non AET-101H)	2,700F セル × 594 直列 × 1 並列 (2006 年～)	最大電圧 1,366V 静電容量 4,55F エネルギー 0.57kWh (630V ↔ 1,100V) 質量 約 500kg	・ 1 充電航続距離 50.7km (JR 予讃線・最高速度 80km/h) ・ 3 分充電で、 距離 7.5km 走行 (充電パワー 300kW → 約 15kWh 充電) ・ 1 分充電で、 距離 4km 走行 (充電パワー 600kW → 約 10kWh 充電)	・ 試験営業 (2005/01-2010) JR 東海道線 (名古屋～大垣) 等 / 試験走行予定	7	
Hi-tram (LH02 形)	鉄道総研, /東急車輛製造, /アパ車両, /京王重機, /東洋電機製造, /GSユサ	鉄道総研	全長 12.9m, 幅 2.23m, 最高速度 80km/h, 車庫, 最小曲線半径 14m, 質量 25.5 トン, 定員 44 人, 出力: 定格 300kW (電動機 4 台) 直流架線 600V & 1,500V 対応	呼び出し電池 (LIM30H-8R : 28.8V フェーブル) (マカオン系正極)	30Ah セル × 168 直列 × 4 並列	定格電圧 605V パワー 600kW エネルギー 72kWh 質量 約 2,000kg	・ 1 充電航続距離 46.0km (万葉線・最高速度 40km/h) 消費エネルギー 24% 削減 架線電力レバレッジ 37% 低減 (対万葉線既存パンチカー)	[りつちい・とらみい (E3301)] LH01 形 ・ 試走 (2003～2012) 鉄道総研所内線 55kWh Li+ 搭載 1 充電航続距離 17km (2003 年 8 月) [Hi-tram (M1170)] LH02 形 ・ 試走 (2007/11-2008/03) 札幌市内線 ・ 試走 (2009/10-11) JR 四国予讃線 ・ 試験走行 (2014/07-08) 万葉線	4	
SWIMO-X	川崎重工, /大阪車輛工業, /三菱電機	川崎重工	全長 15m, 幅 2.23m, 最高速度 50km/h, 3 車体 3 台車連節構造, 最小曲線半径 14m 質量 30.0 トン, 定員 62 人, 出力: 定格 100kW (電動機 2 台) 直流架線 600V 対応 (補助蓄電池もニッケル水素式)	呼び出し電池 (LIM30H-8A : 28.8V フェーブル) (マカオン系正極)	274Ah セル × 480 直列 × 1 並列	定格電圧 576V パワー 250kW エネルギー 158kWh (駆動用 120kWh) 質量 約 3,200kg	・ 架線内走行 ・ 5 分充電で、 距離 10km 走行 (充電パワー 300kW → 約 25kWh 充電)	・ 試走 (2007/12～08/03) 札幌市内線	5	
ameriTRAM (LFX300)	近畿車輛, /富士電機, /GSユサ	近畿車輛	全長 20.0m, 幅 2.65m, 標準軌, 最高速度 80km/h, 3 車体 2 台車連節構造 質量 32.0 トン, 定員 106 人, 出力: 定格 480kW (電動機 4 台) 直流架線 750V 対応 (補助蓄電池も呼び出し付)	呼び出し電池 (LIM30H-8A : 28.8V フェーブル) (マカオン系正極)	30Ah セル × 184 直列 × 2 並列	(e-Bird ヲリ) 定格電圧 662V パワー 400kW エネルギー 40kWh 質量 約 1,000kg	・ 部分架線内走行 ・ 10 分充電で、 距離 6km 走行 (充電パワー 120kW → 20kWh 充電)	・ 試験走行 (2010/07-2012/12) Charlotte (ノースカロライナ) Tempe (アリゾナ) in AZ (アリゾナ) Dallas (テキサス) in TX (テキサス) Kansas City (カンザス州) in KA (カンザス) Austin (テキサス州) in TX (テキサス) New Orleans (ルイジアナ) in LA (ルイジアナ) 他 ・ 納入予定 (2015): Los Angeles (ロサンゼルス)	6	
(223系 2000代 改造)	JR 西日本, /三菱電機, /etc.	JR 西日本 (山陽本線)	全長 80m (編成), 幅 2.95m, 最高速度 130km/h, 4 両編成, 質量 140.6 トン (Mc-T-M-Tc 編成), 定員 554 人, 出力: 定格 1,760kW (電動機 8 台) 直流架線 1,500V 対応	呼び出し電池 (LIM30H-8A1 : 28.8V フェーブル) (マカオン系正極)	※ (構成に 関する詳細 公開情報 未検出)	定格電圧 1,200V パワー 500kW エネルギー 83kWh 質量 約 2,000kg	・ 架線内走行 ・ 日車 2: 240km ・ 6～10 駅毎に急速充電 の停車中の 2 分程度以下 の時間で充電	・ 試走 (2013/02) 山陽本線 (網干～有年: 片道約 18km)	11	
Dencha (817系 改造)	JR 九州, /鉄道総研, /日立製作所, /GSユサ	JR 九州 (筑豊本線)	全長 40m (編成), 幅 2.99m, 最高速度 120km/h, 2 両編成, 質量 67.1 トン (編成: 改造後), 定員 258 人, 出力: 定格 600kW (電動機 4 台) 交流架線 20kV 対応	呼び出し電池 (LIM30H-8A1 : 28.8V フェーブル) (マカオン系正極)	30Ah セル × 384 直列 × 2 並列	公称電圧 1,382V パワー 500kW エネルギー 83kWh 質量 約 2,000kg	・ 架線内走行 (筑豊線制限 95km/h) ・ 8 分充電で、 距離 25km 走行 (充電パワー 500kW → 67kWh 充電)	・ 試走 (2013/03～2014/02) 筑豊本線, 日田彦山線 ・ 新車営業投入予定 (2016 秋頃～)	12	
ACCUM (EV- E301系)	JR 東日本, /綜合車両製作所, /三菱電機, /GSユサ	JR 東日本 (烏山線)	全長 40m (編成), 幅 2.80m, 最高速度 100km/h, 2 両編成, 質量 77.9 トン (編成), 定員 266 人, 出力: 定格 380kW (電動機 4 台) 直流架線 1,500V 対応	呼び出し電池 (LIM30H-8A2 : 28.8V フェーブル) (マカオン系正極)	30Ah セル × 176 直列 × 5 並列	定格電圧 634V パワー 600kW エネルギー 190kWh 質量 約 5,000kg	・ 架線内走行 (烏山線制限 65km/h) ・ 6 分充電で、 距離 20km 以上走行 (充電パワー 600kW → 60kWh 充電)	・ 営業運行 (2014/03～) 宇都宮～宇積寺～烏山 ・ 事前試走「駅+電池くん」対 E995 (2009～2013)	13	

表2 海外の営業線試走段階または営業投入のバッテリー電車代表例 その1

車両名 / 車両形式	プロジェクト名 / 開発・製造者	導入箇所 / 事業者	車両諸元 (寸法, 質量, 形態, 対応線区)	蓄電媒体種類	蓄電媒体 の構成	蓄電システム の 定格性能	実線性能数値 (1 充電航続距離 / 省エネ効果ほか)	運用設定性能 (充電時間, 蓄電量, 平均無線電距離)	技術展開先 (導入済 / 導入予定 / 試験走行予定)	文献
GTN6	MVV (マックス交通公社), / 現 Bombardier (Duewag ティコナー & ABB) / Maxwell (マクス)	MVV (Manheim Verkehrs und Versorgungs- amt)	全長 35m, 幅 2.3m, 軸間 1,000mm, 最高速度 50km/h, 5 車体 3 台車, 質量 34 トン, 直流架線 750V 対応	電気二重層キャ パシタ (Maxwell 製) にリチウムイ オン電池 (マクス 製) を搭載	1,800F セル × 160 直列 × 4 並列 × 2 台 / 編成	[Mitrac Energy Saver (2005)] 最大電圧 400V コイル 2.5V 合成静電容量 90F パナ 600kWh コイル - 2.0kWh (0V ⇄ 400V 計算) 質量 954kg	架線電力 50% 削減 消費電力 - 30% 削減 1 充電航続距離 500m (最高速度: 50km/h)	試験営業 (2003/09-2007) ・営業 (2008 ~) ・ RNV (リッパ交通公社) 新車発注済み Hildeberg (リッパ) 向け (7 車体 4 台車, Maxwell-3,000F を使用) ...2013 年に納車との予定であったが, 現時点で未だ報道無し	15	
Citadis 302	Alstom (アルストム), / CCM (Center for concepts in mechatronics)	Rotterdam (ロテルダム)	全長 31.6m, 幅 2.4m, 標準軌, 5 車体 3 台車, 最高速度 70km/h, 質量 36.7 トン, 定員 181 人, 出力: 定格 420kW 直流架線 600V 対応	リチウムイ オン電池 (MLC-FESS; Magnet Loaded Composite- Flywheel Energy Storage System; 磁性体装甲コイル 蓄電装置)	カーボン複合材 20,000rpm (本体質量 400kg)	1 充電航続距離 2km (最高速度: 50km/h)	架線電力 50% 削減 消費電力 - 30% 削減 1 充電航続距離 500m (最高速度: 50km/h)	試験営業 (2004-2005) Erasmus bridge (エラスムス橋) (距離 900m, 高低差 15m) を架線 / 充電方式で渡橋 & 3 停留場間を架線 / 充電方式で走行	16	
Citadis 302	CANCA (ニューエストロップ 都市エネルギー), / Alstom (アルストム), / Saft (サフト)	CANCA (Communauté d'agglomération Nice-C ôte d'Azur)	全長 32.8m, 幅 2.65m, 標準軌, 定員 220 人, 最高速度 70km/h, 5 車体 3 台車, 質量 41.3 トン, 直流架線 750V 対応	リチウムイ オン電池 (NHP 10-340 ; 12V モジュール)	34Ah 単 (単体 2V) × 6 直列 × 34 並列 × 4 並列	1 充電航続距離 1.0km (最高速度: 70km/h)	部分架線 / 走行 ・ 1 回の充電で, 広場 2 箇所分を走破 ・ 架線区間で充電 ・ 3 ~ 6 ヶ月または距離 1 ~ 1.5 万 km でリチャージ	営業 (2007/11) - 路線長 8.7km うち 2 箇所の広場 (Place Masséna 及び広場 435m, Place Garibaldi カザル) 及び広場 485m) 区間のみを リチャージ走行	17	
Combino -plus	MST (南交通地下鉄), / Siemens (シーメンス), / Maxwell (マクス), / Saft (サフト)	MST (Metro Transports do Sul) in Lisboa (リスボン)	全長 36.4m, 幅 2.65m, 標準軌, 最高速度 60km/h, 4 車体 4 台車連節構造 (軸 6MT2), 質量 80.0 トン, 定員 232 人, 直流架線 750V 対応	電気二重層キャ パシタ (Max- well 製) にリチウム イオン電池 (NHP 10-340 & NHP 10-340 ; 12V モジュール)	EDLC 3,000F セル × 192 直列 × 2 並列 ・ Ni-MH +105kWh (Ni-MH) +0.85kWh (EDLC) 34Ah セル (単体 2V) × 6 直列 × 44 直列	消費電力 - 30% 削減 1 充電航続距離 2.5km (最高速度: 70km/h)	部分架線 / 走行 ・ 部分架線 / 走行 ・ 最大 26% 勾配も 架線 / 走行可能	営業 (2008/11) - Almada ~ Seixal (南リスボン) ・ 開業予定 (2015/12) - Almada ~ Seixal (南リスボン) in قطر (カタール) 及び Almada ~ Seixal (南リスボン) 路線長 11.5km 24 停留場 (全線架線 / 充電)	18	
Citadis 402	STEEM (Système de Tramway à Efficacité Énergétique Maximisée) / RATP (パリ交通公社), / Alstom (アルストム), / Maxwell (マクス)	RATP (Régie autonome des transports parisiens) - Paris Line T3 (パリ)	全長 43.7m, 幅 2.65m, 標準軌, 最高速度 70km/h, 5 車体 3 台車連節構造, 質量 57 トン, 定員 417 人, 直流架線 750V 対応	電気二重層キャ パシタ (Max- well 製) にリチウム イオン電池 (NHP 10-340 & NHP 10-340 ; 12V モジュール)	EDLC 3,000F セル × 23 直列 × 12 並列 × 4 並列	1 充電航続距離 400m (速度 30km/h) 消費電力 - 平均 16% 減 (1.6kWh 蓄電時) ⇒ 30% 減 (2.0kWh 蓄電時)	架線 / 充電方式 (小部分架線 / 充電) ・ 架線 / 走行時は 停留場ごとに充電	試走 (2009/07-2010) Paris-T3 線 (Georges Brassens - Porte Brancion & Porte de Choisy - Porte d'Italie)	19	
Urbos-3	CAF (カフ: Construcción Auxiliar de Ferrocarriles), / TUSSEM (Transportes Urbanos de Sevilla), / Sociedad Anónima Municipal de Infraestructuras de Transportes Urbanos de Sevilla (カフ: 近郊交 通市立合資会社), / KRITC (Kaohsiung Rapid Transit Corp.: 高雄高速 交通)	・ TUSSEM in Sevilla (セビリア), ・ Zaragoza (ザラゴサ), ・ Granada (グラナダ), ・ KRITC in Kaohsiung (カフ: 高雄) ・ 高雄	全長 31.3m, 幅 2.4m, 標準軌, 定員 284 人, 最高速度 50km/h, 5 車体 3 台車連節構造, 直流 750V 架線対応  [Kaohsiung (カフ: 高雄)] 全長 34.2m, 幅 2.65m, 標準軌, 定員 250 人, 最高速度 70km/h, 5 車体 3 台車連節構造, 直流 750V 架線対応	電気二重層キャ パシタ (Max- well 製) にリチウム イオン電池 (NHP 10-340 & NHP 10-340 ; 12V モジュール)	[ACR-free- drive] ・ EDLC 【構成推定】 3,000F セル × 13 直列 × 13 直列 × 4 並列 × 2 台 / 編成 ・ Ni-MH 34Ah 単 × 6 直列 × 37 直列 × 2 台 / 編成	架線電力 50% 削減 消費電力 - 30% 削減 1 充電航続距離 500m (最高速度: 50km/h)	部分架線 / 走行 (高雄: 全線架線 / 充電) ・ 停車中 20 秒充電で, 1 停留場分走行 (750V × 1,200A × 20 秒 = 5.0kWh)	営業 (2011/04): Sevilla (セビリア) 2.2km (バス事業者が運営) 路線のうち 延伸区間 5 停留場間 (400m) を リチャージ & ヤバ / 充電方式で走行 ・ 営業 (2011/04): Zaragoza (ザラゴサ) リチャージのみ, 急速充電は充電停留場 のみ設置の軌道中央第 3 軌条への 集電靴押付け集電方式 ・ 営業 (2012): Granada (グラナダ) ・ 営業 (2015/08 - 営業 8.7km 分) 【架線 / 充電】 Kaohsiung (高雄) 路線長 22.1km, 36 停留場 (2015/12 までに全線開業) 全停留場で副体架線から充電	20	

表3 海外の営業線試走段階または営業投入のバッテリー電車で代表例 その2

車両形式	プロジェクト名 / 開発・製造者	導入箇所 / 事業者	車両諸元 (寸法, 質量, 形態, 対応線区)	蓄電媒体種類	蓄電媒体の構成	蓄電システムの定格性能	実性能数値 (1 充電航続距離 / 省エネ効果ほか)	運用設定性能 (充電時間, 蓄電量, 平均無給電距離)	技術展開先 (導入済 / 導入予定 / 試験走行予定)	文献
Tango	TPG (シエネップ公共交通) / Stadler (シュタドラー)	TPG (Transports Publics Genevois) (ジュネーブ)	全長 44m, 幅 2.3m, 軸間 1,000mm, 最高速度 70km/h, 6 車体 5 台車連節構造, 最小曲線半径 18m, 質量 57 トン, 定員 261 人, 出力 定格 750kW, 直流架線 600V 対応	電気二重層キャパシタ	EDLC 3,000Fセル × 12 並列	質量: 約 1,000kg	1 充電航続距離 (車両基地構内線 半径 1,500m) 速度 55km/h からの全アレーキ制動を蓄電回収	架線レス走行	試験営業 (2012.07): ...現時点で導入動向の報道無し	21
Dolphin (SYLRV 100)	長春軌道客車 in Shenyang / 中国北車 / Noth (ノース) in Osterreich (オーストリア)	VTRA (joint Venture of TransDEV and RAIP DEV) in Shenyang (シエネーブ)・瀋陽	全長 34.4m, 幅 2.65m, 標準軌, 最高速度 70km/h, 5 車体 3 台車連節構造, 最小曲線半径 19m, 質量 43 トン, 定員 300 人, 出力: 最大 700kW 直流架線 750V 対応	電気二重層キャパシタ	EDLC 500V-15F × 4 並列	定格電圧 500V 合成静電容量 60F 1セル - 1.6kWh	1 充電航続距離 700m	部分架線レス走行	営業 (2013/09): 距離 70km, 65 停留場 交差点, 併用軌道, 分岐箇所は架線レス 運営: TransDEV & RAIPDev (France) 運行契約: 2013-2015 (3 年間), 3.3 億元	22
Catfree (catenary free の略)	Škoda (シュコダ) in Česká (チェコ)	Konya (コニヤ) in Turkey (トルコ) -T28 line	全長 32.5m, 幅 2.55m, 標準軌, 最高速度 70km/h, 5 車体 3 台車連節構造, 定員 364 人, 出力: 定格 400kW, 最大 800kW, 直流架線 750V 対応	リチウムイオン電池 (マカオン系正極 & マカオン系負極)	Li+ ※ (構成に開示する詳細公開情報未検出)	※ (詳細公開情報未検出)	1 充電航続距離 3.0km 以上 (30km/h まで 30 回加速して距離 8km 無給電走行実績)	架線レス走行	営業 (2014/02): 架線レス区間 1.8km Innotrans (2014/08) に車両出展実績 導入予定: Praha (プラハ) in Česká (チェコ), Miskolc (ミスコルツ) in Magyarország (ハンガリー), Bratislava (ブラチスラヴァ) in Slovenská (スロバキア)	23
(licence based) Fexity2	Bombardier (ボンバルディア) / 南京浦鎮車輪廠 (Nanjing Puzhen) / Liebherr (リッベラー) in Osterreich (オーストリア)	Nanjing (ナンジン) シン・南京 2 線	全長 32.5m, 幅 2.65m, 標準軌, 最高速度 80km/h, 5 車体 3 台車連節構造, 質量 72 トン, 定員 222 人, 出力: 定格 480kW, 直流架線 750V 対応	リチウムイオン電池 (マカオン系正極)	Li+ 92Ah セル (単セル 3.7V) × 12 直列 × 2 台並列	〔Primevo battery 50〕 定格電圧 532V 1セル - 49kWh × 2 台 = 98kWh 質量 832kg × 2 台 = 1,664kg	架線下加速中と停車中に充電	架線レス走行	営業 (2014/08): 線区の 90% が架線レス 河西 (Hexi) 線 8km, 13 停留場 麒麟 (Qilin) 線 9km, 13 停留場 試験営業: Menhiem (メンニム) (2014/04+): 5 車体 LRV 49kWh 搭載	24
Capacitor -LRV	南車株洲電力機車 (CSR-Zhuzhou Electric Locomotive) / 宁波南車新能源科技有限公司 (Ningbo CSR New Energy Technology) in China (中国)	Guangzhou (グワンジュウ) (フカン) ヨウ・広州	全長 36.5m, 幅 2.65m, 標準軌, 最高速度 80km/h, 4 車体 4 台車連節構造, 最小曲線半径 25m, 最高勾配 60‰, 定員 386 人, 直流充電 750V 対応	電気二重層キャパシタ (推奨: NingBo 製 NBCSRM0125 P060: 24 セル直列 60V セル) / 編成当り	EDLC 3,000Fセル × 24 直列 / 編成当り	※ (充電 30 秒で距離 4km と編成質量 40 トン仮定から逆算推定した値) 最大電圧 778V (セル 2.7V) 合成静電容量 500F パワー 1,000kW 1セル - 16.8kWh 質量約 11,000kg 体積約 10.8m <sup>3</sup>	1 充電航続距離 4km ※ (実際に 1 充電で距離 4km 走行した文献等は未検出)	架線レス走行	営業 (2014/12): 広東塔~万勝園: 距離 7.7km (10 停留場) 地表集電 (充電場所のみの接触式 LRV) 間設置第 3 軌条から充電 ※ 広州市, 南車株洲等が「世界初の蓄電 LRV」と称している 電線が無く, キャパシタの蓄電 LRV のみで駆動する LRV に限定すれば正しい	25
Capacitor -Light Metro	中国工程院 (中国鉄道関連研究所) / 南車株洲電力機車 (CSR-Zhuzhou Electric Locomotive) / 宁波南車新能源科技有限公司 (Ningbo) in China (中国)	Zhuzhou (チウヂウ) ヨウ・株洲	全長 36.5m, 幅 2.65m, 標準軌, 最高速度 80km/h, 2 車体 4 台車連節方式, 最小曲線半径 80m, 定員 320 人, 直流充電 750V 対応	電気二重層キャパシタ (推奨: NingBo 製 NBCSRM0125 P060: 24 セル直列 60V セル) / 編成当り	EDLC 3,000Fセル × 24 直列 × 24 並列 / 編成当り	※ (充電 30 秒で距離 2km と編成質量 40 トン仮定から逆算推定した値) 最大電圧 778V (セル 2.7V) 合成静電容量 250F パワー 1,000kW 1セル - 8.4kWh (蓄電容量の 75% を使用可処を前提) 質量約 5,500kg, 体積約 5.4m <sup>3</sup>	1 充電航続距離 3km 充電所約 700kW (750A-900A)	架線レス走行	試験車登場 (2012/08): ...35 都市の地下鉄で延伸または新規開業の工事中, 車両導入予定 駅プラットフォーム垂直面設置のハンダブリッジが伸縮し停車中車両の集電器に接触し, 地上側で電流制御 (直流 900A) 充電	26

表4 海外の営業線試走段階または営業投入のバッテリー電車代表例 その3

車両名/ 車両形式	プロジェクト名 /開発・製造者	導入箇所 /事業者	車両諸元(寸法、質量、 形態、対応線区)	蓄電媒体種類	蓄電媒体 の構成	蓄電システム の定格性能	実績性能数値 (1)充電航続距離 /省エネ効果ほか)	運用設定性能 (充電時間、蓄電量、 平均無給電距離)	技術展開先 (導入済/導入予定 /試験走行予定)	文献
Electro- star (エレクトロスタ 改造 Class379)	IPEMU (Independently Powered Electric Multiple Units) /Bombardier-Derby /Valence in U.S. /etc.	Network Rail (イギリス) /Greater Anglia (運行 in London)	全長 81m, 幅 2.8m, 標準軌, 4 両編成, 最高速度 160km/h, 最小曲線半径 90m, 質量 185 トン, 定員 189 人 (2nd) +20 人 (1st), 出力: 定格 1,200kW (電動機 6 台), 交流架線 25kV 対応	リチウムイオン電池 (LiFeMgPO <sub>4</sub> マチ ネリアム) 酸鉄系正 極) (Valence 製 U27- 36XP: 38.4V マチ セル)	・Li+ 1.4Ah セル (単セル 3.2V) × 33 並列 × 12 直列 × 20 直列 × 13 並列	[U-charge XP] 定格電圧 768V ハワー 最大 1,380kW (放電 3C) 充電 230kW セルキ - 460kWh 質量 約 8,000kg	・1 充電航続距離 50km (=30 マチ) ・最高速度: 100km/h (=60 マチ/h) ・交流 25kV と直流 600V とに対応	・試走 (2014/08-) : ・試験営業 (2015/01/12h-02/13th) : Mayflower line (片道約 18km 支線) Manningtree (マニングリー) ~ Harwich (ハーウィッチ) 交流電化区間のリチウムイオン蓄電池電車 の旅客営業電車としては (5 週間だけの 時限運用を認めると) 世界初	27	
Liverty	DART (Dallas Area Rapid Transit: ダラス高速 運輸会社), /Brookville /Bombardier-Oerlikon (ブールバウアー), (ボウバウアー), /Saft (サフト)	Dallas (テキサス)	全長 20.3m, 幅 2.4m, 標準軌, 最高速度 70km/h, 3 車体 2 台車連結構造, 定員 100 人, 出力: 定格 396kW (電動機 4 台), 直流架線 750V 対応	リチウムイオン電池 (リ ン酸鉄系正極) (Saft 製 VL30PFe : 39.6V マチセル 「Modulion-12」)	・Li+ 30Ah セル (単セル 3.3V) × 12 直列 × 14 直列 【以下推定】 × 3 並列	[Iron-OnBoard Rege] (水冷・水暖方式) 定格電圧 554V 使用セル: 1 放電 最大 5C (~ 500kW), 充電 最大 1C (100kW), 【以下 3 台並列推定時】 ハワー 最大 492kW, セルキ - 47.1kWh, 質量 670kg (Modules) + Container+BTMS+DC/DC ⇒ over 1,200kg	・部分架線区間走行 (距離 1.6km) ・架線区間走行中 にハワー充電 (充電パワー: 100kW)	・営業 (2015/04-) : Trinity River (トリニティ川) 渡河箇所うち, 距離 1.6km (含 40%勾配) 架線区間走行 ・納入予定 (2016 年末-) : Detroit (デトロイト) 路線 5.3km の 60% が架線区間 (搭乗) 形式は二次電池 (750V)	28	
Trio	SDT (シフト), /Inekon (イネコン) in Česká (チェコ), /Saft (サフト)	Seattle Department of Transporta- tion (シトル 市交通局)	※ [Inekon-Trio12 の値] 全長 20.1m, 幅 2.46m, 標準軌, 最高速度 50km/h, 3 車体 3 台車連結構造, 最小曲線半径 18m, 質量 30 トン, 定員 113 人, 出力: 定格 180kW (電動機 4 台) 直流架線 750V 対応	リチウムイオン電池 (リ ン酸鉄系正極) (Saft 製 VL30PFe : 39.6V マチセル 「Modulion-12」)	Saft 製 Li+ ※ (構成に関 する詳細公開 情報未検出)	※ (詳細公開情報未検出) 【推定】 Detroit (デトロイト) 向け Liberty と同構成の 公算)	・部分架線区間走行 (距離 4km) ・ハワー走行時は 最高速度 32km/h	・試走 (2015/02-) : Ostrava (オストラヴァ) in Česká (チェコ) ・営業予定 (2015 年末-) : 線区途中の距離 4km が架線区間 ・営業予定 : Praha (プラハ) in Česká (チェコ) ・納入予定 : Detroit (デトロイト) in USA	29	
Tram Wagon (71-405 -11)	Ural-transmash (ウラル-ト ランスマッシュ), /Уральвагонзавод (ウラル車両工場), / П равитель ст во Ново сибирской области (ノボシビル地域政府), /Liotech (リテック) in Россия (ロシア), /Thunder Sky (サンダースカイ) in 中国	Новосибир ской (ノボシ ビル)	全長 15m, 幅 2.5m, 軸間 1,524mm 最高速度 75km/h, 質量 30 トン, 定員 168 人, 出力: 定格 85kW (誘導電動機 1 台) 直流架線 550V 対応	リチウムイオン電池 (リ ン酸鉄系正極) (Liotech 製 LT- LYP240/380/770)	・Li+ 240Ah セル (単セル 3.2V) ※ (構成に関 する詳細公開 情報未検出)	※ (電圧、電流、パワー等に 関する公開情報未検出) 使用セル: 1 放電 最大 3C, 推奨 0.5C 充電 最大 3C, 推奨 0.5C サイクル寿命 5,000 回以上 充電器パワー 100kW	・1 充電航続距離 38km (冬季実績: 暖房最大時) ・[目標値] 力行時に 使用するエネルギー の最大 60% を 回生蓄電 ※ (実績結果の 公表資料 未検出)	・架線区間走行 ・1 充電航続距離 50km ・急速充電 10-15 分 ・70 充電 2 時間	・試走 (2012-2013) : ・営業予定 (2017-) : 全低床新車「Russia One」納入予定 Екатеринбург (エカテリンブルグ), Омск (オムスク), Москва (モスクワ)	30

たが、2010年代に入り、より安全な鉄系正極材のリチウムイオン二次電池を中心に、欧州、中国、直近ではロシア等でも製作可能となってきたためである。

### 3. 蓄電池技術の動向

#### 3.1 高密度化（パワー・エネルギー）

現時点でパワー密度、エネルギー密度の両方が高い実用的な蓄電池はリチウムイオン二次電池であり、1991年の商用製品化以降、継続的な改良が加えられている。

二次電池、特にリチウムイオン二次電池にはパワー形とエネルギー形が存在する。ハイブリッド自動車(HEV)用途には瞬時パワー〔キロワット kW〕（数十秒から場合により数分）が、電気自動車(EV)用には航続距離の観点からエネルギー〔キロワットアワー kWh〕（自動車レベルでは1充電で数百 km が要求される）が要求され、プラグインハイブリッド(PHEV)用にはその中間が要求される。パワー形はエネルギー形に比べてエネルギー密度が2～3割程度低くなり、エネルギー形はパワー形に比べてパワー密度が5割以上低下することが多い。両者の特性はそれぞれトレードオフ関係にある。

「NEDO 二次電池技術開発ロードマップ2013<sup>31)</sup>」によると、2012年度末時点（今から約2年半前）においてパワー形の蓄電池パック（蓄電池モジュール）では、エネルギー密度30～50Wh/kg、パワー密度は1,400～2,000W/kg、コストは約100～150円/Whとなっている。また、2020年頃の先進リチウムイオン二次電池における目標としては、パワー形の蓄電池パックでは、パワー密度2,500W/kg、エネルギー密度200Wh/kg、コスト約20円/Whとなっている。

仮にこの数値が実現するならば、蓄電池電車として1両当たり必要な100kWh程度のエネルギー量<sup>13) 32)</sup>の蓄電池パックは質量500kgの計算となり、蓄電池箱としても1トン以下で構成できることになる。コストも200万円+ $\alpha$ となるので、導入する事業者が急増するであろう。

2013年初頭時点の実例で、セルレベルではHEV用では4,500W/kgが達成されており、EV用ではエネルギー密度130Wh/kg前後が実用化されている<sup>33)</sup>。蓄電池パックレベルではこの数値の半分までは低下しないにせよ、数値を割り引いて考える必要がある。それでも2020年目標に向けて進展していることが分かる。

上記ロードマップでは性能目標だけでなく、正極材料、負極材料、その組合せ、電解質、革新電池についても目標が掲げられており、今後さらに群雄割拠状態で開発が進んでいくものと思われる。

#### 3.2 高電圧化

リチウムイオン二次電池のシステム定格電圧については高電圧化が図られてきている。扱うパワー（電力）が大

きくなっても、電圧を上げることで電流を必要以上に大きくしないで済み、また鉄道車両として使用されてきた既存の電力変換器や主電動機を使用できるメリットは大きい。

車載用組電池として600V級（500V～700V程度）、1,100V級（920V～1,280V程度）、1,400V級（1,200～1,600V程度）が実現しており、1,800V級（1,500～2,100V程度）へ向けた高電圧化が進展しつつある。国内の在来鉄道線ではほぼ蓄電池端子電圧そのままインバーター駆動が可能になりつつある。既に定格電圧1,386Vのリチウムイオン二次電池を搭載した蓄電池電車（図1上）の走行試験が2013年度に実施されており<sup>12)</sup>、このような定格電圧1,500V級の蓄電池で駆動する蓄電池電車の営業運行が2016年秋以降に予定されている<sup>34)</sup>。

#### 3.3 長寿命化（サイクル寿命と寿命予測）

完全放電と満充電の繰返しを1サイクルとした時に、パワー形蓄電池では内部抵抗が初期の内部抵抗値より20%増加した時点を、エネルギー形蓄電池では初期容量から20%容量低下した時点を、各々サイクル寿命と定義することが多い<sup>35)</sup>。エネルギー形の場合、2013年時点で2,000～4,000サイクル程度<sup>31)</sup>であった。HEV用蓄電池としては「25℃、3C充放で10,000サイクル経過後も8割以上の容量維持<sup>36)</sup>」を謳うものもある。

リチウムイオン二次電池の寿命予測手法として、蓄電池放電容量が使用時間あるいはサイクル数の2分の1乗に比例して低下する“ルート則”が広く用いられている。これは黒鉛負極表面上に反応生成SEI（Solid Electrolyte Interface）被膜が生じ、被膜成長速度が被膜厚さに反比例するメカニズムに基づく。最近になり、理論モデルおよびインレンズSEM（Scanning Electron Microscope：走査型電子顕微鏡）による実験観察からこのことが実証された<sup>37)</sup>。つまり、負極に黒鉛等の炭素系材料（LiC<sub>6</sub>）を用い、炭酸エステル系（エチレンカーボネート、diメチルカーボネート、エチルメチルカーボネートなど）電解液を用いる構成の“一般的な”リチウムイオン二次電池における寿命予測式は“ルート則”モデルに載る。

言い換えると、長寿命化は、サイクル数の2分の1乗に比例する容量低下の比例係数を小さな値にすることでもある。この比例係数を得ることと、放電深度との関係から寿命予測が可能となっているのである。

#### 3.4 高安全化

高安全化においては、蓄電池自体と、蓄電池周辺システムの双方の安全を高める必要がある。

2013年初頭に運航中の新型航空機ボーイング787の“メインバッテリー（エンジンと補助動力による発電が双方とも停止状態となる駐機中などに機内に電力を供給する蓄電池）”からの発煙が電気室内で検知される事態

## 特集：車両技術

が発生し、長期間の運航停止を余儀なくされたことは記憶に新しい。発煙は有機電解液蒸気の噴出が要因であることから、有機電解液を用いる蓄電池、キャパシターには共通の懸念事項である。

鉄道車両においては、現在はまだリチウムイオン二次電池を主駆動エネルギー源とする営業車数自体が少なく、導入初期であることから余裕をみた設計およびリスク回避を意識した運用などが行われ、現時点では「事故」は発生していない。しかし今後この技術が広がっていくにつれて、スリム化のための限界設計やタイトな運用がなされていく可能性があり、高安全化は重要な項目である。なお、本稿では安全規格に関する記載は割愛する。

### 3.4.1 より安全な正極材の選定

蓄電池セルが自己発熱して蓄電池温度が上昇し、異常発熱や発火に至る現象を“熱暴走”と呼ぶ。過充電や内部短絡などの発熱により一定の温度を超えることで発生し得る。正極材料としてコバルト酸リチウムを用いたリチウムイオン二次電池（以下、コバルト系）は、正極が層構造となっており、熱暴走が起りえる。これに対して正極がスピネル構造のマンガン酸リチウムを用いたリチウムイオン二次電池（以下、マンガン系）では熱暴走は起りにくいとされている。

一般に、正極材別の安全度は、鉄系が最も高く、次いでマンガン系、離れてニッケル系（三元系を含む）、コバルト系の順となっている。ノートPC、携帯電話、スマートフォンなど多くの小型情報端末にはエネルギー密度の高いコバルト系が使われている。マンガン系や鉄系はコバルト系に比べるとエネルギー密度は落ちるものの安全度が高く、コバルト系に比べると安価なため、大電力を必要とする通信ビル用据置き蓄電池や、大エネルギーを必要とする自動車、鉄道や建機で用いられている<sup>38) 39)</sup>。鉄系では酸素が遊離しないため過充電を続けても燃えにくいのが特長であるが、その一方でセル定格電圧が3.2Vと低く、エネルギー密度の低さが短所である。

### 3.4.2 低内部抵抗バッテリーの選定または温度制御

リチウムイオン二次電池の大きな特長は急速充電ができることである。一方これまでのノートPC、電気自動車（EV）、建機や航空機におけるバッテリー事故は、その殆どが「充電中」に起こっている事実がある。

充電中のリチウムイオン二次電池が発煙や発火に至る要因としては、過充電、高温暴露、過放電継続や、特に低温暴露継続による劣化<sup>40)</sup>が考えられる。

発熱による温度上昇への対策は、特に急速充電を行う用途では、なるべく内部抵抗が低い電池を選定することで発熱量を下げるのが第一であり、次いで良好な放熱が得られる筐体設計を行うことで高熱環境にさらし続けられない状態で使用することである。もちろん、短絡・地絡を起こさないよう保護回路を設けることは言うまでもない。

パワー形蓄電池はエネルギー形蓄電池に比べてエネルギー密度が低いため航続距離は短くなるが、内部抵抗が小さく充電中の電圧降下が小さくなるよう設計されている。同一エネルギー容量に換算した時の内部抵抗値が低く（多くがエネルギー形の半分以上）、同じ電流あるいはパワーで充電する際の発熱がそれだけ少ない。充電中の発熱による事故確率もエネルギー形に比べると低くなる。

蓄電池車両の設計では、航続距離確保を重視する設計を指向しがちである。しかし航続距離が長くなるとその分、充電時間も長くなるので、充電パワーを上げて短時間に急速充電したくなる。その際、充電時の安全確保の観点からはパワー形蓄電池をベースに高安全を維持しつつ、蓄電池の技術進歩によるエネルギー密度向上に応じて航続距離を徐々に伸ばしていく、というのが本来の蓄電池選定として望ましい。

一方でエネルギー形蓄電池を選定する際には、蓄電池の温度管理を十分に行う必要がある。これに関して、リチウムイオン二次電池の動作温度を+15℃以上+45℃以下に維持する液体冷暖方式の温度維持システム（BTMS: Battery Thermal Management System）<sup>41)</sup>が開発され、2014年のInnoTransで展示された。2015年に入り、上記BTMS装備のリチウムイオン二次電池を搭載したと思われるLRV車両<sup>28) 29)</sup>が営業運行し始めている。

### 3.4.3 電解液蒸気の排出拡散

現在のリチウムイオン二次電池は、電解質中のリチウムイオンが電気伝導を担うため、電解液には高いリチウムイオン伝導性が求められる。このことから、エチレンカーボネートなど炭酸エステル系の有機電解液を用いるのが一般的である。

しかし有機電解液は液漏れ対策としての封止技術が必要である。また、内部短絡などでセル内圧が高くなると防爆のため安全弁が開いて電解液蒸気が噴出する構成となっているが、この電解液蒸気の拡散設計が安全確保の重要項目となってきている。

ボーイング787ではバッテリーセルからの噴出はやむを得ないとして、モジュールを覆う容器と、そこから外部へのベント管を設けた。電解液蒸気が機体内に入らずに外部に出る構造とすることで、電解液蒸気は滞留することなく素早く外気で拡散する<sup>42)</sup>。

鉄道車両においては、蓄電池箱として床下や屋根上などの車室外空間に設置することで、この問題をひとまずは解決できる。つまり、開空間や、閉空間でも換気が十分な箇所であれば問題無いと言える。それでも換気の無い長大狭小トンネル内での発生に対しては、別途考慮の必要が出てくる。

抜本的には、電解液蒸気が噴出しないタイプのリチウムイオン二次電池の開発、さらにはセパレータなどの難燃化、不燃化が望まれる。

#### 4. 蓄電池周辺技術に関する技術動向

##### 4.1 ギ装搭載場所

車内搭載か車外搭載かの搭載場所による得失が存在する(図2)。「セル異常発熱時に防爆安全弁から電解液蒸気が噴出することに対する安全確保(ボーイング787の事例)」からも、今後は床下、屋根上あるいは車上であれば隔壁等を介した車室外部、といった車室外空間への搭載が必須となってくる。

通常の在来鉄道車両では床下機器箱として搭載する。

LRVや路面電車では、海外の5連節クラス車両では屋根上空間が利用できる。国内の2~3連節あるいは単車級では設置個所に工夫が必要である。1実例として、ドア以外の椅子下部を切欠いて車外から蓄電池を搭載する方法がLFX-300(ameriTRAM)で具現化されている。

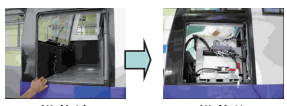
##### 4.2 主回路構成(直流電車・交流電車)

ここでは、電源側から負荷側へのパワーの流れを「正(プラス)」とする。蓄電池端子に充放電変換器が接続されている場合は、蓄電池端子が変換器の入力側となる。入力に対して出力が低い電圧に制御される場合は“降圧”変換器、出力が高い電圧に制御される場合は“昇圧”変換器と呼称する。


##### 4.2.1 直流電車の架線・蓄電池ハイブリッド

方式①(図3)と方式②(図4)は、電流可逆チョッパー(2象限チョッパー)を架線側に挿入するかバッテリー側に挿入するかが異なる<sup>2) 4) 5) 7) 13)</sup>。電流可逆チョッパーはその向きにより、降圧チョッパーとして用いるか、昇圧チョッパーとして用いるかが決まる。回路の構成上、入出力電圧の高低に留意する必要がある。条件に合わない電圧を入出力端子に与えた場合は、スイッチング半導体(現在はほぼシリコンのIGBT)に逆並列接続されたダイオードによって、条件が成立するまで制御不能の電流が流れ続けることになる。また、この構成では充放電変換器が入っていない側を定位とするのが、変換器による電力損失を防ぐ観点から有用であり、回路構成の選択により架線主体走行に好適か、蓄電池主体走行に好適かがほぼ決まる。

<p><b>車内搭載</b></p> <p>○: バッテリー各モジュールの温度管理が容易 = 外気温による寿命劣化が少ない</p> <p>○: 粉塵対策・結露対策が容易</p> <p>×: 万が一の事故時の対策が必要 = 旅客・乗務員の安全確保方策が前提</p>	<p><b>車外搭載</b></p> <p>◎: 万が一の安全対策が容易 = 車内での発火・発煙を防止</p> <p>△: 粉塵対策・結露対策が必要</p> <p>△: 温度管理が難しい = 寿命劣化が早くなることを考慮</p>
---	--



搭載前  
(車両先頭部運転台下部バッテリー室)



搭載後

図2 車載蓄電池のギ装搭載場所の違いと得失

##### 4.2.2 交流電車の架線・蓄電池ハイブリッド

交流電車への主蓄電池搭載例としての方式③(図5)は、1,500V系などの高電圧主蓄電池を直流中間回路に直接接続するものである<sup>12)</sup>。主蓄電池とその周辺機器(蓄電池投入フィルタを形成するコンデンサーなど)以外の搭載が不要で、蓄電池走行時にも従来電車なみの性能が得られる。蓄電池走行時の補機回路へ電力供給は、主蓄電池からPWM整流器を経て主変圧器2次巻線、1次巻線、3次巻線を経由して行う。主蓄電池への充電は、交流架線から主変圧器とPWM整流器を介して行うものと、駆動インバーターからの回生で行うものがある。

なお、応用回路として、3次巻線を用いずに補機SIVを中間回路に直結すると、既存の直流電車用SIVをそのまま使用でき、回路構成自体はさらに簡素化できる。

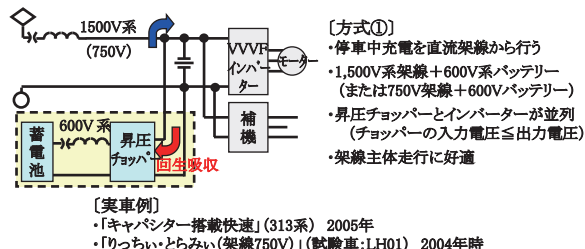


図3 バッテリー電車の主回路トポロジー①  
直流集電形・蓄電池電圧を昇圧

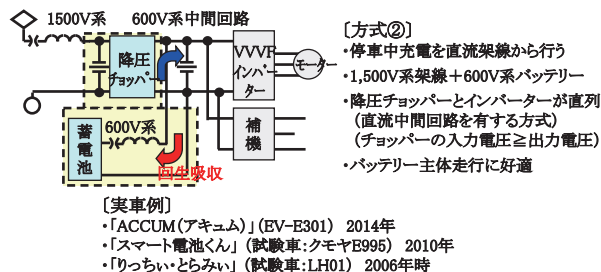


図4 バッテリー電車の主回路トポロジー②  
直流集電形・架線電圧を降圧

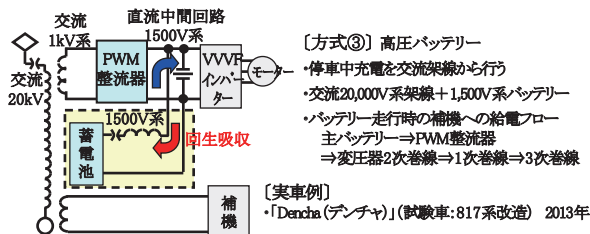


図5 バッテリー電車の主回路トポロジー③  
交流集電形・中間回路に高電圧蓄電池を直結

#### 5. まとめ

紙面頁数の都合上、車両保守時の感電防止技術、急速充電所の構成、設備容量と充電所間隔、集電電流値と電圧上昇抑制手法の考え方<sup>43)</sup>に関する記載は割愛した。

## 特集：車両技術

最後に、先人による外国文献抄訳の「結論」の文章をそのままここに再掲して「まとめ」とする。

『鉄道の経済的、技術的發展は電気エネルギーを電気車にたくわえる夢を蘇生させ、そうしてこの原理は他の形の電気車両に拡張することを可能ならしめうる。輸送量が変電所と電車線設備の費用に見合うにはあまりに少ない地帯ではこの原理に基づいて動車を採用することにより実際的に経済的に成功を修めることができるだろう。そうして蓄電池や他の蓄電装置の今後の発展は、ここにのべた発展を、輸送の新しい形態のスタートとなしうることが期待される。』<sup>44)</sup>

## 文 献

- Gerhard Wilke : Neuer vierachsiger Akkumulatortriebwagen der Deutschen Bundesbahn, Elektrische Bahnen, Heft 1, pp.2 ~ 11, 1954.01.
- Sameshima, H., etc., "Energy re-cycling trolley-less tramcar using rechargeable lithium ion battery", SPEEDAM2004, 21, Capri, Italy, 2004.06.
- 小笠ほか：LH02型架線・バッテリーハイブリッドLRV "Hi-tram"の開発, 車両技術 ISSN0559-7471, No.240, pp.149-168, 2010.09
- Ogasa, M. etc., "Development of Contact-wire/battery hybrid LRV", VPPC2010, DI-2-1, Lille, France, 2010.09.
- 奥ほか：低床電池駆動LRV "SWIMO-X"の開発, 車両技術 ISSN0559-7471, No.239, pp.113-124, 2010.03
- 服部ほか：次世代LRV "ameriTRAM"の開発, 車両技術 ISSN0559-7471, No.243, pp.61-75, 2012.09
- Sekijima, Y., etc., "Development of energy storage system for DC electric rolling stock applying electric double layer capacitor", WCRR 2006, IP3(7), Montréal, Canada, 2006.06.
- 中神ほか：燃料電池車両ハイブリッドシステムのエネルギー管理, 平成19年電気学会産業応用部門大会 3-34, pp. III 235-238, 2007.08
- 小川ほか：燃料電池・バッテリーハイブリッド試験車両の開発, 平成20年電気学会産業応用部門大会 3-63, pp. III 371-374, 2008.08
- 藪田ほか：蓄電池駆動電車システムの評価, JR-East Technical Review, No.40, pp.21-24, 2012.06
- 東海：バッテリー電車で蓄電システムの開発について, Invitation To Railway Technology, [https:// www.westjr.co.jp/company/action/technology/technical/pdf/28\\_3.pdf](https://www.westjr.co.jp/company/action/technology/technical/pdf/28_3.pdf), 2013
- 畠田ほか：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, J-RAIL2013, S3-3-5, pp.233-236, 2013.12
- 長谷部ほか：EV-E301系蓄電池電車, 車両技術 ISSN0559-7471, No.248, pp.28-44, 2014.09
- 特許庁：電気化学キャパシタの種類の原理, 平成22年度特許出願技術動向調査報告書 "電気化学キャパシター", pp.2-5, 2011.04
- Steiner, M. etc., "Energy Storage on board of DC fed railway vehicles", PESC2004, Aachen, Germany, 2004.06.
- François L., "Alstom-Future trends in railway transportation (Flywheel in Rotterdam)", Japan Railway and Transport Review 2005, No.42, pp.4-9, 2005.12.
- Moskowitz, J., "Alstom Full-tram project", [http://hydrail.org/sites/hydrail.org/files/2\\_Moskowitz.pdf](http://hydrail.org/sites/hydrail.org/files/2_Moskowitz.pdf), 2006.06.
- Siemens., "Tram System - Combino Plus MST, Metro Sul do tejo, Almada, Portugal", Document No.A19100-V520-B439-V3-7600, 2012.
- Moskowitz, J., etc., "STEEM: ALSTOM and RATP experience of supercapacitors in tramway operation", VPPC2010, SS-16-4, Lille, France, 2010.09.
- Trainelec., "Greentech-CAF energy storage system", <http://powercap.com.my/wp-content/uploads/2014/09/-Greentech-ACR-data-sheet.pdf>, 2010.11.
- Stadler., "Supercap tram successfully in service", <http://www.stadlerrail.com/en/news/2012/08/03/supercap-tram-successfully-in-service/>, 2012.08.
- Voith., "Einfach weiterfahren. SYLRV100 für Shenyang Niederflur-Strassenbahnen", [http://voith.com/en/1953\\_d\\_g\\_2277\\_d\\_rb\\_shenyang\\_2013-10.pdf](http://voith.com/en/1953_d_g_2277_d_rb_shenyang_2013-10.pdf), 2013.10.
- Railway Gazette, "Škoda develops catenary-free tram", <http://www.railwaygazette.com/news/urban/single-view/view/skoda-develops-catenary-free-tram.html>, 2014.05.
- Bombardier, "Nanjing tram PRIMOVE", <http://primove.bombardier.com/projects/asia-pacific/china-nanjing-primove-tram.html>, 2014.09.
- Li, H., etc., "Stationary Charging Station Design for Sustainable Urban Rail System: A Case Study at Zhuzhou Electric Locomotive Co., China", Sustainability ISSN 2071-1050 (Open Access), 2015-7, pp.465-481, 2015.01.
- 宁波南车新能源科技：产品中心60V120F模组, <http://www.csrap.com/ckfinder/userfiles/files/60V%20125F模组规格说明.pdf>, 2014.12
- Bombardier, "UK Battery-driven Electrostar Electrical Multiple Unit", [http://www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/Projects/supporting-documents/BT\\_Battery-Driven-Bombardier-Electrostar\\_LowRes.pdf](http://www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/Projects/supporting-documents/BT_Battery-Driven-Bombardier-Electrostar_LowRes.pdf), 2015.02.
- Brookville, "Brookville delivers first off-wire capable Liberty Modern streetcar to DART for Dallas Downtown -to-Oak cliff line", <http://www.brookvillecorp.com/Brookville-Delivers-Dallas-Streetcar.asp?news=news-streetcar.asp>, 2015.05.
- Railway Gazette, "Battery tram delivered to Seattle", <http://www.railwaygazette.com/news/traction-rolling-stock/single-view/view/battery-tram-delivered-to-seattle.html>, 2015.04.
- Liotech, "Tram with increased autonomous course", <http://www.liotech.ru/entram>, 2012.05.
- NEDO スマートコミュニティ部・蓄電技術開発室：二次電池技術開発ロードマップ2013, <http://www.nedo.go.jp/content/100535728.pdf>, 2013.08
- 秦ほか：急速充電による電池駆動電車の実用的な技術成立性の検討, Jrail2010, S4-2, pp.105 ~ 106, 2010.12
- 吉田ほか：リチウムイオン電池, 日立化成テクニカルレポート No.55, pp.6 ~ 9, 2013.01
- JR九州：Release 平成28年秋, 若松駅～折尾駅間に環境にやさしい架線式蓄電池電車を導入します, [http:// www.jrkyushu.co.jp/top\\_info/pdf/366/m167.pdf](http://www.jrkyushu.co.jp/top_info/pdf/366/m167.pdf), 2014.11
- 清水：系統電力消費型車両Ⅱ - PHEVの優位性 -, Engine Review (自動車技術会), Vol.2, No.3, pp.33 ~ 38, 2012.03
- 東芝：SCiB 詳細説明 - 長寿命性能 (サイクル特性), <http://www.scib.jp/product/detail.htm>, 2014.07
- 田尾ほか：リチウムイオン二次電池用グラファイト負極上のSEI被膜の成長過程, ジーエスユアサテクニカルレポート, Vol.10, No.2, pp.8 ~ 15, 2013.12
- 松村ほか：リチウムイオン電池の安全性評価試験における発生事象について, 交通安全環境研究所, HP 自動車研究領域概要 2012-21, pp.135-138, 2012
- 市村：小型リチウムイオン電池の寿命特性, NTT ファシリティーズ総研研究報告, 2005
- 運輸安全委員会：ボーイング式787-8型JA804A非常脱出スライド使用による非常脱出, 航空重大インシデント調査報告書 A12014-4, 2014.9
- Saft., "Ion-OnBoard® Regen Li-ion battery system -For Regenerative traction", Document No.21807-2-0415, 2015.04.
- ANA : B787型機バッテリー回収の検討と概要, <https://www.ana.co.jp/share/boeing787info/#cnt03>, 2014.9
- 小笠：バッテリー電車をめぐる最近の技術開発その4 - バッテリー周辺技術の新たな動向, 鉄道車両と技術 No.216, pp.2-14, 2014.08
- 久保：最近の蓄電池動車, 日本国有鉄道, 外国鉄道技術情報, 工作編第2号 (電気車専門号) 18, pp.123 ~ 130 (抄訳「Modern battery railcars」E.T. on R, Vol.4, No.11, pp.513-530, 1958), 1960.01

(URL参照はいずれも2015年7月15日にアクセス確認)