

# 蓄電池電源車の構想と編成電車への給電手順

小笠 正道\*

Concept of Storage Battery Electricity Source Railcar and Power Supplying Procedure to e.m.u.-trains

Masamichi OGASA

Here we propose a concept of a storage battery electricity source railcar to run e.m.u. (electric multiple unit)-trains on non-electrified lines of a middle distance beyond 100 km. This method has advantages in formation possibility as a train and in the total cost of the first few decades in some cases compared to the usual electrification method of a whole line. To embody a battery source car, a circuit configuration and a power supply method when connecting and releasing it to a train has been presented. The procedure of replacing source cars at a nodal station is also specifically described, while preventing electric shocks.

キーワード：非電化、電車、電源車、蓄電池、連結、電源切替え

## 1. はじめに

近年の蓄電池技術の進展により、比較的短距離の非電化線を走行する蓄電池電車が営業運行中である<sup>1)2)</sup>。一方で中長距離の非電化線に純電気車を走らせるには、一般には電化が必要と考えられるが、燃料電池車への期待も存在する。これら以外の手法として筆者は、距離100kmを超える非電化線区を、内燃動車や燃料電池車ではなく編成電車が電気エネルギーのみで走行する方法を提案してきている<sup>3)4)5)</sup>。本稿では電源車の連結解放による走行の構想と編成電車への給電手順を示す。

## 2. 長距離非電化線に編成電車を走らせる方法

### 2.1 充電ポイント観点からの4種類の走行方法

文献4では、4両編成気動車特急が1日8往復走行する距離130kmの実在非電化線を対象として、4両編成電車が以下に示す4つの方法で蓄電池走行する場合を想定し、全線電化方式に対するコスト比較のケーススタディを行っている。

- (1) 片道以上を走破できる蓄電量を編成電車に分散搭載。折返し駅の充電所において約20分で急速充電。
- (2) 片道走破必要分より少量の蓄電量を編成電車に分散搭載。特急停車等の各主要駅のみで1~3分停車中に急速充電。停車時分内に充電し切れずに不足した量は終点駅で補充充電。
- (3) 編成電車は連結した蓄電池電源車の電力で非電化線を走行後、途中駅や

終点駅で電源車を切離し待機中の充電済み電源車を連結して継続走行。切離された電源車は次の列車到着までにゆっくり充電して待機(図1)。電源車は総質量50tonとした。

- (4) 明かり区間は架線からの電力で走行し、狭小トンネル内のみ編成電車に分散搭載された蓄電池の電力で走行する、部分電化による走行方法。

特急の運行頻度が1時間あたり平均1本未満となる当線区では、初期コスト、運用コスト、コストペイバックタイムの比較を行った。運用コストは鉄道統計年報に基づき、額自体および方式による差異が大きい車両保存費、電路保存費、蓄電池交換費を主な比較対象とし、それ以外の費目は差異が少ないため相殺できるとした。その結果、10箇所以上の変電所設備と架空電車線設備の整備が必要となる全線電化方式に比べて、(1)~(3)の蓄電池電力を利用した電車走行の方が、当初数十年以上の間、コスト面で有利となる結果(図2)が得られた<sup>3)4)</sup>。

しかし、(1)と(2)に示す走行方法では、急速充電時におけるパンタグラフの熱的上限からの集電電流の制

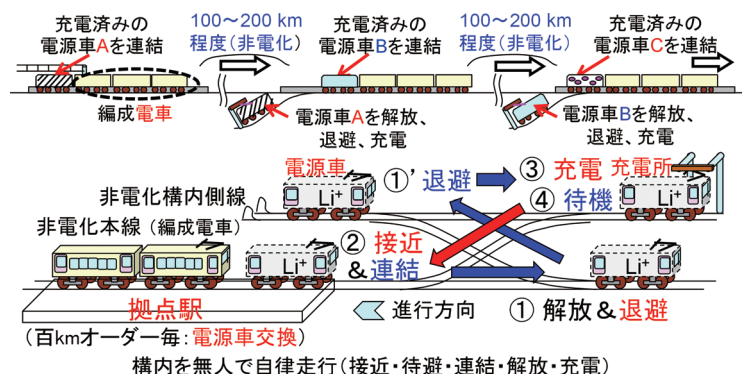


図1 電源車解結による非電化線の電車走行イメージ

\* 元 車両技術研究部

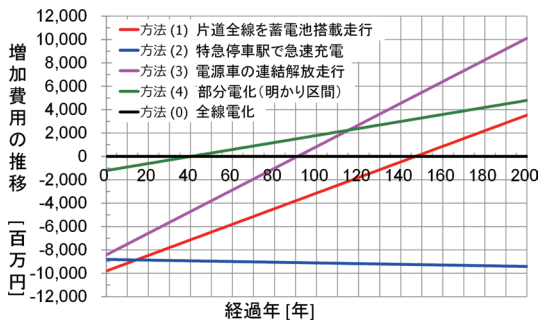


図2 蓄電池各種走行方式における対電化コストペイバックタイム  
(距離 130km 非電化実在線でのケーススタディ)

約により、編成電車に搭載すべき集電装置の数が多くなる。特に (1) では1車両当り3基の集電装置が必要となる車両が発生する。蓄電池搭載による軸重増加と相俟って、編成電車としての成立のハードルが高いことが分かった。

また、(4) の方式は走行中に高頻度のパンタグラフ昇降を伴い、トロッコ線とパンタグラフ双方に対する耐久性の課題が存在する。

これに対し、(3) の電源車方式ならば、充電パワーは (1) や (2) の3分の1程度で良く、また、電源車1両当りの集電装置も2基で済むなど、現実的な構成が期待できる。

「連結して、走行する (Connect and Run)」は鉄道の大きな特長であり、電源車はそれを活かせる手法である。

## 2.2 電源車方式の導入による利点

電源車や編成電車への充電、充填場所を図3に示す。以下に電源車方式の利点を示す。

### (1) 地上設備の簡素化

- ・初期費がネックで電化できない非電化路線への“電車”走行を他方式よりも比較的容易に実現。
- ・運行頻度の低い電化線では電源車方式電車の走行に置き換えることによる、架線設備の縮減による保守費の削減や、老朽架線設備の撤去。
- ・充電所と付帯設備 (送配電設備を含む) 最小化：充電所は結節駅か折返し駅のみ、変電所は電化線既設のみ。
- ・充電所や変電所の用地確保や、山腹への高圧铁塔群建植や高圧線引込み、といった大掛りな整備が不要。
- ・運行ダイヤ上、次列車までの充電時間を長く取れば充電所 kVA 容量を抑えられ設備投資が軽減。
- ・地域設置型の充電所として、電力系統に連系しない分散発電所や、地上併設蓄電装置との組合せが可能。

### (2) 非電化線の簡易電化による環境負荷低減

- ・編成電車や編成蓄電池電車と同じ電気駆動で、非電化線における走行時や駅構内での排ガスゼロ、静粛化、充電する電気を発生する発電所における発電方式や脱炭素対策次第で“クリーン電気”を使用可能。
- ・立地、設備 kVA 容量、運用上確保できる時間次第で、分散型再生可能エネルギー発電式の充電所も可能。

### (3) 電化区間における非常時対応

- ・走る蓄電池として、架線停電時の蓄電非搭載電車の救援車として対応可。

### (4) 駅設備の有効活用

- ・駅構内の側線や各種設備を撤去した後の遊休地を有効

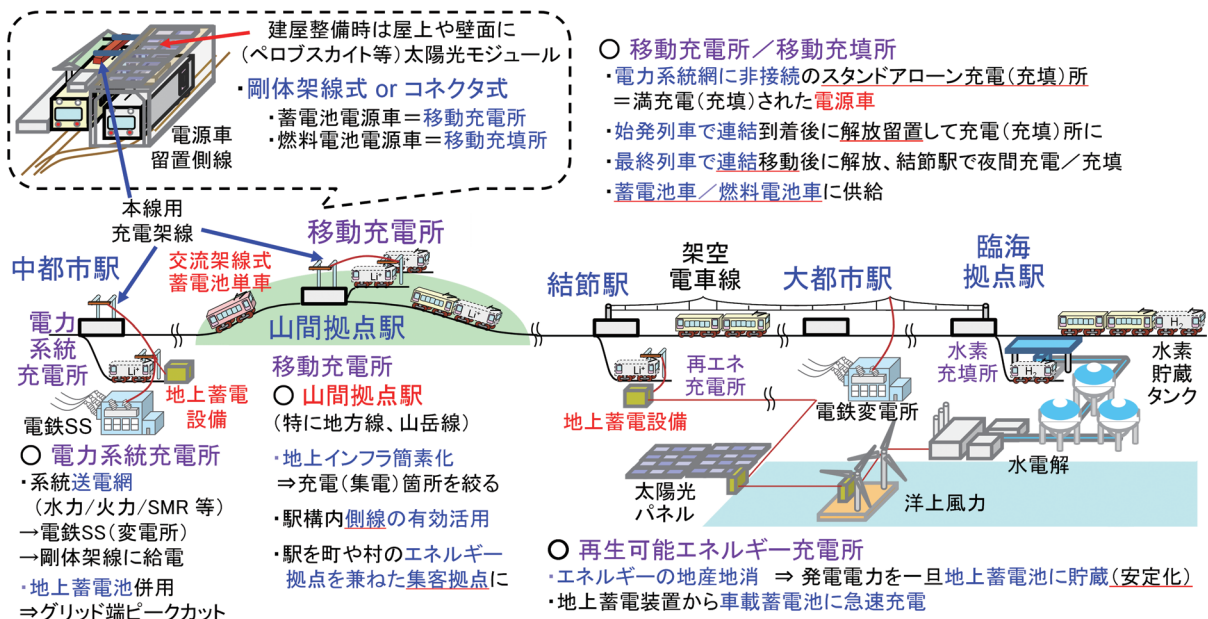


図3 電源車 / 編成電車への充電 / 充填イメージ

活用して充電所や小規模簡易発電所を設置。

- 蓄電池電源車を充電する充電所が、電力系統連系型や、蓄電装置併設型である場合は kVA 容量または kWh 容量次第で、充電ステーション、町や村の集客拠点に。
- 電源車自体を移動充電所として留置側線上に設置可。
- (5) 車両機装設計のシンプル化
- 連結方式の蓄電池テンドー車であることから、編成電車への蓄電池搭載に比べて構成上の無理が少ない。
- (6) 蓄電池の劣化抑制
- 編成から解放後は次列車までの時間でゆっくり充電し急速充電を極力回避することで、蓄電池劣化を抑制。
- (7) 対象列車、走行線区、電源供給の自由度が大
- エネルギー容量 kWh 次第で“移動式充電所”として駅構内側線に留置し、蓄電搭載型編成電車の停車中充電器として使用できる。
- 移動式充電所として使用する際は、充電可能な結節駅で夜間に電源車を充電し、始発電車に連結して線区走行後に山腹等の所定充電駅構内側線に留置する。日中は充電器として編成電車を充電し、最終電車に連結して結節駅に戻す運用が可能。
- 編成電車が蓄電搭載型なら電源車を解放後にそのまま自力走行を続け、蓄電非搭載型なら電源車を連結した状態で走行継続する。この場合、始発電車に連結する電源車数を調整することで、複数の移動充電所や電源車連結を必要とする編成電車に対応する。
- 移動式のため、ダイヤ改正に伴う編成電車への充電所位置の変更要求に柔軟に対応できる。

なお、電源車は蓄電池価格次第では、蓄電池以外に内燃機関または燃料電池での代替え選択も可能である。気動車の軽油や燃料電池車の水素は各車のタンクごとに充填が必要なため、電源車1車両に集約すれば長編成になるほど燃料充填の労力を低減できる。

### 3. 電源車解結式の具現化に向けた技術課題

#### 3.1 電源車連結による編成電車への給電回路と手順

電源車は自走可能な両運転台 Mc 車で編成電車の前位または後位に連結する。電化線を走行して来た編成電車が蓄電非搭載型の場合、車内の照明や空調など接客用補機電力を落とさず、また電圧が異なる電源を混触させずに蓄電池電源車からの電源供給に切替えた上で、非電化走行に臨む必要がある。

編成電車への直流高圧引通し母線（以下、DC バス）の設備、架線電圧あるいは電源車の蓄電池電圧と編成電車の DC バスの電圧を整合させた上での接続解放シーケンス、それを実現できる回路構成が必要となる。

そのような蓄電池電源車の主回路構成例を図4に示す。

#### 3.2 人手を介さない連結器周辺構成

人手を介さない連結解放操作のため、データ伝送線、電力供給線、空気配管を自動で引通せる連結器が必要となる。近年、欧州 Voith（フォイト）社で Cargo Flex なるデジタル対応自動連結器<sup>6)</sup>が開発されており、利用できる可能性がある。

また、人手を介した連結を行う場合も想定して、連結解放作業時の作業員の感電防止策も重要である。

このような連結器を編成電車および電源車の各前後端に採用し、乗客移乗が無いことを前提に貫通幌の脱着作業を省略、あるいは自動貫通幌自動接続機構の開発により、手動作業を介さない連結が可能となる。

具体的には、両用連結器（自動連結器と密着連結器に対応）下部の電気連結器を基本として電源車に装備し、主回路、補助回路、制御指令線、ブレーキ用空気配管（エアレス車では不要）を自動で接続、解放が可能となる構成とする。配線群と配管の一体接続可能な連結器を前提に、主回路 DC バスはプラス線とマイナス線の対とし、レールを帰線回路として期待できない非電化線に対処する。

#### 3.3 電源車自律運転による充電・接近待避・連結解放

連結解放に人手を要しては人件費が余計に掛かってしまう。それを避けるため、下記一連の作業を無人かつ自律的に行う必要がある。

- 電源車が編成電車への電力供給を停止
- 連結器を自己解放
- 待避走行して充電位置に留置
- 充電位置で充電作業を行い、その後は待機
- 次の編成電車が到着したら接近して連結
- 編成電車と電源車とで回路を構成、給電開始

これらは構内側線の線路形状マップを元に、本線信号機の現示を確認した上で、分岐器（スプリングポイント可）を亘る走行を行う。そのため、分岐前停止、充電位置への停止、連結位置への停止、の各段階における高精度の停止位置制御が要求される。無人自律走行パターン

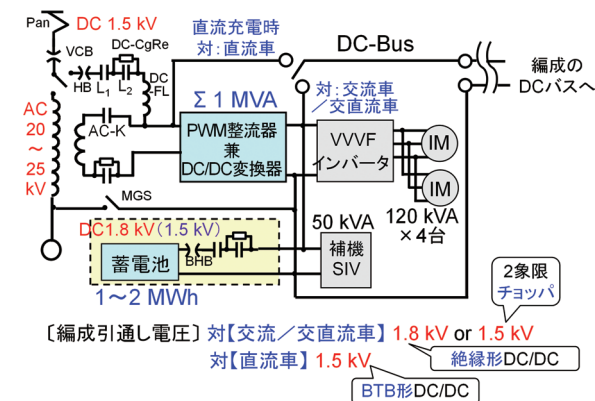


図4 蓄電池電源車の主回路構成（交直両用の例）

生成の概念を図5に示す。

なお、無人自律走行を行う駅においてはそのルート上にヒト、動物、モノ、移動体などが入り込まないように、プラットフォーム上のホームドアなど安全面での施策を合せて行う検討が必要である。

#### 4. 電源車連結解放時の給電回路の構成と手順

前章の技術課題のうち、1番目の主回路を構成できることが電源車方式を実現するための最初のステップとなる。そのため本稿では、給電回路の構成例と給電手順について述べる。

##### 4.1 引通し回路構成例

蓄電池電源車は架線または自車蓄電池からの電力による自力走行と自車搭載蓄電池への充電、ならびに自車搭載蓄電池から編成へ電力を供給する役割を持つ。そのため、電源車から供給する直流電力には編成電車の駆動インバータを動作できる電圧が要求される。その際、蓄電池後段に電圧変換器を配置する方法があり得るが、蓄電池走行が主体の場合は変換器による電力損失が生じ続ける。これを避ける観点から、蓄電池電圧を直接編成に供給する方式とした。直流架線電圧1.5kVから変換器を介して8両程度の編成電車への供給と1.2~1.8kV程度の公称電圧を有する蓄電池充電が可能な回路構成とした。

直流架線充電型の蓄電池電源車と直流編成電車の主回

路構成の例を図6に示す。電源車の連結器および、編成電車の編成前後の連結器内にDCバス引通し線のコネクタ機能を有することを前提としている。

連結器内コネクタからの結線は、接続接触器(Connecting Contactor)箱に引込まれた後、プラス線側を接続解放できる接触器LBpl(Line Breaker of positive line)と、プラス線とマイナス線の間を放電抵抗経由で短絡できるLBdcg(Line Breaker of discharge)とに接続される。

電源車においてはさらに、プラス線をDC/DC変換回路を介してその先の架線電圧に接続できる接触器LBch(Line Breaker of chopper)、およびプラス線を電源車の蓄電池ならびに電源車の自車駆動回路と補機回路に接続できる接触器LBbt(Line Breaker of battery)とを有す

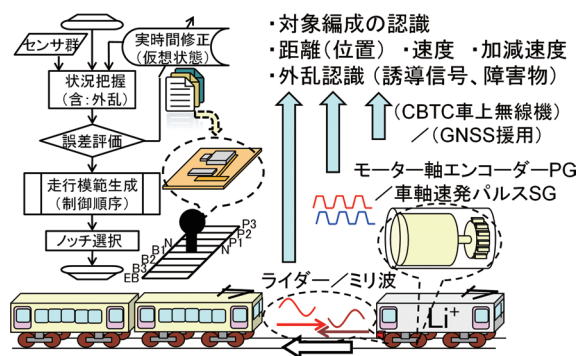
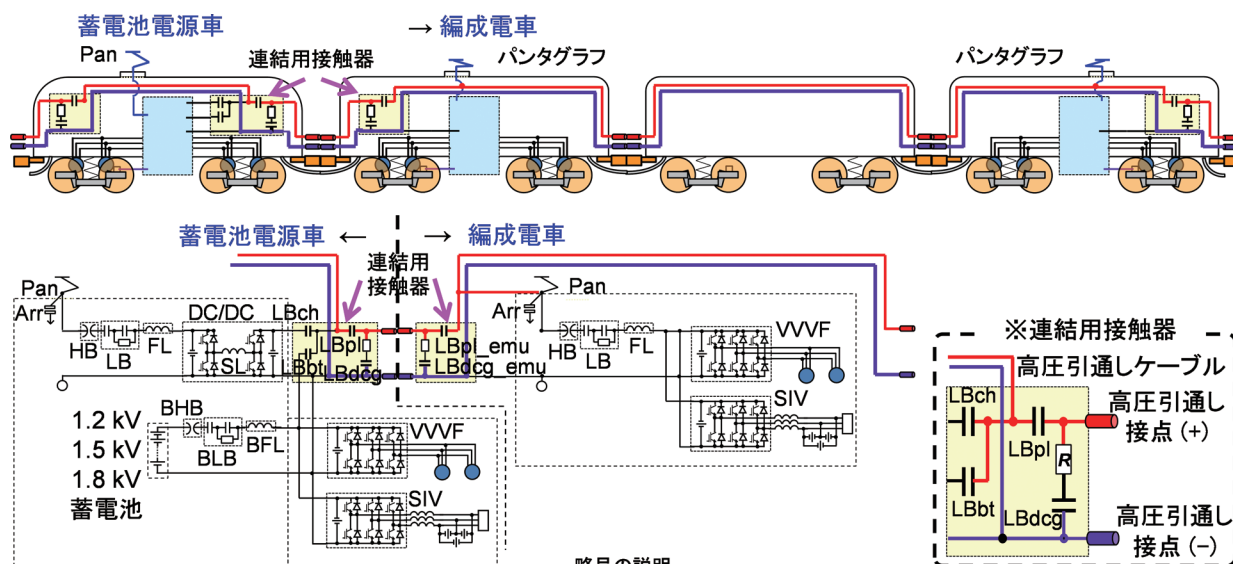


図5 無人自律走行パターン生成のイメージ



略号の説明  
 Pan: Pantograph(パンタグラフ) HB: High speed circuit Breaker(高速度遮断器) LB: Line Breaker(断流器または接触器)  
 FL: Filter reactor(フィルタリアクトル) SL: Smoothing reactor(持流リアクトルまたは平滑リアクトル)  
 ※L: リアクトル(インダクタ)の略号Lは“レンツ(Lenz)”に由来  
 DC/DC: Direct current ⇄ Direct current(直流/直流変換器) Arr: Arrester(避雷器)  
 VWVF: Variable Voltage Variable Frequency(可変電圧可変周波数インバータ) SIV: Static Inverter(静止型補助電源装置)  
 BHB: Battery HB(蓄電池高速度遮断器) BLB: Battery LB(蓄電池遮断器) BFL: Battery FL(蓄電池リアクトル)  
 LBch: LB of chopper(チョップ出力接触器) LBbt: LB of battery(蓄電池出力接触器) R: Rheostat(抵抗器)  
 LBpl: LB of pull through(引通し出力接触器) LBdcg: LB of discharge(放電用接触器)

図6 電源車と編成電車との直流主回路引通し構成

る構成とした。

DC/DC 変換器は、図 6 に例示する降圧チョッパと昇圧チョッパの BTB (Back to Back) 接続の非絶縁型ならば、蓄電池電圧が架線電圧より低い場合にも高い場合にも対応可能である。高周波変圧器を用いた絶縁昇降圧 DC/DC 変換器としても良い。また、蓄電池公称電圧の設定次第では降圧チョッパのみ、昇圧チョッパのみとして簡易化する選択も可能である。

## 4.2 連結解放時の主回路の構成および給電の手順

### 4.2.1 結節駅での編成電車への電源車連結と給電開始

電化線から非電化線への結節駅において、編成電車が到着し、電源車が停止している状態から連結を行う際の回路構成と給電の手順を図 7 に示す。

電源車主回路と編成電車主回路の接続の前に、連結面に電荷が供給されないように LBpl および LBpl\_emu を開放する。次に残存電荷を除去するため LBdcb および LBdcb\_emu を投入し、電気抵抗を直列接続して閉回路を構成して放電する。連結して電源車連結面と編成電車連結面の回路同士が接続された後は LBdcb および LBdcb\_emu を開放し、引通し線のプラス側とマイナス側の短絡を避ける。この手順で人手による連結時の感電を防止する。

この間、編成電車は架線から電力供給を受けており、車内の照明や空調などのサービス電源は落ちない。

次に、電源車は、連結回路を通して繋がった編成電車の引通し線の電圧が、電源車側回路に入り込まないように、DC/DC 変換器の出力後段の LBch を開放しておく。その上でパンタグラフを上昇し、架線からの電力を受けて DC/DC 変換器のゲート制御により、出力電圧を編成電車の電圧と等しくする。単純な降圧チョッパでは通流率 100%、単純な昇圧チョッパでは通流率 0% で良い。この段階で LBch と LBpl を投入することで、架線電圧が印加された電源車側出力端と、編成電車側の引通し線が同電圧の状態に接続される。そのため電位差に起因する横流を回避できる。

電源車、編成電車ともに架線から

の電力供給状態となった段階で、今度は編成電車のパンタグラフを降下する。これにより、編成電車へは架線からの電力が電源車を介して供給される。

ここで、電源車の DC/DC 変換器は出力電圧を移行させ、車載蓄電池電圧と等しくする“均圧制御<sup>7)</sup>”を行う。

“均圧制御”の原理を図 8 に示す。負荷に印加する電圧を第 1 電源から第 2 電源に切替える際に、予め DC/DC 変換器の通流率制御を行って第 2 電源の電圧と等しい電圧が負荷に印加されるよう調整した上で、第 2 電源を投入し、第 1 電源を外す方法である。負荷にいきなり異なる電圧が不連続に印加されることがなく、目標電圧に 1~数秒程度の時素を経てゆっくり変化して印加されるため、尖頭電流の流入を避けられる。特に、電源同士の短絡を防ぐことが主眼である。

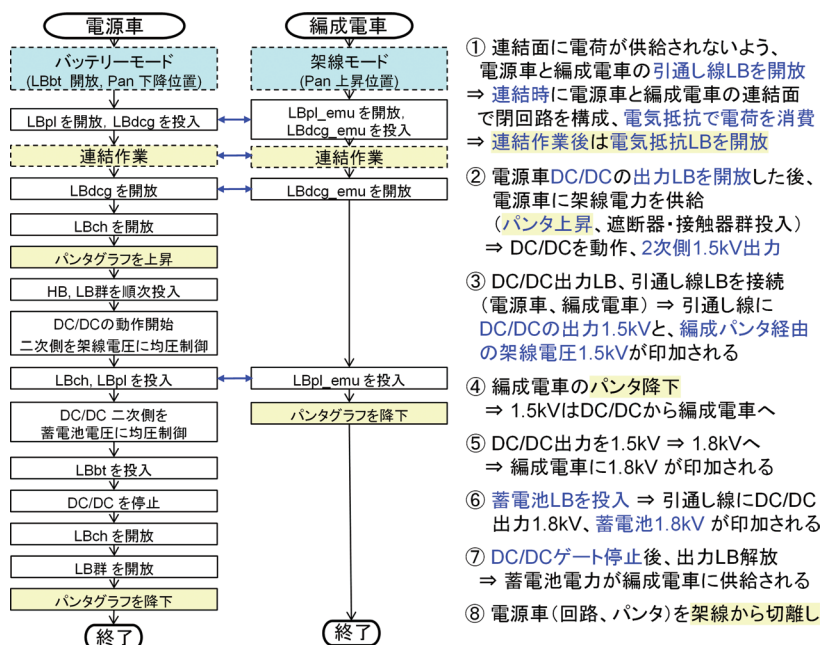


図 7 電源車連結時の給電切替えフロー

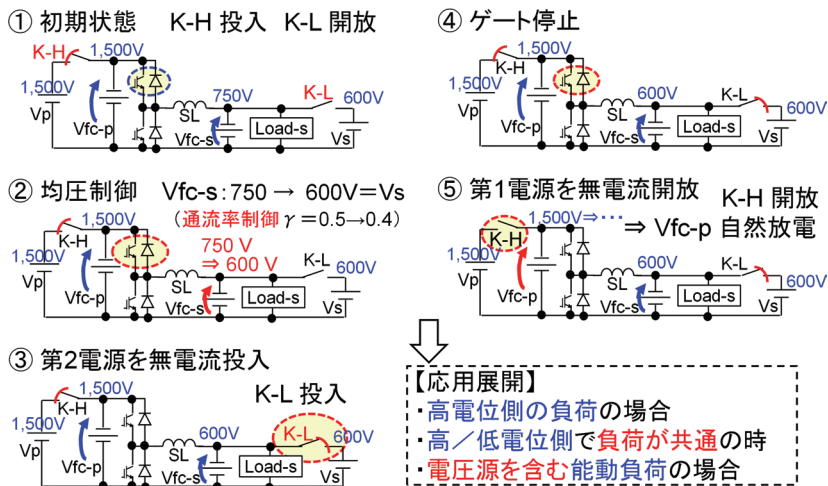


図 8 均圧制御による電源切替えの原理 (低電位側受動負荷の場合)

均圧制御により、編成電車の引通し線全体の電圧が、電源車搭載の蓄電池と等しい電圧に制御された状態になる。ここへ来て初めて、電源車の蓄電池と編成電車の引通し線を接続して良い条件が整い、電源車の蓄電池出力端のLBbtを投入できる。

その後は、編成へは電源車蓄電池からの電力が直接供給された状態となるため、電源車が架線から受けている電力を停止すべく、降圧チョップや昇圧チョップの場合であればDC/DC変換器をゲート停止すれば良い。各レグのスイッチング素子と逆並列されたダイオードにより、降圧チョップの場合は架線からの流入を防ぐことにより、また昇圧チョップの場合は電流が流入できる向きではあるものの蓄電池電圧の方が高いため、架線からの流入が防止される。

電源車の架線側接触器であるLB群を無電流状態で開放した後、HB（Hi-speed circuit Breaker：高速度遮断器）を開放しないままで、パンタグラフを降下できる。

この一連の手順により、電化線から非電化線への結節駅で電源車から編成電車への電力供給が可能となる。

#### 4.2.2 結節駅での編成電車への給電停止と電源車解放

非電化線から電化線への結節駅において、電源車連結の編成電車が到着後、電源車を解放する際の回路分離と給電の手順を図9に示す。

電源車のパンタグラフを上昇し、架線側接触器LB群を投入し、DC/DC変換器のゲート制御により、DC/DC変換器の出力電圧を蓄電池電圧の値に制御する。編成電車の引通し線には蓄電池電圧が印加されているので、この状態でLBchを投入する。

続いてLBbtを開放することで、蓄電池からの電力供給は停止し、架線からDC/DC変換器を介した蓄電池電圧相当の電力が編成電車に供給された状態になる。

ここで、DC/DC変換器の出力電圧が架線電圧と等しくなるように均圧制御を行う。編成電車の引通し線に架線と同じ電圧が印加されたら、編成電車のパンタグラフを上昇し、引通し線の接続開放のプラス側接触器である電源車LBplと編成電車LBpl\_emuを開放する。これにより、編成電車の架線側HBやLB群の状態遷移を伴わずに、架線電力を編成電車に供給できるようになる。

電源車ではDC/DC変換器の停止、架線側HBやLB群の開放、パンタグラフ降下を行う。

最後に、連結時と同様に、連結面回路の電荷放出を行い、その後に連結器を解放して、短絡抵抗器を復帰する。

#### 4.2.3 電源車交換における給電停止 - 解放 - 別車連結 - 給電開始

非電化線内の結節駅において、電源車Aが連結された編成電車が到着し、電源車Aを解放した上で、電源車Bを連結する際の回路分離と給電停止、ならびにそれに続く回路構成と給電開始の手順を図10に示す。

本線上に急速充電用剛体架線が設置されている場合は、それを架線電圧に準ずる電源と捉えることで、4.2.1項および4.2.2項に準ずる形態で大元の電源遮断期間を発生させずに電源切替えを行うことができる。

また、電源車Aと電源車Bが編成電車へ接続する位置が異なる場合は、電源車Aまたは電源車Bを同時に連結する状態が作れることから、相手の電源車の蓄電池電圧を架線電圧の代替え電圧とみなす。あるいは編成電車が蓄電搭載型の場合は編成内蓄電装置を仲介電源とする。これにより、いずれも4.2.1項と4.2.2項の手順に準じて電源切替えを行える。

ここでは最も厳しい前提として、別電源を介した電力供給切替えができない場合を想定する。この場合、電源車交換時には大元の電源が遮断される期間が発生する。その間は直流100V系や24V系の補機用蓄電池からの電力供給により車内の空調や照明等の補機電力を賄う必要がある。編成電車に非常走行用の蓄電池が搭載されている場合は、それらを活用しても良い。

電源車Aの解放に先立ち、編成電車側の接触器LB群の開放を行う。この段階で、編成電車への電源車からの電力は一旦遮断される。補機回路への供給電流も含めて編成電車LB群を無電流遮断とするには、補機用蓄電池回路の構成変更を伴う場合がある。

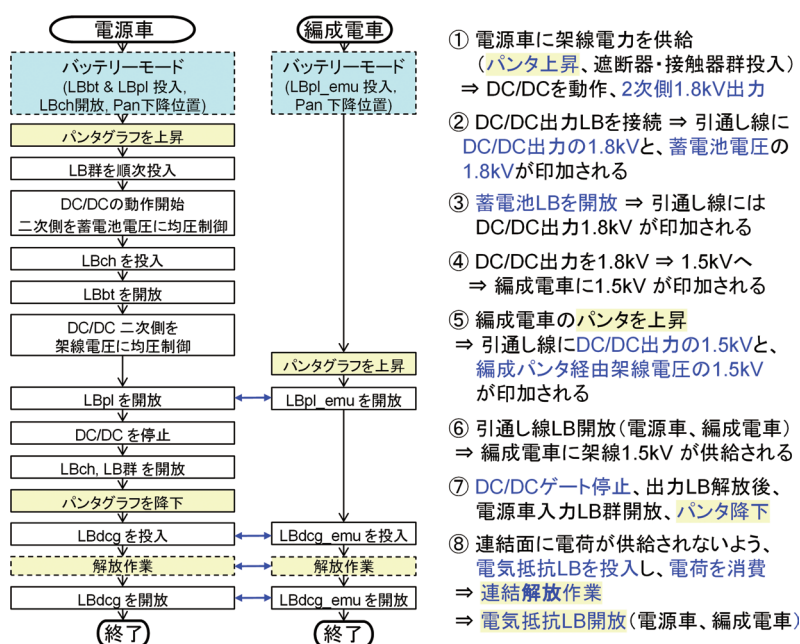


図9 電源車解放時の給電切替えフロー

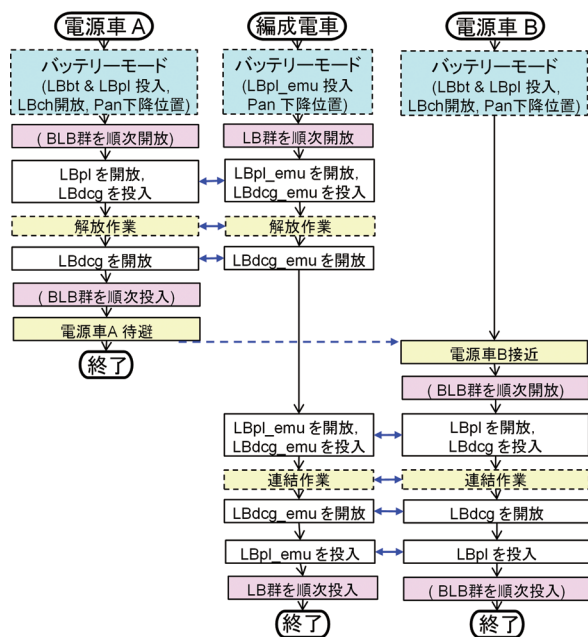


図 10 電源車交換時の給電切替えフロー

安全面から連結面回路の電気抵抗により電荷放電を施した上で、電源車 A が解放されて待避する。電源車 B が接近して連結する際も、安全面から電荷放電の後、LBpl および LBpl\_emu を投入して引通し線に蓄電池電源電圧を印加し、編成電車の接触器 LB 群を投入するのが、最も簡便な方法となる。編成電車 LB 群の開放と投入の代わりに、電源車 BLB 群の開放と投入を行っても良い（図 10 の薄桃色着色部）。

## 5. まとめ

蓄電池電源車の構想の具現化に向けて、蓄電池自体の技術では無く、それを適用する鉄道分野固有領域における技術課題として以下 3 つの存在を示した。

- ① 連結解放時の給電回路構成と給電および停止の手順
- ② 連結器周辺技術－感電防止策を含む
- ③ 電源車の自律自走による無人での連結、解放

これらの運用段階においては、電源車運転の計画策定や管理、走行ルート上における安全確保施策や異常時対応などの施策が必要となる。

本稿では、①と②の蓄電池電源車を編成電車に連結解放する際の電力供給の回路構成と供給手順を提案した。

基本は人手を介さない自動構成としつつ、人手による連結解放にも対応できるよう感電防止など安全を確保した電源の供給、停止の手順が必要である。具体的には以下 3 つの場合の給電切替え手順を提示した。

- (1) 編成電車が電化線から非電化線へ入る結節駅における、電源車の連結と主回路確立の手順
- (2) 非電化線を電源車連結で走行して来た編成電車が、

電化区間に入る結節駅において、給電を停止して電源車を解放し、通常の電車として走行可能とする手順

- (3) 非電化線の結節駅において、電源車を交換する手順  
さらには、蓄電池を搭載しない編成電車が電源車を連結して走行する以外に、電源車を途中駅に留置し、蓄電池電車が到着した際の急速充電用の移動型電源（モバイルチャージャー）とする運用展開も考えられる（図 3）。

電源車の電源としては蓄電池以外に、内燃機関や燃料電池により発生する電力も想定でき、電源選択の自由度を保持した上での開発検討が可能となる利点がある。

蓄電池電源車は、編成電車に連結する蓄電池テンダー車のイメージである。蒸気機関車のテンダー車が機関車後位に連結されて水と石炭を供給したのに対し、蓄電池電源車は電気エネルギーを編成電車に供給する。

最近、米国でも貨物列車の電気式ディーゼル機関車後位への蓄電池テンダー車連結による“電化”が構想されている<sup>8)</sup>。

本稿で示した技術課題の解決手法を順次提示し、また、移動充電所として用いる場合の蓄電容量の検討設計を行うことで、構想の具現化に繋がると考える。

## 文献

- 1) 滝口裕之：蓄電池駆動車 EV-E301 系（ACCUM）の概要，JR EAST Technical Review, No.51, pp.45-50, 2015
- 2) 畑中宏文，畠田憲司，田口義晃，金子貴志，大室敦士：DENCHA の開発と走行試験結果，第 23 回鉄道技術連合シンポジウム（J-Rail2016），S3-4-6, pp.579-582, 2016
- 3) 小笠正道：蓄電池電源車の解結による非電化線の電車走行と対電化コスト FS，平成 27 年電気学会産業応用部門大会，5-49, pp.V-307-312, 2015
- 4) Masamichi Ogasa, “Case study of four battery-powered methods to run electric trains on non-electrified lines”, Proceeding of International Power Electronics Conference 2022 (IPEC-Himeji), 17C3-1, pp.1095-1100, 2022.
- 5) 小笠正道：蓄電池電源車解結における連結時の回路構成と給電手順の構想，令和 4 年電気学会産業応用部門大会，5-37, pp.V-245-250, 2022
- 6) Railway Gazette International, “Cargo Flex enters the digital era.”, ISSN 0373-5346, Vol.177, No.09, pp.28-29, 2021.
- 7) 小笠正道，田口義晃，上園恵一，松本哲也：蓄電池電車の電源切替シーケンスと電圧均等化制御—直流複電圧版，電気学会半導体電力変換研究会，SPC-18-171, pp.1-6, 2018
- 8) Kiran Julin “Battery-tender cars,” Berkeley Laboratory, <https://newscenter.lbl.gov/2021/11/23/big-batteries-on-wheels-can-deliver-zero-emissions-rail-while-securing-the-grid/>（参照日：2023 年 1 月 12 日）