

鉄道用地上蓄電装置のエネルギー媒体

小西 武史*

Energy Storage Unit of Fixed Energy Storage System for Electrified Railway

Takeshi KONISHI

The various types of fixed energy storage systems have been introduced into electrified railway systems in recent years. The importance of fixed energy storage systems for energy saving or uninterruptible power supply will continue to increase. In this paper, the recent trend of introduced fixed energy storage systems is reported by the type of energy storage unit.

キーワード：蓄電装置，エネルギー媒体

1. はじめに

直流電気鉄道用の地上蓄電装置（以下、単に蓄電装置と呼ぶ）に関して、近年国内外の導入事例が数多く報告されている^{1)~4)}。省エネ対策や非常用電源確保を目的とする蓄電装置の導入は、今後も続くと予想される。これまでに、図1に示す二次電池、フライホイール、キャパシタが蓄電装置のエネルギー媒体として実用化されている。ここではこうしたエネルギー媒体の適用状況を解説する。

2. 二次電池

2.1 鉛蓄電池

鉛蓄電池は、最初に発明された化学エネルギーを利用する二次電池である。正極に二酸化鉛、負極に鉛、電解液として希硫酸を用いた電池であり、幅広い用途で使用されるようになった。戦前の蓄電装置は全て鉛蓄電池がエネルギー媒体である。明治末期から昭和初期にかけて変電所のピークカットを主目的とした導入事例がある⁵⁾。戦後の昭和末期においては電圧降下補償を目的とした実証試験が行われたが⁶⁾、現在鉛蓄電池を実運用している蓄電装置は無い。

2.1.1 ピークカット用

信越本線（横川・軽井沢間）（現在は廃止区間）は、1912年に直流600Vのアプト式によって電気機関車運転が開始された。その際の電力供給設備として横川に火力発電所が建設され、丸山変電所（安中市）・矢ヶ崎変電所（軽井沢町）に送電されていた。両変電所には小容量（900kW）な回転変流器が設備されていたが、負荷平準化対策として1300Ah超の鉛蓄電池が並置された。発電所が故障して停電になった場合、短時間ではあるが電

* 電力技術研究部 き電研究室

池電源のみで電気車運転が行われたこともある。しかし、大正から昭和にかけて発電容量、変電所機器容量が増強され、昭和初期にこれらの蓄電装置は廃止された。なお、丸山変電所の建物は現在では図2に示すように修復が施されて保存されている。図2の手前側が蓄電池室、奥側が回転変流器を含む主器室であり、蓄電池室の方が広い。

山手線にも大正期に大容量の鉛蓄電池が複数の変電所に併設され、朝夕のラッシュ時には鉛蓄電池からの電力供給を併せて行っていた。しかし、大正から昭和にかけて発電容量、変電所機器容量が増強されたことに加え、1927年には鉛蓄電池が接地事故によって焼失したこともあり、昭和初期にこれらの蓄電装置は全廃となった。

私鉄では京阪電鉄の新京阪線（現在の阪急電鉄京都本線）の正雀変電所、及び京阪線の守口、伏見両変電所に鉛蓄電池を用いた蓄電装置が設備された。2時間放電率で3000A前後であり、夜間5時間程度の充電で、昼間のラッシュ時の数時間程度は蓄電装置の電源のみで電車運転が可能であった。当時の電気代は高価であったため、蓄電装置の導入によってピーク負荷を低減させ、購入電力の契約容量を下げることで経費節減が図られた。しかしながら、蓄電装置の保守面の問題等により、10年足らずで廃止に至った。

2.1.2 電圧補償用

戦後、直流電気鉄道では電車の編成出力増大によって変電所の中間点や電化区間の末端部において電圧降下が増大し、所要の電車線電圧を確保するための対策に迫られるようになった。そこで、電車線電圧の低下が問題となる地点に蓄電装置を設置し、電圧の補償が必要な短時間だけ蓄電装置から電力を供給する方法が検討された。

1980年に国鉄可部線の中島駅構内に鉛蓄電池の蓄電装置が仮設され、電圧降下対策としての実証試験が行われた。戦前は鉛蓄電池を電車線側に直結する方式であったが、この蓄電装置には充放電切替装置としてサイリス

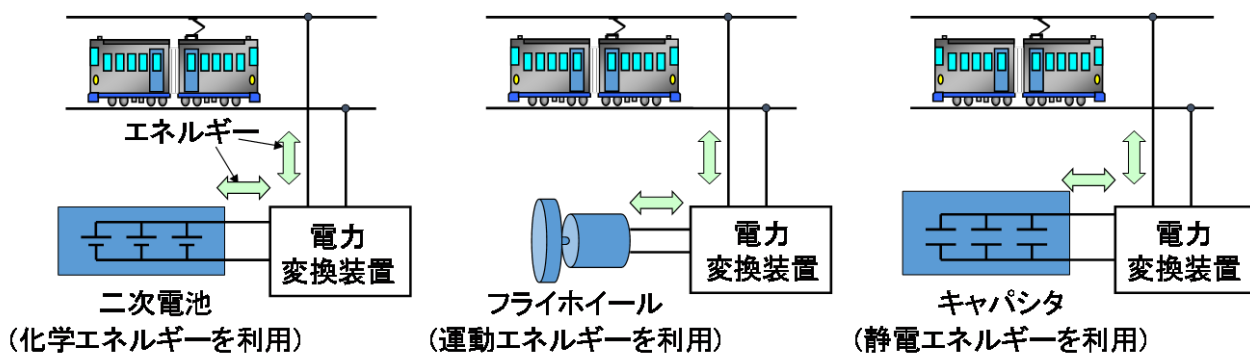


図1 実用化されている蓄電装置のエネルギー媒体の種類



図2 丸山変電所・蓄電装置の復元した建物の外観

タが用いられた。試験は約3年かけて行われ、本蓄電装置が電圧降下対策として有効であることは確認されたものの、運用面などでの課題が残り本運用には至らなかった。

2.2 リチウムイオン電池

リチウムイオン電池は、正極にリチウム酸化物、負極に炭素材料、電解液に有機溶媒が用いられる二次電池である。酸化・還元反応による電子の流れによって充電・放電を行う方式である。リチウムイオン電池に関しては、ハイブリッド自動車や電気自動車に導入されている高出力電池、再生可能エネルギーの発電エネルギー平準化に導入されている大容量電池、パソコンや携帯電話で導入されている小型電池など、数多くの応用事例がある。

一般的にリチウムイオン電池は、エネルギー密度とパワー密度とが相反する関係にあり、使用する電池の用途によって電極材料等が異なっている。電気鉄道用のリチウムイオン電池は、エネルギー密度とパワー密度の双方が要求されるため、両者のバランスがとれるような材料が選定されている。

文献7)の例では、パワー密度向上のため、材料面ではマンガン系正極のリチウムの量と金属比率を最適化し、結晶性制御によって活物質表面の反応抵抗を低下させている。一方、文献8)の例では、従来のものと電極材料等が異なる安全性の高いリチウムイオン電池が開発されている。従来のリチウムイオン電池は、負極材料としてカーボン系の黒鉛等の材料が用いられているが、本

例では独自の酸化物系負極材料が使用されている。この負極の主要材料であるチタン酸リチウム(LTO)は、従来のリチウムイオン電池に使用されているカーボン系材料と異なり、それ自体が燃えることのない熱的に安定な物質である。

リチウムイオン電池を用いた蓄電装置は、2006年にJR西日本で導入されて以降、日本では数多く導入されている。その大きな理由は、エネルギー密度が他のエネルギー媒体と比較して大きく、省エネ対策や非常用電源対策に適している点である。従来の弱点であったパワー密度、寿命に関しても、充電率(State of Charge: SOC)⁷⁾を適切に管理、制御することによって十分克服されている。近年は定格が200kWhを上回るリチウムイオン電池も導入されている。

2.3 ニッケル水素電池

ニッケル水素電池は、正極材料として水酸化ニッケル、負極材料として水素吸蔵合金、電解液として水酸化カリウムを使用する二次電池である。リチウムイオン電池と同様、コンパクトカメラの充電電池やハイブリッド自動車の電池など幅広い分野で導入されてきた。

従来の円筒型ニッケル水素電池はセパレータを挟んで正極・負極各1枚の電極板を巻いた構造となっているため、高速充放電時の放熱が難しい。さらに、各電池間をケーブルで接続する機会が多く、それに起因して内部抵抗をある程度以上小さくすることが困難で、電池の大容量化、使用用途拡大に限界があった。そこで、電池モジュールを直方体構造とし、隔壁によって直列接続する構成とし、セルの表・裏面をそれぞれ正・負極としたバイポーラー構造が開発された。これにより、厚みが薄く、断面積の大きな隔壁によりセル間の接続によるエネルギーロスを最小限にした。また、高速充放電時の放熱を解決するため、セル間に放熱板を設け、容量に比例した冷却伝熱面積を確保するとともに、強制空冷ファンを装着した。これにより、連続大出力充放電が可能となり、大出力放電・充電後も温度の上昇が少ない安全な電池が実現した。

ニッケル水素電池を用いた蓄電装置も、2010年の大阪市交通局（現大阪メトロ）での導入以降、省エネ対策や非常用電源確保用としての採用事例が増えている。

3. フライホイール

フライホイールは“はずみ車”とも呼ばれ、回転体の運動エネルギーを蓄えるものである。電車線から吸収した電力により電動機を駆動してフライホイールの回転速度を上昇させエネルギーを蓄える。また、電車線の電圧が低下した場合には、電動機を発電機として使用し、蓄えたエネルギーを放出して電車線に電力を供給する。

1981年に縦型フライホイールが京浜急行電鉄・瀬戸変電所に設置され、実用化のための各種試験が実施された⁹⁾。回転数 800～1200rpm の範囲において最大 1300A で充放電する試験が行われ、信頼性と安全性が検証された。その結果を受けて、1988年に京急逗子線に実用機が設置された。この実用機は回転数 2100～3000rpm、最大出力 3000kW に設定された。試験機の使用経験を踏まえ、実用機では発電電動機が直流機から誘導機に、フライホイールは縦型から横型へと変更された。本フライホイールは、末端における架線の電圧降下を補償する目的で設置され、現在に至るまで運用されている。なお、フライホイールは、海外においてもニューヨークやロンドンの地下鉄などで実用化されてきた。

しかし、日本においては初期コスト、保守性、設置面積などの制約により、その後の本格的な普及には至っていない。そこで、それらの短所を改善するため、軸受部分に超電導技術を応用した磁気軸受を使用することで、回転損失の大幅な低減、省メンテナンスを実現するフライホイールの研究開発が近年進められている¹⁰⁾。

4. キャパシタ

4.1 電気二重層キャパシタ

ある種の電解液の中に電極を浸すと、電極に接する電解液に薄い絶縁層が形成される。電解液が電極付近（内層）と中間部（外層）で二重の層となるため、これを電気二重層と呼ぶ。電解液が電気分解するまでの一定電圧以下ではこの層が保たれる。電極には比表面積の大きな活性炭などが用いられる。電気二重層の内層の厚さは非常に薄く電極の表面積が大きいため、大容量の電荷（静電エネルギー）を貯蔵することが可能になる。二次電池と異なり化学反応を伴わず、活性炭表面のイオンの物理的吸着のみでエネルギーの蓄積を行うことができる。この原理を利用したキャパシタを“電気二重層キャパシタ”と呼ぶことが多い。他に、“電気二重層コンデンサ”、“スーパーキャパシタ”、“ウルトラキャパシタ”などの呼称も

ある。

電気二重層キャパシタは、大電流で急速充放電が可能、百万回サイクル以上の寿命、完全放電が可能、重金属を含まないなどの利点を有する。また、寿命はSOCに依存しないため、端子電圧が0Vから最大電圧の範囲まで自由に充放電できる。ただし、体積あたり、質量あたりのエネルギー密度が二次電池と比較して劣ることが課題であり、非常用電源対策としての適用は難しい。

日本では2007年に西武鉄道・西武秩父線において、連続下り勾配走行時の回生失効対策を目的として導入されたのが始まりである。日本での導入事例は多くないが、海外では2桁程度の導入事例がある。

4.2 ハイブリッドキャパシタ

電気二重層キャパシタの弱点であるエネルギー密度の低さを改善するため、電解液や電極材料の研究開発が行われてきた。代表的なのが、“ハイブリッドキャパシタ”と呼ばれるものであり、電極にリチウムイオンを添加したものが多くことから“リチウムイオンキャパシタ”とも呼ばれる。ハイブリッドキャパシタの正極側電極は電気二重層キャパシタで用いられる活性炭を使用し、負極側電極はリチウムイオン電池で使用される炭素系材料にリチウムイオンを少量材料中に入れたものが用いられる。負極のリチウムイオンが静電容量を増加させるため、電気二重層キャパシタの特長である高パワー密度の特性を備えつつ、エネルギー密度を向上させることができる。また、リチウムイオン電池と異なり正極に酸化物を使用していないため、化学反応による熱暴走を起しにくく安全性が高い。ただし、通常の電気二重層キャパシタと異なり、最低電圧を0Vにすることはできない。

ハイブリッドキャパシタの電気鉄道への導入は無いが、離島の非常用予備電源の実証試験などで適用事例がある。

5. エネルギー媒体の接続方式

エネルギー媒体の電車線側との接続方式は、基本的にはチョップ接続、直結接続の2種類に大別される。チョップは図1に示した電力変換装置に相当する。

チョップ接続は、フライホイール、リチウムイオン電池、電気二重層キャパシタで採用されている。一方、直結接続は鉛蓄電池、ニッケル水素電池で採用されている。前者の接続に関しては、充放電時にチョップから発生する高調波電流が鉄道設備に支障がないことを確認することが必須である。一方、後者に関しては、充放電が電車線電圧の変動に応じた受動性となるため、不要充電が生じないようにエネルギー媒体の定格端子電圧を適切に調整する必要がある。

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

6. エネルギー媒体の充放電制御

蓄電装置は、基本的に電車線電圧をもとに充放電動作を行う。電車線電圧が高めならば充電、低めならば放電するのが基本である。

エネルギー媒体を電車線に対してチョップ接続した蓄電装置は、充放電制御の選択によって、より効率的に運用することが可能である。一例を図3(a), (b)に示す。エネルギー媒体のSOCが0%あるいは100%付近に偏ると、必要な充放電ができなくなる。そこで、SOCの偏りを回避するために、(a)待機中に調整充放電する、(b)充放電する電車線電圧の閾値をSOCや時間帯に応じて変動させるなどにより、適度なSOCに制御する方式が採用されている。

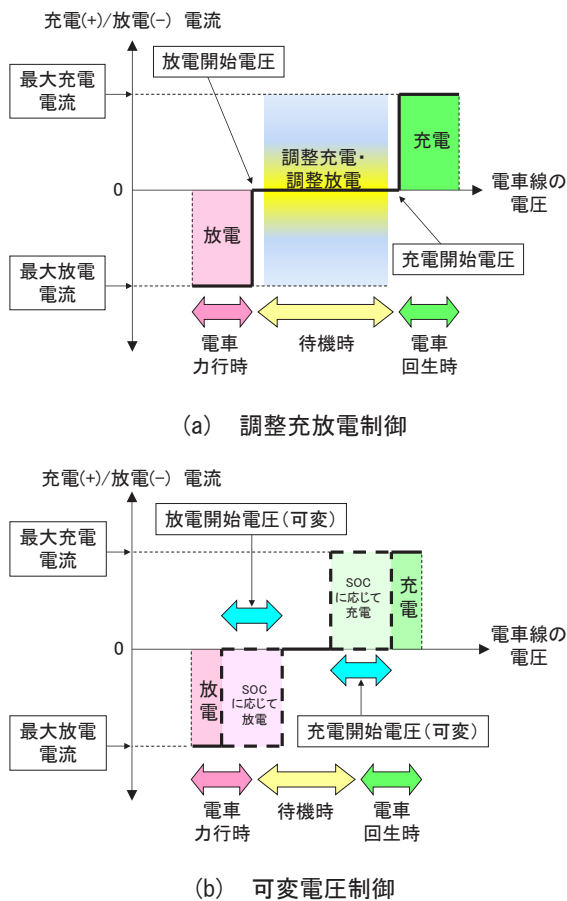


図3 エネルギー媒体のSOCを考慮した充放電制御

7. おわりに

表1は2008年末と2018年末における蓄電装置の導入状況である³⁾。現在の蓄電装置は2008年末と比較して5倍以上の台数となった。2011年の東日本大震災を引き金に、各鉄道事業者の省エネ施策と変電所停電時の緊急走行対策としての導入が促進されてきた。今後も導入を予定している鉄道事業者が複数ある。

リチウムイオン電池、ニッケル水素電池、電気二重層キャパシタは平成期以降に導入されたエネルギー媒体であるが、最初の導入事例から既に10年以上が経過した。蓄電装置の新設だけでなく、更新をどのように進めるのかを判断する上で、運用状況やエネルギー媒体の特性変化等のデータを活用していくことが重要になる。

今後は、電気自動車用に開発が進められている全固体電池のような、新たなエネルギー媒体の導入も期待される。一方で、近年は電池を搭載した鉄道車両の導入も急速に進んでいる。遠い将来には蓄電池を搭載した車両が多数走行するようになり、逆に地上用の蓄電装置を撤去する状況となる可能性もある。エネルギー媒体の市場やエネルギー事情などの社会情勢によって、地上用の蓄電装置の今後の展開が大きく変わることも考えられる。

表1 日本における蓄電装置の台数の変遷

蓄電媒体種類	2008年台数	2018年台数
リチウムイオン電池	4	20
ニッケル水素電池	0	13
フライホイール	1	1
電気二重層キャパシタ	2	3

文献

- 1) 長谷伸一：電力エネルギー貯蔵技術の動向，鉄道と電気技術，Vol.19, No.8, pp.3-13, 2008
- 2) 小西武史：鉄道技術 来し方行く末 地上電力貯蔵装置，RRR, Vol.75, No.3, pp.28-31, 2018
- 3) 小西武史：技術解説 電力貯蔵装置の変遷，鉄道と電気技術，Vol.30, No.1, pp.9-15, 2019
- 4) 鉄道電力供給における蓄電装置応用技術：電気学会技術報告，No. 1359, pp.3-17, 2015
- 5) 鎌原今朝雄：バッテリー変電所，鉄道電気，Vol.56, No.3, pp.30-33, 1980
- 6) 三浦梓，谷口一：バッテリーポスト，電気鉄道，Vol.36, No.10, pp.11-15, 1982
- 7) 高橋弘隆，上村正，小高英明，宮崎崇，松村寧：地上蓄電システムに適した蓄電デバイス技術，平成26年電気学会全国大会，5-S27-3, 2014
- 8) 小杉伸一郎，稲垣浩貴，高貝則雄：安全性に優れた新型二次電池 SCiB™，東芝レビュー，Vol. 63, No. 2, pp.54-57, 2008
- 9) 電気鉄道発達史，社団法人鉄道電化協会，pp.220-223, 1983
- 10) 宮崎佳樹，水野克俊，山下知久，中尾健吾，向山晋一，松岡太郎：鉄道用フライホイール向け大荷重対応超電導磁気軸受の開発，鉄道総研報告，Vol.32, No.3, pp.35-40, 2018