

第70回

地上電力貯蔵装置

はじめに

電池をはじめとして電力を貯める装置は、携帯電話や電気自動車など多用途に数多く使用されています。電気鉄道においても電車を電気駆動するために、車両に搭載するタイプと地上に据え付けするタイプの電力貯蔵装置の普及が進んでいます。ここでは地上電力貯蔵装置の変遷について紹介します。

れいめい期の電気鉄道でのバッテリー適用

日本では1895年に京都市が初の電車を運行し、電化が拡大していきました。20世紀初頭では電気鉄道を建設するには、電力を調達するために水力または火力の発電所もあわせて建設し

なければなりません。しかし、電気運転区間が延びると、各地に発電所を設けていくことはコスト面などで無理が多く、今日のように沿線に複数の変電所を建設して電力供給する方式に変わっていきました。そこで大きな問題に直面したのが電気鉄道の負荷特性です。電車の力行(加速)・だ行や複数電車の混在によって負荷変動はきわめて大きなものとなり、変電所の最大パワーも大きなものとなります。しかし、当時の電源は十分な容量を望むことは不可能であり、最大パワーに対応するための設備を設置するのはコスト面でも大きな課題でした。そこで、バッテリー(鉛蓄電池)を変電所に補助的に設け、一時的に必要となる大電流をバッテリーにより負担させる方法が導入されました。急勾配区間として知

られる信越本線の横川・軽井沢間(現在は廃止区間)では、1912年に電化されましたが、その際に設置された丸山、矢ヶ崎の各変電所にはバッテリー室が設けられていました。図1は矢ヶ崎変電所の写真ですが、手前の建物に蓄電池室(130坪)と機器室(107坪)が配置され、容量は1時間定格1322Aとされていました。図1の左側の建物には通常の変電設備が設置されましたが、バッテリー室の方が長く、大きな設備であったことがうかがえます。列車が上り勾配を運転する時は、バッテリーを放電し、下り勾配の時は回転変流器(現在の整流器に相当)を介してバッテリーを充電しました。

都心部でも電源増強の目的でバッテリーが設備されていた時期がありました。明治時代の電車は市電のように1両編成で走行していましたが、大正時代に入ると電源増強により3両編成の電車が登場するようになりました。図2は1914年に京浜線(現京浜東北線)の大井町変電所に設備されたバッテリーです。(a)の左側が変電機器室、右側がバッテリー室で、(b)がバッテリー室内部です。こちらもバッテリーの設置面積が大きく、壮観な風景がうかがえます。この装置も変電所ピーク電力対策、あるいは電源停電時の予備電源として電気運転に貢献していました。しかし、1927年に変電機器室内で発生した接地事故により、バッテ

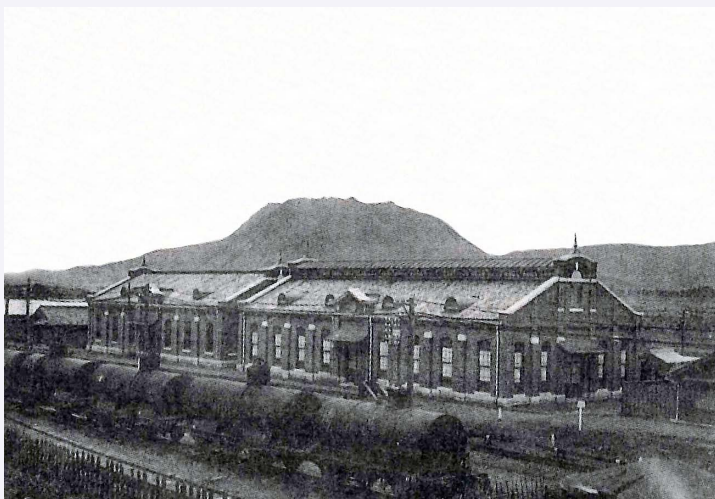


図1 矢ヶ崎変電所外観(右側がバッテリー室)
出典：電気鉄道の技術・研究開発の歩み¹⁾

リー室は一瞬にして焼失してしまう痛恨のできごとがありました。昭和に入ると電力会社の電源が増強されたことや前述の事故もあり、国鉄では1928年に電源増強用バッテリーの使用が廃止されました。

以上に示した例はどれもヨーロッパ製のバッテリーでしたが、国産が導入されていた時期もありました。京阪電鉄では新京阪線（現在の阪急京都本線）の正雀変電所、京阪本線の守口、伏見両変電所で国産のバッテリーが1932年に導入されました。その設備は、2時間放電率で3000A前後であり、国鉄の設備、あるいは現在の地上電力貯蔵装置と比較してもはるかに大容量の設備でした。また、それまでのバッテリー標準電圧は600V前後が主流でしたが、正雀変電所は1500Vであり、現在の多くの直流電気鉄道にも対応できるものでした。夜間に5時間程度充電すると、昼間の2~3時間のラッシュ時でもバッテリー電源のみで電車運転が可能なほどでした。当時の電気料金は非常に高かったため、バッテリーの導入によって購入電力の契約容量を切り下げることが可能でした。しかし、バッテリー設備の保守に手数がかかったことと、変電所機器の設備増強によって次第にバッテリーは使用されなくなり、1941年に廃止されました。この時点で日本の鉄

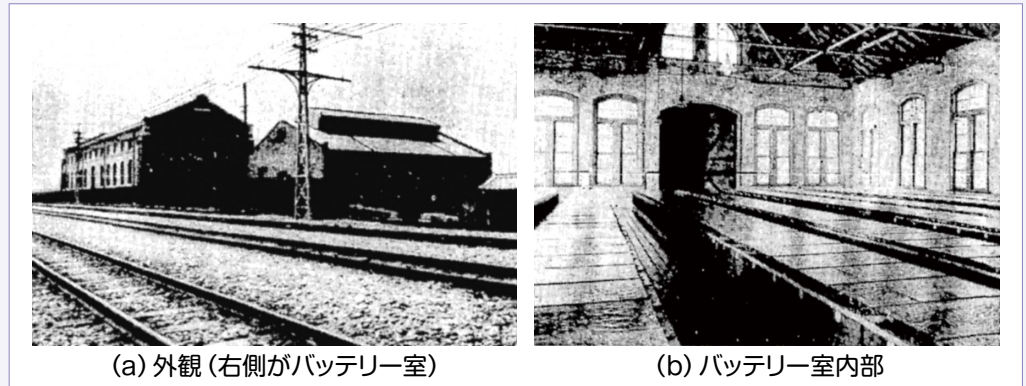


図2 大井変電所バッテリー室
出典：鉄道電気²⁾

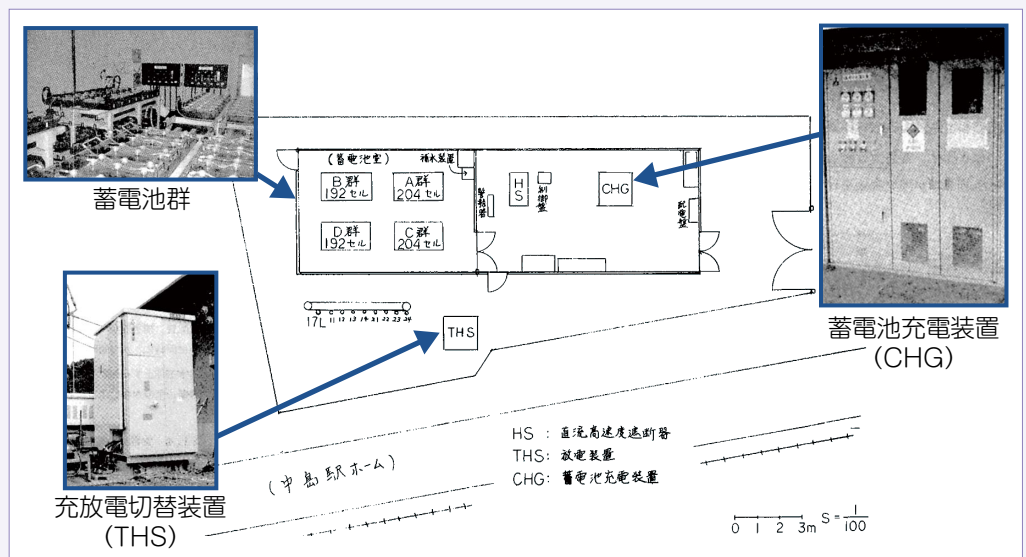


図3 可部線中島駅付近に仮設したバッテリーポスの構成と各要素
出典：鉄道技術研究所速報³⁾

道用地上電力貯蔵装置は一旦完全に廃れました。

なお、同種のバッテリーは海外でも導入事例があります。イギリスのリバプール電気鉄道では、20世紀初頭に248セルで構成された750kWhのバッテリーを設置し、電気鉄道の負荷変動の救済の目的で使用されたと記録されています²⁾。

バッテリー復活に向けた研究開発

戦後、日本は高度経済成長を遂げ、電気鉄道もスピードアップ、長大編成

化が進んでいきます。ところが、変電所の建設による電源増強は必ずしも容易ではなく、次第に既設電化区間の架線電圧降下が大きくなり電車の運行に支障をきたす可能性が懸念されるようになりました。そこで、バッテリーを変電所の中間に設置し、電圧降下を救済する手法について研究開発が進められるようになりました。

1980年代には鉄道技術研究所でバッテリーによる直流電圧補償装置（バッテリーポスト）の開発が行われていました。可部線中島駅付近に仮設されたバッテリーポスの構成と主要な要素を図3に示します。蓄電池群の

A群とB群、C群とD群はそれぞれ直列に接続されていました。充放電切替装置（THS）（図3では「放電装置」）は、蓄電池群のA群+B群とC群+D群を直列接続することで架線側への放電を、開放することで充電を行うことを可能にしていました。蓄電池充電装置（CHG）は現在の地上電力貯蔵装置に多く用いられているチョッパーに相当します。CHGは架線側の電圧を監視し、設定値より高いときにはオン動作してバッテリーに充電し、低くなると放電するように制御しました。THSやCHGにはサイリスターが適用され、充放電時のスイッチング周波数（☞参照）は360Hzが採用されていました。この周波数は整流器によるリップル電圧（☞参照）の主要な周波数成分（60Hz×6相）に合わせて設定されたもので、スイッチングによる特異な高調波電流の発生を防止しています。現在の地上

電力貯蔵装置でも同様な考えに基づいてスイッチング周波数を設定しています。

バッテリーポストがない場合には付近の架線電圧が750V程度まで低下していたのに対し、バッテリーポストを設置して放電させると最低電圧は980Vにとどまり、230V程度電圧が上昇する結果が得られました。

れいめい期のバッテリーとは異なり、変電所中間付近を電車が加速走行する短時間帯に限定して放電を行えばよい。ため、バッテリー容量を前述の1/5～1/10程度で済ませることが出来ます。また、バッテリーの性能自体も良くなり保守の手数もほとんど要しないようになりました。

試験は約3年かけて行われ、バッテリーポスト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、本運用には至りませんでした。

フライホイールによる地上電力貯蔵装置の復活

バッテリーポストの研究開発が行われていた1980年代には、回生ブレーキ付きのチョッパー車が各鉄道事業者で数多く採用されていました。しかし直流変電所ではシリコン整流器が普及し、直流から交流への逆変換はできないため、回生車両が発生する回生エネルギーは付近に力行する車両がないと有効利用されないケースも顕在化するようになりました。そこで、回生エ

ネルギーを地上電力貯蔵装置に吸収・蓄積させ、必要なときに力行車に供給する方式が検討されるようになりました。

京浜急行電鉄では1981年に縦型フライホイールを瀬戸変電所に設置し、実用化のための各種試験を実施しました。その試験機の外観を図4に示します。上部は直流発電電動機、下部がフライホイールです。フライホイールは回転エネルギーとして回生エネルギーを蓄積します。回転数を上昇させることで充電が、下降させることによって放電が可能です。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ました。

その結果を受けて、1988年に京急逗子線の末端に実用機が設置されました。すなわち、戦前から50年近い歳月を経て日本における鉄道用地上電力貯蔵装置の復活が遂げられました。実用機は回転数2100rpm～3000rpm、最大出力3000kWと設定され、仕様が強化されました。試験機の使用経験を踏まえ、実用機では発電電動機として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ました。

実用機は前述の回生エネルギーの有効利用に加え、架線電圧が低下した際にエネルギーを放出して補償する機能、すなわちバッテリーポストと同様に電圧降下補償の効果もあります。設置から30年近く経過した現在も稼働し、長寿命性も裏付けられています。

フライホイールは海外においてロンドン地下鉄やニューヨーク地下鉄などで20世紀末に広く導入されています。しかし、国内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、その後の普及には至りませんでした。

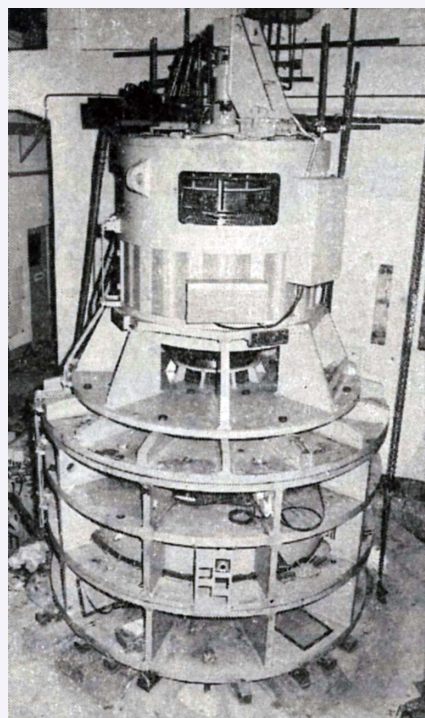


図4 仮設された縦型フライホイール試験機

出典：鉄道電気技術発達史⁴⁾

☞ スイッチング周波数

サイリスターのような半導体素子を1秒間にオン/オフする回数。

☞ リップル電圧

直流電圧に加わる交流電圧。

近年の地上電力貯蔵装置の導入ラッシュ

20世紀の地上電力貯蔵装置のエネルギー媒体は鉛蓄電池とフライホイールの2種にほぼ限定されていましたが、21世紀に入ると様相が大きく変わってきました。リチウムイオン電池やニッケル水素電池といった二次電池、電気二重層キャパシターといった高エネルギー密度、あるいは高パワー密度を有するエネルギー媒体の特性が向上し、大電力用途への展望が開けてきました。

2006年にJR西日本・北陸本線の新ひきだ正田変電所にてリチウムイオン電池を用いた地上電力貯蔵装置が運用を開始し、フライホイール以来の導入例となりました。近年の導入事例として、西武鉄道で稼働を開始した電気二重層キャパシターを用いた地上電力貯蔵装置の外観を図5に示します。ただし、二次電池やキャパシターは依然高価であり、導入に見合った回生エネルギー回収効果を期待しにくいことから、その後5年間に導入された日本の地上電力貯蔵装置は7台にとどまりました。

ところが、2011年に東日本大震災が発生し、発電所の停止や計画停電の実施を通じて日常生活で無限に供給されられると思われていた電力エネルギーが有限なエネルギーであることが改めて認識されました。鉄道分野においては、2012年7月に国土交通省「エコレールラインプロジェクト推進会議」にて、鉄道の消費エネルギーを、2030年までに2010年度比で2割程度削減することが提案されました。それを受けて、地上電力貯蔵装置の導入による回生エネルギー利用、あるいは変電所停電時のバックアップ電源としての地上電力貯蔵装置の重要性が強くなり意識され、導

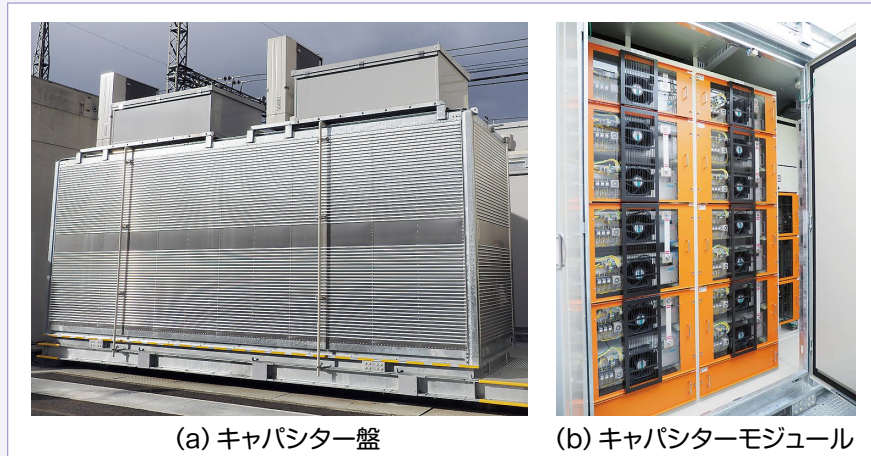


図5 電気二重層キャパシターを用いた地上電力貯蔵装置の一例
提供：西武鉄道(株)

入が一気に加速しました。2011年から約6年が経過した現在、日本における地上電力貯蔵装置の導入数は25台を超えました。間もなく導入される装置も多く、一般的な鉄道電力設備になりつつあります。

海外でも歩調を合わせるかのように、二次電池や電気二重層キャパシターを用いた地上電力貯蔵装置の導入が目立つようになりました。2017年1月には日本主導で作成、審議してきた地上電力貯蔵装置のIEC国際規格が発行されるに至りました。

地上電力貯蔵装置のこれから

地上電力貯蔵装置は近年導入が増えている新しい電力設備に思えますが、ここで紹介したように100年を超える歴史があります。とくに、バックアップ電源としての活用に関しては100年前との概念の隔たりはほとんどなく、まさしく「歴史は巡る」といって差し支えないでしょう。京阪電鉄でかつて導入されていたバッテリーと同等の容量を有する地上電力貯蔵装置を適用して、電気鉄道の負荷平準化や受電設備

の小型化を指向する方式が、将来採用されるかもしれません。

近年研究開発が進められている「超電導磁気軸受フライホイール」も、図4の試験機と同じ縦型を想定したものであり、従来は実現が難しかった方式を実現するためのアプローチが行われています。

さらには、ICTを活用して、車両の力行／回生の状況や在線位置を考慮した適切な充放電制御を行うことでエネルギーの効率性を高める新たな技術開発も今後活発になりそうです。

(小西武史／き電研究室
電力技術研究部)

文献

- 1) 小林輝雄：電気鉄道の技術・研究開発の歩み、鉄道現業社、pp.40-41、1996
- 2) 鎌原今朝雄：バッテリー変電所、鉄道電気、鉄道現業社、Vol.33、No.6、pp.30-33、1980
- 3) 木下喬、戸田弘康、伊東利勝、白石弘：バッテリーによる直流き電電圧補償装置の開発、鉄道技術研究所速報、No.A-84-135、1984
- 4) 鉄道電化協会編：電気鉄道技術発達史、鉄道電化協会、pp.220-223、1983