

回生電力貯蔵装置の導入事例と今後の展望

Example Installation and Future Prospects for Regenerative Energy Storage System

高橋 弘隆

Takahashi Hirotaka

真岡 明洋

Maoka Akihiro

青木 克成

Aoki Katsushige

金 永翊

Kim Young Ik

東日本大震災による原子力発電所の被災などを背景にした電力不足の懸念がある中、公共交通機関の根幹である鉄道は今まで以上の節電を図る必要に迫られている。また、全世界で地球温暖化問題への取り組みが課題である。

日立製作所は、ハイブリッド自動車に使用されているリチウムイオン電池を適用し、電車の回生電力を貯蔵して有効利用できる回生電力貯蔵装置を開発し、2007年に実用化した。導入後の電力削減効果は導入前と比べ10%以上にもなる事例もある。今後、海外市場も含めた鉄道電力削減のため、さらなる展開を加速する。

1. はじめに

鉄道用電力貯蔵装置を直流電気鉄道の地上設備に適用する試みは古く、わが国でも1912年から1928年にかけて、当時不安定だった電源を補償する目的でバッテリーポストが導入されている。一方、高度経済成長期を境とする輸送力の増強は、鉄道の電力需要の増加をもたらすとともに、き電回路の電圧低下や回生失効を招いたことから、対策の一つとして、蓄電媒体と電力変換装置を組み合わせた電力貯蔵装置が開発され、1988年にはフライホイールを媒体とする電力貯蔵装置が実用化された。

自動車業界ではハイブリッド自動車が2008年以降、増加しており、コア部品である蓄電池の技術革新およびコストダウンが進んできている。

日立製作所は、2004年に自動車用リチウムイオン電池を適用した回生電力貯蔵装置（以下、B-CHOPと記す。）を開発した。その後、神戸市営地下鉄西神・山手線でフィールド試験を実施して成功し、2007年に実用機を同路線板宿変電所に納入した。海外では2011年に韓国ソウルメトロ9号線に納入し、稼働を開始している。

ここでは、B-CHOPの製品概要と海外導入事例、および今後の展望について述べる。

2. 製品の概要

B-CHOPは回生電力を貯蔵する媒体として、ハイブリッド自動車などに適用されているリチウムイオン電池を搭載している（図1参照）。

電車の回生電力は急峻（しゅん）に立ち上がる特性を持っている。したがって、適用する蓄電池の選定には電力吸収時の充電特性、逆の放電特性が鍵になる。この特性を加味して各種二次電池を比較し、電池特性および寿命などのデータを採取し、リチウムイオン電池を蓄電池として適用することとした。

リチウムイオン電池の特徴は、電気二重層キャパシタやニッケル水素電池と比較してエネルギー密度が高く、小型・軽量であり、他蓄電媒体と比較して優位なことから、急速な充放電を繰り返す用途に製作されているため、電鉄負荷への使用に最適なことである。また、使用材料の改良や最適充放電制御によって長寿命化技術が確立されてきている。



図1 | リチウムイオン電池

ハイブリッド自動車用のリチウムイオン電池を使用している。

表1 | 蓄電池式回生電力貯蔵装置 (B-CHOP) の仕様
装置の基本仕様を示す。

定格電圧 ^{*1)} (V)	定格容量 (kWp)	定格電流 (A)	負荷パターン ^{*2)}	リチウムイオン電池			
				モジュール定格	モジュール構成	定格	貯蔵容量
820 V	500	600	600 A 10秒 + 300 A 10秒充電 300 A 30秒放電	173 V 5.5 Ah	25×10P	346 V 55 Ah	19 kWh
820 V	1,000	1,200	1,200 A 10秒 + 600 A 10秒充電 600 A 30秒放電	173 V 5.5 Ah	25×20P	346 V 110 Ah	38 kWh
820 V	2,000	2,400	2,400 A 10秒 + 1,200 A 10秒充電 1,200 A 30秒放電	173 V 5.5 Ah	25×40P	346 V 220 Ah	76 kWh
1,650 V	1,000	600	600 A 10秒 + 300 A 10秒充電 300 A 30秒放電	173 V 5.5 Ah	45×10P	692 V 55 Ah	38 kWh
1,650 V	2,000	1,200	1,200 A 10秒 + 600 A 10秒充電 600 A 30秒放電	173 V 5.5 Ah	45×20P	692 V 110 Ah	76 kWh
1,650 V	3,000	1,800	1,800 A 10秒 + 900 A 10秒充電 900 A 30秒放電	173 V 5.5 Ah	45×30P	692 V 165 Ah	114 kWh

注：略語説明ほか *1) 充電開始 / 放電開始電圧は、現地で可変可能（オプションで遠方切り替え機能有り）である。
*2) 基本パターンを示す（インターバルは180秒周期）。

2.1 製品仕様

B-CHOPの仕様は以下のとおりである。

- (1) 適用規格：IEC/EN (International Electrotechnical Commission/European Norm), JEC (Japanese Electrotechnical Committee)
 - (2) 定格容量：3,000/2,000/1,000/500 kWp
 - (3) 定格電圧：1,650 V/820 V（ただし、充放電開始電圧可変可能）
 - (4) 制御方式：電流リミッタ付き定電圧制御
- その他の仕様も含めて表1に示す。

2.2 回路構成

装置はチョップ装置盤（フィルタ盤含む）、蓄電池盤のブロックで構成している。回路構成を図2に示す。この装置の大きな特徴は、場所を限定することなく、任意の場所に設置が可能なことである。

変換器については、1,500 V系統の場合、3,300 V 1,200 A のIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 素子を使用し、

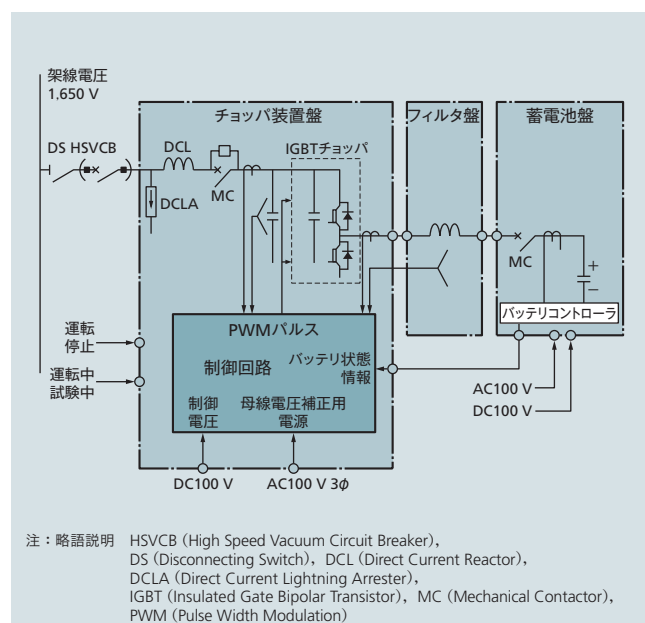


図2 | B-CHOP回路構成図

製品化した装置の回路構成を示す。

双方向チョップを多重構成として、き電線側と蓄電池側へのリプル電流の抑制を図っている。なお、万一の故障の早期復旧を考えた構造および故障時の要因を分析できるトレースバック機能を有している。

蓄電池は、リチウムイオン電池モジュールを1,500 V系統の場合、4直列として必要吸収電流に合わせた並列構成とし標準化を図っている。リチウムイオン電池単体では、バッテリーコントローラでSOC (State of Charge：充電率)、SOH (State of Hysteresis：内部劣化度)、バッテリー温度などの運転状態監視と保護を行い、この情報はチョップ装置側に送信され、リチウムイオン電池に最適な運転制御を実現している。

チョップ装置での運転制御には、リチウムイオン電池の充放電により、き電線電圧制御と、待機時には次の充電(回生電力吸収)のためにSOCを下げておく充電率制御を組み込むことにより、き電線電圧の一定制御と蓄電池の長寿命化制御を両立させている。受電側の電圧変動によって過充電や過放電とならないよう、受電側の電圧要素を装置に取り込んだ電圧補正機能も有している。

オプション機能としてスケジュール制御機能や電力管理からの電圧設定変更機能、および受電停電時の電車の緊急走行モード機能にも対応可能としている。

3. 海外導入事例——ソウルメトロ9号線

最近、韓国政府および地方自治体は、鉄道輸送をCO₂削減など地球温暖化防止に有効な輸送手段として位置づけ、さらなる省エネルギーを進めていて、電車停止時や減速時に生み出される回生電力の有効活用に関する技術導入にも大きな関心を持っている。韓国国内では貯蔵媒体として電気二重層キャパシタを使用した回生電力貯蔵装置を導入し、効果を検証している鉄道事業者もある。

ソウルメトロ9号線は韓国初となる民間資本を活用した社会資本整備事業による都市鉄道で、ソウル市からソウル市メトロ9号線株式会社が車両・電気・機械設備などの委託を受けて経営しながら、ソウル9号線運営株式会社へ、

表2 | B-CHOP仕様
今回納入したB-CHOPの仕様を示す。

項目		数値	備考
定格容量		1,000 kWp	
定格電圧		1,650 V	最大2,000 V
定格電流		600 A	606 A (電流制限)
蓄電池	種類	リチウムイオン電池	
	モジュール	4直列×10並列	
	定格電圧	692 V (173 V/モジュール)	
	定格電流	55 Ah	
	最大充放電電流	±1,500 A	
変換器	構成	1S×2 A×4多重	
	制御方式	キャリア多重PWM制御	
	冷却方式	ヒートパイプ自冷	DCL強制風冷
	周波数	720 Hz	合成周波数2,880 Hz

運営・保守をアウトソーシングしている。

今回のB-CHOP導入は、日立製作所提携先の韓国エンジニアリング大手企業であるPOSCO-ICT社が、ソウルメトロ9号線とESCO (Energy Service Company) 事業として契約したもので、B-CHOPの設置による省エネルギー効果をシミュレーションで検討して、そこで得られる省エネルギー量で基本料金を設定し、収益を回収するビジネスモデルとした。

納入したB-CHOPの仕様を**表2**に示す。今回納入したB-CHOPは海外展開対応としてIEC60146 (Semiconductor converters) に準じた製品とした。

設置箇所は、909変電所と921変電所の2か所で (**図3**参照)、いずれも地下変電所である。地下鉄建設時の搬入口はすでに封印されているため、搬入は一般の階段に限られており、搬入は輸送を考慮して機器を解体して行った。

921変電所のB-CHOP運転時の波形を**図4**に示す。

B-CHOP放電時に整流器からの出力電流は抑制され、B-CHOPから優先的に電力が供給されている。このことから、電力行時に電力会社から供給される電力は抑制され、ピークカット効果が得られていることが分かる。

この路線への導入時のシミュレーション結果では、921変電所の省エネルギー効果は年間510 MWhであったが、921変電所B-CHOPの1か月間運転の結果では隣接の変電所を含めると94 MWhの省エネルギー効果が得られ、当初予定していた以上の省エネルギー効果が得られるものと推測される。また1か月間の運転の結果、ラッシュ時間の消費電力量も削減され、ピークカット効果も得られている。現在、POSCO-ICT社で省エネルギー効果を随時評価している最中である。

4. 今後の展望

東日本大震災以降、原子力発電所の停止に伴う電力不足が懸念されており、B-CHOPのもう一つの役割として、貯蔵した電力で停電時に電車を緊急走行させるというニーズが出ている。しかし、貯蔵装置を系統に設置しただけでは緊急走行は実現できないため、停電時に他鉄道システムと連携をとり、放電制御や系統制御、運行制御が必要となる。日立製作所は鉄道の総合システムインテグレーターとして、この緊急走行が実際に実現できる鉄道システムの構築にさらに取り組む。

また、B-CHOPは直流系統のスマートグリッドを実現させるためのツールに十分なりえる。単に変電所の一製品として展開するだけでなく、B-CHOPをコア装置とした、



図3 | ソウルメトロ9号線路線図 (a) とB-CHOPの外観 (b)
今回のB-CHOP導入サイトと921変電所で稼働開始したB-CHOPの装置外観を示す。909, 921駅ともに地下駅である。装置 (b) は、左奥からチョッパ盤 (フィルタ盤列盤構成)、蓄電池盤である。

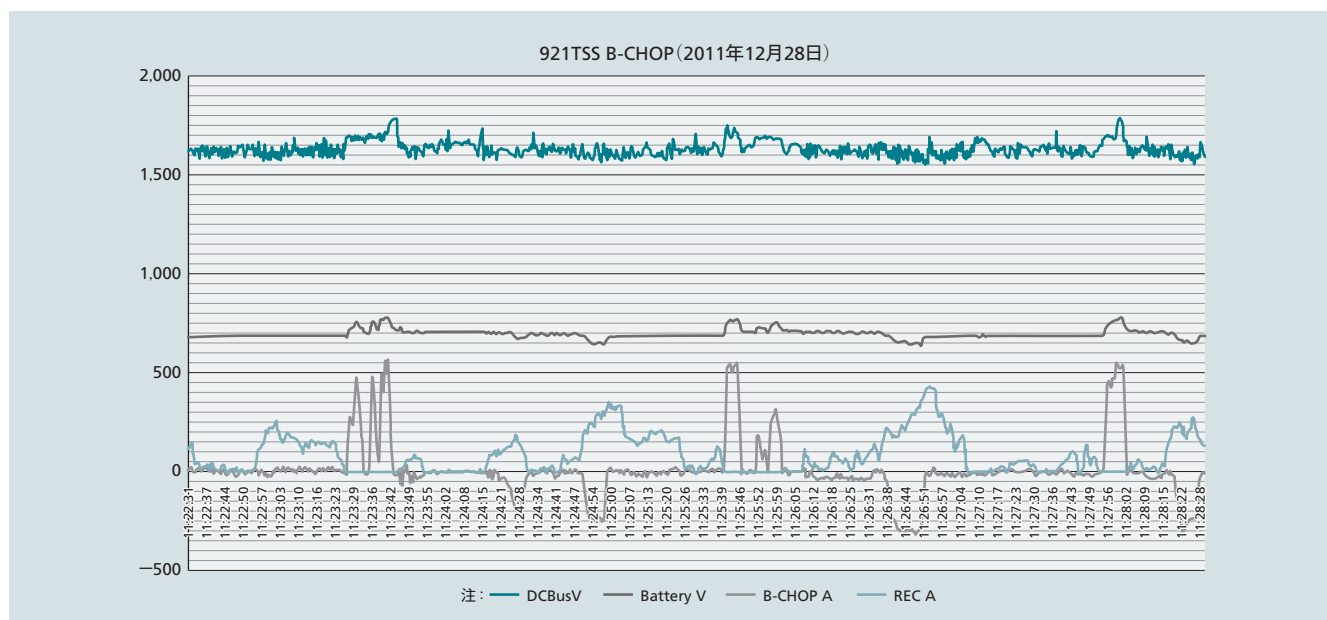


図4 | 現地測定サンプリンググラフ

B-CHOP放電時整流器からの出力電流が抑制され、ピークカットできている。

鉄道の総合システムインテグレーターにしかできない鉄道版スマートグリッドを実現させるため、他鉄道システムとの連携によって省エネルギー効果を高めていく総合的なエネルギーマネジメントを実現していく。

5. おわりに

ここでは、B-CHOPの製品概要と海外導入事例、および今後の展望について述べた。

今後、地球温暖化防止や省エネルギーに対するニーズは海外市場や国内市場においてこれまで以上に高まるものと思われる。これからもこの分野の技術革新を行い、環境・エネルギー問題の解決に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 高橋：回生電力の有効利用，鉄道と電気技術，社団法人日本鉄道電気技術協会（2005.6）
- 2) 伊藤，外：リチウム電池式回生電力吸収装置の開発，電気学会，交通・電気鉄道研究会（2005.9）
- 3) 高橋，外：回生電力の有効利用方法の確立，第42回鉄道サイバネ・シンポジウム，606（2005.12）
- 4) 井藤，外：蓄電池式回生電力吸収装置のフィールド試験の概要，鉄道と電気技術（2007.1）
- 5) 高橋，外：回生電力の有効利用方法の確立，鉄道車両と技術（2007.2）
- 6) 高橋，外：電力貯蔵鉄道用変電システム，日立評論，89，11，834～837（2007.11）
- 7) 奥井：将来に向けた鉄道電力技術の取組み，鉄道と電気技術（2012.1）

執筆者紹介



高橋 弘隆

1991年日立製作所入社，交通システム社 輸送システム本部 電力変電システム部 所属
現在，鉄道用変電システムのシステムエンジニアリング業務に従事



青木 克成

1992年日立製作所入社，交通システム社 輸送システム本部 電力変電システム部 所属
現在，鉄道用変電システムのシステムエンジニアリング業務に従事



真岡 明洋

1985年日立製作所入社，インフラシステム社 情報制御システム事業部 大容量変換器センタ 所属
現在，パワーエレクトロニクス関連機器の設計・開発に従事



金 永靖

2004年日立製作所韓国支店入社，株式会社日立コリア 鉄道・産電営業部 所属
現在，韓国における鉄道関連営業業務に従事