

回生電力貯蔵システムによる 列車自力走行実証試験とその評価

真岡 明洋
Maoka Akihiro

五十嵐 洋
Ikarashi Hiroshi

栗野 文義
Kurino Fumiyoshi

リチウムイオン電池を適用した回生電力貯蔵システム(B-CHOP)は、2007年の初号機納入以来、7サイトに納入している(2014年6月現在)。このシステムは、車両の回生電力を有効活用する省エネルギーシステムであるが、最近では、広域停電などで駅間に停止した列車を最寄り駅ま

で自力走行させて緊急避難を行う、いわゆる「緊急走行」のニーズが増えてきている。このニーズに対応するために、東京地下鉄株式会社と共同で実証試験を実施し、このシステムのみで自力走行が可能であることを確認した。

1. はじめに

鉄道車両の回生制動システムは、制動時の電力をき電線に戻すことにより他の車両で使用できるようにした省エネルギーシステムであり、各鉄道事業者では新車の導入時に積極的に採用してきている。しかし、回生電力を使用する車両が不在の場合には、余剰電力がき電線の電圧を上昇させて、回生失効を引き起こす要因となる。この回生失効を防止するための地上側の設備として、回生インバータや抵抗式回生電力処理装置(通称「抵抗チョッパ」)が導入されている。

これに対し、日立では、より回生電力を有効に活用し得るシステムとして、ハイブリッド自動車用のリチウムイオン電池(以下、「Li電池」と記す。)を適用した回生電力貯蔵システム(以下、「B-CHOP」と記す。)を2004年に開発し、2007年に実用化した。

一方、大規模災害などによって予期せぬ広域停電が発生すると、変電所への電力供給が途絶えるため、自力走行装置などを有しない電気鉄道車両は、停電と同時に停止を余儀なくされる。このとき、地上側に電力供給設備があれば、駅間の橋梁(きょうりょう)上やトンネルなどに停止した列車を最寄り駅まで自力走行させることで、より安全かつ迅速な避難誘導が可能となる。この非常用電力供給設備へのB-CHOPの適用については机上ではこれまでも検討してきたが、今般東京地下鉄株式会社(以下、「東京メトロ」と記す。)の変電所構内に試験機を設置し、Li電池のみで

の車両走行に成功した。

以下では、B-CHOPの概要とともに、その走行試験の結果について述べる。

2. B-CHOP

B-CHOPは、車両の回生制動電力を有効に活用するため比較的急峻(きゅうしゅん)に立ち上がる車両の回生電力特性を考慮する必要がある。また、従来の非貯蔵形回生システム同様、システム動作時にはき電電圧の一定制御が要求される。日立では、このようなシステム要求を十分に考慮したB-CHOPを構築している。

2.1 貯蔵媒体

比較的急峻に立ち上がる車両の回生電力特性を考慮した場合、貯蔵媒体は、急速な充放電を繰り返す用途に耐え得るものである必要があり、エネルギー密度も比較的高いことが要求される。この特性を考慮し、ハイブリッド自動車などに適用されているLi電池を貯蔵媒体として適用した(図1参照)。

Li電池の特長は、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・軽量で優位であり、さらに、急速な充放電を繰り返す用途に製作されており、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り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。

2.2 システム構成

B-CHOP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。図2に、その回路構成を示す。

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、双方向チョップを多重構成として、き電線側の高調波と蓄電池側へのリップル電流の抑制を図っている。また、万一の故障時の早期復旧を考えた構造および故障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、1,500 V系統の場合、Li電池モジュールを4直列とし、吸収電流に合わせて必要な並列構成とすることで標準化を図っている。個々のLi電池ではバッテリーコントローラでSOC (State Of Charge: 充電率), SOH (State Of Health: 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、この内部状態情報はチョップ装置側に送信され、Li電池に最適な運転制御を実現している。

チョップ装置では、Li電池の充放電中は、き電線電圧を一定にするAVR (Automatic Voltage Regulation) 制御と、待機時は次の充電(回生電力吸収)のためにSOCを設定値に調整する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

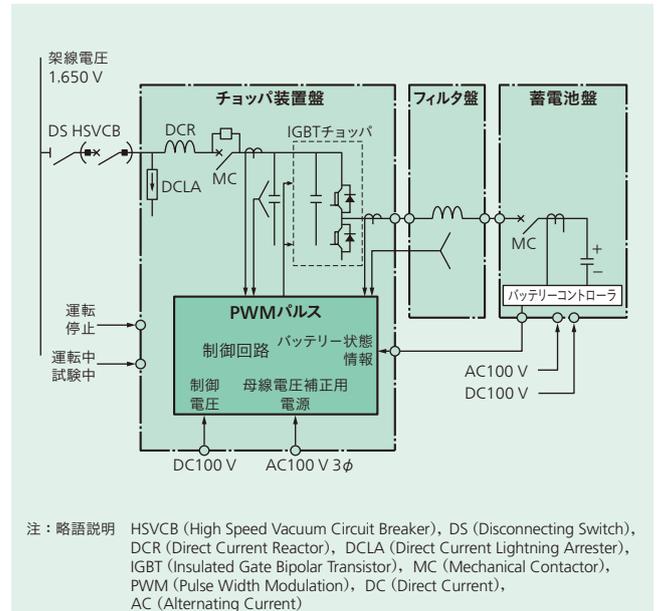


図2 | 回生電力貯蔵システム(B-CHOP)回路構成図

製品化した装置の回路構成を示す。

注：略語説明 HVCB (High Speed Vacuum Circuit Breaker), DS (Disconnecting Switch), DCR (Direct Current Reactor), DCLA (Direct Current Lightning Arrester), IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), MC (Mechanical Contactor), PWM (Pulse Width Modulation), DC (Direct Current), AC (Alternating Current)

電側の電圧変動によって不必要な充電や放電とならないよう受電側の電圧要素を取り込んだ充放電開始電圧補正機能も有している。

オプション機能として、時間帯によって充放電開始電圧を設定できるスケジュール制御機能、および電力管理システムからの充放電開始電圧設定変更機能を有し、受電停止時の電車の緊急走行モードにも対応可能としている。

2.3 製品仕様

B-CHOPの標準仕様は以下の通りである。

- (1) 適用規格：IEC/EN, JEC
- (2) 定格容量：3,000 kW/2,000 kW/1,000 kW/500 kW
- (3) 定格電圧：1,650 V/820 V (ただし、充放電開始電圧設定変更可能)
- (4) 制御方式：電流リミッタ付定電圧制御

その他の仕様も含め表1に示す。B-CHOP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。

表1 | 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	2 S × 10 P	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	2 S × 20 P	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	2 S × 40 P	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	4 S × 10 P	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	4 S × 20 P	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	4 S × 30 P	692 V 165 Ah	114 kWh

*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あり)である。

*2 基本パターンを示す(インターバルは180秒周期)。

表2 | B-CHOP納入実績

2007年初号機以降，7サイトに納入している。

顧客名 (Order Company)	Project	電圧 (V)	容量 (kWp)	台数	納入年
神戸市交通局	西神・山手線 板宿変電所	1,500	1,000	1	2007
Posco lct (韓国)	ソウルメトロ9号線 909/921変電所	1,500	1,000	2	2011
東日本旅客鉄道 株式会社	青梅線 拝島変電所	1,500	2,000	1	2013
大阪市交通局	千日前線 鶴橋変電所	750	1,000	1	2014
東日本旅客鉄道 株式会社	高崎線 桶川変電所	1,500	2,000	1	2014
京王電鉄 株式会社	相模原線 堀之内変電所	1,500	2,145	1	2014

2.4 納入実績

国内においては，2011年3月の東日本大震災を一つの契機として省エネルギー機器への設備投資が増加傾向であり，2007年の初号機，海外を含め，7サイトに納入している（2014年6月現在）。納入実績を，表2に示す。

3. 緊急走行実証試験

日立は2013年3月から，東京メトロと協力して非常用地上バッテリー装置（以下，「EM-B-Traction」と記す。）の研究を進めてきたが，今般の緊急走行実証試験はB-CHOPで確立した技術の応用として計画，機器設計を行い，機器搬入，誘導障害試験（信号設備への影響確認）を経て，2014年1月26日に10両編成車両を用い，東京メトロ東西線の西葛西駅から南砂町駅間2.7 kmの自力走行に成功した。

3.1 機器仕様

東京メトロ東西線に使用している車両の力行特性，および，東西線の勾配などを考慮し，10両編成車両を走行させるに足るLi電池容量を検討した。実証試験に用いたEM-B-Tractionの仕様を，表3に示す。

通常運転モード時は1,000 kWp充電，500 kWp放電でのB-CHOPを使用した省エネルギー運転とし，緊急走行モード時は，2,000 kWp放電を可能とした。チョップ部

表3 | EM-B-Traction実証試験装置仕様

B-CHOPを使用した非常用地上バッテリー装置（EM-B-Traction）の仕様は，実証試験走行を考慮して検討した。

項目	仕様
定格容量	1,000 kW（緊急走行モード時：2,000 kWp）
負荷パターン	クラスS 600 A 10秒+300 A 10秒充電 300 A 30秒放電 （緊急走行モード時：負荷パターン開放）
冷却方式	沸騰冷却自冷式
蓄電池構成	231 Ah（4 S×42 P）
貯蔵容量	160 kWh

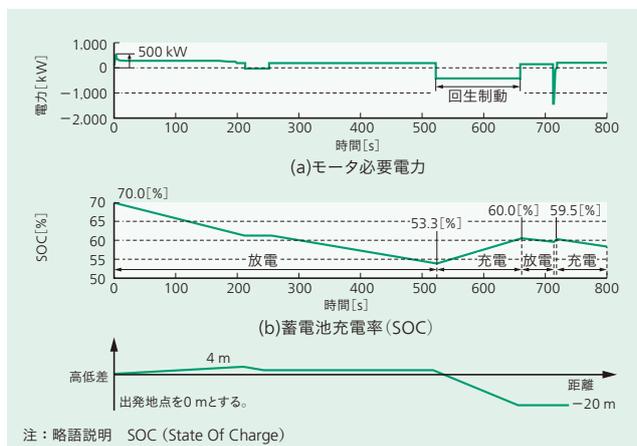


図3 | 蓄電池容量シミュレーション

勾配も考慮して蓄電池容量を検討した。

は，6多重構成とし，標準の2,000 kW機と同一構成とした。

3.2 事前検証

緊急走行モード時には，Li電池に蓄えた電力を可能な限り放出する必要があるため，通常運転時とは異なり，使用するSOC範囲を最大限に広げる。その条件で，シミュレーションにより事前検証した結果を図3に示す。

この結果により，実証試験で使用するLi電池の容量には問題がないことを確認した。

3.3 緊急走行試験

2014年1月26日終車後に，EM-B-Tractionシステムを立ち上げ，同日25時39分（1月27日1時39分）に10両編成車両が西葛西駅を出発，同25時48分（1時48分）に南砂町駅に到着した。このときの測定波形を図4に示す。

緊急走行モードで起動後，き電電圧を安定に制御してお

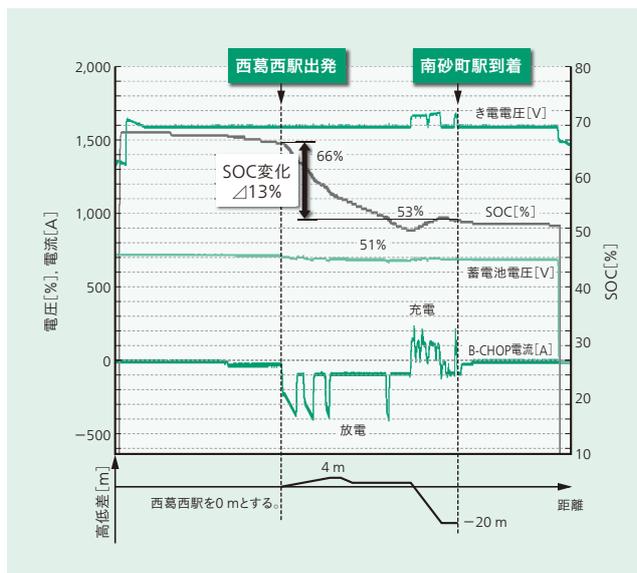


図4 | EM-B-Tractionによる緊急走行時の波形

EM-B-Tractionは，き電電圧を安定に制御している。

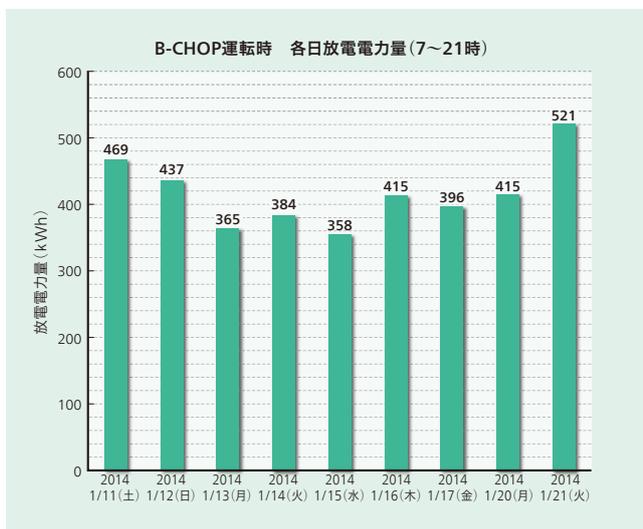


図5 | 省エネルギー効果 (B-CHOP放電電力)

EM-B-Tractionは、省エネルギーにも寄与する。

り、また走行中、力行、回生を複数回実施したが、EM-B-Tractionは計画通りに問題なく電力を供給している。また、EM-B-Tractionは、チョップにより1,600V一定電圧のため、モータ電流を低減できる特長を有しており、Li電池盤も小型化が可能である。

3.4 省エネルギー効果

EM-B-Tractionは、通常運転モードではB-CHOPとして回生電力を蓄電し、そのエネルギーを力行車に供給することで、省エネルギーに寄与する。今回の実証試験中においても、日中はB-CHOP運転を実施して、その効果を確認した。結果を図5に示す。

今回、1,000kWシステムにより、平日平均718kWh、休日平均731kWhの省エネルギー効果が見込めるという結果が得られた。

4. 今後の展望

東日本大震災以降、大規模災害時などでの停電ならびに津波への対応が懸念されており、貯蔵した電力で停電時に電車を緊急走行させる、というニーズは鉄道事業者の間で全国的な広がりを見せている。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ず、停電時には中央指令所(電力管理システム)と現場側の機器(EM-B-Traction)が連携した放電制御や系統制御などが不可欠である。緊急走行を実現させる鉄道システムの構築完遂をめ

ざし、システム検討を今後も継続していく。

5. おわりに

B-CHOPは直流電気鉄道システムのスマートグリッドを実現させるためのツールとして有効であり、単に変電所の一つの機器との位置づけにとどめず、他の電力系・運行系鉄道システムと連携を図ることが可能なコア装置とし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の実現に向け、さらに検討していく。また、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ことが十分に考えられる。今後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，社団法人日本鉄道電気技術協会(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，社団法人日本鉄道電気技術協会(2012.1)
- 8) 高橋，外：回生電力貯蔵装置の導入事例と今後の展望，日立評論，94，6，466~469(2012.6)

執筆者紹介



真岡 明洋

日立製作所 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



五十嵐 洋

日立製作所 インフラシステム社 電機システム本部 パワーエレクトロニクス設計部 所属
現在、パワーエレクトロニクス応用製品の設計・開発業務に従事



栗野 文義

東京地下鉄株式会社 鉄道本部 電気部 所属
現在、指令所システムなどの計画業務に従事