

回生電力貯蔵装置による列車緊急走行機能の開発

久米 靖則
Kume Yasunori

河津 浩典
Kawatsu Hironori

清水 賢宏
Shimizu Takahiro

東日本大震災以降、省エネルギーや再生エネルギーへの注目度が増している一方で、電力会社からの電力供給がダウンする非常時における乗客の安全な誘導が課題となっている。その手段として、リチウムイオン電池に蓄電した電力を活用し、乗客を電車内に乗せたまま電車を最寄り駅まで自力走行させる「列車緊急走行機能付き回生電力貯蔵装置」を東京地下鉄株式会社と協議しながら検討し、フィールド試験（東京地下鉄東西線葛西変電所）を経て、列車緊急走行機能を開発した。この度、東京地下鉄東西線葛西変電所に本運用となる列車緊急走行機能付き回生電力貯蔵装置を納入した。

東日本大震災以降、省エネルギーや再生エネルギーへの注目度が増している一方で、電力会社からの電力供給がダウンする非常時における乗客の安全な誘導が課題となっている。その手段として、リチウムイオン電池に蓄電した電力を活用し、乗客を電車内に乗せたまま電車を最寄り駅まで自力走行させる「列車緊急走行機能付き回生電力貯蔵装置」を東京地下鉄株式会社と協議しながら検討し、フィールド試験（東京地下鉄東西線葛西変電所）を経て、列車緊急走行機能を開発した。この度、東京地下鉄東西線葛西変電所に本運用となる列車緊急走行機能付き回生電力貯蔵装置を納入した。

1. はじめに

リチウムイオン電池を使用した日立による回生電力貯蔵装置（以下、「B-CHOP」と記す。）は、2007年に1号機を納入して以来、国内外で10セットが稼働中である。

B-CHOPは、電車の回生制動が利かなくなる回生失効を防止し、リチウムイオン電池に蓄電した電力を電車の力行エネルギーとして供給する、省エネルギー機能付きの回生装置として開発したシステムであるが、回生失効防止のみ

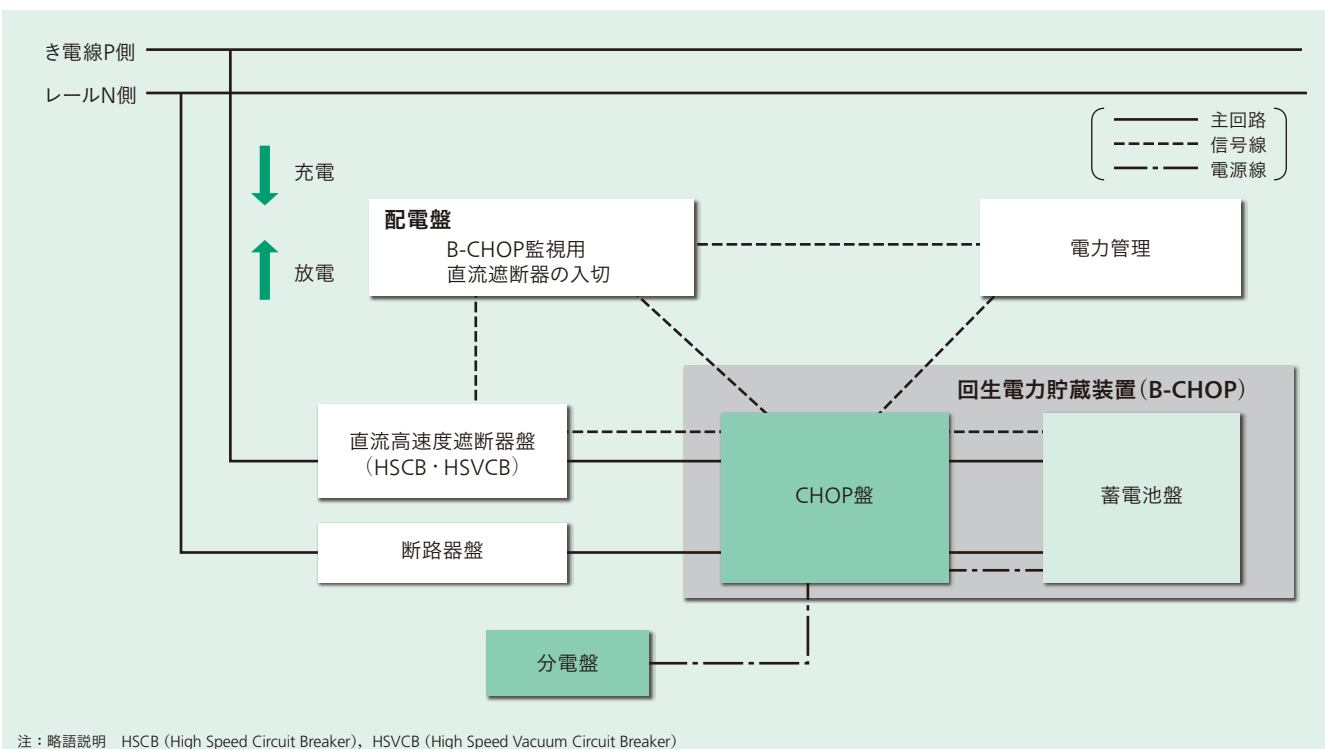


図1 | B-CHOPシステムの構成
B-CHOPを中心にしたシステム構成を示す。

ならず、その電力供給機能を活用した変電所補完や列車走行への適用が検討されている。日立では、2014年にリチウムイオン電池の電力のみで列車を走行させるフィールド試験を実施し、列車緊急走行の実現性を確認した¹⁾。

これに対して、本格導入に向けて必要であった電源自給システムおよび緊急走行機能への切り替え機能の確立、ならびに充放電制御用DC (Direct Current) -DC変換器の改良について報告する。

2. 回生電力貯蔵装置 (B-CHOPシステム)

2.1 システム概要

B-CHOPは電車の制動力で発生する回生電力を蓄電池に貯蔵し、蓄電した電力を電車の力行時に供給する。これを一連の動作で繰り返すことによる電力の有効利用を目的としたシステムである。

B-CHOPは、直流高速度遮断器盤と断路器盤を介して変電所内のき電線P側およびレールN側と接続されている(図1参照)。直流高速度遮断器盤はき電線P側との遮断分離を行い、断路器盤はレールN側との分離を行うことを目的としている。B-CHOPは、CHOP盤(DC-DC変換器)と蓄電池盤で構成され、蓄電池の状態およびき電状態からCHOP盤によって適正な充放電制御を行う。

2.2 蓄電池

B-CHOPシステムを構成するにあたり、急峻(しゅん)に立ち上がる回生電力に追従できるだけの性能を備えた蓄電池を選定する必要がある。また、変電機器として使用することから、長時間の運転や繰り返しの充放電に耐えることが求められるため、すでに実績を積んで信頼性が確立されてきているハイブリッド自動車(HEV: Hybrid Electric Vehicle)で使用されているリチウムイオン電池を採用している(図2参照)。HEV用リチウムイオン電池は、他の蓄

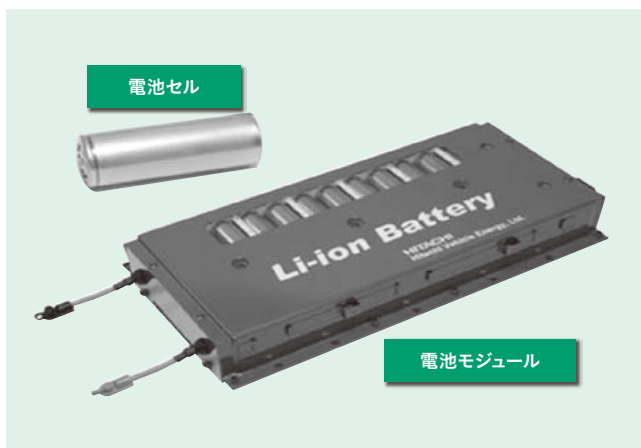


図2 | リチウムイオン電池モジュールの外観

ハイブリッド自動車用のリチウムイオン電池としても使用されている。

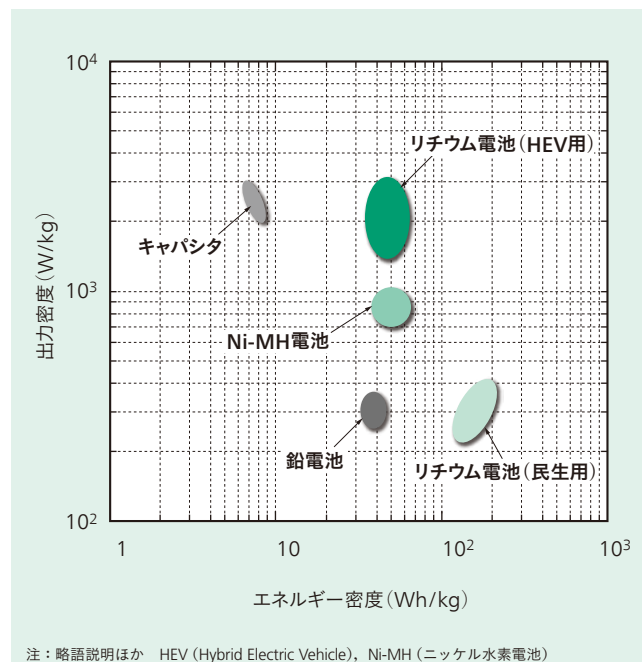


図3 | 各種蓄電池要素の能力分布

主要蓄電池媒体の能力比較を示す。

電媒体に対してエネルギー密度および出力密度が比較的高い媒体である(図3参照)。リチウムイオン電池のセル電圧、バッテリー温度などの内部状態情報をバッテリーコントローラ(BCU: Battery Controller Unit)を介してCHOP盤に送信し、リチウムイオン電池に対して適切な運転制御を行うことで、蓄電池の寿命を延ばすことを実現している²⁾。

2.3 CHOP盤の改良

CHOP盤のDC-DC変換器はIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)を用いた昇降圧チョッパとしており、通常はき電電圧によって適正なIGBTを採用する。しかし、き電電圧にかかわらず同一のIGBTを使用することで構造上の標準化を図ることが可能と考えられる。そこで、直流1,500Vき電の場合は、チョッパを3レベルとすることで汎用の直流1.7kVクラスIGBTを採用し、直流750Vき電用と共通化した。さらに、スイッチング周波数を1,200Hz(50Hz地区)とこれまでの2倍にし、蓄電池用直流リアクトルの小型化と低騒音化を図った。また、変換器と直流リアクトルを風冷とし、CHOP盤の据え付け面積として日立従来比70%を実現した。

3. 緊急走行対応機能

3.1 緊急走行モード

現在稼働中のB-CHOPは、省エネルギーモードあるいは回生失効防止モードで運用されているが、今回緊急走行モードを新たに設けた。緊急走行モードは、大規模停電などにおいて電力会社から変電所への電力供給が停止した場

合に、蓄電池の電力のみで電車を走行させるモードである。B-CHOPは、き電電圧が低下またはなしになると入力電圧低下を検知して一旦停止し待機状態になる。この後、そのき電電圧低下が電力会社からの電力供給停止によるものと判断され、電車に対して緊急走行を必要とする場合に、緊急走行指令を外部からB-CHOPに送信する。緊急走行モード信号を受信すると、B-CHOPは主として以下の機能を緊急走行用に切り替える。

- (1) 充電および放電開始電圧
- (2) 各種制御パラメータ
- (3) SOC (State of Charge：充電率) 可動範囲

切り替え後、直流高速度遮断器が投入されることで、B-CHOPはき電電圧を一定に保つ制御を行いつつ、電車に対して電力供給を行う。

3.2 補機電源自給機能

上述したように電車に対する緊急走行指令を行う場合、電力会社からの送電停止による変電所の停電が前提であるため、制御装置やFANなどのいわゆる補機電源も供給停止となることを想定する必要がある。そこで、緊急走行機能付きB-CHOPは、補機電源自給機能を搭載した補助電源盤をオプションとして設置できるようにした。

通常時は変電所の分電盤などから補機電力供給を受けてB-CHOPを稼働させているが、緊急走行モード信号を受信した場合は、リチウムイオン電池の電力を補助電源盤内のINV (Inverter)とUPS (Uninterruptible Power Supply) を介してB-CHOPに供給する (図4, 図5参照)。

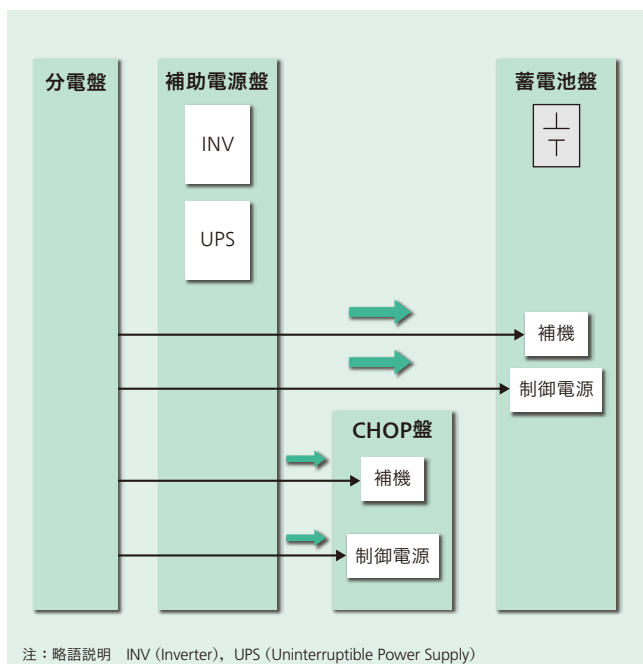


図4 | 通常走行時の制御電源・補機電源の流れ
通常時のCHOP盤と蓄電池盤へ供給される制御電源・補機電源の流れを示す。

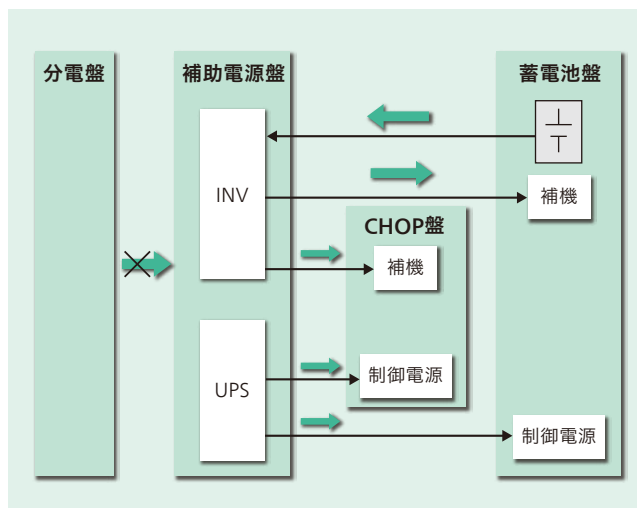


図5 | 緊急走行モード時の制御電源・補機電源の流れ
緊急走行時のCHOP盤と蓄電池盤へ供給される制御電源・補機電源の流れを示す。

補助電源盤の主な仕様を表1に、外形を図6にそれぞれ示す。

3.3 システム仕様

フィールド試験結果および補機電源自給機能などを考慮し、最終仕様を決定した。フィールド試験時と納入時の仕様比較を表2に示す。

表1 | 補助電源盤の主な仕様

補機電源自給機能を搭載した補助電源の主な仕様を示す。

項目	仕様
UPS容量	4 kVA (緊急走行時のDC110 V用 給電時間1時間)
インバータ定格容量	15 kVA (AC220 V/39.4 A 50 Hz) 三相3線
インバータ方式	3相2レベル方式
冷却方式	強制風冷
素子	IGBT素子
盤構成	屋内自立閉鎖盤

注：略語説明 DC (Direct Current), AC (Alternating Current), IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)



図6 | CHOP盤 (補助電源盤：最右側位置)
CHOP盤と補機電源自給機能を搭載した補助電源盤の装置の外形を示す。

表2 | フィールド試験時と今回納入製品の主な仕様比較

フィールド試験時と今回納入製品の主な仕様比較を示す。

項目	仕様	
	フィールド試験時	今回納入製品
制御方式	電流制限機能付き 定電圧制御方式 (AVR)	電流制限機能付き 定電圧制御方式 (AVR)
定格電流	1,210 A (2,000 kW)	909 A (1,500 kW)
電流制限値	1,210 A (き電側電流リミッタ付き き電電圧1,650 V)	909 A (き電側電流リミッタ付き き電電圧1,650 V)
定格電圧	直流1,650 V (最大直流2,000 V)	直流1,650 V (最大直流2,000 V)
チョッパ数	6相	6相
チョッピング周波数	600 Hz (合成周波数3,600 Hz)	1,200 Hz (合成周波数7,200 Hz)
電池構成	4直列×21並列×2式	4直列×24並列×2式

注：略語説明 AVR (Automatic Voltage Regulation)

4. 運用開始と今後の課題

改良型CHOP盤および補助電源盤を適用した緊急走行機能付きB-CHOPシステムを、フィールド試験を実施した東京地下鉄株式会社の東西線葛西変電所に2016年2月に現地搬入し、誘導障害試験を含めた現地試験を経て、2016年3月に運用を開始した。これで、省エネルギー、回生失効防止に加え、緊急走行機能が新たにB-CHOPの製品群に加わった。

しかし、今後のB-CHOPの運用を考えると以下に示す課題がある。

- (1) 緊急走行機能付きB-CHOPにおいて、充電動作開始電圧・放電開始電圧に関係なく、SOCを常に一定レベル以上(例：SOC 50%以上)に確保する方法の確立
- (2) 各社で多様な蓄電池システムが導入されていくことから、これらの緊急走行実施時の並列き電運用時(例：「A変電所A社電力貯蔵装置」、「I変電所B社電力貯蔵装置」による並列き電)の対応についての検証
- (3) 適切な充電開始電圧と放電開始電圧の自動設定機能についての検証
- (4) 各種設定値(例：充電開始電圧・放電開始電圧)を外側から安全に変更できるシステムの確立
- (5) 閉鎖された空間にB-CHOPを設置した場合の排熱対応設備の検証
- (6) B-CHOPと各種鉄道システムとの協調
- (7) 変電所補完システムへの適用
- (8) 蓄電池盤のさらなる省スペース化の検証

5. おわりに

第4章に示した課題の解決はもとより、今後ともB-CHOPに対する機能向上の各種要望に応え、省エネルギーにも列車の乗客の安全誘導保護にも活用できる使い勝手のよいシステムに成長させる所存である。

参考文献

- 1) 真岡, 外: 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, 日立評論, 96, 9, 590~593 (2014.9)
- 2) 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



久米 靖則
日立製作所 鉄道ビジネスユニット 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



河津 浩典
日立製作所 インダストリアルプロダクツビジネスユニット
パワーエレクトロニクス設計部 所属
現在、蓄電池式回生電力貯蔵装置のシステム設計に従事



清水 賢宏
日立製作所 インダストリアルプロダクツビジネスユニット
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製品の開発に従事