

feature article

# 電化区間で回生電力を有効利用する 省エネルギー蓄電システム

Energy Storage System for Effective Use of Regenerative Energy in Electrified Railway

嶋田 基巳 Motomi Shimada

大石 亨一 Ryoichi Oishi

荒木 大二郎 Daijiro Araki

中村 恭之 Yasushi Nakamura

日立グループは、鉄道システムにおける環境負荷の低減に貢献するため、リチウムイオン電池を用いた電車向け省エネルギーシステムを開発している。軽負荷回生ブレーキ状態や、モータ特性の性能限界という回生ブレーキの課題については、それぞれ回生吸収機能、高速域電気ブレーキ機能の開発と、適切に動作させる高効率回生マネジメントを提案し、製品化を進めている。回生吸収機能については、導入する路線や運転形態を考慮した適切なシステムとして、地上設備「B-CHOPシステム」、車上設備「連続回生システム」をそれぞれ開発した。今後、幅広い顧客ニーズに応えられる省エネルギーシステムとして、機能アップを進めていく。

## 1. はじめに

日立グループは、鉄道事業における省エネルギー化・CO<sub>2</sub>削減に貢献するため、蓄電池制御技術を適応した鉄道システムの開発を進めている。

回生ブレーキの弱点を克服し、さらなる省エネルギー効果の向上を図る技術として、「回生吸収機能」、および「高速域電気ブレーキ機能」を開発した。これらの技術のポイントになるのは、ブレーキ時の回生エネルギーを消費する他車両がないときに、これを蓄電池に吸収する回生吸収機能と、インバータ装置の直流部電圧を蓄電池で昇圧し、電動機やインバータの出力を増加させて回生ブレーキの動作速度域を高速側に拡大する高速域電気ブレーキ機能を適切に動作させることである。

日立グループは、回生吸収機能を実現するシステムとして、地上設置「B-CHOPシステム」と、車上設置「連続回生システム」を開発した。地上設置では、装置の設置によって大きな省エネルギー効果を得られることが実証されており、車上設置でも本線走行試験レベルで効果を確認している。

ここでは、車上および地上設置による回生吸収の特徴と効果について述べる。

## 2. 回生電力の高効率利用

### 2.1 回生ブレーキの課題

#### (1) 軽負荷回生ブレーキ状態

回生ブレーキは、減速時に駆動用モータを発電機として使用する。得られた回生エネルギーは架線に戻し、加速す

る他の車両がこれを加速エネルギーとして再利用する。しかし、閑散時間帯など、ブレーキ中に回生エネルギーを消費する他の車両が少ないと、回生エネルギーの行き場がなくなる。これを「軽負荷回生ブレーキ状態」と言う。このときフィルタコンデンサ電圧が上昇するため、これを抑えるインバータ装置の軽負荷回生制御が動作して回生電流を絞る。軽負荷回生制御によってフィルタコンデンサ電圧の上昇は抑えられるが、回生ブレーキ力が減少するため、不足するブレーキ力を空気ブレーキで補足する必要があり、回生エネルギーは低下する。

#### (2) モータ特性の性能限界

走行速度から停止までに必要なブレーキ力をすべて回生ブレーキで負担できれば、省エネルギー効果は最大となる。しかし、回生ブレーキ力は、高速域ではモータ出力特性によって制限される。高速域では必要なブレーキ力に対して回生ブレーキで負担できないブレーキ力を空気ブレーキで補うため、省エネルギー効果が低下する（「モータ特性の性能限界」）。

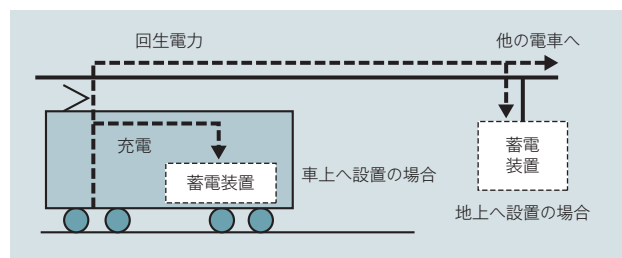


図1 回生吸収機能

架線へ戻せない回生電力を蓄電池で吸収する。吸収した回生電力は、次の加速時に再利用することにより、インバータ装置の消費電力を低減する。

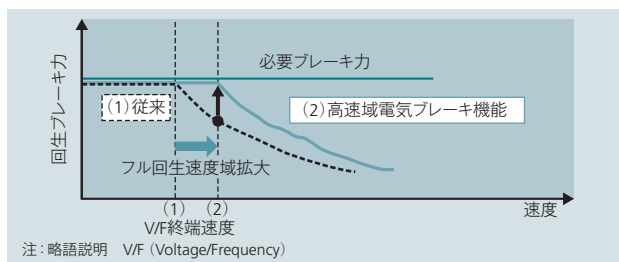


図2 回生ブレーキ特性

蓄電池でインバータ装置の直流部電圧を昇圧して、電動機やインバータの出力を増強させ、回生ブレーキの動作速度域を高速側に拡大する。

## 2.2 課題に対する解決策

### (1) 回生吸収機能

軽負荷回生ブレーキ状態の解決策として、「回生吸収機能」を開発した。これは、回生エネルギーを消費する他の車両がないとき、その回生エネルギーを蓄電池で吸収して、加速エネルギーとして再利用するものである（図1参照）。蓄電装置の設置場所としては、車上に設置する方式と地上に設置する方式の二つの方法が考えられる。

### (2) 高速域電気ブレーキ機能

「モータ特性の性能限界」の解決策として、「高速域電気ブレーキ機能」を開発した。これは、蓄電池でインバータ装置の直流部電圧を昇圧して、各機器を流れる電流量を変えずに電動機やインバータの出力を増強させ、回生ブレーキの動作速度域を高速側に拡大するもので、図2のようにフル回生可能なV/F (Voltage/Frequency) 領域の終端速度を高速域側へシフトさせるものである。

## 2.3 高効率回生マネジメント

回生吸収機能と高速域電気ブレーキ機能を適切に動作させて実現するため、高効率回生マネジメントを開発した。動作概略の機器イメージを図3に示す。

高速域電気ブレーキ機能を実現するための高速域電気ブレーキ装置では、接地点とインバータ装置負側入力端子の間に蓄電装置を直列に挿入することにより、インバータ装置負側入力端子の電位を接地点電位から電池電圧分 ( $\Delta V$ )

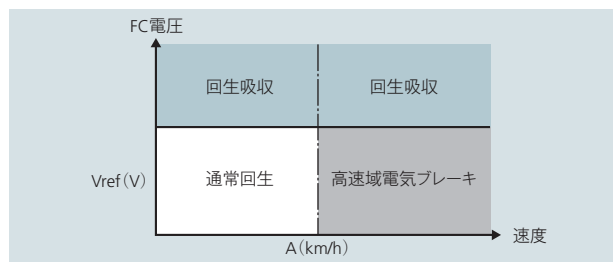


図4 高効率回生マネジメントの制御方針

架線電圧条件、速度条件により「高速域電気ブレーキ機能」と「回生吸収機能」、「通常回生」の3モードのいずれかを選ぶ。

だけ低くして、インバータ装置全体の印加電圧を電池電圧分 ( $\Delta V$ ) だけ加算する。この加算電圧をチョップ装置で0Vから電池電圧 $\Delta V$ まで連続的に変化させて、フィルタコンデンサ電圧を指令値に追従制御している。

車上に回生吸収装置を設ける場合は、インバータ装置の主回路に、昇降圧チョップを介して蓄電装置を並列に挿入する。回生時は昇降圧チョップを降圧チョップ動作させ、回生電力を蓄電池に充電する仕組みで、回生時にフィルタコンデンサ電圧が上昇して所定値を超えた時点で軽負荷状態と判断し、所定値を上回らないようにリミッタ制御を行う。

一方、地上に回生吸収装置を設ける場合は、架線と接地点の間に昇降圧チョップを介して蓄電装置を並列に挿入する構成となる。地上設置の場合は、回生吸収装置の挿入点における架線電圧より、軽負荷状態の判断を行う。

高効率回生マネジメントでは、架線電圧条件、速度条件により、「高速域電気ブレーキ機能」、「回生吸収機能」、「通常回生」の3モードのいずれかを選択するようになっている（図4参照）。

高速域 [V/F終端速度: A (km/h) 以上] かつ架線電圧が所定値 ( $V_{ref}$ ) 以下であれば、高速域電気ブレーキ機能が動作する。ただし、速度がV/F終端速度 [A (km/h)] 以下になると高速域電気ブレーキ機能を停止し、通常回生動作に戻る制御とした。また、軽負荷回生状態となり、架線電圧が所定値を上回ると回生吸収機能が動作する。

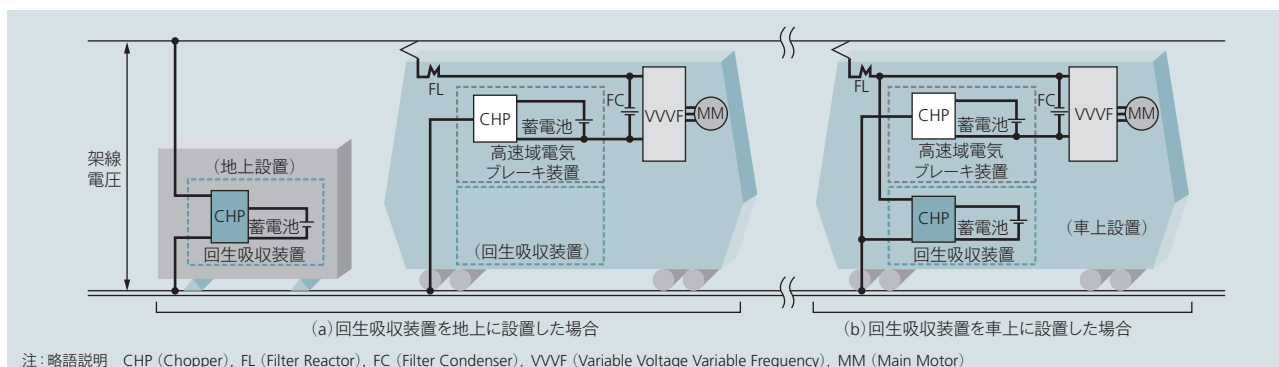


図3 高効率回生システムの機器構成

回生吸収装置は地上、あるいは車上に設置する。高速域電気ブレーキ動作時は、インバータ装置負側入力端子側に蓄電装置を直列挿入する。

### 3. 回生吸収機能を実現するシステム

#### 3.1 蓄電装置の車上設置と地上設置の特徴

日立グループは、回生吸収機能を実現するシステムとして、地上設置「B-CHOPシステム」と、車上設置「連続回生システム」の開発を並行して進めてきた。これは、両者の特徴と、導入する路線や運転形態を考慮して、適切なシステムを提案することが重要と考えたからである。回生吸収システム（地上／車上設置）の特徴を表1に示す。

#### 3.2 車上設置(連続回生システム)

##### 3.2.1 連続回生システム概要

連続回生システムの機器構成を図5に示す。連続回生装置は、電車線へ戻せない回生電力を蓄電装置に充電して、これを次の加速時に再利用することで消費エネルギーを低減するものである。蓄電装置側とインバータ側の電圧が違っていても、昇降圧チョップパによって充放電電流を制御できる。

通常の停止ブレーキ時（B5S）には、蓄電装置だけで回生電力量を吸収できる蓄電容量を確保している。定格電圧は、試験を行う路線における電車線供給電圧750Vの半分程度の340Vとした。これは、昇降圧チョップパの通流率（スイッチング素子のオン／オフの比）を50%付近で制御することで、電池電流のリプル率抑制をねらったものである。

この連続回生システムの性能確認試験は、大阪市交通局

表1 蓄電装置の設置方式の比較

蓄電装置の地上設置と車上設置それぞれの特徴を示す。

項目	地上設置	車上設置
回生吸収機能	他車で消費されない回生電力を蓄電	他車で消費されない回生電力を蓄電
設置の容易性	沿線に空き地があれば設置は比較的容易	車上の設置スペースに制約あり。列車ごとに蓄電装置の設置要
離線時の連続回生	対応不可	可能

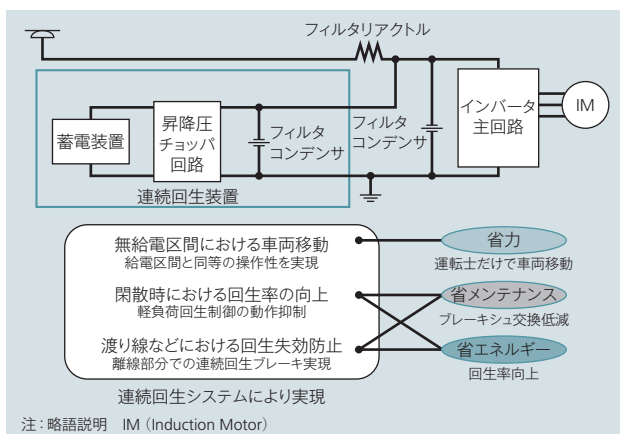


図5 連続回生システムの機器構成

電車線へ戻せない回生電力を蓄電装置に充電して、これを次の加速時に再利用することで消費エネルギーを低減する。

の協力により、本線において2007年度に実施した。

##### 3.2.2 連続回生システムの制御と性能確認

充電制御は、電車線に回生電力を戻せずフィルタコンデンサ電圧が上昇したとき、所定値を超えないように回生電力の一部を充電する。また、放電制御では、力行（りきこう）電力を優先的に蓄電装置から供給する。

連続回生システムの回生率向上効果を走行試験で確認した。走行試験は大阪市交通局10A系車両で実施した。

###### (1) 試験方法

このシステムによる回生率の向上を確認するため、付近に走行車両のいない軽負荷状態で試験した。速度60 km/hからブレーキ（B5S）を投入したときの回生率を測定した。

###### (2) 試験結果

回生吸収制御停止／動作による回生率向上効果の比較を図6に示す。同図の黒線で示す波形が回生吸収機能停止時で、青線の波形は回生吸収機能動作時である。

回生吸収機能停止時は、回生電力の一部を電車線に戻せずモータ電流が絞られる。この試験では、1インバータ（モータ2台）当たりの力行電力量は2.00 kWh、回生電力量は0.64 kWh（回生率32%）だった。

回生吸収機能動作時は、電車線に戻せない回生電力を蓄電装置に充電するため、モータ電流はほとんど絞られない。この試験では、1インバータ当たりの力行電力量は1.88 kWh、回生電力量は0.82 kWh（回生率約44%）だった。

回生吸収制御の停止／動作による回生率比較を図7に示す。通常負荷時（回生電力を他車の力行で消費しているとき）は、回生吸収機能停止／動作で回生率は同程度である。一方、軽負荷状態では、この装置の回生吸収機能で回生率が11.6ポイント向上し、約44%の回生率を実現できた。

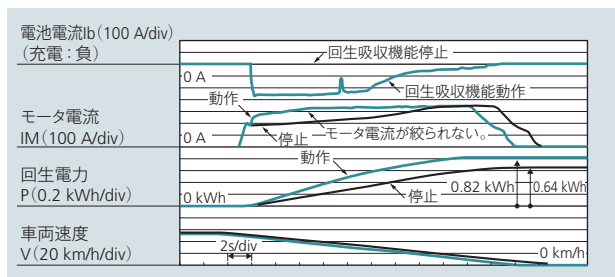


図6 回生吸収制御による回生電力向上

回生吸収機能動作時は、電車線に戻せない回生電力を蓄電装置に充電するため、モータ電流はほとんど絞られない。

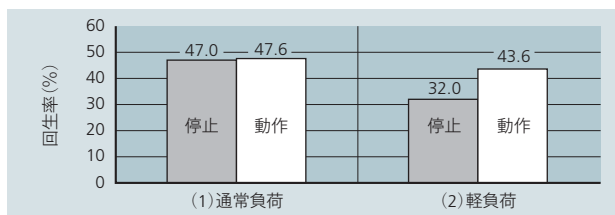


図7 回生吸収制御による回生率向上効果

本線試験では、軽負荷状態の条件を模擬した。この装置の回生吸収機能で回生率が11.6ポイント向上し、約44%の回生率を達成した。

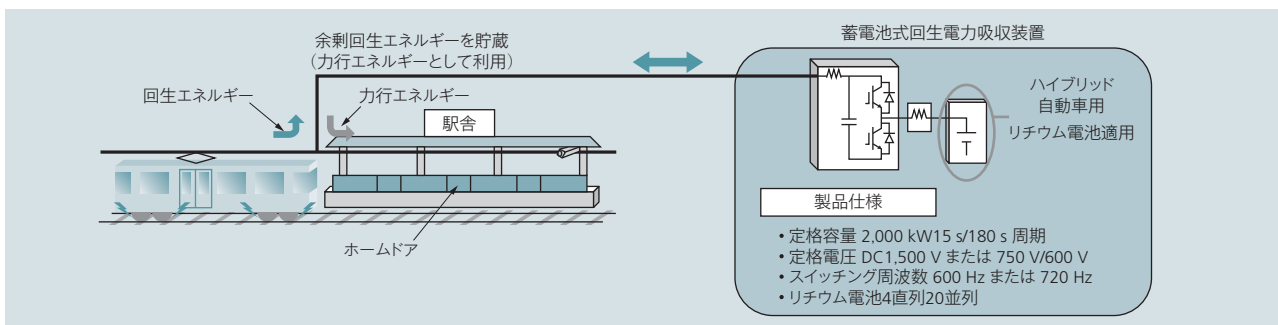


図8 地上設置タイプの蓄電池式再生電力吸収装置  
地上に蓄電装置を設置し、利用しきれない回生電力を吸収する。



図9 神戸市交通局納め蓄電池式再生電力吸収装置の外観  
年間385 MWhの省エネルギー効果を確認した。

### 3.3 地上設置「B-CHOPシステム」

#### 3.3.1 B-CHOPシステムの概要

地上に蓄電池式再生電力吸収装置を設置した場合のシステムの一例を図8に示す。車両設置と同様に回生ブレーキのエネルギーを蓄電池に貯蔵し、加速時にそのエネルギーを利用する。き電電圧の安定化による回生失効防止対策などのほかに、き電電圧の安定化対策も実現できることが特徴である。

#### 3.3.2 納入製品の稼働状況

製品は神戸市交通局に納入し、現在稼働中である(図9参照)。長い急勾(こう)配が存在する区間に装置を設置することにより、年間358 MWhもの省エネルギー効果を実現した。

### 3.4 適用導入に対する支援

回生電力の有効活用を最大限にするためには、地上側および車両側システムのおのおのの特徴を生かした最適化が必要であり、そのためには種々のエンジニアリングが必要となる。車上および地上を含めて最適なりチウムイオン電池設置場所、装置容量、周辺システムとの協調などの検討、およびシミュレーション検証などの支援を行っている。

日立グループは、長年築いた車両技術および変電技術から、顧客ニーズに即した最適回生システムの導入に対する事前評価を行っている。実走行モデルによるシミュレータに関しては早くから支援ツールとして整備を行い、これを活用した数多くの提案を実施している。

## 4. おわりに

ここでは、車上および地上設置による回生吸収の特徴と効果について述べた。

路線状態によらずに、回生電力量を増大することで消費電力量の低減をめざす「高効率回生マネジメント」と、地上および車上設置による回生吸収のシステムについて、事業者からの要求に合わせて検証を実施した。今後、幅広い顧客ニーズに応えられる省エネルギーシステムとして機能整理を進め、鉄道システムにおける環境負荷低減を加速させていく所存である。

#### 参考文献

- 1) 徳山, 外: 環境負荷を低減するハイブリッド駆動システムの実用化, 日立評論, 89, 11, 830~833 (2007.11)
- 2) 大石, 外: 連続回生装置による離線時の回生失効防止, 第45回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号506 (2008)

#### 執筆者紹介



**嶋田 基巳**  
1995年日立製作所入社, 社会・産業インフラシステム社 交通システム事業部 水戸交通システム本部 交通システム開発センタ 所属  
現在, 車両用駆動制御システムの開発に従事  
日本機械学会会員



**大石 亨一**  
2006年日立製作所入社, 社会・産業インフラシステム社 交通システム事業部 水戸交通システム本部 車両電気システム設計部 所属  
現在, 電車駆動用インバータの設計開発に従事



**荒木 大二郎**  
2008年日立製作所入社, 社会・産業インフラシステム社 交通システム事業部 水戸交通システム本部 交通システム開発センタ 所属  
現在, 電車駆動用インバータの設計開発に従事



**中村 恭之**  
1990年日立製作所入社, 社会・産業インフラシステム社 交通システム事業部 輸送システム本部 変電システム部 所属  
現在, 鉄道変電システムのエンジニアリング取りまとめに従事  
電気学会会員