

鉄道の運転電力削減による カーボンニュートラル実現の取組み

Carbon Neutrality Initiatives by Reduction of Operating Power of Railway Vehicles

山下良範*
Yoshinori Yamashita
吉本剛生†
Koki Yoshimoto
石山琢麻‡
Takuma Ishiyama

金子健太§
Kenta Kaneko
秋原優樹§
Yuki Akihara

*交通事業部
†先端技術総合研究所
‡神戸製作所
§伊丹製作所

要 旨

近年、世界的にカーボンニュートラル実現への意識が高まっており、鉄道分野でもカーボンニュートラルに向けた取組みが進められている。

三菱電機は車両の省エネルギー技術として、SiC(シリコンカーバイド)適用の推進制御装置や高効率の全閉形電動機を実用化した。また、鉄道車両では世界初(注1)となる同期リラクタンスモーター駆動システム(Synchronous reluctance motor and inverter TRAction System : SynTRACS)を開発して-18%の省エネルギー効果を実証した。さらに、編成での補助電源系統の高効率化、走行パターンの改善、データ分析に基づいて地上・車上間で連携した消費電力削減、余剰回生電力の有効利用など、車両を中心に多様な省エネルギー技術を展開して運転電力を削減し、鉄道分野でのカーボンニュートラル実現への取組みを推進する。

(注1) 2022年11月10日現在、当社調べ

1. ま え が き

地球温暖化防止に向けて、先進各国は2050年までにカーボンニュートラルの実現を宣言しており、世界的に脱炭素化への意識が高まっている。日本では2030年度に2013年度比で温室効果ガス46%削減の高い目標を掲げており、これに向けた動きが活発化している。

鉄道は輸送効率が高く環境負荷が少ない輸送機関として期待されており、自動車や航空機から鉄道輸送に移行するモーダルシフトや、鉄道の更なる省電力化と脱炭素化のための技術開発が進められている⁽¹⁾。当社は長年、交通事業で培ってきた先進的な技術によってカーボンニュートラル実現に向けた取組みを推進し、安心・安全・快適で持続可能な豊かな社会の実現を目指している。

鉄道分野でのカーボンニュートラルの実現に当たっては、現状、鉄道事業者のCO₂排出量のうち電車走行用によるものが約7割を占めており、これを削減することが有効である(図1)。そこで、当社は電車走行時の省エネルギー施策として、SiC適用の推進制御装置や高効率の全閉形電動機を主回路システムに適用し、駆動時の効率向上や、回生電力量の増大による省エネルギー化を図ってきた。さらに地上設備では、駅舎補助電源装置(以下“S-EIV”という。)を開発して、余剰回生電力の有効活用を促進してきた。

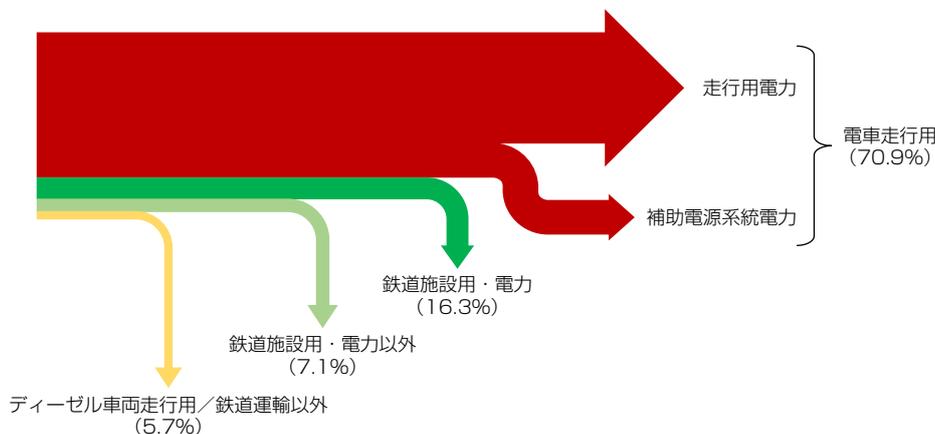


図1. 鉄道事業者のCO₂排出割合(2019年度)
(国土交通省鉄道局“鉄道分野のカーボンニュートラルが目指すべき姿”概要を基に作成
<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001611572.pdf>)

今後の更なるCO₂排出量削減のためには、これらの取組みの更なる進展に加えて、き電システムを俯瞰(ふかん)した現状把握・分析をベースに、鉄道システムを構成する各サブシステム間で連携した取組みが必要になる。当社は車両に搭載した電機品から取得されるデータを活用し、地上・車上間でデータを連携して、省エネルギー効果を更に高める取組みを進めている。

本稿では、鉄道分野でのカーボンニュートラル実現に向けて、車上システムに関連する省エネルギー技術として、主回路システムの技術革新を応用した高効率化や列車統合管理システムを用いた編成の機器効率向上、地上・車上間の連携による省エネルギー技術として、変電所送り出し電圧の調整による回生エネルギーの利用効率向上などの取組みを述べる。

2. 車上システムに関連する省エネルギー技術

車上システムに関連する省エネルギー技術としては、車両の駆動制御に直接関わる主回路システムや補器用電源である補助電源システムの高効率化を始め、編成全体として軽負荷時には稼働する機器を減らして高効率な領域で運転する方法、大量な実績ランカーブのデータ分析によって線区に応じた最適な省エネルギー運転パターンを作成する方法などが考えられる。

2.1 主回路システムの技術革新による省エネルギー化

主回路システムの省エネルギー技術として、当社は2012年2月に高効率な全閉形誘導電動機とハイブリッドSiCパワーモジュール(スイッチング素子にSi(シリコン)-IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を、フライホイールダイオードにSiC-Diodeを適用したハイブリッド構成のパワーモジュール)を適用したインバーター装置を組み合わせた主回路システムを世界に先駆けて^(注2)実用化し、営業線に投入した。このシステムでは、電力回生ブレーキが有効な領域の拡大や、高周波スイッチングでのモーター損失の低減など、主回路システム全体としての省エネルギー化に寄与している。

さらに、鉄道車両では世界初になる高効率な同期リラクタン্সモーター(Synchronous Reluctance Motor : SynRM) (図2)及びその駆動システム(SynTRACS)を開発した。SynRMは、鉄道車両の駆動用モーターとして普及している誘導モーター(Induction Motor : IM)に比べて、発熱損失が少なく、高効率であることが特長である。鉄道車両用の高効率なモーターとしては、永久磁石同期モーター(Permanent Magnet Synchronous Motor : PMSM)があるが、PMSMは強力な希土類(レアアース)磁石を回転子に内蔵しており、将来的にレアアースの入手性に懸念があること、また、惰行時に起電力が発生するため異常時を考慮してモーターごとに開放接触器が必要になり、回路構成が複雑になることなどの課題があった。

SynTRACSは、SynRMとSiC適用の駆動制御用インバーターで構成され、レアアースを用いずに世界最高レベルの高効率化を実現した。モーターの最大出力は450kWとし、モーター単体の発生損失は従来の高効率IMの50%に削減した。また、2.1.2項で述べる営業車両での省エネルギー効果の検証の結果、推進制御システム全体として、SynTRACSの消費電力は従来のIMシステムに対して18.1%低減できた⁽²⁾。このように、SynTRACSは今後の鉄道車両の省エネルギー化に大きく貢献するシステムである。

(注2) 2012年9月27日現在、当社調べ

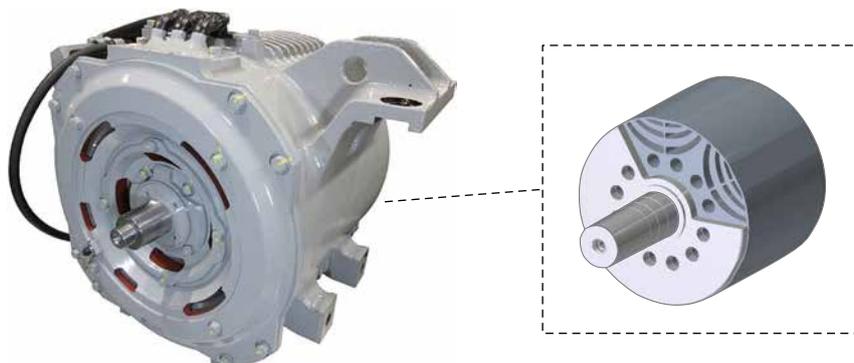


図2. 鉄道車両用SynRM及びモーター内部の回転子イメージ

2. 1. 1 SynTRACSの技術的特徴

先に述べたように、PMSMは回転子に希土類磁石を内蔵しており惰行時に起電力が発生する。一方、SynRMでは、回転子がIMと同様に鉄心だけで構成されるため、惰行時に起電力が発生せず、惰行時の取扱いはIM方式と同様で特段の考慮は必要ない。鉄道車両では、慣性が大きく走行抵抗が小さいため、駅出発後に加速して所定の速度に達すると、次駅停車前のブレーキ操作まで惰行することが多い。惰行時の誘起電圧対策や、駆動中のモーター内の磁束の変化で発生する鉄損を抑制する観点では、IM方式が有利とされている。一方、IM方式は、回転子導体へ通電が必要であり、回転子に電流が流れると巻線抵抗によって銅損が発生するため、原理的に効率面では同期モーター方式の方が有利である。SynRMは、このようなIMの利点と、同期モーターの高効率特性の両方の長を併せ持っている。

一般に、PMSMでは希土類磁石によって発生するトルクと回転子形状によるリラクタンストルクを合わせて回転力を発生させる。一方、SynRMはリラクタンストルクだけで回転力を発生させるため、鉄道車両の駆動用モーターとしての大容量化や、高トルクの可変速制御には多くの課題があった。そこで、①回転子鉄心形状の最適化、②SiC適用インバーターの特性の活用、という二つのアプローチによってこの課題を解決した。図3にSynRMの回転原理を示す。

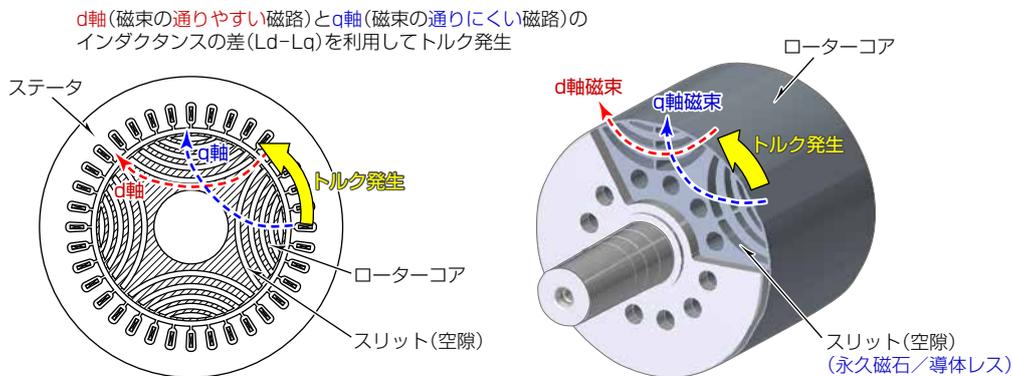


図3. SynRMの回転原理及び回転子イメージ

2. 1. 2 SynTRACSの省エネルギー効果の検証

SynTRACSを東京地下鉄(株)日比谷線13000系に搭載し、2021年12月から営業運行での使用を開始した。約1か月半の営業線走行での、SynTRACS搭載車の積算電力量を測定した。積算走行距離は11,157kmに及び、実消費の原単位は0.88kWh/(車・km)であった。SynTRACSの省エネルギー効果を確認するため、従来のIMシステムとの電力量の原単位比較を行った。各システムの搭載車系の車重が異なるため、車重を換算した比較を表1に示す。検証の結果、SynTRACSは従来のIMシステムと比較して、実消費で18.1%の改善になった。

表1. SynTRACSと従来IMシステムの原単位比較

| | 車重(t) (1両当たり) | 原単位(kWh/(車・km)) | | |
|---------------------------------|------------------|-----------------|------|------|
| | | 力行 | 回生 | 実消費 |
| SynTRACS 13000系試験搭載車両(車重換算後) | 33.31 | 1.58 | 0.81 | 0.77 |
| 従来IMシステム 9000系大規模リニューアル工事車両 | 29.25 | 1.87 | 0.93 | 0.94 |

18.1%の改善

また、SynRMの高効率特性を活用して冷却構造を簡素化することによって、従来のIMと比較して軽量化(-7.1%)、かつ大容量化(+11%)を実現した。さらに、SynRMは惰行時に起電力が発生しないため、PMSMで異常時を考慮して設置しているインバーターとモーター間の故障時開放用の接触器が不要になり、SynRMではシステムの簡素化が可能になる。

2.2 列車統合管理システムを用いた編成制御による省エネルギー化

2.2.1 補助電源装置の軽負荷運転時の機器効率向上

補助電源装置(以下“SIV装置”という。)の機器効率は負荷率によって変化し、一般に軽負荷時には定格負荷時と比べて機器効率が低下する。そこで、編成内に複数のSIV装置を搭載し、並列同期運転(三相出力電圧の振幅・位相を合わせる制御)を行う場合に、起動・停止が無停電で可能である特長を生かして、編成全体の負荷率に応じてSIV運転台数を調整し、軽負荷時でも高効率領域での運転を可能にする。

具体的には、軽負荷時にSIV装置の運転台数を減らすことによって、運転中のSIV装置の負荷率を上げて、編成としてSIV装置の機器効率を改善する制御方法である(図4、図5)。休止中のSIV装置は約1秒で並列運転に復帰可能であり、急激な負荷変動にも対応可能である。また、列車統合管理システムが持つ他のSIV装置や負荷機器の動作情報(空調の冷暖房負荷や空気圧縮機の動作状況)をこの制御に用いることによって、きめ細かな休止・運転制御が可能になる。

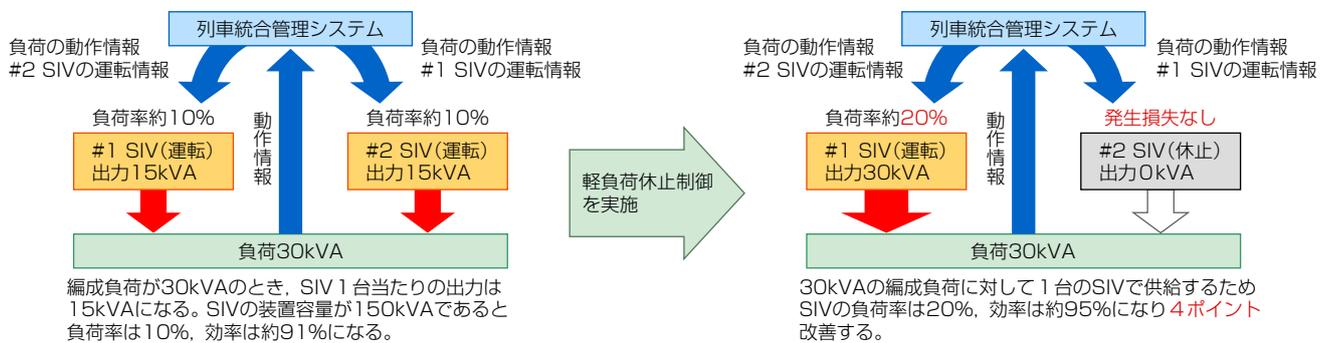


図4. 編成内のSIV装置の軽負荷休止制御による機器効率向上

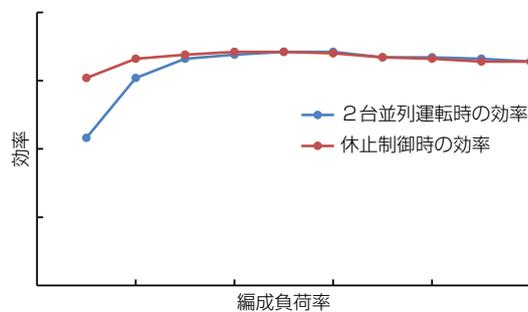


図5. SIV装置の2台並列運転時と休止制御時の効率比較

2.2.2 ATO運転での低引張力行走時の電動機効率向上

近年、多くの鉄道事業者でATO(Automatic Train Operation)運転が導入されているが、ATO運転では列車が目標速度に到達すると一定速度を保つために定速バランス走行制御が適用されることが多い。定速バランス走行中は走行抵抗や勾配の影響を打ち消す程度の低い引張力で走行し続けることになり、ATO運転では通常の手動運転に比べて、低い引張力で走行が多くなる。主電動機の効率は引張力の大きさによって変化し、一般に引張力が高いほど高効率になる特性であるため、ATO運転中の各主電動機は低効率領域で動作することが多くなる。

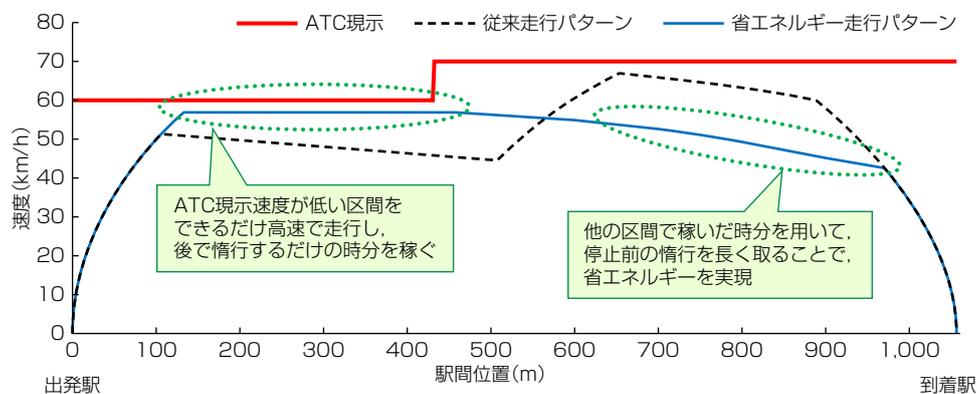
そこで、編成内の特定のM車(電動車)又はM軸(駆動軸)の電動機を選択して稼働させる制御(M車/M軸選択制御)を適用することで、編成として電動機の効率向上を図る。M車/M軸選択制御は、低い引張力指令を受けた場合に編成内の一部の主電動機の動作を停止し、編成全体の合計引張力が変わらないように、その他の主電動機の引張力を大きくする制御である。これによって、主電動機を高効率領域で動作可能になるため、全主電動機を動作させる場合に比べて、消費電力の低減が実現できる。

2.3 走行パターンの最適化による省エネルギー化

惰行などを有効活用して列車走行パターンを最適化することで、同一駅間走行時分でも消費電力量を大きく削減できることが知られている。当社でもATO走行パターンを最適化することで、大きな省エネルギー効果が生み出せることを実路線で確認している⁽³⁾。一方で、鉄道事業者が省エネルギーを目的とした走行パターン修正に投資判断するためにはデータの裏付けが必要になるが、そのデータ取得・分析には大きな労力が必要であった。しかし、クラウドを経由した車上データ収集が実現された現在では、大量なデータの収集・分析が容易になっている。当社で多数の実列車データに対する可視化・分析を実施した結果、次の二つの知見が得られた。

- ①ダイヤ乱れがなくてもATO回復モード(制限速度の範囲内で走行時間を極力短くするモード)を選択するケースがある。
- ②一部の駅間で無駄な加速などがあり、走行パターンの改善の余地がある。

①では、回復モードで走行時分を2秒短縮するために、消費電力量が10%以上増加する駅間があり、運用や回復走行パターンの見直しが有効と考えられる。また、②については図6に示すように、走行パターンを省エネルギー運転を意図して最適化することで、15%もの消費電力量改善が見込まれる駅間があることが分かった。このように、車上データの可視化によって、有効な施策を少ない労力で適切に選定することが可能になる。



| | 駅間走行時分(秒) | 消費電力量(kWh) |
|--------------|-----------|-------------|
| 従来走行パターン | 88.0 | 12.5 |
| 省エネルギー走行パターン | | 10.6(15%削減) |

ATC : Automatic Train Control

図6. 走行パターンの最適化による省エネルギー化推進の実施例

3. 地上・車上間の連携による省エネルギー技術

2章では車上システムに関連する省エネルギー技術について述べた。以前から、車載機器の高効率化に加えて、ブレーキ時に発生する回生電力の利用効率向上によって消費電力低減を図ってきた。回生電力は負荷車の状況や架線電圧変動などの影響を受けるため、これらの状況を把握して対応することが重要になる。また、負荷車が少ない状況では、回生電力が列車の運転電力として十分に利用できない場合があり、余剰な回生エネルギーを駅設備で有効活用するための検討を進めている。

3.1 変電所の送り出し電圧や車両の回生絞り込み電圧の見直しによる回生電力の利用効率向上

回生電力の有効利用には地上側のき電系統や変電所での状況把握が重要になるが、一つのき電区間に複数列車が存在する場合、変電所内の測定項目だけでは列車間の電力融通の状況を把握することは困難である。そこで、架線電圧など車両側で測定可能なデータ(車上データ)を用いることで、これら電力の状況を把握し、き電系統全体での最適化が可能になる。ここでは、車上データ分析に基づく変電所の送り出し電圧の最適化と回生電力の有効活用について述べる。

図7に架線電圧と力行車(力行中の車両)・回生車(回生中の車両)の電力融通の模式図を示す。変電所からの送り出し電圧が高い場合、回生時には架線電圧が一定値以上に上昇しやすくなり、回生車では過度な電圧上昇を避けるために回生電

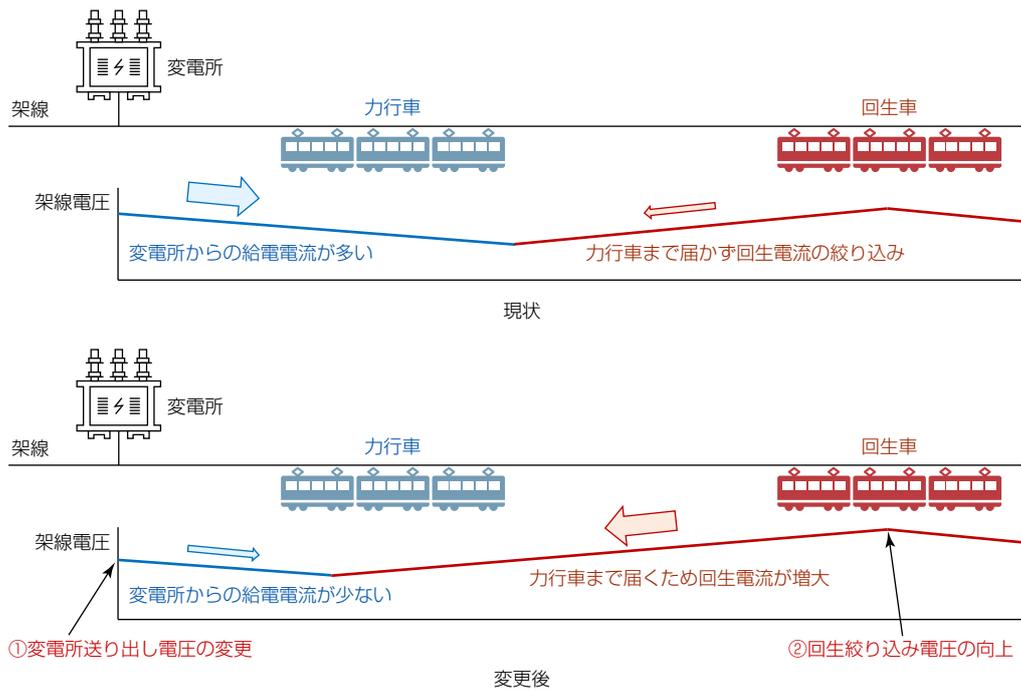


図7. 架線電圧と力行車・回生車の電力融通の模式図

流を絞り込んで、回生電力が少なくなる。同時に、力行車には回生車から供給される回生電力が少なくなるため、この分、変電所から供給する電力が増加することになる。このように、架線電圧や回生車の絞り込み特性の影響によって回生電力は増減する。ここで、車上で収集される架線電圧や回生電力の状況などのデータを分析することで、き電システム全体での運転電力の削減策の検討や効果の検証が可能になる。

運転電力の削減策としては、変電所の送り出し電圧を下げたり、回生絞り込み電圧を上げたりすることによって、回生車からの回生電力の供給範囲が拡大し、回生電力の利用率向上が期待できる。一方、変電所の送り出し電圧を下げることで、架線電圧が下がって、車両性能が低下して力行時間が増大する可能性もある。これは、車両側の機能として、力行時に架線電圧が規定値より低下すると、入力電流を制限して編成出力を抑えるためである。さらに、架線電圧を下げた際、車両は力行性能を維持するために架線電流が増大し、架線での電力損失が増大する懸念もある。このため、不必要に架線電圧を下げることは避けるべきであり、変電所の送り出し電圧の下げ幅については現状の車上でのデータを見極めた上での対応が必要になる。

3.2 駅舎補助電源による余剰な回生電力の有効活用

余剰な回生電力を吸収する省エネルギー設備であるS-EIVの設置検討に当たって、車上データを活用した取組みを行っている。特定期間での車上データから車両運転電力量、車両のパンタグラフ電圧を分析して、余剰回生電力量の発生状況を見える化し、回生絞り込み電力量の多い駅間を評価し、S-EIV設置場所の候補地として選定する(図8)。

車上データは当該区間を走行する全ての車両からデータを取得し、分析することが理想的であるが、現状、全車系のデータは取得できないため、全運行本数に対する取得割合を把握した上で検討している。実績として25%程度のデータでも各駅区間での余剰電力の傾向が把握できることを確認しており、路線内で余剰な回生電力の有効利用に適した設置候補地の選定材料になる。今後、車上データが取得できる車両が順次増加していくことで検討精度は向上していくと考えられる。

この検討で設置候補地を選定した上で、実際の省エネルギー効果を定量的に把握するため、導入効果実測機器(図9)を用いて導入効果を実測している。実測機器は屋外設置できるDCPT(Direct Current Potential Transformer)箱と導入効果測定箱で構成し、DCPT、S-EIV演算部、監視制御箱は実機と同一の機器を使用して、S-EIV実機と同等の構成で実測を行う。実測は最低9日間行い、平日・休日の平均から月平均を算出し、月平均から季節係数を乗じて年間回生電力量を推定する。実機導入前に実測による省エネルギー効果が評価可能であるため、S-EIVのスムーズな導入によってカーボンニュートラル実現を加速化させる。

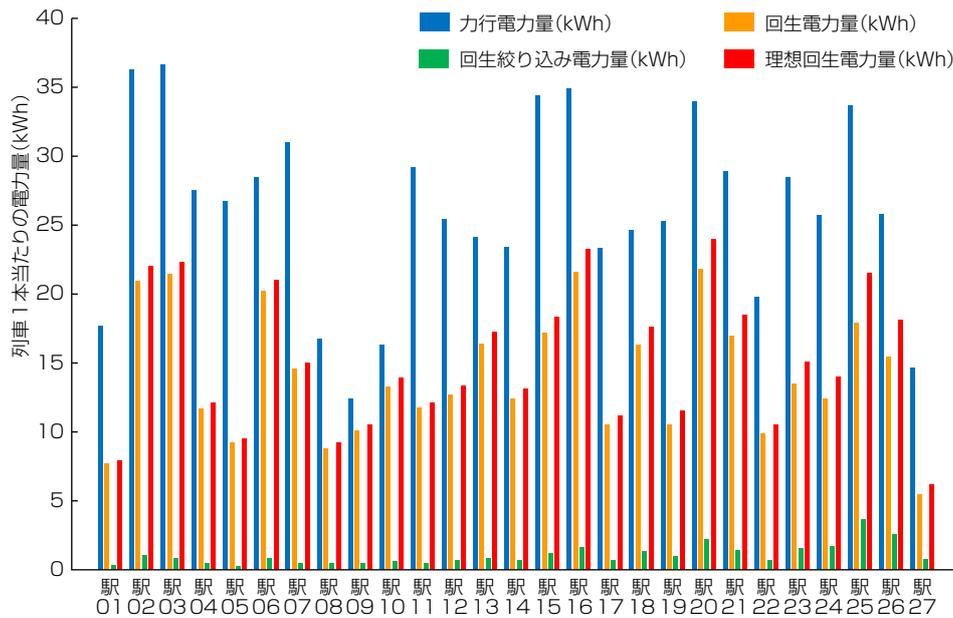


図8. 駅間ごとの力行・回生電力量の車上測定データ

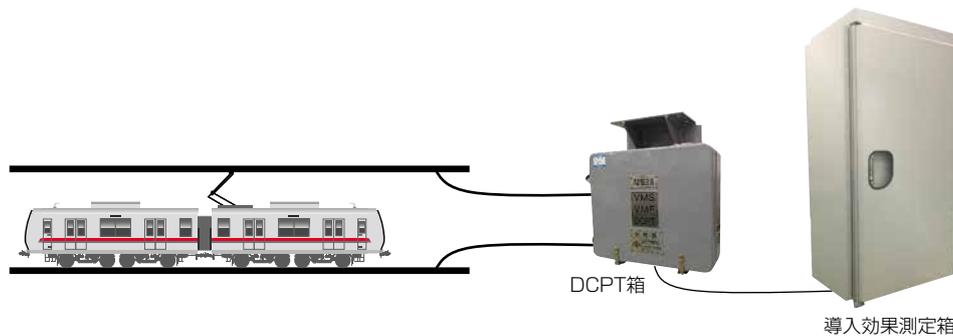


図9. 省エネルギー効果の導入効果実測機器

4. む す び

カーボンニュートラル実現への取組みとして、鉄道事業者でCO₂排出量の7割を占める電車走行用の電力削減を達成する様々な技術を述べた。鉄道車両の車上システムとして、これまでのSiC適用の推進制御装置に加えて、世界最高レベルの高効率化を実現するSynTRACSを開発し、消費電力量が従来のIMシステムと比較して、18.1%の改善になることを営業運用で確認した。また、補助電源系統では、並列同期運転時に編成全体の負荷率に応じてSIV運転台数を調整することで、高効率な運転が可能になる。さらに、省エネルギー編成制御として、特定のM車又はM軸を選択して稼働させる選択制御によって、主電動機を高効率領域で動作可能にして、編成全体の効率改善に寄与することが可能になる。

車上システムだけでなく、地上側のき電系統や変電所の最適化を図るため、車上データを用いることで、変電所の送り出し電圧の最適化と、駅舎補助電源の最適配置による回生電力の有効活用策について述べた。

今後は、更なるCO₂排出量削減に向けて、き電系統を俯瞰した現状把握・分析によって、システム間で連携した取組みが必要不可欠になってきている。当社は車両に搭載されている電機品から取得されるデータを活用し、省エネルギー効果を一層高める施策を展開することで、鉄道分野でのカーボンニュートラルの実現に向けて貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 国土交通省：鉄道分野のカーボンニュートラルが目指すべき姿（2023）
<https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001611767.pdf>
- (2) 友松白英，ほか：同期リラクタン্সモータシステムの開発，第59回鉄道サイバネ・シンポジウム，503（2022）
- (3) 金子将大：ATO制御の改良による省エネ性と停止精度の向上，JREA，59，No.5（2016）