

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

鉄道の新しい電力技術



池田 充
Mitsuru Ikeda
電力技術研究部
部長

[専門分野] 架線・パンタグラフ系の動的相互作用, 集電系騒音

鉄道が持続可能な交通機関であり続けるために、今世紀後半におけるカーボンニュートラルの実現に向けて鉄道が他の輸送機関に率先してさらなる低炭素化を推進するとともに、日本の特殊事情である今後の急速な人口減少への適応をすることが求められています。そこでここでは、電力で運行する鉄道（電気鉄道）について、これら二つの課題を克服するために鉄道総研が行ってきた技術開発、あるいはこれから取り組むべき技術課題について俯瞰的に述べたいと思います。

鉄道をとりまく環境

2015年9月の国連サミットにおいて、「持続可能な開発目標（SDGs）」として17のゴールを定めた「持続可能な開発のための2030アジェンダ」が採択されました。これを受け、2016年12月には日本政府により持続可能な開発のための8つの優先課題が定められました。そのうち、これからの鉄道経営に最も影響するものは「省・再生可能エネルギー、気候変動対策、循環型社会」だと思われます。地球規模の気候変動を抑制するためには、今世紀後半

には人為的な温室効果ガスの排出を実質ゼロとすること（カーボンニュートラル）が必要であるとされており、日本政府は2050年までの目標として温室効果ガス排出量80%削減の達成を掲げています。

国土交通省によれば¹⁾、2017年度における鉄道の旅客輸送量当たりの二酸化炭素排出量は19g-CO₂/人kmなのに対し、自家用乗用車は137g-CO₂/人km、航空は96g-CO₂/人km、バス56g-CO₂/人kmとされており、鉄道は他の輸送モードに対して環境にやさしい交通機関であると

いえます。その理由の一つとして、鉄道では100年以上も前から電動化を進めてきたことがあげられます。列車に電力を外部から供給して運行する鉄道を、一般に電気鉄道と称します。電気鉄道では、走行中の車両はCO₂を排出しません。列車の運行に必要な電力をつくる（発電する）際のCO₂排出量についても、火力発電のエネルギー効率に比べて高いうえ、再生可能エネルギーによる発電であれば実質的なCO₂排出はゼロです。

しかし、自動車でも環境性能の高い

表1 鉄道の炭素排出削減に向けた施策

	省エネルギー	エネルギーマネジメント	リサイクル・リユース	ピークカット・変動再生可能エネルギー活用	その他
車両	<ul style="list-style-type: none"> ・ 車体軽量化（マグネシウム合金製車体、FRP製台車枠、構体の最適設計） ・ 車体空気抵抗低減 ・ 軽量・高効率電動機 ・ 軽量・高効率主回路 ・ トランスレス電力変換装置 ・ 超電導主変圧器 ・ 高効率空調システム 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 全電気ブレーキ ・ 回生絞り込みゼロ ・ バッテリー搭載型車両 	<ul style="list-style-type: none"> ・ すり板、ブレーキライニングのリサイクル ・ アルミニウム製車体のモノアロイ化 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ソーラー電車 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 貨物輸送のモーダルシフト促進
電力供給設備	<ul style="list-style-type: none"> ・ 上下タイキ電 ・ 超電導き電ケーブル ・ 高電圧き電 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 電力貯蔵装置による回生電力回収 ・ 超電導フライホイール蓄電装置 ・ 駅舎用回生インバーター ・ 可変リアルトルによるき電用整流器の電圧制御 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高強度銅合金製トロリー線（複合トロリー線の代替） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ネガワット活用のための蓄電システム ・ 運用間合いにおける車両搭載蓄電装置の活用 ・ 電鉄用き電線を用いた再生可能エネルギーの託送 	
列車運行管理	<ul style="list-style-type: none"> ・ 省エネランカーブ ・ 省エネダイヤ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 電力デマンド制御 			

車へ移行する動きが急速に進んでいます。つい最近、トヨタ自動車は2025年に世界で販売する車両の約50%を電動車とするという目標を公表しています。また、航空機や船舶でも電動化の動きが始まっており、たとえばノルウェーでは、2040年までに国内を発着する短距離路線の全便をすべて電動航空機に切り替える計画が発表されています。こうした状況のなか、各鉄道事業者ではCO₂排出量の削減目標を定め、その達成に向け

さまざまな取り組みがなされていますが、カーボンニュートラルの実現は容易ではなく、さらなる技術革新が必要です。

こうした国際社会の流れとは別に、日本の特殊事情である人口減少もまた鉄道に対して大きな影響を与えています。とくに、人口減少にともなって生じる人口の低密度化と地域的偏在の進行とが、長大なインフラ設備を有する鉄道に深刻な影響を与えるものと思われまます。国土交通省によれば²⁾、2050年には全国の約半数の地域で人口が50%以上減少する(2015年比)と予測されています。こうした状況下では、これまで100年以上かけて構築してきた鉄道の電力供給設備を今までと同じ方法で維持・管理することは困難だといわざるをえません。

そこでここでは、脱炭素化を図りつつ人口減少時代に適合するために求められる、鉄道の電力設備に関わるこれからの技術開発について概観してみたいと思います。

電気鉄道の脱炭素化に向けた技術開発

地球温暖化の抑止は待ったなしの課題ですので、実施可能な施策を総動員

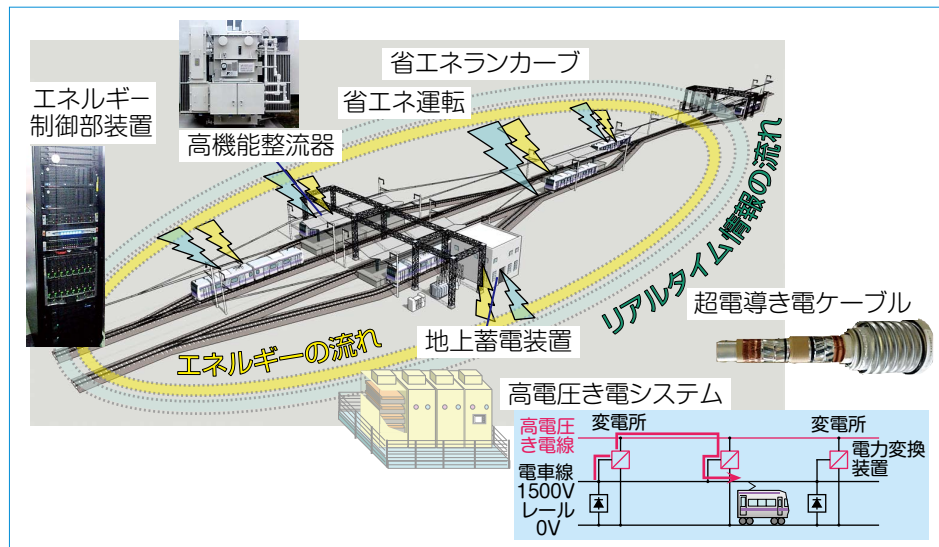


図1 鉄道のエネルギーネットワーク

してカーボンニュートラルの早期実現を図ることが求められています。そこで、電気鉄道のさらなる炭素排出量削減を実現するために考えられる戦略を表1にまとめてみました。

列車運行に要するエネルギーの低減、すなわち省エネは、炭素排出量削減の基本的戦略です。車両の軽量化は列車走行に要するエネルギーの低減に直結するため、鉄道総研ではアルミニウムに対して比重が30%以上小さい難燃性マグネシウム合金を車両構体に適用するための研究をメーカーなどと協力しながら進めています。また、車両に電力を供給する電車線路が持つ電気抵抗はエネルギー損失を発生させるため、電気抵抗ゼロのき電線を実現することのできる超電導き電ケーブルの開発を進めています。

ところで、電気鉄道が他の交通機関と大きく異なる特徴のひとつとして、電力供給設備と移動体である車両とが電力の流れに関してひとつのネットワークを形成していることがあげられます。これは、電力供給設備と車両を合わせたシステム全体としてのエネルギーマネジメントが可能であることを意味しています。鉄道ではブレーキ時に発生するエネルギーを電気エネ

ギーに変換し、電車線を介して他の列車の走行に活用する回生ブレーキが早くから実用化されています(日本では1930年代に実用化)が、これも電力供給設備と車両とがひとつのネットワークを構成していたからこそ早い時期での実用化が可能でした。ご承知のように、エネルギー供給に関して閉じたシステムである自動車において回生ブレーキが実用化されるには20世紀末まで待たなければなりません。

現在、回生ブレーキは在来線、新幹線を問わず広く普及し、鉄道の省エネに大きく貢献していますが、回生ブレーキがエネルギー回収に有効なためには、ブレーキにより生み出される電力を消費する車両が近くにいないとはなりません。もし、こうした車両がない場合には、自動的に機械ブレーキに切り替わり、ブレーキによって生み出されるエネルギーは熱として捨てられます。列車本数がそれほど多くない線区ではこうした状況が発生しやすいため、最近では変電所などに蓄電設備を設け、回生ブレーキにより生み出された電力を消費する列車がない場合には、これをいったん蓄電装置に蓄え、必要に応じて列車の駆動用電力として利用する装置の導入が進められています。

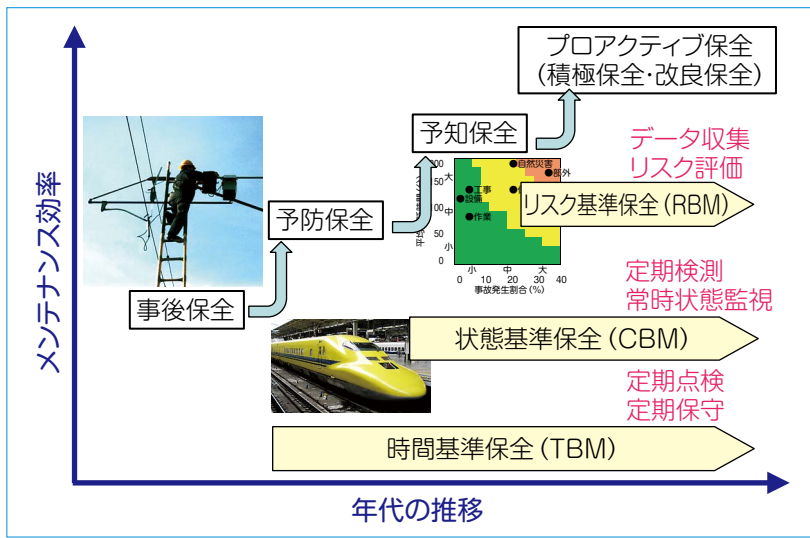


図2 大規模設備の保全手法の推移

しかし、電力供給のためのネットワークをより積極的に活用すれば、さらなる省エネ効果が期待できます。そこで鉄道総研では、エネルギーネットワークによる省エネ化に関わる研究プロジェクトを進めています。エネルギーネットワークとは、従来の電力供給ネットワークに対して、各変電所や各列車の情報をリアルタイムに相互に共有するための情報ネットワークと、これのリアルタイム情報を基にして列車運行と使用電力を予測し、エネルギーの流れを制御する制御部、そしてリアルタイムに電力を制御する電力機器を付け加えたもの(図1)です。エネルギーネットワークを実現し、高度な電力エネルギー制御を行うことにより、さらなる省エネ化の実現を目指して研究を進めています。

エネルギーネットワークの頭脳に相当する制御部には、列車運行に関わる電力消費を正確に評価・予測することが求められます。そのプラットフォームとして列車運行電力シミュレーターを開発しています。車両、き電回路、運行計画、線区条件などさまざまなデータをもとに、各列車の集電電流や架線電圧、位置、速度を評価すると同時に、各変電所のき電電流、き電電圧の時間的推移を評価することができます。そのうえで、より省エネとなるように電力の流れを制御します。

電力の流れの制御にはさまざまな方法が考えられます。鉄道総研では、本特集号で別途紹介するように、直流用整流器の送り出し電圧を制御する可変リアクトルや、超電導磁気軸受フライホイールなどの開発を進めています。また、き電線を高電圧化し、電力変換装置により電車線と接続することによって、き電損失の低減を図る直流用高電圧き電システムの開発にも取り組んでいます。さらに、各列車をあらかじめ定めたダイヤやランカーブどおりに運行するのではなく、省エネを実現するためある程度柔軟な列車運用を行う方法の検討も行っています。

もう少し広い視点で見れば、鉄道の電力供給設備は電力会社が構築したもっと大きな送配電ネットワークの負荷でもあります。日本全体の発電における再生可能エネルギー比率を高くすることが低炭素化に大きく貢献しますし、当然ながら鉄道起源のCO₂削減にも寄与します。そのためには、鉄道においてもエネルギー消費を太陽光発電や風力発電といった変動再生可能エネルギーの供給パターンに対してマッチングさせることが求められます。今後、こうした観点における研究開発にも積極的に取り組むことにより、鉄道の環境性能に磨きをかけることができると考えています。

人口減少時代に適合した電力設備の維持管理

図2は、設備の保全手法の考え方の推移を概観したものです。大規模設備の保全は、故障後の修繕作業を業務の中心とする事後保全から、定期的な検査・保守作業を中心とする予防保全へと移行し、現在では予知保全へ、さらにはプロアクティブ保全へと移行する取り組みが進められています。

予防保全とは、不具合発生の有無には無関係にあらかじめ定めた時間周期で点検、保守を行う時間基準保全を基本とする保全方法です。一方、予知保全は設備の健全度や性能を常時監視し、何らかの性能や機能の低下が認められた時点で点検・保守を行う状態基準保全を基本とします。これらに対し、最近では不具合が発生する根本的な原因・要因を可能な限り排除するとともに、排除できないものについては常時監視による状態基準保全を行うプロアクティブ保全が提唱され、普及しつつあります。また、設備の不具合にともない発生するリスクの大小を定量的に評価し、これに基づいて保全のタイミングを決定するリスク基準保全の考え方も浸透しつつあります。

電車線に関しては、パンタグラフが直接しゅう動するトロリー線に何らかの不具合があると大きな輸送障害を引き起こす可能性が高いことから、電気検測車によるトロリー線の状態監視を定期的実施し、問題箇所を抽出してメンテナンス指示を行う方式が1960年代から実施され、輸送障害防止に大きく貢献しています。これは、前述した予知保全に相当するといえるでしょう。しかし、電車線設備はトロリー線以外にもちょう架線やつり金具などさまざまな線索・金具から構成されていますが、現在の電気検測車で検査できるのはトロリー線に限られ、これ以外

の部材の状態監視は人間の目視に頼っているのが現状です。そのため、架線全体としてみれば予防保全が適用されている、といえます。変電所などの電力変換機器もまた、現状では予防保全が中心です。

近年のICT、IoTの発展とともに、設備状態を高頻度もしくはリアルタイムで監視することにより予防保全から予知保全に移行し、メンテナンス効率を上げることがさまざまな分野で期待されています。しかし、電力設備には高い電圧を常時かけられているものが多いうえ、とくに電車線に関しては部品点数が多いことから、設備の状態監視を確実かつ低コストで行うこと自体にまだ課題が多くあります。そこで鉄道総研では、電力設備のメンテナンスを予防保全から予知保全、さらにはプロアクティブ保全へと移行させるための研究開発に取り組んでいます。

前述のように、電車線設備に関しては大量のセンサーを密に設置して常時監視することは現実的とはいえないため、走行する車両からモニタリングを行うことが有効と考えられます。ただし、設備の健全度の指標となり得る動的状態量は、車両条件や走行速度などの影響を強く受けるため、最悪条件における動的状態量を把握することは容易ではありません。そこで、**図3**に示すデジタルツインの活用が有効と考えられます。これは、走行車両において架線の静的な3次元構造を精度よく計測してモデル化し、それをもとにさまざまな条件下における架線の動的挙動をシミュレーションにより評価することにより、今後発生する可能性のある不具合、たとえば疲労破断や大離線の発生などを事前に予測するものです。この実現に向け、電車線の非接触測定装置や、架線・パンタグラフ系の高精度なシミュレーションツールの開発などを

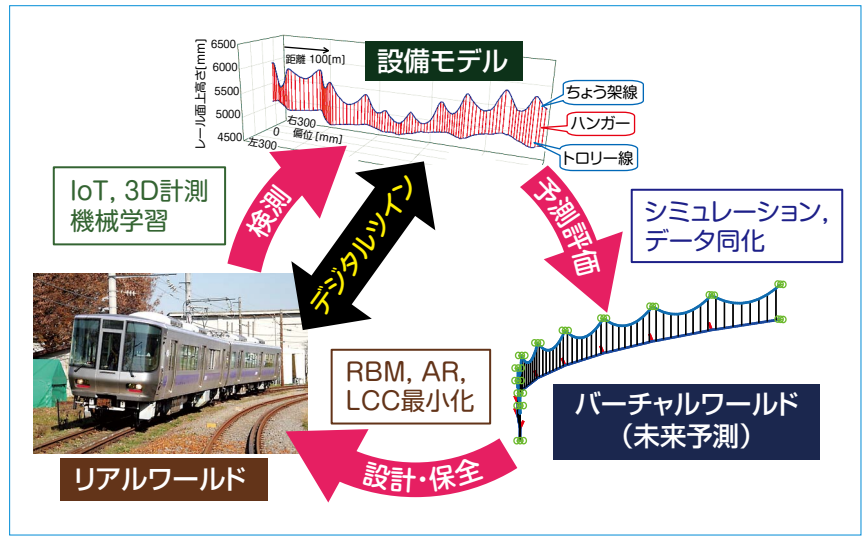


図3 電車線設備のデジタルツイン

進めています。

一方、変電機器は電車線設備に比べて数が限られる代わりに、劣化の早期検知が難しい機器が多いことが特徴です。そこで、これまでにさまざまなセンサー、検出方法の提案を行ってきましたが、劣化検出方法が多様化、複雑化しすぎると、システム全体としての運用コストや長期的な信頼性などの点で問題があることから、今後は変電機器に対するデジタルツインの適用も視野に入ってくるものと思われます。

プロアクティブ保全は、不具合の発生要因自体を排除することが本質です。本特集で紹介する、バッテリー搭載車両への非接触給電技術はその一例です。バッテリー搭載車両は、非電化区間における電動化を実現することにより低炭素化に貢献でき、すでに複数のJR会社で実用化されています。現在、非電化区間の折り返し駅において急速充電を行う必要がある場合には、駅に充電専用の剛体架線を設置し、停車中にパンタグラフを上げて充電する方法が採用されていますが、剛体架線の保守には高所作業をとまいます。車載蓄電池に対する高効率の非接触給電が実現できれば、高所作業をとまなメンテナンスが不要となり、保全業務の効率化が実現できます。このように、プロアクティブ保全の実現には従来とは

異なる発想や技術を必要とすることから、鉄道総研としても革新的な研究開発を通じてこれに貢献していきたいと考えています。

おわりに

鉄道が将来にわたって基幹交通手段であり続けるためには、他の輸送機関に率先してさらなる低炭素化を推進するとともに、日本の特殊事情である人口減少への適合を図ることが必要です。鉄道総研はこうした課題の解決に向け、今後も着実に取り組んでいきます。

なお、列車運行電力シミュレーターに関わる研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。**RRR**

文献

- 1) 国土交通省：運輸部門における二酸化炭素排出量, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html (入手日：2019/7/19)
- 2) 国土交通省：近年の人口動向について(平成27年国勢調査に基づくメッシュ別将来人口推計等について), <http://www.mlit.go.jp/common/001290828.pdf> (入手日：2019/7/19)