

電力技術に関する最近の研究開発

奥井 明伸*

Recent Topics on Power Supply Technology

Akinobu OKUI

Safety, environment, convenience and low-cost are important motivation for research and development of power supply technology. Railway Technical Research Institute has been conducting research and development, to improve the safety against earthquake, to reduce the environmental impact by improving the energy efficiency, to constructed of power system to contribute to the improvement of passenger convenience, to reduce maintenance cost. This report is described about recent research and development related to power supply technology in Railway Technical Research Institute.

キーワード：電気鉄道，安全性，環境，利便性，低コスト化，耐震対策，省エネルギー，計測

1. はじめに

我が国は世界でも有数の地震国であり、これまで鉄道構造物はもとより鉄道電気設備についても多くの耐震対策がなされてきた。特に1978年の宮城県沖地震以降、電気設備に関して耐震設計指針¹⁾が発行された他、1995年に発生した兵庫県南部地震では電車線設備の耐震対策として「電車線路設備耐震設計指針(案)」が発行されている²⁾。2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震では電車線設備が被害を受けたことは記憶に新しいが、大規模地震対策にとどまらず中規模地震等で生じる電気設備の軽微な損傷等を防止することも視野に入れた総合的な耐震対策の実施は、安全で信頼性の高い公共交通を実現する上で重要である。また、地震以外においても高速鉄道網の発展、高密度輸送が期待される都市近郊鉄道網の発展のためには、車両、地上設備等の「安全性」の確保は必須であり、そのための技術開発が今後ますます重要になる。

一方、日本国内のエネルギー消費については、1973年のオイルショック以降、「エネルギーの使用の合理化に関する法律(省エネ法)」(1979年)に基づくエネルギー管理や官民を挙げた様々な取り組みにより、30%を超えるエネルギー消費効率の改善を実現した。さらに、2005年には、京都議定書目標達成計画の策定に伴い、省エネ法改正に基づく対策強化が進められた。2006年4月から改正省エネ法が施行されたのに伴い、運輸部門においては一定規模以上の輸送事業者及び荷主については、省エネ計画の策定とエネルギー使用量の報告が義務付けられた。今日、鉄道においても、太陽光発電に代表される再生可能エネルギーを利用した省エネルギー技術の導入も

進められており³⁾、今後、ますます「環境」に配慮したシステム構築が必要になる。

他方、急速に進む少子高齢化は、労働力人口の減少を生んでおり、厚生労働省は「女性や高齢者の労働力が上昇をする前提で試算しても人口の減少は避けられず、長期的には女性や高齢者の労働力率の上昇にも限界があるため、将来の労働力人口の減少幅は大きくなる」と見ている。国内全体として女性や高齢者の就労が促進されたとしても、労働環境の厳しさ等から就労が進みにくい分野においては、労働力不足が深刻化する可能性があり、労働人口減少の影響を緩和し、産業や経済の活力を維持する等の観点から、外国人労働者の受入れ拡大に関する議論も高まっている。鉄道においてもこうした労働力確保の課題は避けられず、将来の労働力人口減少は間接的に設備の維持管理に要する経費の増大につながるため、「低コスト化」を考慮に入れた省力化技術の確立が急務である。

また、2005年に国は、都市鉄道のネットワークが拡充されている現状において、そのネットワークを有機的に活用して都市鉄道の機能の高度化を図る目的で「都市鉄道等利便増進法」を定めた。これは、都市鉄道施設の整備等を促進し、都市鉄道等の利用者の利便を増進することを目的としたものであるが、異なる鉄道事業者で構成される鉄道網を利用者の「利便性」向上という観点から設備改善していくことも重要である。それには、異なる軌間の鉄道事業者間の運行方式や、異なる電気方式・信号方式を繋ぐシステムの構築を必要とする。

以上の「安全性」、「環境」、「低コスト化」、「利便性」の4つのキーワードを研究開発の動機と位置づけ、当研究所の研究開発課題の枠組みのひとつである「鉄道の将来に向けた研究開発」の中から、電力技術に関する最近の

* 電力技術研究部 部長

特集：電力技術

研究開発課題について、それぞれの実実施計画、実施状況、成果等について概説する。

2. 電力技術に関する研究開発

鉄道総研で2011年度に実施した電力技術に係わる研究開発課題を、安全性、環境、利便性、低コスト、という4つのキーワードで分類したものを図1に示す。一方で、鉄道総研では、多くの研究開発課題を「鉄道の将来に向けた研究開発」、「実用的研究」、「基礎的研究」に区分して研究開発を進めているが、このうち「鉄道の将来に向けた研究開発」課題は、鉄道の持続的発展のために将来必要となる技術課題を解決することを目的としており、それぞれ複数の課題で構成されている。「実用的研究」は、鉄道事業者に即効性のある実用的な技術開発成果を提供することを目的としている。「基礎的研究」は実用技術の萌芽または基盤となる研究課題で、鉄道固有現象の解明、事象のモデル化、評価法の確立、新しい技術・材料・研究手法の適用等を目的としている。

「鉄道の将来に向けた研究開発」課題の中で2014年度までに実施または計画されている電力技術に係わる研究開発課題を以下に示す。

- (1) 地震に対する安全性向上
 - 電車線構造物の被害軽減方法の開発
- (2) 電力の新供給システム
 - 低ロス半導体素子の電鉄への適用の研究
 - 自然エネルギーを利用した電力システムの構築
 - 蓄電技術の開発
 - 超電導き電ケーブルの開発
 - 高電圧直流き電方式の研究
 - 新供給システムの構築と運転電力シミュレータによる評価
- (3) 新しい状態監視保全技術
 - 画像による架線系の検査と異常検出
 - 架線・パンタ系に係わる動的挙動予測の高精度化

- 電車線状態診断手法改良

2011年度に実施した研究開発課題の中で「実用的研究」に分類される研究開発課題は図1に示す11件である。これらは、2009～2011年度に開始され、2～3年の研究開発期間を経て終了する。なお、2012年度には、新たに安全性と低コスト化に係わる4件の研究開発課題を設定した。一方、2011年度に実施した研究開発課題の中で「基礎的研究」に分類される研究開発課題は、図1に示す3件である。これらは、2009年度または2010年度に開始され、3年の研究開発期間を経て終了する。なお、2012年度には、新たに安全性と低コスト化に係わる2件の研究開発課題を設定した。

3. 地震に対する安全性向上

地震に対する電力設備の安全性向上対策として、既設・新設の電車線構造物の耐震対策の検討、要注意箇所抽出手法・診断手法の検討を行う計画である。具体的には電車線路の三次元運動解析による要注意箇所の抽出・診断ならびに対策法の提案を行う。

電車線や電柱等の電車線路設備の各構成部材について、荷重・変位特性や固有周期などの機械特性を試験測定により求め、3次元で運動可能なようにモデル化し、想定地震動に対する3次元運動解析を実施している。

解析結果により、被害要因となることが明らかになったき電線等の支持点近傍の曲げ変形や、曲線引金具の圧縮接続箇所などに対して、具体的な強度向上策等を検討し、対策品の開発を行っている。また、き電線等の鋼心アルミより線(ACSR)化、および電車線支持物の門型化を実施する対策案を提案し、新幹線の標準的な装柱について耐震性能が向上することを確認している。さらに、3次元運動解析は、既存設備について対策を実施すべき箇所の選定にも用いることができ、電車線路を構成する各部材の強度協調をはかりながら、耐震性の向上を効果的に実施することが可能である。

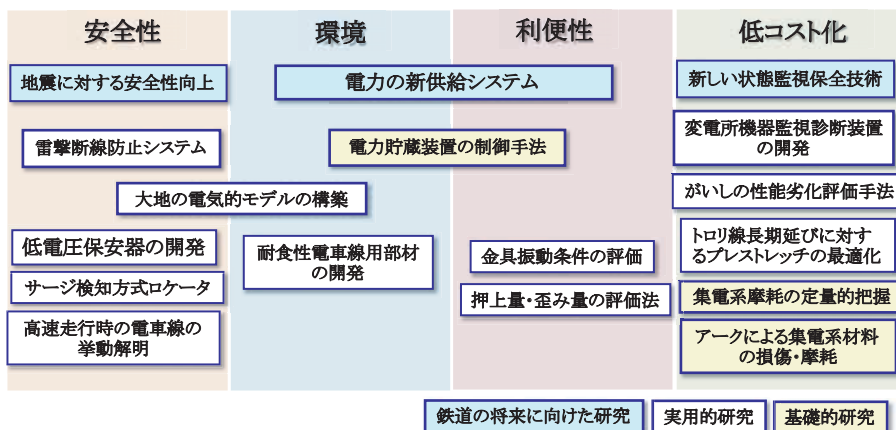


図1 鉄道総研の電力技術に係わる研究開発課題 (2011年度)

巨大地震に対する安全性を議論する場合には、現行の設計地震動を超えるような大振幅の揺れはもちろんのこと、長周期成分や長継続時間の揺れに対して注意を払う必要がある。また、本震はもちろんのこと、続く余震群に対しても安全性を確保することが要求される。そこで、電車線柱の塑性域における特性を考慮した応答解析（交番載荷試験等）を行い、電車線支持物の合理的な耐震性評価手法の提案ならびに既存の電車線柱に対する健全度診断手法の提案を行う。また、現有する電車線構造物の耐震余裕度や残存耐力を適切に評価し合理的な安全性の評価方法を開発することに加え、新しい対策工法を提案する予定である。

4. 電力の新供給システム

低炭素社会の実現に向けた取り組みとして電気鉄道のエネルギー効率の改善を目的に「電力の新供給システム」で幾つかの課題を実施する。具体的には、送電損失の低減を目的とした超電導き電ケーブルの開発や電車線電圧の高電圧化に必要な要素技術の開発を進めるとともに、太陽光発電等の自然エネルギーの導入や蓄電技術（電力貯蔵装置）の確立、分散化された電源設備の最適な制御手法について検討を行う（図2）。

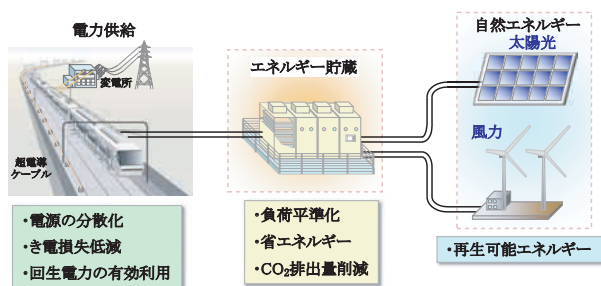


図2 将来の電力供給システム（イメージ）

4.1 超電導き電ケーブル

現在、超電導ケーブルは電力の送電用として実用化に向けた開発が進められており、鉄道総研でも直流電気鉄道への適用を検討してきた。大電流の供給を必要とする直流電気鉄道は、電圧降下対策や回生失効対策を必要とする場合があり、これまでもき電線の増強（太線化、多線条化）やき電区分所の設置、回生インバータの設置等の対策がとられてきた。超電導き電ケーブルはこうした課題に対して有効であり、併せてき電損失の低減に寄与する。また、超電導ケーブルをき電線へ適用することによって、損失低減や電圧変動の抑制が図れるだけでなく、レール電位低減による電食防止効果も期待できる。現在、冷却システムを含めて連続通電で直流1500V、5kAを満たすケーブルの開発を進めている⁴⁾。

4.2 高電圧化

直流電気鉄道は、交流電気鉄道に比べてき電電圧が低いため、ピーク電力の増加は、許容値を上回る電車線路の電圧変動を生じさせる他、き電用の直流高速度遮断器の容量不足、運転電流が故障電流を上回ることでの故障検出の制限といった保護上の課題を生んでいる。こうした課題を解決するためのひとつの手段として、1,500Vの直流電圧を5,000V程度まで高電圧化することが有効である。しかしながら、3,000Vを上回る高電圧化は試験的に行われた以外は実用化の実績がなく、電気車の駆動装置の改良、電車線路の絶縁の確保、高電圧に対応する直流高速度遮断器の開発、既設設備を高電圧化するための移行手段等、幾つかの課題を解決する必要がある。

これらの課題のひとつとして、高電圧に対応可能な直流高速度遮断器の開発を進めている。高電圧化を行う上で、絶縁の確保と短絡故障時等の大電流の高速度遮断は必須の技術であるが、現在使用されている直流高速度気中式遮断器や、近年使用され始めた真空バルブと転流回路を組み合わせた直流高速度真空遮断器は、耐圧や性能上の制限からそのまま高耐圧化することは困難である。そこで、SiC（炭化ケイ素）やGaN（窒化ガリウム）等の低損失な半導体デバイスの実用化を想定した半導体遮断器の開発を行っている。過去にゲート・ターン・オフ・サイリスタ（GTOサイリスタ）を用いた遮断器の実用化事例はあるが、今後開発される半導体デバイスの多くは高速スイッチング性能を有している可能性が高いことから、遮断時の急激な電流変化に伴う過電圧を制限するための技術開発が必要になる。なお、SiC等を用いた高耐圧な半導体デバイスは現在、実用化されていないため、電流遮断特性の類似したIGBT等を用いた遮断器により原理や性能等の検証を行う計画である。

4.3 電力貯蔵装置

今日ではリチウムイオン電池をはじめとする二次電池や、電気二重層キャパシタ、フライホイール等を用いた電力貯蔵装置の開発が進み、特に、電車線路の電圧降下対策、電気車の回生失効対策、変電所で使用する電力のピークカット、省エネルギー対策等を目的に使用されている。

従来、電力貯蔵装置の充放電に関する制御は、予め設定した充電・放電開始電圧と電車線電圧を比較することによって行われていたため、充電状態が偏ることが多く、電圧降下対策と回生失効対策を両立させることが難しかった。現在、充電・放電開始電圧や入出力電流の大きさを、電力貯蔵媒体の充電状態に応じて変動させることで、両方の機能を両立させる制御方式を検討している。

図3は、電気二重層キャパシタとチョップ装置を組み合わせた電力貯蔵装置を試験線に設置した際の試験結果を示すもので⁵⁾、充電状態を監視しながら、補充電や捕

特集：電力技術

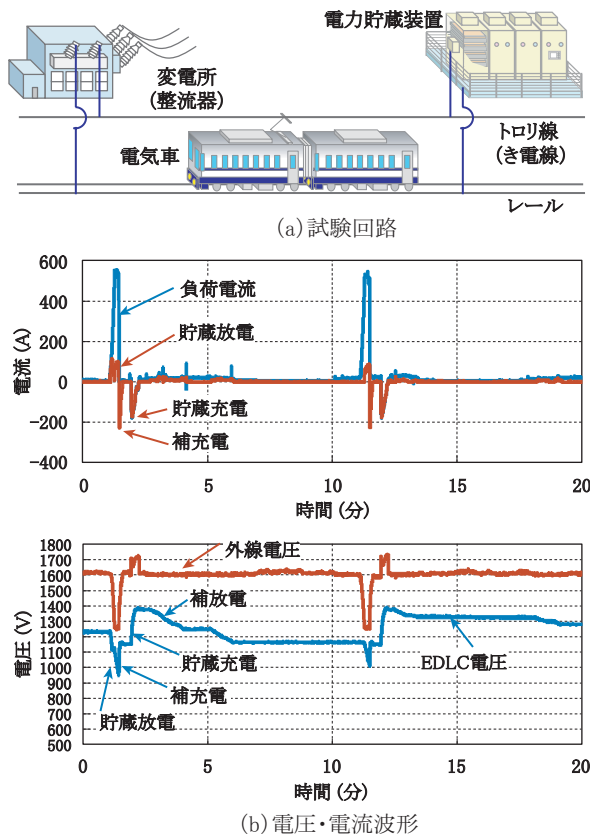


図3 電力貯蔵装置の制御方式

放電を行うことで、適正な充電状態を維持している。従来の制御の場合、電気二重層キャパシタの充電電圧が上限もしくは下限に向かうため、満充電もしくは空充電状態に偏りやすい傾向があるが、充電状態を監視する制御方式では、補充電または補放電を行うことで電気二重層キャパシタを中間充電状態に維持し、さらに電気車の力行、回生に対応させた充放電を行うことで、省エネルギー効果と同時に外線電圧の安定化に寄与している。

鉄道総研ではこの他、超電導磁気軸受を採用したフライホイールの開発も進めており、現在2トン程度のフライホイール支持が可能な軸受の開発を中心に、電動発電機とフライホイール間のトルク伝達方式、超電導コイルの冷却方式、フライホイールの運動解析、フライホイールの監視方法、営業線導入時を想定したシステムの評価等について検討を進めている⁶⁾。

5. 新しい状態監視保全技術

これまで、特定の部材や変状個所に焦点を絞ったモニタリング技術について検討がなされてきたが、通常状態における設備全体の状態を継続的に把握することも保守の低コスト化のためには重要である。そこで、電車線設備を対象に、状態監視保全のための効率的な状態監視手法および異常検知・診断技術を確立する。

車上からのセンシング技術として、画像による集電系の検査と異常検出システムの開発、架線・パンタグラフの接触力の測定による電車線状態診断手法の開発を行う。これらの開発によりちょう架線、補助ちょう架線などの上部線条の状態診断、トロリ線のひずみ・静高さ・張力の推定などが可能となり、保守業務の効率化が期待される⁷⁾。電車線、軌道、構造物等に対する車上等からのセンシングは、保守点検の効率化のために重要な要素であるが、モニタリングシステムを運用する場合には、安定して計測可能な物理量を抽出すると共に、適切なセンサを選択し、また、種々の環境条件のもとで多くのセンサを確実に動作させる必要がある。さらに、得られた情報から鉄道設備の特徴的な条件を取り入れた状態監視手法を構築する必要がある。そこで、鉄道設備の中・長期的な状態の変化を監視するセンサの耐久性ならびに保守性について検討を行うと共に、保守情報ネットワークの設計・運用の最適化を図り、設備の状態変化に基づいた経年変化予測手法の構築、最適な監視方法や保全手法を提案する。

6. おわりに

最近の電力技術に関する研究開発課題として、鉄道総研で実施している研究開発課題の一部を紹介した。今後も安全性、環境、利便性、低コスト化を目的として、鉄道事業者の要請に応えながら研究開発を進めて行く計画である。なお、本研究を行うにあたって現地試験等で多くの鉄道事業者やメーカ各社のご協力を頂いており、本紙面を借りて深く感謝するとともに、成果の活用をお願いしたい。なお、本開発の一部は国土交通省の補助金を受けて実施している。

参考文献

- 1) 電気技術基準調査委員会：変電所等における電気設備の耐震設計指針 (JEAG5003-1980)
- 2) 電力設備耐震性調査研究委員会：電力設備の耐震性に関する調査研究、鉄道総合技術研究所・日本鉄道電気技術協会、1997。
- 3) 奥井：鉄道研究の将来展望、電気学会誌、vol.130、No.8、p.542、2010
- 4) 富田：高温超電導材料の研究と鉄道へ向けた応用、RRR、Vol.66、No.4、2009
- 5) T. Konishi, H. Morimoto, T. Aihara, M. Tsutakawa: "Fixed Energy Storage Technology Applied for DC Electrified Railway", IEEJ Trans 2010;5:1-8, 2010.
- 6) 長嶋、高橋、岩松：在来方式鉄道への超電導リニア技術の適用、RRR、Vol.67、No.7、p.9、2010
- 7) 奥井：研究開発の基本計画と成果、鐵道電気設備年鑑' 11、鐵道会図書出版、p.151、2011