

電力技術に関する最近の研究開発

兎束 哲夫*

Recent Topics on Power Supply Technology

Tetsuo UZUKA

After the Tohoku-Pacific Ocean earthquake, all the Japanese railway operation companies have to care for energy saving problem, since Japan lost major part of electric power source. Thus, R&D about power supply technologies in RTRI should be directed toward the same direction. Also, Japan enters an era of falling birthrates, an aging society, and a shrinking population in the first half of the 21st century, and there has been a rapid decrease in the labor population. In such circumstances, maintenance free technology is another big subject for RTRI. This paper describes the recent topics on power supply technologies.

キーワード：電力設備，電車線，変電所，省エネルギー

1. はじめに

2011年3月の東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）以降、日本のエネルギー事情は一変した。地震直後の東日本では深刻な電力不足となり、計画停電の実施に至った。引き続き同年夏には原子力発電所の停止に伴う電力供給力不足から、関東の鉄道各社が電気事業法に基づく電気使用制限を受け、一般電力消費がピークを迎える午後12～15時間帯において15%の電力使用制限を実施した。各社は間引き運転を伴う「節電ダイヤ」による運行や、駅設備の停止等の措置によって電力量を低減した。それ以降も、夏期および冬期に全国の鉄道事業者が繰り返し節電要請を受けている。鉄道事業者の省エネルギーの目的は地球環境対策としてのCO₂排出量削減であり、副次的に電力料金の節減が図られている。過去においては、省エネルギー効果が明確な施策であっても、初期投資が大きい場合は節電できる電力料金に見合う投資効果を得ることが難しく、実現が困難な場合もあった。しかし、大震災以降は日本全体のエネルギー不足が続いており、各鉄道事業者では全系統にまたがった省エネルギーを検討し、着々と実現に至っている¹⁾。

一方、2015年春予定の北陸新幹線金沢延長および2016年春予定の北海道新幹線開業の後、しばらくの間は日本全体で鉄道路線新設の動きは低調である。また、各鉄道事業者では少子高齢化時代に備えるため、一層の省メンテナンス化を進めている。

このような状況から、鉄道総研における電力分野における当面の研究開発は、省エネルギーと省メンテナンスおよび安全性向上を中心としている。

* 電力技術研究部 部長

本稿では電力技術に関する最近の研究開発について、鉄道の将来に向けた研究開発を中心として、鉄道総研の基本計画に沿って紹介する。

2. 鉄道総研基本計画に基づく取り組み

鉄道総研における研究開発活動は基本計画に基づいており、2006年度からの5年間の活動に関する基本計画（RESEARCH 2010）は、これまでの研究開発の進展および鉄道を取り巻く昨今の状況の変化を反映させつつ、鉄道技術に関する総合的な研究所として各界からの負託に応える活動を効果的に推進し、鉄道の持続的発展を目指すことを目的に策定された。

このRESEARCH 2010の中では効果的な研究開発を進めるために、以下の3項目を「研究開発の柱」として定めている。

鉄道の将来に向けた研究開発
実用的な技術開発
鉄道の基礎研究

2.1 鉄道の将来に向けた研究開発

「鉄道の将来に向けた研究開発」の中で2013年度に実施した電力技術に係わる研究開発課題を、表1に総括して示す。電力技術に係る研究開発課題は合計15件あるが、これらは1～5の大課題の中で「4. 鉄道ネットワークの維持発展」を除く4つの大課題の中の5つの個別課題で実施されている。2013年度には電力技術に係わる7件の研究開発課題を実施し、1件が終了した。

表1 鉄道の将来に向けた研究開発（電力関連）

大課題／ 個別課題／ 研究開発課題
1. 鉄道システムの安全性・信頼性向上
<ul style="list-style-type: none"> ○ 知能列車による安全性・信頼性向上 ○ 地震に対する安全性向上 <ul style="list-style-type: none"> ・電車線構造物の被害軽減方法の開発
2. エネルギーの効率的な利用
<ul style="list-style-type: none"> ○ 電力の新供給システム <ul style="list-style-type: none"> ・自然エネルギーを利用した電力システムの構築 ・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 ・高電圧直流き電方式の開発 ・鉄道用フライホイールの実用化技術開発 ・超電導き電ケーブルの長尺化技術の構築
3. メンテナンスの刷新
<ul style="list-style-type: none"> ○ 新しい状態監視保全技術 <ul style="list-style-type: none"> ・画像による架線系の検査と異常検出
4. 鉄道ネットワークの維持発展
5. 鉄道シミュレータの開発

2.2 エネルギーの効率的な利用

このような状況において鉄道総研で取り組んでいる大課題「エネルギーの効率的な利用」に含まれる個別課題「電力の新供給システム」では、従来の電力供給システムに代わる省エネルギー型の電力供給システムの開発を主眼としている。具体的には、送電効率の向上対策として超電導き電ケーブルの開発およびき電電圧の高電圧化、回生電力の有効利用対策として超電導軸受を用いたフライホイール蓄電装置の開発や自然エネルギー等の分散化電源システムの構築、さらに電力供給システムの最適化を目標に、エネルギー評価が可能なシミュレータを開発するものである（図1）。

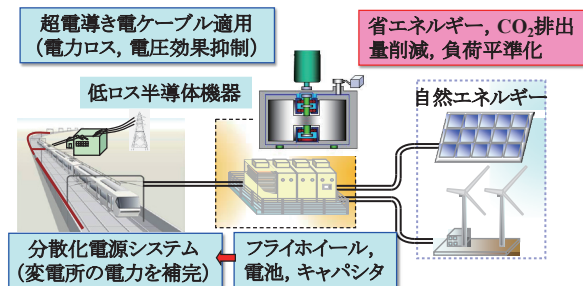


図1 電力の新供給システムのイメージ

このうち、2012年度に終了した研究開発課題「超電導き電ケーブルの開発（2010～12）」では、直流電気鉄道用の超電導き電ケーブルの基本性能を確認する目的で、冷媒である過冷却液体窒素の往路と復路、超電導導体の往路と復路をすべて同軸構成とした短尺（5m）の超電導き電ケーブルを製作し、12 kA までの通電試験および冷却試験を行った（図2）。さらに、「超電導き電ケーブルの長尺化技術の構築（2013～14）」において、直流電気鉄道用の超電導き電ケーブルの基本性能を確認する目的で、往路と復路が同軸構成になった30m長の超

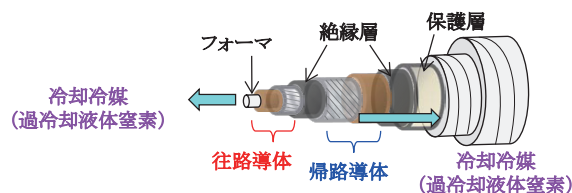


図2 超電導ケーブル構造

電導き電ケーブルを用いた所内試験を2012年7月に実施し、冷凍システムを含めシステム全体が設計通りに動作することを確認し、次いで2013年7月には世界初の電車運転を行った（図3）²⁾。さらに約300m長の超電導き電ケーブルによる試験設備を製作して冷却試験を実施し、2014年7月にはこの300m長ケーブルを用いた所内電車運転を達成した。現在は、これらの基礎試験の結果をもとに超電導き電ケーブルの長尺化について検討を行うとともに、冷却装置を含めたシステム開発を進めている。



図3 超電導き電ケーブルを用いた列車走行試験

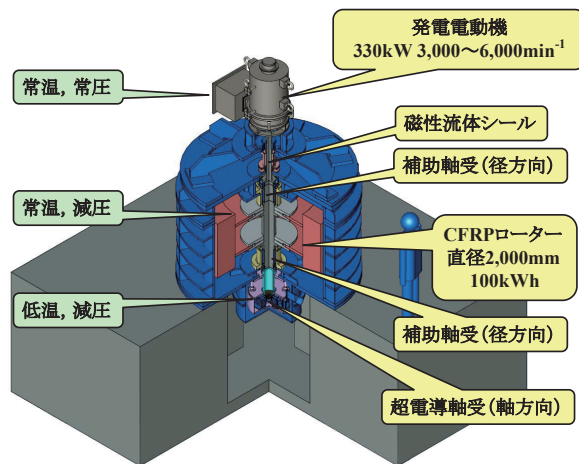


図4 超電導磁気軸受フライホイール

一方、「高機能超電導磁気軸受を適用した鉄道用フライホイールの開発（2010～12）」³⁾では、回転するロータによる垂直（スラスト）荷重を模擬可能な試験装置を製作し、超電導磁気軸受が回転体を非接触で支持できることを検証した。また、回転試験により、ロータダイナミクス、軸受冷却技術を確認するとともに、減衰付与装置を開発し、高速回転安定化に有効であることを確認し

た。引き続き「鉄道用フライホイールの実用化技術開発 (2013～14)」において、2トン程度のフライホイール支持が可能な磁気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している。電力量 10kWh 超級の超電導磁気軸受フライホイールを設計・製作中である (図 4)。

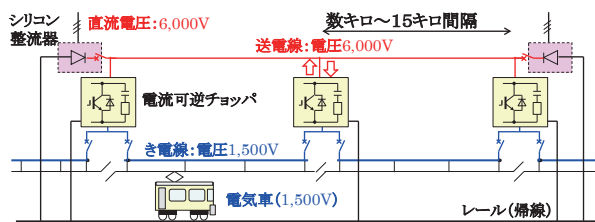


図5 高電圧直流き電方式の構成例

「低ロス半導体素子の電鉄への適用の研究 (2010～12)」⁴⁾では、高電圧直流き電を行う上で必要となる整流器と直流高速度遮断器について、損失や基本性能に関して検討した。整流器については、SiC（炭化ケイ素）を材料とするショットキーバリアダイオード素子を用いた小容量の全波整流回路を製作して半導体素子の損失特性を評価し、高電圧化した場合に従来の Si（ケイ素）を材料とする整流器と比較した損失低減の可能性を示した。また、Si の IGBT（絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ）を用いて小容量の直流高速度半導体遮断器を製作し、通電試験による損失ならびに短絡電流遮断試験による限流効果を確認した。

高密度線区における電気車電流の増加対策としては、1,500V 直流標準電圧の 3,000V 程度への高電圧化が有効であるが、車両側の対応が必要となる。「高電圧直流き電方式の研究 (2013～14)」では、新たに高電圧整流器および送電線を新設し、送電電圧をき電線電圧（電車線電圧）まで降圧する電流可逆チョッパ装置を一定間隔で設けることにより、従来設備であるき電線や電車線の標準電圧 1500V は変更しない高電圧直流き電方式を提案している (図 5)。これによって従来の車両をそのまま利用しながら、高電圧化された送電線を介した電力供給と回生電力吸収により、損失低減、電圧変動抑制、回生電力有効利用および変電所間隔の延伸を図る。現在は検討した構成に基づいたき電損失のシミュレーション計算と、高電圧直流き電線の耐候試験を進めている。

このほか、各鉄道事業者で導入が進む電力貯蔵装置は、変動する鉄道負荷だけでなく、自然エネルギー発電の変動に対しても有効である。鉄道総研では両者の組み合わせでより高い省エネルギー効果を発揮することを計算で確認しており、実証試験を準備中である。また、こ

れらの様々な省エネルギー手法を総合して評価する電力シミュレーションツールを開発している。

なお、本研究開発課題「電力の新供給システム」の一部は国土交通省の補助金と文部科学省の科学研究費および新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成を受けて実施している。

2.3 鉄道システムの安全性・信頼性向上

「鉄道システムの安全性・信頼性向上」に含まれる「地震に対する安全性向上」は、鉄道施設の耐震余裕度（設計上の限界値を超えてもすぐには倒壊しない）や残存耐力など、現在の耐震設計で内包している安全性を明確にし、巨大地震に対しても合理的に安全性が評価できる手法を構築する。また、制振デバイスや地盤免震なども含めた新しい合理的な対策工法を提案するとともに、地震リスクを低減する。

2013 年度に終了した研究開発課題「電車線構造物の被害軽減方法の開発 (2011～13)」では、電車線柱の被害を低減する対策方を検討し、実物大振動台試験を実施して効果を確認した。また、砂詰基礎の交番載荷試験結果から得られた荷重・変位関係を再現する非線形特性の三次元解析モデルを構築した。これらの研究成果は、東北地方太平洋沖地震を受けて「電車線設備耐震設計指針」の改訂に反映されている⁵⁾。

なお、本研究開発課題の一部は国土交通省の補助金を受けて実施している。

「メンテナンスの刷新」に含まれる「新しい状態監視保全技術」は、鉄道の中長期にわたる状態変化を継続的に監視するため、センサの耐久性向上および更新作業の容易化を図るとともに、保守情報ネットワーク設計・運用の最適化技術の確立を目指す。さらに各設備の状態変化に基づく経年変化予測手法を確立し、監視頻度の最適化等、合理的な保全手法の提案につなげる。

このうち、「電車線状態診断手法の改良 (2012～14)」では、接触力測定結果から電車線構造を診断する手法及び画像処理による設備診断手法を開発している。

3. 実用的な研究開発

「実用的な研究開発」では、JR 各社殿からのご要望に基づく様々な研究開発を進めている。2013 年度に実施した 11 件の研究開発課題から、主な成果を示す。

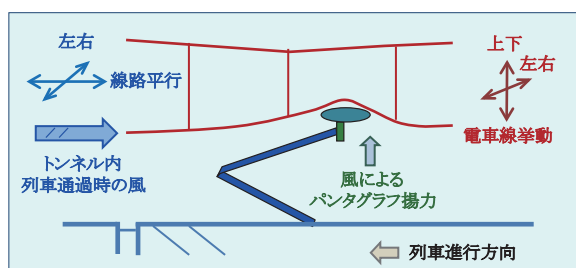
「直流き電回路における高抵抗地絡検出の実用化 (2012～13)」では、地絡電流値と負荷電流値の判別が困難のため変電所で保護が困難な直流き電回路の電車線高抵抗地絡事故に対して、ダイオード及びバリスタで構成した保護線用素子と保護線を用いて支持物電圧変化を変電所で確実に検出するシステムを開発し、営業線にお

特集：電力技術

ける人工故障試験で有効性を確認した。

「高速走行時の電車線の挙動解明と金具振動試験条件の評価（2011～2013）」では、高速列車のトンネル通過時パンタグラフ周辺風速を実測し、速度向上の評価基準を提案した（図6）。また、電車線金具振動条件を明らかにするとともに、パンタグラフ通過時の電車線コネクタ疲労現象について有限要素法を用いてコネクタの振動波形を模擬し、より線疲労試験結果と照合する解析手法を開発した⁶⁾。

「新幹線用サージ検知方式ロケータの開発（2011～2013）」では、故障時に発生するサージ電圧の到達時間から故障点を標定する方法（図7）について、新幹線区間での適用可能性を検討した。サージ伝搬速度実測等の結果から、新幹線固有の設備である切替開閉器から発生するサージ電圧についてはき電圧変化との対比から影響を排除できること、また変電所構内の配線遅延を考慮すべきであること等が明らかになった。



風向	対向車	列車速度比	風向	対向車	列車速度比
線路平行	なし	0.3	左右	なし	0.08
	あり	0.5		あり	0.12

図6 トンネル内での電車線挙動と考慮すべき風速

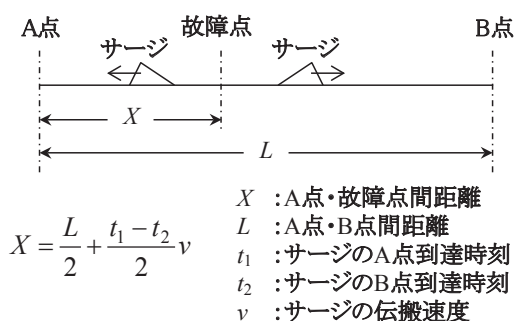


図7 サージ検知形故障点標定方式

「アークによる集電系材料の損傷・メカニズムの解明と評価（2011～2013）」では、トロリ線とパンタグラフすり板の摩耗現象解明を目指すとともに、紫外線を用いた離線検出測定器の実用化を目指した。

「トロリ線の長期伸びに対するプレストレッチの最適化（2011～2013）」では、トロリ線張り替え時に行っているプレストレッチ作業について、トロリ線材料の巻癖除去とクリープ特性の両面から検討した。その結果、プ

レストレッチ作業は巻癖除去効果を持っていることと、クリープ特性には影響を与えないことから、作業時間を15分程度に短縮可能と考えられることを示した。

4. 鉄道の基礎研究

「鉄道の基礎研究」として、2013年度は3件を実施した。主な成果の概要を以下に示す。

「環境による電車線路部材劣化の評価（2012～2014）」では、電車線路設備の故障防止・安定運用に資するため各部材を評価している。2013年度は、長経年トロリ線の残存寿命を評価して経年のみで耐疲労性が低下しないことを確認するとともに、FRP部材の硝酸水溶液中での脆性破壊再現、高圧ケーブルの暴露劣化試験でケーブル端末部の施行方法の評価をそれぞれ行った。

「高速・大電流条件における集電系材料の摩耗メカニズムの解明（2012～2014）」では、各種の試験を通じて通電条件下のトロリ線やカーボン系すり板等の集電系材料の接点溶解現象や摩耗形態遷移メカニズム解明を目指している。

5. まとめ

前述のように電力技術に関する最近の研究の中心は、省エネルギーと省メンテナンスであるが、その他の研究課題にも積極的に取り組んでいる状況を紹介した。

運転電力削減に関しては、鉄道事業者各社で様々な施策が実現している。次のステップは、車両・運転・電気各部門のさらなる協力であろう。また、省メンテナンスに関しては、状態監視用のセンサ開発とデータの蓄積、およびその処理のシステム化が必要である。

鉄道総研では今後も、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。

文 献

- 1) 兎東：鉄道システムの省エネルギーについて、鉄道と電気技術誌, Vol.25, No.1, pp.3-8, 2014
- 2) 富田, 鈴木, 福本, 石原, 赤坂, 小林：鉄道用超電導ケーブルの適用性評価, 鉄道総研報告, Vol.28, No.2, pp.53-58, 2014
- 3) 吉澤, 荒井, 長嶋, 坂本：フライホイール駆動用永久磁石同期電動機の開発, 鉄道総研報告, Vol.27, No.7, pp.35-40, 2013
- 4) 重枝, 森本, 吉井：電力地上設備への低ロス半導体素子適用の検討, 鉄道総研報告, Vol.27, No.8, pp.11-16, 2013
- 5) 電車線路設備耐震設計指針・同解説, 鉄道総研, 2013
- 6) 清水, 菅間, 近藤, 半田, 光用：新幹線トンネル内の列車風が集電性能へ及ぼす影響, 鉄道総研報告, Vol.27, No.8, pp.29-34, 2013