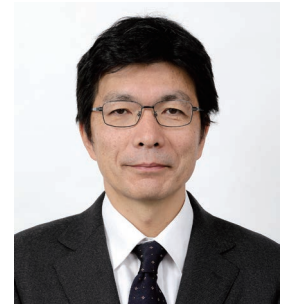


# 電力ネットワークの電力協調制御による低炭素化

電力技術研究部長  
池田 充



## 1. はじめに

鉄道はエネルギー効率が高く、省エネルギーなシステムであるが、持続可能な社会の実現に向けて鉄道の低炭素化が求められている。本講演では、列車と電力供給設備との高度な情報連携による省エネルギー化の実現にむけたこれまでの鉄道総研の研究成果を紹介する。さらに、次期基本計画RESEARCH 2025において実施する、再生可能エネルギーの積極的な活用を可能とするための一般電力系統と鉄道用蓄電システムの電力協調制御法の研究、回生電力のさらなる活用のためのリアルタイムエネルギー協調制御法の研究、リアルタイム省エネ運転ダイヤ作成手法の研究、などについて、その方向性について述べる。

## 2. 低炭素化に関わる目標と方策

温室効果ガスによる地球温暖化(図1)を抑止するための2020年以降の国際的枠組みは2016年に発効したパリ協定により定められており、日本は2030年までに温室効果ガスの排出量を2013年比で26%削減することを目標として掲げている。さらに、長期目標として2050年までに温室効果ガス排出量の2013年比80%削減を目指すことが、2016年に閣議決定されている。温室効果ガスには、二酸化炭素のほかにメタン、一酸化二窒素、フロンなどがあるが、日本の場合には温室効果ガスの全排出量に占める二酸化炭素の割合が90%以上と極めて高いことから、二酸化炭素の削減、すなわち低炭素化の実現が重要となっている。

環境省による「温室効果ガス2050年80%削減のためのビジョン」では、炭素排出量の80%削減のための基本的

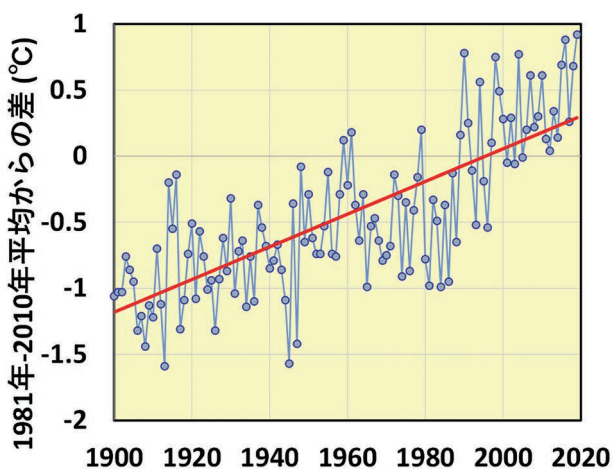


図1 日本の年平均気温の偏差  
(1981年～2010年平均気温からの偏差)

※気象庁ウェブサイト ([https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/list/an\\_jpn.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/list/an_jpn.html)) をもとに筆者作成

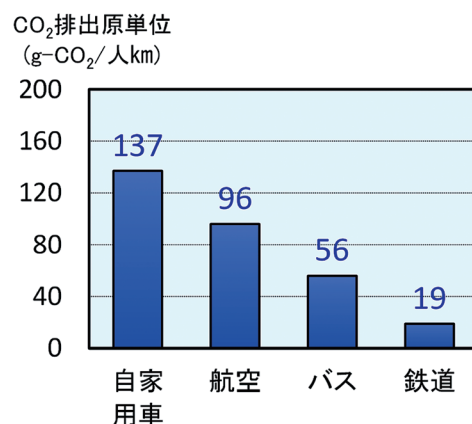


図2 旅客単位輸送量あたりのCO<sub>2</sub>排出量(2017年度)

※国土交通省ウェブサイト ([https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei\\_environment\\_tk\\_000007.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html)) をもとに筆者作成

考え方として、「約40%の省エネ」と「約70%の1次エネルギーの低炭素化」が示されている ( $0.6 \times 0.3 \div 0.2$ )。1次エネルギーの低炭素化には、二酸化炭素の分離・貯蔵とその利用 (CCUS) も有効であり、国などが主導して研究開発が進められているが、現時点においては再生可能エネルギーの主力電源化が最も現実的な選択肢である。

鉄道は他の交通機関と比べてエネルギー効率がが高く、旅客の単位輸送量あたりのCO<sub>2</sub>排出量は自家用車の約14% (2017年度) である (図2) など、鉄道は自動車や航空などに比べて低炭素化が進んだ輸送モードである。その理由の一つは、鉄道では100年以上も前から電動化、すなわち電化が進められてきたことである。電車や電気機関車はそれ自身からの二酸化炭素排出がない。うえ、発電に関しても、火力発電のエネルギー効率は自動車等が利用する内燃機関に比べると高い。

しかし現在、自動車の電動化 (EV、FCV など) への取り組みが本格化しており、さらに再生可能エネルギーの普及に欠かせない電力の需給バランスを実現する手段のひとつとして、EVの系統接続 (Vehicle to Grid) を実現する技術も実証段階に入りつつある。これに対し、もともと二酸化炭素排出量が少ない鉄道では、現状に対して大幅な低炭素化を達成することは容易ではない。しかし、将来にわたって鉄道が他の輸送モードに対して環境調和に関わる優位性を発揮し続けるためには、鉄道のさらなる省エネ化を推し進めるとともに、再生可能エネルギーを主力電源とする社会に適合可能な鉄道のエネルギーマネジメント手法を構築することもまた欠かせない。

鉄道総研では2015年度より開始した現行の基本計画RESEARCH 2020において研究課題「エネルギーネットワークによる省エネルギー化」を設定し、電力供給設備と車両との連携により鉄道のさらなる省エネルギー化を実現するための研究を実施するとともに、走行抵抗ならびに加速抵抗の低減に資する研究として、トポロジー最適化と形状最適化を組み合わせた車両構体構造最適化手法<sup>1)</sup>や、アルミニウムに対し比重が30%以上小さい難燃性マグネシウム合金の適用による車両構体軽量化<sup>2)</sup>などの研究開発も実施してきた。さらに、2020年度より新たにスタートする次期基本計画RESEARCH 2025では、鉄道の省エネルギー化のための研究を継続して実施するとともに、再生可能エネルギーの積極的な利活用を可能とするための一般電力系統と鉄道用蓄電システムの電力協調制御法の研究に新たに取り組む予定である。

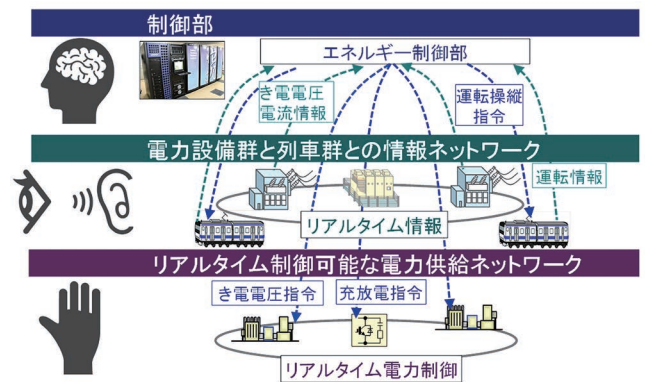


図3 エネルギーネットワーク

### 3. エネルギーネットワークによる鉄道の省エネルギー化 (RESEARCH 2020)

#### 3.1 エネルギーネットワーク

電気鉄道においては、蓄電池搭載型車両を除くと列車の走行エネルギーは全て変電所から電車線路を経て供給されている。このとき、移動体である列車群と地上に固定された電力供給設備とは、エネルギーフローに関してひとつの大きなネットワークを形成している。これは、他の輸送機関と比較したときの電気鉄道の大きな特徴の一つであり、列車群と電力供給設備と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る。

しかし現在の電気鉄道では、変電所などの電力供給設備の運用と各列車の運行とはそれぞれ独立に行われている。近年のICTの発達を背景として、電力供給設備の制御と列車運行制御を一元的に管理することができれば、さらなる省エネルギー化の実現が可能であると期待される。これは、エネルギー供給事業者 (電力会社、ガス会社など) などが提唱するスマートエネルギーネットワークへの取り組みと類似のものである。そこで鉄道総研では、鉄道における電力供給のためのネットワークを「エネルギーネットワーク」と定義し、これを積極的に活用することによりさらなる省エネルギー化を実現する研究をRESEARCH 2020において開始した。

図3に示すように、エネルギーネットワークは情報ネットワーク、電力供給ネットワーク、および制御部から構成される。情報ネットワークは各変電所や各列車がそれぞれの情報をリアルタイムに相互に共有するためのネットワークであり、エネルギーネットワークにおける目や耳の役割を担う。電力供給ネットワーク

は、リアルタイムに電力を制御する電力機器を含む電力供給のためのネットワークであり、エネルギーネットワークにおける手や足の役割を担う。そして、情報ネットワークによりもたらされるリアルタイム情報をもとに列車運行と電力の流れを制御する制御部は、エネルギーネットワークにおける頭脳の役割を担う。

### 3.2 列車運行電力シミュレータ

エネルギーネットワークの頭脳に相当する制御部には、情報ネットワークによりもたらされるリアルタイム情報をもとに列車運行ならびに電力供給機器を適切に制御することが求められる。そのプラットフォームとなるものが列車運行電力シミュレータ<sup>3)</sup>である。

列車運行電力シミュレータは、車両走行、電力供給、列車運行管理に関わる鉄道総研の計算ツールを統合したものであり、車両運用に基づいて列車モデルを生成し、列車ダイヤと路線情報をもとに各列車の在線位置を計算する。そのうえで、各列車のパンタグラフ位置における架線電圧や集電電流を計算し、これに基づいて各列車の運転曲線の更新を行う。以上の計算により、各列車の消費電力や回生電力、各変電所の供給電力を評価する。

列車運行電力シミュレータによる計算結果を走行試験の測定結果と比較することにより、各列車の運転操作に関わる詳細情報が得られる場合の評価誤差は5%

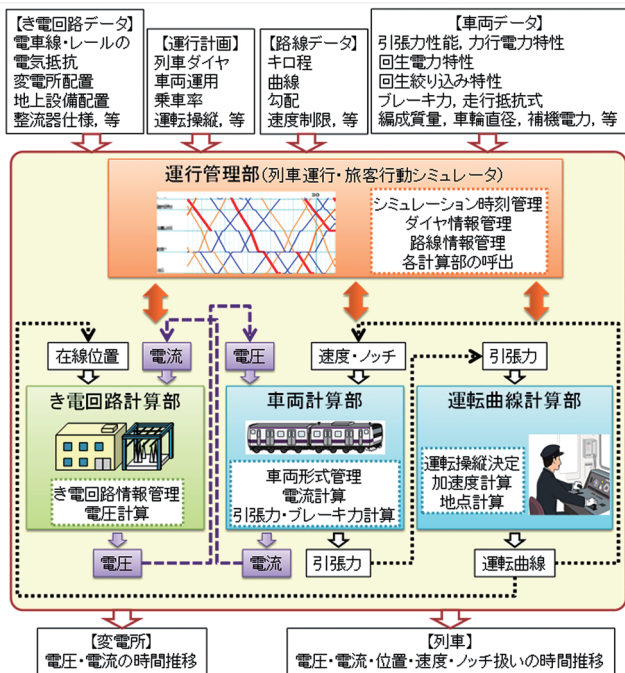
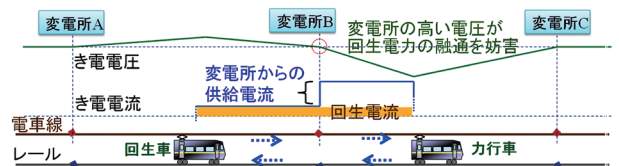


図4 列車運行電力シミュレータ

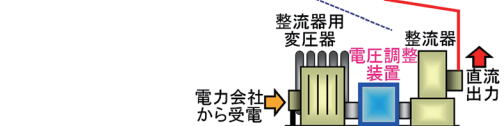
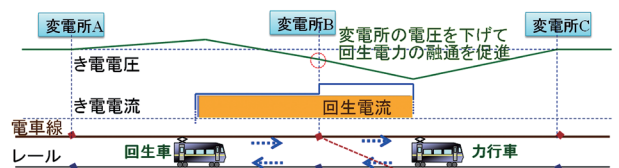
以下であること、各列車の運転操作にばらつきがある営業運転の場合でも評価誤差（検証対象範囲の列車運行電力の中央値）は10%以内であること、などを測定した範囲内ではあるが確認している。

### 3.3 電力供給ネットワーク

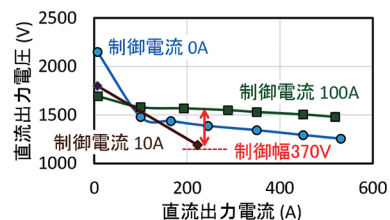
鉄道の省エネルギー化を進めるためには、回生ブレーキによって得られる回生電力を有効に活用することが求められる。しかし、従来の直流用変電所ではき電電圧が整流器の特性により定まるため、図5 (a) に示すように回生車両と力行車両が近接して在線する場合でも、変電所の高いき電電圧が回生電力の融通を妨げる場合があった。図5 (b) に示すようにき電電圧を制御することができれば、回生電力の融通を促進することによって省エネルギー化を図ることが可能となる。そこで鉄道総研では、整流器と整流器用変圧器との間に可変リアクトルを挿入し、リアクトルの電圧降下を制御することによって整流器の直流出力電圧を一定範囲内で制御可能とした高機能整流器<sup>4)</sup>を開発した。同様の機能を有する装置としてすでに自励式整流器が実



(a) 従来の直流用変電所



(b) 高機能整流器を適用した直流用変電所



(c) 試作した高機能整流器の出力電圧調整機能

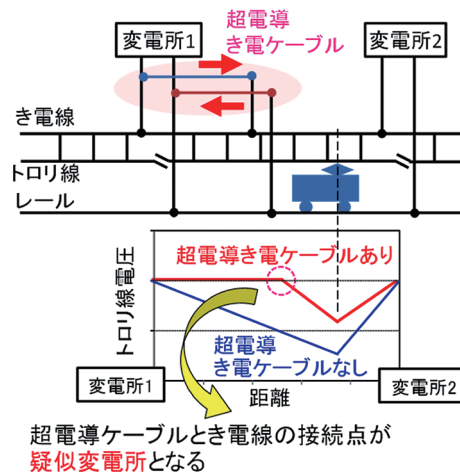
図5 高機能整流器

用化されており、通常の整流機能に加えて回生電力を受電側に返還する（逆潮流）機能も有しているが、非常に高価である。高機能整流器は電力の逆潮流には対応しない代わりに、出力電圧の調整機能を安価（自励式整流器の約1/5）に実現したことが大きな特徴である。小容量（定格500 A）の試作器を製作して機能確認を実施したところ、図5 (c) に示すように整流器の出力電圧を25%の範囲内で制御可能であることを確認した。

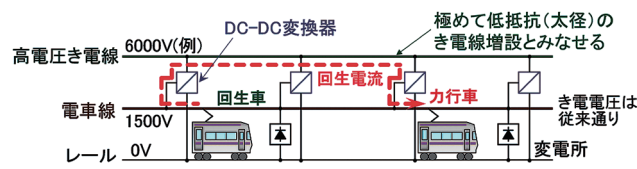
一方、き電回路で発生するエネルギー損失、特に直流き電回路の抵抗損の低減もまた、鉄道の省エネルギー化を進めるうえで重要である。そこで、超電導き電ケーブルシステム、高電圧き電システムの開発にも取り組んでいる。

超電導き電ケーブルシステム<sup>5)</sup>は、高温超電導線材とこれを冷却する液体窒素の流路を一本のケーブルとして構成した超電導き電ケーブル、電流の取り出し口となる端末部、および液体窒素の循環ポンプと冷却機から構成される。超電導き電ケーブルの電気抵抗はほぼゼロであるため、図6 (a) に示すように超電導き電ケーブルと従来のき電線との接続点を疑似的に変電所と見なすことができる。つまり、き電回路の長さを見かけ上短くすることができ、その分だけ抵抗損が低減するとともに回生効率が向上することにより省エネルギー化に貢献する。これまでに鉄道事業者の協力の下で、き電回路の一部に超電導き電ケーブルシステムを接続し、実車両を走行させて超電導き電ケーブル経由で数千アンペアの電流を車両に供給させる試験や、送電中に超電導き電ケーブルシステムを切り離す試験を実施し、良好な結果を得ている。今のところ、本システムのケーブル長は400m程度であるが、実際の変電所間隔（数km）を想定したシステムの開発に取り組んでいる。

一方、高電圧き電システムはき電線の電圧を高電圧化して電流を小さくすることによって抵抗損を減らすものである。ただし、電車線を昇圧すると車両改造が必要となるため、電車線電圧は変更せず高電圧き電線を別途設け、電車線との間に設けたDC-DC変換器により高電圧き電線のみ昇圧するシステム<sup>6)</sup>を検討中である。これは、従来の直流き電回路に対して極めて低抵抗のき電線を増設したことと等価であり、変電所間隔の拡大が実現できる。さらに、DC-DC変換器を適切に制御することにより、回生電力の融通をより効率よく実現することが可能となる。現在、本システム実現にむけ、電力変換器の具体的構成と制御方法の検討を進めているところである。



(a) 超電導き電ケーブルシステム



(b) 高電圧き電システム

図6 き電回路の抵抗損失低減手法

### 3.4 エネルギーネットワークを活用した省エネルギー化

情報ネットワークにより得られた車両ならびに電力供給設備のリアルタイム情報を基に列車運行ならびに列車運行電力の予測が可能になり、さらに電力供給ネットワークにより電力設備の制御が可能になれば、電力設備や列車運行の具体的な制御法が省エネルギー効果を大きく左右する。ここでは、エネルギーネットワークを活用した地上蓄電装置の新しい制御法について紹介する。

現在、直流き電区間において回生電力の活用を図る目的で、地上蓄電装置の設置が複数の鉄道事業者において行われている。現時点では、充放電制御を必要としないニッケル水素電池を除けば、蓄電装置が接続された点の架線電圧（外線電圧）に応じて充放電電流の指令値を決定する制御法が一般的である。この制御方式は列車に関する情報を直接利用していないため、回生電力の発生や力行最大電流の到達といった列車の挙動に対して不適切な充放電動作を行う場合が生じ得ることや、特に変電所の受電電圧の変動によって不要な充放電を行う場合があるなどの課題がある。そこで列

車運行に対してより適切な充放電を行うとともに、受電電圧変動のある状況下での省エネルギー効果の低下を防ぐため、リアルタイムに得られる各列車の運行情報に基づき、地上蓄電装置近傍に在線する各列車の力学的エネルギーを計算するとともに、外線電圧の監視も行い、充放電量をリアルタイムに決定する制御方法<sup>7)</sup>を提案している(図7(a))。

列車運行電力シミュレータにこの制御則を組み込み、実規模路線データを用いたシミュレーションを実施して、本制御手法の省エネルギー効果を受電電圧変動のない場合およびある場合について比較・評価した。その結果を図7(b)に示す。本図中には、各条件について蓄電装置を設置しない場合との比(百分率)も示している。受電電圧変動がない場合には従来方式と提案手法の省エネルギー効果はほぼ同等であるが、受電電圧に変動があると従来方式では省エネルギー効果が大きく低下する一方で、提案方式では安定した省エネルギー効果が得られることがわかる。このように、エネ

ルギーネットワークを活用することにより、さらなる省エネルギー化が実現できることがわかる。

また、地上蓄電装置の容量選定のため、各列車が計画ダイヤ通り運行される前提において、地上蓄電装置の最適充放電制御を数理最適化により求める手法も提案している。この手法では、地上蓄電装置の導入により最大で10%以上の省エネルギー効果を得られる場合があることを試算により確認している<sup>8)</sup>。将来的に自動運転や運行予測の技術が普及することを期待すると、このような数理最適化手法も充放電制御に適用し得ると考えている。

## 4. 電力ネットワークの電力協調制御による低炭素化(RESEARCH 2025)

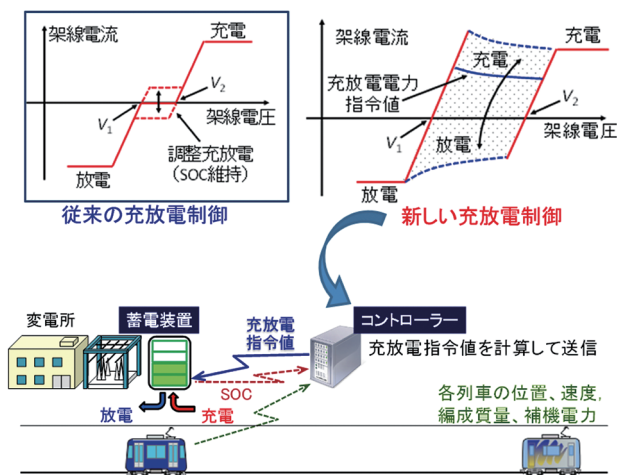
### 4.1 エネルギーネットワークから電力ネットワークへ

3章で述べたように、RESEARCH 2025では電気鉄道のさらなる省エネルギー化を目指してエネルギーネットワークの構築と活用について検討を行い、一定の成果を得たが、鉄道の大規模な低炭素化を進めるうえで以下の課題があることもまた明らかであった。

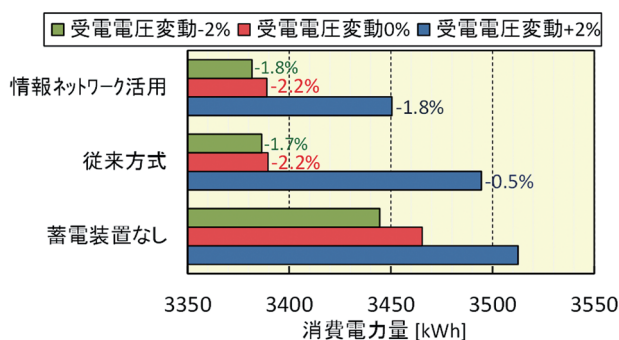
- ① 車両の軽量化、インバータ制御や回生ブレーキの採用などが広く普及している電気鉄道では、現状に対し大規模な省エネルギー化を実現する余地が少ない。
- ② 提案した省エネルギー化施策を個別に導入するだけでは、省エネルギー効果に限界がある。

また、電力供給に関する状況変化として、日本国内の全発電量に対して風力発電と太陽光発電が占める割合が、2014年度の2.3%から2018年度には7.2%に増加していることが挙げられる。2020年4月には発電電分離の実施が予定されており、再生可能エネルギーによる発電量のさらなる増加が期待されている。

以上を考慮すると、鉄道のエネルギーネットワーク内だけのエネルギーフローを考えるのではなく、鉄道外部の一般電力系統との協調を図ることにより、鉄道として再生可能エネルギーを積極的に活用するとともに、複数の省エネルギー化施策を協調して制御することによってさらなる省エネルギー化を実現することが、鉄道の低炭素化を促進するために有効であると考えられる。そこで鉄道総研では、RESEARCH 2025において新たに研究課題「電力ネットワークの電力協調制御による低炭素化」を設定し、これら課題に取り組むこととした。なお、エネルギーネットワークが鉄道に閉じたネットワークであるのに対し、これを鉄道



(a) リアルタイム列車運行情報に基づく充放電制御



(b) 各充放電制御の省エネルギー効果比較

図7 エネルギーネットワークを活用した地上蓄電装置の充放電制御

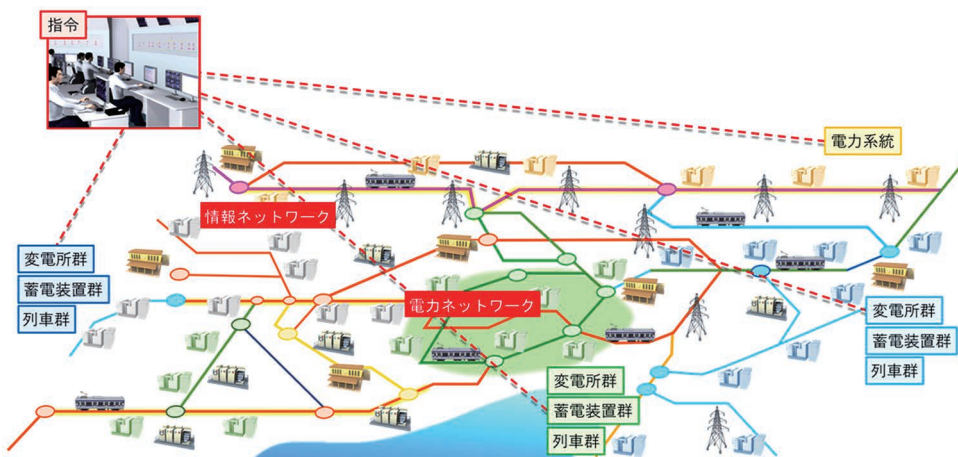


図8 電力ネットワーク

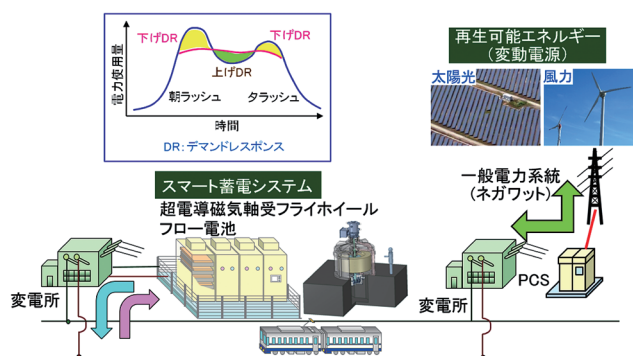


図9 鉄道におけるディマンドレスポンス

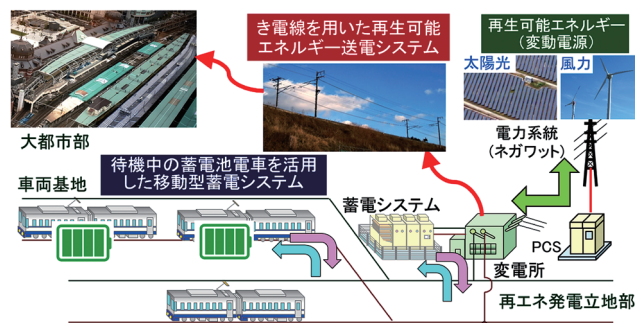


図10 再生可能エネルギーの積極利用のための待機中蓄電池電車の活用およびき電線による再生可能エネルギーの送電

外部の一般電力システムとのインターフェイスにまで拡張したものを電力ネットワークと定義することとした(図8)。

#### 4.2 再生可能エネルギーの積極的利活用

風力発電や太陽光発電は、発電量が自然条件に応じて変動する。その一方で電力システムにおいては需要(電力消費量)と供給(発電量)がバランスしている必要がある。現在は主に供給側において需給バランスの調整が行われているが、今後、総発電量に対する風力発電や太陽光発電の比率を高くしていくためには、需要側にも需給バランスの調整が求められるようになる。言い換えれば、鉄道が再生可能エネルギーを積極的に利活用するためには、鉄道が電力の需要制御(ディマンドレスポンス)を行うことを可能とする必要がある。

そこで図9～図10に示すように、電気鉄道の地上蓄電装置を、回生電力の回収・活用を目的としたものから、電力需要の制御(ディマンドレスポンス)にも対応可能なものにするとともに、待機中の蓄電池車両の車載蓄電池も電力需要の制御に活用するための技術

開発を行う。なお、これらの検討を効率よく行うためには電力フローのシミュレーションが有用であり、これを実現可能なシミュレータの構築にまず取り組む予定である。

一方、風力発電や太陽光発電は基本的に分散型電源であり、比較的人口の少ない地域に立地適地が多い。一方、こうした地域は電力需要自体が小さいことから、需要調整力も小さい。そこで、電気鉄道が日本国内をほぼ網羅するネットワークを有していることを活用し、鉄道のき電回路を活用して再生可能エネルギーを地方から大都市圏に送電する手法についての検討も行う。

#### 4.3 鉄道のさらなる省エネルギー化にむけて

RESEARCH 2020では、各列車が計画ダイヤどおり走行することを前提として最も省エネとなるランカーブを生成する手法を提案<sup>9)</sup>し、特定の線区の試算ではあるがこれにより3%～5%の省エネルギー効果が得られることをシミュレーションにより確認してい

る。しかしながら、実際の運転ダイヤが前提とする計画ダイヤからずれた場合（遅延等が発生した場合）には、この方法による省エネルギー効果が減退する可能性がある。そこでRESEARCH 2025では、計画ダイヤ通りの列車運行を前提とはせず、各列車の運行状況に基づいて省エネとなるランカーブをリアルタイムに生成する方法の提案に取り組む（図11）。

また、複数の省エネルギー施策をそれぞれどこに設置し、全体としてどのように制御すれば、最大の省エネルギー効果が得られるのかを明確にすることは、鉄道のさらなる省エネルギー化を実現するうえで重要である。そこで、高機能整流器、高電圧き電用電力変換器、地上蓄電装置など制御可能な複数の電力供給デバイスに加え、上述した省エネランカーブのリアルタイム生成と、制御不要な超電導き電ケーブルが適用可能である場合に、これらをどのように組み合わせ、どのような協調制御を実施すれば、最も高い省エネルギー効果を得ることが可能となるのかを予測・提案するための研究開発にも取り組む（図12）。

## 5. おわりに

RESEARCH 2025では、鉄道の低炭素化を実現するための取り組みとして、RESEARCH 2020において進めてきた省エネルギー化のための研究開発をさらに推し進めるとともに、再生可能エネルギーが主力電源となる脱炭素社会の到来を見据え、鉄道に適したエネルギーマネジメント手法を構築することにより再生可能エネルギーの積極的な利活用を図る研究開発にも新たにに取り組む。

ただし、2020年には発送電分離が実施される一方で、2019年より住宅用太陽光発電の固定価格での買取期間が順次満了するなど、再生可能エネルギーに関わる様々な社会の動きがあり、経済動向もまた再生可能エ

ネルギーの伸長に大きく影響するため、日本国内のエネルギー供給の将来動向を予測することは容易ではない。その一方で、地球温暖化が社会に与える影響が次第に顕在化しつつあり、低炭素化の実現はもはや待ったなしの課題である。そこで、鉄道に適した次世代のエネルギーマネジメントとはどのようなものであるのか、複数のシナリオを想定しつつ、現在の常識にとらわれることなく検討を進めていくことが重要である。

そこで鉄道総研は、今回紹介した研究開発だけでなく、水素社会に対応した燃料電池車両の開発や、超電導磁気浮上式鉄道で培った技術を応用した新しい地上蓄電装置である超電導磁気軸受けフライホールの実用化など、さまざまな研究開発を行うことにより鉄道の低炭素化を実現し、地球温暖化の抑止に貢献したいと考えている。

なお、本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た。また、超電導き電ケーブルに関わる研究の一部は、その他、国立研究開発法人科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム（JPMJSV0921）」、「未来社会創造事業（JPMJMI17A2）」、および国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の支援を受けて実施してきている。

## 参考文献

- 1) 高垣昌和, 加藤祐貴, 八木毅: 構造最適化技術を活用した車両構体の提案, 鉄道総研報告, 31巻4号, 2017
- 2) 森久史, 上東直孝, 森本文子, 松井元英, 曾根康友: 難燃性マグネシウム合金で鉄道車両を軽量化する, RRR, 75巻1号, pp.20-23, 2018
- 3) 武内陽子, 小川知行, 森本大観, 今村洋一, 美濃部晋吾, 杉本祥一: 列車運行電力シミュレータの開発, 鉄道総研報告, 30巻8号, pp.5-10, 2016

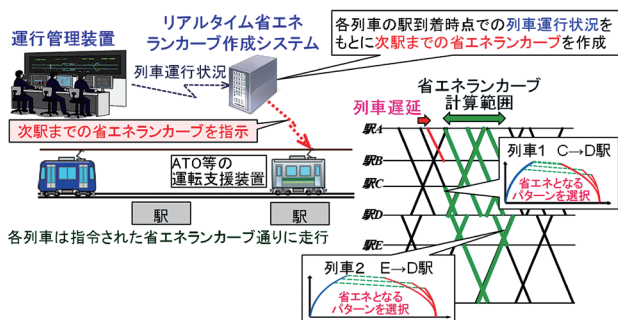


図11 省エネランカーブのリアルタイム生成

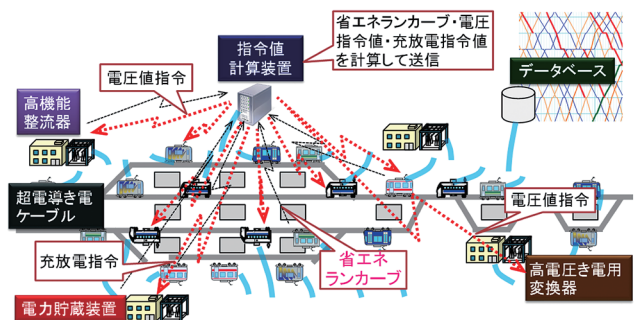


図12 複数の省エネ施策のリアルタイム協調制御

- 4) 森田岳, 彦坂知行, 林田広和, 加藤昌史: 整流器用可変リアクトルの設計手法, 鉄道総研報告, 32巻4号, pp.11-16, 2018
- 5) 富田優: 超電導き電ケーブル開発の現状, JREA, 61巻9号, pp.42482-42485, 2018
- 6) 吉井剣: 高電圧き電システムにおけるDC-DC変換器のDC-AT制御法, 2019年電気学会産業応用部門大会, pp.5-9, 2019
- 7) 齋藤達仁, 生出珠之助, 小川知行, 武内陽子, 森本大観: 列車の力学的エネルギーと架線電圧を用いた地上蓄電装置の充放電制御方式, 2019年電気学会産業応用部門大会, pp.5-58, 2019
- 8) 武内陽子, 小川知行, 佐藤圭介, 森本大観, 齋藤達仁: 最適充放電制御による地上蓄電装置の容量選定手法, 鉄道総研報告, 34巻2号, 2020
- 9) 武内陽子, 佐藤圭介: 運転操縦方法の選択による列車運行エネルギーの最小化, 鉄道総研報告, 31巻10号, pp.41-46, 2017