

脱炭素実現に向けた鉄道電力システムの高度化

電力技術研究部長
重枝 秀紀



1. はじめに

JR、公民鉄を合わせた我が国の鉄道の電化率は路線長ベースで62%程度であるが、エネルギー消費量ベースでは、路線毎の輸送量が反映された結果として電力が約95%を占めている。二酸化炭素 (CO₂) の排出量も電力利用によるものがほぼ同じ割合であり、残りが気動車などの燃料の燃焼によるものである。したがって、再生可能エネルギー（以下、再エネ）等による電力の脱炭素化が進めば、鉄道の脱炭素化も自ずと大きく進捗することになる。

電力の脱炭素化について、本年10月に国の第6次エネルギー基本計画が閣議決定され、2030年の電源構成に関する野心的な見通しとして、従来20～22%程度としていた再エネの比率を36～38%程度に引き上げ、非化石エネルギーの合計比率を59%程度とすることなどが示された。再エネのうち、気象条件等に

よる発電量の変動が大きい自然変動電源である太陽光発電の比率は14～16%程度、風力発電の比率は5%程度と想定されており、電力の供給サイド、需要サイドの双方において、これらの変動を受容可能な電力システムの構築が求められる。

鉄道総研が「鉄道の将来に向けた研究開発」の一環として取り組んでいる研究課題「電力ネットワークの電力協調制御による低炭素化」では、鉄道の電力利用について従来から取り組んでいる「消費エネルギーの削減」に加えて、鉄道においても電力供給の変動を受容可能なシステムを構築することを目的としている。具体的には、供給サイドにおける再エネを積極的に活用して電力の脱炭素化を図るために、鉄道用の蓄電装置を供給サイドの電力系統（以下、商用系統）とも協調制御する「スマート蓄電システム」の構築に新たに取り組むことを大きな特徴としている（図1）。

本講演では、鉄道電力システムにおける脱炭素化実

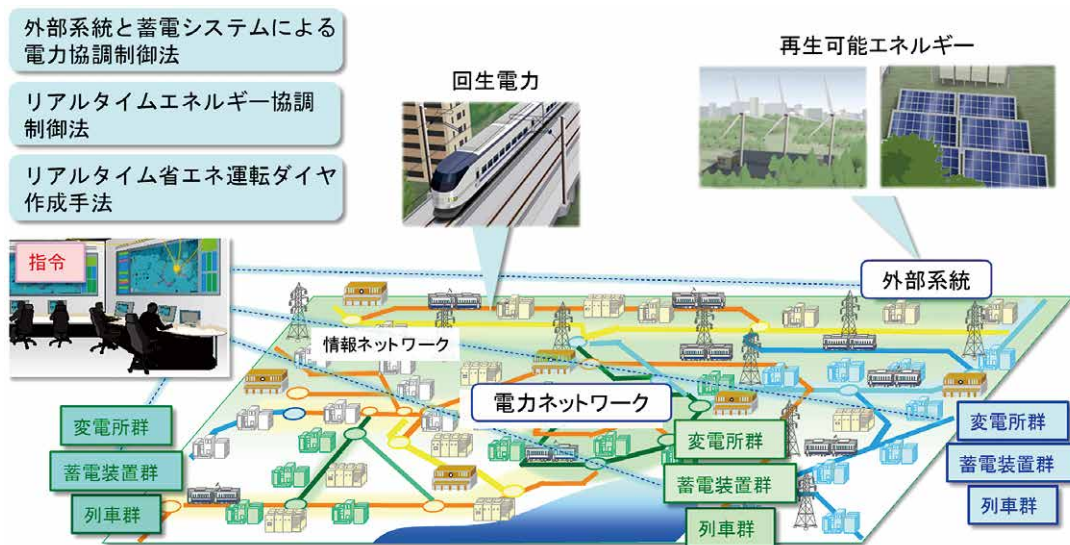


図1 「電力ネットワークの電力協調制御による低炭素化」の主な取り組み

現に向けて、鉄道のさらなる省エネルギー（以下、省エネ）化に対するこれまでの取り組みと、鉄道における再エネ活用の取り組みについて述べるとともに、現在研究開発を進めているスマート蓄電システムの概要を紹介する。

2. 鉄道電力システムにおける省エネルギー

2.1 鉄道電力システムの概要

鉄道電力システムの例として、直流電気鉄道の代表的な構成例を図2に示す。一般に、鉄道電力システムでは商用系統から交流の電力を購入し、鉄道用変電所（以下、変電所）において列車運行用のき電系統に向けた直流電力と、沿線の信号設備や駅設備用の配電系統に向けた交流電力に変換して供給する。前述のとおり、電力の脱炭素化に向けて商用系統における再エネ比率の向上が見込まれるとともに、鉄道における再エネ活用として駅舎などに小規模の太陽光発電設備（以下、PV）を設置して配電系統に連系する事例も多い。

2.2 鉄道の消費エネルギー内訳

直流電気鉄道における消費エネルギーの内訳を図3に示す¹⁾。変電所で商用系統から購入した電力のうち、き電系統と配電系統の比率は一般に8:2程度であるが、駅設備の電力消費が多い地下鉄事業者では5:5程度になることもある。

き電系統のエネルギー内訳を詳細にみると、送電損失が全体の6%程度を占め、残りが車両に供給される。近年の車両は基本的に回生ブレーキを備えており、加速時に消費したエネルギーの一部を減速時に回生電力としてき電系統に戻し、他の車両の加速などに活用で

きるが、回生ブレーキだけではブレーキ力が不足する場合などに、機械ブレーキを併用することによるエネルギー損失が15%程度を占める。その中には、回生電力に見合った負荷が無いために回生電力を制限したことにより生じた損失が含まれており、これを制限することなく活用できれば省エネ化が可能である。回生電力の制限に伴う損失の割合は路線や列車運行などの条件によるが、き電系統の送電損失と合わせて、消費エネルギー全体の10~15%を占めると想定される。

2.3 鉄道電力システムにおける省エネの取り組み

上記のエネルギー内訳を踏まえて、直流電気鉄道の省エネに向けた鉄道電力システムにおける主な取り組みは次の3点になる。

- ①き電系統における送電損失の低減
- ②き電系統における回生電力の制限に伴う機械ブレーキ損失の低減
- ③配電系統における送電損失低減と省エネ

鉄道総研では、主にき電系統における①と②の損失低減に関する研究開発を進めている。両者に対する施策として、き電電圧の昇圧（例えば1500V→3000V）が有効であることが知られている²⁾が、地上設備と車両の改修を要する。そこで、地上設備の改修だけで昇圧と同等の効果をえられる直流高電圧き電システム（図4(a)）を提案した³⁾。本方式は、DC-DC変換器を介して直流の高電圧き電線（例えば6000V）と従来のき電系統との間で電力を融通させるものであり、遠方の列車にも回生電力を送れることから、回生電力の利用率が向上する。また、高電圧化して電流を小さくすることで送電損失を低減する。鉄道総研で開発したき

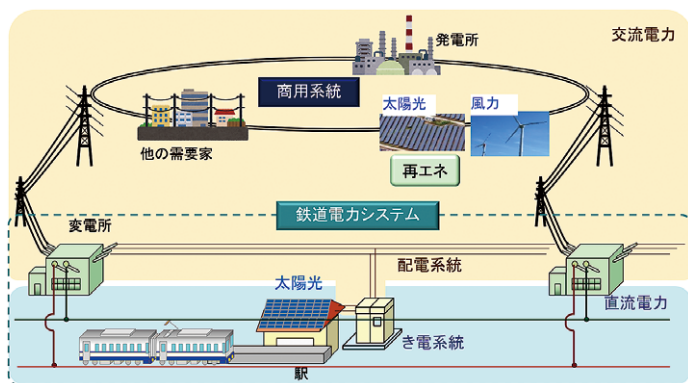


図2 直流電気鉄道の電力システム構成例

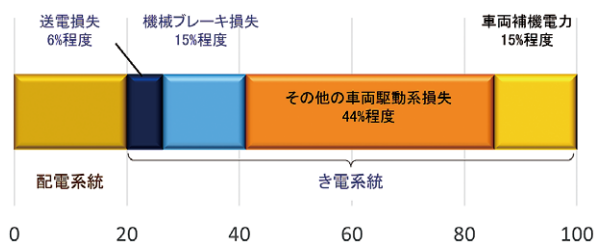


図3 直流電気鉄道の消費エネルギー内訳
(文献1を基に作成)

電系統用の電力シミュレーターを用いてモデル路線を対象とした試算を行った結果、平均3.5%の省エネ効果が認められた。

また、実用化に向けた研究開発を行っている超電導き電ケーブルを適用すれば、上記システムと同等以上の省エネ効果が得られると期待される(図4 (b))。既に400 m級のシステムを既存路線のき電系統と並列に接続して電力を供給する検証を行っており⁴⁾、さらにキロメートル級のシステム構築に向けた研究開発を進めている。

上記以外の取り組みとして、回生電力を他の列車に活用する機会増を目的とした上下タイキ電方式、回生電力を交流電力に変換して配電系統で活用する回生インバーター、回生電力を一時的に充電して列車の加速時に活用する蓄電装置など、様々な施策が既に適用されており、鉄道総研でも電気二重層キャパシタを蓄電媒体とする蓄電装置を開発、実用化した⁵⁾。蓄電装置については、このほかりチウムイオン電池やニッケル水素電池などの蓄電池、あるいはフライホイールを蓄電媒体とするものが実用化されており、国内では2019年時点で40台以上の装置が運用されている。

3. 鉄道における再エネ活用

3.1 商用系統における再エネ比率向上

鉄道の脱炭素化に向けた取り組みとして、さらなる省エネの他に再エネなど非化石エネルギーの活用も不可欠である。1章で述べたように、電力利用を主とする鉄道事業者においては、商用系統において再エネなど非化石エネルギーの導入拡大による電力の脱炭素化が進めば、自ずと脱炭素化が進捗する。ただし、自然変動電源の導入が拡大する上で安全性や安定供給が大前提であり、第6次エネルギー基本計画では需要サイドの取り組みとして、供給サイドの変動に合わせたデマンドレスポンス(DR)等の需要の最適化を適切に評価する枠組の構築、蓄電装置等の分散型エネルギーリソースを活用したアグリゲーションビジネスの推進などが挙げられている。このため、供給サイドと需要サイドの双方で部門横断的にエネルギーマネジメントを行い、再エネを最大限活用して脱炭素化を図るセクターカップリングに関する様々な研究開発や実証試験が行われており、鉄道事業者がこれらの取り組みに参入することも、脱炭素化への貢献につながるものと期待される。

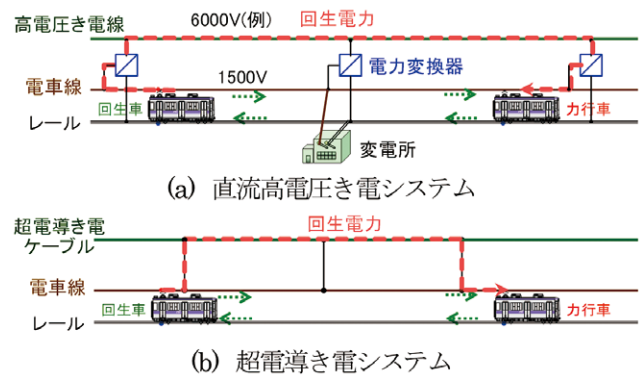


図4 省エネに向けたき電システム

3.2 鉄道事業者による再エネ調達

鉄道事業者が積極的に再エネを活用する方法として、駅舎の屋根上や鉄道敷地に自社でPV等を設置する、電力小売事業者の再エネ電力メニューを利用する等の他、鉄道敷地に他社が設置した再エネ発電から電力を購入するオンサイトPPA (Power Purchase Agreement: 電力購入契約)、鉄道敷地外に他社が設置した再エネ発電から商用系統経由で電力を購入するオフサイトPPA等の形態があり、再エネ調達手段は多様化している。列車運行用電力としてこれらを利用する場合は大規模な発電設備が必要となるが、それがPVである場合は日中に発電量が最大となるPVの特性と、朝夕のラッシュ時に負荷が多く日中は少なくなる鉄道負荷の特性の相性が悪く、何らかの調整を行わなければ鉄道負荷として再エネを有効に利用できない点が課題である。

4. スマート蓄電システム

4.1 スマート蓄電システムの概要

これまで述べたように、脱炭素化に向けて鉄道電力システムのさらなる省エネを進めるとともに、鉄道において再エネ活用の促進を図る必要がある。そこで、鉄道総研では「電力ネットワークの電力協調制御による低炭素化」の一環として、従来単体で機能している鉄道電力システム内の蓄電装置を協調して制御することで省エネ効果の向上を図るとともに、商用系統に連系された再エネとも協調させることで鉄道における再エネ利用率の向上やDRの実施による調整力の提供を目指した「スマート蓄電システム」の構築に取り組んでいる。

スマート蓄電システムの構成を図5に示す。上記の目的を踏まえた本システムの機能は次のとおりである。

①回生電力活用による省エネ効果の向上

鉄道総研が構築に取り組んでいる「エネルギーネットワーク」⁶⁾の機能の一部であり、リアルタイムに収集した列車の位置、速度等の情報に基づき複数の蓄電装置の充放電を適切に制御することで、回生電力の利用率向上を図る。

②車載蓄電装置の活用

非電化区間を蓄電池だけで走行する蓄電池車両、停車時の非常走行用電源として蓄電装置を搭載した車両などに搭載した蓄電池を、車両基地に留置されている際に鉄道電力システムに接続し、回生電力や再エネの充放電に活用する。

③セクターカップリングによる脱炭素化

商用系統に連系されている鉄道向けの再エネ発電量等の情報に基づき、鉄道電力システムの蓄電装置で再

エネの充放電を行うことで、鉄道における再エネ利用率の向上を図る。また、外部のアグリゲーターからの指令に基づく充放電を行うことで、商用系統の変動に合わせたDR等の調整を行う。

4.2 スマート蓄電システムの適用例

本システムの適用イメージとして、図6 (a) に示すモデル路線において、商用系統に連系された5 MWのPV電力を鉄道負荷で活用するケースの検討例⁷⁾を示す。PVは、年間で最も発電量が大きくなる時期の晴天日に図7の電力を発電するものとした。

電力シミュレーターで計算したモデル路線全体の負荷電力を図8に示す。一般に、鉄道負荷は列車運行に応じて大きく変動する。このため、図8には30分毎の平均電力を青線で併せて示している。図7と図8を比較すると、日中の負荷電力は瞬時的に5 MW近くになる場合もあるが、平均電力は2 MW未満でありPV

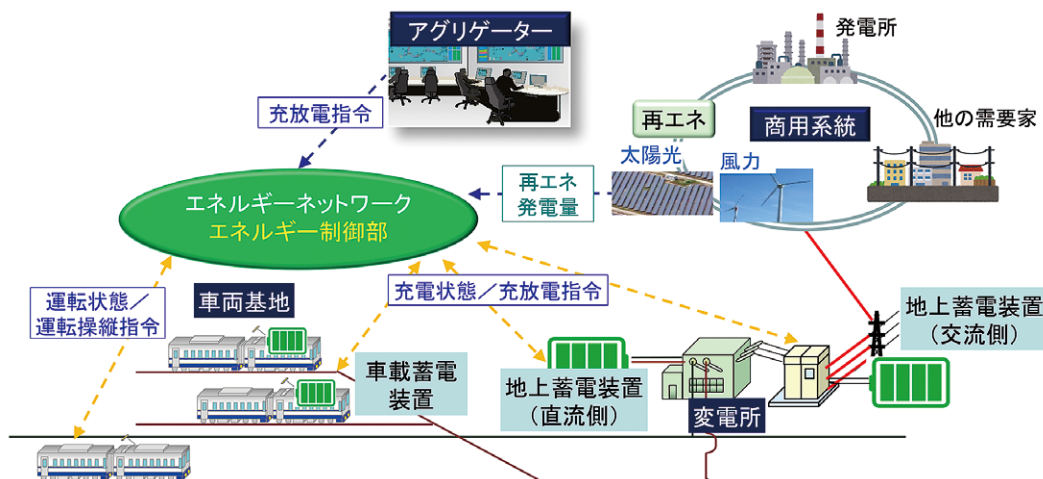
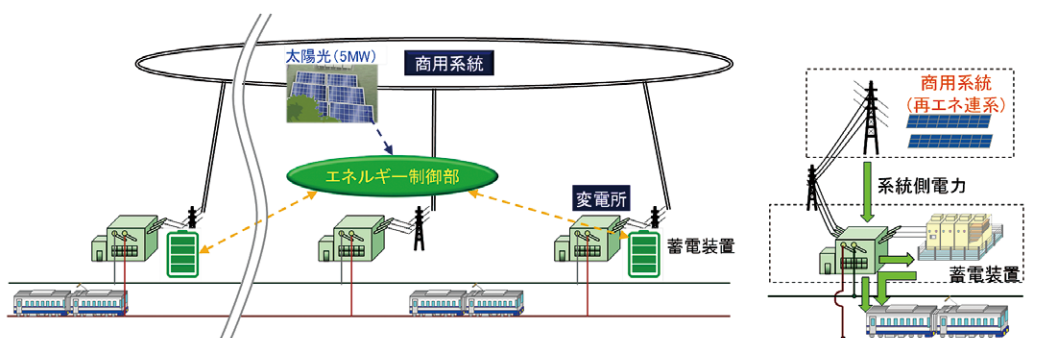
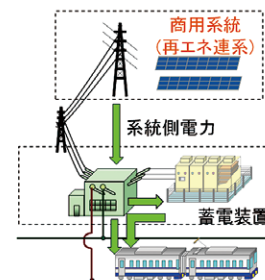


図5 スマート蓄電システムの構成



設備条件: 路線長約84km、単線、19駅、9変電所、蓄電装置の総容量30MWh
列車条件: 4両編成、90本/日(上下合計)

(a) モデル路線の条件



(b) 蓄電装置適用時の電力の流れ

図6 スマート蓄電システムの適用ケース

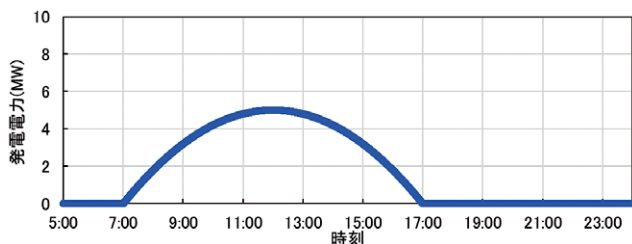


図7 PV発電電力特性

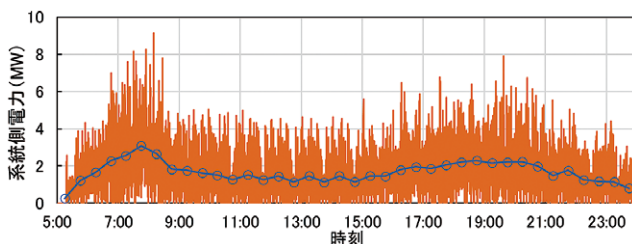


図8 モデル路線の負荷電力

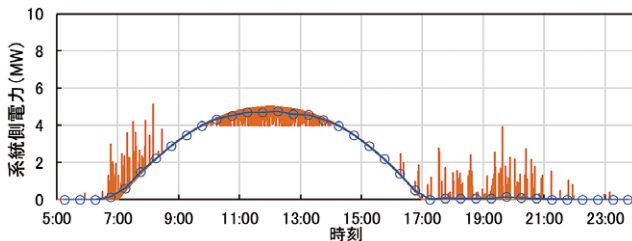


図9 蓄電システム適用時の負荷電力

電力が余る一方、負荷電力がピークとなる朝夕の時間帯はPV電力がごくわずかである。結果として、1日の負荷電力量31.9 MWhに対し、PV電力の利用率は約40%に留まる。

次に、1日の負荷電力量にほぼ匹敵する総容量30 MWhの蓄電システム（最大定格入出力4 MW）を適用するケースを考える。全変電所に均等に蓄電装置を設置する場合、1台あたりの容量は約3.3 MWhとなる。蓄電システムは、PV発電量と負荷電力に基づき制御を行い、図6 (b) に示すようにPV電力が負荷電力を上回る場合はその差分を充電、PV電力が負荷電力に対して不足する場合は不足分を負荷側に放電し、商用系統側には放電しないものとする。

上記の制御を適用した場合の、商用系統側から見た鉄道負荷電力を30分平均電力とともに図9に示す。蓄電システムによって日中に充電、他の時間帯に放電を主とする調整を行った結果として、負荷電力は図7のPV電力とほぼ同じ特性となり、約97%を鉄道側で消費したことになる。ただし、この中には蓄電装置の充

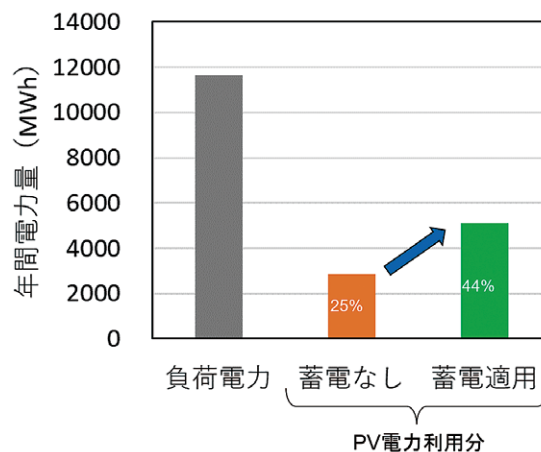


図10 年間のPV電力利用率

放電に伴う電力損失も含まれており、全量が列車運行に供されるわけではないことに留意する必要がある。

以上の結果を基に、次の仮定に基づいて年間のPV電力利用率を試算した結果を図10に示す。

- 負荷電力は、図8（平日ダイヤ相当）を365日分計上する。
- 蓄電システムの制御は晴天日のみ行う。
- 蓄電システムの充放電効率は80%とする。
- 年間の晴天日数は250日（約7割）とし、曇天日・雨天日のPV電力は計上しない。
- 季節によるPV発電量の低下を考慮した通期のPV発電効率は80%とする。ただし、蓄電システムを適用しない場合においては、PV発電量が低下しても日中の負荷電力への供給は可能と想定されるため、発電時間の低下のみを考慮してPV発電効률을90%とする。

図10より、蓄電システムを適用することで負荷電力に対するPV電力の利用率が25%から44%に向上し、その分、列車運行に伴うCO₂排出量の削減が可能となる。

本検討は、商用系統との協調による再エネ利用率の向上を主目的とした例であるが、回生電力活用による省エネも考慮した協調制御手法など、種々の検討を進めているところである。

4.3 スマート蓄電システムの研究課題

スマート蓄電システムの構築に向けて我々が取り組んでいる主な研究課題を次に示す。

(1) 適用効果評価手法の開発

商用系統との協調制御による適用効果を試算するため、電力シミュレーターに商用系統を模擬する機能を

新たに付加した。これを利用して各種制御による効果を定量的に評価する。一方、再エネの導入促進に向けた制度設計は現在進行形であり、その動向を注視しながら、脱炭素化の効果と投資効果の両面から鉄道事業者のメリットを明確にしたシステムの提案を目指す。

(2) 蓄電システム制御アルゴリズムの確立

鉄道の蓄電装置には回生電力活用以外にも回生ブレーキ力の確保や非常走行用電源などの用途を持つものがあり、商用系統との協調も考慮した蓄電システムを検討する上で、それらの用途が相反する場合がある。このため、鉄道運行において優先すべき機能の維持を前提としつつ、前項の適用効果評価に基づき脱炭素化に効果的なシステム構成と協調制御アルゴリズムの開発に取り組む。

(3) 車載蓄電装置の活用に向けた検討

車載蓄電装置を活用する上で、本来の用途における蓄電池寿命に対して新たな用途に基づく充放電が大きな影響を与えないことが重要である。このため、様々な充放電条件に対する蓄電池のサイクル通電試験を実施し、本来用途に影響しない制御条件を導出する。

また、車両基地等に留置されている車両の蓄電装置では、架線とパンタグラフとの接点における発熱等によって充放電電流が制限される。そのような制約を考慮した上で、効果的な活用方法の提案を目指す。

5. おわりに

地球温暖化に起因するとされる気候変動は、国内の鉄道運営にも影響を及ぼしつつあり、地球温暖化対策として脱炭素化の取り組み促進は不可避である。特に、再エネの主力電源化を進めるにあたり、再エネの一定割合を占める自然変動電源への対応は重要であり、今後普及が見込まれる電気自動車等の蓄電池を再エネに対する調整に用いるための研究開発を始め、様々な取り組みが行われている。

鉄道分野における国内の蓄電装置は、現状1台あたり数十～数百 kWh程度の規模であり、導入数も限られていることから、調整力としては極めて局所的な効果に限定される。しかしながら、近年、鉄道負荷のピークシフトや非常走行用電源としての用途に加え、調整力の提供も視野に入れた7 MWh級の蓄電装置を導入した国内事例⁸⁾もあり、今後の制度設計によっては大規模蓄電装置の導入が進むことも考えられる。また、海外では我が国同様に自然変動電源を含めた再エネの導入拡大を図るポーランドにおいて、鉄道に

1.2 MWh級の蓄電装置を300台導入し、鉄道の電力供給安定化と再エネに対する調整に供する計画がある。

鉄道総研は、本講演で紹介したスマート蓄電システムに関する研究を通して、再エネの導入拡大に向け鉄道事業者のメリットを明確にした取り組みを提案するとともに、鉄道電力システムの更なる省エネや鉄道電力システムを利用した再エネ電力の融通などの研究開発を推進し、脱炭素化の実現に貢献したいと考えている。

なお、本講演で紹介した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 (JPMJSV09 21)」、 「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) 鉄道電気利用における省エネルギー・新エネルギー技術の効果の検証調査専門委員会編：鉄道電気利用における省エネルギー・新エネルギー技術の効果の検証，電気学会技術報告 第1499号，電気学会，pp.86-88，2021
- 2) 高電圧直流電化方式調査専門委員会編：直流電気鉄道の高電圧化の調査報告，電気学会技術報告第II-295号，電気学会，p.3，1989
- 3) 吉井剣・石山琢麻・川原敬治：高電圧き電システムにおけるDC-DC変換器のDC-AT制御法，電気学会産業応用部門大会，5-19，2019
- 4) 福本祐介・小林裕介・荒井有気・富田優：超電導き電システムを利用して鉄道に電力を供給する，RRR，Vol.78，No.1，pp.8-11，2021
- 5) 蔦川秀・小西武史・上村正：電気二重層キャパシタを用いた電力回生吸収装置「キャパポスト」の実用化，鉄道と電気技術，Vol.19，No.8，pp.19-23，2008
- 6) 池田充：電力ネットワークの電力協調制御による低炭素化，第32回鉄道総研講演会要旨，2019
- 7) 小西武史・生出珠之助：低炭素化を指向した大規模蓄電装置の適用を想定した“R1G”と“R2G”の比較検証，電気学会産業応用部門大会，5-26，2021
- 8) 中井貴哉，桂木浩光，杉浦治：近鉄東花園変電所蓄電システム導入の成果検証について，第33回鉄道電気テクニカルフォーラム講演集資料，pp.97-100，2020