

# 脱炭素化に求められる鉄道技術

理事  
古川 敦



## 1. 脱炭素化に向けた動き

### 1.1 脱炭素化に向けた国内外の動き

2021年8月9日に、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第6次評価報告書の政策決定者向け要約<sup>1)</sup>が公表された。この中では、地球温暖化は温室効果ガスの排出に伴う人為的なものであることをIPCCとして初めて断言し、また温暖化に伴って熱波や豪雨といった極端現象の頻度や強さが増すとした。毎年のように大雨による被害を受ける鉄道にとっても、地球温暖化対策は喫緊の課題である。

地球温暖化への対応は、二酸化炭素（以下、CO<sub>2</sub>）を主体とする温室効果ガスの排出量の削減策（緩和策）と、激甚化する気象災害への対応策（適応策）の2つに分けられる。このうち本稿では、地球温暖化の緩和策としての、鉄道におけるCO<sub>2</sub>排出量削減のための技術に主眼を置いて述べる。

日本では菅義偉内閣総理大臣（当時）が、2020年10月26日の第203回国会の所信表明演説において、2050年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言し、2021年5月26日の改正地球温暖化対策推進法の成立によってこれが法的に位置づけられた。また同年6月18日には経済産業省が「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略<sup>3)</sup>」（以下、グリーン成長戦略）を取りまとめ、10月22日には第6次エネルギー基本計画<sup>4)</sup>が閣議決定されるなど、カーボンニュートラルに向けた動きが加速している。

海外に目を向けると、EUは2020年12月に「持続可能でスマートなモビリティ戦略<sup>5)</sup>」を定め、2030年に高速鉄道の輸送量を2倍、鉄道貨物の輸送量を1.5倍に、2050年にはそれぞれ3倍、2倍とする目標を設定した。またフランスでは2021年7月に、鉄道で片道2時間半未満の区間の国内航空路線の廃止等を定めた環境法案

が成立するなど、欧州では他交通機関よりもCO<sub>2</sub>排出量が少ない鉄道へのモーダルシフトによる脱炭素化の動きが加速している。

このように、脱炭素化は世界的な流れであり、我が国の鉄道においても対応が求められている。国土交通省は、2021年7月に公表した「国土交通グリーンチャレンジ<sup>6)</sup>」において、鉄道などの輸送機関におけるカーボンフリーな代替燃料への転換、あるいはMaaSや物流MaaSなどによるCO<sub>2</sub>排出原単位の小さい輸送手段へのモーダルシフトや輸送の効率化を目指すこととしている。また各分野でESG投資やSDGs経営への取り組みが加速しており、国内の鉄道事業者の中には気候関連情報開示タスクフォース（TCFD）への賛同、あるいはカーボンニュートラルに向けた経営戦略の公表など、環境問題への積極的な取組を示している事業者もある。

一方、鉄道以外の交通機関では、温室効果ガス排出量を削減するために、電化、あるいは水素やバイオ燃料の活用など、カーボンニュートラルに向けた様々な技術開発を進めており、また欧州では、脱炭素化に関わる技術の国際標準化を戦略的に進めている。

このように、国内外で脱炭素化への取組が政策、企業経営、技術開発の各部門で加速しており、元来CO<sub>2</sub>排出量が少ない鉄道においても、喫緊の課題として取り組まねばならない状況にある。

### 1.2 カーボンニュートラルのための戦略

グリーン成長戦略に示された、2050年カーボンニュートラルに向けた戦略を図1に示す。非電力部門（燃料を燃やしてエネルギーを得る部門）では電化を進めるとともに、水素やアンモニア、バイオマスなどからエネルギーを得ることで化石燃料の使用量を最小化する。また、電力部門では再生可能エネルギーを主力電源にするとともに、CO<sub>2</sub>の吸収や固化などにより

大気中への排出を最小限とする。あわせて、大気中へのCO<sub>2</sub>排出に見合う植林やCO<sub>2</sub>直接回収技術によってカーボンニュートラルを実現する。

鉄道との対応で言えば、非電力部門では燃料電池電車の導入やバイオ燃料などによる気動車の脱炭素化などが、電力部門では再生可能エネルギーにより発電した電力を用いた列車運転の実現などが該当する。詳細は次章以降で述べる。

## 2. 鉄道における脱炭素化の方向性

### 2.1 交通機関別のCO<sub>2</sub>排出量の実態とモータールシフト

鉄道はそもそもCO<sub>2</sub>排出量が少ない交通機関であり、

2019年における日本の鉄道からのCO<sub>2</sub>排出量は787万トン（列車運転等のための火力発電からの排出量を含む）で、日本全体（11.08億トン）の1%に満たない<sup>7)</sup>。また、図2に示すように単位輸送量あたりのCO<sub>2</sub>排出量も他交通機関と比較して非常に少ない<sup>7)</sup>。とはいえ、自動車の電化が進んだ場合、例えばグリーン水素（製造時にCO<sub>2</sub>を排出しない水素）で走行する燃料電池自動車が普及すると、自動車の人キロあたりCO<sub>2</sub>排出量は現状の鉄道以下に減少すると見込まれることから<sup>8)</sup>、鉄道においても環境面での優位性を維持するために脱炭素化に向けた一層の技術開発が必要である。

いずれにせよ図1に示す戦略を社会的に実現するためには、CO<sub>2</sub>排出原単位が大きい自家用車、自家用・営業用貨物車あるいは航空の需要を鉄道に移転する

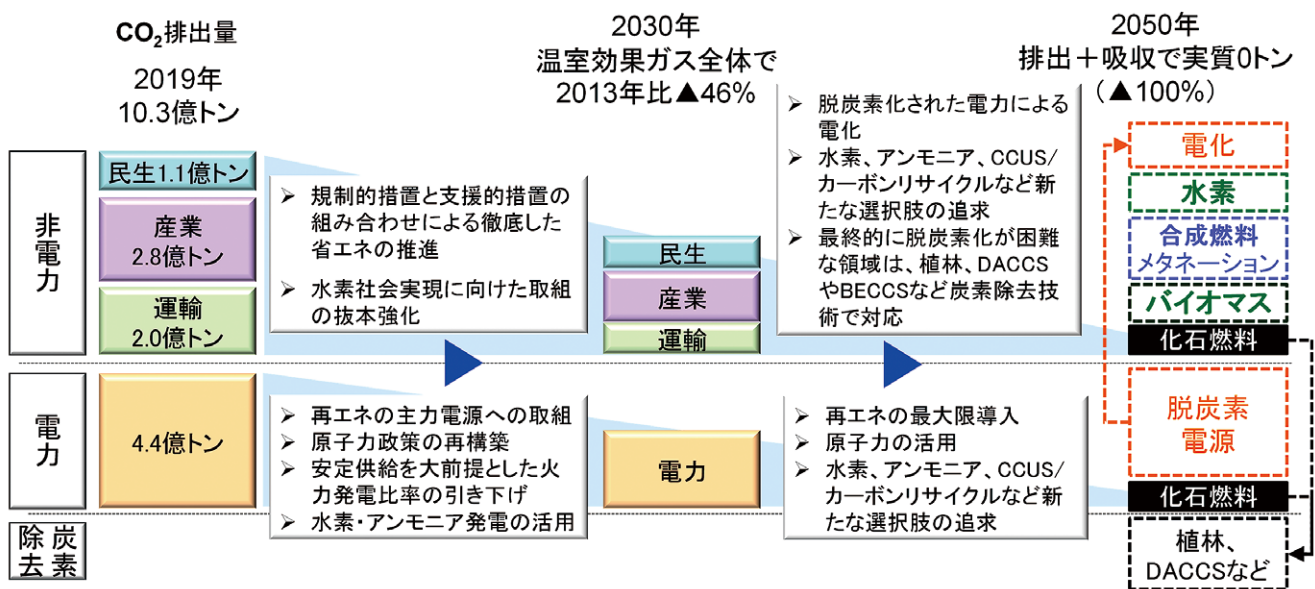


図1 2050年カーボンニュートラルに向けた戦略<sup>3)</sup>

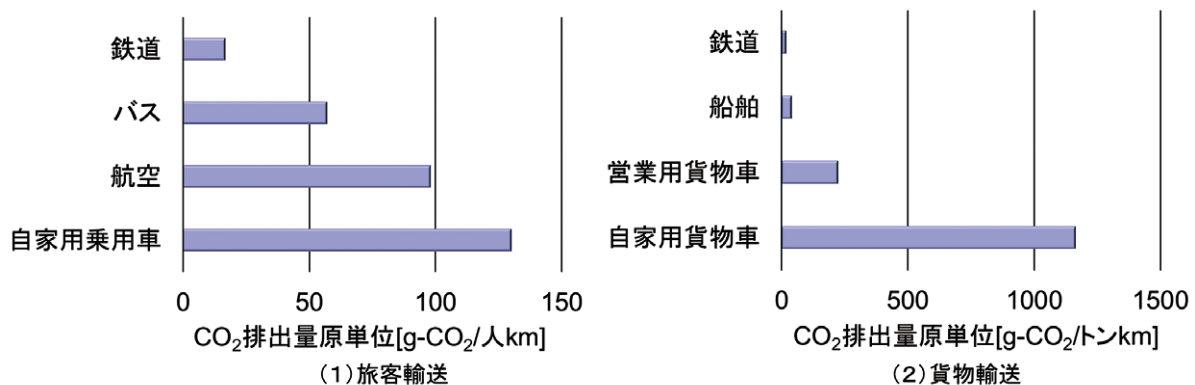


図2 国内の交通機関別の単位輸送量あたりのCO<sub>2</sub>排出量 [2019年度]<sup>7)</sup>

「モーダルシフト」が有効であり、1章で紹介したように国内外で政策的に進められている。特に、最近注目を集めているMaaS (Mobility as a Service) は、鉄道を含む公共交通を有機的に統合し、鉄道にとって弱点である駅まで／駅からの輸送を改善してモーダルシフトを促進するうえで有効である。このため日本国内においても、脱炭素化、都市内の渋滞緩和、あるいは地域活性化を目的に各地で取り組まれている。MaaSでは、情報、予約・決済、サービス提供、政策の各段階における各交通機関の統合がその中核となる<sup>9)</sup>。このような様々なレベルでの統合を実現するため、鉄道では自然災害などによるダイヤ乱れ時における遅延予測や迂回情報の提供、あるいは列車の運行に応じた駅から／駅までの2次交通のデマンド輸送の実現などの技術開発が求められる。

## 2.2 鉄道におけるCO<sub>2</sub>排出量

鉄道から排出されるCO<sub>2</sub>は、事業の運営そのもので排出されるものに加えて、鉄道土木構造物の建設に用いるセメントや鋼材、あるいは車両に用いる鋼板などの素材の製造や廃棄、また建設や加工のための動力などからも発生する。脱炭素化のためには、このような、施設・設備の建設・製造から廃棄までのライフサイクル全体にわたるCO<sub>2</sub>発生量(カーボンフットプリント)の評価が必要となる。UIC(国際鉄道連合)がまとめたフランス、台湾、中国の高速鉄道のカーボンフットプリントの算出例を図3に示す<sup>10)</sup>。運転に伴うCO<sub>2</sub>排出量の差は各国の電源構成の違いによるものであり、調査当時(2008年)において電源の約3/4が原子力発電であったフランスは、約80%が化石燃料による電源であった台湾、中国の1/5以下である。また、台湾、中国の高速鉄道の土木構造物は高架橋が主体であるのに対し、フランスのLGV(TGVが走行する高速新線)は土工区間主体であるため、建設時や資材(セメントなど)製造時のCO<sub>2</sub>排出量が少ない。このほか、1日あたりの列車本数や1列車あたりの乗車人数によっても人キロあたりのCO<sub>2</sub>排出量は変化する。

このように、カーボンフットプリントは様々な条件

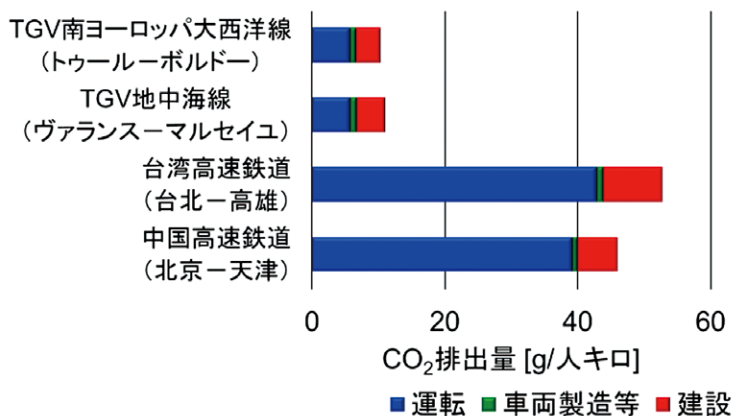


図3 高速鉄道のカーボンフットプリントの例<sup>10)</sup>

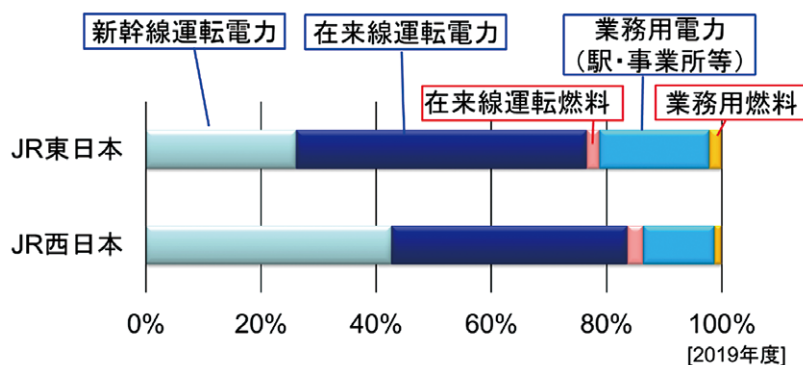


図4 鉄道におけるエネルギー消費量の内訳<sup>11,12)</sup>

によって変化し、例えば新線建設等のプロジェクト計画や土木構造物の構造計画の際には重要な評価指標となる。一方、既設線においてカーボンフットプリントを減らす方策は、運転や駅設備等から排出されるCO<sub>2</sub>削減の他は、設備の補修・交換・廃棄時に発生するものに限られ、全体に占める割合は大きくないこと、また建設資材製造時などの脱炭素化は社会全体の課題であることから、本稿では、鉄道固有の技術である列車運転時のCO<sub>2</sub>排出量削減に絞って議論する。

図4にJR東日本<sup>11)</sup>、JR西日本<sup>12)</sup>が公表している両社におけるエネルギー消費量の内訳を示す。全体の約8割が列車運転に伴うものであり、2割が駅や本社ビルなどの業務用電力・燃料によるものである。また運転時に消費するエネルギーの約95%は電力であり、気動車の燃料は5%程度に過ぎない。これは、今後図1の戦略にしたがって発電に伴うCO<sub>2</sub>排出量が減少すれば、鉄道が排出するCO<sub>2</sub>も自動的に減少することを意味しており、電化が進んだ鉄道の特徴といえる。

### 2.3 列車運転における脱炭素化技術の方向性

CO<sub>2</sub>排出量削減の方向性を検討する際に用いられる式として、CO<sub>2</sub>排出量を3つの因子に分解する式(1)の茅恒等式が知られている。

$$CO_2\text{排出量} = \frac{CO_2\text{排出量}}{\text{エネルギー消費量}} \times \frac{\text{エネルギー消費量}}{GDP} \times GDP \quad (1)$$

この式の1つめの因子は単位エネルギー消費量あたりのCO<sub>2</sub>排出量であり、これを小さくするためにはCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源が求められる。電力部門では再生可能エネルギーによる発電であり、非電力部門では、例えばグリーン水素の活用が挙げられる。第2項は単位GDPあたりのエネルギー消費量であり、鉄道の場合は人キロ・トンキロあたりのエネルギー消費量に相当する。これを小さくするためには省エネが求められる。

列車運転においてこの因子を小さくする方策は、電化区間では再生可能エネルギーで発電した電力の活用であるが、これにはいくつかの課題がある。再生可能エネルギーの主力である太陽光発電や風力発電は、個々の発電所が比較的小規模でありかつ発電量が天候に左右されるため、鉄道側の需要が最大となる朝夕のラッシュ時に必要な量の電力が得られるとは限らない。また太陽光発電や風力発電に適した土地は比較的人口が少ない地域に点在しており、送電網が十分に整備されていないことから、発電された電気を需要地へ送る手段が必要となる。再生可能エネルギーが主力電源となった場合、これらの需要と供給の時間的・空間的なギャップを鉄道側と電力供給事業者が協力して埋める

必要がある。非電化区間でCO<sub>2</sub>を減らす方策は気動車の電車化であり、具体的には燃料電池電車や蓄電池を活用した架線レス電車の導入が該当する。これが難しい場合はバイオ燃料などによるカーボンニュートラルの実現が挙げられる。

2つめの因子を小さくする方策は省エネであり、鉄道では古くから取り組んでいる。例えば電車の速度制御方式は、抵抗制御からチョップ制御、インバータ制御へと進化し、これに伴って省エネが進んできた。また、運動エネルギーを電気エネルギーに変換して架線に戻し、車両を減速する回生ブレーキは、最近のほとんどの電気車に装備されている。脱炭素化のためには、このような省エネ技術をさらに進めていく必要がある。

## 3. 鉄道総研における脱炭素化へ向けた研究開発

### 3.1 脱炭素化へ向けた技術課題

図5に、脱炭素化へ向けて鉄道総研が実施してきた技術課題のキーワードを、鉄道へのモーダルシフト、CO<sub>2</sub>排出量削減、省エネの技術分野別に示す。

以下、これらの分野別に研究開発のこれまでの成果と今後の計画を紹介する。

### 3.2 鉄道へのモーダルシフトに関わる研究開発

モーダルシフトについては政策的な取組が国内外で進められているが、鉄道へのモーダルシフトを技術開発の面から促進するためには、鉄道の利便性を技術的に向上することが重要であり、以下の3つの観点から

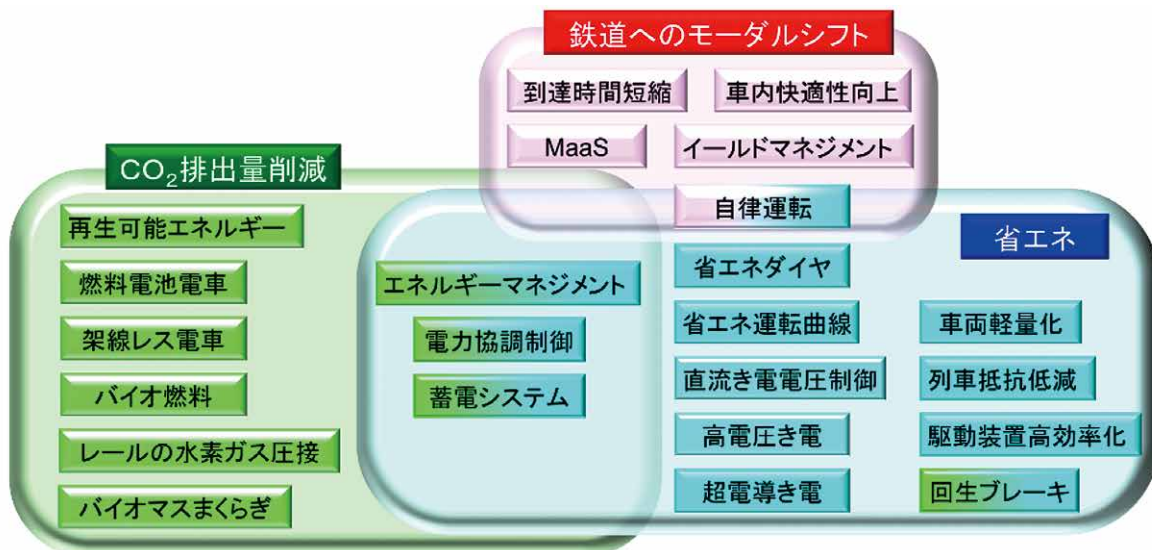


図5 鉄道総研における脱炭素化へ向けた技術分野と課題

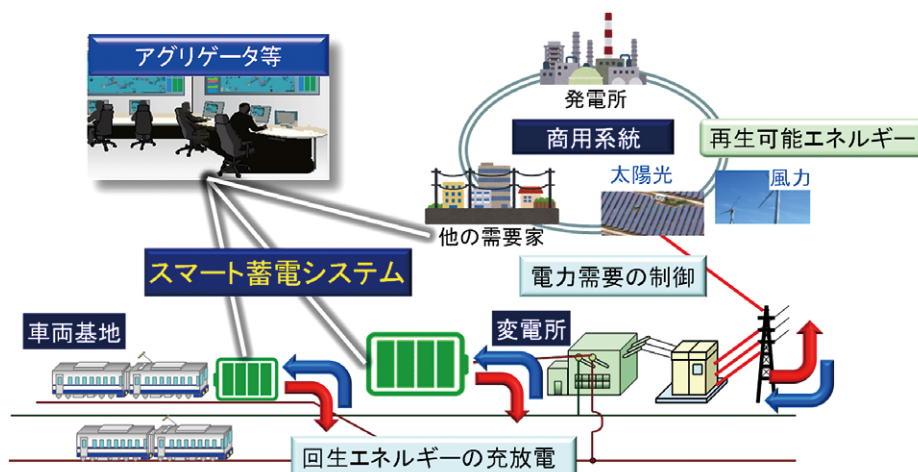


図6 スマート蓄電システム

研究開発を進めている。

### ①到達時分短縮

到達時分短縮のための技術開発は、狭義には新幹線や在来線優等列車の速度向上に関わるものが該当する。加えて、ダイヤ乱れが発生した際の遅延予測や早期回復に関わる技術開発も、広義の到達時分短縮に貢献する。例えばAIを用いた遅延予測手法の開発では、営業線における9日分の実績ダイヤを用いて評価したところでは、30秒以上の遅延が発生した駅間について遅延予測誤差が30秒以内であったものが85%以上であったという結果を得ている<sup>13)</sup>。

### ②車内快適性向上

車内の振動乗り心地改善、車内騒音低減、あるいは温熱環境の評価など多数の研究開発を進めている。最近では、新型コロナウイルス感染症の影響によって、自家用車によるパーソナルな移動の選択が増えていることから、窓開けによる車内換気量の定量化<sup>14)</sup>などによる、利用者への安心感の提供も重要である。

### ③イールドマネジメント

イールドマネジメントは、鉄道が価格面で他交通機関に対し優位となるために必要となる。鉄道総研では、特急列車における指定席と自由席の比率の決定、あるいは企画きっぷの最適な販売数量の決定など、旅客の需要を踏まえて鉄道事業者の収益を最大化するテーマに取り組んできた。今後は他交通機関からの移転を最大化する運賃・料金戦略の策定などが必要と考えている。

なお、MaaSについては、前述したように鉄道と他交通機関などとの各レベルにおける統合が求められる。これに対しては、防災分野において被災後の運転再開を支援する技術、あるいは列車自らが各種情報に基づ

き、進路を構成し、運転曲線を導出して自動運転する「自律運転」実現に向けた技術などが貢献できるものと考えている。

## 3.3 CO<sub>2</sub>排出量削減に関わる研究開発

茅恒等式の1つめの因子を小さくするための、CO<sub>2</sub>排出量削減に関わる研究開発課題には以下のものがある。

### (1) 電力ネットワークの電力協制御

日本の電源構成が再生可能エネルギー主体となった場合、鉄道側の需要と電力供給との時間的・空間的なギャップが生じるおそれがある。電力供給において需要と供給のバランスが崩れると周波数が変動して電気の品質が低下し、最悪の場合は大規模なブラックアウトが生じる。これを防ぐため、基本的には電力供給側で供給量を調整しているが、需要家自らが再生可能エネルギーによる発電を行ったり、蓄電システムを整備したりしている状況を踏まえ、需要家側のエネルギーリソースを有効に活用するための需給調整市場が2021年4月に開設された。

鉄道においても、再生可能エネルギーが主力電源となった場合は、需給調整を担うアグリゲータ等と協調して商用系統も含むマクロな電力需要の制御を行うとともに、鉄道側単体でもある程度の需要制御を行う必要がある。これに対し、電力供給ネットワーク、車両、各種蓄電システムと商用系統とを協調制御し、太陽光発電がピークとなる日中に鉄道側の地上蓄電システムや車両基地に留置中の車両の蓄電池を充電し、これを朝夕のラッシュ時に鉄道側で利用したり、太陽光発電の能力が低下する夜間に系統側へ給電したりする「スマート蓄電システム」(図6)の実現を目指した研究開発

を進めている。さらに地方の鉄道沿線に点在する小規模の再生可能エネルギー発電所からの電力を、鉄道の電力供給システムを通じて需要地に送電する手法を提案し、社会全体から見た再生可能エネルギーの有効活用を目指す。あわせて、再生可能エネルギーの時間的ギャップを埋めるためには各種蓄電システムの高性能化が求められる。これに対しては、超電導磁気軸受を利用したフライホイール蓄電システムや、超電導電力貯蔵装置の開発を進めている。

また、鉄道の電力供給ネットワーク内でのエネルギーマネジメントのために、き電回路、車両、運転に関わる電気や情報の流れ等を連成して計算できる列車運行電力シミュレータを開発した<sup>15)</sup>。今後は、これに蓄電システムのエネルギー計算機能や商用系統電力潮流計算機能を付加し、商用系統との協調制御や各種脱炭素化施策の評価に活用していく予定である。

## (2) 気動車の電車化

非電化区間での列車運転に伴うCO<sub>2</sub>排出量をゼロとするためには、架線がなくても走行可能な電車の導入が有効である。一つは、水素を燃料として走行する燃料電池電車であり、もう一つは、電化区間ではパンタグラフから給電して通常の電車として走行し、非電化区間では蓄電池からの給電により走行する架線レス電車である。

鉄道総研では、CO<sub>2</sub>を排出しない動力源である燃料電池、回生エネルギー活用のための蓄電池および電化区間を走行するための架線給電の、3モードハイブリッド電車の開発を2000年から開始し、2006年には出力100kWの燃料電池を搭載した車両を製作し、走行を実現した。さらに2019年には燃料電池の出力を150kWとし、電力変換装置、燃料電池を小型化して床下に搭載し、客室スペースを確保した車両を製作した<sup>16)</sup>。この車両は燃料電池を小型化するために、主電動機および補機には主として蓄電池から給電する。燃

料電池は主に蓄電池の充電のために動作し、主電動機に直接給電するのは加速時のみである。これにより燃料電池部分の容積を小型化して床下搭載を可能とした。主な諸元を表1に示す。一般的な通勤電車と同等の諸元を有しており、非電化区間の電車化を実現するとともに、再生可能エネルギーで製造した水素を使用すれば、前述した再生可能エネルギーによる発電の時間的・空間的なギャップの克服にも活用できる。

蓄電池を電源とする架線レス電車は、JR東日本のEV-E301系、EV-E801系、JR九州のBEC819系で実用化されている。いずれも電化された本線から分岐した比較的短い非電化区間を走行しており、これらの線区の電車化に貢献している。蓄電池の充電は電化区間で行うか、非電化区間に短区間設けられたき電設備から行う。これらの車両は蓄電池としていずれもリチウムイオン電池を用いており、劣化予測と計画的な交換が求められる。鉄道総研では、車載蓄電池の保守周期適正化のため、劣化診断法と寿命予測手法を提案している。

## 3.4 省エネに関わる研究開発

茅恒等式の2つめの因子を小さくするための、省エネに関わる研究開発課題には以下のものがある。

### (1) 回生エネルギーの有効活用

回生ブレーキによって架線に戻された電力は近くを走行する列車の加速や補機電力に使用される。一方、近くに列車がない場合や架線電圧が高すぎる場合は、回生ブレーキが有効に動作しない「回生絞込」や「回生失効」が生じる。この場合、車両の運動エネルギーは摩擦熱や電気抵抗として散逸してしまうため、エネルギーの有効活用に向けて、以下のような技術開発を行っている。

#### ① 直流き電におけるき電電圧制御

架線電圧が高いことによる回生絞込や回生失効を起りにくくするために、直流き電システムにおいて整流器用変圧器と整流器との間に電圧調整装置（可変リアクトル）を挿入し、き電電圧の制御を可能とする装置を開発した<sup>17)</sup>。試作した装置を用いて鉄道総研所内で試験を行ったところ、き電電圧1500Vに対し370Vの幅で電圧の制御が可能であることを確認した。

#### ② 遠方の列車への回生電力供給

送電に伴うエネルギー損失を低減するとともに、より遠くの列車に回生電力を供給するために、超電導き電ケーブルや高電圧き電システムの開発を進めている。いずれもそれぞれのシステムに適した条件下であれば、電力消費量を5%程度削減できる見通しである。

表1 燃料電池ハイブリッド電車の主な諸元

項目	性能
起動加速度	2.5km/h/s
最大減速度	3.1km/h/s
駆動軸数（編成当たり）	2台車4軸
編成出力	燃料電池 150kW リチウムイオン電池 540kW
主電動機	95kW × 4
高圧水素タンク	20kg (35MPa × 180ℓ × 4)

### ③蓄電システムの制御

回生電力を消費する列車負荷が近傍にない場合のために、いくつかの事業者では発生した回生電力を地上の蓄電システムに充電し利用している。現在の事例では架線電圧が一定以上の場合に充電し、一定以下の場合に放電するというシンプルな制御が行われているが、鉄道総研では、前述の列車運行電力シミュレータにより、架線電圧に加えて車両の走行位置や蓄電システムのSOC (State of Charge) を考慮した、より効率の高い充放電制御アルゴリズムの開発を進めている。

### (2)省エネ運転

列車運転時に消費される電力は、駅間の所要時間が同じであっても加速・だ行・減速といった運転操作の組み合わせによって大きく異なる。駅間ごとの走行位置と速度との関係を表わす運転曲線は、車両の引張力や車両重量、勾配等の条件から定まる最も所要時間が短い運転曲線に余裕時分を加えて作成されるため、運転操作の組み合わせには多くの候補がある。この中から、様々な要因による駅間運転時分のばらつきとそれによる消費エネルギーのばらつきを考慮し、営業線での平均的な運転曲線（エネルギー評価用運転曲線）を再現するアルゴリズムや、与えられた列車ダイヤの下で、列車運転エネルギーの総和を最小とする運転曲線を算出するアルゴリズムを開発した。次の段階として、ダイヤ乱れが生じた場合に、省エネと運転整理をリアルタイムに両立する運転曲線の算出アルゴリズムを開発している<sup>18)</sup>。あわせて、個々の列車のみならず1日の列車ダイヤそのものの工夫による省エネの実現も目指している。

### (3)車両走行の省エネ化

走行に伴って車両が消費するエネルギーを削減する方策として、車両の軽量化、列車抵抗の低減、駆動装置の高効率化などがある。

車両の軽量化のために実施している研究開発には、以下のものがある。

#### ①構造最適化法による車両構体の軽量化

様々な寸法あるいは強度上の制約条件を満足しつつ、最適化手法を用いて最も軽量の車両構体の形状を導出する。モデル車両による試算では、構体の質量を約7%低減できることを確認している<sup>19)</sup>。

#### ②交流電車のトランスレス主回路

交流電車の主変換装置のうち約4トンの質量を占める主変圧器（トランス）を省略して軽量化を図るために、SiC（シリコンカーバイド）パワー半導体を用いた交流電圧の変換回路の実現を目指している<sup>20)</sup>。

### ③ディスク型モーター

台車質量の軽量化のため、従来の歯車装置とほぼ同じ大きさで、かつ車軸を直接駆動できるディスク型モーターの開発を進めている。

また列車抵抗のうち走行抵抗の低減策では、新幹線車両間やドア部の段差、あるいは在来線車両の空調装置や床下機器の形状改善による空気抵抗の低減があり、その具体策の効果の評価を行っている<sup>21)</sup>など。駆動装置の高効率化については、在来線用主電動機の高効率化があり、従来の主電動機の効率が93%であったのに対し約3%の改善を実現し、消費電力を約10%削減できる見通しを得ている<sup>22)</sup>。

## 4. 脱炭素化に求められる鉄道技術

2050年カーボンニュートラルに向けて、我が国では官民をあげた取り組みが進められている。このうち鉄道の列車運転の脱炭素化に関わる主な技術は3章で述べたとおりであり、鉄道へのモーダルシフト、CO<sub>2</sub>排出量削減、鉄道の省エネの観点から多彩な取り組みを今後も進めていく。また、このほかにも駅や事業所における太陽光発電の利用、空調・昇降機・ホームドア等の省エネ、照明のLED化など駅や事業所における省エネなど、脱炭素化に向けた取り組みが鉄道の各分野で進められている。

一方、3章で紹介した技術や社会制度の中には鉄道単独では実現できないものも多い。例えば以下のものが挙げられる。

#### ①鉄道へのモーダルシフトに関するもの

- ・駅まで／駅からの交通機関のデマンド輸送・自動運転など

#### ②CO<sub>2</sub>排出量削減に関するもの

- ・再生可能エネルギーによる発電の開発・普及・効率向上
- ・電力の需給調整制度の整備
- ・グリーン水素の製造・運搬・供給

#### ③鉄道の省エネに関するもの

- ・主制御器・駆動装置軽量化のためのパワーエレクトロニクス技術

#### ④各分野に共通するもの

- ・鉄道と商用系統の協調制御や、運転状況や変電所での電圧等の情報をリアルタイムで伝送・処理するなど、高度なエネルギーマネジメントのためのデジタル技術。あわせてデジタル機器類が消費する電力の削減

・鉄鋼、セメント製造時のCO<sub>2</sub>排出量削減など、カーボンフットプリント削減に関する共通技術  
これらの基盤技術の上に立って鉄道へのモーダルシフト、カーボンフットプリントの削減、および列車運転の脱炭素化に必要なCO<sub>2</sub>排出量削減、省エネルギー化が実現する(図7)。鉄道総研は引き続き関連する諸機関と連携し、2050年のカーボンニュートラルに向けた活動を加速する所存である。関係各位のご指導とご鞭撻をお願いする。

なお、列車運行電力シミュレータ、燃料電池電車、高効率電動機、ディスク型モーターの開発の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受け実施した。超電導き電ケーブルの開発の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金およびNEDO, JSTの助成により実施した。SiCパワー半導体による変換回路の開発の一部はJSTの助成により実施した。

## 参考文献

- 1) IPCC : Climate Change 2021 The Physical Science Basis Summary for Policymakers, 2021.8
- 2) 文部科学省, 気象庁, 環境省監修: 日本の環境変動とその影響2012年度版, 2013.3
- 3) 経済産業省: 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略, 2021.6
- 4) 内閣: 第6次エネルギー基本計画, 2021.10
- 5) European Commission : Sustainable and Smart Mobility Strategy - putting European transport on track for the future, 2020.12
- 6) 国土交通省: グリーン社会の実現に向けた「国土交通グリーンチャレンジ」, 2021.7
- 7) 国立環境研究所: 日本の温室効果ガス排出量データ, 2021.4
- 8) 水素・燃料電池戦略協議会: 水素・燃料電池戦略ロードマップ, 2016.3
- 9) 石村尚也, 高柿松之介, 大川徹, 吉田奈々絵: MaaS (Mobility as a Service) の現状と展望<前編>, 経済月報, 2019.5
- 10) JR東日本インテグレートドレポート2020
- 11) JR西日本グループ統合レポート2020
- 12) UIC : Carbon Footprint of High Speed Rail, 2011.11
- 13) 辰井大祐, 中挾晃介, 國松武俊: ニューラルネットワークによる列車運行予測手法, 鉄道総研報告, Vol.31, No.10, 2017

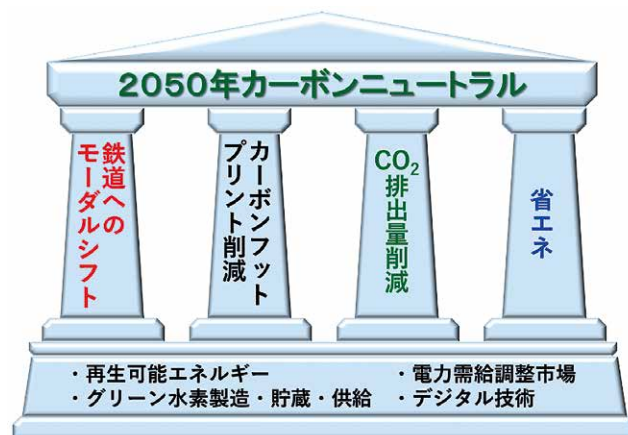


図7 脱炭素化に求められる鉄道技術

- 14) 中出孝次, 高垣昌和, 遠藤広晴: 列車走行時の窓開けによる車内換気の数値シミュレーション, R & M, Vol.29, No.11, 2021
- 15) 小川知行, 武内陽子, 森本大観, 齊藤達仁, 影山真佐富: 営業運行を再現する列車運行電力シミュレータの開発, 鉄道総研報告, Vol.35, No.8, 2021.8
- 16) 小川賢一, 米山崇, 須藤貴幸, 柏木隆行, 山本貴光: 燃料電池ハイブリッド試験電車の高性能化, 鉄道総研報告, Vol.34, No.5, 2020
- 17) 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, Vol.32, No.4, 2018
- 18) 国崎愛子, 武内陽子, 小久保達也, 田中峻一, 小川知行, 生出珠之助, 明石太輔: 力行電力量変化量に基づいた走行時分変更による省エネ運転整理ダイヤ作成, 電気学会交通・電気鉄道研究会/マイクロナシン・センサシステム合同研究会, 2021.3
- 19) 高垣昌和, 沖野友洋, 小柳勝敬: 構造最適化による車両構体の軽量化設計手法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.20, 2020
- 20) 福田典子, 小笠正道: 交流電気車トランスレス化回路用入れ子キャパシタ構造の基礎検討, 令和2年電気学会全国大会, 2019
- 21) 井門敦志, 小濱泰昭: 鉄道車両の床下形状平滑化による空気抵抗低減についての研究, 日本機械学会論文集(B編), Vol.71, No.703, 2005
- 22) 近藤稔, 宮部実, 海老塚龍次, 花岡幸司: 鉄道車両駆動用高効率誘導電動機的设计と効率評価, 電気学会論文誌D, Vol.134, No.4, 2014