

鉄道車両の脱炭素化に向けた研究開発の方向性

車両制御技術研究部長
山本 貴光



1. 鉄道車両の脱炭素化に向けた背景

鉄道車両は蒸気機関によっていた創生期から、いかに少ない燃料で多くの人・物資を運べるかについて研究・開発が行われてきた。この目的のために動力近代化が進められ、蒸気機関からディーゼル機関や電車となり、さらに電車に使用される電動機や制御装置についても直流電動機と抵抗制御の組み合わせからチョップ制御、添加励磁制御を経て、誘導（交流）電動機とインバータの組み合わせまで進化した。最近ではインバータに使用される素子にIGBTより損失が少ない

SiCを用いたパワーモジュールが使われるようになってきた。このような技術の進化により、最近のステンレス製構体で軽量な電車では、初期の電車（直流電動機+抵抗制御と鉄製構体の組み合わせ）と比較して消費エネルギーが半分程度まで低減されてきた。

鉄道は走行抵抗が小さく、一度に多くの人・物を運ぶことができるためエネルギー効率が高い交通手段であるが、近年は自動車の高効率化・省エネ化が進み、また「2050年カーボン・ニュートラル宣言」が行われるなど、鉄道においてもより一層の消費エネルギー低減・脱炭素化が求められている。本稿ではこれらの要求に対する鉄道車両の現在の状況を示し、今後の研究開発の方向性について述べる。

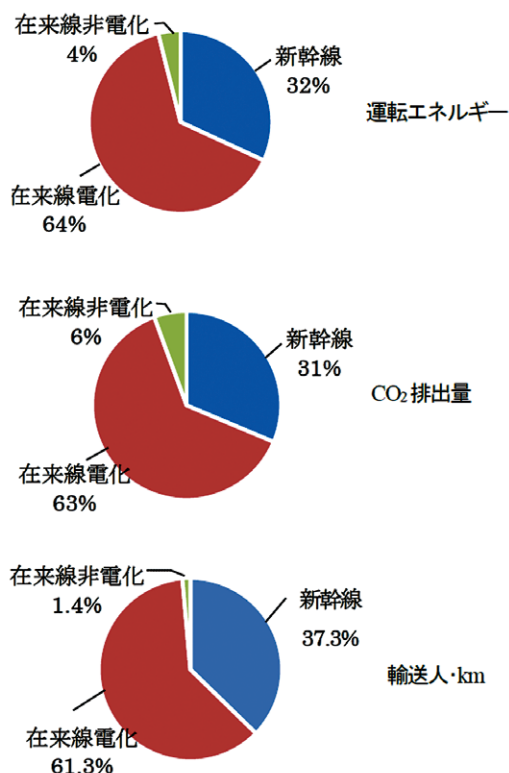


図1 鉄道の運転エネルギー、CO₂排出量、輸送人・kmの割合

2. 鉄道車両の現状と脱炭素化に向けた適用技術

2.1 鉄道車両の消費エネルギー、CO₂排出量、輸送人・kmの割合

鉄道車両に関するエネルギーの消費とCO₂の排出は鉄道車両の製造段階で生じるものと運用段階で生じるものに大別される。鉄道車両は一度製造されると通常の場合、30年以上使用される（新幹線を除く）ので製造段階より運用段階で排出するCO₂の割合が高いため、以下では運用段階でのCO₂排出量について述べる。

大都市圏など需要が多く見込まれる路線は電化され、そこには主に電車が使用されている。一方、地方などの需要が相対的に小さい路線は非電化のままであり、主に液体式変速機を使用したディーゼルカーが使用されている。これはエネルギー消費は多いが電化区間も走行できるので運用面での利点がある。

路線タイプで分類した鉄道車両の運転エネルギー、CO₂排出量、輸送人・kmの割合を図1に示す¹⁾。省エ

ネの観点では運転エネルギーは在来線電化区間が最も多く、この削減が最も効果的である。一方、CO₂排出量削減の観点では、在来線非電化区間は運転エネルギーが4%であるのに対してCO₂排出量が6%と多いことから電車化することによりCO₂排出量削減が可能であることがわかる。在来線非電化区間の輸送人・kmが1.4%なのに対し、運転エネルギーが4%を占めていることから在来線非電化区間では比較的需要が少なく、小規模な輸送システムが適していると考えられる。

2.2 鉄道車両の消費エネルギー、CO₂排出量削減に向けた適用技術

鉄道車両の消費エネルギー、CO₂排出量削減に向けた適用技術を図2に示す。前節より、消費エネルギーの割合が大きい電化区間に使用される電車への課題としては、走行エネルギーの削減があり、適用技術としては回生ブレーキの性能向上（高速域での適用範囲拡大や付随車用回生ブレーキの開発など）、車両の軽量化、列車抵抗低減、駆動装置の高効率化などが挙げられる。これらの省エネ技術はこれまでも取り組まれて

きており、現状でも相当に省エネルギー化されているため、鉄道車両として将来的に削減できる消費エネルギーは限定的である。脱炭素化に向けては発電における地上側のCO₂排出量削減技術に期待するところが大きい。

一方、消費エネルギーの割合は高くはないが、非電化区間向けの課題としてディーゼルカーのCO₂排出量削減があり、適用技術としては燃料電池電車、架線レス電車、バイオ燃料が挙げられる。

燃料電池電車は水素を燃料とし、走行中のCO₂排出量はゼロである。従って、水素生成時のCO₂排出量が少なければ脱炭素化技術となる。

架線レス電車も走行中のCO₂排出量はゼロの技術であり、再生可能エネルギー由来の電気が使用できれば脱炭素化技術となる。

バイオ燃料は、非電化区間を走行するディーゼルカーに生物由来の燃料を使用するものである。これにより走行時にはCO₂を排出するが、この燃料の生成時に同量のCO₂を吸収することから、CO₂が増加しない「カーボン・ニュートラル」となる。

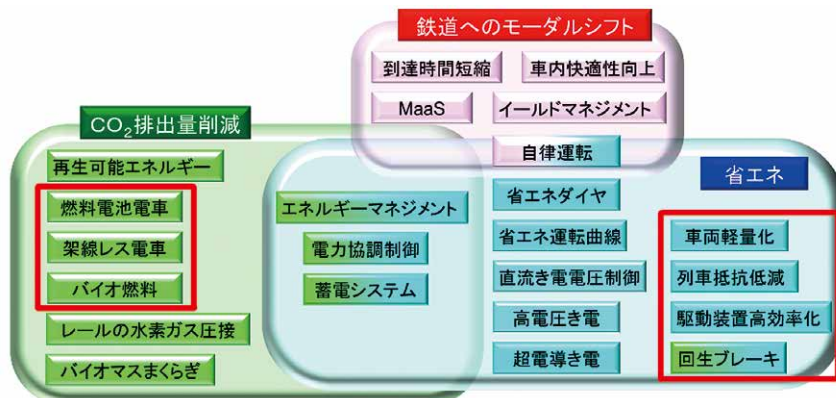


図2 鉄道車両の消費エネルギー、CO₂排出量削減に向けた適用技術

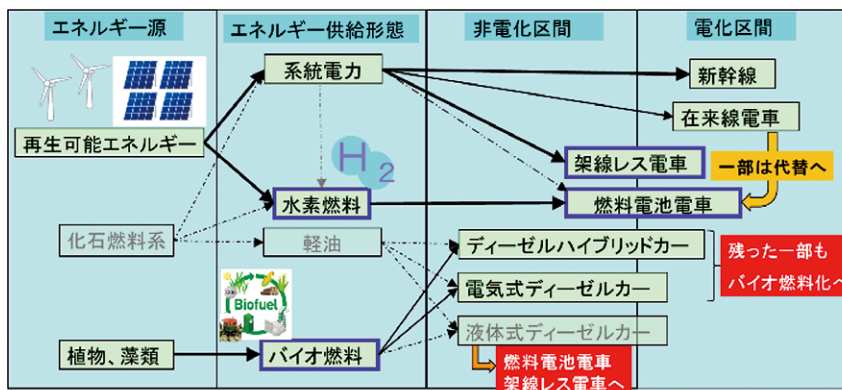


図3 鉄道車両における将来の脱炭素化のイメージ

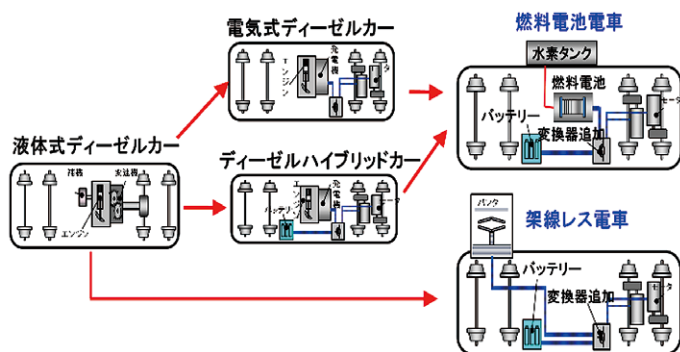


図4 各種ディーゼルカーと架線レス電車、燃料電池電車の機器構成

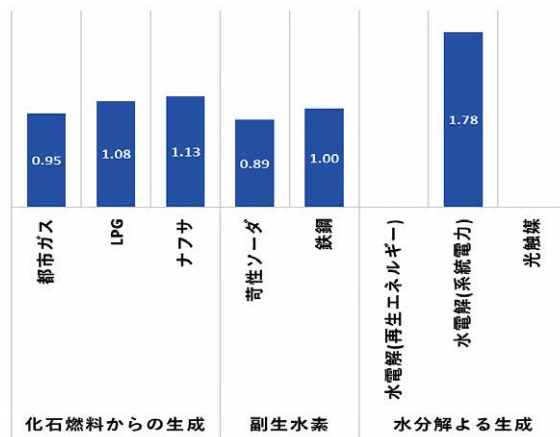


図5 水素の生成方法によるCO₂発生量 (製造設備・発電設備等のインニシャルCO₂発生分を除く)

2.3 鉄道車両における将来の脱炭素化のイメージ

前節で示した脱炭素化技術を適用した場合の鉄道車両における将来の脱炭素化のイメージを図3に示す。電化区間では従来、化石系燃料主体であった系統電力が再生エネルギー主体となり、CO₂排出量が削減される。非電化区間では軽油を用いるディーゼルカーが使用されていたが、水素燃料による燃料電池電車および系統電力による架線レス電車に代替される。線区の特徴から一部残るディーゼルハイブリッドカーや電気式ディーゼルにはバイオ燃料が適用される。さらにローカル運用などの在来線電車の一部は燃料電池電車や架線レスバッテリー電車に置き換わることにより地上電化設備の簡略化が可能となる。

2.4 架線レス電車と燃料電池電車の機器構成

架線レス電車は従来の電車にバッテリーと変換器を追加した構成で、電化区間では電車として走行するのに加えて、非電化区間ではバッテリーを電源として走行できる。バッテリーの充電は電化区間走行中又は充電設備のある場所で停車中にパンタグラフを介して行う。非電化区間での走行可能距離は搭載したバッテリーの容量により決定される。

燃料電池電車は架線レス電車の構成に燃料電池と水素タンクを追加した構成で、燃料電池とバッテリーのハイブリッド電源とすることにより燃料電池の設計出力を低く抑えている。バッテリーは非電化区間でも車載した燃料電池より充電されるため、走行可能距離は搭載した水素量による。図4に各種ディーゼルカー、架線レス電車と燃料電池電車の機器構成を示す。

液体式ディーゼルカーから燃料電池電車への転換を目指す場合、同じ電気駆動方式である、電気式ディーゼルカー又はディーゼルハイブリッドカーを経由する

のも一つの方法と考えられる。

3. 鉄道車両の脱炭素化に向けた技術の動向

これら脱炭素化技術の研究開発状況を以下に述べる。

3.1 燃料電池電車技術の動向

(1) 水素の生成方法の違いによるCO₂発生量の比較

最初に燃料電池電車の燃料となる水素の生成について述べる。水素は化石燃料と異なり燃料として使用できる密度では自然界に存在しない。したがって、何らかの方法で生成することになるが、生成方法とCO₂排出量には密接な関係がある。水素の生成方法は大きく分けて化石燃料からの生成、副生水素利用、水分解による生成の3つの方法がある(図5)²⁾。

水素生成時のみを考えると「再生可能エネルギー利用による水電解」はCO₂排出量がゼロとなり、脱炭素化に最も有利である。同じ水電解でも「系統電力」を使うと後述のように軽油を燃料とする現状のディーゼルカーよりCO₂排出量が増加する。燃料としての水素を大量かつ安価に生成する方法は、現状では化石燃料から水蒸気改質法により水素を生成する方法である。「副生水素」は苛性ソーダ等の製造における副産物として得られるものであり、安価でCO₂排出量も少ないが、燃料としての本格的な使用には量が不足する。「光触媒」による方法は現状では研究室レベルの開発状況であり、大量生産等に課題がある。

これらの方法によって生成された水素を燃料とした燃料電池電車と現行のディーゼルカーおよび電車におけるCO₂排出量の比較を図6に示す。水素運搬時

のCO₂排出量を考慮しない条件において、ディーゼルカーを燃料電池電車に置き換えてCO₂排出量を削減するためには、50%以上の再生可能エネルギーを利用した水電解、天然ガス改質、副生水素利用のいずれかによる必要がある。また、再生可能エネルギーで生成した水素のみを利用できれば将来的には電車以上のCO₂削減の可能性がある。水素は最も軽く、エネルギー密度が低い物質であり、運搬時に発生するCO₂が他の燃料に対して多いため、できるだけ地産地消が好ましい。

(2) 鉄道総研における燃料電池電車の開発

鉄道総研では、非電化区間を走行するディーゼルカーの代替による脱炭素化を目指して2001年より燃料電池電車の開発を進めてきた。2007年には試験電車に燃料電池他の機器を搭載した走行試験により、実際に鉄道車両としての走行が可能であることを確認した。しかしながら、この車両は加速性能がディーゼルカー並であることに加え、客室内に機器が満載され、実用化に向けてはもう一段の開発が必要な状況であった。2019年に各機器を小型化して床下に配置することで客室スペースを確保し、さらに燃料電池出力を約1.5倍に増強して加速性能を電車並に向上して営業車に近い車両を実現した。図7に鉄道総研における燃料電池試験電車

車を示し、図8に主回路機器構成を示す。燃料電池は90 kW × 2群構成、バッテリーは15 kWh × 3群構成としており、それぞれ1群が故障しても当該部位を切り離すことで加速性能等は低下するが残りの機器で運転が可能(縮退運転)な構成とした。モーター駆動用変換器の入力電圧をDC1,500 Vとしたことにより燃料電池・バッテリーハイブリッド電源と架線電源を切り替え可能とし、架線とのバイモードが可能な構成とした。搭載した燃料電池システムを図9に示し、高圧水素タンクシステムを図10に示す。2007年に開発した燃料電池

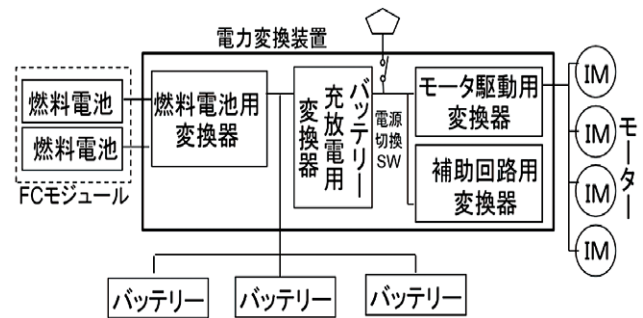


図8 燃料電池試験電車の主回路機器構成

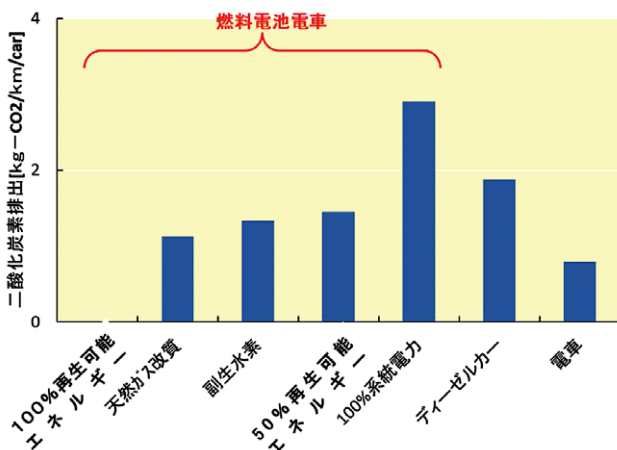


図6 水素生成方法の違いによる燃料電池電車、ディーゼルカー、電車のCO₂排出量の比較

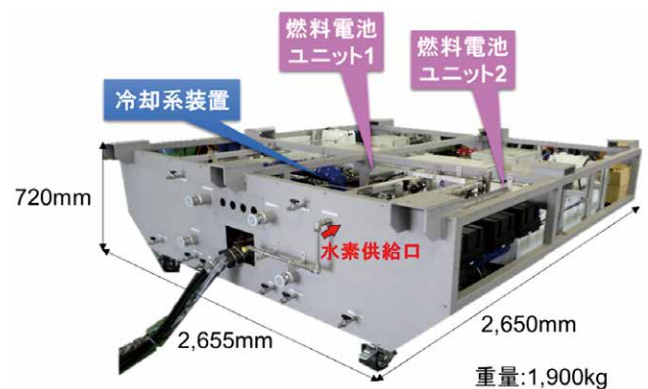


図9 燃料電池システム



図7 鉄道総研における燃料電池試験電車

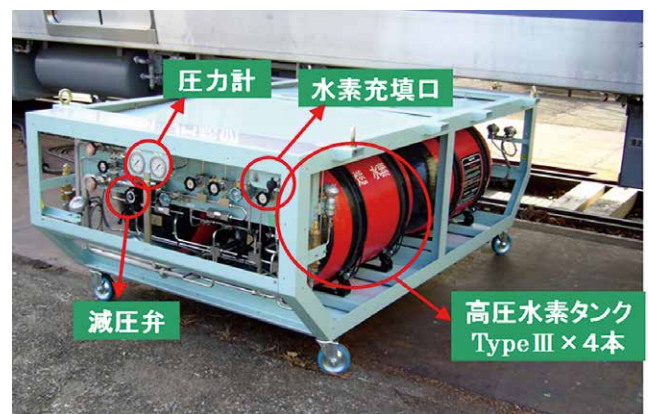


図10 高圧水素タンクシステム



図11 「HYBARI」の外観イメージ(提供:JR東日本)



図12 Coradia iLint

システムは高さが1.5mあり、床下搭載が不可能であったが、今回の燃料電池システムは小型化により床下搭載が可能となった。燃料電池モジュールはシステムの1/3程度の大きさであり、それ以外は冷却系の機器や吸気フィルターなどの周辺機器が占めるため、燃料電池システムの小型化にはこの周辺機器の小型化が必要である。高圧水素タンクは自動車用として実績があるTYPE III (アルミ容器を樹脂で強化した複合容器) を4本搭載する。水素貯蔵量は約20 kgであり、1回の充填で2両編成の車両が最大80 km走行可能である。鉄道総研内の試験線でこの試験車両の走行試験を行い、電車並みの加速度(起動加速度2.9 km/h/s)を確認した。今後は営業走行パターンを模擬した車両試験台試験を行って、性能を確認する計画である。

(3) 国内における開発状況(JR東日本)

国内における燃料電池車両の開発としてJR東日本の例を示す。2006年に試験車両NEトレインでの開発を経て、2020年10月に日立、トヨタなどと試験車両「HYBARI」(図11)を開発することが発表³⁾された。この発表によれば、鶴見・南武支線・南武線(尻手～武蔵中原)を試験区間として2022年3月頃の実証試験を開始予定とのことである。搭載する燃料電池は60 kW×4台、水素貯蔵ユニットは51 L×5本のユニットを4台搭載し、最高充填圧力は70 MPa。最高充填圧力での満充填で最大140 kmの航続距離を有する設計となっている。既に実用化されている自動車技術を導入することで、営業車両の実現を目指すとのことである。

(4) 海外における開発動向

鉄道車両の3大メーカーの一つであるアルストム社が「Coradia iLint」(図12)と称する燃料電池電車を開発し、2018年～2020年にドイツ北部のニーダーザクセン州運行会社が営業走行試験(18万km)を実施

した⁴⁾。この車両は2両編成で200 kWの燃料電池と貯蔵圧力35 MPa、Type IV (樹脂の容器を樹脂で強化した複合容器)の水素タンクを各車の屋根上に搭載し、1充填での航続距離は600～800 kmである。

DB(ドイツ国鉄)は同じく鉄道車両の3大メーカーの一つであるシーメンス社と2両編成の燃料電池電車の開発を行うことを2020年11月に発表した⁵⁾。DBは水力で発電した電力を2023年から10年間にわたり、年間190 GWh買電する契約をノルウェーと行っており、この電力を使って生成されたクリーンな水素が燃料電池電車の燃料として使われるか注目される。

また、SNCF(フランス国鉄)はアルストム社と2021年にiLintとは異なる燃料電池電車の開発の契約を行った⁶⁾。この燃料電池電車は直流1,500 V、交流25 kV架線電力でも走行可能なバイモード車両であり、水素燃料による航続距離は600 kmとされている。

(5) 燃料電池電車の国際規格化

燃料電池電車の実用化・普及に向けた国際的な動向として国際規格化がある。国際規格IEC 62864-1(ハイブリッド車両)のフレームワーク内の規格である鉄道車両用燃料電池(IEC 63341)のキックオフ会議が2020年11月に行われた。この規格は以下の3つのパートから構成され、2023年度中の国際規格発行を目指して検討が進められている。

- Part1: 鉄道車両用燃料電池の安全性・要求仕様
- Part2: 鉄道車両用燃料貯蔵システム
- Part3: 鉄道車両用燃料電池の試験方法

3.2 架線レス電車技術の動向

(1) 鉄道総研における架線レス電車の開発

鉄道総研では2001年より架線レス電車の研究開発を開始し、バッテリーの特性検証の他、これらの機器を搭載して鉄道車両が構成できることの検証を目的と

して、比較的小型のLRV車両をベースにしたLH02形「Hi-tram」(図13)を2007年に完成させた。この車両は路面電車区間(DC600V)の他、鉄道線(DC1,500V)への相互直通運転が可能な主回路構成となっている(図14)。実際に営業線における試験走行を行い、一度の充電で路面電車として25~46km、鉄道線では約50kmの走行が可能であることを確認した。

(2) 国内におけるバッテリー搭載鉄道車両の開発動向
走行用バッテリーを車載する主な用途は次の3種類



図13 鉄道総研の架線レス電車「Hi-tram」

に大別できる。

- 電化-非電化区間直通運転用「架線レス電車」
- ディーゼル・バッテリーハイブリッド車両
- 停電時などの非常時走行用

車載バッテリー技術を適用した国内の鉄道車両(一部試験車両を含む)を図15に示す。国内では2003年頃から試験車両の開発が行われ、最初の営業用車両であるディーゼルハイブリッド車両キハE200形(JR東日本)が2007年に営業投入された。

(3) 海外におけるバッテリー搭載鉄道車両

車載バッテリー技術を適用した(あるいは予定(契約済))鉄道車両の海外における代表例を表1に示す⁷⁾。

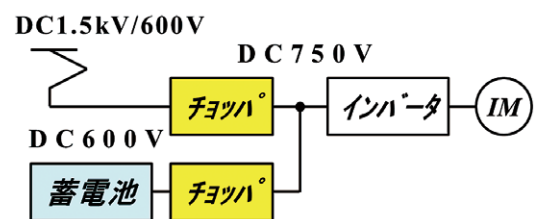


図14 「Hi-tram」の主回路構成

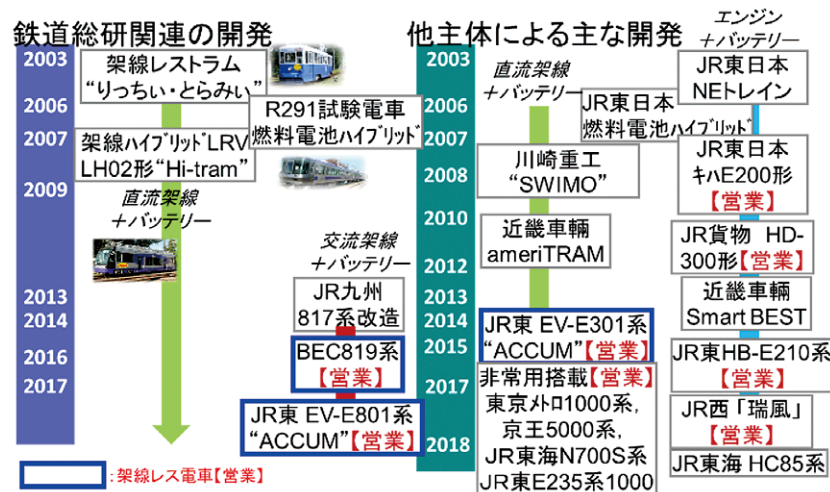


図15 車載バッテリー技術を適用した国内の鉄道車両

表1 車載バッテリー技術を適用した海外の鉄道車両(代表例)

鉄道事業者	名称	メーカー	営業開始	バッテリー
オーストリア国鉄	Class4746	シーメンス	2020年3月	東芝SCiB(三元系)
バーテンウールテンブルグ近郊交通公社(ドイツ)	Talent3	ボンバルディア	2020年11月	AKASOL製(三元系)
シュレスヴィヒホルシュタイン州近郊交通公社(ドイツ)	FLIRT-AKKU	シュタットラー	2022年予定	HOPPECKE製(マンガン系)
ナパバレー鉄道(カリフォルニア州)	Class230(D-train)	ヴァイバール	2021年4月	
マーシーレイル(リバプール)	Class777Metro	シュタットラー	2021年中予定	HOPPECKE製(マンガン系)

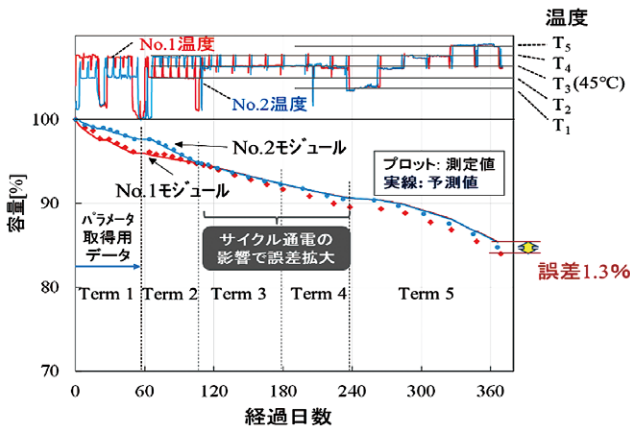


図16 バッテリー劣化予測手法による推定値と実測値の誤差

海外においても架線レス電車やディーゼルハイブリッド車両による試験走行は行われてきたが、本格量産化は遅れており、2020年頃から営業線に向けての導入が始まった。

(4) 架線レス電車の普及に向けた研究開発

(a) バッテリーの劣化予測手法

鉄道総研ではバッテリーの交換時期の最適化を目的としてバッテリーの劣化予測を精度良く実現する手法の研究開発を行った⁸⁾。バッテリー劣化の指標としては主に①容量低下、②内部抵抗増大が挙げられる。①の容量低下は従来からルート則の予測式が使われているが誤差が大きい。誤差を低減する目的でワイブル則に基づいた予測式が提案されているが、この式も温度変化が大きい用途では誤差が大きいため、温度変化への対応が課題であった。そこで温度変化に対応する劣化因子を積算する項を導入した式を提案した(式(1))。

$$Y = 100 \times \exp \left\{ - \left(\int_0^t \frac{1}{\eta(t)} dt \right)^m \right\} \quad (1)$$

Y: 容量(%) m: 劣化パラメータ
 温度変化の影響を考慮した時刻tにおける劣化因子蓄積の進展速度

この提案式に基づいて予測した容量低下を実験結果と比較し、誤差1.3%と高精度が得られることを確認した(図16)。なお、②の内部抵抗増大については従来のルート則で高精度が得られることを確認している。

(b) バッテリー温度上昇予測手法

バッテリーは安全に使用するために使用上限温度以下で使用する必要がある。バッテリーの使用開始直後

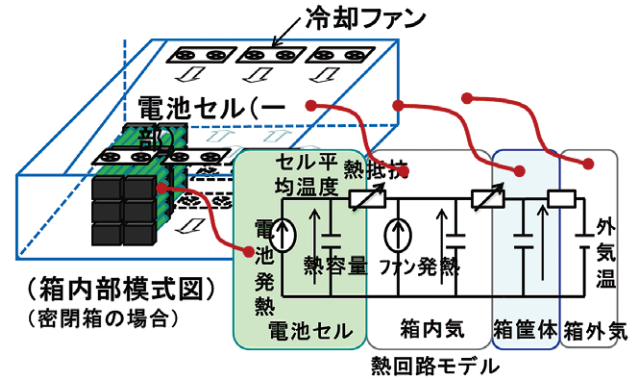


図17 バッテリー箱の熱回路モデル

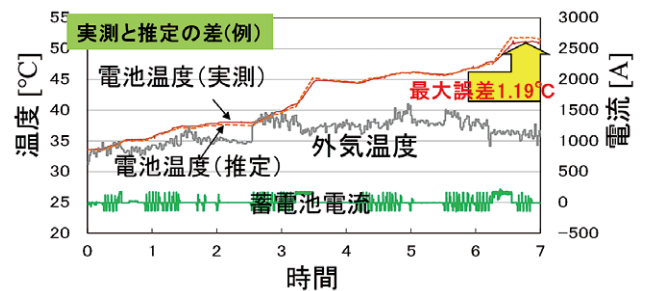


図18 熱回路モデルによる推定値と実測値の誤差(例)

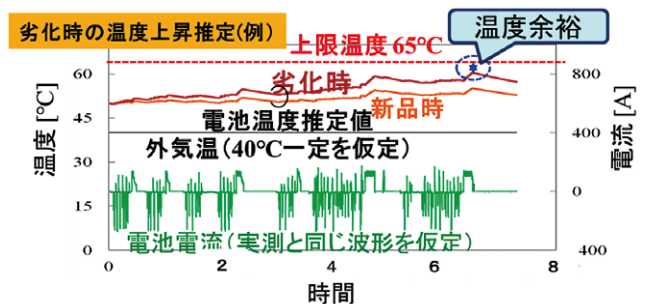


図19 熱回路モデルによる劣化時の温度上昇推定値(例)

は温度上昇が限度値以下であっても、劣化により内部抵抗が増大すると温度が上昇する傾向がある。鉄道総研では、バッテリーが箱に収められている状況を、電池セル、箱内気、箱筐体、箱外気に分けた熱回路モデルで表現し、それぞれの熱容量をコンデンサ、それぞれの媒体間の熱抵抗を抵抗に置き換えて電気回路的に示した熱回路モデル(図17)を提案した⁹⁾。本手法による推定値と実車での測定結果を比較したところ最大誤差は1.2℃程度であった(図18)。本手法によりバッテリー劣化時の温度上昇を推定することで使用上限温度との余裕などの評価が可能となる(図19)。

3.3 バイオ燃料技術の動向

バイオ燃料の区分を表2に示す¹⁰⁾¹¹⁾。

第一世代(可食性原料)、第二世代(非可食性原料)では化石系燃料との混合比率に制限があった。最近では、第三世代(炭化水素系)の開発が進み、コスト面の課題はあるもののこれらの技術的課題は克服されてきている。また、藻類によるバイオ燃料も実証プラントの建設が行われ、一部のバスやフェリーなどにおいて試用が行われ始めた。

4. 鉄道車両の脱炭素化技術における課題

4.1 燃料電池電車の実用化・普及に向けた課題

燃料電池は1セルで1V程度の電圧であるため、鉄道車両に必要な高電圧で使うためには数百枚という多数のセルを直列接続する必要がある。この中のどれか1つのセルでも不具合が発生すると、直列接続されているセル/モジュールが使用不可となるため、セルには高い信頼性が要求される。また、燃料電池を発電させるのに必要となる周辺補機装置についても高い信頼性が要求される。燃料電池は使用により劣化していくが、鉄道車両への適用には高い信頼性に加えて長寿命が要求される。燃料となる水素については、3.1(1)項に示したCO₂排出量が比較的少ない水素を適用する必要がある。また、運搬方法も含めて、CO₂排出量が少ない鉄道車両への供給体制を確立する必要がある。水素は最も軽い物質であるため、容積エネルギー密度が低く、航続距離を確保できる燃料タンクの鉄道車両への搭載設計も課題である。鉄道車両への水素燃料の貯蔵については鉄道車両を対象とした法令等はない

め、現状では実施にあたっては1件ごとに安全性確認を行う必要がある。このため普及にあたっては法令等の整備が期待される。また、鉄道車両に適用できる高圧水素タンクの種類が少ないことも課題である。

4.2 架線レス電車の普及に向けた課題

架線レス電車はすでに実用化されているが、さらなる普及に向けての課題としてバッテリーの交換がある。バッテリーは使用により劣化していき、鉄道車両としての寿命内で複数回の交換が発生する。この頻度をできるだけ下げするためにバッテリーの長寿命化(高耐久性)が必要である。また、コスト低減も必要となる。さらにバッテリーの寿命を高精度で予測できればバッテリーの寿命を設計に取り入れ、計画的な交換運用が可能となる。

4.3 バイオ燃料技術の実用化・普及に向けた課題

バイオ燃料の鉄道車両への採用における課題として、現行のディーゼルエンジンへの適応性の確認がある。具体的には、ディーゼルエンジンの部品に対する腐食性等の確認、耐久性の確認、出力の確認、排出ガス成分の確認等がある。将来、大量に使用されることを想定した場合、食料との競合性が無いこと、大量生産技術の確立、低コストが実現できること等が挙げられる。

5. 鉄道車両の脱炭素化に向けて

5.1 燃料電池電車と架線レス電車の特徴

鉄道車両の脱炭素化技術として有望な燃料電池電車

表2 バイオ燃料の区分

バイオ燃料の区分	食料との競合性	ガソリン・軽油の代替	ジェット燃料の代替	開発動向
第一世代 可食性由来バイオディーゼル	×	○(混合比率に制限あり)	×	商用化
第二世代 セルロース系バイオエタノール等	○	○(混合比率に制限あり)	×	R&D~実証
第三世代 炭化水素系バイオ燃料	○(食料と競合しない原料の選択が必要)	○	○	R&D~実証
微細藻類由来 バイオ燃料	○	○	○	R&D~実証

表3 燃料電池電車と架線レス電車の特徴

項目	架線レス電車	燃料電池電車
走行区間	電化・非電化区間とも可	電化・非電化区間とも可
航続可能距離	最大100km程度	800km程度 (燃費4km/kg、水素200kg搭載時)
電源出力・エネルギーの設定	バッテリー容量により出力、エネルギー共増減	出力は燃料電池、エネルギーは搭載水素量で別々に設定可能
車両質量的に優位な走行距離	40km程度以下	40km程度以上
システム構成の容易性	基本的にバッテリーと変換器を追加搭載する	燃料電池、高圧水素タンク、バッテリー、変換器(2台)、ラジエータなどが必要
最小編成両数	1両	2両
必要となる地上設備	充電設備(電化区間走行があれば不要となる可能性あり)	水素供給設備

と架線レス電車を述べたが、それぞれの特徴を表3に示す。両者の共通事項として非電化区間が走行可能であることが挙げられ、将来的に地上設備の簡略化に向けて一部の電車の代替とすることも考えられる。両者の最も大きな差異としては航続可能距離が挙げられ、適用可能な線区の自由度は燃料電池電車が勝る。しかし、燃料電池電車は搭載機器が多く、1両で構成することが困難であることなどから対象とする線区の条件に応じて選定されると想定される。

5.2 脱炭素化に向けた鉄道車両のイメージ

鉄道車両における将来の脱炭素化のイメージを、エネルギー源、エネルギー供給形態および走行区間の電化の有無の観点で整理して図3(2.3節)に示した。脱炭素化に向けて再生可能エネルギーの拡大が望まれるが、余剰電力で水素製造が行えれば無駄を少なくできる。生成された水素は保存できるので、需要に応じた使用が可能である。将来的な脱炭素化において、新幹線では系統電力における再生可能エネルギー比率の増加を期待するしかないが、ローカル運用など比較的低頻度で需要が少ない在来線電車は燃料電池電車や架線レス電車への置き換えにより電化設備が省略できる可能性がある。また、非電化区間を走行する車両においても燃料電池電車や架線レス電車が主流となっていく、残ったディーゼルカーにおいても燃料が軽油からバイオ燃料に代替されていくと期待される。現状では在来線で使用する系統電力と軽油によるエネルギー消費割合は16:1であるが、将来、再生可能エネルギーを利用した水素燃料や植物・藻類由来のバイオ燃料のエ

ネルギーコストが系統電力と競争力を持てば在来電車(約50,000両)と非電化区間を走行するディーゼルカー(約2,700両)の割合も変わることが想定される。脱炭素化に向けて、これまで無かったエネルギー供給形態である水素燃料およびバイオ燃料に着目し、線区に適した鉄道車両方式を選択していくことが想定される。

鉄道総研ではこれらと4章で述べた課題に対して、鉄道事業者、メーカー、関係省庁、関係団体と協力しながら克服を目指していく。

なお、鉄道総研における燃料電池電車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て実施した。

参考文献

- 1) 国土交通省「鉄道統計年報平成30年度」、環境省「2017年度省エネの概要」、「電気事業別排出係数一覧令和3年度提出用」より算出
- 2) 平成26年4月資源エネルギー庁資料「水素の製造、輸送・貯蔵について」より数値を抜粋
- 3) JR東日本ホームページ、ニュースリリース、2020年10月5日付け「水素をエネルギー源としたハイブリッド車両(燃料電池)試験車両の開発－鉄道技術と自動車技術を融合して試験車両を開発します－」
- 4) Alstom: PRESS RELEASE” Alstom's hydrogen train successfully completes three months of testing in Austria”, December 1.2020
<http://www.alstom.com/press-centre/2017/03/alstoms-hydrogen-train-coradia-ilint-first-successful-run-at-80-kmh/>(参照日:2021年10月22日)

- 5) JETRO ビジネス短信 2020年12月2日,
<http://www.jetro.go.jp/biznews/2020/12/2ca7038e1ac8f604.html/> (参照日：2021年9月2日)
- 6) <http://www.electrive.com/2021/04/09alstom-to-construct-hydrogen-trains-for-four-regions-in-france/> (参照日：2021年10月22日)
- 7) 小笠正道., "「蓄電技術-Ⅲ」, " 鉄道車両と技術 No.264, 2019.2
- 8) 田口・門脇：「鉄道車両駆動用リチウムイオン電池の温度変動条件に対応した保存劣化長期予測の実験検討」, 電気学会研究会, VT-21-023, TER-21-064, pp.19-24 (2021)
- 9) 田口, 寺田, 三木, 畠田, 木村：「車両駆動用リチウムイオン電池の簡便な温度上昇推定手法」, 鉄道総研報告, Vol.30, No.11, pp.41-46 (2016)
- 10) NEDO TSC Foresight No.37 (2020.7 (2017年 NEDO 技術戦略研究センター資料))
- 11) <http://www.euglena.jp> ユーグレナ社資料より (参照日：2021年11月7日)