

ハイブリッド化が進む非電化区間の鉄道車両

鉄道は電化した方が走行エネルギーが低減し、列車の高速化も内燃機関を使用した場合よりはるかに容易といわれる。その一方で、電化には設備投資に加え、運用コストが発生する。そのため近年、電化ではなく「電動化（ハイブリッド化）」した車両を運用する路線が増加している。



小海線(山梨県～長野県)では2007年に世界で初めて「エンジン・蓄電池ハイブリッド方式」キハE200形が営業運転に供された。

画像提供：東日本旅客鉄道(株)

電動化が必要な理由

国土交通省の「鉄道統計年報」によれば、2021年度の鉄道車両は約62,900両で、電車(機関車と旅客車)が約79%を占めている(図1)。『数字で見る鉄道 2024』によると、2023年度の鉄道総延長は約24,000 kmで、そのうち約8,900 kmが非電化区間である。主に非電化区間で運用されている鉄道車両が気動車で、乗客や貨物を積載する空間を持ち、ディーゼルエンジンなどを搭載して自走する車両である。

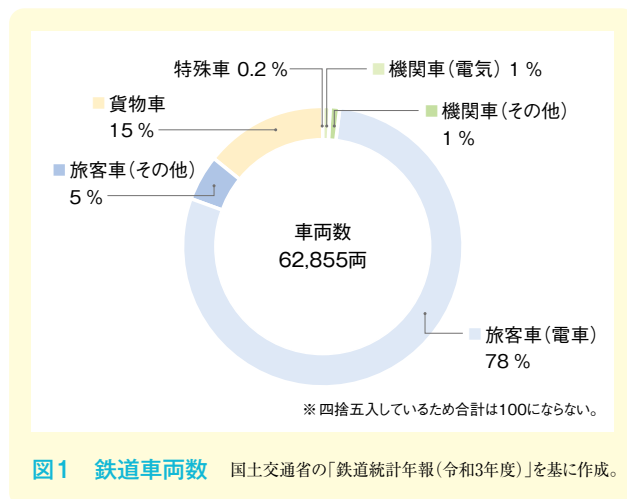
鉄道はほかの交通機関と比較してエネルギー効率が低いといわれているが、エネルギー消費の抑制とCO₂排出量削減を実現するために、軽量化、動力装置の高効率化、回生エネルギーの活用などが行われてきた。回生エネルギーとは、制動時の運動エネルギーを電力に変換して利用するエネルギーであり、鉄道車両の省エネルギー化に大きく貢献している。しかし、従来の気動車は回生エネルギーを活用できず、電車と比べて動力装置の効率が低い、排気ガスや騒音が発生するなどの課題があった。

架線(トロリー線)から電力を得て走行する電車は高効率だが、非電化区間を電化するには設備投資が必要になる。そこで現在進められているのが、非電化区間を走行する鉄道車両の電動化である。電動化とは、ディーゼルエンジンを動力源としてではなく、発電機と組み合わせて電

力源として用いたり、あるいは蓄電池から電力を供給するなどして、鉄道車両の動力に電気エネルギーを使用する方式に変更することである。

蓄電池を用いた電動化には、回生エネルギーを利用できるようにすることに加え、CO₂排出量の削減や騒音の低減などのメリットがある。さらに電化区間で運用している通常の電車と共通化できる車両部品が増えることによる管理コストの低減や、交換・廃棄部品の削減などのメンテナンスコストの低減効果も期待できる。

もちろん電動化により車両質量が増加するというデメ



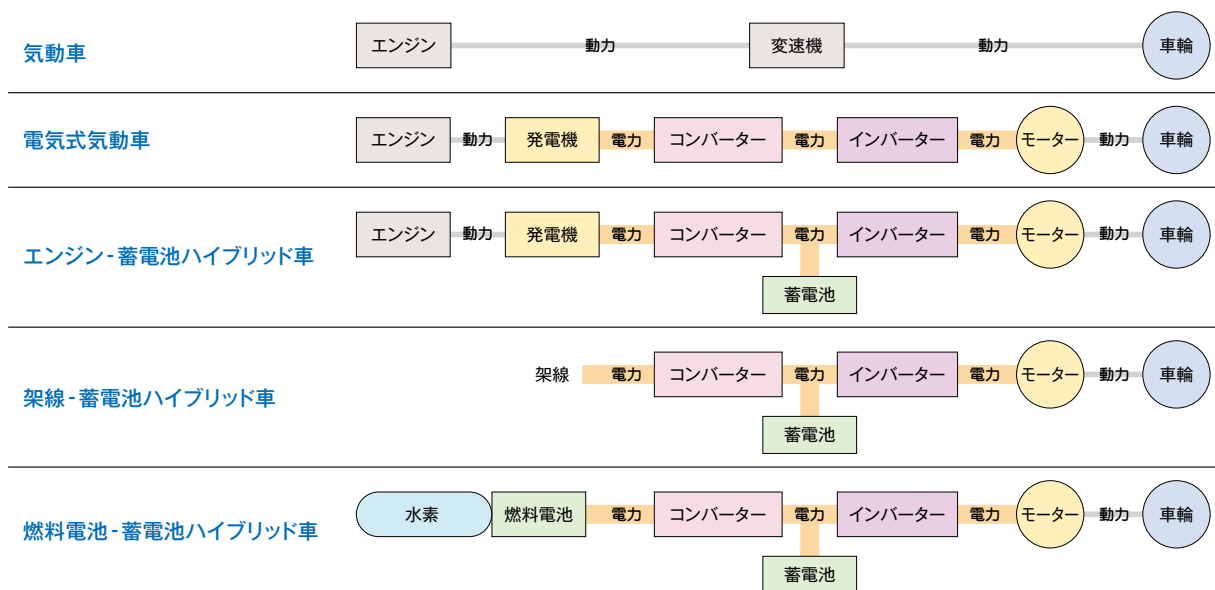


図2 ハイブリッド車の動力伝達の種類

東日本旅客鉄道(株)の資料を基に作成。

リットもある。一般的な気動車が30トン程度であることに
対し、電動化することで40トン前後まで増加するが、それ
を補って余りあるメリットが電動化にはある。

ハイブリッド車とは？

蓄電池(バッテリー)を搭載した鉄道車両を「ハイブリッド式」と呼び、動力源や動力の伝達の仕組みによっていくつかの方式に分類することができる。電動自動車にバッテリー車、ハイブリッド車、プラグインハイブリッド車、燃料電池車などが存在するのと同様に鉄道車両にもさまざまなタイプのハイブリッド車がある(図2)。

従来の気動車では、内燃機関(ディーゼルエンジン)の動力はトランスミッション(液体変速機)・減速機を通じて、車輪に伝達される。電気式気動車では、ディーゼルエンジンは発電機の動力源として使用され、車輪の駆動にはモーターが用いられる。この電気式気動車に蓄電池を搭載したのがエンジン-蓄電池ハイブリッド車である。

エンジン-蓄電池ハイブリッド車はエンジンと発電機を搭載し、自分で電力を発電する。一方、電化区間では架線からの電力で走行し、非電化区間では搭載した蓄電池にあらかじめ電化区間で架線から充電しておいた電力で走行するのが架線-蓄電池ハイブリッド車である。

また、電力源として燃料電池を使用する燃料電池-蓄電

池ハイブリッド車も開発されている。エンジン-蓄電池ハイブリッド車のディーゼルエンジンと発電機を、燃料電池に置き換えることで、小規模なシステム変更で構成できる点
が特徴である。

世界で初めて営業線区で運用されたハイブリッド車はキハE200形で、山梨県の小淵沢駅から長野県の小諸駅を結ぶ小海線(78.9 km)で、2007年から供用が開始されている。キハE200形にはディーゼルエンジンと発



2016年より若松線で運用されている架線-蓄電池ハイブリッド車 BEC819系。愛称は「DENCHA (Dual ENergy CHArge train)」。
車両下部の青い部分にリチウムイオン電池が収納されている。

図3 架線-蓄電池ハイブリッド車 画像提供: 九州旅客鉄道(株)



蓄電池などの設置スペースを確保するため、従来、床下に設置されていた機器の一部が車内に設置された。

図4 車内の機器室



パンタグラフの取付部を低くするために、車内の一部の天井が低くなっている。

図5 低屋根部



タグはホーム近傍の線路内に設置され、車両に搭載されたセンサーがタグを検知することで、運転士にパンタグラフの昇降などを指示する。

図6 ホーム検知用IDタグ

画像提供：九州旅客鉄道(株)

電機が搭載され、蓄電池として1両あたり約15 kWhのリチウムイオン電池が搭載されている。

鉄道車両の運転モードには、動力を使用して加速する「力行」、動力を使用しないで走行する「惰行」、ブレーキで減速する「制動」と、「停止」がある。ハイブリッド車では、駅の静音化などの目的で蓄電池からの電力のみでモーターを駆動させて発車している例がある。その場合でも、発車後速やかにエンジンを起動させ、エンジン発電機と蓄電池の電力を併用して加速するようになっている。

蓄電池の充電は主にモーターを使用しない惰行中や、制動時の回生ブレーキにより発生した電力で行われる。回生エネルギーは鉄道の省エネルギー化には非常に重要な存在で、都市部の通勤電車では最大で消費電力量の約50%が回生エネルギーとして架線に戻り、他列車で使用される。小海線では約10%（最大約20%）の省エネルギー効果がある。

回生エネルギーを有効に回収するためにはモーターの効率も重要となり、かご型誘導電動機が広く利用されている。一方、駅間距離が比較的短い地下鉄などではより効率の良い永久磁石同期電動機(PMSM)が採用されている。PMSMに使用される永久磁石には、ネオジム磁石(ネオジウム・鉄・ホウ素)やサマリウム・コバルト磁石などが用いられている。

バッテリーだけで走行する蓄電池車

発電機を搭載していない架線-蓄電池ハイブリッド車では、電力は架線から供給される。2016年より筑豊本線(若松線)で運用されている交流架線式蓄電池電車BEC819系は、交流方式による蓄電池電車である(図3)。

2両1編成で蓄電池を搭載した付随車とモーター車から構成され、計画当時の技術で蓄電池として約360 kWhのリチウムイオン電池が車両の床下に搭載されている。運行区間は若松駅～折尾駅(10.8 km)で、蓄電池容量で走行可能な線区が選択されたという。若松線の終端である若松駅に充電設備はなく、BEC819系は1回の充電で折尾→若松→折尾の21.6 kmを走行している。なお、2019年には香椎線(25.4 km)へも運行を拡大している。

エンジン-蓄電池ハイブリッド車は、発車や加速の際のエネルギー源として蓄電池を使用するが、架線-蓄電池ハイブリッド車では蓄電池のみのエネルギーで走行する必要がある。大容量の蓄電池を搭載するため、従来、付随車に搭載していた機器の一部をモーター車に移設し、さらに車内にも機器室を設けて収納している(図4)。なお、エンジンと発電機を搭載しているキ



鳥山駅(栃木県)では、停車中に剛体架線からバッテリーに充電する。架線と接触するパンタグラフの「すり板」を通常の2列から4列に増やすことで、大電流を流しやすくしている。

図7 急速充電に適したパンタグラフ

画像提供：
東日本旅客鉄道(株)

ハE200形の場合は床下のスペースに余裕がないため、蓄電池は車両の屋根に設置されている(巻頭写真)。

非電化区間のトンネルは電化区間よりも狭小なので、BEC819系はトンネル区間を通過する際に、構造物に接触しないように室内の天井を低くした低屋根部を設け、屋根上のパンタグラフの取り付け高さを従来の電車より低くしている(図5)。ほかにも、パンタグラフを上げたまま非電化区間に進入すると、架線終端の碍子やパンタグラフを損傷するため、ホーム検知システムを利用したパンタグラフインターロックシステムを採用している(図6)。

BEC819系では、電化区間および電化／非電化の境界駅で架線から蓄電池に充電が行われるのに対し、2014年から烏山線(栃木県)で運用されているEV-E301系は、電化区間走行時や終点の烏山駅で直流架線から充電する方式が採用されている。パンタグラフには架線と接触して電流を流す「すり板」が設置されているが、架線-蓄電池ハイブリッド車では、通常の電車では2列であるすり板が、電気機関車などと同様の4列に増設され、スムーズな充電を実現している(図7)。

実証試験が進む燃料電池車

エンジン-蓄電池ハイブリッド車と架線-蓄電池ハイブリッド車はすでに営業運転が開始されているが、現在、実証試験が行われているのが燃料電池-蓄電池ハイブリッド車である。2030年度の導入を目標に2022年から鶴見線(神奈川県)でFV-E991系の試験走行が繰り返されている(図8)。蓄電池として120 kWhのリチウムイオン電池を2つ搭載し、燃料の水素は最高充填圧力70 MPa、容量51 Lの水素タンクが5本1組で4ユニットから供給されている。燃料電池の出力向上をはじめとして、実用化に向けての技術開発が行われているところである。

今後、老朽化が進んでいる従来型の気動車は、順次、ハイブリッド車などの電動化された車両への置き換えが



鶴見線で実証試験中の燃料電池ハイブリッド車FV-E991系。愛称は「HYBARI (HYdrogen-HYBrid Advanced Rail vehicle for Innovation)」。

図8 実証試験中の燃料電池車 画像提供：東日本旅客鉄道(株)

進むものと予想される。本稿で紹介したエンジン-蓄電池ハイブリッド車、架線-蓄電池ハイブリッド車、燃料電池ハイブリッド車は競合関係にあるわけではなく、それぞれの線区に適したタイプが採用されていくと予想される。特に水素のサプライチェーンが必要になる燃料電池-蓄電池ハイブリッド車は、たとえば製鉄所や石油化学コンビナートなど、地域で水素利用が可能なエリアなどへの導入が予想される。

また、地上設備の保守コスト削減を目的に、電化区間の架線や変電所などの設備を撤去して非電化区間にするケースも想定される。その際には電車からハイブリッド車への変更が有効である。カーボンニュートラル社会に適した鉄道車両が適材適所で活躍するためには、蓄電池や燃料電池などの一層の性能向上が求められる。

- 取材協力：東日本旅客鉄道(株)、九州旅客鉄道(株)
- 取材・文：石田亮一

鉄道車両の形式・用途と記号

世界で初めて営業運転を行ったエンジン-蓄電池ハイブリッド車の形式はキハE200形である。「キ」は気動車を意味し、「ハ」は座席車(普通車)を表す。「ハ」は国鉄時代は3等客車を表す記号であった。従来、客車は3等級制であったが、1960年に2等級制に変更された。グリーン車には2等客車を示す「ロ」の用途を表す記号が使用されている。1等客車は1955年に廃止され

ているが、2013年に九州旅客鉄道(株)の「なつ星 in 九州」用客車では「イ」が復活している。

なお、キハE200形の後継車両はHB-E300系である。東日本旅客鉄道(株)ではハイブリッド車にはエンジン-蓄電池タイプに「HB」、架線-蓄電池タイプに「EV」、燃料電池-蓄電池タイプには「FV」、電気式気動車には「GV」を割り当てている。