

# 車両の先進的省エネルギー技術

秦 広  
車両制御技術研究部(主管研究員)



はた ひろし

## はじめに

省エネルギーは、石油などの限りある化石燃料を少しでも長く使い続けるためなどの観点から、昔から重要視されてきました。最近では地球温暖化につながると考えられているCO<sub>2</sub>排出を抑制するため、これと密接にリンクするエネルギー消費抑制の重要性が大きくなっています。

鉄道は図1のように自動車や飛行機と比較して省エネルギーな乗り物と言えますが、最近の社会情勢からは、さらに磨きをかけることが期待され、鉄道事業者、関係メーカーがさまざまな努力をしています。

本稿では、鉄道総研の車両関係の取り組みを中心に、省エネルギーの先進技術をご紹介します。

## 車載リチウムイオン二次電池

最近の電車は、ブレーキ時に発生する電気エネルギーを架線を通して加速中の電車に供給する回生ブレーキと呼ばれる技術を使っています。これが図1に現れた鉄道の省エネルギーの理由の一つです。しかしながら、ブレーキをかける時にちょうど加速中の電車がいないとこの技術が使えなくなります。これを防ぐために電車にエネルギーを蓄えられるものを搭載する研究開発が内外で進められています。蓄えるものの候補はいろいろありますが、鉄道総研では、エネルギー密度の大きい、すなわちある量のエネルギーを蓄

えるのに必要な質量が小さくて済むリチウムイオン二次電池に着目して電車に搭載する大容量の装置を開発してきました(図2)。

リチウムイオン二次電池は、パソコンや携帯電話の電池として広く使われています。また、ハイブリッド自動車や電気自動車の蓄エネルギー装置の本命として使われ始めています。

この電池の実用化の上での留意点の一つに、過充電によるトラブルの防止があります。過去、パソコン、携帯電話などでリチウムイオン二次電池のトラブルが何度か報じられましたが原因はほとんどが過充電です。そこで、大容量電池の開発に当たっては、3段階の過充電防止対策を考えました。

電池の端子電圧がある値になると、運転席で運転士に注意を促す表示が出ます。ここで運転士が操作して充電を終

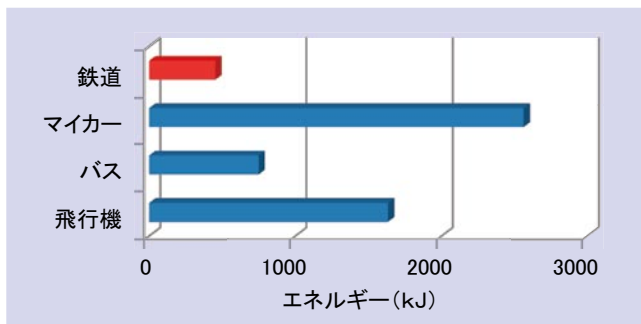


図1 一人を1km運ぶのに必要なエネルギー<sup>1)</sup>



図2 開発した車載用大容量リチウムイオン二次電池



図3 リチウムイオン二次電池搭載試験電車



図5 燃料電池試験電車



図4 ドイツの鉛バッテリー駆動電車



図6 開発した燃料電池と車両搭載状況

了することができます。もし充電が続けられて電圧がある値に達すると充電制御装置が充電を停止します。万一何らかの理由でさらに充電が続いてしまった場合には、電流を流しこむ回路の遮断器を開いて充電を止めるようにしています。これにより、リチウムイオン二次電池の過充電防止対策は万全と考えています。

リチウムイオン二次電池の車両搭載により、常に動作する回生ブレーキを作ることができました。また、この電池の大容量を生かして、バッテリー駆動で走行することも可能な電車の開発も行いました(図3)。これは、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の資金により、LRTタイプの車両で行いました。数kmごとに充電することにより、「架線レス」で走ることができます。開発した急速充電技術により、充電時間は約1分とダイヤに影響のない範囲です。最高速度は80km/h、架線電圧は1500Vにも対応しており、軌道だけでなく鉄道にも使える実力を持っており、2009年11月にはJR四国での走行試験(1500V電化区間および非電化区間)をしました。

実はバッテリー車両はドイツですずっと昔に実用化された歴史があります。代表的な形式である515形は、1957年から200両以上が製作され<sup>2)</sup>、数十年間走ってきました(図4)。鉛バッテリーを搭載していたため、車両質量57トンのうちバッテリー質量が23トンを占めています。回生ブレーキを使っており、興味深い実用例といえます。

### 燃料電池電車のパワー制御

鉄道総研では、燃料電池で発生する電力により車両を駆動する燃料電池電車の開発を行っています(図5、図6)。燃料電池電車の回生ブレーキについて考えてみます。燃料電池電車は最近の電車と同様にインバータでモータを制御して走ります。ですから、ブレーキの時にモータからインバータに電力を発生させることが可能です。しかし、燃料電池電車ではパンタグラフや架線がありませんから、他の電車に回生電力を供給することはできません。また、燃料電池に充電することもできません。そこで、先に紹介したリチウムイオン二次電池を搭載してここに蓄える方法

を考えています。これは燃料電池と二次電池のハイブリッドになりますが、実用化される際には図7のような構成になると考えます。ディーゼルカーをこれに置き換えれば、リチウムイオン二次電池も搭載することにより回生ブレーキを使うことができることなどから、省エネルギーに貢献できます。

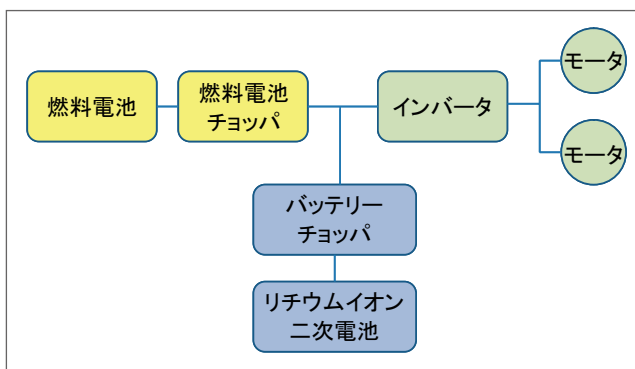


図7 燃料電池車両の主回路構成

この方式では、加速する時に燃料電池からの電力と二次電池からのパワーをどういふふうに分けるかが一つの考えどころになります。鉄道総研では、二次電池の充電放電を制御するチョップパ装置に、燃料電池や駆動用インバータの情報を集め、これにより最適なパワー配分になるよう制御しています。

図8に鉄道総研構内で走行した際のパワーのやりとりを示すグラフを示します。最初の停車中は、燃料電池から二次電池に約50kWのパワーを供給(充電)していることがわかります。このときは二次電池の残存容量を60%になるまで充電します。走行開始して約5km/hになると、燃料電池の出力が絞り込まれています。これは走行中は二次電池の目標残存容量を下げ、この時点で実際の残存容量が目標値を越えたためです。走行中の目標残存容量を下げるのは、次にブレーキがかかり、モータからのパワーを充電できるようある程度「おなかをすかせておく」ためです。この走行では残存容量が比較的多いため、加速中はほとんどバッテリーからの電力でまかっています。ブレーキにより速度が5km/h以下になると目標残存容量が上がるので、燃料電池のパワーが大きくなっています。

最適なパワー配分は、使用する線区の最高速度や勾配条件などでも変わってきます。今後もさらにブラッシュアップをしていきます。

### 超電導主変圧器の低損失線材

新幹線に代表される交流電車は、車両に変圧器を搭載しています。これで架線の25kVなどの高電圧を数千Vという制御に適した電圧に下げています。変圧器は電磁誘導を利用しており、電流を流す巻線(銅線など)と磁束が通る鉄心(鋼板)という金属の塊になります。鉄道車両用では軽量化を考慮した設計にしていますが数トンの重さになります。また、軽量化を重視するため、これとトレードオフ

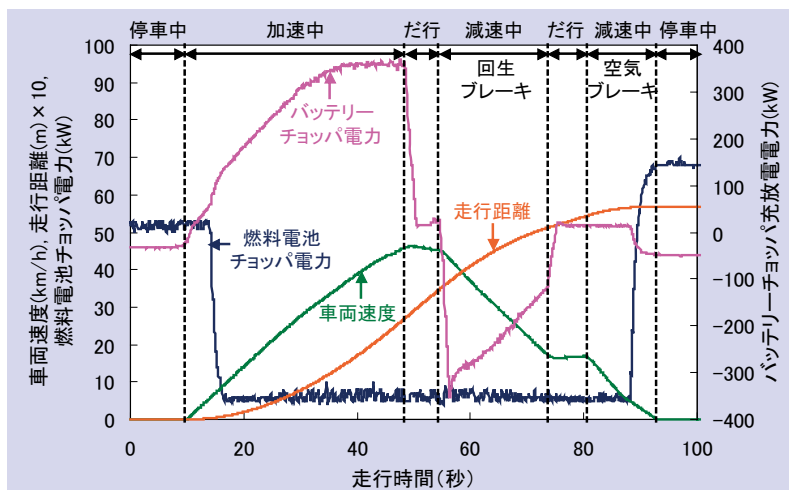


図8 燃料電池車両走行試験時のパワー(電力)のやりとり

の関係にある効率は電力用変圧器に比べると低くなっています。国内では96%程度、海外では、周波数の違いなどの事情がありますが、効率90%という場合もあります。この改善と主変圧器自体の軽量化を目的として超電導線材を巻線に使用する超電導主変圧器の開発に取り組んでいます。ここでは、線材の損失低減の手法について紹介します。この主変圧器に用いているのはビスマスを中心とした酸化物(セラミックス)の線材です。幅が約4mm、厚さが約0.3mmのテープ状の形態をしています。この線材は図9のように銀などの母材と呼ばれる金属にフィラメントと呼ばれる超電導素線を数十本埋め込んだ構造になっています。これを極細多心構造と呼んでいます。

超電導というと永久電流=損失ゼロというイメージがありますが、これは直流を流した場合で、交流を流すと線材

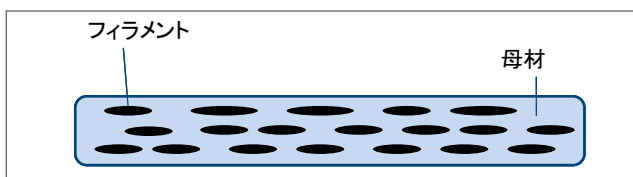


図9 ビスマス系超電導線材の構造



図10 試作した超電導主変圧器

中の磁界の変化により損失が発生します。それでも現在作られている線材の構成で理論上は効率99%を超える主変圧器が構成できます。

そこで、鉄道総研ではこの線材を用いて新幹線などの高速鉄道車両に対応した超電導主変圧器を試作しました(図10)。試験結果から、容量や電気絶縁、振動などの仕様を概ねクリアすることができましたが、フィラメント同士の接触という線材製造上の課題が残り、効率は96%程度に止まっています。

この損失の低減のため、線材の幅を狭くすること、フィラメントをねじる(ツイスト)こと、フィラメント同士の接触を防ぐためにバリアと呼ばれる絶縁材を入れることなどが考えられます。現在、線材幅が約2mmでツイストを入れた線材で巻線を作り、損失がほぼ半減できることを確認しました。

### 永久磁石モータに使われる磁石

主なモータの種類は、図11のようになります。電車の駆動用に使われるモータは昔は直流モータが主でしたが、現在電車に使われているモータは誘導モータが主流になっています。これは、固定子に回転する磁界を発生するための巻線があり、回転子にバーとエンドリングと呼ばれる導体を配置したものです。このモータは回転子の導体に電流が流れるので、損失(熱)が発生します。回転子に導体ではなく永久磁石を配置したものが永久磁石モータです。この場合は、固定側の回転磁界と回転子の永久磁石の吸引、反発力が回転力になります。この時、磁石に生じる損失は、誘導モータの導体に発生する損失と比べると非常に小さくなります。いいかえるとモータの効率は永久磁石機が高く

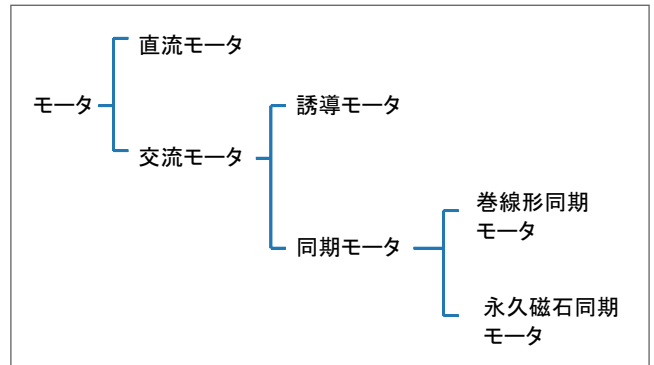


図11 主なモータの種類

なります。このメリットを生かすために、近年、鉄道車両用永久磁石モータの研究開発が進んでいます。

永久磁石は、みなさんが小学校で使った経験があるように昔からあるわけですが最近になって電車のモータ用が研究開発されるようになったのは、小型で磁力の大きい永久磁石が開発されたからです。それはネオジム系磁石と呼ばれるものです。ネオジムは希土類(レアアース)と呼ばれるグループに属する元素で、化学で習った周期律表では下の方にあります。この磁石は、体積当たりの磁力が従来のものより大きくなり、電車のモータに必要な回転力を生み出すための磁力を、台車の中に収めなければならないモータの中に収まる大きさで発生させることができます。

永久磁石モータは日本では鉄道総研が軌間可変試験電車に使用したり、JR東日本が京葉線の電車の一部に使用したりしてきました。東京メトロで今年作られる新型電車に広く使われることになりました。海外でも最近研究開発が進んできました。フランスのTGVで571km/hという速度記録を達成した時の中間車には永久磁石モータが使われました。これを踏まえて2011年から永久磁石モータを用いた最高速度300km/hの電車がイタリアのミラノ、フィレンツェ、ローマ、ナポリ間を走る予定です。

### おわりに

地球温暖化防止のためCO<sub>2</sub>排出を25%低減することが提唱されるなど、今後も省エネルギーの必要性は大きくなると思われます。鉄道がその省エネ性に磨きをかけてこれに貢献できるよう今後も研究開発を続けていきます。

なお、燃料電池車両と超電導主変圧器の研究開発の一部は国土交通省の補助金により実施しました。RRR

### 文献

- 1) 国土交通省ホームページ
- 2) Jane's world railways 1985-86, p.671, Jane's Publishing Company Limited