

燃料電池・バッテリーハイブリッド 試験電車の概要

山本 貴光

車両制御技術研究部
(動力システム 研究室長)

古谷 勇真

車両制御技術研究部
(動力システム 研究員)

長谷川 均

浮上式鉄道技術研究部
(電磁力応用 主任研究員)

小川 賢一

同
(同 研究員)



やまもと たかみつ



はせがわ ひとし



ふるや たけまさ



おがわ けんいち

はじめに

鉄道総研では、非電化区間を走行するディーゼルカーの置き換えを対象として、また、将来的には電車の代替として全く新しい駆動源である燃料電池を適用した鉄道車両の開発を行っています。燃料電池は水素を燃料として、電気エネルギーと水を生成する大変クリーンな電源として開発が注目されている電源です。鉄道への適用に関する開発当初は1kW級燃料電池を使って基礎的特性の取得や乗用模型車両の駆動源としてモータ駆動に対する応答性等の確認を行いました。これを受けて2001年からは研究テーマ「燃料電池の鉄道車両駆動用電源への適用の基礎的研究」として実施し、30kW級燃料電池による実台車の駆動試験を実施しました。水素供給制御、水素リサイクル機能の必要性、生成水処理などの課題が確認されましたが、どれも開発を中止するほど困難なものでは無いため、これらの課題の対策と大出力化した燃料電池を導入し、実際の鉄道車両を走行させる段階に移行しました。2006年4月、100kW級燃料電池を搭載した「クヤR291」の走行試験を開始しました。そして2008年12月にもう一両の試験車両「クモヤR290」にバッテリーと充放電装置を搭載して2両で走行する「燃

料電池・バッテリーハイブリッド試験電車」の構成が完成しました。今回はこの「燃料電池・バッテリーハイブリッド試験電車」(外観を図1、主要仕様を表1に示す)の概要についてご紹介します。

バッテリーハイブリッド化の目的

これまでの100kW級燃料電池のみによる走行では鉄道車両1両がなんとか走行できるだけの出力でしかありませんでした。また、空調などの補機電源用電力は架線から集電する必要がありました。今回、バッテリーハイブリッド化による出力の増大に伴い、2両編成での走行および補機電力も燃料電池とバッテリーで賄うことが可能となりました。本構成とすることにより、さらにブレーキ時に発生する回生電力を蓄えて有効に利用することが可能となり、効率および燃費の向上が期待できます。将来、実用化時にはこの「回生電力を有効利用する機能」が必須なと考えられます。燃料電池のみを走行用電源とした走行試験結果から燃料電池・バッテリーハイブリッド構成にした場合に想定される効果を表2に示します。



図1 R291系 燃料電池・バッテリーハイブリッド試験電車



図2 100kW級燃料電池車両搭載状況

表1 燃料電池・バッテリーハイブリッド試験電車の主要仕様

最高設計速度	100 km/h
電源方式	燃料電池・バッテリーハイブリッド:直流1500 V
燃料電池	固体高分子型120 kW
燃料電池 チョッパ装置	昇圧直流電力変換装置800 V→1500 V 600 kVA
ハイブリッド用 バッテリー装置	リチウムイオンバッテリー36 kWh, 360 kW
バッテリー 充放電装置	双方向直流電力変換装置600 V—1500 V 360 kW
主電動機	3相かご型誘導電動機95 kW×2台
水素タンク	TYPEⅢ・35 MPa・約720 L

表2 ハイブリッド化による想定される効果

仕様	ハイブリッド化前	ハイブリッド化後
車両数	1両	2両
編成出力	最大120 kW	最大480 kW
回生電力有効利用 エネルギー効率*	不可 50%程度	最大360 kWまで可 65%程度
補機電力	架線より	燃料電池・バッテリーより
燃費	7 km/kg at1両編成	5 km/kg at2両編成

*エネルギー効率は(燃料電池出力エネルギー+回生エネルギー)/水素エネルギーとした

バッテリーハイブリッド用機器の概要

今回、燃料電池とバッテリーとのハイブリッド化にあたり、新たに製作した装置はバッテリー装置とバッテリー充放電装置です。バッテリー装置は近年、開発が進み、性能向上が著しいリチウムイオンバッテリーを採用しました。このリチウムイオンバッテリーは容量に対して軽量であり、また出力密度が高く、内部抵抗が小さいため充放電効率が高いという特徴があります。現状では容量に対してコストが高いという課題がありますが、今後、需要の増加に伴い、大量生産されることによって低コスト化が期待できます。バッテリーの搭載量は最大回生電力を吸収可能とすることから360kW、36kWhという仕様になりました。

バッテリー充放電装置は、バッテリーの電圧をDC1500Vに変換してインバータ装置に供給する装置で、バッテリーからインバータ装置・SIV装置へ電力を供給する機能と、燃料電池チョッパや回生電力のDC1500Vからバッテリーを充電する機能を有します。また、バッテリーと通信を行いバッテリーの残存エネルギー情報等を参考にしてバッテリーの充電制御を行う機能も有しています。今回は地上設置で実績があるものを基本設計とし、車上搭載向けに一部変更しました。この装置の出力はバッテリーに合わせて最大360kWとしました。リチウムイオンバッテリーとバッテリー充放電装置の車両搭載状況を図3に示します。

燃料電池・バッテリーハイブリッドの構成と動作のしくみ

燃料電池とバッテリーのハイブリッド構成について図4に示します。燃料電池およびバッテリーともそれぞれの電圧をDC1,500V化する電力変換装置を接続し、DC1,500Vでインバータに電力を供給する構成としています。この構成により、インバータ～主電動機は従来から直流電車用として使用されているものがそのまま使用可能となります。このような電源が2つある構成において、負荷をとった場合、どちらの装置がどれだけ出力を分担するのかを予め決めておく必要があります。今回の構成におい



図3 リチウムイオンバッテリー(手前)とバッテリー充放電装置(奥)のクモヤR290形車両への搭載状況

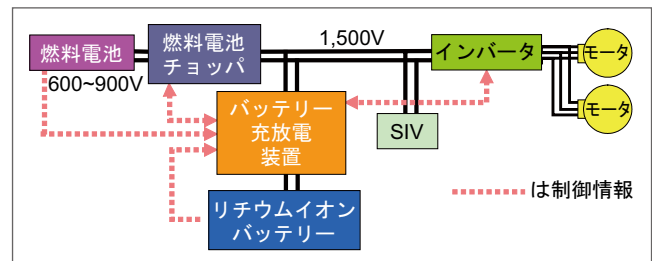


図4 燃料電池とバッテリーのハイブリッド構成

てはこの出力分担を制御する機能をバッテリー充放電装置に持たせました。燃料電池の出力はバッテリー充放電装置からの指令で動作する燃料電池チョッパ装置の出力に自動で追従するため、燃料電池自体には出力の指令は必要ありません。走行時の基本動作状況を以下に示します。

【加速時】

- ①加速用電力はバッテリーからの放電によって賄います。補機電力のほとんどは燃料電池出力により賄われます。
- ②加速用電力がバッテリー出力の許容値以上となった場合およびバッテリーのエネルギー残存容量が規定値以下となった場合は燃料電池からも出力されます。

【惰行時】

- ①補機電力分の電力を燃料電池が出力します。
- ②速度情報から算出された予想回生エネルギーを回収す

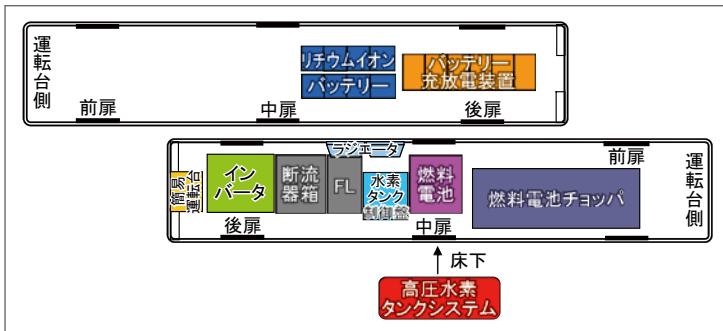


図5 各装置の車両搭載配置

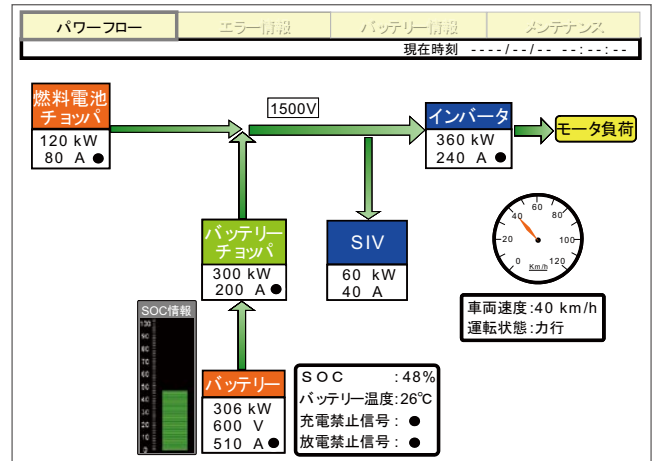


図6 燃料電池・バッテリーハイブリッドモニタ画面例

ることを考慮したバッテリー残存エネルギーの規定値を下回った場合、燃料電池からのエネルギーによりバッテリーの充電が行われます。

【減速時】

- ①インバータから回生電力が発生すると、燃料電池からの電力供給は停止され、この電力は補機電力とバッテリーの充電に使用されます。

【停車時】

- ①補機電力は燃料電池からの出力によって賄われます。
- ②バッテリーのエネルギー残容量が規定値を下回ると燃料電池からの出力が上昇し、バッテリーが充電されます。

このように、基本的に加速用電力はバッテリーによって賄われることを基本とし、燃料電池は補機電力の供給とバッテリーをいつでも充電可能な装置という位置付けの動作を基本としています。しかし、今後の走行試験を行っていく上でさらに高効率な制御方法を検討していく予定です。なお、バッテリーの残容量が極端に少なくなった場合や、バッテリーが異常となった場合は燃料電池の出力が立ち上がり、燃料電池の出力範囲内にインバータ入力自動的に制限される機能も有しています。

燃料電池出力とバッテリー出力の割合

燃料電池の出力とバッテリーの出力を合計した値が鉄道車両の必要出力以上になるように設計しますが、それぞれどのような値にしたらいでしょうか。ここで燃料電池とバッテリーの出力あたりの重さとコストを比較してみます。燃料電池は現状では14kg/kW、150万円/kW程度であるのに対して、リチウムイオンバッテリーは、3.3kg/kW、6万円/kW程度となっています。これらの値は現在開発品における参考値で将来の普及時には格段に低コスト化する

ことが想像されますが、重さ、コストともバッテリーの割合を増やした方が有利であることが想定されます。しかし、車両を加速するために必要となるエネルギーは回生ブレーキに戻ってくるエネルギーより大きく、また空調など補機のエネルギーも必要となるため、エネルギーを生み出す装置が必要となります。バッテリーはあくまでエネルギーを蓄えておく器に過ぎません。今回の構成ではエネルギーを生み出す装置は燃料電池であり、燃料電池出力の下限值があります。これは以下の考え方から求められます。

- ①走行線区における始点駅から終着駅までの間の運転時間において、列車が必要とするエネルギー (kWh) を燃料電池が発電可能な時間 (h) で除して求められる出力 (kW)。
- ②上記走行区間において上記の方法で求めた燃料電池出力で運転した場合、バッテリーの残容量が規定範囲内を下回る場合があるときは規定範囲内に収まるように燃料電池出力を増大させる。

この①②の両方とも満たす最低の値が燃料電池出力の最低値（最適値）となります。従いまして、検討する路線条件によって燃料電池の最低必要出力は大きく異なることが想定されます。②の条件を確認するためには燃料電池-バッテリーハイブリッド構成における走行シミュレーションを行う必要があります。

各装置の車両搭載配置

今回使用した試験電車は燃料電池車両の開発以外の研究開発においても使用するため、通常の電車として走行する機能を有しています。このため燃料電池-バッテリーハイブリッド試験電車の構成においては、高圧水素タンクシステム以外は車上に搭載しました。各装置の車両搭載配置を図5に示します。燃料電池、燃料電池チョップ、インバー

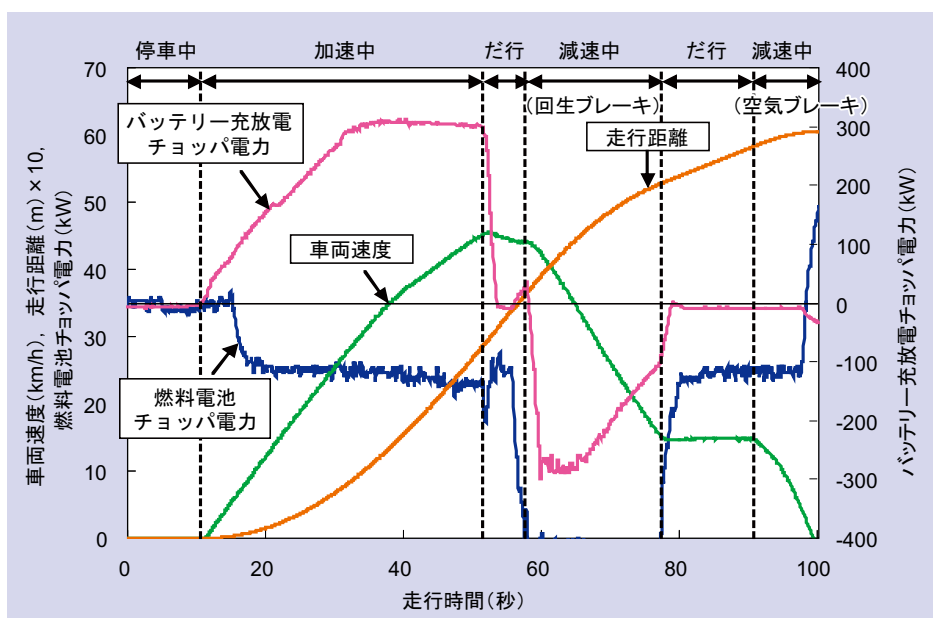


図7 燃料電池・バッテリーハイブリッド構成における走行試験結果例

タはクヤR291に、リチウムイオンバッテリーおよびバッテリー充放電装置はクモヤR290に搭載しました。計測関係はクモヤR290にて一括して行うため、クヤR291にセンサがある計測配線は車間を渡しています。本構成では電力変換装置が従来のインバータ車より燃料電池チョップおよびバッテリー充放電装置搭載分だけ増えていますので、ノイズ等への対策を十分に行う必要があります。

燃料電池・バッテリーハイブリッド用モニタ装置

今回、新たに製作した装置の一つに燃料電池・バッテリーハイブリッド用モニタ装置があります。この装置は電気エネルギーの流れが一目で確認できることを目的としています。電流の流れる方向により矢印の向きが変わります。また、この装置はモニタ中の各種データを保存する機能があり、故障が起こった場合でもどの装置からどのような順番で故障が発生したかを確認できるようになっています。リチウムイオンバッテリーとの間ではRS-485の通信により、全バッテリーセル電圧、バッテリーモジュール温度、バッテリー残存量 (SOC)、充放電電流などの情報を、1秒単位で記録できます。モニタ画面の例を図6に示します。

走行試験概要

今回の燃料電池・バッテリーハイブリッド構成において、基本的な走行を確認しました (図7)。まず走行前では補機電力を燃料電池で賄っています。加速中はバッテリーと燃料電池の両方とも出力を出しています。最高速度 (約45km/h) から回生ブレーキが動作し、回生電力が発生す

ると燃料電池出力が低下し、この電力がバッテリーに吸収されます。速度が十分低下し、回生電力が無くなると燃料電池出力が立ち上がり、補機電力を賄います。ほぼ停止状態になるとバッテリーのエネルギー残存量を所定値まで回復させるために燃料電池出力を上げて充電を行います。これらの動作により回生エネルギーは次回の加速や停車中の補機電力として有効に利用されることが期待できます。今回の試験結果例では加速・減速時ともバッテリーの仕様値に

近い300kW強の電力を充放電している状況が確認できました。また、バッテリー⇄燃料電池の切り換えもスムーズに行われ、負荷装置への影響は無いことを確認しました。今後調整を行って、更に仕様値に近い運転を確認すると共に最適なハイブリッド制御を実現していく予定です。

おわりに

今回の燃料電池・バッテリーハイブリッド構成の試験電車は車両内に機器を搭載し、チョップ装置などの電力変換装置も大きく、燃料電池の出力も120kWと小さいため、実用化に際してまだまだ課題が多い構成です。実用化にあたっては、東日本旅客鉄道(株)においてもNEトレインに燃料電池を搭載してバッテリーハイブリッド構成とした車両により本線を使用した走行試験が行われるなど、今後、燃料電池の技術開発が進み、燃料電池の入手性が容易になることで更に多くの鉄道事業者が導入を検討していくことが期待されます。燃料電池を鉄道車両に適用するためには小型化・大出力化などの技術的課題の他、低コスト化や法令の整備などを行うことが必要ですが、燃料電池の普及にあたっては、水素供給設備が同時に導入できる公共交通機関への適用が最も有力な手段となりえると考えられます。燃料電池が省エネ技術として普及していく初期段階での導入用途として「鉄道車両」が有力候補となるよう、鉄道車両へ燃料電池を適用した場合に想定される課題の抽出と、その解決策について引き続き検討を行っていきます。

なお、本研究開発の一部は国土交通省からの補助金を受けて実施しました。[RRR]