

燃料電池車両の開発

小川 賢一

車両制御技術研究部
(動力システム 研究員)

山本 貴光

同
(同 研究室長)

長谷川 均

浮上式鉄道技術研究部
(電磁力応用 主任研究員)



おがわ けんいち



やまもと たかみつ



はせがわ ひとし

古谷 勇真

車両制御技術研究部
(動力システム 副主任研究員)

長石 晋太郎

同
(同 研究員)

秦 広

同
(主管研究員)



ふるや たけまさ



ながいし しんたろう



はた ひろし

はじめに

近年、枯渇が懸念される化石燃料の使用低減やCO₂排出に伴う地球温暖化の防止を目的として、省エネルギー化やCO₂排出低減のための技術開発が活発になってきています。鉄道は、自動車や航空機など他の輸送手段に比べてCO₂排出が少なく、省エネで効率のよい移動・輸送システムとなっています。近年新製される電車では、インバータ制御による誘導電動機駆動方式が主流であり、減速時にモータで発生する電気を架線に戻して近くを走行中の電車で再利用する回生動作によって、更に省エネ化されています。大都市近郊では電車が大部分を占めますが、国内鉄道路線の4割程度の区間は非電化となっており、このような区間ではディーゼルエンジンを動力源とした気動車が走行しています。

気動車は、架線からの電気を使わず、軽油を燃料としてディーゼルエンジンで走行します。このため、電車のように架線を使って回生動作を行うことができません。さらに、排ガスやディーゼルエンジンからの騒音・振動が大きいなどの課題があります。この技術的な解決策の一つとして、モータ、電力変換装置、バッテリーなどを搭載して回生動作が行えるようにし、燃料消費量の削減と効率向上、また排ガスや騒音・振動の低減を図ったディーゼル・バッテリーハイブリッド車両が開発されてきており、一部の営業線で運行が始まっています。しかしながら、将来的には軽油のような枯渇系燃料に依存しない代替エネルギーを使って走行する車両が必要になると考えられます。

この究極の新技术として注目されているのが燃料電池です。燃料電池は、再生可能な燃料である水素を空気と反応させて高効率で発電する装置であり、排出物は反応によってできた水だけという大変クリーンな電源です。最近では、

家庭や病院などの施設に導入が始まっており、また自動車でも燃料電池を動力源とした車両が開発され、実証走行もかなり進んできています。

鉄道分野にもこのような優位性のある燃料電池を導入すべく、鉄道総研では2001年より燃料電池を鉄道車両の電源に適用する研究開発を進めてきました。以下、本研究開発の内容について説明します。

燃料電池試験電車の開発経緯

鉄道総研では、燃料電池試験電車の開発を3つのフェーズに分けて進めてきました(表1)。燃料電池は内部の電解質とよばれる部分によっていくつかの種類に分類されます。鉄道の毎日の運行を見据え、常温動作が可能で起動時間が短い固体高分子形とよばれる燃料電池を対象として適用研究を行ってきました。

まずPhase1において、30kW級燃料電池システムを導入して鉄道車両用の電動台車を駆動する試験を行い、燃料

表1 鉄道総研における燃料電池車両の開発マップ

Phase 1	Phase 2	Phase 3
2001-2003年度	2004-2006年度	2007-2008年度
<ul style="list-style-type: none"> ・30kW級燃料電池システムの試作 ・30kW級燃料電池による電動台車駆動試験 	<ul style="list-style-type: none"> ・100kW級燃料電池システムの試作 ・35MPa高圧水素タンクシステムの試作 ・燃料電池搭載試験電車を用いた構内走行試験(1両編成) 	<ul style="list-style-type: none"> ・リチウムイオンバッテリーシステムの試作 ・バッテリーチョップ装置の試作 ・燃料電池・バッテリーハイブリッド試験電車を用いた構内走行試験(2両編成)

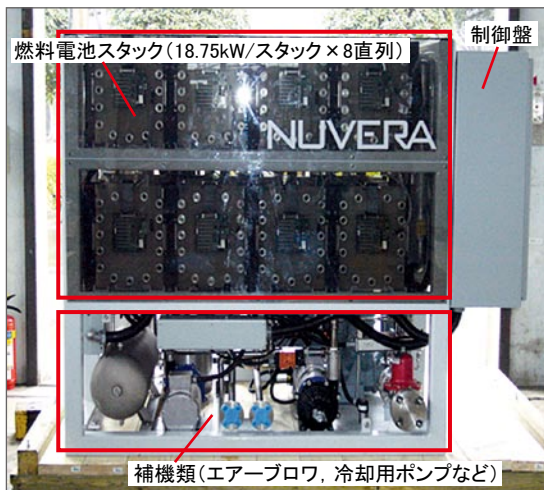


図1 100kW級固体高分子形燃料電池システム



図2 燃料電池・バッテリーハイブリッド試験電車の走行試験状況

電池の電気的特性が鉄道車両駆動に適応可能であることを確認しました。この結果を受けて、Phase2において、車両搭載が可能な100kW級燃料電池システム（外部に供給可能な最大電力は120kW）（図1）と35MPaの高圧水素タンクシステム（容量720L／水素18kg程度を貯蔵）を新たに試作して試験電車に搭載し、1両で片道650m程度の構内試験線を利用して走行試験を行いました。この結果、試験線による制限速度の中で、最高速度が42km/hで走行できることを確認しました。さらに高い速度域での走行確認のため、車両試験台（車両を定置に固定した状態で、地上設備の軌条輪を回転させて走行模擬を行う試験設備）を利用した走行模擬試験を実施し、最高速度105km/hまでを確認しました。この時の電源構成は、100kW級燃料電池システムの出力が鉄道車両1両を駆動するのに最低限の電力であったため駆動電力のみに使用し、補機電力（照明、空調、空気供給コンプレッサなど）は架線からパンタグラフを介して給電する構成としました。また、バッテリー等のエネルギー蓄積装置は搭載していなかったため、全て機械ブレーキを使って減速を行いました。そこでPhase3において、リチウムイオンバッテリー装置（容量36kWh／最大充放電電力360kW）とバッテリーチョップ装置（双方向型DC/DCコンバータ 600V⇔1,500V）を試作して、燃料電池とバッテリーの電源ハイブリッド化を行いました。これによって、駆動電力だけでなく補機電力も燃料電池とバッテリーから供給できるようになり、回生動作も行えるようになりました。

以下、Phase3の開発内容を中心に説明していきます。

燃料電池・バッテリーハイブリッド試験電車の構成

構成した燃料電池・バッテリーハイブリッド試験電車の走行試験状況（図2）と主回路構成（図3）を示します。

図3に示すように、本試験電車の駆動システムは、燃料

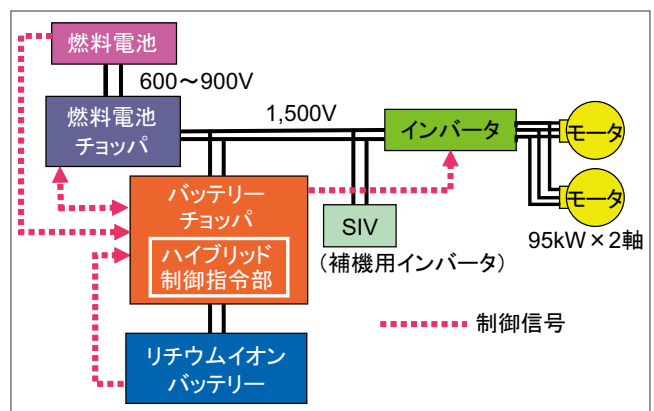


図3 試験電車の主回路構成

電池を動力源としてバッテリーの出力と合わせて加速し、減速時は回生エネルギーをバッテリーに蓄えられるようになっています。燃料電池とバッテリーにそれぞれチョップ装置が接続されており（燃料電池チョップ装置は昇圧動作のみ）、これらのチョップ装置によってインバータ入力電圧を直流1,500V一定に保つよう制御が行われます。これにより、電源電圧の変動による影響をほとんど受けなく走り、さらに従来の直流1,500V系の電車と同じ主回路機器をそのまま適用することも可能となります。本構成を用いた場合、搭載する装置の数が多くなり総重量が増えてしまいますが、大幅な変更を伴わずに既存の駆動システムにハイブリッド機能を付加することが可能です。

また冒頭に述べたように、本試験電車の開発は非電化区間を走行する気動車の置き換えを主なターゲットとしていますが、予めパンタグラフを搭載しておき、ハイブリッド給電とパンタグラフ給電の電源切換えが可能な構成にしておけば、非電化区間と直流電化区間相互を直通で走行できるような運用上のバリエーションも考えられ、燃料となる水素の搭載量を低減できる可能性があります。

燃料電池とバッテリーの出力分担制御方法

2つ以上の電源を用いて主回路を構成する場合、各電源の出力分担制御が必要になります。本試験電車では、この制御の関数としてバッテリーの充電状態 (SOC : State Of Charge) と車両速度などを用いており、これらから制御目標とするSOC (目標SOC) を設定しています。この目標SOCと運転状態 (加速、だ行、回生、停車) からバッテリーの充電・放電の向きと燃料電池の出力制御を行います。加速時は燃料電池出力をバッテリー出力に加え、回生時は回生電力を効率よくバッテリーに蓄える制御を行っています。図4に走行により確認したハイブリッド制御動作の結果を示します。

車両の運転状態ごとに燃料電池とバッテリーの出力動作状況について説明します。

< 停車中 >

次の加速に備えて目標SOCを高くしておき、燃料電池から出力してバッテリーを充電し、さらに車両の補機電力を供給します。

< 加速中 >

バッテリーから優先的に出力させ、燃料電池からの出力と足し合わせた電力を使って加速します。

< だ行 >

回生電力を蓄えられるよう目標SOCを低くして燃料電池から出力してバッテリーを充電し、さらに車両の補機電力を供給します。

< 減速中 (回生ブレーキ) >

燃料電池出力を抑制し、回生電力をバッテリーに蓄えます。

走行確認試験により、これら一連のハイブリッド制御の基本動作が正常に行われることを確認しました。

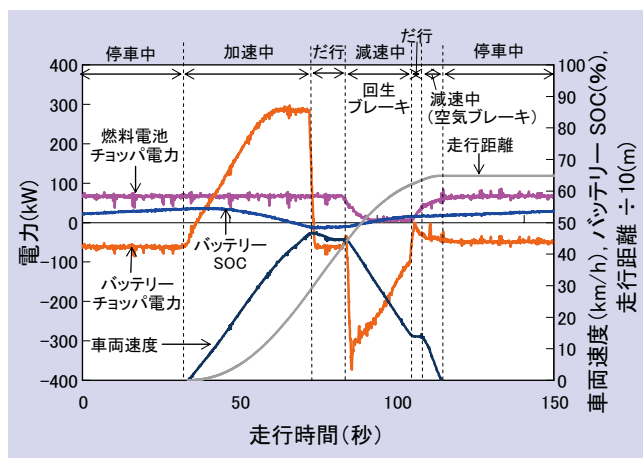


図4 ハイブリッド制御動作の走行確認結果

連続走行試験と走行評価方法

燃料電池電車の実用化のためのポイントの一つに、航続距離があります。水素の搭載量は走行する線区や運転方法によって変わり、また現状の試験電車の構成が最適設計されているわけではありませんが、今回の構成でどれだけ走れるのか、効率はどのくらいかについて知っておくことは実用化に向けて有用です。このため、効率と燃費を主な評価項目として構内試験線にて連続走行試験を行いました。燃費および各種効率について、以下のように定義しました。

$$\textcircled{1} \text{燃費 (km/kg)} = \frac{\text{走行距離 (km)}}{\text{水素消費量 (kg)}}$$

$$\textcircled{2} \text{車両エネルギー効率 (\%)} = \frac{\text{加速エネルギー (kWh)} + \text{補機エネルギー (kWh)}}{\text{走行で消費した水素エネルギー (kWh)}} \times 100$$

$$\textcircled{3} \text{燃料電池エネルギー変換効率 (\%)} = \frac{\text{燃料電池から外部に供給したエネルギー (kWh)}}{\text{走行で消費した水素エネルギー (kWh)}} \times 100$$

$$\textcircled{4} \text{回生効率 (\%)} = \frac{\text{回生エネルギー (kWh)}}{\text{加速エネルギー (kWh)}} \times 100$$

前述のように、構内試験線は片道650m程度で、試験線の両端部での折り返しに最低1分程度必要です。また、試験線の曲線部での最高制限速度は45km/hとなっています。これらの条件が営業線とは違いますが、この構内試験線を使って走行試験を行い、燃費と効率の評価を行いました。

燃費・効率の評価

図5および図6に連続走行試験の結果例を示します。

図5は速度、走行距離、また水素圧力と走行時間との関係を表し、図6は燃料電池チョップ装置とバッテリーチョップ装置のパワーとエネルギー、またバッテリーSOCと走行時間との関係について表しています。これらの図から、燃料電池で水素を消費しながら出力し、バッテリーで充放電を繰り返しながら、構内試験線を連続して走行している様子が分かります。前式に示したように、水素消費エネルギーを分母として燃費・効率の評価を行うため、走行終了後にバッテリーSOCを走行開始時と同じ状態まで回復させてから試験を終了しています。

走行条件を変えた燃費・効率の比較結果

燃費・効率は、空調のON・OFF、また走行ごとにバッテリーSOCを走行前と同じ状態まで回復させてから走行を始めるか否か、などの走行条件の違いによって様々に変わ

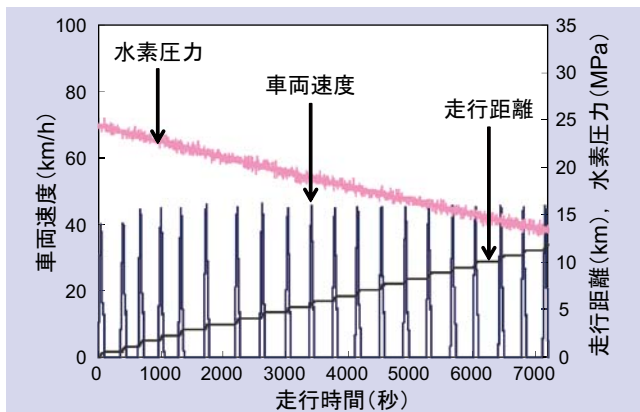


図5 速度曲線の結果例

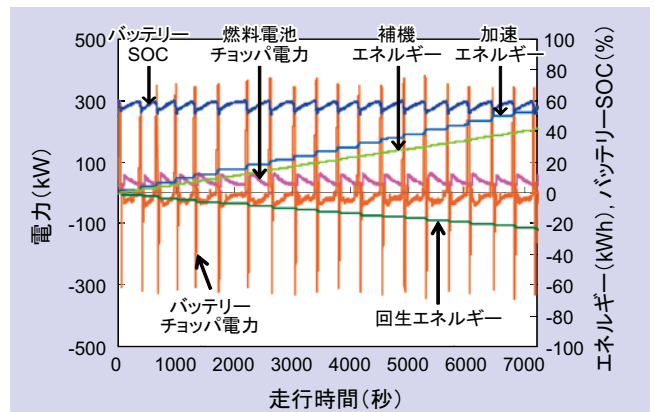


図6 電力・エネルギー曲線の結果例

ると考えられます。先に示した図4と図5の走行条件は、「空調をON、走行開始時のバッテリーSOCを一定の値になるまで復帰させてから走行」した時の結果例を示しています。

そこでまず、単純に補機エネルギーの違いによる燃費・効率の比較を行うために、空調ON条件とOFF条件で各々走行試験を行いました。空調条件は走行の始めから終わりまで変えず、また両条件とも走行ごとに走行開始SOCを一定の値になるまで復帰させてから走行を始めました。その他、走行距離、車両の運転方法などについてはほぼ同じ条件としました。これらの比較結果についてまとめたものを表2と表3に示します。

まず補機エネルギーについて比べると、空調ON時はOFF時の3倍弱程度まで増大しています。空調ONによって補機による消費電力が増え、これによってバッテリーの充電電力が小さくなりSOCの復帰に時間がかかるため、同じ走行距離でも走行時間が20分程度長くなっています。上記理由により、空調ON時の方が、水素消費量が増えて燃費が低下することが分かります。参考までに、この燃費をもとに航続距離を求めると87～130km/両程度となり、現行営業車両の1日の平均走行距離(350～400km程度)に比べると不十分な距離ですが、だ行時間(試験線では走行距離の制約により2～3秒と短い)の延長や水素タンクの鉄道車両専用設計、また各種装置の小型軽量化などにより今回の航続距離はさらに延伸できるものと見込んでいます。車両エネルギー効率も燃費と同様に、空調ONによって水素消費量が増えて低下しています。燃料電池のエネルギー変換効率は、走行条件に依らず50%程度の高効率になることが分かりました。回生効率は、首都圏を走行する一般の通勤型電車の回生効率とほぼ同程度となりました。

今後も引き続き走行試験を行い、走行条件を様々変えて燃費や効率などについて評価を行っていきます。

表2 走行時間と各種エネルギーの比較結果例

空調条件	ON	OFF
走行距離 (km)	11.9	
試験時間 (分)	107.3	88.0
水素消費量 (kg)	4.91	3.31
水素消費エネルギー (kWh)	160.4	108.3
加速エネルギー (kWh)	55.9	54.5
回生エネルギー (kWh)	23.3	22.0
補機エネルギー (kWh)	41.7	15.9

表3 燃費・各種効率の比較結果例

	空調条件	ON	OFF
①	燃費 (km/kg-H ₂ /両)	4.84	7.20
②	車両エネルギー効率 (%)	60.8	65.0
③	燃料電池 エネルギー変換効率 (%)	50.8	51.4
④	回生効率 (%)	41.7	40.3

おわりに

今回、開発した燃料電池・バッテリーハイブリッド試験電車を用いて、構内試験線を利用した連続走行試験が行える段階となりました。しかし、現状の構成では使用装置の大部分が試作で車内に搭載されていることや、燃料電池出力が実用級とする300kW級に比べて小さいなど、まだまだ普及に向けて多くの課題が残されています。

今後も引き続き走行試験による評価を行っていくとともに、機器の小型・大出力化など現状の課題点を精査し、一つ一つ課題をクリアして将来的に燃料電池鉄道車両の実用化につなげていきたいと考えています。

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