

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 燃料電池ハイブリッド電車の駆動システムを小型化・高性能化する

地球環境問題への対応として、クリーンでエネルギー効率の高い燃料電池ハイブリッド電車の開発に取り組んでいます。これまで検討してきた気動車の置き換えのみならず、一部の電車の置き換えも視野に入れ、2019年に駆動システムの小型化・高性能化を行いました。本開発の成果として、走行に必要となる主な装置はすべて床下に収め、電車並みの加速を実現するとともに、客室空間を確保した車両を実現しました。この燃料電池ハイブリッド試験電車について紹介します。

## はじめに

近年、CO<sub>2</sub>排出量やエネルギー消費量の削減のため、自動車分野では、エンジン駆動からモーター駆動を用いたハイブリッド自動車などへの転換が急速に進んでいます。一方、鉄道分野では都市部を中心に古くからモーター駆動の電車が用いられていますが、地方の非電化線区では、電化方式に比べ地上設備が簡素で安価なディーゼルエンジン駆動の気動車が主力として用いられています。しかし、昨今の環境対策などのため、従来型の気動車に変わり、モーター駆動のディーゼルハイブリッド車（☞参照）、バッテリー電車（☞参照）などへの置き換えが進められています。これらの車両は環境面や航続距離の面でそれぞれ一長一短がありますが、鉄道総研では双方の特長を兼ね備えた燃料電池ハイブリッド電車の開発を2001年より継続して行っています。ここでは、気動車の置き換えのみならず、一部の電車の置き換えも視野に入れた燃料電池ハイブリッド電車を実現する駆動システムの小型化・高性能化について紹介します。

## 燃料電池

燃料電池にはいくつか種類がありますが、鉄道車両で用いられているものは固体高分子形燃料電池（PEFC：Polymer Electrolyte Fuel Cell）とよばれるもので、燃料の水素と空気中の酸素を反応させることで発電します。他の種類の燃料電池と比較して起動時間が短く、ディーゼルエンジンと比較して効率が高く、また発電時の排出物は水のみであり、クリーンという特長があります。燃料電池は名前に「電池」が付いていますが、通常のバッテリーとは異なり内部にエネルギーは蓄えて

### ☞ ディーゼルハイブリッド車

ディーゼルエンジンで発電機を回し、発電するとともにバッテリーを搭載し、発電した電力とバッテリーの電力を組み合わせて走行する車両。ブレーキ時に車両の運動エネルギーを電気として回収してバッテリーを充電することで、効率向上を図れます。

### ☞ バッテリー電車

バッテリーを搭載し、バッテリーの電力を使用して走行する車両。バッテリーの充電が必要であり、一回の充電による走行距離も限られます。



柏木 隆行  
Takayuki Kashiwagi  
車両制御技術研究部  
水素・エネルギー研究室長



小川 賢一  
Kenichi Ogawa  
車両制御技術研究部  
水素・エネルギー研究室  
主任研究員



米山 崇  
Takashi Yoneyama  
車両制御技術研究部  
水素・エネルギー研究室  
主任研究員



須藤 貴幸  
Takayuki Sudo  
前 車両制御技術研究部  
水素・エネルギー研究室  
主任研究員



山本 貴光  
Takamitsu Yamamoto  
車両制御技術研究部長

おらず、また一般的には充電することはできません。

### 燃料電池ハイブリッド電車

燃料電池ハイブリッド電車の構成例を図1に示します。車両の電源として、燃料電池とバッテリーを用いており、この両者を組み合わせる(=ハイブリッド化)ことで、電力を効率良く利用しながら車両を動かすことができます。車両の加速時は燃料電池とバッテリーの両方から電力をモーターへ供給し、惰行時には燃料電池でバッテリーを充電、減速時にはモーターからの回生電力と燃料電池からの供給電力でバッテリーを充電します。バッテリーには、小型かつ大電力の充放電が可能なりチウムイオン形が用いられています。

### 小型化・高性能化の検討

これまで鉄道総研で開発してきた燃料電池ハイブリッド試験電車では、燃料電池を鉄道車両駆動に適用させるための研究開発を行ってきており、10年以上にわたる走行試験を行ってきました。一方で、燃料電池やバッテリーの性能が限られており、また走行に必要な機器の外形寸法も大きく、多くの機器を客室内に配置していました。このため、客室には乗車スペースが十分になく、加速性能は旧型(旧国鉄時代)の気動車並み(1.5km/h/s)にとどまっていました。そこで、十分な客室空間をもち、加速性能を電車並み(2.5km/h/s以上)に高めた車両の実現を次の目標として開発を開始しました。このような車両を実現することで、例えば非電化線区の気動車を置き換えて環境面などでの改善を図るだけでなく、運行頻度の低い電化区間の電車を置き換え、運行時間などの旅客サービスを低下させることなく地上電気設備

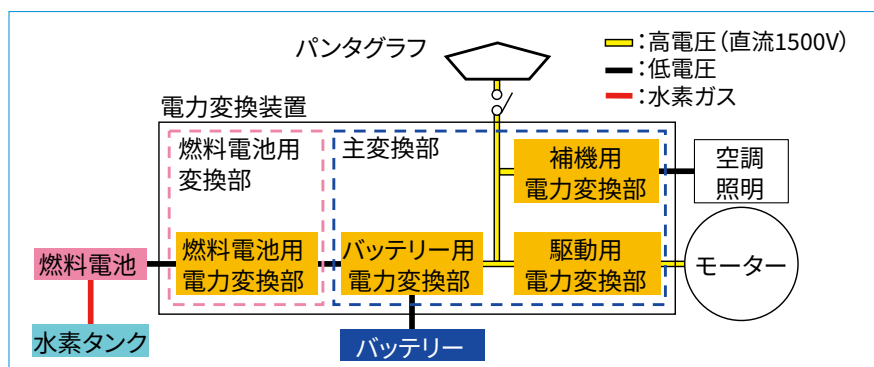


図1 燃料電池ハイブリッド電車の構成例

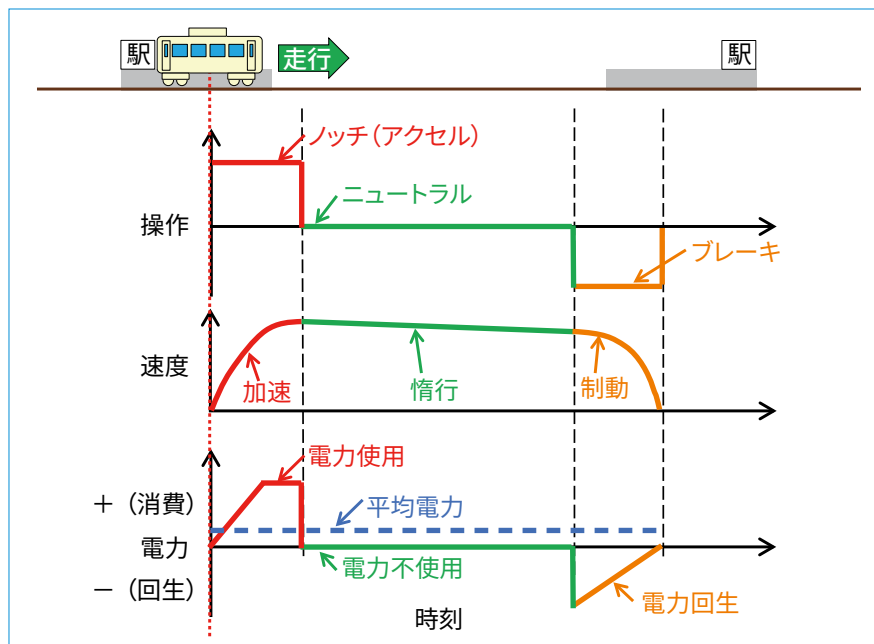


図2 在来線電車の電力使用イメージ

の削減を可能とし、維持・管理コストの削減を図ることも可能となります。以下、この目標達成に向けた検討内容について解説します。

### 燃料電池とバッテリーの出力算定<sup>2)</sup>

燃料電池は体積当たりの出力が小さく、また非常に高価であるため、必要となる出力すべてを燃料電池に負担させることは合理的ではありません。鉄道車両の電力使用パターンの特徴として、在来線の走行では、加速時に大きな電力が必要となるものの、走行時間全体で平均化した電力は、加速時に必要な最大電力よりも低くなります

(図2)。これは鉄道では走行にともなうロスがきわめて小さく、一度加速してしまえば、その後は電力をほぼ必要としないこと、さらに制動時の回生電力により加速に使用した電力の一部を回収できることにあります。そのため、燃料電池の機器出力は走行によるエネルギー損失を補填するのに必要な平均電力相当で設計し、残りの電力をバッテリーに負担させることで、燃料電池の大きさやコストを一段と抑えることができます。この設計方針の下、今回は2両編成で短距離平坦路線を電車並みの加速性能(2.5km/h/s)で走行させた場合を想定し、走行シミュレーションにより機器出力を検討しました。

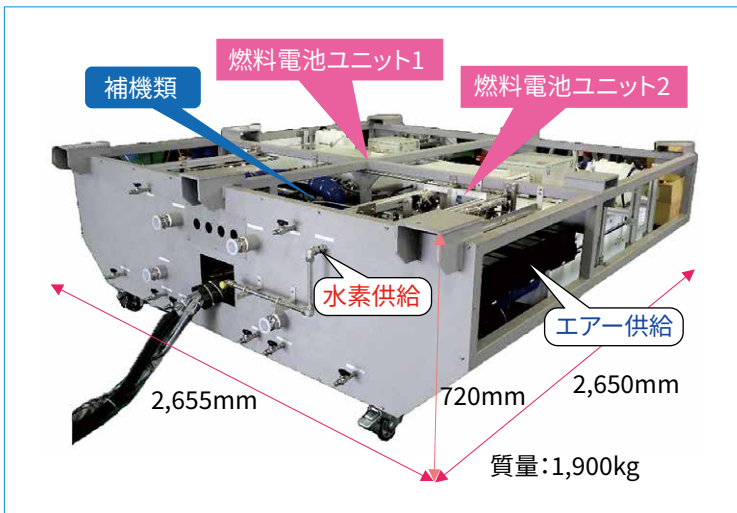


図3 燃料電池

表1 燃料電池の比較 (従来を1とする)

項目	従来燃料電池	小型化・高性能化燃料電池
出力	1	1.5
出力当たり体積	1	0.77

表2 電力変換装置の比較 (従来を1とする)

項目	従来電力変換装置	小型化電力変換装置
体積	1	0.55
質量	1	0.6

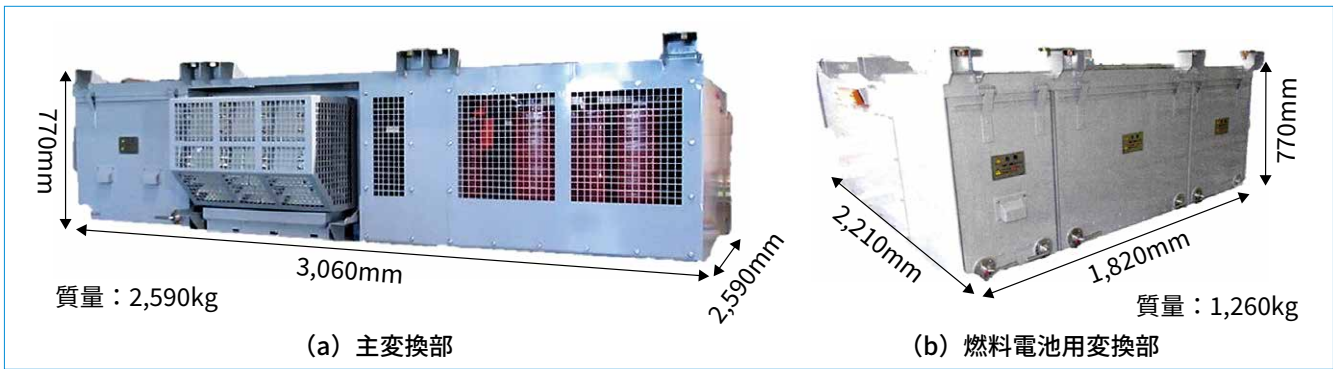


図4 電力変換装置

その結果、燃料電池出力150kW、バッテリー出力540kWと算定し、各機器を設計しました。

### 燃料電池の小型化・高性能化<sup>2)</sup>

燃料電池は、その出力を従来の1.5倍に高めつつ、車両の床下に搭載できるように小型化する必要がありました。燃料電池は発電を行う燃料電池スタックのほかに、水素と反応する空気の供給装置、発電時の発熱を放散する冷却装置など多くの装置から構成されています。このため、燃料電池の小型化にあたっては燃料電池スタックの発電性能を高めるだけでなく、冷却系のシンプル化による冷却装置の小型化なども行いました。周辺の機器もあわせて小型化を行うことで、機器出力を50%向上しながらも出力当たり

体積の約23%削減を実現し、出力増にとまなう大型化を抑えました(図3、表1)。これらにより、燃料電池を薄型化して車両の床下への搭載を実現しました。

### 電力変換装置の小型化<sup>2)</sup>

電力変換装置の構成を図1に示します。この回路では、駆動用および補機用の電力変換部の入力電圧を国内の直流電化区間で多く使用されている1,500Vに合わせています。これにより、直流電化区間では燃料電池を用いず架線集電による通常の電車として走行ができるため、水素消費量を節減でき、非電化区間における航続距離の延伸につながります。また燃料電池は2台、バッテリーは3台を1組として各電力変換部に接続し、燃料電池やバッ

テリーの一部が異常により停止した場合でも走行継続が可能な回路構成とし、車両の信頼性を向上させています。この回路構成において、主変換部は駆動用・補機用・バッテリー用の複数の電力変換部を統合し共通する機器を削減することで小型化を図りました。また、バッテリーと燃料電池用電力変換部を並列接続とすることで燃料電池用電力変換部の電圧を低圧化し、低電圧用の小型遮断器(回路スイッチ)の採用を可能としました。さらに燃料電池用電力変換部ではSiC(炭化ケイ素:パワーデバイス用半導体材料)製のパワーデバイスを用いることで変換器の損失を減少させ、冷却器の小型化が可能となり、遮断器の小型化と合わせ、全体の小型化を図りました。これらの結果、従来の電力変換装置と比較して、体積



図5 燃料電池ハイブリッド試験電車

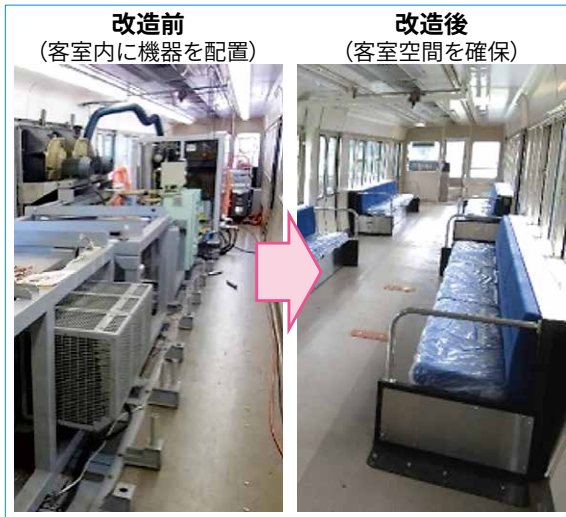


図6 改造前後の車内状況

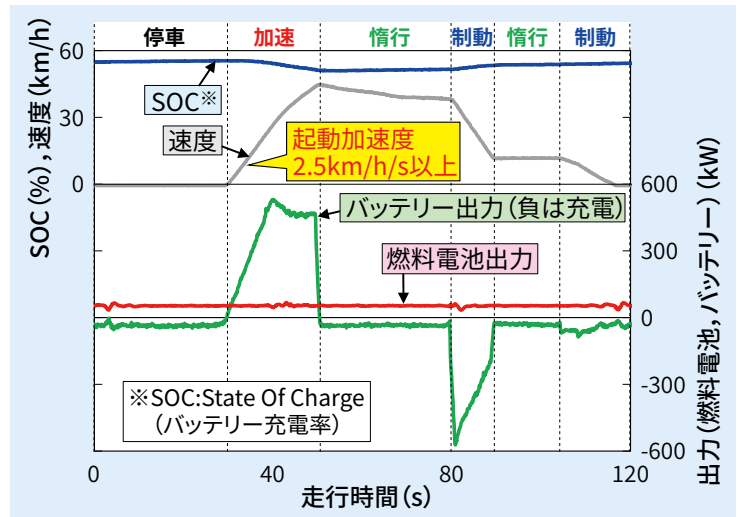


図7 走行試験結果

は約45%、質量は約40%の削減を実現しました(図4, 表2)。

### 構成した車両と走行試験結果<sup>2)</sup>

従来の車両を改造し、駆動システムの小型化・高性能化した燃料電池ハイブリッド試験電車の外観を図5に、改造前後の車内の様子を図6に示します。この車両を用いて、全長約650mの鉄道総研所内試験線で、走行性能確認試験を行いました。加速性能は起動時で2.9km/h/s(勾配補正前2.8km/h/s)となり、電車並みの加速度を実現していることを確認しました(図7)。また、この走行前後でバッテリーの充電率(SOC: State Of Charge)がほぼ同じとなっていることから、設計どおり燃料電池から走行により失われたエネルギーを補填してお

り、連続した走行が可能であることがわかります。

### おわりに

クリーンでエネルギー効率の高い燃料電池ハイブリッド電車は、これからの鉄道車両のあるべき姿の一つを具現化したものといえます。一方で燃料電池ハイブリッド電車の実用化には、車両の開発のみならず、鉄道において高圧水素ガスを使用するための高圧ガス保安法など関係法令の整備、また大量の水素を使用することから水素サプライチェーンの整備、さらには現状高価である燃料電池のコストダウンなどの課題を解決していく必要があります。今後、水素社会の進展にともない、これらの課題が解決され、燃料電池ハイブリッド電車が広く使用されることを

期待しています。その際には、ここで紹介しました、小型化・高性能化した駆動システムを有する燃料電池ハイブリッド電車がその一助となれば幸いです。

本開発の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。**RRR**

### 文献

- 1) 山本貴光, 長谷川均, 古谷勇真, 小川賢一: 燃料電池・バッテリーハイブリッド試験電車の概要, RRR, Vol.66, No.3, pp.2-5, 2009
- 2) 小川賢一, 米山崇, 須藤貴幸, 柏木隆行, 山本貴光: 燃料電池ハイブリッド試験電車の高性能化, 鉄道総研報告, Vol.34, No.5, pp.5-10, 2020