

# 燃料電池ハイブリッド試験電車の高性能化

小川 賢一\* 米山 崇\* 須藤 貴幸\*  
柏木 隆行\* 山本 貴光\*\*

## Performance Improvement of Fuel Cell Hybrid Powered Test Railway Vehicle

Kenichi OGAWA Takashi YONEYAMA Takayuki SUDO  
Takayuki KASHIWAGI Takamitsu YAMAMOTO

There is growing demand for railway vehicles that has high efficiency and does not emit CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>. To meet such a demand, we have been developing fuel cell (FC) hybrid powered railway vehicles. In the past development stage, we had to install the FC and the power converters on the passenger space because of their large sizes. Also, the vehicle acceleration had been limited to local diesel motive units. We nowadays succeeded in securing the passenger space by equipping the downsized FC and the power converters under vehicle floor. In addition to that, we also improved the tractive performance to standard electric motive units by increasing the power capacities of the FC and the battery.

キーワード：ハイブリッド電車、燃料電池、水素エネルギー、小型化、高性能化

### 1. はじめに

地球環境問題への取り組みから、エネルギー効率が高く、CO<sub>2</sub>やNO<sub>x</sub>を排出しない鉄道車両への要望が高まっている。また、持続可能なエネルギー社会に寄与するため、鉄道車両のエネルギー源の多様化が求められている。このような要求に応えるため、鉄道総研では燃料電池(FC: Fuel Cell)ハイブリッド電車の研究開発を行っている。FCは水素と酸素の化学反応により発電するもので、エネルギー変換効率が高く、排出物が水だけというクリーンな電源である。また、燃料とする水素は様々なエネルギー源から生成でき、鉄道車両のエネルギー源の多様化に寄与する。本研究開発では、このような特長を持つFCと、回生エネルギーの有効利用を目的としたバッテリー(Bat: Battery)を組み合わせ、ハイブリッド電源構成により駆動するFCハイブリッド電車の実用化を目指す。これにより、CO<sub>2</sub>排出をゼロに近づけると共に、持続可能なエネルギー社会への貢献を目的としている。

従前の開発<sup>1) 2)</sup>では、FC、Bat、電力変換装置といった主回路系装置を試験電車の車内に搭載して駆動が行えることの確認を目的とし、その加速性能は非電化区間を走行する気動車相当(起動加速度1.5km/h/s程度)としていた。電化区間の架線レス化など、FCハイブリッド電車のさらなる適用拡大を図るためには、FCおよびBatを高出力化させて電車相当の加速性能(起動加速度2.5km/h/s程度)に向上させるとともに、客室空間を確保するため主回

路系装置を小型化し車両床下に搭載する必要があった。

そこで今回、上記の要求を満たす車両を実現するため、FCおよびBatの出力向上と主回路系装置の小型化を行った。FCは、出力密度の高いFCスタックを採用し、従前の100kWから150kWに高出力化するとともに、冷却系の小型化などにより出力当りの体積を従前比20%削減した。また、Batを360kWから540kWに高出力化し、FCとBatのハイブリッド電源出力として従前の460kWから690kWに向上させた。電力変換装置は、Bat用チョッパ、駆動用・補機用インバータといった複数の電力変換部を統合し、またFC用のDC/DCコンバータにSiCパワーデバイスを用いて、総体積を従前比45%削減した。以上により、電車相当の加速性能を有し、客室空間を確保した実用形に近い車両構成を実現した。所内試験線走行により上記の加速性能が得られることやハイブリッド制御の基本動作の確認を行い、良好な結果を得た。

本報告では、今回開発したFCハイブリッド試験電車の高性能化と走行試験結果について述べる。第2章で、FCハイブリッド電車のコストや質量に大きな影響を与えるFCとBatの搭載容量の決定手順を示す。第3章で、主回路系装置の小型化の取り組みについて述べる。第4章で、FCハイブリッド試験電車の高性能化を述べ、第5章で所内試験線における走行試験結果について述べる。

### 2. FC・Batの容量決定

#### 2.1 FC・Batの容量決定法

鉄道車両は、走行路線、運行ダイヤ、基準となる運転

\* 車両制御技術研究部 水素・エネルギー研究室

\*\* 車両制御技術研究部

パターンが予め規定される。このため、車両や路線の条件を指定し、最も厳しい運転条件で走行シミュレーションを行い消費エネルギーを求め、この計算結果を基に車両に搭載するFCとBatの容量配分を決定することが可能である。ここで、FCとBatの容量配分を決定するにあたって、現状ではBat（ここでは、主に産業用のリチウムイオンタイプを想定する）はFCの4倍程度の体積出力密度（kW/L）があるため、FC容量を低減し、Bat容量を大きくする配分が、ハイブリッド構成の小型化に有利である。このような容量配分の下で、Batは変動の大きいモータ電力の供給や吸収を行い、FCを一定の出力で運転して、Batが過放電・過充電とならないようにエネルギーを管理する方法が合理的であると考えられる<sup>3)</sup>。以上の設計の考え方に則り、下記に示す手順を用いてFCとBatの出力容量を決定する。

【FC・Batの容量決定手順】

- ① 車両条件・路線条件を定める。
- ② FCハイブリッド電車に用いるBatのエネルギー管理法を決定する。
- ③ FCハイブリッド電車として走行シミュレーションを行い、全走行区間でBat充電率（SOC：State of Charge）をバランスできるパワーをFC容量として決定する。
- ④ Batの最大放電パワー、最大充電パワー、最大放電エネルギー、寿命の観点から必要となる容量を検討し、その中の最大容量でBat容量を決定する。なお、寿命に最も影響を持つパラメータは放電深度（DOD：Depth of Discharge）であることが文献4で報告されており、DODから電池の寿命を予測する近似式として下式が提案されている。

$$\text{寿命サイクル数} = \frac{X}{\text{DOD}^Y}$$

XやYの値は、用いるBatによって固有の値である。本検討では文献3に示される供試Batが通常の温度条件下で、X=3,300、Y=1.8であることから、この値を引用して検討を行う。

2.2 走行シミュレーションを用いたFC・Bat容量検討

2.2.1 前提条件

走行シミュレーションを行う前提条件として、車両条件を表1に示し、車両性能特性を図1に示す。また、車両の補機電力は、通年の平均的な電力を想定し2両で30kWとした。路線条件については、表2に示すような比較的勾配の緩い条件を設定した。

次に、Batのエネルギー管理法を図2に示す。この管理法では、充電と放電の中間の充電率として50%を基準とし、Bat充電率が50%以上ではFCの効率の良い低出力

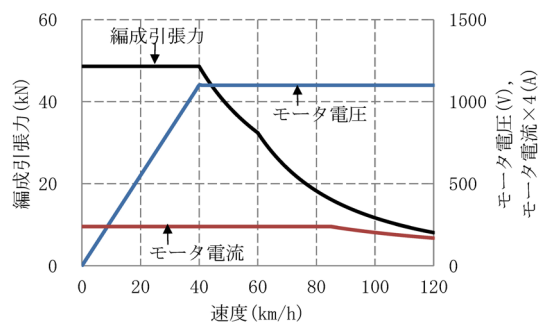
点（ $P_{mid}$ ）で動作をさせ、Bat充電率が50%未満では最高出力点（ $P_{max}$ ）でFC出力を動作させてBatのエネルギー管理を行う。ただし、力行時はBatのピーク放電電力を抑えるためFCを $P_{max}$ で出力させ、回生時はBatのピーク充電電力を抑えるため $P_{mid}$ で出力させる。また、FC出力切替時のチャタリング防止のため、閾値となるSOC（50%および60%の各々）に2%のヒステリシス幅を設けた。

表1 車両条件

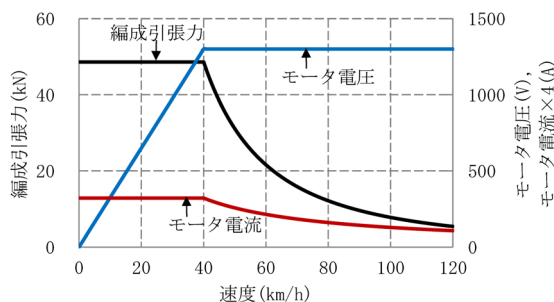
項目	値
車両数 (両)	2
編成質量 (t)	65
動力制御車/付随制御車 (両)	1/1
加速度 (km/h/s)	2.5
減速度 (最大回生) (km/h/s)	2.5
ギア比	7.07
車輪径 (mm)	820

表2 路線条件

項目	値
延長 (km)	7.03
最急勾配 (‰)	13
駅数 (A~J 駅)	10



(a) 力行特性



(b) 回生特性

図1 車両性能特性

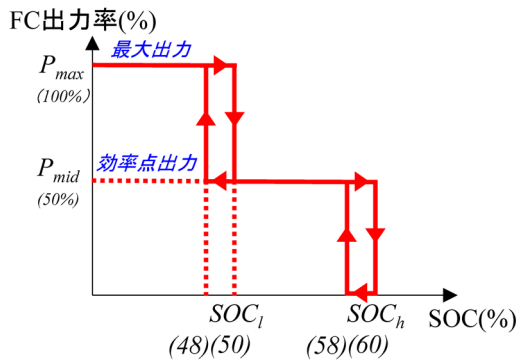


図2 Batのエネルギー管理法

2.2.2 シミュレーション

走行シミュレーションには、鉄道総研が開発した鉄道車両用のエネルギー消費計算シミュレータであるHYBRID-SPEEDYを用いた。シミュレータの概要を図3に示す。本シミュレータは、前項で述べた車両条件や路線条件のほか、図2に示したようなエネルギー管理法を自由に設定可能である。既存のシミュレータは、FCハイブリッド電車には対応していなかったため、FCハイブリッド電車と同様の駆動構成を持つシリーズ式ハイブリッド気動車モデルをアレンジし<sup>5)</sup>、HYBRID-SPEEDYを用いたFCハイブリッド電車の消費エネルギー計算を可能とした(図4)。

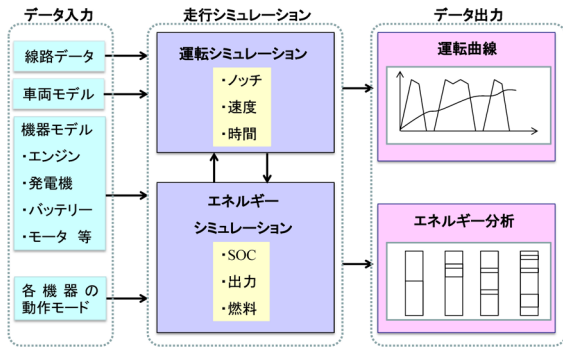


図3 Hybrid-Speedyの計算フロー

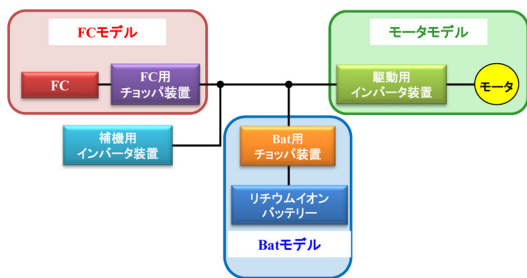


図4 FCハイブリッド電車モデル

2.2.3 FC・Batの容量決定

前節の条件の下で、走行シミュレーションを行った例を図5に示す。図5より、150kWのFC容量があれば全走行区間でSOCを50%付近に維持できることが分かった。また、Bat容量は、出力、エネルギー、寿命の観点から検討した結果、表3のようになった。出力による検討では、最大Cレート(電池の定格容量を1時間で放電する際の一定電流の放電を1C放電という)を12Cとした。また、寿命の容量検討では、車両検修周期を目安に8年(年間360日の車両運用)とし、1日当り36片道の走行で、充放電サイクル数を駅間数に合わせた9サイクル/片道とし、これを基に933,120サイクル(DOD=4.12%相当)とした。

表3 Bat容量の検討

項目	値	必要容量
①最大放電パワー	474.5 (kW)	39.5 (kWh)
②最大充電パワー	-492.9 (kW)	41.1 (kWh)
③最大放電エネルギー	3.92 (kWh)	3.92 (kWh)
④寿命	933,120サイクル (8年相当)	40.9 (kWh)

表3の結果から、最大充電パワーの必要容量が最も大きく、41.1kWhのBat容量が必要なことが分かった。この容量に10%程度の余裕を見込み、Bat容量の仕様を45kWh(12Cで540kWの充放電が可能)と決定した。以上の検討から、FC容量を150kW、Bat容量を540kWhと決定した。なお、FC・Batの容量配分は、図2に示したエネルギー管理法に用いるFC出力率や閾値SOCなどによっても変わる可能性がある。

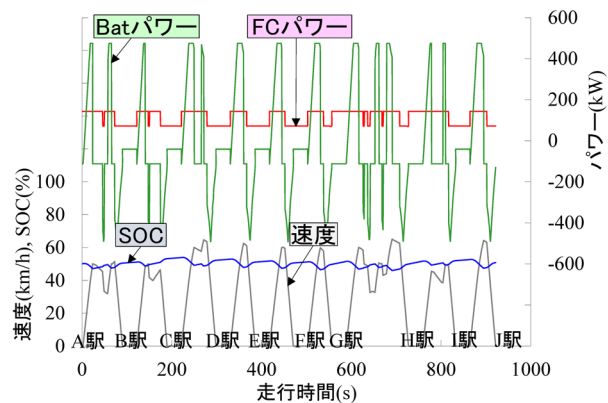


図5 走行シミュレーションによるFC・Bat容量検討

3. 主回路系装置の小型化

3.1 主回路システム

FCハイブリッド試験電車の主回路システムを図6に

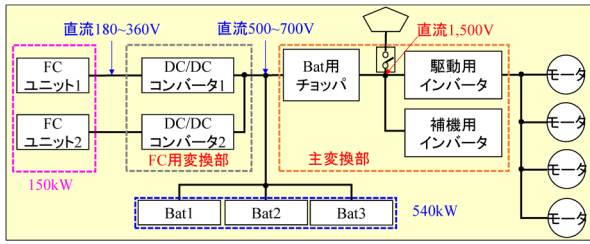


図6 主回路システム

示す。駆動用および補機用のインバータ入力電圧は、電化区間では、FC を用いず架線から供給される通常の電車としての走行を可能とし、水素消費量節減により非電化区間での航続距離の延長を可能とするため、直流1,500V 架線用のインバータと誘導電動機が利用可能な直流1,500V とした。FC 電圧は直流300V 程度と低圧であるため、DC/DC コンバータを用いて直流600V 程度に昇圧を行う。この出力をBat と接続し、さらにBat 用チョッパを用いて1,500V に昇圧する構成とした。

本主回路システムの特徴として、FC ユニットごとの独立した発電運転が可能であり、1 ユニット異常時も残りのユニットは影響を受けずに発電動作を継続できる。Bat は3バンク並列構成で、2バンクまでの部分故障を許容し、車両性能は制限されるが走行継続が可能である。

### 3.2 FCの小型化・高出力化

FC は、発電を行うFC スタックと空気供給や冷却を行う補機から構成される。今回、この各々について、表4 に示す小型化を行った。この小型化の取り組みによって、表5 に示すように出力当りの体積を20% 削減させ、高さ方向の寸法を720mm に抑えて車両床下搭載を可能とし、その出力を100kW から150kW へと1.5 倍の高出力化を図った。FC の外観を図7 に、主な仕様を表6 に示す。

表4 FCの小型化の取り組み

構成	従前	今回
FC スタック	・スタック数：8 ・低電流密度 (0.5A/cm <sup>2</sup> )	・スタック数：6 ・高電流密度 (1.0A/cm <sup>2</sup> )
補機	空気供給	大型集中エアープロア (1台)
	冷却	1次系・2次系
		小型分散エアープロア (6台)
		1次系のみ

表5 FCの小型化の評価

構成	(L/kW)	
	従前	今回
①FC スタック, 制御器	37.2	32.4
②ラジエータ, 冷却タンク	20.9	12.3
計	58.1	44.7

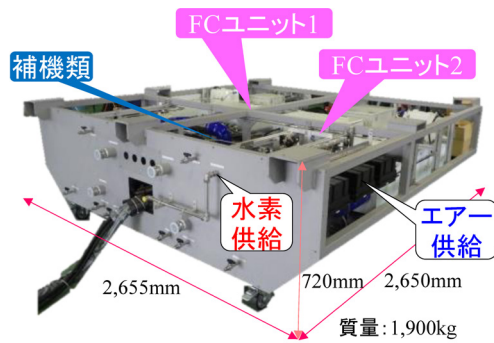


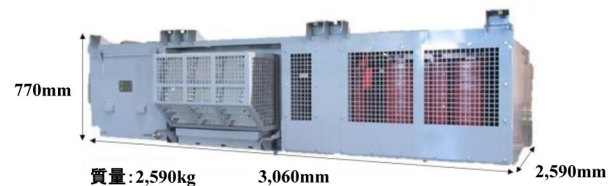
図7 FCの外観

表6 FCの主な仕様

項目	仕様
タイプ	固体高分子形
最大発電電力	180kW(90 kW×2 ユニット)
スタック構成	30kW×3 直列×2 ユニット
電圧範囲	180～360 V 程度
電流範囲	0～500 A 程度/ユニット
運転温度上限	65℃
起動時間	30 秒程度 (オフ～最大出力)

### 3.3 電力変換装置の小型化

電力変換装置は、図8 に示すように主変換部とFC 用変換部から構成される。主変換部は、Bat 用チョッパ・駆動用インバータ・補機用インバータを統合し、部品共有化により小型化させた。FC 用変換部はSiC の適用により小型化し、さらに低圧形回路 (直流750V 未満) として小型遮断器を採用し小型化した。以上の方策により、表7 に示すように体積比で45% の小型化を図った。



(a) 主変換部



(b) FC用変換部

図8 電力変換装置の外観

表7 電力変換装置の小型化の評価

構成	従前 (m <sup>3</sup> )	今回 (m <sup>3</sup> )	
①駆動用	2.62	10.14	4.67
②補機用	1.67		
③バッテリー用	5.85		
④FC用	3.10	2.49	
計	13.24	7.16	

### 3.4 Batの小型化・高出力化

2章で述べたように、Batは出力条件が最も厳しいため、小型化にあたっては体積出力密度が最も有利なものを選定する必要があった。そこで、高レートでの充放電が可能なリチウムイオン蓄電池を対象とし、各メーカーの電池仕様から体積出力密度が最も優位なBatを選定し、従前の360kWから540kWに高出力化した車載バッテリーユニットを開発した。この外形を図9に、仕様を表8に示す。

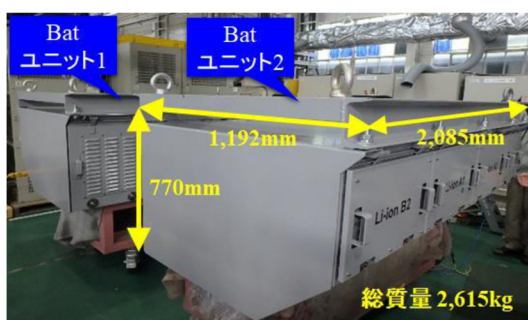


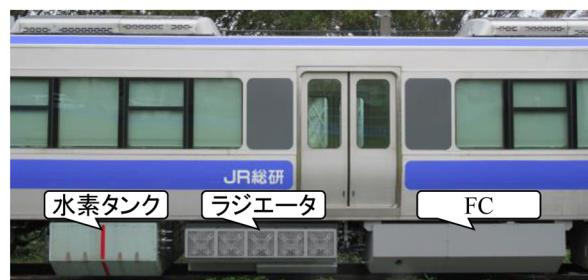
図9 車載バッテリーユニットの外観

表8 車載バッテリーユニットの主な仕様

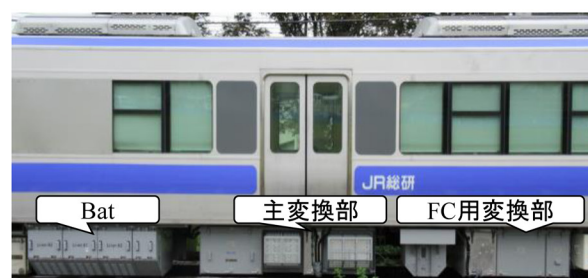
項目	仕様
タイプ	リチウムイオン
最大出力	540kW (放電) / -540kW (充電)
公称容量	45.3 kWh
電気構成	8セル/モジュール×21モジュール ×3バンク
定格容量	75 Ah (25Ah×3バンク)
公称電圧	604.8 V
公称電流	900A (放電) / -900A (充電)
冷却方式	冷却ファンによる強制風冷



(a) 外観



(b) 付随制御車の床下搭載状況



(c) 動力制御車の床下搭載状況



(d) 客室内の状況

図10 FCハイブリッド試験電車の構成

## 4. FCハイブリッド試験電車の高性能化

### 4.1 FCハイブリッド試験電車の構成

前述の主回路系装置を試験電車床下に搭載した。配管によって接続されるFC、ラジエータ、水素タンクは付随制御車に搭載し、Batと電力変換装置は動力制御車に搭載した(図10)。なお、水素タンクは従前の開発品を

表9 従前との性能比較

項目	従前	今回
編成出力 (FC容量)	460 kW (100 kW)	690 kW (150 kW)
駆動軸数	1台車2軸	2台車4軸
起動加速度	1.5 km/h/s	2.5 km/h/s

流用したため床下搭載としたが、実用時には航続距離延伸のため、屋根上スペースを利用して、水素貯蔵量を確保する必要があると考えられる。この構成によって、表9のように編成出力を従前の1.5倍に向上し、2台車4軸駆動により電車相当の加速性能を得る高性能化を図った。

#### 4.2 パワーフロー制御

走行状態によるパワーフロー制御を図11に示す。加速時は、FCとBatからモータに電力を供給する。惰行時と停車時は、FC出力パワーでBatを充電する。制動時は、FCパワーとモータからの回生電力でBatの充電を行う。

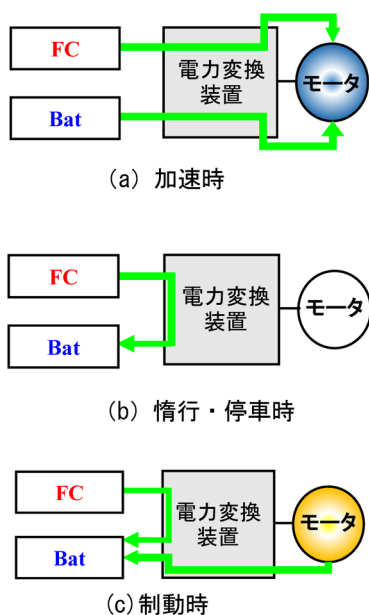


図11 走行状態によるパワーフロー制御

#### 5. 所内試験線走行による基本走行性能の実証

構成したFCハイブリッド試験電車を用いて、所内試験線走行(1片道600m, 最高速度45km/h)を行い、FC・Batのハイブリッド電源構成により仕様の加速性能(起動加速度2.5km/h/s)が得られることの実証を行った。所内試験線1片道走行時の試験結果を図12に示す。

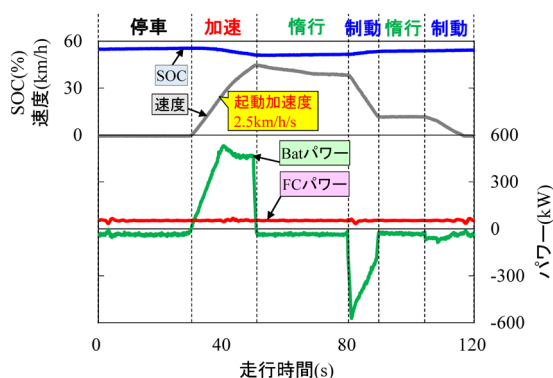


図12 所内試験線走行試験結果(1片道)

この走行試験結果から、FCとBatのハイブリッド電源構成により、設計どおりの加速性能が得られることを確認した。今後、パワーフロー制御の高度化や車両試験台を用いた模擬路線走行による燃費や効率などのエネルギー評価のほか、FC高負荷連続出力時の動作確認などを行っていく計画である。

#### 6. まとめ

本論文では、電化区間の架線レス化など、燃料電池ハイブリッド電車のさらなる適用拡大を図ることを目的として実用形に近い燃料電池ハイブリッド試験電車を開発し、以下について報告した。

- ① FCハイブリッド電車のFC・Bat容量の決定手順を明示した。
- ② FCや電力変換装置などを在来線車両の床下に搭載するための小型化の取り組みとその評価を述べた。
- ③ 高性能化した2両編成のFCハイブリッド電車を用いて所内試験線にて走行試験を行い、FCとBatのハイブリッド電源出力により電車相当の加速性能(起動加速度2.5km/h/s)が得られることを確認した。

今後の予定として、

- ① パワーフロー制御の高度化
- ② 車両試験台を用いた模擬路線走行によるハイブリッド制御の検証やFC高負荷連続出力時の動作確認などを行っていく計画である。

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

#### 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車両のエネルギー効率評価, 鉄道総研報告, Vol.23, No.11, pp.17-22, 2009
- 2) 米山崇, 山本貴光, 小川賢一: 構内走行試験による燃料電池の耐久性評価, 鉄道総研報告, Vol.27, No.5, pp.47-52, 2013
- 3) 小川賢一, 近藤圭一郎: 燃料電池-リチウムイオン二次電池ハイブリッド鉄道車両の燃料電池・蓄電池容量設計法, 電気学会D部門誌, Vol.139, No.5, pp.472-479, 2019
- 4) 米山崇, 田口義晃, 小笠正道, 山本貴光: リチウムイオン二次電池の放電深度による寿命予測法, 平成17年電気学会産業応用部門大会論文集, pp.193-196, 2005
- 5) 小川賢一, 米山崇, 小川知行, 長谷川均, 山本貴光: 燃料電池電車のエネルギーシミュレーション手法, 鉄道総研報告, Vol.31, No.6, pp.17-22, 2017

■ 2020年5月号（特集：車両技術）の訂正

特集論文の図中に誤りがありました。

以下のように訂正させて頂き、お詫び申し上げます。

【訂正箇所】

P.8 図8中の一部表記

【誤】質量：1,350kg



(a) 主変換部



(b) FC用変換部

図8 電力変換装置の外観

【正】質量：1,260kg



(a) 主変換部



(b) FC用変換部

図8 電力変換装置の外観