

公益財団法人鉄道総合技術研究所R291系燃料電池試験電車で電機品

Electric system of type R291 with trolley, battery and fuel cell hybrid for Railway Technical Research Institute

The Railway Technical Research Institute (RTRI) type R291 was developed in 2006 as a test vehicle equipped with a fuel cell. Type R291 has been used for various tests at the RTRI test track.

Since 2019, each equipment installed in the vehicle has been renewed to achieve the following items with a view to practical use. First, the acceleration and deceleration performance has been improved to the same level as general commuter trains. Second, output power of fuel cell is increased from 150 kW to 180 kW. Finally, all the equipment are mounted under the floor by reducing the size and weight of each equipment.

We have developed the main electrical equipment for type R291 such as power converter (including traction inverter, auxiliary power supply, and battery chopper), fuel cell chopper, filter reactor, and high-speed circuit breaker.

In this paper, we describe these developed electrical equipment and their operational mode.

藤本 和樹
Fujimoto Kazuki

天野 哲生
Amano Tetsuo

小籠 亮太郎
Kokago Ryotaro

森 雄生
Mori Takao

1. はじめに

公益財団法人鉄道総合技術研究所(以下「鉄道総研」と呼ぶ) R291系試験電車は、2006年に燃料電池搭載の試験車両として開発され、鉄道総研構内において各種試験に供されてきた。このたび、2019年より車両に搭載されている各機器を刷新することで、

- ・通勤形電車相当の加減速性能の実現
- ・燃料電池の出力増(150 kW→180 kW)
- ・全機器を小型軽量化し床下へぎ装

といった項目を実現し、実用化を視野に入れたシステムとなった。

当社はこの刷新に際し、架線・バッテリーハイブリッドシステムを統括する電力変換装置、燃料電池の出力電圧を所望の電圧に制御する燃料電池チョッパ装置、高速度遮断器、フィルタリアクトルを新たに開発・納入した。本稿ではそれらの製品概要について述べる。



(写真提供：公益財団法人鉄道総合技術研究所)

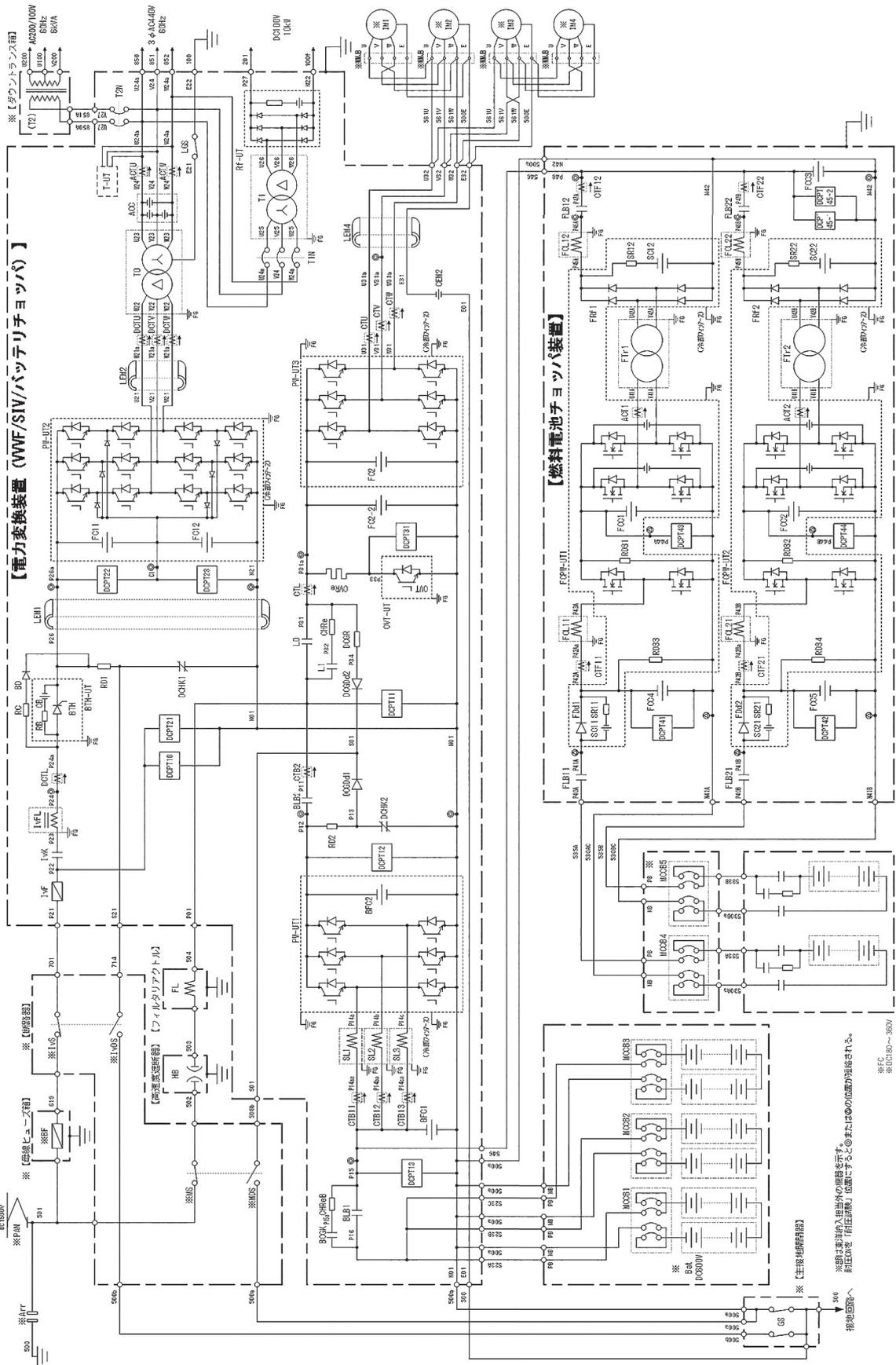
■ 図1 R291系試験電車外観
Fig.1 Type R291

2. R291系試験電車の概要

図1にR291系の外観を、表1に車両諸元を示す。

■ 表1 車両諸元^{[1][2]}
Table1 Vehicle specification

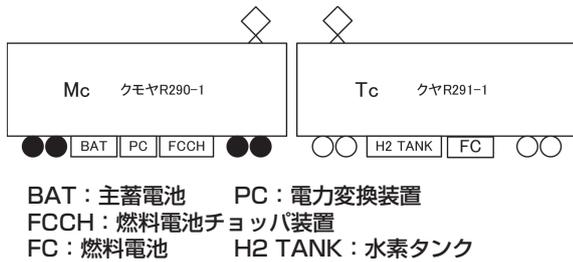
項目	仕様	
	車種	自重
車両編成	Mc-Tc	
編成質量	Tc(クヤR291-1)	31.8t
	Mc(クモヤR290-1)	37.2t
設計最高速度	120km/h	
起動加速度(設計値)	3.0km/h/sec(0.83m/sec ²) (平坦線)	
最大減速度	3.1km/h/sec(0.86 m/sec ²)	
電気方式	3電源ハイブリッド方式 ・ DC1500V 架空電車線 ・ DC600V リチウムイオン電池 ・ DC360V 燃料電池	
主電動機	95kW×4 三相かご形誘導電動機	
電力変換装置	主制御部 2レベルIGBT-VVVFインバータ(4M1C制御) 補助電源部 3レベルIGBT-静止形インバータ 80kVA 蓄電池チョッパ部 2レベル三相双方向チョッパ 最大540kW 連続167kW	
燃料電池 チョッパ装置	昇圧チョッパ・高周波絶縁DC-DCコンバータ 90kW×2群	



■ 図2 主回路接続図
Fig.2 Main power circuit diagram

図2にR291系の主回路接続図を、図3に各装置の車両内搭載位置を示す。Mc車にはVVVF・SIV・バッテリーチョッパを搭載した電力変換装置とリチウムイオン電池、燃料電池の出力電圧をリチウムイオン電池の電圧まで昇圧させる燃料電池チョッパ装置が搭載され、Tc車には燃料電池と水素タンクが搭載されている。

それぞれの変換器はRS485 HDLC伝送にて接続され、バッテリーチョッパを親機、その他の変換器を子機としている。各機器個別の状態情報は伝送にて各変換器に通信され、その情報を使用して制御し、装置内配線を低減している。



■ 図3 R291系の各装置搭載位置

Fig.3 Mounting position of each equipment in type R291

3. 基本的な動作

本章では、各装置の基本的な動作をモード別に説明する。

3.1 架線モード

パンタグラフ上昇状態では、通常の電車と同様、架線から集電して走行する。また、SOC(State of Charge: バッテリの充電状態)に応じた架線からバッテリーへの充放電や、力行アシスト・回生吸収動作が可能である。

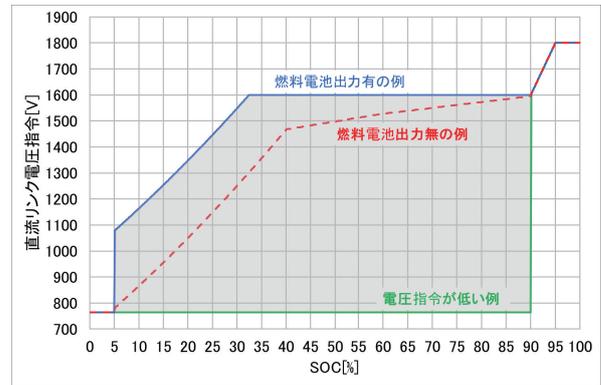
このモードにおいて燃料電池を動作させると、電気事業法上の保安規制の対象になる可能性があるため、燃料電池チョッパ装置は動作させず、入出力の接触器を開放した状態としている。

3.2 バッテリーモード・バッテリー燃料電池ハイブリッドモード

パンタグラフ降下状態では、バッテリーチョッパが直流リンク電圧を一定に制御する。リチウムイオン電池の稼働バンク数・SOC・燃料電池の出力状態によってバッテリーチョッパが出力できる瞬時電力は時々刻々変化する。一方で、通勤形電車相当の加速性能を実現するため、VVVFの出力制限は最小限に抑える必要がある。さらに、VVVF-バッテリーチョッパ間の通信には遅延が発生するため、通信で出力可能電力を送受信する方法では、その急変(燃料電池チョッパはリチウムイ

オン電池の保護動作など)に追従できない。

そこで、力行中は直流リンク電圧-出力可能電力の関係式をもたせて、直流リンク電圧から求められる出力可能電力での電力制限を設けることとした。図4にSOC-直流リンク電圧特性の一例を示す。



■ 図4 SOCと直流リンク電圧指令値の関係の一例

Fig.4 An example of DC link voltage command vs. State of Charge

一方、ブレーキ中はバッテリーチョッパの許容充電電流を上回る電流を回生すると直流リンク電圧が上昇する。その上昇した電圧に応じてVVVFは軽負荷回生制御(回生負荷が小さい場合に電流を絞りこむ制御)とすることとした。

燃料電池は発電動作のみであるため、リチウムイオン電池に対しては常時充電動作となる。一般に寿命の観点から、燃料電池は一定負荷で動作させることが望ましい。一方でリチウムイオン電池は上限電圧が存在するため、常時一定負荷とすることができない。そこでSOC状態に応じて発電電力に垂下特性を付加し、SOCが100%に近づくで発電電力が滑らかに減少する設定とした。

3.3 架線モードとバッテリーモードの切り替え

各モード間の遷移については、SIVを停止させずに、架線モードからパンタグラフを降下させてバッテリーモードに切り替える動作と、バッテリーモードからパンタグラフを上昇させて架線モードに切り替える動作が可能である。

4. 納入した各機器の詳細

本章では、各機器の詳細について説明する。それぞれの機器の車両ぎ装状態を図5に示す。図中左から電力変換装置・フィルタリアクトル・燃料電池チョッパ装置である。高速度遮断器は燃料電池チョッパ装置の右隣にぎ装されている。



(写真提供：公益財団法人鉄道総合技術研究所)

■ 図5 納入機器(ぎ装状態)

Fig.5 External view of all delivered equipment

4.1 電力変換装置(RG6046-A-M)

電力変換装置は、VVVF部・SIV部・バッテリーチョッパ部の3システムを一つの外箱に格納したシステムであり、それぞれ次の特徴をもつ。

4.1.1 VVVF部

VVVF部は既存システムでは燃料電池走行時はT車搭載の2個モータ制御1群構成、架線走行時は台車単位の2個モータ制御×2群構成だったものを、燃料電池走行/架線走行問わず通常の電車相当として走行するため、小型軽量化を目的に4個モータ制御(車両制御)とした。パワーユニットはスナバレス2レベル構成とし、乾式フィルムコンデンサを内蔵することで小型軽量化を図っている。

インバータ制御はPG 併用型センサレスベクトル制御である。従来2MIC 構成であったが、今回は前述の目的により4MIC 構成となり、制御特性の低下を伴うが、センサレスベクトル制御による高精度トルク制御によりそれを補っている。

4.1.2 SIV部

SIV部は架線および直流リンク部のDC1500 Vを入力し、三相AC440 VとDC100 Vを出力する。定格容量は交流出力・直流出力の総合で80 kVAである。パワーユニットはスナバレス3レベル構成を採用し、キャリア周波数を当社従来SIVよりも高周波化することで出力電圧・電流リプルの低減を実現している。さらに、三相交流出力側のフィルタ回路を、リーケージトランスと乾式交流コンデンサの構成にすることで交流リアクトルを省略し、小型軽量化を図っている。

4.1.3 バッテリーチョッパ部

バッテリーチョッパ部はリチウムイオン電池3バンク分と燃料電池チョッパ装置2群分の出力電圧を直流リンク電圧まで昇圧し、それらの出力電力をVVVF・SIVの所要電力に合わせて制御する機能と、リチウムイオン電池のSOCの制御する機能を有している。

従来装置(RG6006-A-M)は地上用蓄電システムを流用した一般産業用の制御盤相当のものであり、車内に設置されていたが、鉄道車両床下へのぎ装に際し大幅に構成を見直した。また、従来装置ではリチウムイオン電池からの電力のみを制御していたが、本装置では燃料電池からの電力も制御している。

本構成要素は、高圧側を直流リンク電圧、低圧側をリチウムイオン電池とした双方向チョッパで構成しており、従来装置では単相チョッパであったが、本装置では三相チョッパで構成した。キャリア周波数は従来装置同等であるが、各相のキャリアに120°位相差を設けることで、リップル電流の振幅が理論上1/9となり平滑リアクトル・コンデンサの小型化が可能となった。さらに、平滑リアクトルは絶縁種別を変更することで小型・軽量化を図った。

パワーユニットに使用するパワーモジュールやフィルタコンデンサなどはVVVF部と共通としたが、バッテリーチョッパは停車中も動作する必要があるため、冷却に走行風を用いることができないため、強制空冷方式としている。

4.2 燃料電池チョッパ装置(RG4095-A-M)

燃料電池チョッパ装置は、燃料電池の出力電圧をリチウムイオン電池の電圧まで昇圧する機能をもち、燃料電池の出力電圧を昇圧する「昇圧チョッパ」と、燃料電池側の低圧回路と

電力変換装置・架線側の高圧回路を電氣的に絶縁する「高周波絶縁DC-DCコンバータ(以下「DC-DCコンバータ」とする)により構成される。

R291系には燃料電池が2台搭載されており、本装置にはそれぞれの燃料電池に対し同一の回路が2群内蔵され、本装置の出力で並列に接続されている。本装置の出力は、電力変換装置内バッテリーチョッパの低圧側、リチウムイオン電池と並列に接続されている。

装置内の構成要素の配置については、パワーユニットや入出力接触器・制御ユニットを両車側に、高周波トランス・直流リアクトルを装置中央にそれぞれ配置することでメンテナンス性に配慮した。冷却方式については、パワーユニット部を強制空冷、トランス・リアクトル類は自然空冷とした。

本装置の小型化のポイントは下記の2点となる。

(1) 燃料電池側回路の低圧回路化(DC750 V未満)

従来の燃料電池チョッパ装置(RG4040-A-M)は三相双方向チョッパのみで構成されていたため、燃料電池を含むすべての回路が架線電圧であるDC1500 Vの高圧回路となっていた。一方、本装置ではDC-DCコンバータを加えることで、装置入力-出力間の電氣的絶縁を図っている。これにより、燃料電池側回路がDC750 V未満の低圧回路となり、構成部品の低耐圧化と絶縁距離の短縮が可能となった。さらに、燃料電池側の遮断器に低耐圧品を採用することで、装置の小型化に貢献している。

(2) 低耐圧フルSiCパワーモジュールの適用

(1)の燃料電池側回路の低圧化に加え、昇圧チョッパとDC-DCコンバータ間のDCリンク電圧を500 Vに設定することで、昇圧チョッパとDC-DCコンバータ一次側のスイッチング素子に1200 V耐圧のフルSiCパワーモジュールの適用が可能となった。低耐圧パワーモジュールは、鉄道用途で適用が進んでいる高耐圧SiCパワーモジュールに対し、より高速でスイッチングすることができ、キャリア周波数の高周波化による高周波トランスなどの受動部品の小型化、ひいては装置全体の小型化に貢献している。

さらにDC-DCコンバータ二次側の整流器にもSiC-SBDを適用することで、リカバリ損失を抑え高周波化を図っている。

これらの方策により、従来の燃料電池チョッパ装置には存在しなかった入出力間の絶縁機能を付加したうえで小型・軽量化を実現した。その結果、従来装置は車内に設置されていたが、本装置は床下にぎ装することが可能となった。

本装置の制御は、前述のとおりリチウムイオン電池の電圧に合わせて、燃料電池チョッパ装置の出力電力を制御することにより、リチウムイオン電池と燃料電池によるハイブリッ

ド走行を実現している。具体的には下記の2方式の制御を試行した。

(1)出力電力制御：昇圧チョッパで燃料電池チョッパ内の直流リンク電圧を一定に制御し、DC-DCコンバータで装置の出力電力を制御する。

(2)入力電流制御：昇圧チョッパで燃料電池からの入力電流を制御し、DC-DCコンバータで燃料電池チョッパ内の直流リンク電圧を一定に制御する。

4.3 フィルタリアクトル(L3068-A)

フィルタリアクトルは、パンタグラフを上げて架線モードで動作している時に、VVVF部およびバッテリーチョッパ部から発生する高調波を架線側に流さないことを主目的に設けている。インダクタンスは8 mH、定格電流は200 Aである。

空芯・乾式のリアクトル1回路を納めた装置で、車両の走行による通風によってコイルを放熱する構造としている。

4.4 高速度遮断器(SA419-R-M)

高速度遮断器(図6)は、主回路の地絡や過電流時にVVVF部およびバッテリーチョッパ部をDC1500 V架線から切り放して機器を保護することを主目的に設けている。

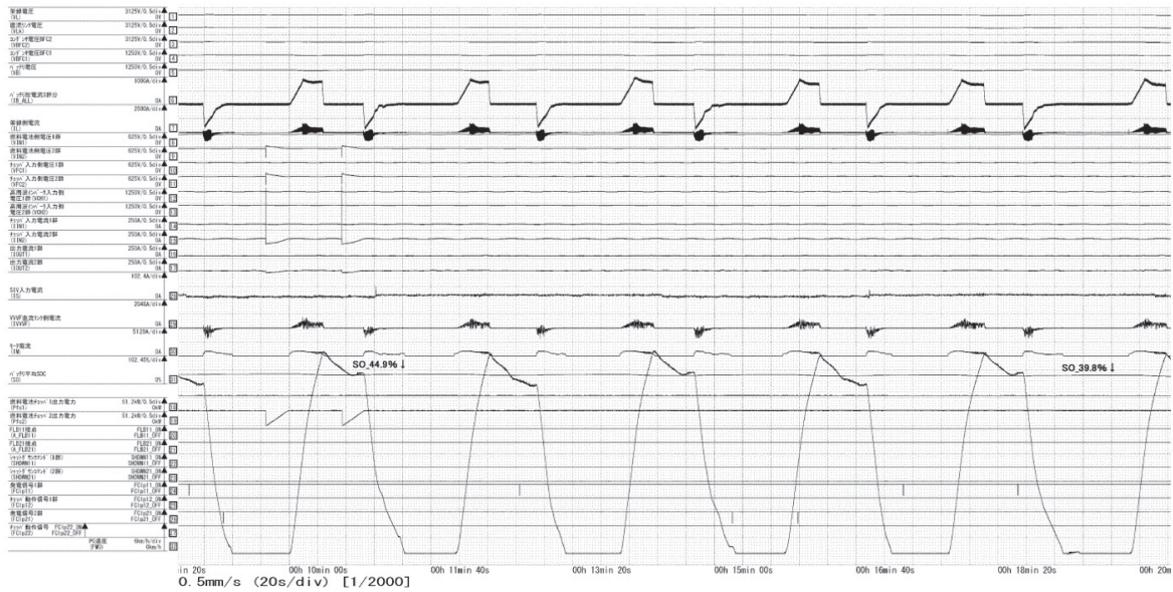
定格電圧1500 V、定格電流800 Aのデアイオングリッド消弧式のアークレス遮断を行う電磁式高速度遮断器で、軽量の不燃性樹脂製アークカバーに収納している。



■ 図6 高速度遮断器外形
Fig.6 External view of HSCB

5. 現車試験チャート

図7にバッテリー燃料電池ハイブリッドモードにおける走行試験のチャートを示す。バッテリーからの電力供給と燃料電池からの電力供給でスムーズに加減速していることがわかる。



■ 図7 燃料電池・バッテリーハイブリッド走行試験波形
Fig.7 Running test at LiB and FC hybrid

6. むすび

本稿では、R291系試験電車について、当社が納入した電力変換装置、燃料電池チョッパ装置、高速度遮断器、フィルタリアクトルの各機器と、電車としての動作モードについて解説した。

最後に、多大なご指導を賜った公益財団法人鉄道総合技術研究所および協力いただいた関係メーカー各位に厚くお礼を申し上げます。

なお、本製品は「国土交通省の鉄道技術開発費補助金」を受けて開発した技術を活用している。

執筆者紹介

藤本 和樹

交通事業部交通技術統括部交通技術部に所属し、交通システム製品のエンジニアリング、技術開発に従事。

小籠 亮太郎

交通事業部交通技術統括部交通技術部に所属し、交通システム製品のエンジニアリングに従事。

天野 哲生

交通事業部開発部に所属し、鉄道用電力変換装置の制御開発に従事。

森 雄生

交通事業部交通工場設計部に所属し、鉄道用電力変換装置の開発設計に従事。

参考文献

- [1] 山本貴光：「燃料電池試験電車の開発」, 車両技術237号, pp.150-157, 2009年3月
- [2] 小川賢一, 米山崇, 須藤貴幸：「鉄道総研の新しい燃料電池ハイブリッド試験電車」, JREA, Vol.63, No.5, pp.44057-44060, 2020.