

Special edition paper

水素ハイブリッド電車FV-E991系(HYBARI)の走行試験概要



梅坂 智之*¹



中野 彰*¹



八重樫 徹郎*¹



有賀 洋三*²



水野 司*³

Overview of FV-E991 hybrid (Fuel Cell) railway test vehicles running tests

Tomoyuki UMESAKA*¹, Akira NAKANO*¹, Tetsuro YAEGASHI*¹, Yozo ARUGA*², and Tsukasa MIZUNO*³

*¹ Researcher, Environmental Engineering Research Laboratory of Research and Development Center of JR East Group

*² Assistant Chief Researcher, Environmental Engineering Research Laboratory, Research and Development Center of JR EAST Group

*³ Chief Researcher, Environmental Engineering Research Laboratory of Research and Development Center of JR East Group

Abstract

In a world striving toward a more sustainable society, we have developed the hydrogen hybrid train FV-E991 series (HYBARI) in response to demand for next-generation vehicles running on cleaner energy, including mass transportation systems such as railways. The "HYBARI" is to be the world's first fuel cell train equipped with a hybrid system using two power sources (a CO₂-free hydrogen fuel cell unit and a main-circuit storage battery) using high-pressure (70 MPa) hydrogen. As a result of the running tests, the general performance of the railway vehicle, the fuel cell hybrid performance, and the safety of the hydrogen system were confirmed.

●**Keywords:** Fuel cell, Hybrid system, Hydrogen tank unit, Safety device, Power conversion device, Main circuit storage battery

*¹JR東日本研究開発センター エネルギー・環境ユニット 研究員
*²JR東日本研究開発センター エネルギー・環境ユニット 副主幹研究員
*³JR東日本研究開発センター エネルギー・環境ユニット 主幹研究員

1. 緒言

JR東日本は2022年7月に、JR東日本グループがめざすエネルギー戦略として「エネルギービジョン2027～つなぐ～」を策定し、2050年度までにJR東日本グループ全体のCO₂排出量「実質ゼロ」をめざす「ゼロカーボン・チャレンジ2050」に取り組んでいる。よりクリーンなエネルギーで走行する次世代の鉄道車両への期待が世界的に高まっていることから、水素ハイブリッド電車FV-E991系「HYBARI」(以下、「FV-E991系」と示す。)を開発した。

水素ハイブリッド電車の営業投入をめざして開発したFV-E991系は、鉄道車両として世界初となる70 MPaの高圧水素を使用した燃料電池システムにより営業線を走行するため、走行性能や安全性の検証が必要である。そこで、FV-E991系は2022年3月より走行試験にて鉄道車両として必要な基本性能を確認し、鉄道車両における高圧水素利用時のハイブリッドシステム・水素システムの性能などの検証を行っている。

本稿では、FV-E991系の走行試験の概要について紹介する。

2. FV-E991系の概要

FV-E991系の主要機器を図1に示す。FV-E991系は2両構成とし、1号車は制御電動車(Mzc)、2号車は制御付随車(Tzc)である。VVVF(Variable Voltage Variable Frequency control)インバータ装置と補助電源装置(SIV: Static Inverter)を一体化した電力変換装置や主回路蓄電池などの主回路関係機器を1号車に搭載し、水素関係機器および燃料電池システム関連機器は2号車に搭載している。2号車において、水素貯蔵ユニットに充填された水素が、燃料電池装置へ供給され、空気中の酸素と化学反応することにより発電する。主回路蓄電池は、燃料電池装置からの電力と、ブレーキ時に発生する回生電力により充電される。VVVFインバータ装置は、燃料電池装置と主回路蓄電池の両方からの電力で主電動機を動作させる。また、補助電源装置もVVVFインバータ装置と同様に、燃料電池装置と主回路蓄電池の両方からの電力により三相440Vをつくり出し、空気調和装置や電動空気圧縮機などに供給する。

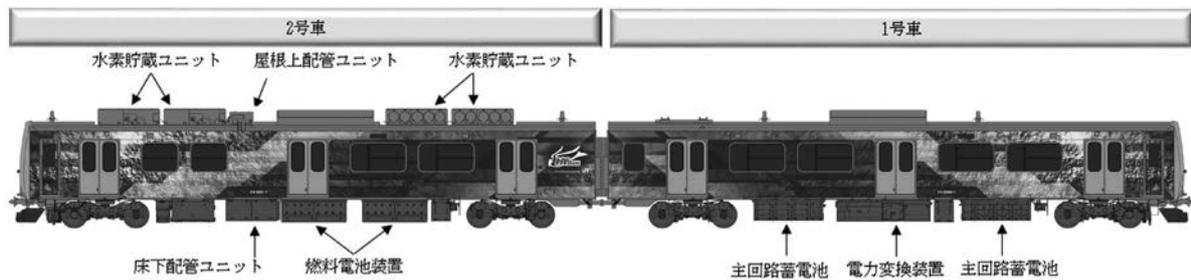


図1 ハイブリッド駆動システム機器配置

3. 走行試験

3・1 走行試験概要

2022年3月より行った走行試験において、基本性能、高圧水素利用時のハイブリッドシステムや水素システムの性能などの評価試験に加えて、将来の水素ハイブリッド電車へ高速水素充填を見据えた課題抽出をするための水素充填試験を実施した。走行試験の概要については、以下のとおりである。

(1) 車両基本性能試験

試験期間：2022年3月～2022年10月

試験線区：南武線（川崎駅～登戸駅）

確認項目：加減速などの基本性能

(2) 通し運転試験

試験期間：2022年9月～

試験線区：南武線（川崎駅～登戸駅）、鶴見線（鶴見駅～扇町駅）

確認項目：ハイブリッド制御、燃料電池システム温度、主回路機器温度、水素消費量、蓄電池走行時の主回路蓄電池SOC(State Of Charge：充電率)の変化量など、燃料電池の発電効率

(3) 水素システム性能の検証

水素システムの安定性確認：高圧水素ガスの安定的な貯蔵、燃料電池への供給を確認

水素配管応力測定：走行中および水素充填中に水素配管に発生する振動や応力を測定

(4) 水素充填試験

35 MPa水素充填：走行試験のために日常的に行う水素充填。季節による外気温の影響などを日々の水素充填時のデータから確認

70 MPa水素充填：鉄道車両としては初となる高速大流量な水素充填。営業運転への適用を想定し、本充填方式での配管応力、タンク温度など各種データを測定

3・2 ハイブリッドシステム性能評価

燃料電池と主回路蓄電池のハイブリッドシステム性能については、車両基本性能試験と通し運転試験にて評価を行った。

(1) 車両基本性能試験

車両基本性能試験にて力行加速性能、再力行性能、追い力行性能、勾配起動、常用ブレーキ、空転滑走などの一般的な電車としての基本性能を確認した。主な試験結果は以下のとおりである。

- ・主回路蓄電池および燃料電池から必要な電力が供給され、所定の力行加速度が得られることを確認した。
- ・燃料電池出力変動時のSIV出力電圧は、安定して出力し続けていることを確認した。

(2) 通し運転試験

通し運転試験においては、営業運転を想定した運行ダイヤでの通し運転試験を行い、FV-E991系の主回路・補助回路電気品における各種温度上昇値、SOC変化量および水素消費量について確認した。主な試験結果は以下のとおりである。

- ・燃料電池と主回路蓄電池のハイブリッド制御について、走行状態に応じた発電モード遷移や制御応答性が設計のとおり動作していることを確認した（図2）。

- ・燃料電池システムの温度測定については、夏季および冬季の結果を比較し、外気温による燃料電池システムへの影響度合いを確認した。
- ・VVVFインバータおよびSIVの素子の温度上昇については、外気温が40℃の状況で使用した場合でも許容値に対し余裕をもって動作していることを確認した。
- ・SOC変化量評価については、鶴見線鶴見～扇町間、南武線武蔵中原～登戸間、川崎～武蔵中原間において蓄電池走行を行い、SOCが不足することなく走行可能であることを確認した。
- ・水素消費量評価については、鶴見線および南武線において燃料電池走行での水素消費量を確認するとともに、設計時に実施した走行シミュレーション結果の妥当性を検証した。

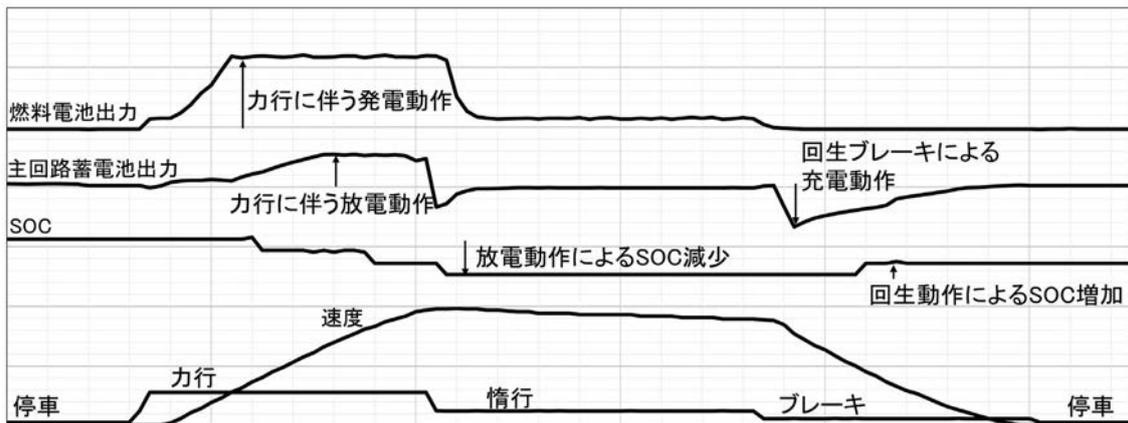


図2 現車測定データによるハイブリッド制御の検証

3・3 水素システム性能の検証

(1) 水素システムの安定性確認

FV-E991系には、70 MPaの高圧タンクで貯蔵された水素ガスを1 MPa未満に減圧して燃料電池に供給するシステムが搭載されている。夏季および冬季において同一行路の試運転を行った際の、時間経過に対する高圧水素および低圧水素の圧力変化を図3に示す。高圧水素の初期圧力は異なるが、夏季と冬季を問わず、試運転の時間経過とともに30 MPa近い高圧水素が減圧され、低圧水素は1 MPa未満で一定に推移していることが分かる。このように一連の走行試験のなかで、本システムが外気温の違いに関わらず安定的に機能し、高圧水素が安定的に貯蔵されていること、さらに燃料電池に供給され消費されていることを確認した。

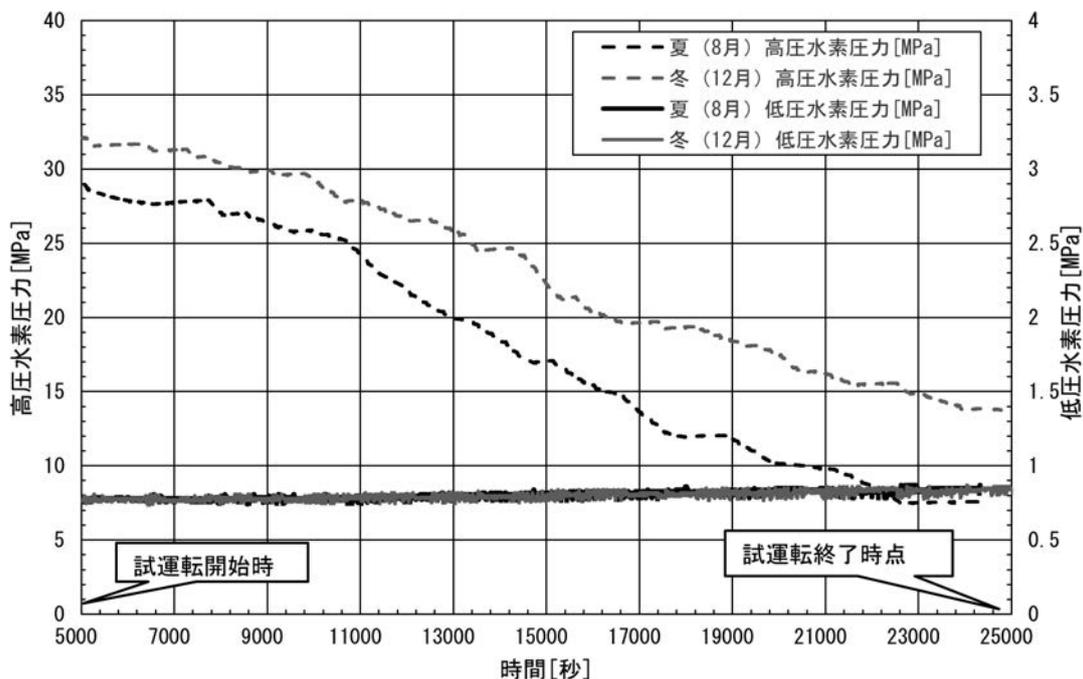


図3 試運転中(夏季・冬季)の時間経過に対する高圧水素および低圧水素圧力の変化

(2) 水素配管の応力測定

FV-E991系に搭載した水素配管の走行中および水素充填中に発生する振動や応力を測定するため、水素配管上および水素システムユニット内の各所に熱電対・ひずみゲージを仮設し、温度と応力をデータロガーにより記録した。測定結果の分析から、配管破損や機器故障の原因となりうる応力の発生は無く、FV-E991系の水素配管構造の安全性を確認することができた。

3・4 水素充填試験

FV-E991系の走行試験に必要な35 MPa水素充填および営業投入を想定した大流量充填に向けた70 MPa水素充填の試験を実施している。

(1) 35 MPa水素充填

35 MPaの水素充填時の構成を図4に示す。35 MPa水素充填は、水素カードルと呼ばれるガス容器を使用し、19.6 MPaと45 MPaの二種類のカードルを用いて、FV-E991系の水素タンクとの圧力差を利用した差圧充填方式である。充填装置は、カードルから供給する水素の流量調整や、異常時における安全装置の役割を有している。35 MPa水素充填は走行試験を行うために必要な水素を日常的に充填する作業であり、夏季や冬季などの外気温の違いや、天候に左右されることなく安全に充填できることが確認できた。



図4 35 MPa水素充填時の構成

(2) 70 MPa水素充填

70 MPa水素充填は、水素自動車向け商用移動式水素ステーションを用いて、カードル圧力(19.6 MPa)を80 MPaに昇圧させて、圧力差を利用して充填する差圧充填方式である。70 MPaの水素充填時の構成を図5に、水素充填試験の状況を図6に示す。本充填試験で、FV-E991系の配管構造においても水素タンクの最高充填圧力である70 MPaの水素充填ができることを確認した。また、充填条件ごとの各種車両データ(配管応力、タンク温度など)を測定し、営業車を見据えた高速で大流量な充填に向けた知見を得た。今後はシミュレーションなども活用して大流量充填時の影響を検討していく。



図5 70 MPa水素充填時の構成



図6 70 MPa水素充填試験

4. 結言

FV-E991系の走行試験では、鉄道車両としての基本性能を確認し、ハイブリッドシステム、水素システム、水素充填などの水素ハイブリッド電車特有の性能確認を行った。結果として、鉄道環境における高圧水素利用時のハイブリッドシステム・水素システムの性能などに問題が無いことを確認し、各種水素充填方式に関する知見を得た。引き続き水素ハイブリッド電車の営業投入をめざし、技術検証を重ねていく。

参考文献

- 1) 村山健、岡本秀一、飯田隆幸、水素ハイブリッド電車FV-E991系 (HYBARI) の概要、JREA (日本鉄道技術協会)、Vol.65.No.9 (2022)、P27-30 (46357-46360)