

特集：車両技術

国内外の燃料電池鉄道車両の開発動向

米山 崇* 柏木 隆行* 山田 昂征*

Development Trend of Fuel Cell Trains

Takashi YONEYAMA Takayuki KASHIWAGI Takamasa YAMADA

Fuel cell trains are being developed in Japan and abroad. In Japan, Railway Technical Research Institute and East Japan Railway Company have been developing fuel cell trains in each way. Overseas, European railway manufacturer Alstom unveiled a fuel cell train in 2015 and has conducted trial operation since 2018, and Germany's Siemens has also been developing a fuel cell Train. In China, a group company of CRRC, a manufacturer of rolling stock, developed a low-floor fuel cell tramway, which started operation at the end of 2019 in Foshan, China. This paper reports on these development trend of fuel cell trains.

キーワード：燃料電池鉄道車両，ハイブリッド，開発動向

1. はじめに

燃料電池鉄道車両の開発が国内外で行われている。燃料電池は水素を燃料として発電を行うため、発電の際の二酸化炭素や窒素酸化物の排出がゼロのクリーンな電源として注目されている。また、燃料となる水素は、石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料のほか、水力・風力・太陽光など多様な一次エネルギーを利用した電力から製造できるため、将来の安定したエネルギー供給や脱炭素化の一手法として期待されている。

国内では、公益財団法人鉄道総合技術研究所（以下、鉄道総研）と東日本旅客鉄道株式会社（以下、JR 東日本）がそれぞれ燃料電池鉄道車両の開発を行っている。鉄道総研は 2001 年に燃料電池鉄道車両の開発を開始し、バッテリーとのハイブリッド化や、搭載機器の小型化・高性能化を実施し、走行試験を実施してきた。JR 東日本は、株式会社日立製作所（以下、日立）、トヨタ自動車株式会社（以下、トヨタ）と連携して燃料電池ハイブリッド車両の開発を行っており、2022 年 3 月頃より実証試験を開始する予定である。

海外では、2015 年にヨーロッパの鉄道メーカーの ALSTOM が燃料電池鉄道車両を公開し、2018 年以降営業試験走行を実施している他、ドイツの SIEMENS も燃料電池鉄道車両の開発を行っている。中国では、鉄道車両メーカーの中国中車（CRRC）のグループ企業が低床路面電車の開発を行っており、中国の仏山市において 2019 年末に運転を開始している。本報告ではこれらの国内外の燃料電池鉄道車両の開発動向について報告を行う。

2. 国内の燃料電池鉄道車両開発の動向

国内の燃料電池鉄道車両の開発動向として、鉄道総研による開発と JR 東日本における開発状況を以下に述べる。

2.1 鉄道総研における開発

鉄道総研では、超電導磁気浮上式鉄道車両の車上電源用として燃料電池の開発を 1990 年代に開始した。その後、2001 年より燃料電池鉄道車両の研究開発を開始し、2006 年に燃料電池を動力源とする試験電車を製作、2008 年からは燃料電池とリチウムイオンバッテリーのハイブリッド構成とし、その後約 10 年に亘り走行試験を行いながら、燃料電池を鉄道車両に適用するための技術を蓄積してきた。当初は燃料電池の出力密度が低かったことなどから、現在より低出力にも関わらず装置の外形寸法が大きく、また開発の第一段階として鉄道車両としての動力性能を確認することを目的としていたため、多くの機器を客室内に配置していた。このため、車両に十分な客室空間がなく、加速性能は国鉄型の気動車並みにとどまっていた。

近年、小型で高出力な燃料電池や、炭化ケイ素（SiC）を材料に用いた電力用半導体素子（従来のシリコン製に代わる炭化ケイ素製の小型・低損失・高速動作可能な素子）が入手可能となり、燃料電池や電力変換装置を従来よりも小型化できるようになってきた。

そこで、より実用形に近い燃料電池鉄道車両を目指して、2019 年に既存の試験電車の改造を行い、十分な客室空間を持ちながら、加速性能を電車並みに高めた燃料電池ハイブリッド試験電車を完成させた¹⁾。完成した燃料電池ハイブリッド試験電車の外観を図 1、回路構成を図 2、改造前後の室内の状況を図 3 に示す。燃料電池、リチウムイオンバッテリー、水素タンク、電力変換装置

* 車両制御技術研究部 水素・エネルギー研究室



図1 鉄道総研の燃料電池ハイブリッド試験電車の外観

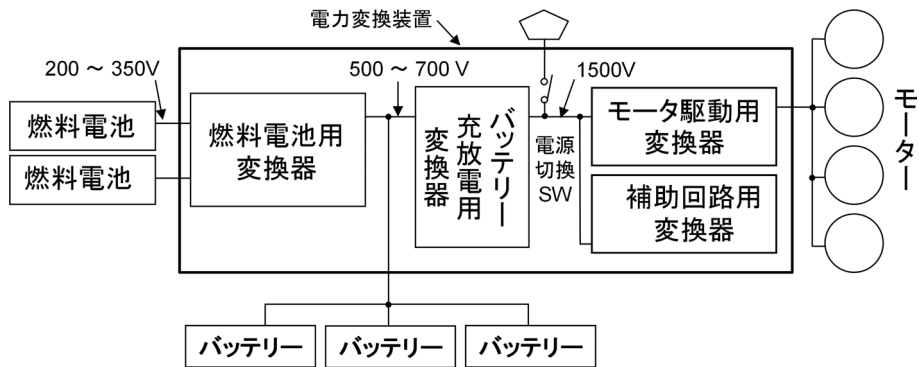


図2 燃料電池ハイブリッド試験電車の回路構成

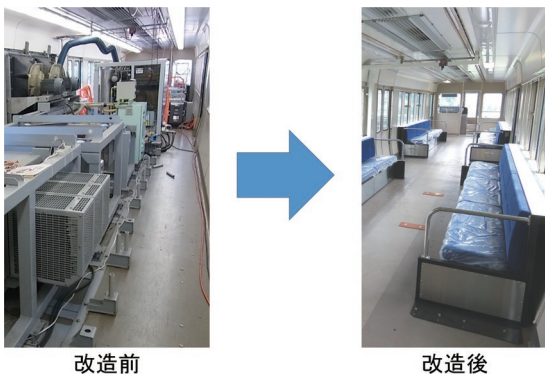


図3 改造前後の車両室内の状況

といった燃料電池ハイブリッド試験電車の走行に必要な主な装置はすべて車両の床下に搭載した。本車両はパンタグラフを搭載しているため、直流の架線のある区間（直流電化区間）ではパンタグラフにより集電して電車として走行可能であり、架線のない区間（非電化区間）では、バッテリーのみによる走行や燃料電池バッテリーハイブリッドによる走行が可能である。本車両の主な諸元を表1に示す。

2.2 JR東日本における開発²⁾

JR東日本、日立、トヨタは2020年10月に燃料電池と蓄電池を電源とするハイブリッドシステム（図4）を搭載した試験車両FV-E991系（図5 愛称名HYBARI）を連携して開発することに合意したことを発表した。

この発表において、JR東日本は鉄道車両の設計・製造の技術、日立はJR東日本と共同で開発した鉄道用ハイブリッド駆動システムの技術、トヨタは燃料電池自動車・バスの開発で培った燃料電池の技術を有しており、3社が持つ鉄道技術と自動車技術を融合し、自動車でも実用化されている燃料電池を鉄道車両へ応用することで、自動車より大きな鉄道車両を駆動させるための高出力な制御を目指したハイブリッド車両（燃料電池）試験車両を実現するとしている。

燃料電池装置の開発はトヨタが、ハイブリッド駆動シ

表1 鉄道総研の試験電車の主要諸元

車両構成	2両（1M1T）
空車質量	Mc：約37t Tc：約32t
電源最大出力	燃料電池（PEFC）：150kW（net） リチウムイオンバッテリー：540kW
電源モード	①架線 ②架線・バッテリー ③燃料電池・バッテリー ④バッテリー
主電動機	95kW×4
加速度	2.9km/h/s
水素タンク	18kg-H ₂ （35MPa 180L×4本）

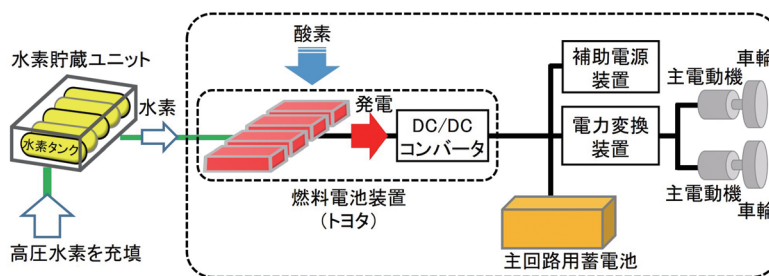


図4 JR東日本 FV-E991系 (HYBARI) の燃料電池ハイブリッドシステムの仕組み (JR東日本提供)



図5 JR東日本 FV-E991系 (HYBARI) の外観イメージ (JR東日本提供)

表2 JR東日本 FV-E991系 (HYBARI) 主要諸元

車両構成	2両 (1M1T)
最高速度	100km/h
加速度	2.3km/h/s
航続距離	約 140km (最大)
主回路装置	電力変換装置 (VVVF インバーター) 1C2M×2 群 主電動機 95kW×4
燃料電池装置	固体高分子形: 60kW×4
主回路用蓄電池	リチウムイオン電池: 120kWh×2
水素貯蔵ユニット	最高充填圧力 70MPa 水素貯蔵容量 51ℓ×5 本×4 ユニット

システムの開発は日立が担当する。試験車両の主要諸元は表2に示す通りである。

実証試験は2022年3月頃に開始予定であり、試験区間は神奈川県横浜市・川崎市のJR東日本の鶴見線、南武線尻手支線、南武線 (尻手～武蔵中原) である。

3. 海外の燃料電池鉄道車両開発の動向

海外の燃料電池鉄道車両の開発動向として、現在運行中の車両を含め最近の開発事例を以下に述べる。

3.1 ALSTOM における開発

ヨーロッパの鉄道車両メーカーのALSTOMは2016年9月にドイツのベルリンで開催されたInnoTransにおいて、燃料電池鉄道車両 iLint の公開を行った。その際の車両の外観を図6に示す。

文献3によると、この燃料電池鉄道車両 iLint はALSTOM の気動車 Coradia LINT54 をベースとしており、内装はLINT54と変わらない。また、燃料電池 (Hydrogenics (現 Cummins) 社製) と水素タンク (XPERION COMPONENTS 社製: 同社は燃料電池や天然ガス自動車・バス用のガスタンクを製作しているメーカー) は屋根上に搭載され、リチウムイオンバッテリーや電力変換装置は床下に搭載されている。各車両の先頭側の台車が動力台車であり、車両を駆動する主電動機は気動車のエンジンと同様に床下に吊り下げられ、推進軸とギアにより動力台車の2本の車軸へとつながっている。また、連結面側の台車は付随台車となっている。車両・燃料電池・水素タンクの主な仕様を表3に示す。

文献4によると、iLint は2017年3月にドイツのザルツギッターの試験線で80km/hでの走行を行い、2018年から2020年の間の約1年半の期間、2編成のiLintによりドイツのハノーファー周辺で営業路線 (ブクステフーデからプレーマーフェルデ、プレーマーハーフェンを経てクックスハーフェンへ至る路線) で総走行距離18万kmの営業試験走行を行った。その後、2020年2月～3月にオランダ北部で10日間の走行試験実施、2020年9月～11月にオーストリアで営業走行を行っている。また、文献5によれば、2021年5月～12月にドイツ南部で営業試験走行を予定している他、文献6によると、これまでに41編成がドイツの2つの州によって注文され、2021年9月にフランス国内でもデモ走行を実施し、2022年にフランス国内のトゥール・ロシュ線で試験を行うとのことである。

なお、文献7、文献8によると、ALSTOM では iLint のほかに、フランス向けに Régionalis という車両の架線・燃料電池デュアルモード対応車両 (架線の下ではパンタグラフを使用して電車として走行、架線のない区間では燃料電池で走行) を開発中で、フランス国鉄の子会社の



図6 ALSTOMの燃料電池鉄道車両 iLintの外観

表3 ALSTOMの燃料電池鉄道車両 iLintの主な仕様

車両	メーカー	ALSTOM
	形式名	Coradia iLint
	車両構成	2両
	最高速度	140km/h
	定員	300名
	モーター出力	320kW（連続） 400kW（回生時）
	航続距離	600～800km （走行線区により変わる）
燃料電池	メーカー	Hydrogenics
	出力	1両あたり200kW程度 （HyPM HD 30モデルがベース）
水素タンク	メーカー	XPERION COMPONENTS
	形式名	X-STORE
	種別	Type4 （プラスチックの容器を炭素・ガラス繊維で補強）
	貯蔵圧力	35MPa
	貯蔵量	1両あたり94kg程度 （水素タンク24本搭載により）
バッテリー	メーカー	AKASOL
	種別	リチウムイオンバッテリー
	電圧	800V
	容量	111kWh
	出力	221kW（連続） 450kW（40秒）

SNCF Voyageursと12編成（プラス2編成のオプション）の契約を行い、2024年に営業運転開始を見込んでいるとのことである。

3.2 中国中車における開発

文献9では、中国の鉄道車両メーカーの中国中車のグループ企業である青島四方機車車輛が、2015年の3月に中国の青島（チンタオ）で行われたイベントで、燃料電池路面電車の走行を実施したと報告している。なお、文献10によると、使用される燃料電池は100%低床車両用にカスタマイズされた専用モジュールではなく、バス用に設計された既存のBallard社製の燃料電池モジュールを使用し、出力は200kW（net値）とのことである。また、この路面電車は最高速度70km/hで100kmの走行ができ、水素の充填時間は3分とのことである。文献11では、この燃料電池路面電車は2019年末に仏山市で運行開始されたことが報告されている（図7）

この他に、中国中車の別のグループ企業である中国中車唐山軌道客車も開発を行っているが、これについては鉄道総研報告2018年1月号¹²⁾を参照されたい。



図7 仏山の燃料電池路面電車の外観
(Image provided by Ballard Power Systems)

3.3 TIG/mにおける開発

TIG/mはアメリカ合衆国カリフォルニア州の架線レス路面電車メーカーであり、燃料電池を搭載した観光用路面電車の開発を行っている。カリブ海のアルバとアラブ首長国連邦のドバイにて運行されたことが報告されているが、これについても鉄道総研報告2018年1月号¹²⁾を参照されたい。

3.4 SIEMENSにおける開発

文献13、文献14によると、ドイツのメーカーのSIEMENSは、Mireo Plus Hを製作し2024年から1年間、ドイツ鉄道（DB）のテュービンゲン、ホルブ、プフォルツハイム間の試験運用を行うと2020年11月に発表している。車両は2両編成（航続距離600km）を開発中で、最高速度は160km/h、編成の駆動出力1,700kW、起動加速度 1.1m/s^2 （ 3.96km/h/s ）で、電車並みの走行性能を持っているとのことである。なお、3両編成（航

続距離 1000km) も 2 両編成と同じ性能で検討されている模様である。

3.5 FCH2RAIL consortium による開発

文献 15 によると、トヨタ・モーター・ヨーロッパ（本社ベルギー）は 2021 年 4 月に、EU の FCH2RAIL コンソーシアムのメンバーとして鉄道車両プロジェクト向けにパッケージ化された燃料電池モジュールを供給すると発表している。開発する車両は架線・燃料電池のデュアルモードの鉄道車両とし、燃料電池モジュール以外のバッテリーや電力変換装置などのハイブリッドシステムはスペインの車両メーカーの CAF が製作する予定である。車両はスペイン国鉄の Renfe が提供する CAF 製の車両を使用する。試験はスペインやポルトガルで行われる予定である。本コンソーシアムは 2021 年 1 月に発足し、4 年以内にシステム開発・実証・認証取得を目指していくとしている。また、このプロジェクトを通じて、水素技術と架線との安全性について基準等を検討していく、将来、EU 全体で承認を容易にできるような提案を行っていくとしている。

3.6 燃料電池機関車の開発

ここまでは電車の開発状況を紹介したが、機関車の開発も進んでいる。文献 16 によると、ポーランドの鉄道車両メーカーである PESA は、ポーランドで開かれた Trako 2021 にて、プロトタイプ燃料電池機関車を発表した。この機関車は、1970 年代から 80 年代に製造された SM42 電気式ディーゼル機関車を改造したもので、駆動用の 180kW のモーターを 4 台、1 日分の水素として 175kg を搭載し、燃料電池は Ballard 社製の 85kW のものを 2 台、リチウムイオンバッテリーは 167.6kWh を搭載している。今後試験等を行い、2022 年にポーランド国内の石油精製所で使用予定とのことである。

また、文献 17 によると、スペインの鉄道車両メーカー Talgo が 2021 年 9 月に「今後数か月以内に燃料電池機関車の試験を開始する」と発表している。使用される機関車は元々は Renfe130 シリーズで使われた Travca のプロトタイプで、パンタグラフに代わり燃料電池で給電する。5 両の客車をつなぎ、マドリッド周辺やスペイン西部で試験を行う予定である。この機関車では、燃料電池と水素タンクは搭載スペースの都合で機関車とは別の車両に搭載するとのことである。メーカーの目標は郊外・地方鉄道の電化・非電化区間の両方で使用できる旅客列車で編成質量 142 トン、最高速度 140km/h とされている。

北米では、文献 18 と文献 19 において、カナダの Canadian Pacific (CP) が、2020 年に燃料電池とバッテリーの駆動による本線用の燃料電池機関車の開発を発表し、機関車の名称を「H2 OEL」とし、2021 年秋に完成

予定と発表している。また、文献 20 では燃料電池メーカーの Ballard がこのプロジェクトに 200kW の燃料電池モジュール 6 台を納入する計画と発表している。

4. おわりに

本稿では国内外の燃料電池鉄道車両の開発動向を報告した。国内では試験走行が計画・実施されており、海外ではヨーロッパや中国で営業走行や試験走行が行われている。2022～2024 年頃には国内外の鉄道路線で、さらに実証試験や営業運転が増え始めると思われる。

また、気候変動問題に関する国際的な枠組みである「パリ協定」や「2050 年までのカーボンニュートラル実現」を目指す国際的動きもある中で、今後の実用化、普及に向けて、技術開発・実証試験・法令・規格の整備が今後も行われていくと考えられる。

鉄道総研における研究開発の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

文献

- 1) 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
- 2) JR 東日本, 日立, トヨタ: 水素をエネルギー源としたハイブリッド車両(燃料電池)試験車両の開発—鉄道技術と自動車技術を融合して試験車両を開発します—: https://www.jreast.co.jp/press/2020/20201006_4_ho.pdf (参照日: 2021 年 10 月 22 日)
- 3) Hondius, H, "iLint targets the regional railway," Railway Gazette International, Vol.173, No.3, pp.58-61, 2017.
- 4) Alstom's hydrogen train successfully completes three months of testing in Austria: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2020/12/alstoms-hydrogen-train-successfully-completes-three-months-testing> (参照日: 2021 年 10 月 22 日)
- 5) Hydrogen train trial to inform electrification thinking: <https://www.railwaygazette.com/passenger/hydrogen-train-trial-to-inform-electrification-thinking/58617.article> (参照日: 2021 年 10 月 22 日)
- 6) Alstom's Coradia iLint hydrogen train runs for the first time in France: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2021/9/alstoms-coradia-ilint-hydrogen-train-runs-first-time-france> (参照日: 2021 年 11 月 2 日)
- 7) First order of hydrogen trains in France – a historic step towards sustainable mobility:

- <https://www.alstom.com/press-releases-news/2021/4/first-order-hydrogen-trains-france-historic-step-towards-sustainable> (参照日：2021年10月22日)
- 8) SNCF places orders for more hydrogen trainsets:
<https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/sncf-places-orders-for-more-hydrogen-trainsets/58877.article> (参照日：2021年10月22日)
- 9) Ballard Customer Demonstrates World's First Hydrogen Fuel Cell Tram:
<http://www.ballard.com/about-ballard/newsroom/news-releases/2015/04/07/ballard-customer-demonstrates-world-s-first-hydrogen-fuel-cell-tram> (参照日：2021年10月22日)
- 10) Zemek K, "Developing alternative traction in China," Railway Gazette International, Vol.172, No.3, pp.44-45, March, 2016.
- 11) 毎日新聞：「燃料電池車 中国先行」, 2021年2月5日版 P.6
- 12) 米山崇, 小川賢一, 柏木隆行, 山本貴光：海外における燃料電池鉄道車両の開発動向, 鉄道総研報告, Vol.32, No.1, pp.47-50, 2018
- 13) Deutsche Bahn and Siemens enter the Hydrogen Age:
<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:6bdd169b-eff6-45d4-befa-715d36b160d7/Wasserstoff-DB-Siemens-EN.pdf> (参照日：2021年10月22日)
- 14) Mireo Plus B Mireo Plus H Hybrid multiple units:
<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:4c3fe5f8-a500-44d9-ad0c-7f3fe792c71f/mors-b10040-00dbmireo-plusplattformenus-72.pdf> (参照日：2021年10月22日)
- 15) Toyota Motor Europe to supply fuel cell modules for train project as member of FCH2RAIL Consortium:
<https://newsroom.toyota.eu/toyota-motor-europe-to-supply-fuel-cell-modules-for-train-project-as-member-of-fch2rail-consortium/> (参照日：2021年10月22日)
- 16) Pesa unveils prototype hydrogen shunting locomotive:
<https://www.railjournal.com/freight/pesa-unveils-prototype-hydrogen-shunting-locomotive/> (参照日：2021年11月2日)
- 17) Talgo to conduct hydrogen-powered test "within months":
<https://www.railjournal.com/fleet/talgo-to-conduct-hydrogen-powered-test-within-months/?web=1&wdLOR=c8978403A-ABC5-4795-8672-BB74FA836D10> (参照日：2021年11月2日)
- 18) CP announces hydrogen-powered locomotive pilot project:
<https://www.cpr.ca/en/media/cp-announces-hydrogen-powered-locomotive-pilot-project> (参照日：2021年11月4日)
- 19) CP's hydrogen-powered locomotive pilot project:
<https://sustainability.cpr.ca/about/highlight-stories/cps-hydrogen-powered-locomotive-pilot-project/> (参照日：2021年11月4日)
- 20) Ballard Fuel Cells to Power CP Hydrogen Locomotive Program:
<https://www.ballard.com/about-ballard/newsroom/news-releases/2021/03/09/ballard-fuel-cells-to-power-cp-hydrogen-locomotive-program> (参照日：2021年11月4日)