

燃料電池試験電車の構内走行試験等による燃費及び効率の評価

山本 貴光* 古谷 勇真* 米山 崇* 小川 賢一*

Evaluation of Fuel Consumption and Energy Efficiency with a Railway Test Vehicle Powered by Fuel Cells

Takamitsu YAMAMOTO Takemasa FURUYA Takashi YONEYAMA Kenichi OGAWA

We (Railway Technical Research Institute) have been developing a railway vehicle powered by fuel cells in order to preserve global environment. We introduced the 100kW class fuel cells, installed them in the test vehicle, and carried out the running test with the test vehicle on our test track. From these test results, we tried to evaluate fuel consumption and energy efficiency of the test vehicle, and found a large variation in the results of fuel consumption depending on running condition. Then, we tried to calculate fuel consumption under the condition of practical revenue line. This paper reports on the running test results and the calculation of fuel consumption and energy efficiency of a railway vehicle powered by fuel cells.

キーワード：固体高分子，燃料電池，水素エネルギー，省エネルギー，CO₂排出削減，高効率，燃料消費

1. はじめに

近年，地球温暖化などの環境への影響が懸念され，省エネルギー化・二酸化炭素排出削減に対する関心が高まりつつある。この対策の一つとして最近急速に開発が進められている技術に燃料電池がある。燃料電池は，

- ①発電効率が高く省エネルギーである
- ②CO₂発生量が少なく，環境負荷軽減が可能
- ③水素エネルギーが利用可能で将来の枯渇燃料の対策の一つとなり得る
- ④排気は未反応の空気と生成された水だけでクリーンである

などの特徴を有する。鉄道総研ではこの燃料電池を鉄道車両に適用し，非電化区間を走行する従来のディーゼルカーの代替とすることによって，消費エネルギー削減・二酸化炭素排出削減が可能で，環境に優しく，これから未来に向けて相応しい鉄道車両を提供することを目的とした開発を行っている。本研究開発は2000年のフィージビリティスタディ開始から始まり，2001年から研究開発テーマとして実施して30kW級燃料電池にて鉄道車両用台車を駆動することに成功した¹⁾。2006年には固体高分子型100kW級燃料電池を導入し，試験車両に搭載して構内走行試験を実施した(図1)。また，構内走行試験では確認できない速度40km/h以上の走行については，車両試験台を使用した走行模擬試験を行い，最高速度105km/hまで加速できることを確認した。これらの試験結果から燃料消費率(以下，燃費)を評価したところ，走

行内容により大きな差異があることが判明した。そこで，実営業路線を想定したシミュレーションを実施し，各種条件により燃費がどのように変化するか検討を行ったので以下に報告する。



図1 燃料電池試験電車の構内走行試験状況

2. 燃料電池試験電車概要

(1) 100kW級燃料電池システム

今回導入した100kW級燃料電池システムの主要仕様を表1に，外観を図2に示す。18kW級燃料電池スタックを8個搭載し，電氣的に直列に接続している。無負荷運転時の出力電圧は同規模出力の固体高分子型燃料電池としては比較的高い850Vを発生する。燃料電池スタックの出力(gross)は合計約150kWであるが，システム内補機電力として最大30kW使用するため，外部への最大出力(net)は120kWである。運転に必要な空気供給

* 車両制御技術研究部(動力システム)

特集：車両技術

装置、水素バルブ、冷却水ポンプ、冷却水タンクなどをモジュール化している。このシステムはもともと定置で実績があるものを移動体用に小型化したものである。質量は約1,650kg、メーカーはNUVERA社（米）である。

表1 100kW級燃料電池システム主要仕様

項目	仕様
定格出力	150kW (gross), 120kW (net)
定格電流	250A (gross), 200A (net)
電圧	850V (無負荷時), 600V (定格負荷時)
大きさ, 質量	1650 (L) × 1250 (W) × 1500 (H) mm, 1650kg
スタック構成	18.75kW × 8個 (電氣的に直列接続)
水素供給	圧力 0.9MPa, 流量 1,620SL / min
空気供給	装置内に設置したコンプレッサにより供給 (最大 8500SL / min)
冷却	外部ラジエータによる水冷方式
計測, モニタ	外部PCにCANにより情報伝送
起動・自立運転	装置内のバッテリーにより起動, 発電確立後自立運転可能
補機等	補機電力最大 30kW, コンプレッサ・水ポンプ・ファン等含む



図2 100kW級燃料電池システム

(2) 燃料電池用高圧インバータ装置

通勤路線などで使用されている直流電車の駆動システムには架線電圧 DC1500V に対応したインバータが使用されている。燃料電池が発生する電圧は架線電圧より低いいため、この電圧に対応したインバータが必要である。また、燃料電池の出力は通常の電車が必要とする出力と比べて小さいため、出力パターンが変更可能という機能が必要である。これらの機能を実現するため燃料電池用高圧インバータ装置を試作した。主要仕様を表2に、外観を図3に示す。

(3) 燃料電池試験電車の構成

100kW級燃料電池システム, 燃料電池用高圧インバータ装置, 高圧水素タンクなどを搭載して1両で走行可能な燃料電池試験電車を構成した²⁾³⁾。外観を図4に示す。

表2 燃料電池用高圧インバータ装置の主要仕様

項目	仕様
方式	IGBTによる2レベルインバータ
素子構成	3.3kV, 1.2kA, 1S1P6A
入力電圧	DC600 ~ 1800V
定格出力	300kW
冷却方式	ヒートパイプによる自然冷却
機能	負荷電流パターン, 低電圧検知などの保護設定値が変更可能



図3 燃料電池用高圧インバータ装置



図4 燃料電池試験電車

この燃料電池試験電車は燃料電池の出力が鉄道車両1両を駆動するためにぎりぎりの容量であるため、駆動系に供給するだけとし、補機系電力は地上から架線・パンタグラフを経由して供給される構成とした。ちなみに補機は空調・照明・ブレーキ装置用空気圧縮装置などであり、空気溜めの圧力が十分であれば、架線から集電すること無しにパンタグラフを折り畳んでの走行が可能な構成となっている。なお、駆動は1台車に搭載された誘導電動機 (95kW) 2個による。

3. 構内走行及び車両試験台試験結果

(1) 構内走行試験結果概要

この燃料電池試験電車を構内試験線 (延長約650m) において走行させる試験を行った。この試験結果例を図5

に示す。車両性能の設定は加速度を約1km/h/sec（速度20km/hまで）とした。主回路構成は燃料電池出力を直接インバータに接続しており、バッテリー等は接続していない。この試験では最高速度42km/hまで加速可能であることが確認できた。また、車両走行による振動条件においても燃料電池及び水素供給系の正常動作を確認した。

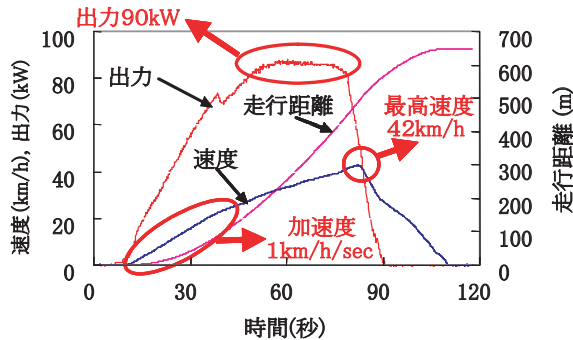


図5 構内走行試験結果例

(2) 車両試験台試験結果概要

走行距離制限を無くし、最高速度40km/hを超える場合の走行性能を確認するため、車両試験台を使用した走行模擬試験を実施した。荷重条件は16,000kg/軸とし、ほぼ実車に相当する慣性負荷とした。この条件において最高速度を確認した試験結果例を図6に示す。この結果から最高速度は105km/hまで加速できることを確認した。高速域においても低速域と同様の燃料電池出力が確保できればさらに速度向上が可能と考えられるが、そのためには燃料電池の更なる高電圧化が必要である。

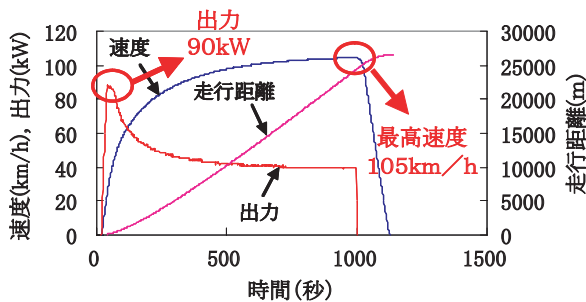


図6 車両試験台試験結果例

(3) 走行試験結果例による効率・燃費の評価

効率及び燃費は将来営業線走行時にどれだけの燃料を搭載しなければならないかを検討する上で大変重要な評価項目である。今回、この2つの試験結果を例として効率・燃費の評価を行った(表3)。なお、効率と燃費は以下の式(1),(2)のように定義した。

$$\text{エネルギー変換効率(\%)} = \frac{\text{燃料電池出力エネルギー(kWh)}}{\text{消費した水素の電気的エネルギー(kWh)}} \times 100 \quad \dots (1)$$

$$\text{燃料消費率(km/kg)} = \frac{\text{走行距離(km)}}{\text{走行で消費した水素量(kg)}} \quad \dots (2)$$

効率はどちらの結果もほぼ50%程度となったが、燃費は約5倍近い開きが見られる。これは、構内試験線は加速終了後すぐ機械ブレーキにより減速して、惰行がほとんど無いといういわゆる“燃費が悪い走り方”になっていることによる。表3の距離当たりの燃料電池外部電力量が構内走行試験線の方が大きいことから上記のことが推察される。

表3 効率・燃費の評価例

走行条件	構内試験線	車両試験台
燃料電池外部電力量 (kWh)	1.38	13.3
消費した水素から得られる電気的エネルギー (kWh)	2.77	25.3
エネルギー変換効率 (%)	49.9	52.7
走行距離 (km)	0.65	26.6
走行で消費した水素量 (kg)	0.084	0.77
燃料消費率 (km/kg)	7.6	34.6

今回の走行試験ではバッテリー装置などのエネルギー蓄積装置を搭載していないが将来の営業線においては回生エネルギーを吸収・有効利用するためのこれらの装置と燃料電池がハイブリッド構成されることが想定される。このような構成とした場合、効率はどの程度向上するのか、ブレーキ直前の試験電車の運動エネルギーの80%を有効利用できると仮定した場合について検討した結果を表4に示す。なお、計算にあたっては回生エネルギーを考慮した以下の(3)式を使用した。

$$\text{エネルギー変換効率(\%)} = \frac{\text{燃料電池外部エネルギー} + \text{回生エネルギー(kWh)}}{\text{消費した水素の電気的エネルギー(kWh)}} \times 100 \quad \dots (3)$$

表4 回生エネルギーを考慮した場合のエネルギー効率 想定

走行条件	構内試験線	車両試験台
走行試験結果の効率 (%)	49.9	52.7
運動エネルギーから計算した回生エネルギー (kWh)	0.51	3.28
回生エネルギー利用時の効率の試算値 (%)	67.5	65.7

表4より回生エネルギーを考慮するとエネルギー変換効率が13~18%程度向上できる可能性がある。なお、営業線想定時では構内走行試験結果より平均の駅間が長く、回生エネルギーも有効利用することにより燃費が良い走行が期待できるが、補機電力も燃料電池出力から賄う必要があるため、ほぼ構内走行試験結果に近い燃費とすることが予想される。

4. 実営業路線を想定したシミュレーション

構内試験線及び車両試験台試験結果には補機電力分は考慮されていないが、実際に営業線を走行する場合は補機電力を考慮する必要がある。補機電力分を考慮した場

特集：車両技術

合、どの位の燃費となるかについて、実際の試験データから燃料電池の出力に対する燃料消費量を用いて、実在する路線条件においてランカーブを検査し、併せて消費エネルギー等の計算と燃料消費量の計算を行って燃費を評価した。

(1) 計算条件

a. 路線条件

路線長：27.5km, 駅間数：12, 勾配：最大22%, 高低差：2.7m低下（ほぼ平坦線区）

b. エネルギー計算条件

以下の4通りの条件を計算した。

条件1：燃料電池で常に補機電力を供給しながら、加速時には駆動電力も供給する。

条件2：ブレーキ時に回生電力を補機に供給する。その他は（条件1）と同じ。

条件3：ブレーキ時の回生電力をバッテリーで吸収して次の加速時にこのエネルギーを有効利用する。

条件4：加速時の車両性能を向上させ、時間短縮する。その他は条件3と同じ。

この条件を表5にまとめる。

表5 シミュレーションに使用したエネルギー計算条件

	条件1	条件2	条件3	条件4
回生動作	なし	あり	あり	あり
バッテリー	なし	なし	あり	あり
車両性能	A	A	A	B
主回路構成	C	C	D	D

（車両性能A・Bは図7(a)の引張力・電流・電圧を、主回路構成C・Dは図8の(a)・(b)をそれぞれ示す）

c. 車両及び走行条件

また、共通した車両及び走行条件は以下のとおりである。車両：1両編成、質量：33,000kg（空車）+7,700kg（乗客）、燃料電池出力：120kW、補機電力：35kW連続、減速度：約3km/h/sec、誘導電動機：95kW×2個

車両性能は燃料電池出力の制限及び燃料電池試験電車に搭載されている誘導電動機の定数等から図7のように設定した。また、主回路構成はハイブリッド用バッテリーの有り、無しで図8のような構成になる。

なお、ここで想定したバッテリー装置はリチウムイオン二次電池で回生電力を吸収可能な容量として168セル、60Ahを想定した。各機器の効率はインバータ、燃料電池用チョップ装置、バッテリー用双方向チョップ装置とも97%とし、バッテリーはその時の電流値から損失分を計上することとした。最高速度は80km/hとし、70km/hまで速度が低下した場合、再力行することとした。

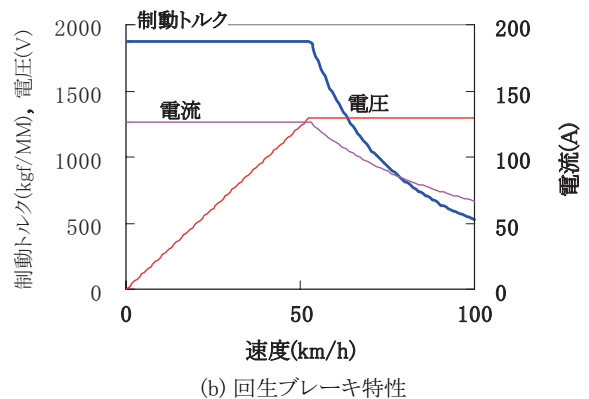
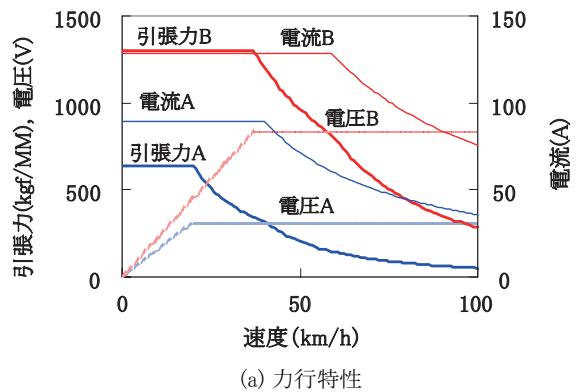
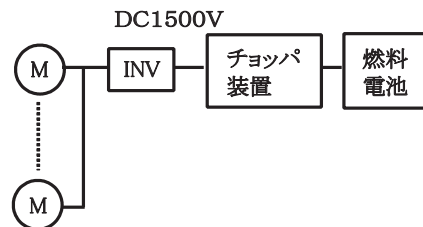
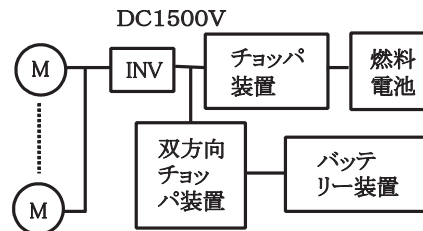


図7 シミュレーションに使用した車両性能



(a) ハイブリッド用バッテリー無し条件の主回路構成C

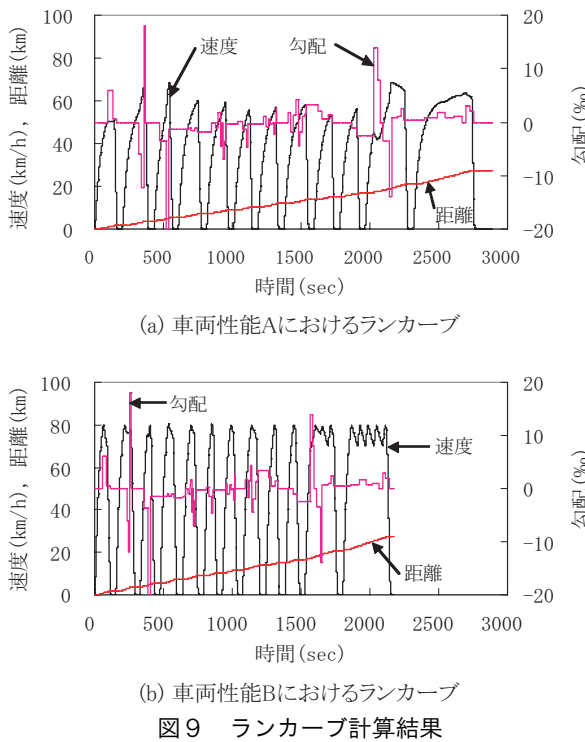


(b) ハイブリッド用バッテリー有りの主回路構成D

図8 シミュレーションに使用した主回路構成

(2) 計算したランカーブの結果

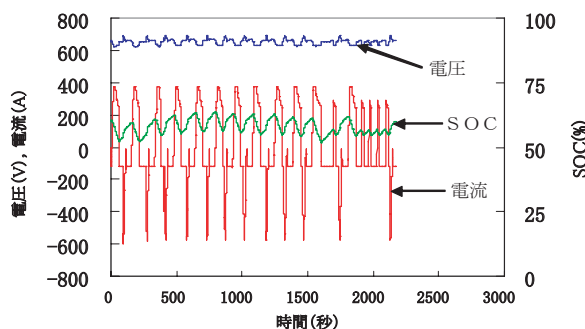
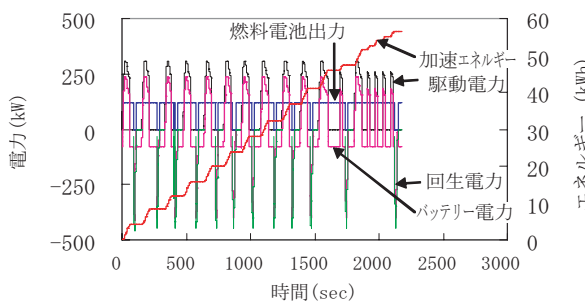
車両性能A、Bの2通りで計算したランカーブの結果を図9に示す。この結果から車両性能Aでは加速力不足により最高速度80km/hに到達せず、所要時間は46分00秒となった。車両性能Bでは最高速度に達して惰行する運転を繰り返す、所要時間は35分48秒（車両性能Aの77.8%）となった。なお、各駅での停車時間は40秒とした。



(3) 電力・エネルギー曲線等の検討

上記ランカーブに併せて、電力・エネルギー及びバッテリーの電圧・電流・SOC (State of Charge: 残存容量) を計算している。電力・エネルギー曲線及びバッテリーの電圧・電流・SOC 曲線について条件4の計算結果を例に図10、図11にそれぞれ示す。

なお、条件3及び条件4ではバッテリーの初期SOCを60%と設定し、走行終了時に60%まで復帰することを待って終了としている。



(4) 燃費・効率等の計算結果

本シミュレーションで得られた各種エネルギー、燃料消費量などから燃費・効率等を評価した結果を表6に示す。

表6 各シミュレーションにおける燃費・効率

		条件1	条件2	条件3	条件4
加速エネルギー*1	①	36.09	36.09	36.09	56.61
補機エネルギー*1	②	26.83	26.83	28.06	21.07
消費エネルギー合計*1	①+②	62.92	62.92	64.15	77.68
燃料電池発電エネルギー	③	64.87	62.71	53.72	63.01
再生エネルギー*1	④	-	2.09	15.20	21.43
エネルギー損失合計	⑤	1.95	1.88	4.77	6.76
水素消費量 (kg)	⑥	3.74	3.63	3.24	3.76
水素消費エネルギー*2	⑦	123.06	119.41	106.63	123.90
燃費 (km/kg)	27.5/⑥	7.36	7.58	8.50	7.32
効率*2	③/⑦	0.527	0.525	0.504	0.508

エネルギー単位は (kWh), *1: インバータ入力端での値, *2: 低位発熱量 (LHV) 換算⁴⁾

(5) シミュレーション結果の考察

本シミュレーションを行った結果について以下に考察する。

(a) 燃費について

最も燃費が悪い条件は車両性能を向上した条件4となったが、この条件においても補機電力を供給して7km/kg以上の値となった。最も燃費が良い条件は条件3で8.5km/kgであった。

(b) 効率について

条件1, 2は効率52%台となったのに対し、条件3, 4は効率50%台となった。これは燃料電池の使い方による差と考えられる。条件3, 4はバッテリーのSOC及び再生動作条件により燃料電池出力が0%出力と100%出力に切り替わるが、条件1, 2は車両性能の変化に合わせた燃料電池の出力となるため、0%~100%の間の出力となる時間割合が多い。一般的に燃料電池は50~60%出力時が最も効率が高く、50%未満あるいは60%を超える出力領域では若干効率が低下するという傾向があり、今回の結果はこの影響によるものと考えられる。条件1の燃料電池発電電力量は条件4より多いが水素消費量が少なくなっていることからこの影響であることが窺える。ちなみに3章で述べた構内走行試験結果及び車両試験台試験結果の効率も高出力で運転している時間割合が多い構内走行試験結果の方が効率が低いという結果となっている。

出力条件が似ている条件1と2及び条件3と4とでは出力0%となっている時間が長い条件2, 3 (条件2は再生動作中に燃料電池出力が0%となり、条件3ではバッテリーにて電力供給中は燃料電池出力が0%となる) の効率が若干低いこともわかる。しかし、この影響よりも再生エネルギーが有効利用できるメリットが大きく、条件3が結果的に最も省エネな条件となった。

特集：車両技術

(c) 回生エネルギーについて

条件2において回生エネルギーによりその時の補機電力のみ供給するような使い方では3%程度の燃料節約しかならない。条件3のようにバッテリーを搭載して回生エネルギーをできるだけ多く回収することにより、バッテリー等による損失増大を考慮しても15%程度(対条件1:消費燃料比(123.06:106.63)より)の省エネが図れることが分かる。条件4において条件3より速度が約1.3倍程度向上しているが(運動エネルギーは約1.7倍に増加)回生エネルギーは1.4倍しか増大していないのは回生ブレーキ特性が高速域で低下し、機械ブレーキによる補足が行われているためである。

(d) シミュレーション結果と営業線における実際の消費エネルギーとの比較

今回使用した路線を走行するディーゼルカーが同様の走行を行った場合に消費する軽油から消費エネルギーを求めると軽油1Lで38.2MJの発熱量として925MJ(=257kWh)と計算される。表6に示す水素消費エネルギー(⑦:106~123kWh)と比較するといずれの条件においてもこの値の半分以下であり、燃料電池・水素エネルギーを利用する鉄道車両が省エネであることがわかる。

5. おわりに

本報告では、燃料電池を駆動用電源とした鉄道車両において、補機電力は地上から別途供給している条件ではあるが、構内走行試験を実施して最高速度42km/hまでの確認を行い、更なる高速域においては車両試験台試験にて105km/hまでの走行性能を確認してそれぞれ燃費(7.6~34.6km/kg)及び燃料電池システムの効率(49.9~52.7%)の評価を行った。

また、実営業路線を想定したシミュレーションを行い、回生動作の有無、主回路構成におけるバッテリーの有無、車両性能を変更した場合の燃費・効率の評価を行って、その傾向を示した。その結果、実営業路線においては補機電力を考慮した場合でも構内走行試験線の走行試験結果に近い燃費(7.32~8.50km/kg)が得られるという評価が得られた。

今後は、図8(b)に示すような燃料電池とバッテリー装置とのハイブリッド化を行い、走行試験を行って4章で実施したシミュレーションの条件の違いによる傾向を確認していきたい。また、高低差が大きい路線や片勾配路線などについてもシミュレーションを実施して燃費がどの程度となるかについて評価を行っていきたい。

燃料電池は定性的には環境に優しく、省エネな技術と

言われているが、今回の評価によって、鉄道車両負荷条件下で50%を超える高効率であることと、従来ディーゼルカーと比較して消費エネルギーが半分以下であることが定量的に評価できたと考える。

燃料電池の開発は現在、自動車への適用を目的とした開発が自動車メーカーにおいて最も盛んに行われているが、燃料電池の鉄道への適用は自動車への適用と比較して、

- ①水素供給設備などの地上のインフラも鉄道事業者が同時に設置可能
- ②専門の技術者の管理下において、一定周期で点検される条件下で使用可能
- ③自動車と比較して搭載スペースが確保し易い
- ④燃料電池コストが自動車と比べて比較的高い段階から適用できる可能性がある

などのメリットがあると考えられる。

燃料電池車両の開発は現在、ディーゼルカーの代替を目的として行っているが、低コスト化が実現されれば鉄道車両にはこの他にも適用用途が考えられ⁵⁾⁶⁾、燃料電池の大きな市場となる可能性を秘めている。このような様々なメリットがある燃料電池鉄道車両を、燃料電池の入手性が容易になった際には速やかに導入・普及が行えるよう技術開発を引き続き進めていきたい。

なお、鉄道総研における鉄道車両への燃料電池の適用に関する研究開発の一部は国土交通省からの国庫補助金を受けて実施した。

文献

- 1) 古谷, 近藤, 山本:「燃料電池による鉄道車両用インバータ・誘導電動機駆動特性」, 鉄道総研報告, Vol.19, No.5, pp.23-26, 2005
- 2) 秦, 寺内, 山本:「鉄道総研クヤR291系」, 鉄道ファン, 通巻549号, 第47巻, 第1号, pp.60-63, 2007
- 3) 山本:「燃料電池試験車(クヤR291)」, 鉄道ピクトリアル「鉄道車両年鑑」, 通巻第795号, 第57巻, 第10号, pp.105-107, 2007
- 4) 「燃料電池発電」, 電気学会 燃料電池運転性調査専門委員会編, p.150, 1994
- 5) 山本:「燃料電池試験電車の開発」, Rolling stock & Machinery, 通巻676号, 第15巻, 第1号, pp.22-25, 2007
- 6) 山本:「鉄道総合技術研究所における燃料電池鉄道車両の開発」, 鉄道車両と技術, 通巻第129号, 第13巻, 第2号, pp.10-13, 2007