

100kW級燃料電池車両の開発

車両制御技術研究部 動力システム

主任研究員 山本 貴光

1. はじめに

現在開発が進められている燃料電池は、再生可能な水素エネルギーを利用し、排気は反応時に生成した水と反応に寄与しなかった空気だけで大変クリーンな電源である。さらにエネルギー変換効率が高いなどの特長を有しており、環境対策や原油などの枯渇系燃料対策としても注目されている。鉄道総研では、この燃料電池の鉄道車両への適用を目指し、2001年度より研究開発を開始した。最初は1kW級燃料電池により電源特性の確認を行い、2004年度には30kW級燃料電池により実際に鉄道車両用台車の駆動試験を行って、燃料電池が鉄道車両駆動用電源として適用可能であることを確認した。これらの結果を踏まえ、2006年度には100kW級燃料電池を試作して試験電車に搭載し、走行試験を実施した。これらの走行結果の概要および燃費・効率について評価を行ったので報告する。

2. 100kW級燃料電池システムの試作

今回試作した燃料電池システムには①低温動作で起動時間が短い、②酸化剤に空気が使用可能、③自動車などの移動体用として実績が多い等の理由により固体高分子型を採用した。固体高分子型は主な用途として定置用と移動体用の開発が行われている。一般的に定置用は長寿命であり、移動体用は変動負荷に強いという特徴があるが、30kW級燃料電池の試験結果から定置用でも鉄道車両に要求される変動負荷に十分対応可能であることがわかった。鉄道車両に適用するためには出力電圧が極力高いことが必要であり、開放電圧として900V程度出力可能な定置用で実績があるNUVERA社製100kW級燃料電池システムを車載用に小型化して導入した。図1にその外観を、表1に主要な仕様を示す。本燃料電池システムは金属セパレータを採用することで低コスト化した。また、DWI (Direct Water Injection) 方式の採用により、冷却方式の簡素化及び加湿装置不要を実現している。また、空気供給装置や水ポンプなどの電源は燃料電池により発電した電力の一部より供給するため、燃料電池システムの運転には外部からの電源供給は不要である。



表1 100kW級燃料電池システム主要仕様

外部出力	120 kW
内部補機電力	30 kW
出力電圧	850~600 V
負荷電流	0~250 A
質量	1.650 kg
寸法	1.65(L)*1.25(W)*1.5(H) m

図1 100kW級燃料電池システム

3. 高圧水素タンクシステムの試作

燃料電池の燃料となる水素は、①ほぼ常温であること、②1MPa未満の低圧であること、③燃料電池が要求する供給速度があること、④99.99～99.999%の高純度であること、等が必要であり、最も容易に満たせる方式として高圧ガスとして蓄える方式を採用した。この高圧水素を蓄える装置として、燃料電池自動車等で実績があるアルミ容器にカーボンファイバーを全周に巻き付けたTypeⅢと呼ばれる容器を使用して、高圧水素タンクシステムを試作した。この装置の外観を図2に、主要仕様を表2に示す。



図2 高圧水素タンクシステム

表2 高圧水素タンクシステム主要仕様

項目	仕様
高圧側最大圧力	35MPa
容器種別	TypeⅢ
容器内容量	180L
タンク構成	4本構成
水素搭載量合計	17.2kg

4. 燃料電池試験電車の構成

2両編成の試験電車のうち、SIVおよび電動空気圧縮機を搭載したクヤR291の車内に100kW級燃料電池システム、燃料電池対応インバータ装置を、床下には高圧水素タンクシステムをそれぞれ搭載した。また、後位側台車を付随台車から電動台車に振り替え、妻側に簡易運転台を設置して1両で走行可能な構成とした(図3)。今回の構成ではSIVの電源は集電装置より供給しているが、主な補助電源負荷装置は空調、室内照明、電動空気圧縮機、制御バッテリー充電回路であり、空気溜めに十分な空気圧力があれば、集電装置を折り畳んでの走行が可能である。主回路構成を図4に示す。



図3 燃料電池試験電車

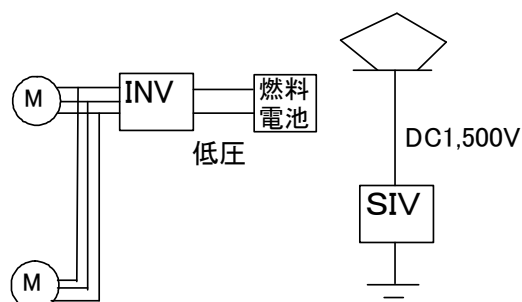


図4 主回路構成

5. 構内走行試験と車両試験台試験結果

4. に示した燃料電池試験電車を使用して構内試験線により走行試験を実施した。試験は構内試験線の始点から終点まで約 650mを往復する走行となる。一部の曲線区間では速度制限があるため、最高速度は 40km/h 程度を計画した。これ以上の速度領域での走行確認については車両試験台で走行模擬試験を行った。本燃料電池試験電車は燃料電池の出力の制約から上述のとおり 1 両編成であり、1 台車 2 モータ駆動で走行試験を実施した。車両質量は空車質量 28,200kg に燃料電池等の機器及び運転・計測員を含めて約 32,000kg となった。図 4 の主回路構成で示すとおり、今回の構成では回生エネルギー吸収及び加速アシストするバッテリー装置等は搭載していない。この構成において加速度を約 1 km/h/sec (速度 20km/h まで) の設定で走行試験を行った結果例を図 5 に示す。この結果から、速度 40km/h 以上で走行可能、燃料電池出力 90 kW 程度まで車両の走行に応じた変動負荷に追従することを確認した。

40km/h 以上の高速での走行特性を確認するため、車両試験台を使用した走行模擬試験を実施した。この車両試験台は、レールに該当する部分が円盤になっており、車両を固定したまま、車輪を回転させて駆動試験を行うことが可能で、実走行を模擬した慣性負荷を設定できる試験装置で①走行距離の制約がない、②最高設計速度は 500km/h、軌間可変で、ほとんどの鉄道車両に対応可能という特徴を有する。車両試験台を使用し、慣性負荷条件はほぼ実車同様の 16 t / 軸の設定とし、試験を行った結果例を図 6 に示す。最高速度は 105km/h であり、この速度でほぼ均衡した。高速域で出力が向上できればさらに速度向上可能と考えられるが、そのためにはインバータ直流電圧を上昇する必要がある。最高出力確認試験では最高 115kW 出力を確認し、変動負荷条件でほぼ仕様上の定格出力を確認した。

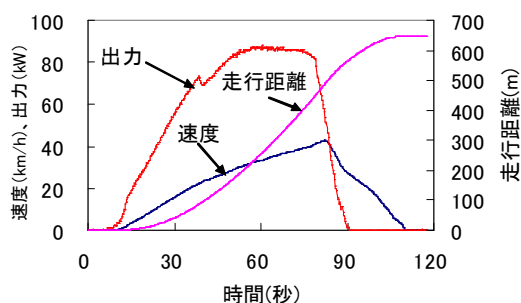


図 5 構内走行試験結果例

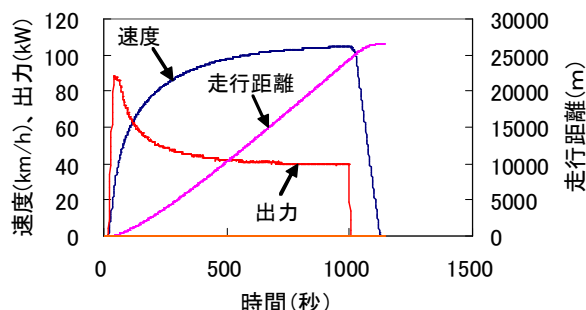


図 6 車両試験台試験結果例

6. 燃費と効率の評価例

代表的な走行における燃費と効率例として、構内走行試験結果例 (図 5) における燃費・効率と車両試験台試験結果例 (図 6) における燃費・効率の評価を行った。これらの計算にはそれぞれ以下の式を使用した。

$$\text{燃料消費率}(km/kg) = \frac{\text{走行距離}(km)}{\text{走行で消費した水素量}(kg)} \quad (1)$$

$$\text{エネルギー変換効率}(\%) = \frac{\text{燃料電池外部エネルギー}(kWh)}{\text{消費した水素の電気的エネルギー}(kWh)} \times 100 \quad (2)$$

これらの式より計算した結果を表3に示す。表3に示す結果から走行で消費した水素量は重要であり、水素量の計測はもとより、圧力変化における圧縮係数や温度補正なども考慮する必要があることがわかる。

表3 燃料電池試験電車の走行における燃費・効率の評価例

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
消費した水素の電氣的エネルギー(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

今回の結果から、エネルギー変換効率はほぼ50%程度以上であり、燃費は7.6~34.6km/kgという値が得られた。ただし、この燃費は補機電力を供給していない条件である。今回の試験ではブレーキ時の回生エネルギーは有効利用できていないが、ブレーキ開始時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の効率を試算した値を表4に示す。なお、計算にあたっては以下の回生エネルギーを考慮した(3)式を使用した。

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

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%程度向上する可能性があることがわかった。

7. おわりに

今回の開発は「鉄道車両用燃料電池システムの開発」と位置付け、2004~2006年度の3年間で100kW級燃料電池の試作、試験電車への搭載及び走行試験を実施した。営業線の車両と比べると出力が小さいため、加速性能等はまだまだ十分では無いが、走行試験等を実施して燃料電池により鉄道車両駆動の可能性があることが確認できた。また、試験結果より一例ではあるが燃費及び効率の評価を行った。2007年度からはエネルギー蓄積システムとのハイブリッド化を行い、回生エネルギーの有効利用や加速電力分担の最適化の開発を行う計画である。

燃料電池の課題としては低コスト化や長寿命化などがあるが、鉄道への適用が燃料電池普及の先駆けとなることを願う。なお、本研究開発の一部は国土交通省からの補助金を得て実施した。