

燃料電池・バッテリーハイブリッド車両のエネルギー効率評価

山本 貴光* 長谷川 均**
古谷 勇真* 小川 賢一*

Energy Efficiency Evaluation of Fuel cells and Batteries Hybrid Railway Test Vehicles

Takamitsu YAMAMOTO Hitoshi HASEGAWA
Takemasa FURUYA Kenichi OGAWA

Fuel cells have been receiving attention as a clean and high efficiency power-supply system. We have been developing a new type of railway vehicle powered by fuel cells in order to replace conventional diesel vehicle in non-electrified areas. We have installed a hybrid system using fuel cells and batteries in our test vehicles and carried out test running in our test track using these vehicles. This paper describes the development of fuel cells and batteries hybrid test vehicles and an evaluation of energy efficiency and fuel consumption rate in this hybrid system.

キーワード：燃料電池，リチウムイオンバッテリー，ハイブリッド，効率向上，燃料消費率

1. はじめに

燃料電池は水素等を燃料として、電気エネルギーと水を生成するクリーンで高効率な電源として開発が注目されている。鉄道総研では、非電化区間を走行するディーゼルカーの置き換えを対象として、また、将来的には電車の代替も視野に入れ、全く新しい駆動源である燃料電池を適用した鉄道車両の開発を行っている。これまでに、鉄道車両駆動用として最低限度の容量である100kW級燃料電池の開発を行い、実際に所内の試験車両に搭載して1両編成での走行試験を実施した。その結果、最高速度42km/hを確認し、燃料電池の発電が鉄道車両走行時の負荷変動に追従できることを確認した¹⁾。しかし、出力が十分でないため、加速性能が低く、回生エネルギーが有効利用できない構成であり、補機電力の供給は架線から行っているなど実用化するまでには多くの課題があった。

今回、バッテリー装置、バッテリー充放電装置、燃料電池・バッテリーハイブリッドモニタ装置を開発し、車載化して上記100kW級燃料電池とハイブリッド化した。これにより、車両加速性能を向上し、回生エネルギーを有効利用し、補機電力もこのハイブリッド電源より供給する構成として、2両編成で走行可能な構成とした。これらの開発内容および走行条件を変更した場合のエネルギー効率や燃費の評価を行ったので以下に報告する。

* 車両制御技術研究部（動力システム）

** 浮上式鉄道技術研究部（電磁力応用）

2. 燃料電池・バッテリーハイブリッドシステムの開発概要

2.1 燃料電池・バッテリーハイブリッド試験電車の仕様等

ハイブリッド化前では主電源が燃料電池のみの構成であり、燃料電池の出力が100kWと1両編成での走行しかできなかったが、今回、燃料電池とバッテリーをハイブリッド構成とすることにより、出力向上して2両編成で走行可能となった。燃料電池・バッテリーハイブリッド構成とした試験電車を図1に、主な仕様を表1にそれぞれ示す。また、ハイブリッド化前と後の変更点とハイブリッド化により想定される効果を表2に示す。

今回のハイブリッド化における編成出力は、将来、代



図1 燃料電池・バッテリーハイブリッド試験電車

特集：車両技術

表1 燃料電池・バッテリーハイブリッド試験電車主要仕様

最高設計速度	100km/h
電源方式	燃料電池・バッテリーハイブリッドDC1500V
燃料電池	固体高分子型 120kW
燃料電池チョッパ装置	昇圧直流電力変換装置 800V → 1500V 600kVA
バッテリー装置	リチウムイオンバッテリー 36kWh 360kW
バッテリー充放電装置	双方向直流電力変換装置 600V - 1500V 360kW
主電動機	三相誘導電動機 95kW × 2 個
水素タンク	TYPE III 35MPa 約 720L

表2 ハイブリッド化前後の変更点と想定される効果

	ハイブリッド化前	ハイブリッド化後
車両数	1 両	2 両
編成出力	最大 120kW	最大 360kW
補機電力	架線より集電	燃料電池・バッテリーハイブリッド構成より給電
回生電力有効利用	不可	最大 360kW まで可
エネルギー効率	約 50%	約 65%
燃費	7km/kg-H ₂ (1 両編成)	5km/kg-H ₂ (2 両編成)

替対象となるディーゼルカー（キハ40型・220馬力）2両編成を考慮して設定した。

2.2 燃料電池・バッテリーハイブリッド構成

燃料電池とバッテリーのハイブリッド構成としては様々な方式が考えられる。代表的な構成を図2に示す。構成Aでは燃料電池やバッテリーに出力制御機能が必要であり、現状では不可能である。構成Bではバッテリーの残存容量により中間電圧（インバータ入力電圧）に変動があり、構成Cでは燃料電池の出力により中間電圧に変動が発生する。構成Dは最も構成機器が多く複雑となっているが従来のDC1500V主回路機器が使用できる。構成Eはパラレルハイブリッド構成であるが、回生ブレーキは1軸分しか動作させることができず、燃料電池からバッテリーを充電することもできない。在来車の主回路システムを準用して燃料電池・バッテリーハイブリッド化する場合は構成Dとする必要がある。これらの構成例についての比較を表3に示す。

鉄道総研では、これらの燃料電池・バッテリーハイブリッド構成の内、使用する主電動機やSIVが架線電圧DC1500V用として製作されたものであることなどから構成Dを採用することとした。鉄道総研の燃料電池・

バッテリーハイブリッド試験車両のハイブリッド構成を図3に示す。

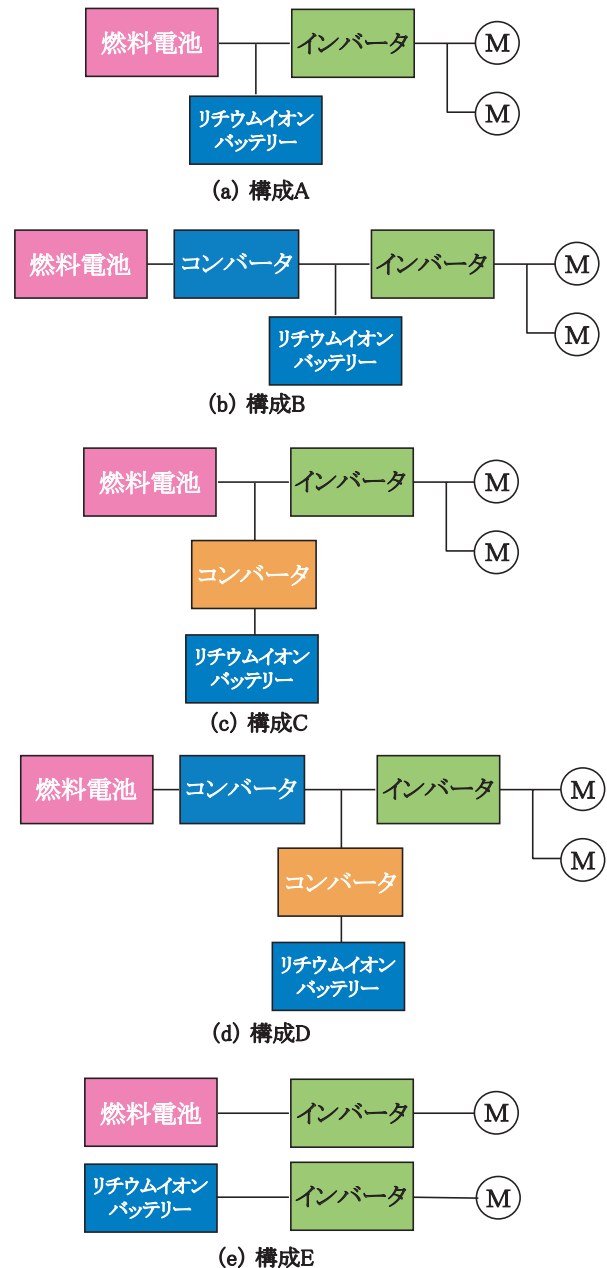


図2 燃料電池・バッテリーハイブリッドの代表的な構成例

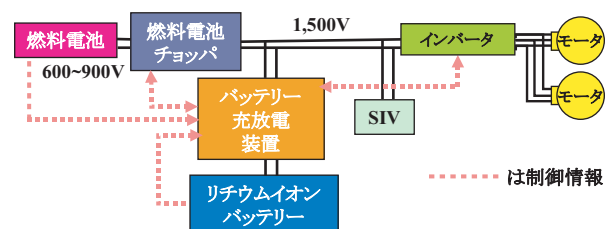


図3 鉄道総研燃料電池・バッテリーハイブリッド試験車両のハイブリッド構成

表3 ハイブリッド構成の比較

構成	中間電圧	出力分担制御	燃料電池からバッテリーを充電	電圧変動
A	DC600V程度	不可	可	有
B	DC600V程度	可	可	有
C	DC600V程度	可	可	有
D	DC1500V程度	可	可	無
E	DC600V程度	可	不可	—

2.3 ハイブリッド用バッテリー装置の開発

ハイブリッド用バッテリーの種類として、近年、高性能化され、信頼性も向上し、コストも低くなりつつあるリチウムイオンバッテリーを採用した。主な仕様を表4に示す。今回採用したバッテリーのモジュール(図4)はHi-tram(鉄道総研が開発した架線・バッテリーハイブリッドLRV)で採用されたものと同寸法、同容量であるが、今回のバッテリーは充電・放電の両方向に対して10C(C:バッテリーの電流量に対する倍率)程度の大電流を流すことを考慮した特性としている。電気的な構成としては168セル分を直列にしたものを2並列とした。夏場などでバッテリー温度が上昇することを考慮して架台に冷却ファンを設置し、温度センサにより運転を制御する。各セルに監視基盤を設置し、セルのアンバランスを調整するとともにセル電圧情報をバッテリーモニタ装置に伝送する機能を有するバッテリーモニタ装置では最高セル電圧、最低セル電圧、平均セル電圧、電流、バッテリー残存容量(SOC: State Of Charge)、故障情報、モジュール毎の温度情報などを群(並列)単位で確認することができる。バッテリーの容量は回生電力360kWが吸収可能であることを条件として60Ah(36kW/600V/10C)を選定した。



図4 リチウムイオンバッテリーのモジュール (内部に8セル内臓)

表4 ハイブリッド用バッテリー装置の主な仕様

バッテリーの種類	リチウムイオンバッテリー
電圧	定格 604.8V 変動範囲 504 ~ 705.6V
容量	60Ah (30Ah × 2 並列), 36kWh
充放電可能電力	360kW
セル構成	1モジュール8セル構成 × 42モジュール, 336セル (168セル直列×2並列)

2.4 ハイブリッド用バッテリー充放電装置の開発

バッテリーをハイブリッド構成で使用するに当たり、電力制御と電圧レベルを600V⇄1500Vに変換する目的でバッテリー充放電装置の開発を行った。バッテリー充放電装置を図5に、主な仕様を表5に示す。

本バッテリー充放電装置は定置において架線電圧を補償するバッテリーポスト用として開発されていたものを車載型に応用した。バッテリーの充放電に対応するため、双方向型としている。今回は機能確認に主眼をおいたため、ハード構成については定置仕様そのままとしたが、将来の実用化においては車載型に専用設計することにより軽量化が可能である。今回のハイブリッド構成では、図3に示した燃料電池、燃料電池チョップ装置、リチウムイオンバッテリー装置、インバータ装置などから制御情報をバッテリー充放電装置に集約して制御を行うこととした。これは燃料電池チョップ装置より取り扱う電力が大きいため、本装置で電力制御を行った方が合理的と考えられるからである。実用化時にはハイブリッド制御部のみ独立にすることも考えられる。



図5 ハイブリッド用バッテリー充放電装置

表5 ハイブリッド用バッテリー充放電装置の主な仕様

主回路方式	双方向DC/DCコンバータ
最大電力	充・放電とも360kW
電圧	低圧側500~720V, 高圧側1500V
質量	2,400kg
大きさ	4.5(L) × 1.0(W) × 1.65(H) m

特集：車両技術

2.5 ハイブリッド関係機器の車両搭載

100kW級燃料電池システム、高圧水素タンクシステムおよび上記に示したハイブリッド用に新たに導入した機器等の機器配置を図6に示す。本構成では、鉄道車両への実装を考慮した小型・軽量化やぎ装に関する検討を考慮しておらず、ハイブリッド機能確認を優先した。そのため、高圧水素タンクシステム以外のハイブリッド用機器は客室に搭載した。

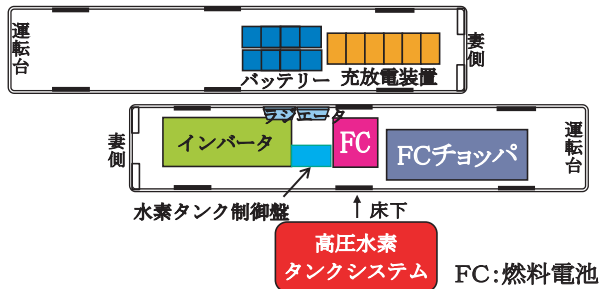


図6 ハイブリッド関係機器の車両搭載状況

2.6 ハイブリッドモニタ装置の開発

燃料電池・バッテリーハイブリッド構成において電力の流れを確認でき、各装置の出力状況を時系列で記録することが可能な燃料電池・バッテリーハイブリッドモニタ装置を開発した。画面の例を図7に示す。本装置はモニタ・記録機能の他、リチウムイオンバッテリー装置とRS485（1対の信号ラインに最大32台の装置を接続できるマルチドロップによる通信方式）によるデジタル通信を行っており、計測用にバッテリーSOCをアナログ出力可能で、バッテリーの内部抵抗の計算と寿命状況評価機能を付加した。

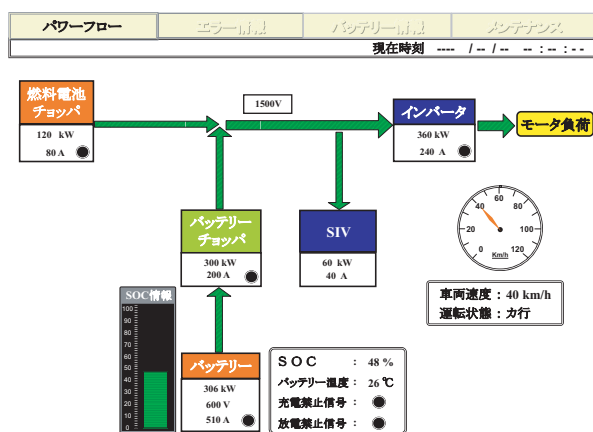


図7 ハイブリッドモニタ装置の画面例

3. 燃料電池・バッテリーハイブリッド制御方法

3.1 燃料電池・バッテリーハイブリッド制御方針

インバータ、リチウムイオンバッテリー、燃料電池、燃料電池チョップパ装置からバッテリー充放電装置が制御情

報を受け取り、リチウムイオンバッテリーの充放電制御および燃料電池チョップパ装置の出力制御を行うことでハイブリッド制御を行っている。

リチウムイオンバッテリーの充放電制御は、燃料電池チョップパ装置の出力、バッテリー充放電装置の出力、インバータの入力およびSIVの入力が接続されている高圧電圧を制御目標としており、この値が1500Vより高ければリチウムイオンバッテリーの充電を行い、低ければ放電を行う。

燃料電池チョップパ装置の出力制御は、リチウムイオンバッテリー装置から送られてくるSOC信号（以下、バッテリーSOC）に対して、充電目標SOC（CEO、停止中は70%）と放電目標SOC（CSO、停止中は60%）の間となるように制御される。また、バッテリーSOC信号がCEOとどれだけ離れているかに応じて燃料電池チョップパ出力信号の値を制御している。速度5km/h以上は走行中と認識し、速度に応じた回生電力が受け入れられるようにCEOとCSOを下げる制御を行っており、その結果、走行中のバッテリーSOCは停止中より低い状態となる。これらの制御により、バッテリーSOCが十分高い状態で走行を開始すると加速はバッテリーからのみ電力が供給される場合もある。

今回のCEO、CSOの設定に当たっては、最大回生時にその電力を受け入れ可能なSOCの最大値に若干の余裕をもってCEOを70%とした。CSOはSOC信号の補正や負荷電力変動によるSOC信号の変動があってもハンチングを起こさないようにCEOより10%下げた60%とした。今回の仕様である360kWの負荷に対してはバッテリーSOCが30%の状態から走行を開始しても速度45km/hまで問題無く放電可能であった。

なお、上記のCEO、CSOおよびバッテリーSOCとCEOの差による燃料電池チョップパへの出力制御に関する設定値はバッテリー充放電装置において変更可能としている。

3.2 インバータ装置のハイブリッドに対応した改良点

安定した電源により常時電源が保証されていれば問題無いが、ハイブリッド構成においては異常時に負荷を軽減する等の機能がインバータ装置に必要となる。本構成においては以下の機能を追加した。

- ① バッテリー過充電予告信号受信時には回生動作中であれば回生動作を中止する。
- ② バッテリー過放電予告信号受信時には力行中であれば力行ノッチを2ノッチ（燃料電池のみでも出力可）以下に制限する。
- ③ インバータ入力電圧低下時にはインバータ入力電圧がDC1500V程度に回復するまで負荷を低減する。

3.3 実走行試験結果例による制御の確認

上記ハイブリッド制御により実際に走行した結果例を

図8に示す。まず最初に、停車中は次の走行を控えバッテリーSOCを60%以上にするように燃料電池チョッパ出力を制御している。加速を開始して走行中を認識すると、回生電力が戻ってくることを想定して速度とバッテリーSOCに応じて燃料電池チョッパ出力を低減させる制御を行う。だ行では速度に応じた目標バッテリーSOCと実際のバッテリーSOCの差により燃料電池出力が制御される。回生ブレーキ指令が入ると燃料電池チョッパ出力は最低出力まで絞られるが、まだ十分回生電力が発生していない一瞬の間はバッテリーから放電される。その後、回生電力が発生し、補機電力の供給とバッテリー充電に使用される。回生動作が終了し、速度5km/h以下で停車を認識すると、その後の回生電力をバッテリーに充電することが期待できなくなるため、燃料電池チョッパ出力を上昇させて、バッテリーSOCを十分高い値に充電する制御となっている。

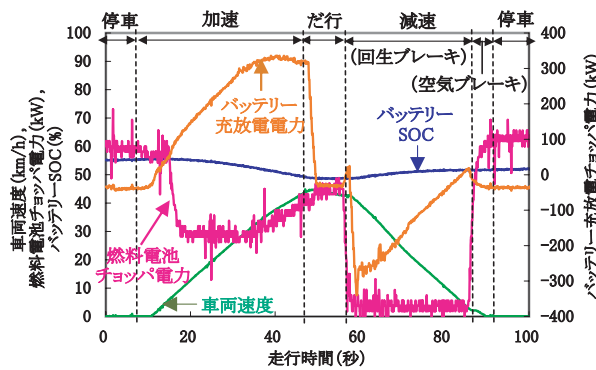


図8 ハイブリッド走行試験結果例

4. 燃料電池・バッテリーハイブリッド構成による燃費と効率の評価

鉄道総研内の構内試験線にこれまでに示した燃料電池・バッテリーハイブリッド試験電車を走行させてその試験結果より、燃費と各種効率の評価を行った。この試験線では走行距離が615m程度と短いため、営業線と比べてだ行走行区間が非常に短い。また、折り返し運転となり、踏切警報時間確保のため停車時間が少なくとも1分以上必要となる条件であるため、停車中の補機エネルギーが大きくなる傾向がある。このため表定速度（停車時間も含めた平均速度）が低く、燃費が低くなる傾向がある。

これまで述べてきた構成や制御においても燃費や効率の評価は走行方法や補機電力の大小により大きく変化すると考えられる。以下には走行方法を1走行毎にバッテリーSOCの復帰を待つ場合と待たずに走行する場合の比較および補機電力として空調（1両分のみ）をONした場合とOFFの場合にどの程度の差が発生するか評価を行った。

4.1 補機電力が小さい条件（空調OFF）における燃費と各種効率の評価

空調OFF条件で1走行毎にSOCの復帰を待って連続走行試験を行った（条件1）結果を図9に、SOCの復帰を待たずに行った連続走行試験（条件2）の結果を図10に示す。SOCの復帰を待つ場合は燃料がある限り継続可能であり、SOC初期値を60%とするため、今回は30走行を行った内の最初の1走行を削って評価を行った。SOCの復帰を待たない連続走行では、走行に伴いSOCが減少していくため、通常走行が可能と確認されている30%を下回った時点で走行終了とした。SOC60%から22走行が可能であった。

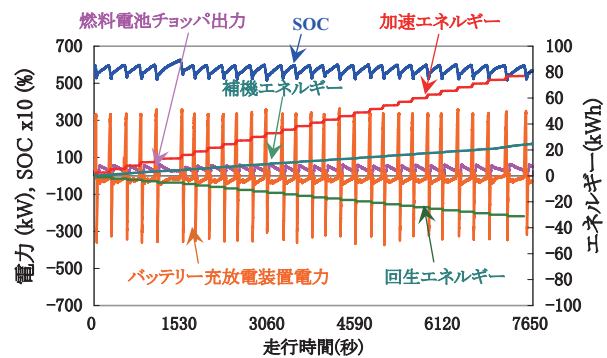


図9 空調OFF・SOC復帰を待った（条件1）連続走行試験結果

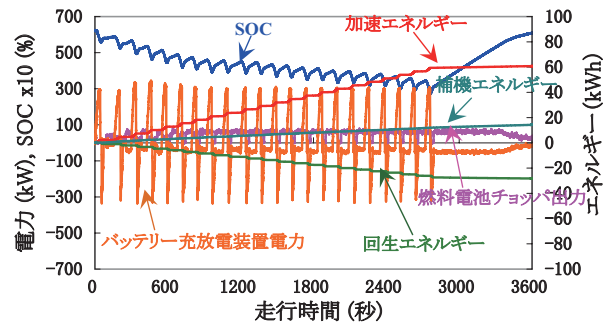


図10 空調OFF・SOC復帰を待たない（条件2）連続走行試験結果

これらの走行について以下に燃費および各種効率の評価を行う。なお、それぞれの評価については以下の式として定義した。

$$\text{燃費(km/kg-H}_2\text{)} = \frac{\text{走行距離(km)}}{\text{消費した水素量(kg)}} \quad (1)$$

$$\text{燃料電池変換効率(\%)(net)} = \frac{\text{燃料電池出力エネルギー(kWh)}}{\text{消費した水素のエネルギー(kWh)}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{回生効率(\%)} = \frac{\text{回生エネルギー(kWh)}}{\text{加速エネルギー(kWh)}} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{車両エネルギー効率(\%)} = \frac{\text{A+B-C(kWh)}}{\text{消費した水素のエネルギー(kWh)}} \times 100 \quad (4)$$

特集：車両技術

ここで、A:加速エネルギー、B:補機エネルギー、C:走行前後のバッテリーSOCの違いによるバッテリー放電エネルギー、消費した水素のエネルギーはLHV(237.3kJ/mol)換算である。

条件1,2について燃費の評価を表6に、走行試験結果における各種エネルギーを表7に、各種効率を表8にそれぞれ示す。

表6 空調OFF条件における燃費の評価

条件	空調	SOC復帰	走行距離(km)	消費水素(kg)	燃費(km/kg-H ₂)
1	OFF	待つ	17.9	5.04	3.55
2	OFF	待たない	13.4	3.08	4.34

表7 空調OFF条件における各種エネルギー測定結果

条件	加速エネルギー	補機エネルギー	回生エネルギー	SOC放電エネルギー*	水素エネルギー**
1	82.4	25.9	33.3	1.7	164.7
2	60.8	14.5	28.4	0.0	100.6

* 走行前後のバッテリーSOCの違いによるバッテリー放電エネルギー
 **消費した水素の(LHV)換算エネルギー、エネルギーの単位は(kWh)

表8 空調OFF条件における各種効率

条件	燃料電池効率%	回生効率%	車両エネルギー効率%
1	49.8	40.4	64.7
2	50.5	46.7	74.8

4.2 補機電力が大きい条件(空調ON)における燃費と各種効率の評価

空調ON条件(1両のみ)でSOCの復帰を待たずに行った連続走行試験(条件3)の結果を図11に示す。SOC60%から走行を行い、SOC30%を切るまで16走行可能であった。

条件3における燃費の評価を表9に、走行試験結果における各種エネルギーを表10に、各種効率を表11に示す。

今回の条件では補機エネルギーの割合が比較的少ない条件2が燃費および車両エネルギー効率が比較的高く、燃料電池効率はどの条件でもほぼ50%程度であった。条

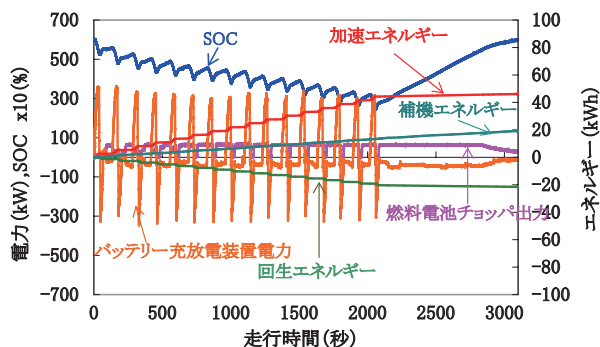


図11 空調ON・SOC復帰を待たない(条件3)連続走行試験結果

表9 空調ON条件における燃費の評価

条件	空調	SOC復帰	走行距離(km)	消費水素(kg)	燃費(km/kg-H ₂)
3	ON	待たない	9.7	2.97	3.27

表10 空調ON条件における各種エネルギー測定結果

条件	加速エネルギー	補機エネルギー	回生エネルギー	SOC放電エネルギー*	水素エネルギー**
3	46.2	19.3	21.6	0.0	97.1

* 走行前後のバッテリーSOCの違いによるバッテリー放電エネルギー
 **消費した水素の(LHV)換算エネルギー、エネルギーの単位は(kWh)

表11 空調ON条件における各種効率

条件	燃料電池効率%	回生効率%	車両エネルギー効率%
3	49.8	46.7	67.4

件2と条件3では空調のON・OFFの違いであるが、燃費として1.07km/kg-H₂、車両エネルギー効率で7.4%の違いが見られた。SOCが30%を切ってから60%程度まで復帰させる時間は条件2では12分程度、条件3では15分程度であった。また、条件1で1走行毎にバッテリーSOCを復帰するのに要した時間は約3分であった。参考までに本試験電車に搭載している高圧水素タンクには約17kgの水素を搭載しており、条件1~3の燃費では1充填で55~74km程度(2両編成)の走行が可能と考えられる。

5. まとめ

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により2両編成での走行試験を行い、バッテリーSOCを走行毎に一定(60%)に復帰させる走行と復帰を待たない走行において燃費および各種効率の比較を行った。その結果、復帰を待たない走行の方が燃費で0.79km/kg-H₂、車両エネルギー効率で約10%良いという結果が得られた。また、空調ON・OFFの影響としては燃費で約1km/kg-H₂、車両エネルギー効率で約7%の違いがあることを確認した。営業線走行ではこれらの値はさらに向上されると考えられるが、車両エネルギー効率は当初想定どおり、65%という非常に高い値であることが確認できた。今後さらに実用化に向けて、機器の小型化の検討や燃料電池の寿命確認を行っていく。

文献

- 1) 山本, 古谷, 米山, 小川:「燃料電池試験電車の構内走行試験等による燃費および効率の評価」, 鉄道総研報告2008年2月号, pp53-58