

2306 リチウムイオン二次電池搭載のエネルギー回生型トラム

Energy Re-cycling Tramcar Using a Rechargeable Lithium Ion Battery

正[電] ○鮫島 博 (鉄道総研) 正[電] 小笠 正道 (鉄道総研)

正[電] 山本 貴光 (鉄道総研)

Hiroshi SAMESHIMA, Railway Technical Research Institute 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji-shi
Masamichi OGASA, Railway Technical Research Institute
Takamitsu YAMAMOTO, Railway Technical Research Institute

Various methods have been studied recently to save energy consumption in electric railway system. In particular, regenerative brake system has made a contribution to economize a great deal of energy consumption for about thirty years. However, the regenerative brake system in electric railway vehicles has a lot of issues, like as regeneration cancellation by wheel slide and trolley voltage condition, decrease of electric braking force in high speed range, and restriction of regenerative power determined by impedance of power supply circuit.

In order to utilize and re-cycle braking energy and secure steady regenerative load, we selected lithium ion battery as electric energy storage equipment, and developed a rechargeable lithium ion battery (600V system) for electric railway vehicles. The developed battery has a superior performance as high energy and power density, high efficiency, 500A charge-and-discharge current, long cycle life, and less loss and maintenance work.

In this report, we show an energy re-cycling trolley-less tramcar using the rechargeable lithium ion battery as on-board energy storage equipment, and show results of the tramcar performance and the developed battery characteristics.

Keywords: energy storage equipment, braking energy, rechargeable lithium ion battery, tramcar, regenerative ratio

1. はじめに

昨今、地球温暖化やエネルギー資源枯渇などへの対応として、省エネルギー化が盛んに叫ばれており、各分野で様々な研究・検討が行われている。

電気鉄道システムでは、これまで積極的に省エネルギー化を推進してきた。車両、き電、運転など鉄道システム全体の観点から種々の方策を実現しており、運転制御方法の効率化、車体の軽量化、車両の走行抵抗低減、運転制御方法の効率化、き電抵抗の低減、電力回生ブレーキ・ベクトル制御インバータ採用などが主なものである。

特に、ブレーキ時の電力回生については、電気車が架線を媒介として他の電気車にパワーを融通できる電気鉄道システムの特徴を活かして、30年以上前から実用化されており、エネルギー消費量低減に大きく貢献している。一方、電力回生ブレーキのさらなる性能向上のためには、き電条件や滑走による回生失効の発生、高速域における電気ブレーキ力の低下、き電抵抗による車両側回生可能パワーの制限など、新たな課題に対応していかなければならない¹⁾。これまでは、回生ブレーキの安定動作に向けた地上側の対応として、フライホイールや回生吸収インバータの設置が行われてきた。最近では、電気二重層キャパシタ^{2),3)}、車両用フライホイール⁴⁾、二次電池⁵⁾といった電力貯蔵媒体に関して、地上および車両の両面から数多くの検討がなされている。

我々は、エネルギー貯蔵媒体として、リチウムイオン二次電池に着目し、鉄道車両搭載に向けた75Vシステム電池の開発、繰り返し充放電試験による電池の特性把握を行った⁶⁾。試験結果より、鉄道車両搭載に向けて目途がたったため、今回、鉄道車両搭載に必要な300kW級(600V-500A)のリチウムイオン二

Table 1 Specifications of the Developed Battery System

公称容量(C)	55Ah
公称電圧	604.8V (3.6V×168セル)
定格電圧	705.6V (最大充電電圧)
	504.0V (最小放電電圧)
最大充放電電流	500A
寸法	W960×H1000×D900mm(84セル)×2
質量	580kg(84セル)×2(架台枠含む)

次電池システムを新たに開発した。

本稿では、豊橋鉄道殿から譲り受けた路面電車に上記300kW級リチウムイオン二次電池システムを搭載して、車両性能、電池特性を確認した結果を、以下報告する。

2. リチウムイオン二次電池

<2.1 リチウムイオン二次電池の特徴>

リチウムイオン二次電池は、他の二次電池と比較して内部抵抗が小さく高率充放電が可能、エネルギー密度や充放電効率が低い、メモリ効果がない、サイクル寿命が長い、メンテナンスが容易など、優れた特徴を有している⁵⁾。また、他の二次電池に比べて単セル電圧が高いため、高電圧化が容易である。

従って、大容量、小型・軽量、省メンテナンス性など鉄道車両に搭載する機器としての要求を満足しながら、省エネルギー化を実現する車上搭載用の電力貯蔵媒体として、リチウムイオン二次電池は極めて有効である。

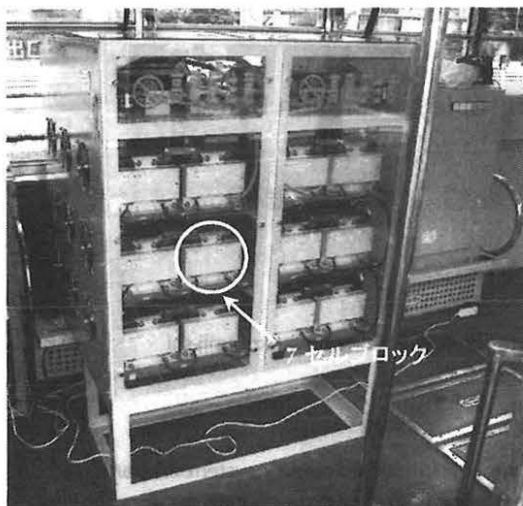


Fig.1 Lithium Ion Battery System (84cells)



Fig.3 Battery Tramcar

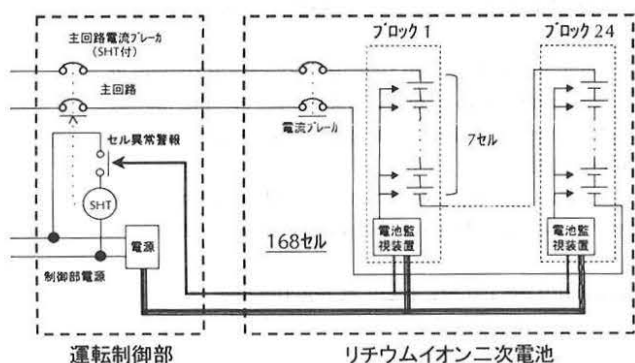


Fig.2 Block Diagram of the Lithium Ion Battery System

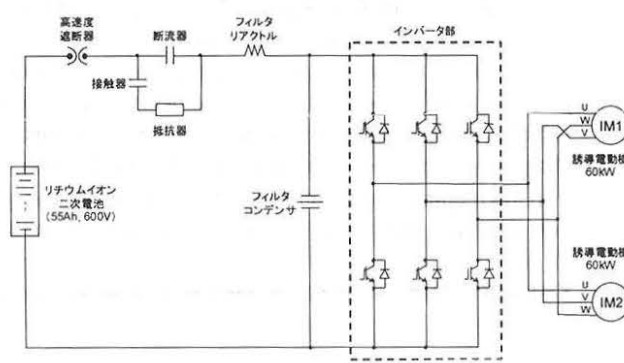


Fig.4 Traction Circuit of the Tramcar

Table 2 Specifications of the Battery Tramcar

車両質量	19,700kg
駆動電源	リチウムイオン二次電池
制御方式	VVVF インバータ制御 (180kW) 速度センサレスベクトル制御
駆動方式	吊掛式
主電動機	誘導電動機 (60kW×2)
加速度	3.0km/h/s
減速度	3.4km/h/s (回生最大)
ギヤ比	5.77 (75:13)
車輪径	720mm
補助電源	鉛蓄電池 (DC100V:160Ah)

<2.2 開発リチウムイオン二次電池システム>

今回、エネルギー貯蔵媒体として、鉄道車両用 300kW 級 (600V-500A) のリチウムイオン二次電池システムを開発した。開発電池システムの主要諸元を Table1 に、外観を Fig.1 に、またシステムブロック図を Fig.2 に示す。

本電池は、55Ah の公称容量 (Capacity: 以下 C とする) で、公称容量の約 10 倍の充放電電流 (500A) を実現しており、大エネルギー容量と急速充放電特性という鉄道車両用として必要な両方の特性を備えている。また、電池単体としての充放電効率は約 98% (1CA 充放電時) であり、他の電力蓄積媒体と比較すると極めて高い。

本 300kW 電池システムは、セルを 168 個直列に接続した構

成で、システム質量は約 1,200kg (セル質量: 605kg (168 セル)) である。セルの配置に関しては、7 セルブロックを 2 個横並びに配置し、縦方向に 3 段積み上げたものを 1 モジュール (42 セル) としている。全体システムは 4 モジュールからなり、Fig.1 は 2 モジュール分を示している。

なお、本電池システムには電池の温度上昇時を考慮してファンを搭載しており (2 モジュールあたり吸気用 9 台、排気用 9 台)、それぞれ最大風量は 4.5m³/min である。

本システムは、電池監視装置により、各セルごとの電圧のアンバランス調整、セル電圧・温度、機械的変形の監視を行っている。システムに何らかの異常が発生した場合は、監視装置からの信号により主回路電流ブレーカにて保護動作を行う。

3. エネルギー回生型トラム

本トラムの主要諸元を Table2 に、外観を Fig.3 に、主回路図を Fig.4 に示す。

本車両は、豊橋鉄道から譲り受けた路面電車 (昭和 36 年竣功) を改造したもので、車内にリチウムイオン二次電池及び VVVF インバータを搭載し、併せてパンタグラフの撤去、電動機の吊り替えを行った。

主電動機は誘導電動機 (1 時間定格 60kW×2 台) を用いており、1 台のインバータで駆動している。また、駆動方式は吊掛式である。駆動用の電源は、リチウムイオン二次電池のみであり、架線からのエネルギー供給、架線へのエネルギー回生は行っていない。従って、力行時は電池から放電することで、電動機を駆動し、一方ブレーキ時はエネルギーを全て電池に充電する。ブレーキについては、空気ブレーキ系も搭載しているが、

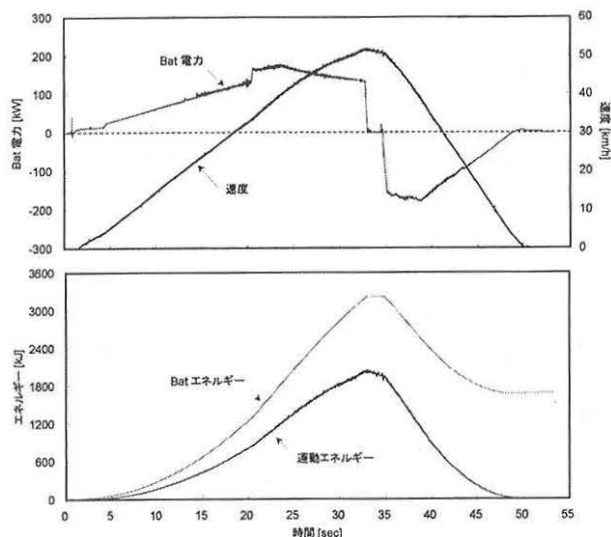


Fig.5 Running Test Result (Power and Energy: 50km/h)

走行試験では全速度域において電気ブレーキ(電気停止ブレーキを含む)のみを力行時と同様の速度-トルクパターンで作用させており、電空ブレンディングは行っていない。

補助電源装置に関しては、鉛蓄電池(160Ah)を搭載しており、制御回路、計測器、照明、空気圧縮機などの電源として使用している。

4. 試験結果

今回、エネルギー回生型トラム車両の性能およびリチウムイオン二次電池の特性を確認し、路面電車としての実現可能性を評価するために、構内試験線にて走行試験を実施した。以下に、試験結果を述べる。

<4.1 基本試験パターンでのエネルギー回収率>

Fig.5は、「速度50km/hまでの力行」-「惰行(2sec)」-「ブレーキ(回生最大)」の基本試験パターンでの走行試験結果で、Bat端子での電力、エネルギー、車両速度、車両運動エネルギー(等価慣性質量含む)を示している。

最大電力は、力行時 174.4kW、ブレーキ時 176.6kW となっており、Batの定格電力300kWに対して余裕がある。

エネルギーに関しては、加速に要したエネルギー(以下、加速エネルギーとする)が 3214.7kJ、ブレーキかけ始めの運動エネルギー(以下、ブレーキ時運動エネルギー)は速度 49.9km/h 時で 2085.1kJ、回収エネルギーは 1535.8kJ であった(実使用エネルギーは 1679.1kJ)。従って、上記試験パターンにおけるエネルギー回収率は、加速エネルギーに対して 47.8%、ブレーキ時運動エネルギーに対しては 73.7%である。他の試験においても、ほぼ同等のエネルギー回収率を実現していた。

なお、基本試験パターンでの走行による放電深度(DOD: Depth of Discharge)の変動幅は、力行時 2.62%、ブレーキ時 1.18%であった。

<4.2 路面電車模擬走行試験>

今回開発したエネルギー回生型トラムを路面電車に適用した場合を考慮し、路面電車の走行パターンを等価的に模擬した試験パターンによる繰り返し走行試験を実施した。試験の初期条件として、電池の充電深度(SOC: State of Charge)はほぼ100%に近い状態(電池電圧 683V)としている。

(1) 試験走行パターン

走行パターンは、「速度 40km/h までの力行」-「惰行」-「ブ

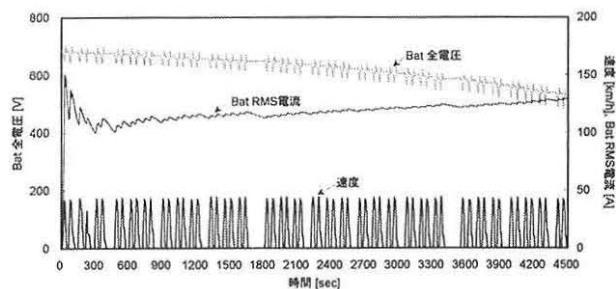


Fig.6 Voltage-and-Current Characteristics of the Battery

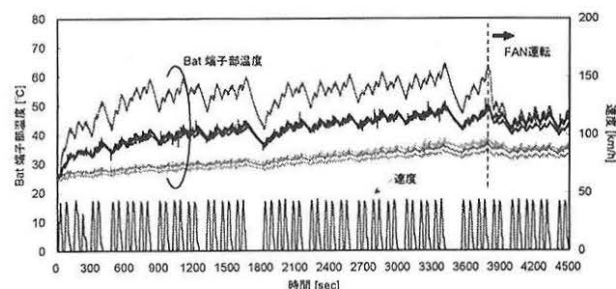


Fig.7 Temperature Characteristics of the Battery

レーキ(回生最大)」で、1回あたり約 250m の走行距離である。また基本的に停車時間は 10~20sec に設定したが、乗降客の多い駅を設定するために、6 走行に 1 回 60sec 停車とした。さらに、路線の折り返しを想定して、24 走行ごとに 150sec の停車時間を設けた。

電池電圧を監視しながら上記走行パターンを繰り返し、放電可能な電圧範囲を下回った時点で試験終了とした。なお、試験パターンにおいては、構内試験線の長さ、線路形状などの制約から、複雑な試験パターン実施が困難であったため、想定駅間距離が短い、信号待ちの状況は考慮していないなど、通常の路面電車が走行する路線の実態と若干異なる点がある。

(2) 電池電圧、電流特性

前節で述べた試験パターンで繰り返し走行を行った時の電池電圧および電池の RMS 電流を Fig.6 に示す。

電池の全電圧は、繰り返し走行とともに 683.1V から 530.6V へと約 150V 低下しており、電池の SOC が減少していることが分かる。また、電池電圧が低くなるにつれて、1 回の走行による電池電圧の低下割合が大きくなっており、リチウムイオン二次電池の定電流放電時の SOC 特性と同様の傾向を示している。

電池の RMS 電流については、概ね 120~130A の範囲で推移しているが、走行回数の増加による電池電圧の低下とともに、上昇傾向にある。1 走行あたりの車両の消費電力量は、走行回数によらず毎回ほぼ同一であるが、電池電圧が低下したことにより電流が増えることで、車両として瞬時所要電力を補うため、RMS 電流が増加したと考えられる。

(3) 電池温度特性

Fig.7 は、繰り返し走行試験による電池端子渡りバー部(熱電対にて測定)の温度推移を示している。温度の測定部位は、Fig.1 に示した 2 モジュール(84 セル)のうち、左側のモジュール中段で 1 箇所(奥行方向中央)、右側のモジュールでは、上段で 1 箇所(奥行方向中央)、中段で 3 箇所(奥行方向手前 1 箇所、中央 2 箇所)、下段で 1 箇所(奥行方向中央)である。

Fig.7 に示す温度のうち、最も高い部位は放熱が困難な傾向にある右側モジュール中段中央部で、48 走行後約 63°C (上昇値としては 37K)まで上昇した。また、各部位とも 48 走行時点で依然として、温度は飽和していない。一方ファンの運転を開始

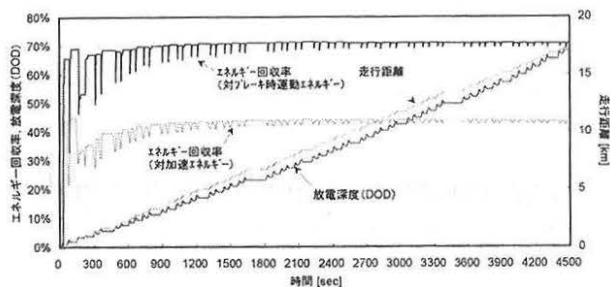


Fig.8 Regenerative Ratio, DOD, and Running Distance

Table 3 Results of the Running Test

走行時間	1 時間 15 分
放電深度 (DOD)	68.2%
走行距離	17.4km
加速エネルギー	37.5kWh
ブレーキ時運動エネルギー (累積)	22.8kWh
実消費エネルギー	21.1kWh
回収エネルギー	16.4kWh
エネルギー回収率 (対加速エネルギー)	43.3%
エネルギー回収率 (対ブレーキ時運動エネルギー)	70.6%

した 52 走行後以降は、最も高い部位においても、温度は 50℃ 以下となり、ファンによる約 10℃ の温度低減効果を確認した。

今回のリチウムイオン二次電池システムでは、設置スペースの制約から、縦方向に 3 段積みの構成としたが、温度上昇の観点からは、放熱が容易な平らなモジュール構成が望ましいと考える。機装スペースとの兼ね合いではあるが、今後検討の深度化を図っていきたい。

(4) 走行距離およびエネルギー回収率

今回実施した路面電車走行を模擬したトラムの繰り返し走行試験において、測定した電池の電圧・電流、速度から、消費電力量、エネルギー回収率、電池の DOD、走行距離を算出した。結果を Fig.8, Table3 に示す。

今回の試験では、全体で 1 時間 15 分、62 回パターン走行を実施し、Bat 電圧は約 150V 減少、DOD は 68.2% 増加した。その間の走行距離は 17.4km であった。リチウムイオン二次電池の寿命を考慮し、電池の充電方法を詳細に検討する必要があるが、満充電の状態からならば、約 15km 程度の路線を途中で充電することなく走行させることが可能である。Fig.8 において、試験回数の増加による電池電圧の低下とともに、DOD の増加割合が増しているが、試験後半において電池の充放電電流が増えたことで、充放電に伴う損失が増加したためと考えられる。

エネルギー回収率は、加速エネルギーに対しては約 43.3%、ブレーキ時運動エネルギーに対しては約 70.6% であった。エネルギー回収率に関しても、試験後半で電池の充放電電流が増えたため、損失が増加し、エネルギー回収率の低下が確認できる。なお、今回の模擬走行パターンでは、1 回の走行における平均加速エネルギー、ブレーキ時運動エネルギーは、それぞれ約 0.6kWh、約 0.37kWh である (DOD の変動幅から考えると、1~2% の範囲内である)。

トラムは、駆動方式が吊掛式であったこと、構内試験線のほとんどが曲線区間であったことなど、車両の走行抵抗が極めて大きかった。今後トラムの走行抵抗を低減することで、エネルギー回収率の向上、走行距離の延長が可能であると考えられる。

5. まとめ

今回、車両のエネルギー蓄積媒体として以下のような特徴をもつ 55Ah-300kW 級のリチウムイオン二次電池を開発した。

■ 電流 1CA の充放電時のエネルギー効率 98% 以上

■ 約 10CA (500A) の電流での充放電が可能

また路面電車に上記電池システムを搭載し、エネルギー回生型架線レストラムとして、駅間距離約 250m ほどの模擬パターンによる走行試験を行った。走行試験結果は以下の通りである。

■ エネルギー回生型架線レストラムとして、性能的には走行可能なことを確認した。

■ エネルギー回収率は加速エネルギーに対して約 43%、ブレーキ時運動エネルギーに対しては約 71% を実現した。

■ 試験終了までの電池の放電深度は 68.2% に達し、走行距離は 17.4km であった。

■ 試験回数の増加による電池電圧の低下→電池の充放電電流増加→損失増加により、エネルギー回収率が約 1% 程度低下した。

■ 温度が最も上昇した部位は、電池システム中段中央部で 48 走行後の温度上昇値は 37K である。また他の部位も含めて 48 走行時点では、温度は飽和していない。

■ 電池システムに取り付けているファンの運転により、約 10K の温度低減効果を確認した。

6. あとがき

架線レスシステムにおいては、

■ 負荷に起因する回生失効がない。

■ 離線がなく、インバータ等の機器、主回路素子の耐圧を低減できる可能性がある。

■ 架線設備の保守低減が可能

■ 都市景観向上

などの特長を有しており、本稿では以上のような特長をいかした架線レストラムの可能性を示した。

しかしながら、路面電車の走行抵抗、設置スペースを考慮した電池システムのハードウェア構成、電池の寿命、価格、車両・地上での充電設備など、今後いくつかの課題に対して十分な検討を行う必要がある。高性能蓄電媒体搭載の「架線ハイブリッド電車」と併せて、継続して開発を行ってきたい。

参考文献

- 1) 小笠：回生ブレーキとエネルギー、鉄道車両と技術、No.78, pp.10~19, 2002
- 2) 土岐、高原、山田：鉄道車両回路における電気二重層キャパシタ直列接続の検討、平成 15 年電気学会産業応用部門大会、III-179~182, 2003
- 3) 小西、長谷、中道、奈良、上村：EDLC と蓄電池を併用した電気鉄道用電力貯蔵装置の基礎試験、平成 15 年電気学会産業応用部門大会、III-183~186, 2003
- 4) 川口、小笠、近藤、高門、松村：大型ハイブリッド車用すべり軸受式フライホイール蓄電装置の概要、平成 15 年電気学会産業応用部門大会、II-523~526, 2003
- 5) 岡崎、西山、山野：リチウムイオン電池による電力貯蔵システムの電気鉄道への応用検討、電気学会交通・電気鉄道研究会資料、TER-02-34, pp.31~36, 2002
- 6) 鮫島、小笠、山本、岡崎、西山、瀬山：鉄道車両搭載に向けたリチウムイオン二次電池の特性、平成 14 年鉄道連合技術シンポジウム J-Rail2002, pp.183~186, 2002