

鉄道用強制空冷式リチウムイオン電池モジュール 「LIM30H-8R」の開発

Development of Forced-air-cooling Lithium-ion Battery Module "LIM30H-8R" for Railway Applications

瀬山幸隆* 中本武志* 西山浩一* 園田輝男*

Yukitaka Seyama Takeshi Nakamoto Koichi Nishiyama Teruo Sonoda

Abstract

Forced-air-cooling lithium-ion battery module "LIM30H-8R" has been developed for railway applications. This battery module with series-connected 8 cells of 30 Ah class LIM30H type cell has wind tunnel structure for good cooling performance, and the continuous rating of current effective value defined as square mean value of charge and discharge current is 100 A ($3.3 I_t$ A). At that value of 140 A of charge and discharge test corresponding to rated current at the condition of end of life to maintain the power by compensating the increase of the battery internal resistance reaching to the provisional criteria twice as initial value, the highest surface temperature was 42 °C in the case of 1.0 m³/min. cooling air flow rate at environmental temperature of 34 °C resulting in the temperature reduction of 8 °C than that of the case of natural convection condition. This means that the cycle life at this condition of LIM30H cells in this battery module is expected to be around 77 months by half capacity of initial one at effective current of 100 A at 35 °C under 1.0 m³/min. cooling air flow rate compared with the value of around 56 months under the conventional type. Therefore, this battery module is best suited for railway applications needed for large-current charge and discharge.

Key words: Forced-air-cooling, Lithium-ion battery, Cycle life performance, Simulation

1 はじめに

近年、化石燃料の大量消費を原因とする地球温暖化が深刻な問題となっている。そのため、風力あるいは太陽光発電のようなクリーンエネルギー活用が検討さ

れるとともに、ハイブリッド電気自動車に代表される省エネルギーシステム導入の動きが加速している。このような動きは電力を大量に消費する鉄道においても同様であり、その手段として有望視されているのが回生電力の有効利用である。

回生電力とは、電気ブレーキによる車両制動時に発生する電気エネルギーである。この回生電力は車両か

* 研究開発センター 第二開発部

ら架線に放出され、近傍を走行する別車両の力行（加速）に使用されることによって有効利用されている。しかしながら、近傍を走行する車両がない場合は再生電力が消費されずに架線電圧が上昇するために、電気ブレーキが使用できず、機械ブレーキによって車両を停止させることになる（回生失効）。機械ブレーキは車両の運動エネルギーを熱として系外に放出するものであるために、回生失効は省エネの観点から回避すべき現象であるといえる。

各鉄道事業者は、回生失効回避のために蓄電媒体を用いた架線電圧平準化の検討を進めている。蓄電媒体として各種二次電池、電気二重層キャパシタおよびフライホイールなどが検討されているが、その中でも、エネルギー密度や入出力特性などの性能、さらにメンテナンス性および信頼性の点から注目されているのが大形リチウムイオン二次電池である^{1,2)}。このようなニーズに対し、我々は鉄道用大形リチウムイオン二次電池「LIM30H / LIM60H」を開発し、すでに営業路線へ電池システムの適用をおこなってきた^{3,4)}。

LIM30H および LIM60H は、最大 $10 I_t$ A の大電流充放電が可能であることを特長とする電池である。しかしながら、このような大電流充放電を長時間継続すると、電池の直流内部抵抗に起因するジュール発熱によって電池温度が上昇する。このような場合には、入出力制限をおこなう必要から電池性能を充分に得ることができないだけでなく、高温での継続使用が電池寿命に悪影響をおよぼすことも懸念される。そのために、ジュール発熱を効率的に排出できる冷却機構を開発することが、これら電池の普及における課題となっていた。

そこで我々は、鉄道用大形リチウムイオン電池 LIM30H の強制空冷モジュール「LIM30H-8R」の開発を実施してきた。本稿では、LIM30H-8R の特徴および性能、さらに、これを用いた場合の LIM30H 寿命推定結果についてのべる。

2 リチウムイオン電池モジュール「LIM30H-8R」

2.1 構成

リチウムイオン電池モジュール「LIM30H-8R」は、鉄道用 LIM30H を 8 セル直列接続したものである。その外観を Fig. 1 に示す。モジュール外装は軽量な合成樹脂製であり、さらには合成樹脂そのものの高い絶縁性によってコンパクト化も実現した。また、本モジュールには、前面に吸気口、背面に排気口を設け、



Fig. 1 Appearance of LIM30H-8R type lithium-ion battery module.

Table 1 Specifications of LIM30H-8R type lithium-ion battery module.

	LIM30H-8R
Nominal capacity / Ah	30
Nominal voltage / V	28.8
Mass / kg	ca. 18
Dimensions / mm	L 389 W 231 H 147
Rated current (continuous) / A	100
Resistance to vibration	JIS E 4031 2b

セル空冷を効率的に実施できる構造とした。なお、本モジュールは電池監視装置を内蔵している。この監視装置は、全構成セルの電圧およびモジュール温度を常時監視する機能をもつ。

2.2 仕様

LIM30H-8R の仕様を Table 1 に示す。本モジュールは連続定格電流を 100 A ($3.3 I_t$ A) としている。また、耐振動性は JIS E 4031 2種 b 相当であり、鉄道車両搭載についても適合性をもたせている。

3 冷却性能

3.1 冷却風量

強制空冷では、実際に得られる冷却風量は送風機の実能力と流路の圧力損失で定まる。そのため、高性能の送風機を適用したにもかかわらず、流路の圧力損失が大きいと実際に得られる冷却風量が少なくなる場合がある。したがって、実質的な冷却風量を把握することは強制空冷を実施するうえで非常に重要であるといえる。

3.1.1 測定方法

Fig. 2に示すように、LIM30H-8RにDC24 Vファンを搭載した排気ファンユニットおよび断面積既知の吸気ダクトを取りつけた状態でファンを動作させ、実際の冷却風量を調査した。なお、使用したファンは山洋電気(株)製DCファンモータ9G924A202(最大風量: $2.5 \text{ m}^3/\text{min}$. カタログ記載値)である。また、冷却風量は風速計〔日本カノマックス(株)製アネモマスター風速計6004〕によって吸気ダクト内の風速を18ヶ所計測し、その平均値に吸気ダクト断面積を乗じて算出した。

3.1.2 計測結果

DCファンモータ端面からモジュールまでの直線距離をパラメータ $L(\text{mm})$ としたときの冷却風量計測値をFig. 3に示す。図から、 L 値の増大にしたがって冷却風量が増加する傾向があり、 $L = 30 \text{ mm}$ のときに $1.1 \text{ m}^3/\text{min}$. の風量が得られることがわかる。本試験に使用したプロペラファンの最大風量が $2.5 \text{ m}^3/\text{min}$. であることから、実際に得られる冷却風量は送風機能力の40~50%程度であるといえる。なお、使用したファンの風量-静圧特性から、 $L = 30 \text{ mm}$ でのLIM30H-8Rの圧力損失は約 50 Pa と見積った。

3.2 セル冷却性能

3.2.1 冷却風量と電池表面温度との関係

充放電パターンの実効値(以下、実効値電流と呼ぶ)を 100 A としたときの各構成セル表面温度上昇傾向をFig. 4に示す。ここで、Cell 1, 2, 5および6は、それぞれ、モジュール吸気側端部、排気側端部、吸気側中央部、排気側中央部に位置する電池である。通電開始後すぐに電池温度が上昇し、3時間後には電池温度が定常状態に到達している。また、Cell 1, 2, 5および6の3時間経過後の温度(温度定常状態)はそれぞれ 37.0 , 37.7 , 36.5 および $38.2 \text{ }^\circ\text{C}$ であり、モジュール排気側中央部に位置するCell 6の温度上昇がもっとも顕著であることがわかる。しかしながら、それぞれの電池表面温度の差は $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度であり、本モジュールにおける構成セルの温度ばらつきは、きわめて小さいものといえる。各実効値電流条件下における冷却風量とCell 6電池表面定常温度との関係をFig. 5に示す。また、その測定条件の詳細を参考のためにTable 2に示した。図から、冷却風量の増大にともなって電池表面温度が低下する傾向が認められる。その場合、直流内部抵抗が初期の2倍まで上昇した寿命末期レベルの劣化状態を想定し、連続定格電流 100 A の $\sqrt{2}$ 倍にあたる実効値電流 140 A での通電を実施した場合

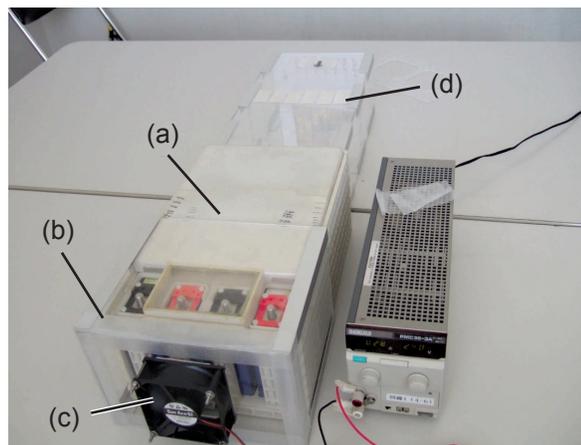


Fig. 2 Appearance measurement apparatus of cooling air flow rate for LIM30H-8R type lithium-ion battery module.

(a) LIM30H-8R, (b) Exhaust unit, (c) DC 24 V fan, (d) Cooling air inlet unit

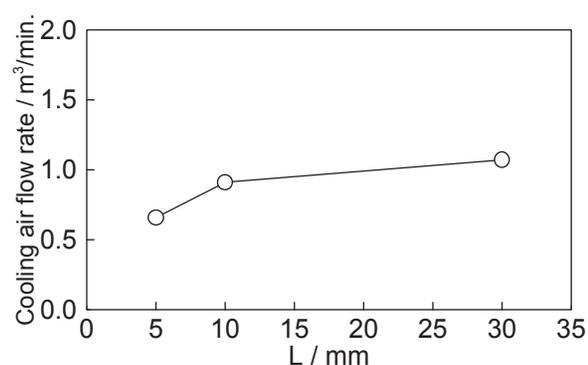


Fig. 3 Cooling air flow rate of LIM30H-8R type lithium-ion battery module as a function of parameter "L": linear distance between air exhaust of LIM30H-8R and edge face of DC 24 V fan.

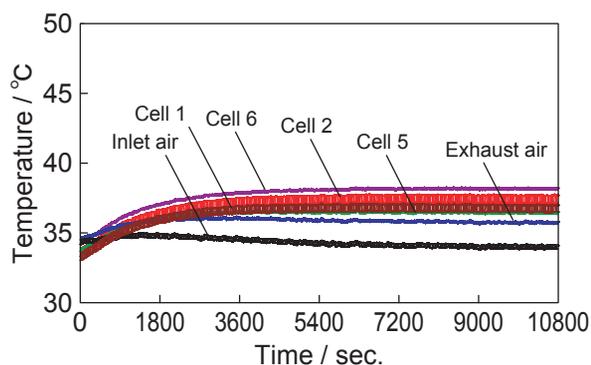


Fig. 4 Increase trend in temperature on the surface of each cell in LIM30H-8R type lithium-ion battery module at 100 A effective values of current under cooling air flow rate of $1.0 \text{ m}^3/\text{min}$.

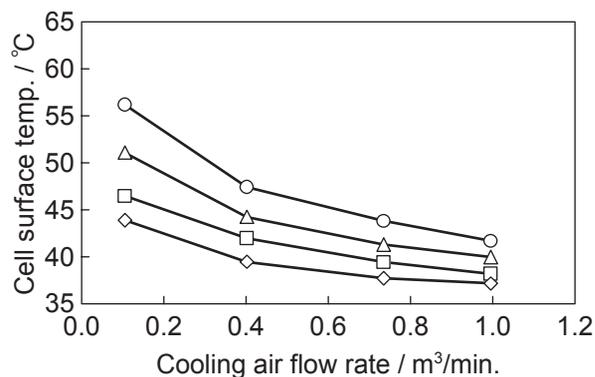


Fig. 5 Dependence of cell surface temperature of LIM30H-8R type lithium-ion battery module on cooling air flow rate under various effective value of current: 140 A (○), 120 A (△), 100 A (□), and 85 A (◇).

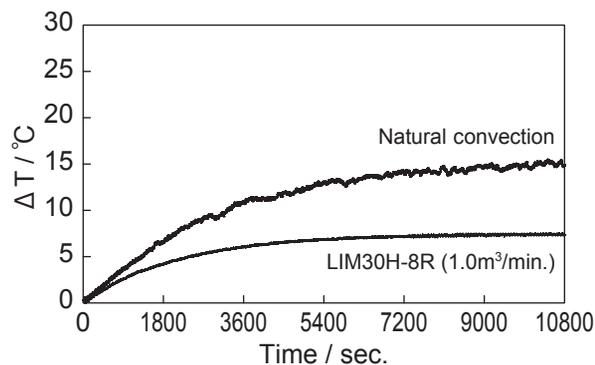


Fig. 6 Comparison of increase trend in temperature on the surface of each cell in LIM30H-8R type lithium-ion battery module at 140 A effective value of current under cooling air flow rate of 1.0 m³/min. at natural convection condition.

Table 2 Cooling test conditions for LIM30H-8R type lithium-ion battery module.

LIM30H-8R	
Ambient temp. / °C	34
Effective value of current / A	85, 100, 120, and 140
L value / mm	30
Cooling air flow rate / m³/min.	0.11, 0.40, 0.74, and 1.00

においては、冷却風量を 0.11 から 1.00 m³/min. まで増大させることによって、電池表面定常温度が 56 °C から 42 °C まで低下することを確認した。このときの環境温度が 34 °C (恒温槽設定: 35 °C) であることから、本モジュールは、1.00 m³/min. の通風をおこなうことによって、寿命末期レベルの電池を用いた場合においても連続定格の 100 A 連続通電条件でセル温度上昇を 8 °C に抑制できるといえる。

3.2.2 自然対流条件との比較

寿命末期を想定した実効値電流 140 A での電池温度上昇について、LIM30H-8R を用いた場合と自然対流条件 (単セルデータ) との比較を実施した。LIM30H-8R への冷却風量は 1.0 m³/min. とし、評価は温度上昇がもっとも大きい Cell 6 表面温度でおこなった。なお、試験時の環境温度は、LIM30H-8R を用いた場合が 34 °C (恒温槽設定: 35 °C)、自然対流条件が 31 °C (試験室温度) であった。その結果を Fig. 6 に示す。温度定常状態までの温度上昇 (ΔT) は、LIM30H-8R の場合で 8 °C、自然対流条件の場合で 15 °C となることがわかる。したがって、LIM30H-8R を適用することにより、電池温度上昇を 7 °C も抑制できるといえる。

4 電池寿命への効果

前述のとおり、LIM30H-8R を用いた強制空冷条件下において、自然対流条件に対して電池温度上昇を大きく低下させる冷却効果が得られることを確認した。温度は電池の寿命性能を決定する要素のひとつであることから、これら 2 種類の環境の違いは電池寿命に影響をおよぼすことが推察される。本項では、各環境における電池の寿命推定をおこない、その影響について考察する。

4.1 寿命推定方法

寿命推定は平方根則をもちいておこなった⁵⁾。平方根則は、電池の容量低下および直流内部抵抗上昇がサイクル数 (≒時間) の平方根に比例するという経験則である。Fig. 7 は、20 t クラスの LRT (Light Rail Transit) 運行を模擬した 300 A 充放電サイクルによる寿命試験結果である。このデータから得た劣化係数は、容量低下 (kq) が 5.11、抵抗上昇 (kr) が 5.17 であった。なお、このときの電池温度は約 37 °C であった。

4.2 温度の影響

温度による電池の劣化加速検証を目的として、25 および 45 °C 環境における電池の劣化係数を計測した。なお、その計測は、充放電そのものによる電池発熱の影響を排除する目的で、電池の満充電保存試験により実施した。その結果を Fig. 8 に示す。また、このデータから得た電池の劣化係数を Table 3 に示す。この傾向は、上記平方根則における劣化係数のアレニウスプロットによって近似されることがわかっている。本稿では、この結果を 4.1 項の充放電データに適用するこ

とによって、充放電サイクル時の温度加速因子とした。

4.3 直流内部抵抗の影響

LIM30H 電池における直流内部抵抗の温度依存性を Fig. 9 に示す。

直流内部抵抗は電池温度の上昇ともなって低下する傾向がある。このデータを各温度状態における電池発熱の計算に使用したデータである。

4.4 電池発熱と電池温度上昇

LIM30H-8R を用いた場合（冷却風量：1.0 m³/min.）および自然対流条件での電池発熱と温度上昇との関係

Table 3 Deterioration factor for capacity (kq) and DC internal resistance (kr) of LIM30H type lithium-ion cells under 100% S.O.C. storage test at 25 and 45 °C.

Ambient temperature / °C	kq	kr
25	3.98	1.53
45	7.15	2.41

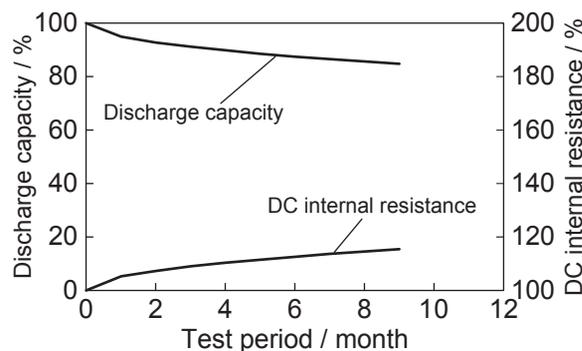


Fig. 7 Cycle life performance of LIM30H type lithium-ion cells under 300 A pattern test at 25 °C.

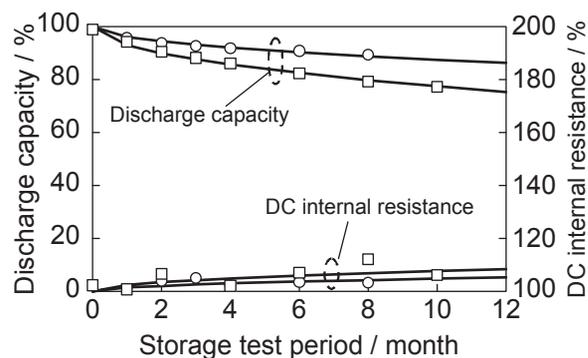


Fig. 8 Calendar life performance of LIM30H type lithium-ion cells under 100% S.O.C. storage test at 25 °C (○) and 45 °C (□).

を Fig. 10 に示す。なお、電池発熱は電流の実測値と供試電池の直流内部抵抗の推定値から算出した値である。

4.5 寿命計算結果

電池の温度上昇および劣化傾向の再計算の間隔を1ヶ月おきに設定し、LIM30H-8R を用いた場合（冷却風量：1.0 m³/min.）および自然対流条件における電池の劣化傾向を計算した。なお、周囲温度条件は実使用における夏場を想定して 35 °C としている。放電容量の劣化傾向を Fig. 11 に示す。図から、LIM30H-8R 条件の容量劣化は自然対流条件よりもゆるやかであることがわかる。一例として、放電容量が初期の 50% まで低下した時点をも寿命とし、その期間を算出すると、LIM30H-8R 条件では約 77 ヶ月、自然対流条件では約 56 ヶ月と算出できる。このように、LIM30H-8R を用いた強制空冷によって、鉄道用 LIM30H 電池の大幅な寿命延長が可能であると結論づけられる。

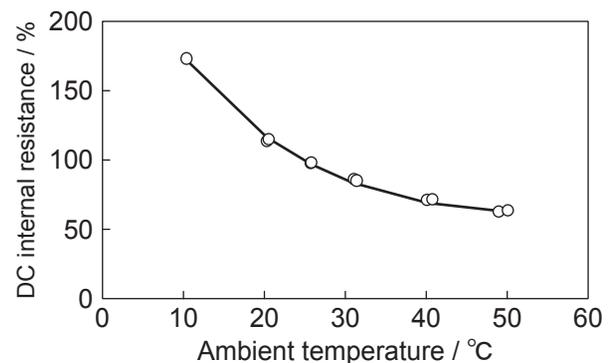


Fig. 9 Dependence of DC internal resistance on cell temperature for LIM30H type lithium-ion cells.

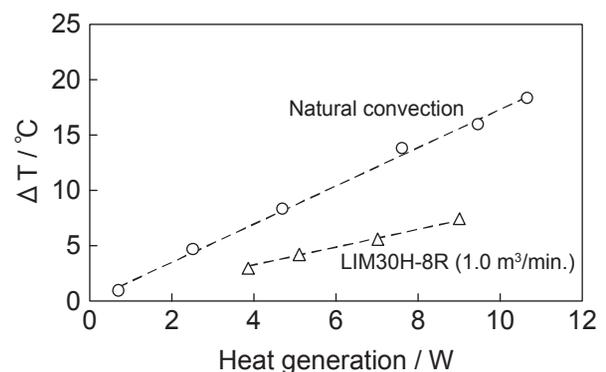


Fig. 10 Dependence of cell surface temperature increase on heat generation calculated by power distribution to LIM30H type lithium-ion cells.

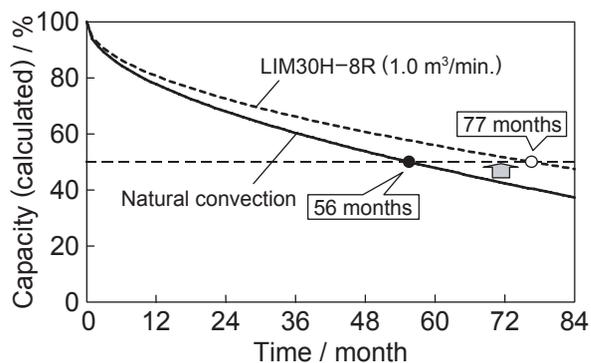


Fig. 11 Simulation on cycle life performance of lithium-ion cells in LIM30H-8R type battery module by the calculation from values of deterioration factor under different cooling conditions at the setting ambient temperature of 35 °C.

5 まとめ

鉄道用に開発したリチウムイオン電池モジュール「LIM30H-8R」は、軽量コンパクトという特長に加え、すぐれた電池冷却性能を示すことを確認した。また、

この冷却効果によって、鉄道用リチウムイオン電池 LIM30H の寿命性能が大幅に向上することを寿命計算結果から確認できた。

以上のことから、リチウムイオン電池モジュール「LIM30H-8R」は、鉄道用途に適した電池であるといえる。

文献

- 1) M.Ogasa, *Rolling stock & Technology*, (89), 13 (2004).
- 2) J. Ishii, *GS Yuasa Technical Report*, **3** (2), 1 (2006).
- 3) T. Nakamoto, Y. Seyama, K. Nishiyama, and T. Sonoda, *The 46th Battery Symposium in Japan*, 520 (2005).
- 4) Y. Seyama, K. Okazaki, N. Higashi, and T. Sakuno, *GS Yuasa Technical Report*, **2** (2) 25 (2005).
- 5) T. Nakamoto, Y. Seyama, K. Nishiyama, and T. Sonoda, *The 47th Battery Symposium in Japan*, 484 (2006).