

## 蓄電デバイスの鉄道システムへの応用の研究

Study of application of a storage battery to the railway system



高草木 敦理\*



藺田 秀樹\*

JR East has improved the environmental performance of a vehicle traveling on the non-electrified section. We have developed a "catenary and battery hybrid-train system." EV-E301 system equipped with this system in March 2014 (commonly known as: ACCUM) and ACCUM debuted in Karasuyama Line. It became the one great achievement. However, lithium-ion battery technology has advanced. Lithium-ion batteries for particularly the automotive have proceeded at the high-power and high capacity. In this paper, we selected the high-performance storage devices for automobiles, and examine the necessary conditions for the application of the railway vehicle. At the bench test we confirmed the efficiency.

●キーワード：リチウムイオン電池、電気・ハイブリッド自動車、EV-E301系(ACCUM)

### 1. はじめに

JR東日本では、2009年から蓄電池駆動電車の開発を始め、2014年3月には烏山線にてEV-E301系（以下ACCUMと称す）の営業運転が開始した。リチウムイオン蓄電池はぎ装スペースが大きく、質量も重い、また航続距離もまだ短いのが鉄道車両用途としての現状である。これは蓄電池の性能によるところが大きい。

そこで蓄電池技術の進歩が目覚ましい自動車用の蓄電池に着目し、軽量かつ出力、容量ともに高性能な自動車用蓄電池セルを鉄道車両に応用するための検討、試作を行い、搭載に必要な試験および検証を行った。そして、自動車用蓄電デバイスを鉄道システムへ応用し主回路用蓄電池の小型軽量化等をめざす。

### 2. 研究内容

自動車用蓄電デバイスを鉄道車両に活用する場合の要求事項や課題を検討し、鉄道車両用蓄電池システムの試作を行い、ベンチ試験等で性能などの検証を行う。

#### 2.1 自動車用蓄電池セルの選定

現在烏山線で営業運転を行っているACCUMは産業用蓄電池を活用している（以下ACCUM用蓄電池と称す）。自動車用蓄電池セルおよびACCUM用蓄電池セルの性能を出力、容量、寿命、コスト等で比較し、選定した。

自動車用蓄電池には、高出力タイプと高エネルギータイプがあり、高出力タイプは大電流での入出力を得意とする。少ない電池搭載量で頻繁に大電力の回生吸収を行う、大

きな瞬発力を出す、また急速充電を行う等が求められる用途に適している電池である。

高エネルギータイプは出力密度が高出力タイプと比較すると小さいが、大きなエネルギー密度を有する。限られた空間でできるだけ多くの電力を貯蔵する必要のある用途に適した電池である（図1）。

今回は鉄道車両の充放電に必要な入出力を有し、容量がACCUM用蓄電池より大きい高エネルギータイプの電池（以下、開発蓄電池と称す）を選定することにした。

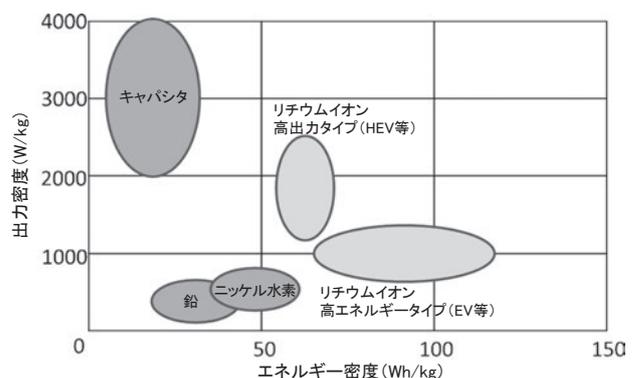


図1 各蓄電デバイスの出力密度とエネルギー密度の関係

図2は独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 二次電池技術開発ロードマップ2013の中にある自動車用二次電池ロードマップである<sup>1)</sup>。近年、自動車用蓄電池の状況は、エネルギー密度、出力密度が向上し、HV車やEV車の生産数増加に伴い、リチウムイオン蓄電池の生産数も増加している。よって大量生産による蓄電池コストの低減が見込まれる。また、自動車と鉄道車両は移動体という共通点からも開発蓄電池を選定した。

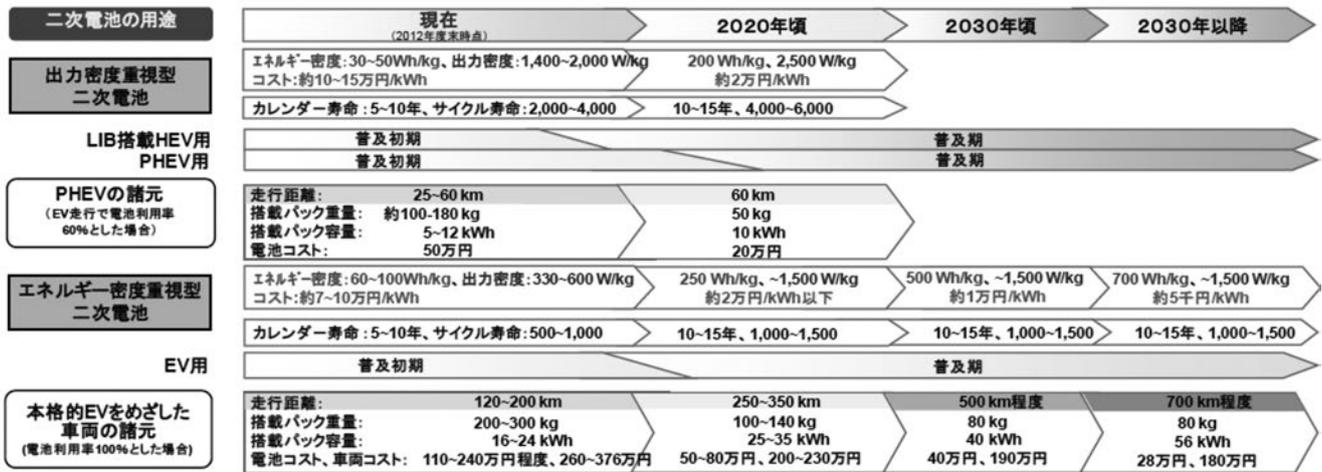


図2 自動車用二次電池ロードマップ<sup>1)</sup>

## 2.2 ACCUM用蓄電池と開発蓄電池の比較

ACCUMの運用に適するのは、高エネルギータイプの蓄電池である開発蓄電池を選定した。現在ACCUMで使用されているACCUM用蓄電池と開発蓄電池の特性比較を表1に示す。

## 2.3 蓄電池モジュールの仕様

### 2.3.1 蓄電池モジュールの仕様検討

蓄電池モジュールとは蓄電池セルを数個直列につないだものをまとめ、箱型にしたものである。これを鉄道車両へ搭載するために必要な課題を以下の点について検討した。

#### ①セル配置

蓄電池モジュールは構造等により、体積当たりのエネルギー密度や質量あたりのエネルギー密度が変化するため、モジュール化には、セル数、セルの配置とモジュールに必要な監視基板や通信線の配置を効率よく行い、エネルギー密度を低下させないように検討した。

#### ②構造・強度

セル数により、強度を考慮し、すべて樹脂構造とするか、一部板金化するか等を検討した。

#### ③空間・沿面距離の確保

蓄電池はDC700Vとなるため、周囲に電流がリークしない距離を検討した。

#### ④安全性

作業者が端子にすぐ触れない構造および、単セルが故障しても隣り合うセルや周辺機器に影響が出ない構造を検討した。

#### ⑤セル間隔

蓄電池モジュールのセル間隔の違いによる温度上昇値から、最適な間隔を検討した。

#### ⑥冷却構造

充放電の頻度により、温度が上昇するため、隣り合うセルからの温度影響を受けにくく、動作可能温度も超えにくい構造を検討した。

表1 ACCUM用蓄電池と開発蓄電池の比較

特性	ACCUM用蓄電池	開発蓄電池
(1) SOC (充電率) -OCV 特性	ACCUM用蓄電池セルはSOC変化に伴う開放電圧(OCV)の変化が大きい。	開発蓄電池セルはSOC変化に伴う開放電圧(OCV)の変化が小さい。
(2) 各レート充電 受け入れ特性 (25℃)	完全放電状態からCCCV充電を行った際の充電時間と充電電気量との関係を5C電流で比較した場合、ACCUM用蓄電池は10分程度で充電電気量80%まで充電できる。	完全放電状態からCCCV充電を行った際の充電時間と充電電気量との関係を5C電流で比較した場合、開発蓄電池セルは15分程度で充電電気量80%まで充電できる。
(3) 各レート放電 特性(25℃)	放電電流値を変化させた場合の放電容量と電圧の関係を比較するとACCUM用蓄電池セルは、5Cで下限電圧まで放電した場合、SOC100%まで放電できない。	放電電流値を変化させた場合の放電容量と電圧の関係を比較すると開発蓄電池セルは、5Cで下限電圧まで放電した場合、SOC100%まで放電できる。
(4) 各温度充電 特性	周囲温度を変化させた場合の放電容量と電圧の関係は温度が低くなると内部抵抗が増加するため電圧降下が大きくなる。温度による下限電圧までの放電で放電可能な電気量の変化は、開発蓄電池セルとACCUM用蓄電池とではほぼ同特性となる。	同左
(5) 温度と放電 特性	周囲温度と下限電圧までの放電で放電可能な放電容量との関係は温度による下限電圧までの放電で放電可能な電気量の変化は、開発蓄電池セルとACCUM用蓄電池とではほぼ同特性となる。	同左
(6) サイクル寿命	25℃ 3000 サイクル後の容量保持率は約80% 45℃ 3000 サイクル後の容量保持率は約50%	同左 45℃ 3000 サイクル後の容量保持率は60%

⑦メンテナンス性

多くのセルをモジュール化すれば、少ないセル数のモジュールに比べ、重量が増すため、エネルギー密度と重量による交換等の作業性を検討した。

⑧信頼性

電圧、温度等を監視するための通信が健全に行われるために必要な構成を検討した。

2.3.2 蓄電池モジュールの仕様決定

2.3.1の検討事項から最適なセル数、構造、試作モジュールの仕様を検討し、下記のように決定(表2)。

- ・モジュールのセル配置は横方向6セル、奥行方向2セル、合計12セルとした。
- ・モジュール構造は、セルの上部を樹脂ケースで覆った状態で上下前後を板金で覆う構造とした。
- ・セル間隔は冷却性能とエネルギー密度を考慮し、2通りのセル間隔(組立時に設定した基本間隔とさらに間隔を空けた基本間隔+4mm)で試験し、最適なセル間隔を検証した。

表2 開発蓄電池試作モジュール仕様(概要)

項目		仕様
電池性能	セル構成	12セルを1直列
	定格電圧	45.0V (3.75V/セル)
	定格容量	38.0Ah
外形	寸法	W288×L427×H150[mm]
周囲環境	使用周囲温度範囲	充放電: -20 ~ 45℃ (充電時: 温度による電流制限あり)
	使用湿度範囲	90% 以下 (結露のないこと)
	設置場所	腐食性ガス、塩分、粉塵のない場所
	高度	標高 1400m 以下
方式	冷却方式	自冷
その他	最大直列接続数	17モジュール直列 (最大使用電圧: 900V)
	監視基板	ACS
	監視項目	全セルの電圧、温度
	異常表示	LIBM との通信にて LCD 異常表示

最終的に基本間隔+4mmにすることにしたが、蓄電池ユニットの充放電および留置による温度変化の試験は、セル間隔が基本間隔の試作モジュールを使用した。表3はセル間隔を基本間隔および基本間隔+4mmにした場合のモジュールのセル温度上昇値を示す。

表3 モジュール温度上昇試験の最高セル温度の温度上昇値(セル間隔別)

セル間隔 試験温度	烏山線走行パターン	
	25℃	45℃
基本間隔	8.92℃	7.53℃
基本間隔+ 4mm	7.54℃	5.91℃
差異	△1.38℃	△1.62℃

2.4 蓄電池モジュールの試作・検証

2.3.1項で検討した蓄電池モジュールを試作し、試験を実施した。検証試験では以下の試験について問題ない事を確認している。

- ・JIS C8715-1「性能要求事項」の要求事項
  - ・JIS C8715-2「安全性要求事項」の要求事項
  - ・JIS E4031「振動および衝撃試験方法」の要求事項
  - ・ノイズ試験(ファーストランジェントバースト試験、静電気イミュニティ試験)
- また、モジュール化した試作品について以下の試験を行った。
- ・充放電および留置による温度変化
  - ・発火、バント、液漏れ等による周囲への影響
  - ・無制限過充電試験、完全短絡試験によるモジュールの挙動を確認

2.5 蓄電池ユニットの仕様

蓄電池ユニットは蓄電池モジュールをさらに直列に接続し、使用する定格電圧で一つの箱にまとめたものである。これを構成するにあたり、配慮すべき要求事項(安全性、回路構成、モジュール配置、メンテナンス性など)から蓄電池ユニットの仕様を検討した。また、今回の仕様はシステム電圧中心にACCUMに合わせた。

蓄電池ユニットのシステム構成比較を表4、開発蓄電池のユニット仕様を表5に示す。

表4 システム構成比較

モジュール	① ACCUM 用蓄電池 (8セル)	② 開発蓄電池 (12セル)
直列数	22	14
システム電圧	633.6V	630V
並列数(1群)	5	5
体積比	100%	79%
質量比	100%	77%

表5 開発蓄電池ユニット鳥山線仕様

項目		仕様
電池性能	モジュール構成	14 個モジュールを1直列
	定格電圧	630V
	定格容量	38.0Ah
外形	寸法	W770×L1010×H785[mm]
方式	冷却方式	自冷

## 2.6 実用化を見据えたユニットの試作

温度上昇および留置試験における蓄電池モジュールおよび周辺機器の構成図を図3に示す。今回ACCUMとの比較評価可能な条件とするため、ACCUMに実装する場合と同じ縦4段積みとし、点線枠で囲った部分（電池収納箱、機器箱）をユニットのミニモデルとして試作した（図4）。各試作内容を表6に示す。

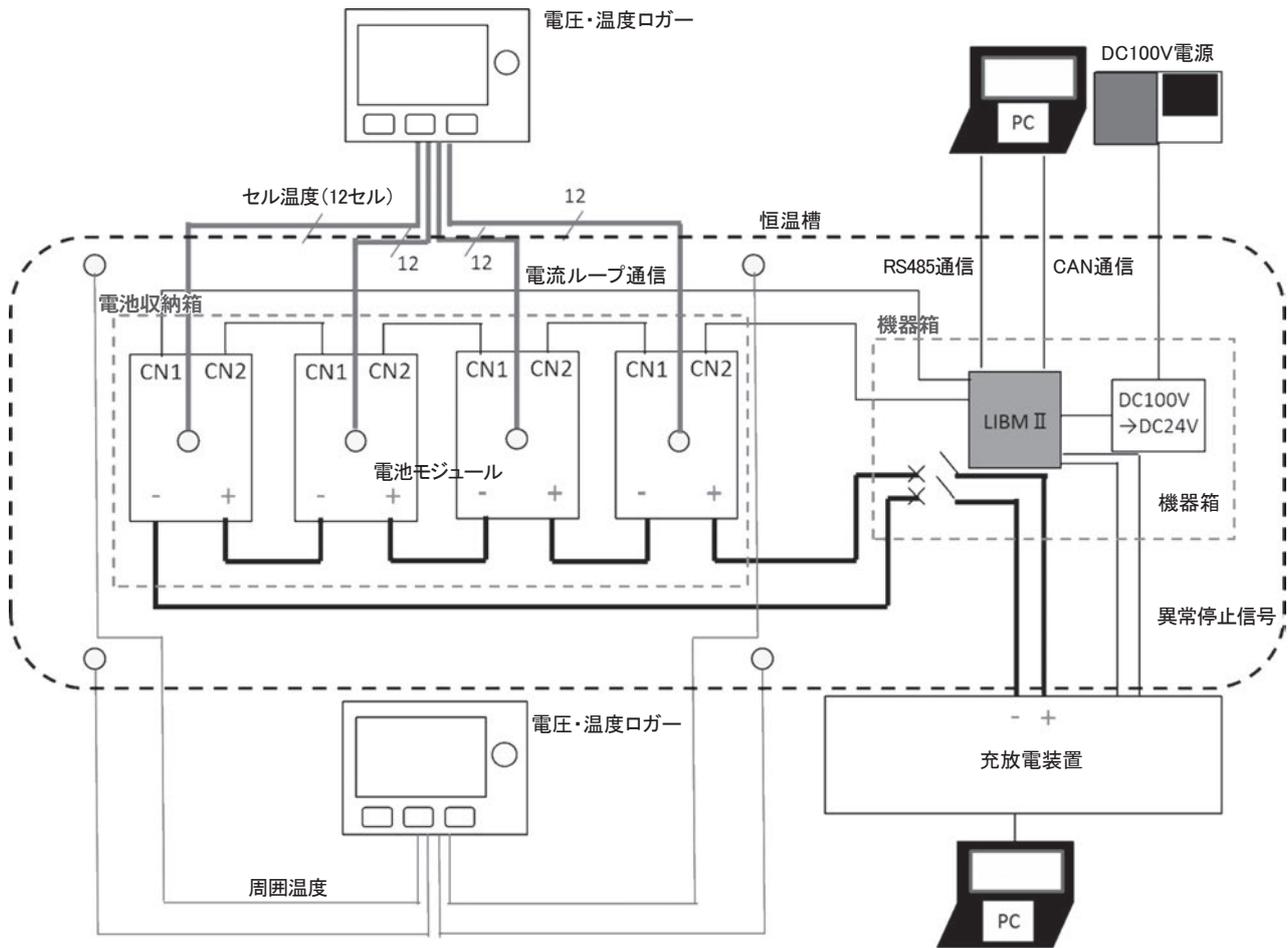


図3 温度上昇試験および留置試験における構成図と外観

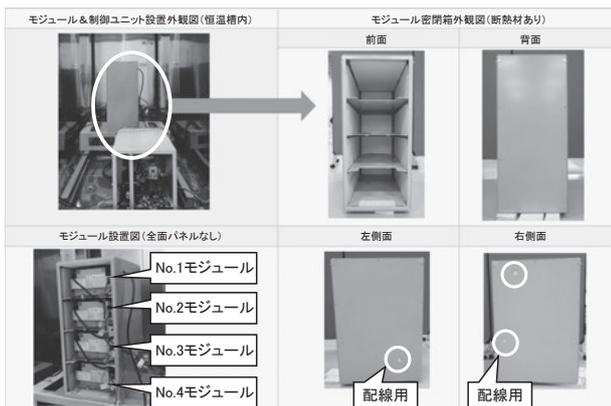


図4 ユニットミニモデル試作内容

表6 ユニットミニモデル試作内容

試作物	収納部構成
電池収納部 (W:344mm ×L:541mm ×H:781mm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>電池モジュール（縦積み4段直接続）</li> <li>断熱材（内壁に貼り付け）</li> </ul>
機器箱 (W:620mm ×L:403.2mm ×H:450mm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>電池管理基板 (LIBM)</li> <li>MCCB (制御電源用)</li> <li>MCCB (主回路用)</li> <li>ヒューズ</li> <li>ホールセンサ</li> <li>リレー素子</li> <li>100V-24V DC コンバータ</li> </ul>

2.7 実用化を見据えたユニットでの検証試験

2.6で試作した蓄電池ミニモデルで下記の試験を行い、ACCUM用蓄電池と比較評価した。

- ①急速充電試験
- ②温度上昇試験
- ③留置試験
- ④暖気運転試験
- ⑤低温運転試験

①急速充電試験(表7)

充電上限SOCが同じ場合、蓄電池特性の違いにより、開発蓄電池はACCUM用蓄電池に比べ充電時間が長くなる。そこで、充電量を同じとし、SOC範囲をACCUM用蓄電池はSOC59~90%まで、開発蓄電池は51~75%まで充電する時間を計測したところ、充電時間がほぼ同じとなった。

ACCUMは烏山線内での使用SOC範囲が60~90%程度であり、開発蓄電池容量換算では50~75%の範囲である。よって、開発蓄電池は75%以上確保できれば、現状の使用状況で使用が可能である。

表7 ACCUM用蓄電池と開発蓄電池モジュール急速充電時間比較

	ACCUM用蓄電池モジュール	開発蓄電池モジュール			
		66.0 - 90.0%	56.0 - 80.0%	51.0 - 75.0%	46.0 - 70.0%
充電SOC範囲	59.6 - 90.0%	66.0 - 90.0%	56.0 - 80.0%	51.0 - 75.0%	46.0 - 70.0%
充電SOC幅	30.4%	24.0%			
充電量	9.12Ah				
充電制御	70kW制限(100A)	120A			
10℃	—	1560s	857s	659s	512s
25℃	407s	919s	515s	409s	350s
39℃	365s	—	—	—	—

②温度上昇試験(表8)

ACCUMと同等の烏山線走行パターンで充放電試験を行った。その結果、温度上昇試験結果がACCUM用蓄電池の温度上昇試験結果とほぼ同等であることから開発蓄電池モジュールはACCUM用蓄電池の置換えに使用できることがわかった。

表8 烏山線パターン 温度上昇試験比較表

試験温度(℃)	測定点	試験開始時	3往復後	6往復後	6往復後
		温度(℃)	温度(℃)	温度(℃)	温度上昇(℃)
10	最高モジュール温度	13.9	31.4	38.4	24.5
	平均モジュール温度	13.2	30.7	37.2	24.0
	最低モジュール温度	12.0	29.6	35.0	23.0
	温度ばらつき	1.9	1.8	3.4	1.5
25	最高モジュール温度	25.3	42.3	49.3	24.0
	平均モジュール温度	24.3	41.9	48.3	24.0
	最低モジュール温度	23.3	41.5	46.5	23.2
	温度ばらつき	2.0	0.8	3.0	0.8

③留置試験(図5)

蓄電池駆動電車が夜間留置され、翌日の運用までに蓄電池温度がどの程度低下するかを把握するため、留置試験を行った。外気温-15℃の恒温槽に保管し、開発蓄電池は8時間で34℃~1℃に低下することが分かった。ACCUM用蓄電池は以前の同試験で8時間で11℃から-3℃に低下している。よって開発蓄電池の方が冷えやすいことが分かった。今後、実用化するには、断熱材や構造について配慮が必要である。

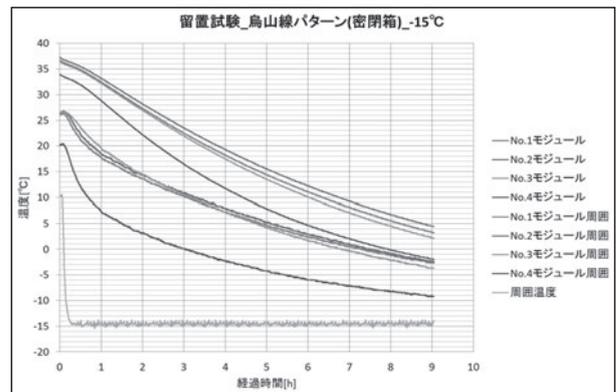


図5 開発蓄電池 留置試験 密閉箱 -15℃

④暖機運転試験(図6・図7)

蓄電池は低温状態で使用する際、充放電が制限される。最大値で充放電可能にするためには一定の温度まで蓄電池自身の充放電により、内部にある抵抗で蓄電池温度を上昇させる必要がある。温度-10℃から10℃までの暖機運転時間は、ACCUM用蓄電池が4500秒(75分)、開発蓄電池が2800秒(約47分)と短く、暖機性能が良い。この結果により、③留置試験の結果は暖気運転により解決できる可能性がある。

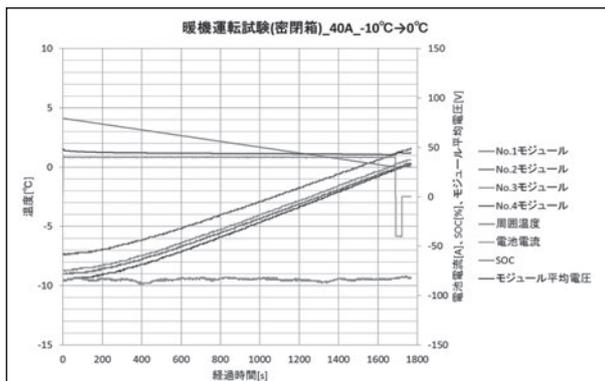


図6 暖気運転試験 密閉箱  $-10^{\circ}\text{C}\Rightarrow 0^{\circ}\text{C}$  40A

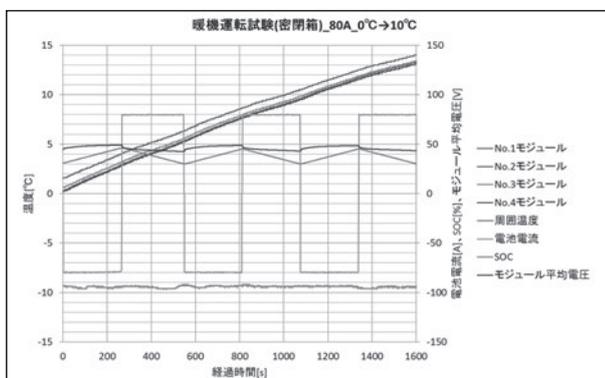


図7 暖気運転試験 密閉箱  $0^{\circ}\text{C}\Rightarrow 10^{\circ}\text{C}$  80A

### ⑤低温運転試験 (図8)

蓄電池は低温環境での充放電を限度を超えて行くと寿命が早まる、もしくは故障する原因となる。低温環境下において、充放電を行い、使用に問題ないかを確認した。その結果、ACCUM用蓄電池と同様、周囲温度 $-15^{\circ}\text{C}$ で烏山線走行パターンを使用した場合、モジュールは $15^{\circ}\text{C}$ 程度を維持できることがわかった。

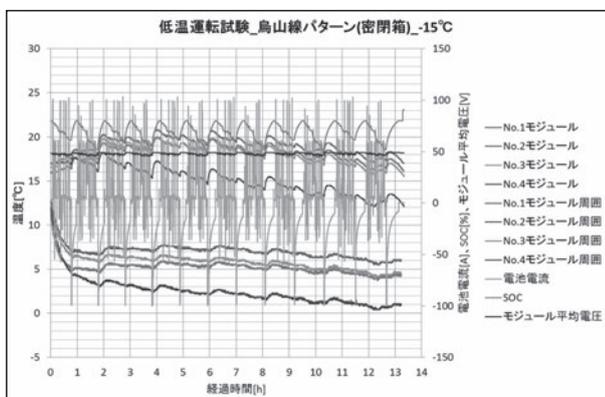


図8 低温運転試験 烏山線パターン 密閉箱  $-15^{\circ}\text{C}$

## 3. 今後の課題

蓄電池モジュールの仕様を決定し、前項の体積率を検討した結果、従来の電池箱より寸法を小さくすることができ、温度上昇試験・留置試験・暖気運転試験・低温運転試験の結果から鉄道車両への搭載と従来の電池箱への置換えが可能になった。

急速充電時間が10分以上確保できる場合、開発蓄電池をSOC90%まで充電できれば、ACCUM用蓄電池のSOC20%~90%の容量21Ahに比べ、開発蓄電池のSOC20%~90%の容量は26.6Ahの容量を使用することができる。そのため、実際の車両運行に合わせて、最短時間となる充電方法を検討することが必要である。

寿命については、ACCUM用蓄電池では、寿命シミュレーションから8年後の容量保持率が69.1%になる。しかし、開発蓄電池の8年後の容量保持率は70%以上となり、期待寿命が長くなる(地方線の条件で8年後容量保持率70%から推測)。

よって、烏山線の開発蓄電池の寿命シミュレーションを実施し、ACCUM用蓄電池と最終的に比較し、開発蓄電池の場合のモジュール交換時期を決定する必要がある。

## 4. まとめ

今回は、自動車用蓄電池セルから鉄道車両用に適したものを選び、搭載に必要なモジュールおよびユニットの検討、試作そして検証を行った。蓄電池ユニット1両あたりの大きさは、ACCUMと比較すると体積は約21%減、質量は約23%の削減ができた。今後、この蓄電池をNETレインへ搭載するための改造を行い、蓄電池の特性、挙動、性能を比較するために、定置試験および走行試験等を行い、蓄電池駆動電車への実用性を検証する。

### 参考文献

- 1) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構; NEDO二次電池技術開発ロードマップ2013