

産業用鉛蓄電池の無線による常時状態監視システム

Wireless Monitoring System of Lead Storage Batteries' States for Industrial Use

水杉真也* *Shinya Mizusugi* 向谷一郎* *Ichiroh Mukaitani* 小布施俊** *Takashi Kofuse*
白鷹 優** *Masaru Shirataka* 加納光益** *Mitsuyoshi Kanoh* 柴田康博** *Yasuhiro Shibata*

産業用鉛蓄電池の無線による常時状態監視システムを開発した。本開発システムは、蓄電池の温度、電圧測定機能に加え、複数周波数による電池抵抗測定機能を搭載し、蓄電池の異常及び劣化の検知が可能である。また、耐ノイズ性能に優れた無線通信機能を有し、これにより最大 1620 個の蓄電池の監視が可能である。産業用鉛蓄電池の異常及び劣化が生じた場合、本開発システムにより、これらの問題を設備運用中に発見することが可能となり、システムダウンの危険を回避できる。これにより、顧客の設備運用効率の向上、予防保全による設備の信頼性向上及び保守点検費用の削減に繋がる技術基盤を構築した。

The wireless and constant monitoring system of lead-acid batteries' states has been developed for industrial use. This system can measure the battery resistance by plural frequency, battery temperature, and battery voltage. Therefore, it is possible to detect abnormality or deterioration of the battery. And this system has superior noise immunity in wireless communication. Therefore, it is possible to monitor up to 1,620 batteries. If abnormality or deterioration of the lead-acid battery occurs, it is possible to find these problems during operation of the facilities and avoid the system failing due to a power shortage. By this development, the technology of this system to improve the efficiency of operating the customer's facilities, the high efficiency of the maintenance measures to prevent the system failing due to a power shortage, and the reduction of the maintenance cost are established.

〔1〕 緒 言

非常用電源設備用の産業用鉛蓄電池は、無停電電源装置 (UPS)、発電機設備、直流電源設備、通信用電源設備などに使用されている。これらの設備に使用されている蓄電池の異常及び劣化は、システムダウンによる重要な設備の機能損失、非常時における電力供給の不安定化に直結するため、蓄電池の維持管理及び予防保全として、保守点検は重要である¹⁾。

また、東日本大震災を契機として、電力供給量が逼迫した状況にあり、消費者の蓄電に対する意識が高まりつつある²⁾。こうした状況の中、電力需要量の多い時間帯のピークシフト^{*1}に代表される新しい電力使用形態も生じ、夜間電力の有効活用、太陽光や風力などの再生可能エネルギーによる発電の出力変動抑制といった蓄電池の新たな役割について頻りに議論されている³⁾。新しい電力使用形態に伴い、従来の非常用電源用途とは異なった蓄電池の使われ方も想定され

ることから、今後は蓄電池が健全に機能しているか否かに関する状態監視技術の必要性がより一層高まると考えられる。

産業用鉛蓄電池は電源機器に常時接続されているため、定期的な保守点検の際には、電源機器を一旦停止させ、電源機器から切り離れた状態で蓄電池の電圧や電池抵抗の測定が必要になる。近年では電源機器を停止させることなく蓄電池の温度、電圧及び電池抵抗などを測定し、測定データを無線通信して、蓄電池の異常及び劣化を判定する常時監視方式の状態監視システム (常時状態監視システム) の開発が進んでいる。常時状態監視システムで蓄電池の不良及び故障を迅速に発見できることで、突発的な蓄電池の異常の検知も可能であり、設備運用効率の向上及び保守点検費用の削減が期待できる。

蓄電池の劣化検出精度に優れた産業用鉛蓄電池の無線による常時状態監視システムを開発したので報告する。

※1) ピークシフト：蓄電池を使用して電力需要の少ない夜間に蓄電し、電力需要の多い昼間に放電すること。

*名張事業所 **産業用蓄電システム事業本部 SE 事業統括部

【2】無線による常時状態監視システム

2.1 システム構成及び仕様

図1は本開発システムの装置構成を、表1はシステム仕様を示す。本開発システムは、無線子機、無線親機及び上位コントローラから構成される。無線子機が測定した蓄電池の温度、電圧及び電池抵抗を無線親機へと無線通信する。測定データは、無線親機からLANケーブルで接続された上位コントローラに送られる。上位コントローラは、測定データを管理し、測定データの経時変化に基づく特徴などにより蓄電池の異常及び劣化を判定する。監視蓄電池個数は、最大1620個（無線子機270個×無線親機6台）である。無線に使用する周波数帯は、ユーザー毎の無線局免許取得が不要な2.4GHz帯を選定し、無線方式は一般に使用されているIEEE802.15.4を採用した。

2.2 無線子機回路構成及び仕様

図2は無線子機回路構成、図3は無線子機基板、表2は無線子機の各回路の役割、表3は無線子機の仕様を示す。表2の回路構成③～⑥は、CPUからの指令によって回路機能のON/OFFが可能であり、ONの割合を最小限にすることで、子機の消費電流を24時間平均で2mA以下に抑えている。

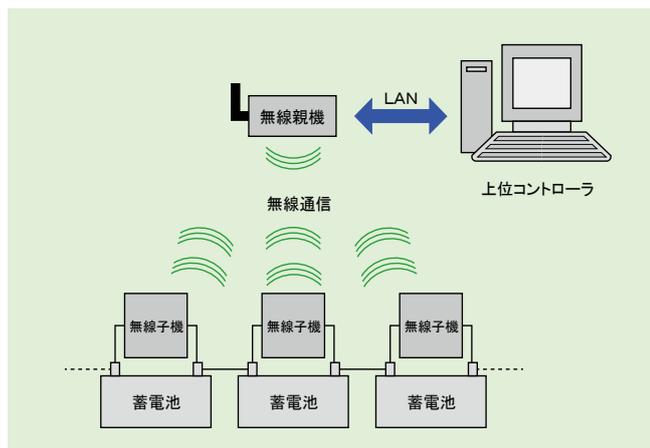


図1 無線による常時状態監視システムの装置構成
Fig.1 Equipment configuration of wireless monitoring system of storage batteries' states

表1 システム仕様

Table 1 Specifications of development system

項目	内容
構成装置	上位コントローラ 無線親機 無線子機
通信方式	IEEE802.15.4 (2.4GHz帯)
対応電池	MSE, MSJ, UP
監視電池個数	1620個 (無線子機270個 × 無線親機6台)
監視項目	電圧, 温度, 電池抵抗 (複数周波数)

表2 無線子機の各回路の役割

Table 2 Wireless device part of each circuit

回路構成	内容
① 保護回路	無線子機逆接や過電流・内部短絡を保護する
② 電源回路	CPUやICの動作電圧を作り出す
③ 温度・電圧測定回路	温度・電圧を測定する
④ 抵抗測定回路	電池に電流を印加して、その際の電圧変化を検出する
⑤ 無線回路	無線親機を通して上位コントローラと通信を行う
⑥ CPU	各種制御を行う

【3】蓄電池の劣化検出精度向上

3.1 制御弁式鉛蓄電池の劣化メカニズム

本開発システムの蓄電池の劣化検出精度向上を図るため、制御弁式鉛蓄電池の劣化メカニズムについて検討した。図4は制御弁式鉛蓄電池の寿命要因を示す^{4) 5)}。寿命要因としては大きく分けて三つ挙げられる。

一つ目が電解液中の水の減少である。水の減少の原因は、過充電による水の電気分解反応、電槽からの透湿及び正極板の格子腐食である。水の減少により、制御弁式鉛蓄電池の極板とリテーナに含まれている電解液の抵抗が上昇することで、電池抵抗のオーミック抵抗成分に影響が現れる。

二つ目は正極板の劣化である。正極板は過充電により、格子腐食が発生し、集電体のオーミック抵抗が上昇する。また、格子腐食が格子変形を引き起こし、活物質の脱離の発生、格子/活物質間の絶縁層生成により、格子と活物質間の電池抵抗の反応抵抗成分が増加する。

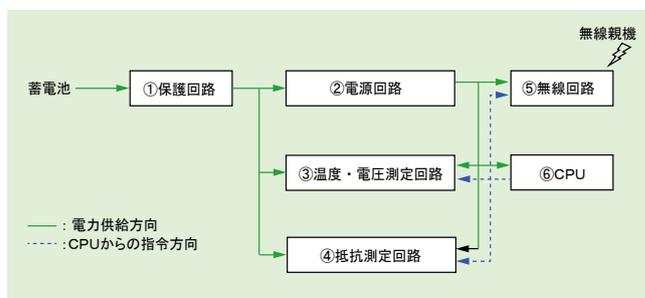


図2 無線子機回路構成
Fig.2 Configuration of wireless device circuit



図3 無線子機基板
Fig.3 Appearance of wireless device

表3 無線子機の仕様

Table 3 Specifications of wireless device

項目	内容
対象電池電圧	6/12 V
監視電圧範囲	4.0~15.5 V
監視温度範囲	-20.0~60.0 °C
監視電池抵抗範囲	0.5~11.0 mΩ
消費電流	2 mA以下
外形寸法	W66 × H56 × D13 mm

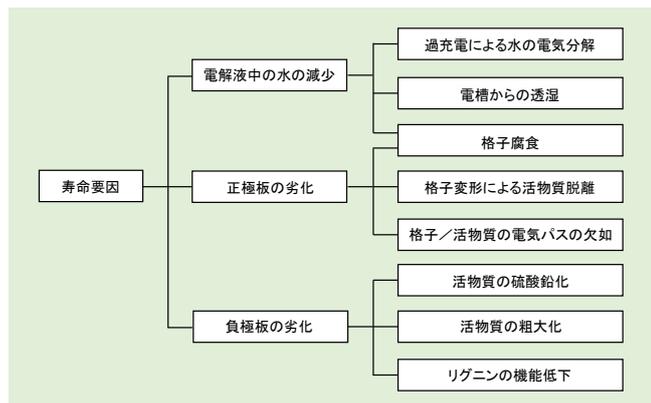


図4 制御弁式鉛蓄電池の寿命要因
Fig.4 Lifetime factors of valve-regulated lead-acid battery

三つ目は負極板の劣化である。負極板の劣化では、充電による活物質の硫酸鉛化、粗大化及びリグニンの機能低下⁶⁾により、電池抵抗の反応抵抗成分に影響が表れる。

オーミック抵抗成分は電気化学インピーダンス測定において原理的に高周波領域に現れる成分であり、反応抵抗成分はかなり低周波領域に影響が現れる^{7) 8)}。上記三つの寿命要因により、電池抵抗は上昇する。通常、非常用電源設備用の鉛蓄電池は正極格子の腐食により寿命となるが、まれな現象として鉛部品の腐食による断裂、蓄電池内の異物による短絡という現象が起こる場合がある。

これらの蓄電池の異常及び劣化検出に最適な電池抵抗測定周波数を検討した。

3.2 電池抵抗測定周波数の決定

試験電池には、使用年数の異なる制御弁式据置鉛蓄電池 MSE-200 (公称電圧 2V, 10HR 容量 200Ah) を用いた。電気化学インピーダンス測定により、周波数特性を解析した。表4は周波数応答解析器による測定条件を示す。今回の検討では絶対値であるインピーダンス $|Z|$ を用いた。インピーダンスは複素数で表され、蓄電池のオーミック抵抗及び反応抵抗といった抵抗の情報である実数部と、コイルやコンデンサの抵抗といったリアクタンスの情報である虚数部に分けられる。

図5は使用年数の異なる MSE-200 の周波数特性を示す。経時劣化が進行するにつれ、各周波数におけるインピーダンス $|Z|$ が増大している。低周波数領域において各蓄電池のインピーダンス $|Z|$ が増大しており、各蓄電池のインピーダンス $|Z|$ の差が顕著になっている。このインピーダンス $|Z|$ の差は反応抵抗に関する劣化、つまり負極の比表面積の低下や正極活物質相互間の電気パスの減少と示唆される^{4) 5)}。

以上のことから、無線子機による蓄電池の電池抵抗測定に用いる周波数を、蓄電池のオーミック抵抗の観察可能な高周波数領域 (350Hz ~ 2kHz)、電池反応抵抗を観察可能な低周波数領域 (100Hz 未満) 及びその中間の周波数領域 (100 ~ 350Hz) から複数選択した。

高周波数領域 (350Hz ~ 2kHz)、中間周波数領域 (100 ~ 350Hz)、低周波数領域 (100Hz 未満) の各領域から決定した測定周波数を、以下「高周波数」、「中周波数」、「低

周波数」と表す。

3.3 L4 直交表に基づく実験による加速寿命評価試験

3.3.1 電池抵抗評価試験

制御弁式鉛蓄電池は、実使用において温度環境・電源の品質・使われ方が異なるので、劣化進行は単純に使用年数を反映しているわけではない。そこで、実験計画法における L4 直交表に基づく実験により使用温度、使われ方の差異による劣化への影響及び交互作用による組合せ効果を評価した。表5は L4 直交表に基づく実験内容を示す。図6は無線子機を装着した試験電池の外観を示す。

表4 周波数応答解析器による測定条件

Table 4 Measurement conditions of frequency response analyzer

項目	内容
試験電池	MSE-200
試験温度	25 °C
測定状態	2.23 V トリクル充電状態
測定周波数範囲	100 mHz ~ 2 kHz
積算回数	10 回

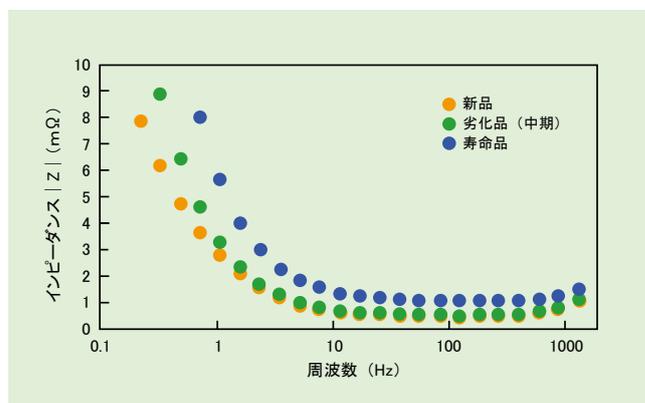


図5 使用年数の異なる MSE-200 の周波数特性

Fig.5 Frequency characteristics of different MSE-200 batteries of different age

表5 L4 直交表に基づく実験内容

Table 5 Contents of L4 orthogonal array in experiment

項目	温度	使われ方
L1	25 °C	トリクル
L2	25 °C	サイクル
L3	60 °C	トリクル
L4	60 °C	サイクル



図6 無線子機を装着した試験電池の外観

Fig.6 Appearance of test battery equipped with wireless device

無線子機の電池抵抗測定機能を用いて、試験電池の電池抵抗を測定した。測定周波数は3.2節で決定した三つの周波数を用いた。試験電池には、表5で示すL4直交表に基づく加速寿命評価試験により、数段階に加速劣化させた制御弁式据置鉛蓄電池UP300-12A（公称電圧12V、10HR容量100Ah）を用いた。図7はトリクル充電状態の試験電池の電池抵抗と1.0C放電持続時間の関係を示す。図7より以下のことがわかった。

- (1) 各周波数で測定した電池抵抗は1.0C放電持続時間と相関がある。
- (2) 1.0C放電持続時間の低下に伴う電池抵抗の増加率は、高周波数及び中周波数で測定した場合と、一般的な市販の電池抵抗計（周波数1kHz）で測定した場合でほぼ等しい。
- (3) 1.0C放電持続時間の低下に伴う電池抵抗の増加率は、高周波数で測定した場合よりも、低周波数で測定したほうが大きい。

電池抵抗の増加率が大きいということは、劣化の程度が顕著に現れていることを意味する。(1)～(3)より、各周波数で測定した電池抵抗は、設備稼働中においてもノイズの影響を受けず、蓄電池の劣化が検出できていることが示された。一般的な市販の電池抵抗計は蓄電池のオーミック抵抗を測定しているものが主である。高周波数及び中周波数で測定した電池抵抗は、一般的な市販の電池抵抗計で測定した電池抵抗とほぼ等しいことから、今まで一般的な市販の電池抵抗計による測定で蓄積してきたデータベースを活用することができる。低周波数で測定した電池抵抗の1.0C放電持続時間の低下に対する増加率が最も大きいことから、蓄電池の微小な劣化の検知に有効である。これは蓄電池の反応抵抗成分が電池抵抗に現れているためである。高周波数及び

中周波数による電池抵抗測定は蓄電池のオーミック抵抗の情報を、低周波数による電池抵抗測定は電池反応抵抗の情報を得るのに有効である。

3.3.2 劣化解析による各因子の蓄電池に及ぼす影響

図7の結果を、表5のL4直交表に基づく実験内容に割り付けて各因子の蓄電池に及ぼす影響を解析した。図8は25℃トリクル試験電池の測定値を基準とした低周波数による電池抵抗増加率の要因効果図を示す。図9は25℃トリクル試験電池の1.0C放電持続時間を基準とした1.0C放電持続時間低下率の要因効果図を示す。交互作用とは、温度及び使われ方の両方の因子による組合せ効果の有無を示しており、傾きが大きいほど組合せ効果があることを表わす。図8及び図9より、以下のことがわかった。

- (1) 使用温度による影響では、60℃の方が25℃と比較して電池抵抗増加率が大きい。高温による加速寿命評価試験での電池劣化を顕著に反映しているといえる。
- (2) 無線子機の低周波数で測定した電池抵抗は、一般的な市販の電池抵抗計と比較して電池抵抗の増加率が大きく、蓄電池の劣化検出感度が高い。
- (3) 無線子機で測定した電池抵抗の増加率及び1.0C放電持続時間低下率の要因効果図の傾向は同じである。

今回のL4直交表に基づく実験では、各因子の影響による劣化の程度を独立的に数値で評価できる。劣化の程度が大きいと推定される高い温度条件や、サイクル環境で使用した場合の電池抵抗の増加率が高い。高温による加速寿命評価試験の劣化加速環境により、特に電解液中の水の減少、過充電による格子腐食及び負極の有効反応面積の低下が発生する⁴⁾。また、サイクル使用による加速寿命評価試験の劣化加速環境で、正極活物質の劣化も顕在化し易い⁵⁾。

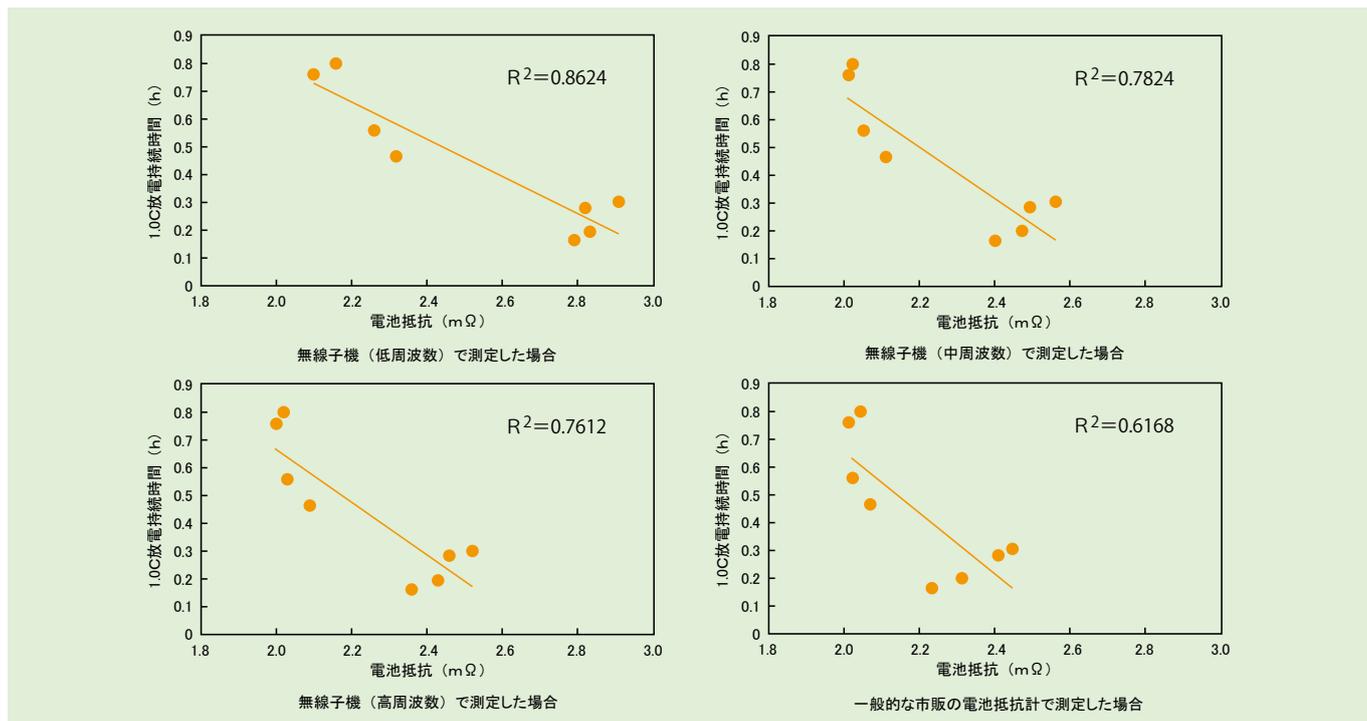


図7 電池抵抗と放電持続時間の関係

Fig.7 Relationship between battery resistance and discharge continuation time

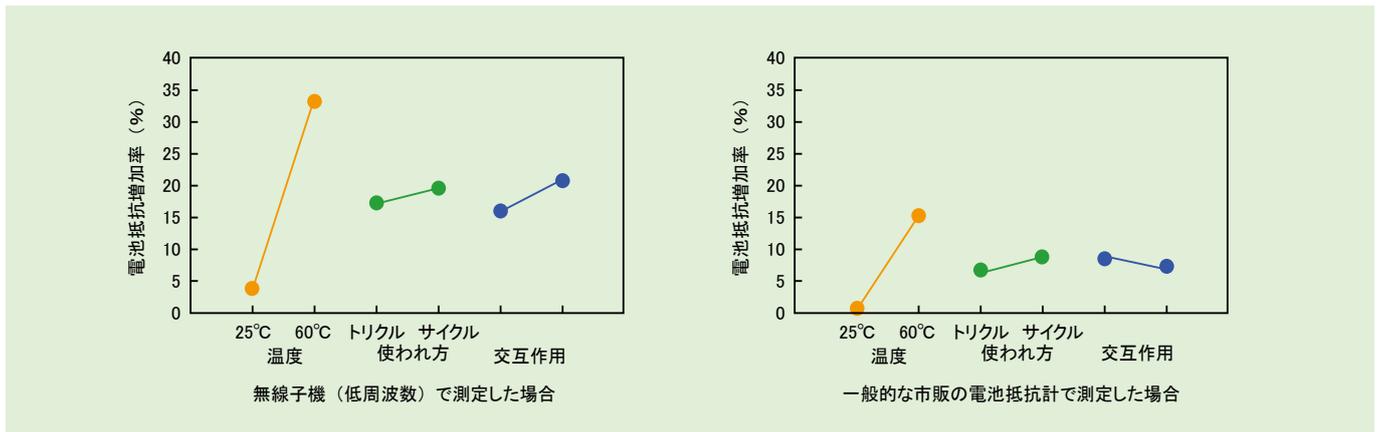


図8 要因効果図（電池抵抗増加率）
Fig.8 Graphs of factorial effects (rate of increase for battery resistance)

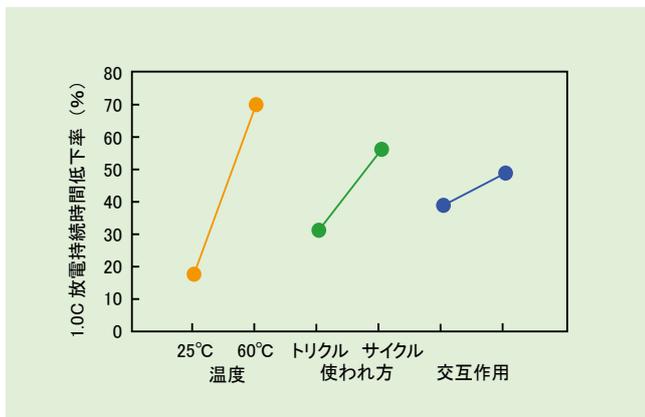


図9 要因効果図（1.0 C 放電持続時間低下率）
Fig.9 Graph of factorial effects (rate of decrease for 1.0 C discharge continuation time)

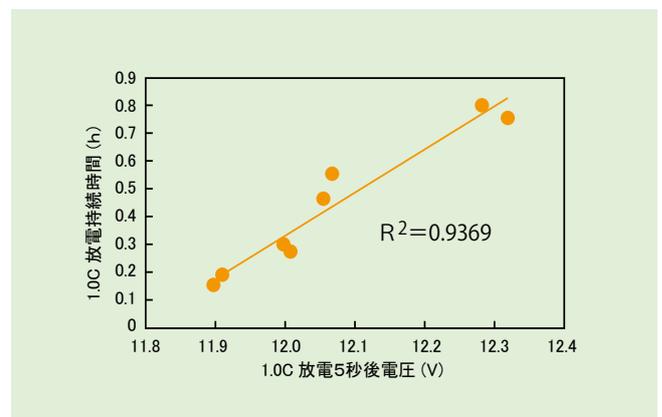


図10 1.0 C 放電持続時間と 1.0 C 放電 5 秒後の電圧
Fig.10 Relationship between 1.0 C discharge continuation time and voltage five seconds after 1.0 C discharge

このことより、無線子機による測定結果は蓄電池の劣化傾向を良く反映しており、無線子機は当初の期待通り感度良く蓄電池の劣化を検出できているといえる。

3.4 放電による電圧降下確認試験

電池放電電圧データを活用した蓄電池の劣化判定について検討した。

放電による電圧降下を記録し管理することは、蓄電池の劣化を推定する上で有効である⁴⁾。近年の電力事情により、新たな電力使用形態も想定され、蓄電池の放電頻度が上がる可能性もある。このことから、放電データを劣化の推定パラメータとして活用するため、停電を自動判断し、電池放電電圧データを取得する機能を無線子機に搭載した。

電圧降下確認試験では停電を想定し、トリクル充電直後の電池放電電圧データから劣化を判定するため、試験電池の放電時の電圧を測定した。図10は1.0C放電持続時間とトリクル充電状態から1.0C放電5秒後の電圧を示す。図10より、1.0C放電持続時間と1.0C放電5秒後電圧は相関がある。電池放電電圧データを取得する機能を無線子機に搭載することで、設備の停電回数や蓄電池の電圧降下の情報から上位コントローラが判定し、蓄電池の異常及び劣化を検出することができる。

蓄電池の劣化を判定するため、強制的に放電させる機能

を持つ非常用電源設備は存在するが、非常用電源設備の本来の機能である停電時の電池放電を有効に活用することで、本開発システムは設備を停止させることなく蓄電池の劣化判定が可能である。停電時の電池放電電圧データ測定と電池抵抗測定を併用することで、精度の高い蓄電池の劣化検出が可能になった。

〔4〕無線通信評価試験

電波の反射や回折が発生する環境で無線通信状態を確認するため、キュービクル内で無線通信評価試験を行った。図11は無線通信評価試験の構成を示す。本試験では、図11のように無線親機及び無線子機に使用されている無線モジュールを①～④の位置に配置し、受信強度 (RSSI^{※2}: Receive Signal Strength Indicator) 及びパケットエラー率 (PER^{※3}: Packet Error Rate) を測定した。表6は無線通信評価試験結果を示す。通信区間①-②の通信距離が最も短く、①-④が最も長い。

本開発システムで使用する無線モジュールの最大受信感度値は-92dBmであり、表6に示すように全ての通信区間に

※2) RSSI 測定：無線モジュールが受信した電波強度の測定。
※3) PER 測定：無線モジュール間で、1000回の通信を行った際の受信エラー回数の測定。

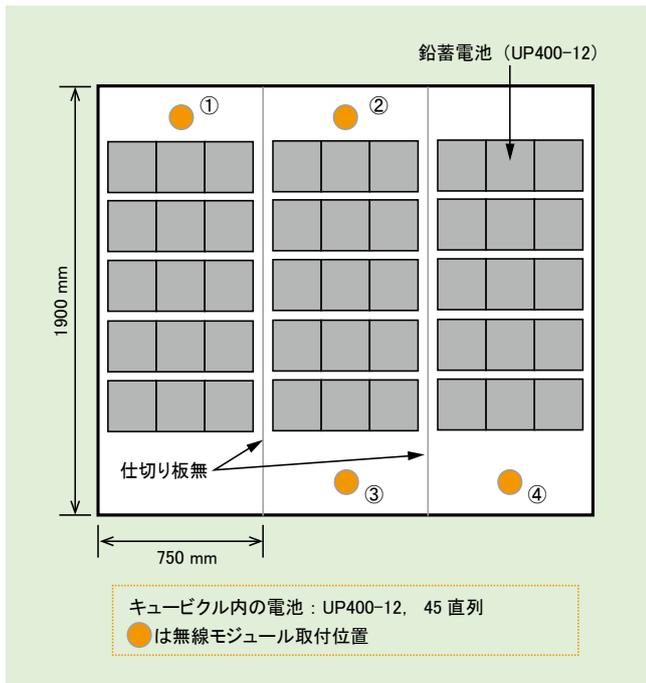


図 11 無線通信評価試験における無線モジュール取付位置の概略
 Fig.11 Schematic diagram of wireless communication test

において -92dBm 以上の値が得られており、受信エラーなく通信ができていたことから、本試験で実施した全ての通信区間において無線モジュール間の無線通信が可能である。

〔5〕 結 言

非常用電源設備用途の産業用鉛蓄電池の無線による常時状態監視システムを開発した。

- (1) 無線子機－無線親機間の無線通信技術を開発し、最大1620個の蓄電池の監視を可能とした。
- (2) 高周波、低周波及びその中間の周波数による電池抵抗測定により、オーミック抵抗及び電池反応抵抗の両方を測定可能にした。
- (3) 電池放電電圧データを取得する機能を無線子機に搭載することにより、設備を停止させることなく蓄電池の異常及び劣化検知を可能にした。

〔6〕 今後の展開

本開発システムは非常用電源設備用途へ適用予定であり、現状、日立グループ内での納入、技術展開が主である。今後は広く海外展開も視野に入れ開発を進め、本開発システムの運用により、低炭素社会の実現に寄与し、地球温暖化抑制活動に貢献していく。

表6 無線通信評価試験結果

Table 6 Results of wireless communication test

通信区間	RSSI	PER	判定基準	判定
①－②	-31.65 dBm	0 回	-92 dBm 以上	○
②－③	-42.14 dBm	0 回		○
②－④	-42.66 dBm	0 回		○
①－④	-57.70 dBm	0 回		○

〔参考文献〕

- 1) 柳田定春 他：POS システム用小形無停電電源装置の開発，新神戸テクニカルレポート，No.7，p.27 (1996)。
- 2) 西岡淳 他：スマートシティを実現するエネルギー管理，日立評論，Vol.91 No.12，p.32 (2011)。
- 3) 寺田正幸 他：低炭素産業基盤を支える産業用蓄電デバイス，日立評論，Vol.92 No.12，p.34 (2010)。
- 4) 塩谷宏 他：据置シール鉛蓄電池劣化判定方法の開発，新神戸テクニカルレポート，No.6，p.20 (1995)。
- 5) 向谷一郎 他：サイクル専用小形制御弁式鉛蓄電池 HC 形の開発，新神戸テクニカルレポート，No.13，p.16 (2003)。
- 6) 木村隆之 他：リグニン構造が与える鉛蓄電池の負極性能への影響，新神戸テクニカルレポート，No.17，p.9 (2007)。
- 7) 電気化学会編：電気化学測定マニュアル基礎編，丸善，p.97 (2002)。
- 8) 木下隆博：複素数解説，オーム社，p.77 (1959)。