

サイクル長寿命制御弁式鉛蓄電池の風力発電への適用

Valve-Regulated Lead-Acid Batteries with a Long Cycle Life for Wind Power Generation System

高林久顯* Hisaaki Takabayashi 佐野伸一** Shinichi Sano
広瀬義和** Yoshikazu Hirose 三谷 桂** Katsura Mitani 野村洋一*** Youichi Nomura

自然エネルギーを利用した発電は、温室効果ガスの排出のない環境にやさしい電力を供給するというメリットがある反面、その発電能力は自然条件により大きく変動するため、電力の安定供給性や電力系統の周波数および電圧を変動させるという問題がある。

この電力変動の吸収や余剰電力の貯蔵など、効果的に電力を利用する手段として、蓄電池設備の併設が有効であるといわれている。

風力発電の変動吸収用途として制御弁式鉛蓄電池を使用した場合の電池の劣化状態把握を目的として、約5年間使用してきたサイクル長寿命制御弁式鉛蓄電池（LL形電池）の特性を測定、評価すると共に、一部のセルを取り外して解体し、内部の変化を調べた。

電池容量は、ほぼ定格値を維持しており、低下は認められず、解体調査したところ、正極集電体の腐食変形の進行は認められたが、部分充電状態（PSOC）で使用されたときに生じがちな活物質のサルフェーションや、短い充放電の繰返しによる局所的な電池劣化や早期容量低下（PCL）は認められず、この電池の変動吸収用途としての適用が可能であることが確認できた。

Electric power generation system using natural energy source, such as wind power, photovoltaic power and etc, a renewable and environmentally friendly energy source, have an advantage of supplying electric power without exhaust of greenhouse gas but a problem which cause instability of voltage and frequency of power grid. Combination with battery energy storage system is one of the effective methods to solve these problems.

For the purpose of verifying its effect, the battery, Valve-Regulated Lead Acid (VRLA) batteries with long cycle life (LL type) was applied to smooth the fluctuations of wind power generation system. This report is its investigation result after about 5 years test.

The capacity keeps standard and no down trend. The corrosion of positive grid is shown of similar level to the usual cycle use. But on the active material, sulfation under the partial state of charge (PSOC) cycle or the partial deterioration and PCL by repetition of short time discharge and charge do not occur. It is verified that this VRLA battery could be used for the application of fluctuation absorption of wind power generation.

〔1〕 緒 言

現在、地球温暖化等の環境問題への注目度が高くなっている。わが国では、気候変動に関する国際連合枠組条約第3回締約国会議（COP3）で採択された京都議定書の“温室効果ガスを2010年度までに6%削減する”という目標に対し、2005年時点で実質的には約7.8%増加している状況であり、この温室効果ガスの排出量削減対策が重要な課題となっている。

これに対する有効な手段の一つとして、太陽光や風力などの自然エネルギーを利用した発電があり、その導入目標量を2010年度に太陽光発電で482万kW、風力発電で300万kWとし

ている。

自然エネルギーを利用した発電は、温室効果ガスを排出しない環境にやさしい電力を供給するというメリットがある反面、その発電能力は自然条件により大きく変動するため、電力の安定供給性や電力系統の周波数および電圧に与える影響が問題となる。

この電力変動の吸収や余剰電力の貯蔵など、効果的に電力を利用する手段として、蓄電池設備の併設が有効であるといわれている。風力発電の出力変動平滑化用途への蓄電池の適用は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が実施した『蓄電池併設風力発電導入可能性調査』において、鉛蓄電池、ナトリウム-硫黄電池、レドックスフロー電池を使

用して検討され、いずれも充分可能であると評価された¹⁾。

これまでは、系統電力が小さく、風力発電による発電量の割合が大きくなる一部の離島を除き、風力発電による発電量が系統容量に対して小さかったために、それほど問題にならなかったが、今後風力発電の導入量が多くなると、その影響が顕著になってくるはずであり、風力発電の増加に伴い、蓄電池設備の必要性は高くなると考えられる²⁾。

当社は、これまでに電力の負荷平準化のための夜間電力貯蔵用として、サイクル長寿命の制御弁式鉛蓄電池（以後、LL形電池と記す）を開発してきた^{3) 4) 5) 6)}。このLL形電池が2002年から、実際の風力発電システム（1200kW）で使用されてきた。

夜間電力貯蔵用途と風力発電の変動吸収用途では、充放電の制御等、電池の使用条件に大きな差があるため、電池の劣化等にも違いが生じると予想される。そこで、この電池を風力発電の変動吸収用途として使用した場合の状態を把握し、変動吸収用途としてのさらなる性能向上を目的として調査した結果を報告する。

〔2〕サイクル長寿命制御弁式鉛蓄電池（LL形電池）の概略

2.1 電力の負荷平準化を目的とした夜間電力貯蔵用途と風力発電変動吸収用途の違い

一般に鉛蓄電池は、その使用方法により電池の劣化の状況が異なる。負荷平準化を目的とした夜間電力貯蔵用途と電圧や周波数の変動吸収を目的とした風力発電用途における電池の使用法の比較を表1に示す。

夜間電力貯蔵用途においては、夜間電力を昼間の電力消費のピーク時に使用するので、電池は、毎日比較的深い放電を行う。また、系統電力を使用する充放電システムとなるため、充放電時の電流、電圧、電気量の制御が可能であり、電池を

比較的安定した状態で使用できる。

風力発電の変動吸収用途では、充放電の電流は非常に短い間隔で連続的に変化し、電池の充放電の電圧や電気量の制御が困難となる。また、風力発電の発電量の変化に対して、電池は常時充電を受け入れられる状態である必要があるため、SOC（State of Charge：充電状態）を下げたPSOC（Partial State of Charge：部分充電状態）でのサイクル使用となり、電池の早期劣化を防ぐため、定期的に電池を完全充電状態に戻す均等充電が必要となる。

このように、夜間電力貯蔵用途に比べて充放電の制御が困難である風力発電の変動吸収用途では、電池のサイクル寿命低下以外にも、PSOCで使用されたときに活物質に生じがちなサルフェーションや短い充放電の繰返しによる局所的な電池の劣化やPCL（Premature Capacity Loss：早期容量低下）が問題となると考えられる。

2.2 LL形電池の概要

夜間電力貯蔵用のLL形電池の概要を表2に示す。高密度、高強度の正極活物質と高耐食性合金の集電体により耐久性を向上させている。また、負極活物質の添加剤を改良することで充電受入れ性の向上や活物質のサルフェーション等を抑制している。さらに電池は横置きに設置することで電極とリテナー間の密着性を維持するとともに、電解液の成層化を抑制している。これら長寿命化仕様のLL形電池を用いて、充放電時のパターンや電気量を制御することにより、3000サイクルを越える長寿命化を達成した。図1にLL形電池のサイクル寿命試験の結果を示す。

この電池を風力発電の変動吸収に使用するために、耐PCL特性や、長期間PSOCサイクルで使用したときの回復性能を、従来の制御弁式鉛蓄電池（以下、汎用品という）と比較、評価した。

電動車両用電池の評価として開発した間欠ハイレート放電によるPCLの評価試験^{7) 8)}を実施して調べた。その結果を

表1 夜間電力貯蔵用途と風力発電変動吸収用途での電池使用法の比較

Table 1 Comparison of Use of Battery.

項目	夜間電力貯蔵用途	風力発電用途
目的	負荷平準化	変動吸収
使用方法	夜間充電一昼のピーク時放電	常時連続的な短時間充放電
使用状態	充電状態（SOC）100%から深放電	常時充電を受け入れられる状態にするため、充電状態を下げた部分充電（PSOC）状態で使用 定期的な均等充電が必要
充放電制御	電気量の制御可	電気量の制御困難

表2 LL形電池の概要

Table 2 Specification of the LL Type Battery.

項目	内容	目的
正極集電体	高耐食性合金（Pb-Ca-Sn合金）	正極集電体腐食変形抑制
正極活物質	高密度・高強度	泥状化・崩壊抑制
負極活物質	添加剤改良（リグニン、カーボン）	充電受入れ性向上 サルフェーション抑制 充放電効率向上 充電電気量抑制による正極集電体腐食抑制
電池構成・使用条件	横置き（極板水平方向） 横置きに適したリテナー 添加剤の使用	成層化抑制 電極とリテナー間の密着性を維持
	電気量管理による充放電制御	過充電量制御による正極集電体腐食抑制 電力効率向上

図2に示す。また、PSOCサイクルで使用した場合の回復性能について汎用品と比較した結果を図3に示す。

PCL耐久性試験では、汎用品では早期に容量が低下するのに対して、LL形電池は容量低下が見られず、PCLが生じにくいことがわかる。

また、長期間のPSOCサイクル使用からの回復性能についても、3ヶ月間、6ヶ月間の使用では、汎用品に比べ容量の回復性能に優れ、風力発電の変動吸収用途に適した電池と考えられる。

[3] 風力発電システム稼働中の電池調査

3.1 風力発電システム

今回調査した風力発電システムの仕様を表3に、風車および電池の写真を図4に示す。

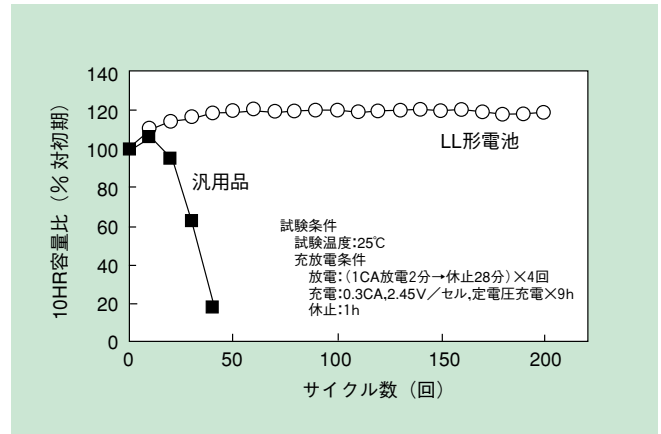


図2 PCL現象加速評価試験の容量推移
Fig.2 Change in Discharge Capacity during Accelerated PCL Cycle Test.

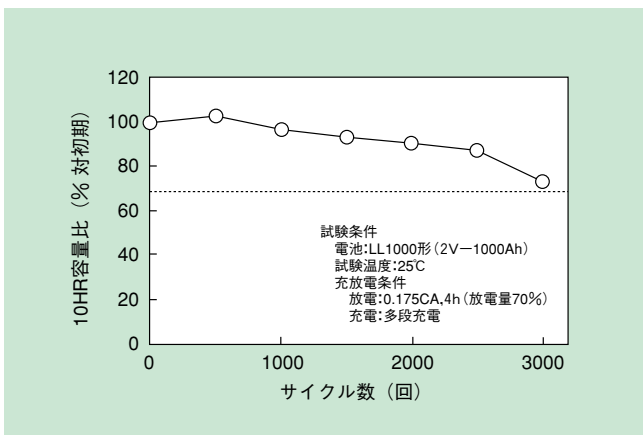


図1 LL形電池のサイクル寿命試験結果
Fig.1 Result of Cycle Test of LL Type Battery. (2V-1000Ah)

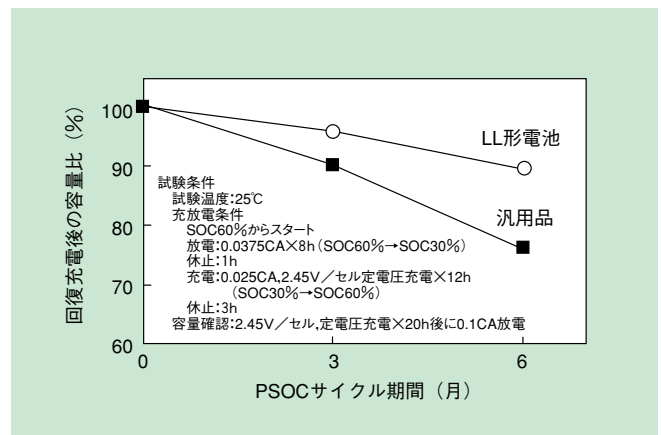


図3 PSOCサイクル試験における電池の回復性能の比較
Fig.3 Comparison of Capacity during PSOC Cycle Test.

表3 風力発電システムの概要

Table 3 Outline of Wind Power Generation System.

項目		仕様
風力発電機		1200 kW (600kW-2機)
電池 (制御弁式鉛蓄電池)	型式	LL1000形
	公称電圧	2 V
	公称容量	1000 Ah
	接続数	200セル直列-2並列 (400V-2000 Ahで使用)
用途		風力発電の発電変動吸収と出力低下時のバックアップ



図4 風車と電池写真
Fig.4 Wind Turbine Generator and LL Type Battery.

本風力発電システムは、風力発電機と電池からなる。風力発電機は2台の風車による出力1200kWの規模である。この風力発電機の変動吸収と出力低下時のバックアップのために電池が設置され、2002年から稼働している。この電池は、夜間電力貯蔵用に開発されたサイクル長寿命の制御弁式鉛蓄電池（LL1000形、2V-1000Ah）で、200セル直列-2並列の構成であり、400V-2000Ahで使用される。

電池を風力発電の変動吸収を目的として使用する場合、通常は電池のSOCを下げたPSOCの状態で使用するので、活物質のサルフェーションを防ぐために、定期的に均等充電を行う形で運用されている。

3.2 稼働状況調査

今回、実際の稼働状況を調査するために、データロガーを設置し、電池電圧、充放電電流、温度を調査した。

本風力発電システムにおいて、通常運転時の電池電圧と電流の測定結果の一例を図5に、均等充電時の電池電圧と電流の測定結果を図6に示す。通常運転時では電池電圧は420~450V（2.10~2.25V/セル）と比較的高く、SOCの高い状態で使用されていた。また、今回実施した1秒間隔での計測でも、電流は最大100A程度で細かく充放電されている状況がわかった。

次に、均等充電時の設定は480V（2.40V/セル）の定電圧充電になっているが、風力発電機からのパルス電流を吸収

するため、一時的に最大で550V（2.75V/セル）にまで電圧が上がっていた。また、電池は電気室に近いところに設置され空調設備もないため、電池の温度は冬季で32℃程度、夏季で38℃程度であり、年間を通じで電池使用環境の温度は比較的高い状態であったと考えられる。

3.3 セルの調査

本風力発電システムにおいて約5年間使用した電池の中から調査用のセルを抜き取り、放電容量、電圧、内部抵抗を測定するとともに、解体して内部の変化を調べた。

(1) 電池試験

約5年間使用した電池から抜き取った調査用セルの電圧、内部抵抗を図7に示す。電圧が特に低下しているセルはなく、内部抵抗は約0.3mΩと初期値の1.2倍程度となっていた。これは、後述するように、電池温度が高かったことと充電時の電圧が高くなること等により、電解液の減少や正極集電体の腐食が進行したためと考えられるが、問題となるレベルではなかった。

放電試験時の放電曲線を図8に示す。電池容量は、0.1CA放電で定格容量の96~106%を維持しており、容量の低下は見られなかった。放電曲線にも異常はなく、PCLの発生も認められず、約5年間の使用においても、電池の放電性能に大きな劣化は見られなかった。

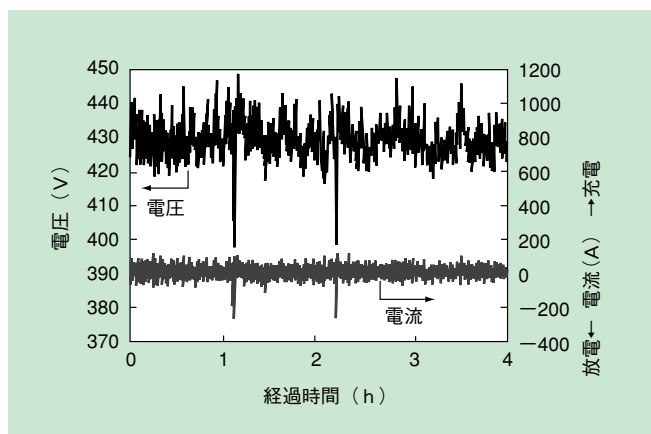


図5 通常運転時の電池電圧と電流の測定結果
Fig.5 Batteries Voltage and Current during Normal Operation.

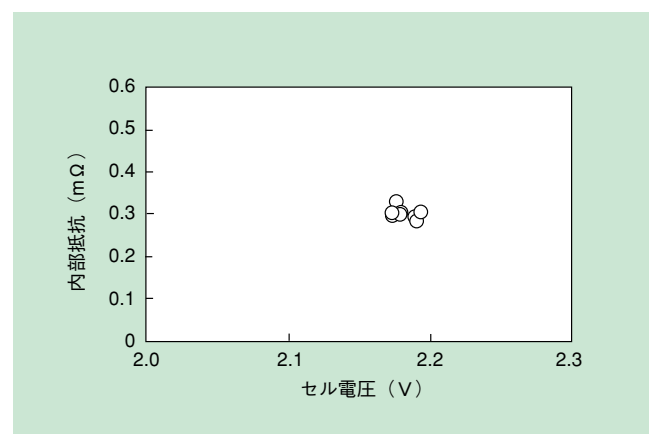


図7 調査セルの電圧と内部抵抗
Fig.7 Voltage and Internal Resistance of Investigation Batteries.

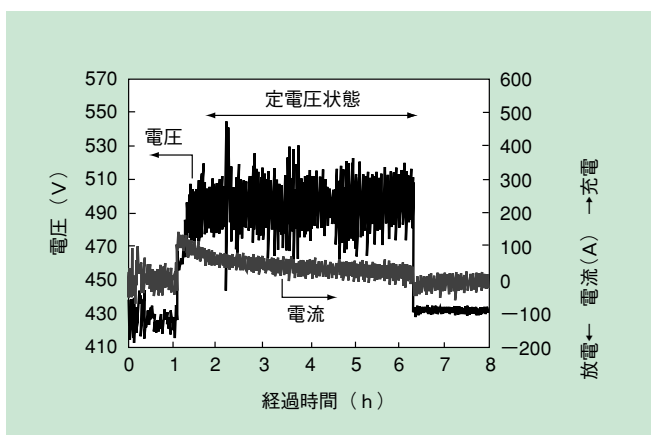


図6 均等充電時の電池電圧と電流の測定結果
Fig.6 Batteries Voltage and Current during Equalizing Charge.

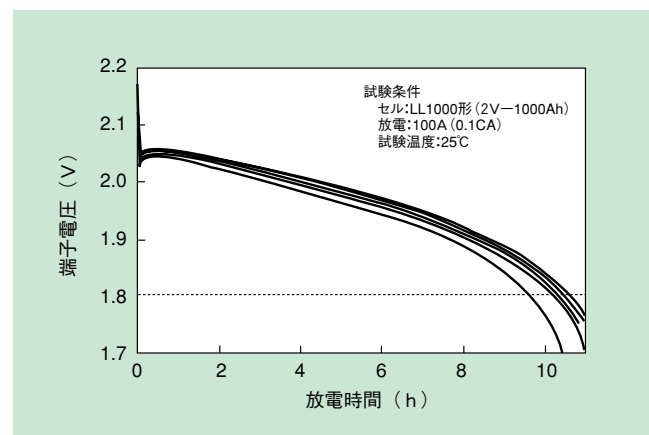


図8 セルの放電試験結果
Fig.8 Result of 0.1CA Discharge Test.

表4 セル調査の結果
Table 4 Summary of Battery Investigation.

項目		状況
セル	容量	97~106% (図8)
	電圧	約2.18V (図7)
	内部抵抗	約0.3mΩ (約1.2倍) (図7)
	極板群	短絡なし
	ストラップ	腐食、割れ等の異常なし
正極	外観	変形あり(約3%)、泥状化・脱落少ない
	硫酸鉛	少ない、平均約4% (図9)
	集電体腐食	寿命レベルに対し約60% (図10)
負極	外観	変形なし
	硫酸鉛	少ない、平均約5% (図9)
電解液	液量	減少あり
	比重	約0.03上昇
	成層化	ほとんどなし (図11)

(2) セル解体調査

この調査用セルを解体した結果を表4に示した。解体時の正極板の外観からは、活物質の泥状化等による活物質の脱落や短絡はなかった。

正、負極活物質中の硫酸鉛量の測定結果を図9に示す。硫酸鉛量は正極活物質で平均約4%、負極活物質で平均約5%であり、サルフェーションによる活物質中への硫酸鉛の蓄積は認められなかった。本風力発電システムでは、PSOCサイクルでの使用による活物質のサルフェーションを防止するために、定期的に電池を完全充電状態にする均等充電を実施しており、その効果が出ていると考えられる。今後の対策として、この間隔をできる限り広げることにより、電池の過充電を抑制し、電解液の減少や正極集電体の腐食変形をより小さくする検討が必要と考えられる。

正極集電体においては、腐食による変形伸びが最大で約3.8%認められた。また、正極集電体の腐食量を測定した結果を図10に示した。本電池の寿命時の正極集電体の腐食量レベルに対して61%程度の腐食量となっており、集電体の腐食の進行が認められた。正極集電体の腐食量は、温度や電圧、過充電量により増加し、一定条件下では電池の充放電に対して、ほぼ比例的に増加する⁴⁾。したがって、正極集電体の腐食量からみると、現状の使用条件では、約9年程度の使用が可能と推定される。今回の正極集電体の腐食量の増加は、前述のように、電池の温度が高いこと、均等充電時に電池電圧が高くなること等の影響があると考えられる。

次に、電池の充放電を繰り返した際に、下部の電解液比重

が高くなる、いわゆる成層化現象の発生を調べるために、セル内の電解液比重を測定した結果を図11に示す。本風力発電システムの電池は、極板が水平になるように横置き設置されているため、セル内の電解液の比重に大きな差は生じておらず、約5年間の使用では成層化現象は認められなかった。

以上のように、本風力発電システムにおいて、変動吸収と出力低下時のバックアップ用として約5年間使用した電池を調査した結果、現状では電池の性能低下等の大きな問題は認められず、サイクル長寿命の制御弁式鉛蓄電池(LL形電池)を、風力発電の変動吸収用途へ適用することに問題がないことが判った。電池の期待寿命については、今回の使用環境においては、最も劣化が進んでいる項目と考えられる正極集電

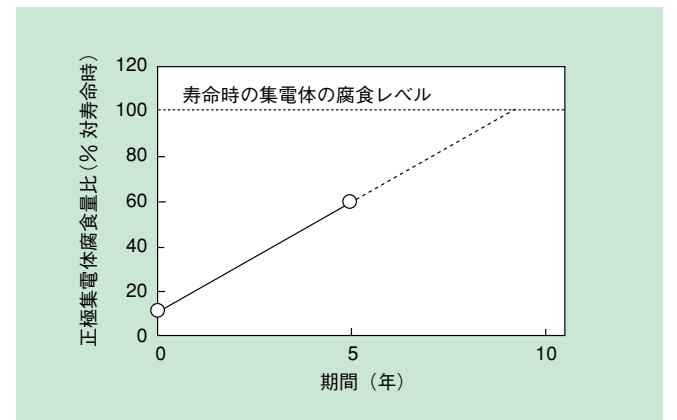


図10 正極集電体の腐食量
Fig.10 Corrosion of Positive Grid.

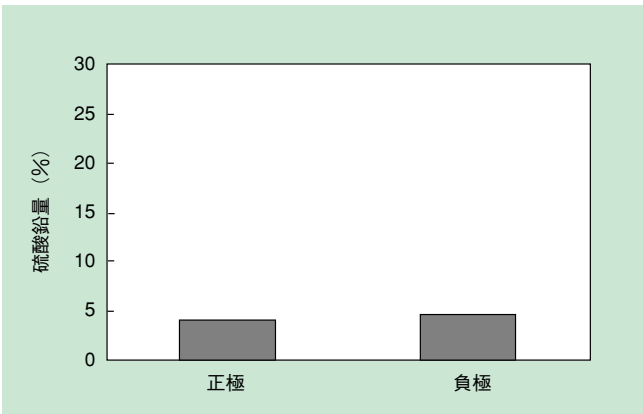


図9 正、負極活物質中の硫酸鉛量の測定結果
Fig.9 Amount of Lead Sulfate in PAM and NAM.

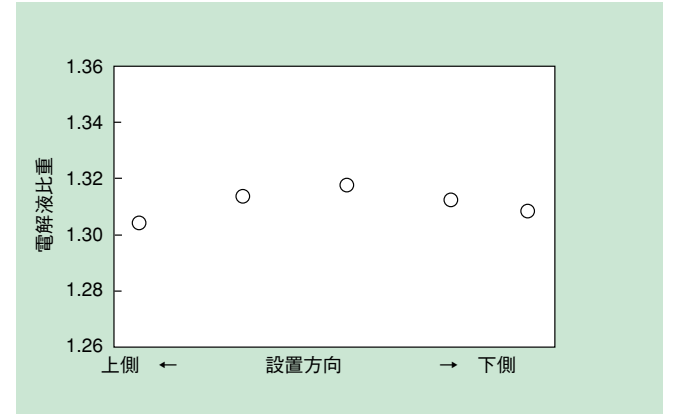


図11 電解液比重の測定結果
Fig.11 Electrolyte Specific Gravity in Battery.

体の腐食量レベルから考えると、現行のLL形電池で約9年程度の使用が可能と見込まれる。

風力発電の変動吸収用途では、システムごとに条件が異なるので、電池の使用可能期間も異なってくると考えられるが、電池の運用条件を適切にすること、および風力発電用途に適した電池仕様に改良することにより、電池の期待寿命をさらに延長することも可能と考えられる。

〔4〕 結 言

風力発電の変動吸収用途として、1200kWの風力発電システムで約5年間使用した電力貯蔵用のサイクル長寿命制御弁式鉛蓄電池（LL形電池）の稼働状況を調査した。

- (1) 電池の容量低下は認められず、風力発電の変動吸収用途として使用できることが確認できた。
- (2) 解体調査の結果、PSOCで使用されたときに活物質に生じがちなサルフェーションや短い充放電の繰り返しによる局所的な電池の劣化やPCLは認められなかった。
- (3) 正極集電体の腐食変形に進行が認められた。これは使用環境温度が比較的高い状態で使用されたことと充電時の電圧が高くなることがある等、使用条件の影響も大きいと考えられる。
- (4) 正極集電体の腐食量の進行状況からみると、現状の使用環境、条件では、約9年程度の使用が可能と見込まれた。

〔5〕 今後の課題と展望

一箇所の風力発電システムの結果ではあるが、今回の調査により変動吸収用途として現行のサイクル長寿命制御弁式鉛蓄電池（LL形電池）が実用に耐えることを確認した。現在、今回調査のシステムも含め、数箇所の風力発電システムでの運用や変動吸収での仕様を想定したベンチテストを実施中であり、今後、使用条件の適正化や電池を改良することで、風力発電の変動吸収用途として、より長期間使用可能な電池を開発して行きたい。

〔参考文献〕

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：“平成12年度調査報告書 蓄電池併設風力発電導入可能性調査”（2002）。
- 2) 桑江登 他：“風力・電池ハイブリットシステム”，電気学会論文誌B, Vol.127, No.6, p.715（2001）。
- 3) 高林久顯 他：“電力貯蔵用制御弁式鉛蓄電池の開発”，新神戸テクニカルレポート, No.11, p.35（2001）。
- 4) Hisaaki Takabayashi, et al : "Development of Valve Regulated Lead Acid Batteries for Power Storage", Proceedings of INTELEC' 03, p.383(2003).
- 5) 川越智夫 他：“小容量サイクル長寿命制御弁式鉛蓄電池LL50-12形の開発”，新神戸テクニカルレポート, No.14, p.19（2004）。
- 6) 高林久顯 他：“サイクル長寿命電力貯蔵用制御弁式鉛蓄電池LL-S形の開発”，新神戸テクニカルレポート, No.15, p.31（2005）。
- 7) 向谷一郎 他：“電動車輛用制御弁式鉛蓄電池の早期容量低下とその判定方法”，第42回電池討論会要旨集, 1C14, p.340（2001）。
- 8) 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.15（2003）。