

集中連系型太陽光発電システム実証研究

Demonstrative Research on Grid-Interconnection of Clustered Photovoltaic Power Generation Systems

下浦一朗* *Ichiro Shimoura* 笈田和佳** *Kazuyoshi Oida* 松村康司*** *Yasuji Matsumura*

太陽光発電システム（以下PV（Photovoltaic）システム）の急速な拡大に伴い、特定の配電系統にPVシステムが集中連系された際、系統の電圧上昇による出力変動等の悪影響が懸念される。当社は、2002年12月より独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下NEDO技術開発機構）が実施する「集中連系型太陽光発電システム実証研究」に参画した。

系統を安定化させ、出力変動を回避する手段として、鉛蓄電池が有効であると考えられている。鉛蓄電池が長期間有効に安定運用できる方法を検討するため、回復充電頻度や放電深度等、蓄電池寿命に影響を及ぼす因子を選定し、群馬県太田市の実証試験地区において種々条件にて試験を実施した。解体調査から、鉛蓄電池の運用方法は放電深度50%、2週に1回の回復充電を適用すれば、鉛蓄電池の運用可能期間は約12年程度であると考えられた。

As photovoltaic(PV) power generation systems have been rapidly expanding, some practical problems, PV system on grid may induce over voltage in distribution lines, are apprehensive. We participated in the program of "Demonstrative Research on Grid-Interconnection of Clustered Photovoltaic Power Generation Systems" organized by NEDO (New Energy Industrial Technology Development Organization) in December 2002 and have been investigating to solve the above problems using lead acid batteries at the test site in Ota-City, Gunma Pref..

To evaluate the optimization of controlled operation method for life extension of VRLA battery (valve regulated lead acid battery), we have been collecting data using for the power conditioning system, e.g. depth of discharge and frequency of recovering charge, which is considered to influence on battery life. On the basis of tear down analysis of batteries tested in the area as well, it was confirmed the life of batteries used for this program will have 12 years as designed by employing two operation modes composed of recovering charge at every two weeks and 50% depth of controlled discharge limit.

〔1〕 緒 言

2008年より京都議定書で締結された第一約束期間に入り、また同年7月に開催されたG8北海道洞爺湖サミットでは、2050年までに世界全体の温室効果ガスの排出量を半減するといった目標が設定されたことから、地球環境保全のための対策がより一層重要な課題となる。

こうした背景のもと、今後PVシステムが配電系統へ局所集中的に導入される集中連系が予想され、PVシステムからの逆流による系統電圧の上昇、系統連系用電力変換装置（以下PCS、Power Conditioning System）から発生する高調波および単独運転防止装置の誤動作等の問題が考えられる。

そこで、これら諸問題について検討するため、NEDO技術開発機構では2002年12月から2008年3月までの期間で「集中連系型太陽光発電システム実証研究」というプロジェクトを計画し、(株)関電工を主体とする研究チームが実行してきた^{1) 2)}。当社は、このプロジェクトに参画、蓄電池の充放電により太陽光発電システムの余剰電力を制御するPCSの開発^{3) 4)}およびこれに用いる鉛蓄電池の運用を担当した。

上記諸問題の中で逆流による系統電圧の上昇は、PVシステムの連系台数の増加に比例して大きくなり、集中連系時には頻繁に系統の制御電圧値を超える可能性がある。

現状はPVシステムの出力電力を絞り込む方法（出力抑制）にて対策しているが、この方法では頻繁に出力抑制が生じる

*電池研究開発センター **名張事業所 ***電池機器事業本部

と発電効率が低下する。また、十分な日射があるにも関わらず発電を停止することは、発電効率を低下させ、エネルギーの有効利用ができない等の問題がある。

本実証研究では、PVシステムに蓄電池を併設し、抑制分の電力を一時的に蓄電池に蓄え、夜間などに負荷へ供給するPCSを使用した対策方法を検討した。当社は、このPCSに用いる蓄電池を長期的に運用する制御方法について検証した。

〔2〕実証試験におけるシステムの概略

2.1 制御弁式鉛蓄電池の概要

PVシステムに併設される蓄電池として、以前はベント式鉛蓄電池が数多く使用されてきた。しかしながら、長寿命化技術を適用した制御弁式鉛蓄電池が近年開発されて以降、ローメンテナンスであるこのタイプの鉛蓄電池が主流となっている。本実証研究でも長寿命タイプの制御弁式鉛蓄電池^{5) 6)}を使用した。

表1に、本実証研究に使用した制御弁式鉛蓄電池の仕様を示す。本蓄電池は、正極集電体に耐食性合金、正極活物質には高密度・高強度活物質を採用すること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の改良により充電受入性や活物質の耐サルフェーション性能を改善している。さらに蓄電池を横置き（極板が水平になる方向）に設置することで電解液の成層化（蓄電池上部と下部の電解液比重に差が生じること）を抑制していることも特長とする。

2.2 住宅用システムの概要

図1に、本実証研究のPVシステムのイメージを示す。本実証研究の実証試験地区は、群馬県太田市の「PalTown 城西の杜」である。太陽電池パネルが553軒の住宅の屋根に配置され、定格4kWのPCS、蓄電池（LL49-12×16個直列）、各種データを収集する計測端末等が収納された屋外収納箱を各住宅に設置した。

図2は、実証試験地区の設置例である。このPVシステムの設置により、「PalTown 城西の杜」は太陽電池パネルの総発電容量2,130kWとなる世界有数の住宅用太陽光発電システムの街となった。

2.3 蓄電池の長寿命化運用試験

本実証研究の主な目的は、局所的に集中したPVシステムからの逆流による電圧上昇の抑制である。系統電圧の上昇時に確実に動作するように、通常時、蓄電池は放電状態で待機させ、回復充電時を除き系統電圧が上昇した際のみ、蓄電池に充電する運用方法が考えられる。この場合、蓄電池はPSOC（Partial State of Charge：部分充電状態）で長期間放置されることが予想され、鉛蓄電池にとってはサルフェーションが起りやすい環境下に置かれることになる。このサルフェーションを防止するには、蓄電池を満充電状態にする回復充電の頻度を多くすることが良いと考えられる。しかしながら、回復充電の実施により、出力抑制回避等の本来システムが目的とする機能を十分発揮できなくなるため、可能な限り回復充電を実施しないほうが望ましい。

本実証研究の目的は、回復充電の頻度と放電深度等を組み合わせた様々な条件にて試験を実施し、蓄電池を長寿命化する制御方法を明らかにすることである。

〔3〕実証試験の結果

3.1 調査内容

表2に、回復充電の頻度、放電深度および部分充電状態での放置時間を試験条件として組み合わせた6種の試験パターンを示す。

実証試験地区においては、住宅毎でPV発電量および負荷量が異なるため、想定したパターンの試験が可能な限り実施できるように、実証試験地区に設置されたPVシステムの計測データを事前に解析し、これに基づき試験住宅を選定し、各試験パターンにて運用した。基本とするパターン①は2005年5月頃より蓄電池付きPVシステムが設置された後、約11ヶ月間試験した。その後2006年4月から、表2に示す各試験パターンでの試験を開始した。なお、パターン③は当初実証

表1 制御弁式蓄電池の仕様

Table 1 Specification of LL49-12.

| 項目 | 内容 |
|-------------|-------------------|
| 形式 | LL49-12 |
| 公称容量（10時間率） | 49 Ah |
| 公称電圧 | 12V |
| 寸法 | H350×L175×W166 mm |
| 重量 | 約27 kg |

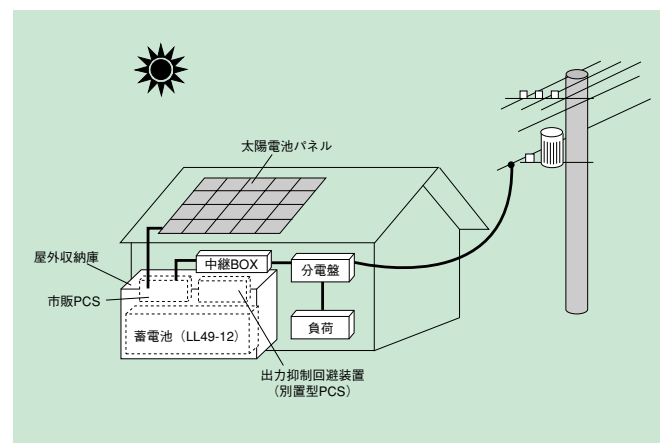


図1 PVシステムのイメージ図

Fig.1 Image of PV system of demonstrative test.

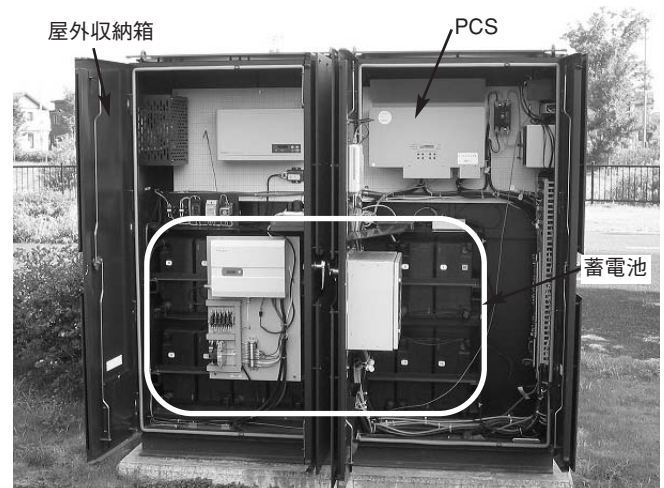


図2 実証試験地区の設置例

Fig.2 Example of installed cabinet of demonstrative test site.

表2 試験パターンの詳細内容

Table 2 Test pattern.

| 項目 | 回復充電頻度 | 動作範囲 (SOC (%)) | | 最大電流値 | 運転モード | 実施軒数 |
|-------|-------------------|----------------|-----|-------|--------------------------|------|
| | | 上限 | 下限 | | | |
| パターン① | 基本パターン | 1回/2週 | 100 | 30 | 充電: 0.3 CA 放電: 0.4 CA | 8軒 |
| パターン② | 使用範囲外 (50%利用した場合) | 1回/2週 | 100 | 50 | | 8軒 |
| パターン③ | 回復充電の頻度 1 | 0回 | 100 | 30 | | 2軒 |
| パターン④ | 回復充電の頻度 2 | 1回/1週 | | | | 8軒 |
| パターン⑤ | 回復充電の頻度 3 | 1回/4週 | | | | 8軒 |
| パターン⑥ | 低SOC放置の検討 | 1回/2週 | 30 | | 電圧制御運転 | 8軒 |

試験地区の管理事務所1ヶ所のみで開始したが、一般の住宅と負荷の状況が大きく異なるため、2007年2月より別途2軒を選定し追加試験を開始した。パターン①～⑤は逆潮流抑制運転、パターン⑥は電圧制御運転による運転モードにて試験した。

逆潮流抑制運転とは、PVシステムの余剰電力をできる限り蓄電池に充電する運転モードである。また電圧制御運転とは、系統電圧が上昇し管理値を逸脱するときに、PVシステムの余剰電力を蓄電池に充電する運転モードであり、蓄電池は回復充電時を除いてはPSOCにて充電を待ち受けている状態におかれる。

これらの試験において、各パターンでの蓄電池の劣化状況は常時計測されている蓄電池の電圧、電流および温度等のデータと、回収した蓄電池の放電試験データおよび解体調査から解析した。

3.2 計測データの解析

3.2.1 蓄電池温度の推移

一般に鉛蓄電池で、起電力、電解液抵抗および電解液の拡散、粘度などが温度の影響を受け、低温側で放電容量が低下し、充電反応も進行し難くなる。一方高温側においては、10℃2倍速のアレニウス則に従い、10℃温度が上昇すると蓄

電池の寿命が約1/2になるといわれており、寿命に対しては厳しくなると推測される。蓄電池の寿命に対する温度の影響は大きいので、蓄電池温度の差異は実証試験地区における気温の季節変動および各試験パターンについて解析した。

図3は、2006年4月から2007年4月までの蓄電池温度の推移を示す。図より試験パターンの違いによる月毎の最大、最小、および平均温度の推移に大きな差異は認められない。全て、4月は約20℃程度であるが、夏場に向け温度が上昇し、8月には約34℃、9月以降温度は低下していく傾向がある。これはPVシステムが屋外設置であるため、気温や日射の影響を受け、蓄電池温度も変動していくためである。

蓄電池温度の最大値についてもパターン⑥が最も低い。これは、電圧制御運転のため満充電状態付近まで充電される頻度が少ないためであると考えられる。

3.2.2 蓄電池の充放電量の推移

本実証試験において、蓄電池への充電の電力源はPVシステムで発電された電力のみとなっている。また給電優先順位が、①住宅負荷、②蓄電池、③逆潮流（回復充電時を除く）となっているため、日射量と負荷量の蓄電池の充放電量に対する影響が大きいと考えられる。そこで、各試験パターンにおける蓄電池の充電量と放電量について調べた。

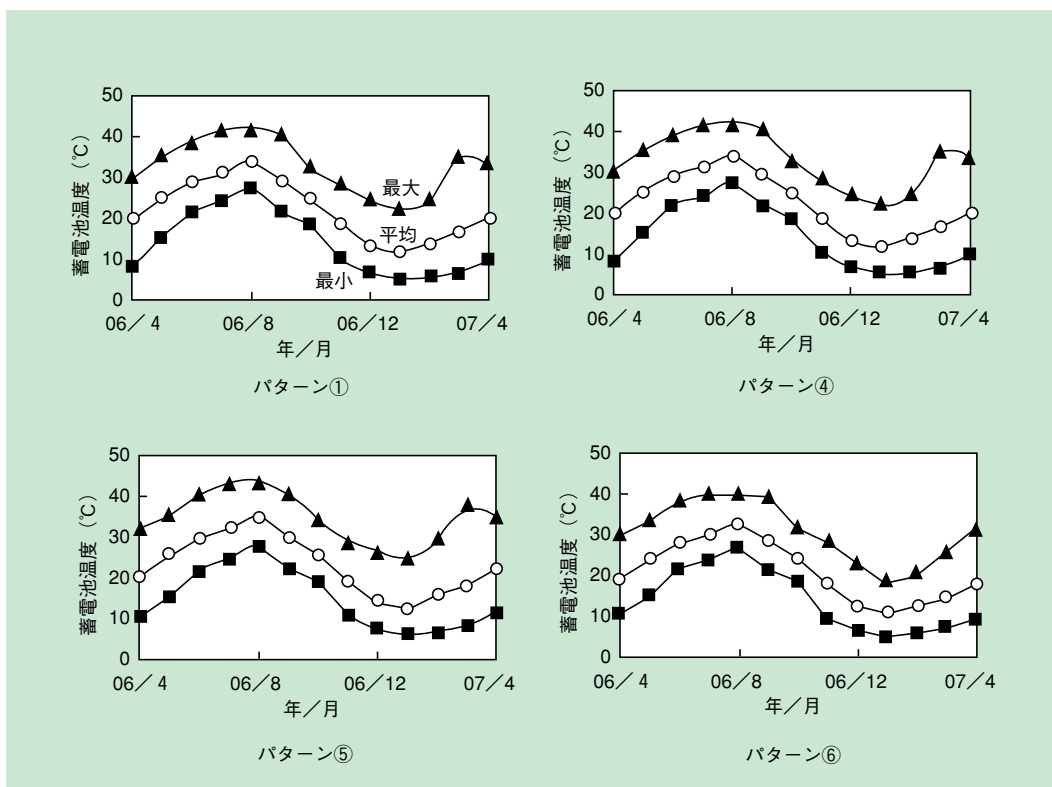


図3 蓄電池温度の推移
Fig.3 Change of battery temperature at demonstrative test.

図4に、蓄電池充電量（日平均）の推移を示す。なお、ここでは蓄電池の充電側が負として表されている。図より全体的に6, 7, 11月の充電量が低い。これについては、6, 7月は梅雨, 11月は秋の長雨により日射量が少ないことによる影響と推測される。図より、パターン⑥が最も充電量が低いことがわかる。

図5に、蓄電池放電量（日平均）の推移を示す。パターン⑥は電圧制御運転のため、回復充電時を除き系統電圧が管理値を逸脱しそうなときに充電されるため充放電の頻度が低い。その結果、パターン⑥の場合、平均放電量が小さくなると思われる。パターン②は他に比べて放電深度の下限が50%と低いため、放電量も小さくなる。平均放電量は、パターン⑥で約9~15Ah, パターン②で約18~22Ah, それ以外では約20~28Ahで推移していることがわかった。

3.2.2 蓄電池の放電容量試験

本実証試験において、住宅負荷の大きさや蓄電池温度は住宅毎や季節によって異なるために、鉛蓄電池の劣化状態は実証試験地区にて常時計測しているデータだけでは、完全には確認できない。そこで、実証試験地区に設置されている蓄電池の劣化状態を確認するため、2007年2月と10月に試験途中の蓄電池を一部回収し、実験室にて一定温度（25℃）の下、定電流放電（0.1CA放電）による蓄電池容量試験が実施された。

表3に放電容量試験の結果を示す。放電容量比の差は、パターン③を除く全ての試験パターンで、2月回収時と10月回収時でほとんど無く、初期に対し110%以上の容量が示された。また、各試験パターンの間で放電容量の差異は認められなかった。回復充電のない運転パターンであるパターン③については、容量試験を3サイクル実施しても初期の70%程度

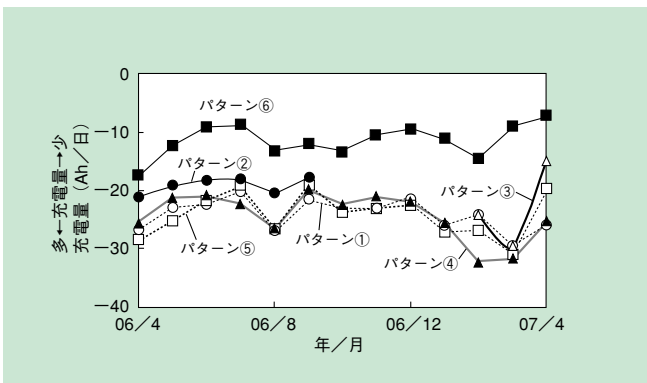


図4 蓄電池充電量（日平均）の推移
Fig.4 Change of charge capacity at demonstrative test.

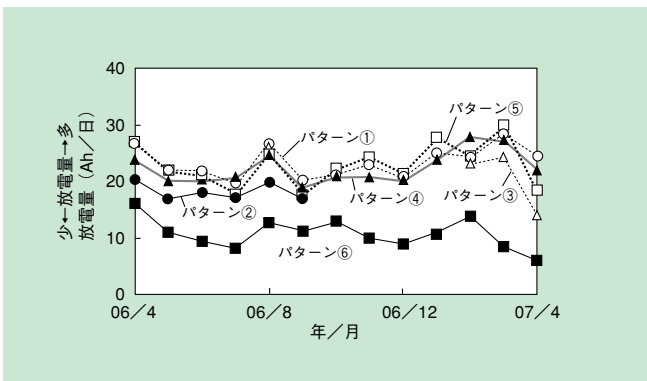


図5 蓄電池放電量（日平均）の推移
Fig.5 Change of discharge capacity at demonstrative test.

にしか回復しなかった。このことより、パターン③については、運転時の充電不足によるサルフェーションが発生していると推測される。

3.3 回収電池の解体調査結果

蓄電池の劣化状況を詳しく調べるため、2007年10月に実証試験地区から回収してきた蓄電池は、容量試験後に一部解体され、劣化状況について調査検討した。

3.3.1 正極集電体の腐食調査

図6に、実証試験における各試験パターンでの正極集電体の腐食量を示す。集電体の腐食量は、集電体の枠骨格子（枠骨）と内側の細骨格子（細骨）について測定した。腐食量は充電量、充電回数などの影響を受け、充電回数が増えれば腐食量は増加していく傾向にある。しかしながら、パターン⑥は充放電量が少ないパターンであるにもかかわらず腐食量が他の試験と同等である。これは、常時低SOC（State of Charge：充電状態）状態であることが影響しており、腐食の進行状態が異なるのではないかと推測される。

そこで、これらの集電体の腐食形態に違いが確認できるか否か、正極集電体の断面を観察した。図7に、正極集電体の断面観察結果を示す。いずれの集電体も腐食の形態は、Pb-Ca合金特有の粒界腐食ではなく、全面腐食となっていることがわかる。この腐食形態については、同じくPSOCで使用されるアイドリングストップ車用の蓄電池にも同様の結果が報告されている⁷⁾。

パターン⑥に関しては、先に述べたように、低SOC状態での試験のため腐食形態が違おうと考えたが、その他の試験パターンとの相違点は見られなかった。低SOC状態で維持されているパターン⑥は、正極の電位が低いいため、電位の影響が腐食量に現れていると推測される。

表3 放電容量の推移
Table 3 Change of discharge capacity.

| 項目 | 容量比（％，対初期） | |
|-------|------------|-----------|
| | 07/2月回収時 | 07/10月回収時 |
| パターン① | 117 | 117 |
| パターン② | 121 | 115 |
| パターン③ | — | 70 |
| パターン④ | 120 | 116 |
| パターン⑤ | 121 | 113 |
| パターン⑥ | 120 | 117 |

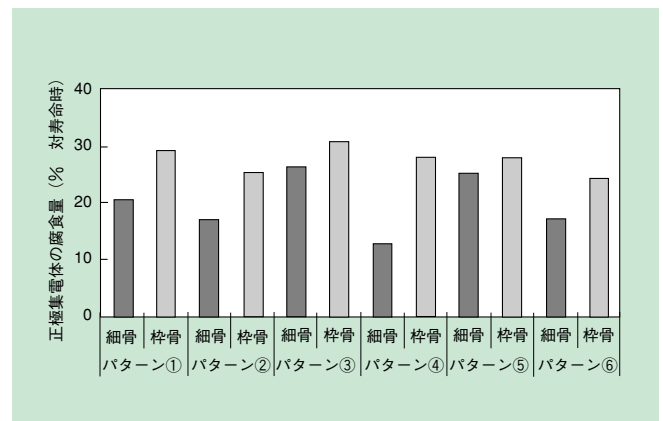


図6 正極集電体の腐食量
Fig.6 Corrosion of positive grid.

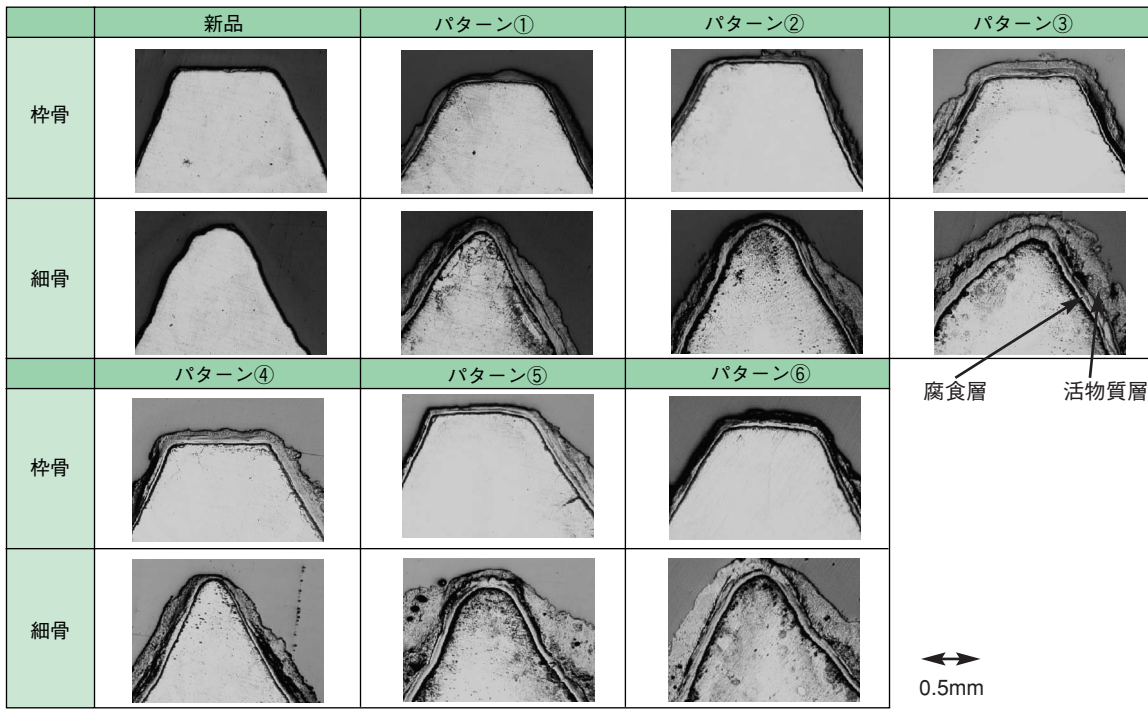


図7 実証試験後の正極集電体の断面
Fig.7 Cross section of positive grid after demonstrative test.

3.3.2 活物質中の硫酸鉛量と電解液比重の調査結果

次に各試験パターンにおける硫酸鉛量と電解液比重について測定した。図8に正極の硫酸鉛量、図9に負極の硫酸鉛量の測定結果を示す。パターン③については、硫酸鉛が多く蓄積しているものと推測されたが、正負極とも他の試験パターンに比べて硫酸鉛量がやや多い程度であった。これらの結果より、サルフェーション問題は、いずれの試験パターンにおいても顕在化していないと推測される。

表4に電解液比重の測定結果を示す。電解液比重は、極板群の上部と下部を測定した。

他の試験パターンに比べて、パターン③の電解液比重が減少している。これは回収後の放電容量が初期の70%程度にしか戻らず、また活物質中の硫酸鉛が若干多かったためとも考えられる。測定した電解液比重が大きく増大していないことから、減液による液枯れは生じていないと推測できる。

回復充電のないパターン③は、予想よりも硫酸鉛量が少なく、電解液比重が高かった。この理由として、容量確認試験を繰り返す度に、他の蓄電池と比べて放電容量が大きく回復していたことから、容量確認後の回復充電にてサルフェーシ

オンが徐々に解消したものと推測される。

3.3.3 劣化状態の解析結果

図10に、前節までの結果をもとに試験毎の解体調査項目をパラメータとして劣化状態を解析した結果を示す。図中の値は寿命目安の値になったときをゼロ、新品の蓄電池の値を100とした指標である。図10から、正極集電体の腐食量が蓄電池の劣化の進行を進め、寿命を短くすることがわかる。また、回復充電は1回/4週以上の頻度とすることにより、サルフェーションが防止できると推測される。

表4 電解液比重の測定結果

Table 4 Electrolyte specific gravity in battery.

| 項目 | 電解液比重 (対初期) | |
|-------|-------------|--------|
| | 極板群上部 | 極板群下部 |
| パターン① | +0.005 | +0.007 |
| パターン② | -0.006 | -0.002 |
| パターン③ | -0.014 | -0.014 |
| パターン④ | -0.006 | -0.005 |
| パターン⑤ | +0.002 | +0.004 |
| パターン⑥ | +0.009 | +0.009 |

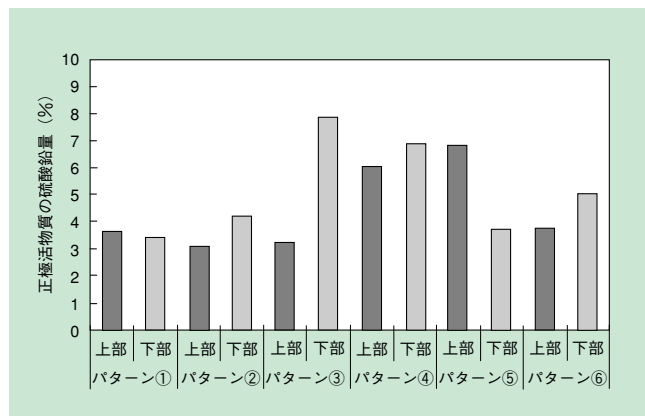


図8 正極活物質中の硫酸鉛量
Fig.8 Amount of lead sulfate in positive active material.

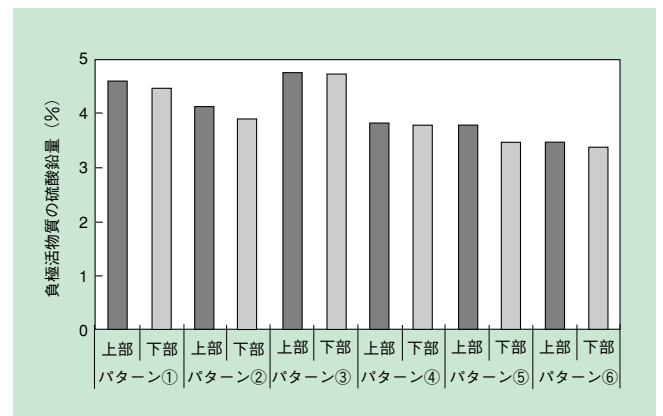


図9 負極活物質中の硫酸鉛量
Fig.9 Amount of lead sulfate in negative active material.

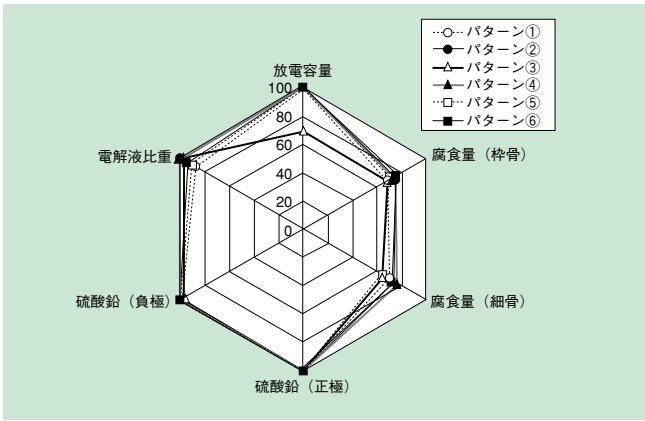


図10 劣化状態の解析結果

Fig.10 Tear down result of battery after demonstrative test.

そこで、蓄電池の寿命を寿命に対する劣化の影響が大きい正極集電体の腐食量の結果と、実証試験地区データをもとに推定した。図11に、蓄電池寿命予測を示す。正極集電体の腐食量は、温度や電圧、過充電量によって増加し、一定条件下ではほぼ直線的に増加することが報告されている⁸⁾。

これをもとに、腐食量が直線的に増加すると推定した場合、回復充電の頻度を1回/4週以上とすることで、本実証研究での蓄電池の推定寿命は、約9～12年と見込まれる。最適な運用方法がSOC50～100%、回復充電を1回/2週の場合、寿命は約12年と推察される。

集電体の腐食量は温度にも影響されるので、屋外設置の際は収納箱への日射を考慮し、直射日光を避けて夏場の蓄電池温度の上昇を抑えることが望ましいと考えられる。蓄電池温度の上昇対策により、寿命のさらなる延命が期待される。

[4] 結 言

NEDO技術開発機構の実証研究において、試験した蓄電池の調査より、以下の結果が得られた。

- (1) 寿命に対する最重要支配因子は、正極集電体の腐食である。
- (2) 正極集電体の腐食速度は、放電深度の浅い試験条件（パターン②）の場合、遅くなる。
- (3) 放電容量の低下は、低SOC状態で放置した試験条件（パターン⑥）の場合、回復充電を実施することにより他の試験と同様に見られない。
- (4) 放電容量は、回復充電のない試験条件（パターン③）の場合、低下する。
- (5) 蓄電池の推定寿命は、逆流抑制運転において最適な運用方法（パターン②；回復充電1回/2週、SOC50～100%）を用いたとき、約12年と推察された。

制御弁式鉛蓄電池を併設したPVシステムによる実証研究により、このPVシステムは出力抑制に対し有効に作用することが確認され、その他高調波や単独運転等の諸問題に対しても、有益なデータを取得することができた。

[5] 謝 辞

本実証研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託業務（再委託）にて実施したものである。関係各位のご協力に深く感謝致します。

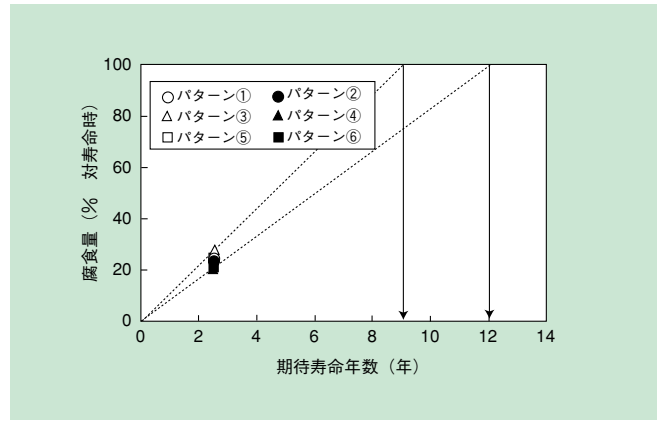


図11 正極集電体の腐食量からの蓄電池の寿命予測

Fig.11 Life expectation by corrosion of positive grid.

[参考文献]

- 1) (株)関電工：平成14年度 NEDO委託業務成果報告書、「集中連系型太陽光発電システム実証研究」（2003年3月）。
- 2) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構：“なぜ、日本が太陽光発電で世界一になったのか”（2007）。
- 3) 原 享 他：“住宅向け蓄電池併設型太陽光発電システムの開発” 新神戸テクニカルレポート, No.15, p.39 (2005)。
- 4) 伊藤俊輔 他：“住宅用蓄電池システムの太陽光発電組合せ実証運用”，新神戸テクニカルレポート, No.19, p.29 (2009)。
- 5) 高林久顕 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)。
- 6) 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)。
- 7) 沢井研 他4名：アイドリングストップ車による高性能制御弁式鉛蓄電池の実車試験，GS Yuasa Technical Report, 第4巻1号, p.14 (2007)。
- 8) Hisaaki Takabayashi, et al. :Development of Valve Regulated Lead Acid Batteries for Power Storage, Proceedings of INTELEC'03, p.383 (2003)。