

電動フォークリフト用EV鉛蓄電池

Electric-Vehicle Lead-Acid Batteries for Electric Forklifts

菊地 智哉
Tomoya Kikuchi

室地 晴美
Harumi Murochi

吉原 靖之
Yasuyuki Yoshihara

要 旨

フォークリフト市場では、環境規制の強化によりエンジン車代替として電動化が強く望まれている。しかし、従来電動車は、「液式鉛蓄電池」を主電源としているため、長時間充電と、硫酸鉛の蓄積などの特有の劣化要因で、連続稼働が困難であった。加えて、電池性能と安全性の維持には必須である頻繁な補液作業も、その煩わしさと、溢液による環境圧迫で、作業現場の電動化志向を抑制していた。そこで、業界初補水不要、稼働時間延長を実現する急速充電性能、リフレッシュ充電による長寿命化を有し、24時間稼働が可能な電動フォークリフト用EV (Electric Vehicle) 鉛蓄電池を開発・商品化した。

Abstract

In the forklift market, there is a strong demand for electric forklifts as combustion engine substitutes due to reinforced environment regulations. But for conventional electric forklifts powered by flooded-type lead-acid batteries, 24h continuous operation was difficult because of the long charging time and characteristic deterioration factors of the battery. In addition, periodic maintenance to supply water to the battery reduced the substitution demand.

We developed valve-regulated electric-vehicle lead-acid batteries for electric forklifts suitable for 24h continuous operation, which realized:

1. Maintenance-free clean energy source (industry's first)
2. Rapid-charge capability for long-time operation
3. Long lifetime with refresh charge.

1. はじめに

今日の生活の多様化に伴いエネルギー消費は増加の一途をたどり、これに起因する大気汚染・環境問題が世界的な課題となっている。

自動車業界では、CO₂排出量の規制が段階的に強化され、排ガス規制などが、次々と実施されようとしている。このため、自動車業界では、内燃機関をもたない電気自動車や、トヨタ(株)のプリウスに代表されるハイブリッド車などがすでに市場に投入されている。さらに、建設機械や産業車両業界でも自動車業界と同様に排ガス規制が施行され、1996年に窒素酸化物・微粒子排出物に関するTier1規制が米国で実施されて以来、米国・日本・欧州など世界的に実施され、Tier2を経て現在Tier3規制が実施されている。2015年頃には、さらに排ガスを1/10程度に抑えることを求めたTier4規制が施行されることがほぼ決定している。

そのため、フォークリフト市場ではエンジン車代替として電動車が強く望まれており、2015年には電動車の普及率が60%~70%と、今後幅広く普及してくるものと予想されている。

従来電動車は、液式の鉛蓄電池を主電源としているため、満充電にするための充電時間が完全放電から10時間~12時間と長く、硫酸鉛(以下、PbSO₄)の蓄積などの特

有の劣化要因で連続稼働が困難であった。

加えて、電池性能と安全性の維持には必須である頻繁な補液作業も、その煩わしさと、補液時の電解液の溢液による機器の腐食などの問題で、作業現場の電動化志向を抑制していた。

これら従来の液式鉛蓄電池の課題を解決すべく、電動フォークリフト用EV鉛蓄電池を開発した。

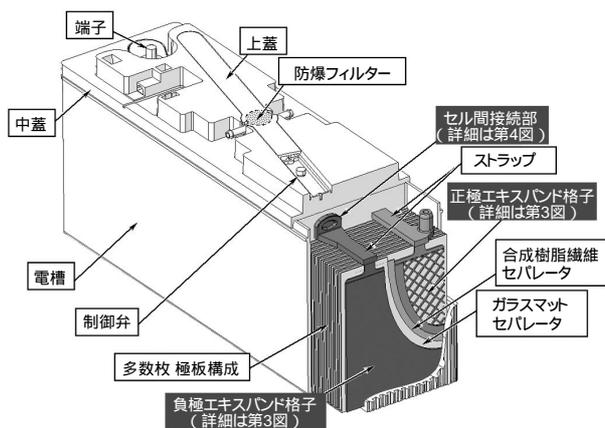
この電動フォークリフト用EV鉛蓄電池によって、業界初補液不要を実現したクリーン性能、稼働時間延長を実現する急速充電性能、リフレッシュ充電方式を開発し、急速充電と併用し、エンジン車並の24時間稼働を実現した。

2. 本電池の特徴について

2.1 補液不要とクリーン性能

EV鉛蓄電池は、一般にVRLAバッテリー(Valve Regulated Lead Acid Battery; 制御弁式鉛蓄電池)と呼ばれる補液不要のバッテリーである。第1図に、その構造図を示す。

液式の鉛蓄電池は電解液が多量にあるのに対して、VRLAバッテリーの電解液は、正極、負極と吸液性のガラス繊維セパレータに含有し、それ以外には電解液が存在しない設計となっている。そのために、横倒しに設置し



第1図 EV鉛蓄電池の構造図 (12V60Ah)

Fig. 1 External view of battery

ても液漏れしない構造となっている。

液式鉛蓄電池を充電すると充電末期に充電効率が低下して、水の電気分解により電解液が減少する。このため、液式の鉛蓄電池は週に1回の補液が必要となる。また、この補液作業は電池が多直列になるほど補液セルが増加して、作業者の負担となるばかりではなく、補液中に電解液が飛散し機器の破損、補液作業忘れによる、安全問題や電池寿命への影響など、さまざまなトラブルが発生する。

一方、VRLAバッテリーは、充電中に発生した酸素ガスを負極板が吸収することで水に循環されるガス吸収反応が起こるため液減りが少なく、寿命末期まで補液作業が不要である。

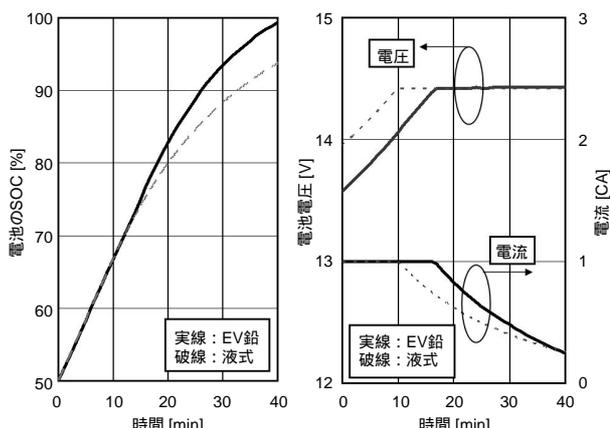
以上のように、EV鉛蓄電池は、補液不要である簡便なメンテナンスとクリーン性、安全性を両立し、電池性能を長期間維持することができる特徴を有する。

2.2 急速充電特性について

第2図に、EV鉛蓄電池 (12V60Ah) と液式電池 (12V65Ah) の急速充電特性を示す。充電状態 (SOC: State of Charge) 50% から60Aで急速充電を行うと、EV鉛蓄電池は、40分でSOC 100%まで電池容量を回復させることが可能である。

それに対して液式電池は、充電の反応性が悪く、大きな電流を流した場合に急激に電池電圧が上昇している。これにより、定電圧充電では充電電流値が小さくなり、同じ充電時間でSOC 93%までしか電池回復を回復させることができない。EV鉛蓄電池は大きな電流でも充電の受け入れ性が良く短時間での電池容量の回復が可能である。

この優れた充電特性は、正極板・負極板を多数枚構成にすることによる反応面積の増大、目の細かいエキ



第2図 EV鉛蓄電池と液式電池の急速充電特性

Fig. 2 Rapid charge characteristics

スバンド格子の採用による集電能力の向上、低抵抗セル間接続部の採用、活物質添加剤の添加量・添加種の最適化などの取り組みで実現できた。

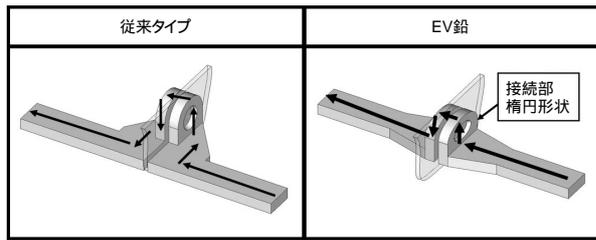
具体的には、反応面積の増大は、1枚あたりの正極・負極板の極板厚みを薄くし、1セルあたりの正極・負極板の極板枚数を従来比200%に増加させることで、反応面積を正極180%、負極170%に増加させ反応性を向上させた。次に、エキスパンダ格子の集電能力を向上させるために、第3図に示すように自動車用の格子に比べ目の細かいエキスパンダ格子を採用することにより格子の抵抗を低減させ、さらに活物質との接触面積を従来比200%に向上させ電流密度を50%に低減した。

さらに、低抵抗中間セル接続部では、キャストオンストラップ工法を採用した。第4図に、改善結果を示す。導電経路 (第4図矢印) を従来より短くしたことで内部抵抗を従来比50%に低減し出力特性を向上させ、鉛使用量低減による軽量化を両立させた。また、セル間接続を精円にすることで電流経路の断面積を確保しながら高さ寸

自動車用 正極・負極 (並目)	EV鉛用 正極 (細目)	EV鉛用 負極 (超細目)
活物質との接触面積 (並目を100とした場合)		
100	150	200

第3図 各種エキスパンダ格子

Fig. 3 Expand grid



第4図 セル間接続部
Fig. 4 Diagrammatic illustration of inter cell connection

法を抑え、体積効率を従来比106%に向上させた。

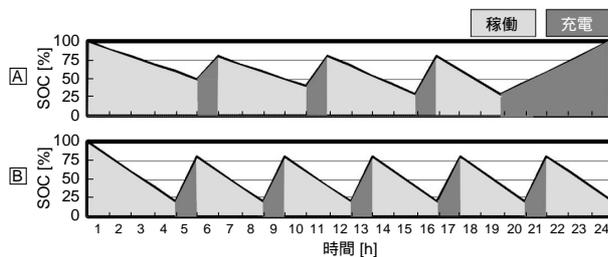
添加剤の最適化では、負極活物質へ無機添加剤を添加することにより活物質微粒子の微細化を促進させ、反応面積を増加し、有機添加剤により活物質の収縮を抑制した。

以上の技術により、大電流充電時の短時間での回復充電を可能にした。この技術は、高率放電時および低温放電時の放電性能の向上や、電池の長寿命化も同時に実現した。

3. 24時間稼働へのアプローチ

3.1 フォークリフトの稼働パターンと寿命特性

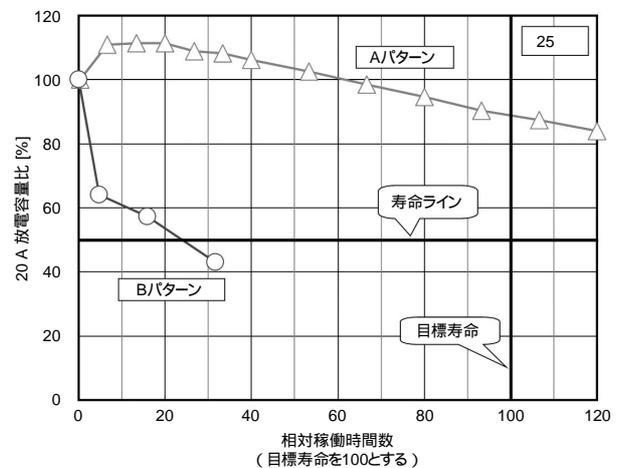
第5図に、フォークリフトの1日の稼働パターン（SOCの動き）のイメージ図を示す。上段Aパターンは、1時間の急速充電を1日3回行い、夜間に電池のSOCを100%にする満充電を行ったパターン（16時間稼働）、下段Bパターンは、長時間の充電時間を確保することができないため満充電は行わず、休憩時間1時間のみ急速充電を行い稼働するパターン（24時間稼働）である。



第5図 フォークリフトの1日の稼働パターン
Fig. 5 Operation pattern of forklift truck

次に、これらのパターンでの、寿命評価結果を、第6図に示す。電池容量が初期容量比50%になった点を寿命ラインとすると、Aパターンは目標寿命の稼働時間を達成しているのに対し、Bパターンのように満充電を行わずに使用した場合、短期間で急激な電池容量の低下が起こった。

従来の液式鉛蓄電池では、1回の満充電時間が10時間～12時間要していたものが、急速充電特性などの優れた特徴を生かし、満充電時間を5時間にまで短縮することが可能となったが、1日に1回満充電を実施しないと急激に電池容量の低下が起こることがわかった。



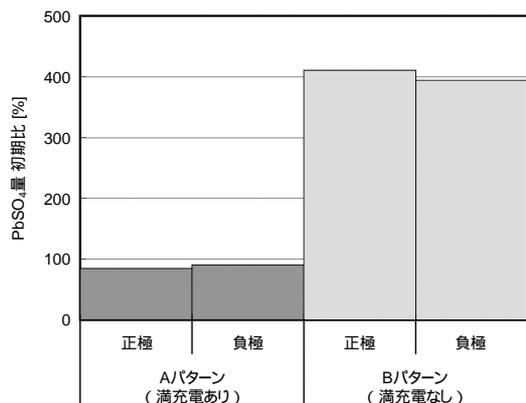
第6図 フォークリフト使用パターン寿命評価
Fig. 6 Cycle life test of forklift truck pattern

3.2 電池劣化要因

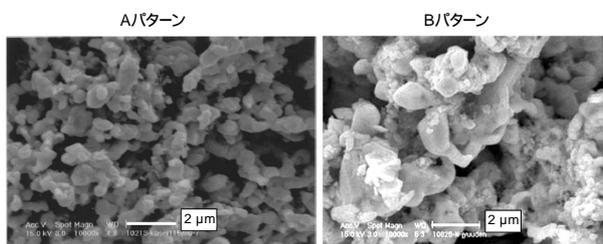
満充電を実施しない、Bパターンの劣化要因を調査するため、電池極板のPbSO₄の定量分析および走査型電子顕微鏡（SEM：Scanning Electron Microscopy）による形状観察を行った。第7図に、3週間稼働のAパターンとBパターンの満充電状態での極板中のPbSO₄の定量分析結果を示す。

AパターンのPbSO₄量は、初期比正極85%、負極90%程度なのに対して、Bパターンは充電状態にもかかわらず、正極410%、負極400%と初期に比べPbSO₄が多く存在していた。次に、第8図にAパターンとBパターンの負極板のSEM画像を示す。BパターンはAパターンに比べ、活物質粒子（PbSO₄）が粒成長していることがわかった。

分析結果より、電池の早期容量低下は、充電不足によるサルフェーションによるものと推定した。

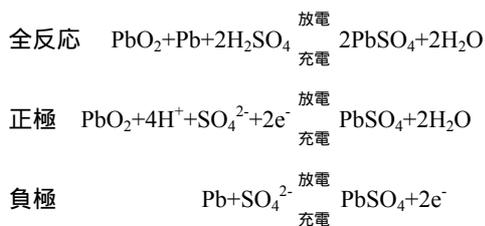


第7図 充電状態での正極・負極板のPbSO₄量
Fig. 7 PbSO₄ amount of positive and negative plates in charging status



第8図 充電状態での負極板のSEM画像
Fig. 8 SEM images of negative plates in charging status

下記に鉛蓄電池の化学反応式を示す。



充放電反応において充電物質は正極PbO₂、負極Pbで、放電物質は両極ともPbSO₄である。ここで、充電不足で満充電状態にならないと、放電物質であるPbSO₄の結晶サイズが粗大化し、充電反応性が低下する。PbSO₄の結晶サイズが粗大化すると、充電してもPbSO₄が固定化し充電物質にもどりにくくなることで、充・放電反応に寄与しなくなる。これにより反応活物質部分が減少し、電池容量の低下が起こる^{1), 2)}。この放電物質のPbSO₄が粗大化し反応性が低下し、固定化する現象がサルフェーションである。

サルフェーションは充電不足で長期間使用すると発生しやすく、これを避けるためには放電後、直ちに満充電状態に戻す必要がある。

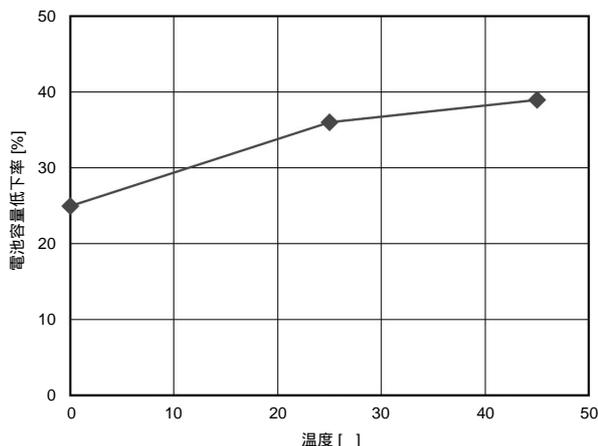
しかし、実際のフォークリフト市場では、満充電状態に戻すための充電時間を確保することができない程、高

稼働なユーザーが存在している。このような使われ方では、給油するとすぐに使えるエンジンタイプのフォークリフトを使用するか、電動車を使用する場合には数台、車を保有したり予備のバッテリーを保有する必要がある。

少数台の電動車ですべてのユーザーを網羅するためには、高稼働で満充電をする時間をとれない使われ方でも、サルフェーションを抑制し、従来の1日1回満充電するような使われ方と同等な電池寿命を確保することが必須となる。

3.3 サルフェーションの温度依存性

サルフェーションは化学反応であるため温度によってサルフェーションの進行も異なると考えられる。第9図に、Bパターンを各温度で3週間試験を行った場合の電池容量の低下を、初期容量比で示す。

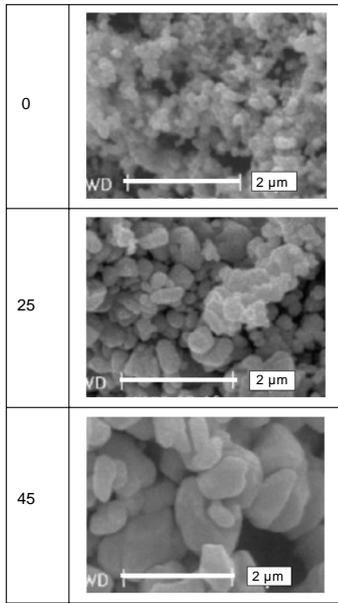


第9図 放電容量に及ぼすサルフェーションの温度依存性
Fig. 9 Temperature dependence of sulfation on discharge capacity

試験の結果、サイクル前の電池容量から3週間目の電池容量の低下率は、0 で25%、25 で36%、45 で39%と温度が高くなる程、電池容量の低下率が大きくなっていった。

サルフェーションの進行に温度の影響があるものかを確認するため、Bパターンにて0、25、45と試験温度を変化させサイクル試験実施後の正極板のSEM画像を、第10図に示す。

高温下で使用されることによって、PbSO₄の結晶サイズが大きくサルフェーションの進行が大きくなることを確認した。これらの結果より、サルフェーションの進行は使用環境温度に依存し、高温の方がよりサルフェーションが進行しやすいことが明らかとなった。



第10図 サルフェーションの温度依存性
Fig. 10 Temperature dependence of sulfation

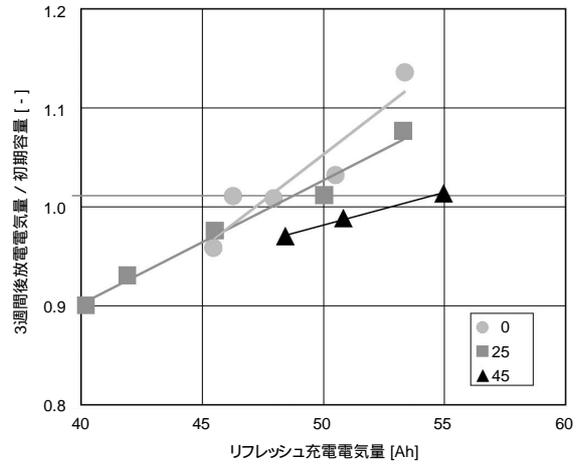
3.4 サルフェーションの解消

サルフェーションを週末の休止時間に、電気量の多い特別な充電（以下、リフレッシュ充電と呼ぶ）を行うことによって解消する検討を行った。週末にリフレッシュ充電を行う理由は、顧客との使われ方の市場調査を実施する中で平日は高稼働でも、週末は休日のユーザーが多く存在することがわかったためである。

活物質中にPbSO₄が固定化されると、PbSO₄は導電性が低いため、充電受け入れ性が悪くなり、十分な充電反応が起こりにくくなる。このため、週末に通常の満充電を行っても、サルフェーションを解消できず、電池容量を回復させることができない。そこで、充電不足によるサルフェーションを解消するために、週末に通常満充電よりも多くの充電電気量を入れることにより、サルフェーション解消の可能性を検討した。

各温度でリフレッシュ充電の効果を確認した。Bパターンを月曜日～金曜日相当の5日繰り返し、週末のリフレッシュ充電時の充電電気量を変化させてリフレッシュ充電の効果を確認した結果を、第11図に示す。図中の横軸はリフレッシュ充電の充電電気量、縦軸は3週間目の電池容量と初期容量の比を示す。この縦軸が1.0以上であると電池容量が初期容量より増加しておりサルフェーションが解消され、リフレッシュ充電の効果がある状態、逆に1.0以下では電池容量が低下しており、サルフェーションによる電池劣化が起きていることを示唆する。

週末のリフレッシュ充電時に0 で46 Ah、25 で、50 Ah、45 で55 Ah以上の充電電気量を充電することに



第11図 リフレッシュ充電電気量と電池容量の関係
Fig. 11 Relation between amount of charge and capacity

よって3週間サイクル後の電池容量比が1.0以上で容量低下が起こらず、リフレッシュ充電により電池容量の低下を防ぐことができた。

リフレッシュ充電時の充電電気量を多くすれば電池容量の伸びは大きくはなるが、充電電気量を多くしすぎると電解液の減少や正極格子の腐食など背反の反応も加速する。このため、電池容量を低下させず、充電電気量も多くしすぎないように電池容量比が1.01になるようにリフレッシュ充電電気量を設定した。

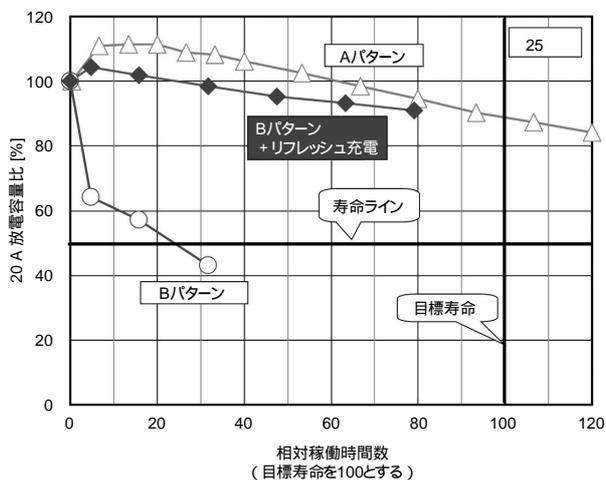
また、第9図、第10図の結果からも明らかのように、高温環境下で使用される程、サルフェーションは進行するので、高温になるほどより多くの充電電気量が必要であった。

次に、リフレッシュ充電を実施した場合のサイクル寿命特性を確認した。その結果を、第12図に示す。

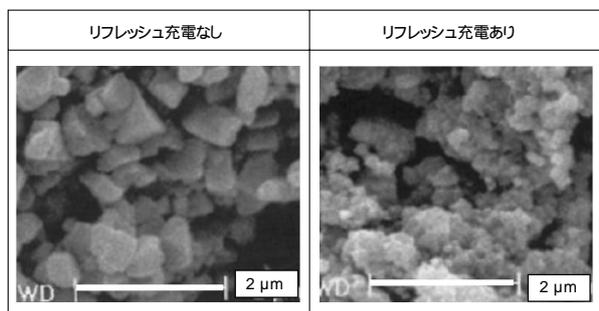
Aパターンは、1時間の急速充電を1日3回行い、夜間に満充電にするパターン（16時間稼働）、Bパターンは、長時間の充電ができないため満充電は行わず、1時間の急速充電を1日5回のみで稼働するパターン（24時間稼働）、パターンB+リフレッシュ充電は、Bパターンを5日相当サイクル後、リフレッシュ充電を行った場合のサイクル寿命特性である。週末に1回リフレッシュ充電を行うことで平日に充電不足な状態で使用されても、急激な電池容量低下は起こらず、1日1回満充電を実施しているAパターンの電池容量推移に近づき、良好なサイクル寿命特性を示すことがわかった。

次に、リフレッシュ充電なし（Bパターン）とリフレッシュ充電あり（Bパターン+リフレッシュ充電）で3週間サイクル試験を行った場合の正極のSEM画像を第13図に、PbSO₄量を第14図にそれぞれ示す。

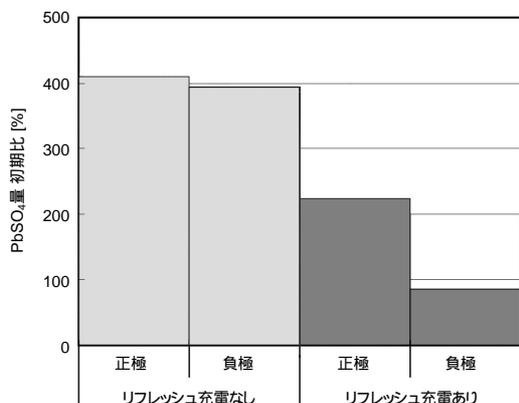
第13図に示したように、リフレッシュ充電を行った場合にはBパターンのみで充電した場合に比べて、大きなPbSO₄の結晶が減少し、また正極、負極ともPbSO₄量も減少した。このことより、リフレッシュ充電を行うことに



第12図 フォークリフト使用パターン寿命評価
Fig. 12 Cycle life test of forklift truck pattern



第13図 リフレッシュ充電あり・なしの正極SEM画像
Fig. 13 SEM images of with refresh charge and without refresh charge



第14図 充電状態での正極・負極板のPbSO₄量
Fig. 14 PbSO₄ amount of positive and negative plates in charging status

よって平日の充電不足によるサルフェーションを抑制できることが明らかとなった。

しかしながら、正極のPbSO₄量は初期値並みにはなっておらず今後、対策を実施する。

以上、高稼働で1日1回の満充電を実施する時間を確保することができないユーザーでも、週末の休止時間にリフレッシュ充電を行うことで、充電不足によるサルフェーションを抑制し電池の劣化を抑制する充電技術を見いだした。

4. まとめ

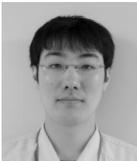
今回、電池性能および充電制御を最適化することにより、環境対応型電動フォークリフト用のEV鉛蓄電池を開発し、業界初 補水不要を実現したクリーン性能、稼働時間延長を実現する急速充電性能、リフレッシュ充電と急速充電を併用する充電方式により24時間稼働を達成した。

これらの優れた特徴を生かし長時間稼働の実現と環境に優しいクリーンな電動フォークリフト用の電源を開発した。

参考文献

- George Wood Vinal : Storage batteries fourth edition. p.310 (1955).
- 佐々木熊三 : 電池ハンドブック (電気書院) p.167 (1964).

著者紹介

 菊地智哉 Tomoya Kikuchi
パナソニック ストレージバッテリー (株)
Panasonic Storage Battery Co., Ltd.

 室地晴美 Harumi Murochi
パナソニック ストレージバッテリー (株)
Panasonic Storage Battery Co., Ltd.

 吉原靖之 Yasuyuki Yosihara
パナソニック ストレージバッテリー (株)
Panasonic Storage Battery Co., Ltd.