2015年の技術と成果

Technical Progress and Results in 2015

〔1〕研究・開発

地球温暖化、大気汚染や土壌汚染といった環境問題は、人類の繁栄において緊急の課題となっている。地球環境負荷低減のためには、CO_2を排出しない再生可能エネルギーの導入増加と、電力の有効利用による省エネルギー化が重要である。また、低環境負荷材料を使用した製品開発、廃棄物低減のための製品のライフサイクル向上も重要である。

当社は、1917年の創立以来、受変電設備を主力製品として、日本あるいは世界の電力の安定供給に貢献してきた。これまでに培った技術を更に発展させ、地球環境に優しい分散型エネルギー社会の実現に貢献するため、各事業分野において、以下のような研究開発を行っている。

電力機器分野では、再生可能エネルギーの導入拡大にともなう電力系統の課題を解決するための研究開発を行っている（詳細は、一般論文の「再生可能エネルギー導入拡大による課題とその解決に貢献する当社系統解析技術」項を参照）。また、当社の主力製品である電力用コンデンサに使用される絶縁材料として、生分解性を有する低環境負荷の新しい絶縁油の開発を行っている。

新エネルギー・環境分野では、従来の受変電設備を監視制御装置で統合することにより、消費電力の低減を目指した日新版スマートグリッドであるスマート電力供給システム（Smart Power Supply Systems、以下、SPSS）の実規模検証システムを当社前橋製作所に構築し、実証試験を行っている。SPSSは、多様な分散型電源と蓄電池で構築されたシステムであり、多様な蓄電池を取り扱うための技術開発も進めている。また、当社独自の新しい蓄電池として、電解液が中性に近く、環境に優しい金属錯体フロー型蓄電池の開発を行っている。

ビーム・真空応用分野では、より臨場感が期待される4Kや8Kの高解像度の大型テレビやモバイル機器の低消費電力化に寄与する材料として注目されている酸化物半導体薄膜を製造するためのスパッタ技術の開発を行っている。

ライフサイクルエンジニアリング分野では、電力用コンデンサの劣化診断技術の確立と長寿命化を目的に、コンデンサ材料の劣化機構解明に取り組んでいる。

また、これらの研究開発に対して、試作・検証コストの削減、開発期間の短縮を図るため、開発の初期段階から各種シミュレーション技術を積極的に活用するとともに、当社製品の開発に適した解析技術の構築も進めている（詳細は、一般論文の「電力機器開発に貢献するシミュレーション技術」項を参照）。

以下に、2015年度の各研究成果を紹介する。

1．1　新絶縁材料（生分解性絶縁油）の開発

電気機器に使用される絶縁材料は、機器のコンパクト化や高性能化をめざし、各種開発されてきた。近年、低環境負荷材料へのニーズがますます高くなってきており、電気絶縁油においても生分解性が高く、安全な菜種油、大豆油などの天然エステルやそれらを改良した植物エステル油などの適用が増加しつつある。当社においても、これらのニーズに応えるべく、2015年より変圧器で生分解性絶縁油（パームヤシエステル油）の適用を開始した。

今回、新たな生分解性絶縁油を化成品メーカと共同開発し、電力用コンデンサへ適用できる目途を得た。**図1**は、開発した生分解性絶縁油である。この絶縁油を油入機器に使用することにより、万が一自然災害や事故等で油が漏洩した場合、環境への影響を最小限に抑制することが可能となる。

図1　開発した生分解性絶縁油

1．2　電池電力貯蔵システムの検証と多様な分散電源システムへの展開

当社では、①エネルギーの効率的運用・②環境負荷の低減・③系統事故や災害時の停電対策・④設備の保全というコンセプトの下に、SPSS（スマート電力供給システム）の開発と検証を行っている。③については、多様な分散電源を停電対策にも適用する検討を進めている。

需要家構内にSPSSを提案する場合、**図2**に示すように複数の分散電源群（コジェネ発電機：G・太陽光発電設備：PV・電池電力貯蔵設備：BESS）による多様な分散電源システムを設置する。平常時はこれらを組み合わせて、電力負荷平準化（ピークカット／ピークシフト）を行うとともに、発電余剰電力の充電、不足電力の放電を行うことによって、エネルギーコストが最小になるように運用させる。一方、系統停電時は停電を検出し、高速SW（Switch）で需要家を系統から切り離し、分散電源群を自立運転に移行させて重要負荷のみに給電することで、災害時にも重要負荷への給電を継続させる。

今回は、前橋製作所SPSS設備（**図3**）を用いて、BESSの自立運転移行機能を検証した結果を紹介する。停電を模擬するため高圧遮断器を開放した後、高速SWと制御モードの切り替えにより、停電検出から20ミリ秒以内でBESSが安定的に自立運転に移行することを確認した（**図4**）。

今後は、分散電源システム全体に拡大し、自立運転中・系統復電時の安定動作や、系統事故時の保護について、検証を進める予定である。

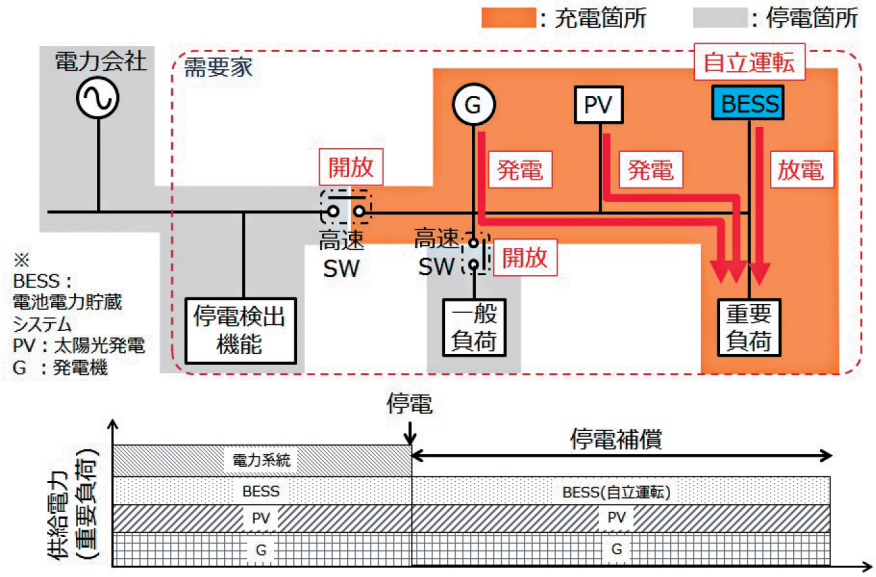

図2　多様な分散電源システムの動作例（系統停電時）

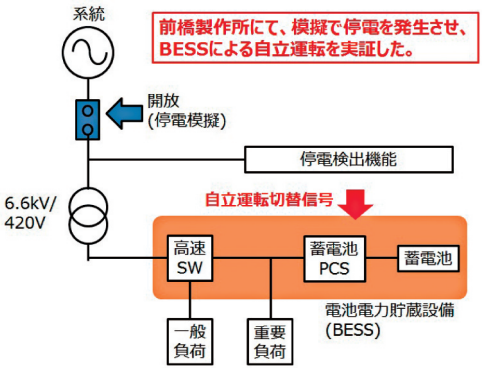

図3　前橋SPSSによる検証設備

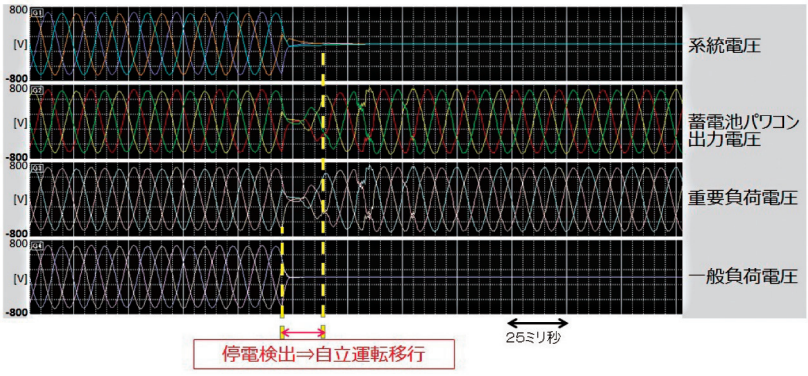

図4　BESSの自立運転移行の検証結果

1．3　電池利用技術の開発

電力システム改革や再生可能エネルギー導入拡大を背景として、電力系統安定化や余剰電力対策、停電対策等を目的とした定置用蓄電池システムの市場拡大が予想されている。当社では、適用用途毎に異なる蓄電池への要求性能に対して、最適な蓄電池を選択し顧客に提供することを目的に、電池利用技術の開発に着手した。

市販のリチウムイオン電池を入手し、SOC（State Of Charge）100%に相当する電圧で課電し、定期的に放電容量を測定するフロート課電試験を実施した。各温度における容量低下を直線近似して、放電容量が80%まで低下するまでの到達時間を算出した結果を**図5**に示す。到達時間の対数が絶対温度の逆数にほぼ比例することが確認された。蓄電池のSOCに応じた課電試験を実施することで、蓄電池のカレンダー寿命を推定することが可能となる。

以上のような取り組みを進め、顧客の課題解決のために最適な蓄電池を提案できるようにすることを目標に、長期間の加速劣化試験を実施しなくても簡易的・短期間の評価で蓄電池の良否を判定出来るような技術を確立する。今後は、リチウムイオン電池を中心とした各種電池の評価に取り組んで行く予定である。

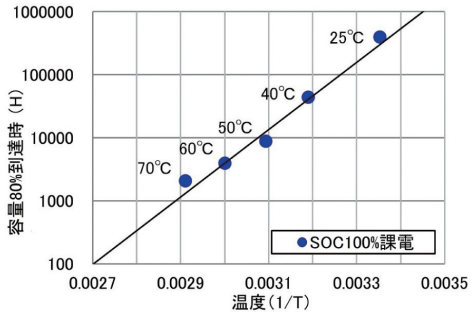

図5　市販リチウムイオン電池の課電試験結果

1．4　新規電力貯蔵デバイスの開発

当社では、電力貯蔵用途を目指した新規電力貯蔵デバイスを開発している。電力貯蔵デバイスの大きな課題のひとつはコストである。揚水発電所のコストは約3万円/kWh、エネルギー密度は約1Wh/L、システム効率は約70%であるが、電力貯蔵デバイスが既存技術よりコスト高では普及が難しいと考えている。そのため、今後巨大市場が生み出される電力貯蔵デバイス市場参入には揚水発電所以下の安価な電池（暫定目標：2万円/kWh）が必須と考え、開発の狙いとしている。

コスト目標を達成するため、電力貯蔵デバイスを安価な材料のみで構成できるよう、中性に近い電解質で動作するフロー電池を探索し、以下の特長を備えた錯体系電解質（Ti-クエン酸/Fe-クエン酸）を見出した。

◆中性の電解液なので、容器や電極へのダメージが少なく、安価な材料が使用可能
◆水系の電解液なので安全性が高い
◆他のフロー系電池と同様に
　①蓄電容量の大型化が容易
　②充電容量の正確な把握が可能
　③活物質が長寿命
　④設置の自由度が高い（例えば、太陽光パネル下、半地下、湧水槽など）
◆許容温度範囲が広く、冷却装置が不要

図6に開発中の電力貯蔵デバイスの蓄電原理を示す。現在、電解質が中性であることから、導電率が低くなり電池の抵抗が大きくなるという課題に対して、当社技術を活用（イオン交換膜：EBグラフト技術、カーボン電極：電極塗工技術）することで取り組んでいる。

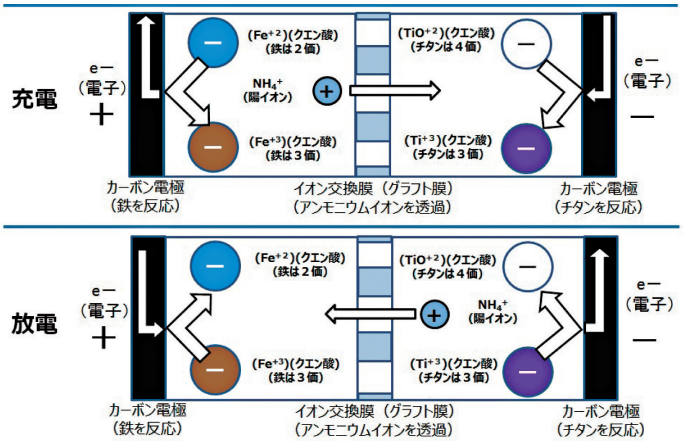

図6　新規電力貯蔵デバイスの蓄電原理

1．5　酸化物半導体薄膜用スパッタ技術

次世代フラットパネルディスプレイ用薄膜トランジスタ（TFT）の材料として、IGZO（In-Ga-Zn-O_4）を代表とする酸化物半導体が注目されている。酸化物半導体は、スイッチングオフ時の漏れ電流が小さく、オンオフ切換速度が速いという特徴を有しており、低消費電力・高精細ディスプレイへの適用が期待されている。酸化物半導体層の形成には、アモルファスシリコン成膜のような特殊材料ガスを使用したプラズマ気相成長（PE-CVD）法ではなく、物理的なスパッタリング法が用いられる。一般的なスパッタ装置は、成膜速度の高速化のため、磁石をターゲット材料裏面に配置する。しかし、磁界領域に偏って材料が消費されるため、材料の利用効率が低下し、且つ膜厚・膜質分布が悪くなる問題があった。また、膜密度が低いため、TFT作製プロセスに高温のアニール処理が必要となり、安価な樹脂シートを基板に用いることが困難であった。

当社では、磁石を用いずに高速成膜を可能とするスパッタ装置を開発している。これまでに、ターゲット材料の消費効率や膜厚分布が良好であることを確認した。今回は、このスパッタ装置を用いて形成したIGZO薄膜の膜密度評価を実施した。**図7**に高周波電力とターゲット電圧を変えて成膜したIGZO薄膜の膜密度変化を示す。室温成膜であるにもかかわらず、6 g/㎤以上の良好な膜密度を有することが確認されており、理論値に近い値が得られている。また、これらの結果はスパッタ成膜条件の高周波電力とターゲット電圧により制御可能であることが分かる。一般的なスパッタ装置で高密度膜を得るには350℃以上の高温アニール処理が必要になるが、本結果は当社の方式が低温のアニール処理でも高密度膜が得られることを示唆しているものと考えている。

今後は、大面積ガラス基板に対応したスパッタ装置を開発し、実用化を目指す予定である。

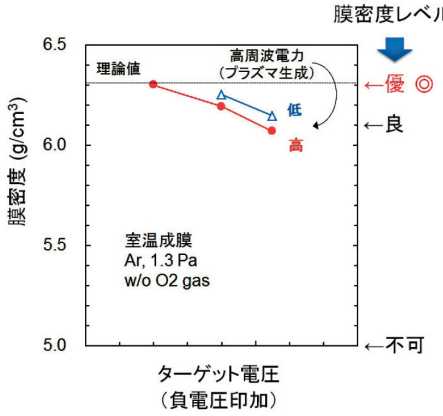

図7　IGZO膜密度の高周波電力とターゲット電圧依存性

1．6　材料劣化ーフィルム劣化機構解明ー

フィルムコンデンサの高信頼性化を図るためには、コンデンサにおけるポリプロピレンフィルム（以下、PPフィルム）の劣化メカニズムを明らかにする必要がある。しかし、従来は、絶縁油とPPフィルムの溶解、膨潤に加え長期的な課電を中心に研究されていたが、放電による劣化を評価した研究は少なかった。

当社では、名古屋大学との産学連携を進め、**図8**のような密閉ボイド電極モデルを用いて微小放電を連続的に発生させることにより、PPフィルムの劣化評価をおこなった。その結果、PPフィルムの表面状態の劣化やその劣化の進行に伴い、放電パターンや電荷量が経時的に変化することが明確になり、またPPフィルム表面にできた劣化生成物（**図9**）の分析を行ったところ、劣化物の多くが酸化物であることなどを確認することができた。これらの結果を国際学会等で報告した。

モデルでの評価は実際のコンデンサと同じ環境ではないが、引き続き検討を行い、実際のコンデンサに近い形での評価を進め、コンデンサの高信頼性化につなげていきたいと考えている。

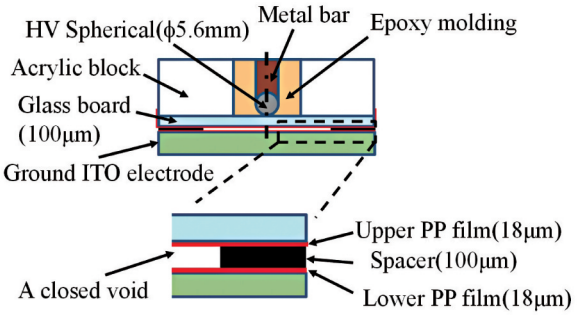

図8　評価電極モデル

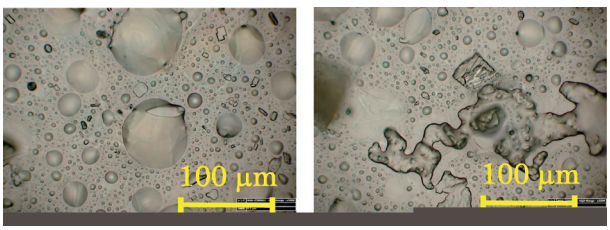

図9　劣化生成物の例（滴状：左、塊状：右）