

創立100周年記念論文

電力用コンデンサ事業のあゆみ

History of Power Capacitor Business

森 脇 一 雄* 川 口 正 人*
K. Moriwaki M. Kawaguchi

概要

我が国において、OF（Oil Filled）式タンク形電力用コンデンサは1931年の開発誕生以来、著しい進歩を遂げている。それらの進歩は、高信頼性、低損失化、大容量化により電力系統への適用ができたことが大きい。また積極的に海外への進出を図り、技術提携の実施、生産拠点の設立など当社事業の先駆的な役割を果たしてきた。

本報では、日新電機創立100周年記念にあたり、コンデンサ事業の歴史を振り返り、あゆみと展望について述べる。

Synopsis

In Japan, OF (oil-filled) tank type power capacitor since 1931 the development birth, has made remarkable advances. The main factors of these advances, is that it has been applied to the power system by high reliability, low loss, and capacity enlargement. Also actively strive to expand into overseas, implementation of technical cooperation, and such as the establishment of the production base has played a pioneering role of our business. This report, Upon Nissin Electric 100th Anniversary, looking back on the history of capacitor business, it describes the prospect and transition.

■ 1. はじめに

近年、地球温暖化防止のためエネルギーの合理的利用が叫ばれているが、電力用コンデンサは、元来電力を効率良く使用するために使われてきた。電力用コンデンサが今日のように発展したのは、住友電線製造所（現、住友電気工業株式会社）が高信頼性のOF式^(注)コンデンサを開発したことが契機になったと言える。以降、1945年に当社へ研究設備、製造設備、技術陣を含めて技術移管される等の変遷を経て、開発から85年間に亘る発展は、誘電体や構造などの改良や生産方法の改善によるコンパクト化と低ロス化の技術変遷と重なっている。

電力用コンデンサは、絶縁紙やフィルムをアルミ箔と共に巻き回した誘電体素子を、真空加熱乾燥し、高度に精製・脱気処理された絶縁油を含浸して、完全密封構

造としたものであり、使用中における特性変化が極めて少ない信頼性の高いものである。

本稿では、低損失・コンパクト化への歩みと共に、コンデンサ事業のあゆみと展望について述べる。

(注) Oil Filled 方式の略。当社のOF式は、絶縁油劣化防止策として油量調整容器に金属セルを採用した、完全油密封方式である。

■ 2. OF式コンデンサの開発と電力系統への適用

コンデンサは電気機器の中でも古い歴史を持っており、米国ゼネラル・エレクトリック社（以下、GE社）が電力系統用として、1919年に工業的に生産を始めた。20世紀初頭の電力用コンデンサは、同期調相機に比べ、取扱い・保守が簡便、運転損失が小さいにも拘らず信頼性が低く、その適用分野は低圧小容量負荷の力率改善用

*電力システム事業本部

にとどまっていた。

ところが、1923年にOFケーブルがイタリアのピレリー社で開発され、住友電線製造所が技術導入契約を締結した。OF式の原理は絶縁材料（絶縁紙や絶縁油）として十分に精製したものを使い、使用中の劣化の原因となる空気・水分を吸入させないことにより劣化を防止したもので、使用中の温度変化を油量調整装置又は小容量の缶形コンデンサのように容器自体の容積変化によって補償している。この原理を適用することにより電力用ケーブルの信頼性が大きく改善された。

そして、同社ではこの技術を応用して高信頼度のOF式コンデンサの開発に着手し、1931年には世界最初の完全密閉形のOF式コンデンサ（図1）の試作に成功、翌年には第1号製品（図2）が蔵前高等工業学校（現、東京工業大学）へ納入された。両者ともに、油量調整装置はPT（Pressure Tank）を用いていた。FT（Feeding Tank）を油量調整装置としたコンデンサは1934年に製品化され、3.3kV 50kvarコンデンサ（図3）合計約2Mvarが、住友鴻之舞鉱業所に納入された。

工業製品にとって生産技術・管理も重要であり、OF式機器の性能のみならず、信頼性確保に真空乾燥工程が特に重要である。当時は、生産工程中で0.01Torrが簡便に測定できる真空計がなくU字形マノメータとマックレオード真空計を組み合わせたS形真空計（図4）が開発され、コンデンサ製造品質の確保に貢献した。



図1 OF式コンデンサ試作器 (6kV 7kvar)



図2 OF式コンデンサ第1号製品 (10kV 10kvar)



図3 FTを使用したOF式コンデンサ第1号製品 (3.3kV 50kvar)



図4 S形真空計

S形真空計と上記3種類のコンデンサは、1946年コンデンサ事業を移管された当社に保管展示されている。

OF式コンデンサの開発によりコンデンサの信頼性が向上したこともあり、1次変電所の電圧調整をコンデンサで行うことが住友電線製造所より提案され、電気試験所、電力会社と共同で同期調相機との比較研究が開始され、その可能性が明らかになった。

1937年には22kV 2Mvar設備11群（単位コンデンサは3.8kV 100kvar）が朝鮮送電の水色変電所に採用され、以後、群容量の大きい電力用コンデンサ設備が変電所に集約的に設置された。従って、コンデンサの単器容量も大容量のものが便利であるため、我が国では当初から大容量単位を経済的に製作できるOF式タンク形コンデンサの研究と開発が進み、世界にも類を見ない高信頼性の電力用コンデンサが製作されてきた。

コンデンサの発展初期には、電力料金に力率条項の規定がなく、コンデンサの殆どが力率改善または調整により、直接に利益を受ける電力供給業者や大口自家発電設備を有する化学工場などでのみ、使用されていた。しかし、第2次世界大戦後の日本の経済復興に伴う既設送電線の急激な負荷増加に加え、電力料金に力率条項が1949年末に加味されて以来、一般需要家を含む交流系統の力率改善用・調相用・直列用などに、低圧回路から特別高圧回路にまで広く電力用コンデンサが使用されるようになった。

このように、OF式コンデンサの実用化でコンデンサの信頼性が格段に高くなったこと、同期調相機でなされていた1次変電所の電圧調整をコンデンサでできることを着想、実証できた結果、コンデンサの電力分野での応用が広がった。

送電システムの安定度向上、送電容量増大のための調相用として、早くから電力用コンデンサ設備を適用していた我が国では、コンパクト化・信頼性への要求が強くなり、タンク形に代表される大容量の電力用コンデンサが独自の進歩を遂げてきた。その設置量は我が国の電力消費量の伸びと共に、図5に示すように飛躍的に増大した。1958年から1997年までの年平均伸び率は7.5%で、発電設備の6.6%を上回っており、特に1990年頃の特別高圧用の設置量の伸びが著しい。

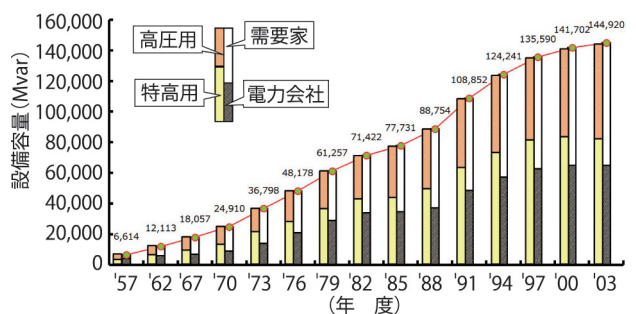


図5 日本における電力用コンデンサ設備容量の変遷

3. コンデンサ事業の変遷

3. 1 住友電線製造所からの事業移管

1945年に住友電線製造所から当社へ研究設備、製造設備、技術陣を含めて技術移管したことは前述したが、これは戦時中の軍需中心の生産から、戦後は民需へ転換する一方策として検討する中でコンデンサ事業への進出を構想し、当社から住友電線製造所へ移譲を要請したものである。

戦時中、住友電線製造所のコンデンサ製造設備は、小形のものには戦時中に三重県上野市の疎開工場に移設したため無事であったが、大阪製作所にあったその他設備は戦災により損害を受け、修理が必要であった。そのうえ、大阪製作所では水害によって相当な被害を受けていたので、各種製品の生産復旧に追われていて、コンデンサ工場を復活させる見込みが立っていなかった。さらに当時GHQは財閥解体を決めており、その関連で企業独占排除の方針を固めていたため、住友電線製造所には電線以外の事業は切り離されるという危惧の念があった。同社はそれらの事情を勘案、当社へのコンデンサ事業移管を受託し、1945年12月に両社間で覚書が取り交わされた。この結果、住友電線製造所は、当社に対して、コンデンサ製造が相当の利益を生むようになるまで、設備を無償貸与するとともに、技術の指導、研究への援助協力を行うことになった。

この覚書はただちに実施に移され、住友電線製造所から技術陣が当社へ移籍した。当社は住友電線製造所の伊賀上野工場から疎開設備を本社工場内に移設してコンデンサ工場を建設し、1946年にまず農事電化用・通信用の低圧小形コンデンサの生産を開始した。ついで半年弱の間に、紙巻装置、水圧機、浸油炉などの設備を完成させ、高圧コンデンサの生産も始めた。同年3月には特別高圧コンデンサ設備(44kV)、翌1947年には77kVコンデンサ設備をそれぞれ日本発送電株式会社へ納入している。

3. 2 戦後復興から高度経済成長期へ

生産開始当初は、電力過剰時代であったため、営業面では非常に苦労が伴ったが、1946年夏ごろから国内における電力不足が始まり、家庭では毎日数回停電、電圧低下で点灯しても薄暗い、といった情景が一般的に見られた。そのため、電力危機突破には不可欠のコンデンサの受注が増え、日本発送電株式会社をはじめ全国の配電会社から注文がくるようになった。1948年には、コンデンサ確保を望む商工省(現、経済産業省)から重要工場の指定を受けた。なお、この間の1948年7月、当社は技術・営業力の分散を避けるため、低圧コンデンサの製造・販売を、松下電器産業株式会社

(現、パナソニック株式会社)へ移管することを決めた。正式契約は1950年10月であるが、これを契機に当社は、農事電化用その他低圧コンデンサの生産を中止し、特高・高圧の大形コンデンサの生産に全精力を集中することになった。低圧コンデンサが必要な場合は、松下電器産業株式会社より購入した。

わが国経済がドッジ不況にあえいでいた1950年6月に突如として朝鮮戦争が勃発した。これによる特需により、わが国経済は復興の足掛かりを得、高度経済成長期へ突入していく。コンデンサ事業も例外にもれず、好調を持続していたと同時に、他社との競争も激化した。当社は、①コンデンサ設備のシステムとしての開発が他社に先んじていたこと、②当社が提唱して1949年に設立した電気協同研究会蓄電器回路委員会、直列蓄電器専門委員会を活用できたこと、③製販一体で顧客への対応にあたったこと、などが功を奏し、その競争を乗り切った。1950年からは韓国、中国(大連)、中華民国(台湾)などへの初輸出も開始した。

3. 3 海外との技術提携

1954年11月、当社は英国スタンダード・テレフォニクス・アンド・ケーブル・リミテッド(STC社)との間に、OF式コンデンサおよび関連製品の技術援助契約を締結した。わが国重電機業界における戦後の技術輸出の第1号である。契約締結後、当社の技術者をSTC社に派遣し、契約に基づく技術指導を行った。この技術輸出は当社技術の優秀さを欧州先進国に認知せしめ、また知名度の向上に大いに貢献した。

1960年2月、豪州デュコン社(以下、デュコン社)とOF式高圧コンデンサに関する技術援助契約を締結した。デュコン社は当時、豪国における唯一のコンデンサメーカーで、高圧コンデンサについては、GE社の技術を導入し、豪国における需要の過半数を供給していたが、GE社との提携契約が切れて困っていた。その折、1959年に当社が豪国ニューサウスウェルズ電力局向けに33kV 100MVAのコンデンサ設備を受注したことから、デュコン社では前途に危機感を抱き当社技術の導入に踏み切った。当初はコンデンサ本体のみの技術指導でスタートしたが、さらに実効をあげるため、1962年1月に提携範囲を拡大した新契約が締結された。この技術提携は、当社製品の豪州市場進出の端緒として意義があった。

1968年4月、GE社と技術提携してAFPコンデンサ(三塩化ジフェニル含浸紙-フィルムコンデンサ)を開発したが、1972年3月PCB規制により生産を中止した。その後、代替油としてかねて開発を進めていたKIS油を採用し、1972年9月にKFPコンデンサを製品化した。GE社とのその後の関係について社内で討議した

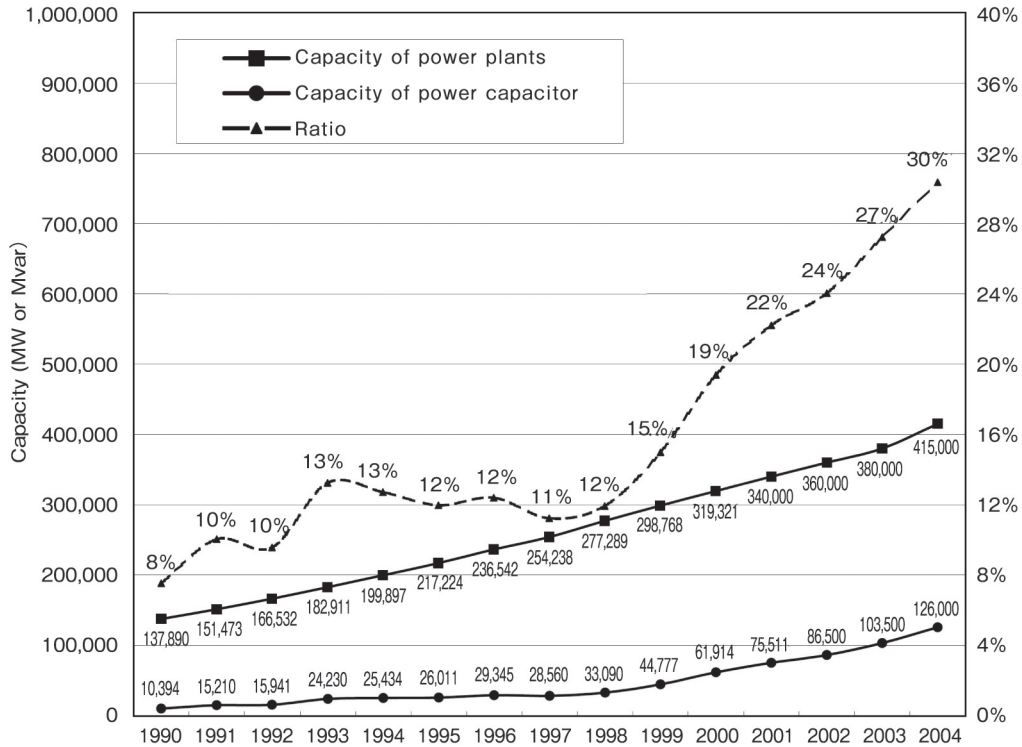


図6 中国における発電設備容量と電力用コンデンサ設備容量との変遷

結果、同社の優れた技術を評価し、1974年11月、オールフィルムコンデンサについての技術提携を行った。オールフィルムコンデンサは、当社においても1974年9月からプロジェクトチームを編成して本格的な開発に着手していた製品であるが、米国のコンデンサ業界の情報入手などを考慮して契約を締結した。

3. 4 海外への事業展開

1985年当時、急激な円高不況に見舞われて、当社の輸出高も大幅に減少するなど大打撃を受けた。かねてから海外展開の一環として東南アジアに海外での生産拠点を構築すべく適切な候補地の選定を急いでいた当社は、社会的に安定し、従来から製品輸出などを通じて関係が深く、将来発展性のあるタイに決定、1987年10月に日新電機タイ株式会社（NET）を設立、汎用コンデンサの製造を開始した。NETではわが国への供給はもとより、世界各国へ供給してきた。最近では、タイ国内および周辺国への供給源にもなっている。

タイでの生産拠点構築に続き、第二の海外生産拠点として、1991年3月に中華民国（台湾）亜力電気股份有限公司との合弁会社として、日亜電機有限公司（NAC）が設立された。NACではガスコンデンサの生産を開始した。

経済成長著しい西電東送の中国では、2001年より、



図7 中国生産タンク形第1号製品(ユニット形11kV 6Mvar)

無錫市電力電容器厂（高新電容器部門）と合併して、日新電機（無錫）電力電容器有限公司（NEWPC）を設立、その後、無錫電力電容器有限公司、無錫日新電機有限公司との合併を経て、日新電機（無錫）有限公司（NW）へ社名を変更して今日に至る。

わが国では、近年その電力用コンデンサの設置量の増加率は鈍化しているが、中国では、図6に示すように最近では年率20%の勢いで増加している。当社では、タンク形（ユニット形）11kV 6Mvar器（図7）を納入した。現在の中国では、主に缶形コンデンサによる設備構成であるが、タンク形コンデンサ設備は

架台式に比べ設置面積が1/6となり、都市部の消費電力増やUHV送電、HVDC送電が進展すると共に、コンパクト・低損失で信頼性が高いタンク形構成による設備が増加していくものと期待される。

4. 誘電体の開発と改良

4. 1 絶縁紙の改善

OF式コンデンサの誘電体として、当初は高圧ケーブル用絶縁紙を薄くした密度0.82~0.95g/m³、厚さ60~85μmのクラフト紙が使用された。

一般に絶縁紙の場合、繊維比率（密度）を下げれば損失は改善されるが、破壊電圧は低下する。従って、耐電圧性能を低下させずに損失を低下させるということは、当時の常識に反していた。絶縁紙の物理特性と油含浸紙の電気特性との関係が解明され、1954年に抄紙方法を改善して密度を低く保ったまま、気密度を向上させた低密度高気密度紙が開発され、tan δが約2割小さくなった。その結果、一般に密度0.8g/m³前後、厚さ30~90μmの絶縁紙が用いられるようになった。

そして、絶縁紙含有不純物であるヘミセルロース、リグニン、樹脂分、灰分などの影響が解明され、特殊蒸解法や純水抄造などの製紙技術に応用された結果、絶縁紙の誘電特性は大幅に改善され、tan δも0.18%付近となった。1964年には20~30μmの比較的薄い絶縁紙が採用されて、設計電位傾度の向上も可能になり、電力用コンデンサは大幅に小形軽量化された。

4. 2 絶縁油の開発と変遷

OF式コンデンサの絶縁油として、開発初期に国内外産十数種の鉱油について、固有抵抗・誘電率・tan δに加え、電極端モデルにおける可視ガス発生電圧⁽⁶⁾が測定・評価され、良好な2~3種が見出された。1936年には、絶縁耐力に優れたナフテン系の国産鉱油が全面採用された。

鉱油は、安定性およびtan δが優れ、かつ安価である反面、可燃性で誘電率が低い欠点がある。この点を補うべく研究された結果、1930年にGE社によって、塩化ジフェニル（PCB）がコンデンサ用不燃油として適していることが見出され、誘電率が高い三ないし五塩化ジフェニルが採用された。我が国においても、1953年頃から小容量器に適用され、コンデンサは大幅にコンパクト化した。しかし、周知のように環境汚染物質として規制され、我が国では1972年、アメリカでは1977年に使用が禁止された。

PCBの使用禁止を受けて、我が国では世界に先駆けて様々な合成油が開発され、アルキルナフタレン（JIS C 2320,4種）、アルキルジフェニルエタン（同,5種）などの低損失、高絶縁耐力、水素ガス吸収性に優れ

た芳香族炭化水素系の絶縁油が開発された。同時に、プラスチックフィルムが誘電体として適用され始めた時期とも重なり、絶縁油の電気特性の他にフィルムへの溶解性・膨潤性・含浸性についても検討されて実用化に至った。

4. 3 絶縁紙からフィルムへ

誘電体材料の改善と生産技術の向上により、電力用コンデンサの性能と品質の向上が図られてきたが、天然繊維を用いる以上、その改善には限界があった。このため、絶縁耐力が高く、tan δの極めて低いプラスチックフィルムを用いたコンデンサの開発が進められた。

1955年頃から電子機器回路用コンデンサには、ポリスチレン、ポリエチレンなどのフィルムが使用されるようになったが、電力用への適用は遅れていた。1966年GE社において、ポリプロピレンフィルムと絶縁紙を交互に重ねて、これに三塩化ジフェニルを含浸した高圧缶形コンデンサが実用化された。我が国においても翌年実用化されたが、前述のようなPCBの規制により、1972年には芳香族炭化水素系絶縁油が我が国では適用された。フィルムの適用が遅れていたタンク形では、紙-フィルムコンデンサが1976年に実用化されて、在来コンデンサに比べ損失1/4、容積1/2以下と、大幅な低ロス化、コンパクト化、単器大容量化を果たした。

紙-フィルムコンデンサでは、絶縁紙を介在させることで誘電率の向上と絶縁油の含浸性を確保しているが、絶縁耐力、tan δの点からはオールフィルム化が望ましい。表面が平滑なフィルムでのオールフィルム化では、絶縁油をフィルムとフィルムの層間に浸透させることが困難であった。しかし1973年にアメリカのMcGraw Edison社によって、フィルム表面とアルミ箔の粗面化、含浸条件の工夫などにより、缶形オールフィルムコンデンサが実用化された。

タンク形コンデンサの素子は広幅素子と呼ばれ、缶形素子に比べ反物状の素子面積は数倍にもなり、含浸条件のみならず素子巻き技術の更なる向上が必要であったが、1990年には22kV単器30Mvarという世界に類を見ない大容量のタンク形オールフィルムコンデンサが開発された。

図8にタンク形コンデンサの損失-温度特性の戦後における改善経過を示すが、オールフィルムコンデンサの実用化により1/10以上の損失低減が実現された。これによってコンデンサ使用時の電力損失の節減とコンデンサ単体の発熱量の低減により、熱設計上の制約が軽減され単器容量の増大・更なるコンパクト化が可能になった。

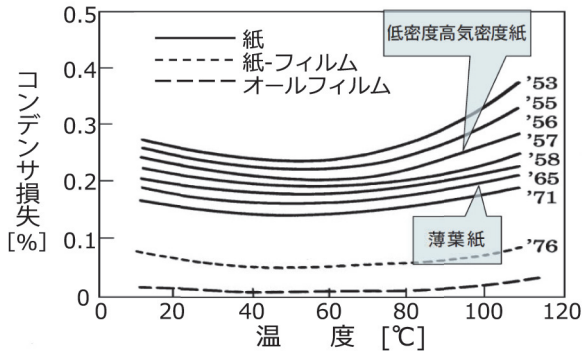


図8 電力用コンデンサの損失-温度特性の改善

4. 4 オイルレス・コンデンサの開発

防災のためのオイルレス化の強いニーズに対して、1985年世界に先駆けて我が国で、金属蒸着フィルム誘電体に不燃性ガスを充填したオイルレス缶形コンデンサが開発され、防災ニーズの高いビルの受配電設備などに、近年は数百Mvar/年ほど設置されている。

不燃性ガスとして当初、絶縁性能に優れたSF₆が使用されていたが、1997年の地球温暖化防止京都会議で排出抑制対象ガスに指定され、2000年には環境に優しい窒素ガス又は窒素ガスとヘリウムガスの混合が使用されるようになった。

蒸着フィルムは、プラスチックフィルムの表面に数百Åの非常に薄いAlやZn合金を真空蒸着して電極とした誘電体で、一部が絶縁破壊しても破壊点近傍の微小面積の蒸着金属が消失し、若干容量が減少するものの瞬時に絶縁機能を回復するため、信頼性の高いシステムである。しかしながら、原理的にも大容量素子を製作することが難しく、単器数百kvar程

度に留まっている。

また、防災とコンパクト化を狙って、誘電率の高いセラミックを適用した例もあるが、技術的にもコスト的にも大容量化が難しく、進相用として実用化には至っていない。

電力用コンデンサは、電力機器ではオイルレス化のあまり進んでいない機器であり、これからのナノテクノロジーの進歩と共に、大容量器のオイルレス化は、今後の研究課題である。

5. 電力用コンデンサの構造と設備

5. 1 オールフィルムコンデンサ素子構造の改良

前述のような誘電体材料の改善と共に、コンデンサ素子の構成も図9に示すように変遷してきた。一般に電力用コンデンサの素子は、当初は電極箔と数層の誘電体を反物状に巻いていたが、現在では生産性の良い丸く巻いて巻き芯を抜き反物状とする素子巻き方法が取られており、その製造技術はその都度改善されてきた。

コンデンサ素子電極端の電界は、誘電体の絶縁構成と厚さ、電極箔厚み、電極端部ズレなどに影響され、平滑部に比べると1.8~3倍程度厳しくなる。素子の電界設計をする場合、問題となるのはこの部分で部分放電が発生することである。この防止策として、絶縁油の耐部分放電性を向上させるだけでは限界があり、箔端部の構造の改善によって電界を緩和させる必要がある。電極箔の切断エッジによる集中電界を緩和する方法として、レーザーで端部を丸くする方式もあるが図10のように電極箔の端部を折り曲げ、箔端部の電界強度を大幅に低下させる方式（折り曲げ箔、

区分	構造(例)	含浸剤	製造年代					
			1950	1960	1970	1980	1990	2000
NHタイプ (油入り)	アルミ 紙	鉱物油 ↓ PCB	[Timeline bars]					
	アルミ 紙 フィルム	PCB ↓ 芳香族系 炭化水素	[Timeline bars]					
	エンボスアルミ 粗面化 フィルム	芳香族系 炭化水素	[Timeline bars]					
SHタイプ (油入り)	両面蒸着電極紙 フィルム	芳香族系 炭化水素 脂肪族 エステル	[Timeline bars]					
SHタイプ (乾式)	金属蒸着フィルム	SF ₆ ガス	[Timeline bars]					
		N ₂ ガス	[Timeline bars]					

図9 コンデンサ誘電体構成と含浸材の変遷

Folded Foil) が、缶形コンデンサで1977年頃より実用化された。この折り曲げ箔電極採用により部分放電開始電圧は大幅に上昇し、誘電体の高電位傾度使用が可能となり、更にコンパクト化が進んだ。

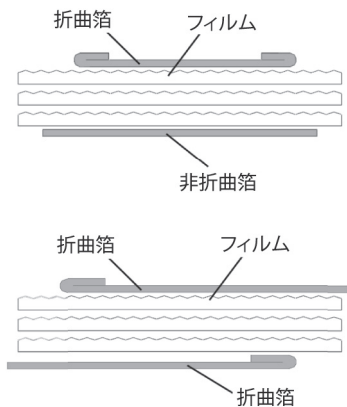
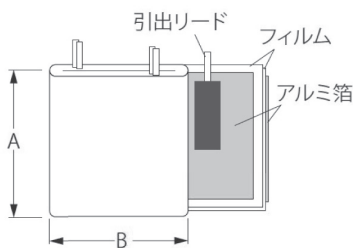
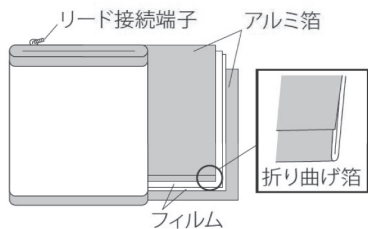


図10 端部折り曲げ箔の誘電体構成例

タンク形に用いられる広幅素子は、非折り曲げアルミ箔電極から外部への引き出し線として、当初は銅線で、1956年からアルミ線をメッシュ状に編んだリード線を使っていた (図11 (a)、CF型と称す)。オールフィルム化に伴い広い幅のフィルムをシワなく速く巻くために、1990年代後半から、外部引き出しとして素子の外へ電極箔を突き出す構造 (突き出し箔、Extended Foil) が採用され、折り曲げ突き出し箔 (図11 (b)、JX型と称す) の広幅素子が開発された。



(a)CF型素子



(b)JX型素子

図11 油入コンデンサ素子の構造

コンデンサ素子内部の発熱源は、大別して①誘電体損失②電極箔やリード線に流れる電流による損失があり、①には理想的なコンデンサの $\tan \delta$ と電極端部の電界乱れによる損失とがある。オールフィルム化以前は、電力用コンデンサのコンパクト化、低ロス化は主に誘電体の改良によってきたが、ポリプロピレンフィルムの $\tan \delta$ が極小となると共に、素子内部の伝導電流によるジュール損失が支配的になった。

図12に、ほぼ同容量の広幅JX・広幅CF・缶形JX素子の損失実測値から、誘電体平滑部・巻回コーナー部・電極箔部に分離し算出した損失内訳を示す。広幅JX型では、平滑部電極端より更に電界が厳しくなる巻回コーナー部電極端近傍油層の電気伝導による損失が2/3を占める。広幅CF型では、電極全面からリード線に流れる電流による損失が更に加わる。缶形JX型では、広幅JX型より巻回数が増えるため、巻回コーナー部での電気伝導損失が更に増加し、大容量素子ではJX型にしても損失はあまり低減されない。

このようにオールフィルム化の結果、同一誘電体構成であっても、素子構造によりその損失に大きな差が出るのが判明した。JX型広幅素子の開発は、CF型比半減の損失低減に加え、電極が突き出されることによる素子内部の熱放散の改善と相まって、単器大容量化の熱設計的な制約を事実上取り払ってしまった。

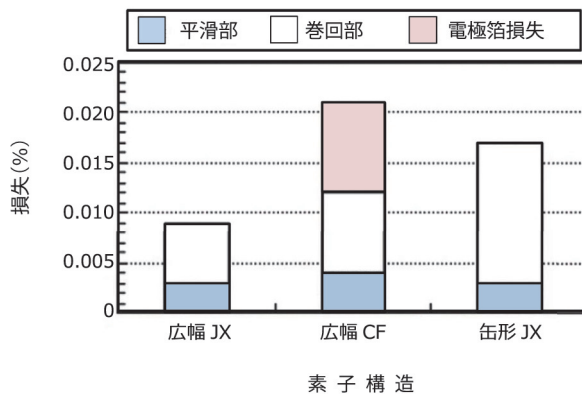


図12 オールフィルム素子の損失内訳

5. 2 コンデンサ設備構造の進歩

前述のように、現在製造されているコンデンサ単器には、タンク形と缶形コンデンサがある。進相用コンデンサは、一般に直列リアクトルおよび放電装置と組み合わせて使用されるが、大容量設備を構成する場合、現在でも諸外国においては、800kvarクラス以下の缶形コンデンサ複数台と組み合わせて使用される。一方、我が国ではタンク形コンデンサが独自に発展してきたこともあり、大容量タンク形コンデンサと直列リアクトルが組み合わせられる場合が多く、一体化した製品も開発されてきた。

コンデンサとこれら装置を一体化したユニット形コンデンサが1960年に、さらに1965年には開閉制御装置を組み込んだものが製品化された。また、66/77kV回路用としても10Mvarのユニット形コンデンサ設備が、1999年に製品化されている（図13）。



図13 特別高圧回路用ユニット形コンデンサ設備
(66kV 10Mvar)

一方、我が国の電力消費量増大・系統規模の拡大により、変電機器は高電圧・大容量化が進み立地条件も厳しくなってきた。従来66kV以上の特別高圧回路に使用されていた調相用コンデンサ設備は、支持碍子で構成した絶縁架台に搭載されフェンスに囲まれていたが、用地の縮小化、環境調和、信頼性・安全性の向上、保守省力化を目的として、大地置き大容量縮小形コンデンサ（以下、縮小形コンデンサ）が開発された。

縮小形コンデンサは、鉱油含浸紙缶形コンデンサ複数台をラックに組み、油入タンクに密閉された放熱器冷却方式の154kV 5Mvar器6台を油ダクトで接続した30Mvar設備として1973年に実用化された。しかし、低損失の合成油含浸紙-フィルム広幅素子が開発されたことに伴い、コンデンサ素体をシールドで囲み、それとタンク間との対地絶縁をクラフトボードで形成し、同一油タンクに封じた自冷式66/77kV単器13,340kvar縮小形コンデンサが、1980年に実用化された。66kV以上の縮小形コンデンサは、2015年末までに、1,500台以上、約20,000Mvarが納入されている。

油入機器間を接続するには、油中貫通ブッシングを用いる方法とプレスボードスペーサを使用する方法がある。後者は、油ダクトに使われる変圧器油と本体のコンデンサ油が長期的に混入する危険があり、初期の縮小形コンデンサには前者が用いられていた。しかし、高電圧化に伴い大型化し、①本体のデッドスペースが増加しコンパクト化に反する、②輸送の

関係から現地にて取り付ける必要が生じ、工場で完全密封と言うOF式の長所が損なわれることから、ガス絶縁機器で実用化されているエポキシ絶縁スペーサが現在では適用され、電力用コンデンサのコンパクト化と省資源に貢献している。

また、コンデンサ単器大容量化に伴う、エネルギー高密度化および高調波の流入による騒音増大は環境上の問題となり、タンク形コンデンサでは様々な騒音対策の工夫がなされており、低騒音が要求される設置箇所にはコンデンサに防音壁附属した設備もある。

5. 3 単器大容量化と高電圧化

タンク形コンデンサは、当初20~60kvarのものが製作されていたが、その後次第に大容量化し、1939年には500kvar器が製作された。その後、大戦により大容量化も停滞したが、戦後は前述のように、低ロス化に代表される誘電体の改善、設計・製造技術の向上ならびに所要群容量の増大、用地取得難などの情勢に応じて単器大容量化されてきた。単器最大容量として、油浸紙コンデンサでは3,334kvar器、紙-フィルム誘電体を適用したタンク形コンデンサが7,000kvar器、66kV回路用縮小形コンデンサでは20Mvar器が実用化された。この縮小形コンデンサは、我が国最大群容量120Mvar設備にも適用された。前述のように、タンク形コンデンサのオールフィルム化は遅れていたが、1990年にCF型22kV 30Mvar器が実用化され、その後66kV 27Mvar縮小形コンデンサも開発された。

しかし、CF型ではこれが熱安定性の面から単器最大容量の限界であったが、広幅JX型素子が開発され、2000年には単器世界最大容量40Mvar縮小形コンデンサが台湾電力に納入された。表1に66/77kV 40Mvar設備における、絶縁架台式と縮小形コンデンサ設備の比較を示すが、設備面積で約1/3と大幅なコンパクト化と低損失化を果たした。図14に、タンク形コンデンサの最大単器容量とタンク内容積の変遷を示す。

現在、我が国では、変電所のGIS化およびスペースの有効活用と経済性比較より、絶縁架台式と縮小形が併用されている。

一方、大容量化を図る一方策として、縮小形コンデンサの高電圧化がある。調相用としては、147kV器が既に1990年に実用化されている。

電力消費の増大に伴い、1965年に電源開発株式会社・佐久間で、1977年に東京電力株式会社・新信濃で、50/60Hz異周波数系統間連系用として周波数変換設備が運転開始され、交流フィルタが設置された。我が国初の本格的HVDC送電として、1979年運転開始された北海道-本州間直流連系設備には、直流の海底

表1 66/77kV 40Mvar 電力用コンデンサ設備の比較

設備	絶縁架台式コンデンサ設備	縮小形コンデンサ設備
定格	66/77kV 3φ 40Mvar	
設備レイアウト		
設備面積	80m ² (100%)	28m ² (35%)
保守	支持碍子の清掃が必要。	充電部遮蔽なので外観点検のみでよい。

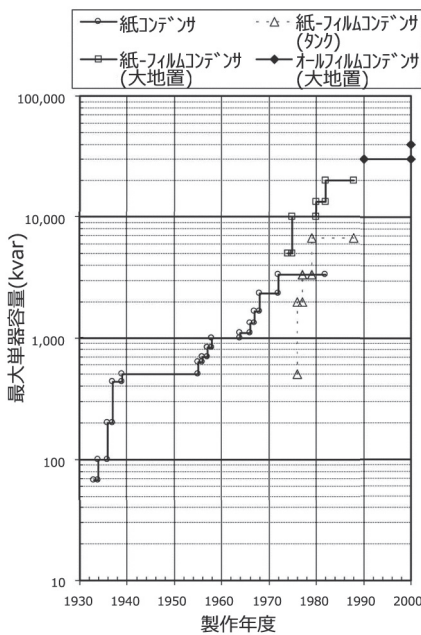


図14 タンク形コンデンサ最大単器容量の変遷

ケーブルと架空線路とを有するため直流フィルタとサージコンデンサが、交流フィルタと共に設置された。

これらの超高压コンデンサ設備は、これまでの諸外国設備と同じくユニットコンデンサを絶縁架台上に複数台搭載され、充電部露出のため全体がフェンスで囲まれており、変換所の敷地の半分近くを占めていた。

このため、大規模HVDC用高調波フィルタのコンデンサ設備として、更なるコンパクト化、耐震対策としてのロープロフィール化、塩害や鳥獣害に対する信頼性向上が望まれた。そこで、1980年頃から、パルプモールドの工夫などによる絶縁合理化、超高压用エポキシ絶縁スペーサの開発、絶縁油処理法など設計・生産方法などの研究が開始された。

その結果、66~500kVに至るまで同一コンセプトの設計・組み立てを可能とした縮小形コンデンサが開

発され、北海道－本州連系増設用DC250kV直流フィルタ設備が2年間の実系統試験を経て実用化され、275kV交流フィルタ用コンデンサは試作・検証後、新信濃増設用として実用化された。そして、2000年には紀伊水道HVDC用としてAC500kV、DC500kV高調波フィルタ用コンデンサが実用化された。

AC500kV高調波フィルタとしてタンク形コンデンサを絶縁架台式搭載した設備と縮小形コンデンサによる設備（図15）との比較を表2に示す。



図15 大地置式 AC500kV 高調波フィルタ設備

6. むすび

OF式コンデンサの開発から、85年を経た当社コンデンサは、力率改善用、調相用またはフィルタ用として、国内のみならず、世界各国の電力系統で幅広く使用されている。また当社コンデンサ事業は全社に先駆けて海外生産拠点を設立するなど、海外展開を積極的に推進してきた。

今後は電力広域連系設備および国内電力・産業向更新需要の継続的受注をベースに、パワーエレクトロニクス、環境・医療分野向けの新製品の開発と参入、アジア、アフリカ地域の開発途上国のインフラ整備事業における販路拡大などの受注増大を図り、持続的成長を成し遂げる所存である。

表2 AC500kV 高調波フィルタ設備の比較

設備	絶縁架台式 (11、13、高次分路は同相異分路共通架台式)	大地置式
高調波交流フィルタ容量 5分路：50Mvar、11分路：35Mvar、13分路：25Mvar、高次分路：50Mvar		
設備レイアウト		
設備面積	2850m ² (100%)	1664m ² (58%)
設置環境	塩害条件 0.03mg/cm ² まで適用可能	塩害条件 0.03mg/cm ² 以上でも適用可能
保守	支持碍子の清掃が必要。	充電部遮蔽なので外観点検のみでよい。

参考文献

- (1) 村岡：「コンデンサ技術の新しい潮流」、OHM、Vol.85 No.10、pp.30-35(1998.10)
- (2) 電力用コンデンサに関する国際規格と国内規格の整合性委員会編：「わが国における電力用並列コンデンサの設置状況、稼動状況および無効電力配分状況に関する調査結果」、電気学会技術報告、第1130号、pp.17-21(2008.9)
- (3) 電力用コンデンサ誘電体調査専門委員会編：「電力用コンデンサの新規誘電体に関する実態調査および今後の展望」、電気学会技術報告、第1003号(2005.2)
- (4) 西松：「電気絶縁油の高電圧化における安定性」、Vol.25 No.11、pp.730-733、日本潤滑学会(1980)
- (5) 花村 他：「大容量オールフィルムコンデンサの開発」、電気学会静止器研究会資料、SA-90-55(1990.8)
- (6) 村岡、松原：「電力用コンデンサの損失低減と単器大容量化」、電気学会論文誌B、Vol.125-B No.2、pp.227-232(2005.2)
- (7) 鈴木、大河原、山内：「縮小新形コンデンサの開発実用化」、電気学会静止器研究会資料、SA-80-27、(1980)
- (8) 村岡：「電力用コンデンサの大容量・高電圧化に関する研究」、名古屋大学学位論文(2004)
- (9) 高橋 他：「電力用コンデンサの騒音について」、電気学会静止器研究会、SA-87-17(1987)
- (10) 陰野、松本、村岡：「台湾電力殿納40Mvar電力用コンデンサ設備」、電気学会全国大会、No.5-122(2001)
- (11) 山形 他：「147kV電力用コンデンサ設備の実用化」、電気学会電力・エネルギー部門大会、No.438(1991)
- (12) 室谷 他：「UHV直流送電用大地置フィルタの開発」、日新電機技報、Vol.29 No.4、pp57-65(1984)
- (13) H.Ooi, et al.：“Development of Compact250-kV DC Filter for HVDC Converter Station”, IEEE Trans.Power Delivery, VoL.4 No.1, pp.428-435(1989)
- (14) T.Yamazaki, et al.：“Development and Field Test Results of the AC275kV Compact Filter”, IEEE Trans,Power Delivery, VoL.11 No.4, pp.1707-1712(1996)
- (15) T.Shimato, T.Hashimoto, M.Sampeï：“The Kii Channel Link in Japan”, CIGRE Session, Paris,14 - 106(2002.9)
- (16) 電力用コンデンサ応用技術調査専門委員会編：「電力用コンデンサ応用技術」、電気学会技術報告、第777号(2000.5)
- (17) 坂本：「真空計」、実用新案第178508号(1919)
- (18) 室谷、西松、深川：「電力用コンデンサの歩みと動向」、日新電機技報、Vol.36 No.4、pp.3-10(1991)
- (19) 村岡、松本：「電力用コンデンサの歴史」日新電機技報、Vol.55 No.2、pp.43-53(2010.10)
- (20) 日新電機：「人と技術の未来をひらく 日新電機75年史」(1992.3)

執筆者紹介



森脇 一雄 Kazuo Moriwaki
電力システム事業本部
コンデンサ事業部
技術部電力・JR技術グループ長



川口 正人 Masato Kawaguchi
電力システム事業本部
コンデンサ事業部長