

特 別 寄 稿

# 電力用コンデンサの歴史 - そのコンパクト化と低ロス化の歩み -

History of Power Capacitors  
- The Progress in Size and Loss Reduction -

村岡 隆\* 松本 義明\*\*  
T. Muraoka Y. Matsumoto

## 概 要

日本でOF式タンク形電力用コンデンサが1931年誕生以来、電力用コンデンサは著しい進歩を遂げている。それらの進歩は、鉱油含浸紙誘電体、そして芳香族炭化水素油を含浸した紙・フィルム誘電体とオールフィルム誘電体の改良で達成された。加えて、コンデンサ素子と機器の構造、そして生産技術の改良が、電力用コンデンサの発展に貢献してきた。損失が低減されるに伴い、単器容量は増大し、そしてコンパクトな縮小形コンデンサが開発された。その単器容量は最大40Mvarまで、交流または直流500kV回路用すら開発されている。初期に比べると、現在の電力用コンデンサの損失は1/20、誘電体容積は1/10となっている。

本報では、電力用コンデンサ75年以上の歴史を振り返り、電力用コンデンサ技術の変遷と現状について述べる。

## Synopsis

Power capacitors in Japan have made remarkable progress since the OF (oil-feeding) tank type power capacitor was born in 1931. The progress has been achieved by innovation in mineral oil impregnated paper dielectrics, mixed paper film and all-film dielectrics impregnated with aromatic hydrocarbon oils. Improvement in capacitor elements and equipment structures as well as advancement in production techniques are other factors to have accelerated such progress.

Along with reduction in power loss, compact capacitor units with a larger capacity have been developed, such as dead-tank type capacitors with a maximum capacity of 40 Mvar and compatible even for AC or DC 500 kV lines. Compared with initial power capacitors, these current models have been cut in power loss and dielectric volume by 20 and 10 times, respectively. This paper describes the transition in power capacitors and related technologies from the past to the present, looking back at the over 75-year history.

## 1. まえがき

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）が開発したことが契機になったと言える。以来、75年間以上に亘る発展は、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歴史と言っても過言ではない。

電力系統に繋がれるコンデンサを電力用コンデンサと言うが、構造などから表1に示すように、一般的に2つに分けられる。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。

本報では、電力用コンデンサの黎明期からの歴史を振り返るとともに、その技術的な変遷と現状について、タンク形コンデンサを中心にして述べる。

\*総務人事部 日新テクノアカデミー  
\*\*グローバル事業本部

本稿は、SEIテクニカルビュー、January 2010, No.176, p.31-39に掲載の論文に加筆・修正したものである。

## 2. 電力用コンデンサ事業の変遷と発展<sup>(1)~(3)</sup>

### 2.1 黎明期

コンデンサは電気機器の中でも古い歴史を持っており、アメリカの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（昭和6年）には世界最初の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字形マノメーターとマックレオード真空計を組み合わせたS形真空計<sup>(4)</sup>（図4）が開発され、コンデンサ製造品質の確保に貢献した。

表1 電力用コンデンサの構造による分類

種類	油量調整	単器の容量	単器の電圧	主に使われる場所
タンク形	FT (Feeding Tank)	300kvar	3.3kV	変電所や大規模工場設備
缶形	容器の可とう性	500kvar	6.6kV	屋内や受電盤内など



図1 OF式コンデンサ試作器 (6kV 7kvar)



図3 FTを用いたOF式コンデンサ製品第1号品 (3.3.kV 60kvar)



図2 OF式コンデンサ製品 第1号品 (10kV 10kvar)

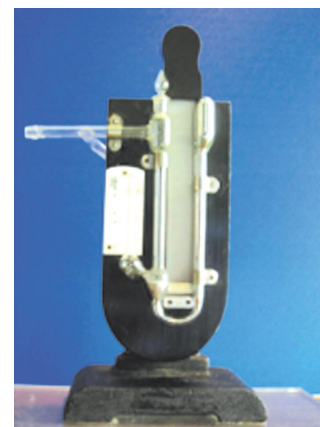


図4 S形真空計



図5 1938年頃のコンデンサ素子巻き工場

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。

図5は、1938年頃のコンデンサ素子巻き風景であるが、日本の伝統技能の機織り技術が応用されており、我が国の周辺技術の裾野の広さ、重要性を再認識させられる。

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された。

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り、いきおい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のみで使用されていた。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システムの力率改善用・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り、日本が世界をリードするようになった。このことから、現在使われている電力機器の中で、酸化亜鉛形避雷器（ZnOアレスタ）<sup>(5)</sup>と同様、電力用コンデンサは日本の開発品だと称されても良い

であろう。

## 2.2 電力用コンデンサの発展

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、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（図6）。その設置量は我が国の電力消費量の伸びと共に、図7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伸びは大きい<sup>(6)</sup>。

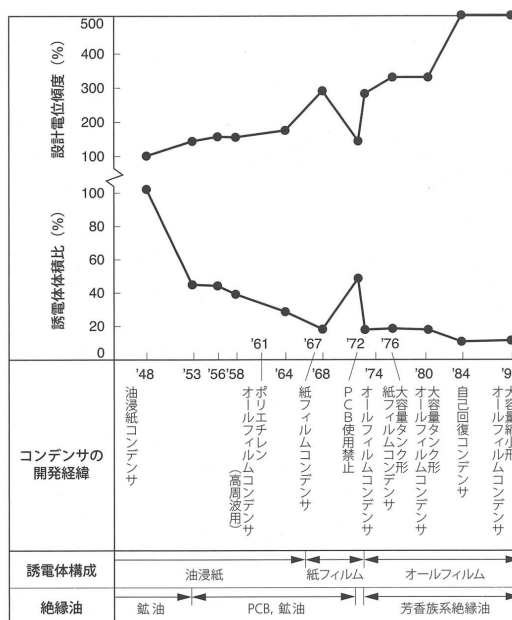


図6 コンデンサの誘電体システムの変遷

## 2.3 タンク形コンデンサのアジアへの展開

諸外国では、特別高圧回路用であっても、複数台の缶形コンデンサを絶縁架台に搭載する方式（図17参照）が一般的である。1980年代のグローバル化に伴い、当社の缶形コンデンサは、1988年からタイ国にて生産されるようになり<sup>(7)</sup>、我が国への供給はもとより、上記世界中の各国に供給してきた。最近では、タイ国及び周辺国への供給源にもなっている。

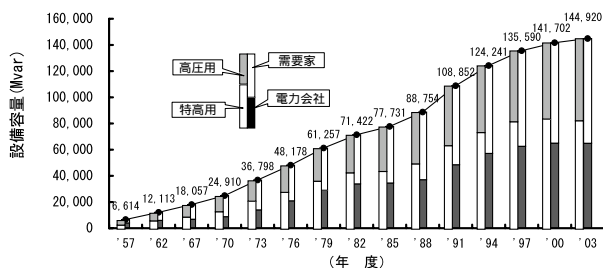


図7 日本における電力用コンデンサ設備容量の変遷

一方、タンク形は前述のように、第二次世界大戦以前から中国などに輸出されており、中国瀋陽で使用であった1940年製の307kvar器1台が、1980年に訪中記念として当社に贈呈された(前述のコンデンサと共に、本品も保管展示されている)。戦後も韓国やオーストラリアなどに輸出されており、縮小形コンデンサ(4.2参照)として始めて、58kV 3Mvar器が中国国鉄に1984年に納入された。

我が国では、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、経済成長著しい東電西送の中国では、図8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、中国無錫に新たな生産拠点を2001年に立ち上げ、翌年には現地生産1号器として、ユニット形(4.2参照)のタンク形11kV 6Mvar器(図9)が需要急増の広東省沙溪変電所に納入された。

現在での中国では、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。

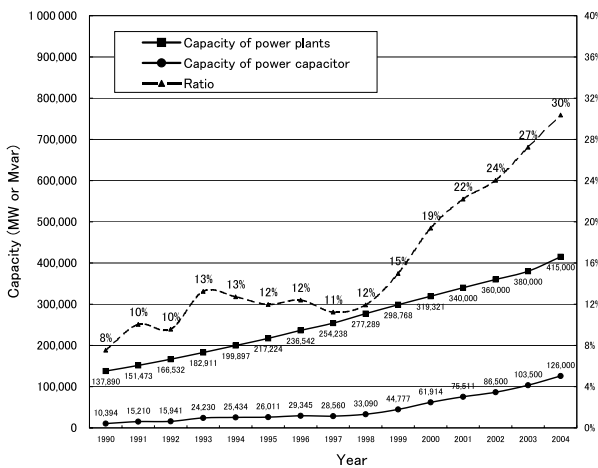


図8 中国における発電設備容量と電力用コンデンサ設備容量との変遷



図9 中国生産タンク形第1号製品 (ユニット形、11kV 6Mvar)

### 3. 誘電体の開発と改良<sup>(1)~(3)、(8)</sup>

#### 3.1 絶縁紙の改善

OF式コンデンサの誘電体として、当初は高压ケーブル用絶縁紙を薄くした密度 $0.82 \sim 0.95\text{g/m}^3$ 、厚さ $60 \sim 85\mu\text{m}$ のクラフト紙が使用された。

戦後の資材不足時には、絶縁紙の誘電体損失( $\tan$ )が $0.4\%$ を超え、国産パルプの原木として使用されていた杉や桧材中の油脂量が非常に大きいことが原因と判明し、松材に変更され以前の性能が出るようになった。

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、 $\tan$ が約2割小さくなった。その結果、一般に密度 $0.8\text{g/m}^3$ 前後、厚さ $30 \sim 90\mu\text{m}$ 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、 $\tan$ も $0.18\%$ 付近となった。

1964年には $20 \sim 30\mu\text{m}$ 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。

#### 3.2 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10数種の鉱油について、固有抵抗・誘電率・ $\tan$ に加え、電極端モデルにおける可視ガス発生電圧<sup>(9)</sup>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 $\tan$ 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 C2320、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。

### 3.3 プラスチックフィルムの誘電体への適用

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 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ー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 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<sup>(10)</sup>。

図10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。

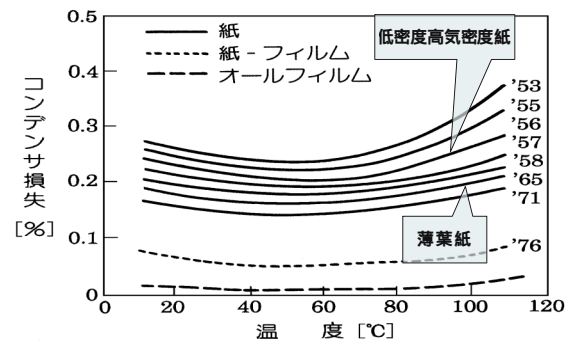


図10 電力用コンデンサの損失-温度特性の改善

1982年には高圧缶形コンデンサに、それまで低圧分野に用いられていた数百の金属を絶縁紙両面に蒸着し電極として、誘電体フィルム1枚の素子に絶縁油を含浸したSH (Self-Healing) 方式が採用された。この方式は、電極箔が非常に薄く抵抗が大きいため、損失が若干大きくなるものの設計電位傾度が高く取れ、更なるコンパクト化が図られた。

### 3.4 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<sup>(11)</sup>、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SF<sub>6</sub>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、図11に示すように、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。

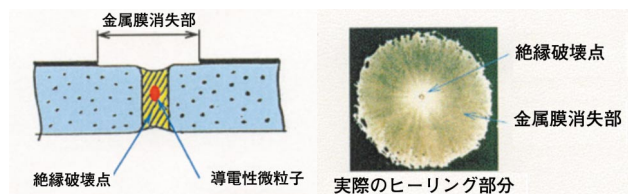


図11 セルフ・ヒーリング現象

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<sup>(12), (13)</sup>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をも期待したい。

#### 4. 電力用コンデンサの構造と設備

##### 4.1 コンデンサ素子構造の改良<sup>(8)</sup>

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12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、当初は図5のように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。

区分	構造(例)	含浸剤	製造年代				
			1950	1960	1970	1980	1990
NHタイプ (油入り)	アルミ 紙	鉱油 ↓ 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 脂肪系 エステル	[Timeline bars]				
SHタイプ (乾式)	金属蒸着フィルム	SF <sub>6</sub> ガス N <sub>2</sub> ガス	[Timeline bars]				

図12 コンデンサ誘電体構成と含浸材の変遷

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

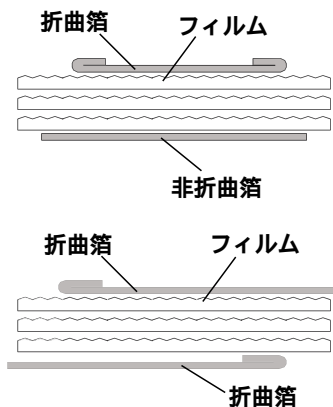
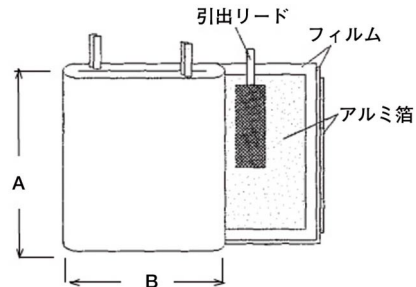


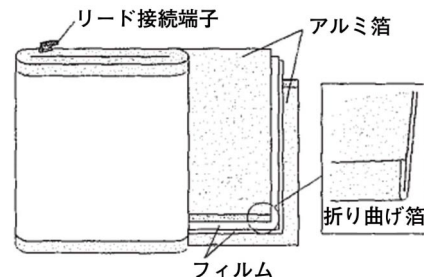
図13 端部折り曲げ箔の誘電体構成例

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13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、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。

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14(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14(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14 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 誘電体損失 電極箔やリード線に流れる電流による損失があり、には理想的なコンデンサのtan 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 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。

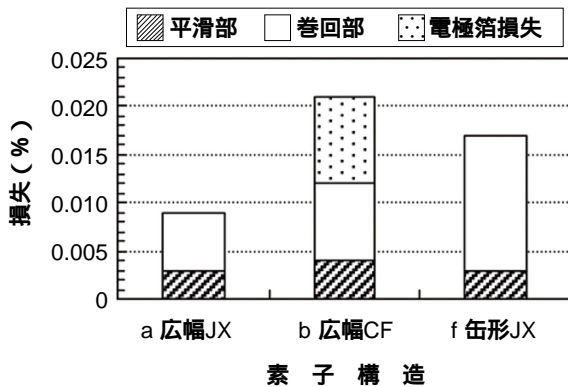


図15 オールフィルム素子の損失内訳

図15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<sup>(14)</sup>。

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事が判明した。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。

#### 4.2 コンデンサ構造の進歩

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組み合わせられる場合が多い。

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、1965年にはこれに開閉制御装置を組み込んだものが製品化され、更に2008年には、画期的コンパクト化を実現した連結タイプのユニット形コンデンサ(図16)が製品化された<sup>(15)</sup>。また、特別高圧回路用として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17)。

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、保守点検の簡易化を目的として、大地置き式大容量縮小形コンデンサ(縮小形コンデンサと称す)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<sup>(16)</sup>。66kV以上の縮小形コンデンサは、2010年7月ま



図16 高圧回路用ユニット形コンデンサ設備 (6.6kV 500kvar)



図17 特別高圧回路用ユニット型コンデンサ設備 (66kV 10Mvar)

で、1,074台、15,485Mvarが納入されている。

油入機器間を接続するには、油中貫通プッシングを用いる方法とプレスボードスペース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、本体のデッドスペースが増加しコンパクト化に反する、輸送の関係から現地にて取り付けの必要が生じ、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ス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<sup>(17)</sup>。

また、コンデンサのエネルギー高密度化と高調波流入による騒音が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<sup>(18)</sup>、高調波フィルタ用大容量コンデンサでは防音壁附属の設備もある。

#### 4.3 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 30Mvar級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<sup>(19)</sup>。図18に既設の絶縁架台式缶形コンデンサ設備との比較を示すが、設備面積1/6、高さ2/3と大幅なコンパクト化と低損失化を果たした。

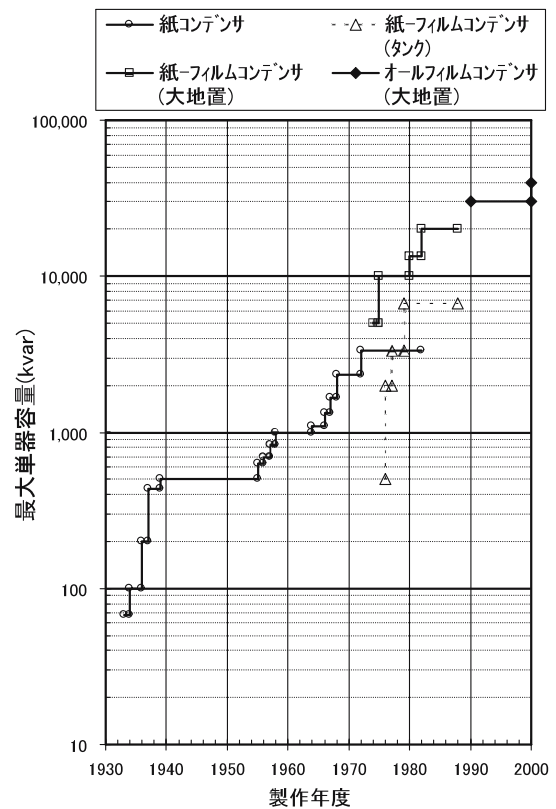


図19 タンク形コンデンサの最大単器容量の変遷

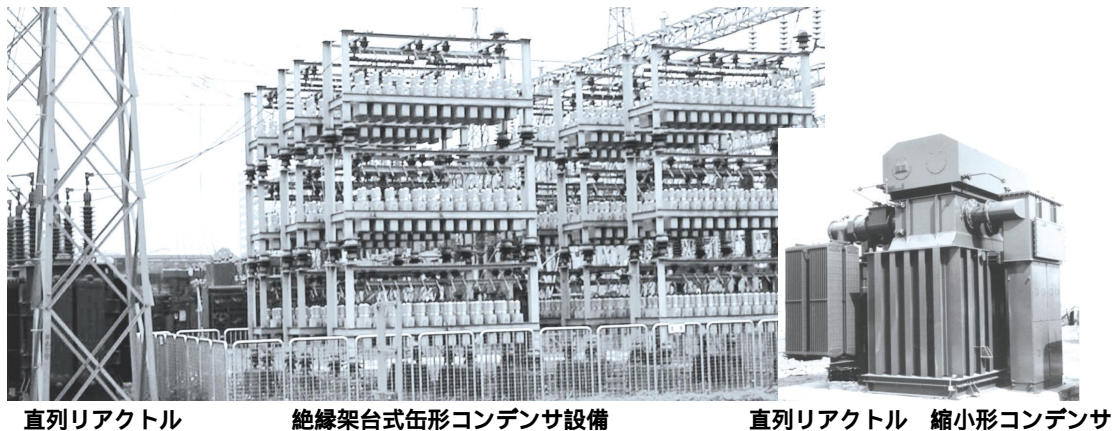


図18 69kV 40Mvar 電力用コンデンサ設備の比較



図19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が、広幅JX素子の適用により更なる単器大容量化の可能性が示唆されている<sup>(14)</sup>。

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年に実用化されており<sup>(20)</sup>、広幅JX素子を適用して、将来の1,000kV昇圧時の変圧器三次補償用の1群161kV 240Mvar設備に適用されるのを待っている<sup>(21)</sup>。

電力消費の増大に伴い、1965年に電源開発・佐久間で、1977年に東京電力・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<sup>(22)</sup>。

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<sup>(23)</sup>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<sup>(24)</sup>。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<sup>(25)</sup>。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搭載した設備と縮小形コンデンサによる設備(図20)との比較を表2に示す。

## 5. あとがき

3/4世紀を経た電力用コンデンサは、容積1/10、損失1/20とコンパクト化・低ロス化が進んだ。“持続可能な社会”実現への模索が続く今、コンパクト化・低ロス化のみならず、使用資材の低減、工事・輸送の簡略化など資源・エネルギーの使用量の軽減、環境・安全面への配慮などが、電力用コンデンサにも更に求められていくであろう。

本報では主に力率改善用、調相用の電力用コンデンサについて述べたが、電力の品質向上に貢献する装置として、高調波フィルタ、静止型無効電力補償装置(SVC)、瞬時電圧低下対策装置、エネルギー蓄積装置など、システム化による電力用コンデンサの応用拡大<sup>(26)</sup>が更に図られていくであろう。特に、分散電源の電力貯蔵用に使われるようになった電気二重層コンデンサが、パワーエレクトロニクス技術の進歩と共に系統に連系されるようになり<sup>(27)</sup>、電力用コンデンサも進化していると言えるであろう。

これからの技術者には、専門技術だけでなく技術リテラシー(技術を使いこなせる能力)が重要であると言われるが、電力用コンデンサの先達の足取りを辿ると、その確かな眼差しを感じることができる。本報が、若き技術者たちの“温故知新”となれば幸いである。



図20 大地置式 AC500kV 高調波フィルタ設備

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 <sup>2</sup> (100%)	1664m <sup>2</sup> (58%)
設置環境	塩害条件 0.03mg/cm <sup>2</sup> 以上でも適用可能	塩害条件 0.03mg/cm <sup>2</sup> 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) 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)
- (2) 日新電機社内誌、「コンデンサのあゆみ - 60周年を記念して」(1991.11)
- (3) 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)
- (4) 坂本貞一：「真空計」、実用新案第178508号 (1919)
- (5) 電気学会編：「電気学会100年史」、p.347 (1988.5)
- (6) 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)
- (7) 荒木、大西、石本：「OF式コンデンサの新生産拠点の概要」、日新電機技報、Vol.36 No.4、pp.46-48

- (8) 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)
- (9) 西松：「電気絶縁油の高電圧化における安定性」、潤滑、Vol.25 No.11、pp.730-733、日本潤滑学会 (1980)
- (10) 花村、唐木、村岡、荻田、松本：「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)
- (11) 高橋、村岡、米光、芝原：「高圧用ガス絶縁コンデンサの開発」、日新電機技報、Vol.32 No.3、pp.49-52 (1987)
- (12) 西松、高橋、井上、村岡、米光：「配電線搬送用結合コンデンサの開発」、日新電機技報、Vol.31 (1991)

- No.3、pp.36-40 (1985)
- (13) 山岡、久保田：「セラミックコンデンサとその最新事例」、OHM、Vol.85 No.10、pp.60-64 (1998.10)
- (14) 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)
- (15) 平崎、富田、中山、山下、小倉、山下、近藤、川勝：「世界最小高圧コンデンサ設備スーパーユニバーサルツインの製品化」、日新電機技報、Vol.53 (通巻130号) pp.21-26 (2008.3)
- (16) 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)
- (17) 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)
- (18) 高橋、一薫、中西、荻田：「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)
- (19) 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)
- (20) 山形、伏見、村岡、塩見、西迫、松本、和田、井上：「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)
- (21) 山形：「100万V変電機器の開発はここまで進んだ」、電気学会論文B、Vol.115 No.11、pp.1276-1286 (1995)
- (22) 室谷、江尻、金万、大西、村岡、桑田、川口：「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、pp.57-65 (1984)
- (23) H.Ooi, H.Irokawa, H.Ejiri, K.Takahashi, T.Muraoka : " Development of Compact 250-kV DC Filter for HVDC Converter Station ", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.4 No.1, pp.428-435 (1989)
- (24) T.Yamazaki, S.Karaki, T.Muraoka, Y.Matsumoto, K.Oonishi, S.Inno : " Development and Field Test Results of the AC 275kV Compact Filter ", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.11 No.4, pp.1707-1712 (1996)
- (25) T.Shimato, T.Hashimoto, M.Sampe : " The Kii Channel Link in Japan ", CIGRE Session, Paris, 14-106 (2002.9)
- (26) 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)
- (27) 熊田、道念、岡崎、老田：「地域分散型電力供給システムの現状」、電気学会誌、Vol.129 No.2、pp.72-75 (2009.2)

## 執筆者紹介



村岡 隆 Takashi Muraoka  
総務人事部  
日新テクノアカデミー  
技師長 博士 (工学)



松本義明 Yoshiaki Matsumoto  
グローバル事業本部  
コンデンサ事業部長