

矢成 敏行
T. Yanari

当社は、1894年(明治27年)に第1号器の変圧器を納入してから、昨年で100年を迎えた。その間、現在に至るまで多数の記録品を生み出し、変電設備の進歩・合理化に貢献してきた。

変圧器は、当初は米国からの技術導入に依存して発展してきたが、やがて実力をつけ1975年ころからは独自技術により目覚ましい進歩を遂げた。世界各所で発生して現在も問題となっている流動帯電による事故も、1980年代初頭にはすでに現象解明を完了し、対策を講じている。

ここでは、このような100年に及ぶそれぞれの時代の主要な技術の発展とその背景を述べる。

One hundred years have passed since Toshiba manufactured its first transformer in 1894. Since then, we have contributed to the progress and optimization of substation equipment and achieved many records related to transformer products.

In the early years, our transformer technology was improved through the introduction of technology from American manufacturers. Since 1975, however, we have manufactured transformers according to our own designs and have made great progress in this field. Recently, it has been reported that many transformer failures occur due to streaming electrification. Toshiba, however, already studied the streaming electrification phenomenon and completed countermeasures against it in the early 1980s.

This paper describes the 100-year history of Toshiba transformer technology, including the background to this technology.

1 まえがき

わが国に変圧器が渡来したのは1889年(明治22年)大阪電灯が米国から30kVAの発電機を輸入し、運転を開始したときで、変圧器は英国製であった。これを模して初めて国産の変圧器を製作したのは三吉電機工場で、1893年のことである。

東芝の前身、芝浦製作所でも翌1894年(明治27年)から英国Ferranti社の製品をまねて単相10kVA以下、三相30kVA以下の製作を開始しており、昨年100周年を迎えた。

ここでは東芝変圧器100年を振り返り、技術の流れを五つの時代に分けて、それぞれの時代について代表的技術・製品を紹介する。

2 黎明(れい)明期の変圧器

模倣時代を脱却して、独自の設計が進められるようになったのは、1900年米国で設計に従事していた技師を迎えて米国式油入変圧器を取り入れてからで、配電用だけでなく、試験用、特別高圧用変圧器の設計にも進出した。図1の変圧器は、浜川崎工場に記念として保管されている多分現存する最古の



図1. 現存する最古と考えられる13.2kV-100kVA特別高圧変圧器 この変圧器が作られた1910年当時は、まだ10kVA以下の配電用変圧器がほとんどであった。

13.2kV-100kVA oil-filled transformer

特別高圧変圧器で、1910年信濃電気に納入した13.2kV-100kVAである。

図2は明治・大正時代の当社製変圧器の電圧・容量の推移を示したものである。当時のわが国の変圧器の記録品はすべ

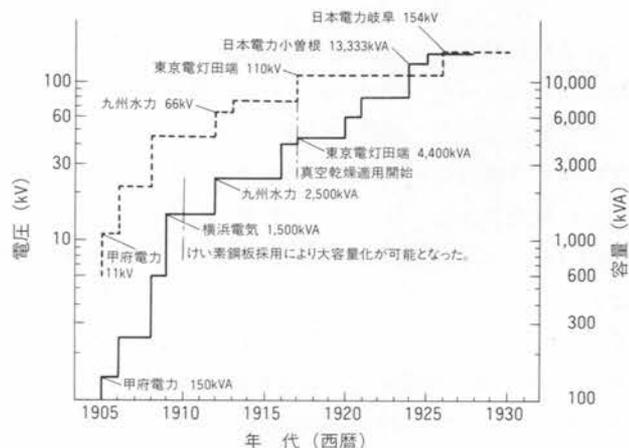


図2. 初期における東芝変圧器の電圧・容量の推移 1909年米国GE社と技術提携を開始。この技術をベースに国産品としての初製品を納入してきた。

Increase in capacity and voltage of Toshiba transformer units

て外国製、それも米国製で占められていた。国産品は2~6年遅れて製品化を達成し、国産品としての初製品を納入してきた。しかし、1926年に国産初の154kV変圧器を日本電力(株)岐阜変電所に納入してからは国産品の技術が評価され、わずかな例を除いて国産の製品が採用されるようになった。

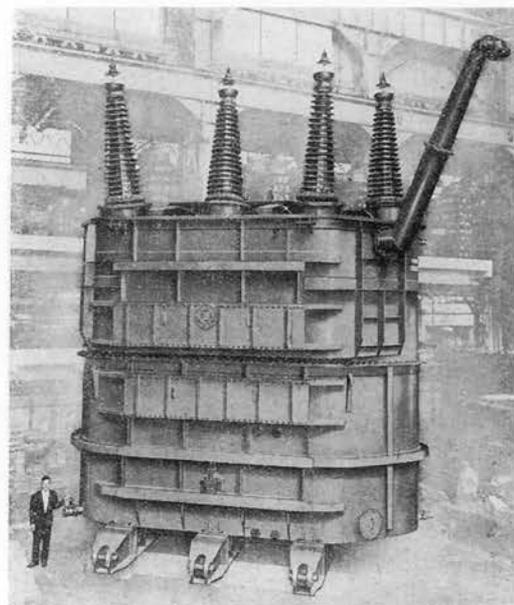


図3. 水豊発電所向け220kV-100MVA変圧器 当時の世界最大容量に並ぶ記録品で、8台すべてを当社が納入した。
220kV-100MVA transformer for Suiho Power Station

行ってきた耐雷絶縁設計の妥当性が初めて確認された。

その後当社では耐雷巻線構造として、GE社で開発されたりブシールド巻線やAEG社で開発された多重円筒巻線について研究を行い、1940年には実用化している。

3 昭和初期における変圧器発展期

昭和初期の変圧器の発展は、朝鮮半島(現朝鮮民主主義人民共和国)の鴨緑江での水力発電計画抜きでは語れない。

最初の計画は鴨緑江の支流の赴戦江で計画され、1928年に水冷式としては当時の記録的な容量である36MVAを完成させた。この計画が予期以上の成功を納めたことから、1935年以降は長津江・虚川江さらに鴨緑江本流の開発が進められたが、虚川江では東洋で初の超高压220kV送電電圧が採用された。また、鴨緑江水豊発電所向けとして1940年には当時の世界最大容量に並ぶ100MVA変圧器8台を完成させている(図3)。また、発電所用と同時に受電端変電所用としても100MVA6台を納入しているが、これらは送油風冷式でフィン付きユニットクーラ方式を採用した初製品でもある。

また、この時代は世界的に雷インパルス試験と耐雷巻線についての検討が盛んに行われた。当社では1920年ころからコイル線路端部の絶縁を強化する形の耐雷絶縁設計を採用し、前述の220kV変圧器にも適用している。しかし、商用変圧器にインパルス試験が行われたのは1933年米国で実施されたのが最初であり、わが国では試験設備が不十分であったことと測定技術が未熟であったこともあり、1937年になる。

わが国の最初のインパルス試験は、1937年当時の鉄道省武蔵境変電所向け単相154kV-18MVAで実施された。これは仕様書中に絶縁協調の項目が記載され、その検証のためインパルス試験の実施を求められたもので、これにより従来から

4 戦後の復興期

戦後の最初のエポックは1952年に運転を開始した275kV変圧器の完成で、関西電力(株)新愛本変電所に納入した99MVAである。この変圧器は三巻線変圧器で等価容量が117MVAと電圧・容量とも過去にない大きさであると同時に、1945年に発行されたJEC-110によりインパルス試験を実施するため非共振巻線構造を採用した点も新しい。図4はその中身を示したものであるが、コイル相間に配置されている円筒状のものが静電コンデンサ型のスタックシールドである。

また、1952年には戦争でとどえていたGE社との技術提携が復活し、多くの新しい技術がもたらされた。そのなかには気相乾燥法、額縁形鉄心、コイル強制冷却あるいは転位電線など現在でも適用している多くの技術が含まれており、その技術の固有化に注力した。しかし、一方では自己技術開発力も保持すべく当時のヨーロッパの新技術にも注目し、ハイセルキャップ巻線などの技術をいち早く採り入れ、自身の技術として固有化を図っている。

この時代の特徴として、一次変電所容量の増加に対し、現地据付工事を早く行うため、特殊貨車を使用しての組立輸送が一般化したことが挙げられる。新絶縁構造のほか五脚鉄心構造の採用や方向性けい素鋼板の採用により輸送可能限界容量は飛躍的に発展を遂げている。また、海上輸送についても

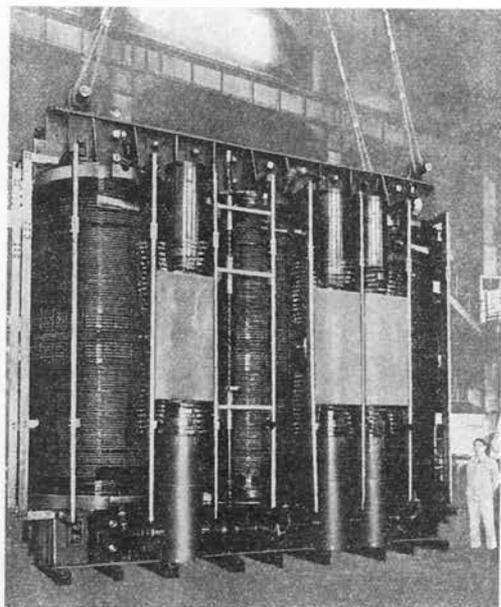


図4. 初の275kV変圧器の中身 インパルス試験を実施するため、高圧巻線に非共振巻線構造を採用し電位分布の均一化を図っている。

Core and coils of first 275kV transformer

フローティングクレーンを使用した船積みが採用されるようになり、その後の火力発電所用変圧器の単器容量の増大に対し、三相組立輸送ができるようになった。

5 変圧器の拡大発展期

図5は、当社が納入した発電所向け変圧器容量の推移を示したものであるが、1960年代に入ると火力発電所の単器容量の増大に拍車がかかり、それに合わせて高インピーダンス変圧器の導入が増加した。このため巻線もれ磁束による漂遊損失の増加および構造材の局部過熱への対応が大きな課題とな

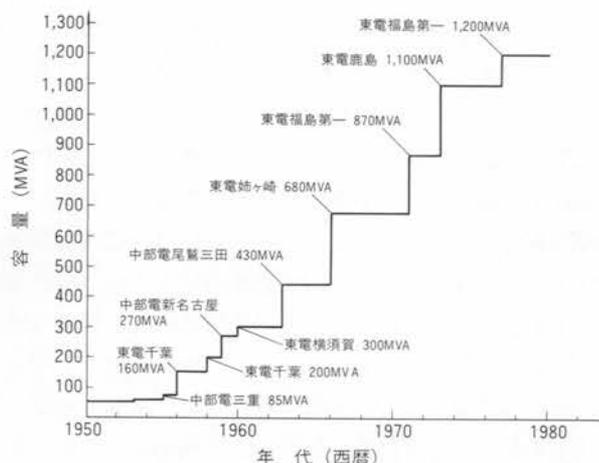


図5. 発電所用変圧器容量の推移 1960年代の容量増加と高インピーダンス化で、巻線もれ磁束による構造材の局部過熱対策が課題となった。

Increase in capacity of generator transformer units

った。これに対しては転位電線の適用、アルミシールドおよびけい素鋼板シールドの採用あるいは二重同心巻線配置の採用などで対応したが、初期の製品では構造材中に流れる循環電流に対する構造が不十分で、運転中に油中の可燃性ガスが増加し、現地で改造・修理を行った変圧器も少なくない。

1960年代に入り、わが国の次期送電電圧として500kVが決定されたが、国内での適用の前に海外での適用実績を積む目的で、1965年にカナダ、次いで米国およびオーストラリアから大量の500kV変圧器の受注に成功した。これら変圧器は米国の初期500kV変圧器の事故例から、従来の絶縁試験に加え、新たに部分放電試験が仕様として要求されていた。

当時は部分放電に対する設計・製造・試験面の対応策はまったく手探りの状態であり、使用絶縁材料の吟味や新絶縁処理法の導入、製造環境の改善や試験法の改善などを実施したが、この問題を完全に克服したのは国内向け500kV変圧器が軌道に乗った1970年代中ごろからのことで、防塵(じん)室の整備および作業者の防塵意識が徹底したことが大きな効果を上げた。図6は国内向け500kV変圧器の1号器となる東京電力(株)新古河変電所納入の1,000/3MVA変圧器である。

一方、国内向け500kV変圧器では、運転開始前の現地課電試験中に突然絶縁破壊を起こすトラブルが発生している。この原因についてはその後の実器およびモデルコイルによる調査から、変圧器内での絶縁油の流動帯電による静電気放電が発端になったものであることが判明した。その後の調査でこの静電気放電発生の要因は絶縁油の流速および帯電度、コイルの導油構造が大きく作用することが判明し、わが国では電力会社、メーカーの共同研究もあって1980年代初頭にはこの問題への対応は終えているが、海外では最近になって大きな

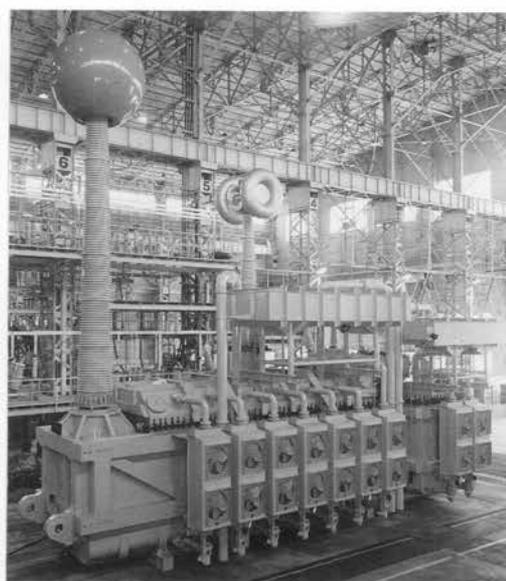


図6. 国内向け初の500kV変圧器 輸送問題をクリアするため、高圧巻線をハイセルキャップ巻線とし、コイルを3脚並列にして対応した。

First 500kV transformers for domestic use

問題となっている。このトラブルを契機として借り物の導入技術から、自前の技術への脱皮を図って、基礎的な現象調査にまでさかのぼった技術開発に注力することになった。

6 独自新技術開発の時代

500 kV 送電が本格的に適用されだした1970年代後半になると、1980年代中ごろには次の電圧としてUHV送電が始まると予想し、研究が進められた。また、大型・高速化したコンピュータを利用しての数値解析の進歩をいち早く取り込み、電界解析および巻線内に侵入する雷サージに対する電位振動解析技術を確立し、絶縁強度についても放電現象にまでさかのぼって調査した。さらに、当時わが国に入ってきたヨーロッパ流のプレスボードを主体とする各種成形絶縁材料を適切に配置することにより、コンパクトで絶縁強度の高い構造を開発した。これにより、1979年には500 kV変圧器と同一の貨車輸送制限内で2倍の電圧となるUHV変圧器のプロトタイプを完成させた(図7)。

このときはUHVの実現が先に延びたため、この技術を500 kV以下の機種に反映させ、大きな成果を納めた。なお、1993年に完成した東京電力(株)新榛名変電所向け1,000 kV実証試験用変圧器は、基本的にはこの当時の技術をベースとし、それにその後の絶縁技術の進歩を採り入れ一段とコンパクト化を図ったものである。

最近の新しい技術としてガス絶縁変圧器の発達がある。当社のガス絶縁変圧器の歴史は古く、1967年に導入技術をベースにわが国におけるガス絶縁変圧器の第1号として第一生命(株)に3 MVA器を納入しているが、このときはその後の需要を



図7. 長期課電試験中のUHVプロトタイプ変圧器 長期運転信頼性検証のため1.2Eの過電圧で3年以上の課電を実施した。

Long-term energization test of UHV prototype transformer

喚起することはできずに終わっている。しかし、その後1979年に当社流のガス絶縁技術により製品化を達成し、都心ビル変電所の不燃化の波に乗って適用実績を延ばしてきた。1983年からは東京電力(株)との共同研究により液冷却方式による大容量器の開発に取り組み、1989年に世界初の200 MVAガス絶縁変圧器を完成した。

一方、その後の研究で、ガス冷却でも大容量化を可能とする技術開発を行い、1994年275 kV-300 MVA変圧器を東京電力(株)東新宿変電所に納入した。

7 あとがき

以上、東芝変圧器100年の技術変遷を五つの時代に分け、それぞれの時代の代表的技術について概説した。これらの時代の技術進歩を一断面で目視化したのが図8で、特殊貨車を使用しての貨車組立輸送が行われだした当時からの変圧器の貨車輸送が可能な鉄心1脚当たりの巻線等価容量の変遷を示したものである。ほぼ同じ輸送限界寸法内で、絶縁の合理化、けい素鋼板の改良および特殊貨車の開発によりこの55年間で飛躍的な容量増加を達成している。また、今後も1,000 kV変圧器適用技術を反映することにより、さらにいっそうのコンパクト化が可能である。

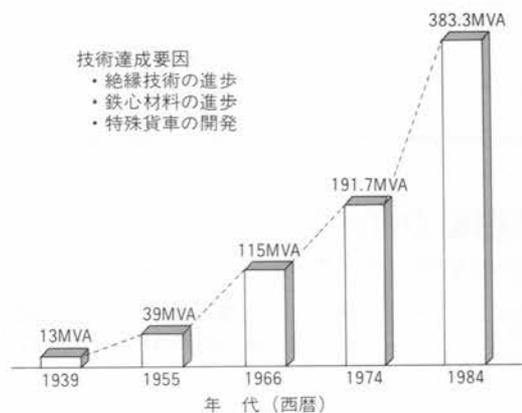


図8. 貨車組立輸送可能容量の変遷 容量増加達成の要因は、絶縁の合理化、けい素鋼板の改良および特殊貨車の開発による。

Increase in allowable capacity of transformers for railway transportation

100年を振り返ってみると、当社は多くの新技術・新製品を生み出し、わが国の変電設備の進歩・合理化に貢献してきた。今後も先輩の築いてきた歴史をさらに発展・継続させ、技術的パイオニアとしての地位を堅持していく所存である。



矢成 敏行 Toshiyuki Yanari, D.Eng.

1962年入社。電力用変圧器の開発・設計に従事。現在、浜川崎工場技監、工博。

Hamakawasaki Works