

■ 要旨

わが国の変圧器技術の発展過程を三つの時代に分類した。

「模倣から技術国産化まで」では変圧器の製作を開始した1893年から終戦までの期間を扱っている。当初は海外の模倣や導入技術をベースにスタートしたわが国の技術も1920年代までにはこれら技術を消化してほぼ独り立ちできるまでに成長し、1930年代には一流国の技術をキャッチアップするまでになった。

次の「海外技術からの脱却」では戦後から1970年代の中頃までを扱っている。戦後の復興期における海外との技術提携の復活と海外の新技术の積極的導入、その後の経済の急拡大による電力需要の伸びから海外とほぼ同一ペースで大容量化を達成したことを述べ、さらに高電圧化では500kV変圧器の実現に触れている。この大容量化で問題となる漏れ磁束に対する解決方法については、海外とほぼ同時期の開発のため海外技術を当てにできず独自に解決せざるを得なかった。また、高電圧化では新たに導入された部分放電試験への対応策に苦勞し、その解決に10年を要した。この解決は作業者の品質に対する問題意識の改革が決め手となったもので諸外国に先駆けて問題解決を達成した。

「独自技術による発展」では1970年代後半から現在にいたるまでを扱っている。1972年に運転を開始した500kV変圧器で冷却のために循環する絶縁油と絶縁物との摩擦静電気が発端で絶縁破壊事故に発展した流動帯電事故について触れ、その解決の過程で得た教訓がその後のわが国の独自技術による開発に大きく役立ったことを示した。具体的事例として諸外国に比べて厳しい貨車輸送限界内で達成したUHV変圧器の開発とUHV絶縁技術や世界に先駆けて開発に成功した大容量ガス絶縁変圧器の実用化が挙げられる。これらは基礎に立ち返った開発と地道な検証とによって達成されたものである。また、厳しい輸送条件と製品への高い信頼性の要求から生まれた新しい分解輸送形変圧器は従来の分割形に比べコスト面、特性面でも優れ適用拡大が期待されるものとなった。

■ Abstract

The first transformer products manufactured in Japan were made in 1893. In this paper, the processes of developing power transformers in Japan are divided into three periods.

1. From imitation to domestication of power transformer technologies: 1893-1945

Japanese power transformer technologies started by imitating foreign ones, and then were further developed on the basis of technical collaboration with foreign manufacturers in its early stage. By the 1920s the industry had assimilated those technologies and was able to stand on its own technologies. In the 1930s Japan caught up with the technologies of top-level countries.

2. Outgrowing imported technologies: 1945-1975

In the period of reconstruction after the world war, Japan revived technical collaboration on power transformer technology with foreign countries and aggressively introduced newly developed techniques acquired from these top-level countries. The Japanese economy and the demand for electric power expanded rapidly in 1960s, so an increased MVA level of transformers was achieved at almost the same time as foreign countries. In this period, 500kV transformers also were developed. Leakage flux problems are serious problems for large power transformers. Japan's makers had to solve these problems for themselves without any technical support from foreign countries because they developed large transformers at almost the same time as other countries. Additionally, they encountered problems with extra-high voltage. Japan's makers had a hard time developing a partial discharge test; this test was newly required for development of the 500kV transformer. Ten years were required to solve this problem. However, overcoming these problems lead to a change in foreign countries' attitude regarding the quality of Japanese workers.

3. Growth of domestic technologies: 1975-now

Insulation breakdown problems in 500kV transformers are caused by static electricity between insulating oil, circulated for cooling the core and coils of transformers, and their solid insulation. Lessons Japanese manufacturers learned in solving these problems produced good results that aided them in developing original transformer technologies. For example, development of the UHV transformer and its insulation technologies overcame Japan's severe limitation in railway-transport as compared with that of European countries or the USA. Another example is development ahead of the rest of the world of the practical use of large capacity gas-insulated transformers. Development of these technologies was achieved from basic research and steady testing.

■ Profile

矢成 敏行 *Toshiyuki Yanari*

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

昭和37年3月	東京大学工学部電気工学科卒業
昭和37年4月	東京芝浦電気株式会社〔現在の(株)東芝〕入社 以後40年間電力用変圧器の設計、開発に従事
昭和60年10月	UHV変圧器の長期絶縁信頼性に関する研究にて 東京大学より学位受領
平成2年4月	技監
平成13年8月	(株)東芝 定年退職
平成15年4月	国立科学博物館 主任調査員 工学博士

■ Contents

1.はじめに	51
2.わが国の変圧器技術発展の概要	52
3.模倣から技術国産化まで (戦前における変圧器技術)	56
4.海外技術からの脱却 (戦後の復興から500kV変圧器製品化)	63
5.独自技術による発展 (流動帯電の克服と新技術への挑戦)	73
6.技術の系統化	85
7.変圧器保存状況	104

1 | はじめに

発電所で起こした大容量の電気を遠く離れた消費地に届けるためには送電線の電流容量の制約から高電圧にして送り出し、消費地の近くで分配しながら電圧を下げて消費者に電気を送り届けているが、この電圧の変換に使用されているのが電力用変圧器である。多くの発電所からの電力を連携し、系統をネットワーク化するために開閉所や変電所が設けられ、消費者に停電のない信頼性の高い電気を送り届けている。現在わが国で使用されている送電電圧は最高500kVであり、それに接続される変圧器は一台で一般家庭の消費電力で100万軒分の電力を電圧変換する能力を持っている。変圧器については付録に分類整理されているように各種用途があるが、以下本報告ではこのうち常に技術的牽引役を担ってきた電力用変圧器に限定して技術の変遷と系統化作業を進めて行く。

系統化にあたっては変圧器の主要検討技術を高信頼性、大容量化、高電圧化、環境問題、付属品の五項目に分類して、それぞれの観点で時代ごとに検討を加えている。高信頼性で扱うテーマとしては試験検証、耐雷設計（以下斜体文字で示した専門用語は巻末に簡単な用語解説を行っていることを示す。）、長期信頼性、保守と寿命、流動帯電、電圧調整、耐震性および防災

性であり、大容量化では鉄心や巻線、冷却などのほかに輸送問題が大きく採り上げられる。高電圧化では巻線と絶縁問題が中心となり、それに絶縁材料、絶縁処理などが絡んでくる。環境問題としては騒音と不燃化が主要項目である。付属品として扱っているのはタップ切換装置、クーラと放熱器、コンサベータおよびブッシングである。

以下変圧器をその発展過程を3期に分類して概要を述べる。

- (1) 模倣から技術国産化まで（戦前における変圧器技術）
- (2) 海外技術からの脱却（戦後の復興から500kV変圧器製品化）
- (3) 独自技術による発展（流動帯電の克服と新技術への挑戦）

以下第2章ではわが国における変圧器の技術発展の状況を概観し、第3章から第5章では3期に分けてそれぞれの時代での技術的関心とその時代の技術発展の状況を具体的に説明する。また、第6章では技術の系統化といった観点から再度全時代を振り返って変圧器の技術的発展の経過をたどってみる。

2 わが国の変圧器技術発展の概要

2.1 模倣から技術国産化まで

(1) 黎明期の変圧器

わが国の変圧器技術は海外製品の模倣から始まっている。1893年三吉電機工場がイギリスの製品を模倣して製品化したもので、これは現在の形の変圧器が世に出てから8年後のことであった。その後1900年にはアメリカの会社に勤務していた技術者が帰国し、アメリカ流の設計で独自に油入変圧器を製作し始めている。当初は電灯用としてスタートしているが、1900年代に入ると電力用としての需要が増え、特別高圧による長距離送電も開始されて変圧器の高電圧、大容量化が求められるようになった。1910年以降素鋼板および絶縁油の適用が始まり、これら要求に応えられるようになった。

1911年からは海外との技術提携による技術を設計に取り入れ始めている。当初の変圧器は海外も含めて外鉄型が主体であったが、1918年にアメリカGE社で巻線間の油ギャップを絶縁筒で仕切ったバリヤ絶縁方式が有効なことを見出して内鉄型に変更したことを受けてわが国でも内鉄型が誕生し、その後適用の範囲を広げていった。

1920年代に入ると10MVA級大容量変圧器も製作されるようになり、1923年には154kV送電が開始された。当初はアメリカ製の変圧器が適用されたが、1926年に日本電力岐阜変電所(以下SSと略す)向け6.667MVA器で初めて国産の154kV変圧器が適用され、この変圧器の成功によってその後は殆んど国産変圧器が採用されるようになった。この時点をもってわが国の変圧器技術が一人前になったと見てよいと考える。

(2) 朝鮮半島での発展

わが国の変圧器が大いに発展したのは昭和に入って朝鮮半島に進出して電力開発を進めた時代に合致している。最初は1928年に36MVA器が納入された。この計画が成功を収めたことから1935年以降相次いで電力建設が進み、1939年には東洋初の超高压製品である220kV変圧器を、また1940年には戦前の容量記録品である水豊発電所(以下PSと略す)向け100MVAを完成するなど戦争が激しくなる1943年頃まで朝鮮半島および満州に大量の変圧器が出荷されている。

この時代は日本の変圧器が大容量化でも高電圧化に

おいても世界の一流国と肩を並べるまでに成長した時代で、朝鮮半島および満州への進出が日本の変圧器技術を大いに高めたことは否定できない。

(3) 耐雷設計とインパルス試験

この時代の最大の技術的関心事は雷サージに対する変圧器巻線の挙動の把握と耐雷巻線の開発である。雷サージに対する変圧器巻線の振舞いについての論文がドイツで発表されたのが1915年で、それ以降各国で研究が進められ、併せて耐雷巻線構造についても研究が行われた。わが国では当初海外で開発された各種耐雷巻線の採用に対しては送電系統構成が異なるためメリットが少ないと考え消極的で、その当時採用していた巻線の線路端部分の絶縁を強化する構造を踏襲していたが、1930年代に入り電位分布の調査を実施してわが国の系統であっても耐雷巻線による電位分布改善効果が期待できることを確認してからサージブリーブ巻線や部分遮へい巻線といった巻線方式が標準的に適用されるようになった。これら耐雷設計された変圧器にインパルス試験が始まったのは1930年アメリカにおいてである。わが国でも1937年に鉄道省向け154kV 18MVAで初めて適用され、耐雷設計された変圧器の設計妥当性が初めて証明された。また、インパルス試験は終戦の間際となる1945年に規格として発行された。

2.2 海外技術からの脱却

(1) 超高压変圧器の出現と海外技術の導入

戦後最初の技術的エポックは関西電力で進められた新北陸幹線による275kV送電の開始である。この系統に投入された変圧器には戦前に培ってきた技術に加え戦後に開発した新しい技術も投入されている。また、これらは1945年に発行されたインパルス試験規格の適用が規定されている点でも各社の技術力を試されるもので、当時の総力を挙げて取り組んだ製品である。

戦争で途絶えていた海外との技術提携が1952年に復活し、戦中・戦後における海外の進んだ新しい技術が入ってきた。中には文献などの情報だけから独自に調査し実用化にこぎつけたものや、提携先からの情報や工場見学によって得た情報から実用化までもっていったもの、あるいは戦時中から培ってきた自主技術で実用化までもってきたものなどがあるが、これら新しい技術が1950年代中頃から1960年代にかけて数多く投入

されていった。これらの中には現在も適用されているものが少なくない。

この中でその後の変圧器の発展に最も多くの影響を与えた技術として挙げられるのはアメリカから導入された方向性けい素鋼板の適用とその素材の特性を生かす額縁形鉄心の導入であろう。1910年以来適用されてきた熱間圧延のけい素鋼板に比べ磁化特性に優れ、僅かの励磁電流で高磁束密度を達成することができ、使用磁束密度も従来の1.3T以下から1.6T~1.7Tにアップさせることができたため変圧器の小型化に大いに貢献することができた。

(2) 発電所用変圧器の大容量化

朝鮮戦争以降わが国の経済は急速に立ち上がり、電力需要も増加したことから大容量の火力発電所が次々と建設された。発電機など主機はその1号機にアメリカ製が適用され、2号機以降技術導入により国産化するのが通例であったが、変圧器については当初から国産技術によって製作された。もちろんここに多くの海外から導入され、実用化された新技術が適用されたことはいうまでもない。

この発電所用変圧器の大容量化の進展スピードは速く1958年に200MVA、1960年300MVA、1963年430MVA、1966年680MVA、1971年870MVA、1973年1100MVAと急増した。この大容量化のスピードは海外とほぼ同一であったため、大容量化によって発生する問題の解決法については海外でもまだ開発されておらず、独自に解決することが求められた。特に日本の場合系統構成上高インピーダンスを要求されるケースが多く、この変圧器の高インピーダンス化が大容量化の問題をさらに難しくさせている。このような点で技術提携を継続しても得るところが少なくなり導入技術依存体質から次第に離れていった。

(3) 変電所用変圧器の大容量化と負荷時タップ切換装置

発電所の大容量化に合わせ変電所の変圧器容量も大容量化が求められ、さらに工場出荷から運転開始までの期間の短縮を求める電力会社の要望が強く、大容量器で一般であった分解輸送から組立貨車輸送を指向するようになった。ここでも方向性けい素鋼板適用による鉄心の大幅な小型化と輸送時の高さを低減させるのに適した三相五脚鉄心の採用および鉄道輸送限界寸法を有効に利用する特殊貨車の投入、さらには新しい耐雷巻線構造と新絶縁材料の適用による巻線占積率の向上により貨車組立輸送限界容量も急激に上昇し、1963年には戦前の貨車輸送記録39MVAに対し

300MVAを同一限界内で輸送できるまでに技術力が向上している。

また、これに併せて電力の質を向上させる目的からそれまでの配電用変圧器に加え、電力用変圧器でも負荷時タップ切換が要求されるようになってきた。この頃ドイツMR社で変圧器タンクに内蔵して取り付ける方式の負荷時タップ切換装置(以下LTCと表示)が開発され、世界の注目を集めていたところからわが国でも技術提携によりこのタイプのLTCを導入して適用することを電力会社が強く希望して実現した。このMR社タイプのLTCはその後機種の変遷はあったものの現在でも技術提携により製作されている。わが国の変圧器事業で未だにライセンスによって縛られている唯一の事例である。

(4) 輸出向け500kV変圧器と部分放電試験

変圧器の大容量化が進み、超高压変圧器技術も定着安定化した1960年代に入るとヨーロッパで実現している400kV送電に刺激され、わが国でも次期送電電圧の検討が行われ、次期電圧として500kVが決定されている。メーカーでは正式に500kVが決定したことから開発に拍車がかかり、貨車輸送を前提にしたモデル検証を行い、1966年には三浦半島武山にある超高压研究所へ実証試験用としてプロト器を製作している。さらに国内での適用の前に海外で運転実績を積む目的から、当時海外で計画のあった500kVや400kV変圧器の受注競争に参加し、各国から大量の変圧器受注に成功した。これらの変圧器仕様にはアメリカでの500kV送電運転開始直後に発生した絶縁トラブルを反映して運転電圧よりやや高い電圧で長時間部分放電発生を監視する試験が導入されていたが、この部分放電試験に対する対策は当時世界的にまったく未知の技術であり、その解決には大いに苦労し、完全な解決にはその後10年近い歳月を要した。

(5) 国内向け500kV変圧器

1970年に入ると東京電力で500kV送電の計画が本決まりとなり、変圧器の仕様決定が行われ先行検証器の製作、検証が実施された。開発にあたっては欧米に比べて厳しいわが国の鉄道輸送限界に対処するため巻線構造や絶縁構成にそれまでの輸出向け変圧器に対し多くの改善を取り入れている。仕様決定に際しては経済性もさることながら信頼性を最重要視してタップの配置や変圧器の構成および試験電圧などが決定されている。この信頼性最重要視の考え方は1980年代終わりまで続き、わが国変圧器技術の動向に大きな影響を及ぼすこととなった。

このようにして導入された500kV変圧器であるが、1972年運転前の課電試験中に絶縁破壊事故を起こし、500kVの運転開始は1年延びて1973年となった。さらに1974年にも課電試験中に絶縁破壊事故が発生し、分解調査結果と実変圧器およびモデルコイルを使用しての精力的な調査から絶縁油の流動によって絶縁物上に蓄積した静電気の放電が発端になったものであることが判明した。

2.3 独自技術による発展

(1) 流動帯電の克服

変圧器での流動帯電現象については世界的にまだ知られておらず、その原因究明はまったくの手探りであった。実規模から基礎的なモデルまで数多くのモデルを用意し、条件を変化させながらその原因となる因子の究明にあたった。2年にも及ぶ調査から静電気を発生させる因子としては油流速や油通路の形状、油の帯電のし易さをもっとも大きく影響を及ぼしている他にAC電界の大きさや絶縁物の表面状態なども関与していることが分かり、それぞれに対する対策は立てられた。この中で絶縁油の帯電のし易さについては油中の微量物質が油中溶存酸素と油中の銅イオンとにより活性化されて帯電度を大きく変化させることは確認できたものの、それ以上は現在でも不明である。混合物である石油を原料としているための難しさといえる。このトラブルを経験して変圧器設計根拠をどの程度把握しているかを見直す活動が起こり、例えば絶縁については放電現象にまでさかのぼって研究を行い、絶縁構造を決定するような新しい動きが出てきて、これがその後のわが国の技術発展に大いに寄与することとなった。

(2) UHV変圧器の開発とUHV開発技術

わが国の500kV送電網が整備されてきた1970年代後半になると次期電圧としてUHV送電が話題となり、本格的な開発が始まった。500kV変圧器と同一の輸送限界で2倍の高電圧に耐える変圧器を開発することがテーマで、前述の放電現象にまでさかのぼった研究と当時大型化・一般化した電算機を利用した解析技術の進歩さらには新しい絶縁材料の採用とにより達成の目途が得られ、1970年代末にはプロトタイプ器の製作が行われた。一方、UHV送電実現のための検討委員会も発足し、技術課題の検討が行われた。この中で従来以上に厳しい運転時ストレスに対する長期信頼性が取り上げられ、各種検証が計画的に行われた。その結果はその後わが国の試験電圧決定の根拠として採用され

ている。

しかし、その後の経済成長の変化からUHV実現は先送りとなり、メーカーは開発した技術を500kV以下の機種に反映してこれらの小形化、低損失化を図っている。また、この技術を適用して海外の765kV変圧器の受注にも成功している。

(3) ガス絶縁変圧器の開発

絶縁媒体にSF₆ガスを使用したガス絶縁変圧器の登場は早く1967年に既に第1号が誕生している。しかし、当時はまだ不燃性変圧器に対する需要も少なく、PCB変圧器との競合もあり、その後の需要はないまま過ぎていった。その後再び登場したのは1978年で、導体の絶縁に従来の紙に替えてフィルムを採用し、欠陥であったインパルス耐圧を大幅に改善したものとなっていた。ちょうどガス絶縁開閉装置(以下GISと呼ぶ)も普及しておりコンパクトな変電所が構成できることからビルの地下変電所や地下鉄用としてガス絶縁変圧器の需要が増加していった。その後巻線冷却方式の改善などにより自冷方式で30MVAまで製作されるようになり、電力会社の配電用としても採用が始められた。

ガス絶縁変圧器の大容量化についての取り組みはまずアメリカでスタートし、1980年代始めには300MVA級の開発実用化を図るとのことであったが、その後計画は中止となり、開発は途中で投げ出された。日本ではその頃から大容量化について検討が始まり、アメリカで開発が進んでいた方式を引き継ぐ格好で冷却にパーフロロカーボンという液体を使用し、絶縁にPETフィルムとSF₆を使用する変圧器の開発に各社が乗り出している。各社それぞれ異なる方式で開発を進めた結果、1989年にまず東芝が東京電力向けに154kV 200MVAを完成させた。続いて1990年には日立、東芝、三菱がそれぞれ275kVの250MVAおよび300MVA器を完成させた。これらは従来の油入変圧器とは構造がまったく異なり、解決しなければならない技術課題を数多く抱えていたが、これらを計画的にクリアし、また信頼性検証も実施して実用化にまでこぎつけたもので、流動帯電事故以来根づいてきた基礎技術開発力の成果であると考えられる。

しかし、このようにして開発した液冷却方式のガス絶縁変圧器ではあったが、従来の油入変圧器に比べると冷却のために特別な装置や高価な冷却液体が必要となることから価格が大幅にアップし、一般的に適用することは困難と考えられた。しかし、地下変電所で必要となる分路リアクトルの開発を行っていた東芝はブロック化された分路リアクトルの鉄心冷却には変圧器

で適用した冷却パネルを挿入する方式が適用できないためにガス冷却の研究を行っていたが、その過程で300MVA級の変圧器でもガス冷却の可能性を見出した。巻線内のガス流の解析技術を確立して温度分布を均一化する技術を開発し、これに既に開発済みの大容量高ガス圧ブローと高ガス圧容器および絶縁物の耐熱性アップとを組み合わせることによって開発に成功し、1994年に東京電力東新宿SSに300MVA器を納入した。冷却と絶縁にSF₆を使用したことにより変圧器のコストアップが抑えられ、変電所機器全体をガス機器化することによって生じるメリットを評価すると油入変圧器と遜色ないまでに価格差が縮まったため、その後地下変電所用として従来の油入変圧器に代わってこのガス絶縁変圧器が主役となっている。

(4) UHV実証試験器

1980年代に一旦凍結になったUHV計画が1990年代に入り、21世紀初頭に東京電力で運転を開始する、その前に1995年から2年間の実証試験を実施するという案が急浮上し、再び始動し始めた。1980年代に中断した実器製作の先行としての実規模モデル検証と変圧器の仕様決定が進められ、検証器としては将来の予定される実器と同定格のバンク容量3000MVA、電圧1050/525/147kVの変圧器が日立、東芝および三菱に一相づつ発注された。技術的には1980年代に開発済みの絶縁技術を適用して1993年に完成し、新榛名変電所で2年間の検証を行った。その過程でいくつかの新しい問題に遭遇し、この試験を行ったことに対する意義が見出された。

当初は21世紀初頭にはUHV送電が運転を開始する計画であったが、その後バブル崩壊後の電力需要の低迷から現在計画は凍結され、いつUHVが実現するか明らかではない。

(5) 輸送条件の変化と新分解輸送変圧器

500kV変圧器の出現以来、わが国では信頼性を求める電力会社の要望が強く、現地での変圧器内部作業を伴う構造は極力避けることになり、1960年代まで行われていた分解輸送はいうまでもなく、輸送用のカバーで輸送し現地で本カバーに取り替える構造も絶縁技術の進歩で中身の小型化が進んだこともあり、1970年代後半にはほとんどなくなった。一方、工場で検証した状態を維持したまま輸送し、現地で工場の品質を再現させることが求められるため、輸送条件が厳しい場合は変圧器の分割数を増やして対応するケースが増加してきた。さらに変電所や特に揚水発電所の立地条件お

よび変圧器の輸送条件は次第に悪化し、このように分割数を増やしても輸送に要する費用が大幅に増加することから何らかの手を打つ必要性が出てきた。この問題を最初に手がけたのは関西電力と三菱電機で、従来の分解輸送に対しコイルを一括でフィルムパックし、分解時および現地での再組立時の吸湿をなくす構造を採用して現地乾燥の省略を図り、さらに鉄心構造、現地組立作業条件の工場並化などに工夫を凝らして、新しい分解輸送方法を提案した。この方法はその後各社に受け入れられ、鉄心構造の工夫や防塵作業室の改善、現地試験検証の必要性と試験項目の検討、さらには現地試験設備の導入などを行って一般化し、1994年には従来単相器3台構成であった500kV 1000MVA器を三相器として構成し、輸送費の大幅低減に加え据付スペースの低減と損失の低減でもメリットを出し、その後の適用拡大に弾みをつけた。今後貨車輸送の可否に関わらず、さらに適用の拡大が考えられる。

3 模倣から技術国産化まで (戦前における変圧器技術)⁽¹⁾

3.1 黎明期の変圧器

(1) 模倣時代

変圧器がわが国に初めて登場したのは1889年大阪電灯が125Hz 1000Vで500灯用の30kVAの発電機をアメリカから輸入し、交流配電の運転を開始したときからで、変圧器はイギリス製が輸入されている。

変圧器は1831年にFaradayが電磁誘導現象を確認したことに始まる。しかし、基本的に現在の変圧器と同じ閉磁路鉄心を使用した構造は1885年にハンガリーのGanz Electric Works社の技術者によって発明され、その年ブタベストで開催された博覧会に展示され、照明電源として使用されて大成功を収めたことに始まるとされている⁽²⁾。この発明は交流電力系統拡大のスタートとなり、その後の大容量・高電圧送電システム形成の基となった。写真3.1にFaradayの電磁誘導実験のモデルを、写真3.2にブタベスト博覧会に展示された最初の変圧器を示す。



写真3.1 Faradayの電磁誘導線輪モデル (1831)

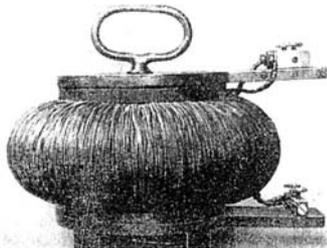


写真3.2 Ganz社のブタベスト博覧会に展示された外鉄型変圧器 (1885)

国産初の変圧器は1883年に三吉正一が創立した三吉電機工場がイギリス製の変圧器を模して1893年に製作したものと伝えられるが、三吉電機は1898年に閉鎖されたため詳細な記録は現在では明らかでない。東芝の前身の芝浦製作所でも翌1894年からイギリスのFerranti社の製品を真似て単相0.375~10kVA、三相1~30kVAの1000Vまたは2000Vから100Vへ降圧する変圧器の製作を開始している。1895年に京都で開催された第4回内国勸業博覧会にその製品を出品

している。この変圧器は気冷式で細長い形状をしていたため石塔型と呼ばれていたが、現在では写真も残ってなくその形状を確認することはできない。当時のFerranti社の製品写真を写真3.3に示す⁽³⁾。続いて1897年には明電舎も変圧器の製作を始めているが、容量は10燭光50~100灯用としている。

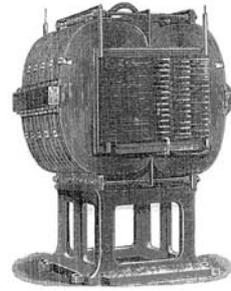


写真3.3 Ferranti社のLondon変電所に納入された150馬力外鉄型変圧器 (1891)

(2) 油入り変圧器のスタート

このような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アメリカのワグネル変圧器会社に勤務していた飯島善太郎が帰国し、芝浦製作所に入社してからで、アメリカ式の油入変圧器を独自設計で導入したときに始まる。飯島は配電用だけでなく試験用や特別高圧用変圧器の設計製作にも進出し、1903年には50kV 4kVAの試験用変圧器(写真3.4に示す)を製作



写真3.4 1904年万国博覧会に出品した芝浦製50kV試験用変圧器

し、翌年セントルイスで開催された万国博覧会に出品して金牌を獲得して日本電機工業界のために気をはいている。また、1905年には11kV 150kVAの最初の特別高圧変圧器を甲府電力向けとして製作している。なお、日本における特別高圧の導入は1899年であり、これら変圧器にはアメリカ製が使用されている。図3.1に国産変圧器の大容量化と高電圧化の推移を示す。1906年には22kV 250kVAの変圧器が製作され、1907年には東京電灯で駒橋発電所から早稲田までの初の長距離47マイ

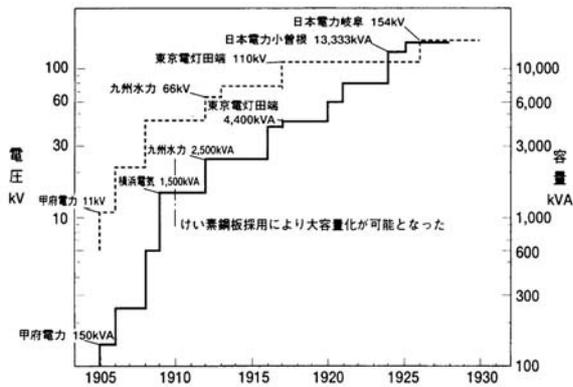


図3.1 初期における変圧器の大容量化と高電圧化の推移

ル55kV 15MW送電が開始されたが、これにはアメリカGE社製の2000kVA変圧器が使用された。1908年芝浦製作所は44kV 500kVA変圧器を箱根水力電気に納めている。1909年に芝浦製作所が横浜電気保土ヶ谷変電所に納めた外鉄型水冷式単相44kV 1500kVA変圧器は当時としては純国産の画期的製品で真空乾燥が初めて適用されている⁽⁴⁾。電気学会での特別講演が行われ、その時の記録によると1910年までの特別高圧製品は30kV級が34台15350kVA、20kV級75台7815kVA、10kV級19台417kVAの製作実績があるとの報告がされている。また、1907年における芝浦製作所の完成変圧器台数は当時の試験台帳に基づいて筆者が調査したところでは、ほとんどが配電用であるが3800台となっていたとの調査結果があり、既にながりの製作能力を持っていたことが伺える。

また、1908年には日立製作所が、1910年には三菱電機が変圧器の製作を開始したことにより、わが国の変圧器の国産化が大きく進展を始めた。写真3.5は1910年製信濃電気向け岸特許水蒸気冷却式油入自冷式単相



写真3.5 現存する最古の特別高圧変圧器（信濃電気 13.2kV 100kVA 1910年 芝浦製）

60Hz 100kVA 12/13.2kV-3.3kVの特別高圧変圧器で現存する最古と考えられる変圧器である。この変圧器はタンクに水滴を注ぎ掛け、それが気化するときの気化熱によって多量の放熱を図るもので、放熱器がまだ実用化されていなかったこの時代の大容量化にあたっての新しい試みである。なお、この当時は鉄心材料としてまだ薄板軟鋼板が使用されていた時代の貴重な資料

である。また、写真3.6に日立製作所が日立鉱山に同じ1910年に納入した創業当初の製品でその後50年間にわたって使用されてきた変圧器を示す。



写真3.6 日立鉱山向け5kVA変圧器（1910年 日立製）

(3) 変圧器メーカー体制の整備

1909年には芝浦製作所がアメリカGE社と技術提携を結び1911年から設計に取り入れ始めた。1910年にはイギリスからけい素鋼板が輸入され、まず柱上変圧器に試適用されていたが、1911年からはアメリカアレガニー社製のけい素鋼板とVacuum oil社から変圧器油を輸入し3300V以上には油入を適用、2200V以下には乾式を、また500kVA以上には外鉄型を適用することとなった。

1911年には日立も単相水冷式1500kVAを完成させている。1912年には九州水力向けに66kV 2500kVAを、1916年には22kV 4000kVAを、1917年には110kV 4400kVAを猪苗代水力および東京電灯田端変電所向けとして芝浦が製作している。さらに1920年には単相66kV 6000kVAが出現し、翌1921年に三相66kV 8000kVAが現れて関東大震災までの記録となった。いずれにしてもこの当時の製品は大容量化、高電圧化の最初にはまず輸入品それもアメリカ製が使用され、それに遅れること2～6年で国産品が採用されていた。

これまでの大容量変圧器は前述したように外鉄型で製作されていたが、1919年GE社の方針転換を受け、芝浦でも、まず中容量変圧器に内鉄型を採用し、順次適用を拡大していった。

1923年三菱もアメリカWH社と技術提携を開始、1925年には富士電機がドイツシーメンス社と技術提携して変圧器の製作を開始して日本における変圧器メーカーの体制が確立した。

(4) 揺籃期のまとめ

変圧器の揺籃期として関東大震災までの期間を捕らえてみた。当初の変圧器は海外から輸入された製品の模倣から始まり、次いでアメリカで身につけた技術を生かして独自技術で特別高圧油入変圧器を生産するまでに育てた。工業生産が軌道に乗ったけい素鋼板や絶縁油が輸入されるようになった1910年代に入ると電力使用量の増加

もあり変圧器の大容量化、高電圧化が進んだ。この時期に変圧器メーカー数も増え、海外との技術提携も始まっている。当初は記録品となる製品は海外からの輸入が一般であり、導入から2～6年で国産品の適用に踏み切るといった状況であった。また、この時代にそれまでの外鉄型に加え内鉄型の技術も導入され、次第にその範囲を拡大して主役へと取って代る時代でもあった。すなわちこの時代は変圧器の導入からやっとな変圧器の製造体制が整って独り立ちを始めた時期と捕らえることができる。

3.2 技術の国産化

(1) 154kV変圧器の完成

最初に10MVAを超過した大容量器の製作は1924年に製作された日本電力小曾根SS向け単相水冷式77kV 13.333MVA器で、続いて翌年東邦電力向けに80kV 15MVAを完成している。日本の154kV送電は京浜電力龍島PSから戸塚SS間で1923年に開始されたが、国産の154kV変圧器は1926年完成の日本電力岐阜SS向け単相6.667MVAが最初となる(芝浦製)。この変圧器については宮本茂業の著書「変圧器の進歩」^①の序文に元電気学会会長の百田貞次が「この変圧器こそは150kV級最初の内地製品で其の運転成績極めて良好であったため、其の後需要旺盛を極めたる昭和時代の150kV級変圧器は殆んど内地製品に限られ、外国製品は僅かに一、二に過ぎなかった事に想到すれば、これが本邦変圧器史上に遺した功績は頗る偉大であったと言ってよいと思う」と回想している。引き続いて柳河原PS 10MVA 7台、小牧PS 13.333MVA 7台を完成している。写真3.7に昭和電力笹津SS向け165kV 12.5MVA変圧器を示すが、これは当時の最高タップ電圧の製品である。

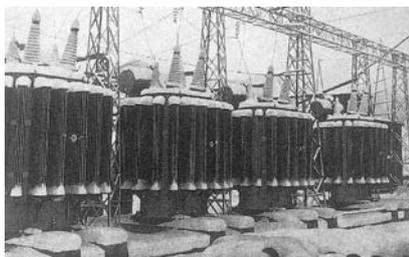


写真3.7 昭和電力笹津SS向け165kV 12.5MVA (1928年 日立製)

それまでの10MVA級変圧器は分解輸送を行い、現地で組立、再乾燥を実施しているが、1926年に製作された大同電力新淀川PS向け77kV 10MVAは組み立てたまま油漬けで海上輸送された。当時このような重量物輸送は初めてであったが、その後の組立輸送の先駆けとなった。写真3.8に外形を示す。

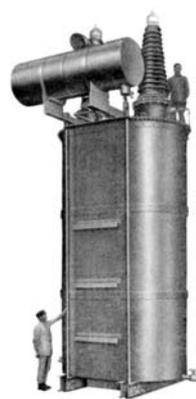


写真3.8 組立輸送された大同電力新淀川PS向け10MVA水冷式変圧器 (1926年 芝浦製)

(2) 冷却方式

この頃の大容量変圧器の冷却方式は水冷式といってタンク内面上部に水配管を取り付け、水を流して油を直接冷却する方式が主流であったが、冷却に関する設計技術の進歩と1920年代中頃には大形の放熱器の製造技術が進歩し、油が放熱器内で冷却され自然循環する自冷式の適用範囲が拡大している。放熱器は1916年にアメリカのStanleyによって考案され、実用化したもので、この頃になって薄鉄板に対する溶接技術が進歩し溶接部からの油漏れが少なくなり適用が一般化したものである。1927年には宇治川電気に自冷式の記録である10MVAが納入され、翌1928年には昭和電力八尾SSに単相22MVA 140kV-87kV-11kVの三巻線変圧器9台が納入された(芝浦製)。これは当時のアメリカの記録を凌ぐ世界的容量記録品であった。

(3) 絶縁材料

当時の絶縁材料としては、送電電圧の上昇に伴い世界的に改良が加えられており、例えば巻線導体の絶縁には当初は綿糸が使用されていたが、1915年頃からマニラ紙によるテープ巻が用いられ始めた。また、1910年頃から紙をレジンで固めた積層絶縁筒が使用され始め、絶縁筒を油道を介して同心的に配置するバリヤ絶縁構造が絶縁的に有効である事が分かり、GE社では1918年にそれまでの外鉄型から内鉄型に切り替えている。これを受けて芝浦でも内鉄型を採用した事は前述のとおりである。また、1928年にはコイル端部の絶縁強化にフランジカラーと称するL形絶縁物を採用し始めている。

3.3 朝鮮半島での発展と変圧器の隆盛

(1) 朝鮮半島における水力発電の開発計画

朝鮮半島における水力発電の開発計画は日本窒素肥

料によって計画されたもので、鴨緑江水域の流域変更によって莫大な水量と高落差を得ようとするものであった。その最初が赴戦江30万kWの開発で、その第一発電所には三相水冷式115kV 36MVA器が採用され、1928年に納入された(芝浦製)。これは当時の水冷式の世界記録を上回る画期的な製品であった。この製品は工場での組立時クレーンリフトがとれないため、ピット内に置いた底タンク上で中身を組み立て、その上から輪切りにしたタンクをかぶせる工法を採るといふ工夫をこらしている。

この赴戦江での発電計画が予期以上の成功を収めたことから続いて長津江の開発が計画され、1935年第一発電所に三相水冷式110kV 40MVA変圧器7台、1936年には第二発電所に三相水冷式110kV 45MVA 3台、1937年にも三相水冷式154kV 60MVA器3台が納入された。続いて虚川江では東洋で初めての超高压220kV送電が採用された。1939年に完成した虚川江第一発電所には三相水冷式220kV 80MVAが芝浦から納入されたが、これは総質量225トンにも及ぶもので水冷式としては世界最大容量であった。写真3.9に初の220kV変圧器の外形写真を示

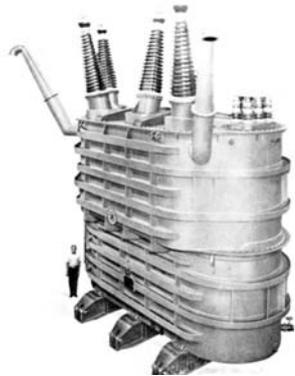


写真3.9 虚川江向けわが国初の220kV 80MVA変圧器 (1939年 芝浦製)

す。このほかに第二発電所に水冷式40MVA、受電端変電所向けとして東興南に三相水冷式80MVA、龍興に三相送油水冷式80MVA、清津に三相油入風冷式80MVAが設置された。この清津向けは日本で初の別置形放熱器を採用している。なお、この220kV送電線は日本における初めての超高压系であったので、その試験には多くの専門家が立ち会い、消弧試験などが行われたが、変圧器としての新しい試みは絶縁耐力試験に従来行われて来た加圧試験に代わり誘導耐圧試験が採用されていることである。

続いて鴨緑江本流の開発にかかり、まず着手された水豊発電所は世界最大容量の100MVA 7台設置(予備1台)という雄大なもので、発電機の一部はドイツに発注されたが変圧器はすべて国産で供給することになった(東芝製)。この100MVA変圧器は50Hz器の他50Hz/60Hz共用器も含まれ、15/230kV三相送油水冷式でドイツに対して9年の遅れがあるものの当時の最大容量で、1940~41年に完

成した⁽⁵⁾(写真3.10)。コイル高さが3.5mに及び、これに使用する絶縁筒には内国産では寸法がならず、王子製紙樺太工場に特注した絶縁紙が使用されている。またこの製作

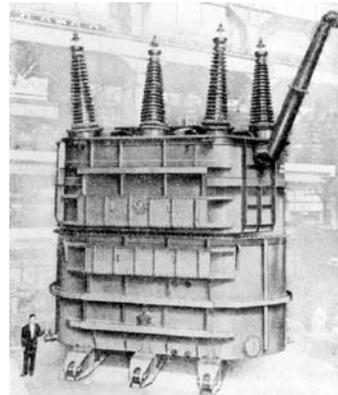


写真3.10 世界最大容量に並ぶ鴨緑江水豊PS向け230kV 100MVA水冷式変圧器 (1940年 東芝製)

のため工場の製造設備や試験設備などの改修、増設が行われている。この他、受電端の3変電所には三相送油風冷式、220kV-66kV 100MVA器が6台設置されているが、これらはフィン付ユニットクーラ方式のわが国初製品である(写真3.11)。昭和初期の朝鮮半島における変圧器容量の発展を図3.2に示す。

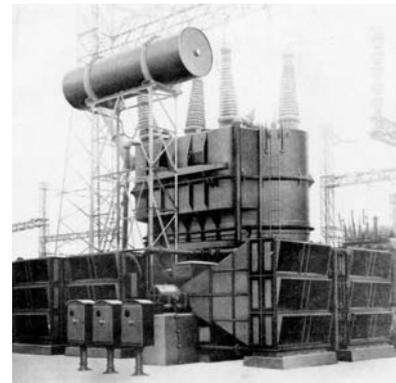


写真3.11 送油風冷式220kV 100MVA変圧器 (1941年 東芝製)

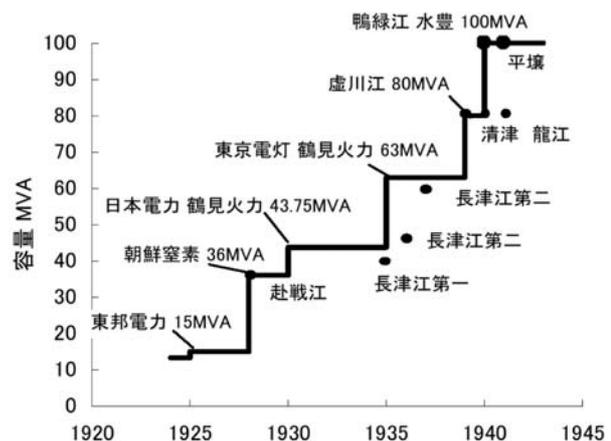


図3.2 昭和初期における変圧器容量の推移

(2) 冷却の進歩

一方、国内に目を転じてみると1924年に日本電力小曾根SS向けに初めて10MVAを超過したのに続いて、1928年には自冷変圧器として記録的な22MVAを昭和電力八尾SS向けに完成した。1930年の日本電力鶴見火力PS向け72kV 43.75MVAは送油ポンプを使用して油を循環する方式を採用し、冷却器には特殊合金を使用して海水を冷却用として使用している。1935年には東京電灯鶴見火力第一PSに66kV 63MVAを、1938年には東京電灯和田堀SS向け154kV 50MVAを完成している。この変圧器は送油風冷式としてのわが国の記録品で、鋼管をソレノイド状に巻き、その中央に堅型送風機を配置した特殊冷却器を適用している(写真3.12)。送油風冷式は主にヨーロッパで発達した冷却方式で、わが国では1926年に関西配電向け80kV 12.5MVAに採用されたのが最初である。

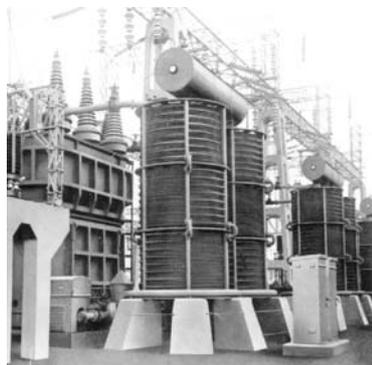


写真3.12 初期の送油風冷式変圧器
(東京電灯和田堀SS154kV 50MVA 1938年 芝浦製)

(3) 耐雷設計

戦前における変圧器の重要な技術的検討項目は変圧器巻線に雷サージが侵入したときの電位振動解析と耐雷巻線の開発およびインパルス試験がある。雷サージの挙動については1915年ドイツのWagnerがE.u.M誌に「巻線間静電容量を持つコイルにおける進行波の侵入」という論文を発表し変圧器巻線内部電位振動に関する基本的考え方を提示した⁽⁶⁾。これを受けて1915年から1920年にかけてアメリカ、ドイツおよび日本における研究から変圧器巻線が分布定数回路とみなされることが確立された。この間、わが国では大学を中心に多くの成果が発表されている。耐雷巻線構造については1921年京都大学の鳥養利三郎がイギリスのJ.I.E.E誌に「変圧器における異常電圧上昇とその防護」という題で巻線振動を軽減する具体的設計を初めて提唱している⁽⁷⁾。これは対地静電容量と直列容量とを均等に分布させず、対地容量は接地面からの距離に逆比例し、直列容量は距離に比例するように調整することにより

当初分布を最終分布に一致させ、振動の防止および電位傾度の改良を図ったものである。この理論はすぐには変圧器に応用されることはなかったが、1929年にGE社が非共振変圧器として発表し注目を浴びるようになった。この当時世界では各種の耐雷構造が提案されたが、日本では中性点が直接接地されておらず高抵抗接地のため非共振変圧器に代表されるような巻線構造は採用されず、当初は1920年頃から採用されていた巻線の線路端部のみ絶縁強化する策などを踏襲する対応が一般に採られていた。しかし、その後次第にサージブルーフ巻線、部分遮へい巻線、多重円筒巻線などが採用されるようになった。

(4) インパルス試験

一方、1926年アメリカ ペンシルベニアで220kV系統の線路絶縁強化を契機に絶縁協調議論が起こった。この論争で変圧器が協調ギャップよりも衝撃電圧に強いことを証明する必要性から1930年にGE社で初めてインパルス試験が実施された。これを機に標準化の委員会がアメリカで発足し、1933年に最初の案が提案された。一方、日本では1936年に衝撃電圧試験に関する調査委員会が発足し、1937年に案を本委員会に提出している。他方、鉄道省では建設中の千手発電所と武蔵境変電所の変圧器に「本器の衝撃波に対する絶縁はコーディネーションギャップ、套管、巻線の順にその耐力を高むるものとす」との記載が購入仕様書に記載され、これを確かめるために衝撃電圧試験の実施が求められた。1937年に武蔵境SS向け単相18MVA 154kV(芝浦製)でわが国初のインパルス試験が実施された⁽⁸⁾。外形写真を写真3.13に、中身写真を写真3.14に、また当時のインパルス電圧発生器を写真3.15に示す。また、翌1938年に千手PS向け31MVAでも試験が実施された。これらの変圧器は前記の線路端部分の絶縁強化を行った当時の標準設計であっ



写真3.13 初めてのインパルス試験を実施した鉄道省
武蔵境SS向け154kV 18MVA (1937年 芝浦製)

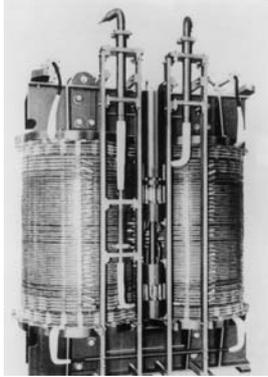


写真3.14 武蔵境 18MVA 中身写真

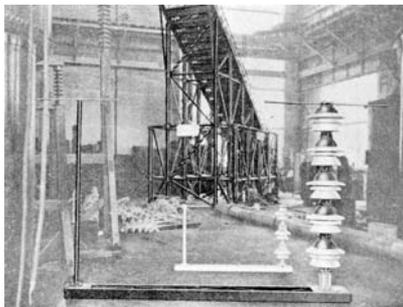


写真3.15 初期のインパルス電圧発生器

たが、タップ切換器操作木棒の一部材質不良により問題が発生したものの、試験に合格し、当時の耐雷絶縁設計構造が妥当であったことを証明した。その後1940年には満州向け230kV変圧器に超高压として初めてのインパルス試験が実施されている。

しかし、この頃日本でも耐雷巻線構造採用の動きが出て来た。三菱では1933年に電位分布測定を実施して1932年にWH社が開発したサージプルーフ巻線を台湾電力向け165kV 7.5MVAに早速適用している。また、芝浦でもGE社が1934年に非共振変圧器のようにコイル全面に大げさなシールドを配置しないでも、線路端部分に部分的にシールドを施すだけで十分な効果が得られるとして開発した部分遮へい(リブシールド)巻線の効果を電位分布測定で確認し、1939年東京電灯信濃川PS向け154kV 39MVAに適用し、以後その適用を一般化している。また日立でも1941年に試作器により部分遮へい巻線の効果を確認している。

また、芝浦ではドイツのAEGで1937年に開発された非振動巻線(多重円筒巻線)にも注目し、中性点が接地される試験用変圧器や消弧リアクトル巻線として1940年から独自開発により適用している。ただし、電力変圧器用として適用されるのは戦後のことである。

(5) 変圧器の規程

1940年に変圧器衝撃電圧試験規程の草案を発表、1944年の改定案を経て1945年にJEC-110として発行された。また、1944年にはJEC-106の衝撃電圧試験、JEC-107衝撃電圧測定法を発行している。

なお、変圧器の規程の経過について触れると、まず1922年に電気機器標準規程として回転機を含めた電気機器全体のJEC-9が制定され、その後変圧器単独として1934年にJEC-36変圧器、誘導電圧調整器及びリアクトル標準規程が制定されている。戦時中には戦時規格としてJEC-36Zが発行され温度上昇限度を緩めている。なお、標準変圧器については日本標準規格JES31が1926年に発行されている。また、絶縁油についての日本標準規格JESも1941年に発行された。先のJEC-110はJEC-36にインパルス試験を型式試験として追加する形で規定したものである。

(6) 組立鉄道輸送

日本における変圧器組立輸送はヨーロッパに比べ大きく遅れている。前述した朝鮮における記録品を始め当時の大容量器のほとんどは分解して輸送され、現地において再度組立や乾燥が行われていたため、現地工事に多くの時間を要した。しかし現地再組立の時間を縮めるために日本においても組立輸送が志向されるようになってきた。前に触れたように1926年大同電力新淀川PS向け10MVAで大容量器として初めて油漬けで組立海上輸送が行われた。1928年には東邦電力名嶋SS向け単相7.5MVAで油漬け鉄道輸送が行われ、1932年には東邦電力木津および岩倉SS向け単相77kV 22MVAで低床車を使用して油漬け鉄道輸送を行っている。しかしこの時は高さを制限内に抑えるため鉄心の上部ヨークの半分を取り外し、現地で油漬けのままヨークを継ぎ足す作業を行うといった苦しい方法が採られていた。1935年には朝鮮送電平壤SS向け154kV 15MVAで油を窒素に置換して輸送質量を減らす方法が初めて採られている。また、変圧器の鉄道輸送に特殊貨車が登場したのは1936年のことで、落とし込み式のシキ60が製作された。写真3.16にシキ60を使用しての貨車輸送状況を示す。この貨車を使用して1939年に東京電灯信濃川PS向け154kV 39MVA変圧器を輸送用仮タンクを使用して窒素ガス封入で鉄道輸送している。これが戦前の鉄道輸送の記録である。

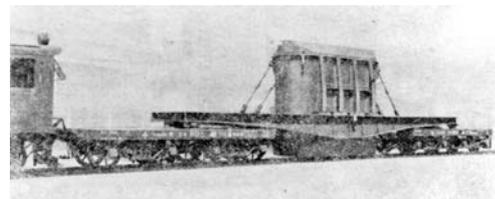


写真3.16 特殊貨車シキ60による組立輸送

(7) 負荷時電圧調整変圧器

この時代に発展したもう一つの技術として負荷時

電圧調整変圧器がある。負荷時タップ切換装置は1920年代の中頃、アメリカで次のタップへの切換時タップ間をブリッジしたときに流れる横流抑制のために限流リアクトルを使用する方法がまず開発され、続いてドイツにおいて抵抗で抑制する方法が開発されている。日本ではアメリカのリアクトル方式を使用した方法が各社で採用され、1930年に中国合同電気(芝浦製)450kVAに最初に適用された⁽⁹⁾。その後一二年の間に急激な進歩を遂げ、翌1931年には熊本電気向けに110kV 12MVAが設置された。写真3.17に当時の負荷時電圧調整変圧器として京都電灯中

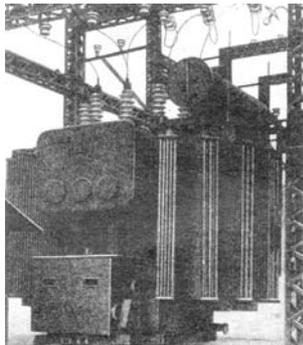


写真3.17 京都電灯中舞鶴SS向け負荷時電圧調整変圧器 (1932年 日立製)

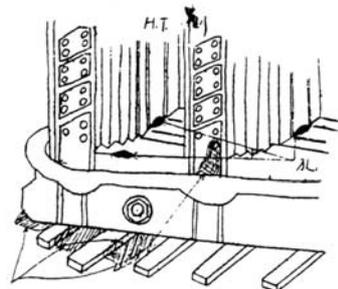
舞鶴SS向け三相6.3MVA器を示す。さらに1933年には初の電圧位相調整器が関西共同火力尼崎PSに電力潮流の制御を目的とし設置された。調整容量は9MVAで線路容量は88.5MVAとなっている。ドイツの抵抗方式は1935年富士が導入し、日本窒素肥料向け11kV 3MVA電気炉用負荷時タップ切換変圧器に適用している。

(8) 昭和初期のまとめと鉄心溶損事故

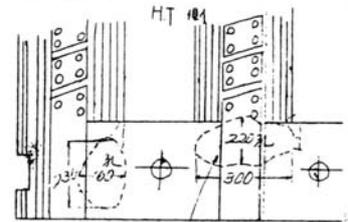
昭和に入って日本の変圧器も独り立ちを始めた。その端緒となったのが日本電力岐阜変電所に収められた154kV変圧器である。この変圧器はアメリカ製既設器と特性を合わせながら低圧電圧を77/11kVの切換可能として製作する当時としては難しい設計であり、導入技術に依存していたと考えられるものの、個々の設計ではそれら技術を十分に使いこなしていたと考えてよい。この変圧器の運転実績が良好なことからその後に増加した154kV器はほとんどに国産器が採用されることになり、その後の朝鮮半島での躍進の原点となっていると考える。

朝鮮半島および満州での変圧器大躍進の陰で忘れてならないのは鉄心溶損事故である。日本国内に比べて鉄道輸送限界は楽ではあったが、大容量化は組立輸送の範囲をはるかに超えており、分解輸送が一般的であった。当時の鉄心は90度の交互接合を使用しており、工場および現地における製造の品質管理は現在とは比べるべくもないが、作業時の鉄心への損傷や現地乾燥の不

十分さ、さらに当時の鉄心絶縁皮膜の不完全さなどが原因して、大容量化のため1ターン形成時におけるループ起電力の増加も加わり大きな循環電流が流れ、鉄心溶損が進んだと考えられるが、朝鮮に納入された大容量変圧器で1938年以来火災事故も含め数件の鉄心溶損事故が発生した。これは大容量化のスピードに変圧器設計・製造技術が追いついていけなかったものと解釈している。図3.3に当時の鉄心溶損状況のスケッチと写真3.18



鉛溶鉄は厚2"クロスバーと同じ高さにて此部分に流出す



此の部の体積約8,000cm³

図3.3 鉄心溶損状況図

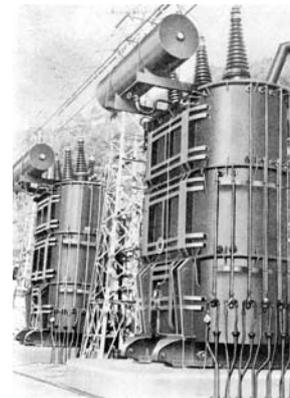


写真3.18 鉄心溶損事故を起こした長津江60MVA (1938年 芝浦製)

に溶損事故を起こした60MVA変圧器の外形写真を示す。

この時代のもう一つの流れが耐雷設計とインパルス試験である。日本では系統構成の違いから均等絶縁が一般的で、当初は欧米で発達した耐雷巻線構造をそのまま適用することができなかったものの、その効果を確認して次第に採り入れていった。また、インパルス試験についても先進国のアメリカの動向を注視しながら規格化の準備を進め、第二次大戦中に規格として発行にまでこぎつけ、戦後の再出発のベースを築くことができたと考えられる。

4 海外技術からの脱却 (戦後の復興から500kV変圧器製品化)

4.1 戦後の復興と超高圧変圧器の実現

1930年代末から1940年代を通し、国内では新規大容量変圧器の注文は途絶えており、僅かに戦災にあった変圧器の修理復旧が主な注文であった。とはいうものの1948年頃から新たな注文もぼつぼつ出始めた。1949年に完成した日本発送電小曾根SS向け22MVAはJEC-110が発行されて最初にインパルス試験を実施した製品である。耐雷巻線構造としては新たに標準とした部分遮へい巻線を適用している。

1950年代に入ると朝鮮戦争の特需も発生して景気が急速に回復し、電力の需要も増加してきた。こういった中で戦後の最初のエポックは1952年に運転を開始した関西電力新北陸幹線用の275kV変圧器である⁽¹⁰⁾。わが国初の超高圧変圧器であり、また、インパルス試験も新規格により規定されている。主要4社が製作を担当したが、日立は成出PS向け70MVA⁽¹¹⁾を、三菱は枚方SS向け99MVA⁽¹²⁾を、東芝は新愛本SS向け99MVA⁽¹³⁾を、富士は椿原PS向け45MVA⁽¹⁴⁾を担当した。

これらには戦前から蓄積された技術に新しい技術も加えられ、各種の工夫がなされている。

日立が製作した成出向け70MVA(写真4.1)は一次巻

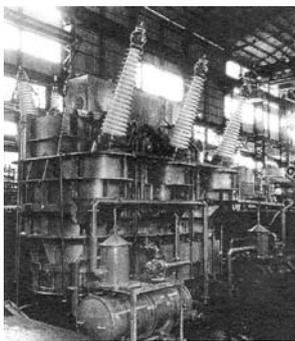


写真4.1 わが国初の275kV変圧器 関西電力成出PS (1951年 日立製)

線が154kV 50MVA、二次巻線275kV 70MVA、三次が11kV 40MVAで超高圧の中性点は直接接地されている。このため超高圧巻線は線路端を巻線高さ中央に配置して線路端の絶縁を容易にしている。中圧に154kVが配置される構造はわが国では初めてで、高圧巻線と共に1940年代に開発済みであった部分遮へい巻線を適用している。

三菱の枚方向け99MVA(写真4.2)は一次巻線250kV 90MVA、二次が77kV 99MVA、三次が10.5kV 45MVAで、等価容量で評価すると117MVAとなり過

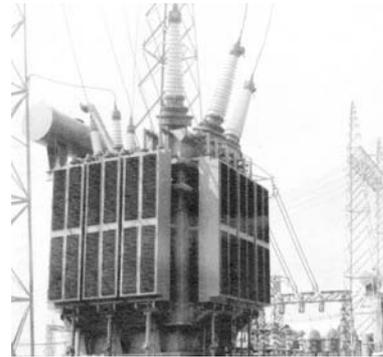


写真4.2 わが国初の275kV変圧器 関西電力枚方SS (1951年 三菱製)

去最大容量である。一次中性点は直接接地されている。一次巻線には外鉄型の標準巻線方式となっていたサージブルーフ巻線が適用されている。また、タンクにはフォームフィット形が新しく適用された。三菱ではこのほかに丸山PS向け72.5MVAも製作している。

東芝の新愛本向けは一次275kV 90MVA、二次166kV 99MVA、三次が11kV 45MVAで枚方同様に過去最大容量器である。一次巻線中性点が直接接地であることから戦前にGEで開発された非共振変圧器構造を初めて適用している。これは中圧巻線が166kVと高いため高圧巻線として欧米でその頃適用が盛んであった多重円筒巻線の適用が困難であったことも理由となっている。非共振巻線のスタックシールドにはGE方式とは異なる工夫がこらされ、コイルとは別に絶縁筒上にソリッド絶縁の静電コンデンサ型の電極を作ってコイルに接続する方式を採用し、コイルが大型化するのを防止している。また、中圧巻線には154kV巻線として標準となっていた部分遮へい巻線が適用されている。図4.1に巻線構造図を示す。

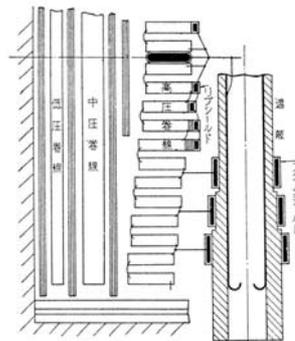


図4.1 非共振変圧器巻線構造図

富士の椿原PS向け45MVAも新構造が適用されている。この場合は発電所向けで高圧巻線は低電圧巻線と対向することから、ドイツAEGで開発された無振動巻線(多重円筒巻線)を適用している。中性点は直接接地

であり、高圧巻線の中性点側と低圧巻線が対向するため高低圧間の主ギャップを小さくすることが可能で、これにヨーロッパで戦後適用が報告されていた主ギャップ充填絶縁構造も初めて適用して、より主ギャップ寸法を小さくし、変圧器の低インピーダンス仕様によく適合させている。

これら変圧器は輸送制約からいずれも分解輸送され、現地で再組立・再乾燥されている。東芝では現地組立のために鉄心起立装置を新しく開発し適用している。現地組立における中身吊り上げ設備を極力減らすことを目的としたもので、下部タンク上で鉄心を組み立てて起立させることにより現地クレーン容量は25tonのもので作業可能となった。また、三菱はフォームフィットタンク構造に対応した乾燥方法として誘導加熱によるタンク加熱と熱風を併用する新しい方法を開発適用している。

4.2 技術提携の復活と技術の固有化

戦争で途絶えていた海外メーカーとの技術提携が1952年に復活し、戦中・戦後における海外の進んだ新しい技術がもたらされるようになった。ただその中には文献などの情報だけから独自に調査し実用化にこぎつけたものや、提携先からの情報や工場見学によって得た情報から実用化まで持っていったもの、あるいは戦時中から培ってきた自主技術で実用化したものもあり、1950年代から60年代かけて新技術が一気に投入されることになった。その例をいくつか紹介すると、導入技術としては気相乾燥法や額縁形鉄心、コイル強制冷却、転位電線など現在でも適用されている多くの技術が含まれる。また、1950年にイギリスで開発されたハイセルキャップ巻線は情報をベースに1951年には独自に調査して固有化を図っている。ヨーロッパで適用されていた主ギャップ充填絶縁構造も情報をベースに開発を進め、1951年に実適用を行っており、前述の初の275kV変圧器にも適用された。また、電位振動の解明を行ったり、素線導体絶縁紙の耐インパルス特性がハイセルキャップ巻線のキーポイントであることを知り、現在の高気密度素線絶縁紙を開発したり、制振遮へい巻線のようにわが国の自主技術で開発された耐雷巻線も生まれるなど、日本の変圧器技術力はかなりのレベルに達していた。制振遮へい巻線からその後改良されたコンデンサカップリングシールド巻線は変圧器の先進地域であったイギリスのメーカーに技術供与もされている。また、上述の転位電線も情報をベースに1957年に転位より線機の設備化を実施し、その後の適

用拡大に大いに貢献した。

戦後海外から入ってきた技術で最も大きな変化を与えたのは1935年アメリカArmco社が開発した方向性けい素鋼板の導入であろう。最初に方向性けい素鋼板が適用されたのは1955年のことで、Armco社からの輸入品が使われていた。しかしこの時の鉄心構造は従来の直角接合をそのまま適用していたので方向性けい素鋼板の特性を生かしていたとはいえない。額縁形鉄心を使用して方向性けい素鋼板の特性を生かすようになったのは1956年東京電力吉祥寺SS向け6MVA以降である。1958年に八幡製鉄がArmco社から技術導入して本格的に生産を始めてからその使用が増加している。しかし、従来の熱間圧延T級材のけい素鋼板から冷間圧延の方向性けい素鋼板G級材を使った額縁形鉄心への完全な移行は国産のけい素鋼板の出回った1962年頃のことである。使用磁束密度も当初はT級材とあまり変わらない1.3T程度であったが、1962年頃から1.6~1.7Tに引き上げられ、鉄心の大幅な小型化が進むこととなり変圧器の大容量化に大きく寄与することとなった。

4.3 変圧器の大容量化と組立輸送の一般化

(1) 変電所用変圧器の大容量化と組立輸送

1950年代に入ると電力需要の増加に合わせて、一次変電所変圧器容量は30~60MVAと大容量化され、さらにこれら大容量変圧器の現地据付工事を早くかつ容易に行うため、特殊貨車を使用しての組立輸送が一般化してきた。また、そのための工夫も現れた。

まず外鉄型でフォームフィットタンクの適用が1951年から始まり、九州電力築上PS向け45MVAではシキ100を使用してタンク横倒し組立輸送が行われた。翌1952年にはシキ120低床車を製作し、築上65MVAを同様に横倒し輸送を行っている。また、東京電力東千葉SS向け39MVAではフォームフィットタンクで横倒し輸送を行っている。1954年にはわが国で初めてのシキ140吊り掛け式貨車を使用して東京電力京北SS向け66MVA器の輸送を行った(写真4.3)。また、1955年に

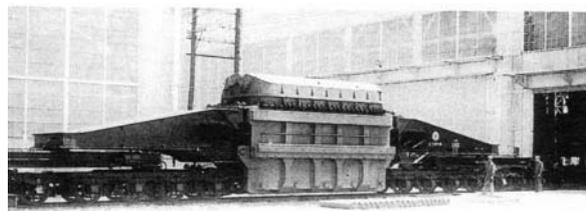


写真4.3 吊り掛け式貨車シキ140による東京電力京北SS向け66MVA (1954年 日立製)

は特別三相方式が開発され、電源開発佐久間PS向け275kV 93MVAに適用された(写真4.4)。また、この



写真4.4 初の特別三相変圧器 電源開発佐久間PS向け 93MVA (1955年 三菱製)

年には三相五脚鉄心が中部電力東名古屋SS向け 99MVAに適用され、吊り掛け式貨車シキ170により組立貨車輸送された。その中身写真を写真4.5に示す。

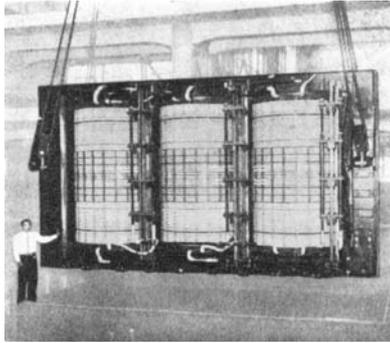


写真4.5 五脚鉄心を初めて採用した中部電力東名古屋SS向け 99MVA (1955年 東芝製)

また、1957～1959年には大形の吊り掛け式貨車が次々と製作され、貨車輸送限界容量の更新が続いた。1958年には九州電力西谷SS向け180MVA、1959年には電源開発西東京SS向け275kV 264MVA、1963年には中部電力西名古屋SS向け262.5kV 300MVA(写真4.6)というように貨車輸送の大容量化が進んだ。図4.2に戦

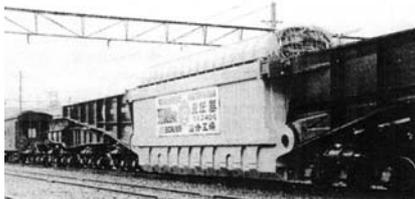


写真4.6 貨車輸送最大容量変圧器 中部電力西名古屋向け 300MVA (1963年 日立製)

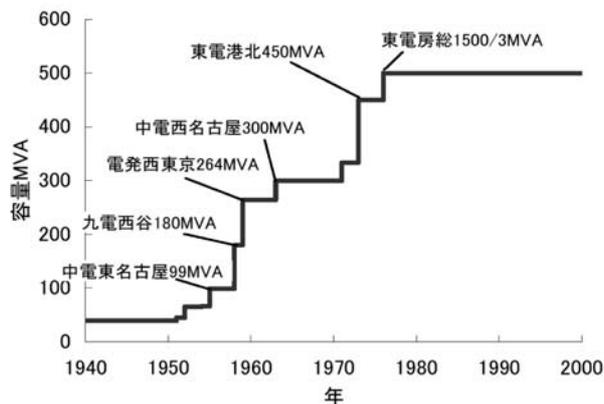


図4.2 変電用貨車組立輸送変圧器容量の推移

後の変電用組立輸送変圧器容量の推移を示す。この背景には鉄道輸送限界を有効に利用する吊り掛け式貨車の導入、方向性けい素鋼板の採用による鉄心の小型化と五脚鉄心構造の採用に加え、1952年に発行されたJEC-120から154kV中性点に段絶縁が採用されたことや耐雷巻線構造の改良による巻線占積率の大幅な改善が寄与している。

海上輸送についても1956年東京電力千葉PS向け160MVA器でフローティングクレーンを使用した船積み採用され(写真4.7)、その後の火力発電所用変圧器単器容量の増加に対して三相組立輸送を可能にした。



写真4.7 フローティングクレーンによる船積み 東京電力千葉PS向け 160MVA (1956年)

一方、配電用変圧器についても全装備でトレーラ輸送できる変圧器が特に都市部を中心に要求されるようになり、1958年に66kV 10MVA変圧器で導入されている。また、万一の緊急時に移動できるタイプの車載形移動用変圧器が同時に導入されている。

(2) 発電所用変圧器の大容量化

発電所向け変圧器について見てみると、その大容量化のピッチの速さも目を見張るものがある。

火力発電所向けとしては主機であるタービン、発電機についてはその1号機に輸入品を採用するケースが多かったが、変圧器については戦前からすでに世界的な記録品を製作するだけの技術レベルに達していたことから、輸入品に頼ることなく1号器から国産品の採用となった。戦前の記録品としては中部電力の名港火力63MVAがあるが、1955年に中部電力三重火力に85MVAが完成、さらに1956年には東京電力千葉火力に160MVAが完成している。その後も1958年に千葉火力に200MVAが、1959年には中部電力新名古屋火力に270MVA、1960年東京電力横須賀火力300MVAと年毎に容量記録が塗り替えられていった。図4.3に発電所用変圧器の容量推移を示す。

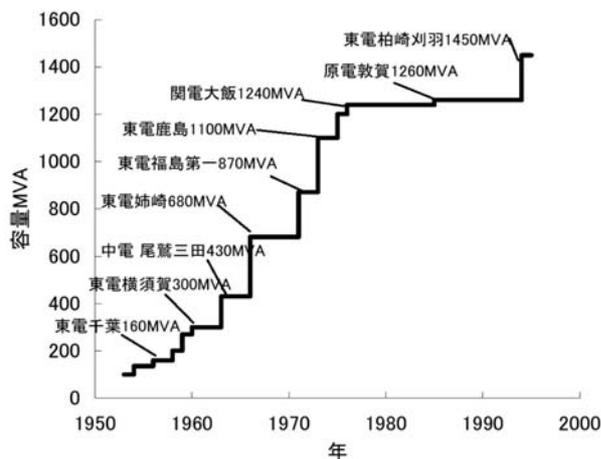


図4.3 発電所用変圧器容量の推移

一方、水力発電所向け変圧器としても大規模なダムが建設されるようになり、大容量化が進んだ。しかし、水力の場合は鉄道および道路輸送に大きな制約を加えられることが多いからことから、このような大容量器に対しては、特別三相として単相毎に輸送する方式が1955年に開発され、それ以降一般的となった。その例が電源開発佐久間PS 93MVA (写真4.4) であり⁽¹⁵⁾、1959年完成の電源開発奥只見PS 133MVA⁽¹⁶⁾である。しかし、1960年完成の関西電力黒部川第四PS 95MVAのようにそれでも寸法と輸送質量に対応しきれずに分解輸送するものもまだ多かった。しかし、分解輸送は1970年代に入り500kV変圧器が出現し、変圧器の信頼性が叫ばれるようになるにつれて次第に減少していった。

4.4 付属品と負荷時タップ切換変圧器

(1) 冷却方式、コンサベータ

付属品に目を向けてみると、冷却方式が戦前は水冷式が主流であったのがヨーロッパで古くから一般的に採用されていた送油風冷式に取って代られてきた。これは変電所用変圧器では冷却水の確保の問題が大きく作用している。1951年に完成した東京電力和田堀SS向け66MVA (写真4.8) ではクーラを直接本体に取り付け

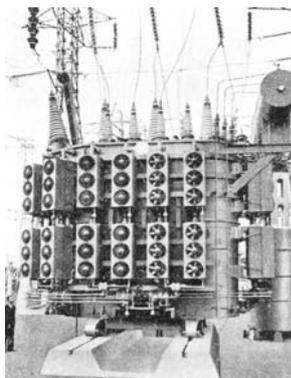


写真4.8 初のユニットクーラを採用した東京電力和田堀SS向け66MVA(1951年 東芝製)

るように簡易化し、現在では当たり前となっているユニットシステムとして冷却器とポンプを一組として組み合わせたユニットクーラとしている。また、コンサベータについても窒素封入式のコンサベータを適用している⁽¹⁷⁾。窒素封入式のコンサベータについては1942年に初適用されているが、当時は材料節約の見地から一般的には採用されず、戦後になって油保存の有効性が評価されて採用されたものである。この当時の構造は三室式が一般的であったが、本器では浮動タンク式を採用し、これがその後1960年代にダイヤフラム方式に移るまでの標準構造となった。ダイヤフラム式もアメリカGE社からの導入技術によるもので、初適用品はゴム袋を輸入して1960年、初めての大容量地下変電所である東京電力千代田SS 100MVAに適用された。それ以後ゴムダイヤフラムの国産化をはかり1960年代中頃までに窒素封入式に取って代った。

(2) 負荷時タップ切換変圧器

この時代のもう一つの技術の流れとして、電力の質を高めるための定電圧送電を行うために負荷時タップ切換変圧器が一般化したことが挙げられる。この当時の負荷時タップ切換装置としてはアメリカ方式のリアクトル式LTCが主流で、一部ドイツ・ヤンセン式などの抵抗式LTCが使用されていた。また、変圧器の方式も主変圧器と直列に負荷時電圧調整器(LVR)を接続する方式と変圧器本体内にタップ巻線を持つ負荷時タップ切換変圧器(LRT)方式とが併用されていた。当時はこれらが適用されるのは配電用が主体であった。しかし、1950年代の後半になると一次変電所用大容量器でも負荷時電圧調整を行うものが現れだした。その方式としては、やはりLVR方式とLRT方式の両方があり、LVR方式としては1956年の九州電力山家SS 90MVA、(LVR:220kV \pm 10, \pm j30kV)、1957年の北陸電力伏木SS 80MVA、(LVR:77kV \pm 5%)などがある。一方、LRT方式としては1957年に中国電力徳山SS 66MVA、1959年の埋め込み式LRTの東京電力蔵前SS 75MVAなどが挙げられる。

しかし、1960年代に入ると一次変電所用変圧器へのLTC採用の傾向はさらに強まり、同時に負荷時タップ切換器を変圧器タンクに内蔵し、変圧器本体と同時に組立輸送を行うLRTへの要求が電力会社から強く出された。他方、寿命が長く、保守点検をほとんど必要としない実用性の高いLTCの採用が強く求められた。このような要求に最も適したのものとしてドイツのMR社製が当時世界的にも注目されており、1963年わが国の変圧器メーカー三社が技術提携することに決定し、以後

MR社の開発した機種がわが国でも主流になり今日に至っている。写真4.9にMR社LTCを最初に搭載した東京電力北東京SS向け300MVAの写真を、写真4.10にそのLTC単独の写真を示す。⁽¹⁸⁾

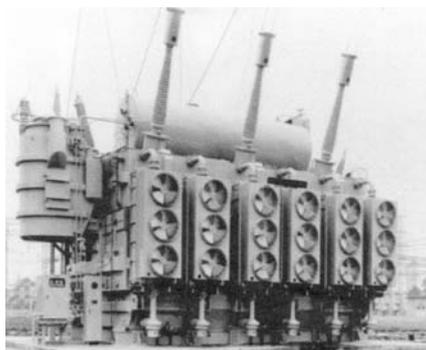


写真4.9 初めにMR社抵抗式タップ切換器を搭載した東京電力北東京SS向け300MVA (1962年 三菱製)



写真4.10 MR社F形タップ切換器

4.5 エレファントブッシングの適用

電力需要の増加に応じて66～154kV系統がケーブルで直接都心に導入されるようになり、地下式変電所で直接変圧器に接続するケースが出てきた。また水力発電所では地下式の発電所が計画され、発電機電圧を地下に設置された変圧器で昇圧し、油浸絶縁ケーブルで地上に電力を送り出すケースが出てきた。このような場合、従来はケーブル終端部を設け、架空線で変圧器ブッシングと接続していた。一方、欧米では1940年頃にはケーブルと変圧器を油中で接続する方法が採られ一般化していた。わが国でも1958年にまず66kV変圧器で油中で接続する方法が適用され、1960年には大容量都心地下変電所の第1号である東京電力千代田変電所向け100MVAに154kVを、また、地下発電所である電源開発奥只見発電所向け133MVA(写真4.11)に275kVを油中で接続するいわゆるエレファントブッシングをそれぞれ初適用している⁽¹⁶⁾。なお、エレファントブッシングの構造としては現地での変圧器とケーブルとの組立時期のずれ、責任分担の明確化の目的から

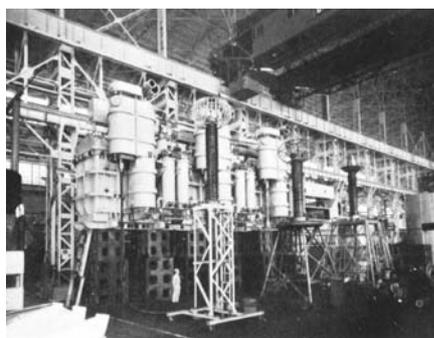


写真4.11 275kVケーブル直結式変圧器
電源開発奥只見PS向け133MVA (1960年 東芝製)

変圧器には油中—油中ブッシングを採用し、接続ダクト中でケーブルヘッドと接続する方式がわが国では一般に採られた。この場合ブッシングポケットおよび接続ダクトの長さをできるだけ短くすることが地下変電所のスペースを減らす上からも求められ、当時の60kV以上のブッシングとしては戦前から主流であった絶縁筒のバリヤを配した油入ブッシングから油浸紙コンデンサブッシングが代わって用いられていたが、ヨーロッパで開発されたレジン(乾式)コンデンサブッシングが寸法を短くするのに有効であったことから、この方式が技術導入され適用されるようになった。しかし、この乾式コンデンサブッシングはレジンを真空含浸させる方式ではなかったため微小なボイドが残存し、その後部分放電試験が実施されるようになると部分放電を発生させ、変圧器本体からの部分放電との判別がむづかしいこと、長期に使用すると運転電圧で電圧劣化を起こすことが報告され、1970年代中頃から真空含浸する方式に代えられた。しかし、その頃になるとGISで開発されたレジンスペースの方がよりコンパクトになることからその適用が始まり、その後は各種方式のブッシングが併用される状態が続いた。

4.6 超大容量変圧器の出現

(1) 超大容量変圧器の出現

1960年代に入ると日本の高度成長に伴って電力需要も急拡大したため、設備投資効率の観点から設備単器容量の拡大が急ピッチで進んだが、中でも火力発電所用変圧器の拡大のスピードは目を見張るものがあつた。図4.3にわが国における変圧器容量の推移を示すが、1960年代から1970年代はじめにかけての急上昇ぶりが分かる。

1960年に東京電力横須賀PS 300MVAが完成した後、1963年には関西電力姫路第二PS 370MVA、東京電力横須賀PS 420MVA、中部電力尾鷲三田PS 430MVAが次々と完成、1966年には東京電力姉崎PS 680MVAが

完成している(写真4.12)⁽¹⁹⁾。また、原子力についても、わが国初の原子力発電所(以下NPSと略す)として1964年に日本原子力東海NPSに100MVAが納入されて以来、1969年に東京電力福島第一NPS 490MVAが、1971年には2号器として870MVAが完成している。

また、1973年には初めて1000MVAを超える1100MVA器が東京電力鹿島火力PSに納入され(写真4.13)⁽²⁰⁾、さらに1973年に運転に入った500kV系統に発電所で直接昇圧する500kV変圧器として東京電力袖ヶ浦PS 680MVA および 1100MVAが完成している。



写真4.12 東京電力姉崎PS 680MVA (1966年 東芝製)



写真4.13 東京電力鹿島PS 1100MVA (1973年 東芝製)

このような大容量化のペースはアメリカを始めとした諸外国とほぼ同一であったため、従来の高電圧化の過程で行ったように海外で開発あるいは確立した技術を導入して、自分らの技術を確立するといったステップを踏むことはできず、大容量化に伴って発生する問題については自ら解決して行くことが求められた。

この大容量化と合わせて、システムの短絡容量抑制のため、変圧器に従来の約1.5倍の高インピーダンス化が求められるケースが増加し、このため変圧器の大容量化の問題点として最もクローズアップされたのが巻線もれ磁束による構造材料中の循環電流およびそれによって発生する損失、熱に対する問題であった。

(2) 漏れ磁束対策

もれ磁束に対する巻線での対応としては1958年以来絶縁特性に優れ、製造の作業性もよい多重円筒巻線が、その導体としては転位電線が本格的に適用されていた。転位電線は薄い導体を使用しても二列に10cm前

後のピッチで撚り合わされているため、機械的にも強く、また巻線端部の磁束のフリンジングに対しても導体幅が1/2として有効に作用する点で優れており、現在でも広く採用されている。

もれ磁束対策として最も苦労したのはタンクの局部過熱防止対策であった。タンクでは巻線からのもれ磁束だけでなく、大電流リード磁界によっても循環電流が流れる。この対応として外鉄型では1952年以来タンク磁気シールドを採用しているが、内鉄型では1958年にアルミによる電磁シールドを採用して対策とした。しかし、その取付構造および取付範囲については製品で何回かの試行錯誤を繰り返した後次第に完成したものになっていった。また、タンク内部構造材中を流れるもれ磁束あるいは大電流磁界による循環電流によって引き起こされる局部過熱は外部から直接診断できないため対応が困難で、現地に行って問題が顕在化し、対策をとったケースも多い。局部過熱の診断技術として現在では油中ガス分析が定着しているが、この技術もこれらの経験を経て確立していったものである。わが国のコンサーバ方式は先にも述べたように1960年代からダイヤフラム方式となっていたため、油中溶存ガス量が少なく微量ガスの分析精度が高くなるため、油の過熱分解によって発生する可燃性ガスの判断基準を厳しくすることができたので、可燃性ガス発生要因を除去するために大いに役立った。なお、工場の温度上昇試験時に油中ガス分析を実施し、内部局部過熱の有無を判断し始めたのは、1960年代の後半のことである。

このように1960年代後半から1970年代にかけてスリット入り鉄心当て板構造の採用、クランプ磁気シールドの採用、二重同心巻線配置の採用、多点接地の防止や絶縁取付などによる循環電流の低減や防止策の導入、不完全接触の防止構造の採用、タンク磁気遮へいの採用(内鉄型)、低圧大電流ブッシングの開発および低圧ブッシングポケットと低圧相分離母線との接続部の過熱対策などの対応を採り入れていった。なお、もれ磁束問題は1980年代に入ってコンピュータを使用しての電磁界解析が一般化してその精度が向上したことによりかなり解決されたが、変圧器は形状が複雑なため一般的に解析を採用するには困難があり、現在でも完全には解決できていない部分がある。

その後変圧器大容量化のペースは鈍り、原子力発電所用として1975年日本原子力東海NPS向け1200MVA、1976年関西電力大飯NPS向け1240MVA、1985年日本原子力敦賀NPS向け1260MVA、1994年東京電力柏崎刈羽NPS向け1450MVA(写真4.14)⁽²¹⁾が出荷され、最近では2002年に中部電力浜岡NPS向けに1510MVA(写

真4.15)⁽²²⁾が完成し、現在世界最大容量記録品となっている。

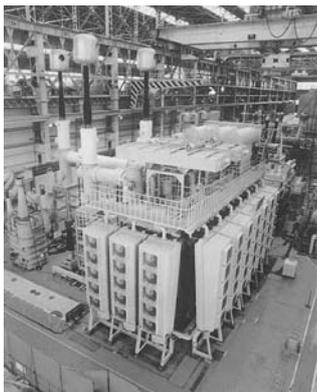


写真4.14 東京電力柏崎刈羽NPS向け 500kV 1450MVA変圧器 (1994年 日立製)

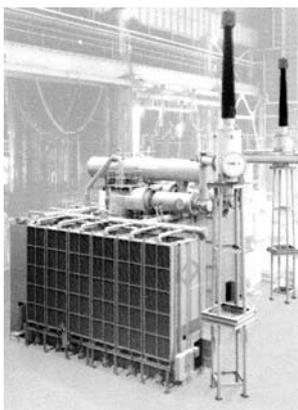


写真4.15 中部電力浜岡NPS向け 500kV 1510MVA変圧器 (2002年 三菱製)

4.7 変圧器の輸出と500kV変圧器の開発

(1) 戦後の変圧器輸出

戦後の変圧器の輸出は円借款をベースにしたものが多く、当初はインド、台湾向けが1960年頃まで続いた。この頃になると次の送電電圧としてヨーロッパなどで実現している400kV送電を念頭に置いた検討や開発が進められた。これらの開発技術をベースに1960年にオーストラリア向け330kV変圧器の受注に成功、翌1961年に330kV 160MVAと100MVAを日立、東芝が出荷している。写真4.16に330kV 100MVA器の外形を示す。これがわが国の本格的輸出の始まりといえよう。これらの変圧器は中圧132kVの線路端でタップを切り換える負荷時タップ切換単巻変圧器である点も初めての経験であった。巻線には当時開発された制振遮へい巻線やハイセルキャップ巻線を適用するなど最新の技術を適用している⁽²³⁾⁽²⁴⁾。このほか耐熱絶縁紙の採用、リード用クレープ紙、可とう銅より線の採用、リード線圧着端子などの新技術を採用し始めたのもこの時期である。

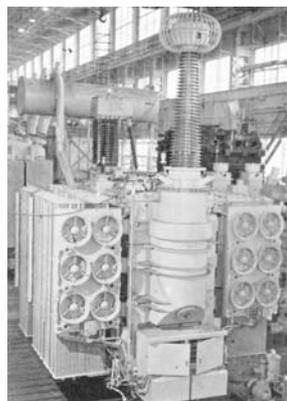


写真4.16 オーストラリア向け負荷時タップ切換 330kV 100MVA単巻変圧器 (1961年 東芝製)

(2) 500kV変圧器への取組みと輸出向け500kV変圧器

その後1960年代に入り、わが国の次期送電電圧が500kVに決定したことを受けてその開発に拍車がかかり、1963年には貨車輸送を前提にした実規模モデルの製作を行うなど、本格的な開発を行っている。1966年には超高圧研究所武山試験所へ実証試験用として500kV 10MVAのプロトタイプ変圧器が日立、東芝、三菱により納入されている(写真4.17)⁽²⁵⁾。また、国内での運用の前に海外での適用実績を積む目的から1965年にはカナダ、次いでアメリカおよびオーストラリア

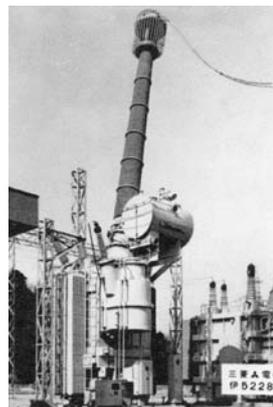


写真4.17 500kV 10MVA課電試験用変圧器
電力中央研究所横須賀研究所 (1966年 三菱製)

から大量の500kV変圧器の、またメキシコからも400kV変圧器の受注に各社が成功した。写真4.18にわが国初の500kV変圧器であるカナダ向け100MVA器の中身写真を示す。500kV昇圧初期にアメリカで作られた500kV変圧器が、運転に入ってからまもなく相次い

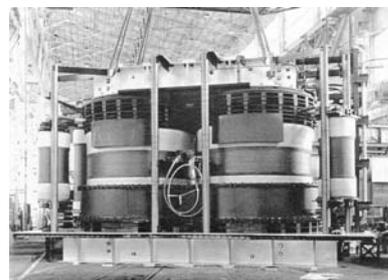


写真4.18 わが国初の500kV変圧器中身 カナダ向け100MVA (1967年 東芝製)

で絶縁事故を起こした事例から、これらの変圧器には従来の絶縁試験に加えて新たに部分放電試験が仕様で要求されている点が特徴であった。

(3) 部分放電試験への取組み

当時は部分放電発生防止に対する設計・製造および試験面の対応技術はまったくの手探り状態であり、電極への過度の電界集中排除、使用絶縁材料の吟味と改良、内部構造材の明色塗装化による防塵意識改善、新絶縁処理法の導入、簡易防塵室あるいは低湿度作業室の導入による製造環境の改善などをとりあえず実施し、ある程度の成果は収めたものの、一回で試験に合格することは希で、異物除去のため変圧器中身を絶縁油で洗浄することも度々であった。その後も使用する絶縁材料のポイドレス化、絶縁物への金属性異物混入の排除、絶縁物水分管理の導入、異物混入防止管理などの対策が採られ、また音響法コロナロケーション技術を確立しコロナ音発生場所の特定化を可能とする技術も確立したが、これだけでは部分放電問題の抜本的な解決にはならなかった⁽²⁶⁾。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年代中頃以降のことで、油中の部分放電開始電界の把握と許容電界値の設定と管理、防塵空調室の整備および作業員への防塵意識の徹底や日本的なQC活動によるところが大きい。実に解決に10年近い日時を要した。現在わが国においては部分放電試験で内部部分放電なしが基本であり、これによって変圧器の絶縁信頼性が確保されると考えている。IEC規格などでは判定基準が日本の場合に比べ緩やかな条件となっているが、これは諸外国の作業環境および作業員のモラルをわが国と比較したとき、そこに明らかな差があることと無関係とはいえない。

4.8 国内向け500kV変圧器の完成と流動帯電事故

(1) 国内向け500kV変圧器の開発

1970年に500kV送電が東京電力でいよいよ本決まりとなり、変圧器の仕様決めが行われた。仕様としてはそれまで関西電力と中国電力間の連系他で一部適用されていたが、わが国ではほとんど初適用となる単巻変圧器が採用され、容量もバンク1000MVAと決まった。また、タップ切換では諸外国の例では単巻変圧器の中圧線路端にタップ巻線を配置している例が多いが、275kVでの適用実績としては少ないこと、また、変圧器の事故例の中ではLTCに起因するものが多いのに加え、275kVという高電圧部に適用することに対す

る信頼性の問題から、タップにより鉄心励磁が変化するため機器が大型化し、タップのステップ電圧も不均等になるなどの欠点はあるものの、中性点切換方式が採用された。その他、タップ巻線は負荷時電圧調整器として別置され、万一のLTC周りの事故に対しても主変圧器単独で運転可能なように配慮された。

なお、試験電圧値については雷インパルス試験電圧に欧米の500kV器で当時一般的に適用されていた1675kVより一ステップ低い1550kVが採用され、開閉インパルス試験も初めて適用され、試験電圧値は1175kVと決まった。AC試験電圧については、欧米では雷インパルス試験電圧値とリンクした形で決められるのが一般であったが、275kVでの実績をベースにその延長として欧米に比べると高い840kVが採用されている。部分放電試験についても海外の例を参考にしながら独自の1.5E(E：常規運転電圧)1時間、2E 5分、1.5E 1時間を続けてかける試験パターンを決定したが、これらAC試験に関しては先行検証器の試験を行う中で決定されていった。このようにわが国の500kV変圧器は275kVの運転実績を踏まえ、さらに信頼性を高めることを主眼に仕様が決められ、これがその後1990年代まで信頼性第一主義を信奉するスタートとなった。なお、AC試験電圧については東京電力に次いで500kV送電に着手した関西電力では欧米と同様に雷インパルスとリンクした形で680kVと設定されたが、その後試験電圧値規格化の動きの中で中間の750kVに最終的に落ち着くことになる。

(2) 500kV変圧器の完成

わが国初の500kV変圧器は1971年東京電力新古河および房総変電所に東芝および三菱から各3バンクずつ出荷された⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。写真4.19に新古河向け500kV器の外形写真を、写真4.20にその中身写真を示す。翌1972年

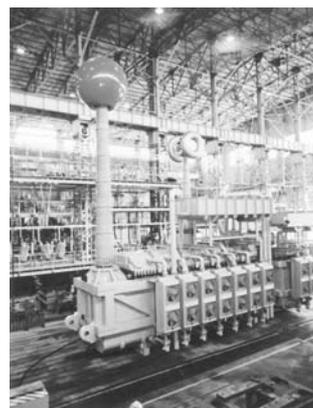


写真4.19 国内向け500kV変圧器初号器
東京電力新古河SS向け1000/3MVA (1971年 東芝製)



写真4.20 新古河1000/3MVA中身

に営業運転を前にした試運転中、房総変電所で絶縁事故が2件続けて発生し、この原因究明と改修のためわが国の500kV送電の運転開始は翌1973年となった。

これらの500kV変圧器は基本的には輸出向け500kV変圧器で実績を積んだ巻線・絶縁構造が採用されているが、鉄道輸送限界の違いとAC試験電圧値が高めに設定されたことから油ギャップと絶縁物を交互に配置するバリヤ絶縁が多用されるなど、よりコンパクトな設計が求められた。また、部分放電試験に対しては新工場建設移転などで防塵設備を強化して対応しているが、当初は防塵管理も徹底してなく、また作業者の防塵意識も低かったため、部分放電試験に一回で合格するケースは少なかった。

1974年に製作された関西電力向け単巻変圧器ではタップ巻線を本体に内蔵する方式が採られ、タップ巻線は単相鉄心の側脚に巻く方式が採用されている。この辺に電力会社による信頼性に対する考え方の違いが現れているが、500kVと154kVとの連系変圧器では東京電力でもLVR方式とはせず本体にタップ巻線を巻き込む方式が採用されている。これは154kVと275kVとの系統の重要性に差が出たものである。

また、1974年には東京電力袖ヶ浦発電所、関西電力奥多々良木揚水発電所向けで500kVに発電機電圧から直接昇圧する変圧器が初めて採用された。

(3) 500kV変圧器事故と流動帯電

1972年試運転中の房総変電所で2台の変圧器が続けて絶縁破壊事故を引き起こしたことは前に述べた。事故を起こした変圧器を含め全台を工場に引き取り調査したが、このときははっきりとした原因はつかめず、この変圧器の現地工事のとき輸送カバーから本カバーへの交換時に絶縁物に含浸している絶縁油が抜けて吸水しやすい状態となっていたために絶縁物中の水分量が増え、これが原因となって絶縁破壊したのではないかとの結論となった。しかし、引き取った変圧器の1

台を工場で長期課電していたところ、内部から音が聞こえ、これが電氣的な信号と一致したこと、試験のため取り付けた覗き窓から放電の光が確認できたことから内部での放電と断定され、ポンプの運転により放電が変化することから油の流動による静電気によるものと判断された。石油業界では静電気によるタンカーの爆発やパイプラインでの火災などが問題となっていたが、変圧器のように絶縁を目的にした機器の内部で油の流動により静電気放電が発生し、絶縁破壊にまで発展することは当時としては誰も予想しておらず、その原因究明には静電気の基礎から調査する必要が生じた。このように流動帯電の研究を開始して間もない1974年に新所沢変電所に納入された変圧器でやはり課電試験中に絶縁破壊が発生した。この時も変圧器の内部の損傷が激しく、原因を突き止めることができなかったが、引き続いて実施していた課電試験中に2台目の絶縁破壊事故が発生し、この時は静電気放電の可能性を考え、3脚並列になっているコイルのうち健全で残っていたコイルを詳細に点検したところコイル下部の油の流路回りに多くの静電気放電によると思われるトラッキングを絶縁物上に発見し、この変圧器の絶縁事故は静電気放電が発端となりACのフラッシュオーバーへと発展したものと判定した。これは事故の直前に円筒実規模モデルにより模擬円筒コイル入口部で静電気放電を発生させることに成功しており、この状況と対比して静電気放電が今回の事故原因と判断された。したがってこの事故が現在まで変圧器の静電気放電による最初の事故とされている。図4.4に静電気放電によるトラッキング痕の発生部位を示した。また、写真4.21～写真4.23に代表的なトラッキング痕を示す。

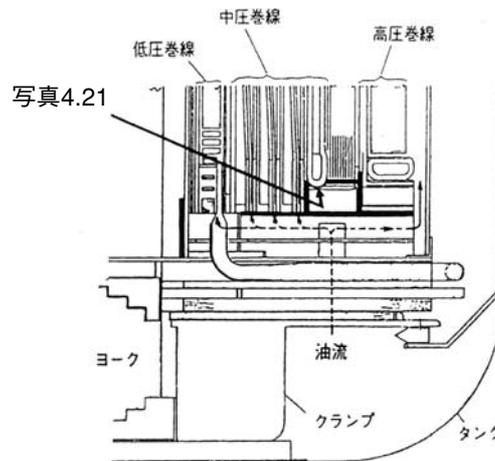


図4.4 静電気放電痕発生部位

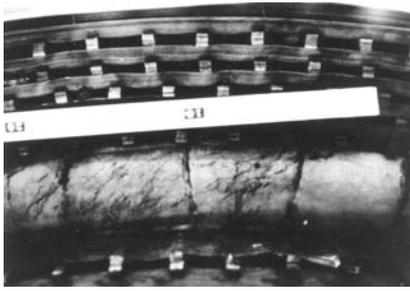


写真4.21 静電気放電痕（中圧多重円筒巻線線路端シールド部）

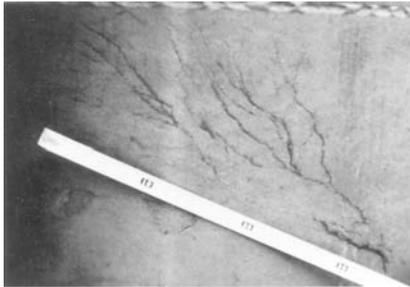


写真4.22 同 三次巻線基礎絶縁筒

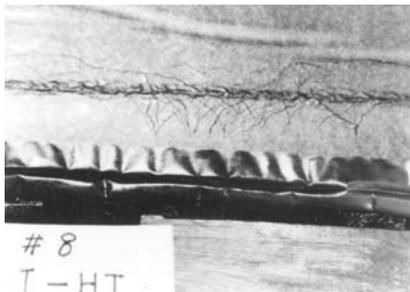


写真4.23 同 高圧巻線基礎絶縁筒

5 | 独自技術による発展 (流動帯電の克服と新技術への挑戦)

5.1 流動帯電の克服と基礎に立ち返った開発⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾⁽³¹⁾

(1) 流動帯電事故原因の究明

この事故の原因究明に当っては実変圧器、実規模モデルおよび基礎モデルを使用して各種の条件を変化させながらメーカ各社が実施した。その結果静電気放電の発生する原因としては絶縁油の帯電のし易さ、油の流路形状と局部的流速、AC電界、絶縁物の表面状態と水分量などが影響することが確認された。このうち油の帯電度は絶縁油によって差があり、また時間的にも変化することがその後確認されている。この時間的変化をもたらす物質が何であるかはいまだに明らかにされていないが、油中の微量物質が油中溶存酸素と油中の銅イオンにより活性化して帯電度を大きく変化させていると考えられている。したがって変圧器の注油から課電までの期間の差によって、設置された変圧器間の帯電度に差が生じ、静電気放電の有無の差を生じさせたと考えている。各社の精力的な研究の結果、わが国では1976年には流動帯電に対する対策を確立している。この調査結果は海外にも紹介されたが⁽³²⁾⁽³³⁾⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾、当時はあまり注目されなかった。しかし、1980年代に入って海外でも静電気放電によると考えられるトラブルが各所で報告され、その後注目されるようになり、現在も大きな問題として取り上げられている。流動帯電についての対策を確立した後も、主に絶縁油の帯電度に関してそれを支配する原因物質についての調査が進められたが、絶縁油がもともと石油から精製されたものであるため、いろいろな化学組成の混合物であり、帯電度に及ぼす微量成分を突き止めることはできずに現在に至っている。ただ絶縁油に10ppm程度のベンゾトリアゾール(BTA)を添加すると絶縁油の帯電度の変化が抑えられるとの実験結果から、わが国では絶縁油にBTAを添加する方法が1980年代から一般的に採用され、絶縁油の規格にもBTA添加油が追加されている。

(2) 流動帯電事故の反省とその後の開発

このような流動帯電現象を予測することは当時では不可能であったと考えられるが、当時の設計ではコイルへの油採り入れについてはコイルの冷却という点でしか考えておらず、油の流れという視点が欠けていたため、局部的流速の高い部分で問題が発生してしまった。これは一つには海外の導入技術によった設計基準

で設計を進めてきた部分で基本に立ち返った検討が抜け落ちたことが根本にあると反省し、変圧器の大容量化や高電圧化に対してこのような抜けがないかを確認する気運が生まれ、根づいていった。これがその後のわが国の新たな技術開発に大いに役立ったと考えている。

この時代、絶縁問題では従来使用されてきた非油浸絶縁材料例えば紙積層コンパウンド材などから油浸のプレスボード積層材や強化木への変更、また、クラフトボードによる成形絶縁物、プレスボード絶縁筒など主にヨーロッパで使用されていた絶縁材料が日本にももたらされるようになり、変圧器の内部構成も大幅に変更された。また、巻線構造も絶縁特性の調査から、従来高電圧用として多用してきたハイセルキャップ巻線のように手の込んだ巻線を使用しなくても単純な連続円板巻線や線路端部分のターン間に僅かなシールドを巻き込むことで十分275kV以上の巻線に適用できることが分かり、その適用が増加した。ここにはコンピュータ利用が一般化し、電位振動解析が高精度化したことが大きく作用している。

5.2 UHV変圧器の開発とUHV開発技術

(1) UHV変圧器の開発

1970年代の中頃になると、国内500kV送電は中部、中国および九州電力でも始まり、東京電力ではそれまでのバンク容量1000MVAから1500MVAと大容量化が進んだ。製造側も部分放電対策として防塵管理の大切さが浸透し、管理の強化とQC活動による作業者の意識改革とによりそれまで苦勞していた無部分放電変圧器の製作が標準的に可能な状態になった。

大形化した電算機を利用した各種電界解析と電位振動解析が大いに進歩したのはこの時期のことであり、この解析結果とモデル実験結果を照合することにより、油絶縁現象の理解が進み、よりコンパクトな絶縁の可能性が見えてきた。

1970年代も後半となると1980年代中頃には次期電圧として当時世界的にも各国で検討が進められていたUHVがわが国でも実用化するとの予測から本格的なUHVの開発が開始された。

この場合500kV変圧器と同一の鉄道輸送寸法・質量制限内で2倍の高電圧に耐える変圧器を製作することが求められ、前記のコンパクトな絶縁に新しい絶縁材料を適切に配置することによりこの目標を達成すべく

取り組み、1970年代末にはそのプロトタイプ変圧器の製作が各社で発表された^{(36) (37) (38)}。

1978年にはUHV送電特別委員会が各界の専門家によって構成され、UHV実現に向けた検討も始まっている。このUHV変圧器の技術的課題としては鉄道輸送限界内で製作することに加え、従来の変圧器に比較して運転中に油道にかかる電界が大きくなっていることから、長期に亘る運転期間中に運転電圧ストレスに加えてかかる各種異常電圧ストレスに対して信頼性が本当に確保されるかを確認することがある。これに対してもその後各種長期信頼性検証が計画、実施され、その結果がこの委員会の場で報告された。これがその後のわが国の試験電圧基準改定にあたり反映されて、わが国独自の信頼性の高い絶縁基準を可能にした^{(39) (40) (41)}。写真5.1に工場フィールドで長期課電による信頼性検証を行っているUHVプロトタイプ変圧器を示す。



写真5.1 UHVプロトタイプ変圧器 (1979年 東芝製)

(2) UHV開発技術の適用

なお、UHVの実現はその後1980年代に入ると経済が高度成長から安定成長へと変化したことから実現が先へ延び、メーカ各社はこの開発技術を500kV以下の変圧器に反映して、これらの小形化、低損失化を図ることとし、モデルチェンジを行っている。例えば内鉄型500kV 1000/3MVA変圧器ではそれまでコイル2脚を並列にし、単相4脚鉄心を使用していたのが、この技術を適用することによりコイルは1脚とし単相3脚鉄心で済むようになり、質量、損失とも大幅に低減されることとなった。

また、この技術を適用して海外の765kV変圧器の入札に参加し、ベネズエラ向け765kV変圧器の受注に日本連合(日立、東芝、三菱)として成功し、初のUHV変圧器を1982年に出荷している(写真5.2)。このほかにもその後ブラジル向けや南アフリカ向け765kVの受注にも成功している。ブラジル向けでは中圧電圧が



写真5.2 初の765kV変圧器 ベネズエラ向け805/3MVA (1982年 三菱製)

500kVであり、高圧のインパルス試験電圧が1950kVと将来のわが国のUHVと同一と予想されるものであり、その先行器と目された(写真5.3)。また、南アフリカ向けはバンク容量が2000MVAと変電所向けとしては最大のものであった(写真5.4)。



写真5.3 ブラジル向け765/500kV 1650/3MVA (1988年 東芝製)

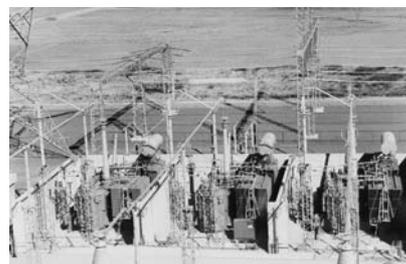


写真5.4 南アフリカ向け765kV 2000/3MVA (1985年 富士製)

5.3 地下変電所の普及と変圧器の防災対策⁽⁴²⁾⁽⁴³⁾

(1) 地下変電所の普及

高電圧の電力ケーブルの開発普及に伴って、都心へ直接高電圧系統を引き込み、都心に高電圧のネットワークを構築する動きが1950年代末頃から進められ、まず1960年に東京電力千代田変電所が完成している⁽⁴⁴⁾。ここには100MVA 154kV変圧器が納入されているが、地下ということで変圧器高さが建設コストに大きく影

響することからその制限が厳しく、現地の組立作業などにも各種工夫がこらされた。写真5.5にその工場組立の様子を示す。

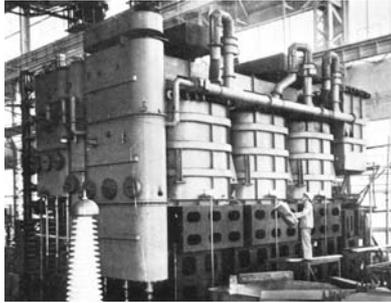


写真5.5 初の大容量地下変電所用変圧器
東京電力千代田 SS 154kV 100MVA (1960年 東芝製)

その後1969年には275kV変電所向け変圧器も出荷され、1971年に新宿、城南変電所が運転を始めている。この275kV地下変電所からガス絶縁開閉機器 (GIS) が適用されだし、変電所の縮小化の観点から非常な効果を発揮することになる。

(2) 変圧器の防災対策

東京電力では275kVのネットワーク化を進めた結果1980年代に入ると系統の短絡容量が当初計画の10GVAを超えることになり、変圧器で内部事故が起きた場合事故エネルギーが大きいと、遮断器が動作して系統を遮断するまでの時間に変圧器タンク内部の圧力がタンク破壊圧力を上回り、タンクが破壊して最悪の場合火災を引き起こす恐れが出てきたため、何らかの対策を施す必要が出てきた。そこでメーカーと電力会社との共同研究として火薬を使って内部事故時のタンク圧力上昇を模擬させ、その変形を調査する試験が行われた。その結果、対策として単相毎に別れているタンクを上部ダクトで共通化するときダクトとコンサベータを共通にし、タンクからダクトへの貫通穴を大口径にすることにより圧力上昇を緩和する方式を提案し、今後の地下変電所の標準構造とした⁽⁴³⁾。

変圧器の防爆については1975年にやはり電力会社とメーカーの共同研究で内部事故時の油分解ガス発生量とタンク膨張量との関係からタンク内部圧力が与えられ、事故許容レベルが決定されることになっていたが⁽⁴²⁾、地下変電所用変圧器は特別三相構造のため膨張量が少なく15GVAという短絡容量に対して耐えられないことから新構造の開発が必要になったものである。

5.4 大容量分路リアクトルの増加

(1) 分路リアクトルの必要性

このように都心に大容量地下変電所ができ、ケーブ

ル系統で結ばれると、負荷の軽い夜間にはケーブルの静電容量のため進み負荷の状態となる。これを回避する目的で地下変電所に大容量の分路リアクトルの設置が進んだ。当初は変圧器の三次回路に取り付けて、間接的に補償を行っていたが、その後275kV系に直接分路リアクトルを接続するようになった。

(2) ラジアル鉄心形分路リアクトルの導入

分路リアクトルは1952年にわが国初の275kVが導入されたときに、その補償用として枚方変電所に15MVAが導入されたのが最初である。その後も単発的に30MVA程度の比較的小容量のものが導入されていた。しかしケーブル系統の増加で1975年以降まず地下変電所につながる屋外変電所に150MVAのリアクトルが設置された。当時のリアクトル方式は空心タイプと呼ばれるものが主で、コイルの回りに磁気シールドを配置したものであった。しかしこのタイプは損失が比較的多く、分路リアクトルが接続された場合は常に100%電流が流れるため損失を減らしたいとの電力側の強い要望から、当時ヨーロッパでは標準的に採用され、日本でもメーカーによっては1960年頃から製作されていたラジアル鉄心構造に変更することになり、1980年代の始めに開発を行っている。この場合にはブロック鉄心間にセラミックのようにヤング率の高い材料を使用したスペーサを配置し、磁気吸引力による変形が出ないようにしている。図5.1に変圧器と分路リアクトルの中身構造概念図を示す。また、写真5.6にラジアル鉄心の組立状況を示す。このようにして開発されたラジアル鉄心タイプの分路リアクトルはその後の分路リアクトルの標準構造となり各社で採用されてい

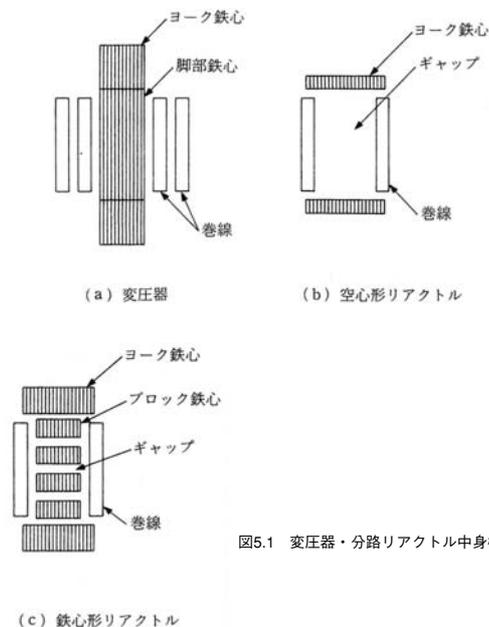


図5.1 変圧器・分路リアクトル中身構造概念図

る。なお、1994年に初の500kVリアクトルとして電源開発に本四連系用250MVAが中国側と四国側にそれぞれ設置されている。また、輸出向けとしては南アフリカに765kV 400/3MVAといった記録的大容量器を1985年に出荷している(写真5.7)。

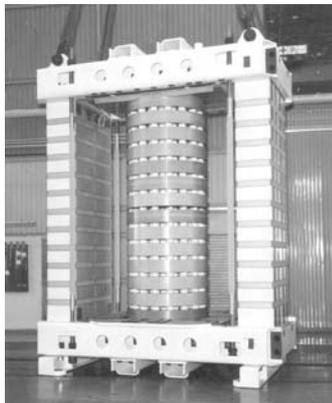


写真5.6 ラジアル鉄心組立状況



写真5.7 南アフリカ向け765kV 400/3MVA 分路リアクトル (1985年 東芝製)

5.5 変圧器の不燃化とガス絶縁変圧器の開発⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾

(1) 不燃性変圧器

不燃性変圧器としては戦前からポリ塩化ビフェニール(PCB)を絶縁油として使用した変圧器が発電所の屋内用変圧器などに単発的であるが製作されてきた。PCBは鉱油並みの絶縁および冷却特性を持っていたため、特にアメリカで需要が盛んであった。日本では、都心のビル地下の変電所などに6~10MVA程度のPCB入変圧器が1950年代中頃から散発的に製作されてきた。しかし、PCBによる毒性が問題となって世界的にPCB使用禁止の動きが強まり、日本でも1974年に使用禁止の通達が出された。しかし、このためにすぐ代替の変圧器の需要が出るほどにはPCB使用変圧器の需要はなかったのがその後しばらくは油入変圧器で済まされていた。

(2) ガス絶縁変圧器の登場から普及まで

一方、SF₆ガス絶縁変圧器についてはGISが実用化するよりも早くその第1号が誕生している。この第1号はアメリカGE社と技術提携をしていた東芝が導入技術をベースに製品化にこぎつけたものである。この製品は冷却としてSF₆を直接空気で冷却するのではなく、タンク内部にエバポレータを内蔵し、フロンを媒体として熱交換を行うもので、第一生命に66kV 3000kVAを1967年に納入している(写真5.8)。この当時



写真5.8 わが国初のガス絶縁変圧器 (第一生命 66kV 3MVA) (1967年 東芝製)

はまだ導体の絶縁としてフィルムを使用する技術はなく、油入と同様に紙を使用していたためインパルスに対する耐圧が低く、絶縁設計にかなり苦労していた。現在のようなフィルムを使用したガス絶縁変圧器が登場したのは1978年のことで上越新幹線用の変圧器として採用された(写真5.9)。これ以降ビルの地下変電所や地下鉄用としてガス絶縁変圧器の需要が増加していった。また、1982年には真空バルブを使用したガス絶縁変圧器用の負荷時タップ切替装置も実用化し、その初製品が札幌市交通局に収められている(写真5.10)。

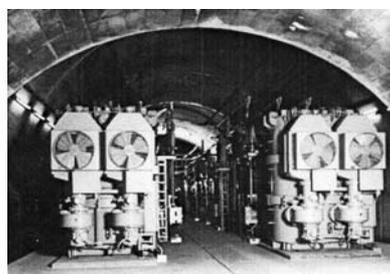


写真5.9 上越新幹線向け66kV 10MVAガス絶縁変圧器 (1978年 明電舎製)

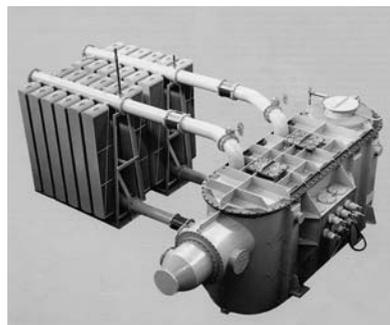


写真5.10 札幌交通局向け66kV 11MVA負荷時タップ切替変圧器 (1982年 富士製)

当初はフィルムとして耐熱クラスEのPET(ポリエチレンテレフタレート)が主に使用されていたが、その後耐熱クラスBのPETや耐熱クラスFのPPS(ポリフェニレンサルファイト)やHのアラミド紙を適用するケースも出てきた。当時は10MVA級の変圧器も送ガス風冷式が一般であったが、自然冷却の要求も強く巻線の冷却方式の改善や耐熱性の高いフィルムの使用などでこの要求に応え、1987年には20MVAが、1989年には30MVAの自冷ガス絶縁変圧器が製作されている。なお、ガス絶縁変圧器の普及は1980年代中頃変電機器での火災が相次いで起こり、これを契機にその採用が大幅に拡大している。代表的なガス絶縁変圧器の構造例を図5.2に示す⁽⁴⁶⁾。

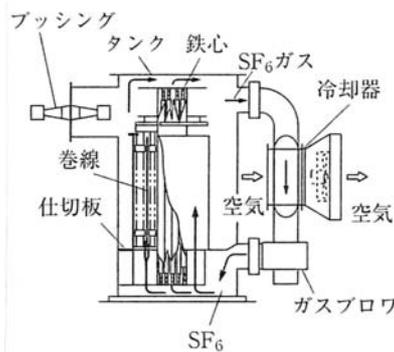


図5.2 ガス絶縁変圧器の概略構造

(3) 乾式変圧器

ガス絶縁変圧器の普及に先立って電圧、容量で下回る領域では戦前から屋内用などの用途で乾式変圧器が使用されていたが、この分野でも1960年代に入るとポリエステル樹脂の、次いでエポキシ樹脂でモールドしたモールド変圧器がヨーロッパで開発された。わが国でも1960年代後半から研究が始められ1974年にエポキシモールド変圧器が導入された。その後次第に大容量化を達成しながら従来タイプの乾式変圧器に置き換わってきている(写真5.11)。



写真5.11 東京都向け22kV 13MVA モールド変圧器 (1994年 富士製)

5.6 液冷却ガス絶縁変圧器からガス冷却ガス絶縁変圧器へ

(1) 大容量ガス絶縁変圧器開発

ガス絶縁変圧器の大容量化についてはまずアメリカで検討され、1980年代始めに300MVA級の開発実用化を図るとの計画が示されていたが、その後アメリカ政府の財政縮小で計画が取りやめとなってしまった。わが国の開発はアメリカでの計画に触発され、まず関西電力と三菱電機との間で開始された。当時は大容量化にはSF₆ガス単独では冷却が不十分と考え、冷却に別の液体を使用する案が考えられていた。三菱はアメリカのWH社が開発していたパーフロロカーบอนを巻線上部から降りかけ、その蒸発時の吸熱により巻線を冷却する蒸発冷却方式を手がけ、1980年にその試適用器として北摂SS向けとして77kV 40MVA器を出荷している。その後の大容量化では液流下式に変更して取り組んでいった。一方東芝は東京電力との間で1983年から開発に取り組んだ。ここではGE社が手がけていた巻線にアルミシートを、絶縁にPETフィルムを使用し、巻線内に金属製のパネル形冷却板を巻き込みその中にパーフロロカーบอน液を流し、直接巻線を冷やすセパレート式冷却を採用した。日立も中部電力との間で同様にパーフロロカーบอนを使用した変圧器の開発に着手している。ここではタンク内の中身の回りにFRP絶縁筒でできた桶を設けて二重とし、その中にパーフロロカーบอน液を入れて中身を直接冷やすという液浸方式である。各社の構造概要と特徴をまとめて表5.1に示す⁽⁴⁶⁾。各社の方式とも解決すべき点が多くあり、開発実用化には時間がかかったが1989年に東芝が東京電力旭SS向けに世界で初めて154kV 200MVA器の大容量ガス絶縁変圧器の開発に成功した(写真5.12)。続いて1990年には各社が275kV 300MVAと250MVAの変圧器を開発し東京電力、関西電力および中部電力各社に納入している^{(47) (48) (49)}。



写真5.12 世界初の大容量ガス絶縁変圧器
東京電力旭SS向け154kV 200MVA (1989年 東芝製)

表5.1 液冷却式ガス絶縁変圧器の構造概要

冷却方式	液 冷 却 式		
	液 流 下 式	液 浸 式	セパレート式
構成例			
巻線構造	矩形平板巻線	円板巻線	シート巻線
鉄心構造	外鉄形	内鉄形	内鉄形
電圧 (kV)	275	275	154, 275
容量 (MVA)	300	150, 250	200, 300
定格圧力 (MPa)	0.1~0.2	0.35	0.4
本体ガス容積 (m ³)	80~100	23.4, 24.4	130, 135
冷却媒体	PFC液	PFC液	PFC液
巻線絶縁被覆	PPSフィルム	アラミド紙	PETフィルム
絶縁媒体	巻線内部	SF ₆ ガス	PFC液
	対地	SF ₆ ガス	SF ₆ ガス
冷却媒体循環方式	強制循環	強制循環	強制循環
特徴	SF ₆ ガスと冷却液混在 圧力調整装置により運転圧力が低い	SF ₆ ガスと冷却液分離 絶縁筒内に鉄心、巻線を液浸	SF ₆ ガスと冷却液分離 冷却パネルで鉄心、巻線を冷却

(2) 液冷却式ガス絶縁変圧器の課題

従来の油入変圧器とは構造がまったく異なり、それぞれの方式で各種解決しなければならない数多くの課題を抱えていたが、これを計画的にクリアし、またその信頼性調査も実施して実用化までこぎつけたことは流動帯電事故以来根づいた基礎開発技術力の賜物と考える。

しかし、この変圧器は従来の油入変圧器が絶縁と冷却に共通の油を使用しているため構造がシンプルであるのに比べ、巻線冷却のために特別な構造を必要とし、そのための費用がかかること、また冷却用のパーフロ

ロカーボン液が非常に高価であることもあり、変圧器としてのコストが従来の油入変圧器の2~3倍となり、とても一般的にこの変圧器を適用することは困難と考えられた。

(3) 大容量ガス冷却変圧器の実現

地下変電所では変圧器のほかに分路リアクトルも必要となるが、東芝ではこのリアクトルのガス絶縁化実現にはブロック化された鉄心冷却に冷却パネルを取り付けるセパレート冷却方式の適用は困難なため、ガス

で直接冷却するための研究を行っていたが、その成功から300MVA級の変圧器もガスで冷却が可能との見込みを得て開発の方向を変更し、1994年に東京電力東新宿SS向け275kV 300MVAをガス冷却で製作することに成功した。写真5.13にその外形を、写真5.14に外見は油入変圧器と変わらない中身写真を示す⁽⁵⁰⁾。従来不



写真5.13 ガス冷却275kV 300MVA変圧器 東京電力東新宿SS向け (1994年 東芝製)

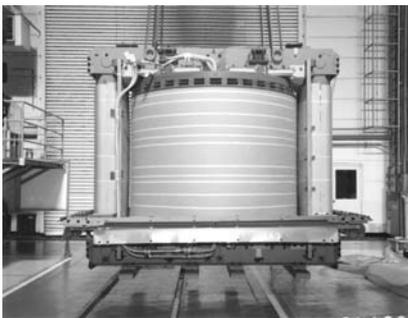


写真5.14 東新宿向け変圧器中身

可能と考えられていたガス冷却に対してガス圧力の上昇、絶縁物の耐熱性のアップ、大容量高ガス圧プロアの開発および巻線内ガス流のコントロールによる巻線温度の均一化などの技術によって達成したもので、これも新技術開発力の向上が大きく貢献したものである。現在東京電力ではこのガス絶縁変圧器が油入変圧器に代わり地下変電所向け変圧器の主流となっており、この方式は中国電力向け220kV 300MVAや初の輸出向けとしてオーストラリア向け345kV 400MVA器としても採用されている。なお、液冷却式ガス絶縁変圧器については日立が中部電力向けとして275kV 450MVAという地下変電所として最大容量となるガス絶縁変圧器を液浸方式で1998年に完成し納入しているのが最後である(写真5.15)。

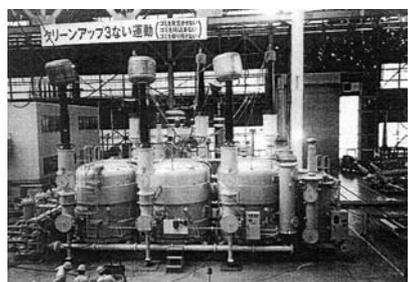


写真5.15 最大容量ガス絶縁変圧器 中部電力名城SS向け275kV 450MVA (1998年 日立製)

5.7 UHV実証試験器

(1) UHV送電計画の再開

UHV送電に関する技術開発は1978年UHV送電特別委員会が設置され、基礎的事項の研究、開発研究および実証試験の研究ステップを踏んで進められ、その中で送電電圧として公称電圧1000kV、最高電圧1100kVが選定された。また、UHV機器については詳細な概念設計、基本仕様の検討を行った結果とメーカーにおける要素モデル・プロトタイプ変圧器による研究結果から、十分信頼性の高い機器の実現が可能であることが明らかにされた。さらに高性能酸化亜鉛形避雷器の開発により、試験電圧値を70%程度に低減、合理化することが可能であることが明らかにされた⁽³⁹⁾。UHV送電に関しては以上の結論が1982年に得られたものの、1980年代に経済成長が高度成長から安定成長に移行したこともあり、その実現は大幅に遅れることとなりUHVに関する研究は中断を余儀なくされた。

しかし、いったん延期されていたUHV計画も1990年代に入り、21世紀初頭に東京電力で運転を開始する、その前に1995年から2年間の実証試験を実施するという案が急に浮上し、それに向けての技術的問題点の抽出、機器の仕様固めおよび1980年代に中断した実器製作を前にした実規模モデルの検証を進めることになった。

(2) UHV実証試験用変圧器

実証試験用変圧器の定格は電圧が1050/525/147kVバンク変圧器容量3000MVAでタップ範囲は7%と決まり、日立、東芝および三菱の三社に一相ずつ発注された。設計的には既に開発済みであった絶縁技術を踏襲することになり、単相1000MVAを2タンクで構成し、ブッシングは2タンクの間から引き出す構造と決まった。実証試験器に先行して1タンク分の先行試作器を製作し、限度試験まで行った後実器を製作した。実証試験器は1993年に完成し、新榛名変電所で2年間にわたる検証を行うこととなった⁽⁵¹⁾。現地据付状態のUHV実証試験器を写真5.16に示す。検証の過程で現地



写真5.16 UHV実証試験設備 東京電力新榛名SS (1993年 左から東芝、三菱、日立製)

試験回路上の問題や500kV変圧器で経験したのとは異なるタイプの流動帯電問題の発生があり、UHVの実用化に対して新しい課題が見つかり、実証試験を実施したことの意義が見出された。また、UHV送電線は先行して建設されて現在500kVで運転されているが、これに接続される500kV変圧器が雷サージで絶縁破壊するといった事故が起こり、原因調査の結果UHV送電線では標準の波形よりも波尾の長い波形の電圧が変圧器に侵入し、このため変圧器内部に大きなストレスがかかることが判明するなど500kVでは経験しなかったような新しい問題が生じている。

当初は21世紀初頭には運転を開始するとの計画であったが、その後バブル崩壊後の電力需要が頭打ちとなったため、現在計画は凍結になったままとされており、UHVがいつ実現するか明らかでない。

5.8 直流変換用変圧器と直流送電

(1) 直流変換用変圧器の登場

わが国の交直変換用変圧器は1964年電源開発佐久間周波数変換所に三菱電機が納入した275kV 368MVAおよび353MVA変圧器が最初で(写真5.17)⁽⁵²⁾、このと



写真5.17 初の周波数変換用変圧器 電源開発佐久間FC (1964年 三菱製)

きのバルブは水銀整流器でスウェーデン製のものが使用された。その後1970年には水銀整流器に代わる国産サイリスタバルブによる長期実証試験を電源開発が行い、日立と東芝が参加して変換用変圧器も製作している。この当時の変換用変圧器の技術的問題点としては励磁電流に各相のバルブ制御角のずれに起因して発生する直流分が乗ることによる鉄心の**直流偏磁**とそれによる騒音の増大および直流電圧に対する絶縁問題さらに高調波電流に対する損失・温度上昇の増加であった。サイリスタバルブによる実用運転の最初は東京電力新信濃周波数変換所でタンク内に油漬けにしたサイリスタバルブを使用して行われた。これは東京電力と中部電力間の電力融通を行うために50Hzと60Hzの周波数変換を間に直流変換を介して行おうというものである。変圧器としては187MVA 275kV/110kVの定格

となっている。

(2) 直流送電の開始

わが国の直流送電としては1979年に運転が開始された電源開発の北海道—本州連系が最初で、1978年に変換用変圧器が北海道側は日立、本州側は東芝から納入された。定格は187MVA 275/125kVと新信濃とほぼ同一である。その後第2期分として直流電圧が±250kVとかさあげされることになり、直流耐圧も±450kVとそれまでの2倍になった。直流絶縁は交流絶縁と比較して絶縁物と油道にかかる電圧分担比率が異なるため絶縁構成を従来の交流絶縁とは変更する必要があるが、直流耐圧が2倍になったことで絶縁構造に対するモデル検証を先行させて行い、実器製作を行っている。第2期分は1979年に納入されている。250kV直流送電用変圧器外形を写真5.18に示す。



写真5.18 250kV直流送電用変圧器 電源開発函館変換所 (1979年 日立製)

(3) 電力融通と500kV直流送電

その後もこれら各電力間の電力融通強化のために増設が行われてきた。図5.3⁽⁵³⁾にわが国における直流変換を伴った変換所の分布図を示す。直流送電が2箇所、周波数変換所(FC)が3箇所(内1箇所は未運開)と、同一周波数の連系であるが中部電力と北陸電力間で系統安定化のための変換所(BTB)が1箇所である。特にそ

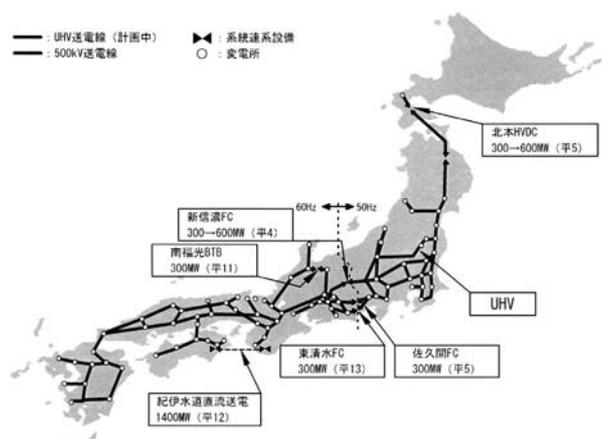


図5.3 わが国の電力システム構成

の中で注目すべきは四国と紀伊半島間を直流で結び四国電力と電源開発で発電した四国側の電力を関西電力に供給することを目的とした直流送電であろう。この計画は当初±250kVで運転されるが、将来は±500kV運転を考慮して直流リアクトルなどは既に500kV用として据え付けられている。これに先行して500kV機器の開発が行われ、メーカーでの直流絶縁に対するモデル検証を経て関西電力山崎試験所において長期課電試験による信頼性検証が実施された。これら機器のうち変圧器とリアクトルについては日立、東芝および三菱の三社で製作を担当し、1997年から翌1998年に納入された(写真5.19)。なお、直流変換用変圧器は872MVA 500kVの定格が採用され、変換用変圧器としては過去最大容量である。



写真5.19 500kV直流リアクトル四国電力阿南変換所 (1997年 三菱製)

5.9 低損失化への指向

(1) 変圧器の損失評価

海外ではかなり以前から変圧器を系統に入れて運転した場合に発生するコストとして変圧器で発生する損失を価格に換算して変圧器の購入価格に上乘せして評価するのが一般となっていた。この損失の評価額は無負荷損失と負荷損失で差があるが、オイルショック以来この評価額は上昇し、特にエネルギーを外国に依存している国では例えば無負荷損で7000\$/kW、負荷損で3000\$/kWといったそれまでの価格に対して4倍程度に上昇した例もある。こうなると機器単独の価格よりも損失評価額の方のウェイトが大きくなり、損失をいかに少なくするかが競争力の最大のポイントとなった。

(2) 低損失化への指向

1980年代に入って国内市場も需要構造の変化から長期低成長時代へと変わり、わずかな物件をめぐってメーカーの競争も激しくなった。わが国では海外のような損失の価格評価を行う習慣はなく、本体の価格のみで評価されてきたが、このような状態となると価格面だけではなく損失の大小が受注の決め手としての良い手段となり、各社が損失の低減にしのぎを削った。特にUHVを開発した技術を500kV以下の機種に適用することによりそれら機器の中身質量の低減や構造の簡略化が可能となったた

め、各メーカーとも競ってこれら技術を適用して損失低減と構造の簡略化を目指すこととなった。

(3) 鉄損の低減施策

低損失化の施策として、まず鉄損の低減としては鉄心材料に高級材料を使用する方法で、レーザなどでけい素鋼板に機械的傷をつけて磁区を区分した磁区制御けい素鋼板の適用と、従来の標準的な厚さ0.35mmから0.3,0.27mmさらに0.23mmといった薄板けい素鋼板の適用がある。構造的には鉄心の接合部を階段状にずらせるステップラップ接合鉄心の採用が挙げられる。このほか鉄損の低減に効果のある方法として絶縁寸法の低減による変圧器質量の低減がある。この場合低減に効果があるのは主として鉄心材料で鉄損の低減に効果がある。しかし銅線の低減にはあまり効果がない。鉄心材料の改良による損失の低減は方向性けい素鋼板が技術導入されて以降は主に日本を中心にして進められ、1968年の高配向性けい素鋼板の開発や厚さ0.23mm材の導入、更には磁区制御けい素鋼板の開発など、日本の鉄鋼メーカーの技術力が世界を席卷し、現在も高級材料の供給は日本のメーカーがほぼ独占している。変圧器メーカーもこれら材料をいち早く採用し、海外との競争を有利に展開してきた。ちなみに使用している鉄心材料の損失は1960年代に方向性けい素鋼板を使用し始めてから現在までに約2/3に低減されている。これに絶縁技術の改良などによる使用鉄心材料の低減による損失低減も含めると50%以下にまで改善されている。

(4) 負荷損の低減施策

鉄損に比べ負荷損の場合、素材面での改善が見込まずその低減効果は少ない。負荷損の低減には主として薄い導体を複数本まとめて絶縁した多導体電線や奇数本の多数の導体を二列に配列し細かいピッチで機械的により合わせた転位電線を使用して巻線の渦電流損失の低減を図ることが主体で、この他にタンク面や中身構造材で発生する漂遊負荷損を磁気シールドの取り付けや鉄系構造材の幅を狭くするあるいはスリットを設けるなどして減らす方法が採られる。輸出向けで損失評価が非常に高い場合は変圧器の質量が増加して価格が上昇することになるが、電流密度を下げて抵抗損を低減する方法も採られることがある。

変電用500kV変圧器のように単相器を構成する並列巻線数を変化させることの出来るものはUHV開発技術を適用することにより負荷損の低減を達成することが可能であった。すなわち、それまで1000/3MVA器では2脚並列で構成していたものを1脚にすることに

より銅線使用量を大きく低減することができたが、それ以外の変圧器ではその割合は少ない。また、従来の巻線絶縁設計では電位振動をできるだけ改善することに注力し、ハイセルキャップ巻線などの工作性のあまり良くない構造を採用していたが、巻線の電位振動とその破壊メカニズムの調査の成果を採用することにより従来は適用が困難と考えられていた普通連続円板巻線を275kVやそれ以上の電圧に使用することが可能となった。さらに細い導体を使用した転位電線を採用することによって大容量器では抵抗損の30%程度も占める巻線渦電流損をその半分以下にまで減らすことが可能となるなど絶縁面での改良が工作性や損失面で大きく貢献することになった。

5.10 低騒音変圧器の一般化と防音対策の簡略化⁽⁵⁴⁾

(1) 低騒音変圧器の必要性

低騒音変圧器の需要は1950年代に単発的に出てきていたが、それはごく限られた場合であった。しかし、その後社会が豊かになるにしたがって産業による公害発生問題に敏感に反応するようになり、騒音についても例外ではなかった。当初は住宅地に接近して設置される二次変電所用変圧器を中心に低騒音化が進められた。しかし、その後1970年代に都市の騒音防止条例が強化され、郊外の一次変電所の大容量変圧器についても変電所の境界線での夜間の騒音を45dBといった値に下げることができた。変電所の構成も1970年代には変電機器には気中絶縁の機器が使用されていたが、その後ガス絶縁の開閉設備（GIS）に取って代われ、変電所の敷地面積が大幅に縮小したことから、変圧器に要求される騒音仕様値は境界線における値から逆算して与えられるため、それ以前の値よりも低い例えば60dBといった仕様値が与えられるようになった。

(2) 低騒音対策とその変遷

このような仕様に対して変圧器本体の対策としてはタンクの周囲に鉄板やコンクリート、あるいはコンクリートパネルなどの防音壁をめぐらし主に鉄心の磁わい振動によって発生する騒音を低減させていた。この他冷却装置から発生する騒音に対してはファンの回転数を低減させるか、クーラに吸音材を取り付けた防音風洞を設けて騒音を低減する方法が採られた。

変圧器本体に防音壁を取り付ける構造は現地での組立が容易なように工夫がこらされていったが、基礎工事や組立に多くの時間と労力を要し、現地作業をできるだけ簡略化しようとする当時の電力会社を含めた方

向にマッチしなくなっていた。

一方、騒音の発生源である鉄心材料についての改善が進んだのもこの時代である。高配向性けい素鋼板は結晶の配向性を改善するとともに、絶縁皮膜により張力を与えて磁気特性ならびに磁気ひずみ特性を改善していることから、従来の方向性けい素鋼板に比べ2～4dBの騒音低減が得られ、1970年代後半以降現在では一般的に適用されている。このほかステップラップ鉄心接合方式は当初無負荷損失の低減策として採用されていたが、接合部での磁束の流れに乱れが少なくなることから、磁わい振動、電磁振動が減少し、条件によっては15dBも低減することが分かり、まず、二次変電所用変圧器に採用され、30MVA級変圧器の防音壁のなし化を一般化した。大容量器でも鉄心積み作業性の悪さはあるが次第に採用が増加し、タンクビームへ取り付ける直付け遮音板との併用、あるいは磁束密度の低減も併せ適用することにより、300MVA級の変圧器でも防音壁なしで60dBといった低騒音を達成することが可能となり、現地作業の大幅な低減を達成している。直付け遮音板の構造を図5.4および図5.5に示す⁽⁵⁴⁾。また、写真5.20には防音壁なしで60dBを達成した300MVA器の外形を示す。

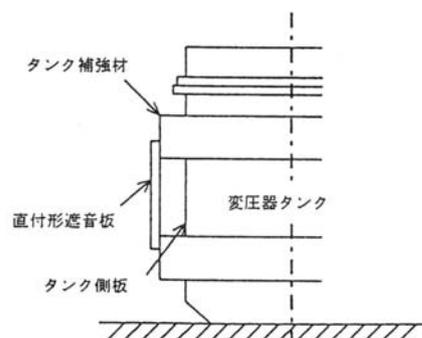


図5.4 直付け遮音板構造図

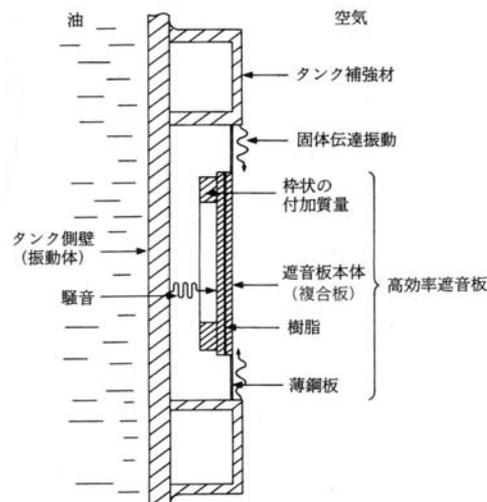


図5.5 直付け遮音板取り付け例詳細



写真5.20 防音壁なしで60dBを達成した300MVA変圧器（東北電力石巻SS）
（1992年 日立製）

このように最近では現地工事に多くの手間を要する大掛かりな防音壁の採用は特別に低騒音を指定された場合にのみ適用し、一般にはタンク直付け遮音板と鉄心構造あるいは磁束密度で対応して現地作業を簡略化するのが一般的となってきた。

5.11 輸送条件の変化と新分解輸送形変圧器

(1) 変圧器輸送条件の変化

昼間電力と夜間電力との差が大きくなり、ピーク負荷に対して揚水発電で対応する割合が増加し、1970年代以後大容量の揚水発電所が各所に建設されるようになったが、これら揚水発電所は立地条件による制約から大容量器の輸送が一番問題となる。この時代は変圧器にとって機器の信頼性をもっとも重要視されていた時代で、過去に行われていた分解輸送を採用することは考えられず、できるだけ工場で検証した状態を維持したまま輸送し、現地で工場の品質を再現させることが求められた。また、変圧器容量は発電機2台または3台分をまとめるケースもでてきた。このため輸送制限寸法、質量内で製品を設計製作するためには分割数を増加させて対応する他なく、単相器をさらに2分割や3分割するケースが生じてきた。1977年に製作された関西電力奥吉野揚水発電所向け500kV 680MVA器は単相を3分割した9分割構造を採用したもので、負荷時電圧調整器を含めると12分割となっている（写真5.21）。揚水発電所だけでなく変電所向けも1980年代には貨車輸送の合理化による輸送ルートの制約や輸送

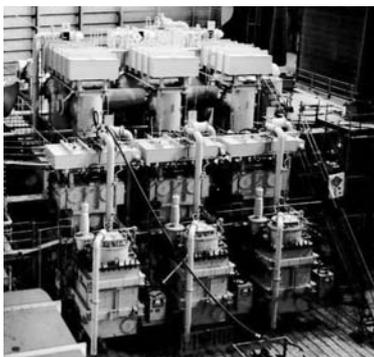


写真5.21 9分割輸送変圧器 関西電力奥吉野PS 680MVA（1977年 東芝製）

寸法、質量制限が厳しくなり、変電所の立地も都心から離れた山間部が増加したことなどから道路輸送も難しくなり、輸送に要する費用が大幅に増加するようになった。また、納入した変圧器で万一事故が発生し、修理のため工場に持ち帰りの必要性が生じた場合にも輸送手段がなくなる可能性もでてきて、これらに対処することが求められるようになってきた。

(2) 新分解輸送形変圧器

この問題を最初に手がけたのは関西電力と三菱電機で従来の分解輸送に対してコイルを一括してフィルムでパックし、分解時および現地での再組立時の吸湿をなくす構造を採用し、現地乾燥の省略を図った。さらに鉄心にも工夫して分解再組立が容易な構造とし、さらに現地組立の作業条件を工場並にするために組立式防塵作業室を採用するなど、電力会社の信頼性重視に配慮した構造と作業体制を作り1984年にモデルケースとして275kV 300MVA変圧器を神戸SSに納入している⁽⁵⁵⁾。この動きはその後他電力や他メーカーでも受け入れられ、鉄心構造の工夫や防塵作業室の改善、現地試験検証の必要性と試験項目の検討さらには試験設備の導入等を行い、1994年には従来単相器3台構成であった500kV 1000MVA器を三相器として構成し、輸送費の大幅な低減に加え、据付スペースの低減、損失の低減で電力会社にメリットをもたらすことが可能となり、その前後からこの方式を採用する電力会社が増加し、一般化するようになった。写真5.22に三相一体型1000MVAの500kV変圧器を示す。この方式にすると

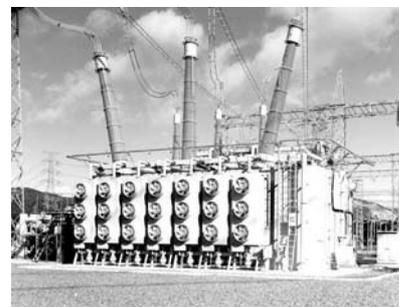


写真5.22 三相一体型500kV 新分解輸送形変圧器
中部電力西部SS 1000MVA（1996年 東芝製）

特殊貨車などは必要なく、一般のトレーラで工場や最寄りの港から輸送することができるため、特別な臨時貨車を走らせるための手間も必要なくなり、輸送間隔に対する制限がなくなることによってかえって組立に要する期間を短縮することも可能になるなどのメリットも生じている。今後この方式は輸送の困難さと無関係に増加する可能性が多いと考える。

5.12 劣化診断と寿命延命化⁽⁵⁶⁾

1990年代に入り、バブル崩壊後の電力需要低迷および電力自由化への流れの中で電力会社は電力流通設備に対する投資を従来以上に絞る方向を打ち出してきた。ここで取り上げられた対策の一つが、戦後の電力需要の急成長で投入してきた変圧器が変圧器の寿命といわれる30年に達するものが増加し、その更新を検討する時期に入っていたが、その延命化を図って投資を減らそうというものである。具体的には変圧器の余寿命を算定し、そのぎりぎりまで使用しようとするもので、中には寿命により変圧器の損傷が起きる確率が高くなっても、損傷が実際に起きるまで使用するといった従来の信頼性重視の方向からの大幅な方向転換も考えられている。このため経年変圧器について実際に変圧器絶縁物の採取、具体的には更新変圧器については最も劣化が進むと考えられる巻線導体絶縁物を採取し、その劣化程度を紙の重合度や引っ張り強度によって判断してデータを積み上げ、あわせてリードなど変圧器内部点検で容易に採取できる部分の絶縁物からも

サンプルを採取してデータを取り、その関連性から簡単に変圧器の寿命を判断し、余寿命を算出しようとする動きが強くなり、電力会社とメーカー他による協同作業により寿命判定の判断基準の標準化が図られ、1999年に発行されている⁽⁵⁶⁾。現在変圧器の更新は1970年代に投入された原子力用変圧器は使用負荷率も高く、今後も機器としては30年程度の運転を期待されていることから、いずれ一回は更新する必要があるとして順次更新が始まっているが、石油火力などは従来のベース負荷用からピーク負荷用としての利用に代わっているため平均負荷率が低いこともありその更新は進んでいない。また、比較的初期に製作されたものは機器の運転効率が低く経済的でないこともあり、次第に廃棄の方向にあり、運転休止の設備が増加している。

一方、変電用変圧器は従来信頼性を重視して海外に比べると過剰な設備を投入し、万一の事故時にも変圧器の過負荷を避ける運用を行っていたため、平均の負荷率は発電所に比べると低く、30年といわれる寿命に達した変圧器でもその劣化度は少なく、今後も電力需要の大きな変化がない限り、劣化度をチェックしながら長期に使用していくことが予想される。

6 | 技術の系統化

6.1 戦前における変圧器

(1) 揺籃期の変圧器

前節までで時代を追って変圧器の技術的進歩の経過を説明してきたが、ここで時代ごとに技術を整理して振り返ってみる。

揺籃期においてはまず海外製品の模倣に始まっている。模倣が始まったのは変圧器が開発されてから10年後のことであった。当時はまず電灯照明用として1000V程度の低電圧での配電からスタートしているが、その後電力としての応用が進むことになり、変圧器としても高電圧大容量化によって対応することになる。スタート時点では空気絶縁で空気冷却であったが、まもなく油を絶縁および冷却媒体として使用する案が考案され、油に鉱油を利用することとなる。しかし、当時の鉄心材料は薄板の軟鉄鋼板であり、発生損失が大きくまた経時的にも特性が変化して、損失が増加するという問題があった。しかしこの問題は1900年にイギリスのHadfieldがけい素鋼板を発明し、1903年に工業化されて変圧器に適用されるようになって大きく改善されることになった。わが国の変圧器大容量化も1910年にけい素鋼板を輸入適用するようになって急速に進展することになる。ちょうどこの頃に海外メーカーとの技術提携も開始され、海外の進んだ技術が導入されることになり、わが国の変圧器技術の進歩が加速されることになった。大容量化に対してのもう一つの問題は冷却である。当初は発熱量も少なく自然冷却ですんでいたものが、大容量化高電圧化によって中身の冷却と全体の冷却の二段階冷却とし、中身の冷却に対しては油の自然対流による冷却を利用し、全体の冷却についてはタンクからの放熱だけでは不足するようになると、当時は放熱器がまだ開発されていなく、まず水配管をタンク内面に取り付けて水で冷却する水冷式が採り入れられた。放熱器による冷却は1916年にラジエータが開発されてからとなるが、当初は薄板に対する溶接技術が不完全で油漏れが多く、まだ一般的に適用されるまでには至らなかった。その後1920年代に入り、冷却設計技術と放熱器の製造技術が向上すると自冷式変圧器の適用が増加し、1920年代後半にはわが国で世界的な容量記録品が作られるまでになった。その後さらに大容量化が進むと中身の冷却に対しても油をポンプで強制的に循環する送油方式が一般的となった。ド

イツなどでは古くから送油風冷式が採用されていたが、日本での採用は遅く1926年のことで、現在一般的に採用されているユニットクーラ方式は1940年代に入ってからとなる。

(2) 戦前における変圧器の隆盛

昭和に入って変圧器は発展の時代に入る。そのきっかけとなったのはわが国初の154kV変圧器で、輸入品に遅れること3年で国産器を1926年に納入しているが、この変圧器が順調に運転を続けたことから、その後は海外からの輸入は減りほとんど国産器が使用されることになった。また、朝鮮半島での電力の開発も変圧器の発展には大きな役割を果たしている。最初の大規模な発電計画が成功すると、その後も次々と発電計画が立てられ、当時の記録的製品が製作された。その一つが東洋で初の超高圧220kV送電の実現で、1939年に220kV 80MVA器が完成している。その後当時の世界最大容量に並ぶ100MVA器も製作され、日本の変圧器製作技術は世界レベルに達したとみなされる。しかし、この当時発生した鉄心の溶損事故を考えると当時の技術レベルは世界的にも大差無かったかとも考えられるが、製造技術、品質管理などが不十分であるにもかかわらず、背伸びして記録器を製作したことによるひずみが表面化したものと考えられる。

当初の10MVAを超える大容量器は輸送手段が無く分解して輸送し、現地で再組立、再乾燥していた。このため組立に日数も必要としていた。朝鮮での大容量器もすべて分解輸送されており、現地組立における作業管理や乾燥の不十分さが鉄心溶損事故の原因の一つと考えられる。組立輸送については鉄道の輸送限界が欧米に比べ小さいことから大きく立ち後れていたが、1920年代後半になると組立輸送が指向されるようになり、特殊貨車による輸送限界の有効利用や油を窒素に置換することにより輸送質量を低減する方法が採られるようになった。このようにして戦前に39MVA器までが貨車輸送されることになった。

(3) 耐雷設計とインパルス試験

戦前の最大の技術的関心事は雷サージの侵入に対して変圧器を事故から如何に守るかということであった。1915年にドイツのWagnerが変圧器内部のサージに対する振る舞いは送電線と同様に進行波理論によって説明できることを発表して以来、巻線の雷サージに

対する検討が各国で進められ、日本でも大学を中心に大いに研究された。変圧器では線路端に近い部分での巻線内の故障例が多いことからその部分の絶縁を強化する方式がわが国では1920年頃から適用されていたが、各国ではサージに対する特性の優れた巻線の開発が進められた。しかし、日本では欧米の中性点を直接接地する送電方式とは異なり、高抵抗接地となっており、雷サージによる電圧分担が異なるためこれら巻線は適用できないとして採用されなかった。しかし、その後メーカでの電位分布測定の実施などによりその後発表されたサージプルーフ巻線や部分遮へい巻線が電位分布改善に効果があることを確認し、1930年代に次第に標準適用するようになっていった。しかし、この当時はこのようにして設計した変圧器が本当に耐雷特性を持っているのか確認することはなかった。1920年代にアメリカで送電線と変圧器などの機器との絶縁協調の問題についての議論がなされ、1930年にそれを実証する目的からGE社で初のインパルス試験が実施された。その後アメリカでインパルス試験が規格化されたが、日本でもこれを受けて規格化のための委員会が組織され、議論を経て終戦間際の1945年に規格として発行された。なお、日本におけるインパルス試験は1937年に当時の鉄道省向け154kV変圧器に対して実施されたのが最初で、線路端部分を絶縁強化した巻線構造が採られていたが、その当時の絶縁構造の妥当性が実証されることになった。

(4) 負荷時タップ切換装置

この時代のもう一つの技術テーマは負荷時タップ切換装置の開発である。負荷の変動に対して電圧を一定に保つために運転中にタップを切り換える負荷時タップ切換装置が開発されたのは1920年代中頃のことでタップを切り換えるときに一時的に異なるタップ位置を橋絡することになるが、このときに流れる循環電流を抑制する方式に限流リアクトルを使用する方法がまずアメリカで開発され、続いてドイツで抵抗を使用する方法が開発された。日本ではアメリカ式の限流リアクトルによる方法がまず採り入れられ、1930年に最初の製品が出荷されている。その後一二年で急速に進歩を遂げて大容量化がなされ、その後電力の潮流制御を目的とした電圧位相調整装置も1933年には導入されるま

でになった。なお、ドイツ式の抵抗式タップ切換装置も1935年にはわが国で実用化している。

(5) 不燃変圧器

環境問題についてはアメリカで不燃性絶縁油としてポリ塩化ビフェニール(PCB)が1920年代に開発され、日本でも国産化し1940年に最初の変圧器が出荷されている。しかし、価格面の問題もあり一般的適用にはいたらずに終戦を迎えた。なお、不燃性としてはこのほか乾式変圧器が古くから適用されていたが、冷却、電圧に制限がありその適用も限られていた。

(6) 規格制定

最後に信頼性の基となる規格については1922年に回転機も含めた電気機器標準規定JEC-9が初めて規定され、1934年に変圧器としての規格JEC-36が制定されて個別生産品である変圧器の品質の統一化が達成された。なお標準品としての柱上変圧器については1926年に日本標準規格JES31が規定されて特性、構造などが統一されている。また、JEC-36は戦時中に温度規制を緩和したJEC-36Zが戦時規格として発行されている。インパルス試験に関しては前述したように終戦間際にJEC-110として発行され、戦後の超高压送電開始に向けての体制が整ったことになる。

(7) 戦前の変圧器技術系統化

以上戦前の変圧器の技術的な流れをまとめたが、これを図示したのが図6.1である。また変圧器の主要テーマである高信頼性、大容量化、高電圧化、環境性および付属品について時系列的に主要技術および製品についての変遷を図6.2、図6.3に示す。図6.2は主要テーマごとに主要技術の開発状況とそのテーマのその時代の技術の流れを一言でまとめて図示したものである。図中吹き出し記事の右肩に枠の中に数字で表示してあるのは本文中の写真番号に対応したものである。図6.3は主要技術の時系列的変遷を示したもので、ハッチしてある技術は同時に並列的に使用されていた技術の中で大容量変圧器に主体として用いられていた技術である。また、技術の境界が斜めとなっているものは技術の切り替わりに時間を要したものである。また、主要技術および製品の開発時期を明記したものが表6.1である。

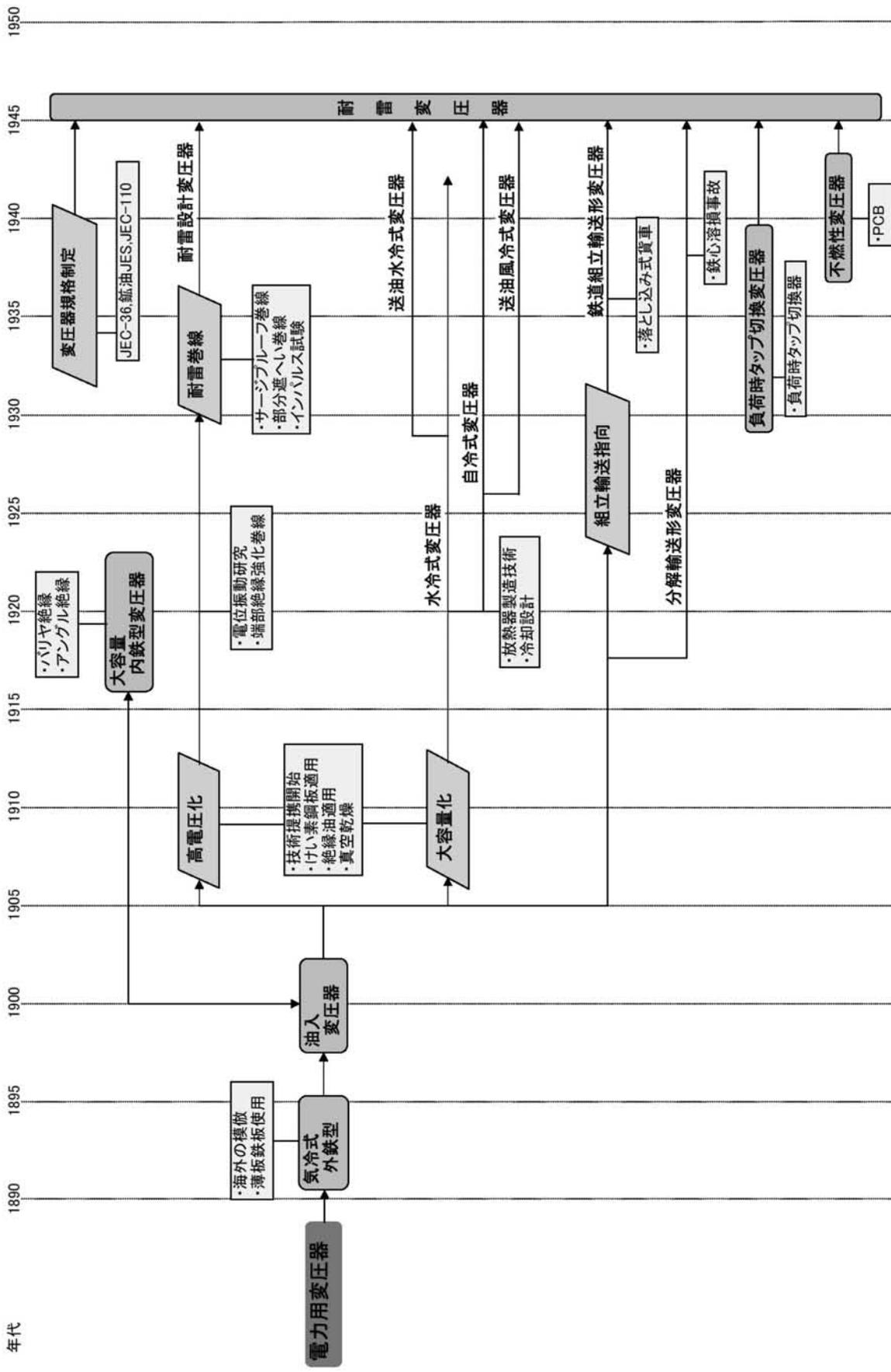


図6.1 変圧器の技術系統化（模倣から技術国産化まで）

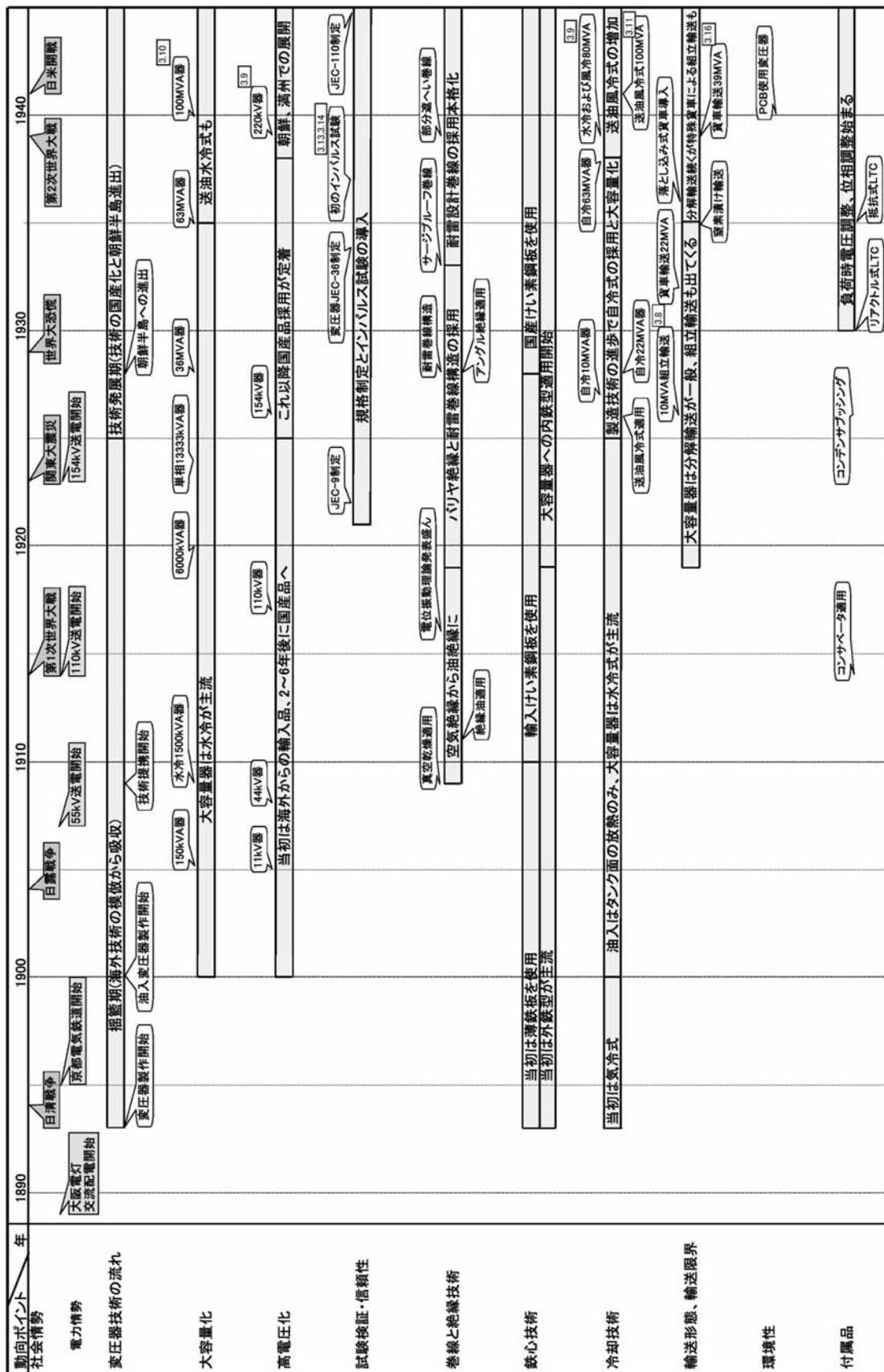


図6.2 変圧器の技術変遷（模倣から技術国産化まで）

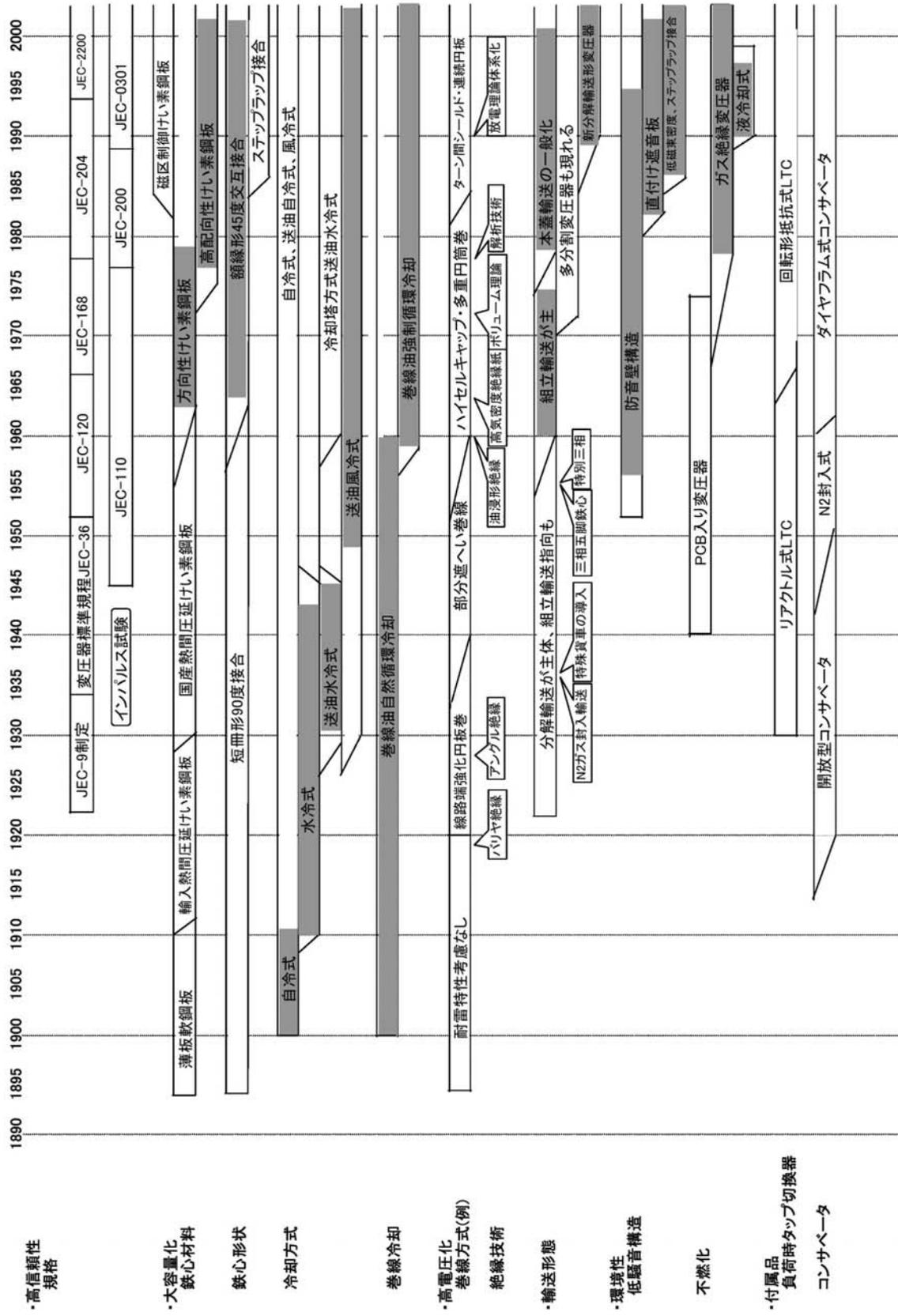


図6.3 主要技術の時系列変遷図

表6.1 変圧器主要開発技術と主要製品（1950年以前）

	1900年以前	1900年代	1910年代	1920年代	1930年代	1940年代
高信頼性 試験検証					○電位分布測定1933 ○インバルス電圧発生装置設置1934 ○インバルス試験実施1937	
規格				○電気機器標準規定JEC-9制定1922 ○変圧器規格JES-31発行1926 ○初の10MVA超過器製作1924	○JEC-36制定1934 ○戦時規格JEC-36Z発行1938	○鉱油系絶縁油のJES発行1941 ○インバルス試験規格JEC-110発行1945
大容量化		○油入変圧器製作開始1900 ○1500kVA器製作1909	○大容量器へ内鉄型適用開始1919 ○けい素鋼板適用開始1910	○国産けい素鋼板製造開始1922 ○送油風冷式適用1926 ○大容量10MVA器に自冷式適用1927	○送油水冷式30MVA1930	○バンクレンジエータ方式初適用1940 ○フィン付きユニットクーラ初適用1941 ○ユニットクーラ初適用1948
鉄心						
冷却		○風冷式1893 ○水入自冷式1900 ○水冷式適用1909頃				
輸送形態、方式				○10MVAを中身相立海上輸送1926 ○7.5MVAを油漬け輸送1928	○油漬け貨車輸送22MVA1932 ○容積カス漬け輸送初適用1935 ○落とし込み式貨車製作1936 ○特殊貨車による組立輸送1939	
高電圧化				○耐雷巻線構造の適用開始1928	○サージブールフ巻線適用開始1933 ○部分巻線適用開始1939	○多重円筒巻線初適用1940 ○中性点巻線方式初適用1948
巻線方式				○フランジカラーの適用1928		
絶縁材料			○絶縁油輸入適用開始1911 ○絶縁油国産開始1913 ○電位振動研究盛ん1916頃	○初の15kV器製作1926	○初の220kV変圧器1939	
絶縁技術						
環境性						
低騒音構造						
不燃化						○不燃性合成油(PCB)入り変圧器1940
付属品						
負荷時タップ切換器			○初の誘導電圧調整器製作1912		○初の負荷時電圧調整変圧器1930 ○抵抗式負荷時タップ切換器導入1935	○窒素封入式コンサベータ初適用1942
コンサベータ			○コンサベータ初適用1914			
クーラ、放熱器						
ブッシング						
代表的製品		○11kV,1500kVA甲府電力1905 ○44kV,1500kVA横浜電氣1909	○66kV,2500kVA九州水力1912 ○500kV試験用変圧器専大1915 ○110kV,4400kVA猪苗代水力1917	○初のコンデンサブッシング1926 ○77kV,1333kVA日本電力小曾根SS1924 ○154kV,6667kVA日本電力岐阜SS1926 ○140kV,22MVA自冷昭和電力八尾SS1928	○450kVALVR中国電氣1930 ○140kV,39MVA組立輸送東京電灯1939 ○220kV,80MVA長津江水電1939	○230kV,100MVA鶴緑江水電1940

6.2 戦後から1975年まで

(1) 275kV変圧器と海外技術導入

戦後の最初のエポック技術は関西電力新北陸幹線275kV送電線の完成とそれ用の変圧器の完成である。これら変圧器は新しい規格によりインパルス試験が規定されたもので、各社はそれぞれ戦前からの蓄積された技術に最新の技術も盛り込み完成させている。新しい技術としてはヨーロッパで開発された主ギャップ充填絶縁構造や無振動巻線(多重円筒巻線)、フォームフィットタンク構造、鉄心起立装置などが盛り込まれている。1952年には戦時中途絶えていた海外との技術提携が復活し、戦時中・戦後に開発された海外の新しい技術が数多くもたらされることとなった。この中には現在でも活用している多くの技術が含まれている。例えば方向性けい素鋼板と額縁形鉄心、気相乾燥、巻線強制冷却、転位電線などが挙げられる。この中でもアメリカArmco社が開発した方向性けい素鋼板はその後の鉄心の小形化に大いに効果を発揮し、変圧器の大容量化に威力を示した。当時の熱間圧延T級鉄心に比べ磁化特性が優れており、高磁束密度で使用できるため、その逆比率で1.3/1.7(約76%)に鉄心の小形化が可能となった。方向性けい素鋼板への切替は技術導入した国産の製品が市場に出回るようになった1962年頃に完了している。

絶縁技術についてもイギリスで開発されたハイセルキャップ巻線について早速開発を行い自己の技術として取り込み、その後の高電圧化の武器として活用している。特にこの巻線と素線絶縁紙として新しく開発した高気密度絶縁紙を組み合わせることによって、より絶縁特性のよい巻線を得ることができるようになった。このほかにも制振遮へい巻線のようにまったく日本オリジナルな巻線も開発されて高電圧化に貢献した。このような技術の適用により1952年に導入された275kV変圧器も1960年代に入るとより一層絶縁のコンパクト化が進むことになる。また、多重円筒巻線は転位電線と組み合わせることにより特に大容量変圧器の高圧巻線として活用され、1960年代から70年代の1000MVA級超大容量器へ珍重された。

(2) 変電用変圧器の大容量化とLRT化

戦後1950年代に入ると電力需要の増加から一次変電所変圧器容量は大容量化し、現地の据付作業を早くかつ容易に行うため、特殊貨車を使用しての組立輸送が一般化した。これを可能にしたのは前述の鉄心材料と

構造の他に三相五脚鉄心の使用、より大容量積載の特殊貨車の投入や特別三相器の開発のような輸送に対する工夫が挙げられる。また、1950年代の中頃には275kV器の組立輸送も実現しているが、これには耐雷巻線構造の改良により絶縁空間が巻線切断面に占める割合が大幅に低減されたのが寄与している。また、154kV系の中性点に段絶縁が採り入れられたことも見逃せない。これらの効果により戦前の貨車輸送限界は154kVで39MVAであったものが、1963年には中部電力西名古屋SS向けとして275kV 300MVAが出荷されるまでになった。

また、この時代になると配電用変圧器の負荷時タップ切替は一般的になったが、一次変電所向けでもその要求が増加してきた。この当時の負荷時タップ切替装置(LTC)はアメリカ式のリアクトルタイプが主流であり、一部ドイツ式の抵抗式が使用されていた。また、変圧器の方式も変圧器と直列に負荷時電圧調整器を接続する方式と本体内にタップ巻線を組み込んだ負荷時タップ切替変圧器(LRT)とが併用されていた。しかし、1960年代に入り一次変電所へのLTC採用の傾向はさらに強まり、同時に負荷時タップ切替器を変圧器タンクに内蔵し、変圧器本体と同時に輸送を行うLRTへの要求が変圧器の大容量化と同時に進行してきた。このような要求に対してリアクトル式は適しておらず、当時世界的に注目されていたドイツのLTC専門メーカーのMR社LTCが最適と判断され、変圧器メーカー三社が技術提携し導入することになった。以後今日に至るまでMR社が開発した機種がわが国でも主機種として活躍している。

(3) 付属品の変化

変圧器の冷却方式として戦前は水冷式が主流であったが、1950年代に入るとフィン付風冷クーラを直接変圧器本体に取り付けるようにし、ポンプと一体にして組み合わせたユニットクーラが現れ、さらに巻線内にポンプからの油を直接送り込む強制冷却方式が導入され、その後の大容量器の標準となった。冷却器には当初鉄のパイプに銅リボンを巻き付けろう付けしたものが採用されていたが、その後1960年代に入りアルミ製のパイプからフィンを絞り出したアルミクーラが登場してきて一般化した。しかし、その後1970年代に入りアルミクーラは特に海岸地域の発電所で塩害による孔食腐食の問題が発生したことから、変圧器の万一の火災事故に際して熱に弱く隣接バンクにも被害が及ぶことから鉄製のチューブに放熱板をはめ込んだタイプの鉄クーラに主流が移っている。

水冷式も1950年代末に都心地下変電所が建設されるようになると、冷却塔と組み合わせて水を循環して外気で冷却する方式が開発され、その後この方式が一般化した。都心地下変電所は1960年に154kV 100MVAの大容量変圧器が初めて導入され、その後1970年代には275kV系の都心導入により300MVAの大容量器が設置されるようになっていった。地下変電所の場合は変圧器の搬入口の制約、天井高さの制約、道路輸送制限などから特別三相タイプが適用され、組立などにも色々な工夫を凝らして対応している。

自冷式変圧器については50MVA以下器に主として使用されてきたが、その適用範囲の拡大につれて、放熱器の占積率を増やすため従来のオーバル形のチューブ断面形状からフラットタイプのチューブへと1960年代始めに変わってきている。また、これによりファン取付の場合のファン効果が増大し、風冷タイプの定格容量増加が可能となった。

コンサベータについては1950年代に入り、それまでの開放式のコンサベータから窒素封入タイプコンサベータが標準的に適用されるようになり、油の酸化劣化を大きく改善した。しかし、1960年にはアメリカで開発されたゴム膜によって油と空気を仕切るダイヤフラム方式が導入され、ゴム膜の国産化とその透過特性の確認を待って1960年代中頃にはダイヤフラム方式が標準方式として定着し、据付スペースの改善とその後一般化した油中ガス分析の分析精度向上に大いに貢献することとなった。

(4) 環境問題への対応

最後に環境問題について触れると1952年に初の低騒音仕様となる変圧器が都心地下変電所用変圧器で製作されている。これは配電用の15MVAであるが、大容量器としては1956年に東京電力戸田SS向け110MVA(写真6.1)が製作されている。しかし、この当時はま

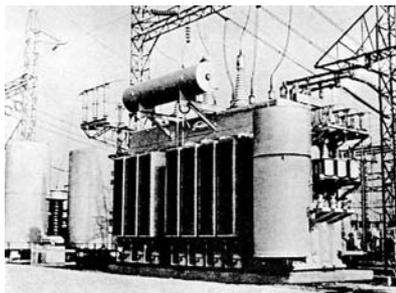


写真6.1 初の大容量低騒音変圧器 東京電力戸田SS 110MVA (1956年 東芝製)

だ都市の騒音に関する条例に縛られることなく騒音仕様の要求は単発的なものであった。しかし、特殊条件での需要はあり、遮音壁構造の低騒音変圧器やコン

クリート防音壁構造の変圧器などが1960年代始めにかけて登場している。いずれにしても1950年代始めに環境問題に対する意識が出始めたと解釈できる。

不燃性変圧器についても都心ビル地下にできた二次変電所用変圧器での需要がやはり単発的ではあったが1950年代中頃から出ており、60kV 10MVA級のPCB入り変圧器が公害問題でPCBの製作、使用が禁止される1970年代まで続いている。

(5) 導入技術からの脱却

1960年代に入り電力需要が大幅に増加し、各地に大容量火力発電所が建設された。発電所のタービンや発電機などの主機1号機はほとんどが輸入品で2号機以降に国産機が使用されることになっていたが、変圧器については1号器から国産品が使用された。これは戦前からの技術力に加え、戦後も新しい技術を精力的に導入してきたことにより、この時点で既に海外と肩を並べるまでに技術力が回復していたことによる。

これら大容量火力発電所向け変圧器の製作に当たっての一番の技術的課題は巻線もれ磁束による構造材の局部過熱であった。例えば上下タンク接合フランジ部が過熱し、ペンキが焦げるなどであった。これらの問題に対しては海外の技術提携先でもまだ問題解決するほどの経験を持っておらず、結局自らが解決せざるをえなかった。このため例えばタンク電磁シールドの取り付け方法や範囲なども試行錯誤しながら改良しており、場合によっては現地でも可燃性ガスが増加して対処するなどの問題も生じている。しかし、このようにしながら次第に問題を解決し、より大容量器に適用できる技術を蓄積していった。

また、変電所向け変圧器も鉄道組立輸送するのが標準となり、鉄道輸送限界内に中身を取めるために絶縁のコンパクト化を図るの必要があり、特にアメリカを中心にした導入技術では対応が困難で(コンパクト化による材料節減より工数低減や標準化を指向していたため)、独自の改良を必要とした。このようにして次第に海外からの導入技術から独立して独自の技術を確立していった。

(6) 500kV変圧器の開発

1960年代始めまでの国内電力の旺盛な需要が一段落すると、メーカーは仕事量を確保するために輸出向けに力を入れ始めた。国内の送電電圧も275kVが導入されて10年以上経ち、次の電圧として500kVが想定され、各社ではそれに備えて、モデル検証をスタートさせている。

当時海外でも500kVや400kV送電の計画が各国で立てられていたが、これらのうち国や州のような公共企業が計画しているものは、実績のないメーカーにも入札のチャンスがあり、わが国のメーカーはこぞって入札に参加し、カナダ、アメリカ、オーストラリアやメキシコなどから多量の500kVや400kV変圧器の受注に成功した。これら変圧器にはアメリカで500kV変圧器の運転当初に工場試験で合格した変圧器が相次いで絶縁破壊事故を引き起こしたことに鑑み導入された**部分放電試験**が仕様書で要求された。当時の製造工場は絶縁物や巻線を扱う工場でも外部との仕切りもなく、土足で自由に入出りができる状態であったため、このような環境で育成されてきた作業者に意識の変革を求めることは難しく、部分放電なしの変圧器を製作できるようになるためにはその後10年以上の日時を必要とした。無部分放電変圧器の達成の陰には当時の海外から派遣された試験立会官の経験豊富なアドバイスも大いに

に貢献している。例えば絶縁物の水分管理や油処理の技術などは彼らから得た情報を基にしたものが、現在のわが国の標準となっている。無部分放電の達成のためには非常に苦勞したが、これも当時の技術提携先では解決されていない技術で、やはり独自に解決する必要があった。

(7) 戦後から1975年までの技術系統化

以上戦後から1975年わが国500kV変圧器の開発まで海外技術からの脱却を果たすまでの技術の変遷を述べてきたが、これを技術的な流れとして示したのが図6.4である。また、主要テーマについて時系列的に主要技術および製品についての変遷を主要テーマごとに主要技術の開発状況とその時代の技術の流れを一言でまとめたものを図6.5に示す。表6.2は主要技術および製品の開発時期を明記したものである。

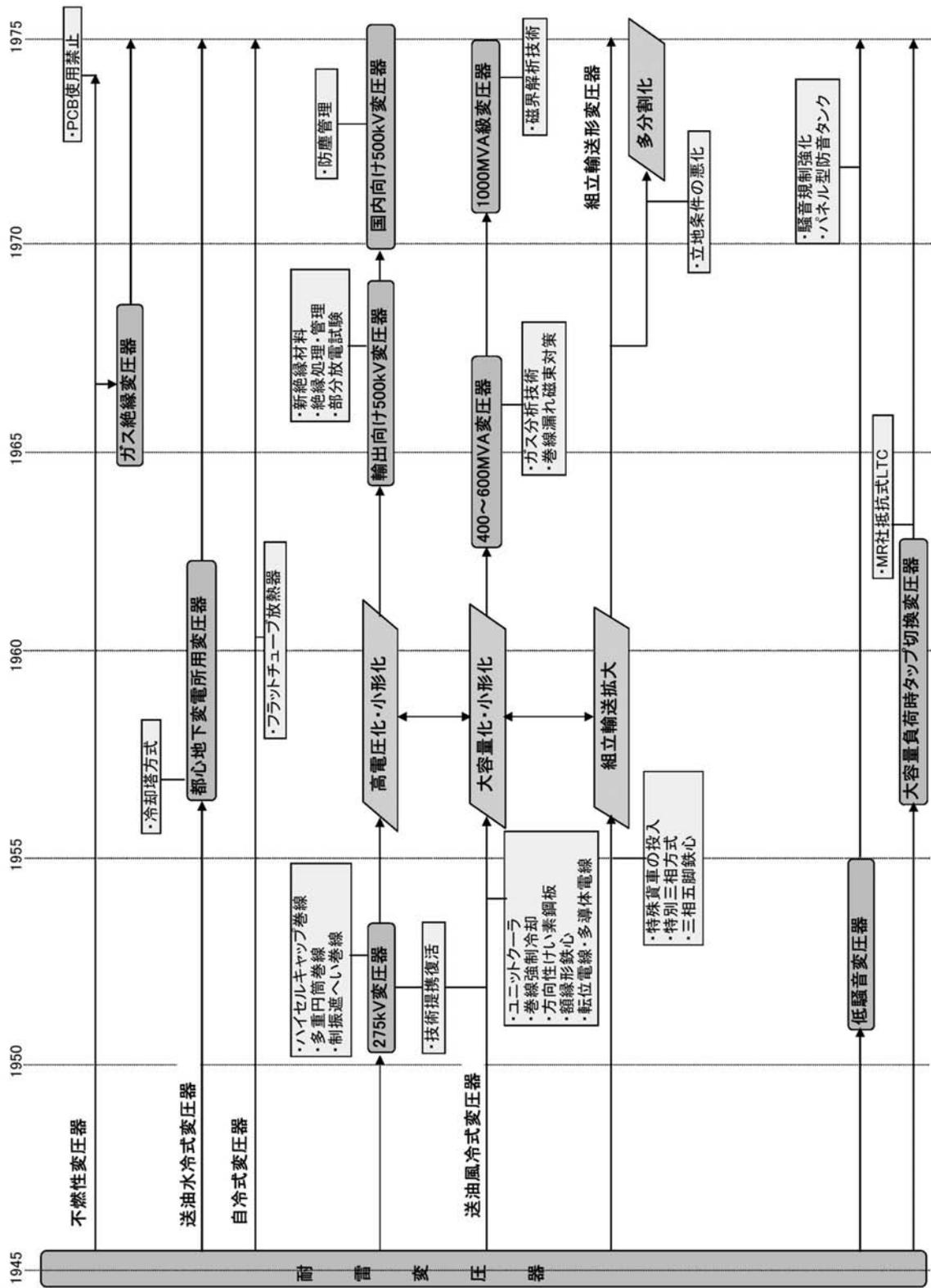


図6.4 変圧器の技術系統化（海外技術からの脱却）

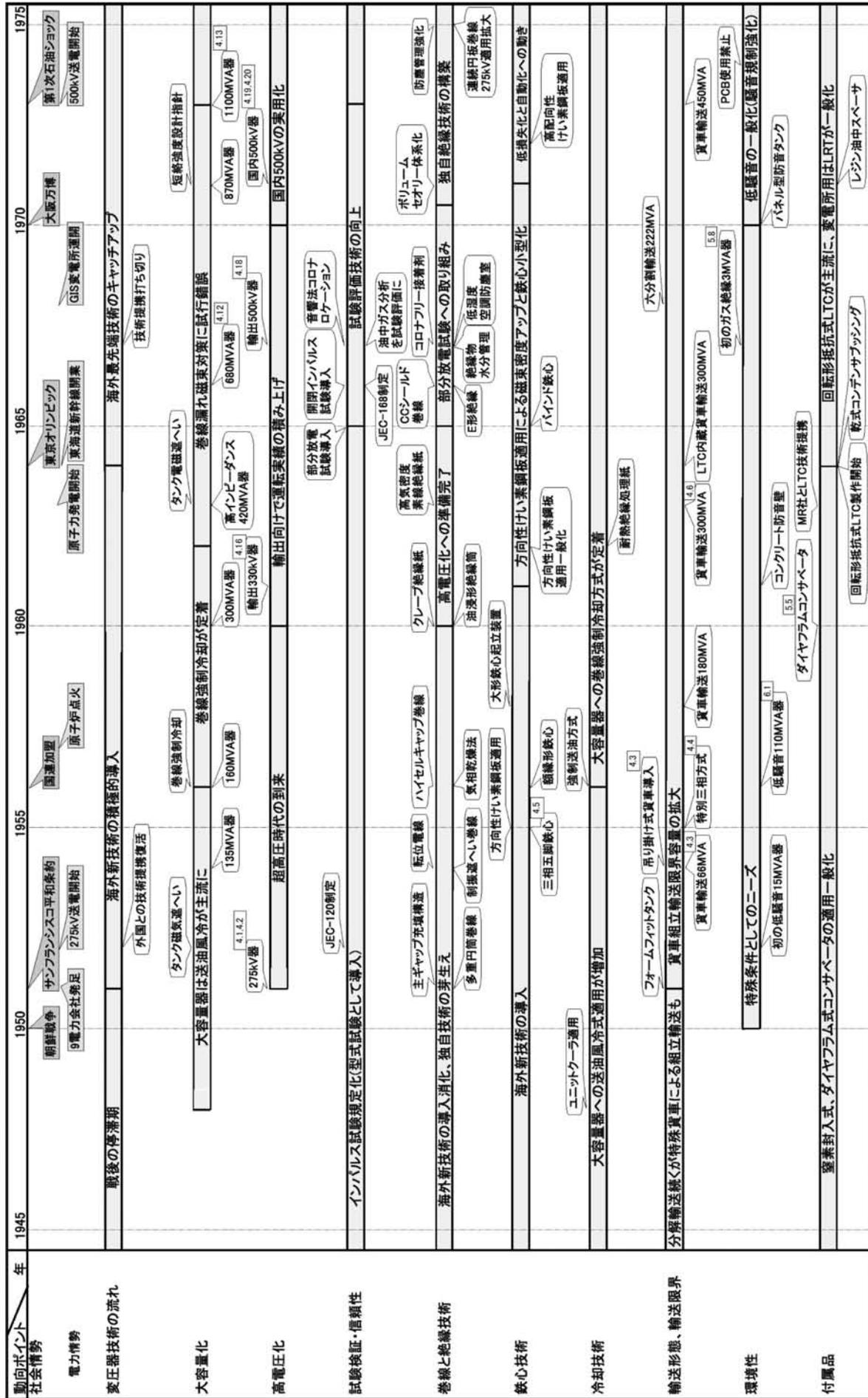


図6.5 変圧器の技術変遷（海外技術からの脱却）

表6.2 変圧器主要開発技術と主要製品（1950年以降）

	1950年代	1960年代	1970年代	1980年代	1990年代
高信頼性 試験検証・信頼性		○部分放電試験の導入1965 ○閉閉インパルス試験の導入1966 ○油中ガス分析を試験設備に適用1967 ○重層法コロナローション技術確立1967 ○JEC-169制定1966	○タンクドラング部遠化構造の採用1974 ○自動ガス分析装置の開発1977	○変圧器ブッシングの新構造設計法の確立1983	○変圧器劣化診断指針1999 ○油中ガス分析による診断指針1999 ○流動帯電に対する管理手法1999
規格	○JEC-120制定1952	○JEC-169制定1966	○JEC-204制定1978 ○変圧器耐震設計法規定1978	○油中ガス分析による保守基準制定1981	○JEC-2200制定1995
大容量化	○タンク磁気運へい適用1952 ○三相互鉄心初適用1955 ○三相互鉄心初適用1955 ○頭線形鉄心初適用1956 ○鉄心起立装置設置1958 ○鉄心抜き置き加工ライン構築1959 ○巻線強制冷却初適用1956 ○冷却方式水冷式開発1957	○タンク電磁運へい適用開始1963 ○ハイランド鉄心の採用1965	○高配向性けい素鋼板適用開始1972 ○ノーベキリング鉄心の一般化1975	○GEORG社鉄心自動切断機導入1980 ○地区制御けい素鋼板適用開始1982 ○ステッピング積み鉄心適用開始1984 ○鉄心脚自動積み設備適用開始1985	
冷却	○冷却方式水冷式開発1957				
輸送形態、輸送方式	○カムフィット形初適用1951 ○タンク傾倒し輸送1951 ○特別三相変圧器適用開始1955 ○吊り掛け式真車製作1955 ○フロートゲージ初適用1956	○LTC内蔵形変圧器の一般化1963 ○六分割輸送変圧器製作1968	○エアハレット式搬送法の導入1975 ○500kV変圧器の本カバール輸送一般化1977 ○エアヘアリングによる現地据付搬送1978	○新分解輸送形変圧器の適用開始1984	
高電圧化		○初の500kV変圧器製作1967	○国内向け500kV変圧器製作1971 ○UHV試作変圧器完成1978 ○熱着転位巻線適用開始1975 ○連続円板巻線超高压へ適用拡大1975	○UHV技術の500kV以下機種への適用1981	○UHVフィールド実証試験線器完成1993
巻線方式	○変圧器へ多重円筒巻線適用1951 ○制御運へい巻線初適用1954 ○転位巻線、被覆体巻線初適用1954 ○ハイセルエッジ巻線初適用1956	○CCCシート巻線適用開始1966 ○大形巻線巻線機の導入1966			
絶縁材料		○油浸形パッド接着絶縁適用開始1960 ○グループ絶縁適用開始1960 ○紙巻軟調、可とう調より線適用開始1960 ○耐熱絶縁紙適用開始1962	○高密度プレスボード適用1972 ○新絶縁材料の一般化1975	○OBTA添加絶縁油の適用開始1980 ○低誘電率プレスボード初適用1989	
絶縁技術	○初の275kV変圧器製作1951 ○主ギヤップ充填絶縁構造初適用1951 ○誘導乾燥法適用開始1951 ○熱電運へい方式初適用1951 ○気相乾燥法初適用1956	○つみみ形絶縁適用開始1962 ○E形絶縁方式適用開始1966 ○絶縁物水分管理導入1967 ○低湿度防塵空室の導入1967	○ポリウレタンセオリー体系化1971 ○流動帯電現象説明、防止技術確立1976 ○電界解析、電位振動解析技術確立1976	○複合絶縁の各種特性調査1980 ○ZnO避雷器油中適用タック巻線保護1982	
環境性 低騒音構造	○低騒音変圧器製作1952 ○運音構造低騒音変圧器製作1957	○コンクリート防音壁低騒音変圧器製作1961	○ハネル型防音タンク採用1970 ○騒音対策指針発行1977 ○PET使用ガス絶縁変圧器の製作1978	○高効率音響格の適用開始1981 ○防音板なし大容量低騒音変圧器開発1984 ○液冷却ガス絶縁大容量変圧器製作1989	○ガス冷却ガス絶縁変圧器の完成1994
不燃化 伊風品		○活線浄油機初適用1960 ○H-インMR社とLTC技術提携開始1963		○MR社新シリーズLTC適用開始1980 ○ガス絶縁LTC初適用1982 ○大容量ガス絶縁LTC完成1989	
負荷時タップ切替器					
コンサベータ		○ダイヤフラム式コンサベータ初適用1960			
クーラ、放熱器		○二重管式水冷クーラ接続型変圧器適用1960 ○275kVクーラ接続型変圧器適用1960 ○乾式コンサベータブッシング製作開始1964	○FRPブッシング適用高効率冷却器採用1979	○プレスボード油中スペース適用開始1984	
ブッシング					
代表的製品	○275kV/99MVA関西電力枚方SS1951 ○110MVA低騒音東京電力戸田SS1956 ○LTC内蔵54kV/75MVA東京電力蔵前SS1959 ○275kV/270MVA中部電力新名古屋PS1959 ○275kV/264MVA組立輸送電送東京電力SS1959	○154kV/100MVA地下変電所電力千代田SS1960 ○LTC内蔵275kV/300MVA東京電力SS1965 ○275kV/680MVA東京電力姉崎PS1966 ○500kV/200MVAカナダ向け1967 ○ガス絶縁66kV/3MVA第一生命1967	○500kV/333.3MVA東京電力新古河、房総SS1971 ○275kV/1100MVA東京電力PS1973 ○275kV/450MVA東京電力中電輸送SS1974 ○500kV/1100MVA東京電力PS1974 ○ガス絶縁66kV/1.0MVA国鉄上越新幹線1978	○765kV/800/3MVAベネズエラ1982 ○新分解輸送形275kV/300MVA関西電力1984 ○液冷却ガス絶縁154kV/200MVA東京電力1989	○液冷却ガス絶縁275kV/300MVA1990 ○防音板なし300MVA.60dB東北電石巻1992 ○UHVフィールド実証器東京電力新巻石SS1993 ○ガス冷却、絶縁275kV/300MVA東京電力1994 ○新分解輸送500kV/1000MVA中部電力1994

6.3 1975年以後独自技術による発展

(1) 流動帯電の克服とUHV技術

先の章で述べたようにこの時代は大容量化と高電圧化という大きな問題に対して独自に技術を開発して行く必要に迫られ、わが国の技術力は急速に高まっていった。

しかし、そのような中で起きたのが国内向け500kV変圧器の初期に起きた流動帯電による絶縁破壊事故である。これは従来の経験領域を超えた大容量高電圧器の製作にあたり導入技術を表面的に信じ、基礎に立ち返った検討なく油流路の設計を行ったことに起因するが、当時としては変圧器の中で摩擦静電気が問題になるとの認識を持っていた技術者は世界的にも皆無であったことは、言い訳かもしれないが最初に問題を起こした当事者として多少のなぐさめになる。この問題の解決には2年以上の歳月をかけて系統だった調査を行い、対策を確立した。その過程で基礎に立ち返った開発の重要性を痛切に感じて早速採り入れたが、その教訓がその後のUHV変圧器の開発や世界で初となる大容量ガス絶縁変圧器の開発実用化の成功をもたらしたものと考える。

この時代はわが国の変圧器技術が大きな発展を遂げた時代である。1970年代末には、わが国固有の厳しい鉄道輸送限界に対処するため油絶縁の根本にさかのぼって油中での放電メカニズムの究明に取り組んだ。その結果適切な絶縁構成を採用することと併せコンパクトで信頼性の高い絶縁構造を開発し、従来の500kV変圧器に対して2倍の電圧となるUHV変圧器製作を同一輸送限界内で達成させる技術の開発に成功した。この技術はUHV送電の実現が先延ばしとなったため500kV以下の機種に適用されて、これら機器の大幅な資源低減に貢献している。この時代は500kV変圧器での絶縁事故があったこともあり、また、コンピュータ社会になり電力システムの信頼性を求める情勢から電力会社では信頼性により重点を置くようになってきたため、初期の500kV変圧器では輸送時仮カバーで輸送し、現地に行ってから本カバーに交換するケースが一般的であったものが、輸送時も本カバーで輸送することが求められるようになった。また、一方で輸送条件も鉄道会社の合理化から特殊限界で輸送する変圧器のような製品に対して特別な対応を採らなくなってきたため、結果として輸送限界寸法がそれ以前より小さめに抑えられるようになった。このような要求に対しても前述の絶縁の合理化によって寸法の縮小を達成して本カバー輸送が一般的となっていった。

(2) 地下変電所の発展

一方、都市部での電力の消費が拡大するにつれて外輪線から都心部へ電力を供給するのに超高圧でそのまま都心に持ってきて、そこから二次変電所に供給することが行われるようになった。都心への電力搬送には電力ケーブルが使用され、地下に275kV 300MVA変圧器で構成される大規模な変電所を設けて、それを次第にネットワーク化していった。この地下変電所の発展には閉閉機器のガス絶縁化が大きく貢献している。このような地下変電所に対応する変圧器として特別三相方式が一般に適用されていたが、変圧器内部で万一絶縁事故が発生した場合、ネットワーク化が強化されるにつれて事故電流も大きくなり、一方で、事故時の変圧器タンクの変形膨張量は特別三相の場合は一般より少ないため、タンクが事故電流の遮断まで耐えられずに最も弱いタンクフランジ部から油を吹き火災に発展する可能性が心配された。この対策が検討され、防災タイプの地下変電所用変圧器構造を電力とメーカーが共同で決定し、既設の変圧器についても改造を行って対処するなどした。しかし、一方で1980年代には不燃性である大容量ガス絶縁変圧器の可能性についての研究が進められ各種方式で開発が進められた。

ケーブル系統の増加の一方で夜間の軽負荷時にはケーブルの充電容量のため、進み電流となりこれを補償する必要性から大容量の分路リアクトルの需要が増加してきた。当初は変圧器三次回路に入れて補償する方式を採っていたが、効率の点から直接275kV系統に接続する方法に代わり150MVA程度の大容量器が標準的に要求されるようになった。

(3) ガス絶縁変圧器の開発

ガス絶縁変圧器は絶縁材料としてフィルムが使用されるようになってからインパルス特性が大幅に向上し、実用化の域に入り、まず1978年から産業用や交通関係で主に地下変電所用として採用されるようになった。特にGISと一体化することによりコンパクトな変電設備を構成できる点が大きなポイントでもあった。その後ガスLTCも開発され電力会社の二次変電所用としての採用も出てきた。この場合従来の10MVA程度から30MVA程度に容量アップが求められ、また、自冷変圧器の要求も出てきたが、巻線冷却の効率化や高耐熱絶縁物の使用などによりこれをクリアした。現在はガス圧を高圧用容器の規制(最高使用圧力が0.2MPa以上)にかからないゲージ圧0.11~0.14MPaを使用する低ガス圧ガス絶縁変圧器が低容量の範囲で使用されているが、この製作可能容量も増加し、最大容

量としては161kV 68MVAが東北電力柳津西山地熱発電所向けとして1994年に製作されている(写真6.2)。



写真6.2 低ガス圧ガス絶縁変圧器 東北電力柳津西山PS 161kV 68MVA (1994年 東芝製)

一方、大容量ガス絶縁変圧器についてはアメリカで最初に開発に手を付けており、1980年代始めには300MVA級の変圧器の開発実用化を掲げて開発が進められていたが、レーガン政権で小さな政府のスローガンで財政の縮小を行ったあおりでこの計画は中止となった。日本でもこの計画に触発されて地下変電所の防災の観点からガス絶縁変圧器の開発が計画された。この当時はガス単独ではこのような大容量器の冷却は困難と考へて、安定な冷却材としてコンピュータ関係でも使用されていたパーフロロカーボンを冷却用媒体として使用することが考へられていた。この冷媒を使用して巻線および鉄心からの発熱を冷却する方法として各種の案が示され、日本では三菱、東芝および日立がそれぞれ別の方式で開発を進めた結果、まず東芝が1989年に世界で初めて200MVAの変圧器の実用化に成功し、翌1990年には各社が275kV 300MVAまたは250MVAの変圧器の開発に成功した。この開発は従来の変圧器が絶縁と冷却に油を使用しているために単純な構造であるのに対して、絶縁にはSF₆ガスを冷却にパーフロロカーボン液を使用するといった使い分けをするため、その分離の部分で多くの課題を抱えており、その開発・検証に多くの時間を要した。しかし、各社とも持てる技術力を大いに発揮してこの難問をクリアして製品化にこぎつけたものである。特に実績のない構造であるためその長期信頼性検証には各社力を入れて検証を実施している。

しかし、開発された変圧器は従来油入変圧器と比べて絶縁と冷却とに別の材料を使用しているため、特に冷却に費用が多くかかり、油入変圧器と比較すると生産設計された製品になったとしてもそのコストは油入変圧器の2倍以上かかることが予想され、これを防災のメリットだけで採用することは電力会社としてもできず、その先行きが心配されていた。しかし、この開発で高ガス圧容器の開発、高ガス圧中で使用するブローアの開発、耐熱性をアップさせたPET他の絶縁材料の開発およびコンピュータによる巻線内のガス流の解

析により最適な流路構成を形成し、巻線内の温度分布をできるだけ均一化する技術の開発などによってガス単独でも大量の熱を十分処理できる見込みが得られ、実規模モデルで確認してガス冷却の大容量変圧器が実現した。その第1号器は東芝によって東京電力東新宿SS向け275kV 300MVAとして1994年に製品化された。この開発により油入変圧器に対するコストアップも防災に要する費用や変圧器とGISの配置の自由度がアップするなどのメリットでほぼ相殺され、地下変電所へ油入変圧器に代わって適用することが可能と判断され、その後適用が増えている。

ガス絶縁変圧器は冷却的に油に劣る分と材料が割高であることから油入変圧器に比べると価格が高く、世界的には価格の安い油入変圧器が圧倒的に多い。現在ガス絶縁変圧器の需要は中国、香港、台湾などのアジアで人口が集中している都市が中心となっており、現在は供給できる技術力を持っているのは日本だけであるが、近いうちには合弁会社でも生産が始まると考へられている。しかし、これらは50MVA程度以下の変圧器についてであって、大容量変圧器についての需要は今のところ出ていない。しかし、最近オーストラリアで公園の地下変電所用としてガス絶縁変圧器の適用が決まり2003年に345kV 400MVA器がTMT&Dから出荷されている。

(4) UHV実証試験用変圧器

UHV変圧器の実現は先延ばしになっていたが1990年に入って21世紀初頭には東京電力で運転を開始するとの案が急に浮上して開発を再開することになった。500kV変圧器で運転当初に流動帯電という未知の問題に遭遇したことから、今回は事前に新しい問題が発生しないかを検証する意味で将来予定される変圧器の定格を決定し、その仕様を基に日立、東芝、三菱の三社が各一相分ずつ実変圧器を製作し、その変圧器で二年間の実証試験を新榛名変電所で実施することを東京電力が計画した。実証器の製作に先立って試作検証器を1/2相分製作して問題の有無を確認した上、絶縁の限度試験を実施している。2年間にわたる実証試験を延長して現在も試験を実施しているが、その間に従来とは異なる新しい問題も発生し、この実証試験の意義は達成されたと考へられる。なお、UHVの運転開始は変圧器技術者にとっては長年の大きな夢であったが、21世紀に入った現在いまだに実現の見通しは立っていない。

(5) 直流変換用変圧器

わが国の直流送電はまず50Hz地区と60Hz地区間の電

力融通を行うための周波数変換という形で始まった。その最初は1964年に電源開発が佐久間周波数変換所にスウェーデン製の水銀整流器を使用した変換器を導入したもので、変換用変圧器には三菱製が使用された。その後変換器は水銀整流器からサイリスタバルブに変わり、国産品の開発検証を経た後実製品として東京電力新信濃変換所に1977年最初のサイリスタ変換装置変換所が誕生した。この変換所では50Hz側と60Hz側とで東芝、日立が製作を分担し、変圧器も同様となっている。

わが国における直流送電の最初は北海道一本州間を結ぶ連系で1979年に運転を開始している。機器としては新信濃とほぼ同様で直流電圧は $\pm 125\text{kV}$ である。ここでは第2期工事で直流電圧をかさあげして $\pm 250\text{kV}$ とし翌年から運転を開始し約600MWの電力を本州と北海道間で融通し合っている。また、1999年には四国一紀伊半島間で直流送電が電源開発、関西電力および四国電力の共同開発の結果開始されている。ここでは直流電圧として第1次で $\pm 250\text{kV}$ とし、将来の2期工事で $\pm 500\text{kV}$ にかさあげする計画となっており、一部機器には既に500kV用の直流機器が納入されている。この機器の製作に先立ってモデル検証および電力会社での長期信頼性検証によって直流絶縁に対する問題を確認している。

(6) 低損失変圧器

UHVやガス絶縁変圧器あるいは直流送電といった新しい技術に目が向けられていた一方、一般の変圧器においても1980年代以降変化が現れている。

1980年代に入って国内市場が長期低成長となると従来はあまり問題とされていなかった損失に注目が集まり、低損失化の競争が起きた。UHV技術を500kV器以下に適用するにあたって、巻線には従来のハイセルキャップ巻線から転位電線を始め多導体電線を使用して巻線渦電流を減らすのに都合のよい連続円板巻線を主体とした構造を採用し、大容量器では抵抗損の30%にもなる渦電流損を半分以下にまで減らすことが可能となった。鉄心材料には新しく開発された低損失のけい素鋼板、鉄心構造としては接合部の磁束の流れがスムーズなステップラップ接合が新たに適用されるなどの改善もあり、これにUHV技術の適用による鉄心材料の低減とによって鉄損の低減が図られ、1960年代と比較すると1/2以下にまで低減されている。なお、500kV器では従来巻線は2脚並列の構造となっていたがUHV技術を適用することによりこれを1脚とすることが可能となり、使用材料の大幅な低減から損失の大幅な低減を達成している。

(7) 低騒音変圧器

損失に加えこの時代の差別化技術として注目されたのが低騒音変圧器である。変圧器の低騒音化は1970年代に都市の騒音防止条例が強化され一次変電所用変圧器でも一般化していたが、変電所のGIS化が進み変電所敷地が従来の気中変電所に比べ大幅に縮小されたことから、境界線での騒音が制限される新しい条例では従来以上に低騒音化を求められることとなった。さらに1980年代に入ると現地作業をできるだけ簡素化する動きが強まり、防音構造の簡略化が求められた。これに対して高配向性けい素鋼板の採用に加えステップラップ接合によって大幅な騒音低減が期待でき、磁束密度の低減と併せ採用することにより簡単な防音構造によって大容量器でも60dBの仕様を満たすことが可能となり、かつての大きな防音構造は次第に少なくなってきた。

(8) 分割輸送から分解輸送へ

1970年代以降大容量の揚水発電所の建設が各所に建設されるようになったが、これら揚水発電所は立地条件から機器の輸送が一番問題となる。特にこの時代は変圧器の信頼性が最も重視されていた時代で、過去に行われていた分解輸送の採用は考えられず、工場で検証した状態のまま輸送し、現地で工場の品質を再現することが求められていたことから変圧器の分割数を増やして対応するケースが増加してきた。一方、変電所用でも国鉄の貨物荷扱いの合理化、続いての国鉄民営化の影響から貨車輸送時のルート上の制約、輸送寸法と質量の制限強化さらには荷扱い駅の集約といった対策が打ち出され、また変電所の立地も都心から離れた山間部が増加するようになった。このため輸送にかかる費用も増加し、全体の費用の20%以上も輸送費が占めるケースも出てきてその対応が求められるようになった。関西電力と三菱電機は新しい形の分解輸送方法を提案し、1984年に300MVA変圧器で試適用した。この方法はコイルを一括してフィルムでバックして分解時および現地での再組立時の吸湿をなくす構造を採用したもので、現地乾燥の省略を図った。さらに鉄心構造や現地組立の作業条件を工場並みとするなど電力の信頼性重視の考え方に配慮した構造と作業体制を作ったものであった。この方法はその後他の電力、メーカーにも受け入れられ、鉄心構造の工夫や防塵作業室の改善、現地試験検証の必要性検討と試験設備の導入などを行い、その適用箇所も増加している。本体構造の複雑化と分解再組立のための作業時間の増加によるコストアップはあるものの、輸送費の大幅な低減に加え、三相一体構造適用による資源の節約、据付スペースの低減

と損失の低減などのメリットも得られこの新分解輸送変圧器構造は今後その適用範囲をより拡大することが予想される。

(9) 寿命予測と延命化

1990年代バブルの崩壊後電力需要は低迷し、電力の自由化の流れによるコスト抑制の動きもあり、電力会社の設備投資は極端に減ってきた。その中で戦後に製作した変圧器は寿命による更新の時期を迎えるものが増加してきた。これに対してこれら変圧器の劣化程度を調査し、変圧器の寿命を正確に把握する動きが出てきた。変圧器の寿命は使用している絶縁物が熱劣化によって機械的強度が低下し、外部事故時に流れる短絡電流で内部絶縁破壊に発展する可能性が増加することを目安としており、一般的には導体絶縁紙の強度が初期の1/4程度に低下した時点を寿命としている。ベースロードとして使用される原子力用変圧器は負荷率も高く、主要機器については60年程度使用することを考えて更新の投資を行っており、変圧器についても運転に入って30年程度経過するものが出てきてコイルの更新を実施するケースが最近でできた。

しかし変電用変圧器では電力の信頼性確保の観点からわが国では余裕を持った設備投資をしてきたため変圧器の負荷率は低く、また昼夜の負荷率の変動もあり、

平均の負荷率は50%を下回った値となっている。このため劣化の程度は一般に寿命といわれる30年を経過してもあまり低下しておらず、当面更新の動きは出ていない。このような観点から今後の変圧器の需要はますます低下することが考えられ、変圧器メーカーも合併統合を行い今後の生き残りを図ることが必要となった。欧米ではこういった動きは既に20年以上も前から起きており、これがいよいよ日本でも現実になったのである。

(10) 1975年以降の技術系統化

以上この時代を振り返ってみると前半は流動帯電事故を経験しそれを克服したことにより海外技術から完全に独り立ちして独自に技術を切り開く道を進み始め、UHV技術を確立し、世界で初めて大容量ガス絶縁変圧器の製品化に成功するなど輝かしい成果をおさめた。しかし、一方で従来製品で他社との差別化技術として低損失化や低騒音化あるいは輸送の簡易化といった分野で新しい技術が育った時代でもあった。1990年代以降景気の長期低迷から新しい技術開発テーマも少なくなり、事業の縮小が進む中で変圧器技術者が分散し技術が衰退していくことが心配される。

図6.6に技術的な流れを、図6.7に主要技術と製品についての変遷を示す。

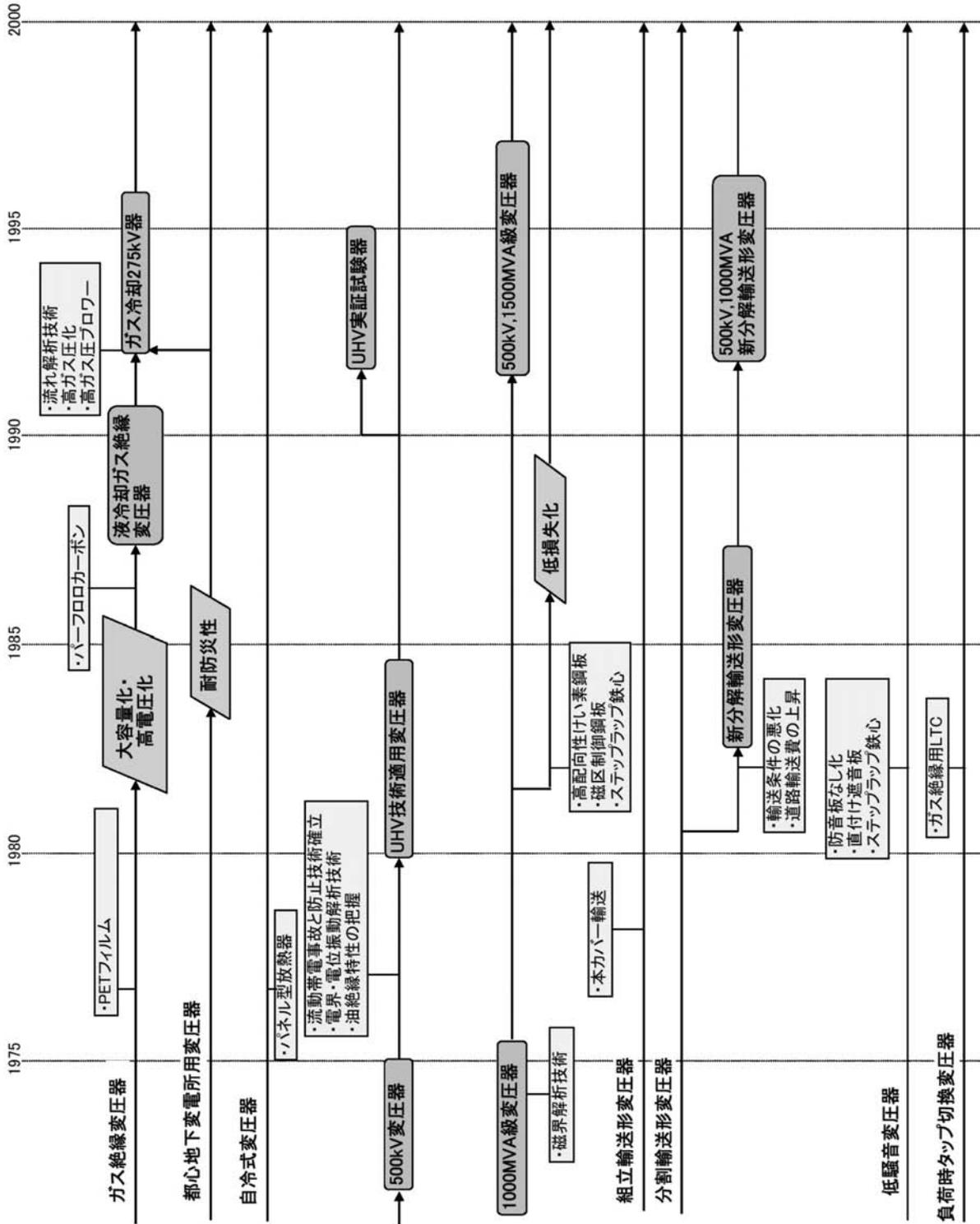


図6.6 変圧器の技術系統化（独自技術による発展）

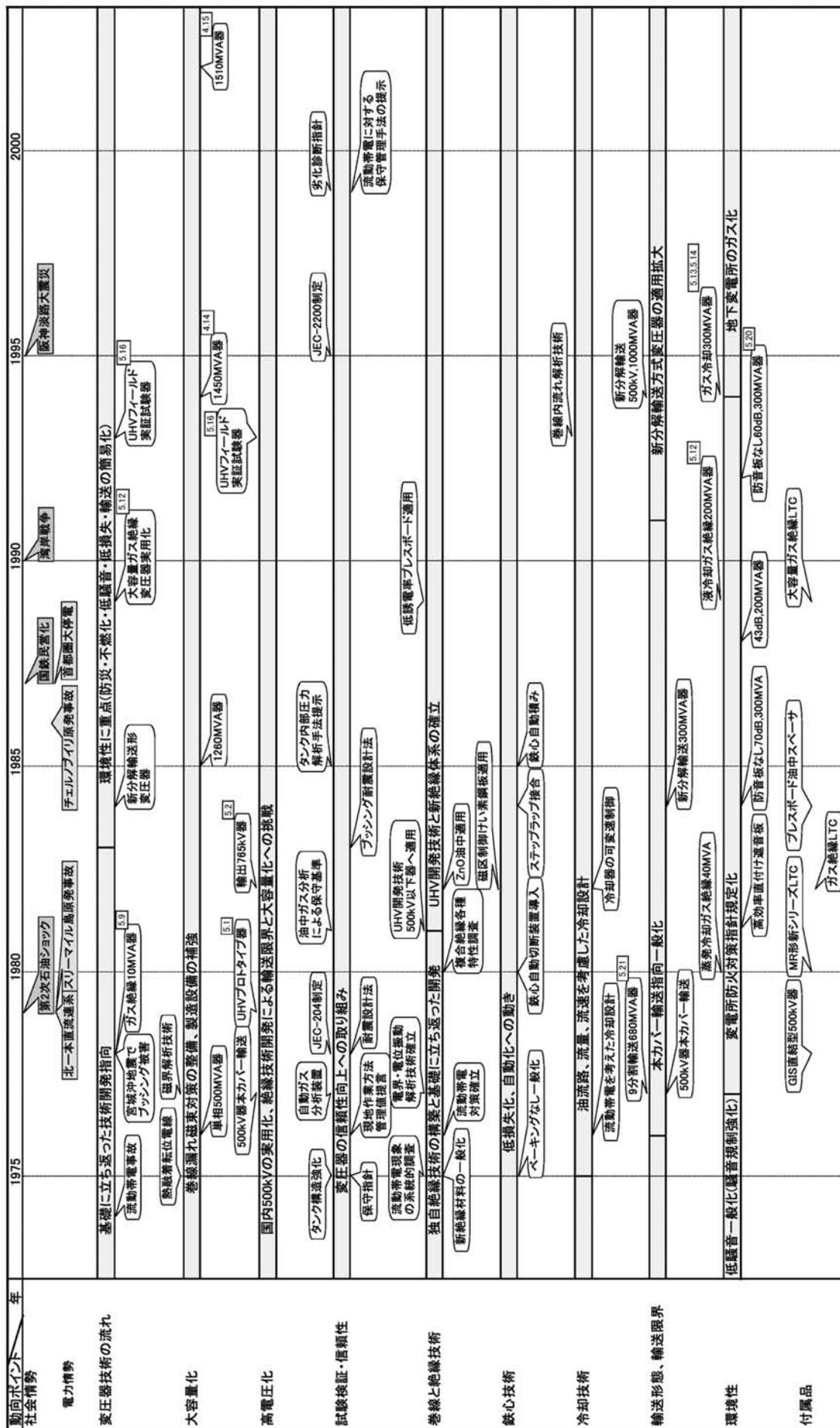


図6.7 変圧器の技術変遷 (独自技術による発展)

6.4 日本の変圧器技術の特色

最後にわが国の変圧器技術の特色について述べる。戦後復活した日本の変圧器技術の多くは技術提携をベースにアメリカから導入された技術に負うところが多かった。しかし、その後経済発展が進むにつれて彼我の産業構造の違いによる設計思想の違いのため彼らの設計をそのまま受け入れることが難しくなった。具体的にはアメリカでは労働力が高いため、できるだけ標準化して構造をシンプルとし、材料費よりも工数低減を優先した設計としていたが、当時の日本では材料費が高く、労働賃金は安かったことから手間がかかっても材料費を減らす設計を指向していた。そのため、変圧器大容量高電圧化の流れの中で500kV変圧器の開発では、わが国の鉄道輸送限界が欧米に比べて小さく、同じ設計思想では十分な余裕を持った製品とすることができず、多少構造が複雑でもコンパクト化を狙った設計へと向かった。このようにわが国の変圧器についての特徴の第一は輸送限界寸法および質量の違いのためコンパクト化を指向した設計が主流となっていることである。この中で特別三相のような考え方も生まれできたのである。第二は社会が電力供給の安定性を強く求めていたため、電力会社からは変圧器の信頼性を強く求められたため、設計面だけでなく製造面でも防塵管理に代表されるように品質管理を徹底して世界に

冠たる製品工場を作り上げていった。部分放電試験許容レベルのわが国の規格値が世界標準に比べ格段に厳しいのはそのひとつの例である。同じような観点から環境性に対する要求も海外に比べはるかに厳しい。住宅地が変電所に接近し始めた1970年代以降規制が強化され低騒音変圧器が一般化した。さらに変電所のGIS化によって境界騒音を抑えるため変圧器の低騒音仕様値が一段と厳しいものとなった。また、都心のビル地下に設置された変電所や交通など公共設備の変電所では変圧器内部事故に起因する火災や油の流失を防止するためガス絶縁変圧器の採用が進んでいる。また、大容量変圧器でもガス絶縁化を達成しているが、これは世界で日本だけの技術である。第四の特色として消費電力の都市集中が多く、離れた電源地域から大容量高電圧送電を求められることである。このため発電所用としては単器で1500MVA級の世界最大容量器が製作され、変電所用としてもバンク容量1000~1500MVA器が普及している。これら大容量化に対する技術的課題の克服および油中ガス分析による予防保全については独自技術による積み上げが大きく寄与している。また、高電圧化でも1000kV送電実現に向けて実証試験を実施して、いつでも実運転に対応できるように準備が完了している。特に1000kV UHV送電では外国に比べ輸送限界が厳しい中で各種信頼性評価も実施して技術を確立した点は大いに誇れるものである。

7 | 変圧器保存状況

電力用変圧器の保存状況調査は日立、東芝、三菱、富士および明電舎が過去に製作した変圧器で新規な技術を適用した、あるいは当時各社としての記録的製品について調査をお願いし、それらについての現状を調査していただいた。その中で海外に輸出したものを除き、国内に現存するものについてまとめたものを調査票データとしてまとめた。これらは合計で128件となった。変圧器の場合一般的に寿命は30年と言われているが、実際には40～50年程度使われている。したがって現在実際に使用されている変圧器は古いもので1950年代初めの頃のもので、それ以前のは調査した範囲ではすべて廃棄されていた。ただ、1910年に製作さ

れた2件のデータについては客先で使用済み後記念品として工場に引取り保管していた製品である。この頃の製品は比較的小さく保存が可能であったが、その後の製品については保存するには大きすぎて、すべて廃棄処分となっている。もっとも当時これら工業製品を保存しようといった考えがなかったことも事実である。なお、これら128件のデータの中から技術的に見てエポックとなっていると筆者が考えた製品33件と1905年に始められた試験番号による製品管理台帳の原本および関東大震災以後の試験成績書の原本とを登録候補として選定した。表7.1に登録候補の製品一覧を示す。

■謝辞

今回実施した「電力用変圧器技術発展の系統化調査」に関しては多くの方々に御協力いただいたことを感謝いたします。

この報告書のベースとなっています変圧器の技術的データについては(株)日立製作所、ティーエム・ティーアンドディー(株)、富士電機(株)、(株)明電舎および(株)日本AEパワーシステムズの絶大なる御協力を得ました。特にデータ作成にあたり次の方々には調査に種々のご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表したいと思います。

ティーエム・ティーアンドディー株式会社

株式会社 日本AEパワーシステムズ

玉置栄一氏、宮脇文彦氏、池田正巳氏、
中田孔氏、海老沢義人氏

天野直樹氏、白坂行康氏、伊藤利和氏、
小川吉晴氏

表7.1 変圧器登録候補一覧

番号	名称	資料形態	所在地	製作者	製作年	コメント
1	変圧器試験番号台帳	実物	TMT&D浜川崎事業所	芝浦製作所	1905	変圧器の試験番号による管理を始めた当初の記録台帳
2	変圧器試験成績書	実物	TMT&D浜川崎事業所	芝浦製作所	1923	変圧器の試験成績記録として現存最古
3	13.2kV 100kVA特別高圧変圧器	実物	日立製作所 電気資料館	芝浦製作所	1910	現存する最古の特別高圧変圧器
4	15kVA単相変圧器	実物	日立製作所 国内工場	日立製作所	1910	日立製作所の第1号器
5	特別三相275kV 93MVA変圧器	実物	電源開発 佐久間水力発電所	三菱電機	1955	特別三相の適用第1号器 275kV器として現存最古
6	地下発電所用特別三相275kV 133MVA変圧器	実物	電源開発 只見水力発電所	東京芝浦電気	1960	初の地下発電所用 275kVケーブルに直結構造
7	275kV 300MVA負荷時タップ切換変圧器	実物	東京電力北東京変電所	三菱電機	1962	変電所用最大容量LRT MR社LTC適用第1号
8	三相275kV 680MVA変圧器	実物	東京電力姉崎火力発電所	東京芝浦電気	1966	最大容量器
9	45dB超低騒音180MVA変圧器	実物	九州電力西福岡変電所	明電舎	1967	わが国初の45dB低騒音大容量変圧器
10	地下変電所用275kV 300MVA変圧器	実物	東京電力城南変電所	東京芝浦電気	1969	初の275kV地下大容量変電所用変圧器
11	国内向け初の単相単巻500kV 1000/3MVA変圧器	実物	東京電力新古河変電所	東京芝浦電気	1971	わが国初の500kV商用変圧器
12	三相275kV 1100MVA変圧器	実物	東京電力鹿島火力発電所	東京芝浦電気	1973	1000MVA超過の初号器
13	組立貨車輸送形275kV 450MVA負荷時タップ切換変圧器	実物	中部電力駿遠変電所	東京芝浦電気	1974	三相一体で貨車輸送を行った最大容量器
14	送方風冷式66kV 10MVAガス絶縁変圧器	実物	東日本旅客鉄道北長岡試験室	明電舎	1978	絶縁にフィルムを使用したガス絶縁変圧器の初製品
15	UHVプロトタイプ変圧器	実物	TMT&D浜川崎事業所	東京芝浦電気	1979	貨車輸送限界内でUHVを実現させたプロトタイプ器
16	単相単巻500kV 1500/3MVA変圧器	実物	中部電力新三河変電所	日立製作所	1982	UHV変圧器技術の500kVへの適用器
17	ガス絶縁負荷時タップ切換66kV 11MVA変圧器	実物	札幌市交通局 麻生鉄北変電所	富士電機	1982	VCB LTCを搭載した初のガス絶縁変圧器
18	蒸発冷却式77kV 20MVAガス絶縁変圧器	実物	関西電力西白浜変電所	三菱電機	1984	液冷却ガス絶縁変圧器の先駆けとなった初適用器
19	単相500kV 1000/3MVA変圧器	実物	九州電力豊前変電所	東芝	1984	UHV変圧器技術の500kVへの適用器
20	275kV 1000MVA位相調整変圧器	実物	東北電力新湯変電所	東芝	1984	世界最大級の位相調整器
21	新分解輸送形275kV 300MVA変圧器	実物	関西電力神戸変電所	三菱電機	1984	新分解輸送形変圧器の初号器
22	2000kV密閉型試験用変圧器	実物	昭和電線電纜相模原事業所	東芝	1987	試験電圧までコロナフリーを実現した試験用変圧器
23	187kV 200MVA超低騒音変圧器	実物	北海道電力苗穂変電所	日立製作所	1988	鉄板防音壁で45dBの低騒音を達成した
24	液冷却式275kV 300MVAガス絶縁変圧器	実物	関西電力方変電所	三菱電機	1990	液流下式でコイル鉄心を冷却するガス絶縁変圧器
25	275kV 250MVA液冷却式ガス絶縁変圧器	実物	中部電力石倍変電所	日立製作所	1990	液流冷却方式のガス絶縁変圧器
26	275kV 300MVA防音壁なし60dB低騒音変圧器	実物	東北電力石巻変電所	日立製作所	1992	タンク直付け防音壁のみで60dBの低騒音仕様を達成
27	UHVフリード実証試験用1050kV 1000MVA変圧器	実物	東京電力新橋名変電所	日立、東芝、三菱	1993	実証試験用として実器定格を想定した試験器
28	送方水冷式275kV 300MVAガス絶縁変圧器	実物	東京電力東新宿変電所	東芝	1994	高圧SF6ガスだけで冷却を達成した最大容量器
29	送方風冷式161kV 68MVAガス絶縁変圧器	実物	東北電力柳津西山地熱発電所	東芝	1994	低ガス圧ガス絶縁変圧器として最高電圧最大容量器
30	新分解輸送形500kV 1000MVA変圧器	実物	中部電力愛知変電所	三菱電機	1994	500kV 1000MVAを新分解輸送形にして三相一体構造化
31	三相500kV 1450MVA変圧器	実物	東京電力柏崎刈羽原子力発電所	日立製作所	1994	最大容量器
32	22kV 13MVAモールド変圧器	実物	東京都清掃局 有明清掃工場	富士電機	1994	モールド変圧器としての最大容量器
33	HVDC用1H直流リアクトル	実物	関西電力、電源開発 紀北変換所 四国電力、電源開発 阿南変換所	東芝、三菱	1997	500kV直流送電に対応した直流リアクトル
34	500kV地下変電所用1500/3MVA変圧器	実物	東京電力新豊洲変電所	東芝	1997	初の地下500kV用変圧器
35	275kV 450MVA地下変電所用液冷却式ガス絶縁変圧器	実物	中部電力名城変電所	日立製作所	1998	275kV地下変電所用およびガス絶縁として最大容量器

■ 参考資料1

添付参考資料1としてわが国における変圧器の技術変遷を日立、東芝、三菱、富士および明電舎の各社の協力により年代別に新技術を最初に適用あるいは実用化した時期およびこれら新技術を適用した製品あるいは当時の各社の記録的製品を一覧として示す。このデー

タをベースに本文の原稿を作成した。また、図6.1～図6.7および表6.1、表6.2もこのデータを基に作成している。また、表には同時にわが国の電力関係のトピックスとなる出来事と世界および日本における社会の出来事と電力と変圧器に関するトピックスをあわせて示す。

変圧器の技術史年表

年	日本における電力状況	変圧器関係開発新技術
1831		
1837		
1856		
1878	日本初のアーク灯点る	
1879		
1881		
1882		
1883		
1885		
1886	東京電灯創業	
1887	東京第二電灯営業用火力発電開始	
1888	日本電気学会創立	
1889	大阪電灯交流配電開始	
1890		
1891	初の営業用水力発電蹴上PS 竣工	
1893		初の国産変圧器製作(三吉電機工場)
1894		気冷式変圧器製作開始(芝浦製作所)
1895	京都電気鉄道開始	
1896	東京電灯50Hz 送電開始(浅草火力)	
1897		明電舎変圧器製作開始
1899	特別高圧11000V の採用	
1900		油入変圧器製作開始
1903		
1904		
1905		試験番号採用開始
1906		
1907	55kV 送電開始(東京電灯,駒橋-早稲田)	
1908		日立変圧器製作開始
1909	44kV 送電開始(塔ノ沢-保土ヶ谷)	真空乾燥初適用 芝浦製作所GE 社と技術提携開始
1910		三菱変圧器製作開始 けい素鋼板初適用(柱上変圧器)
1911	66kV 送電開始(名古屋電灯 他)	けい素鋼板、絶縁油輸入適用開始
1912		誘導電圧調整器製作開始
1913	77kV 送電開始(桂川電力)	絶縁油の製造開始(日本石油)
1914	110kV 送電線建設(猪苗代-田端)	コンサベータ初適用
1915		
1916	電気炉による製鋼開始(大同特殊鋼)	鯨井、西、鳳氏が内部電位振動の研究発表
1917		西、別宮氏は変圧器共振現象の論文発表
1918		けい素鋼板検収にエプスタイン試験導入
1919	ダム式水力発電開始(野花南)	大容量器に内鉄型適用開始
1920	日本初の給電所(東京電灯 麴町)	

主要変圧器製品	社会情勢、海外の電気関係・変圧器の状況、その他
	Faraday が電磁誘導現象を発見
	Masson 薄鉄板のリボンを相互に絶縁して重ね束にした成層鉄心で渦流防止
	Varley 針金を束ねて閉回路とした鉄心を製作
	Edison 白熱電球を発明
	Edison ニューヨークで電力事業開始
	Ewing が鉄の中のヒステリシス現象を発見
	Gaulard とGibbs が交流配電方式を考案 初の火力発電運転開始 (アメリカ)
	Stanley 逆起電力の考えを発見
	Max Deri 分路式交流配電に使用する変圧器の特許出願 trans-form と命名 Ganz 社で内鉄および外鉄型変圧器を製作 (ブタベスト博覧会で変圧器を使用した配電照明の展示) Stanley も鉄針金の環状鉄心および薄板成層鉄心構造の変圧器完成 Ganz 社とStanley は並列配電方式に成功
	Wenstrom 三相内鉄型変圧器製作 油を絶縁用として変圧器に始めて使用 15000V 送電 (ドイツ)
気冷式で30kVA まで標準とした (芝浦)	日清戦争
気冷式1~2kV/100V 50~100 灯用 (明電舎)	
50kV,4kVA 試験用変圧器開発 (芝浦)	Hadfield けい素鋼を発明 イギリスでけい素鋼板工業化 日露戦争
初の特別高圧変圧器11kV,150kVA 完成 (甲府電力向け) (芝浦) 22kV,250kVA 完成 (芝浦)	
44kV,500kVA (箱根水力電気) (芝浦) 外鉄型水冷式44kV,1500kVA 完成 (横浜電気 保土ヶ谷SS) (芝浦)	
	コンサベータの適用開始
単相水冷式1500kVA (名古屋電灯) (日立) 66kV,2500kVA (九州水力) (芝浦)	154kV 送電開始 (アメリカ)
	第1 次世界大戦
500kV 試験用変圧器 (東京大学) (芝浦) 単相油入水冷式38kV,2600kVA (日本窒素肥料) (日立) 油入水冷式60kV,2000kVA (熊本電気) (日立) 110kV,4400kVA (猪苗代水力,東京電灯 田端SS) (芝浦) 350kV 試験用変圧器 (通信省) (日立)	Wagner が変圧器巻線内部電位振動の基本的考え方発表
66kV,6000kVA 完成 (芝浦)	200kV 送電開始 (アメリカ カリフォルニア) 220kV 段絶縁変圧器製作 (アメリカ)

年	日本における電力状況	変圧器関係開発新技術
1921		
1922		国産初のけい素鋼板製造 電気機器標準規程JEC-9 制定
1923	154kV 送電開始(京浜電力 甲信系)	三菱WH 社と技術提携開始
1924		三巻線変圧器製作(東京電灯10MVA)(日立)
1925		富士シーメンス技術提携により変圧器生産開始
1926		77kV,10MVA を中身組立海上輸送(大同電力 新淀川PS)(芝浦) 初のコンデンサブッシング製作 国内初の変圧器規格発行JES31
1927		
1928		耐雷巻線構造の適用開始 国産けい素鋼板の適用開始 フランジカラーの適用
1929		
1930		ラジエータバルブ考案 複針ダイヤル温度計採用
1931		
1932		
1933		電位分布測定 サージプルーフ巻線適用開始(台湾電力 台北SS 単相 165kV,7.5MVA)
1934	初の揚水発電開始	変圧器標準規程JEC-36 制定 インパルス電圧発生装置設置
1935		窒素ガス漬け輸送初適用(朝鮮送電 平壤SS,154kV,15MVA) 抵抗式負荷時タップ切換器(Jansen 式)の導入
1936		落とし込み式貨車シキ60 製作
1937		初のインパルス試験実施(鉄道省 武蔵境SS 154kV,18MVA)
1938		戦時規格JEC-36 Z 発行
1939	6kV 配電開始(東京電灯)	特殊貨車シキ60 による組立輸送(東京電灯 信濃川PS,39MVA) 部分遮へい巻線初適用(東京電灯 信濃川PS 154kV) 衝撃波波形直視装置の開発
1940		230kV 変圧器インパルス試験実施(満州電業) 不燃性合成油(PCB)入変圧器製作(満州向け44kV,4.5MVA) 多重円筒巻線初適用(朝鮮水電 虚川江PS 220kV 消弧リアクトル) バンクドラジエータ初適用(朝鮮水電 清津SS 230kV,80MVA)
1941		フィン付ユニットクーラ初適用(朝鮮水電 100MVA) 鉱油系絶縁油の日本標準規格発行
1942		窒素封入式コンサベータ初適用 中性点段絶縁方式開発 220kV 変圧器の電位振動研究
1943		
1944		高圧側直接調整負荷時電圧調整器の製作
1945		初の静止誘導器インパルス試験規格JEC-110 制定 異方向性けい素鋼板鉄心構造研究

主要変圧器製品	社会情勢、海外の電気関係・変圧器の状況、その他
三相66kV,8000kVA 完成(芝浦) 単相55kV,5000kVA(大同電力)(三菱)	
	非共振変圧器製作(アメリカ)
回転変流機用2kV,240kVA(東京電灯)(明電舎)	関東大震災 イナートア変圧器製作(アメリカ WH 社)
単相水冷式77kV,13333kVA(日本電力 小曾根SS)(芝浦)	並列回路方式負荷時電圧調整変圧器(アメリカ GE 社)
80kV,15MVA(東邦電力)(芝浦)	ラジオ放送開始
単相66kV,1000kVA(帝国電灯)(明電舎)	
初の154kV 変圧器(日本電力 岐阜SS 154kV,6667kVA)(芝浦)	
初の送油風冷式80kV,12.5MVA(関西配電)(日立)	
水冷式53kV,10MVA(京都電灯)(富士)	
自冷式10MVA(宇治川電気)(芝浦)	Jansen 式横流抑制方式発表
水銀整流器用変圧器820kVA(日本鋳業)(日立)	
77kV,22.53MVA(東京電灯)(三菱)	
自冷式単相140kV-87kV-11kV,22MVA(昭和電力 八尾SS)(芝浦)	
165kV,12.5MVA(昭和電力)(日立)	
三相水冷式115kV,36MVA(朝鮮窒素 赴戦江第一PS)(芝浦)	
単相70kV,7.5MVA 油漬け輸送(東邦電力 名嶋SS)(三菱)	
初の分解輸送154kV,18.833MVA(東信電気豊実PS)(日立)	送油水冷式三相100MVA 変圧器(ドイツ AEG)
700kV 試験用変圧器(大阪陶業)(日立)	世界大恐慌
送油水冷式60kV,4.5MVA 二次電流34.5kA 電気炉用変圧器(電気化学)(富士)	
三相送油水冷式72kV,43.75MVA(日本電力 鶴見PS)(芝浦)	絶縁協調に関する推奨案発表(アメリカ)
初の負荷時電圧調整変圧器(中国合同電気 450kVA)(芝浦)	初のインパルス試験(アメリカ GE)
400kV 試験用変圧器(富士)	
負荷時電圧調整変圧器 単相110kV,12MVA(熊本電気)(芝浦)	水冷式三相60MVA 変圧器製作(アメリカ)
三相水冷式105kV,23MVA(朝鮮水電)(富士)	
油漬け貨車輸送77kV,22MVA(東邦電力 木津SS,岩倉SS)(芝浦)	サージブーフ巻線製作(アメリカ WH 社)
単相147kV,20MVA(東京電灯 川崎SS)(三菱)	
負荷時電圧調整変圧器6300kVA(京都電灯)(日立)	
初の位相調整器(関西共同火力 尼崎火力PS 88.5MVA,80kV ±5kV ±j7kV)(芝浦)	V-t 特性発表(アメリカ GE,WH)
負荷時電圧調整器2100kVA(山陽中央水力)(日立)	
分解輸送変圧器39MVA,178.5kV(東信電気 島河原PS)(日立)	
低床貨車で油浸輸送 単相165kV,15MVA(台湾電力)(三菱)	方向性けい素鋼帯の発明(アメリカ Goss)
負荷時電圧調整変圧器 三相77kV,15MVA 自冷式(日本発送電)(日立)	
三相送油水冷式66kV,63MVA(東京電灯 鶴見火力第一PS)(芝浦)	
自冷式 三相161kV,34.65MVA(大井川電力)(三菱)	
単相66kV,1500kVA(南朝鮮電気)(明電舎)	
三相11kV,3MVA 負荷時タップ切換電気炉用変圧器(日本窒素肥料)(富士)	
水冷式154kV,60MVA(長津江水電 下岐川ISS)(芝浦)	多重円筒巻線(非振動変圧器)製作(ドイツ AEG)
自冷式154kV,50MVA(朝鮮送電 京城SS)(芝浦)	インパルス試験規程発行(アメリカ)
単相84kV,31.25MVA(関西共同火力 尼崎第2PS)(日立)	
送油風冷式154kV,50MVA(東京電灯 和田堀SS)(芝浦)	貨車輸送形送油風冷式三相220kV,100MVA 変圧器(ドイツ AEG)
自冷式70kV,63MVA(中部共同火力 名港PS)(芝浦)	
初の220kV 変圧器(長津江水電 虚川江第一PS 220kV,80MVA)(芝浦)	第二次世界大戦始まる
500kV 試験用変圧器(古河電工)(富士)	
三相送油水冷式230kV,100MVA(鴨緑江水電 水豊PS)(東芝)	
単相自冷式230kV,37.5MVA(満州電業 安東SS)(日立)	
単相220kV,50MVA(満州電業)(三菱)	
負荷時電圧調整器 三相44/44 ±3.3kV,150MVA(三菱)	
三相自冷式161kV,35MVA(日本軽金属 新潟)(日立)	
三相送油風冷式230kV,100MVA(朝鮮水電 多獅島SS 他)(東芝)	日米開戦
送風式161kV,70MVA(満州水力電気建設局 松花江PS)(日立)	
負荷時タップ切換変圧器 単相40kV,5MVA(山口県電気局)(明電舎)	
風冷式三相240kV,30MVA(江界水力)(富士)	
三相60kV,28MVA,二次電流58.4kA 負荷時タップ切換電気炉用変圧器(日本窒素肥料)(富士)	
送風式230kV,70MVA(満州水力電気建設局松花江PS)(日立)	主間隙充填絶縁構造(スイス BBC)
三相油入風冷式三巻線154/77/21kV,33MVA(日本発送電 茨城SS)(日立)	

年	日本における電力状況	変圧器関係開発新技術
1948		ユニットクーラ初適用(昭和電工 78MVA) 初の中性点段絶縁変圧器(日発岡山SS 単相140kV,25MVA)
1949		
1950		無振動巻線(耐雷形成層円筒巻線)の開発
1951	9 電力会社発足	275kV 変圧器の製作 ハイセルキャップ巻線開発 フォームフィット形初適用(東電 鹿浜SS 単相66kV,15MVA) 主ギャップ充填絶縁構造初適用 誘導過熱乾燥法適用開始 静電遮へい方式初適用(東北電力 東新潟SS 三相154kV,33MVA) 変圧器へ無振動巻線(多重円筒巻線)初適用(東京電力 154kV,27MVA)
1952	275kV 送電開始(関西電力 新北陸幹線) 電源開発(株)発足	静止誘導器標準規格JEC-120 制定 戦後の海外との技術提携再開 シキ120 形低床貨車製作 現地用鉄心起立装置適用 タンク磁気遮へい初適用(外鉄型) 絶縁油安定度試験法確立
1953	空気遮断器実用化	シキ130 形貨車製作
1954		制振遮へい巻線初適用(九州電力相浦PS 120kV,45MVA) 転位電線初適用 複導体電線適用
1955		特別三相変圧器適用開始 方向性けい素鋼板初適用 三相五脚鉄心初適用 吊り掛け式貨車シキ170 製作 自動電界模写技術 ダイヤル式温度継電器、間接型測温抵抗体、避圧弁採用 油中ガス分析法の開発 独AEG 社と技術提携開始(明電舎)
1956		気相乾燥法初適用 巻線強制冷却初適用 フローティングクレーン初適用 交流磁気特性直視装置 ハイセルキャップ巻線初適用 額縁形鉄心初適用(東京電力 吉祥寺SS 6MVA)
1957	東海村原子炉1号点火	冷却塔方式水冷式変圧器の開発 シキ400 形吊り掛け式貨車製作 転位電線より線機設備化
1958		変圧器の短絡試験(70kV,2000kVA) シキ300 形吊り掛け式貨車製作 多導体電線適用 大形鉄心起立装置設置 ケーブル接続(エレファント)型変圧器初適用 全装可搬式変圧器10MVA 製作 移動用変圧器製品化
1959	超高压海峡横断送電線建設(関門220kV)	鉄板抜き板加工ライン構築 400kV,10MVA 変圧器試作検証 シキ600 形吊り掛け式貨車製作

主要変圧器製品	社会情勢、海外の電気関係・変圧器の状況、その他
三相送油風冷式154kV,78MVA(昭和電工)(三菱) 6MVA 負荷時電圧調整器付147kV,60MVA(昭和電工白石SS)(日立) 輸出向け三相115kV,15MVA 負荷時タップ切換変圧器(インド)(富士)	トランジスタ発明(アメリカ ベル研究所)
N2 ガス封入式コンサベータ使用84kV,20MVA 変圧器(日本発送電)(日立) 初の275kV 変圧器三相250kV,99MVA(関西電力 枚方SS)(三菱) 初の275kV 変圧器三相275kV,70MVA(関西電力 成出PS)(日立) 自冷式三相69kV,45MVA(九電築上PS)(三菱) 特殊貨車シキ100による横倒し組立輸送(九州電力 築上PS45MVA)(三菱) 無振動形変圧器154kV,27MVA(東京電力 箱島SS)(富士) ユニーククーラ適用三相154kV,66MVA 変圧器(東京電力 和田堀SS)(東芝) 風冷式66kV,37.25MVA(日本発送電 鶴見PS)(明電舎)	ハイセルキャップ巻線発表(イギリス EE) 朝鮮戦争 初の原子力発電成功(アメリカ)単相250/3MVA(WH),三相138kV,145MVA(WH) サンフランシスコ平和条約
三重定格変圧器三相69kV,33.75MVA(北海道電力 砂川SS)(三菱) 三相166kV/275/11kV,99MVA 変圧器(関西電力 新愛本SS)(東芝) 初の分路リアクトル77kV,15MVA(関西電力 枚方SS)(東芝) 初の低騒音変圧器三相送油自冷63kV,15MVA(東京電力 日比谷SS)(日立) 特殊貨車シキ120による横倒し組立輸送(九州電力 築上PS65MVA)(三菱) 送油水冷式三相66kV,42MVA,二次電流10kA 電気炉用変圧器(新日本窒素肥料)(富士) フォームフィット横倒し組立輸送三相147kV,39MVA(東京電力 東千葉SS)(三菱) 無振動形変圧器三相275kV,45MVA(関西電力 椿原PS)(富士) 貨車組立輸送154kV,50MVA(東京電力 川崎SS)(東芝) 高圧二重電圧変圧器単相 250-154kV 72.5MVA(関西電力 丸山PS)(三菱) ファールバール形変圧器三相110kV,50MVA(九州電力 築上)(富士)	400kV 送電開始(スエーデン)
三相送油風冷式230kV,135MVA(九州電力 上椎葉PS)(日立) 貨車組立輸送154kV,66MVA(東京電力 武蔵野SS)(東芝) 吊り掛け式貨車シキ140による組立輸送154kV,66MVA(東京電力 京北SS)(日立) 貨車組立輸送154kV,99MVA(中部電力 東名古屋SS)(東芝) 特別三相変圧器275kV,93MVA(電源開発 佐久間PS)(三菱) 低騒音変圧器三相66kV,30MVA(東京電力 隅田SS)(三菱) 55dB 低騒音変圧器三相66kV,30MVA(東京電力 稲荷SS)(明電舎) 三相五脚鉄心適用154kV,65MVA(JPA-韓国)(明電舎) 275kV,132MVA 変圧器(電源開発 西東京)(日立) 全装可搬密封形変圧器2MVA(東北電力 喜多方SS)(日立)	気相乾燥法(アメリカ GE)
低騒音変圧器154kV,110MVA(東京電力 戸田SS)(東芝) 三相送油風冷式巻線強制冷却却初適用154kV,160MVA(東京電力 千葉PS)(東芝) 負荷時電圧位相調整変圧器220kV ±10,±j30kV,90MVA(九州電力 山家SS)(東芝) 48dB 低騒音変圧器66kV,30MVA(東京電力 板橋SS)(日立) 五脚鉄心使用貨車組立輸送66MVA(関西電力 古川橋SS)(日立) 負荷時タップ切換変圧器110kV,60MVA(九州電力 篠原PS)(明電舎) 乾式タップ切換器付H種絶縁変圧器3000kVA(関西電力 堂島SS)(日立) シキ140 貨車組立輸送99MVA(中部電力 岩倉SS)(日立) シキ120 吊り掛け式貨車輸送78MVA(東京電力 駿河SS)(三菱)	商業原子炉運転開始(イギリス コールダーホールNPS) 国連加盟 サイリスタ発売開始(アメリカ GE 社)
冷却塔方式水冷変圧器66kV,30MVA(東京電力 大手町SS)(三菱) 負荷時タップ切換変圧器110kV,66MVA(中国電力 徳山SS)(東芝) 分路リアクトル27.5MVA(関西電力 新愛本SS)(東芝) 負荷時タップ切換変圧器110kV,70MVA(九州電力 大村PS)(日立) 遮音壁構造低騒音変圧器45MVA(東京電力 高輪SS)(日立) 負荷時タップ切換変圧器154kV,30MVA(関西電力 新八幡SS)(富士)	500kV 送電開始(ソ連)
額縁形鉄心適用特別三相変圧器275kV,260MVA(東京電力 中東京SS)(三菱) 三相変圧器275kV,200MVA(東京電力 千葉PS)(東芝) 吊り掛け式貨車輸送負荷時タップ切換変圧器120MVA(東北電力 本名SS)(三菱) 吊り掛け式貨車輸送変圧器220kV,180MVA(九州電力 西谷SS)(日立) スコット結線変圧器2500kVA(国鉄 東北本線 黒磯SS)(日立) 初のケーブル接続型(エレファント)変圧器三相66kV,6MVA(古河化学)(富士) 移動用変圧器 70kV,3MVA(中部電力)(明電舎) 全装可搬形変圧器66kV,10MVA(東京電力 渋江SS)(明電舎)	500kV 送電開始(ソ連)
三相変圧器275kV,270MVA(中部電力 新名古屋PS)(東芝) 特別三相変圧器275kV,264MVA(電源開発 南川越SS)(三菱) 分路リアクトル70kV,20MVA(関西電力 敷津SS)(日立) 組立貨車輸送変圧器三相275kV,264MVA(電源開発 西東京SS)(日立) 埋め込み式負荷時タップ切換変圧器,三相154kV,75MVA(東京電力 蔵前SS)(富士) 組立貨車輸送変圧器三相275kV,200MVA(関西電力 東大阪SS)(富士)	

年	日本における電力状況	変圧器関係開発新技術
1959		
1960	154kV 地下式変電所(東京電力 千代田SS) 275kVOF ケーブル	ダイヤフラム式コンサベータ初適用 活線浄油機初適用 154,275kV ケーブル接続型変圧器適用 油浸形レジン接着絶縁筒適用開始 クレーブ絶縁紙適用開始 紙巻軟銅線、可とう銅より線適用開始 抵抗紙フィールドマッピング 超々高圧試験設備完成 ラジアル鉄心形分路リアクトル適用開始
1961		熱油噴霧乾燥方式の採用 コンクリート防音構造初適用
1962		つづみ形絶縁初適用 耐熱処理絶縁紙適用開始
1963	わが国初の原子力発電開始	ドイツMR 社とLTC の技術提携開始 タンク電磁遮へい適用開始 高気密度クラフト導体絶縁紙適用開始 タップ巻線フロート防止抵抗器初適用 リード接続用圧着端子適用開始 変圧器技術の海外展開開始(インドケララ州政府と合弁会社)
1964		乾式コンデンサブッシング製作開始 二重管式冷却器初適用(東京電力 馬場先SS) アルミコイルの適用開始
1965	負荷時タップ切換変圧器の仕様統一 500kV 送電線建設(東京電力 房総線) 周波数変換所連系開始(電源開発 佐久間)	負荷時タップ切換変圧器の運転実態調査と事故統計を行う(電気協同研究) 部分放電試験の導入 油中ガス分析開発 バインド鉄心の採用 空調設備を備えたコイル組立室 二次元磁界計算技術整備
1966		CC シールド巻線開発適用 大形縦型巻線機の導入 内部構造材の塗色化開始 短絡時の巻線振動解析プログラム開発 変圧器標準規格JEC-168 制定 E形絶縁方式の採用 開閉インパルス試験導入 超大容量器二重同心配置巻線構造適用 スリット入り鉄心当て板の採用 クランプ磁気シールドの採用
1967		油中ガス分析を試験評価に導入 高真空排気装置導入 絶縁物水分管理導入 音響法コロナロケーション技術確立 コロナフリー接着剤の導入 低湿度防塵空調室の導入 熱油循環開始 プレスボード第一種から二種への切換 特性計算のコンピュータ化進む 抵抗式真空スイッチLTC の試作 海外との変圧器技術提携の打ち切り(東芝)

主要変圧器製品	社会情勢、海外の電気関係・変圧器の状況、その他
<p>超高压遮断器試験用400kV,200MVA(日立研究所)(日立)</p> <p>組立貨車輸送変圧器三相275kV,260MVA(東京電力 京浜SS)(三菱)</p> <p>地下変電所用変圧器特別三相154kV,100MVA(東京電力 千代田SS)(東芝)</p> <p>地下発電所用変圧器特別三相275kV,133MVA(電源開発 奥只見PS)(東芝)</p> <p>三相変圧器275kV,300MVA(東京電力 横須賀PS)(東芝)</p> <p>エレファント採用変圧器77kV,50MVA(中部電力 南部平町SS)(明電舎)</p> <p>分路リアクトル77kV,20MVA(関西電力 枚方SS)(明電舎)</p> <p>ケーブル接続型(エレファント)変圧器三相275kV,150MVA(東京電力 横須賀PS)(富士)</p>	
<p>330kV,100MVA 負荷時タップ切換単巻変圧器(オーストラリア シドニーSS)(東芝)</p> <p>330kV,160MVA 負荷時タップ切換単巻変圧器(オーストラリア ベールスポイントPS)(日立)</p> <p>コンクリート防音壁付低騒音変圧器三相90MVA(中部電力 瑞穂SS)(富士)</p> <p>系統連系用単巻変圧器275/220kV,200MVA(関西電力 姫路SS)(富士)</p> <p>PCB 絶縁油入1500kVA(東京電力 川崎火力PS)(日立)</p> <p>エレファント採用変圧器77kV,180MVA(関西電力 姫路PS)(三菱)</p> <p>隔膜式コンサベータ採用154kV,100MVA(関西電力 横大路SS)(明電舎)</p>	
<p>系統連系用単巻変圧器220kV,111.5MVA(電源開発 伊予SS)(三菱)</p> <p>組立貨車輸送変圧器275kV,300MVA(東京電力 北東京SS)(三菱)</p> <p>組立貨車輸送式負荷時タップ切換電気炉用変圧器三相63kV,45MVA(電気化学)(富士)</p> <p>分解輸送変圧器200MVA(中部電力 川根SS)(日立)</p> <p>活線浄油機付負荷時タップ切換変圧器220kV,150MVA(中国電力 山口SS)(明電舎)</p>	
<p>三相変圧器275kV,370MVA(関西電力 姫路第二PS)(三菱)</p> <p>高インピーダンス三相変圧器275kV,420MVA(東京電力 横須賀PS)(東芝)</p> <p>三相変圧器275kV,430MVA(中部電力 尾鷲三田PS)(東芝)</p> <p>組立貨車輸送変圧器262.5kV,300MVA(中部電力 西名古屋SS)(日立)</p> <p>LTC 内蔵形変圧器(東北電力 新三条SS)(東芝)</p> <p>分路リアクトル14.7kV,40MVA(電源開発 南川越SS)(三菱)</p> <p>スコット結線変圧器30MVA(国鉄 東海道新幹線用)(三菱、東芝)</p>	
<p>周波数変換用変圧器275kV,368,353MVA(電源開発 佐久間FC)(三菱)</p> <p>回転形抵抗式LTC 組込み変圧器(関西電力 新加古川SS)(日立)</p> <p>特別三相変圧器275kV,300MVA(東京電力 北東京SS)(三菱)</p> <p>組立貨車輸送変圧器275kV,300MVA(電源開発 名古屋SS)(富士)</p> <p>組立貨車輸送変圧器275kV,200MVA(東京電力 新富士SS)(明電舎)</p> <p>コンクリート防音壁付低騒音変圧器140kV,25MVA(東京都水道局 朝霞浄水場)(日立)</p> <p>整流素子タンク埋め込み式変圧整流装置DC66kA(関東電化)(富士)</p> <p>特別三相変圧器345kV,400MVA(オーストラリア マンモラPS)(三菱)</p> <p>LTC 内蔵輸送形275kV,300MVA(東京電力 東東京SS)(日立)</p>	<p>東海道新幹線開通 東京オリンピック開催</p>
<p>三相変圧器275kV,680MVA(東京電力 姉崎PS)(東芝)</p> <p>LTC 内蔵輸送形変圧器275kV,300MVA(東京電力 江東SS)(東芝)</p> <p>500kV 課電試験用変圧器(超高压研究所 武山)(日立、東芝、三菱)</p> <p>400kV 変圧器(メキシコ向け約50 台3000MVA)(三菱)</p>	<p>ニューヨーク大停電 735kV 送電開始(カナダ)</p>
<p>三相変圧器275kV,680MVA(東京電力 姉崎PS)(東芝)</p> <p>LTC 内蔵輸送形変圧器275kV,300MVA(東京電力 江東SS)(東芝)</p> <p>500kV 課電試験用変圧器(超高压研究所 武山)(日立、東芝、三菱)</p> <p>400kV 変圧器(メキシコ向け約50 台3000MVA)(三菱)</p>	
<p>輸出处向け500kV 変圧器(カナダBCHPA 80,100,200MVA)(東芝)</p> <p>ガス絶縁変圧器三相66kV,3000kVA(第一生命)(東芝)</p> <p>三相275kV,510MVALVR 付変圧器(関西電力 姫路第二PS)(三菱)</p> <p>輸出处向け分路リアクトル236kV,125MVA(カナダ)(三菱)</p> <p>三相変圧器154kV,420MVA(東京電力 五井PS)(日立)</p> <p>輸出处向け分路リアクトル420kV,35MVA(メキシコ CFE)(三菱)</p> <p>電気炉用変圧器三相63kV,50MVA 二次電流112kA(電気化学)(富士)</p> <p>転位電線適用三相154kV,53MVA 変圧器(北陸電力 西勝原第三PS)(富士)</p> <p>超低騒音変圧器220kV,180MVA,45dB(九州電力 西福岡SS)(明電舎)</p> <p>地下変電所用変圧器154kV,100MVA(東京電力 戸越SS)(明電舎)</p>	

年	日本における電力状況	変圧器関係開発新技術
1967		初のSF ₆ 絶縁変圧器の実器導入
1968	初のGIS 変電所	500kV 変圧器での長期絶縁信頼性試験実施 けい素鋼板焼鈍の廃止
1969		アルミコンパクトクーラ採用
1970	275kV GIS (東京電力 北多摩SS)	735kV 試作変圧器の長期課電試験 コイル内電位振動の数値解析 パネル型防音タンク採用 モールド変圧器の開発
1971	275kV 地下式変電所 (東京電力 新宿SS)	ボリュウムセオリー体系化 国内向け500kV 変圧器の製作 UHV 開発試験所建設 500ton トレーラ適用 ウッドブリッジ結線220kV, 200MVA 変圧器 (国鉄 山陽新幹線) 変圧器巻線の短絡強度設計指針発行 (電気学会技術報告) レジン油中スパーサ初適用 る紙法による電界解析
1972		高配向性けい素鋼板適用開始 油中ガス自動監視装置の開発 流動帯電現象調査開始 高密度プレスボードの採用
1973	500kV 送電開始 (東京電力 房総線)	巻線内油流可視化技術の開発 海外への進出 (ブラジル変圧器工場稼働) タンク磁気遮へい初適用 (内鉄型)
1974	500kV VOF ケーブル導入	流動帯電現象による変圧器事故発生 三次元磁界解析技術 非磁性函体渦電流解析 50dB 級送油風冷式冷却器の開発 超大容量器への五脚鉄心の採用 タンクフランジ部強化構造の採用
1975		熱融着転位電線適用開始 プレスボード製構造材、成形絶縁物、強化木等新絶縁材料の一般化 エアパレット式搬送法の導入 大容量変圧器の保守指針の提言 (電気協同研究) 事故拡大防止策としてタンク、ブッシング強度の強化を提言 (電気協同研究) 連続円板巻線の275kV への適用拡大 ノーベーキング鉄心の適用開始
1976	275kV ギャップレスアレスタ製品化	500, 275, 154kV 大容量変圧器の現地作業方法、管理値の提言 (電気協同研究) 流動帯電現象の解明と防止技術確立 絶縁油帯電度管理実施 電位振動解析技術確立 海外への技術供与 (ポーランド ELEKTRIMUNION 社)
1977	変電所の低騒音化の実態調査	電界解析・磁界解析技術確立 自動ガス分析装置開発 500kV 変圧器の本カバー輸送の一般化 変圧器低騒音化対策の指針発行 (電気協同研究)

主要変圧器製品	社会情勢、海外の電気関係・変圧器の状況、その他
特別三相275kV,222MVA 六分割輸送変圧器(東京電力安曇PS)(三菱) 輸出向け単相500kV,400MVA 変圧器(アメリカ BPA)(東芝) 65dB 仕様低騒音変圧器(九州電力 大分PS 270MVA)(日立) 輸出向け単相525kV,900/3MVA 変圧器(USA BPA)(富士)	高配向性けい素鋼帯の開発(八幡製鉄)
地下変電所用変圧器275kV,300MVA(東京電力 城南SS)(東芝) 輸出向け単相400kV,1000/3MVA 変圧器(南アフリカ ESKOM)(三菱) 三相変圧器262.5kV,490MVA(関西電力 海南PS)(日立) 132kV 直落し変圧整流装置、4×34MVA,DC213.6kA(ALCAN)(富士)	アポロ月面着陸
三相変圧器275kV,680MVA(東京電力 鹿島PS)(三菱) 低騒音変圧器275kV,300MVA(中部電力 三河SS)(日立) 輸出向け単相525kV,1000/3MVA 変圧器(アメリカ BPA)(日立) 275kV,700MVA 位相調整器(東京電力 房総SS)(東芝) トラック積載形移動変圧器66kV,10MVA(東北電力)(明電舎)	大阪万国博覧会開催
三相変圧器275kV,870MVA(東京電力 福島第一NPS)(東芝) 国内向け単相単巻500kV,1000/3MVA 変圧器(東京電力 新古河SS)(東芝) 国内向け単相単巻500kV,1000/3MVA 変圧器(東京電力 房総SS)(三菱) 地下変電所用変圧器275kV,200MVA(東京電力 新宿SS)(三菱) 六分割特別三相変圧器275kV,335MVA(東京電力 玉原PS)(三菱) 三相変圧器262.5kV,660MVA(関西電力 海南PS)(日立) 大容量アーク炉用変圧器60MVA(矢作製鉄)(東芝)	
分路リアクトル66kV,80MVA(東京電力 城南SS)(東芝)	
三相変圧器275kV,1100MVA(東京電力 鹿島PS)(東芝) 負荷時タップ切替変圧器275kV,660MVA(関西電力 姫路第二PS)(東芝) 単相単巻500kV,1000/3MVA 変圧器(東京電力 新福島SS)(日立) 三相500kV,640MVA 変圧器(関西電力 奥多々良木揚水PS)(日立) 負荷時電圧調整器付変圧器275kV,860MVA(関西電力 高浜PS)(三菱) 負荷時タップ切替変圧器275kV,450MVA(東京電力 港北SS)(三菱) 単相分離巻線500kV,250MVA 変圧器(関西電力 猪名川SS)(東芝) 負荷時電圧位相調整変圧器268.8kV,250MVA(東北電力 新潟SS)(明電舎) 分路リアクトル154kV,80MVA(東京電力 大井火力PS)(明電舎)	第1次石油ショック
特別三相500kV,640MVA 変圧器(関西電力 奥多々良木揚水PS)(三菱) 組立貨車輸送形LRT275kV,450MVA(中部電力 駿遠SS)(東芝) 三相500kV,1100MVA 変圧器(東京電力 袖ヶ浦PS)(東芝) 特別三相変圧器345kV,500MVA(台湾電力)(富士) モールド変圧器販売開始(富士) 縮小形変電設備66kV,15MVA(東京電力 富士根SS)(明電舎) 単相分離巻線500kV,250MVA 変圧器(関西電力 新生駒SS)(日立) 新幹線き電電圧補償変圧器60kV,13.5MVA(国鉄 徳山SS)(明電舎)	
分路リアクトル275kV,150MVA(東京電力 北多摩SS)(東芝) 三相500kV,1100MVA 変圧器(東京電力 袖ヶ浦PS)(三菱) 三相275kV,1200MVA 変圧器(日本原子力発電 東海第二NPS)(三菱) 分路リアクトル400kV,50MVA(イラン)(三菱)	
単相500kV,500MVA 変圧器(東京電力 房総SS)(三菱) 三相500kV,1240MVA 変圧器(関西電力 大飯NPS)(三菱) 分路リアクトル275kV,150MVA(東京電力 京北SS)(三菱) 三相変圧器275kV,680MVA(東京電力 姉崎PS)(日立)	
単相分離巻線500kV,250MVA 変圧器(関西電力 信貴SS)(三菱) モールド変圧器製作開始(三菱) 分路リアクトル500kV,50MVA(ブラジル)(三菱) 三相500kV,1200MVA 変圧器(東京電力 福島第一NPS)(東芝) 単相単巻500kV,500MVA(東京電力 新古河SS)(東芝) 9分割輸送500kV,680MVA 変圧器(関西電力 奥吉野揚水PS)(東芝) 直流変換器用変圧器125kV,187MVA(東京電力 新信濃FC)(東芝、日立) LTC 内蔵組立貨車輸送形LRT,275kV,450MVA(中部電力 北豊田SS)(富士)	ニューヨーク大停電

年	日本における電力状況	変圧器関係開発新技術
1977		
1978	地震による変電機器の被害実態調査 宮城沖地震により変電機器が被害	加工硬化銅線の適用一般化 UHV 試作変圧器完成 変圧器の耐震設計法規定(電気協同研究) 変圧器標準規格JEC-204 制定 真空バルブ式LTC 開発 電算機による耐震解析法の確立 エアベアリングによる現地据付搬送
1979	配電用負荷時タップ切換変圧器の標準化 北海道一本州直流連系開始	新分解輸送形変圧器の試適用 FRP ファン適用高効率冷却器採用
1980		複合絶縁の各種特性調査 UHV 試作変圧器の長期信頼性検証 BTA 添加絶縁油の適用開始 MR 社新シリーズLTC の適用開始 GEORG 社鉄心自動切断機導入 変電機器の耐震強度試験実施
1981		油中ガス分析による保守基準制定(電気協同研究) UHV 開発技術の500kV 以下器への適用開始 高効率直付遮音板の適用開始 147kV ガス絶縁変圧器試作器完成
1982		酸化亜鉛避雷器油中適用によるタップ巻線保護 磁区制御けい素鋼板の適用開始 冷却器の可変速運転制御方式の開発
1983		変圧器ブッシングの耐震設計法の確立(電気協同研究) アモルファス変圧器の開発
1984		ステップラップ積み鉄心適用開始 プレスボード油中スペーサ初適用 防音板なし低騒音変圧器275kV,300MVA,70dB の完成 275kV ガス絶縁変圧器プロト器完成 新分解輸送形変圧器の適用開始
1985		変圧器タンクの防爆実験実施 変圧器タンクの内部圧力解析手法提示(電気協同研究) 鉄心脚自動積み設備適用開始
1986		超大容量非分割CC シールド連続円板巻線採用
1987	首都圏の大停電発生	
1988	UHV 送電線建設着手(東京電力)	新しい絶縁設計の考え方指針発行(電気協同研究)

主要変圧器製品	社会情勢、海外の電気関係・変圧器の状況、その他
本カバー鉄道輸送単相変圧器500kV,750/3MVA(関西電力 南京都SS)(日立) 大容量アーク炉用変圧器72MVA(東京製鉄 岡山)(東芝) 縮小形変電設備154kV,20MVA(東京電力 成瀬SS)(明電舎)	
GIS直結型変圧器単相単巻500kV,1000/3MVA(九州電力 北九州SS)(東芝) GIS直結型変圧器単相単巻500kV,1000/3MVA(九州電力 中央SS)(日立) GIS直結型変圧器単相単巻500kV,1000/3MVA(九州電力 西九州SS)(三菱) UHV送電試験用変圧器1550/√3kV(電力中央研究所 武山)(富士) 世界最大容量級変圧整流装置三相13.8kV,67MVA,DC68kA(カナダ)(富士) 三相変圧器525kV,1100MVA(東京電力 袖ヶ浦PS)(日立) 二巻線付ラジアル鉄心分路リアクトル500kV,50MVA(アルゼンチン・ウルグアイ)(富士) 世界最大容量モールド変圧器22kV,7.5MVA(国鉄 仙台駅)(富士) 単相512.5kV,1200/3MVA変圧器(カナダ)(富士) 組立貨車輸送変圧器275kV,450MVA(中部電力 駿遠SS)(明電舎) 送ガス風冷式変圧器66kV,10MVA(上越新幹線)(明電舎) 地下変電所用変圧器275kV,300MVA(東京電力 世田谷SS)(明電舎) 地下変電所用分路リアクトル275kV,150MVA(東京電力 世田谷SS)(明電舎)	
250kV,187MVA 直流変換器用変圧器(電源開発 北一本連系)(日立、東芝) 送ガス風冷式ガス絶縁変圧器66kV,10MVA(朝日新聞)(東芝) LTC内蔵組立貨車輸送形500kV,1000/3MVA(関西電力 西播SS)(富士) 地下変電所用変圧器特別三相275kV,300MVA(東京電力 練馬SS)(富士) 特別三相形分路リアクトル275kV,150MVA(東京電力 練馬SS)(富士) 80dB防音壁不付三相変圧器275kV,680MVA(東北電力 秋田PS)(日立)	スリーマイル島原子力発電所事故 第2次石油ショック
分路リアクトル275kV,200MVA(東京電力 新座SS)(三菱) 蒸発冷却式ガス絶縁変圧器77kV,40MVA(関西電力 北摂SS)(三菱) 分路リアクトル500kV,120MVA(アルゼンチン)(富士) 鉄道輸送形500kV,670MVA変圧器(東京電力 新榛名)(富士) 単相変圧器500kV,855/3MVA(アルゼンチン)(富士) 単相単巻負荷時タップ切換変圧器500kV,500/3MVA(東京電力 新潟部SS)(日立)	
2200kV 試験用変圧器(三菱) 1400kV 試験用変圧器(東芝) 1000kV ガス絶縁試験用変圧器(三菱) UHV技術適用単相分離巻線変圧器500kV,750/3MVA(東京電力 新秦野SS)(東芝) UHV送電試験用変圧器1550/√3kV,6MVA(電力中央研究所 赤城)(富士) 525kV,1200/3MVA変圧器(オーストラリア)(富士)	
765kV,805/3MVA変圧器(ベネズエラ)(日立、東芝、三菱) 三相241.5kV,680MVA変圧器(タイ)(富士) UHV技術適用単相単巻変圧器500kV,1500/3MVA(中部電力 新三河SS)(日立) 三相変圧器525kV,1200MVA(東京電力 福島第2PS)(日立) 高効率遮音板適用低騒音変圧器220kV,650MVA(九州電力 新小倉PS)(日立)	
ガス絶縁負荷時タップ切換変圧器66kV,11MVA(札幌市交通局)(富士) 冷却器可変速制御適用275kV,450MVA(中部電力 西濃SS)(明電舎) 冷却器可変速制御適用525kV,300MVA(関西電力 御坊SS)(日立) ガス絶縁変圧器66kV,8MVA(帝都高速度交通営団 向原SS)(日立)	
位相調整器275kV,1000MVA(東北電力 新潟SS)(東芝) 新分解輸送形変圧器275kV,300MVA(関西電力 神戸SS)(三菱) 蒸発冷却式ガス絶縁変圧器77kV,20MVA(関西電力 西白浜SS)(三菱) 70dB防音壁不付変圧器275kV,300MVA(東北電力 須賀川SS)(日立) アーク炉用変圧器126MVA(メキシコ SICARTSA)(東芝)	1150kV送電運転開始(ソ連)
三相500kV,1260MVA変圧器(日本原子力発電 敦賀NPS)(東芝) 分路リアクトル765kV,400/3MVA(南アフリカ ESKOM)(東芝、富士) ガス絶縁負荷時タップ切換変圧器66kV,10MVA(国際電信電話)(東芝) ガス絶縁負荷時タップ切換変圧器64.5kV,30MVA(北海道電力 南三条SS)(三菱) 単相765kV,2000/3MVA単巻変圧器(南アフリカ)(富士)	つくば科学万国博覧会開催
三相500kV,1200MVA変圧器(東京電力 福島第二NPS)(日立) 自冷式ガス絶縁変圧器66kV,10MVA(横浜市交通局 舞岡SS)(日立) ギャップ鉄心方式分路リアクトル275kV,200MVA(東京電力 京浜SS)(三菱) ガス絶縁負荷時タップ切換変圧器66kV,20MVA(札幌市交通局)(明電舎)	チェルノブイリ原子力発電所事故 アメリカ社変圧器事業から撤退
2000kV コロナフリー試験用変圧器(昭和電線電纜 相模原)(東芝) 自冷式ガス絶縁変圧器66kV,20MVA(札幌交通局)(三菱) コンバインドサイクル用三巻線変圧器525/147kV,1100MVA(東京電力 富津PS)(日立) 分路リアクトル400kV,100MVA(南アフリカ)(三菱)	本州一四国架橋完成 国鉄民営化
超低騒音変圧器187kV,200MVA,43dB(北海道電力 苗穂SS)(日立) 高インピーダンス500kV,1500/3MVA変圧器(東京電力 新京葉SS)(日立)	

年	日本における電力状況	変圧器関係開発新技術
1988		
1989		大容量ガス絶縁用LTC 完成 低誘電率プレスボード初適用 磁気嵐による直流偏磁の研究
1990		
1991		
1992		
1993		
1994		
1995		変圧器標準規格JEC-2200 制定
1996		
1997	500kV 地下変電所(東京電力 新豊洲SS)	中国大容量変圧器工場稼働
1998		500kV,250MVA 短絡試験実施
1999		変圧器劣化診断技術指針発行(電気協同研究) 油中ガス分析による診断手法指針の見直し(電気協同研究) 流動帯電に対する保守管理手法の提示(電気協同研究)
2000		超コンパクト新外鉄型変圧器完成
2001		
2002		
2003		

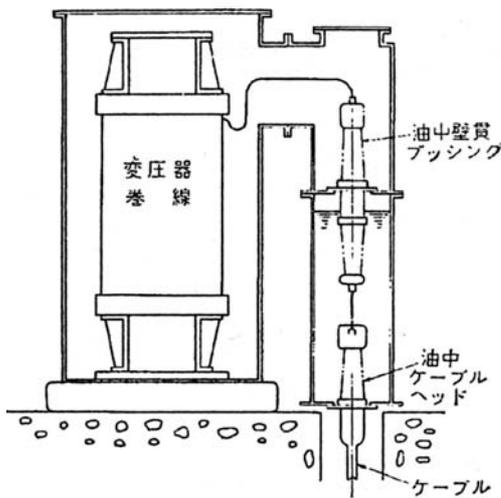
主要変圧器製品	社会情勢、海外の電気関係・変圧器の状況、その他
単相単巻765/500kV,1650/3MVA 変圧器(ブラジル FURNAS)(東芝) 分路リアクトル275kV,200MVA(中部電力 梅森SS)(東芝) 位相調整器一体型変圧器275kV,300MVA(東北電力 秋田SS)(三菱)	
液冷却式ガス絶縁変圧器154kV,200MVA(東京電力 旭SS)(東芝) 自冷式ガス絶縁変圧器66kV,30MVA(九州電力 八代SS)(東芝) 新分解輸送形変圧器220kV,250MVA(九州電力 上椎葉PS)(日立) 分路リアクトル内蔵変圧器275kV,250MVA+20MVAR(中部電力 東信SS)(三菱) 分路リアクトル275kV,250MVA(クウェート)(三菱) 単相単巻765/345kV,1500/3MVA 変圧器(ブラジル FURNAS)(日立) 可変速揚水向けサイクロコンバータ電源用変圧器18.5MVA(東京電力 矢木沢PS)(東芝) 廃熱利用運転ガス絶縁変圧器三相64.5kV,30MVA(東北電力 本町通)(富士) DC アーク炉用変圧器 二次電流40kA 15MVA(大同特殊鋼 星崎)(東芝)	
液冷却式ガス絶縁変圧器275kV,300MVA(東京電力 新坂戸SS)(東芝) 液冷却式ガス絶縁変圧器275kV,300MVA(関西電力 枚方SS)(三菱) 液冷却式ガス絶縁変圧器275kV,250MVA(中部電力 安倍SS)(日立) 三相500kV,1260MVA 変圧器(関西電力 大飯NPS)(三菱) 三次50%容量単相分離巻線変圧器512.5kV,750/3MVA(東京電力 新岡部SS)(日立) 三相275kV,1100MVA 変圧器(東京電力 東扇島PS)(富士)	湾岸戦争勃発
ガス絶縁変圧器三相155kV,25.5MVA(中部電力 北又渡PS)(富士) 高落差自冷式ガス絶縁変圧器三相75kV,20MVA(中部電力 桃花台SS)(富士)	
防音板なし低騒音変圧器268.5kV,300MVA,60dB(東北電力 石巻SS)(日立) 新分解輸送形変圧器三相275kV,250MVA(中部電力 北松本SS)(東芝) 送ガス風冷式ガス絶縁負荷時タップ切換変圧器66kV,60MVA(東京電力 豊洲SS)(東芝) 低誘電率PB 適用単相単巻変圧器525kV,1500/3MVA(東京電力 新坂戸SS)(日立)	
UHV フィールド実証試験用変圧器1050kV,1000MVA(東京電力 新榛名SS)(日立、東芝、三菱) 新分解輸送形変圧器三相500kV,300MVA(関西電力 奥多々良木PS)(三菱) 分路リアクトル500kV,250MVA(電源開発)(三菱)	
送ガス水冷式ガス絶縁変圧器275kV,300MVA(東京電力 東新宿SS)(東芝) 送ガス水冷式ガス絶縁分路リアクトル275kV,150MVA(東京電力 葛南SS)(東芝) 送ガス風冷式ガス絶縁変圧器161kV,68MVA(東北電力 柳津西山地熱PS)(東芝) 2300kV 試験用変圧器(日立) 新分解輸送形変圧器500kV,1000MVA(中部電力 愛知SS)(三菱) 三相変圧器500kV,1450MVA(東京電力 柏崎刈羽NPS)(日立) 世界最大容量モールド変圧器三相22kV,13MVA(東京都)(富士) 高圧二重定格三相変圧器520(225)kV,730MVA(九州電力 苓北PS)(日立) 分路リアクトル500kV,250MVA(電源開発 坂出CH)(東芝) 異容量三相スプリット巻線変圧器275kV,800/450-350MVA(関西電力 姫路第一PS)(三菱)	阪神淡路大震災
三相変圧器500kV,1450MVA(東京電力 柏崎刈羽NPS)(東芝) 送ガス水冷式ガス絶縁変圧器三相107.5kV,40MVA(中国電力 島田SS)(富士)	
新分解輸送形変圧器500kV,1000MVA(中部電力 西部SS)(東芝) 三相負荷時タップ切換変圧器275kV,1050MVA(東北電力 原町PS)(東芝、富士)	
新分解輸送形変圧器三相275kV,250MVA(中部電力 新北信SS)(富士) 新分解輸送形変圧器三相500kV,800MVA(関西電力 奥多々良木PS)(三菱) 全装組立輸送(海上)発電所用変圧器三相281kV,380MVA(東京電力 千葉PS)(富士) HVDC 用1H 直流リアクトル(紀伊水道 阿南、紀北CS)(東芝、三菱) 500kV 地下変電所用1500/3MVA 変圧器(東京電力 新豊洲SS)(東芝) アーク炉用変圧器155/175MVA(メキシコ IMEXSA)(東芝) アーク炉用変圧器152/182MVA(エジプト ANSDK)(東芝)	
HVDC 変換用変圧器500kV,872MVA(紀伊水道 阿南、紀北CS)(日立、東芝、三菱)	
液冷却式ガス絶縁変圧器275kV,450MVA(中部電力 名城SS)(日立) スプリット巻線変圧器三相525kV,410MVA×2(東京電力 富津PS)(富士) 三相変圧器525kV,1100MVA(電源開発 橘湾PS)(富士) 単相765/400kV,1500/3MVA 単巻変圧器(ベネズエラEDELCA)(三菱) 二次巻線付分路リアクトル単相525kV,120/3MVA(中国)(富士)	
特別三相500kV,1500MVA 変圧器(関西電力 能勢SS)(三菱) 新分解輸送形変圧器500kV,1000MVA(中国電力 智頭SS)(日立)	
高圧二重定格三相変圧器525(281.25)kV,1060MVA(東京電力 日立那珂PS)(日立)	ニューヨーク同時テロ
三相変圧器500kV,1510MVA(中部電力 浜岡NPS)(三菱) 送ガス水冷式ガス絶縁変圧器345kV,400MVA(オーストラリア)(TMT&D) スプリット巻線変圧器三相507kV,525MVA×2(東京電力 神流川PS)(TMT&D)	イラク戦争

■ 参考資料2 変圧器専門用語解説

参考資料2として本報告に出てくる変圧器技術用語を専門家以外の人が理解できるように図面も引用しながら解説した。採りあげた項目については本文中に斜体文字で表記してある。参考にしていただければ幸いである。

エレファントブッシング

変圧器と電力ケーブルとをダクト内の油中で接続する方式が採られる。この場合変圧器メーカーとケーブルメーカー間の現地作業時期のずれや責任分担の明確化のため変圧器端子を油中—油中ブッシングに接続し、ダクト内でケーブルに接続する方式が日本では一般に行われ、この時のダクトの形状が象の鼻に似ていることからこの油中壁貫ブッシングのことをエレファントブッシングと呼んでいる。



SF₆ガス

1930年代にアメリカで優れた絶縁性能が認められ、ガス遮断器にまず適用された。その後変圧器への適用も検討され、1950年代にアメリカで変圧器として製品化された。現在ガス絶縁開閉装置用として広く適用されている。地球温暖化物質としても挙げられているが、現在はSF₆に代わる適当な材料がないため大気への放出をできるだけ抑えることを主体とした対策が採られている。

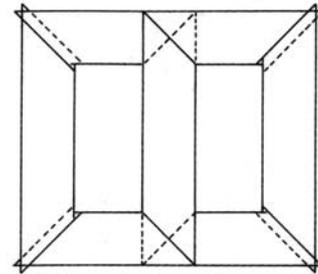
音響法コロナロケーション

変圧器内部で音を伴うような部分放電が発生する場合、その音の波形を3個以上のマイクロホンを使用して記録し、同時に電気的部分放電波形を記録して、音の波形と電気的部分放電の波形の時間ずれから部分放電の発生している場所を推定する方法である。音源とマイク間の距離の差によって到達時間に差が生じ、マイクの位置を適切に変えることによってかなりの精度

で部分放電発生位置が特定できる。

額縁形鉄心

方向性けい素鋼板の特性を生かす鉄心構造で、けい素鋼板を45度の角度で切断し、鉄心脚とヨークの鉄板を互いに突き合わせて構成する鉄心構造で、角の接合部が額縁のように見えることからこの名がついている。なお、接合部は20~30mmずらせて交互に配置して磁束の流れがスムーズとなるようにしている。



額縁接合

加圧試験

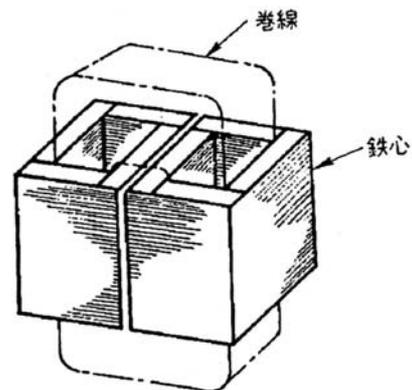
変圧器のAC絶縁試験の一つで、試験用変圧器を使って規定の試験電圧を変圧器巻線に一括して印加する方法。

ガス絶縁開閉装置 (GIS)

変圧器を除いた変電所を構成する機器(例えば遮断器、避雷器、断路器、変流器、など)と変電所の接続母線を圧力容器中に収納し、高圧SF₆ガスで絶縁して送電線からの取入口から変圧器に接続するまでの変電所内の回路構成を形成する機器の総称。

外鉄型変圧器

変圧器が開発された当初は一般に適用されていた構造で、巻線を先に組み立て、その回りに鉄心を後から組み立てる構造。外観として鉄心が外側に配置されていることからこの名前がついた。



均等絶縁

線路端と中性点とが同じ絶縁強度で製作されている絶縁構造をいう。

気相乾燥法

変圧器の中身乾燥方法の一つ。絶縁物中の水分をできるだけ早く放出させるため、加熱によって温度を上げるが、そのとき灯油の一種であるケロシンの蒸気を使用し、蒸気が冷たい絶縁物に触れたときに液化して潜熱を絶縁物に与え、絶縁物の温度上昇を促進させる加熱方法を使用した乾燥法で、加熱終了後液化したケロシンを回収してから乾燥炉内を真空引きしてさらに水分を蒸発させ乾燥する。現在大容量変圧器で標準的に使用されている乾燥方法。

けい素鋼板

1900年イギリスで発明された磁化特性に優れた鉄板で、変圧器や回転機類の鉄心材料として使用される。鉄に約3%のけい素を混ぜることにより僅かな磁化電流で高い磁束密度が得られ、発生損失も大幅に低減することから、この発明以後これら機器の大型化に大いに寄与した。

高配向性けい素鋼板

1968年わが国で開発された変圧器用けい素鋼板で、従来の方向性けい素鋼板より磁化しやすい結晶粒の[100]の方向を圧延方向にそろえて発生損失の改善を図ったけい素鋼板で、高級材料として現在変圧器に一般的に使用されている。

高インピーダンス化

変圧器は回路的に見るとインピーダンスとして表わされる。このため、系統に例えば接地事故がおきた場合は変圧器を通して事故電流が流れるため変圧器のインピーダンスと系統インピーダンスの和で事故電流が制限されることになる。したがって系統の事故電流が遮断器の能力以上になることが予想される場合に変圧器インピーダンスを通常より高く指定していた。当時の275kV器ではインピーダンスは一般には14%が指定されていたが、高インピーダンス器では20%が指定された。

交互積み接合

額縁形鉄心では一般に鉄板を2枚づつ交互に接合位置を20~30mmずらして額縁の角部の接合を行っている。

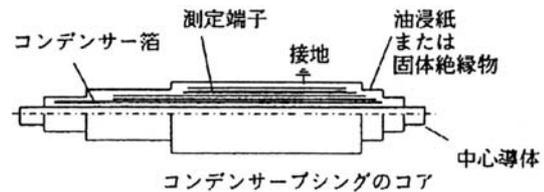


コンサベータ

絶縁油の温度変化による体積変化を変圧器タンク上部に配置した箱内で調整することを目的としたもので、高温の油が直接空気と触れると劣化しやすいので、タンクとの接続には細い管を使用しコンサベータ内の油温が高くならないようにしている。また、油の劣化防止のため空気と直接触れないように不活性な窒素ガスを介在させる方式やゴム膜で仕切る方式がある。現在大容量変圧器ではゴム膜方式が一般的となっている。

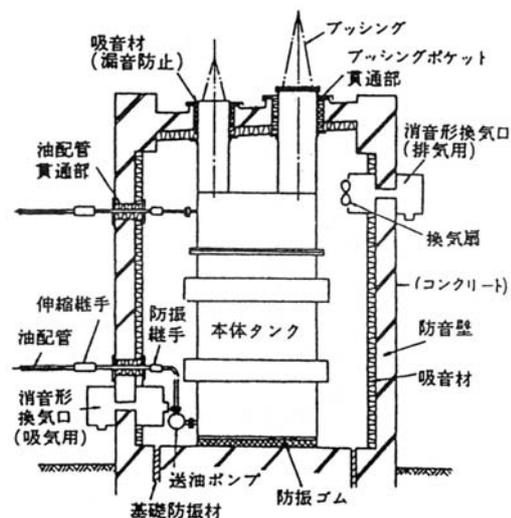
コンデンサブッシング

変圧器巻線端子をタンク外部に引き出し、電源や負荷に接続するための口出しとして使用されるのがブッシングで、その絶縁構成の一つで30kV以上の高電圧用として一般に使用される。中心導体の回りに絶縁紙を巻き付け、その中に多数の電位制御用のコンデンサ箔を巻き込んだブッシングのことである。箔の間隔や寸法を調整して軸方向、径方向の電位分布を制御する。



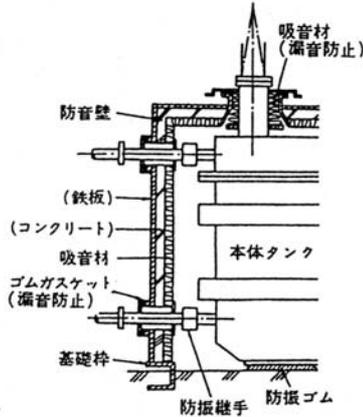
コンクリート防音壁

変圧器本体から騒音を20dB以上低減する必要がある場合に一般に使用された防音構造で、図に示すようにコンクリートで作られた建て屋の中に変圧器本体を引き入れる。ブッシングポケットや油配管などの貫通部は音が漏れないように配慮する。据付スペースや現地工事などの点から最近では適用が減っている。



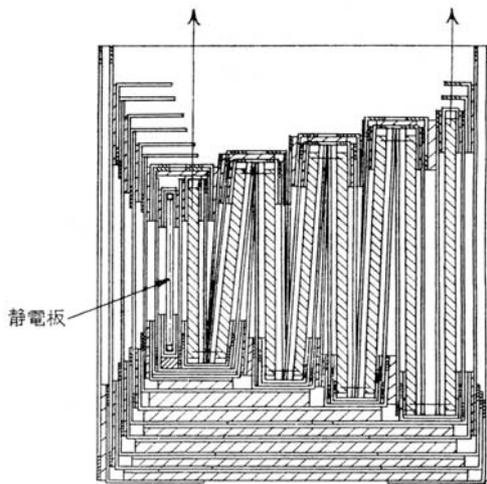
コンクリートパネル防音壁

鉄板で作ったパネルにコンクリートを流し込んだものをあらかじめ製作しておき、現地では変圧器据付後枠にパネルを取り付けて構成する防音構造で、15～20dBの騒音低減が期待できる。



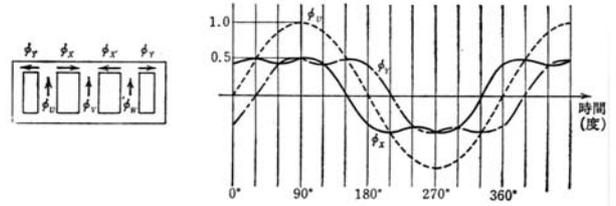
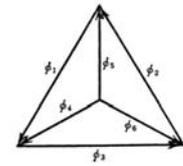
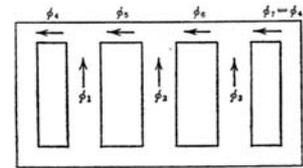
サージブルーフ巻線

外鉄型変圧器の代表的耐雷巻線構造で、線路端に大きな静電シールド板を置いた構造。内鉄型変圧器の多重円筒巻線と同様な特徴を持っている。



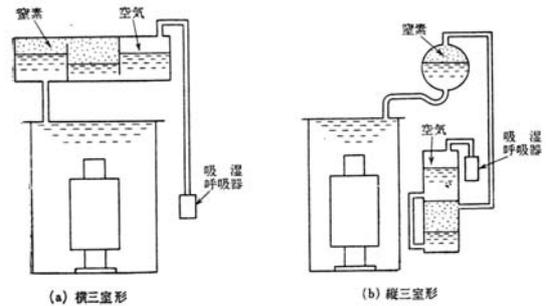
三相五脚鉄心

輸送時の高さを減らすため主脚の磁束 (Φ_1, Φ_2, Φ_3) をヨーク (Φ_5, Φ_6) と側脚 (Φ_4, Φ_7) とに分散させる構造で、磁束が正弦波と考えると $1/\sqrt{3}$ にヨーク高さが低減される。実際には磁束に高調波が重畳するため磁束密度を一定にすると50%までヨーク断面を低減することができる。



三室式コンサベータ

窒素封入式コンサベータの一つで、コンサベータ内が図に示すように三つに分割されていることから呼ばれる。窒素封入式が始まった当初に多く採用されていたが、コンサベータタンクが大きくなる欠点があり、次第に浮動タンク式に取って代られた。



磁区制御けい素鋼板

結晶の磁化が容易な軸方向を圧延方向に揃えた高配向性けい素鋼板で、その特性をさらに高めるために、鋼板表面にレーザを照射したり硬度の高いエッジで細かい傷をつけて磁区を細分化したものを。

真空乾燥

絶縁物中の水分や鉄心に付着した水分を除去するため変圧器中身を乾燥する場合、乾燥時間を短縮するため温風で加熱後、乾燥炉全体を真空引きして水分の発散を早める乾燥方法。

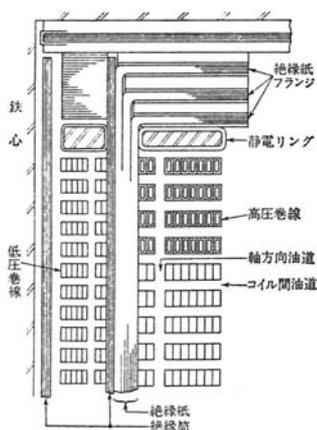
消弧試験

送電線がアークで接地した場合、接地電流を中性点に

接続された消弧リアクトルを通して流すことによりアーク電流が0となり消弧されて接地事故が解消されることを実際に確認する試験。

主ギャップ充填絶縁構造

高低圧巻線間の絶縁構成において間に油ギャップを介在させず、耐圧強度の高い固体絶縁物で充填する構造。巻線冷却のための軸方向油道は巻線内部に設ける。しかし、実際には巻線工作上油ギャップをなくすことは困難で、これら微小ギャップにおいて試験時の高電界で部分放電を発生させることがあるため、この方式は現在ではあまり採用されない。

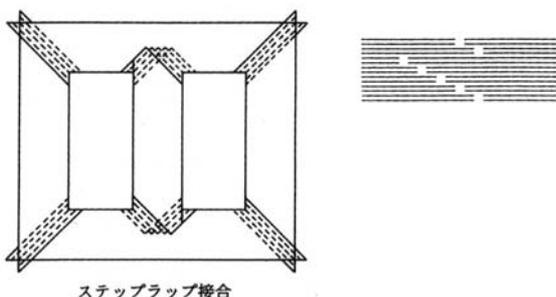


重合度

セルロース系の絶縁物の劣化度を調べる尺度の一つ。セルロースは炭化水素の長い鎖となっているが、熱によって次第にこれら鎖が切れて分子量が減ってくる。重合度は分子量の低減の程度を判定する尺度となっている。

ステップラップ接合

鉄心の抜き板を図に示すように階段状にずらせて脚とヨークの接合部を構成する接合構造。磁束の流れがスムーズとなり発生損失および騒音低減に効果がある。

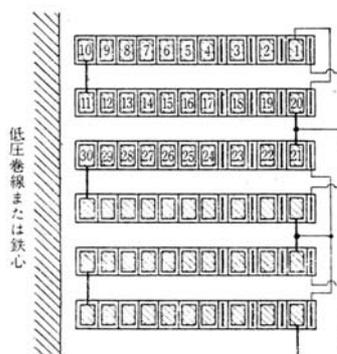


絶縁協調

送電線とそれに接続される変電機器にそれぞれ適切な保護装置を設置して、保護レベルを定め、それに見合った合理的な絶縁レベルを定めることをいう。変電機器には避雷器を送電線からの入り口付近や変圧器近傍に設置し、機器に加わる雷電圧を制限する。一方、これら機器は避雷器で制限される電圧よりやや高めな雷サージに耐えられるように設計する。

制振遮へい巻線

日立製作所で開発された耐雷巻線。電位分布改善のため円板巻線のターン間にシールド導体を一緒に巻き込み、シールド導体の電位を4セクション離れたシールド導体および2セクション離れた通電導体の電位に接続してターン間の静電容量を増加させる巻線。その後通電導体との接続は行わないでも同じ効果が得られることを見出しC-Cシールド巻線と名づけ、現在では500kV級巻線を中心に使用されている。



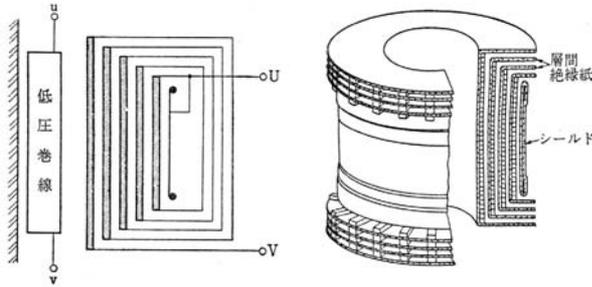
耐雷設計

変圧器巻線に雷サージが侵入した時、その電圧が急峻なため巻線の電圧分担は様にはならず、巻線に直列に接続される静電容量と対地間の静電容量の比が小さいとほとんどの電圧が線路端付近に集中してしまうため、古くはこの部分の絶縁を強化してこれに耐えるようにしていた。その後この比を大きくする方法を各種考案し、できるだけ電圧分担が一樣になるようにして線路端部分だけを極端に絶縁強化しないよい構造を開発してきた。このような雷サージに対する絶縁設計のことをいう。

多重円筒巻線（無振動巻線）

絶縁筒の上にコイルを円筒状に巻き、その外径側に油道を設け、絶縁紙を必要な厚さ巻き付け、その上にまたコイルを円筒状に巻き、これを何層か重ねて最外層にコイル高さ相当の静电シールドを配置し、シールド

は線路端子に接続する。各層間の接続はすべてリードで引き出し外部で接続する方法、外部に引き出さず各層の巻きおわりを油道と絶縁紙の中を通して移動し次の層を巻く方法、絶縁紙の厚さにテーパをつけて巻き終わりからすぐ次の層を逆向きに巻く方法とがある。最後の方法は2層分の電圧が掛かるので絶縁厚さも変化させる必要がある。

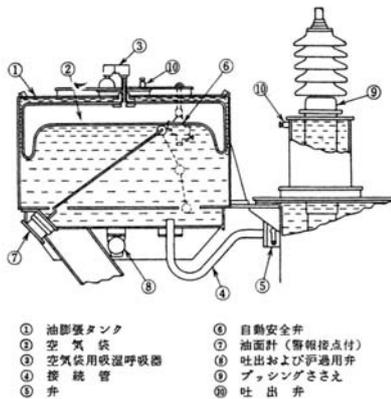


タンク横倒し輸送

外鉄型変圧器では中身を鉄心が取り巻いていることから、鉄心を介してタンク側面で中身を支持固定することができるため、輸送時にタンクを横倒ししても中身の荷重を支えることが可能であり、しかも外鉄型変圧器では長さよりも高さの方が寸法的に大きくなる場合があり、このようなケースでは横倒しするメリットが出てくる。1950年代に採り入れられた輸送方法。

ダイヤフラム式コンサベータ

1960年代に採り入れられたコンサベータ方式で、外気と油をナイロン入りのゴム膜あるいはゴム袋で仕切り、油が空気と触れないようにしたことを特徴とするコンサベータ方式で、現在わが国で標準的に使用されている。ゴム膜には空気を透過しないようにナイロンなどのフィルムが挟まれている。このため油中に溶存するガス成分は少なく、現在変圧器の保守管理に一般的に利用されている油中溶存ガス分析では微量ガスの分析精度が高く異状現象の発見に貢献している。



- ① 油部タンク
- ② 空気袋
- ③ 空気袋用吸湿呼吸器
- ④ 接続管
- ⑤ 弁
- ⑥ 自動安全弁
- ⑦ 油面計 (警報接点付)
- ⑧ 吐出および逆適用弁
- ⑨ プッシングささえ
- ⑩ 吐出弁

タンク磁気シールド

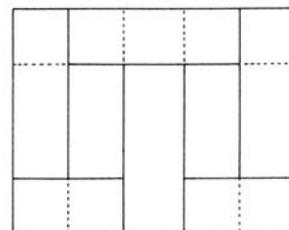
コイルからのもれ磁束によるタンク面での過熱や損失増加を防止する目的でタンク面に取り付ける磁気遮へいで、けい素鋼板を数mmから30mm程度の厚さ取り付ける。取り付け方法には各種あるが、必要厚さ分の幅にしたけい素鋼板の帯をコイルに対向する幅相当に重ねて、そのコバ面をスポット溶接により一体化しハンドリングができるようにしたもの、100~150mm幅、コイル高さの長さ程度のけい素鋼板を必要厚さ分重ねてエポキシなどで接着して一体化したものがあり、これをタンク面に取り付ける。厚さはタンク面に入射する磁束量によって決める。

単巻変圧器

変圧器の結線方式の一つ。変圧器は一般には高压巻線と低压巻線とは別々に必要な容量の巻線を作るが、単巻変圧器では低压巻線を高压巻線と共用することに特徴がある。こうすることによって巻線容量は高压が(高压電圧-低压電圧)×(高压電流)となり低压は(低压電圧)×(低压電流-高压電流)の二巻線変圧器と同一とみなせることとなる。この値は等しく、結局一般の変圧器に比べ単巻結線とすることにより変圧器容量は(高压電圧-低压電圧)/(高压電圧)に低減されることになる。例えば500kVと275kVの単巻変圧器では別巻線とする場合に比べ(500-275)/500=0.45となり同じ送電容量でありながら変圧器の実質の容量が半分以下で済むことになる。この実質容量のことを自己容量という。単巻変圧器はわが国では500kVが導入された時に全面的に適用されたが、これは系統構成が同じ接地系統でないとは適用できないためである。

直角接合

1960年頃までの熱間圧延けい素鋼板を適用していた時代に適用されていた鉄心の接合構造で下図のように鉄心を交互に組み合わせる構成していた。



中性点

三相巻線の一端を共通に接続し、他端を線路に接続する星形結線で共通接続された部分を中性点という。この部分は対地電位が0となる。

窒素封入式コンサベータ

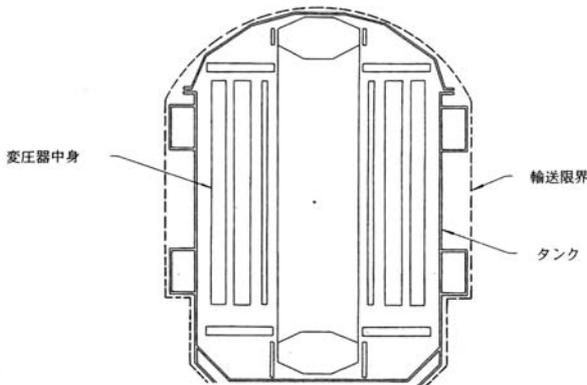
変圧器油の劣化防止のために外気と直接触れないようにコンサベータに不活性な窒素ガスを封入したコンサベータのことで、三室形と浮動タンク式とがある。

直流偏磁

変圧器鉄心の磁束は励磁電源電圧を反映した正弦波となり、これは平常正負対称で直流分は含まれないが、外部から変圧器巻線に直流電流が流入するとこの磁束波形がバイアスされ、1周期の一方のピークのみ磁束密度の高くなる現象が起こる。これを直流偏磁という。この場合、励磁電流の急増、振動・騒音の増加が発生するが、鉄心磁歪が正負非対称となるため、騒音・振動は高調波を多く含む歪み波となる。

鉄道輸送限界

鉄道で貨物を輸送する場合の寸法制限で、トンネル、信号機や駅プラットフォームなどで制限される。輸送ルートによって制限寸法および制限質量は変化するが、最大で幅3.1m、高さ4.0m程度で下図のように制限寸法に合わせた形状にして特殊貨車で特別仕立ての列車ダイヤで輸送する。



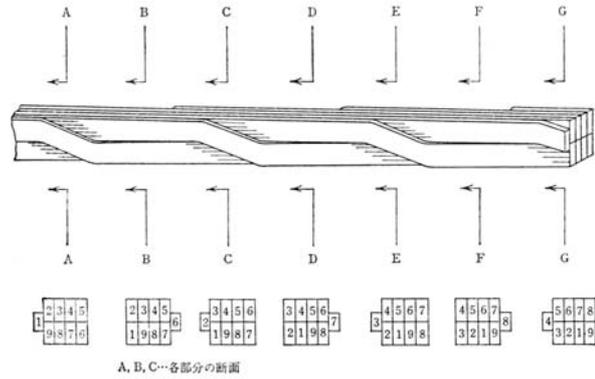
電圧位相調整器

送電系統で電力の流れを制御するために使用される。電圧と同時に位相角をずらすことを行うもので、電圧調整は主巻線と同相に行うのに対して、位相調整は一般に主巻線と直角位相で電圧調整を行い、ベクトル合成で主巻線の位相が変化することになる。

転位電線

ホルマール被覆された奇数本の平角銅線を二列に配置し、導体を専用機械を使用して約10cmピッチで一本ずつ転位させながら撚り合わせて、一本の導体束とし、その上に絶縁を施した変圧器用電線。導体に鎖交する巻線

もれ磁束によって発生する循環電流による渦電流損を低減させる目的で大容量器に使用されることが多い。

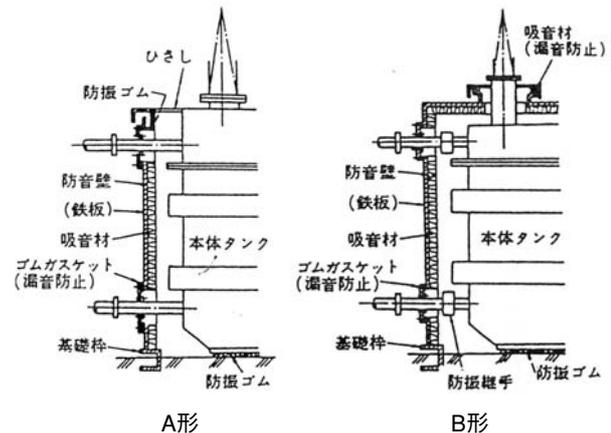


電磁シールド

コイルからのもれ磁束によるタンク面での過熱や損失増加を防止する目的でタンク面に取り付ける磁気遮へいで、タンク面にアルミニウムや銅のような良導体を使用し、磁束が入射するとそれを打ち消すようにシールド内に電流が流れるため、結局磁束をはね返して、タンク面だけの場合ともれ磁束の流れ方を変えてしまい、タンク面での過熱や損失発生防止を行うものである。ただはね返された磁束は結局中身構造物や鉄心に入り、この部分の損失を増加させるため、全体の損失低減にはあまり効果がない。しかし、過去大容量変圧器では大電流リードによるタンク過熱防止対策も含めて電磁シールドが適用されてきた。

鉄板防音壁

組立式鉄板防音壁としては二種類の方式があり、A形、B形と呼ばれている。A形はタンク側面だけを覆うもので騒音低減効果は10dB程度以下である。一方B形は変圧器本体全体を鉄板パネルで覆うもので15dB程度までの低減が見込める。



特別高圧

10000V以上の電圧のことをいう。

等価容量

三巻線以上の多巻線変圧器の容量を表わすのに使用される。各巻線の定格容量をP1, P2, P3, としたときの等価容量は下記で与えられる。

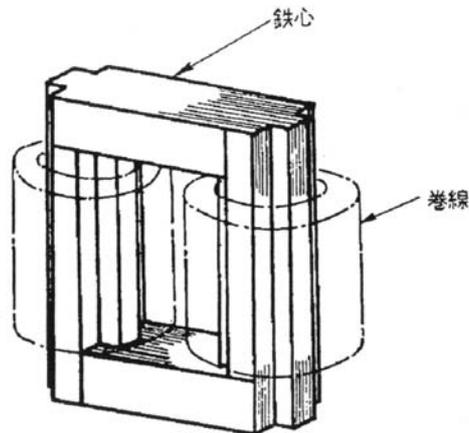
$$P=(P1+P2+P3)/2$$

特別三相方式

三相変圧器を单相器三台の構成とし、据付時はそれぞれを共通ベース上にできるだけ接近して配置し、上部カバーは三相共通として三相のリード接続をその中で行うようにした構造で、輸送時は单相毎に行い、輸送条件を緩和する方式。1950年代に提案され、わが国では地下変電所用変圧器や水力発電所用変圧器のように輸送条件の悪い変圧器に多く適用されてきた。

内鉄型変圧器

1910年代にアメリカGE社がバリヤ絶縁方式と共に採用してから世界的に適用が増加し、現在ではほとんどのメーカーが採用している構造で、上部ヨークを除いた鉄心を先に組み立て、巻線を上部から挿入した後上部ヨークを組み立てる構造で、鉄心脚が巻線の中に隠れることからこの名がついた。

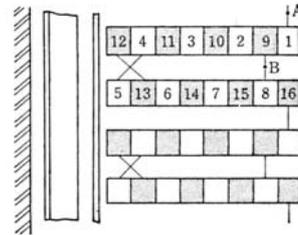


二重同心巻線配置

内鉄型変圧器の巻線配置の一種で、高圧巻線または低圧巻線のどちらかを二つに分割し、分割した巻線の中間に他の巻線を同心的に配置する。低圧—高圧—低圧または高圧—低圧—高圧の配置。分割した巻線は直列に接続する。巻線もれ磁束対策、低圧大電流引き出しが同心配置より容易になることから大容量器で採用される。

ハイセルキャップ巻線

イギリスEE社によって開発された耐雷巻線。電位分布改善方法として巻線に直列に入る静電容量を増加させるために導体の巻き方に工夫を凝らし、円板巻線の2セクションの中で導体を2回転させて隣同士の素線に離れた電位の導体が配置されるようにした巻線。UHV用巻線としても使用される。インターリーブド巻線とも呼ばれる。

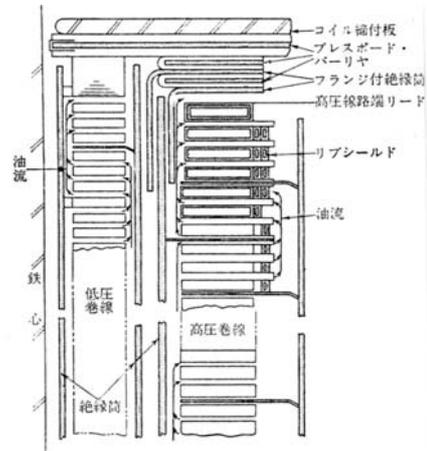


パーフロロカーボン

液冷却ガス絶縁変圧器の冷却用として使用されている不燃性の冷却媒体で、主としてC₈F₁₈やC₈F₁₆Oといった分子式のものが使用されている。これらは沸点が100～130℃で絶縁油と比較すると引火点がない、動粘度が低い、密度が大きいなどの特徴がある。熱安定性がよく、変圧器に使用される他の材料との適合性にも優れていることから変圧器用冷媒として使用されている。

バリヤ絶縁

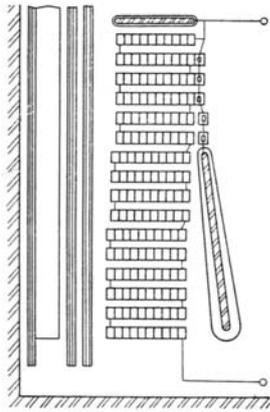
高圧巻線と低圧巻線間のギャップを間に複数の絶縁筒で仕切り、油ギャップと絶縁筒を交互に配置することにより油ギャップの破壊電界が上昇することを利用した絶縁構成。現在標準的に使用されている。



非共振変圧器

アメリカGE社が開発した耐雷巻線で、巻線電位分布を改善するため、巻線の直列静電容量を増加させるた

めに巻線外側に静電シールドを取り付けて巻線初期電位分布が直線となるようにした構造。巻線外側にスタックシールドと呼ばれるスカートのようなシールドを取り付けるのが特徴。



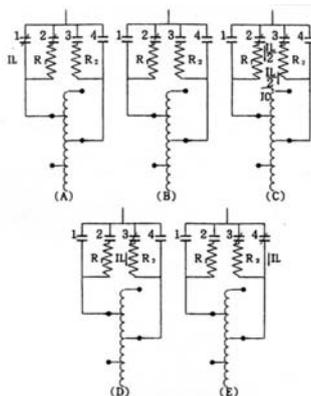
非振動巻線

ドイツのAEG社で1930年代に開発された巻線で多重円筒巻線と同一。巻線の直列静電容量が大きく、対地静電容量が小さいことから巻線初期電位分布が直線となることからこの名がつけられた。

負荷時タップ切換

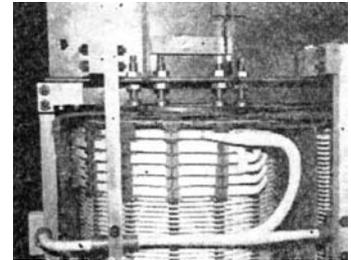
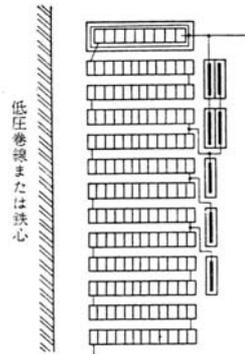
変圧器で負荷が乗っている時にタップを切り換えて電圧調整を行う方式としては変圧器自身にタップ巻線を巻き込む方式と主変圧器とは別に電圧調整用の直列変圧器を持つ方式とがある。

また、タップを切り換えるタップ切換装置としては切換時にタップ間を橋絡するとき、その循環電流を制限する方式にリアクトルを使用する方式と抵抗を使用する方式が実用化している。現在は抵抗式の方が変圧器本体内に内蔵でき、コンパクトであることから世界的に広く使用されている。タップを切り換える動作は図に示すとおりで、切換には約2秒かかる。電流を切り換えるときはアークが発生するため切換開閉器は変圧器本体の油とは別の油槽に収納されている。



部分遮へい巻線

リブシールド巻線とも呼ばれ、線路端近傍のコイル外周に絶縁されたシールド導体を巻き付ける構造。シールドとコイル間の静電容量が直列静電容量となり線路端付近の電位分布を改善する。



部分放電

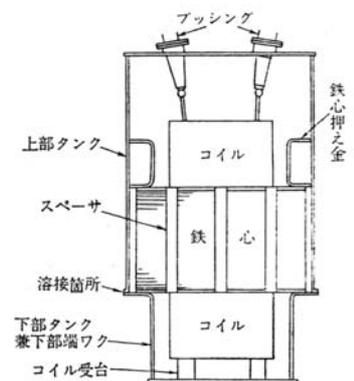
絶縁物が微小放電を伴って部分的に破壊する状態をいうもので、電極形状が悪く一部に電界が集中する場合、絶縁物中にボイドが存在する場合、異物や塵埃が存在する場合など絶縁破壊となる電圧よりかなり低い電圧で部分放電が発生する。変圧器では部分放電は破壊の前駆現象と捕らえ、部分放電が発生しない構造、作業方法を指向している。

分路リアクトル

系統と対地間に挿入されるリアクトルで、長距離高電圧送電線やケーブル系統では対地間の静電容量が大きく、負荷電流が低い場合は静電容量のため進み負荷となり、電圧上昇を伴う。これを補正するために使用されるのが分路リアクトルで、主に軽負荷時に投入される。分路リアクトルの構造としては鉄心形と空芯形があり、最近は損失発生が少ない鉄心形が多く採用されている。

フォームフィット形タンク

外鉄型変圧器のタンク構造の一種で、下部タンク上で巻線および鉄心を組み立て、上部タンクをかぶせて、タンク自身が鉄心クランプを兼用するようにし、中身とタンク間のスペースを最小としたタンク構造。



方向性けい素鋼板

1930年代アメリカのArmco社が開発したけい素鋼板で、それまでの熱間圧延法から冷間連続圧延とし、これに適当な熱処理を行うことにより脱炭および再結晶を行うと、結晶粒の磁化されやすい稜の方向が圧延方向にそろい、その後の僅かな圧延と熱処理により結晶粒が粗大化して損失が激減することを発見し製品化したものである。

ポリ塩化ビフェニール

1930年代にアメリカで開発された不燃性の絶縁油で鉱油並みの絶縁および冷却特性を持っていたためアメリカで多用された。日本でも1940年代に製品化され変圧器にも適用されたが、その毒性のため1972年に製造禁止となり、1974年にその使用が禁止された。変圧器用は凝固点と粘度を下げる目的から三塩化ベンゾールを40%混入したものが使用されていた。誘電正接が大きいためコンデンサ用として多用されていた。

UHV送電

UHVとはUltra High Voltageの頭文字を採ったもので、一般にAC電圧765kV以上のことをいう。世界で765kV送電は各所で運用されているが、1000kV級送電は1980年代に当時のソ連のカザフスタン地方で開始されたのが現在も唯一の運転である。

誘導耐圧試験

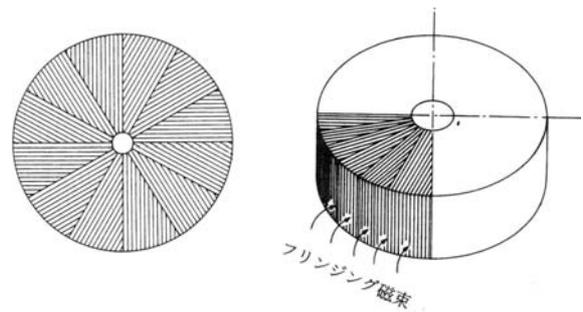
変圧器のAC絶縁試験の一つで、低圧巻線に電源を接続し、供試変圧器に常規の2倍を超えない範囲で誘導を行い、試験端子に規定の電圧を出す。鉄心が飽和しないように商用周波数より高い周波数(一般には3~4倍)で行う。要すれば試験端子以外の端子の電位を調整する。

油浸紙コンデンサブッシング

コンデンサブッシングの一つで、コアに絶縁紙を使用し、コンデンサコアを形成した後乾燥し絶縁油を注入した一般的に使用されるブッシング。絶縁的に安定しているため、30kV以上UHV級まで広く使用されている。

ラジアル鉄心

鉄心の抜き板を図に示すように放射状に配置してギャップで発生する鉄心フリンジング磁束による渦電流損の発生を抑制する効果があるリアクトル用鉄心構造。



流動帯電

送油式変圧器でポンプ運転による油流で油と絶縁物が摩擦静電気を発生させる現象をいう。発生した静電気は絶縁物上に負電荷が、絶縁油中に正電荷が分離し蓄積される。絶縁物上の電荷がある限度を超した時沿面放電が起き、これがきっかけとなってACの絶縁破壊にまで発展することがある。静電気の発生はコイル下部の油採り入れ口付近が最も多く、この部分の流路形状が大きく影響する。静電気放電も一般にはこのコイル下部油採り入れ口付近で発生する。油の正の電荷は時間とともに減衰するが、発生量が多いと上部空間に蓄積され、上部空間体積が大きいと高電圧となり、このような部分に絶縁物などの沿面が介在すると放電に発展することがある。

レジコンデンサブッシング

コンデンサブッシングの一種でブッシングコア成形時にレジンを絶縁紙に含浸させながらコンデンサコアを形成する乾式レジブッシングと絶縁紙によりコンデンサコアを成形後レジンを真空含浸させる方式とがある。前者はコア中に微小ボイドが残存するため部分放電が発生することから現在はほとんど使用されていない。油—油ブッシングとして使用する場合は管が不要なため寸法が短くブッシングポケットが小さくなることから多用されていた時代がある。

■ 付録

変圧器の適用目的と変圧器の分類について述べる。

変圧器の適用目的としては次の六つに分類できる。

- A. 電圧電流変換
- B. 入出力回路分離、極性反転
- C. インピーダンス値の利用、変換
- D. 電圧電流調整
- E. サージ移行、ノイズ抑制
- F. 電力分配

また、変圧器の分類はその使用する目的により次のように分類される。

1. 電力用(電源)変圧器

適用目的はAからFのすべてである。

電力用変圧器

(送電用変圧器)

発電所用変圧器

変電所用変圧器

(配電用変圧器)

二次変電所用変圧器

柱上変圧器

地埋変圧器

パッドマウント変圧器

産業用変圧器

受電用変圧器

大電流用変圧器

半導体電力変換装置用変圧器

電鉄用変圧器

車両用変圧器

医療用変圧器

電源用変圧器

民生用変圧器

電源用変圧器

2. 絶縁変圧器

適用目的はA、B、C、Eである。回路に鎖交する磁束によって生ずる電位差によって引き起こされるノイズを除去するため回路に接続され、回路を一点で接地するようにすることを目的に使用される。

3. 接地・消弧変圧器

適用目的はCのインピーダンス利用。接地変圧器は回路の中性点接地用接続を設ける目的で使用する変圧器で、消弧変圧器は接地変圧器と二次側リアクトルとを組み合わせた装置で消弧リアクトルと同様の目的に使用される。

4. 始動変圧器

適用目的はCのインピーダンス利用。電動機を円滑に始動する目的に使用する変圧器。

5. 試験用変圧器

適用目的はA、Dの電圧電流変換と調整。

6. 計器用変圧器

適用目的はAの電圧電流変換。

7. 漏洩変圧器

適用目的はCのインピーダンス利用。アーク溶接用、ネオン管用などの負の電圧電流特性を有する負荷に供給するため大きい漏れリアクタンスを必要とする場合に用いられる。

8. 誘導電圧調整器・移相器

適用目的はAとDの電圧電流変換と調整。一次および二次巻線の位置関係を回転により変化し、二次巻線の電圧または位相を連続的に変化させるもの。

9. 通信用(パルス・信号伝送)変圧器

適用目的はA、B、C、Eである。変圧器の変換特性とインダクタンスと静電容量による回路定数を利用して信号伝送の際の電圧・電流・インピーダンス変換、極性反転、回路間の電位分離、平衡回路・不平衡回路の変換などの目的に使用される。

10. ノイズ・高調波抑制・スイッチング・耐雷変圧器

適用目的はB、Eである。電源回路から侵入するサージやノイズの二次側への移行を大幅に低減することを目的にする。

これら各変圧器についてその目的と適用される主要技術をまとめて技術体系図として付図に示す。

この他変圧器の分類として据付場所による分類として

屋外用

屋内用

冷却、絶縁媒体による分類として

油入

乾式

ガス入

電圧調整法による分類として

端子台タップ切換式

無電圧タップ切換器付

負荷時タップ切換器付

(負荷時)電圧調整器

動作原理による分類として

二巻線変圧器、多巻線変圧器

単巻変圧器

等に分類される。

以上の調査からも分かるように電力用変圧器が技術的

にすべてに関係しており、昔から最も関心を集めてきた分野であり、技術的牽引役をになってきた。そこで

今回の系統化にあたっては電力用変圧器を選定した。

付図 変圧器の技術体系図

目的
A. 電圧電流変換
B. 入出力回路分離、 極性反転
C. インピーダンス利用、 変換
D. 電圧電流調整
E. サージ移行・ノイズの抑制
F. 電力分配

変圧器の分類
1. 電力用(電源)変圧器 A,B,C,D,F イ,ロ,ハ,ニ,ホ,ヘ,ト,チ,リ
2. 絶縁・耐雷変圧器 A,B,C,E ロ,ニ
3. 接地・消弧変圧器 C ホ
4. 始動変圧器 C ホ
5. 試験用変圧器 A,D ロ,ハ,ニ,リ
6. 計器用変圧器 A イ,ロ,ハ,ニ
7. 漏洩変圧器 C イ,ホ
8. 誘導電圧調整器・移相器 A,D イ,ロ,ト
9. 通信用(パルス・信号伝送)変圧器 A,B,C,E イ,ロ,ニ,ホ
10. ノイズ・高調波抑制・スイッチング変圧器 B,E イ,ロ,ニ,ホ

主要技術
イ. 鉄心構造と磁気特性
ロ. 巻線構造・結線
ハ. 絶縁材料と絶縁特性
ニ. サージ特性
ホ. インピーダンスともれ磁束
ヘ. 冷却と温度
ト. 電圧調整
チ. 電磁機械力
リ. 輸送

■ 文献リスト

- (1) 宮本茂業：変圧器の進歩，オーム社(1952)
- (2) Ganz transformer since 1885 , Ganz Electric Works Budapest (1978)
- (3) The Electrician 1891年9月4日号 P497
- (4) 納富盤一：電気学会誌，明43年2月No.259 P81 (1910) (以下、「電学誌」と略記)
- (5) 宮本茂業他：220kV—100000kVA変圧器，芝浦レビュー，19巻12号(1940)
- (6) K.W.Wagner：“Das Eindringen einer electromagnetischen Welle in eine Spule mit Windungs-kapazität” E.u.M S89 (Feb.1915)
- (7) R.Torikai：Abnormal Pressure-rise in Transformer and its Remedy J.I.E.E. Vol.50 No.303,July 1921,P740-750
- (8) 石川潔他：我が邦最初の変圧器商用衝撃電圧試験 芝浦レビュー第16巻10号，11号(1937)
- (9) 阪本孜郎：芝浦レビュー第9巻10号P287(1930)
- (10) 伊藤龍平：超高压変圧器，遮断器について 「変圧器」経過の概要 電学誌72巻771号 P780(1952)
- (11) 木沢修：成出発電所用70,000kVA変圧器について 電学誌72巻771号 P792(1952)
- (12) 村上有：枚方変電所用99,000kVA変圧器について 電学誌72巻771号 P788(1952)
田宮利彦他：250kV 117,00kVA超高压用変圧器 三菱電機技報26巻5号P23(1952)
- (13) 浅川七平：新愛本変電所用99,000kVA変圧器について 電学誌72巻771号 P783(1952)
浅川七平他：117000kVA超高压変圧器に就いて 東芝レビュー第8巻6号(1953)
- (14) 平田幸造：椿原発電所用45,000kVA変圧器について 電学誌72巻771号 P796(1952)
- (15) 田宮利彦他：佐久間発電所用特別3相式超高压変圧器 三菱電機技報29巻12号P656(1955)
- (16) 山城巍：地下発電所用超高压変圧器—奥只見発電所用133MVA, 287.5kV— 東芝レビュー第15巻8号(1960)
- (17) 浅川七平他：送油風冷式66000kVA変圧器について 東芝レビュー第7巻6号(1952)
- (18) 嶋裕史他：東京電力北東京変電所納め345,000kVA変圧器 三菱電機技報38巻7号P54(1964)
- (19) 村田久夫他：東京電力姉崎火力発電所680MVA変圧器 東芝レビュー第22巻8号(1967)
- (20) 清水栄他：東京電力鹿島火力発電所納入1,100MVA変圧器 東芝レビュー第28巻7号(1973)
- (21) 渡辺優他：発電所用大容量三相変圧器 日立評論80巻2号(1998)
- (22) 出丸俊樹他：原子力向け世界最大容量変圧器完成 TMT&D技報第1巻4号(2003)
- (23) 浅川七平他：オーストラリア向け330kV単巻変圧器 東芝レビュー第17巻4号(1962)
- (24) 小川毅他：オーストラリア向け330kV 160MVA単巻変圧器 日立評論第44巻8号(1962)
- (25) 坂田邦寿他：超高压電力研究所納め500kV変圧器 三菱電機技報41巻3号P424(1967)
- (26) 村田久夫他：500kV用変圧器製作経験と絶縁試験 電気四学会連合大会シンポジウム1969年3月
- (27) 村田久夫他：東京電力(株)新古河変電所納入1000/3MVA500kV変圧器 東芝レビュー第26巻9号(1971)
- (28) 岩崎晴光他：500kV1,000MVA単巻変圧器 三菱電機技報45巻9号P1078(1971)
- (29) 田村良平他：大容量変圧器における流動帯電現象 電学誌第99巻10号P17(1979-10)
- (30) 電気協同研究 第54巻 第5号(その1) 油入変圧器の保守管理(1999-2)
- (31) 東京電力 変電技術史 平成7年3月 工務部、送変電建設本部
- (32) T.Takagi et al, “Reliability Improvement of 500kV Large Capacity Power Transformer” CIGRE SC12, No.12-02, 1978
- (33) S.Shimizu et al, “Electrostatics in Power Transformer” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS- 98, No.4 July/Aug. 1979 P1244
- (34) R.Tamura et al, “Static Electrification by Forced Oil Flow in Large Power Transformer” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS- 99, No.1 Jan/Feb.1980 P335
- (35) M.Higaki et al, “Static Electrification and Partial Discharges Caused by Oil Flow in Forced Oil Cooled Core Type Transformers” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS- 98, No.4 July/Aug.1979 P1259
- (36) 田村良平他：UHV変圧器 三菱電機技報53巻4号P304(1979)
- (37) 村田久夫他：UHV変圧器の開発 東芝レビュー第35巻5号(1980)

- (38) 藤本他：電力中央研究所納入900kV変圧器 富士時報第52巻第7号(1979-7)
- (39) UHV送電特別委員会機器部会 第8次中間報告 UHV交流機器の試験電圧に関する検討(1982-2)
- (40) 電気協同研究 第44巻 第3号 絶縁設計の合理化(1989)
- (41) 電気学会技術報告第517号 試験電圧の考え方と過電圧(1994)
- (42) 電気協同研究 第30巻 第6号 大容量変圧器の事故防止対策(1975)
- (43) 電気協同研究 第40巻 第5号 変電所防災の実効果(1985)
- (44) 藤井義良他：大容量地下変電所(東京電力千代田変電所を中心として)東芝レビュー第15巻11号(1960)
- (45) 電気学会技術報告 第459号 不燃性・難燃性変圧器の現状とその動向(1993-4)
- (46) 電気協同研究 第54巻 第5号(その2) ガス絶縁変圧器の保守管理(1999-2)
- (47) 川田治央他：世界最大容量200MVAガス絶縁変圧器 東芝レビュー第44巻11号(1989)
- (48) 275kV 250MVA三相不燃変圧器 日立評論第73巻1号(1991)
水野和宏他：超高压不燃変圧器の開発 電気学会論文誌B 第115巻4号(1995)(以下、「電学論」と略記)
- (49) 長谷川他：275kV液冷却式ガス絶縁変圧器の開発 電学論B 第110巻12号(1990)
- (50) 高橋英二他：大容量ガス絶縁変圧器の開発 電学論B 第115巻 4号P346(1995)
- (51) 山形芳文：100万V変電機器の開発はここまで進んだ 電学論B 第115巻11号P1276(1995)
- (52) 田村良平他：電源開発佐久間周波数変換所368MVA,353MVA変圧器 三菱電機技報 第39巻11号P12(1965)
- (53) 白坂行康：電力用変圧器技術の変遷 電学誌120巻12号P770(2000)
- (54) 電気学会技術報告 第616号 静止器の騒音対策技術の現状とその動向(1996-12)
- (55) 三浦良和他：関西電力(株)神戸変電所納め275kV, 300MVA CGPA変圧器 三菱電機技報 第60巻4号
P1(1985)
- (56) 電気協同研究 第54巻第5号(その1) 油入変圧器の保守管理(1999-2)

国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第4集

平成16(2004)年3月29日

- 編集 独立行政法人 国立科学博物館
産業技術史資料情報センター
(担当：コーディネイト 永田 宇征、エディット 久保田稔男)
- 発行 独立行政法人 国立科学博物館
〒110-8718 東京都台東区上野公園 7-20
TEL：03-3822-0111
- デザイン・印刷 株式会社ジェイ・スパーク