

275 kV 300 MVA 変圧器の実用性能試験

Practical Performance Test on 275 kV 300 MVA Transformer

栗田 健太郎*
Kentarô Kurita

中川 清*
Kiyoshi Nakagawa

平野 三百里*
Mihori Hirano

要 旨

一次 275 kV に円筒巻線を採用した 300 MVA 変圧器を試作し、長時間コロナ試験、交流および衝撃電圧による絶縁破壊試験を実施して絶縁特性を確認した。このほか漏れ磁束によるタンク損失の測定、巻線機械的強度の確認試験、巻線冷却の実験など一連の実用性能試験を行なった。試作結果を適用した第 1 号機として東京電力株式会社東東京変電所に 300 MVA 負荷時タップ切換変圧器を納入し、昭和 45 年 7 月より営業運転にはいった。これらの内容についても報告する。

1. 緒 言

電力需要の伸びは著しく、それにつれて新鋭火力発電機の単機出力の増大とともに発電所用変圧器の容量も増大している。アメリカでは既に 1,100 MVA 変圧器が完成しており、数年後にはわが国でも同様な需要の出ることが予想される。一方 500 kV 送電が昭和 47 年には開始する予定で変電所用として 500/275 kV、バンク容量 1,000 MVA 単巻変圧器が標準として採用される機運にある。

日立製作所では変圧器の高圧側は円板巻線を標準構造として採用し、研究・開発を続けその性能・構造などの改善に努めてきたが、変圧器容量の増大・電圧の超々高圧化などを考え、昭和 40 年から円筒巻線の構造およびそれに使用する電線・絶縁材料・製法について検討し、試作および実機の製作経験を積み重ねてきた。これらの成果を総合して 275 kV 300 MVA、三相 3 巻線変圧器 1 台を試作し、絶縁破壊試験を含む各種試験を実施して 300 MVA 変圧器の実用性能を実証するとともに、超々高圧、超大容量変圧器の設計・製作に貴重な資料を得た。ここに構造・試験の一端を紹介して参考に供したい。

2. 試作変圧器の構造

試作器は変電所用 275 kV 300 MVA 3 巻線変圧器で、この種変圧器を代表するもので、表 1 はその仕様を示したものである。

2.1 巻 線

巻線は図 1 に示すように内側から三次・二次・一次巻線を同心配置したものである。一次中性点側のタップ巻線はタップ切換えによるインピーダンス変化を小さく押えるため、一次巻線の外側に配置し、各巻線に転位電線⁽¹⁾を使用した。転位電線は断面の小さい奇数本のポリビニルホルマール線を 2 段に重ね、上下段で順次線を入れ換えて転位しその外側を一括外装絶縁するもので、上下段間には絶縁紙を入れて仕切っている。この転位電線を用いると次のような利点がある。

- (a) より徹底した転位ができ、素線寸法の縮小とあいまって漂遊損が低減できる。
- (b) 巻線作業時に転位する必要がなくなり、接続作業が極度に減少するため、作業時間の短縮と信頼性の向上が可能となる。

2.1.1 一 次 巻 線

一次 275 kV 側に円筒巻線を採用した。円筒巻線には各層巻線の巻き方、接続法により N 接続と U 接続がある。前者は各層巻線の巻き方向が同一で接続リードが巻線外部に出るから、本器のように鉄道輸送による寸法制限を受けるものには適しない。後者は

* 日立製作所国分工場

表 1 275 kV 300 MVA 負荷時タップ切換変圧器仕様

項目	巻線	一 次	二 次	三 次
形 式	屋外用送油風冷式、三相、3巻線、5脚鉄心内鉄形			
容 量 (MVA)		300	300	90
電 圧 (kV)		275±10.3% (23 タップ)	147	63
結 線		人 (直接接地)	人 (抵抗接地)	△ (非接地)
絶 縁 階 級 (線路側/中性点側号)		200/80	140/30	60
相 数・周 波 数	三 相 50 Hz			
% インピーダンス	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">← 14.0 →</div> <div style="text-align: center;">← 8.0 →</div> <div style="text-align: center;">← 2.7 →</div> </div>			
騒 音	85 ホン 以下 (JEM)			
使 用 状 態	塩 害 汚 損 0.03 mg/cm ² で 活 線 洗 浄			
輸 送 方 法	つり掛式貨車による (国鉄第 1 輸送限界)			

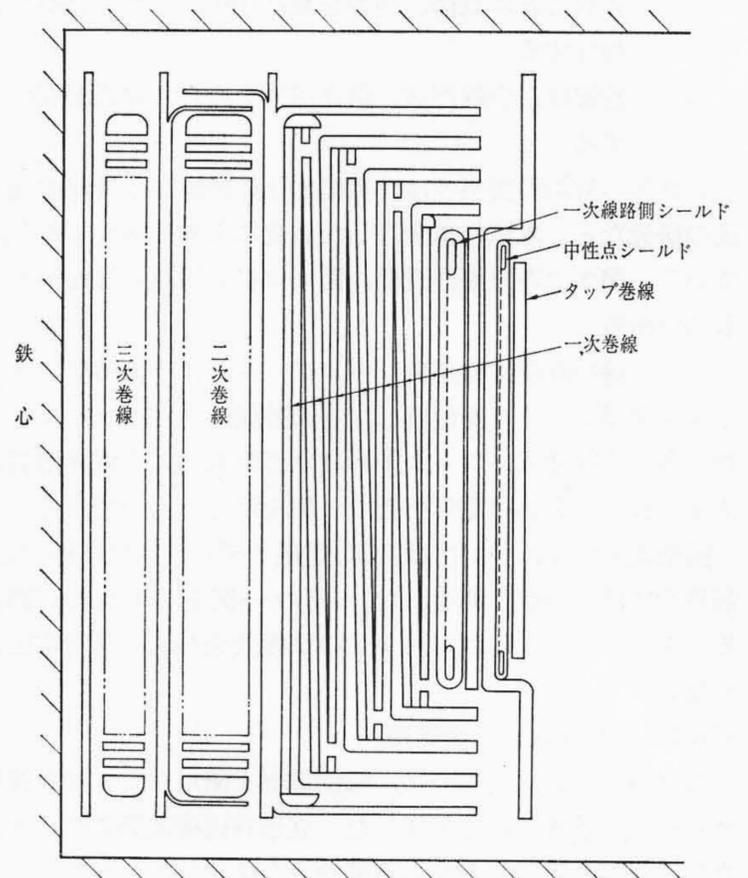


図 1 巻 線 配 置

各層巻線の巻方向を互いに逆にすることで接続リードは外部に出ないが、各層間の冷却・絶縁寸法を同一にとれば巻線幅が大きくなる。U 接続円筒巻線の隣接 2 層では、接続端で 2 層の電位は等しく他端で最大になるから、絶縁紙層の厚みをこれに合わせて、巻線全体の幅を低減することができる。このような巻線構造をと

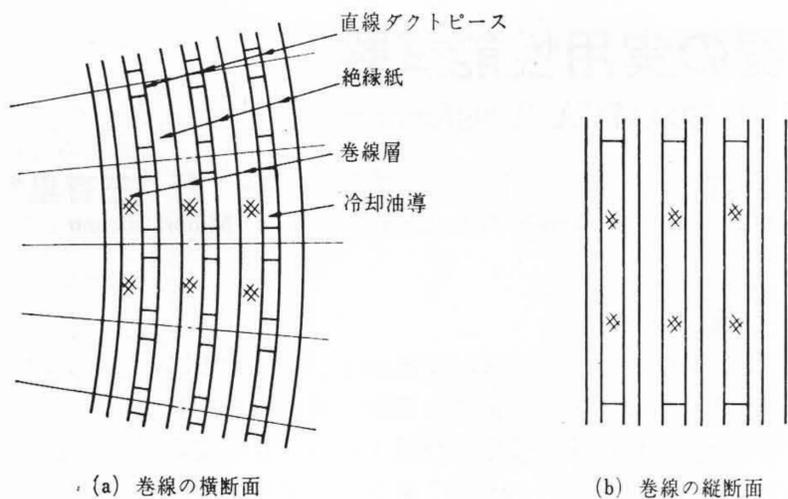
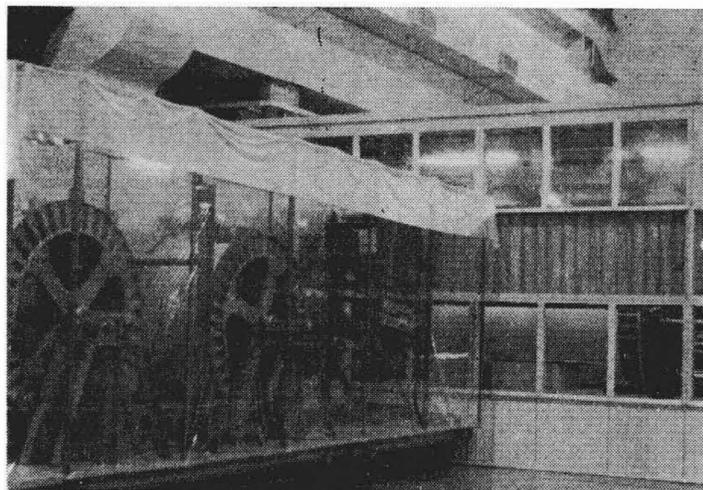


図2 円筒巻線の巻線構成



(防じん空調室内に、さらに超低湿度室を設けている)
図3 円筒巻線製作設備

るとき、巻線は一層おきに軸に対して傾斜するためU接続の一種ではあるが、断面形状でV形を示すので、特にV接続円筒巻線と呼んでいる。本器の一次巻線にはこの方式を採用した。

円板巻線は一相分の巻線を乾燥して所定の圧力で締め付け、巻線高さを調整するが、円筒巻線は図2に示すように巻線層の上にプレスボードの直線ダクトピースをおいて冷却油導を形成し、その上に絶縁紙を巻き付け、次に同様な順序で巻線・冷却油導・絶縁紙層を繰返して製作する。層間絶縁紙は上下端部で外周に向かってL形に曲げるから、巻線ができ上がってから高さを管理するため軸方向に締め付ける手段はない。また半径方向に存在する絶縁物が乾燥により収縮しコイルの支持条件が悪化し機械的強度も低下するおそれがある。これを避けるため次の対策をとった。

- (a) 絶縁紙、プレスボード類はあらかじめ乾燥したものをを用いる。
- (b) 電線は巻き込みながら半径方向、軸方向に圧力を加え、各層ごとに直径、高さを最終寸法に管理しながら巻線を製作する。
- (c) 巻線は、巻線作業、組立作業を通じて超低湿度室で作業する。

これらの対策の妥当性は、基礎的な作業検討、巻線の機械的強度の研究など、本試作に先行した研究によりじゅうぶん確認されている。図3は巻線製作設備、図4は組立用超低湿度室を示したものである。

一次巻線の外側に線路側シールド、さらにその外側にタップコイル保護用シールドを配置し、その外側にタップコイルを配置した。各部絶縁寸法、シールド形状は導電紙による電界解析により決定された。図5は電界解析の一例を示したものである。

衝撃電圧特性については計算、電磁モデルで事前に検討したが、最終的には実巻線で測定した。その一例を示したのが図6である。タップコイルにはシールドの保護効果があり異常電圧はみられない。

2.1.2 二次巻線と三次巻線

二次および三次巻線には、転位電線を使用して立形巻線機により連続円板巻線として製作した。立形巻線機は図7に示すように立軸の巻胴を回転しながら連続巻き作業を行なうもので、巻胴は昇降可能で、巻線作業は常に作業に最も適した管理しやすい位置で行なわれる。巻線の軸方向にも油圧によって所定の締め付け圧力が加わるから、巻線の機械的強度について安定した性能が得られる。これらの作業方法により接続箇所は、二次巻線に1箇所あるのみで、三次巻線にはない。

二次巻線の衝撃電圧特性を改善するためコンデンサカップリングシールド⁽²⁾ (以下CCシールドと呼ぶ)を採用した。CCシールド

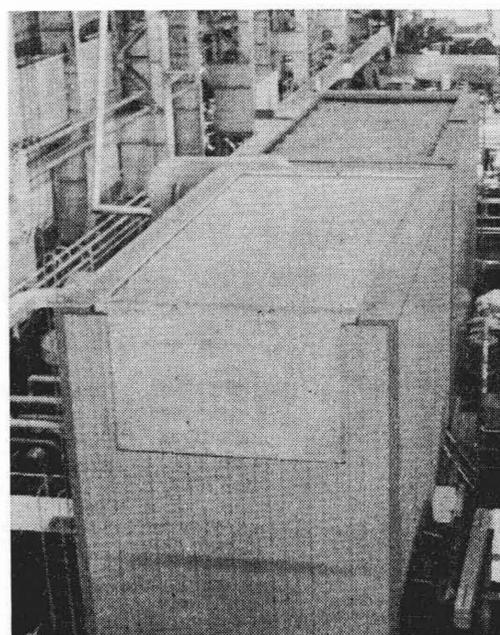
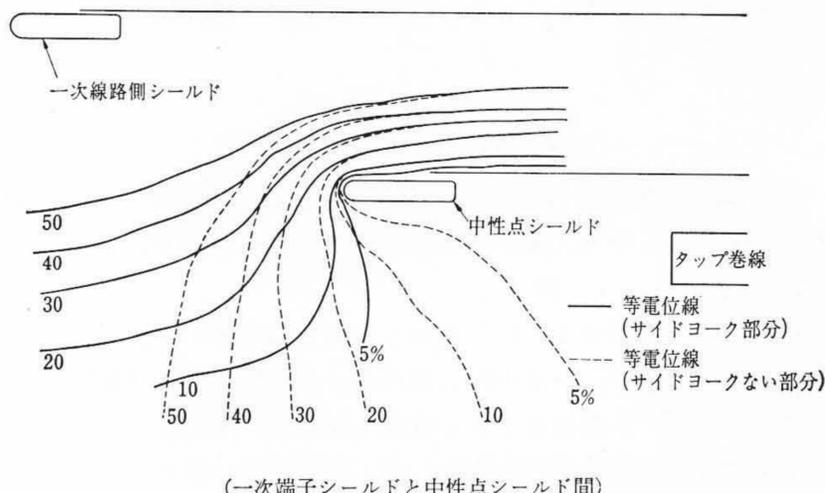


図4 中身組立用超低湿度室



(一次端子シールドと中性点シールド間)
図5 導電紙による電界解析例

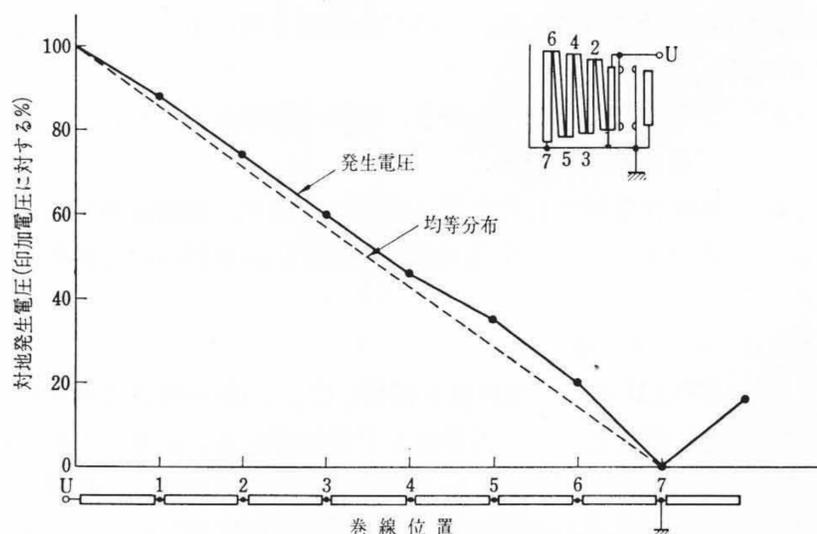


図6 一次円筒巻線の衝撃電圧特性

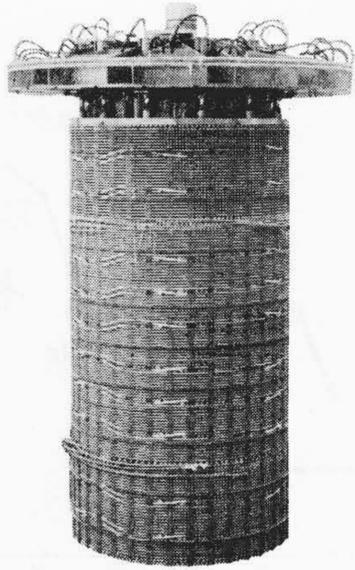
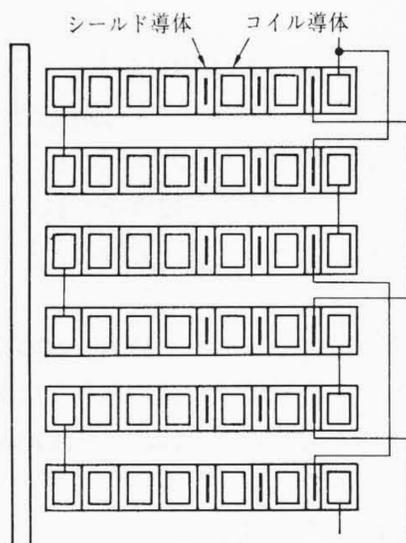


図7 立形巻線機



(CC シールド)

図8 コンデンサカップリングシールド

ドは図8に示すように巻線導体高さとはほぼ同じ高さの薄いシールド導体をコイルの中に巻き込んで遠隔したコイルに巻き込んだシールド導体と接続することによりコイル間の直列静電容量を飛躍的に大きくして衝撃電圧分布を改善するもので、連続円板巻線に採用するには理想的なシールド方式である。

このように転位電線、CCシールドを採用して、立形巻線機で巻いた連続円板巻線に対しては、高い信頼性が得られる。

2.2 鉄心

高さの輸送制限から五脚鉄心構造とし、主脚はガラスバインドテープによる締め付け、ヨークは油みぞに通した平ボルトによって締め付けられている。

所定の形状・寸法に切断したけい素鋼板は1枚ずつ流れ作業的に処理する連続焼鈍装置でひずみ取り焼鈍され、自動的にワニス焼付炉に送られてワニス焼付けが施される。連続焼鈍炉で焼鈍された鉄板は、平坦度にすぐれるためワニス焼付けの改善と相まって鉄心占積率の向上、損失、騒音の低減が可能となった。

鉄心は起立装置を備えた定盤で積み上げられ、専用工具で規定の圧力で締め付けられ、定盤とともに起立するから起立作業中に鉄心に曲げモーメントなどがかからず、磁気特性に悪影響を与えない。主脚にガラスバインドテープを巻付機により張力を管理しながら巻付けキュアするが、この方式の採用により、鉄心締め付金具の簡素化、鉄心占積率の向上、均一な締め付けによる鉄心特性の向上が図られる。鉄心締め付金具を含めた内部金具類は、防じん管理に便利なように明色塗装をして積極的な防じん対策がとられ、作業者のモラルの向上とコロナ特性の改善に役だっている。図9は鉄心の完成姿である。

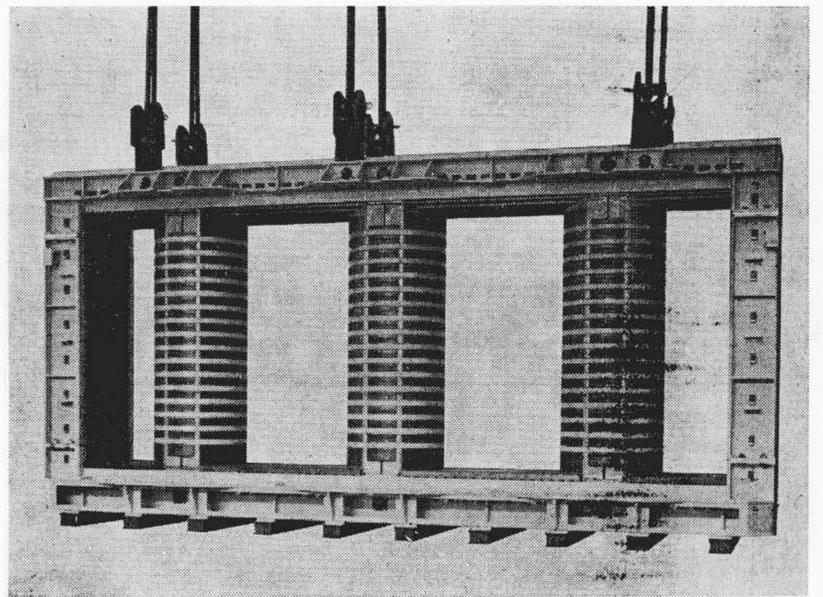


図9 300 MVA 変圧器鉄心

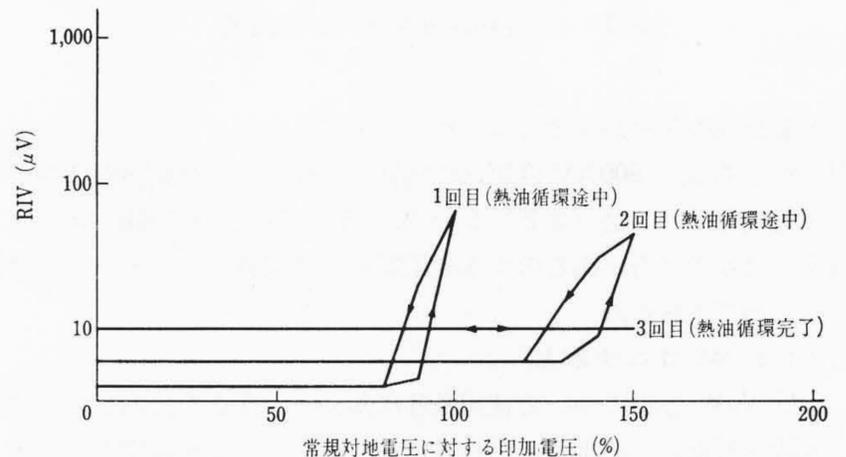


図10 熱油循環処理過程でのコロナ特性

2.3 絶縁と乾燥油含浸処理

絶縁材料としては、プレスボード、絶縁紙など油の含浸しやすいものを使用した。絶縁筒やプレスボードの接着剤や接着法によっては、ボイドを巻き込みコロナ開始電界強度を極度に下げることがあるから接着作業としては、ワニスボイドができぬようにするとともに、油の含浸がよくなる構造とした。

変圧器はタンク内を高度の真空に保ち加熱する真空乾燥法を採用し、真空注油のあと油の含浸速度を早めるため熱油循環を行なった。これは注油した油を熱油循環装置により70~80°Cに加熱して脱気し、さらにフィルタで除じんしながらコイル内部に送り込む方法で次の利点がある。

- 油の温度を高めることにより油の粘度が著しく低くなり含浸が急速に進む。
- 絶縁物中に不均一に分布している水分を均一化させるとともに、油と絶縁物との間の平衡水分の関係を早く成立させる。
- フィルタによって変圧器内のほこりが除去される。
- 熱油循環中に油中水分を測定し、油温と油中水分から絶縁物中の含有水分を間接的に知ることができる。

3. 試験

試作変圧器は完成後、通常の試験を行なったうえで、絶縁試験を実施した。巻線の機械的強度と温度上昇の確認は別に実験用の巻線を製作して行なった。

3.1 絶縁試験

真空注油のあと油含浸が不じゅうぶんな初期含浸過程からコロナ試験を数回行なってチェックした。図10はその一部を示したもの

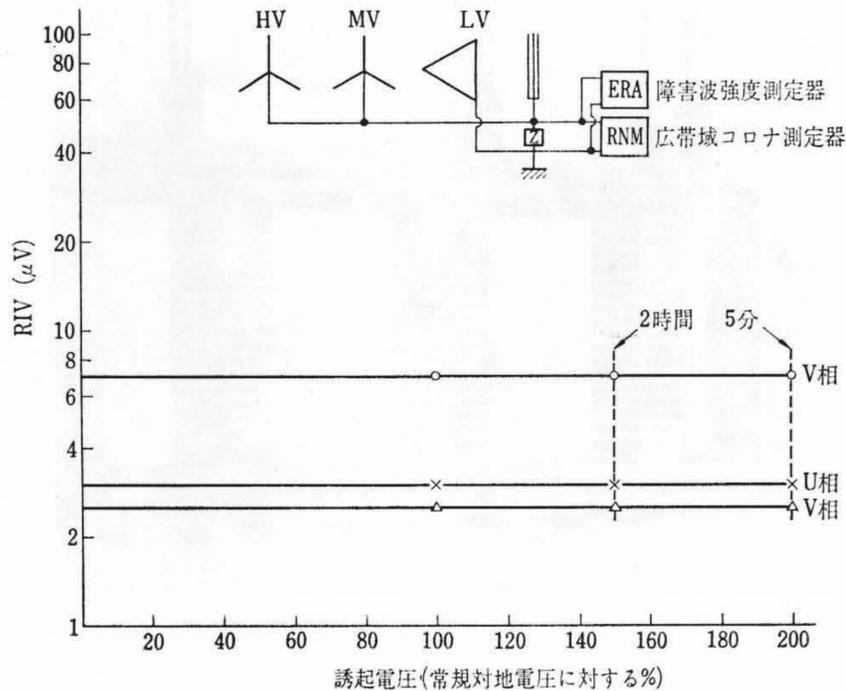


図 11 長時間課電コロナ試験結果

であるが油の含浸がすすむにつれコロナ特性の向上していることが明らかである。500 kV 変圧器に関連して従来の誘導試験のほかに常規対地電圧の2倍(2E)5分間、1.5E2時間の長時間コロナ試験を行なう考え方があるので本変圧器の絶縁試験にはこれらの試験をも含めて実施した。

3.1.1 AC コロナ試験

U, V, W 各相について使用条件にあわせ中性点を接地して誘導試験を行ない、内部コロナの有無を検証した。2Eに電圧をあげ5分間保持し、その後電圧を1.5Eに下げて2時間保持した。結果は図11に示すとおりであるが、いずれも無コロナ(RIVで外部雑音の7μV以下)であった。

3.1.2 衝撃電圧による絶縁破壊試験

一次巻線 U, V 二相について衝撃電圧印加により絶縁破壊試験を実施した。V相について絶縁階級200号の規定電圧(1,050 kV)を100%として6%ステップで130%まで印加したが異常なく、このあと同一の試験を再度実施したところ、全波1,365 kV(1,050 kVの130%)で絶縁破壊した。その影響を調べる目的でコロナ試験を行なったが、コロナ開始電圧は0.8Eに低下しており、衝撃電圧試験の破壊による絶縁劣化と判断された。なおこのとき健全なU相は、2Eまでコロナ発生は認められなかった。

W相についてもV相と同様絶縁破壊試験を行なったが、BIL 1,050 kVの130% 1,365 kVで破壊した。

すべての試験が完了したあとで変圧器を解体点検して絶縁破壊状況を調査した。V相巻線は最外層コイルの線路端付近よりスタートし、その外側にある絶縁物表面をクリーブし、一つはLリング状紙絶縁を経てタップ巻線のシールド端部へ、ほかの一つはLリング状紙絶縁を経て外側の絶縁筒をクリーブして鉄心へ破壊した痕跡(こんせき)が認められた。このほかこれらの破壊により二次的に発生したと判断される破壊痕跡が見られた。W相は、最外層線路端のシールドリングよりそれに接するLリング状紙絶縁と外側の絶縁筒表面をクリーブして鉄心上部ヨークと、巻線最内層のシールドリングへ破壊した痕跡がみとめられた。

実器ではタップ巻線シールド外側の絶縁紙を厚くしてLに曲げる部分の油隙(げき)を細分する構造に改善し、最外層巻線上端シールドリング部分の絶縁補強などを対策としてとりあげ実施した。これにより絶縁裕度を140%以上とした。

3.1.3 交流電圧による絶縁破壊試験

U相について交流(167 Hz)による絶縁破壊試験を実施した。

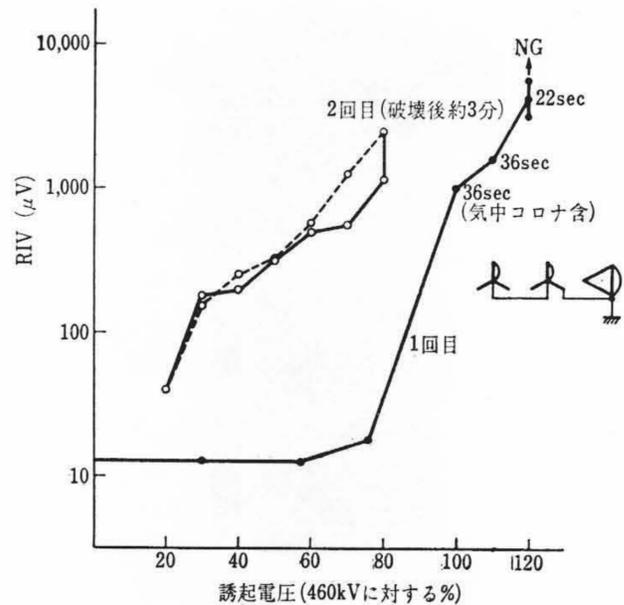


図 12 AC 破壊試験とコロナ特性

電圧は規定試験電圧460 kVを100%として30, 57(1.5E), 76(2E), 100, 110%と36秒ステップで上昇した。120%(552 kV)に昇圧したところ22秒後絶縁破壊を起こした。3分後改めてコロナ測定を行ないながら電圧を上昇させたが、コロナ開始電圧は0.2Eと大幅に低下していた。この試験のときのコロナ特性は図12に示すとおりである。

解体点検の結果、線路端子リード口出し線の接続部のたけのこ状絶縁よりタンクへの絶縁破壊が認められたほかは、いずれも損傷はなかった。実器の対策としては、リード絶縁の沿面長さを長くして絶縁裕度を140%以上とした。

3.2 漏れ磁束によるタンク損失

変圧器漏れ磁束は負荷損、短絡時の発生電磁力、短絡インピーダンスを左右するが、変圧器の大容量化につれて漏れ磁束密度が高くなり、磁束量も増すため漂遊損も増し、その低減のために発生原因、発生個所の究明、その対策がきわめて重要な問題となってくる。損失の低減法、冷却法が適切でなければ局部加熱を起こし事故に発展することもありうる。損失の低減のためには、巻線近くの金属材料を非磁性材料または非金属材料に置きかえるなどの対策が一般に採用されている。漂遊損の最も大きな発生源は漏れ磁束の通路となるタンク側壁であり、大きな損失を生ずる場合にはしゃへいを設けて損失を低減するが、それには次の方法がある。

- (a) タンクの内側に銅またはアルミニウムのしゃへい板を溶接し、漏れ磁束がタンクに向かってしゃへい板を貫通するときに発生するうず電流により逆向きの磁束が発生し、侵入磁束を打ち消させるもので、タンク損をしゃへい板の損失に置換する。
- (b) けい素鋼板を積層したしゃへい板をタンクの内側に取り付け、漏れ磁束をこのしゃへい板に通してタンクにははいるないようにする。

本変圧器はけい素鋼板シールド付きであるが、試験としてはタンクシールドなし、銅板シールド付きの条件で50, 60 Hzについて磁束分布、温度分布、損失などの測定を行ない貴重な資料を得た。詳細な報告は別の機会に発表する予定であるが、実験の一部として50 Hz、一次～二次間定格電圧における損失の比較を表2に示した。これらの解析により、効果的なしゃへい法の確立、損失計算の精度向上が可能となった。

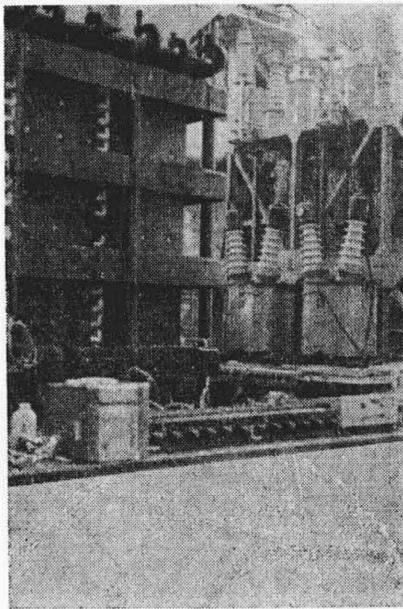
図13は実験中の写真である。

3.3 円筒巻線の機械的強度

円筒巻線の機械的強度について新規な試験法を開発し、その研究成果を日立評論^{(3)~(5)} IEEE⁽⁶⁾などに発表した。円筒巻線は前記し

表2 タンクシールドの損失低減効果

タンクシールド	負荷損 (%)
なし	100
銅板シールド	93.8
けい素鋼板シールド	90.5



(実験用タンクに中身を入れ、タンク磁束、温度上昇などを測定しているところ)

図13 300 MVA 変圧器漏えい現象実験

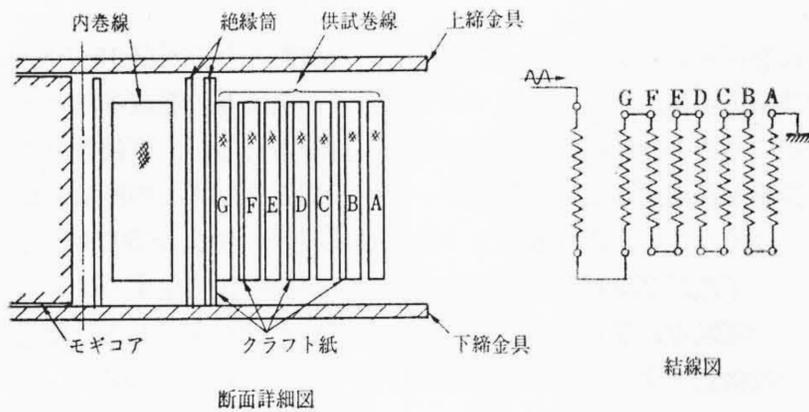


図14 円筒巻線機械強度検証用モデルコイル

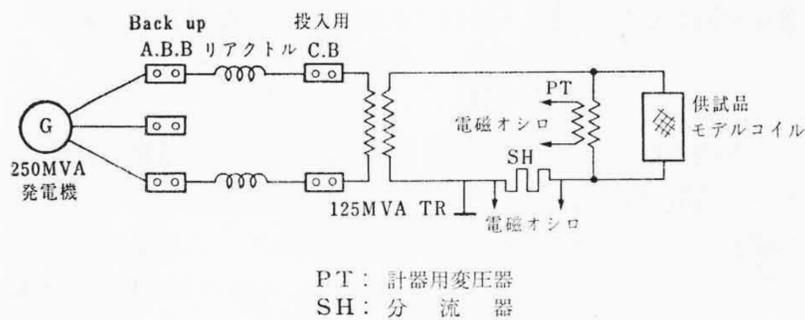


図15 短絡実験試験回路

たように半径方向に電線・プレスボード・層間絶縁紙を順繰りに配置するから、電線のみが隣接する円板巻線とは巻線の構成が異なっており、軸方向からみても両巻線の構造は異なっている。

円筒巻線についても円板巻線で開発した試験法により径方向部分モデル(10%モデル)、軸方向部分モデルおよび50%モデルにより短絡実験を行なって巻線の強度を求め、製法、作業管理、巻線支持法などについて多くの資料を得た。その実験の一部として、本試作変圧器の10%モデル(半径方向の寸法、電線サイズは実物と同じで、軸方向が約10%の高さ)を製作して短絡電流を流し巻線の機械

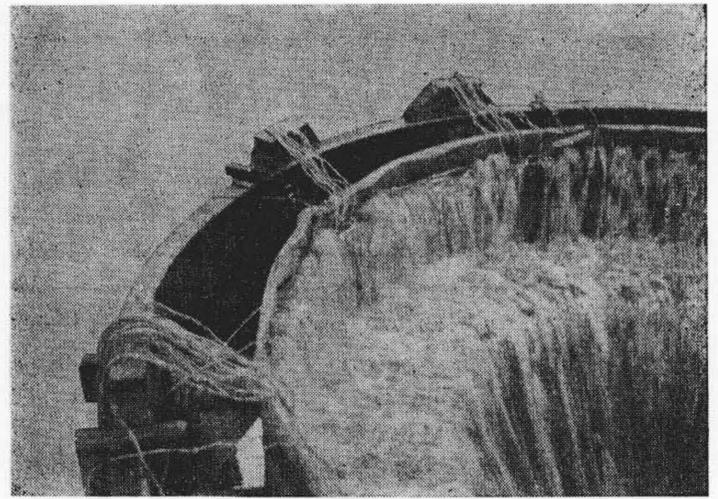


図16 三次元モデルによる冷却実験

表3 高圧巻線温度上昇試験結果

変圧器	温度上昇	
	計算値(deg)	実測値(deg)
300 MVA	23.0	23.3
90 MVA	12.9	12.7

表4 既納300 MVA 変圧器との比較

項目	(比較)	試作変圧器/ 既納入変圧器 (%)
	負荷損	一次～二次
一次～三次		72
二次～三次		91
無負荷損		97
重量	内部重量	87
	総重量	90
	輸送重量	90

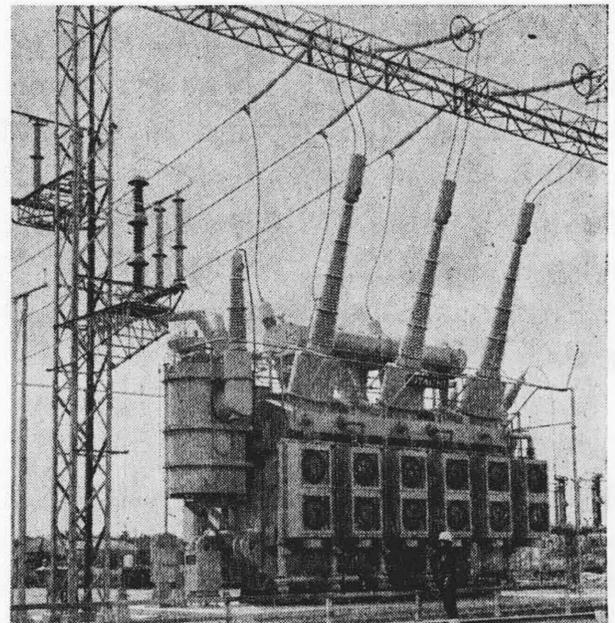


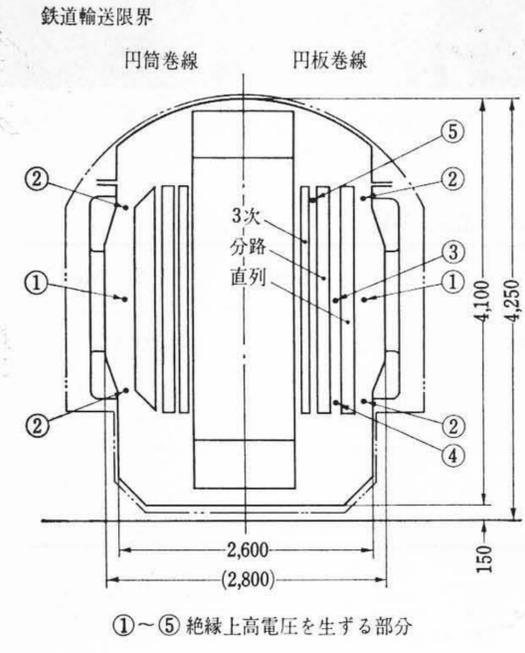
図17 275 kV 300 MVA 変圧器

的強度の裕度を確認した。モデル構造図と試験回路は図14、図15に示すとおりである。無限大母線に接続されたときの短絡電流を100%として91%から順次電流を増し130%まで試験した。各ステップごとにインパルス波形、巻線間静電容量、インピーダンスを測定したが異常は認められなかった。その後巻線を各層ごとに解体点検したが、絶縁紙の破れ、転位電線の変形は全く認められなかった。

転位電線の強度を大幅に増加するため日立電線株式会社の協力により半硬銅転位電線の開発を行ない、本変圧器にも使用した。引き続き性能をさらに高める研究を行なっている。

仕様

巻線(端子)	H	L	T
電圧 (kV)	500±25/√3	275/√3	66
容量 (MVA)	333	333	100
BIL (kV)	1,550	1,050	350
AC耐圧 (kV)	840	460	185
コロナ試験	1.5Eで内部コロナなし(長時間)		
相数その他	単相 単巻		
%インピーダンス(H-L%)	14		
LTC位置	中性点取付		



各構造の問題点と難易度(誘導試験840kV,鉄道輸送としたとき)

巻線構成	巻線配置	誘導試験時電圧	鉄心構成およびLTC配置			
			単相4脚		単相5脚	
			LTC 本体取付	LTCなしまたは 中性点 LRA別置	LTC 本体取付	LTCなしまたは 中性点 LRA別置
直列巻線 円筒		① 840 kV ② 840 ③ — ④ — ⑤ —	●	⊗	●	⊗
分路巻線 円筒		① 840 kV ② 460 ③ 380 ④ — ⑤ —	⊗	○	●	○
直列巻線 円板		① 840 kV ② 460 ③ 610 ④ 460 ⑤ 460	●	⊗	●	○
分路巻線 円板		① 840 kV ② 840 ③ 230 ④ 460 ⑤ 460	●	⊗	●	⊗

● 輸送困難 ⊗ 輸送上から構造詳細検討要 ○ 輸送上問題がない

図 18 国内仕様 500 kV 変圧器構造と問題点

3.4 巻線冷却

巻線の温度上昇を検討するとき一次、二次、三次などの巻線への油流入量が問題になる。円筒巻線と円板巻線を組み合わせたものに外部より強制的に冷却用油を送るとき、双方の巻線内流体抵抗に大きな差があるため流体抵抗の小さい円筒巻線に大部分の油が流れ、ほかの巻線へはあまり流れないという不都合が生ずる。この点を検討するため試作変圧器の実物大三次元モデルにより実験を行なった。モデルに電流を流し、油ポンプにより油を循環し各層間冷却ダクトの流量、円周方向の流量と油温度、巻線各部の温度を測定した。図 16 は実験中の写真である。これらの結果から巻線温度上昇計算式の確認を行なったが、例として試作 300 MVA と 90 MVA 変圧器の巻線温度上昇について計算値と実測値の比較を示すと表 3 のように良い一致をみている。

4. 試作変圧器と既納入変圧器との比較

試作変圧器は前項で述べたように各種の特殊試験を実施して、実機製作上、貴重な資料を得たが、その性能・重量などについて昭和 41 年東京電力株式会社東東京変電所に納入した同一仕様品と比較した結果を示すと表 4 のようになる。変圧器内部重量が 87% に減少しており、損失も大幅な低減が実現した。負荷損の低減は転位電線の採用と漂遊損を低減させるための鉄心・巻線まわりの構造材の材質、構造の改善およびタンクしゃへの改善効果によるところが大きい。

本試作結果を適用した 300 MVA 変圧器を製作して、東京電力株式会社東東京変電所に納入し、昭和 45 年 7 月から営業運転にはいつている。図 17 は現地据付状況を示したものである。

ここで本試作変圧器と国内の 500/275 kV 単巻変圧器との関係について考えてみたい。500 kV 側の試験電圧を BIL 1,550 kV, 誘導試験電圧 840 kV とし、さらにコロナ試験として 2 E 5 分間、1.5 E 2 時間を印加すると考え、単巻変圧器の直列・分路の巻線に円筒、

円板巻線をどのように使ったら良いかを検討したのが図 18 である。国鉄輸送限界からタンクのプロフィールが決まり、巻線各部とタンク間の寸法とそこに印加される電圧が計算されるが、直列巻線に円筒巻線を採用すると線路側のシールド下端とタンクとの絶縁が極度にきつくなり、この点円板巻線とすれば巻線高さの中央が 500 kV 線路端、上下端が 275 kV 線路端となるから円筒巻線で生ずるような絶縁上の問題点は解消する。直列巻線を円板巻線とすると分路巻線を円筒構造とするのが有利なことは図 18 から明らかである。国内 500 kV 変圧器には前記したように誘導耐圧試験のほか長時間コロナ試験が適用されることになるが、本試作では同様の試験を実施して問題のないことを立証した。このことは 500 kV 単巻変圧器の分路巻線と同じ思想で設計・製作すれば良いことを示している。

5. 結 言

円筒巻線を採用した 300 MVA 変圧器を試作し、通常の試験項目のほか長時間コロナ試験、絶縁破壊試験、漏れ磁束によるタンク損失の解析・低減に関する実験その他を行なって、この変圧器が実用上問題のないことを明らかにするとともに、今後の国内標準 500 kV 単巻変圧器を始めとして超々高圧大容量変圧器の設計・製作に有効な資料を得た。

終わりに、本試作変圧器の設計・製作にあたってご指導をいただいた東京電力株式会社の関係各位に対し、ここに深く感謝を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 森山：日立評論 50, 143 (昭 43-2)
- (2) 鹿島ほか：特許第 564828 号
- (3) 平石ほか：日立評論 50, 148 (昭 43-2)
- (4) 堀ほか：日立評論 50, 153 (昭 43-2)
- (5) 平石ほか：日立評論 51, 505 (昭 44-6)
- (6) 栗田ほか：IEEE, PAPER No. 68, TP 661-PWR (1968)