U.D.C. 621. 314. 223. 433. 2. 027. 85. 042. 52

500kV 1,000/3MVA 単巻変圧器
500kV 1,000/3MVA Autotransformer

鹿島芳丈* *Yoshitake Kashima*
平野三百里* *Mihori Hirano*
池本徳郎* *Norio Ikemoto*
中川　清* *Kiyoshi Nakagawa*
片渕武昭* *Takeaki Katahuchi*

A 500/275 kV 1,000/3 MVA autotransformer has been trial-manufactured and tested for practical performance. This type of transformer will serve as mainstay equipment when 500 kV power transmission is realized in Japan.

It is of the single-phase four-legged core structure, with a shunt winding of the layer type, and series and tertiary windings of the continuous-wound disc type. All windings use transposed wires to minimize losses and connection work is eliminated to maximum extent. Reliability has been enhanced through improving corona characteristics by employing advanced insulation structures including roll-bended insulating cylinders of high-density pressboard and pulp molds.

1 緒　言

わが国の500kV送電も実用化段階に入り，各電力会社において，機器の仕様決定，発注が行なわれている。

日立製作所においても，昭和32年ごろより超々高圧変圧器の開発に着手し，数次の試作をはじめ，アメリカボンネビル電力庁（BPA）納め525kV336MVA3台[1]，同じくアメリカ内務省開拓局（USBR）納め525kV 448MVA3台など製作経験を重ねてきた。

今回，国内仕様の500kV変圧器の一つである500/275kV，1,000/3MVA単相単巻変圧器を試作し，過電圧を含む全試験を完了したので，その概要を報告し参考に供したい。

2 仕　様

本変圧器は，500/275kVという最も重要な系統の連系を考え，信頼性の確保を第一として**表1**に示すような仕様が決められている。タップ切換は，中性点に別置された負荷時電圧調整器（LVR）によって行なわれ，主変圧器単独でも運転できるようになっている。

今回の試作は，主変圧器について行なわれ，**図1**はその外観を，**図2**は主要寸法を示す外形図である。

表1　500kV 1,000/3MVA単巻変圧器仕様　本変圧器は，従来の275kV系統と500kV系統を連系する代表的なものである。

Table I Specification on 500kV 1,000/3MVA Autotransformer

形　式	送油風冷単相単巻変圧器（負荷時電圧調整器中性点別置）		
端　子	一　次	二　次	三　次
定格容量（MVA）	1,000/3	1,000/3	300/3（二等辺三角形）
電　圧（kV）	$^{F}527.74/\sqrt{3}$ ～$^{R}500/\sqrt{3}$ ～$^{F}477.74/\sqrt{3}$	$275/\sqrt{3}$	70.77 ～63.0 ～56.77
パーセントインピーダンス（%）（1,000MVA基準）	←14.0→		
	←48.0→		
		←28.0→	
絶　縁　階　級	BIL 1,550kV	200号	60号
	中性点60号		

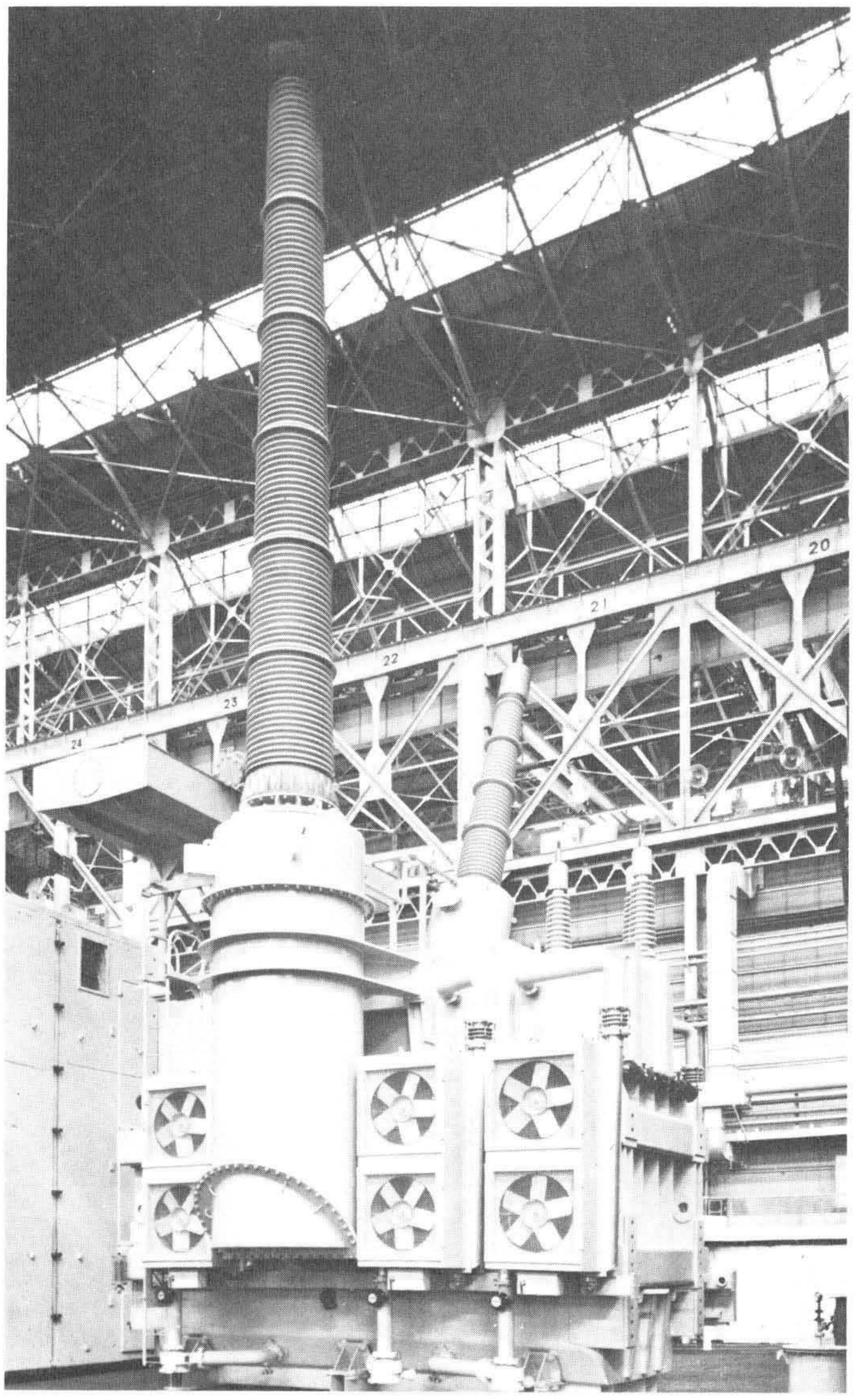
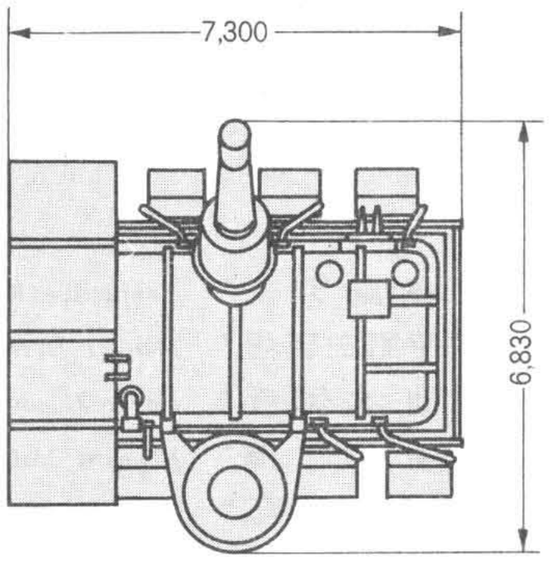


図1　500kV 1,000/3MVA単巻変圧器　本変圧器の完成姿を示す。

Fig. 1 500kV 1,000/3MVA Autotransformer

* 日立製作所国分工場



油なし重量	182,000kg
油　　量	58,000 l
輸送最大重量	165,000kg

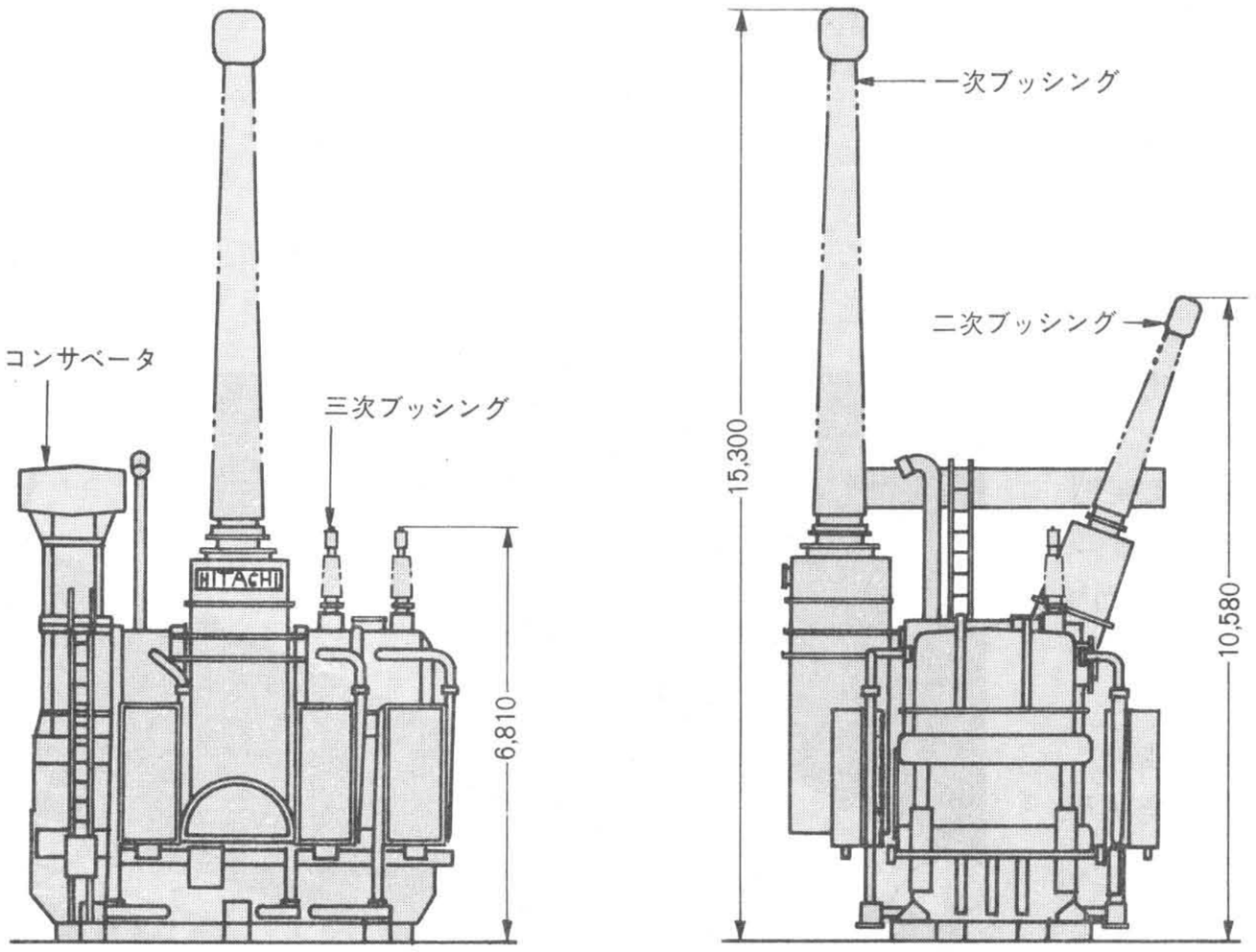


図 2　変圧器外形寸法図　本変圧器の寸法重量を示すもので，これにLVRが接続され一相分の負荷時タップ切換変圧器となる。

Fig. 2　Outline of 500kV Autotransformer

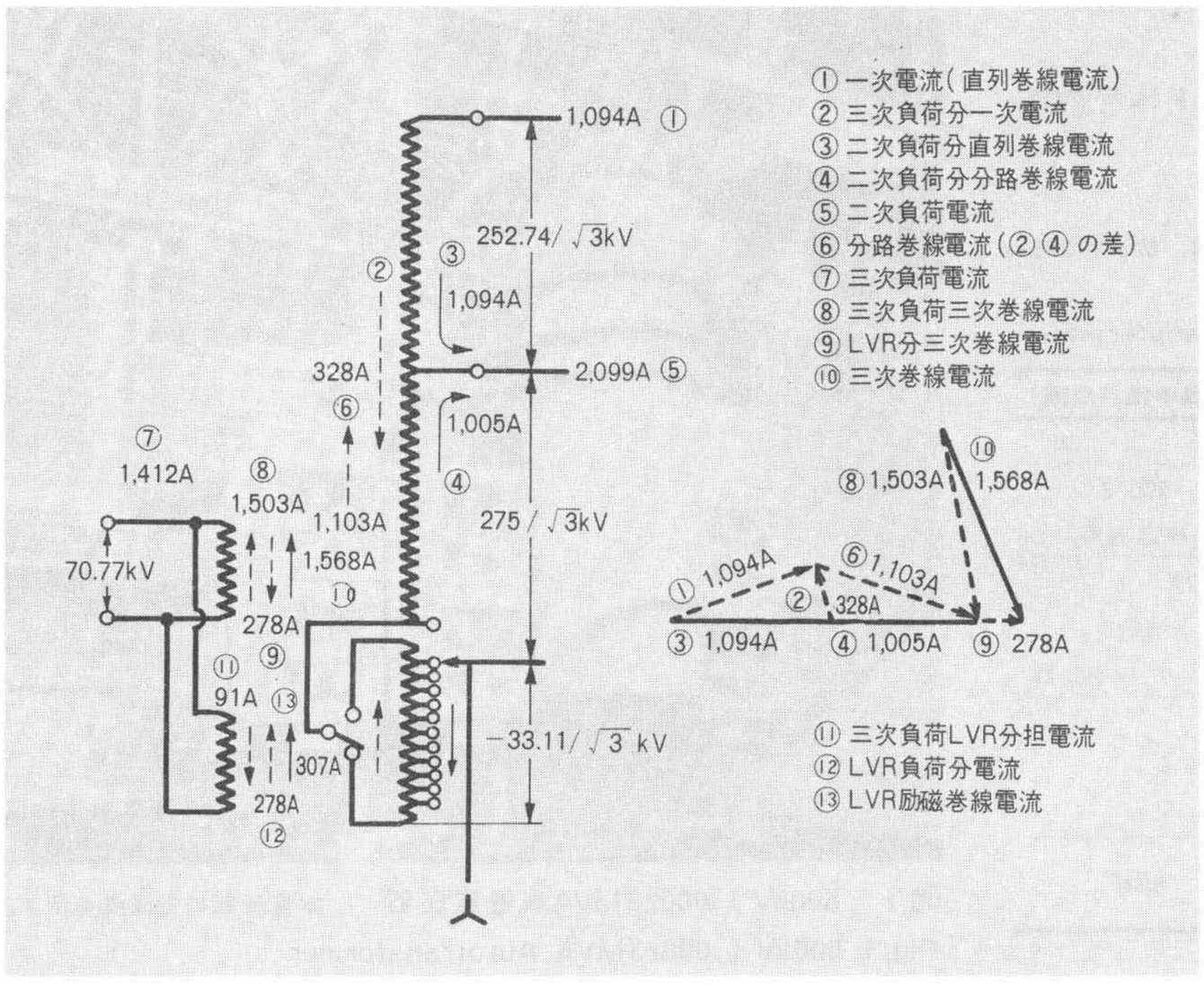


図 3　二等辺三角形負荷(最高タップ)における電流分担　一次および二次負荷が同一容量で三次側から300MVAの負荷をとる場合の電流分布を示す。分路巻線の電流が大きくなるためこの巻線容量をふやす必要がある。

Fig. 3 Current Distribution under Isosceles Triangle Load (At Maximum Tap)

3　単巻変圧器の特性

500/275kVといった超々高圧単巻変圧器では，タップ巻線とタップ切換器の信頼度，経済性および輸送上の制約などから，電圧調整は中性点側で行なわれる。

この場合，一次と二次の巻線が同時に変化するため，鉄心の磁束密度および三次電圧が変化し，タップ電圧も均等とならない。

また，変圧器の一次・二次間の自己容量(Ps)と通過容量(Pe)との関係は，

$$Ps=\frac{V_1-V_2}{V_1}Pe$$

V_1：一次電圧，V_2：二次電圧

であるから，タップにより巻線の自己容量も変化し，パーセントインピーダンスの変化も普通の変圧器より大きくなる。

次に，系統運用上から三次巻線にリアクトルまたはコンデンサ負荷を接続する場合，一次電流と二次電流の差電流が流れる分路巻線では，三次電流の逆アンペアターン分の電流がベクトル的に加算されるため容量が大きくなる。したがって，この影響を考えて巻線容量を決める必要がある。本変圧器では，一次および二次より，三次に負荷を供給する条件(二等辺三角形負荷)で設計されている。この関係を，本変圧器の最高タップについて示せば，**図 3** のようになる。

4　構　　造

4.1　巻線および絶縁構造

巻線は変圧器の最も重要な部分で，構造改善と信頼度向上のため多くの努力を払ってきた。本変圧器には，内鉄形4脚鉄心構造を採用し，二組の巻線を並列に用い，分路巻線をV接続円筒巻線[2]，直列巻線をCCシールド付連続円板巻線[1][3]，三次巻線を連続円板巻線としている。構造の概略は**図 4** に示すとおりである。

これらの巻線はいずれも実績のある標準構造であり，すべて転位電線を用いているので導体接続がほとんどなく，うず電流損の少ない信頼度の高いものとなっている。

特に分路巻線では，絶縁物および冷却ダクトの比率を工夫することにより，占積率を一段と向上させている。また，直列巻線は最外側に位置し，タンクなど大地電位と直接対向しており，上下並列として中央より500kV端子，上下より275kV端子が引き出されている。これに伴い，タンクに対する絶縁距離を合理的なものとするため，タンク中央をふくらませ電界を均等化している。

巻線間の主絶縁はマルチダクト構造として油隙(ゆげき)を細分化し，絶縁筒もすべて高密度プレスボードによる絶縁筒としコロナ特性を向上させている。

巻線端部にはFRPのシールドリングによる

表2　500kVブッシングの試験　　耐塩害8 mがい管を使用した油浸紙コンデンサブッシングのおもな試験結果を示す。

Table 2 Test Result on 500kV Bushing

	試験項目	試験方法	結果	備考
電気特性試験	誘電正接測定 静電容量測定	シェーリングブリッジ	525kVまでフラットな特性 tanδ＝0.3%	耐圧試験前後で変化なし
	コロナ試験	交流　457kV（1.5E）　2時間 609kV（2E）　5分間 1,000kV　1分間	内部コロナなし 外部コロナ発生電圧800kV以上	耐圧試験前後で変化なし 外部コロナはERA波形による
	交流耐電圧試験	840kV　1分間 過電圧1,100kV　1分間	良 良	
	衝撃耐電圧試験	±1,800kV　各5回 過電圧±2,170kV　各5回	良 良	
	開閉インパルス耐電圧試験	1,290kV（1,550kV×0.83）　5回 過電圧1,810kV　5回	良 良	
参考試験	熱安定試験	85 ± 2°C	tanδ値変化なし	
	加熱試験	90°C以上　6時間	異常なし	
	曲げ耐荷重試験	頭部水平荷重　1,000kg	異常なし	
	耐震試験	水平加速度0.3g　共振正弦3波	安全率2以上	

電界調整と機械的強度の向上が図られ，また，鉄心や締金具などの隅(ぐう)角部にもシールドを施すなど細心の注意が払われている。

また，巻線製作は組立まで一貫して防塵(ぼうじん)空調室内で行なわれ，巻線後寸法調整が困難な円筒巻線については，絶縁紙や電線などは乾燥状態で軸方向半径方向に強固に締め付けながら巻き付け，プレスボードなども加圧乾燥するとともに相対湿度約5%の超低湿度の室内で作業されている。円板巻線は竪(たて)形巻線機で巻かれ，単独で加圧乾燥し寸法が調整される。

絶縁物の接着もコロナ発生の一因となるので，部分，構造ごとに接着剤を選択するとともに，防塵についても十分留意している。

品質管理については，全工程を要素別に分析し，チェックシートを整備して品質管理体制を拡充し，“EHV”の標示により超々高圧に対する作業管理がなされている。

これらの設計上，製作上の技術の向上と部分試作などの解析の積み重ねにより，四脚構造の実現が可能となったものである。この構造によれば，巻線一組が1,000/6MVAであるから，三組の巻線を用いる単相五脚鉄心構造とすることにより，バンク容量1,200～1,500MVA級変圧器の鉄道組立輸送も可能である。

4.2　リード線

一次500kV端子は**図2**に示すようにタンク中央のポケットへ引き出される。この構造はリードの引出しが容易であり支持も単純である。リード線は電界集中がないよう整形された大きな直径を持ち，パルプモールドにより，油隙がリードに沿って一様に分割されている。パルプモールドはプレスボードと同一材質であり，接着を全くせずに任意の形状に整形製作できるため，リード組立がプレハブ化され，単純化された。**図5**は，パルプモールドの一例である。

二次端子は直列巻線の上下および分路巻線の上部より引き出される。特に分路巻線リードは内側より引き出されるため，電界を乱さないよう構造上特に注意を要する。このため，直列巻線端子と一体となるよう工夫され，シールドリングにより対地絶縁に直接対向しないようになっている。

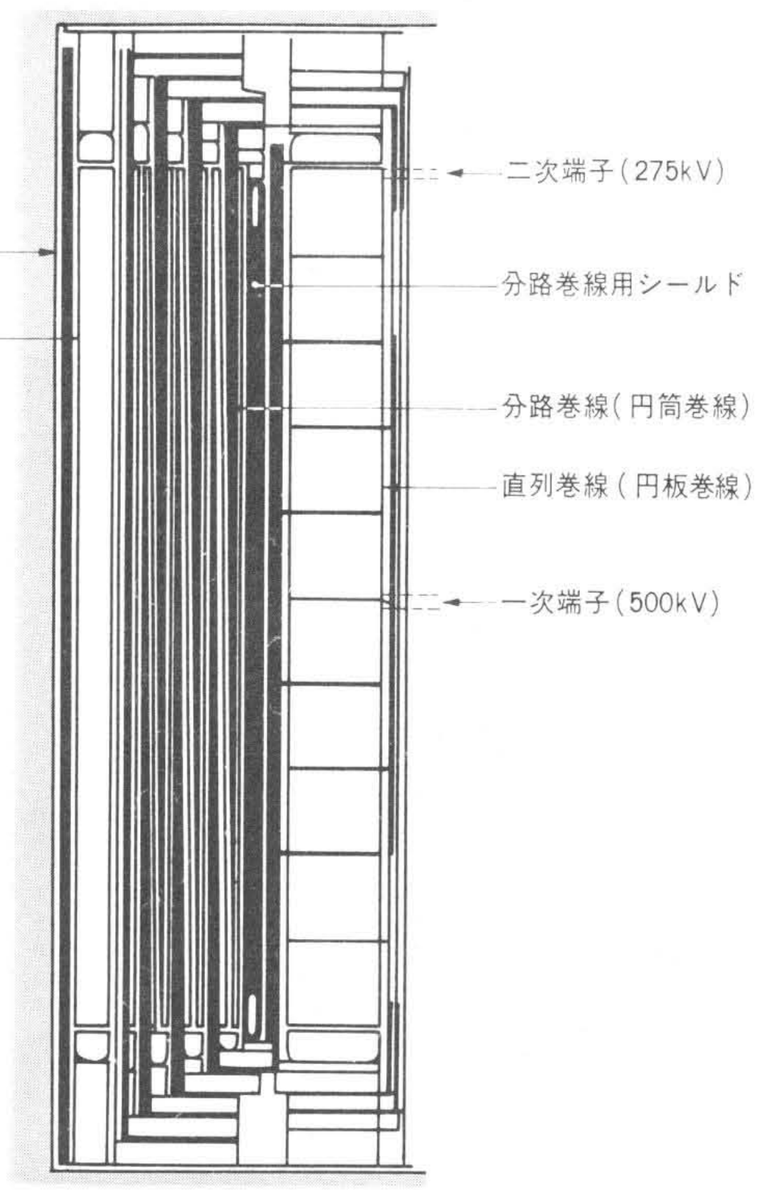


図4　500kV 1,000/3MVA変圧器絶縁構造(巻線の縦断面)　一次巻線を連続円板巻線，二次巻線を円筒巻線とすることにより，タンクとの絶縁，インパルス電位分布などが著しく改善されている。

Fig. 4 Winding Arrangement of 500kV 1,000/3MVA Autotransformer

中性点端子は，負荷時電圧調整器に油道で接続される構造のため，各脚ごとに別々に油中ブッシングで引き出され，二組の並列回路のままタップ切換器に接続される。したがって電流は**図6**に示すように巻線により均等分割され，一方を切換器の1セクタへ，他方を残りの2セクタへ接続する構造となる。

図5　パルプモールド　クラフトパルプを成形したもので任意の形状ができるため，リード線引出し部など複雑な形状の部分の絶縁に使用される。

Fig. 5 Pulp Mould

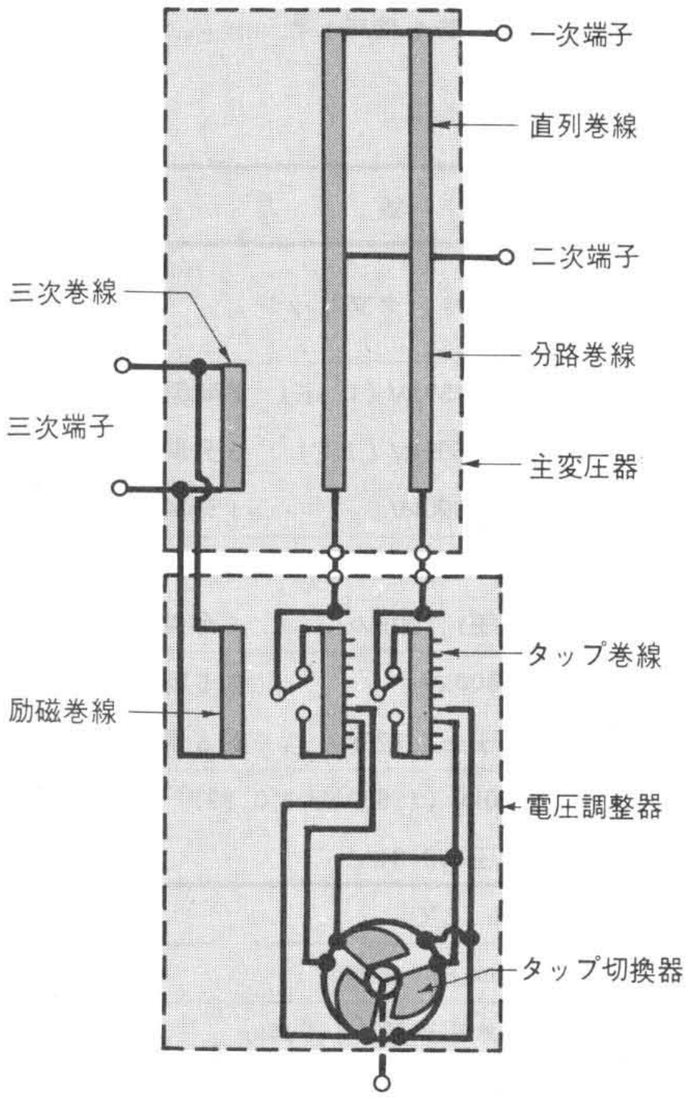


図6　変圧器巻線結線図　本変圧器の巻線は，本体，LVRとも完全に分離された2回路から構成されている。

Fig. 6 Connection Diagram of Windings

4.3　鉄心およびタンク

鉄心は日立標準のバインド構造である。巻線の漏れ磁束が大きく単相器であるなどの特殊性から，漏れ磁束に対する対策は重要である。このため，脚の締付板はもちろん，ヨーク部の締付金具などに対しても漏れ磁束と損失を詳細に検討し，非磁性鋼を用いたり，冷却構造を工夫するなど局部過熱対策が講じられている。

タンクについても非磁性体によるシールドを施している。また，500kV リードを引き出すポケット部については，強度および絶縁上の注意を払うのみでなく，ブッシングの耐震性をも考慮して，ポケット部を強固に固定する方式をとっている。

4.4　525kV油浸紙コンデンサブッシング

本変圧器には，次のような特性の油浸紙コンデンサブッシングを使用した。

衝撃耐電圧値　1,800kV
交流耐電圧値　840 kV，1 分間
定格電流　1,500A

がい管には標準耐塩害がい管を，主絶縁には油浸紙コンデンサコアを用い，スリーブには試験用端子を備え（必要に応じて電圧測定端子の取付けが可能），センタクランプ方式により上下がい管を一体に締め付けている。

本ブッシングは**表2**の諸試験によりその性能を検証している。**図7**は長時間課電試験中の状態を示したものである。

5　試験結果

完成した変圧器について性能試験を実施し，満足すべき結果が得られたので次いで絶縁試験を実施した。

まず**表3**に示した所定の絶縁試験を実施し異常ないことを確認した。その後，過電圧試験を行ない，インパルス試験電圧1,550kVに対して1.5倍までの印加を行なって異常がないことを確かめ，最終的には交流過電圧試験を実施した。その結果は**表4**に示すとおりである。試験電圧840kV に対し1.45倍までの印加を行なったところ，大きな気中コロナを発生し，同時に内部コロナもみられたので，試験電源容量の問題もあり，試験を打ち切った。その後，長時間コロナ試験を行ない解体点検したが異常は認められなかった。

また，500kV 変圧器の信頼度は，工場での作業条件のみでなく，その後の輸送および現地組立の条件においても，完全な状態が保持されていることの確認が重要である。これを検討するため，現地処理についての種々の基礎検討を進めるとともに，実器での現地処理模擬実験を実施した。

図8は，500kV 変圧器における工場発送から現地処理までの条件を模擬した実験結果である。変圧器内の湿度を故意に

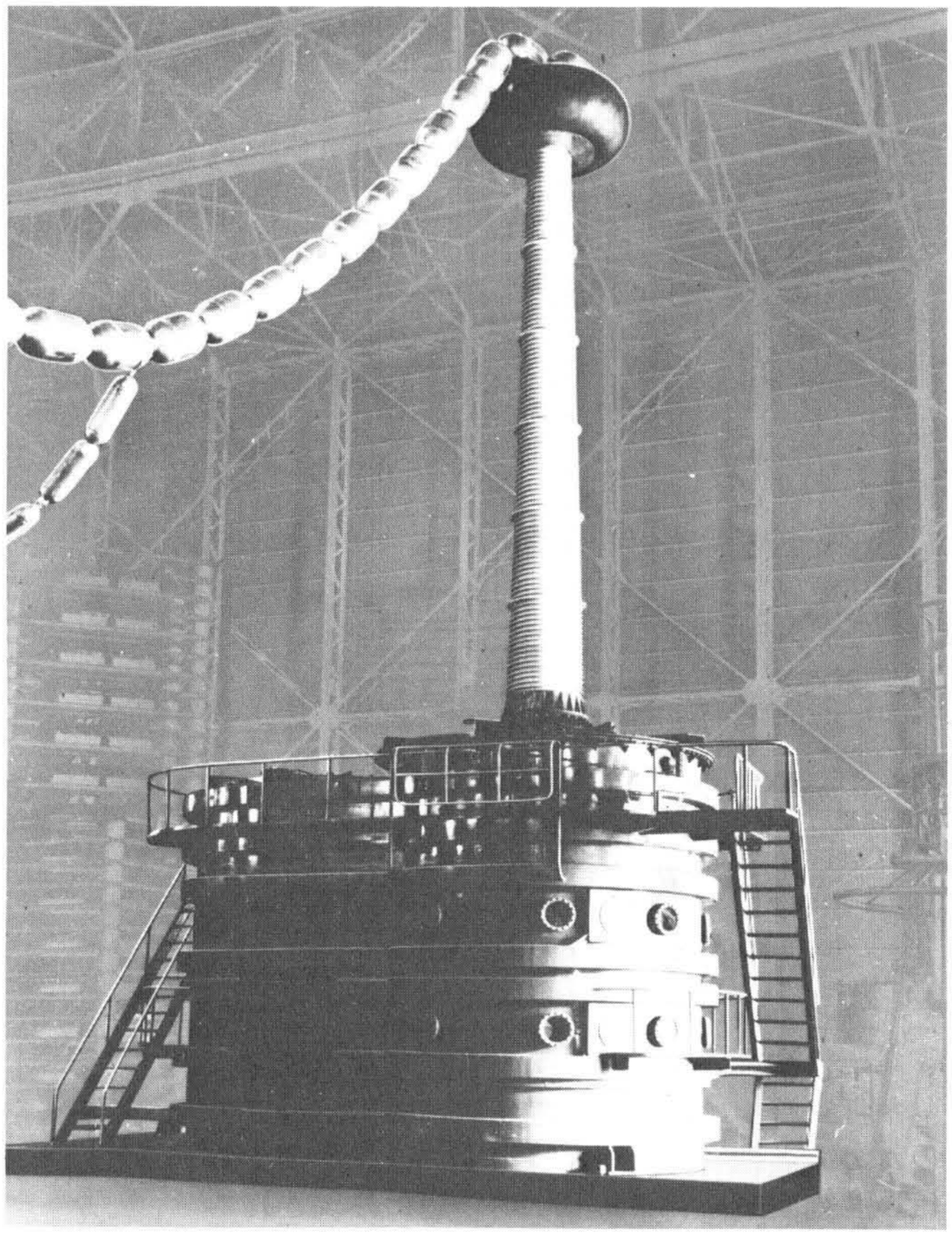


図7　長時間課電試験中のブッシング　1.5E 2時間印加中のブッシング

Fig. 7 500kV Bushing Under Long-time AC Voltage Test

表3　500/275kV単巻変圧器の絶縁試験　各巻線の絶縁強度を示す。
Table 3 Specification on Withstand Test

試験項目		500kV側	275kV側	中性点	63kV側
衝撃耐電圧試験（kV）	全波	1,550	1,050	350	350
	さい断波	1,780	1,210	——	400
開閉インパルス耐電圧試験（kV）		1,290	——	——	——
交流耐電圧試験（kV）		840	460	140	140
コロナ試験（kV）		500kV端子に対して下記のコロナ試験により内部コロナなきこと。 			

表4　交流過電圧試験結果　交流における巻線の過酷試験の結果を示す。
Table 4 Over Voltage Test

試験項目	誘導倍率*	印加電圧（kV）	印加時間（分）	結果
1．過電圧コロナ試験	2.0 E	609	60	良
2．〃	2.1 E	640	5	〃
3．〃	2.2 E	670	30	〃
4．〃	2.3 E	700	5	〃
5．〃	2.4 E	731	〃	〃
6．〃	2.5 E	761	〃	〃
7．過電圧コロナ試験	2.76E	840	5	〃
8．過電圧試験**	840kV ×1.1	924	1	〃
9．〃	840kV ×1.2	1,008	〃	〃
10．〃	840kV ×1.3	1,092	1	良
11．過電圧試験**	840kV ×1.4 / 1.45	1,176 / 1,218	1 / 18秒	1.45倍18秒で気中ストリーマ発生

注：*　527.7/$\sqrt{3}$ kV＝Eとする。
　　**　各ステップで印加前後の1.5E, 2Eのコロナが異常ないことを確認した。

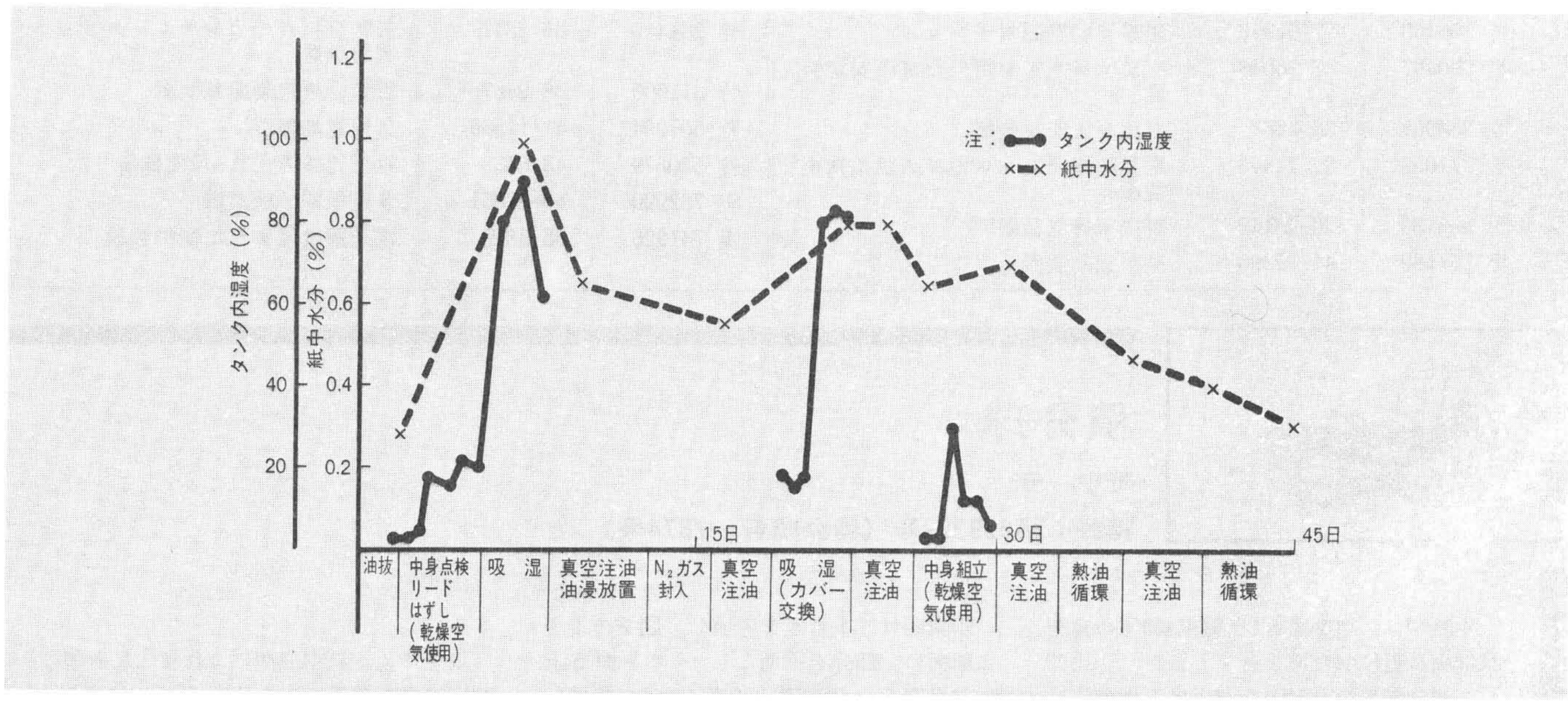


図8　現地処理作業模擬実験結果（680MVA変圧器）　500kV変圧器の現地処理条件を模擬して，680MVA変圧器で油中水分などの測定を行なった。
Fig. 8 Monitering Test of Site Assembly and Processing

極端に高めるなどの条件も含め，各作業ごとに，タンク内湿度，絶縁物中水分などを測定した。本実験の結果から，現地処理後の紙中水分は工場試験時とほぼ同一であることが確認された。また絶縁試験の結果，模擬試験後のほうがむしろコロナ特性が向上しており，コロナレベルもほとんど変化しないことが確認された。

本実験ではタンク内湿度を高めているが，実際に作業する場合は，乾燥空気を吹き込み吸湿を最小限としており，リード線組立てなども専用の組立室をドッキングして行なうなど細心の注意を払うつもりである。

以上の結果により，国内における500/275kV単巻変圧器について十分な性能と信頼性を確認できたといえる。

現在，東京電力株式会社および関西電力株式会社納め1,000/3MVA単相単巻変圧器などを受注製作中であり，本試作の結果を生かした製品の生まれるのも間近い。

6　結　言

以上述べたように，国内向け500kV変圧器について，過電圧試験も含めた貴重な経験を重ねることができたが，この経験を生かしさらに信頼度の向上に努力したい。

終わりに本変圧器の製作にあたり種々ご指導いただいた関係各位に深く謝意を表する。

参考文献

(1)　中川ほか：日立評論　**51**，55（昭44-6）
(2)　栗田ほか：日立評論　**53**，225（昭46-3）
(3)　鹿島ほか：特許第564828号