
500 kV 送変電機器特集

BPA（アメリカ）納 525 kV 変圧器	55
日立における 500 kV 開閉機器および避雷器の現状	60
500 kV 計器用変成器	67
超高速度方向比較搬送継電装置.....	74
500 kV 系の開閉インパルスとその抑制対策	79

BPA (アメリカ) 納 525 kV 変 圧 器

525 kV Transformers for Bonneville Power Administration in USA

中 川 清* 鹿 島 芳 丈*
 Kiyoshi Nakagawa Yoshitake Kashima
 片 淵 武 昭* 加 子 泰 彦**
 Takeaki Katabuchi Yasuhiko Kako

要 旨

アメリカ内務省 BPA 納 525 kV 300 MVA 単相単巻変圧器は、鉄心にバインド締付方式を適用した内鉄形で、主絶縁に油げき付き固体絶縁方式をとり、衝撃電圧特性改善のため巻線にコンデンサカップリングシールドを施した転位電線を使い連続円板巻線とした。分路巻線に対しては短絡機械力を考慮して、モデルコイルにより座屈強度の確認をした。このほか 241.5 kV 線路側に設置する負荷時タップ切換器、525 kV 油浸コンデンサブッシングについても紹介する。

1. 緒 言

わが国の 500 kV 送電計画は実施の段階となり、昭和 41 年度超高压電力研究所に設置された 500 kV 10 MVA 変圧器⁽¹⁾などを用いて実用試験が行なわれ、これをもとにして変圧器の仕様、試験法について検討が進められている。

日立製作所では昭和 32 年ごろから超々高压変圧器の開発に着手し、数次にわたる試作変圧器および納入品の製作、試験を通じて絶縁構造の合理化、信頼性の向上につとめてきた。昭和 42 年末アメリカ内務省の BPA (Bonneville Power Administration) より 525 kV 300 MVA 単相単巻変圧器 3 台を受注し、製作中で完成も間近い。この変圧器の製作には超々高压ならびに大容量変圧器に必要な技術開発の最新結果を適用した。ここにその構造の一端を紹介して、わが国における 500 kV 変圧器の計画の参考に供したい。

2. 仕 様

本変圧器のおもな仕様は下記のとおりである。

形 式	屋外用送油風冷式負荷時タップ切換単巻変圧器					
容 量	高 圧	300 MVA	}	ただし 112% 連続使用可能		
	低 圧	300 MVA				
	三 次	25 MVA				
周 波 数	60 Hz					
電 圧	高 圧	$550/\sqrt{3} \sim 525/\sqrt{3} \sim 500/\sqrt{3}$ kV (9 タップ)				
	低 圧	$241.5/\sqrt{3}$ kV (中性点直接々地)				
	三 次	34.5 kV				
試 験 電 圧	高 圧 端 子	BIL	1,550 kV	交 流	630 kV	
	低 圧 端 子	BIL	650 kV	交 流	275 kV	
	中 性 点	BIL	710 kV	交 流	34 kV	
	三 次	BIL	200 kV	交 流	70 kV	
インピーダンス	高圧低圧間 10% (300 MVA 基準)					

このほかコロナ試験として常規対地電圧の 1.5 倍 (1.5E) まで無コロナ、試験電圧 630 kV (2E) でのコロナノイズレベルは RIV 値でそれぞれ高圧 800 μ V、低圧 550 μ V を越えないこと、さらに 1.5E 2 時間保持してコロナのないことを確認する。

ブッシング、負荷時タップ切換器、コンサベータ、端子箱などの配置も規定されており、図 1 は本変圧器外観である。

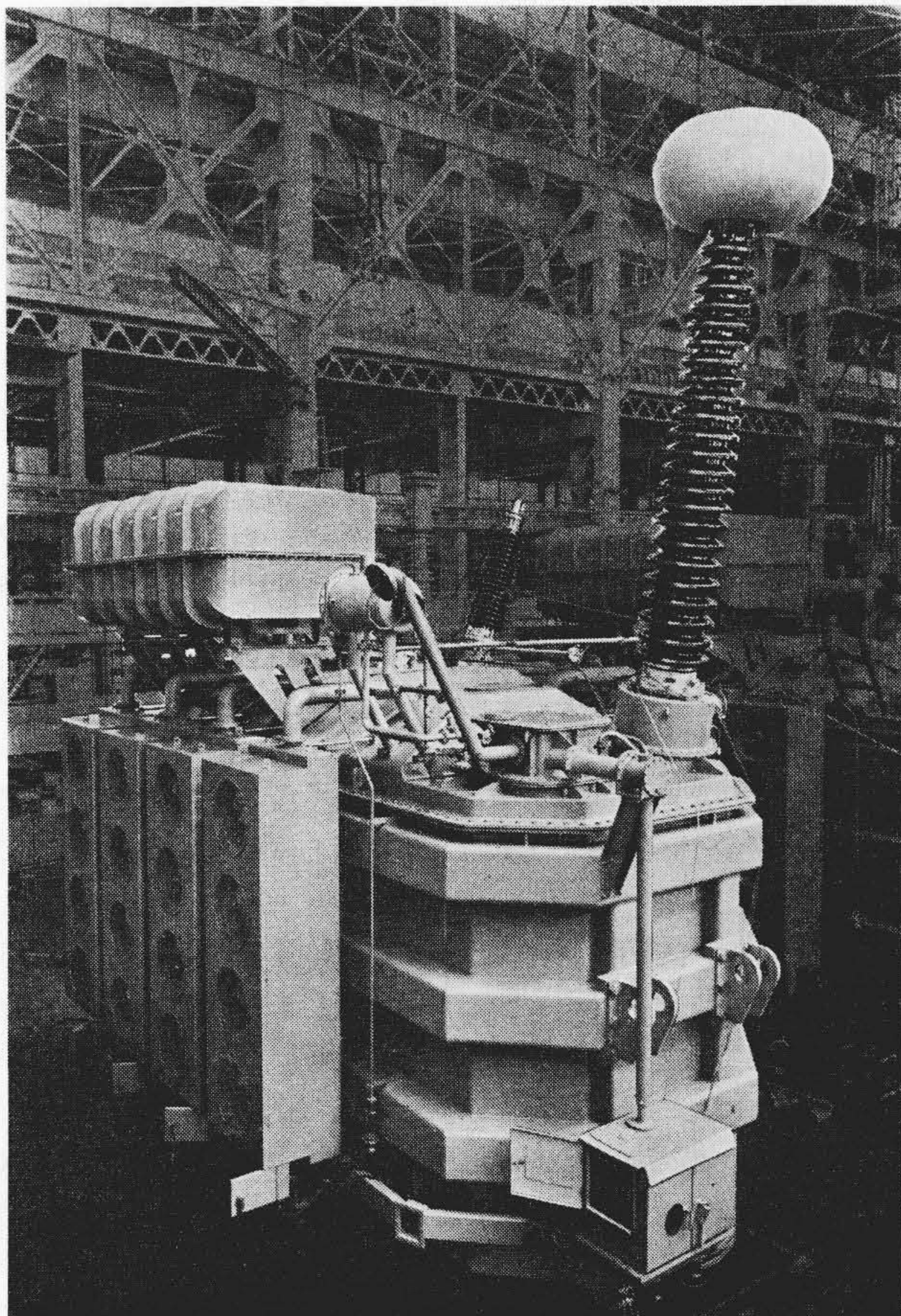


図 1 525 kV 300 MVA 変圧器

3. 巻 線

巻線は図 2 に示すように内側から三次、タップ、分路、直列の 4 巻線同心配置である。使用する電線は作業性の向上、損失の低減を目的として、すべて転位電線である。直列巻線、分路巻線には連続円板巻線を使用し、衝撃電圧分布特性改善のためコンデンサカップリングシールドを採用した。直列巻線は上下並列構造で巻線高さの中央部から 525 kV 端子を引き出している。

3.1 転位電線と連続円板巻線⁽²⁾

大容量器では巻線電流が大きく導体断面積も大きくなる一方漏れ磁束も大きいので、これと直角方向の導体厚みが厚いと渦電流損も増大するため、導体厚みをうすくし多数本を並列にして適宜転位を行ない循環電流を小さくする必要がある。転位電線は図 3 に示すよ

* 日立製作所国分工場

** 日立製作所日立研究所 工学博士

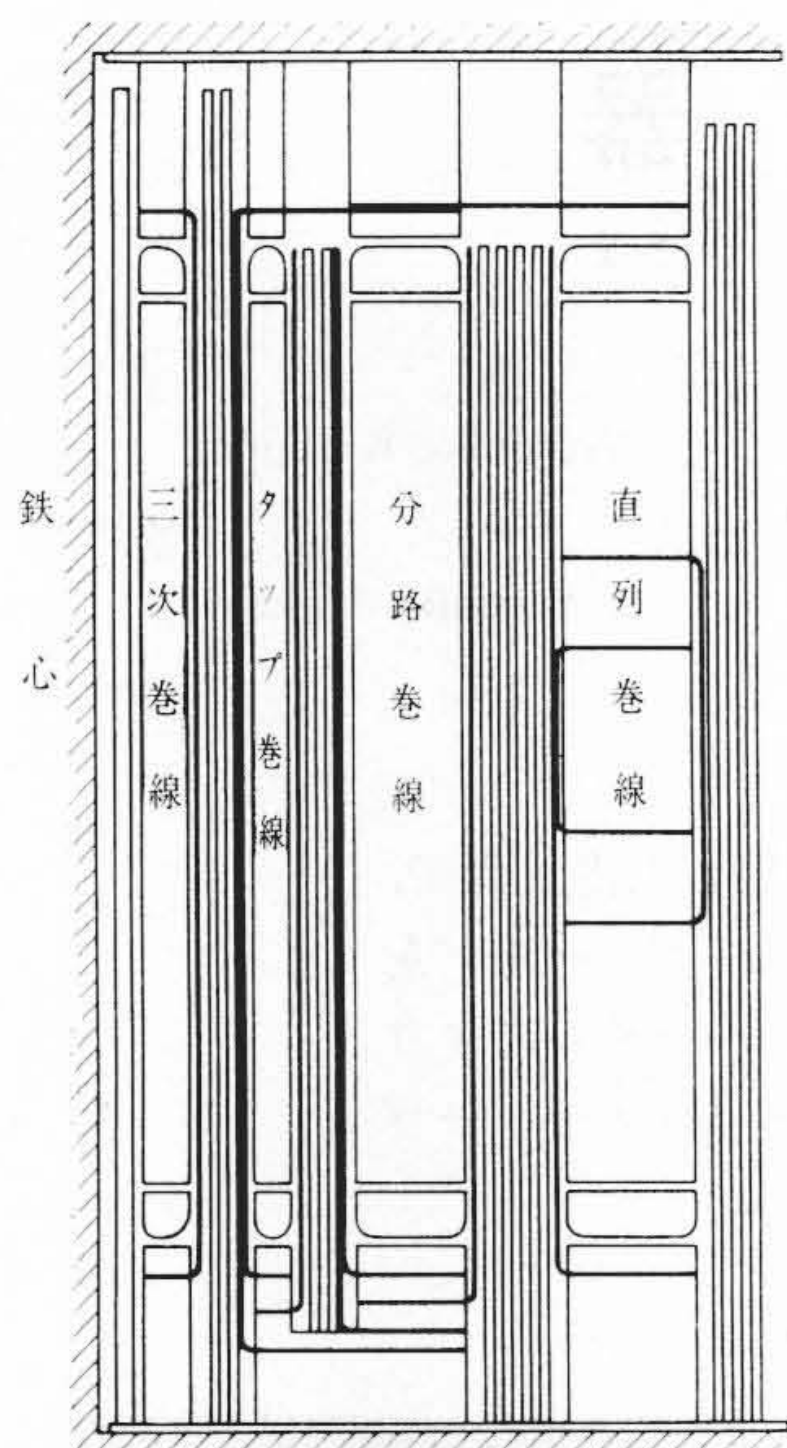


図2 巻線配置と絶縁構造

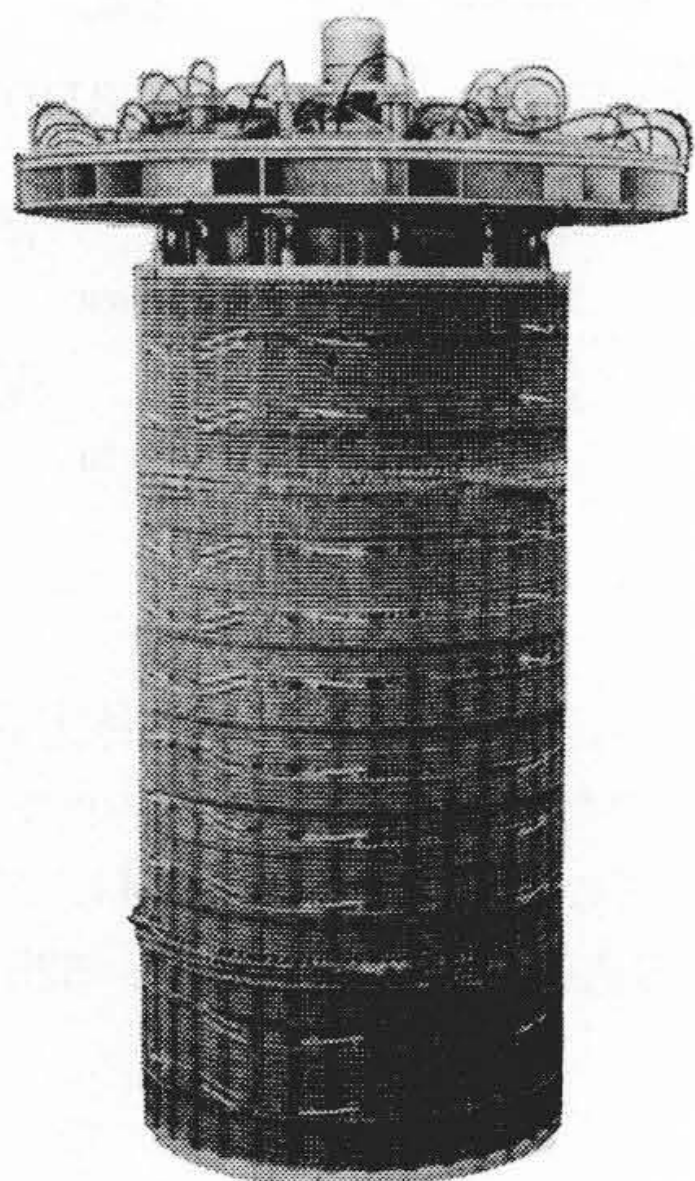


図4 たて形巻線機

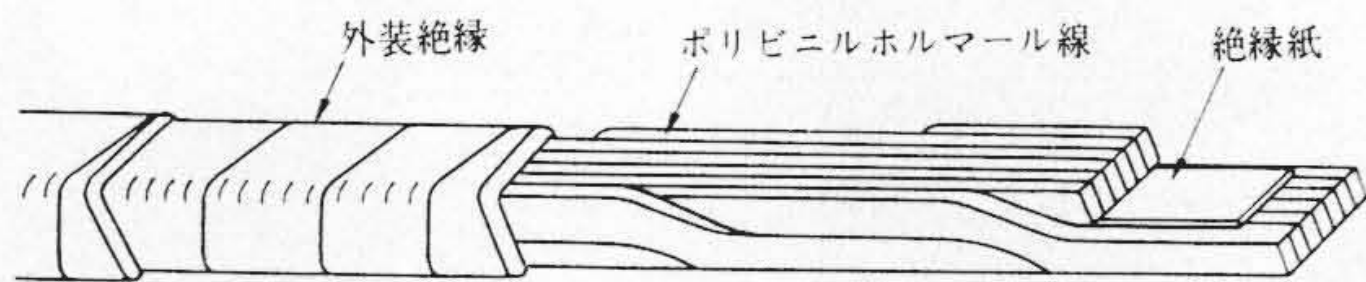


図3 転位電線の構造

うに、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周をクラフト紙で一括外装したもので、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) 巻線作業時に転位を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。

転位電線の利点を円板巻線に生かすには、連続円板巻線構造としなければならないが、このような大形器に在来のような巻線法は適用できず、たて形巻線機によらねばならない。たて形巻線機は、図4に示すようにたて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、巻線作業は常に床面の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しめつ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えられるほか、巻線作業の初工程から最終組立まで一貫して直立状態で作業することができるので信頼度向上への効果は著しい。このたて形巻線機を使用して本変圧器の直列巻線、分路巻線を製作したが、転位電線の採用効果と相まって接続箇所は直列巻線で4箇所、分路巻線で2箇所となり、生産性の高いことが示された。

3.2 コンデンサカップリングシールド⁽²⁾⁽³⁾

直列巻線、分路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(以下C.Cシールドと呼ぶ)を採用した。C.Cシールドは従来標準として採用してきた制振遮へいを改良したもので転位電線を用いた連続円板巻線に最適の遮へい方式である。

C.Cシールドは図5(b)に示すように巻線導体高さとはほぼ同じ高さのうすい遮へい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遮へい導体同士を接続することにより、コイル間の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図5(a)の制振遮へいにおける遮へい導体とコイル間の接続を切り放し

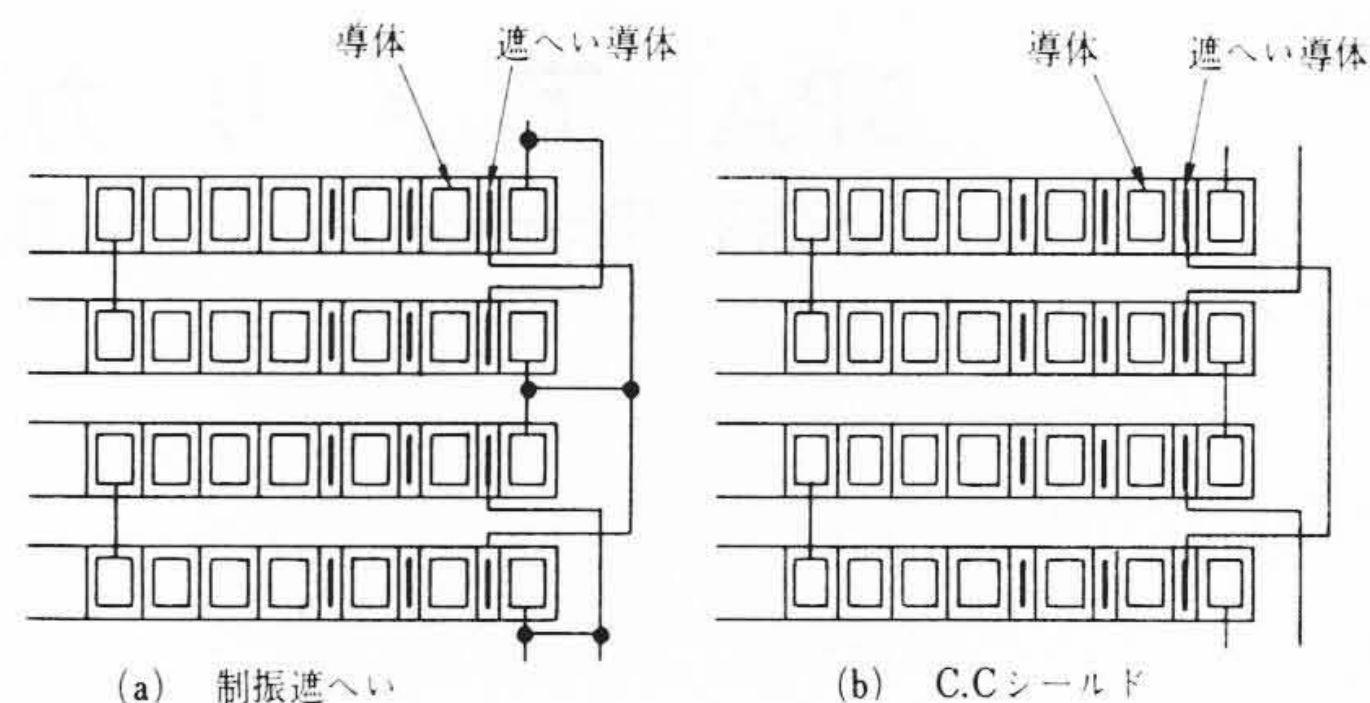


図5 遮へい方式

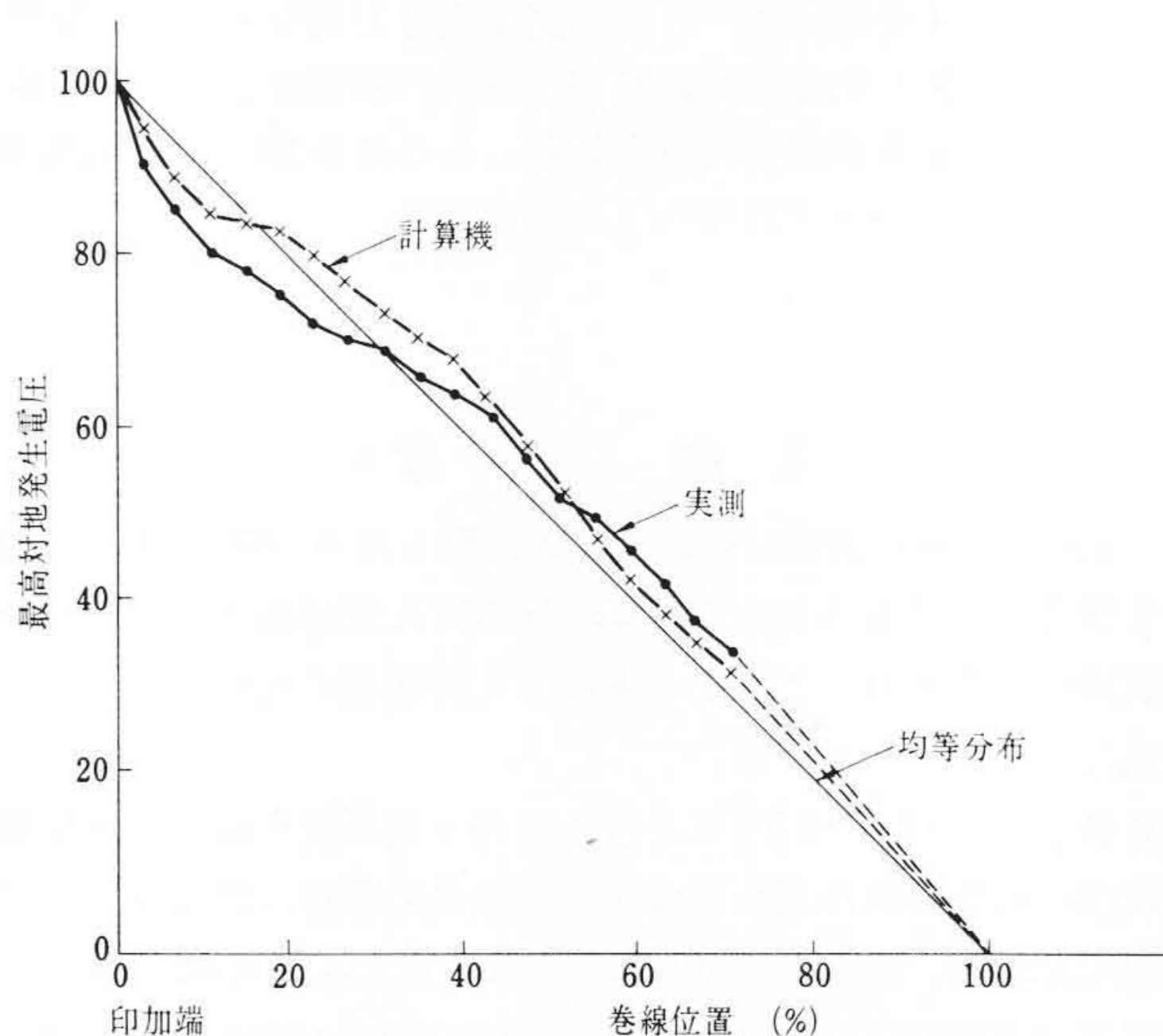


図6 525 kV 300 MVA 変圧器直列巻線の衝撃電圧特性

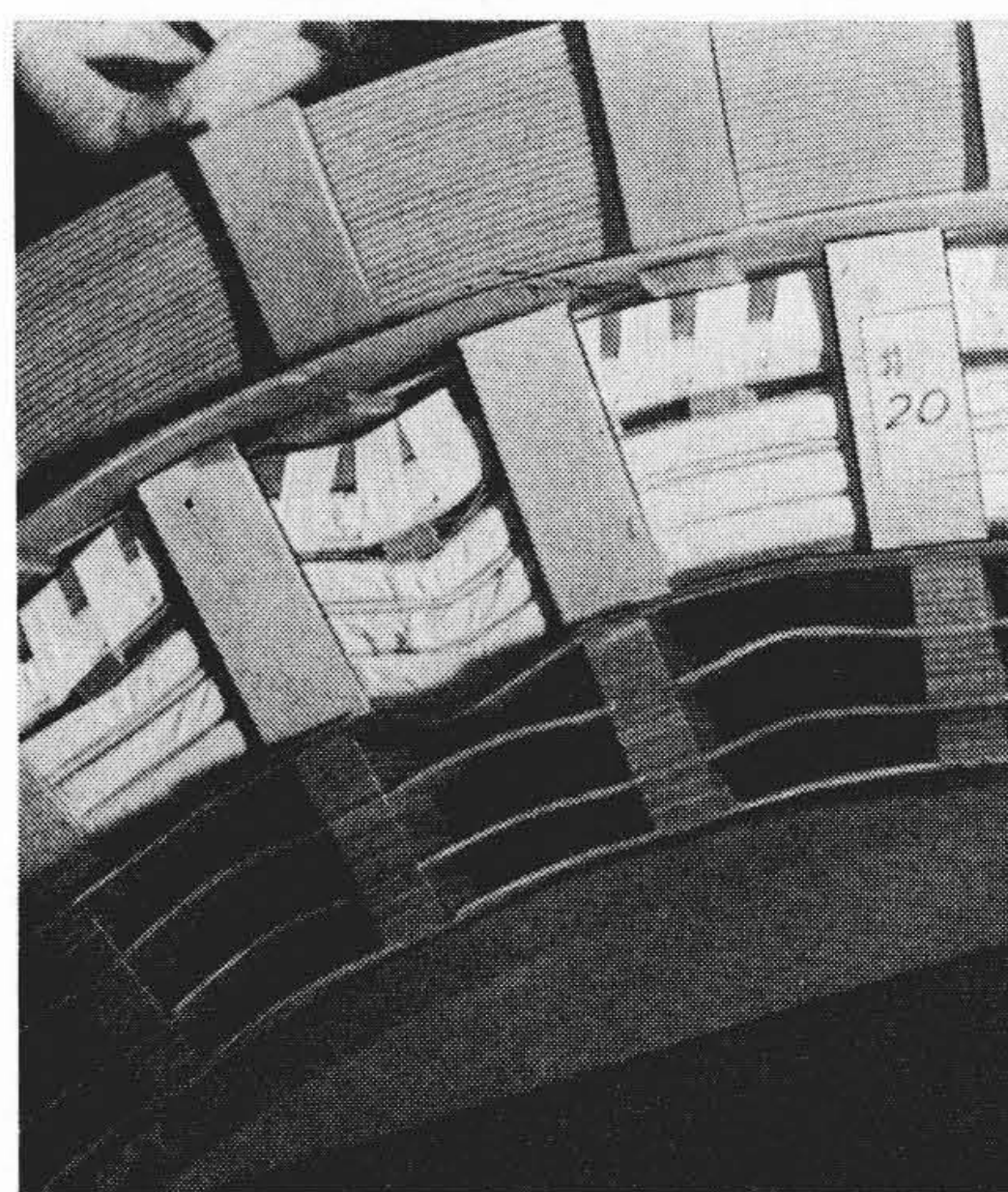


図7 機械力試験を行なった供試モデルコイル

たものと等価となり、その効果も制振遮へいと同様であることはすでに確認済みである。このC.Cシールドを使用するときの衝撃電圧特性は電子計算機によって計算される。図6は本変圧器の直列巻線についての計算結果と実測値を示したものである。計算と実測がよく一致しているばかりでなく、直線分布に近いことが明らかである。

3.3 分路巻線の短絡機械強度

一般に単巻変圧器のインピーダンスは、二巻線変圧器のそれに比べて小さく、また系統容量に比べて器容量が小さいから、短絡に際し巻線に発生する機械力が過酷となる。短絡電流とその漏れ磁束の軸方向成分によって内側巻線(分路巻線)に圧縮力が発生し、この圧縮力がある限度を越えるとコイルは座屈する。日立製作所では数年

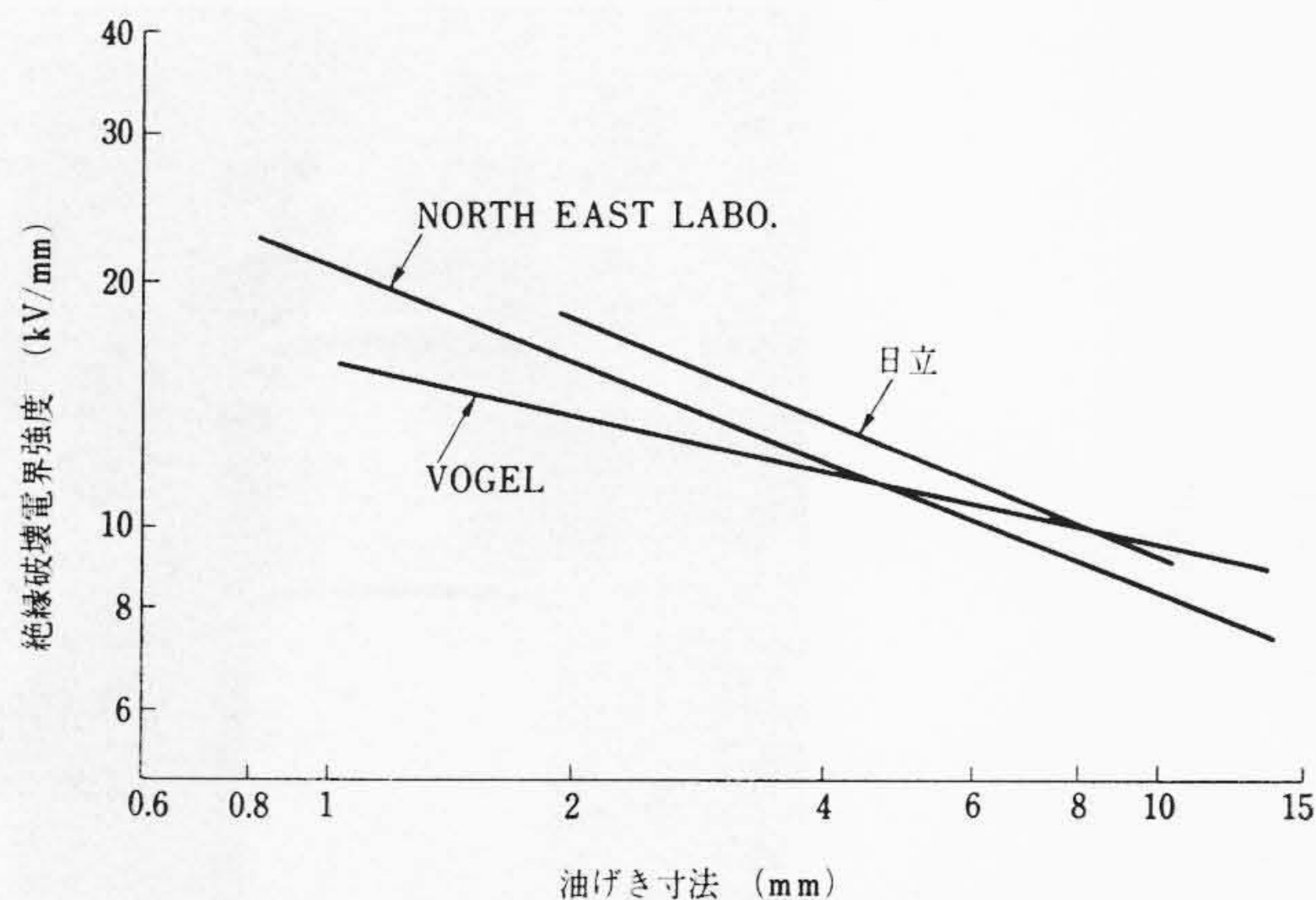


図8 油げき寸法と絶縁破壊電界強度との関係

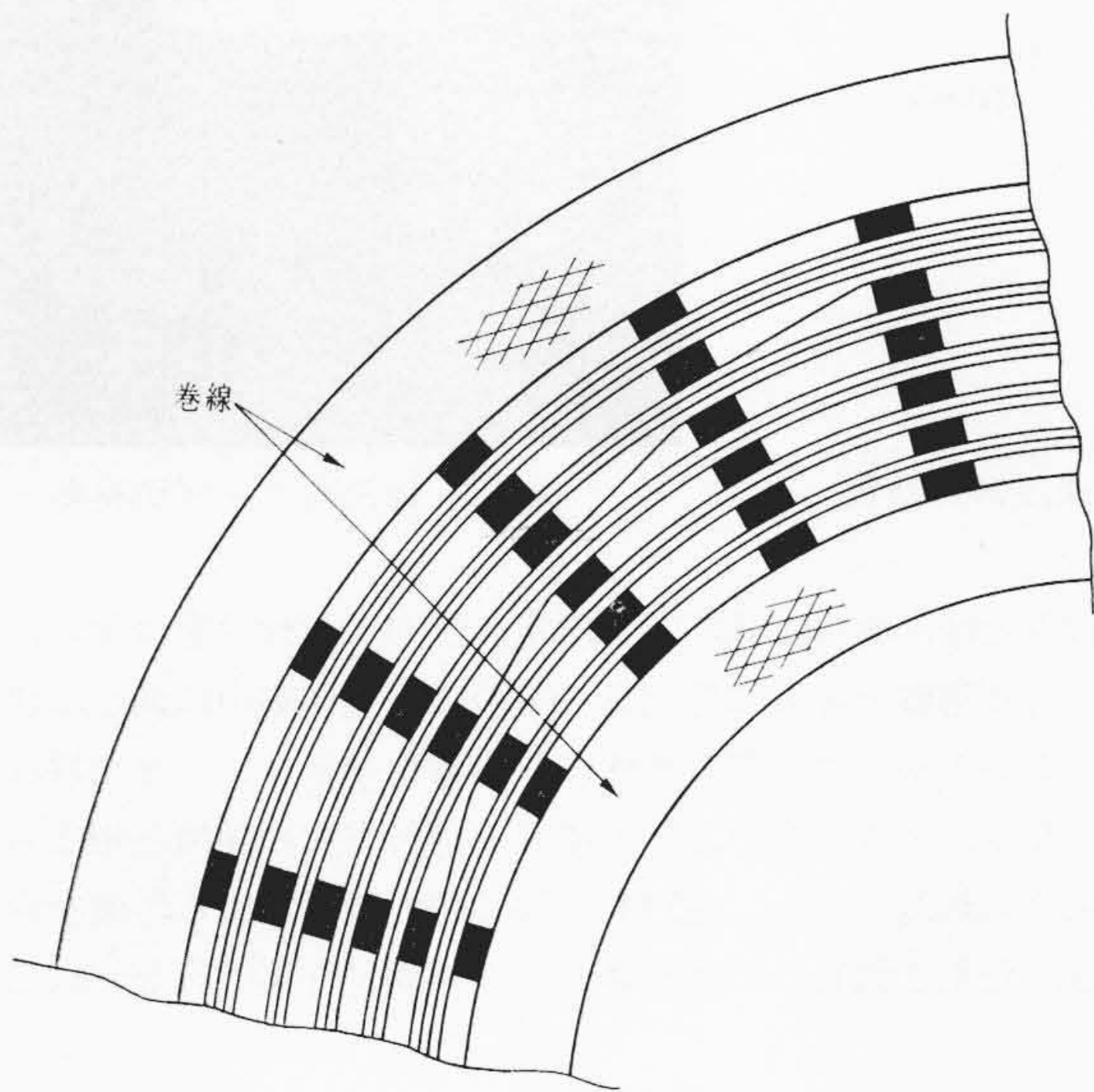


図9 油げき付固体絶縁の構造

来変圧器巻線の機械的強度についてユニークな試験方法を開発して、多数の実物大モデルによる大規模な研究をすすめ、その成果を内外^{(4)~(6)}に発表しているが、本変圧器の分路巻線についても同一の手法を用いて実物大コイルの破壊試験を行なった。この結果、普通の転位電線では巻線の機械的強度がじゅうぶんでないが、導体と絶縁被覆を改善すれば機械的強度も高まり、本変圧器に適用してじゅうぶんな強度のあることを確認して分路巻線に転位電線を採用した。図7は破壊試験をしたモデルコイルを示したものである。

4. 絶 縁

この変圧器のコロナ試験は、常規対地電圧の1.5倍(475 kV)でコロナ測定を行ない、誘導試験電圧 630 kV に上げて規定時間保持してコロナ測定を行ない、直ちに 475 kV に下げて2時間保持する仕様である。変圧器高圧端子でのコロナノイズレベルは、周囲雑音レベル 25 μ V 以下で第1回、第2回の 475 kV において無コロナ、630 kV において 800 μ V 以下と規定されている。

コロナ特性を向上させるには、電界強度の管理と絶縁物への油含浸の徹底である。前者は、各部絶縁寸法と最大油げき寸法、巻線端部電界緩和のクランプリングなどについて電界解析を行ない、最大電界強度を規定値以下に押えることにより行なわれる。後者は、絶縁物の組合せ、絶縁材料の選定、接着法などのほか、製造職場の塵埃(じんあい)管理と最終的な乾燥、注油、油含浸処理が重要なポイントである。本変圧器はこれらの点に注意して設計、製作が進められた。

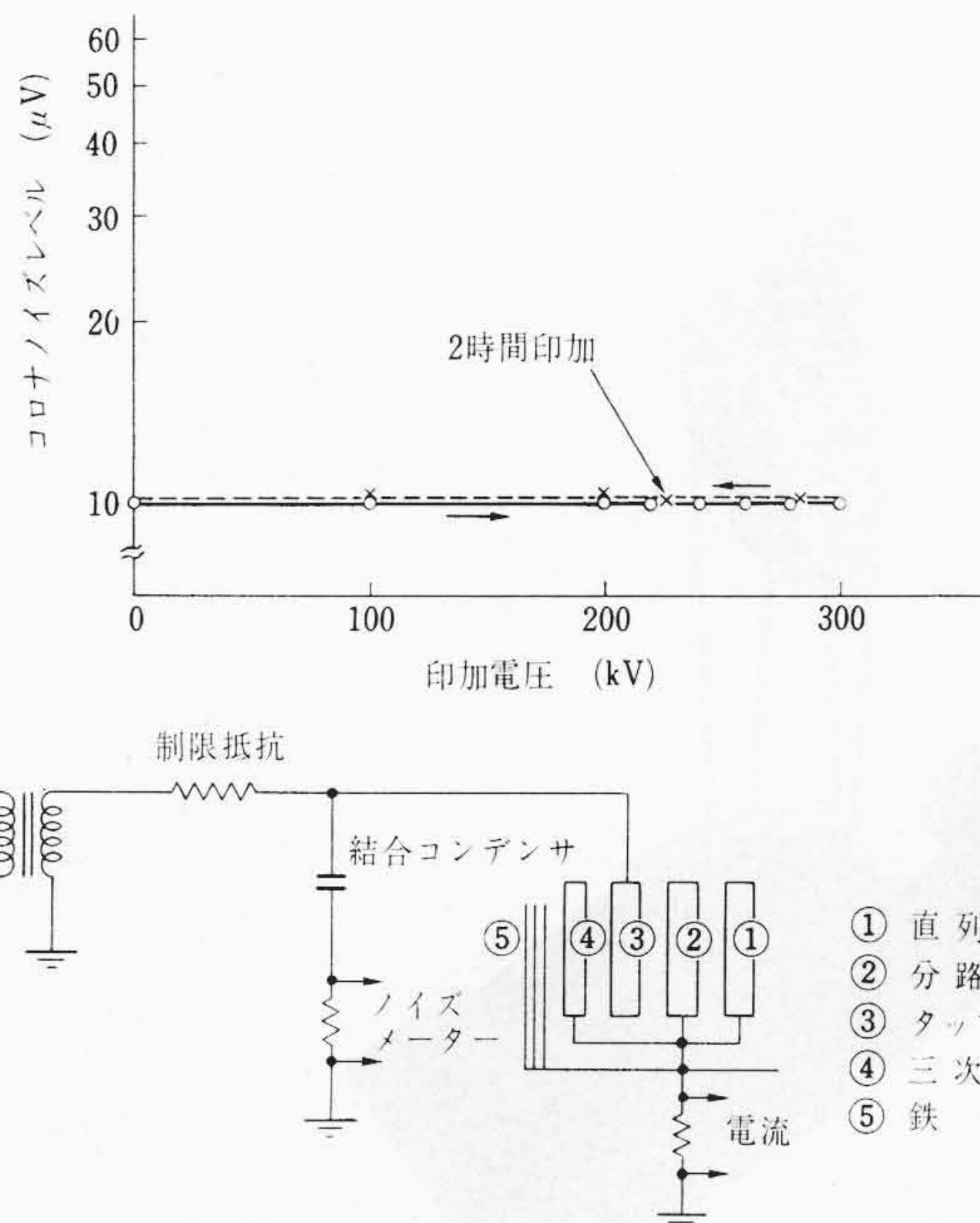


図10 端部コイルのコロナ試験結果

4.1 絶 縁 構 造

変圧器の絶縁は、油と紙の組合せであり、誘電率の小さな油に高い電界を生ずるので、絶縁破壊はまず油げきから発生する。図8⁽¹⁾は油げきの寸法と絶縁破壊強度の関係を示したもので、これから電極間の油げきを絶縁物で細分すれば、大きな油げきを置く場合に比べてコロナ開始電界強度が著しく高くなることがわかる。これにもとづいて、主絶縁には長尺のプレスペーパーを巻いて途中に油げきを設ける油げき付き固体絶縁方式を採用した。その詳細は図9に示すとおりである。この主絶縁構造は、コロナ開始電圧が高くなるほか、乾燥、油含浸が容易になるという利点も兼ねており、超々高圧変圧器の主絶縁構造として今後も標準として使用されるものである。

鉄心継鉄部と対向する巻線端部の絶縁構造は図2に示すようにL形バリヤーを組合せて油げきを分割し、クリーブ距離を飛躍的に伸ばしている。巻線部には電界緩和用のクランプリングをおき、巻線に対向する接地電極にはすべてじゅうぶん大きな丸味をつけるとともに絶縁物でおおい、電界を緩和した。

4.2 製作と乾燥油含浸処理

いかに良い絶縁構造でも絶縁材料の選定とその使用法を誤るとじゅうぶんな性能を発揮させることはできない。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材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になるから斑点接着にしたり、接着剤をうすくするなどボイドの発生を抑制する対策をとった。

変圧器本体は自己タンクで予備乾燥して締め付けを行なったあと引き続いて本乾燥を行ない、真空排気装置によりタンク内を高度の真空に保ちながら注油作業を行なった。注油後放置して油含浸をするが、含浸速度を早めるため熱油循環をする。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塵(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。

- (a) 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。
- (b) 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。

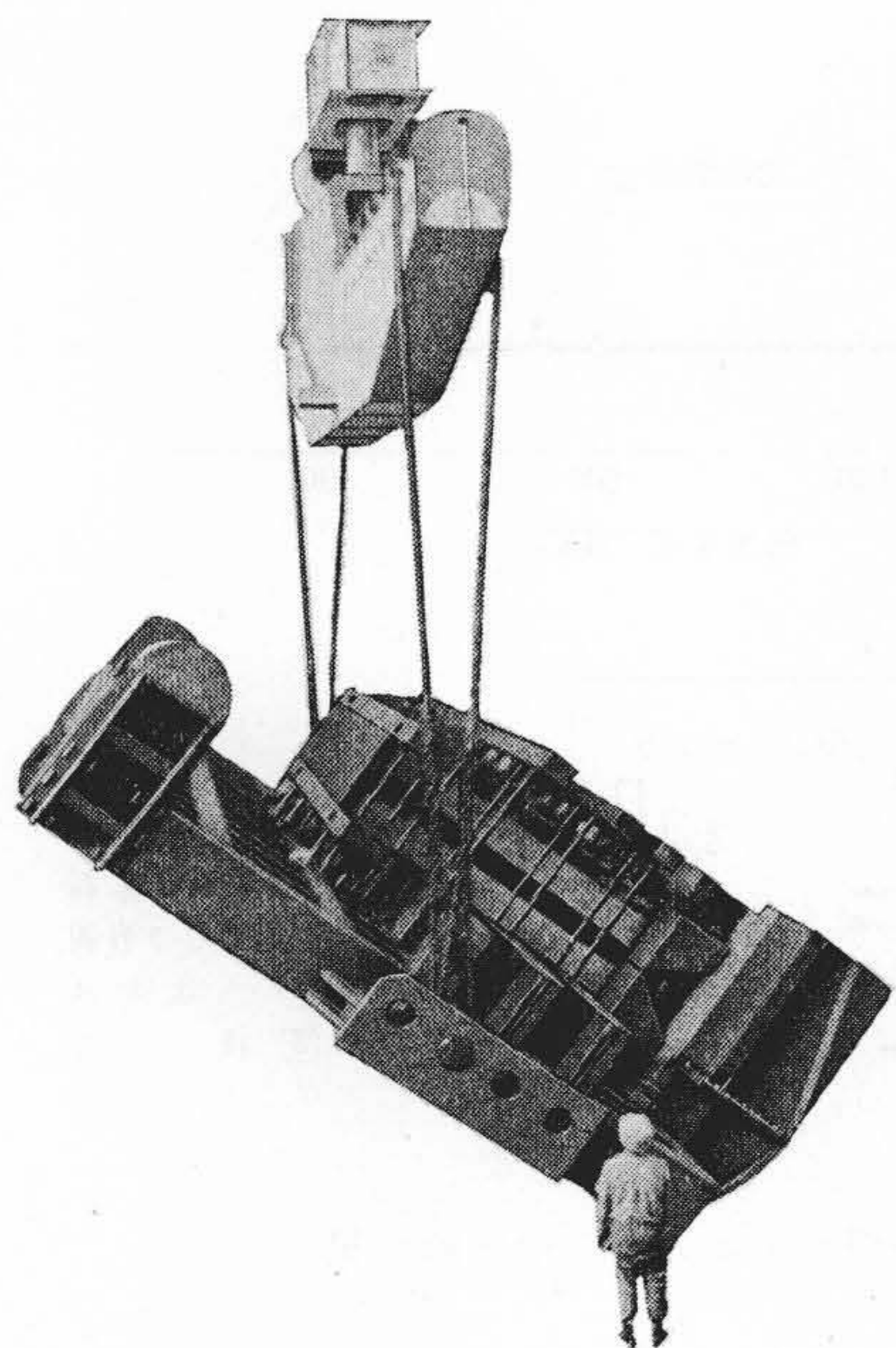


図 11 鉄心起立装置による作業

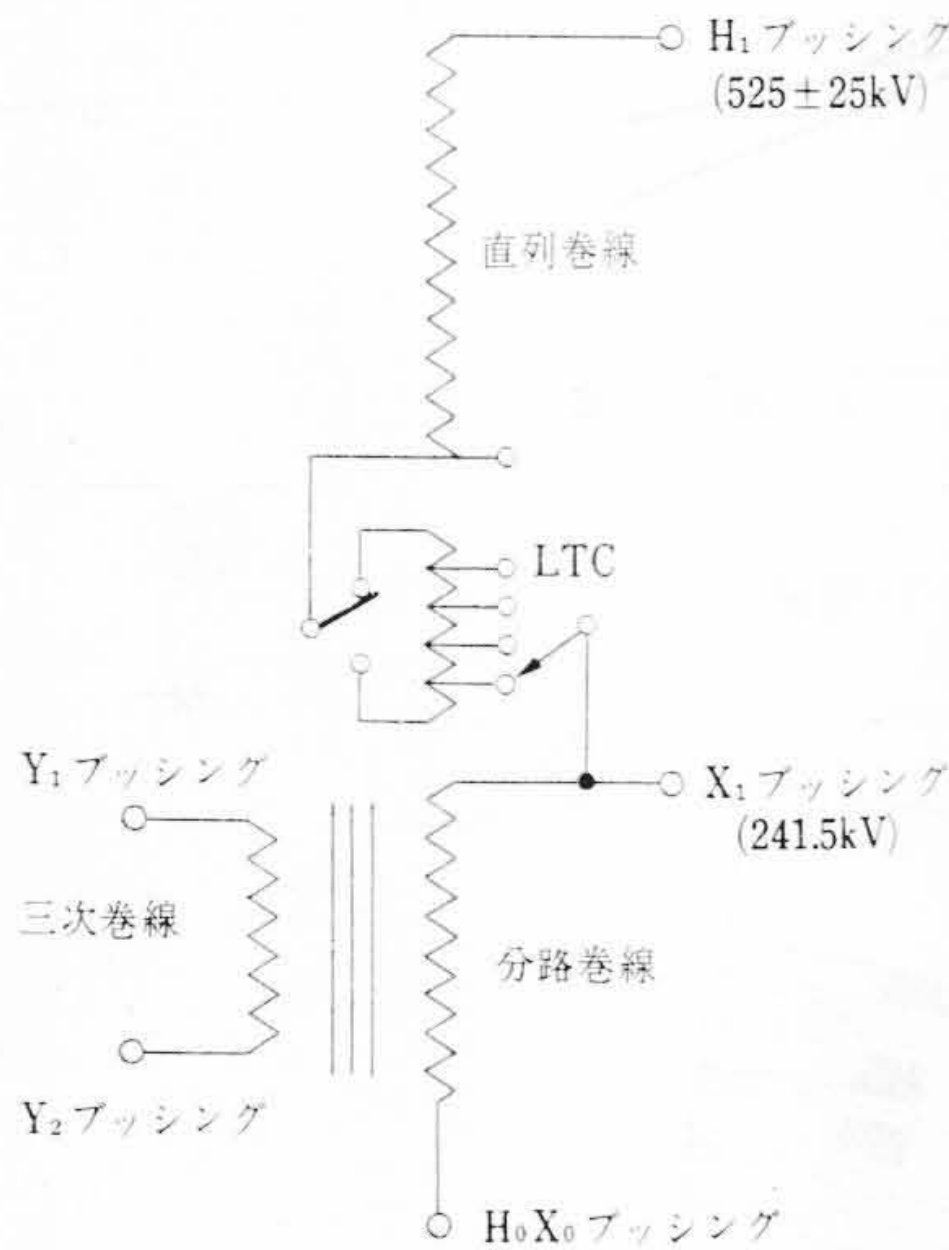


図 12 525 kV 300 MVA 変圧器の結線

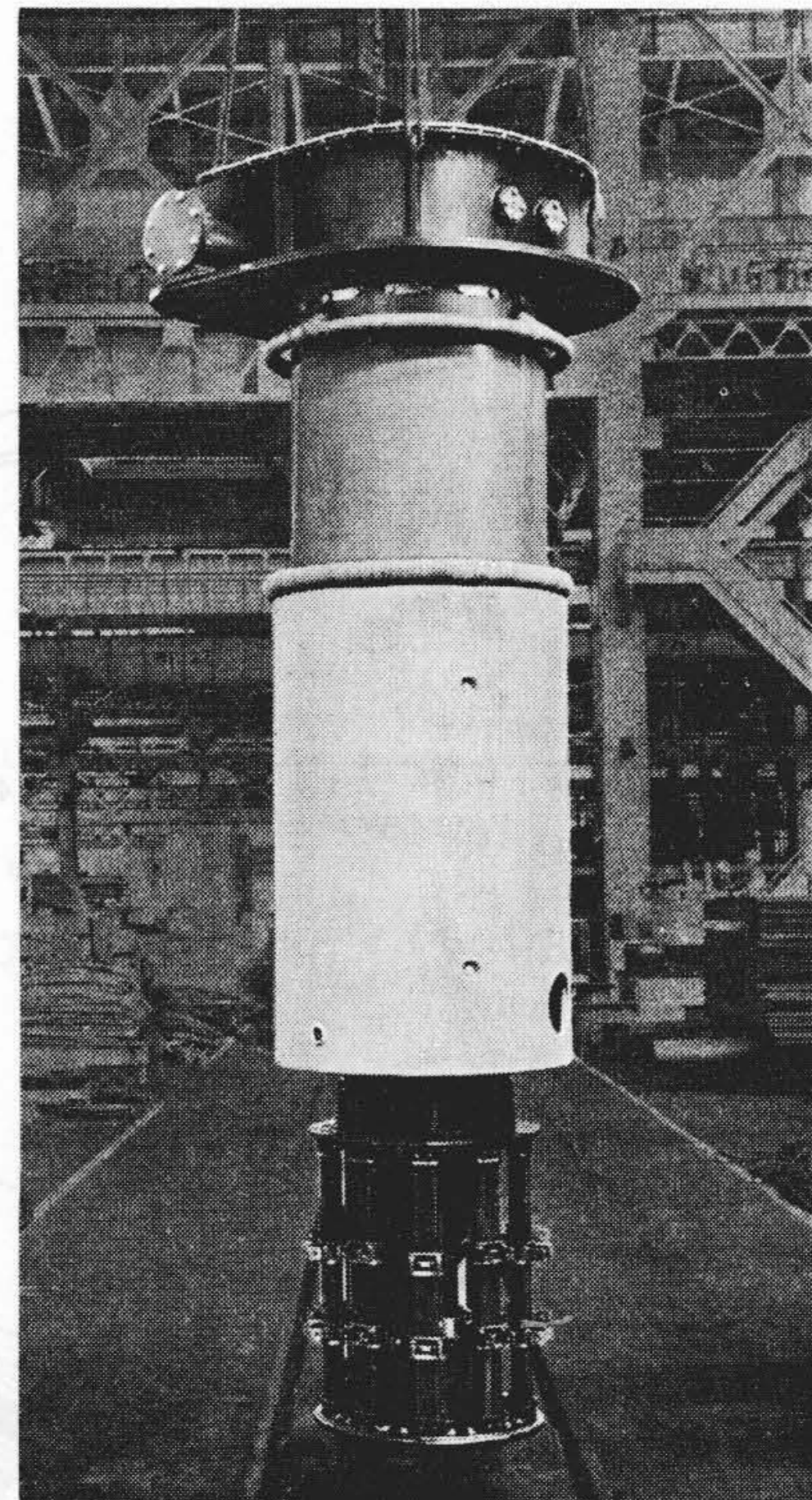


図 13 負荷時タップ切換器

- (c) フィルタによって変圧器内のじんあいが除去される。
- (d) 熱油循環中に油中水分を測定すれば、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。

4.3 端部絶縁構造の確認

巻線端部は鉄心継鉄に対向しており、リードの引き出しがあるうえ、誘導試験のとき直列巻線の端部およびタップ巻線には約 300 kV の対地電圧が印加されることになる。この部分について、巻線高さのみを低くし、他の部分についてはすべて実物と同一の端部モデルを製作し、作業性の検討と、コロナ特性、絶縁処理法、絶縁強度の確認を実物の製作に先立って行なった。図 10 はコロナ試験の一例を示したものであるが、電圧の印加順序は実物と同じである。誘導試験のあと常規対地電圧の 1.5 倍で 2 時間保持に相当した電圧を印加し無コロナであることを確認した。このほか衝撃電圧試験などを行なったあと、コロナノイズレベルを監視しながら印加電圧（商用周波）を高め 420 kV 10 分間印加したとき絶縁破壊を生じた。実器はこの破壊した部分の構造を改善したから、端部絶縁の裕度はより高いものとなった。

5. 鉄 心

変圧器の設計は鉄心の特性、構造に左右される要素が多く、特性の改善に大きく寄与するものとして、けい素鋼板の焼鈍があげられる。本変圧器の鉄心は新設した連続焼鈍設備により鉄板は流れ作業的に処理された。従来のバッチ炉で焼鈍したものとは比べ、へいたん度、損失など、機械的、電氣的に安定した性能が得られた。

構造面での改善として、2 脚鉄心構造の締付けにバインド締付方式⁽²⁾を採用した。この締付方式は熱硬化性樹脂を含浸したガラス繊維のテープで鉄心を巻回してキュアし、締付けるものである。鉄心締付金具の簡素化、鉄心占積率の向上、均一な締付けにより鉄心特性の向上が図られる。

鉄心はまず水平に寝かせた状態で積み上げて組立て直立させる。大形とくに高さの高い鉄心は起立させる過程で自重による曲げモーメントが加わるので、これが有害な応力を鉄心に与えぬよう考慮せねばならない。このため起立装置を備えた定盤の上で水平状態で鉄

心を積み上げ、専用工具により所定の圧力で締付けを行ない、クレーンにより定盤とともに起立させるので起立作業中に鉄心に曲げモーメントがかからず、磁気特性に悪影響を与えない。また鉄板のすべりもなく、ボルト穴のないバインド締付方式の採用と相まって、製作上の信頼度も高い。図 11 に鉄心起立装置による作業を示す。起立されたあと鉄心へのガラステープの巻付作業が行なわれる。

6. 負荷時タップ切換器

BPA 300 MVA 変圧器の結線は図 12 に示すようなもので、241.5 kV 線路側におく負荷時タップ切換器（以下 LTC と呼ぶ）が必要である。このため使用実績のある LR-K 形 LTC の対地絶縁に検討を加えた新形を開発し、ステップ電圧 2,050 V、通過電流 1,200 A 用として、BPA の形式試験を受け、これに合格した。普通の中性点側に設置される LTC は常時対地電圧がゼロであるのに対し、この変圧器の LTC は常時 $241.5/\sqrt{3}$ kV が印加されるため、特に次の点に注意して設計、製作された。

- (a) 電極構造が複雑でかつ裸の部分も多い LTC のコロナ特性を向上させる。
- (b) 切換開閉器内の油が汚損した状態でも使用しても絶縁特性に悪影響のないものとする。

BPA 300 MVA 変圧器と組み合わせるときの試験電圧は、交流 275 kV、BIL 650 kV であるが、将来日本においても 275 kV 線路端に LTC をおく可能性も考え、200 号相当の絶縁試験（商用周波 460 kV、BIL 1,050 kV）を実施しこれに合格した。遮へい構造を徹底することにより商用周波での試験時、460 kV まで無コロナであった。特殊試験として切換開閉器と大地間に電圧を印加した状態での切換試験、切換開閉器室油が汚損したときのコロナ特性を試験し実用に際しての安全性を確認した。このほか国内用として電氣的寿命 20 万回、機械的寿命 80 万回を検証した。この LTC の完成により、今後国内のバンク容量 1,000 MVA 級の単巻変圧器の 275 kV 線路側切換えが可能となった。図 13 は LTC の外観である。

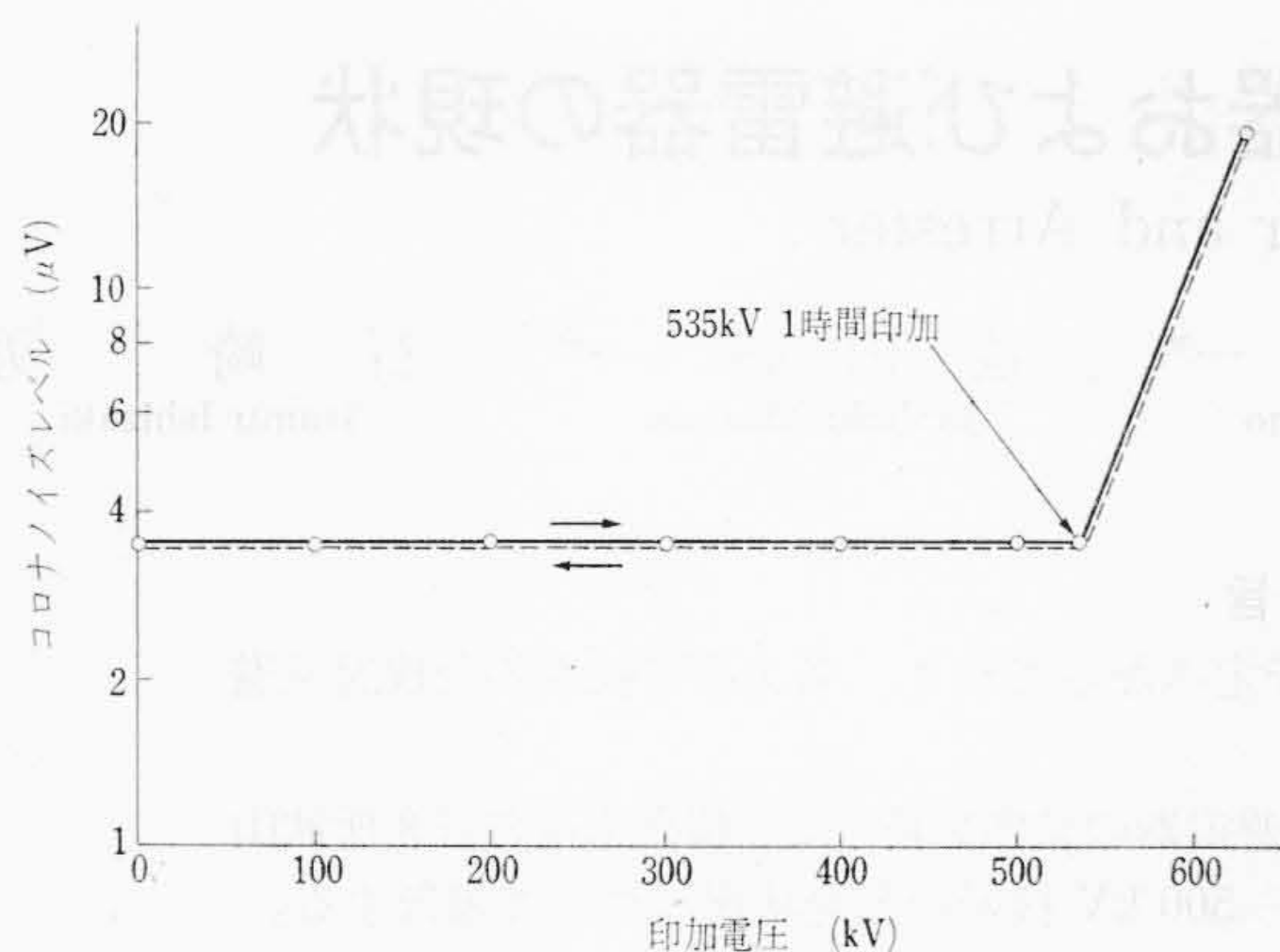


図 14 ブッシングのコロナ試験結果

7. ブッシング

納入品については顧客指定もあって、アメリカ Lapp 社のブッシングを使用した。これと並行して Lapp 社製品と互換性のある 525 kV ブッシングを製作して試験を行なった。この試作品の仕様は次のようなものである。

定格回路電圧	525 kV
定格電流	1,200 A
商用周波耐電圧	630 kV (乾燥および注水)
衝撃耐電圧	1,425 kV (乾燥)
注水開閉サージ耐圧	1,180 kV
波尾さい断波耐圧	1,640 kV
波頭さい断波耐圧	1,835 kV
曲げ荷重試験	800 ポンド (頭部), 1,200 ポンド (下端部)
長時間耐圧	535 kV 1 時間印加後, 630 kV 1 分間印加
コロナ開始電圧	$525/\sqrt{3}$ kV $\times 1.1$ 以上
可視コロナ電圧	340 kV 以上

そのほか、水平加速度 0.5G の地震、風速 40 m/秒 の風圧などブッシングに加わる外力も考慮して設計をした。形式試験のあとで再度コロナ試験を行なった。図 14 はその結果であるが Lapp 社製品と同等以上の良好な成績を収めた。

このブッシングは油浸紙式コンデンサブッシングで、次の特長をもっている。

- (a) 除湿、除じんされた良質の電気絶縁でコンデンサコアを構成している。
- (b) コア内部の電位分布を均等化させるための電極配置は、乾燥、油含浸も考慮した構造としている。
- (c) 工場試験に使用した頭部シールドは FRP 製で強度が大きい。

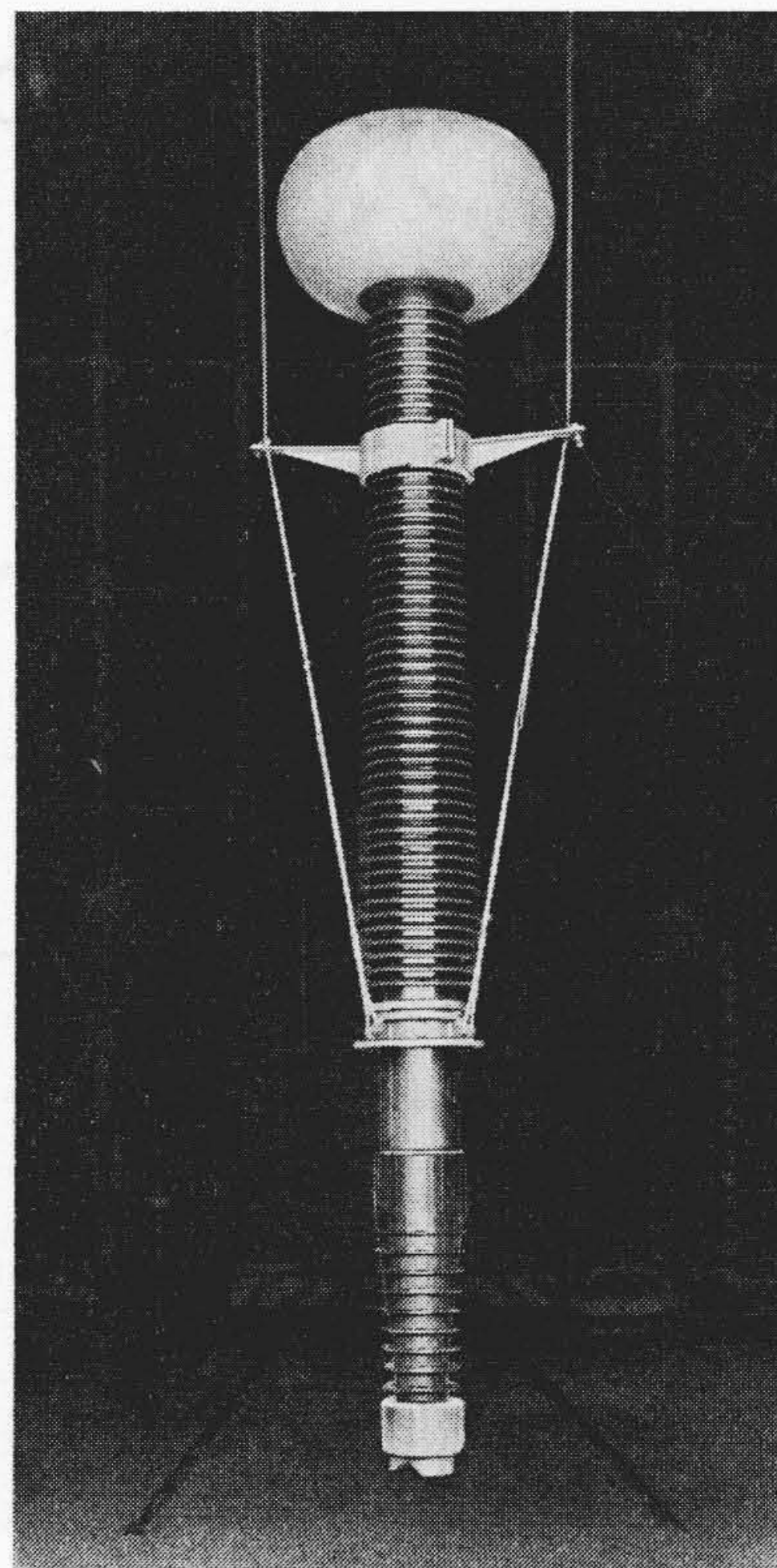


図 15 525 kV 油浸コンデンサブッシング

く軽量で扱いが容易である。

図 15 は外観を示したものである。

8. 結 言

アメリカ内務省 BPA より受注した 525 kV 300 MVA 単巻変圧器の設計、製作について、巻線、絶縁、LTC、ブッシングなどを主体として紹介した。

今回の製作経験により多くの貴重な資料が得られ、500 kV 級変圧器の設計、製作、試験などの技術に対し一段の進歩をとげた。今後とも積極的に技術開発を推進し、さらにいっそうの充実を図りたいと願っている。

参 考 文 献

- (1) 平野ほか：日立評論 49, 818 (昭 42-8)
- (2) 森山：日立評論 50, 143 (昭 43-2)
- (3) 鹿島ほか：特許公報 昭 44-4804
- (4) 平石ほか：日立評論 50, 148 (昭 43-2)
- (5) 堀ほか：日立評論 50, 153 (昭 43-2)
- (6) 栗田ほか：IEEE, Paper No. 68 TP 661-PWR