

400kV 変圧器および計器用変成器

The Japan's First 400 kV Transformer and Instrument Transformer

木 沢 修* 栗 田 健 太 郎* 浅 野 次 夫*
Osamu Kizawa Kentarō Kurita Tsugio Asano

内 容 梗 概

日立研究所大電力実験所の超高圧遮断器試験電源用として、わが国最初の 400 kV 変圧器を製作した。巻線には特殊な静電遮へいを施し、単巻変圧器構造としてその特性の検討を行い、衝撃電圧 1,450 kV、交流電圧 630 kV の絶縁試験に合格した。また遮断器試験用として使用されるため、低インピーダンスに設計し短絡時の機械力に対処するため磁気遮へいを採用した。

また同時に試作品として 400 kV 結合コンデンサ形計器用変圧器およびがい子形変流器を完成した。

1. 緒 言

日立製作所では 400 kV 送電に使用する変圧器および計器用変成器について研究を進めていたが、このたび日立研究所大電力実験所の超高圧遮断器短絡試験電源用として 400 kV、200,000 kVA 単相変圧器を完成した。また同時に試作品として 400 kV 級変成器類を完成した。これらは 400 kV としてはわが国最初のものである。

2. 変 圧 器

2.1 仕 様

本変圧器の仕様は次のとおりである。

出 力	200,000 kVA (30秒定格)
形 式	SOC-C (単相油入自冷式内鉄形)
周 波 数	60~
端子電圧	一次 13.2 kV 二次 R 350—220 kV
衝撃試験電圧	一次 150 kV 二次 1,450 kV
交流試験電圧	一次 50 kV 二次 630 kV
インピーダンス電圧	6.9% (13.2/350 kV 端子間 200,000 kVA 基準)
総 重 量	210 t
油 量	71,500 l
寸 法	高 さ 10.88m 床面積 6.39m×8.91m

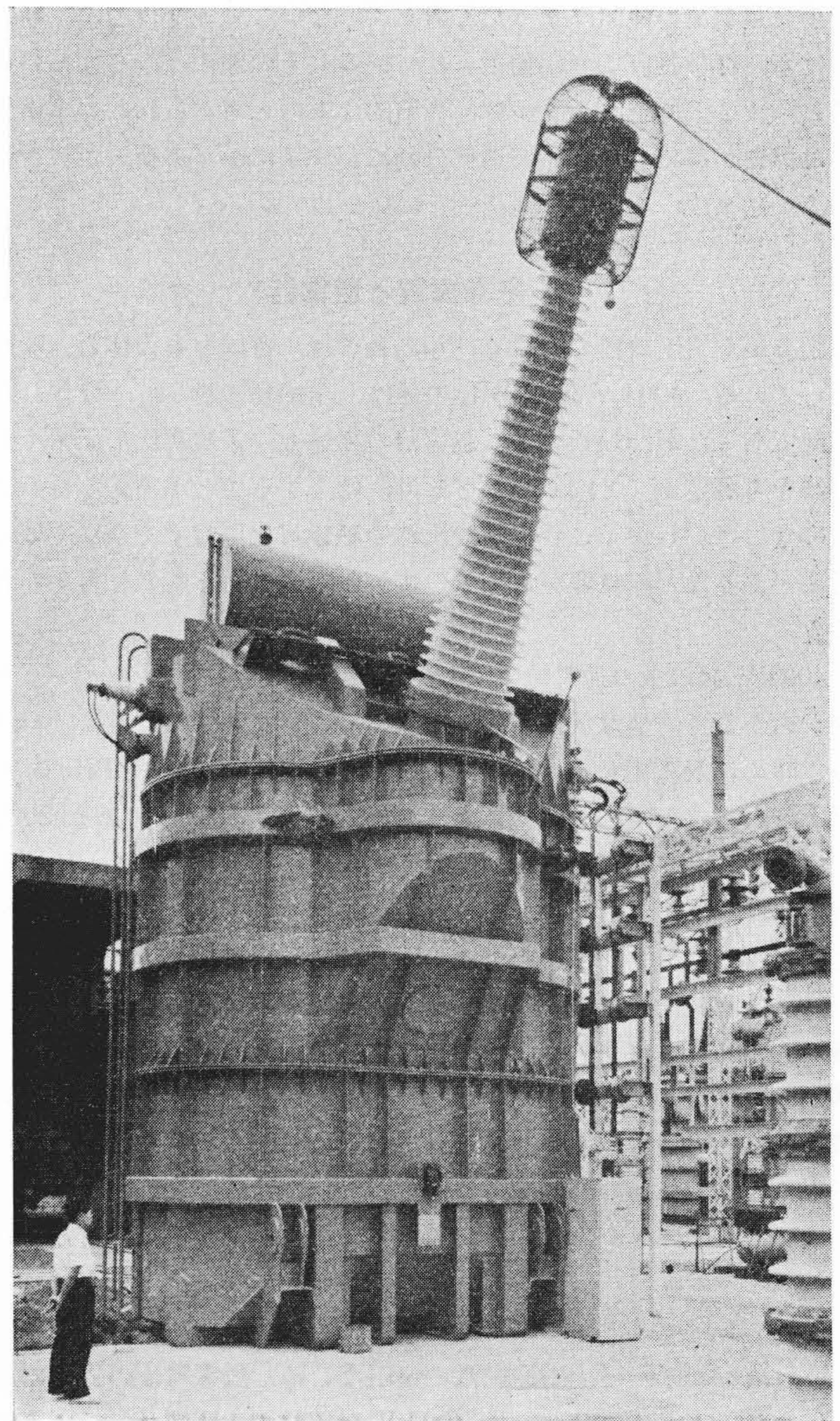
本変圧器の外観を第 1 図に示す。

公称線路電圧 380 kV に対する相電圧、すなわち変圧器二次電圧は約 220 kV であるが、遮断器試験の都合により 350 kV とした。

本変圧器は二巻線変圧器として使用されるが、400 kV 送電において主として採用されると思われる単巻変圧器としての特性をも検討するため、高圧巻線には 220 kV の中間端子を設けた。また高圧巻線の一端は接地して使用されるので段絶縁を採用している。

仕様の決定に際して高圧側の絶縁強度をいかにすべきかについて検討した。400 kV 変圧器の試験電圧をヨーロッパの例について見ると第 1 表のようになる。各国の実情によって異なるが、早期に建設されたものは比較的高く、あとに建設されたものほど低い値になっている。たとえばスウェーデンでは、1952年に運転を開始した最初の系統では異常電圧などの関係から、かなり高い絶縁レベルであったが、その後運転実績が明らかになり、系統も拡大され保護方式も

* 日立製作所国分工場

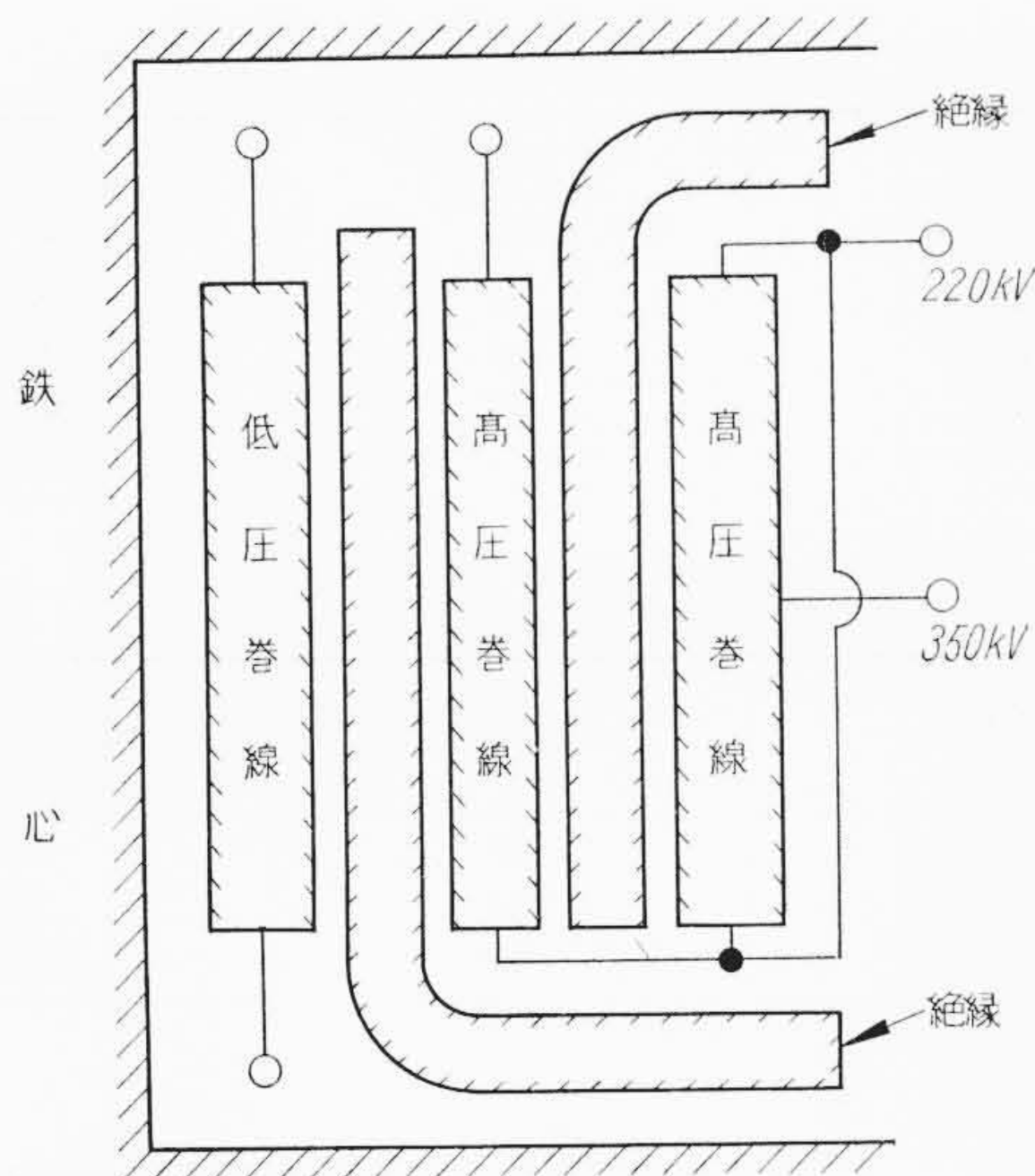


第 1 図 400 kV 200,000 kVA 変圧器

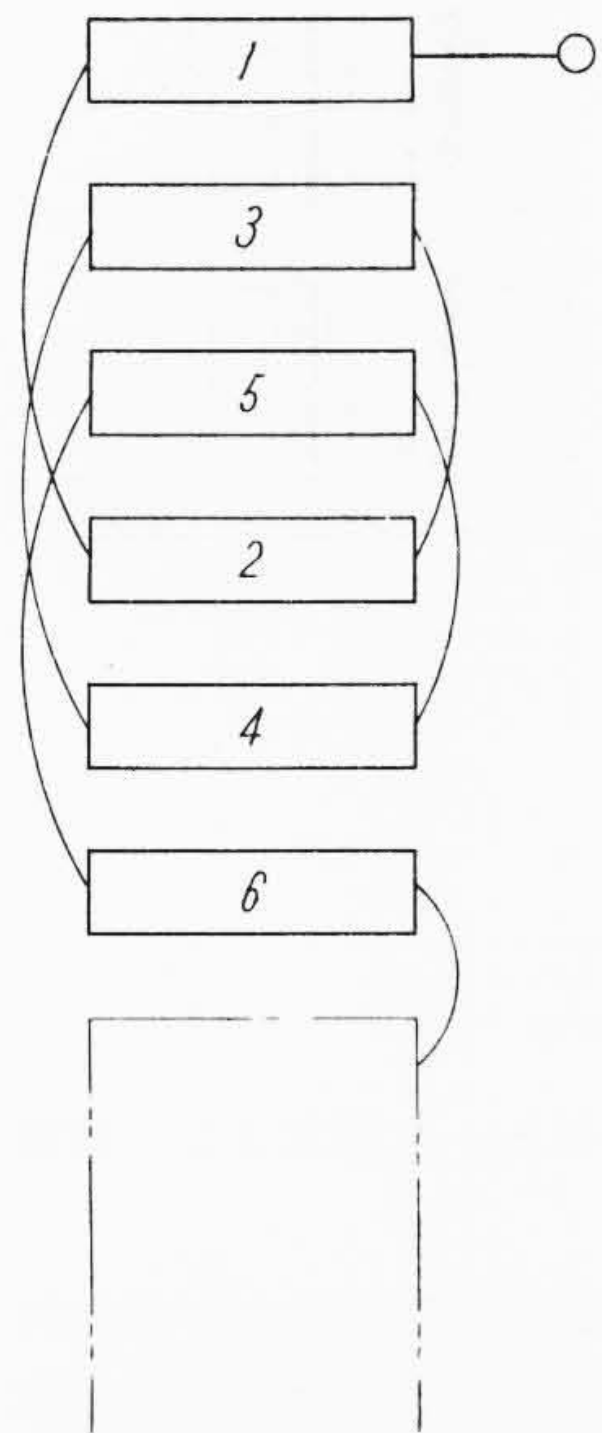
進歩するにつれて、1954年から運転されたものはこれを大幅に低減し、最近計画中のものはさらに低減され、衝撃電圧 1,425 kV 交流電圧 630 kV を採用している。

わが国の 400 kV 送電系統の条件がどのようなになるかはまだ明らかではないので、本変圧器の試験電圧はこれらの例を考慮して、衝撃電圧 1,450 kV 交流電圧 630 kV とした。

本変圧器はまた遮断器の試験電源用として製作されたため、一般の電力用変圧器よりはるかに低いインピーダンスを要求されたことが一つの特長である。



第2図 巻線の配置



第3図 遮へい巻線

2.2 巻線

2.2.1 巻線の構造

本変圧器は日立製作所の標準として安定した製作実績を持っている内鉄形を採用した。

内鉄形超高压変圧器の絶縁方式には多種あるが、大別すれば円板巻線と、多重同心円筒巻線とがある。円板巻線と円筒巻線の優劣は種々論議のあるところであるが、ヨーロッパの400 kV変圧器では円板巻線のほうが多く採用されている現状である。本変圧器では短絡時の機械的強度の点からも円板巻線を採用した。

第2図に巻線の配置を示したが、高圧巻線を2部分に分割するのは、インピーダンス電圧を低く

し、高、低圧巻線間の絶縁を合理的に施すためである。外側巻線は上下を並列として中央を350 kV端子とし、内側巻線との接続部から220 kV端子を引き出した。これは超高压単巻変圧器の標準的構造の一つである。220 kV端子は200号相当の絶縁を施した。

2.2.2 巻線の静電遮へい

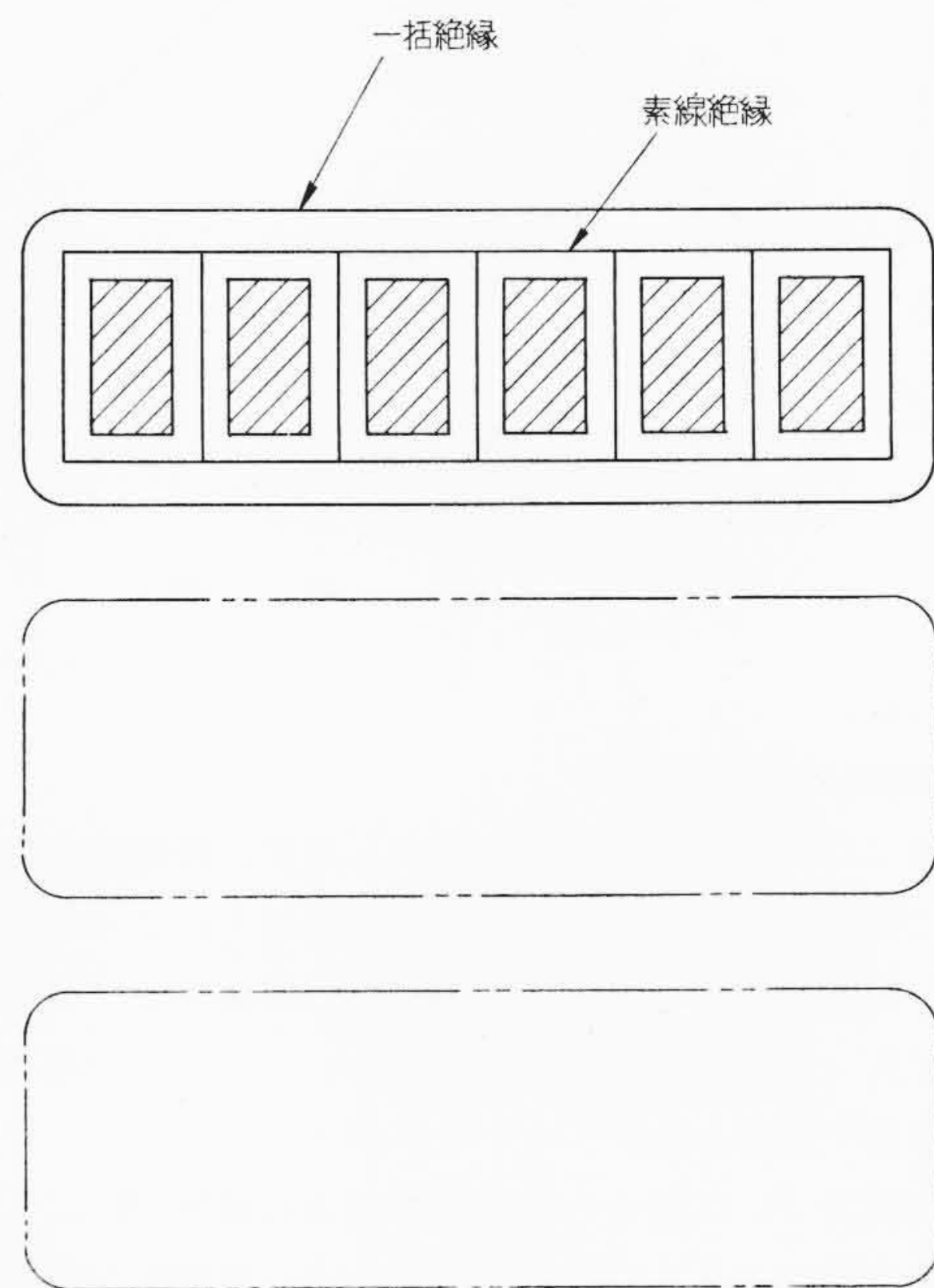
インピーダンス電圧を低くするため幅の小さい高さの高い巻線となり、また絶縁も400 kVともなると厚くなるので、制振遮へい⁽¹⁾⁽²⁾とは異なる新しい遮へい方式を試みた。

これは第3図のように各円板巻線を接続して直列静電容量を増す方式である。この遮へい方式は巻線間の対向面積が十分とれれば、制振遮へいと同等程度の効果があり、特別の遮へい導体を要しないのが特長である。隣接巻線間の電圧は普通の円板巻線の場合の2倍となるところがあるが、全電圧の数パーセント以下なので問題はない。

巻回間および各円板巻線間の絶縁のため、第4図のような一括絶縁を行った。すなわち巻回間は素線の絶縁により、またこれよりも高い電圧の加わる円板巻線間の絶縁はその上をさらに一括して施し、十分な絶縁強度を与えるとともに占積率の低下を防ぐことができた。

第1表 400 kV 変圧器の試験電圧

国	名	回路電圧 (kV)		試験電圧 (kV)	
		公称	最高	衝撃全波	交流
スウェーデン	最初の系統 1954年以降の系統 今後建設する系統	380	420	1,775	780
				1,500	660
				1,425	630
ソ連	1949年 1957年	400	420 (440 可能)	1,500	700
				1,300	600
ドイツ	RWE 1958年規格値	380	420	1,450	640
				1,425	640
フランス		380	420	1,450	630
フィンランド		380	420	1,650	725
IEC	1958年案		420	1,425	630
				1,550	680



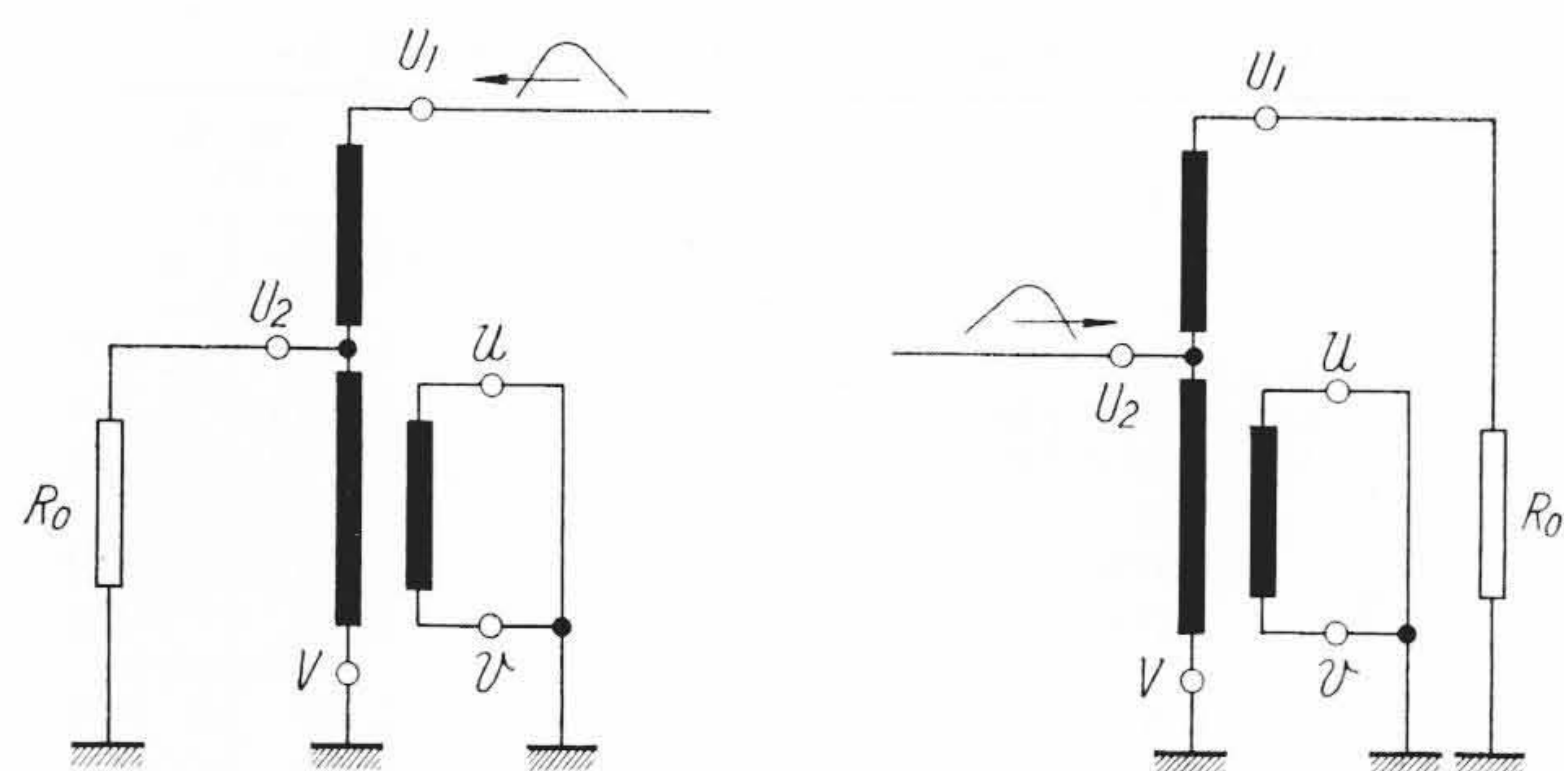
第4図 巻線の絶縁

2.3 単巻変圧器の電位分布

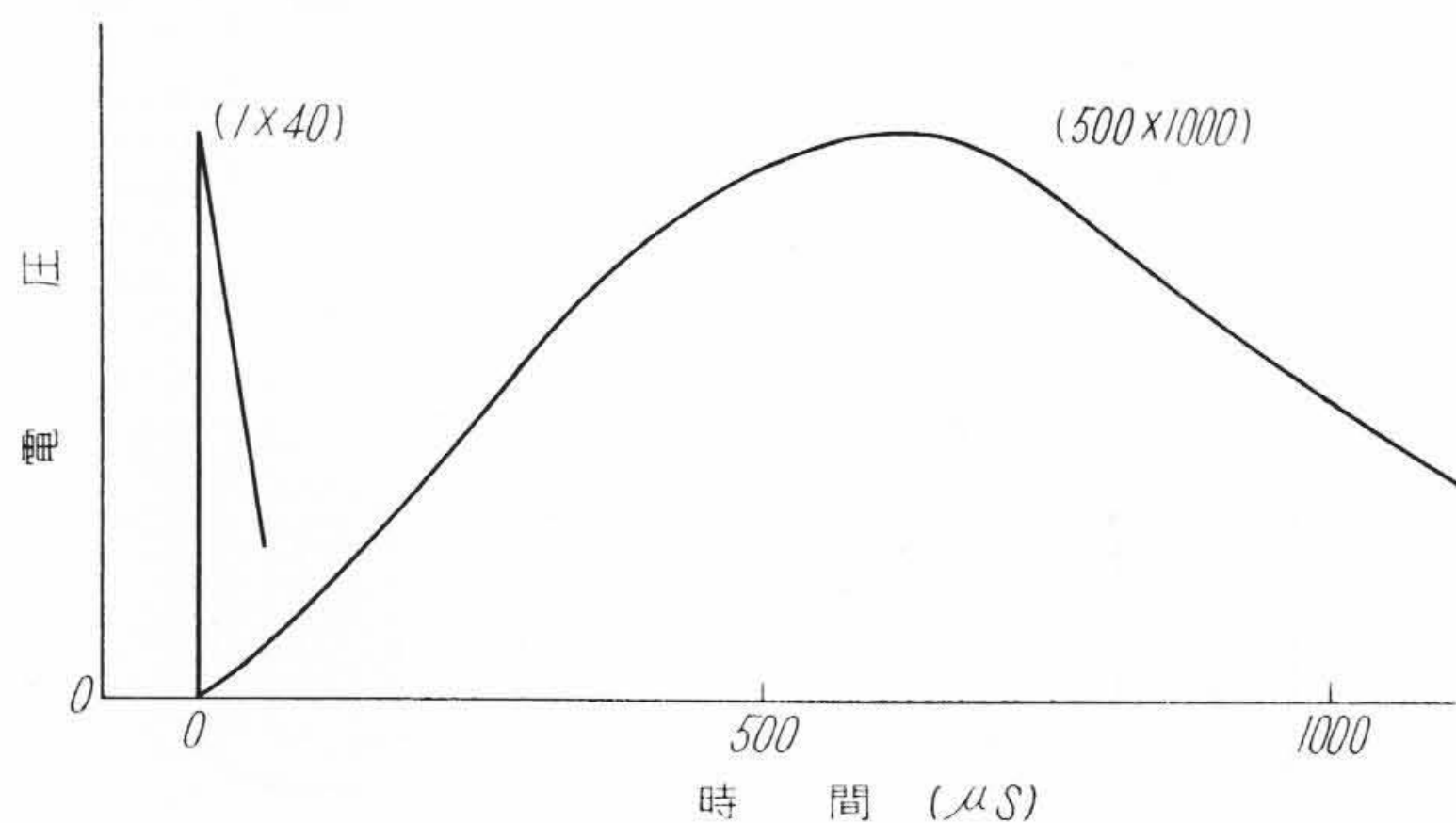
衝撃電圧に対する単巻変圧器の特性は二巻線変圧器のそれと異なっている。これについてはすでに多数の実験を行っており、製作経験もあるのでそれらの結果を検討して設計した。

高、中圧の一方の端子を開放して他方から衝撃電圧を印加すると、開放された端子にはしばしばその絶縁レベルをこえるような高い電圧が現われる。これは実系統では500Ω程度の線路のサージインピーダンスが接続されるため著しく低減されるが、時には開放された状態で印加されることもある。したがって超高压単巻変圧器は両端子とも避雷器を設置し、これがその端子へのサージの侵入を阻止するばかりでなく、他端子への印加によって誘起される電圧を低減する役割を果たすようにする必要がある。

絶縁試験に先立って各端子および巻線各部の電位分布を測定、検討した。第5図のように、高、中圧端子の一方に250、500および1,000Ωのサージインピーダンスを接続して、他方から第6図のような $(1 \times 40) \mu s$ の衝撃電圧および $(500 \times 1,000) \mu s$ の中間周波電圧を印加した。他端子に現れる対地電位を第2表および第3表に示す。この程度のサージインピーダンスが接続されておれば、衝撃電圧の場合他端子の誘起電圧はいずれも絶縁レベル以下であり、中間周波電圧の場合はほぼ電圧比に近い電圧が他端子に誘起されることが明

(a) U_1 印加(b) U_2 印加 R_0 = 線路サージインピーダンス

第 5 図 電 圧 印 加 回 路



第 6 図 印 加 波 形

らかになった。

2.4 短絡時の機械強度

本変圧器はひん繁に短絡を行うので、各部の機械強度に十分な注意を払って製作した。巻線の半径方向の電磁力による導体の応力は 3 kg/mm^2 程度であり、軸方向の力は製作誤差により多少の磁気中心のずれがあっても大きな値とはならない。しかし短絡のひん度を考え安全率を十分とった。

軸方向機械力 F_a は漏えい磁束の半径方向成分 B_r によって生ずるので、第 7 図のように巻線の巻回間にけい素鋼板を巻き込んである⁽³⁾。これによって漏えい磁束を軸方向に向け、軸方向機械力をさらに低減させた。

2.5 400 kV ブッシング

400 kV ブッシングは油入形で、かい子には日立製作所多賀工場製品を使用した。

設計にあたっては電界解析装置を使用して各部電位傾度の検討を行った。頭部にはコロナシールド電極を取り付けたが、変圧器の誘導電圧試験 (630 kV) においても可視コロナの発生はなく、所期の成績をあげた。

本ブッシングは衝撃電圧 1,600 kV、交流電圧 700 kV の耐圧試験に合格した。さらに絶縁破壊試験を行ったが、衝撃電圧 1,775 kV、交流電圧 810 kV 以上は建家に放電して印加できず破壊に至らなかった。新設の超高压実験室において再試験を行う予定である。

3. 計器用変成器

3.1 諸外国のすう勢

諸外国の 400 kV 級計器用変成器を見ると、電圧変成器としては、製作容易で、電力線搬送にも共用可能なコンデンサ形計器用変圧器 (PD) がほとんどであり、いずれも良好な特性を有し、異常現象に対しても考慮が払われている。また巻線形で非常に特色のある絶縁構造を採用している例もある。

一方変流器 (CT) においては、外観はもちろんすべてがい子形で、

第 2 表 衝 撃 電 圧 特 性

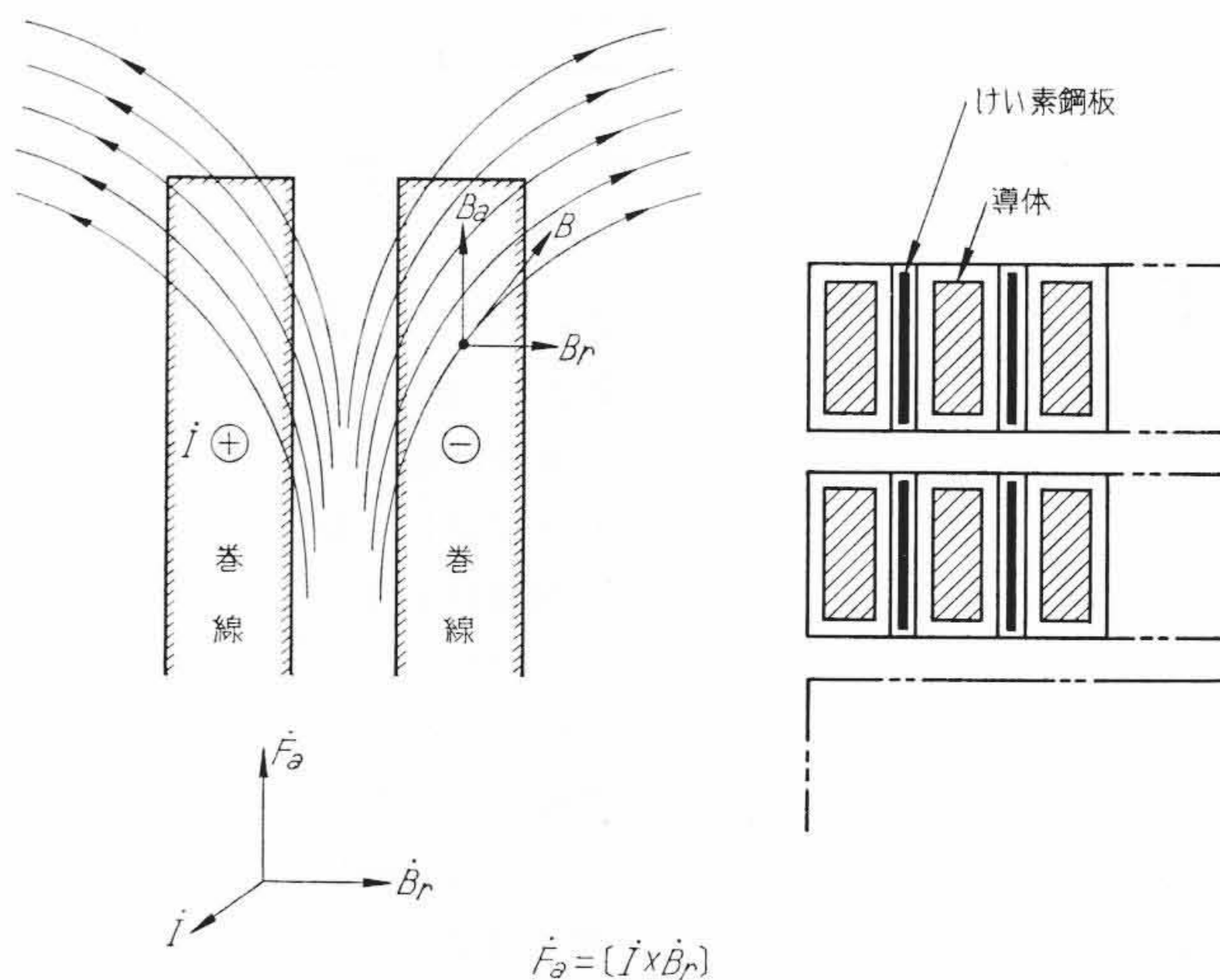
(印加電圧に対する波高値の%を示す)

R_0 (Ω)	U_2 の対地電位 第 5 図(a) (U_1 印加) (%)	U_1 の対地電位 第 5 図(b) (U_2 印加) (%)
250	31	57
500	41	77
1,000	55	103

第 3 表 中 間 周 波 電 圧 特 性

(印加電圧に対する波高値の%を示す)

R_0 (Ω)	U_2 の対地電位 第 5 図(a) (U_1 印加) (%)	U_1 の対地電位 第 5 図(b) (U_2 印加) (%)
250	50	149
500	54	154
1,000	55	163



第 7 図 磁 気 遮 へ い

絶縁方式としては一次側のみを絶縁したものと一次側および二次鉄心をそれぞれ絶縁した 2 形式がある。

二次電流は変電所構内が広くリード線の節約の意味からと思われるが、1~2A というものが多く、わが国においてもすでに超高压系統で一部使用しているので、400 kV 系統実現の場合はおそらく 1A が採用されるのではないかと考えられる。

また、CT と PD を組合わせた計器用変圧変流器も相当見受けられ、これは敷地の節約の面から有利なものと考えられるが、われわれは現状の PD および CT の両者を試作し絶縁上の問題点の究明を行った。

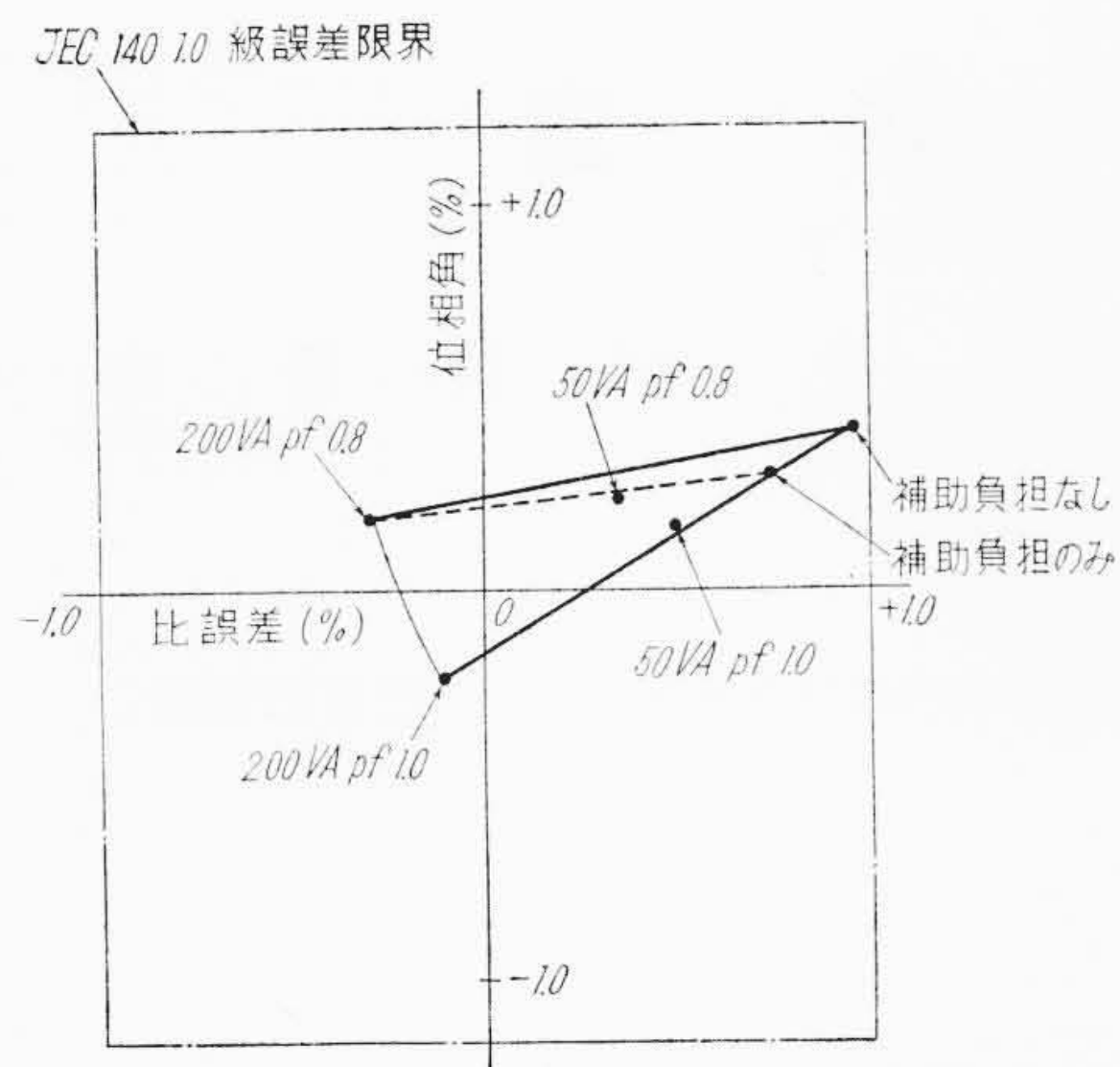
以下にこの試作品について概要を紹介する。

3.2 結合コンデンサ形計器用変圧器

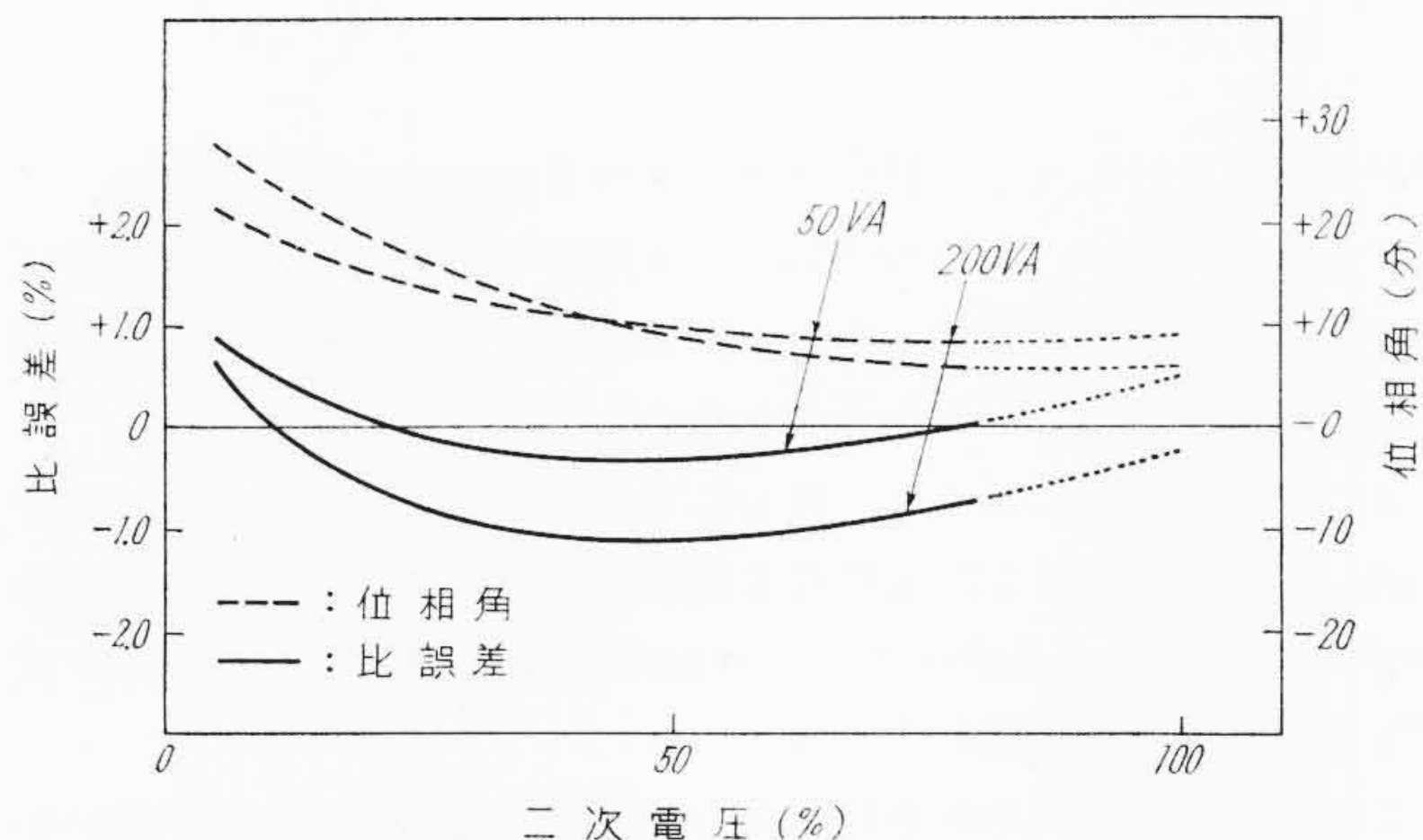
本器は、一次側の開閉、火花ギャップの放電などの衝撃による分数調波発生に対して二次側に補助負担をそう入してその抑制をはかり、また火花ギャップを油中に設けて衝撃比を上げ、BIL 程度のサージに対しても放電を起さぬよう考慮を払ってある。二次側短絡による異常電圧に対しては、前記の油中火花ギャップと二次側ヒューズによってその保護を行っている。

本器の仕様を下記に示す。

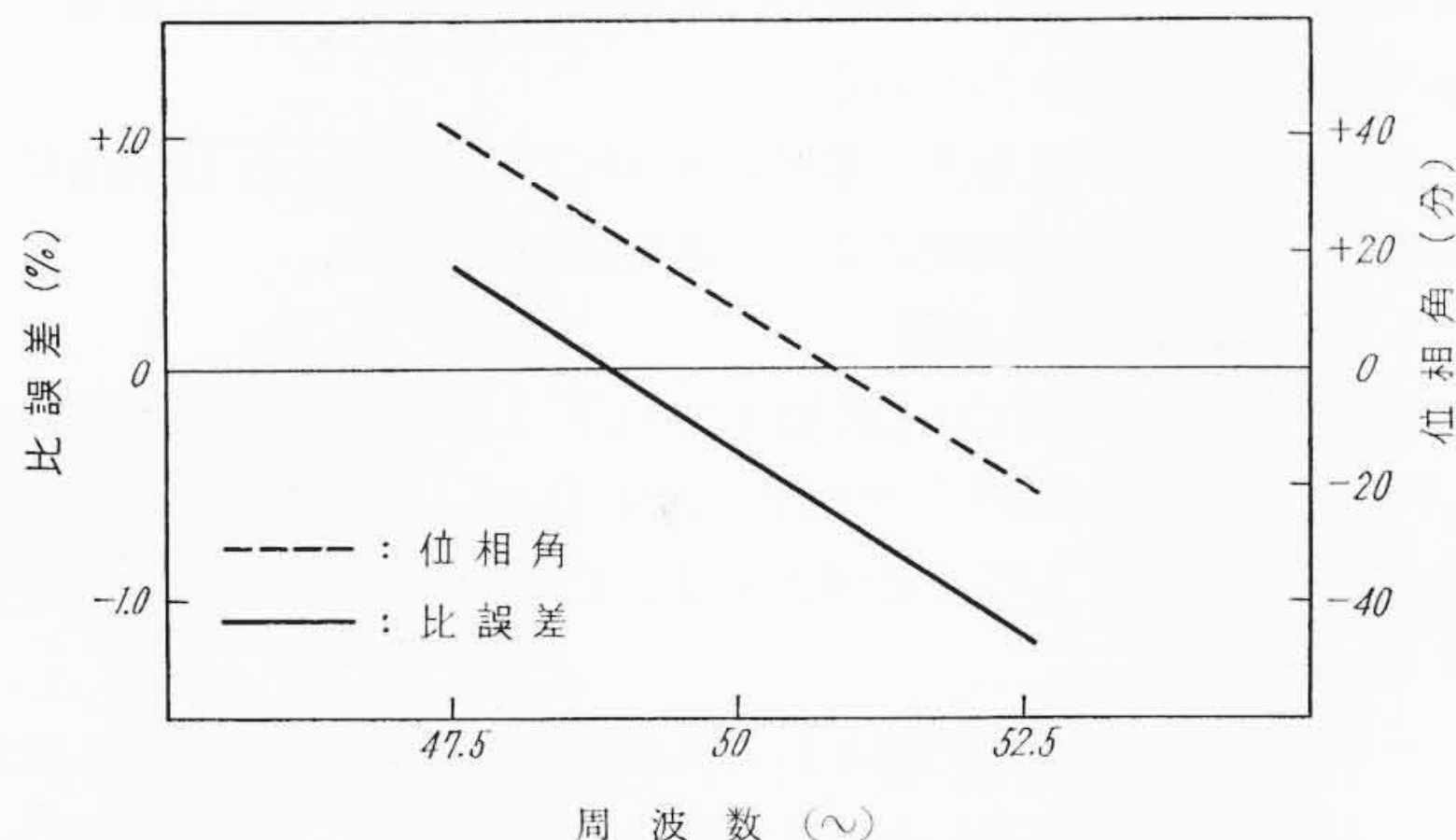
- (1) 変 圧 比 $\frac{380}{\sqrt{3}} \text{ kV} / \frac{110}{\sqrt{3}} \text{ V} / \frac{110}{3} \text{ V}$
- (2) 定格負担 二次 200 VA 三次 200 VA
- (3) 周 波 数 50~
- (4) 階 級 1.0 級 (JEC-140)
- (5) 試験電圧 商用周波 630 kV
衝撃電圧 1,450 kV
- (6) 寸 法 高さ 6.9 m 床面積 1.8 m 角



(a) 誤差円線図 (50~)



(b) 電圧特性 (負担力率 0.8, 50~)

(c) 周波数特性 (定格二次電圧 200 VA 負担力率 0.8)
第 8 図 400 kV コンデンサ形計器用変圧器特性曲線

- (7) 重 量 2,750 kg
(8) 油 量 455 l

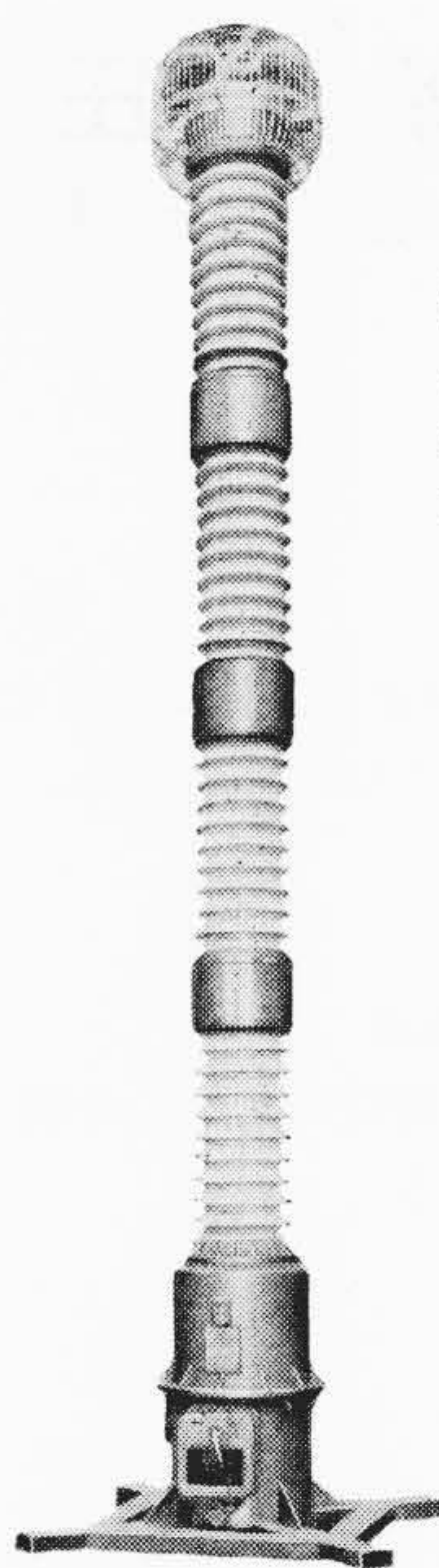
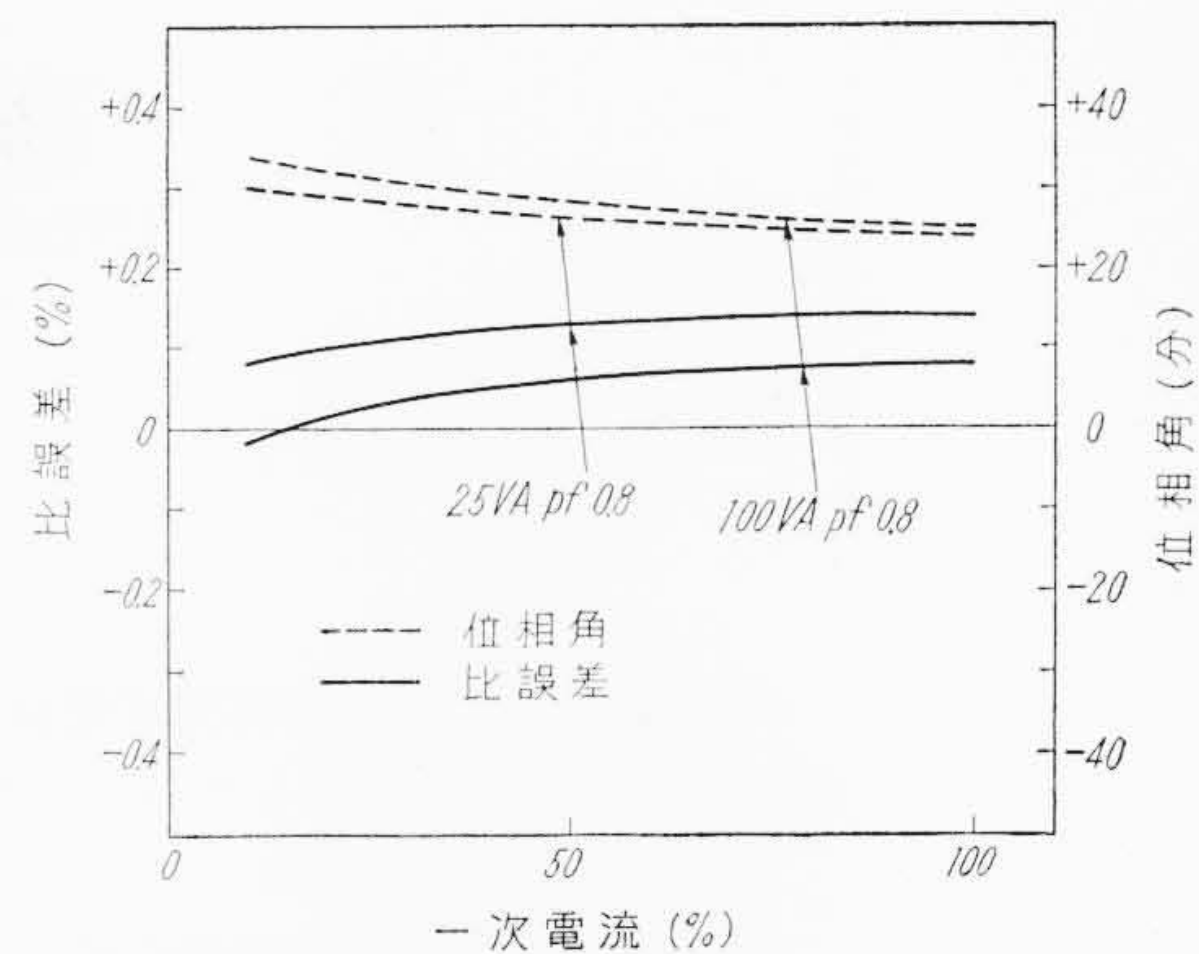
絶縁試験は前記に耐えたのち、商用周波 810 kV、衝撃電圧 1,775 kV まで行ったがなんら異状は認められなかった。

本器の特性は第 8 図(a)誤差円線図、(b)電圧特性、(c)周波数特性に示すように、ほぼ 0.5 級に近い値を示している。なお本特性は、現在の手持の 154 kV 標準計器用変圧器で測定可能の範囲を比較測定し、その後は第 8 図(b)に示した点線のように延長して求めた。

第 9 図はその外観を示したもので、変圧器および共振リアクトルは油入密封形とし絶縁劣化を防止し、最上部にはコロナシールドを設けコロナ発生を防止している。

3.3 がい子形変流器

変流器の形式は、がい管の製作、および絶縁の容易なことを主眼として決定された。すなわち、その絶縁は一次巻線と鉄心上に分布して巻かれた二次巻線をそれぞれ半分ずつ絶縁し、この部分を 2 個

第 9 図 400 kV 結合
コンデンサ形計器用
変圧器第 11 図 400 kV がい
子形変流器

第 10 図 400 kV がい子形変流器特性曲線

のがい管の中間部におく方式を採用した。したがっておのこの絶縁は 200 号相当程度となり、従来の製作経験から十分信頼性のある絶縁となっている。

本器の仕様を下記に示す。

- (1) 最高回路電圧 400 kV(仮称)
- (2) 定格負担 100VA×2
- (3) 変流比 800-400/1A
- (4) 周波数 50/60~
- (5) 階 級 1.0 級
- (6) 試験電圧 商用周波 700 kV
衝撃電圧 1,600 kV
- (7) 寸 法 高 7.8 m
床面積 3.5 m角
- (8) 重 量 7,500 kg
- (9) 油 量 2,300 l

絶縁試験は上記の試験電圧に耐えたのち、PD と同じくそれぞれ 810, 1,775 kV まで印加したが、なんら異状はなかった。

本器の特性は第 10 図に示すように 0.5 級を十分満足している。

第 11 図はその外観を示したもので、上下 2 個のがい管中央部の鉄タンク中には前記のようにそれぞれ絶縁せる一次および鉄心、二次巻線が鎖交して収められており、この部分と最上部にはコロナシールドを設

けてある。

なお本器は試験電圧に耐して相当の余裕があるので、さらに小形軽量化を図る予定である。

4. 結 言

わが国最初の 400 kV 変圧器および計器用変成器の完成にあたってその概要を紹介した。

今回の製作経験によっていくたの資料が得られ 400 kV 機器製作の基礎が確立された。今後は新設の超高圧実験設備を駆使して研究を推進し、いっそうの技術的充実をはかりたいと念願している。

おわりにあたり、本変圧器の完成は日立製作所国分工場および日立研究所その他関係者多数の協力と日頃の研究の結集であることを付記して謝辞にかえる次第である。

参 考 文 献

- (1) 首藤：日立評論 別冊 No. 5, 63 (昭 28-12)
- (2) 首藤：日立評論 別冊 No. 7, 15 (昭 29-7)
- (3) 特許 255762号