

# 電力用変圧器の技術動向

## Recent Technology on Power Transformer

電力系統の高電圧・大容量化に伴い、電力用変圧器に対し高度の信頼性が要求されると同時に、社会環境や経済環境の変化に伴い種々の要望が出される。日立製作所ではこれらに応じるため、工場及び研究所が一体となり、たえず新技術の開発に努力している。これらを背景に、昭和57年にはUHV(1,000kV級)変圧器製作のために開発したハイブリッド絶縁技術などを適用した500kV単相単巻変圧器、UHVの第一段階としての800kV変圧器、国内最大容量級の525kV、1,200MVA原子力発電所向け変圧器などを完成した。本稿は、これらに適用した最近の技術成果について述べたものである。

星 稔\* *Minoru Hoshi*  
 鹿島芳丈\* *Yoshitake Kashima*  
 森 悦紀\* *Etsunori Mori*  
 鎌田 譲\*\* *Yuzuru Kamata*

### 1 緒 言

電力系統の高電圧・大容量化が急速に進められた現在、電力用変圧器に対し高度の信頼性はもとより、その時々々の社会環境や経済環境の変化に伴い種々の要望が出される。

国内での電力用変圧器の歴史を顧みると、1960年代ないし1970年代は大容量化の時代であり、これに付随する種々の問題、例えば、鉄心の大型化、巻線の機械的強度、局部過熱などの問題解決のため解析技術、製作技術、管理技術が大幅に進歩した。500kV変圧器に関してはI期、II期、III期に分けることができる。I期は500kV技術の確立を主目的に絶縁技術の確立、信頼性の確保に重点がおかれたが、II期は西地域の連系を中心とする500kV系統拡大に伴う輸送制限問題に対処して小形化技術を確立した。更に、III期として第2次オイルショックに伴い、省エネルギー、用地縮小化などへの要望が大となり、折から開発したUHV技術を中心にしてこれに対処しつつある。日立製作所ではUHV(1,000~1,500kV)用変圧器の開発を10年以上前に開始し、各種モデルから実器プロトタイプに至る一連の開発研究を進めてきた。これにより新しい絶縁方式であるハイブリッド絶縁を開発し省エネルギー化、小形化を実現した500kV単相単巻変圧器(1,000/3MVA及び1,500/3MVA)、UHVへの第一段階とも言える定格電圧800kV、805.5/3MVA変圧器、国内最大容量級の原子力発電所向け525kV、1,200MVA変圧器などに適用し新しい要望に応じている。

また、変圧器の大型化が著しく進められた現在、正常な運転を維持するための予防保全技術もますます重要となっている。本稿では、これらに対応する新技術についてその一端を紹介する。

### 2 鉄 心

変圧器の省エネルギー及び小形化に最も効果的なのは鉄心の小形化である。鉄心が小形化すれば、その外側の巻線及びタンクは必然的に小形化され、損失低減の面でも効果が現われる。鉄損の低減では最近の高配向性けい素鋼板やけい素鋼板の製造課程でレーザー光を照射した光学的磁区制御けい素鋼板など、材料面での進歩が著しい。

一方、日立製作所では上記材料のもつ特性を十分に生かし、かつ小形化を実現するため、鉄心内での磁束分布、発生損失分布、温度上昇分布などの解析を進めると同時に、各種の実

器鉄心試作での磁束分布、温度上昇分布などの測定結果との照合を行なっている。これにより、損失の小さい、局部過熱のない鉄心構造を開発した。図1は新鉄心構造と従来鉄心構造の一例を示すものである。新鉄心構造では広幅シャーラインにより、脚鉄板分割の廃止、鉄板端面のかえり取りの改善、無機皮膜の絶縁特性向上などによるワニス処理の廃止、鉄心段数の増加による占積率の向上などをはかるとともに、この間、新しい解析技術と実測データをもとに、新接合方式の採用、ヨーク貫通ボルトの廃止、総合的な温度上昇の解析による冷却ダクト配置の合理化など全面的な見直しを行ない、更に占積率を向上させている。内鉄形変圧器の鉄心としての信頼性は、鉄心単独で組み立て、試験用励磁巻線を使用することにより、容易に検証でき、時系列的にデータを蓄積している。

新鉄心構造と既に実用化されているバインド締付方式を組み合わせることで均一な締付力が得られ、損失低減のほかに振動及び騒音の面でも優れた特性をもつ鉄心構造が確立できた。図2に三相五脚鉄心の外観を示す。本構造によれば、鉄心内の発生損失分布(温度上昇)や締付力などの不均一に起因すると推定される長時間励磁に伴う騒音増大現象も解消できる。

また最近、低損失材料としてアモルファス材が脚光を浴びているが、大型変圧器用としては厚さが薄い、幅広材がない、

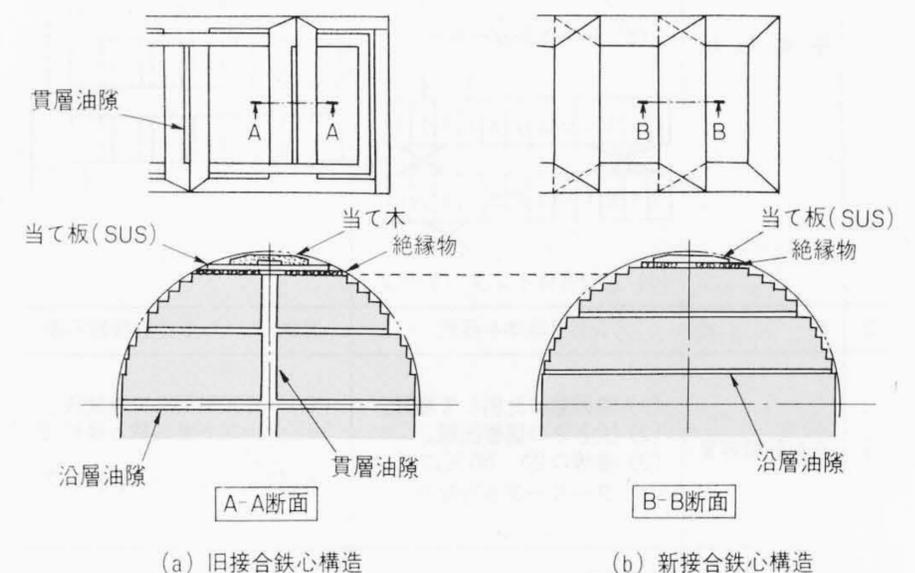


図1 鉄心構造 鉄心接合方式新旧構造の比較を示す。

\* 日立製作所国分工場 \*\* 日立製作所日立研究所

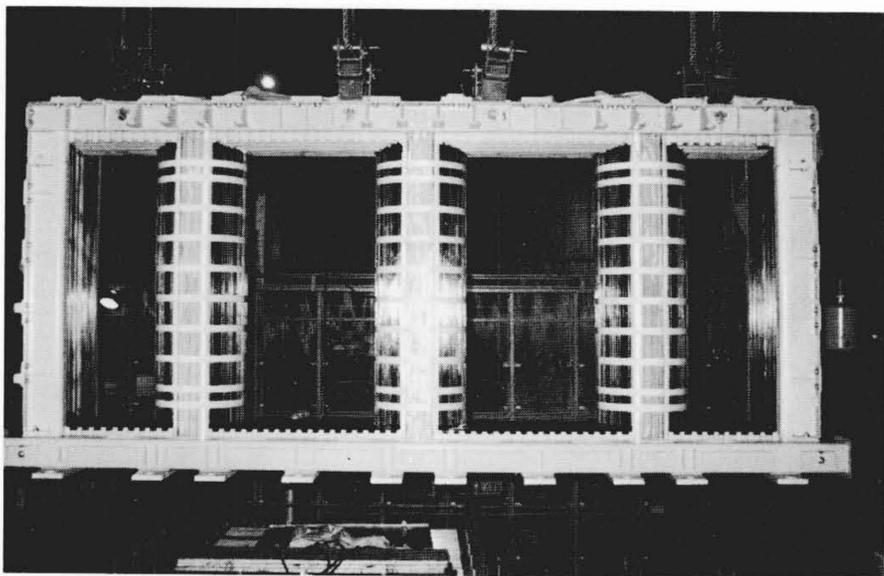


図2 三相五脚鉄心 バインド及び連結金具により均一な締付力が保持される。

飽和磁束密度が低い、磁気ひずみが多いなど、多くの問題があり、巻鉄心形変圧器以外では当面実用化は難しい。したがって、当面の大形変圧器鉄心損失低減は、接合方式、断面積比異種材料の組合せなどを中心に進歩するものと考えられる。

### 3 巻線及び絶縁

変圧器を小形化し、かつ損失を低減するためには、巻線の巻回数低減、巻線の平均長さ低減のほかに、絶縁構造や耐雷設計改善による巻線の占積率向上が必要であり、また、大容量化に伴い巻線の短絡機械的強度向上技術も重要な課題である。以下、それらの技術について述べる。

#### 3.1 高圧巻線の遮へい構造

高圧巻線に用いられる円板巻線の雷インパルス電圧に対する遮へい方式としては、インターリーブ巻線と日立製作所独自のC.C.シールド(コンデンサ・カップリングシールド)巻線

表1 円板巻線の遮へい方式 円板巻線の雷インパルスに対する遮へい方式にはそれぞれ長短があり、容量、電圧で使い分ける必要がある。

No.	項目	インターリーブ円板巻線	C.C.シールド円板巻線
1.	基本形状	<p>(a) 単線インターリーブ</p> <p>(b) 並列導体インターリーブ</p>	
2.	接続	A部で導体を接続	導体、シールドとも接続不要
3.	直列静電容量	(1) 巻回数に比例して増減。 (2) 大きさの調整困難。 (3) 巻線の20~50%にインターリーブを行なう。	(1) コイル巻回数に無関係。 (2) シールド巻回数と接続で調整。 (3) 線路側にシールドを入れる。
4.	巻線占積率	(1) 並列導体増えると占積率が悪い。 (2) 隣接巻回発生電圧大きく、導体絶縁を薄くできない。	(1) 大容量ほど占積率が良い。 (2) シールド絶縁を増やし、導体絶縁を薄くできる。
5.	その他	転位電線使用困難	転位電線使用が最適

とがある。表1にこれら巻線の基本構造と特長の概要について示す。

変圧器の大容量化とともに巻線に用いられる導体の断面積は増すことになるが、巻線内での渦電流損を増加させないために、数本の平角線を相互に絶縁し、これに外装絶縁を施した多導体電線やPVF(ポリビニルホルマール)などで絶縁皮膜を設けた平角線を転位して一括外装した転位電線などのように導体を分割した電線が用いられる。インターリーブ巻線を断面積の大きい大容量器に用いると並列導体数が多くなり、構造が複雑となるばかりでなく、コイル間を渡る導体数が多いため巻線の冷却にも支障が生じる。また、コイル間接続が必要なため、転位電線を用いてのインターリーブ巻線はほとんど不可能である。

これに対し、C.C.シールド巻線は、導体、シールド共に無接続で巻回できるため、転位電線の使用が最適となる。この場合、大容量器になるほど巻線中に占める絶縁物の比率が減少する。また、シールド及び転位電線の巻回数や絶縁厚の調整により、遮へい性能の優れた、占積率の高い巻線を得ることが可能である。この転位電線を用いたC.C.シールド巻線の技術は、IEEE(米国電気電子学会)などでの論文発表、あるいは製作実績と運転経歴によって海外からも高く評価され、インターリーブ巻線を発明し、世界的にその技術を供与してきた英国GEC社(もとEnglish Electric社)へも技術供与されている。

日立製作所では上記の特長を生かすために、導体寸法、漏れ磁束密度などを考慮し、比較的小容量器にはインターリーブ巻線を、大容量器にはC.C.シールド巻線というように適宜選択して適用している。その概略の適用区分を図3に示す。

また、UHV変圧器のように極端に電圧が高く、巻線の電流が小さいものには、図4に示すように巻線内で導体サイズやコイル巻回数を変え、巻線内の直列静電容量を線路側端子付近で大きく中性点側に向かって順次段階的に小さくするグラディエントキャパシタンスインターリーブ巻線(特許出願中)を開発し、プロトタイプ変圧器でその信頼性を確認した。

#### 3.2 巻線の短絡機械強度

巻線の短絡機械強度は系統容量の増大に伴いますます重要な課題となっている。日立製作所では、巻線の半径方向強度、軸方向強度及び短絡時発生機械力の確認のため、種々のモデル試験法及び解析手法を開発し、多数の実物大モデルによっ

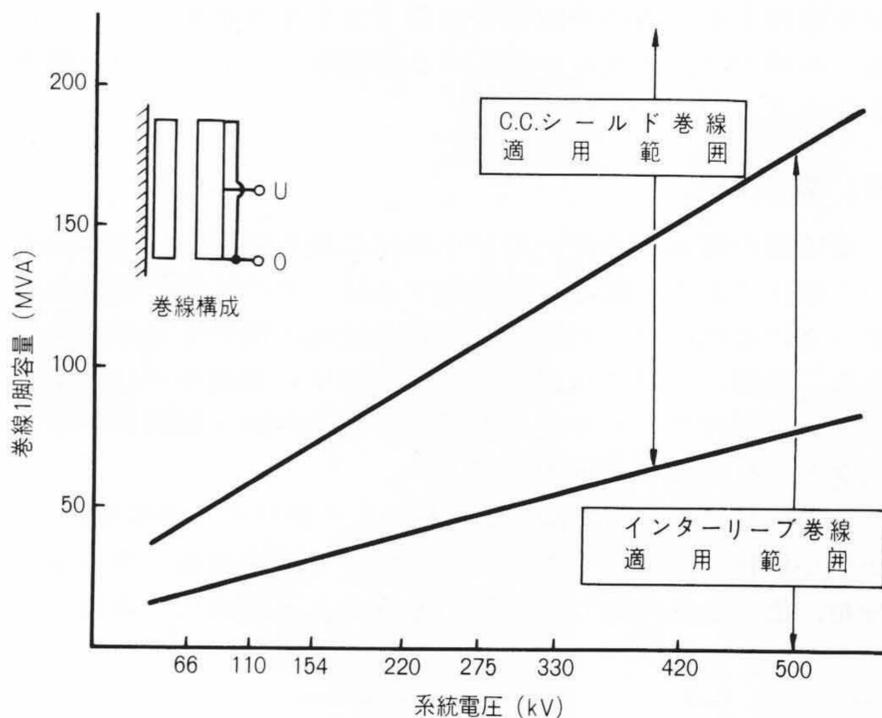


図3 巻線の適用範囲 電圧、電流により最適な遮へい方式を採用する。

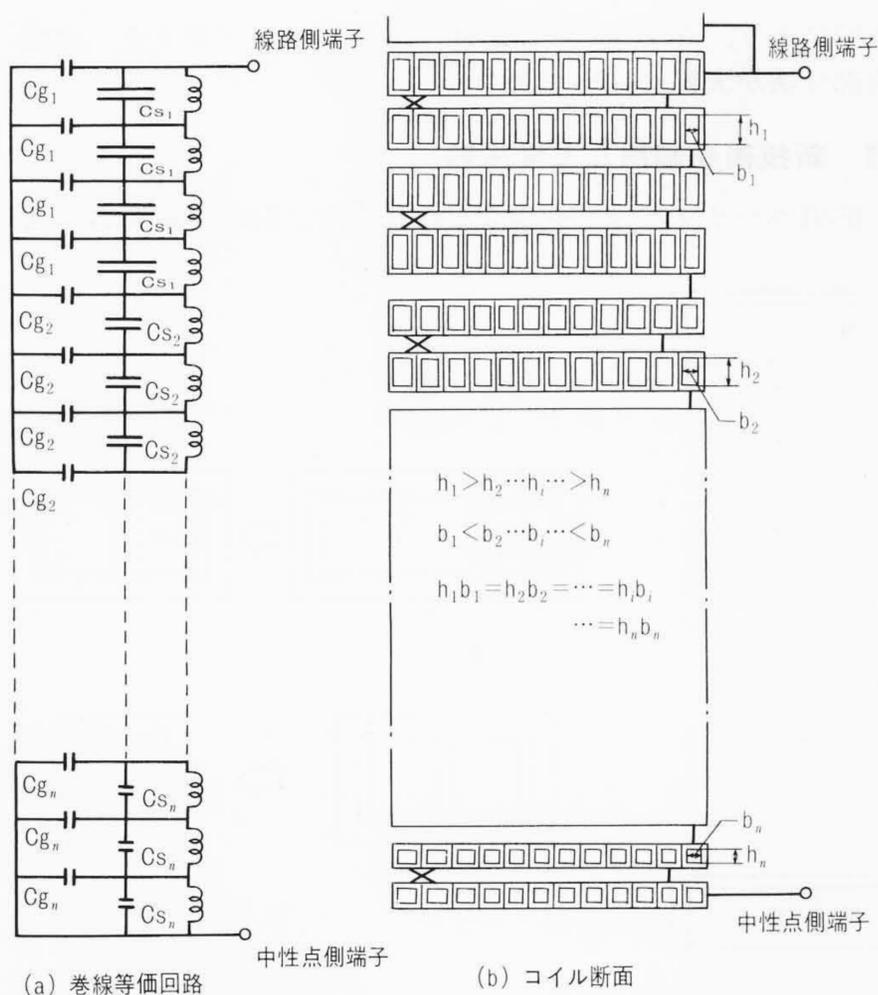


図4 グラディエントキャパシタンスインターリーブ巻線 巻線内の直列静電容量を線路端子付近で大きく順次段階的に小さくしたもので、優れたインパルス電位分布特性をもつ。

て実験及び解析を進め、それらの結果を設計、製作に反映し信頼性の高い巻線を提供してきた<sup>1)</sup>。

一方、巻線1脚当たりの容量増大に伴い、漏れ磁束密度がますます増加し、巻線内で発生する渦電流損が更に増大する結果となる。この渦電流損の増大を防止するためには転位電線を使用し、更にその素線サイズを小さくするという手段がより有効となる。しかし、この場合には巻線の機械的強度の低下という問題が生じる。

この機械的強度の低下防止策として、自己融着性転位電線(Hitachi Self-Bonded Wireの略としてハイボン線と呼称)を実用化している。これは素線絶縁の上にハイボン層(熱硬化性樹脂層)を塗布した素線で構成された転位電線であり、巻線の乾燥処理時に表面のハイボン層が熱硬化し、素線が一体化されるものである。図5にハイボン転位電線と軟銅転位電線の曲げ特性を示す。一般にこの種の電線は高温時に著しい強度の低下がみられるが、ハイボン転位電線は、新しく開発した素線絶縁とハイボン樹脂層の組合せにより、図6に示すように105°C程度の温度領域でも軟銅転位電線の2倍以上の強度をもっている。

### 3.3 ハイブリッド絶縁<sup>2)</sup>

変圧器絶縁は、誘電率の高い絶縁紙と誘電率の低い油との複合絶縁であり、油又は絶縁紙中に異常がないかぎり絶縁破壊は油隙部分から生じる。油隙及び絶縁物の形状寸法は絶縁だけでなく、冷却、機械強度、流動帯電、リード線引出しなどの要因によって決定されるため、変圧器の仕様、部位によりそれぞれ異なってくる。占積率向上のための絶縁構造の改善には、これらの部位に対して部分放電、あるいは破壊の実験的解明と発生電圧・電界の理論的解明がまず必要である。

日立製作所ではUHV変圧器の開発に当たり、上記技術の蓄積によって部分放電及び雷インパルスの絶縁特性に優れ、更に絶縁寸法の縮小に効果的なハイブリッド絶縁を実用化し、

UHV試作変圧器で信頼性を確認した<sup>3)</sup>。

ハイブリッド絶縁は各部位のデータを横断的に整理統合し、油隙をバリヤで分割する油隙細分割方式と誘電体で油隙を充填する充填絶縁方式とを組み合わせ、両者の最も良い配分により構造を合理化し、占積率を向上させたものである。巻線端部について、従来方式とハイブリッド絶縁方式の比較を図7に示す。これを電子計算機を用いて電界解析した電界強度の低減状況を図8に、この効果を確認するための基礎モデルによる実験結果を図9に示す。同図から部分放電開始電圧が従来構造と比較して約1.4倍に上昇していることが分かる。この絶縁方式によれば、従来方式では巻線の端部に多数必要としていたL形バリヤ絶縁の数を少なくすることができ、巻線端部での流動帯電特性の改善も図れる。

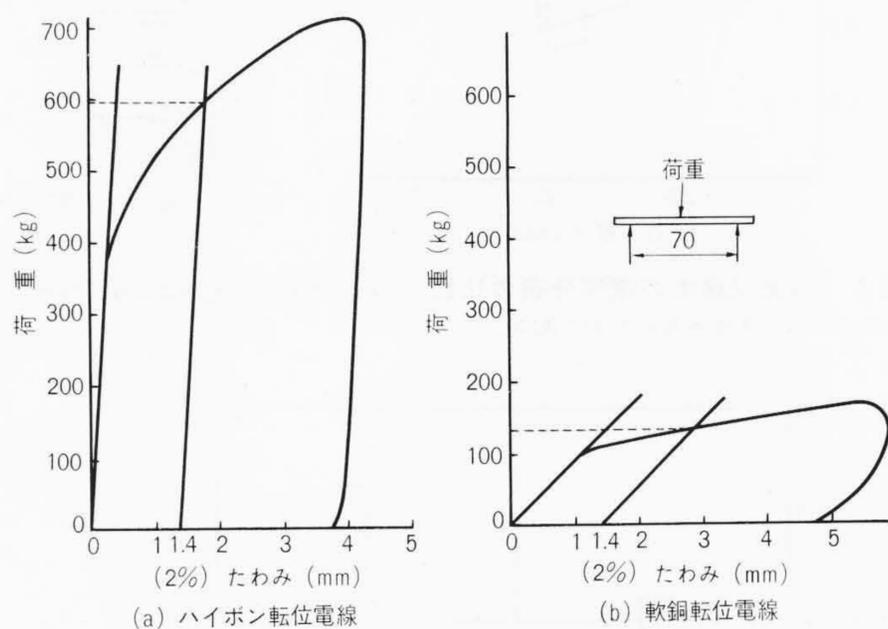


図5 転位電線の曲げ特性 ハイボン線は、2%耐力が約5倍(常温)である。

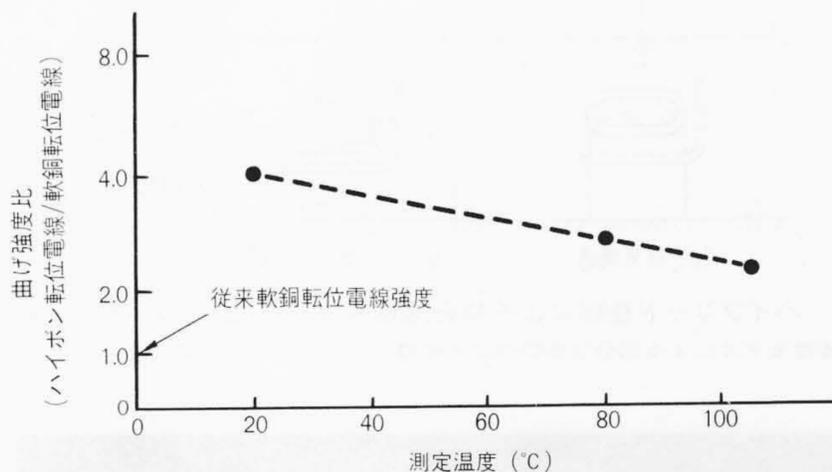


図6 ハイボン転位電線の曲げ強度測定結果 高温領域では強度の低下がみられるが、105°Cでも2倍の強度が確保されている。

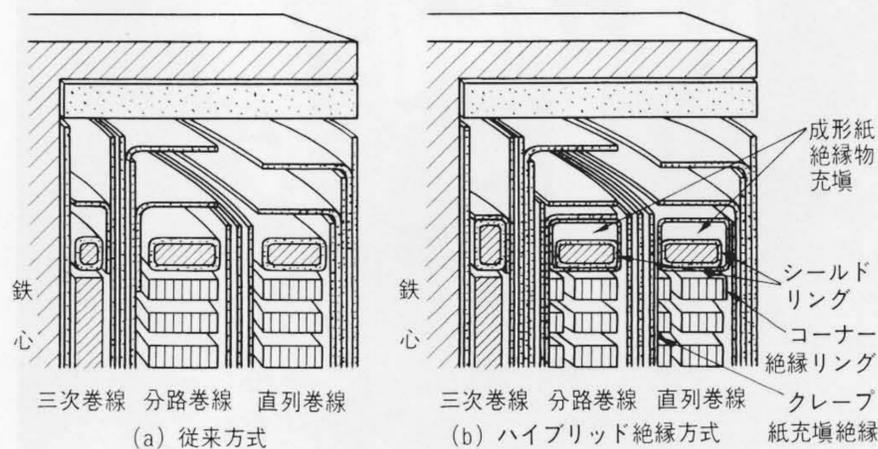


図7 従来方式とハイブリッド絶縁方式の比較 油隙細分割方式と油浸紙充填方式との組合せによる絶縁性能の向上を図っている。

### 3.4 多重バリヤ絶縁リード線

高压側リード線と接地側電極の間を波形パルプモールドをスペーサとして用い、油隙を細分割するバリヤを多重層挿入することにより、従来に比べ大幅な寸法縮小が可能となった。500kV多重バリヤ絶縁リード線の外観を図10に示す。これの

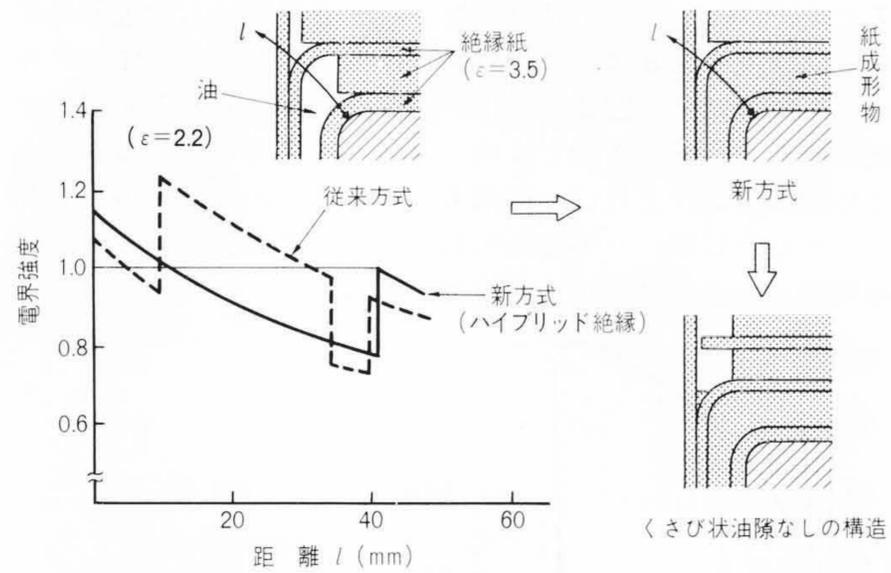


図8 端部絶縁での電界分布の比較 ハイブリッド絶縁により、電界強度の低減効果を示したものである。

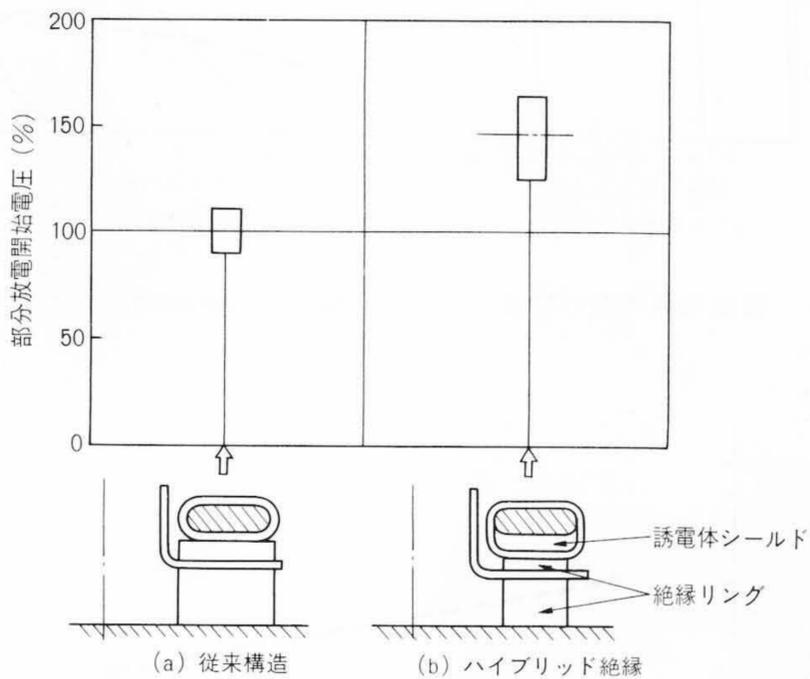


図9 ハイブリッド絶縁による部分放電特性の向上 ハイブリッド絶縁基礎モデルによる部分放電特性向上の様子を示したものである。



図10 多重バリヤ絶縁リード線 本リードの使用により、高压リード線のポケットやリードダクトへの引出部寸法が大幅に縮小できた。

使用により、高压リード線のポケットやリードダクトへの引出部寸法が大幅に縮小できた。

### 4 新技术を適用した変圧器

前項のハイブリッド絶縁などの技術を、500kV変圧器に適

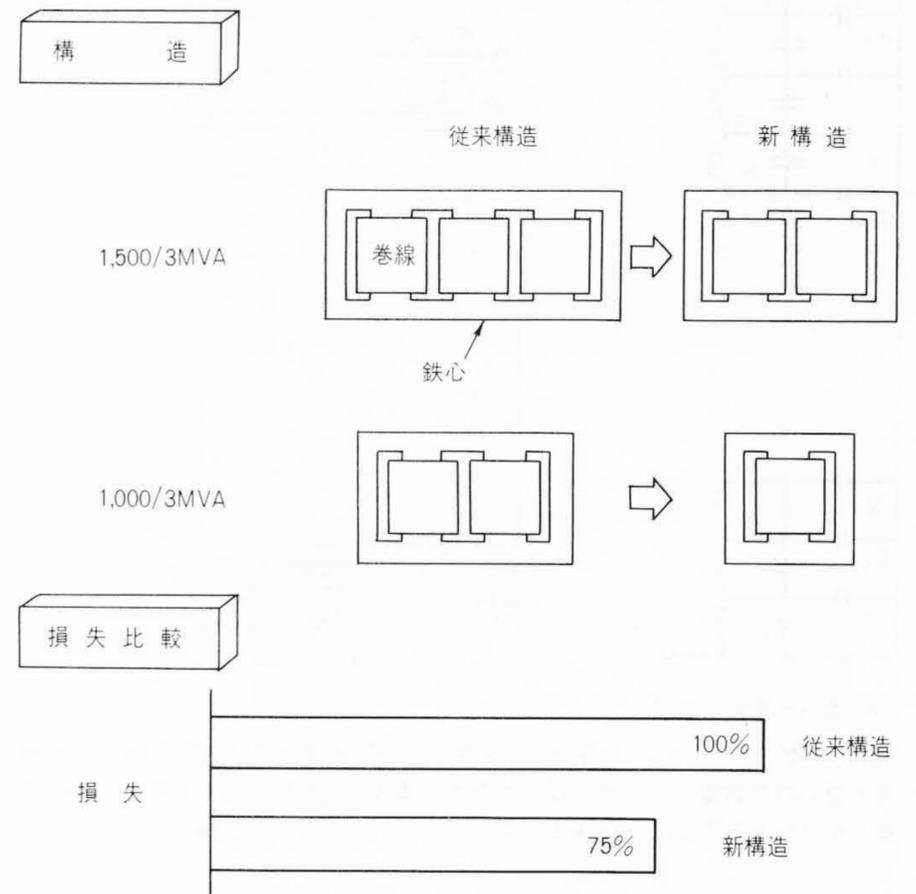


図11 ハイブリッド絶縁適用500kV変圧器の概要 基本構造の改善と損失低減効果を示したものである。

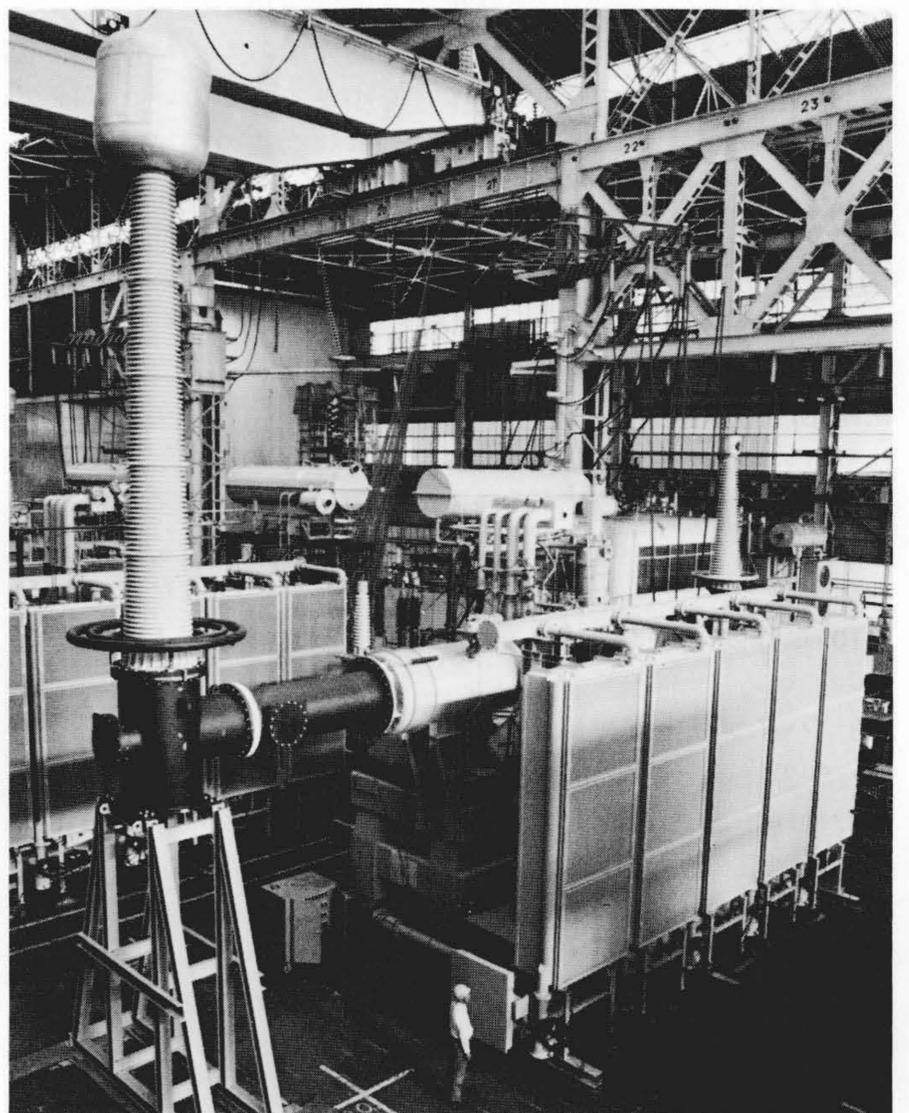


図12 500/275kV, 1,500/3MVA単相単巻変圧器 ハイブリッド絶縁などの技術を適用し、巻線並列数を3脚から2脚に低減し、損失の低減及び据付面積の縮小を実現した。

用することによって並列巻線数の低減が可能となり、大幅な省エネルギー・小形化を図ることができる。日立製作所ではUHV技術の500kV変圧器への適用に先立ち、まず要素試作のほかその一部を400kV級変圧器ほかへ適用し、実用性能を検証した。これに基づいて、500kVとしての実器試作(500/275kV, 1,500/3MVA, 当社試作No. 07号機)を行ない、絶縁破壊試験を含む特性検証を行なった。その概要を図11に、これらの技術を適用した500kV単相単巻変圧器の工場完成姿を図12

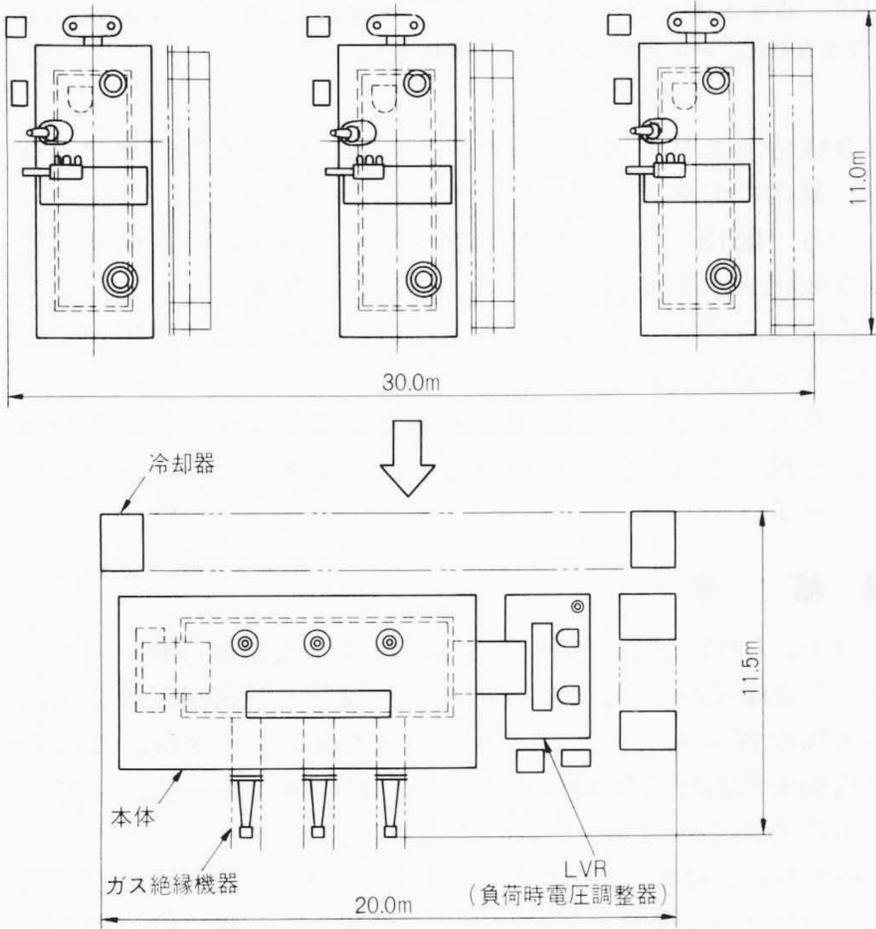


図13 ハイブリッド絶縁適用による500kV変圧器の小形, 縮小化例  
ガス絶縁機器直結方式を併用し, 三相一体構造とした例を示す(500kV, 1,000 MVA単巻変圧器)。

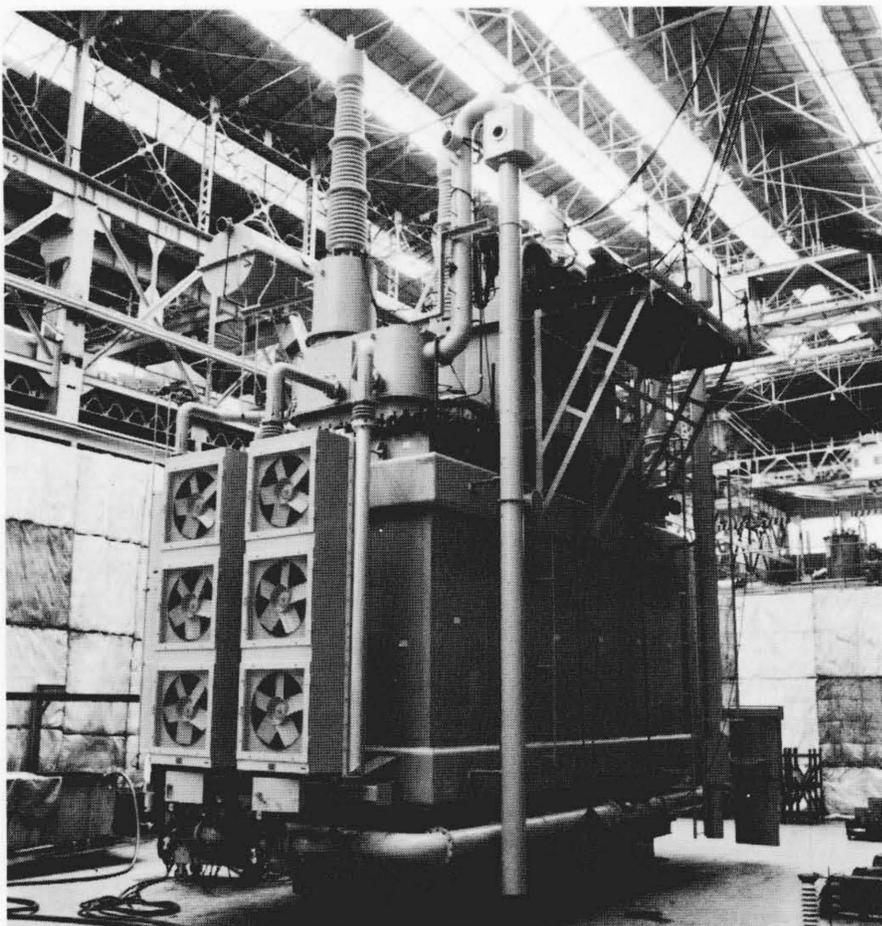


図14 75トン級650MVA変圧器 高効率遮音板を適用し, 防音タンクを省略し, 大幅な据付面積の縮小を図った。

に示す。また、1,000/3MVA単相単巻変圧器が巻線1脚で製作可能なことから、1,000MVA単巻変圧器を三相一体化した図13に示すような構造改善ができ、据付面積が大幅に低減できる。また、ハイブリッド絶縁を適用し、小形、省エネルギー化を図ったUHVの第一段階とも言える定格電圧800kV変圧器をベネズエラEDELCAグリ水力発電所用として製作、納入した。

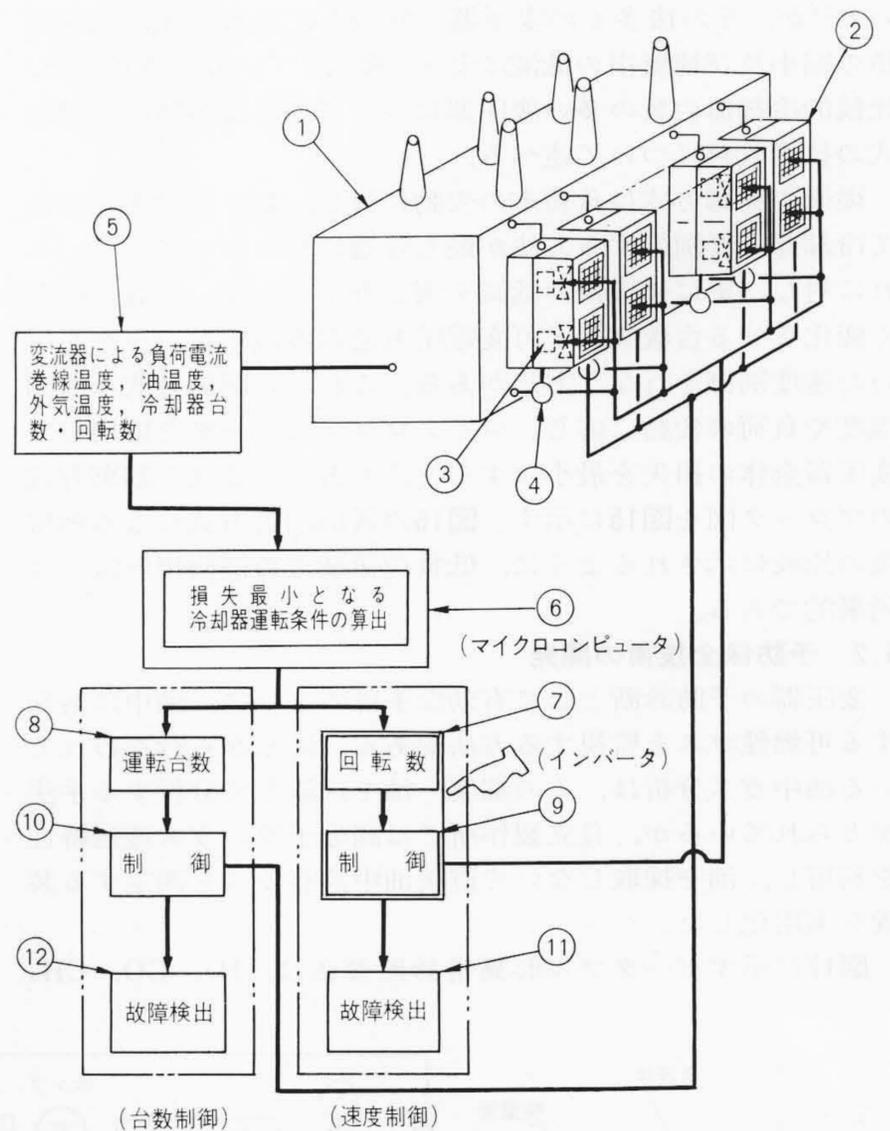
また、従来、変圧器はその低騒音化のため変圧器の外側に鉄板製の防音タンクを設けるなどの手段がとられてきたが、今回、本体タンクの剛性と振動の特長を解析、応用し、防振、制振効果を有効に活用した高効率遮音板<sup>4)</sup>(特許出願中：タンクの補強梁間に付加重量を付けた複合板を設け、防振、制振効果を図ったもの)を適用し、本体タンクだけで防音タンクとほぼ同等の10dB以上の防音効果を挙げ、据付面積の縮小化を実現した。

図14に、高効率遮音板を適用した、防音タンク不付、75トン級650MVA変圧器を示す。本技術と従来の二重タンク方式防音構造とを組み合わせることによって、50トン級300MVA変圧器を二重タンク方式で製作することが可能となり、よりいっそうの小形化が図れる。

## 5 運転・保守技術

### 5.1 冷却器の省エネルギー

ファンにFRP(ガラス繊維強化プラスチック)を使用した



No.	部品名	No.	部品名	No.	部品名	No.	部品名
1	変圧器	4	送油ポンプ	7	指令装置	10	制御装置
2	冷却器	5	負荷率センサ	8	指令装置	11	故障検出装置
3	ファンモータ	6	データ処理装置	9	制御装置	12	故障検出装置

図15 冷却器制御ブロック図 負荷率, 外気温度などの入力により, マイクロコンピュータで最適運転条件を算出し, 制御する。

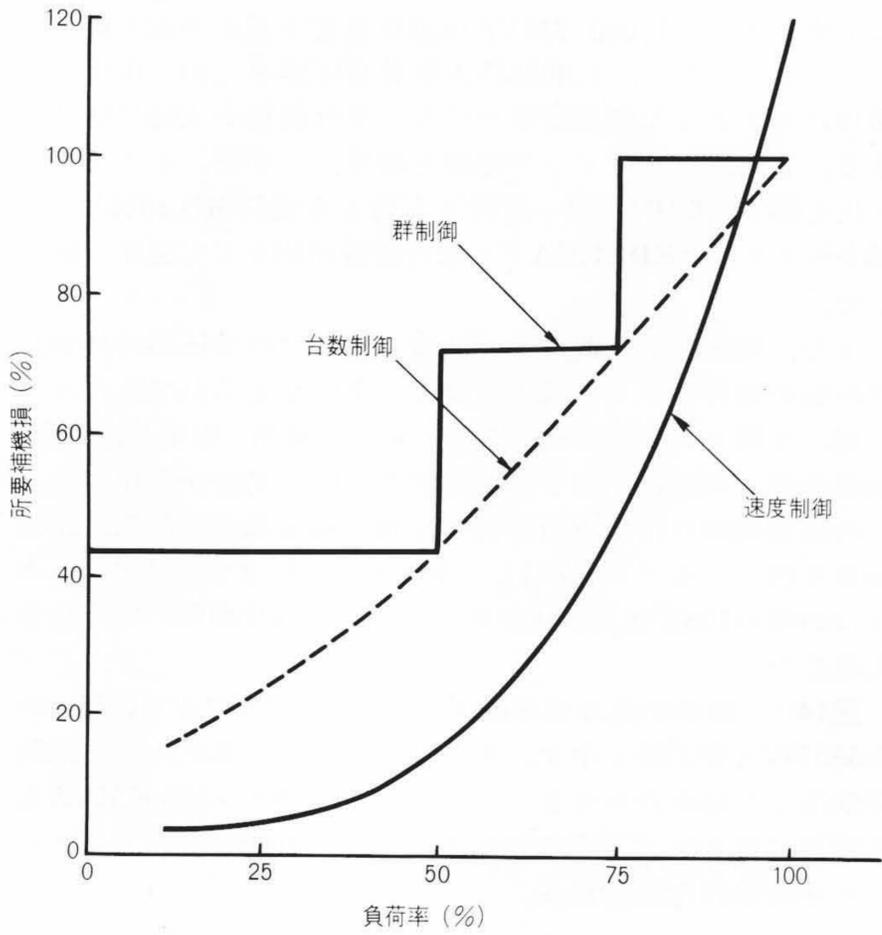


図16 変圧器負荷率と所要補機損(試算例) マイクロコンピュータ応用による新制御方式と従来制御方式との所要補機損の比較を示す。

低騒音高効率大容量冷却器の実用化については既に報告している<sup>5)</sup>が、その後多くの変圧器に使用し、低騒音化、据付面積の縮小及び補機損の低減に大きく貢献している。本稿では、比較的冷却器台数の多い変圧器についての冷却器運転制御方式の技術改善について述べる。

従来の制御方式は負荷率の変動に対し、2～3段階に分けて冷却器を群制御する方法が最も普通に行なわれている。これに対し、更に補機損の低減を図る方法として、台数を細かく変化させる台数制御と可変電圧可変周波数インバータを用いた速度制御を行なう方式がある。これらの制御方式に周囲温度や負荷の変動に応じ、マイクロコンピュータを応用し、変圧器全体の損失を最小にする方法もある。これら制御方式のブロック図を図15に示す。図16の新旧制御方式による補機損の比較に示されるように、低負荷領域での補機損低減には効果的である。

### 5.2 予防保全技術の開発

変圧器の予防診断として有効な手段の一つに、油中に溶存する可燃性ガスを監視する方法がある。従来から行なわれている油中ガス分析は、その都度、油を採取して分析する手法がとられているが、日立製作所では高分子膜のガス透過特性を利用し、油を採取しないで直接油中溶存ガスを測定する装置を実用化した。

図17に示すポータブル形異常診断装置は、 $H_2$ 、 $CO$ 、 $CH_4$

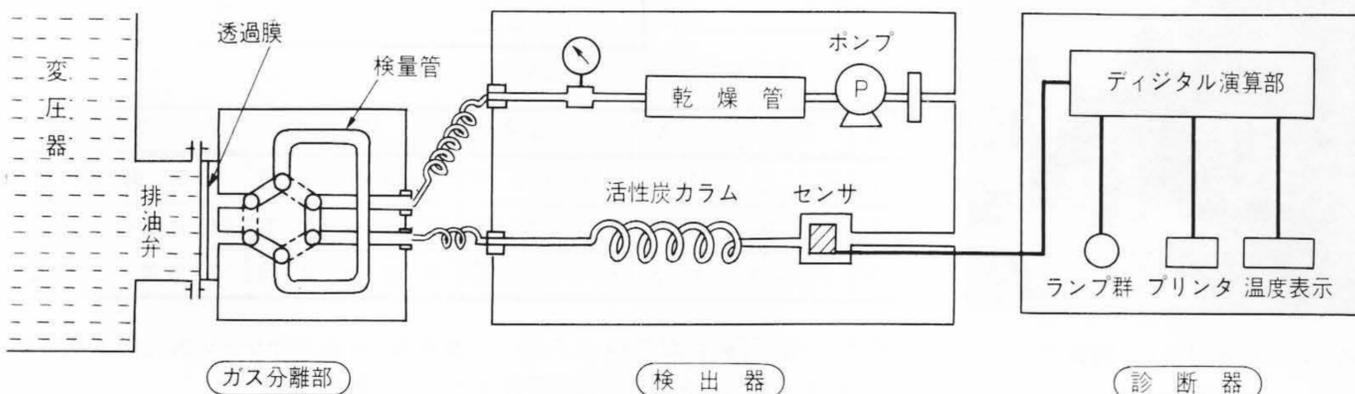


図17 ポータブル形異常診断装置 油中溶存 $H_2$ 、 $CO$ 、 $CH_4$ を測定し、内部異常の有無、異常の形態をその場で把握できる。

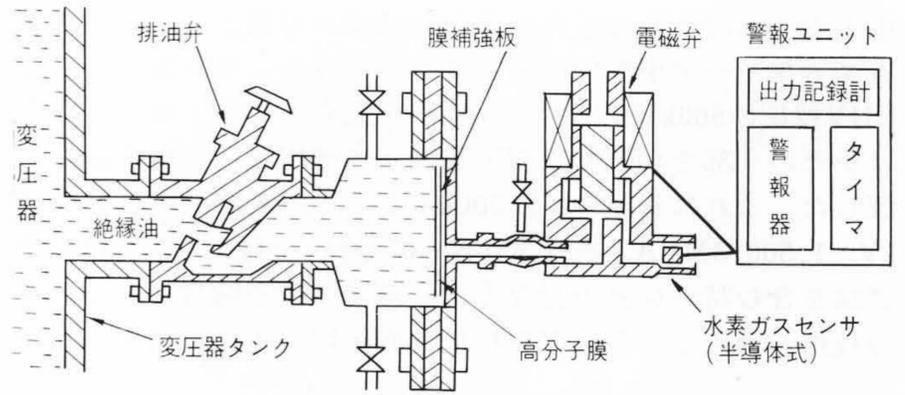


図18 油中水素ガス常時監視装置 変圧器内部異常の早期発見に有効な完全自動化、メンテナンスフリーが実現できる。

の3成分ガスを測定するだけでなく、変圧器内部異常の有無、異常の形態を診断できる画期的な装置である。

一方、図18に示す油中水素ガス常時監視装置は、初期の微小な変化を水素ガスでとらえ、異常の早期発見をオンラインで監視する装置であり、それぞれの特長に応じて適用していくことが望ましい。

これらのほかに、予防保全装置として各種検討されているが、今後ともこの種のものの必要性は高まってくるものと考えられる。

## 6 結 言

以上、UHV変圧器製作のために開発した絶縁技術(ハイブリッド絶縁技術)などの最近の技術を適用し、500kV級変圧器の大幅な省エネルギー化、小形化を実現した。今後、これらの技術を超高压変圧器にも適用し、省エネルギー化、小形化を図る考えである。

終わりに、終始、技術開発と実用化に当たり、御指導、御援助をいただいた電力会社の関係各位に対し厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) K. Hiraishi, et al.: Mechanical Strength of Transformer Windings IEEE PAS Vol. 90, p. 2381(1971)
- 2) 遠藤, 外: 昭和56年, 電気学会全国大会, 632
- 3) 森, 外: 昭和57年, 電気学会全国大会, 625
- 4) 叶井, 外: 電気学会静止器研究会資料, SA-81-45(昭56-11)
- 5) 鹿島, 外: 省エネルギー時代における大容量変圧器の諸問題, 日立評論, 62, 7, 503~508(昭55-7)
- 6) 福田, 外: 最近の超々高压変圧器, 日立評論, 60, 6, 433~438(昭53-6)