# 高効率超大容量三相変圧器の実用化

# Completion of a High Efficiency Ultralarge Capacity Three-phase Transformer

火力・原子力発電所用昇圧変圧器は、現在1,000~1,200MVA級の超大容量器が主流であり、特に原子力では改良型BWRの開発や系統安定度向上などに伴い、今後更に大容量・大形化する方向にある。このため、高信頼性はもとより近年のエネルギー単価の高騰を反映して、省エネルギー・用地縮小化の要請も大いに高まっている。日立製作所では、これらに応じるため最新の設計・製造技術を用い超大形鉄心及び超大容量非分割円板巻線など鉄機械化技術を確立し、これらの技術を東京電力株式会社福島第二原子力発電所 4 号機用525kV、1,200MVAに適用して最高水準の高効率超大容量三相変圧器を完成した。本稿では、この変圧器の概要と信頼性検証試験について述べる。

前島正明\* Masaaki Maejima 丸山勝也\* Katsuya Maruyama 福田輝夫\*\* Teruo Fukuda

#### Ⅱ 緒 言

火力・原子力発電所用昇圧変圧器は、1,000~1,200MVA級の超大容量器が現在主流であり、更に将来は大容量原子力発電所用として1,500MVA級の計画もなされ、ますます大容量・大形化する傾向にある。

発電所用超大容量変圧器の設計・製作技術については、昭和47~50年にかけて525kV,1,200MVA実規模試作<sup>1)</sup>を行ない、過酷試験・特殊試験・解体細密点検などにより高電圧・大容量化に伴う問題点の摘出とその対策を確立し、この技術をもとに東京電力株式会社袖ヶ浦火力発電所4号機用525kV,1,100MVA,同福島第二原子力発電所2号機用525kV,1,200MVA三相変圧器を完成し納入してきた。これらの変圧器は、漏れ磁束密度の低減、雷サージ侵入時の電位分布改善などの理由から、525kV高圧巻線を2分割円筒巻線で構成しているため、巻線占積率が低く損失の大きい銅機械であった。一方、最近の世界的すう勢は機械的強度に優れ占積率も高い

円板巻線を指向している。また火力・原子力発電所は、常時 高出力で運転されるため近年の省エネルギーの要請を反映し て、高負荷で効率が高い鉄機械が要求されている。

日立製作所では、これらの時代のニーズに対応するため、 最近の解析技術の向上と製造設備の充実などによる超大形鉄 心製作技術をもとに鉄心を大形化し、500kV変電所用変圧器 で多数の実績をもつ非分割円板巻線を導入して小形・省エネ ルギー化を図るべく実用化に取り組んだ。その第1号器とし て東京電力株式会社福島第二原子力発電所4号機用高効率 525kV、1,200MVA三相変圧器を完成し、よりいっそうの信 頼性向上と鉄機械化による大幅な損失低減を達成した。そし て鉄心・巻線などの各製作段階で、詳細な検証試験を実施し て信頼性の確保に万全を期した。

なお、今回実用化した非分割円板巻線は、UHV(Ultra High Voltage)変圧器の円板巻線と類似であり、UHV絶縁技術の適

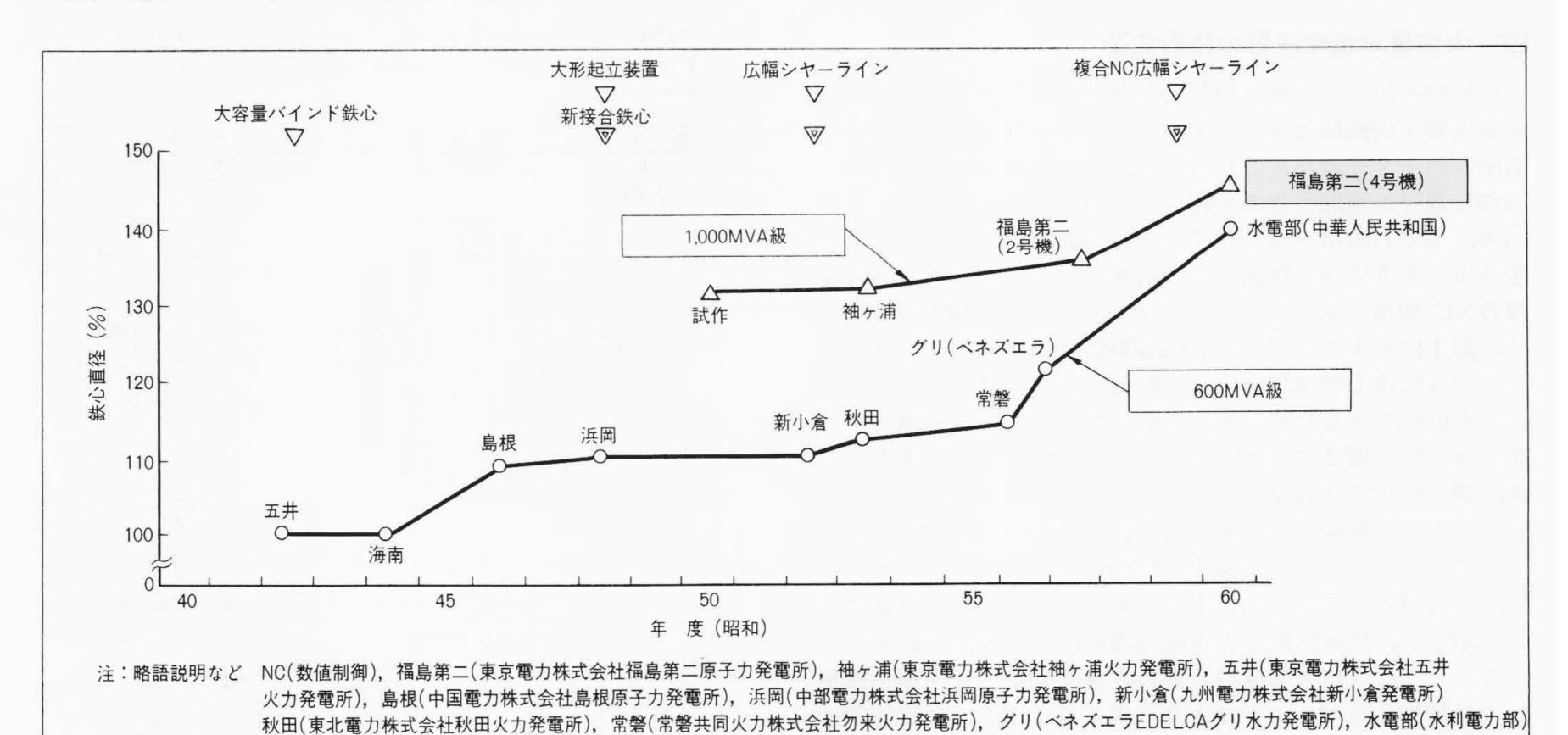


図 | 鉄心大形化の変遷 多年の実績をもつバインド鉄心技術をもとに,最近の解析技術の向上と製造設備の充実により,超大形鉄心製作技術を確立している。

<sup>\*</sup> 日立製作所国分工場 \*\* 日立製作所電力事業本部

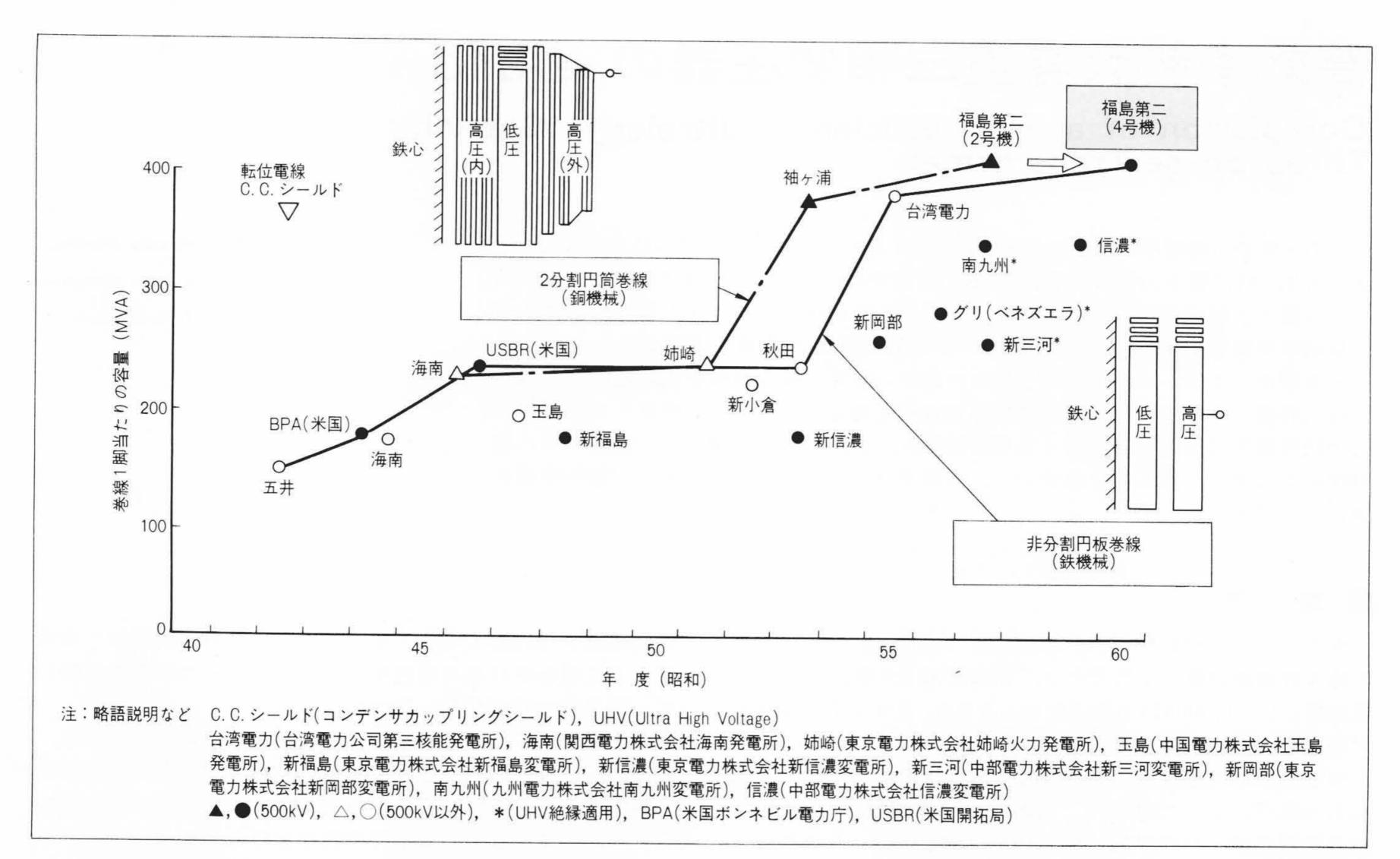


図 2 大容量変圧器の高圧巻線構造と容量の変遷 超大形鉄心の採用により、高圧巻線を非分割円板巻線にできる容量は既に1,200MVAに達している。 これをサポートする技術は、日立製作所のC.C.シールド連続円板巻線である。

用により小形・軽量化が図れるため、今後の低インピーダンス化及び改良型BWR(Boiling Water Reactor)などの超々大容量化への対応をいっそう容易にするものである。以下、高効率525kV、1,200MVA三相変圧器の概要、及び信頼性確認のために実施した各種試験について述べる。

#### 2 大容量三相変圧器の技術変遷

昭和52年以前は、超大形鉄心製作技術をもたないため大容 量変圧器は銅機械となり、漏れ磁束密度の増加を抑えるため 高圧巻線を2分割し、これに伴い、高圧巻線から低圧巻線へ の移行電圧が増加するのを防ぐため円筒巻線としていた。そ の後, 多年の実績をもつバインド鉄心技術をもとに, 鉄心磁 東分布・温度分布・振動などの解析技術の充実, 及び高性能 複合NC(数値制御)広幅シャーラインなど製造設備の導入によ り,図1に示すように超大形鉄心製作技術を確立してきた。 この超大形鉄心の採用により, 巻線巻回数を減らし漏れ磁束 密度を低減できるため、超大容量でも非分割円板巻線化が可 能となった。図2に、高圧巻線に非分割円板巻線を採用した 変圧器の経年的な容量増加を示す。この円板巻線には、雷サ ージ侵入時の巻線電位分布改善を目的としたC.C.(コンデンサ カップリング)2)シールド技術(日立製作所特許)を生かせるた め,大容量器に最適な転位電線を用いた連続円板巻線とする ことができ、信頼性向上と巻線内漂遊損の低減が図れる。

このように、超大形鉄心と超大容量非分割円板巻線を採用して鉄機械化を図ることにより、**表1**に示すように変圧器の損失の大部分を占める銅損を大幅に低減できるので高負荷側で効率が高くなり、高負荷で運転される火力・原子力発電所にいっそう適したものになる。

# 3 高効率525kV, 1,200MVA三相変圧器

#### 3.1 仕 様

この変圧器は、東京電力株式会社福島第二原子力発電所で 発電機電圧を直接525kVに昇圧するものであり、表2に主な仕

表 | 銅機械と鉄機械の特徴比較 鉄機械は変圧器の大部分を占めている銅損を大幅に低減できるので、高負荷で運転される火力・原子力発電所に最適である。

No.	I	項 目 鉄 心		銅機械	鉄 機 械 大形(断面積大)	
1	金			小形(断面積小)		
2		巻回数		多い。	少ない。	
3	巻線	配	置	2分割円筒 高圧内 高圧内 高圧内	非分割円板 	
4		鉄	損	//\	大	
5	損失	銅	損	大	7]\	
6		合	計	大	/]\	
				低負荷で最高効率	高負荷で最高効率	
7		効	率	銅機械 粉	「鉄機械」	

様を、図3にその主要寸法を、また図4に工場試験姿を示す。

#### 3.2 構 造

#### 3.2.1 鉄 心

超大形鉄心は, 特に磁束の不均等による局部過熱や振動が 重要な検討課題であり、実規模試作により精度を確認した計 算法3),4)を用いて各部の磁束密度分布,温度上昇,固有振動数 などを詳細に計算し、最適接合方式、断面形状を決定した。

図5に超大形バインド鉄心を示す。このバインド締付方式 は豊富な経験のもとに確立された技術であり、均一な締付圧 力により鉄損,振動,騒音低減に大きな効果を挙げている。 三相五脚鉄心として,最も磁束の流れが均一で局部損失が集 中しない接合方式とし、上下ヨーク及び側脚の断面比を最適 に選定した。更に積層方向の磁束密度を均一にするため上下 ヨーク及び側脚を長円形状とした。

#### 3.2.2 巻 線

超大容量器としての低圧巻線素線間電流分布や内部構造物 の局部過熱などとともに、 雷サージ侵入時の電位分布などが 重要な検討課題であり、最新の解析手法を駆使して電気的及 び熱的に最適な構造とした。

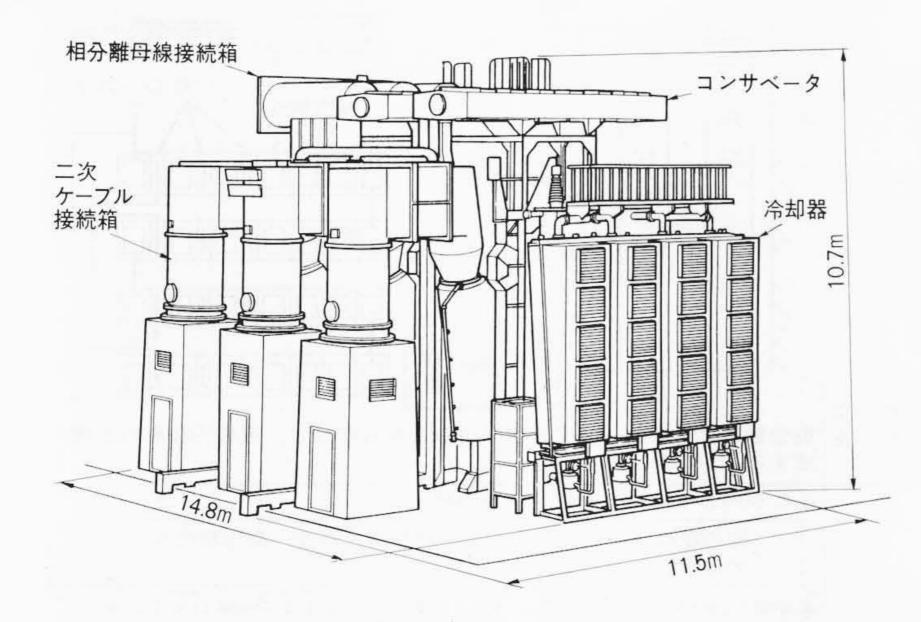
変圧器の大容量化に伴い, 高圧巻線の電流値が増大するた め増容量とともに巻線導体は平角線, 複導体, 転位電線と使 い分けられ, 特に超大容量変圧器では, その高漏れ磁束密度 の面から転位電線の使用が最適となる。

一方, 円板巻線の雷サージに対する電位分布改善法として よく知られるインターリーブ方式は、巻線の2ブロックごと に導体の接続箇所を設ける必要があるため、転位電線を用い

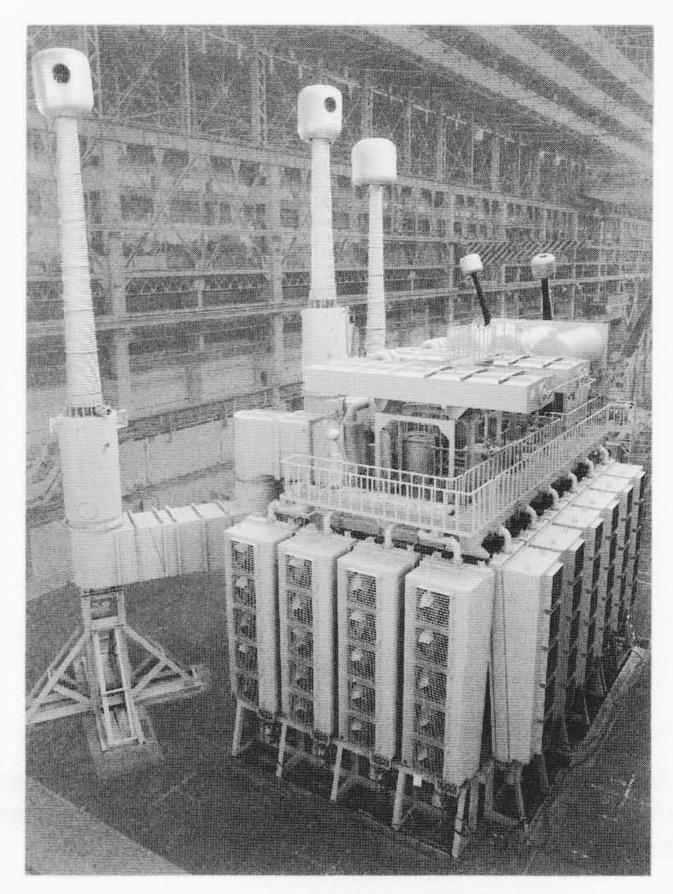
表 2 高効率525kV, I,200MVA三相変圧器の仕様 発電機電圧を 直接525kVに昇圧する変圧器である。

項目		仕	様
形	式	屋外用三相送油風冷式	
容	量	1,200MVA	
電 圧 一	次次	18.525kV F550-F537.5-R525-F512.5kV	
周 波	数	50Hz	
結 線 — 同 二	次次	三角形 星 形	
絶縁階級一 同 二	20	20号A(LIWL*: I50kV) 500号L(LIWL: I,550kV)	
%インピーダン	ス	15%	

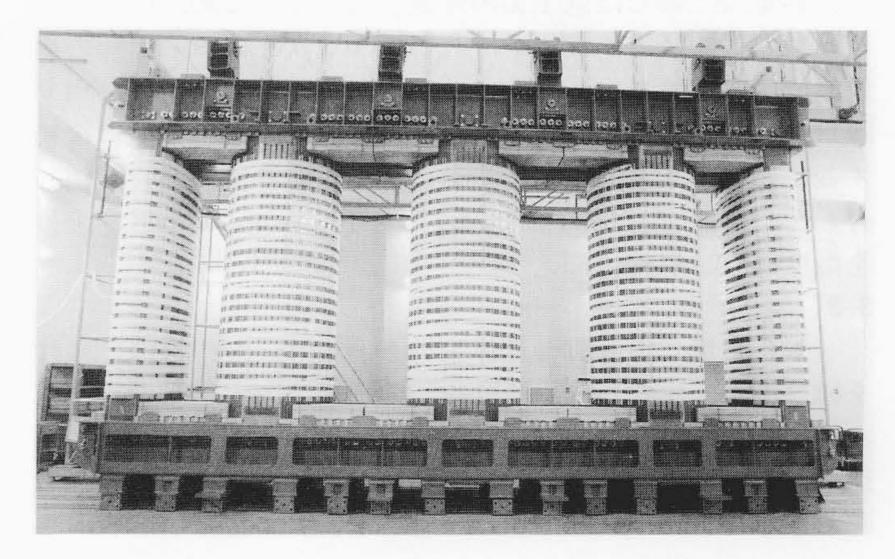
注:\* 雷インパルス耐電圧レベルを示す。



高効率525kV, 1,200MVA三相変圧器寸法図 離母線に、二次側はエレファント構造でOFケーブルに直結される。損失低減に より、同一仕様の既設のものよりも冷却器を1台減らしている。



高効率525kV, 1,200MVA三相変圧器工場試験姿 絶縁試験 を行なうため、525kV試験用ブッシングを二次側に設けている。



超大形三相五脚バインド鉄心 最近の解析技術の向上と製造設 備の充実により,超大形鉄心製作技術を確立した。

た超大容量器には不適となる。日立製作所では早くからこの 点に着眼し、昭和42年に転位電線を使用した円板巻線用とし てC.C.シールドを実用化した。図6に本方式を適用した超大容 量非分割C.C.シールド連続円板巻線を、また表3に2分割円筒 巻線と非分割C.C.シールド連続円板巻線の特徴比較を示す。こ の転位電線を用いたC.C.シールド円板巻線技術は、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、インターリーブ円板巻 線を発明し世界的にその技術を供与してきた英国GEC社へも 技術供与されている。この非分割円板巻線の採用により,導 体接続をなくし信頼性向上を図るとともに, 合わせて, 巻線 の占積率向上による大幅なコンパクト化も達成した。

一方,低圧巻線は多数の並列転位電線から成るへリカル巻 線のため十分な転位を行ない, 各並列転位電線間の循環電流 をほぼ完全になくした。

更に絶縁に関しては、電位振動、電界強度の解析を行ない、 変電所用500kV変圧器で十分実績のある構造及び裕度を確保 した。

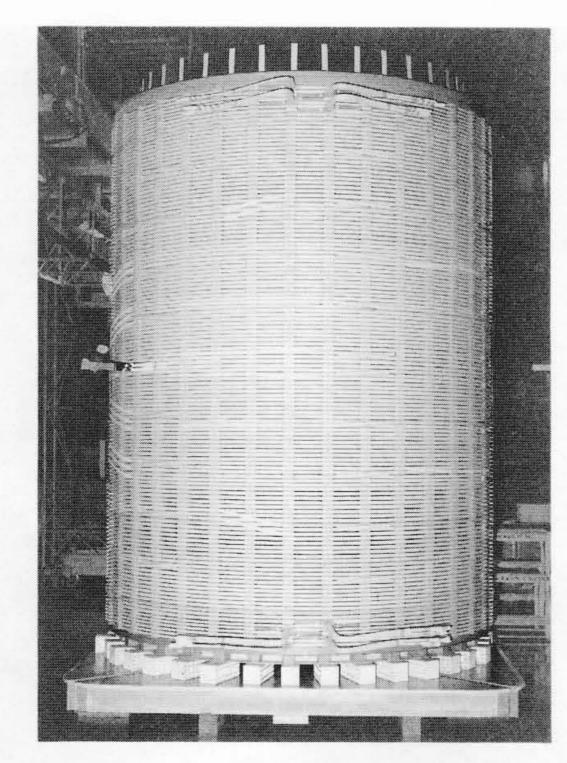


図 6 超大容量非分割C.C.シールド連続円板巻線 転位電線とC.C.シールドを組み合わせて無接続の連続円板巻線を構成できるので、導体並列数の多い超大容量器に最適である。

#### 3.2.3 低圧大電流引出部

大容量変圧器では低圧側の電流が増加するため、低圧ブッシング取付座には渦電流が流れシールド法を誤まるとその周辺部で局部過熱を起こす。このため図7に示すように、相分離母線接続箱のフランジとブッシング取付座を電気的に接続することにより、低圧ブッシング電流と誘導電流を打ち消し合わせ引出部周辺の漏れ磁束をわずか10G以下とし、温度上昇を数度(摂氏)以内に抑えた。

## 3.3 製 作

一貫した原子力品質管理体制のもと設計・製作し、信頼性を確保した。すなわち、設計段階では過去の実績、要素モデル、実規模試作器による検証結果などを完全に反映するため、徹底したデザインレビューを実施した。また製造では専任者をおき $QC(Quality\ Control)$ カード、 $PC(Process\ Control)$ フ

オーム手法による作業管理を強化した。一方、製造設備についても高性能複合NC広幅シヤーライン(図8)及び低温度中身組立室を導入し品質向上に努めた。特に、高性能複合NC広幅シヤーラインは、切断精度を従来より大幅に改善してあるので、鉄心直径増加に伴う接合部のギャップ拡大を防止でき、超大形鉄心の信頼性向上に大きな役割を果たしている。

# 3.4 信頼性検証試験

非分割円板巻線化に際し、鉄心を大形化して対処し、巻線漏れ磁束密度や電磁力などの性能諸元及び絶縁裕度を従来実績に抑えているので、巻線としての検証には製作過程の品質管理の一環としての低電圧気中雷インパルス予備試験や低圧巻線素線間電流分布測定、流動帯電試験などを実施した。

一方、大形化する鉄心については、そのトラブルポテンシャルが磁束の不均等による局部加熱と締付条件、接合部のすき間などに起因した振動増加であり、これらが鉄心の信頼性を大きく左右している。これらについては、解析技術の向上、複合NC広幅シヤーラインなど製造設備の充実を図り対応しているが、超大形鉄心としての重要な検証項目であるので、鉄心単独気中試験や長時間課電試験を実施した。特に図9に示す鉄心単独気中試験は、前述したトラブルポテンシャルに対

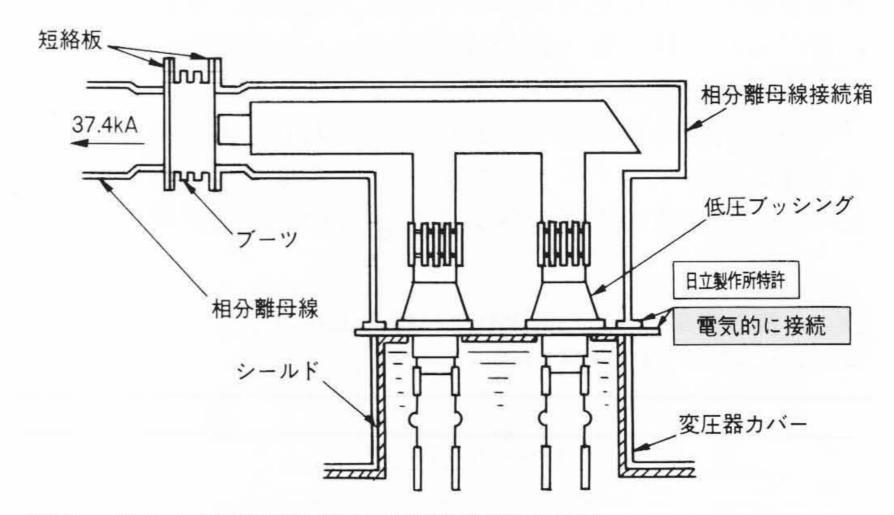
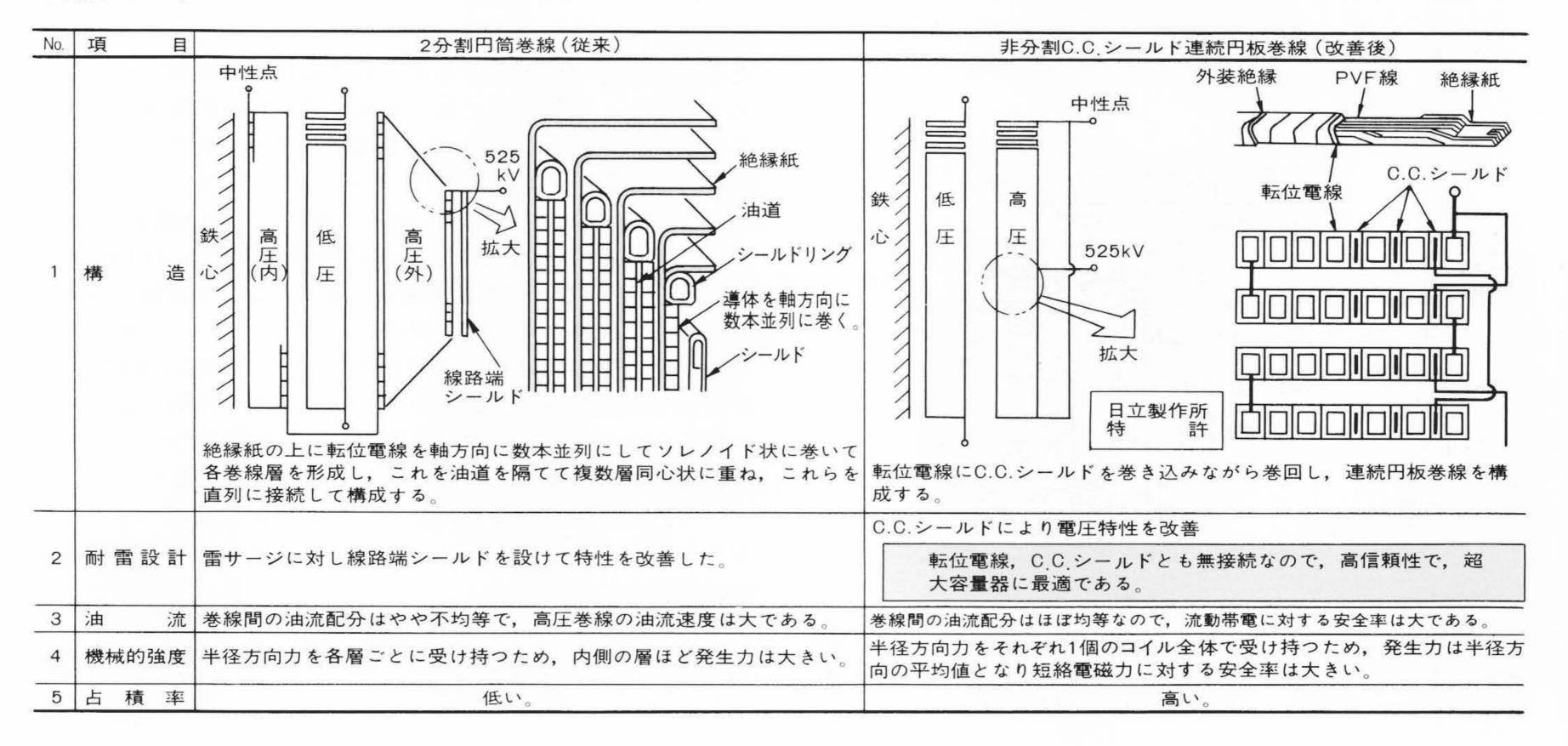


図7 低圧大電流引出部の局部過熱防止対策 相分離母線接続箱のフランジとブッシング取付座を電気的に接続することにより、温度上昇をほとんどなくすことができた。

表 3 2 分割円筒巻線と非分割円板巻線の特徴比較 非分割円板巻線はC.C.シールドと組み合わせた無接続化が可能で、流動帯電、短絡電磁力に対しても優れている。



し実使用状態を詳細にチェックできるので非常に有効な手段 である。

#### 3.4.1 鉄 心

#### (1) 磁束密度分布

鉄心磁東密度分布の測定結果を図10に示す。鉄心温度を決定する基本要素である各部位の磁東密度分布は、主脚の定格磁東密度100%に対し97~100%の範囲にあり、磁束集中は生じていない(設計精度は2%)。この結果、高性能の複合NC広幅シヤーラインの効果もあり、鉄心重量が増えているにもかかわらず鉄損・励磁電流をそれぞれ7%、20%改善できた。

#### (2) 固有振動数

鉄心固有振動数の測定結果を図11に示す。鉄心固有振動数は電源周波数の2倍の100Hzに対し十分離れ,確実に共振を回避できた。この鉄心共振回避と複合NC広幅シヤーラインの適用によって,鉄心の振動振幅と騒音特性は従来より改善できた。

#### (3) 長時間課電試験

鉄心温度も含めた鉄心の総合的な信頼性検証として変圧器完成後,長時間課電試験を実施した。実使用状態より過酷な条件である定格電圧の110%励磁で72時間連続課電して、1時間ごとに油温、励磁電流、鉄損を測定したが、温度によるサーマルストレスの影響に敏感な励磁電流の増加はほとんど認められなかった。この間、RNM(Radio Noise Meter)及びERAメータ\*\*)による部分放電の監視及び超音波マイクによる内部異常音の監視を行なったが異常は認められなかった。また、試験前後及び試験中間で油中ガス分析を実施したがこれも全く問題はなかった。この結果、今回の超大形鉄心はあらゆる面で十分信頼性をもっていることが実証できた。

#### 3.4.2 巻 線

### (1) 高圧巻線雷インパルス電位分布

低電圧による気中雷インパルス予備試験の結果を図12に示す。設計値と測定値はよく一致し(設計精度5%),十分な絶縁裕度のあることが確認できた。

#### (2) 低圧巻線素線間電流分布

図13に示す中身完成状態で低電流を流し、素線間電流分布 を測定した。その結果、素線間のアンバランス電流は定格電流 に対し4%以内で、非常に均一となっていることを確認した。

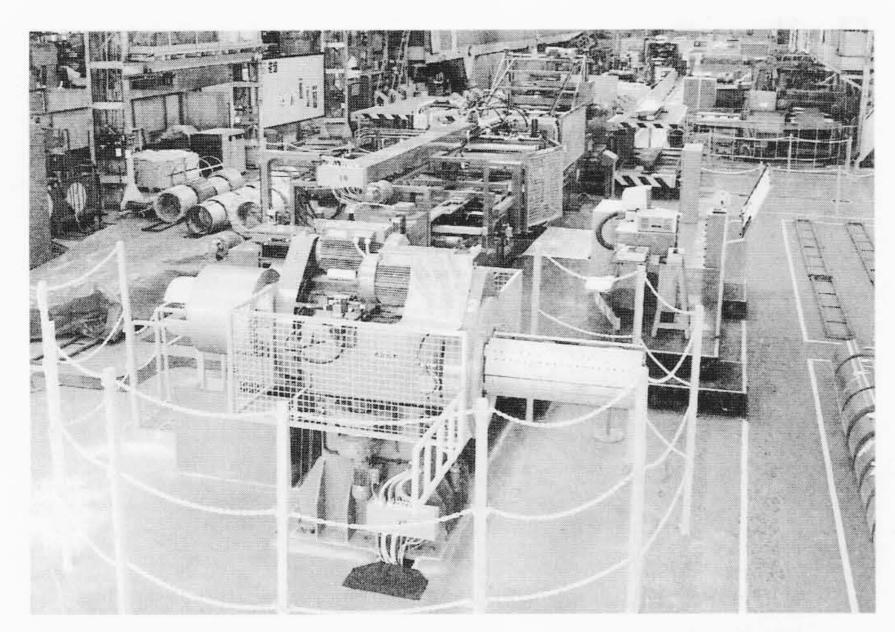


図 8 高性能複合NC広幅シヤーライン ソフトタッチ機構,一貫ライン内での同時仕分けを取り入れて,高精度・低劣化加工のできるラインで,超大形鉄心の製作を容易にしている。

# ※) ERAメータ:英国Electrical Research Association社で開発した 部分放電測定用のメータ

# (3) 長時間温度試験

巻線,鉄心締金具,タンクなどの総合的な信頼性検証試験として変圧器完成後,長時間温度試験を実施した。定格電流で48時間連続通電し,この間部分放電の監視及び内部異常音の監視を行ない,また試験前後及び試験中間で油中ガス分析を実施した。この結果,いずれも異常は認められず,局部過熱や流動帯電による放電はなく信頼性の高い巻線であることが確認できた。

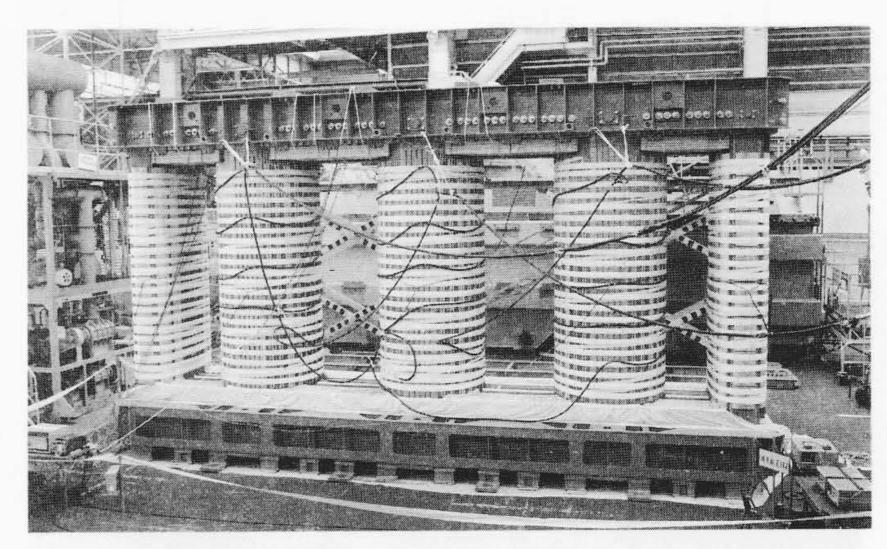


図 9 鉄心単独気中試験 製作過程で仮巻線して鉄損,励磁電流,振動, 騒音,磁束密度分布など諸特性を詳細に測定し,信頼性を確認した。

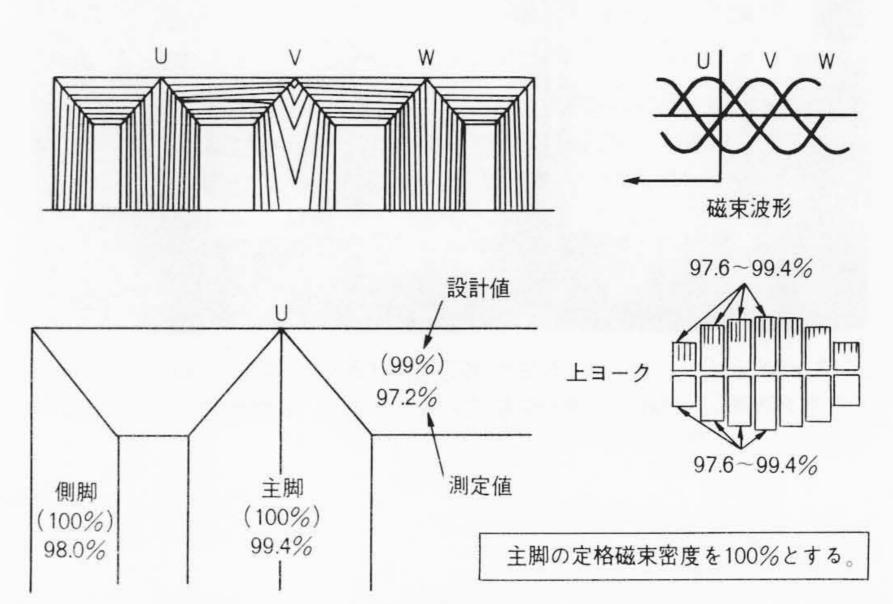


図10 鉄心磁束密度分布 磁束密度分布は各部で均一で、磁束集中のないことを確認した。

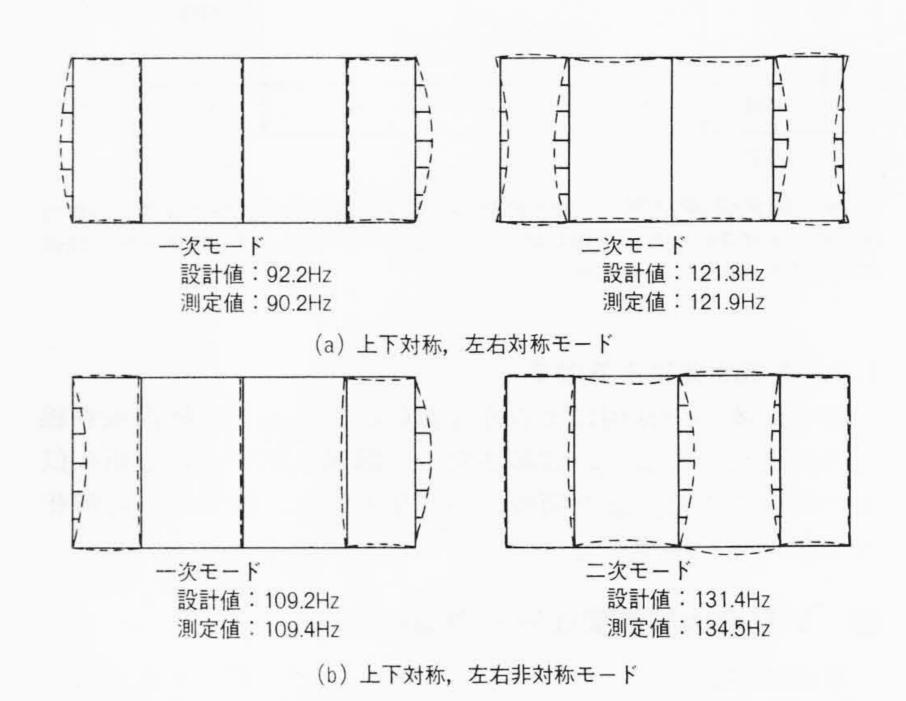


図 | 鉄心固有振動数 鉄心固有振動数は、電源周波数の 2 倍の 100 Hz に対し十分離れ、共振を確実に回避した。

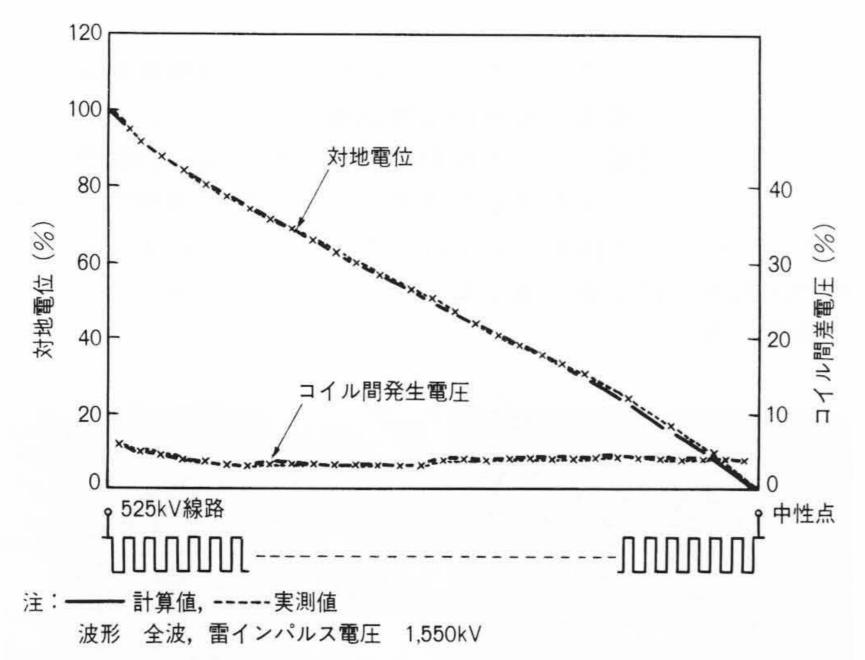


図12 高圧巻線電位分布 気中で低電圧雷インパルス予備試験を実施し、 十分な絶縁裕度のあることを確認した。

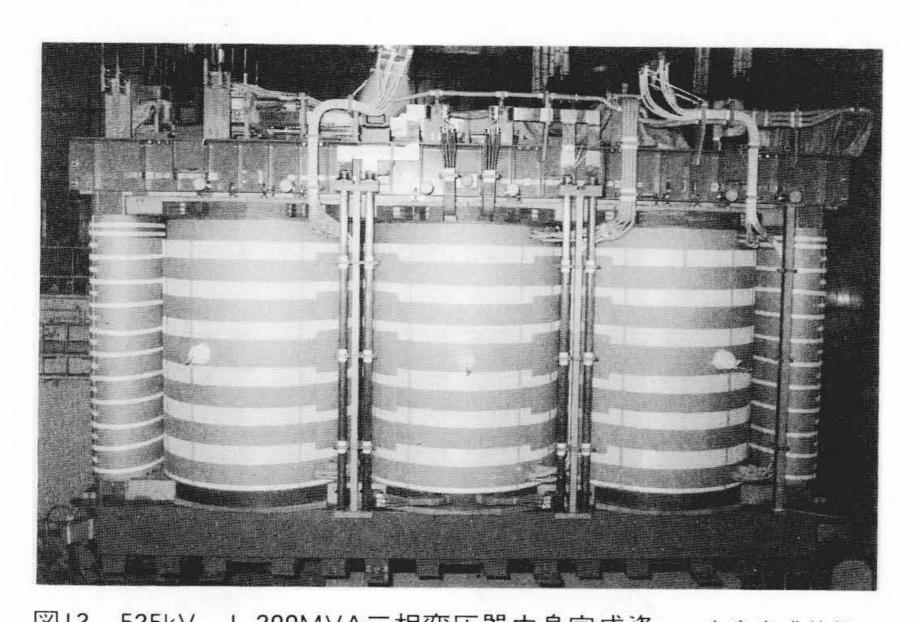


図13 525kV, 1,200MVA三相変圧器中身完成姿 中身完成状態で 低電流を通電し、低圧巻線素線間電流分布を測定し、各素線間の電流がほぼ均 一であることを確認した。

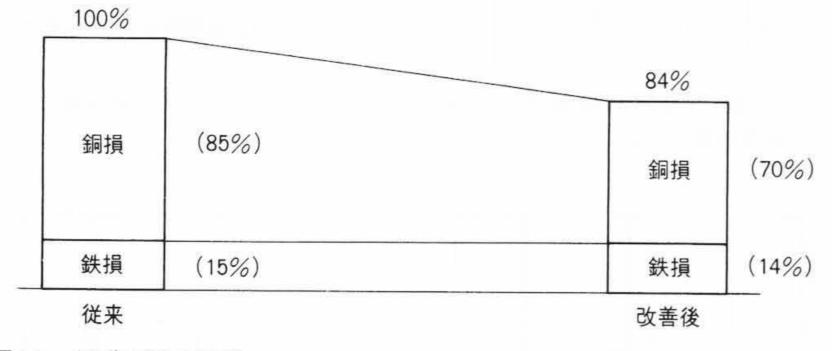


図 14 損失低減効果 超大形鉄心,超大容量非分割円板巻線などの鉄機械化技術の適用により、大幅な損失低減が図れた。なお、鉄心構造改善、設備導入により鉄損についても低減できた。

#### 3.5 構造改善による効果

超大形鉄心の採用による非分割C.C.シールド連続円板巻線 化の構造改善により、信頼性向上と図14に示す大幅な損失低 減が達成できた。また同時に小形化も図れ、超大形鉄心解析 技術が十分な精度をもっていることも確認できた。

# 4 次期超大容量変圧器への適用拡大

系統の安定度向上を目的とした低インピーダンス化や改良型BWRプラント用1,500MVA級変圧器の計画がなされ、変圧器は更に大形化する傾向にある。今回実用化した非分割円板

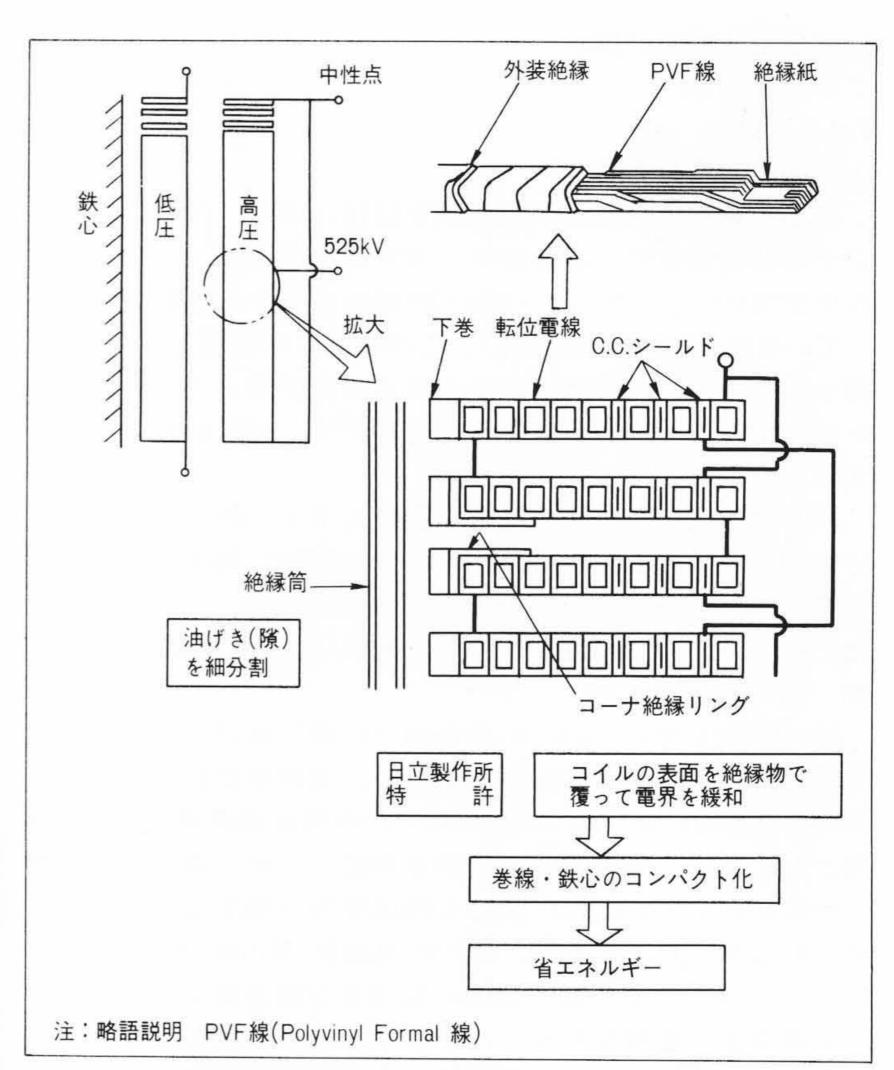


図15 UHV絶縁技術の応用 UHV絶縁技術の応用により、巻線、鉄心のコンパクト化と損失低減が図れる。

巻線はUHV絶縁技術<sup>2)</sup>を適用できるので機器の大形化を抑え 損失を低減できる。発電所用変圧器では高圧巻線を上下並列 とし500kV線路が巻線中央から引き出されるため、UHV絶縁 技術の適用部位は主絶縁部に限定され、その主な技術は**図15** に示すように、コイル角部へのコーナ絶縁リングの設置である。

UHV絶縁技術は、既にベネズエラ・グリ水力発電所納め800 kV、805/3MVA単相変圧器ほかに適用しその効果を挙げているが、今後は本技術とUHV絶縁技術を併用して小形・軽量化及び損失低減を図っていく考えである。

## 5 結 言

以上,超大形鉄心,超大容量非分割円板巻線など鉄機械化技術を適用し,東京電力株式会社福島第二原子力発電所 4 号機用525kV,1,200MVA三相変圧器の信頼性向上と大幅な省エネルギー化,小形化を実現した。今後,本技術とUHV絶縁技術を併用して,いっそうの省エネルギー化,小形化を図っていく考えである。

終わりに、本変圧器の構造改善の機会を与えていただくとともに、設計・製作・信頼性検証試験に当たって終始御指導をいただいた東京電力株式会社の関係各位に対し、深く感謝の意を表わす次第である。

# 参考文献

- 1) 栗田,外:525kV,1,100MVA三相変圧器実用化検証試験,日立評論,62,2,135~140(昭55-2)
- 2) 星,外:電力用変圧器の技術動向,日立評論,**65**,5,315~320(昭58-5)
- 3) 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)
- 4) 前島,外:最近の変圧器低騒音化技術,日立評論,**67**,2,147~152(昭60-2)