

発電所用大容量三相変圧器

—東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所 6 号機用525 kV 1,450 MVA主変圧器—

Ultralarge-Capacity Three-Phase Transformer for Power Station

渡辺 優 Masaru Watanabe 山本正一 Shōichi Yamamoto
前島正明 Masaaki Maejima 斎藤 達 Sadamu Saitō



525 kV 1,450 MVA三相変圧器の外観

一次側は相分離母線に、二次側は500 kV OFケーブルにそれぞれ接続されている。

火力・原子力発電所の単機出力は、技術の進歩や発電所の立地条件などによって増加する方向にある。

これまで、火力・原子力発電所用昇圧変圧器は1,000～1,200 MVA級の大容量器が主流であったが、原子力ではABWR(改良型沸騰水型原子炉)の採用などに伴い、さらに大容量化してきている。

東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所6号機はABWRプラントとしての初号機であり、主変圧器の容量も従来のBWR(沸騰水型原子炉)プラントの1,200 MVAから1,450 MVAに増加している。これは、三相変圧器と

しては世界最大級容量となるものである。

日立製作所は、1,200 MVA級主変圧器に対して超大型鉄心の採用と、500 kV変電所変圧器で多数の実績を持つ非分割円板巻線の採用によって鉄機械化(鉄心の大型化と巻線の巻回数の削減)を図り、小型で高効率な変圧器を製作し、納入してきた。これらの1,200 MVA級主変圧器の製作実績から、さらに鉄機械化を図った高効率超大容量主変圧器を完成させ、東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所 6 号機用の主変圧器として納入した。1996年11月から運転を開始している。

1. はじめに

これまで、火力・原子力発電所用昇圧変圧器は1,000～1,200 MVA級の大容量器が主流であったが、原子力ではABWR(改良型沸騰水型原子炉)が開発され、プラント単機出力がいっそう大容量化している。さらに、系統安定度向上を目的として低インピーダンスの主変圧器が要求されてきている。

加えて、火力・原子力発電所用主変圧器では、高負荷域で高効率となるように、鉄心を大型化し、巻線の巻回数を減らした、いわゆる鉄機械が求められている。

日立製作所は、多年の実績を持つバインド鉄心技術を基に、鉄心磁束分布、温度分布、振動などの解析技術の充実や、高性能複合NC(数値制御)広幅シャーラインなどの製造設備の導入によって超大型鉄心製作技術を確立してきた。さらに、500 kV変電所用変圧器で多数の実績を持つ非分割円板巻線を採用することにより、小型化と省エネルギー化に取り組んできた。そして、これらの技術を適用して高効率化を図った第1号器として、1986年に東京電力株式会社福島第二原子力発電所4号機用525 kV 1,200 MVA三相変圧器を完成させた。

その後、低インピーダンス化された東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所5号機と4号機用525 kV 1,200 MVA三相変圧器や、九州電力株式会社玄海原子力発電所4号機用510 kV 1,250 MVA三相変圧器を完成し、納入している。

これらの1,200 MVA級主変圧器の製作実績に加えて、大型化する鉄心についての詳細な解析と系統サージ解析を含めた巻線内の電位分布、共振時の発生電圧の評価を実施し、東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所6号機用525 kV 1,450 MVA三相変圧器を完成し、納入した。鉄心・巻線などの各製作段階で詳細な検証試験を実施し、解析の妥当性の評価と信頼性の確保に万全を期した。

ここでは、525 kV 1,450 MVA三相変圧器の概要、およ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. 525 kV 1,450 MVA三相変圧器の仕様・構造

2.1 仕様

この変圧器は、東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所で発電機電圧を直接525 kVに昇圧するものである。主な仕様を表1に、工場試験の様子を図1にそれぞれ示す。

2.2 構造

この変圧器は、すでに納入している東京電力株式会社

表1 525 kV 1,450 MVA三相変圧器の仕様

発電機電圧を直接525 kV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	1,450 MVA
電 圧	一次 26.325 kV 二次 F550-F537.5-R525-F512.5 kV
周 波 数	50 Hz
結 線	一次 三角形 二次 星 形
絶 縁 階 級	一次 30号B (LI: 170 kV) 二次 500号L (LI: 1,550 kV)
%インピーダンス	12%

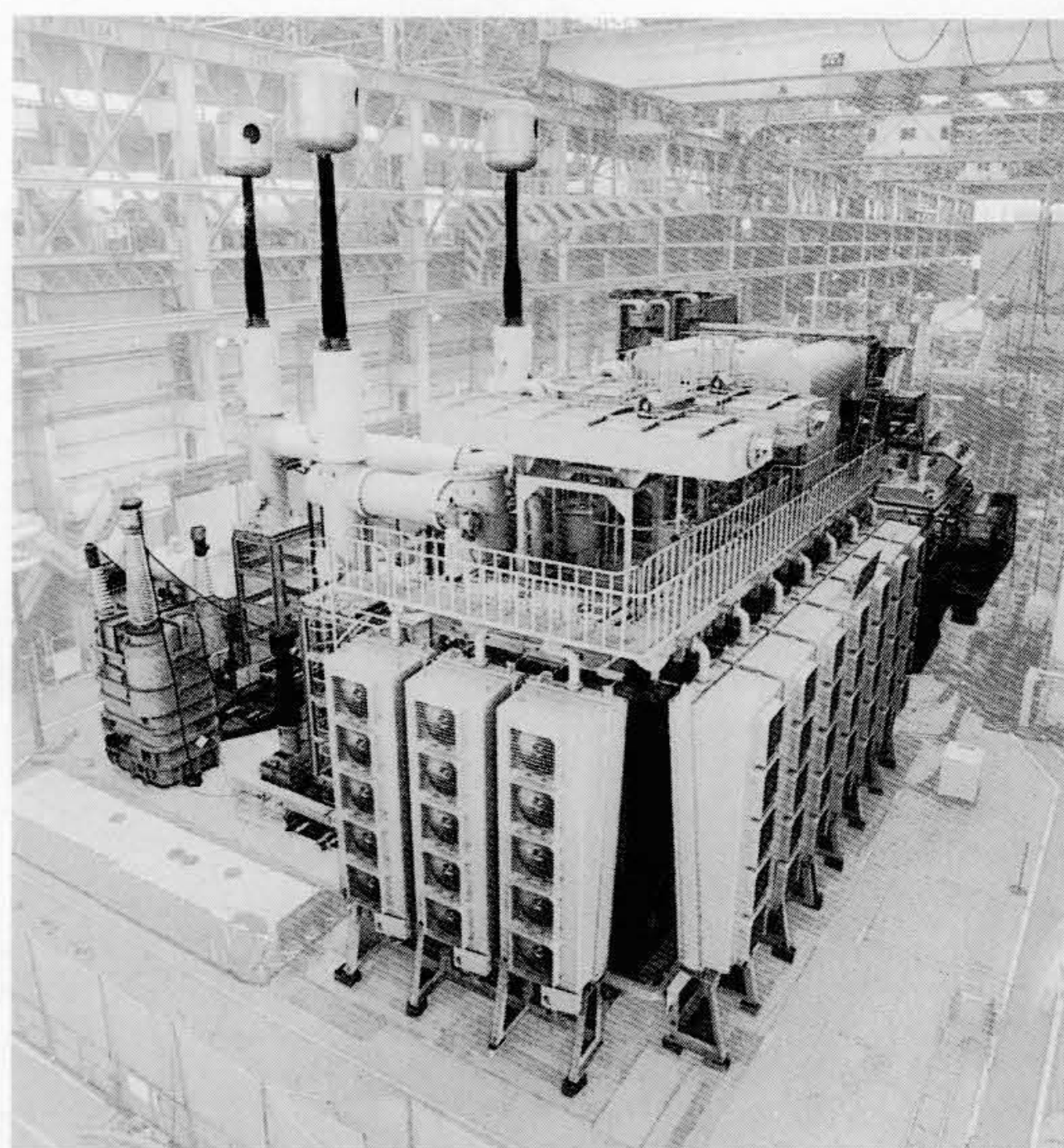


図1 525 kV 1,450 MVA三相変圧器の工場試験

試験を実施するため、525 kV側に試験用のブッシングを設けている。

柏崎刈羽原子力発電所5号機と4号機用主変圧器に比べて、容量が約1.2倍増加している。しかし、%インピーダンスは12%であり、同一の値となっている。

このため、1.2倍の容量増加に対し、磁気装荷(鉄心)で約1.1倍、電気装荷(巻線)で約1.1倍、すなわち、鉄心、巻線ともほぼ均等にスケールアップする設計とした。

2.2.1 鉄 心

鉄心構造としては、三相五脚鉄心を採用した。脚の締付は、均一な締付圧力が確保できるバインド締付方式を採用している。また、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、上下ヨークや側脚の断面積比も最適に選定するとともに、積層方向の磁束分布を均一にするため、上下ヨークと側脚を長円形状とした。

さらに、鉄心の熱伸びなどによる鉄心特性の影響をな

くすため、鉄心全体を均一に冷却している。

2.2.2 巻線

変圧器の大容量化に伴って巻線の電流が増大するため、巻線導体には、高圧巻線・低圧巻線とも転位電線を使用している。高圧巻線には、雷サージに対する電位分布改善と、巻線占積率の向上が図れる非分割CC(Condenser Coupling)シールド連続円板巻線を採用した。また、系統サージ解析を含めた巻線内の電位分布と、共振時の巻線各部での発生電圧を評価し、CCシールドやタップコイルの配置などを決定した。

一方、低圧巻線は多数の並列転位電線から成るヘリカル巻線のため、十分な転位を実施し、各並列転位電線間の循環電流をほぼ完全に無くした。

2.2.3 低圧大電流引出部

大容量変圧器では低圧側電流が増加するため、低圧ブッシング取付部近傍での局部過熱が問題となる。このため、相分離母線接続箱のフランジとブッシング取付座を電氣的に接続し、低圧ブッシング電流と誘導電流を打ち消し合わせて、引出部周辺の温度上昇を数度以内に抑えた(図2参照)。

2.3 信頼性検証試験

従来器に比べて鉄心がさらに大型化するため、気中状態で鉄心単独試験を実施し、磁束密度分布、振動、鉄損などの基本特性をチェックした。鉄心温度を含めた鉄心の総合的な信頼性検証として、変圧器完成後に長時間課電試験を実施した。

巻線については、低電圧気中雷インパルス予備試験や流動帯電試験を実施した。特に、タップコイルについては、共振正弦波や系統サージ解析によって得られた解析模擬波形を印加した場合についても発生電圧を測定した。

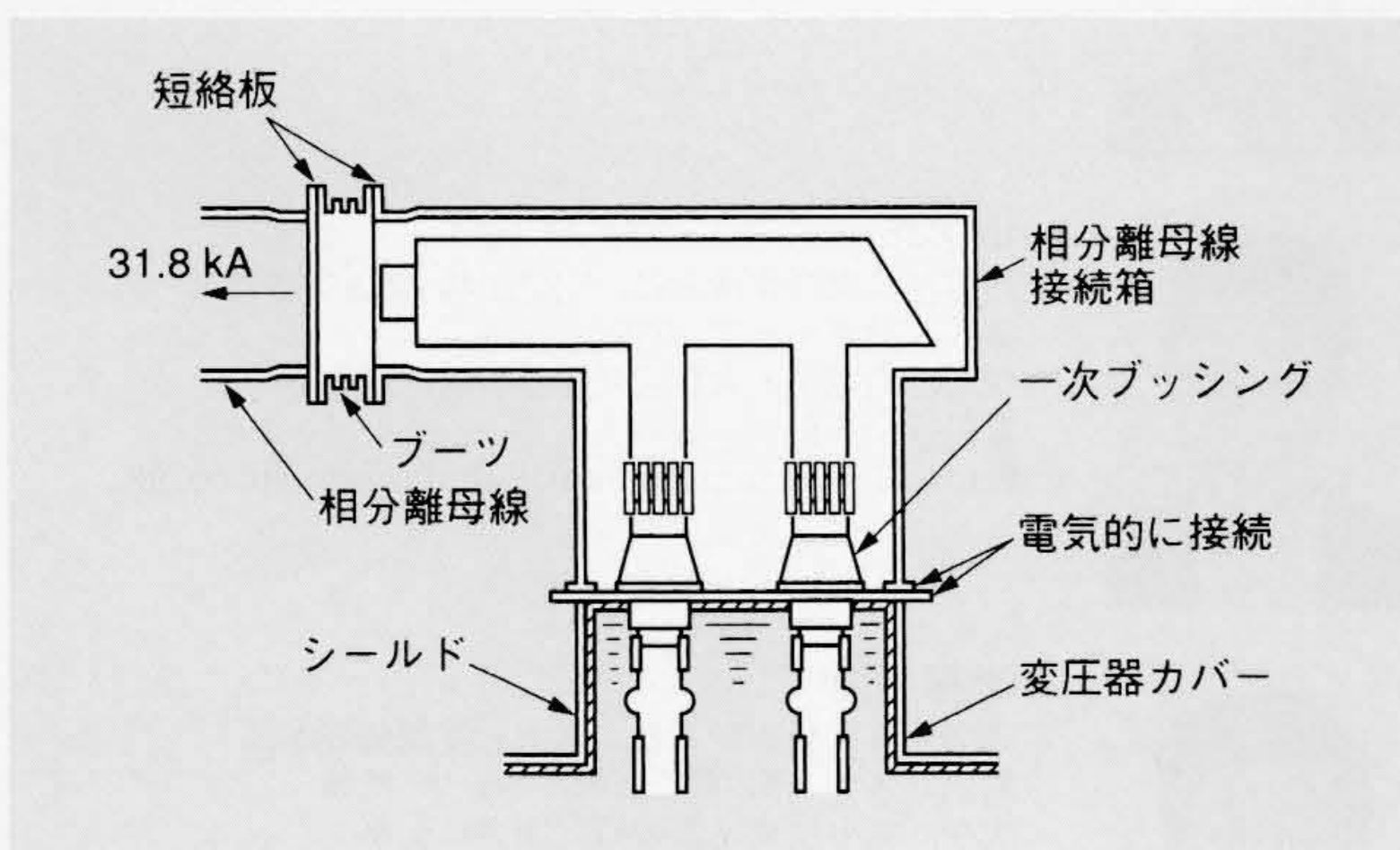


図2 低圧大電流引出部の構造

相分離母線接続箱のフランジとブッシング取付座を電氣的に接続することにより、温度上昇をほとんどなくすることができた。

2.3.1 鉄心

(1) 磁束密度分布

鉄心単独気中試験の様子を図3に、鉄心内の磁束密度分布の測定結果を図4にそれぞれ示す。鉄心温度を決定する基本要素である各部の磁束密度分布は、主脚の定格磁束密度100%に対して98~100%の範囲にあり、磁束の集中は生じていない。

(2) 固有振動数

鉄心固有振動数は、電源周波数の2倍の100 Hzに対して十分離れていることを確認した。

(3) 長時間課電試験

実使用状態よりも過酷な条件である定格電圧の110%励磁で72時間連続して課電し、1時間ごとの油温、励磁

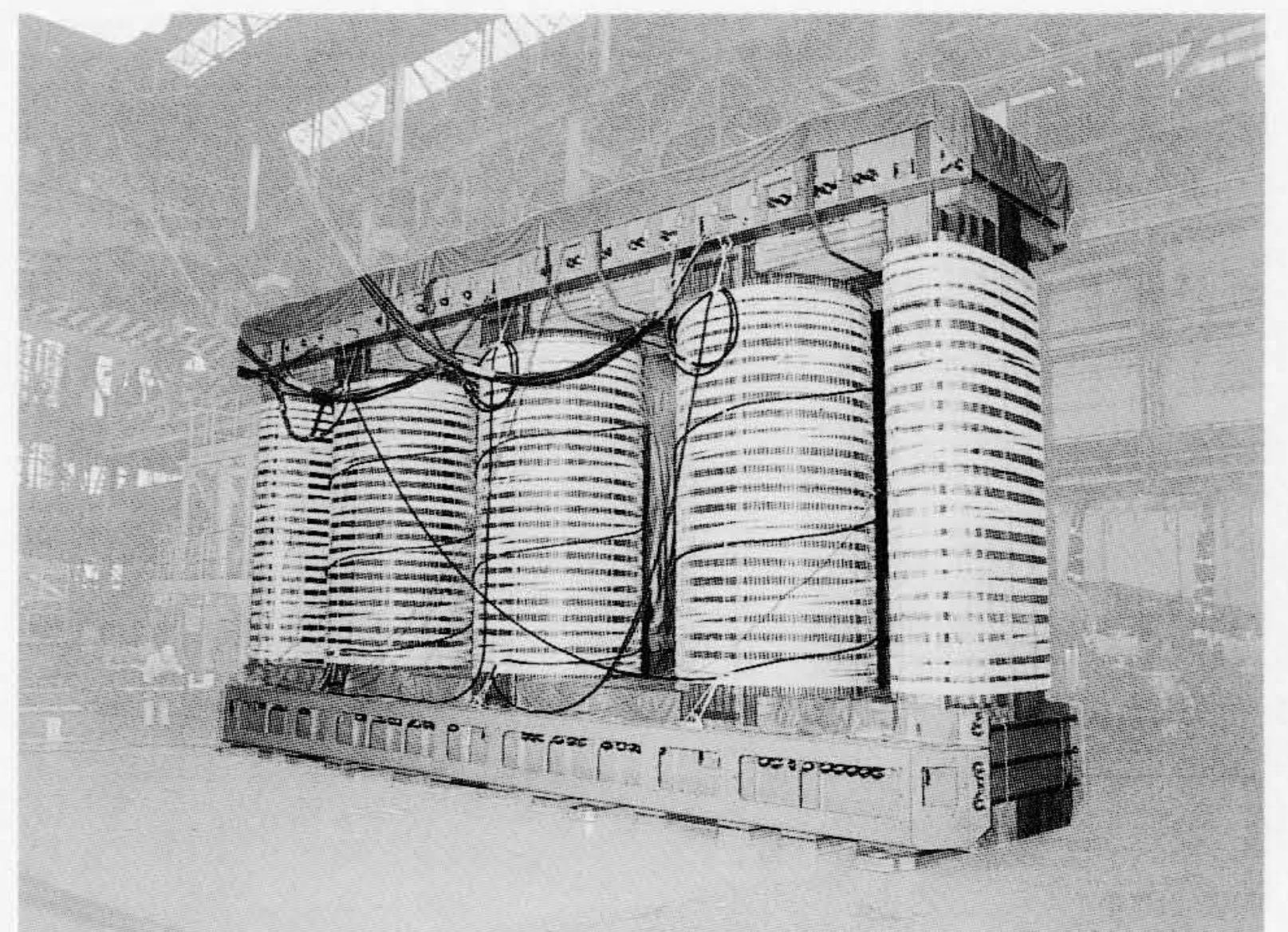
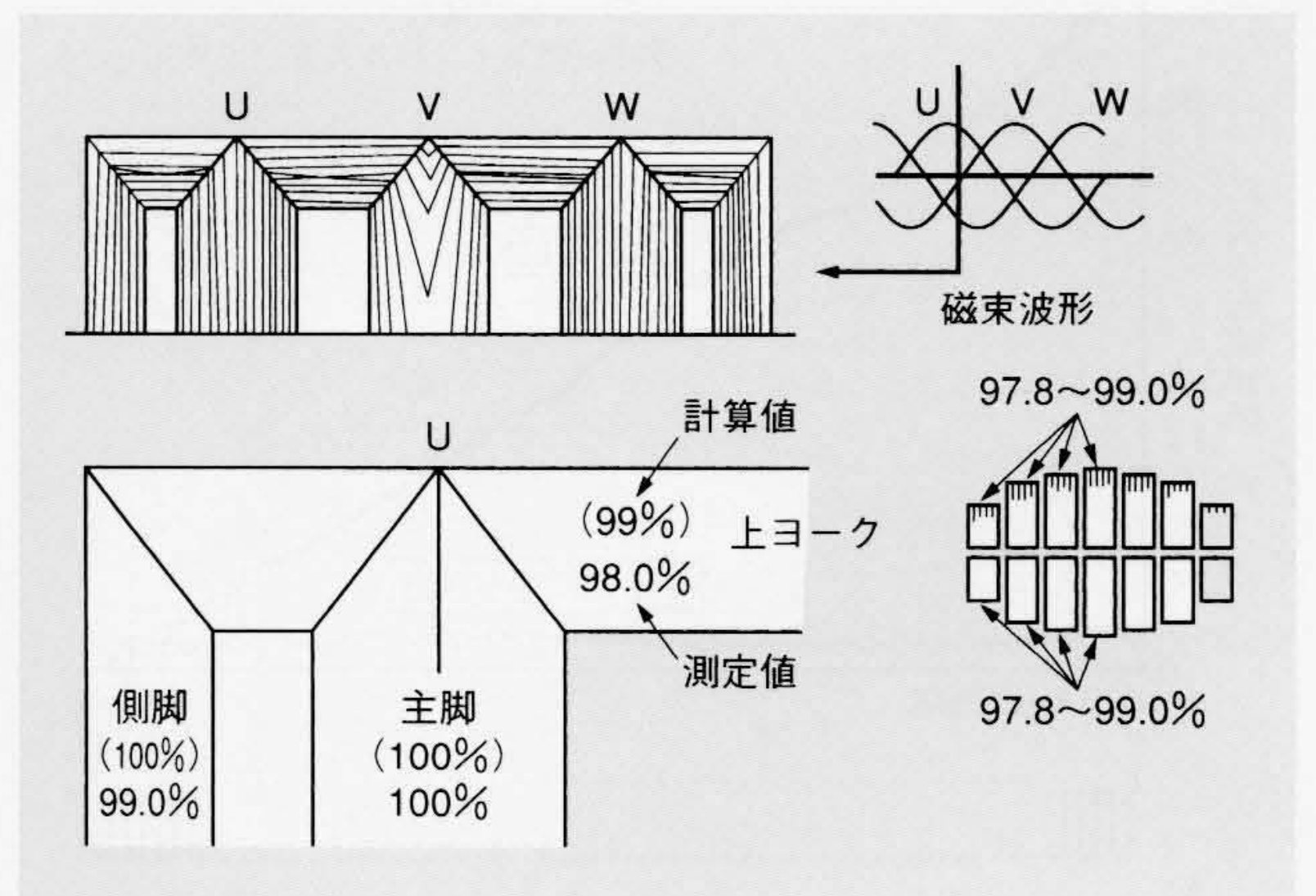


図3 鉄心単独気中試験

気中状態で、鉄損、励磁電流、振動、騒音、磁束密度分布などを詳細に測定し、信頼性を確認した。



注：主脚の定格磁束密度を100%とする。

図4 鉄心磁束密度分布

磁束密度分布は各部で均一で、磁束集中の無いことを確認した。

電流、鉄損を測定したが、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。また、試験中の部分放電の監視、内部異常音の監視、および油中ガス分析の結果も異常なく、十分な信頼性を持っていることが検証できた。

2.3.2 巻線

(1) 高圧巻線

低電圧による気中雷インパルス予備試験の結果、設計値と測定値はほぼ一致し、十分な絶縁裕度のあることが確認できた。気中電位分布測定結果を図5に示す。

また、タップコイルについては、共振正弦波や系統サージ解析によって得られた解析模擬波形を印加した場合の発生電圧を、実使用状態を模擬して油中条件で測定した。その結果、いずれの波形でも実使用状態で十分な絶縁裕度が確保されていることが確認できた。

(2) 長時間温度試験

巻線、鉄心締付金具、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、定格電流で48時間連続通電をする長時間温度試験を実施した。この間、部分放電の監視や内部異常音の監視、流動帯電による放電の監視を実施したが、いずれも異常はなかった。また、試験前後で実施した油中ガス分析結果でも異常は認められず、信頼性の高い巻線であることが確認できた。

3. 今後の展望

系統安定度の向上を目的とした変圧器の低インピーダンス化やABWRプラント用1,500 MVA級変圧器が次々

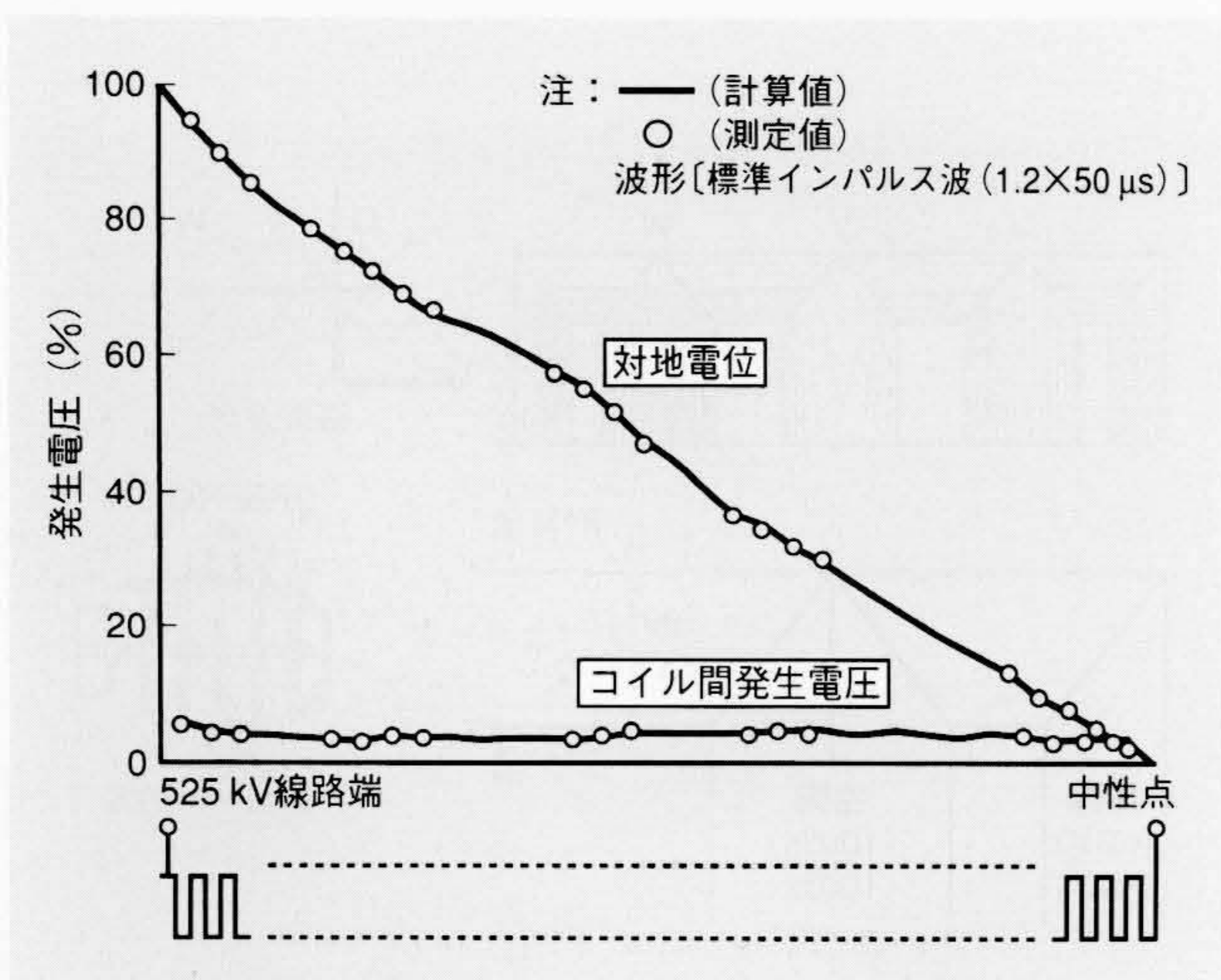


図5 高圧巻線電位分布

気中での低電圧雷インパルス予備試験を実施し、十分な絶縁裕度があることを確認した。

と計画されており、将来的には1,600～1,700 MVA級の変圧器が要求されることが考えられる。

今回、製作、納入した525kV 1,450 MVA三相変圧器にはUHV(超超高压)絶縁技術や誘電率整合絶縁を適用することが可能であり、機器の大型化を迎え、将来の変圧器のいっそうの大容量化に対応できる。

4. おわりに

ここでは、三相変圧器としては世界最大級容量となる525 kV 1,450 MVA主変圧器の構造、および信頼性検証試験について述べた。

信頼性検証試験として実施した鉄心単独気中試験、巻線の電位分布測定、および組立後の総合試験で、十分な信頼性を確認できた。

今後は、UHV技術や誘電率整合絶縁などを併用し、機器の信頼性を確保しながら、いっそうの大容量化へ対応していく考えである。

参考文献

- 1) 栗田, 外: 525 kV 1,100 MVA三相変圧器実用化検証試験, 日立評論, 62, 2, 135～140(昭55-2)
- 2) 前島, 外: 高効率大容量三相変圧器の実用化, 日立評論, 68, 10, 815～820(昭61-10)

執筆者紹介



渡辺 優

1972年日立製作所入社, 国分工場 変圧器設計部 所属
現在, 電力用変圧器の設計・開発に従事
電気学会会員
E-mail: m-watanabe@cm.kokubu.hitachi.co.jp



前島正明

1970年日立製作所入社, 国分工場 品質保証部 所属
現在, 変電機器の品質保証に従事
電気学会会員
E-mail: m-maejima@cm.kokubu.hitachi.co.jp



山本正一

1981年日立製作所入社, 国分工場 変圧器設計部
第一設計グループ 所属
現在, 高電圧・大容量変圧器の設計に従事
電気学会会員
E-mail: s-yamamoto@cm.kokubu.hitachi.co.jp



斎藤 達

1969年日立製作所入社, 電力・電機開発本部
電気システム部 電圧制御グループ 所属
現在, 電力用変圧器の研究開発に従事
電気学会会員, IEEE会員
E-mail: ssaitou@erl.hitachi.co.jp