

関西電力株式会社奥多々良木発電所納め

500kV 640MVA 変圧器

500kV 640MVA Transformer for Kansai Electric Power Co. Okutataragi P.S.

From the necessity of long distance high-power transmission, Japan has adopted 500 kV transmission. Hitachi, Ltd. with its more than ten years of research in this field including experiments with numerous 500 kV test models and rich experience in the design and manufacture of 500 kV transformers for export to those countries where 500 kV is the standard, has received orders to date for as many as 11 banks (31 units) of 500 kV transformers from domestic customers.

One for delivery to the Okutataragi Power Station, Kansai Electric Power Co. was recently completed. This Hitachi's No. 1 unit of 500 kV transformer for domestic use is noteworthy in that it is a three-phase transformer consisting of three single-phase units for direct connection with the two generators in service at the underground pumped storage power station. Preceding the design of this EHV transformer researches and experiments were conducted including a study on the thermal behavior of coil, core, tank, etc. analysis of the insulation of 500 kV oil-to-oil wall bushing, testing by the loading back temperature rise test method, and the like. Also, to ensure high reliability of the product, a quality control and quality assurance system was established which covered application of dust-proof measures, non-destructive inspection of materials, and proper insulation treatment, and use of "EHV" indication symbols, etc.

福田輝夫* Teruo Fukuda
 木内一之* Kazuyuki Kinouchi
 鹿島芳丈* Yoshitake Kashima
 平野三百里* Mihori Hirano
 豊田康三* Kozo Toyoda
 鎌田 譲** Yuzuru Kamata

1 緒 言

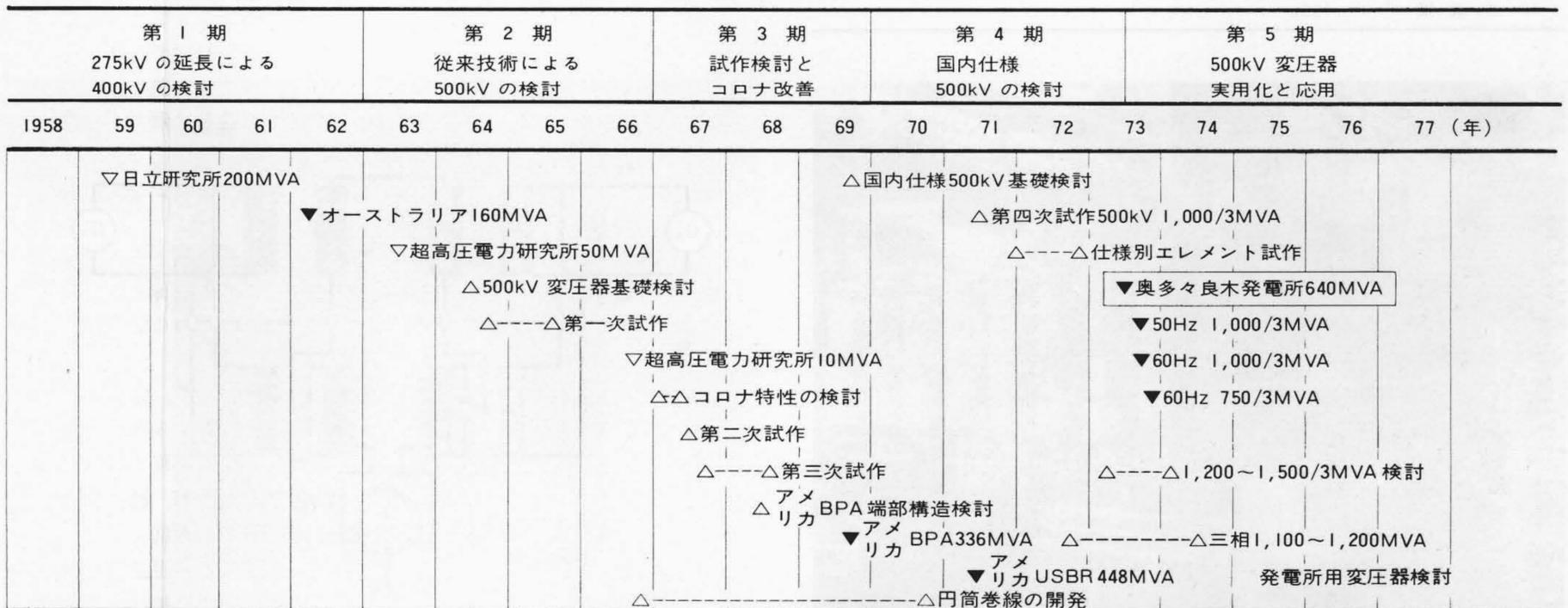
わが国においても大電力長距離送電の必要性から、昭和48年に500kV送電が実現した。

日立製作所においては、昭和32年ごろより500kV級変圧器の開発に着手し、輸出向け500kV変圧器⁽¹⁾などの製作に続き、

国内仕様の500kV変圧器の一つである500/275kV, 1,000/3MVA単相単巻変圧器の実器試作⁽²⁾を行ない、絶縁、漏えい、冷却などの全般的検証とともに設計、製作技術の向上に努めた。これらの実績のもとに現在11バンク(31台)の500kV変圧器を受

表 I 500kV 変圧器開発の経緯 奥多々良木発電所640MVA変圧器が製作されるまでの開発の経緯を示す。

Table I Progress of 500kV Transformer Development



* 日立製作所国分工場 ** 日立製作所日立研究所

注し、その一部はすでに完成している。関西電力株式会社奥多々良木発電所(以下、奥多々良木発電所と略す)納め640MVA変圧器は、これらの第1号機である。

表1は本変圧器完成までの500kV変圧器の開発の経緯を示すものである。

以下、本変圧器の概要について紹介する。

2 仕様

本変圧器は奥多々良木発電所において発電機電圧を、直接500kVに昇圧するものであり、表2に示すような仕様となっている。

仕様上の特色は下記に述べるとおりである。

(1) 500kVケーブル直結方式としては国内最初の変圧器であり、500kV油中壁ぬきブッシングの開発が必要である。

表2 奥多々良木発電所納め 500kV 640MVA 変圧器仕様 500kVケーブル直結方式、地下揚水発電所用単相組合せ三相変圧器で発電機2台に直結されるなど多くの特殊仕様を有する。

Table 2 Specification of 500kV 640MVA Transformer for Kansai Electric Power Co.

形式	送油水冷式負荷時タップ切替屋外用三相鉄形変圧器				
周波数	60Hz				
巻線	一次	一次	二次	中性点	備考
容量(MVA)	320	320	640	—	一次2回路
電圧(kV)	18	18	$550\sqrt{3}$ ~ $509.375\sqrt{3}$ ~ $468.75\sqrt{3}$	—	27タップ
結線	△	△	Y	—	
絶縁	インパルス (kV) FW	150	150	1,550	350
	インパルス (kV) CW	170	170	1,780	—
強	開閉インパルス (kV)	—	—	1,290	—
度	AC耐圧(kV)	50	50	680	140
	コロナ(kV)	—	—	475	—
	長期課電	—	—	381	1.5E 2時間<25μV 1.2E 33時間
%	一次~二次	18%			
Vz	一次~一次	できるだけ大			
端子	一次	IPBにて発電機に接続			
	二次	500kV OFケーブルと接続			
据付場所	地下変圧器室				
輸送重量	135t				

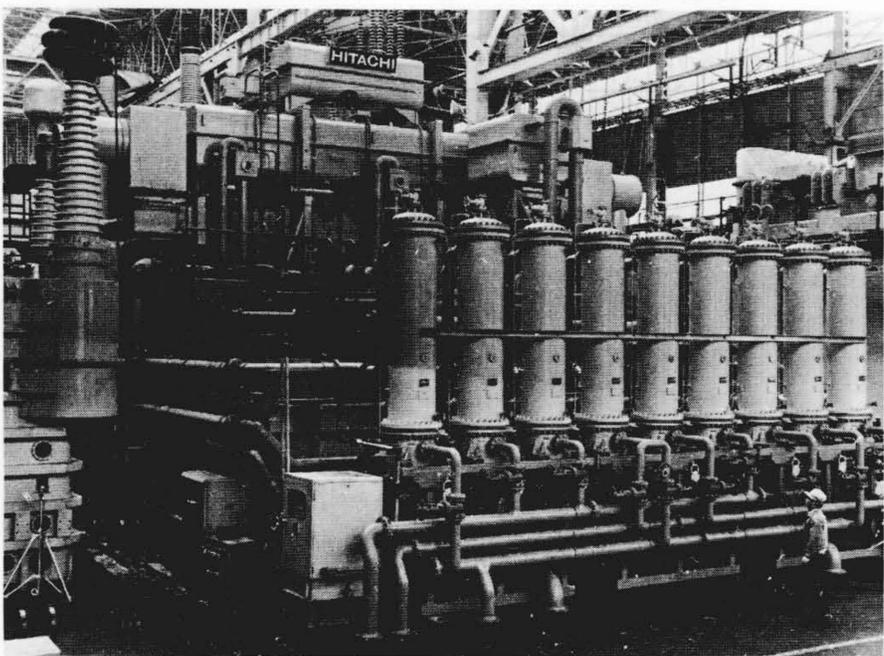
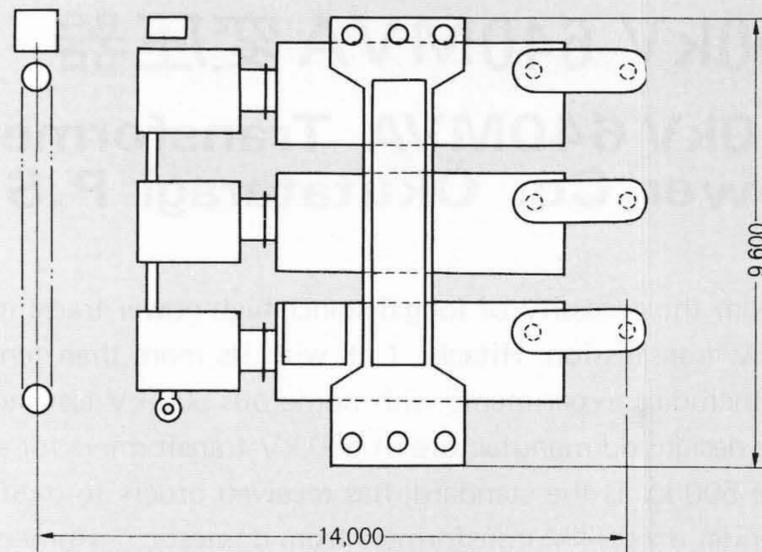
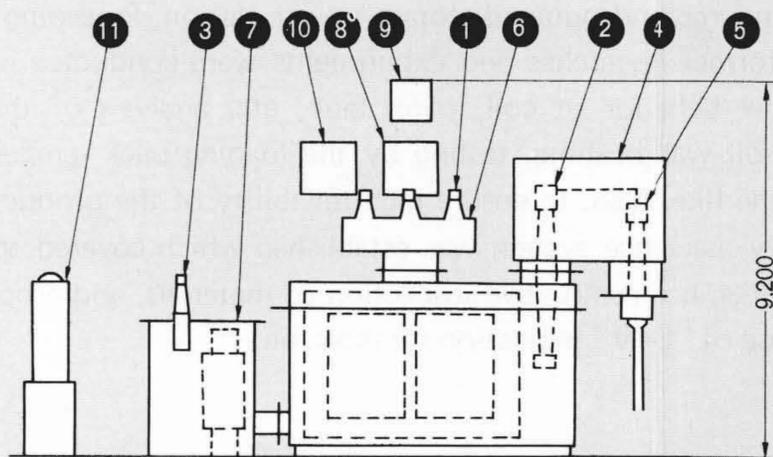


図1 奥多々良木発電所500kV 640MVA変圧器 本変圧器の工場完成姿を示す。

Fig. 1 500kV 640MVA Transformer for Kansai Electric Power Co.



注: 本体油なし重量 458,000kg LVR油なし重量 75,000kg
本体油量 210,000l LVR油量 46,000l



No.	品名	No.	品名
1	一次ブッシング	7	負荷時電圧調整器(LVR)
2	二次ブッシング(壁ぬきブッシング)	8	コンサベータ(本体用)
3	二次中性点ブッシング	9	コンサベータ(ケーブル接続箱用)
4	ケーブル接続箱	10	コンサベータ(LVR用)
5	ケーブルヘッド	11	冷却器
6	低圧リード接続箱		

図2 変圧器外形寸法図 本変圧器の寸法・重量を示すものである。

Fig. 2 Outline of 500kV 640MVA Transformer

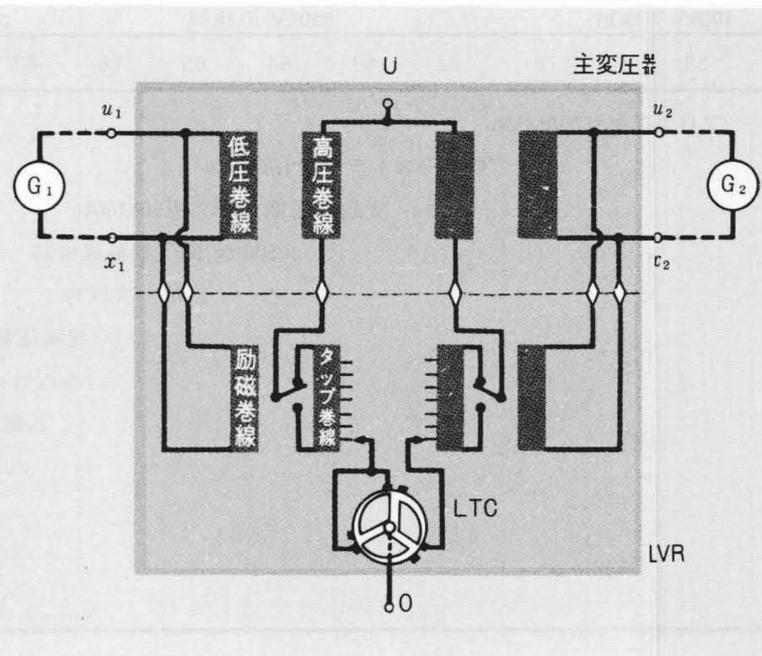
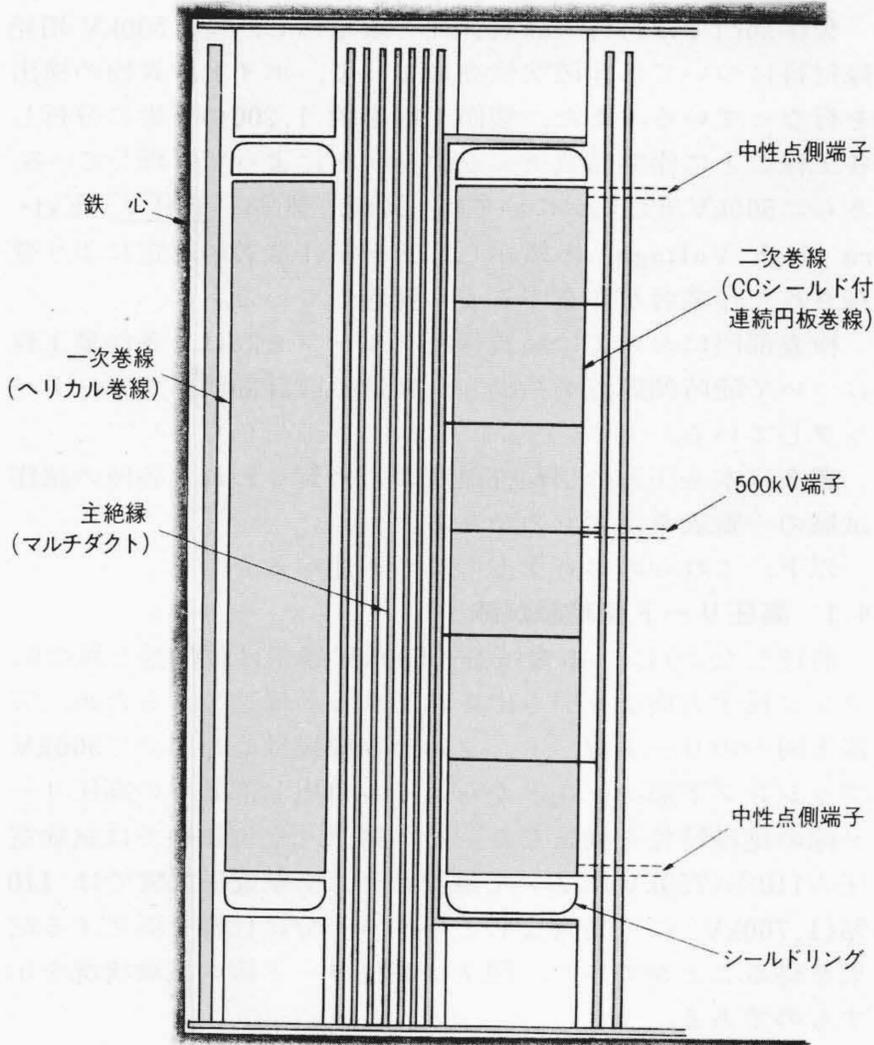


図3 単相分結線図 高圧中性点側に負荷時電圧調整器を別置した単相3台組合せ方式で発電機2台に直結される。

Fig. 3 Schematic Connection Diagram of the Transformer

- (2) 揚水発電所に設置され発電電動機の起動停止が頻繁(ひんぱん)に行なわれるため、ヒートサイクルの問題がある。
- (3) 低圧2回路方式であるため、1回路運転状態における特異現象の有無の確認が必要となる。
- (4) 地下式であるため、現地作業環境の整備が製品の信頼性確保のうえで重要である。

図1は冷却器側からみた外観を、図2は主要寸法を、また図3は単相分結線図を示すものである。



注：タップ巻線はLVRとして別置される。

図4 絶縁構造(巻線の縦断面) C Cシールド付高圧巻線、ヘリカル巻線、絶縁構造とも多くの実績を有する標準構造である。

Fig. 4 Winding Arrangement

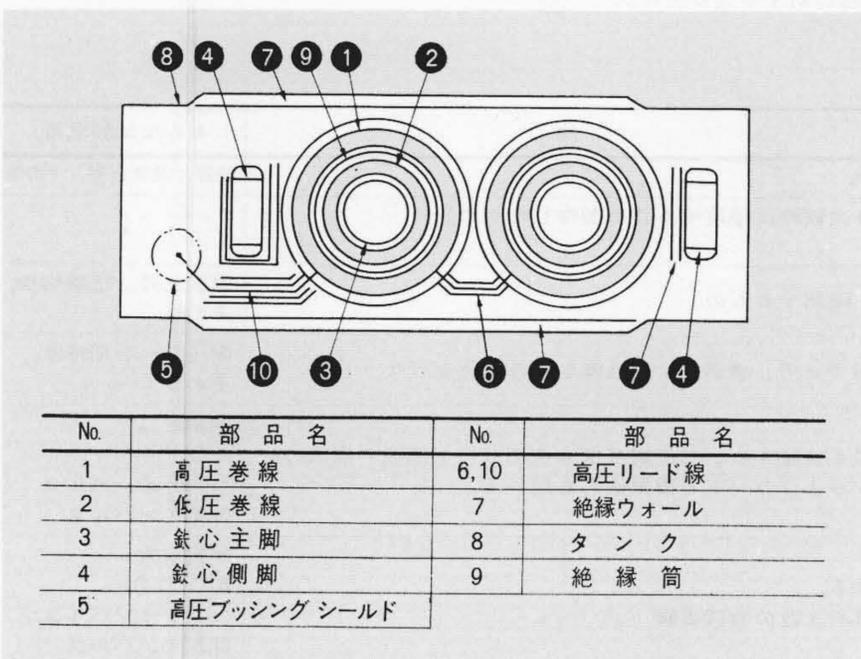


図5 500kV 640MVA主変圧器内部構造図 単相4脚鉄心構造で、高圧リード線はタンク長手方向から引き出されている。

Fig. 5 Internal Assembly of Core & Coils

3 構造

3.1 中身構造

図4は主変圧器の絶縁構造を、図5は内部構造を示すものである。鉄心は単相4脚鉄心構造で、日立製作所標準のバインド鉄心である。二組の高圧巻線は並列であるが、低圧巻線は、低圧2回路間のインピーダンスを大きくするため、1号発電機に接続される低圧巻線と2号発電機に接続される低圧巻線とは異なる鉄心脚に巻回している。

巻線および絶縁構造としては、500kV 1,000/3MVA試作変圧器で十分検証された構造を採用している。

高圧巻線はCCシールド付連続円板巻線、低圧巻線はヘリカル巻線で、いずれも多くの実績を有する標準構造である。

巻線間の主絶縁をマルチダクト構造とし、絶縁筒はすべて高密度プレスボードによる絶縁筒としてコロナ特性を向上させている。

高圧巻線は外側に配置され、タンクなど大地電位と直接対向しており、上下並列として中央より500kV端子を引き出すとともに、タンクに対する絶縁距離を合理的なものとするためタンク中央をふくらませ電界を均等化している。

各部の電界は電子計算機および半導体紙を用いてマッピングによって検討されており、その一例は図6に示すとおりである。

3.2 リード線

図5に示すように、500kV端子は試作器と異なりタンク長手方向へ引き出され、500kV油中壁ぬきブッシングを介して500kV OFケーブルと接続されている。リード線は電界集中がないよう整形された大きな直径を持ち、絶縁紙により油隙(げき)を細分化している。また、リード線、ブッシング下部シールドまで完全に組み立てた状態で輸送するため、現地作業量を低減し、信頼性を向上することができる。この構造は引き続き製作されている500kV変圧器にも採用された標準構造である。

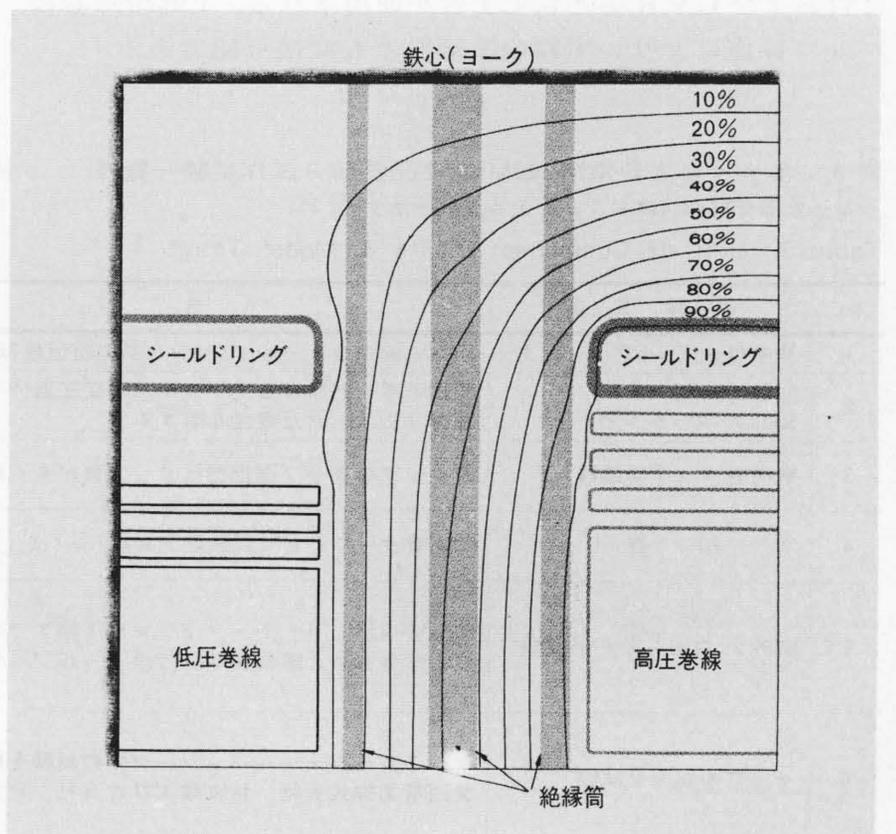


図6 計算機による端部電界マッピング 巻線端部絶縁設計を計算機を用いて行なっている。

Fig. 6 Electric Field Mapping by Computer

ケーブル接続部については、運転時および地震時に変圧器本体の振動がケーブルに伝わらないよう配慮するとともに、現地試験を考慮してケーブルの接続、切離し作業が容易な構造としてある。

3.3 外部構造

輸送制限が過酷であることから、高圧中性点側に単相負荷時電圧調整器(以下、LVRと略す)を別置した単相3台組合せ方式とした。本体とLVRとは油中壁ぬきブッシングを介して接続し、両者の油は分離している。

一次巻線は三角結線2回路であるため、各単相器のカバー上に三相共通の大電流低圧リード接続箱を設けて内部で三角結線を行なっている。

冷却器配管、放圧管など多数の配管が取り付けられているため、これらの配管中の循環電流について検討し、循環電流が流れない構造とした。また配管の熱膨張、収縮を吸収するため、配管の途中に適宜、伸縮継手を設けている。

3.4 500kV油中壁ぬきブッシング

本変圧器には、次のような定格の油中壁ぬき油浸紙コンデンサブッシングを開発使用している。

衝撃耐電圧値：1,800kV

開閉インパルス耐電圧値：1,290kV

交流耐電圧値：840kV, 1分間

定格電流：1,200A

3.5 タップ切換器

タップ切換器としてはLR-K形を使用するが、従来のLR-K形は17タップが最大タップ数であるため、今回27タップのタップ選択器を新しく製作し、切換開閉器と組み合わせた。この新しいタップ切換器に対しては、試験用として1台製作し、形式試験を行なって性能を確認してある。

3.6 冷却器

冷却器は二重管水冷式冷却器で、水側耐圧力30kg/cm²という新設計品であるため、形式試験を行なって性能を確認してある。

冷却器構成は8台+1台(予備)であり、主変圧器第1回路、第2回路負荷損用として各3台、主変圧器無負荷損用として1台およびLVR用として1台が使用される。予備冷却器は、バルブ操作によりいずれの冷却器とも交換可能である。

4 信頼性の向上と確認

超高圧大容量変圧器の製作にあたっては、実績のある過去の製品のデータをフィードバックし、構造その他実績を越えるものがあれば、部分試作あるいは実器試作、実器先行製作を行なって確認する。このため、設計データの検索を折り込んだ性能比較の設計管理図を作成して問題点の摘出と管理を行ない、さらに重要製品については設計検討会議でチェックし、問題点は適宜、試作と設計計算の再検討を行なうことにより解決する。

製作部門では材料の品質管理を厳重にし、特に500kV用絶縁材料については非破壊検査によって、ボイド、異物の検出を行なっている。また、製作工程を約1,200の要素に分析し各工程ごとに作業品質チェックシートによって管理している。さらに500kV変圧器については、図面、製品に「EHV」(Extra High Voltage)と標示し、EHV作業者の認定により登録された作業者が作業するよう管理している。

検査部門においては品質保証グループを設け、各作業工程について随時問題点を指摘し、製造や設計部門へフィードバックしている。

表3は本変圧器の信頼性確認のため行なわれた各種の試作試験の一覧表を示すものである。

以下、これらのおもなものにつき述べる。

4.1 高圧リード線絶縁試験

前述したように、本変圧器の500kV端子は試作器と異なり、タンク長手方向より引き出されている新構造であるため、実器と同一のリード線、タンクおよび模擬鉄心を用いて500kVブッシング下部シールドからコイル口出し部までの高圧リード線の絶縁特性を検証した。その結果、交流試験では試験電圧の110%(750kV)において無コロナ、衝撃電圧試験では110%(1,700kV)にて異常なしという、十分に仕様を満足する結果を得ることができた。図7は高圧リード線の試験状況を示すものである。

4.2 500kV OFケーブル組合せ絶縁試験

本変圧器は、500kVケーブル直結方式としては国内初の製品であるため、図8に示すように実器のウォールブッシング、ケーブル接続箱、500kV OFケーブル(住友電工株式会社製)

表3 奥多々良木発電所640MVA変圧器部分試作試験一覧表
行なった部分試作試験およびモデル試験を示す。

特殊仕様に対する信頼性確認のために

Table 3 List of Component Tests & Model Tests

No.	試作項目	目的	おもな試験項目
1	油中ウォールブッシング	500kV油中ウォールブッシングの特性検証を行なう。	絶縁, 温度上昇, その他
2	6.5mがい管 500kVブッシング	変電所用を対象としているが、本変圧器の一相分試験時に使用するため製作したもの。 油側寸法は1と互換性を有する。	"
3	負荷時タップ切換器	27タップのタップ選択器はタップ数が多く動作を確認するもの。	温度上昇, 短絡切換, その他
4	冷却器	二重管クーラとして試験圧力30kg/cm ² は、新設計であり、構造、冷却性能などの確認を行なうもの。	耐圧力, 冷却特性, その他
5	500kV口出しリード試験	500kV口出しリード~ブッシング下部までの絶縁を検証する。この構造は今後のリード構造の標準の一つとなるもの。実器タンク、ウォールブッシングおよびリードと模擬鉄心を用いる。	絶縁耐力 AC コロナインパルス 開閉インパルス
6	ケーブル組合せ試験	ケーブル~ウォールブッシング間の絶縁を検証する。 関西電力株式会社, 住友電工株式会社, 日立製作所3社の共同実験	絶縁耐力 AC(DC) コロナインパルス 開閉インパルス
7	リード接続箱温度上昇試験	リード接続箱部の局部温度上昇を実器接続箱を使用し確認する。またモデルにより油流を確認する。	温度上昇, 油流
8	タンク応力測定	1/4プラスチックモデルで輸送時の応力を測定, 実器と比較する。	タンク応力, たわみ
9	リードヒートサイクル試験	リード部のヒートサイクルを行ない, 応力集中, 絶縁物の挙動などを測定。	熱応力, 絶縁物挙動

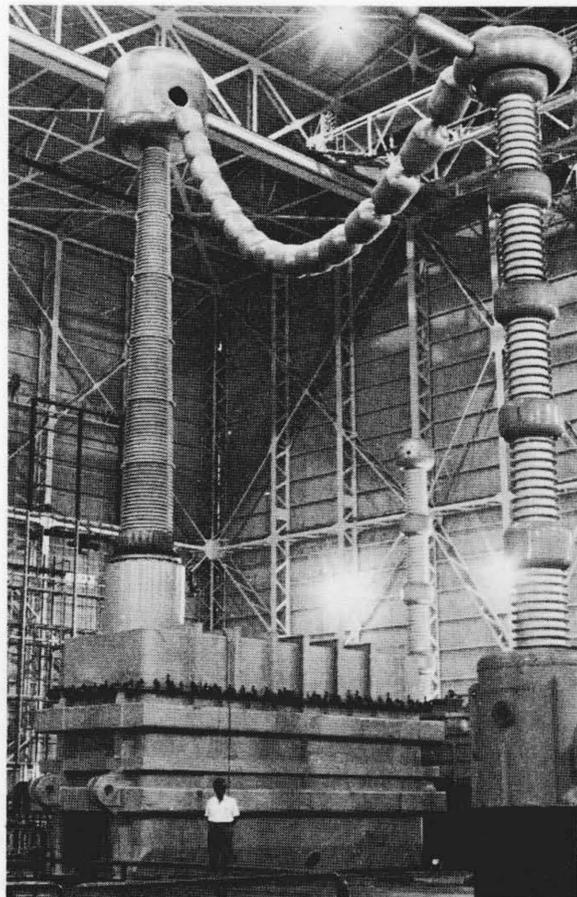


図7 高圧リード線絶縁試験 実器と同一のリード線、実器タンクおよび模擬鉄心を用いて高圧リード線単独の絶縁特性を検証した。

Fig. 7 Insulating Test of High Voltage Lead

を組み合わせ、作業性の検討とともに絶縁特性を検証した結果、交流耐圧試験、コロナ試験ともに無コロナ、またインパルス試験においても異常なしという満足すべき結果を得た。

4.3 低圧リード接続箱試験

低圧リード接続箱には大電流(約6,000A)低圧リード線が12本収納されているため、接続箱内部の冷却特性およびリード線磁界による側板の局部過熱が重要な問題となる。そこで図9に示す実器の1/2スケールプラスチックモデルで油流分布および冷却特性の検討を行なうと同時に、低圧リード接続箱単独で温度上昇試験を実施して局部過熱の有無の検討を行なった結果、局部過熱の面では十分な裕度があることおよび計算機による温度上昇計算値が実測値とよく一致していることを確認することができた。

4.4 リード線ヒートサイクル試験

揚水発電所に設置されるため発電電動機の起動停止が頻繁に行なわれ、ヒートサイクルが問題となる。そこで高圧ブッシング下部からコイル口出し部までの高圧リード線について実器と同一サイズのリード線を製作し、変圧器の寿命に相当する回数および温度変化幅を与えてヒートサイクル試験を行なった。この結果、中心導体と絶縁紙間のギャップの発生、絶縁紙のずれ、損傷などが全くないことを確認した。

4.5 返還負荷法温度上昇試験

実際の運転状態において、変圧器鉄心内の磁束は、励磁電圧による磁束と、負荷電流による漏えい磁束とが重畳したものとなっている。したがって、低圧2回路方式である本変圧器の場合、2回路運転状態では、鉄心内磁束分布は対称となるが、1回路運転状態では鉄心内磁束分布は非対称となる。この非対称磁束分布による異常現象有無の確認のため、通常行なわれる励磁試験および短絡試験に加えて、励磁すると同時に負荷電流を流し、工場において実際の運転状態を実現する返還負荷法温度上昇試験を実施した。

返還負荷法温度上昇試験は、同一定格の変圧器が2台ある場合に可能な方法で、小容量の変圧器では用いられるが大容量変圧器では前例のない試験である。

図10は本変圧器の返還負荷法温度上昇試験結線を示すもの

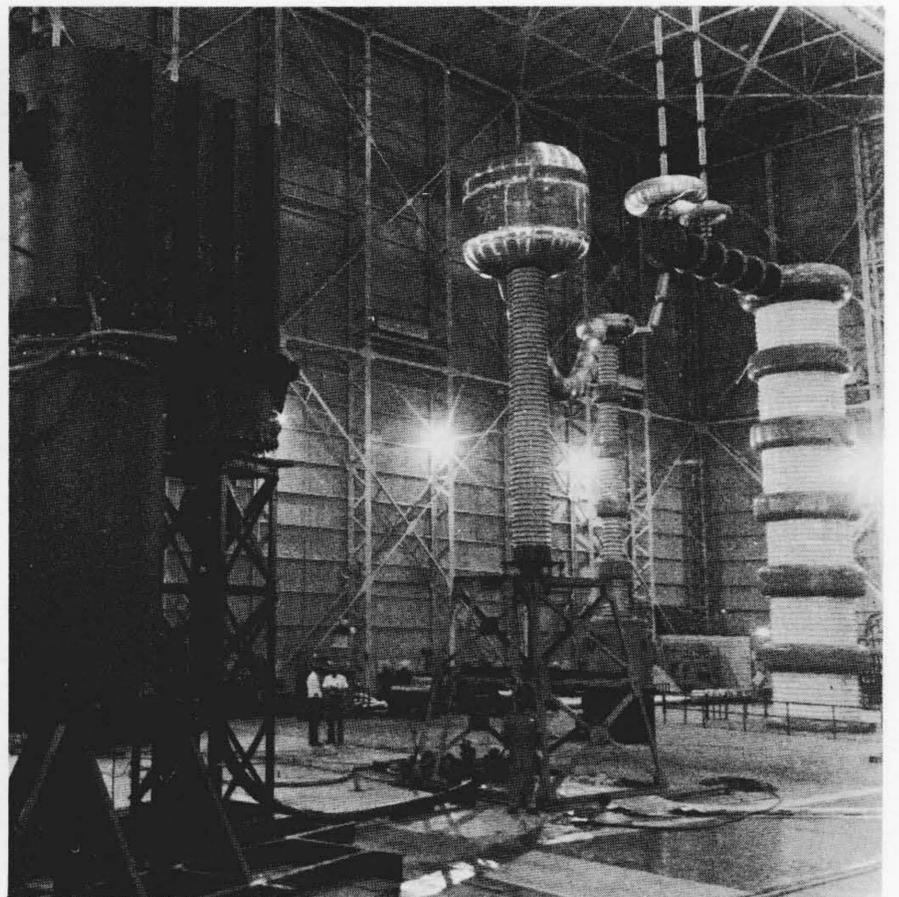


図8 ケーブル組合わせ絶縁試験 実器のウォールブッシング、ケーブル接続箱、500kV OF ケーブルを組み合わせ、絶縁特性を確認した。

Fig. 8 Insulating Test with Cable Included

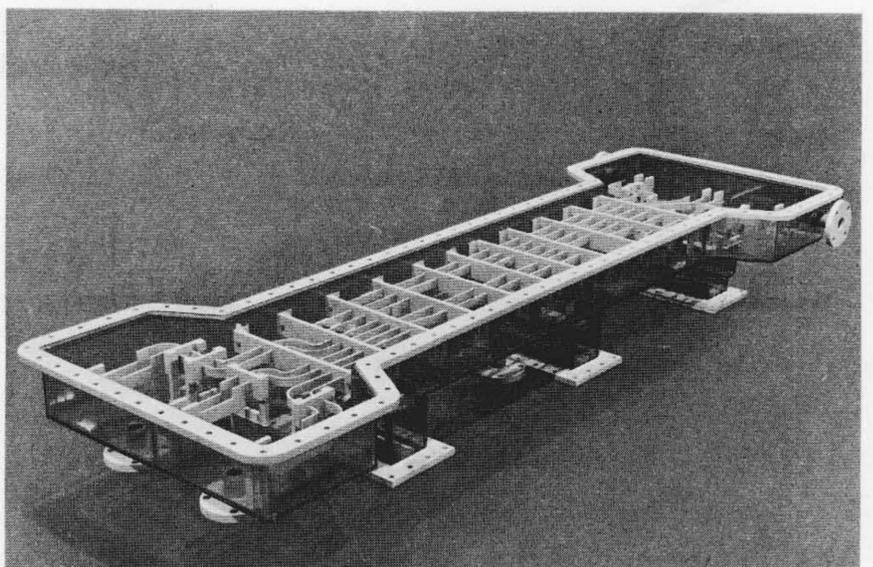


図9 低圧リード接続箱油流モデル 単相器のカバー上に三相共通の低圧リード接続箱を設けて三角結線するが、内部油流分布検討のため1/2スケールプラスチックモデルを製作した。

Fig. 9 Model of Oil Chamber for Low Voltage Lead Connection

である。U相変圧器とV相変圧器を使用し、低圧巻線は並列接続して無負荷損供給電源に接続し、高圧巻線は直列接続して中性点側に負荷損供給電源を直列に接続する。これによりU相変圧器で1回路電動機運転、力率1の全負荷運転を模擬して10時間通電した。その結果、1回路運転を行なっているU相変圧器の温度上昇値は通常の短絡試験法による実測値とよく一致していること、超音波マイクによる内部音測定結果、ガス分析結果などにおいて、全く異常がみられないことが確認され、1回路運転における信頼性を実証することができた。

4.6 現地作業の信頼性向上

500kV変圧器の信頼性は工場での作業条件ばかりでなく、現地組立条件においても完全な状態が保持されていなければならない。このため、現地作業環境の整備には十分な注意を払った。すなわち、工事中の発電機室および機器搬入路から

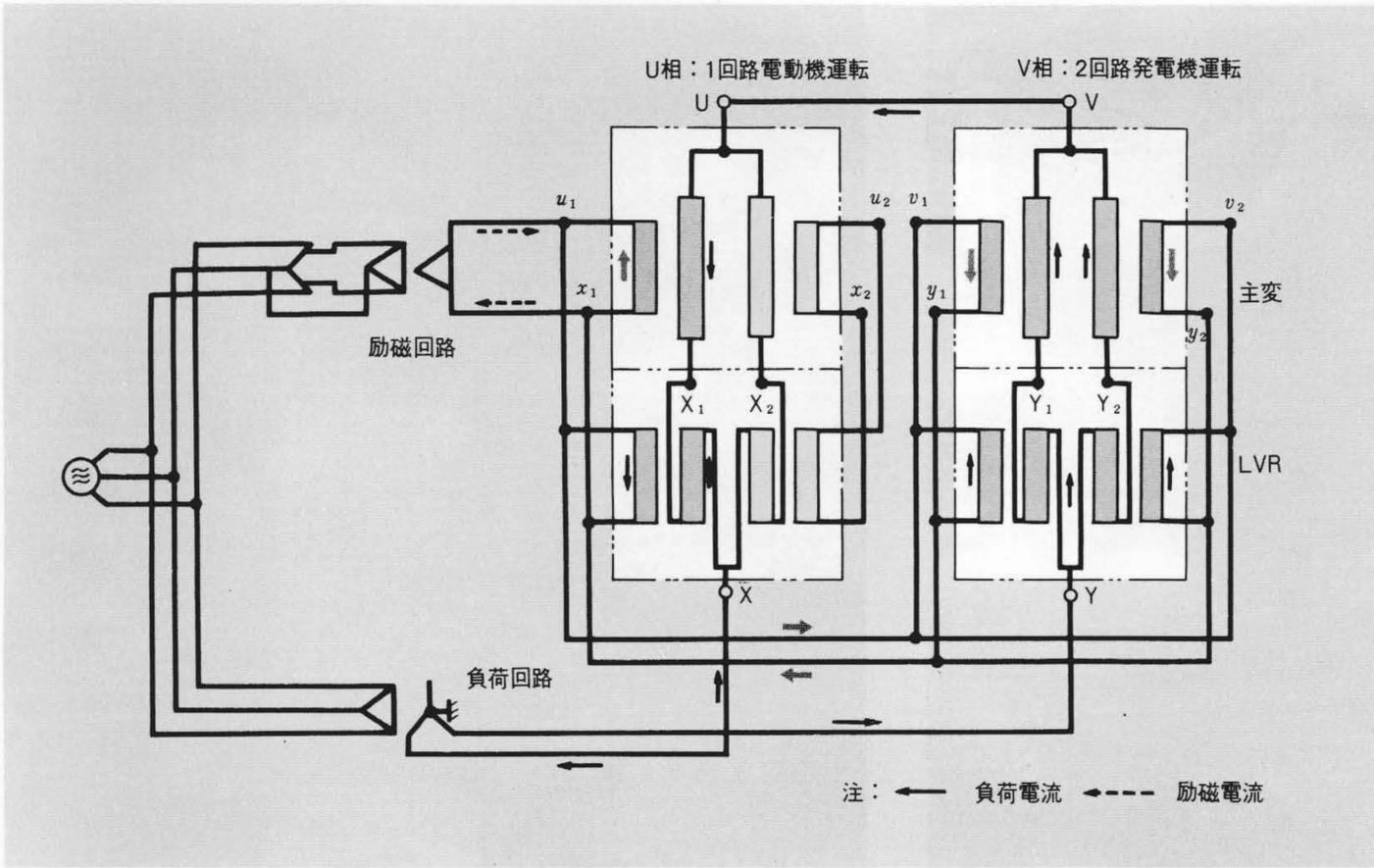


図10 返還負荷法試験結線
 図 1回路運転時における異常現象の有無の検討のため実際の運転状態を工場において模擬するために行ない、異常ないことを確認した。

Fig. 10 Connection Diagram of Loading Back Method

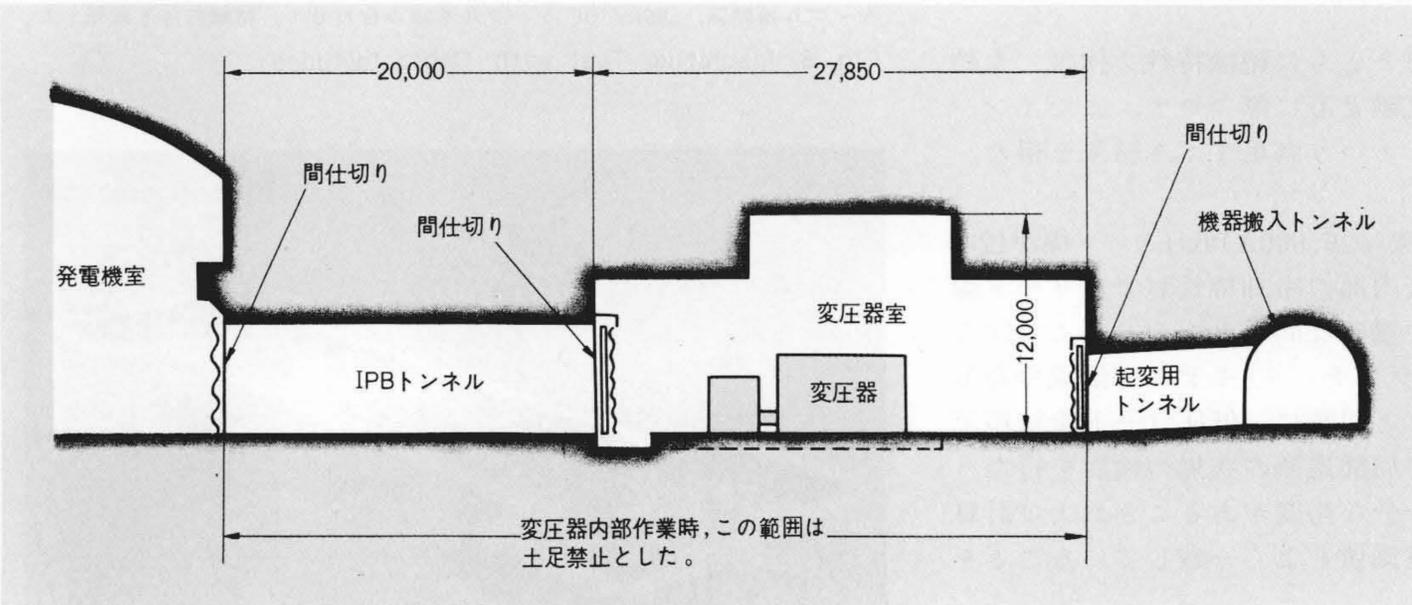


図11 変圧器室の防塵対策
 現地作業の信頼性向上のための防塵対策を示す。

Fig. 11 Dust-proofing Measure at Site

の塵埃(じんあい)を防止するため図11に示すような間仕切りを設けた。また夏季には、90%にも達する高湿度であるため、空調機により除湿するとともに、常時自動記録計により温度および湿度を記録し、一定時間ごとの降下塵埃量を測定し管理した。

これらの対策により、現地の作業環境を工場の空調室内と同等とすることができ、現地作業の信頼性を高めることができた。

5 試 験

500kV 単相組合せ三相変圧器であるため、高圧側絶縁試験は、単相にて500kV 油中壁ぬきブッシングまで組み立てた状態で行ない、さらに三相試験で銅損、鉄損などの特性を確認した。

絶縁試験としては、衝撃電圧試験、開閉インパルス試験、誘導耐圧試験、長時間コロナ試験および長期課電試験を行なった。

衝撃電圧試験はBIL 1,550kV、開閉インパルス試験は1,290kVを印加した。

交流耐圧試験(680kV、1分間)および475kV 2時間の長時間

コロナ試験は、全く無コロナであり、さらに1年間課電に相当する381kV 33時間の長期課電試験においても、全く無コロナという満足すべき結果を示し、絶縁上の信頼性がきわめて高いことを実証できたと考える。

6 結 言

以上述べたように、種々の点で記録的であり特殊仕様である奥多々良木発電所500kV 640MVA変圧器の信頼性は、各種のモデル試験、実器の部分試作試験および実器による確認試験によって、絶縁、漏えい、冷却などの諸特性の面で十分検証することができた。この経験を生かし今後の500kV変圧器の信頼性向上に努力を重ねる所存である。

終わりに、本変圧器の完成にあたり種々ご指導いただいた関西電力株式会社の関係各位に深く謝意を表わす次第である。

参考文献

- (1) 中川ほか：日立評論BPA(アメリカ)納525kV変圧器51, 547 (昭44-6)
- (2) 鹿島ほか：日立評論500kV 1,000/300MVA単巻変圧器 55, 219 (昭48-3)