

525kV 1,100MVA三相変圧器実用化検証試験

Confirmation of Reliability for 525kV 1,100MVA Three-phase Transformer

このたび日立製作所は、東京電力株式会社袖ヶ浦火力発電所4号機用525kV 1,100MVA三相変圧器を完成し納入した。

この変圧器は、製作に先行して各種要素モデル、実規模変圧器の試作により徹底した試験を行ない、大容量化に伴って生じやすい問題点をあらゆる面から検討しながら、信頼性を確認した上で完成したものである。

特に、低圧大電流引出部の局部過熱、流動帯電による放電に対し十分裕度のある構造とした。

栗田健太郎* *Kentarô Kurita*
日向成行** *Shigeyuki Hyuga*
丸山勝也** *Katsuya Maruyama*
前島正明** *Masaaki Maejima*
鎌田 譲*** *Yuzuru Kamata*

1 緒 言

日立製作所では、このほど東京電力株式会社袖ヶ浦火力発電所4号機用525kV 1,100MVA三相変圧器を完成し納入した。

この変圧器は国内でも最大級の容量であるとともに、LNG（液化天然ガス）を燃料とする火力発電所用であることから、特に信頼性を最重点として設計、製作した。

このような超大容量化の傾向に対処するため実器の製作に先行して、数年来、鉄心、巻線タンクなど約70項目にわたる要素モデルにより基本的諸特性を確認するとともに、計算手法の開発、見直しを行なってきた。また、これらの成果を基にして525kV 1,200MVA実規模変圧器を試作し、過酷試験、鉄心、巻線タンクなどに約2,000点のセンサを埋め込んでの特殊試験による計算精度の確認、更に試験完了後解体しながらの細密点検による製作時の品質管理水準の検証など、製品では実施しにくい手法も採り入れ、問題点を摘出してその対策を確立した。

今回の変圧器は、上記した実規模試作器で検証された計算手法、材料、構造、製作法、品質管理法など漏れなく適用し、更に鉄心、巻線、低圧大電流引出部など各製作段階でもそれぞれ予備試験を実施し、信頼性の確認を行ないながら製作を進めた。

また多くの現地試験（例えば数箇月にわたる流動帯電試験）を実施して、信頼性の確保に万全を期した。

以下、525kV 1,100MVA三相変圧器の概要、信頼性確認のため実施した実証試験について述べる。

2 仕 様

この変圧器は東京電力株式会社袖ヶ浦火力発電所で、発電機電圧を直接525kVに昇圧するものであり表1に主な仕様を、図1にその外観を、また図2に主要寸法を示す。

3 構 造

3.1 鉄 心

大容量変圧器の大形鉄心では、無負荷損、励磁電流のほかには局部過熱、振動、騒音、輸送強度などが重要な課題である。

各種の要素モデルにより、その精度を確認した計算法^{1)~3)}を駆使して各部の磁束分布、固有振動数、温度上昇などを詳細に計算し、最適接合方式、断面構造を決定した。

また、高圧巻線誘導試験時に中性点に必要以上の電圧を発

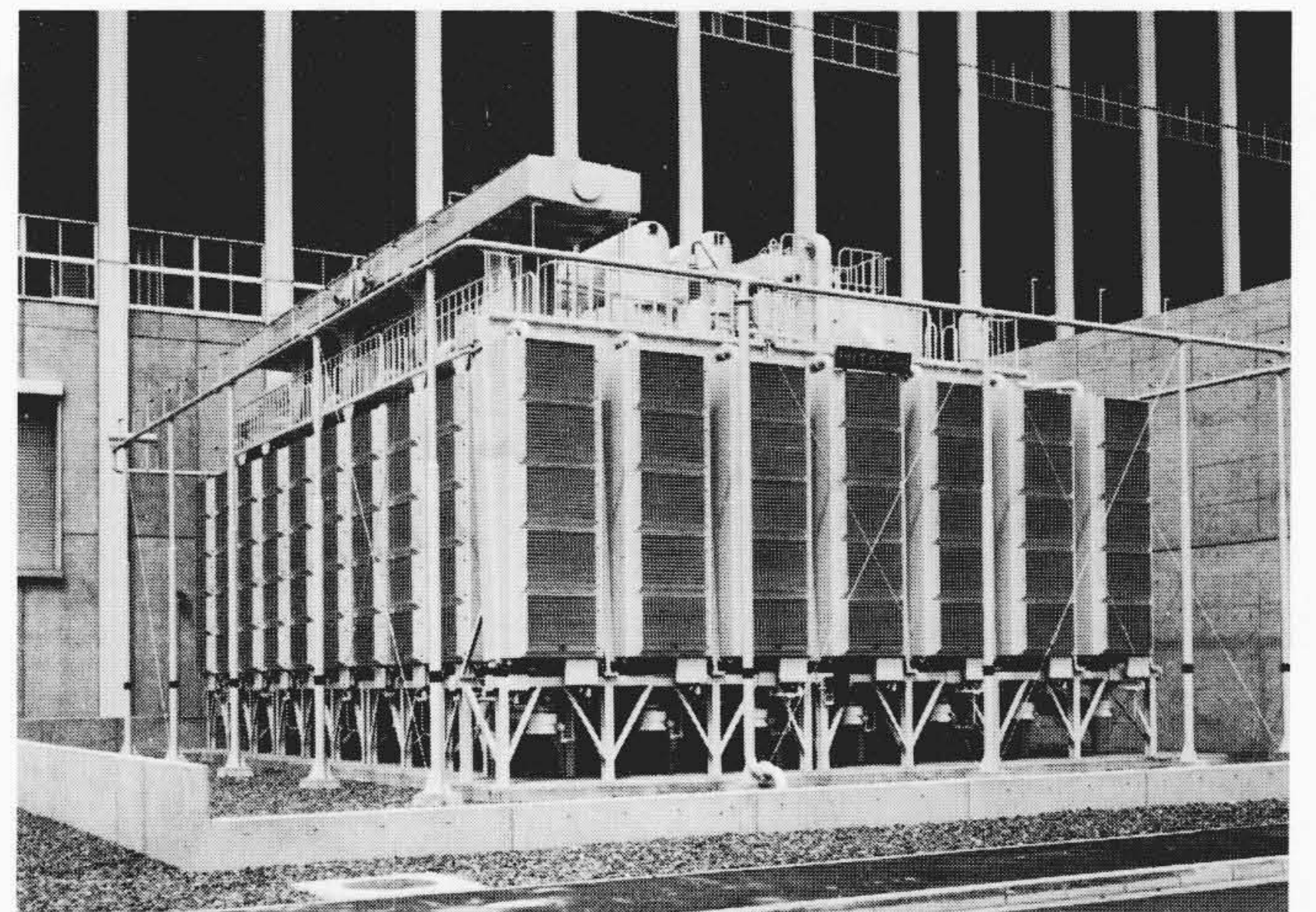


図1 525kV 1,100MVA三相変圧器の外観 本変圧器の現地完成姿を示す。

表1 525kV 1,100MVA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	内鉄形送油風冷式三相変圧器
容 量	1,100MVA
電 圧 及 び 結 線	一次側：19.5kV 三角形結線 二次側：F550-F537.5-R525-F512.5kV 星形結線
絶 縁 階 級	一次側：20号 二次側：500号L（線路側）、60号（中性点側）
周 波 数	50Hz
インピーダンス電圧	15%
騒 音	75ホン以下

生させないように5脚鉄心とした。

一方、締付圧力が均等なバインド方式として無負荷損、振動及び騒音を低減するとともに、つり上げ、輸送、地震などに対して十分な強度をもたせた。図3に鉄心を示す。

3.2 巻 線

大容量変圧器では漏れ磁束による巻線、タンクなどの構造物の局部過熱対策が重要な課題である。

* 日立製作所電力事業本部 ** 日立製作所国分工場 *** 日立製作所日立研究所

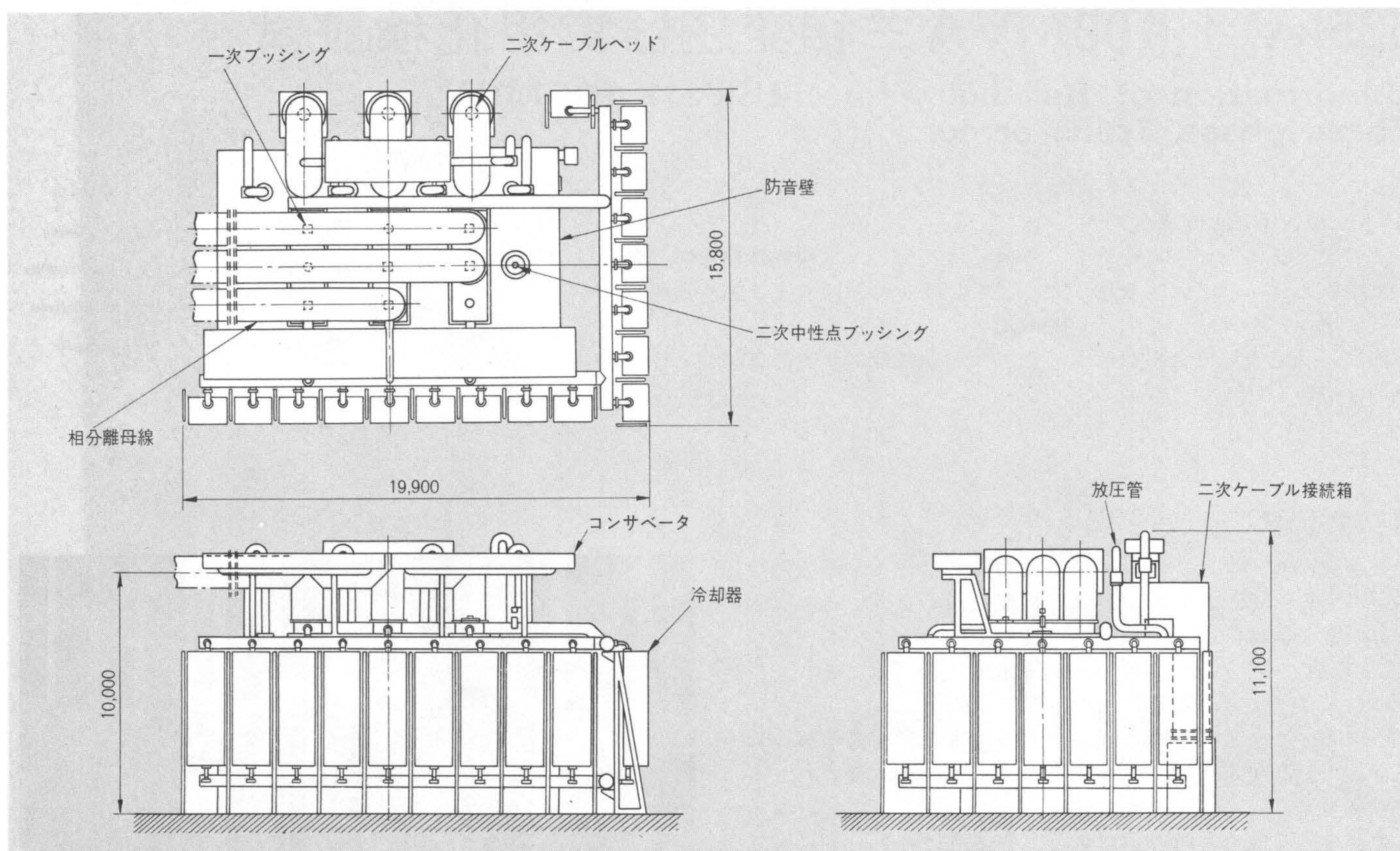


図2 525kV 1,100MVA三相変圧器寸法図 一次側は相分離母線に、二次側はエレファント構造で、OFケーブルに直結される。

各種の要素モデルにより、その精度を確認した計算法を駆使して各部の3次元磁界解析、循環電流、漂遊損、巻線内油流分布、温度上昇、巻線短絡強度などを詳細に計算し機械的、熱的に最適な構造とした。

高圧、低圧巻線とも転位電線を採用して、漂遊損、循環電流の低減を図るとともに、連続巻き構造により導体の接続をなくして信頼性の向上を図った。

更に、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。なお、低圧大電流リード線は各相4分割し、短絡電流に対する機械的強度をもち電界の集中しに

くい大口径の銅パイプを主体とした構造とし、また循環電流が大きくならぬよう巻線からの漏れ磁束に対して対称に配置した。

一方、絶縁に関しては、これまでの変電所用500kV変圧器の経験を生かし、電位振動、電界強度の解析を行ない十分な裕度を確保した。更に、実規模試作器でその裕度を確認した。

大容量器になると、送油量の増加に伴い発生する油中電荷が増大し、これが絶縁物表面に蓄積され部分的に電界が高くなって放電する、いわゆる流動帯電現象が起こる可能性がある。日立製作所では、各種要素モデルにより検証した計算手法^{4),5)}を用いて、流動帯電による電荷が蓄積されやすい巻線下部絶縁物周辺の電位分布計算を行ない、適正油流速、構造の決定、積極的な角とりなどにより、放電に対し十分裕度のある構造を採用した。図4にその計算例を示す。

3.3 タンク

大容量変圧器では、タンクも大形化するので耐真空強度、耐内圧強度のほかに振動、地震なども考慮されねばならない。このため有限要素法により静荷重だけでなく、動荷重も考慮し応力集中の少ない合理的な構造を考察し、無理なく力が伝達され応力集中が生じないように楕円たてステータ形タンクとした。またタンクとカバー間の力の伝達流れを改善するため、それぞれのステータを高張力ボルトで連結して剛結する接合方式とした。なお、静的強度を確認するため相似縮小モデル(縮尺比 $\frac{1}{4}$)による加圧試験を行ない、耐内圧強度が 5 kg/cm^2 以上あることを確認した。また大形化すると固有振動数が低下し、地震時に共振も考えられるので $0.3g$ 正弦共振3波で解析を行ない、タンク底ステータを基礎埋込み金具に溶接するなど、配慮した。図5にその計算例を示す。

一方、巻線漏れ磁束、リード線磁束による局部過熱防止用

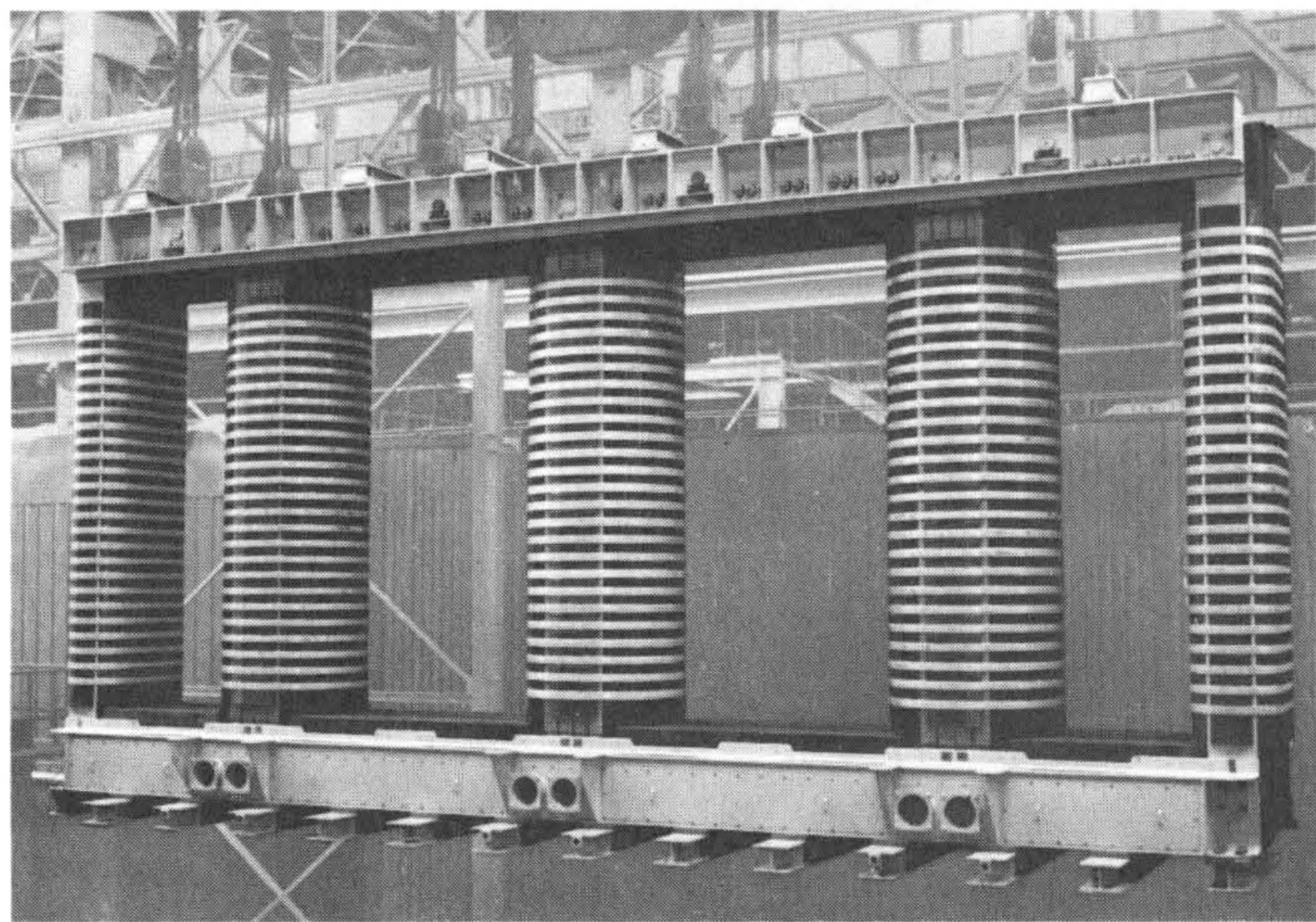


図3 525kV 1,100MVA三相変圧器鉄心 製作過程で仮巻線して無負荷損、振動、騒音、磁束分布など諸特性を詳細に測定し、信頼性を確認した。

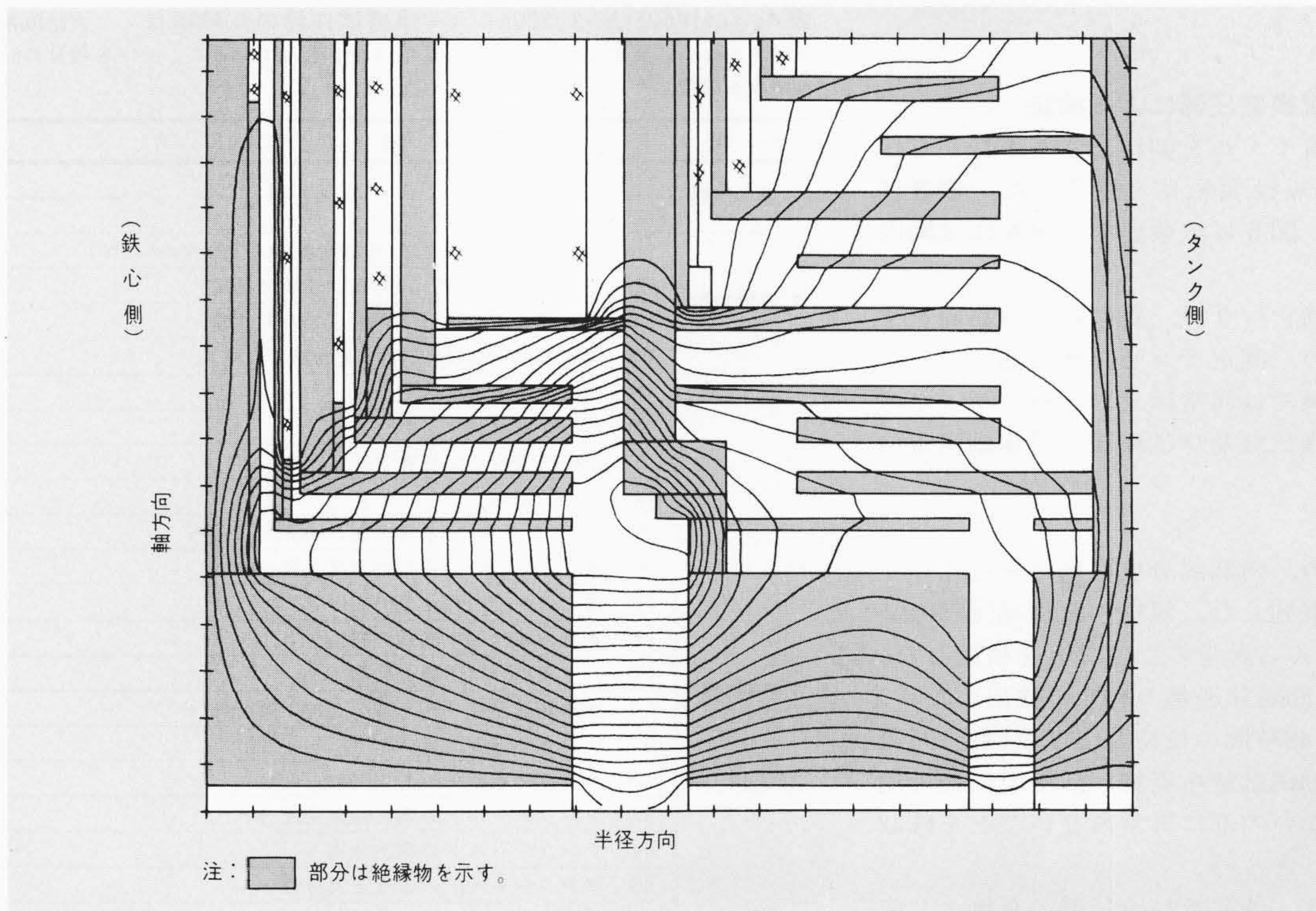


図4 流動帯電による巻線下部絶縁物油導部の等電位線分布 油中電荷による等電位線分布を示す。間隔の密なほど高電界になり放電しやすい。設計段階でこの電界解析を行なって、放電に対して十分裕度のある構造を決定できる。なお、この電界解析はポアソンの方程式から求める。

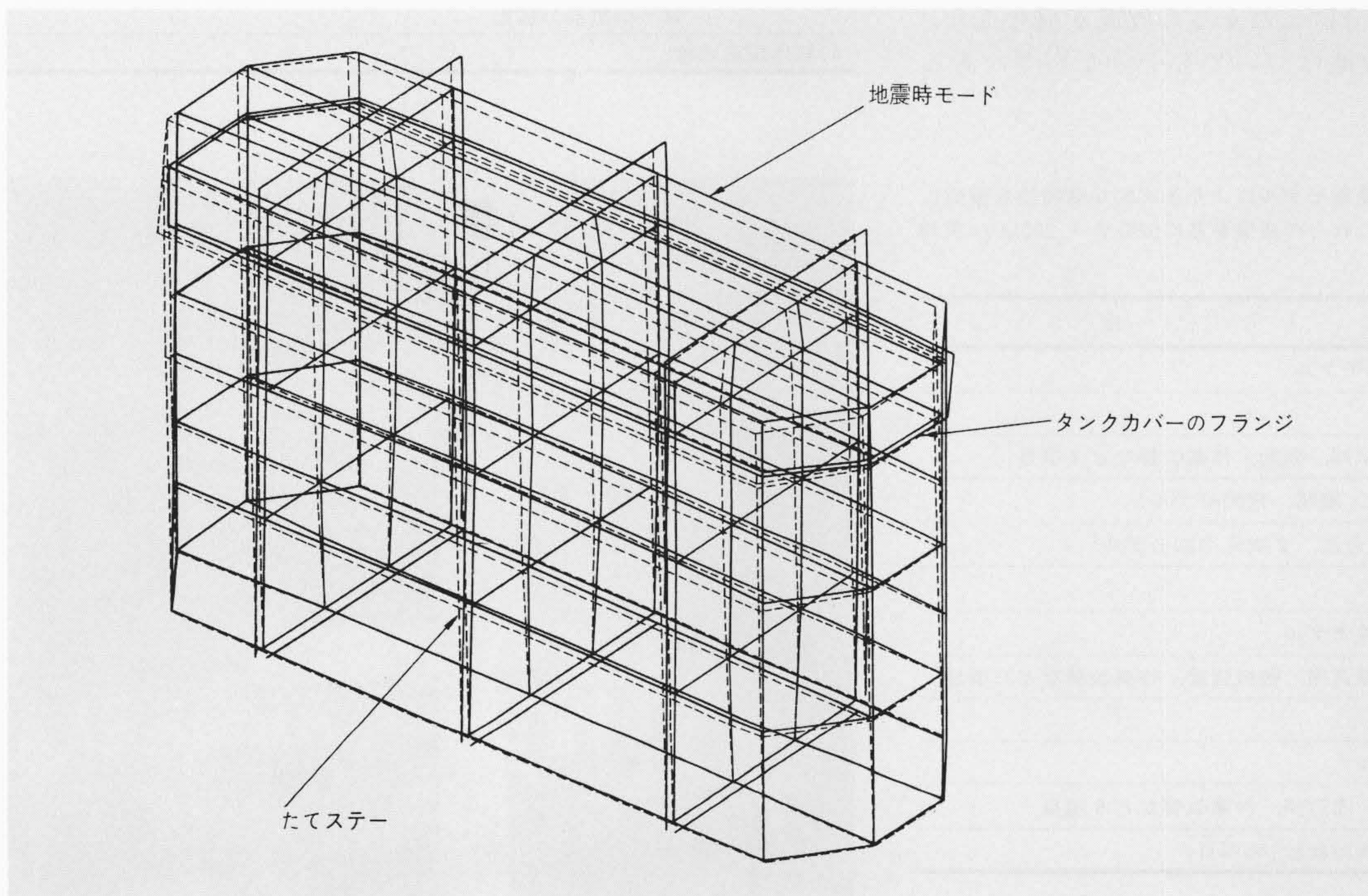


図5 タンクの地震に対する動的解析例 有限要素法により0.3g正弦共振3波で解析し、タンク底ステーを基礎埋込み金具に溶接するなど配慮した。冷却器、防音壁、コンサベータなども同様に解析し、補強など対策を実施した。

のシールドは、多年の実績に基づき信頼性の高い銅板をタンク内側に直接溶接する構造とした。

3.4 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うず電流が流れる。シールド法を誤まるとその周辺部で局部過熱を起こしてしまう。このため、実規模大電流引出部のモデルを製作し漏れ磁束、局部過熱などあらゆる面からの検討⁶⁾を行なった。その結果、相分離母線接続箱のフランジとブッシング取付座とを電氣的に接続することにより、引出部周辺の漏れ磁束が10G以下となり、ほとんど温度上昇がなくタンクの他の部分と同程度に抑えることができた。

4 製作

高電圧・大容量変圧器のため、設計段階で過去の実績、要素モデル、実規模試作器による検証結果を完全に反映するため、徹底してデザインレビューを実施した。また製造工程を約1,200の要素に分解し、各工程ごとに作業品質チェックシートによって管理した。特に、重要作業については作業者の技術認定を行ない、これに登録された作業者が作業を行なうように管理した。一方、工場での製作、試験から現地据付に至るまで各作業工程で専任の品質保証グループにより随時問題点を摘出し、設計、製造部門へのフィードバックを行なった。

5 実証試験

5.1 525kV 1,200MVA 実規模変圧器による検証

表 2 に示す約70項目の要素モデルを製作し、基本特性を確認後、525kV 1,200MVA 実規模変圧器を試作した。表 3 に実規模試作器の主な仕様を、図 6 に試験姿を、表 4 に試験内容の要約を示す。

通常試験のほかに過酷試験を行ない、更に各種計算値を検証して信頼性を確認するため、測定センサを埋め込んでの特殊試験を実施した。通常試験では異常は認められなかったもので、ここでは過酷試験、特殊試験及び試験後の解体細密点検の概要について述べる。

(1) 過酷試験

絶縁の裕度を確認するため、内部部分放電検出を行ないながら商用周波過電圧試験を実施した。規定の試験電圧750kV の140%の電圧を印加し、なんら異常のないことを検証した。

巻線、鉄心を対象とした内部局部過熱の有無の検出のため、最大電流の110%電流による48時間の長時間温度試験、105%電圧による48時間の長時間励磁試験を実施し、その前後で油中可燃性ガス分析などを行ない内部に異常のないことを確認した。

また、パラメータを油温度、課電及び冷却器の有無とし定格送油量の4倍まで送油して流動帯電試験を実施した。図 7 に示すように、送油量を約4倍にしたところ放電が発生した。この結果、流動帯電による放電についても十分な裕度がある

表 2 要素モデル試験要約 要素モデルにより基本的な諸特性を確認し、計算手法の開発、見直しを行ない、これらの成果を基に525kV 1,200MVA 実規模変圧器を試作した。

分 類	項 目
鉄 心	$\frac{1}{25}$ 縮小磁束分布モデル
	剛性モデル
	他に材料特性、冷却、振動、作業改善など7項目
巻線・リード線	絶縁モデル(対地、層間、相間モデル)
	冷却モデル(分岐合流、2次元冷却モデル)
	流動帯電モデル
	低圧巻線循環電流モデル
	他に移行電圧、漂遊損、機械強度、作業改善など33項目
タ ン ク	$\frac{1}{4}$ 縮小モデル
	曲面板座屈モデル
	他にタンク強度、漂遊損、作業改善など8項目
その他 保護及びまとめ関係を含め総計 66項目	

表 3 試作525kV 1,200MVA 実規模変圧器の仕様 110%電流による長時間温度試験及び60Hzでの長時間励磁試験を実施しているので、容量約1,600MVAまで検証済みである。

項 目	仕 様
形 式	内鉄形送油風冷式三相変圧器
容 量	1,200 MVA
電 圧 及 び 結 線	一次側：18.525 kV 三角形結線
	二次側：F 550-F 537.5-R 525-F 512.5 kV 星形結線
絶 縁 階 級	一次側：20号
	二次側：500号L(線路側)、60号(中性点側)
周 波 数	50/60 Hz
インピーダンス電圧	15/18 %

表 4 試作525kV 1,200MVA 実規模試作器の試験項目 表記の各試験を行ない、実規模試作器が十分な信頼性をもっていること及び各項目の計算精度を確認した。

分 類	試 験 内 容
1. 通常試験	(1) 特性試験
	(2) 耐電圧試験
2. 過酷試験	(1) 商用周波過電圧試験(規定の耐電圧750kVの140%)
	(2) 長時間温度試験(110%電流48時間通電)
	(3) 長時間励磁試験(105%電圧48時間課電)
	(4) 流動帯電検証試験(定格送油量の4倍)
3. 特殊試験	(1) 鉄心の磁束密度分布
	(2) 鉄心の漏れ磁束密度分布
	(3) 鉄心の温度上昇分布
	(4) 鉄心の振動
	(5) 鉄心(ヨーク)締金具の漏れ磁束密度分布
	(6) 鉄心(ヨーク)締金具の温度上昇分布
	(7) 鉄心(ヨーク)締金具の曲げ応力
	(8) 巻線の漏れ磁束密度分布
	(9) 低圧巻線の循環電流分布
	(10) 巻線端部及びリード線の温度上昇分布
	(11) タンクの温度上昇分布
	(12) タンクの振動モード、応力、変位
	(13) タンクシールドの漏れ磁束密度分布
	(14) タンクシールドの電流分布
	(15) タンクシールドの温度上昇分布
	(16) 低圧大電流ブッシング引出部のシールドの電流分布
	(17) 低圧大電流ブッシング引出部のシールドの温度上昇分布
	(18) 付属品の振動
4. 解体細密点検	



図 6 試作525kV 1,200MVA 実規模変圧器の試験 高圧側はケーブル直結構造であるが、工場試験時には高圧ブッシングを取り付けた。

ことを検証した。なお、実器である525kV 1,100MVA 変圧器では巻線下部絶縁物構造に改善を加えて、更に余裕をもたせた。

(2) 特殊試験

表4に示す鉄心、巻線などの磁束密度、温度上昇、応力などを約2,000点のセンサを使用してマイクロに測定した結果、実規模試作器が十分な信頼性をもっていること及び計算値と測定値がほぼ一致することが検証された。

(3) 解体細密点検

試験終了後、解体しながらの細密点検により放電こん跡、局部過熱、変形、異物の混入などについて詳細に調査したが、いずれも全く異常は認められず品質管理の妥当性も検証できた。

5.2 525kV 1,100MVA 三相変圧器の予備試験

今回の変圧器は、前述した実規模試作器で検証された計算手法、構造、品質管理法などを適用しているが、更に鉄心、巻線、低圧大電流引出部などの各製作段階でもそれぞれ表5に示す予備試験を行ない信頼性の確認をしながら製作を進めたが、なんら異常は認められなかった。

このうち特に、大容量化に伴い問題となる低圧大電流引出部の試験について述べる。

実規模低圧大電流引出部モデルを製作し、温度上昇部位が検出しやすいこと、磁束密度、うず電流密度、温度上昇などが詳細に測定できることなどから特に気中で試験した。図8にその外観を、図9に測定結果を示す。相分離母線接続箱の

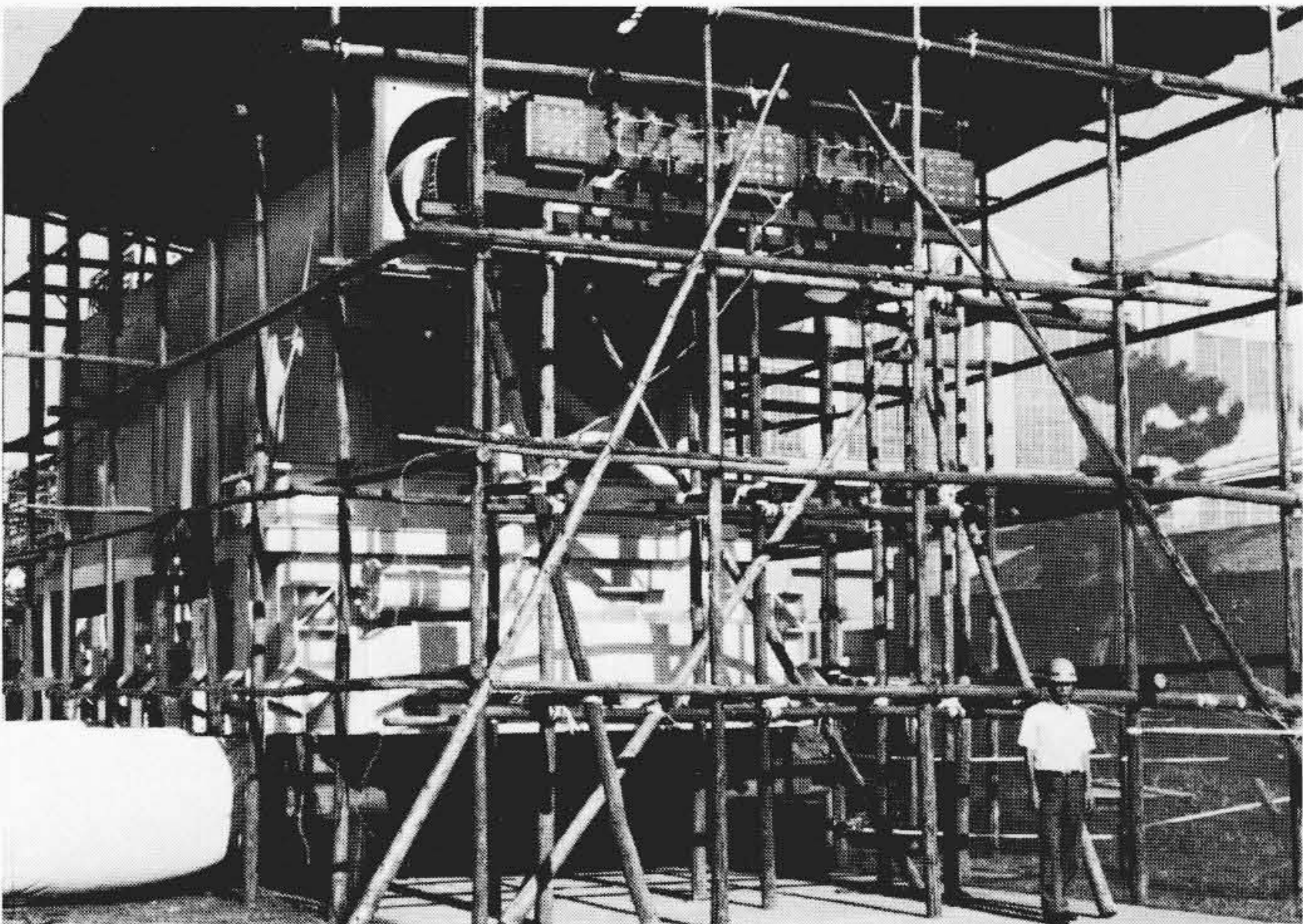


図8 実規模低圧大電流引出部モデルの外観 温度上昇部位が検出しやすいこと、磁束密度、うず電流密度、温度上昇などが詳細に測定できることから、特に気中で試験を行なった。

表5 525kV 1,100MVA三相変圧器の予備試験要約 各製作段階で予備試験を行ない、信頼性を確認しながら製作を進めた。その結果、なんら異常は認められなかった。

分 類		検 証 事 項
鉄	心	各部の磁束密度 振動，騒音
		電位分布，漏れ磁束密度 低圧巻線の循環電流
巻	線	ブス電流，相分離母線接続箱のシース電流 各部の漏れ磁束密度，フランジのうず電流密度 各部の温度上昇

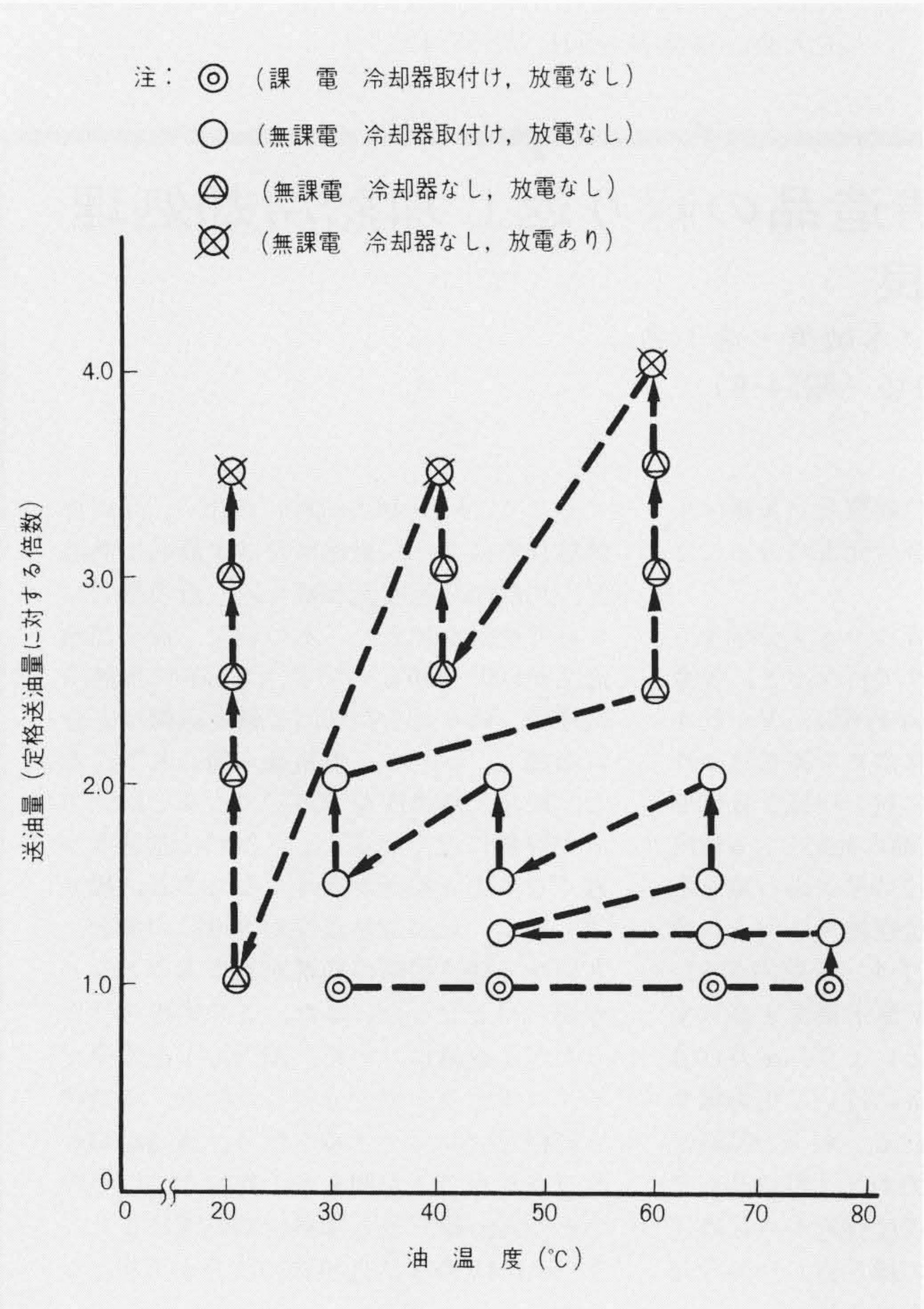


図7 流動帯電試験順序と試験結果 流動帯電による放電に対する裕度は約4倍であることを確認したが、525kV 1,100MVA変圧器では改善を加え更に余裕をもたせた。

フランジとブッシング取付座を電氣的に接続したので、引出部周辺の温度上昇は気中の定格電流試験でもたかだか13.5degであった。油が使われる実際の条件では、空気と油の熱伝達の換算より数デグリーと推定され、実際に実器で測定したところわずか4 deg (油からの温度上昇)で、十分な裕度があることが確認できた。

一方、現地据付に際しても流動帯電試験を実施し、6箇月の長期にわたって巻線接地電流の監視を行ない電流値が1μAと小さいこと、また良好な再現性が得られたこと、更に超音波マイクロホンとロゴスキーコイルを併用した検出でも無コロナであったことなどから、流動帯電による放電に対して十分余裕のあることが実証できた。

6 結 言

東京電力株式会社袖ヶ浦火力発電所向けとして製作した525kV 1,100MVA三相変圧器の概要と、その製作に先立って実施した実証試験の一部について紹介した。今回の実証試験によって、実器に対する設計、製作及び品質管理の妥当性について十分検証することができ、また今後更に大容量、高電圧化する変圧器を製作するための貴重な資料を得ることができた。

最後に、この変圧器を製作する機会を与えていただくとともに、1,200MVA実規模変圧器の試作及びこの1,100MVA変圧器の設計、製作試験の検証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。

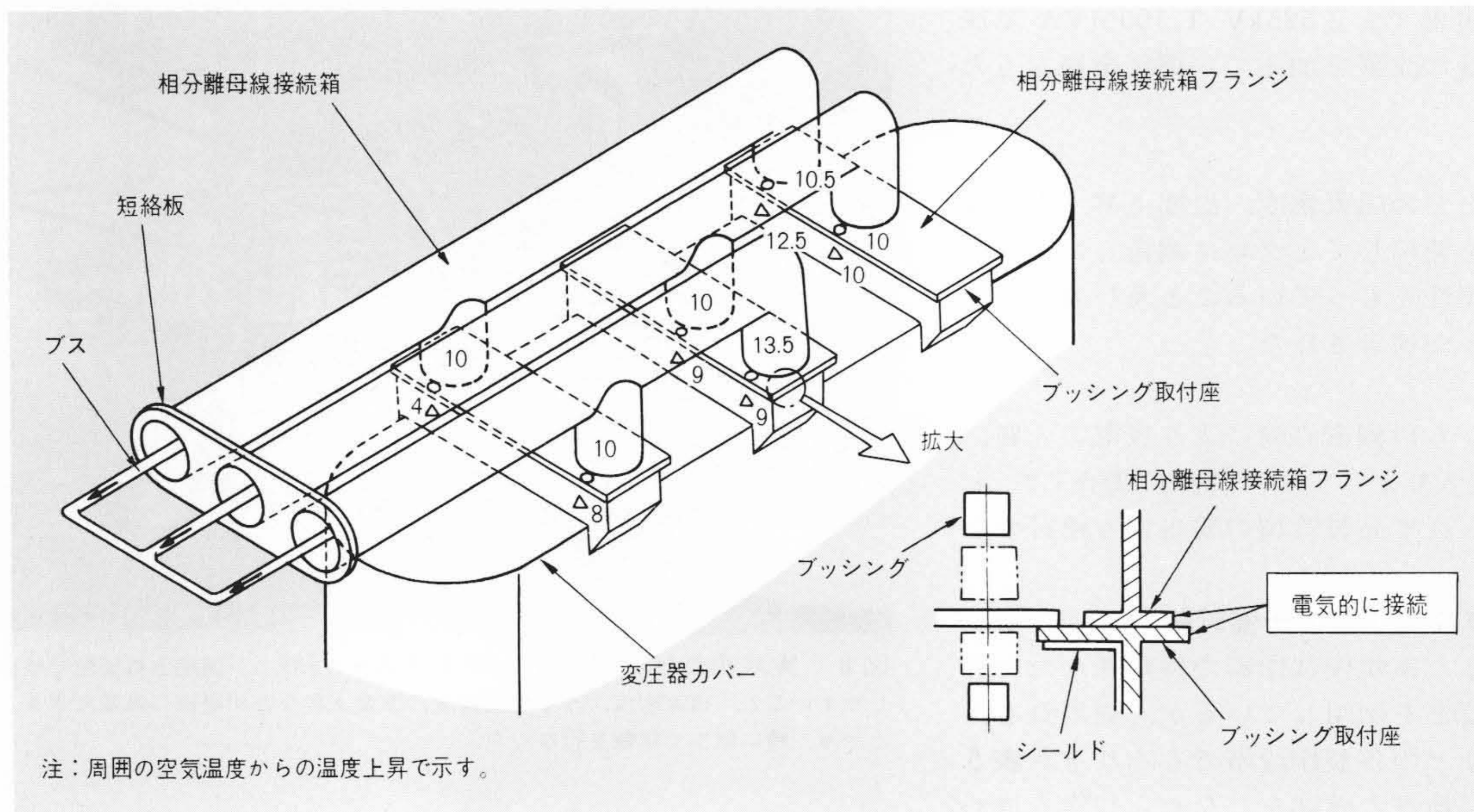


図9 実規模大電流引出部モデルの温度上昇測定値
引出部周辺の温度上昇は気中
でも13.5deg, 油が用いられる実
際の状態ではわずか4 deg であ
った。これにより完璧なシールド
構造を確立できた。

参考文献

- 1) 前島, 外: 三相三脚変圧器鉄心内部および外部磁束分布解析, 静止器研究会TC-75-9 (昭50-12)
- 2) 堀: 変圧器鉄心の磁気ひずみ振動, 昭和46年度電気四学会, 中国支部連合大会, 講演番号30509 (昭46-3)
- 3) 安齊, 外: 変圧器鉄心の温度上昇, 昭和49年電気学会全国大会, 講演番号971 (昭49-3)
- 4) M. Higaki et al.: A CALCULATION OF POTENTIAL DISTRIBUTION CAUSED BY STATIC ELECTRIFICATION OWING TO OIL FLOW IN AN OIL-PAPER INSULATION SYSTEM AND ITS APPLICATION TO PARTIAL DISCHARGE PHENOMENA IN OIL F79 230-4 (IEEE 1979 PES Winter Meeting)
- 5) M. Higaki: STATIC ELECTRIFICATION AND PARTIAL DISCHARGE CAUSED BY OIL FLOW IN FORCED OIL COOLED CORE TYPE TRANSFORMERS F79 231-2 (IEEE 1979 PES Winter Meeting)
- 6) 大谷, 外: 大電流引出部の構造と特性, 昭和53年電気学会全国大会, 講演番号501 (昭53-4)

論文抄録

Ti-6Al-4V合金鑄造品の繰り返し加熱冷却処理による組織の改良

日立製作所 茨木善朗・佐々木敏美・他1名
日本金属学会誌 43-9, 845 (昭54-9)

鑄造したTi-6Al-4V合金の鑄造組織は、鑄造のままでは針状 α 、ウィッドマン組織などになり、これらの組織は通常の熱処理によっては変化しないと言われている。鍛造、ロールなどの加工は鑄造品に対して応用できないので、通常の熱処理が可能な前組織を得ることが望ましい。

本研究で用いたTi-6Al-4V合金は二相合金であり、 α 相の量と β 相の量との比率により、強度、伸びなどを調整するためには、鑄造組織を鍛造材の焼なまし組織、すなわち、等軸 α を中心とした $\alpha+\beta$ 二相組織にすることが必要である。

そこで、鑄造組織を熱処理だけで改良し、その後の溶体化+時効などの熱処理が可能な組織、すなわち鍛造材の等軸 α を中心とした $\alpha+\beta$ 二相組織に近づける前処理方法を検討した。今回は繰り返し加熱冷却処理により、変態及び拡散を利用して改良することを試みた。その結果の確認は、光学顕

微鏡によるミクロ組織の観察及びX線マイクロアナライザによる合金元素の分布によった。

鑄造組織中のAl及びVのライン分析を、X線マイクロアナライザで行なうと、合金元素の配合量であるAlが約6%、Vが約4%の組成が、そのまま常温まで持ち込まれている。一方、鍛造材に対し同様な分析を行なうと、 $\alpha+\beta$ 二相組織に対応し、 α 粒内のAl濃度が高く、 β 相中のVが高い値を示す。このことから、鑄造組織内に均一に分布していたAl及びV原子を、 α 粒内のAl原子濃度と、 β 粒内のV原子濃度を高くする方向へ拡散させることにより、 α 及び β 相を安定化させ、等軸 α に近い二相組織を得られることが推測される。Al及びV原子の拡散には高温が必要であり、再結晶も考えられるため、再結晶温度付近から拡散速度の高温までの繰り返し加熱冷却法が有効であると考えられる。

そこで、 $\phi 3 \times 10$ の試験片を用い、高周波誘導加熱により、組織に及ぼす最高加熱温度、加熱冷却速度及び繰り返し数の影響について検討を加えた。その結果、最高加熱温度が900~950°Cの場合、6 minの加熱冷却速度、繰り返し数10回で鑄造組織は完全に崩壊し、 $\alpha+\beta$ 二相組織が得られた。また、最高加熱温度が950°Cになると板状の α が等軸に近くなること、加熱冷却速度が遅くなると α 粒径が大きくなること、繰り返し数は、最高加熱温度が950°Cの場合、2回から鑄造組織の崩壊が始まることなどが明らかとなった。また、この処理を行なった鑄造組織について、Al及びVをX線マイクロアナライザで分析した結果、鍛造材と同様なプロファイルを示し、鑄造組織が改良されたことが明らかとなった。以上のことから、繰り返し加熱冷却処理により、Ti-6Al-4V合金鑄造組織の改良が可能となった。