

500kV変圧器の信頼性向上

Improvement of Reliability for 500kV Transformers

電力系統の増大に伴い、500kV、600～1,500MVAという超大容量器を必要とすることになった。これらの機器に故障が生ずれば系統安定度だけでなく、社会にも深刻な影響を及ぼすので高い信頼性が要求される。組立輸送を生命とする500kV機器では、厳しい輸送条件の中で信頼性の高い構造を実現するためには、設計から据付までの全工程にわたる信頼性の確認と品質保証を重視せねばならない。

日立製作所では設計における信頼性の確保を重要視し、実績ある信頼性技術をもとに徹底したデザインレビューを行なうとともに、各種のコンポーネント試験や実器による確認試験によって信頼性を検証している。また、現地コロナ試験などにより既納品の事故を未然に防止する体制を確立した。

川嶋啓三郎* Keizaburô Kawashima

福田輝夫* Teruo Fukuda

鹿島芳丈* Yoshitake Kashima

丸山勝也* Katsuya Maruyama

1 緒言

電力系統の増大に伴い、変圧器はますます高電圧・大容量化され、500kV、600～1,500MVAという超大容量器を必要とすることになった。その半面、用地難などの問題から、機器の小形化が要求されている。電力系統が増大すると、機器の故障による停電事故は系統の安定度のみならず、社会に及ぼす影響も深刻なものがあ高度の信頼性が要求される。従って、変圧器の設計・製作に当たっては研究開発、設計、製作、検査及び据付の全工程にわたって信頼性の確認と保証が必要である。

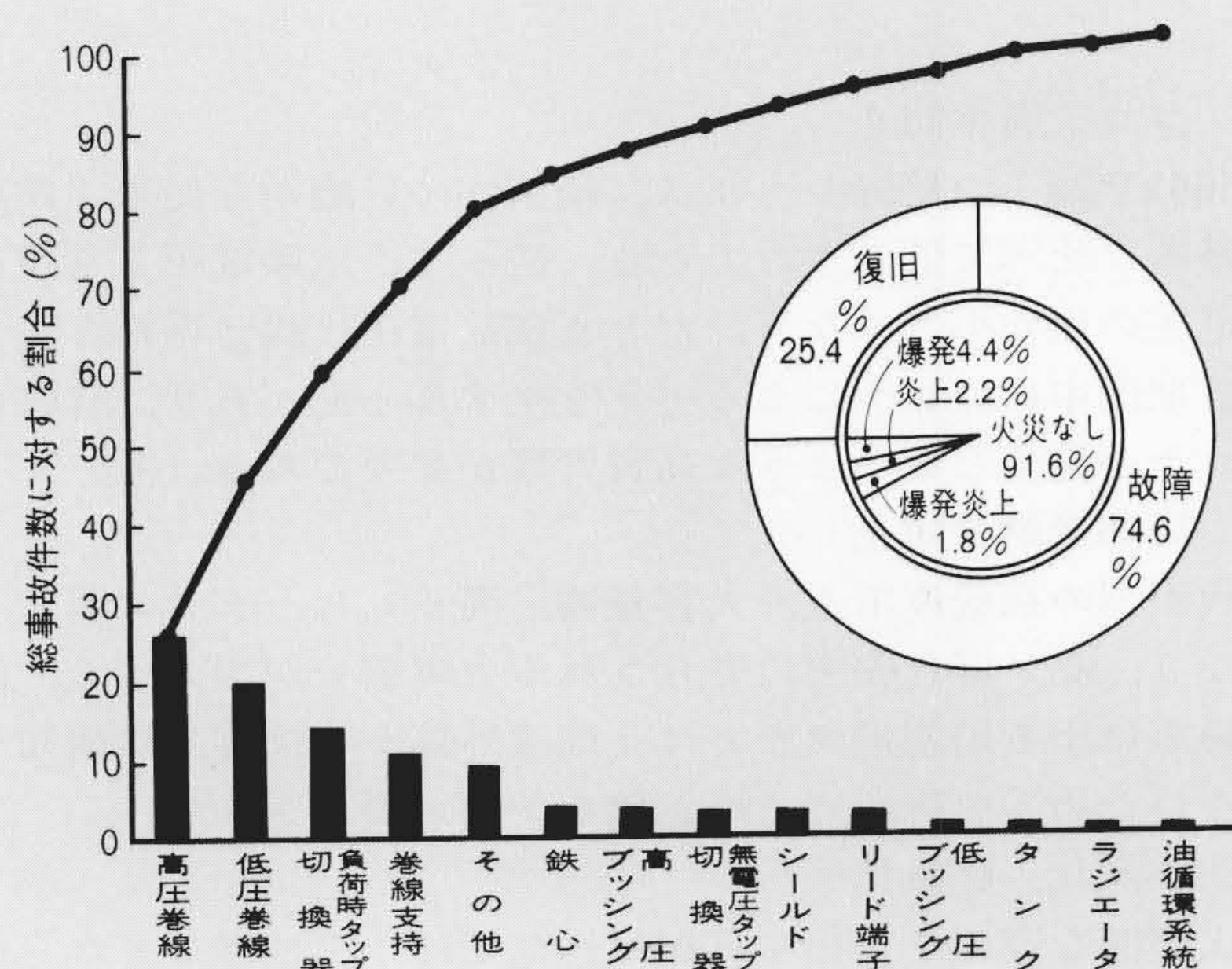
信頼性に関する手法は機器によって一般的手法のほか、その機器特有の特殊性に対する検討が重要である。変圧器について言えば、コロナ、短絡時の電磁力、雷サージ、漏れ磁束による局部過熱などのほか、騒音や万一の事故に対する防災の配慮などの社会的要求も合わせて、変圧器に合致した信頼性向上へのアプローチが必要である。

日立製作所では、設計段階での信頼性の確保を最も重要視し、併せて製造部門での品質管理及び検査部門での品質保証により、信頼性の向上を図ってきた。以下にこれらの信頼性プログラムの概要について紹介する。

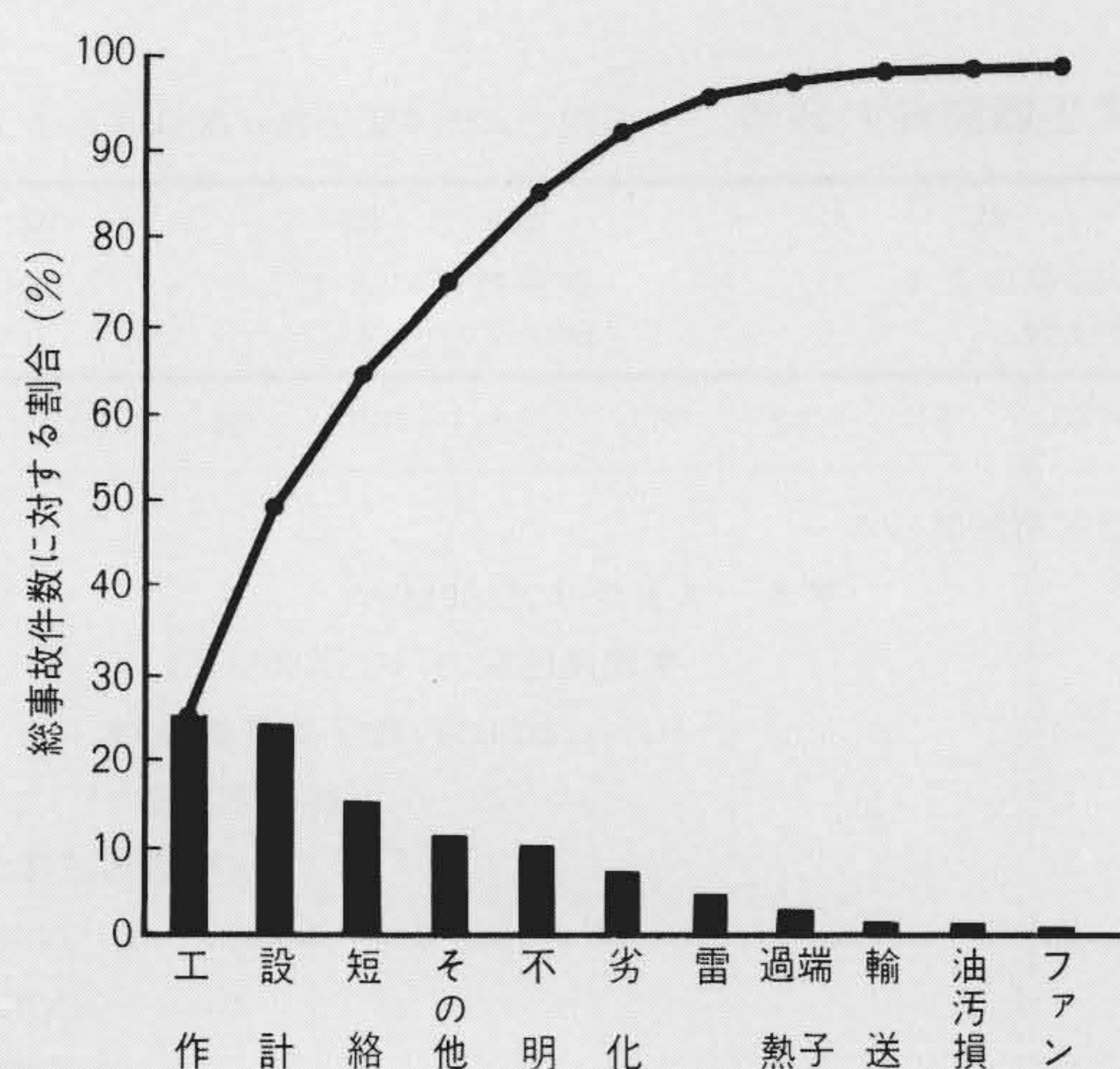
2 500kV大容量変圧器の特殊性

変圧器が高電圧・大容量化していく過程で、種々の故障が発生することについては既に報告されている。図1にEEI (EDISON ELECTRIC INSTITUTE) によるアメリカでの調査例⁽¹⁾を、図2に電気事業連合会の電気事故統計の例⁽²⁾を示す。事故部位は巻線、負荷時タップ切換器、ブッシングなどが高位を占め、これはアメリカ、我が国とも共通である。事故原因は短絡、雷、輸送などの外的要因に比べ、設計、工作という製作者側の要因が多い。また、アメリカにおける初期の500kV変圧器では、工場でのトラブル、運転1年以内のトラブルの例がかなりあり、その多くはコロナ不良、局部過熱などであると言われる。

500kV変圧器は、これらの例からも分かるように、他の変圧器で発生した種々の故障例があり得るほかに特に注意すべき特殊性を見いだし、その信頼性を高めてゆかねばならない。これらの特殊性を挙げると次のようなものがある。



(a) 部位別事故様相と被害様態



(b) 原因別事故様相

図1 アメリカにおける事故統計例 EDISON ELECTRIC INSTITUTEによる1971年度の変圧器事故統計である。電圧2kV以上、容量2.5MVA以上のものが含まれている。

* 日立製作所国分工場

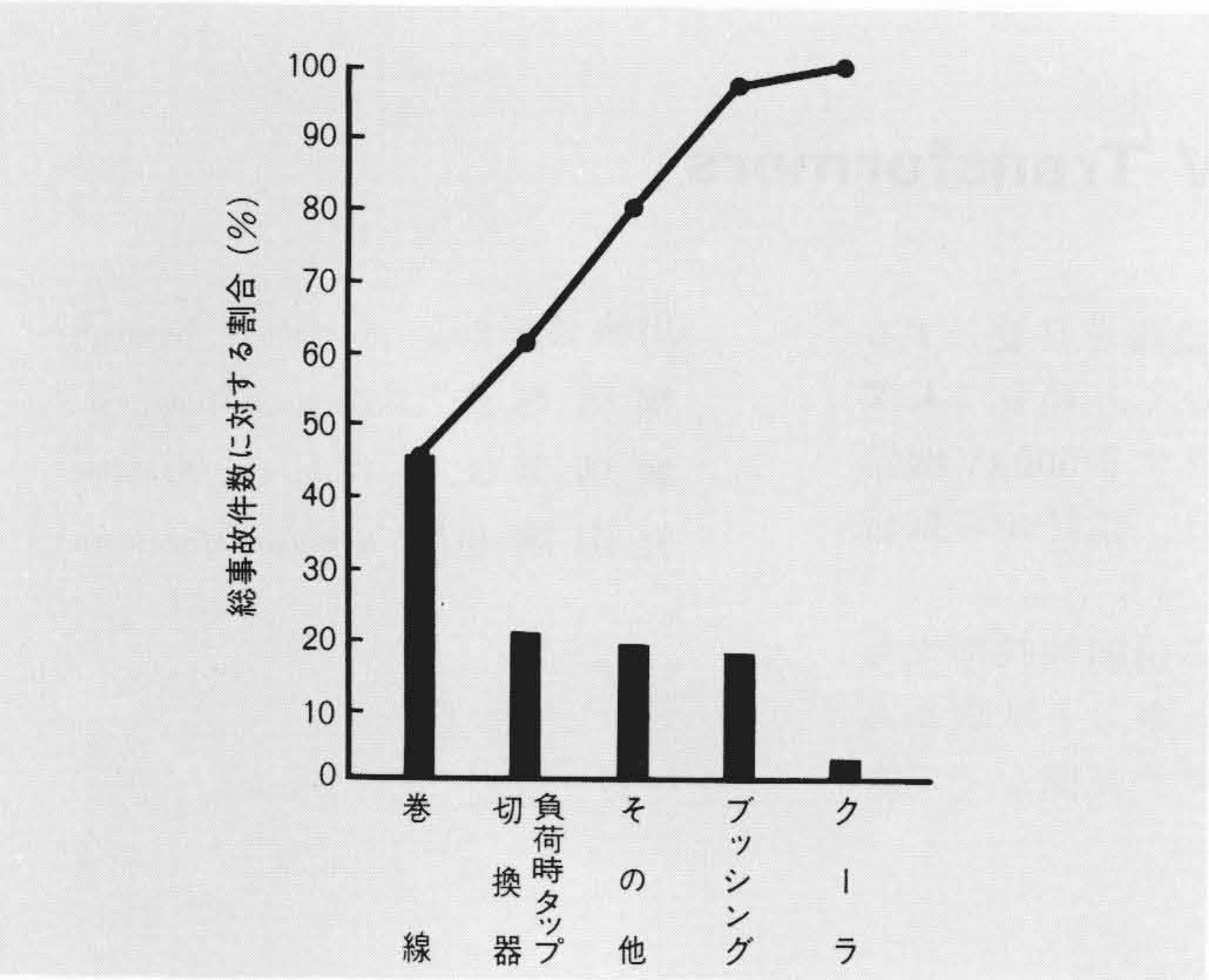


図2 我が国における事故統計例 電気事業連合会による昭和41年～同46年の変圧器事故統計である。

しくなり、単器容量の増大にもかかわらず小形化、軽量化を図る必要がある。

(4) 変圧器の保護と防災

500kV 系統はその性質上系統容量が従来のものに比べて非常に大きい。従って、短絡時の巻線に発生する電磁力、内部故障時の故障電流によるアーク エネルギーの増大などで故障すれば事故の規模は大きくなる。系統に占める重要性和万一の場合に油火災などを生じないよう、変圧器の保護と防災についての信頼度を高める必要がある。

(5) 多品種少量生産

変圧器の仕様は発電所用(火力、原子力、水力、揚水)、変電所用のほかに、電圧、容量、パーセント インピーダンスなどにより種々の組合せがあるとともに、輸送条件によって構造も異なる場合が多く、多品種少量生産となっている。これらの製品の各に信頼度のレベルを一様に保たせなければならない。

3 500kV変圧器の信頼性向上

2.で述べた要件を背景として、常に一定水準以上の信頼度を確保するためには、500kV 変圧器の開発、設計、製造及び保証を含む信頼性プログラムが作られる。3.ではその中の二、三の要点について述べる。

3.1 設計における信頼性の作り込み

3.1.1 信頼性技術の開発

表1に500kV変圧器の開発と実用化の経緯を示す。日立製作所では昭和32年ごろより500kV級変圧器の開発に着手し、多くの実器試作と輸出向け500kV変圧器⁽³⁾などの製作を経て国内500kV変圧器の実用化を図ってきた。

第一次～第三次にわたる実器試作では絶縁性能の検証を行なうとともに、絶縁材料、絶縁処理法の改善などにより、今日の絶縁技術の基礎を確立した。更に第四次試作として国内仕様の500kV変圧器の一つである500/275kV、1,000/3MVA 単相単巻変圧器⁽⁴⁾の実器試作を行ない、2E60分、2.2E30分、2.76E5分(E=527.7/√3kV)などの過電圧コロナ試験を実

(1) コロナ発生防止

500kV 端子の絶縁レベルは、経済性見地から従来の超高压系統に比べて低減されている。従って、試験電圧と常規運転電圧の比が小さくなり、たとえ試験電圧に耐え得たとしても長期間中にコロナによる劣化を生ずる心配があり、有害なコロナが発生しないような品質管理が必要である。

(2) 局部過熱の防止

我が国の系統運用上、大容量器、高インピーダンス器が多くなり、高い漏れ磁束にさらされる金属部分が増大する。漏れ磁束による局部過熱などは完成後外部からは容易に検知できないため、設計時点での正確な予測が要求される。

(3) 小形化、軽量化

広範囲な運用を目指す500kV送電では、用地難などから遠隔の山間地に変圧器が設置される場合が多く、輸送制限が厳

表1 500kV変圧器開発の経緯 国内の500kV変圧器が製作されるまでの開発の経緯を示す。

第 1 期 275kVの延長による 400kVの検討					第 2 期 従来技術による 500kVの検討				第 3 期 試作検討と コロナ改善			第 4 期 国内仕様の 500kVの検討			第 5 期 500kV変圧器の 実用化と応用				
1958	'59	'60	'61	'62	'63	'64	'65	'66	'67	'68	'69	'70	'71	'72	'73	'74	'75	'76	'77
▼日立研究所200MVA					▼オーストラリア160MVA				△国内仕様500kV基礎検討			△第四次試作500kV 1,000/3MVA			▼関西電力(株)奥多々良木PS 640MVA×1				
					▼超高压電力研究所50MVA				△仕様別エレメント試作						▼東京電力(株)福島SS 1,000/3MVA×6				
					△500kV変圧器基礎検討				▼関西電力(株)紀の川SS 1,000/3MVA×6						▼関西電力(株)新生駒SS 750/3MVA×6				
					△第一次試作				▼超高压電力研究所10MVA						▼東京電力(株)新福島SS 1,000/3MVA×3				
									△△△コロナ特性の検討						▼関西電力(株)西京都750/3MVA×3				
									△第二次試作						△第五次試作500kV 1,200MVA				
									△巻線短絡機械力の動的解析の研究										
									△アメリカBPA端部構造検討										
									▼アメリカBPA 336MVA×3										
									△第三次試作			△漂遊損検討用 150MVA							
												▼アメリカUSBR 448MVA×3							
									△円筒巻線の開発										
															△タンク耐爆強度の検討				
															△流動帯電の検討				

注：PS＝発電所，SS＝変電所，▼＝実器製作納入，△＝実器試作及びコンポーネント試作

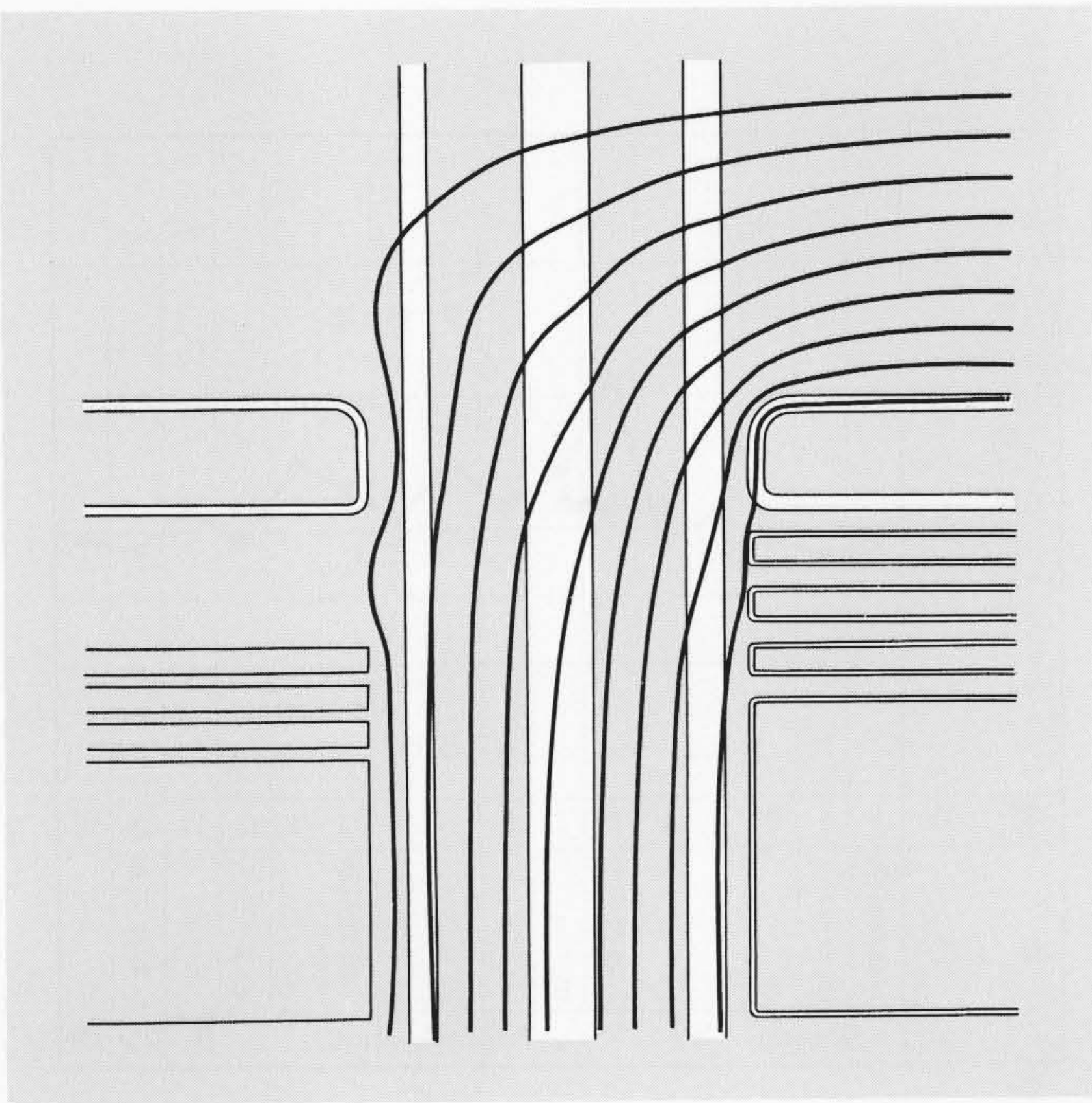
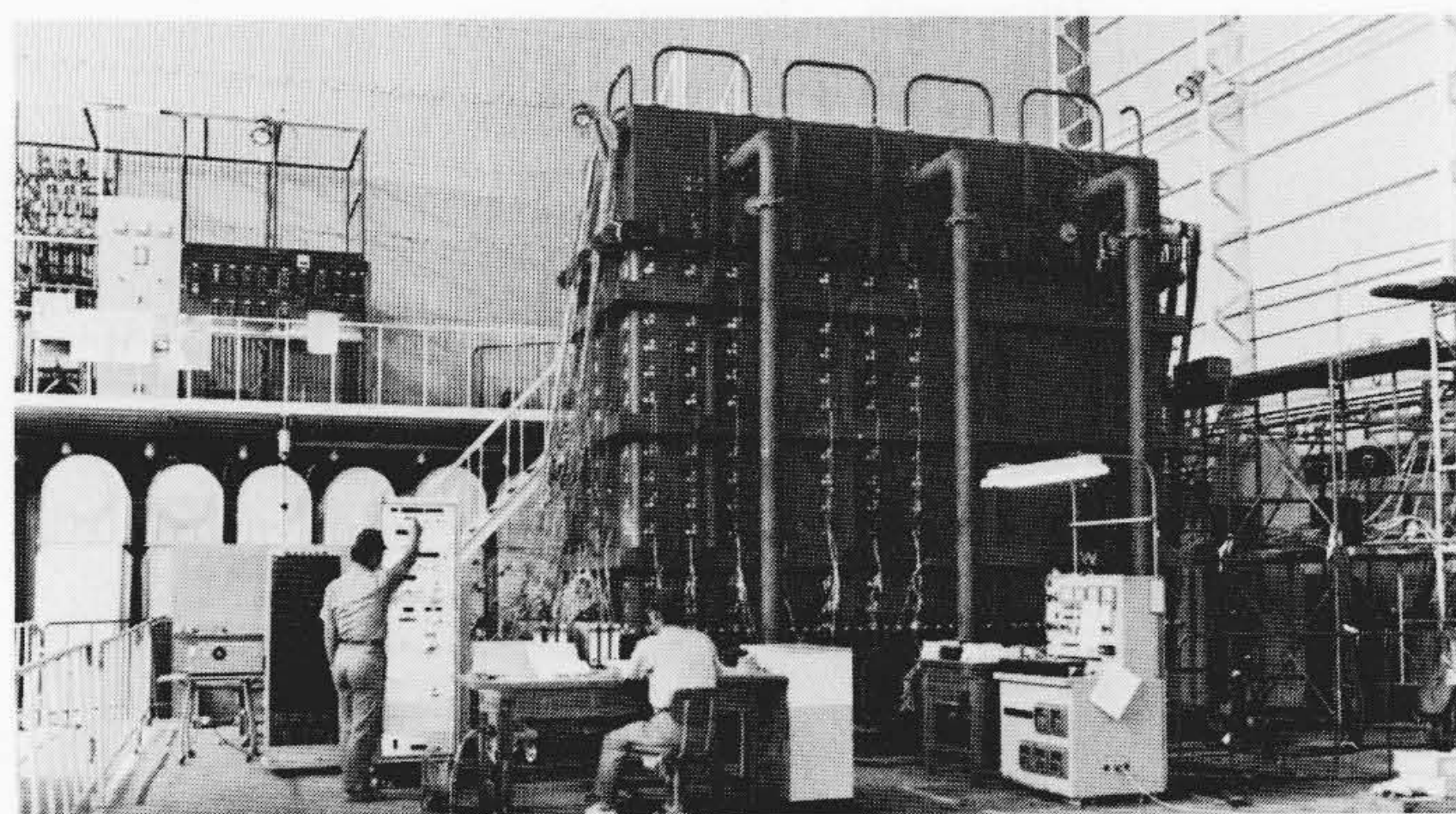
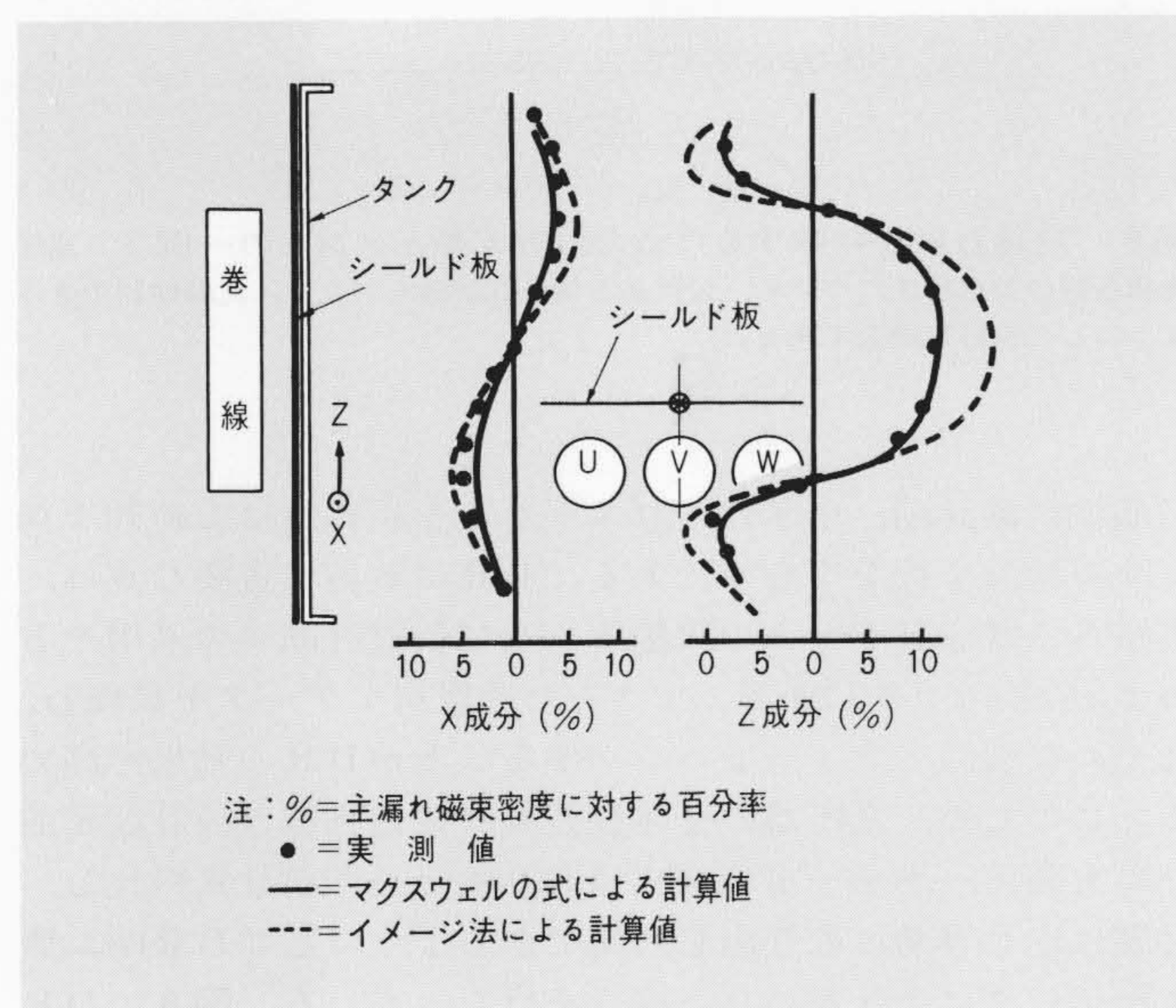


図3 電子計算機による端部電界マッピング 巻線端部絶縁設計は電子計算機を用いて行なっている。



(a)漂遊損検討用変圧器



(b)シールド板表面磁束密度分布

図4 漂遊損検討用150MVA変圧器 変圧器構造物の磁束分布、温度分布などを測定し、電子計算機による解析と結びつけ局部過熱の計算手法を確立した。

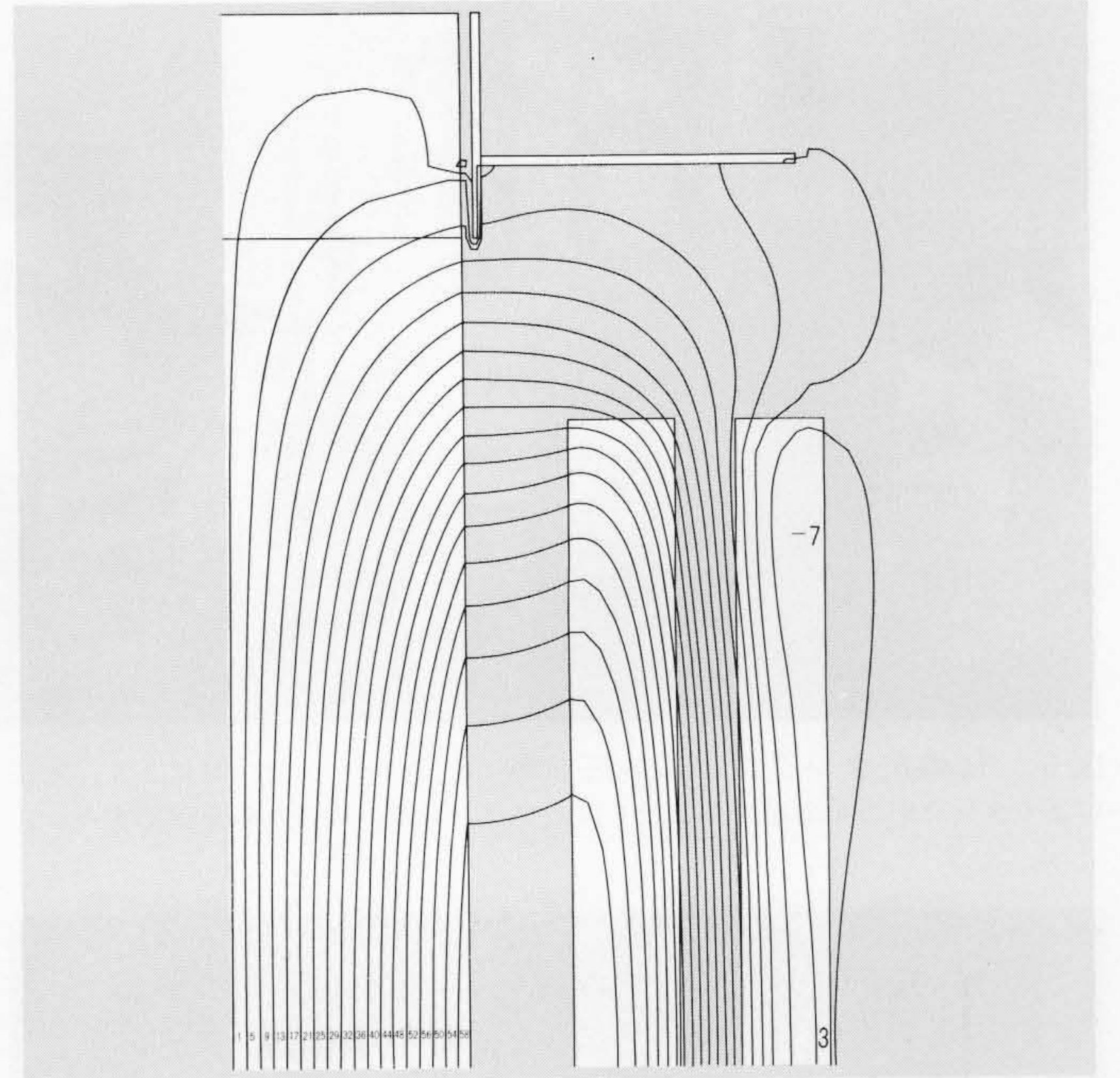


図5 等ベクトルポテンシャル線図 構造物のうず電流による反作用及び非線形透磁率を考慮したマクスウェル電磁方程式を解いたものである。

施し、いずれもコロナ特性に異常のないこと確認した。既に納入した500kV変圧器の巻線及び絶縁構造は、いずれもこれらの実器試作によって十分検証された構造を採用しており、巻線間の主絶縁をマルチダクト構造とし絶縁筒には高密度プレスボードを使用してコロナ特性を向上させている。各部の電界は電子計算機及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3に示すとおりである。

一方、絶縁技術の開発と並行して漏れ磁束による漂遊損の検討のため専用研究室を設け、150MVAの漂遊損検討用変圧器(図4)やコンポーネント試験を行なった。これらの実測結果とイメージ法やマクスウェル電磁方程式など電子計算機による解析を結びつけ、冷却条件も含めて局部過熱の計算手法を確立し、設計段階での予測精度の向上を図った。図5はマクスウェル電磁方程式を電子計算機で解いた等ベクトルポテンシャル線図の例である。

変圧器巻線の機械的強度についてはユニークな試験方法を開発し、多数の実物大モデルによる実験と動的解析法を結びつけて、巻線強度計算法を確立し、IEEE(アメリカ電気電子技術者協会)で発表⁽⁵⁾⁽⁶⁾、大きな反響を呼んだ。

変圧器の保護と防災という点から内部故障時の事故電流などの解析プログラムを開発し、タンク強度と協調のとれたリレーの整定値など保護方式の検討を行なっている。油中アークによる内圧上昇、塑性変形領域におけるタンク強度など、まだ完全に解明されていない現象もあり、現在もモデル、計算などにより検討を進めている。図6に縮尺タンクによる内圧試験の状態を示す。

また、500kVリード部分での地絡発生はその影響が大きいので、特に高い信頼性が要求される。このため、各種構造の500kVリード線についてコンポーネント試作を行ない、絶縁性能を確認した。図7に500kVリード線の絶縁試験状況を示す。また、火力、原子力及び水力発電所用変圧器に用いられるケーブル直結構造については、実際のケーブルを取り付けたコンポーネント試作による絶縁性能の検証とともに、作業

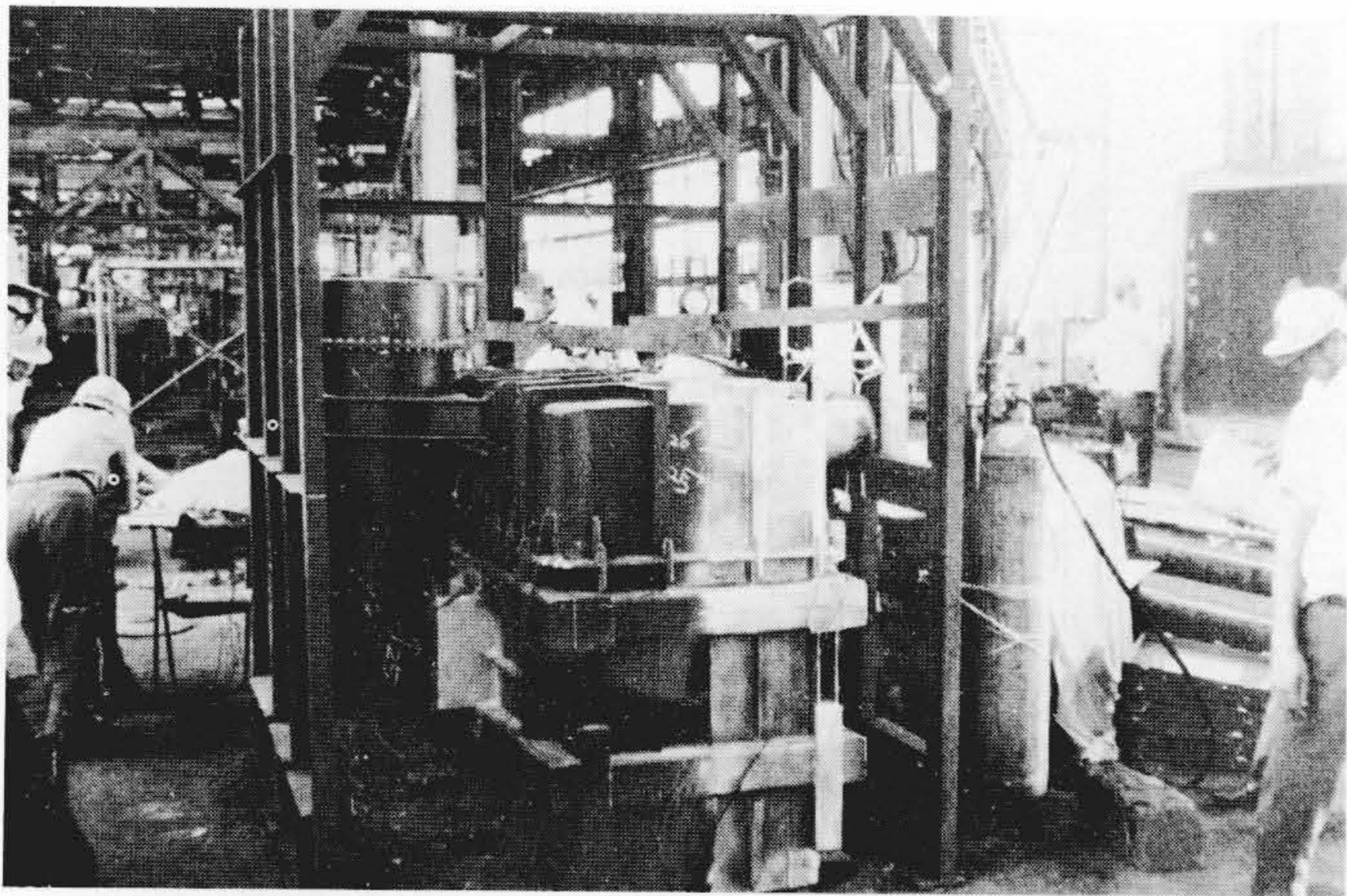


図6 1/4縮尺タンクによる内圧試験 ストレンゲージにより、内圧によるタンク応力を測定するとともに、フランジ部の補強効果を確認する。

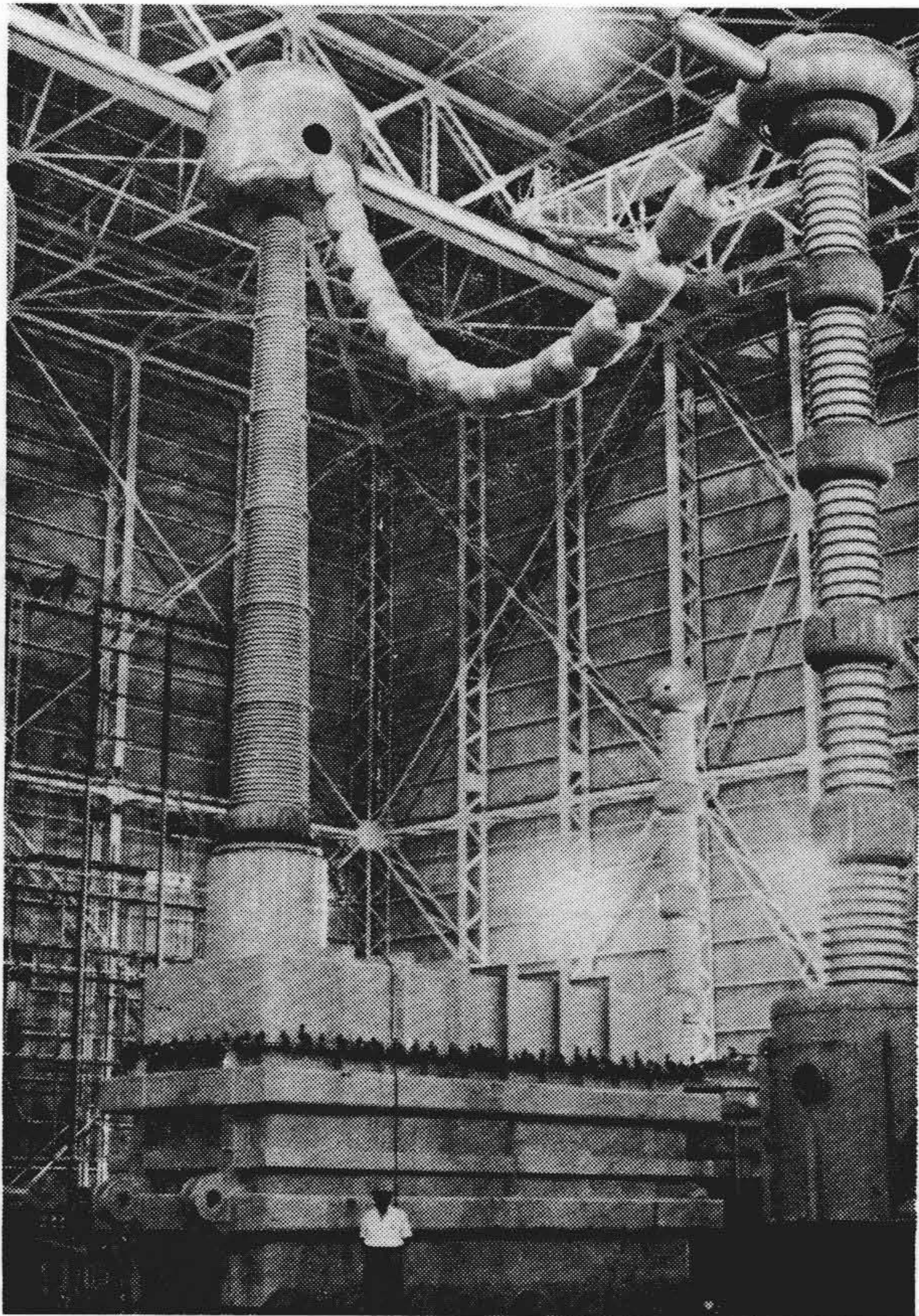


図7 500kVリード線絶縁試験 実器と同一のリード線、実器タンクおよび模擬鉄心を用いて高圧リード線単独の絶縁特性を検証した。

性の検討も行なった。

以上、幾つかの信頼性技術の開発について紹介したが、日立製作所は、コンポーネント試験や研究開発の結果は実器試作によりその実証を行ない、製品を製作することを基本的方針としている。

3.1.2 デザイン レビュー(DR)

製品計画から、据付、運転までの間の幾つかの段階で、各分野の専門家の知識を結集して製品の信頼性、生産性、保全性、輸送などについて事前検討を行ない、結果を設計図面に反映するシステムとしてデザイン レビュー(以下、DRと略す)が有効である。これは製品仕様、設計ドキュメント、設計図面、開発試験結果の吟味及び評価、生産開始前に実施すべき

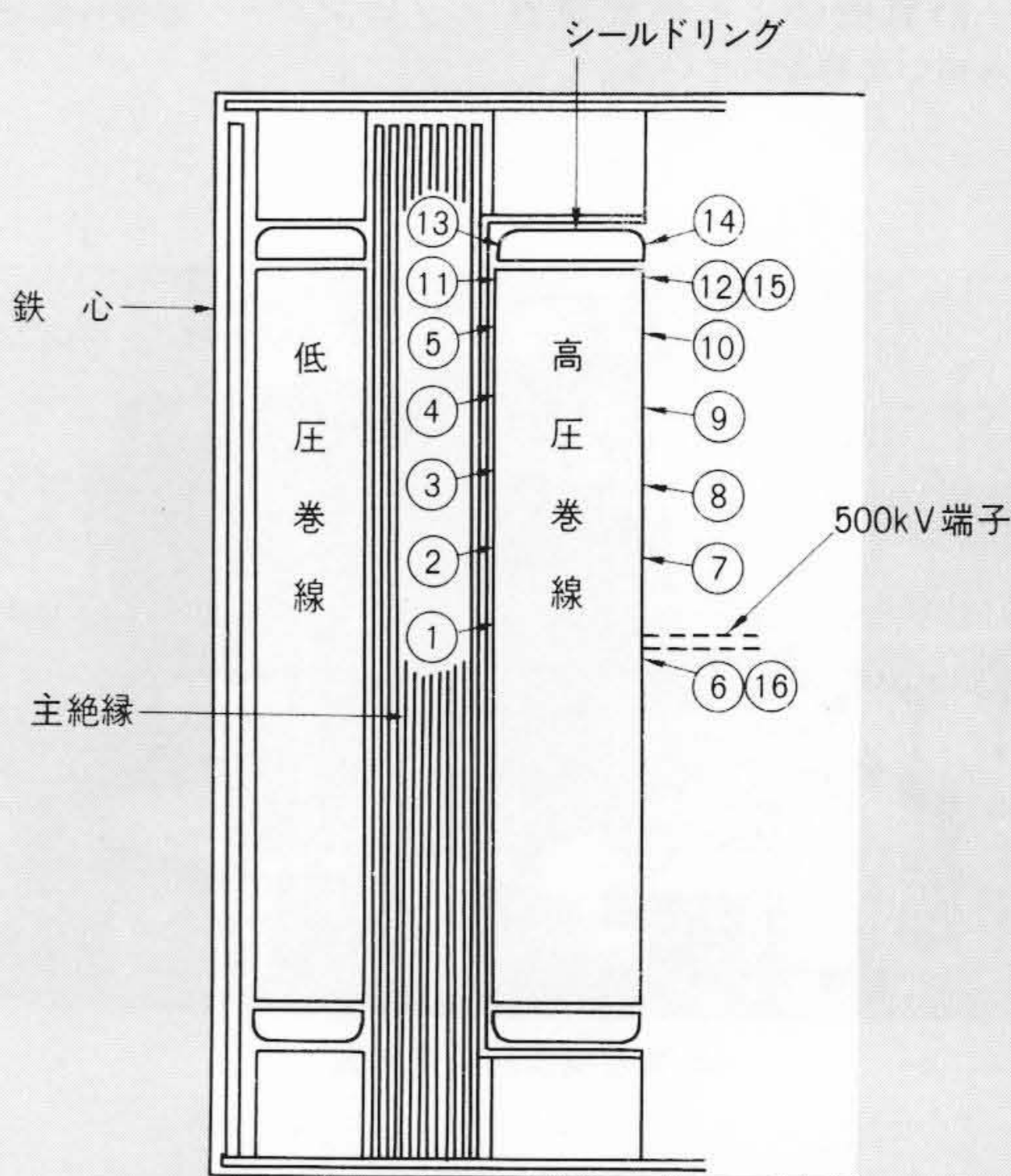
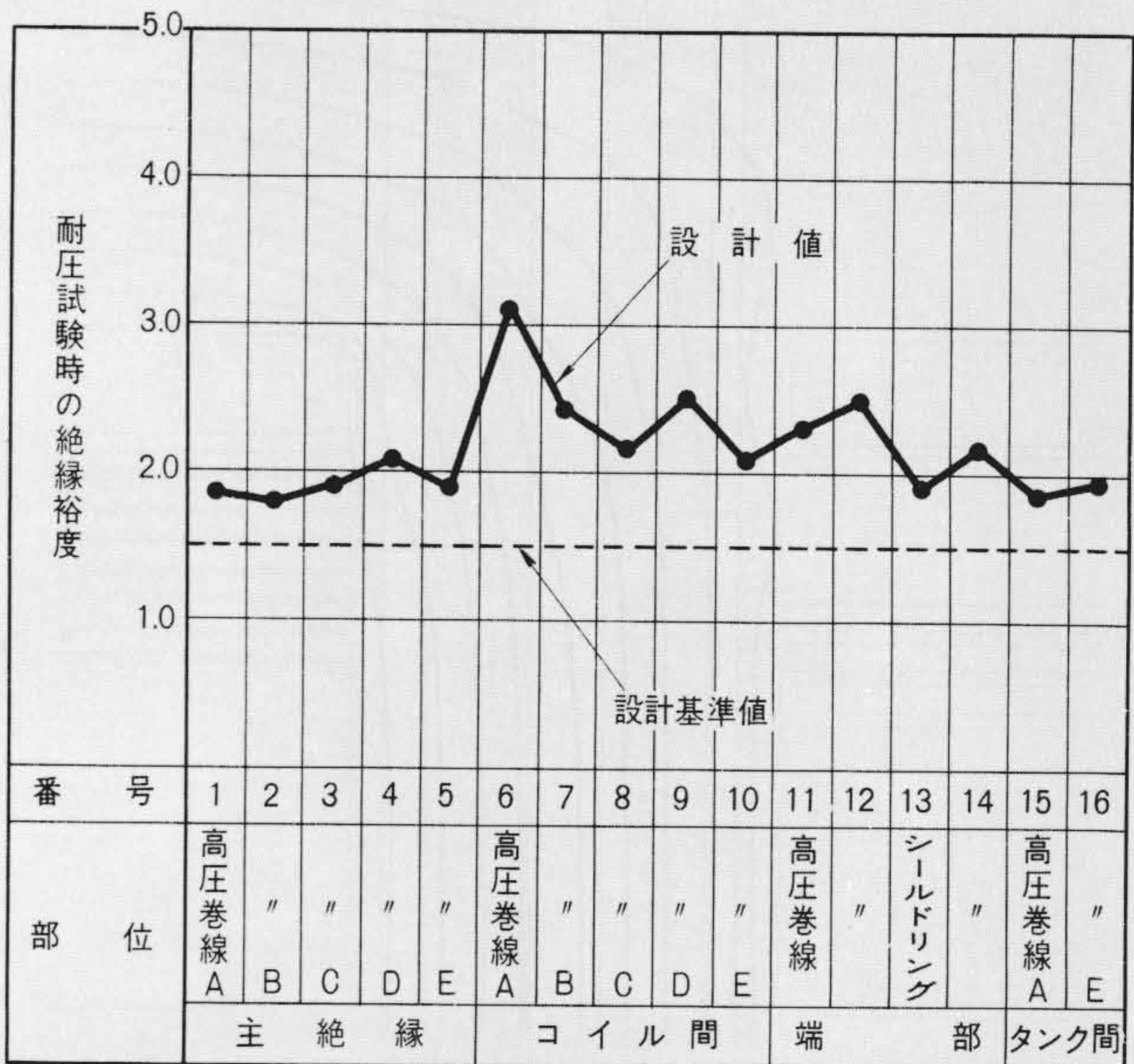


図8 絶縁設計を吟味するための設計ドキュメントの一例 高圧巻線各部の絶縁裕度について、設計基準値と設計値を対比し、比較検討できるようにした設計管理図である。

信頼性試験計画、生産性、コストなどを組織的に広範囲な角度から検討を行なうものである。DRにおいて重要な点は、実績ある既設計データの収集解析及び新設計品への適用をどのように行なうかにある。できるだけ豊富なデータを整理し、速やかに製品へフィードバックすることがDRの効果を高める。このため、変圧器の全体性能及び構造細部の設計諸元並びに実績データを一定の様式に取りまとめて設計資料化し、必要に応じ容易に取り出し対比できるようにしてDR時に豊富なデータによる質の高い検討を行なっている。図8にDR時の設計ドキュメントの一例を示す。

3.2 製造、検査における品質管理と品質保証

製造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

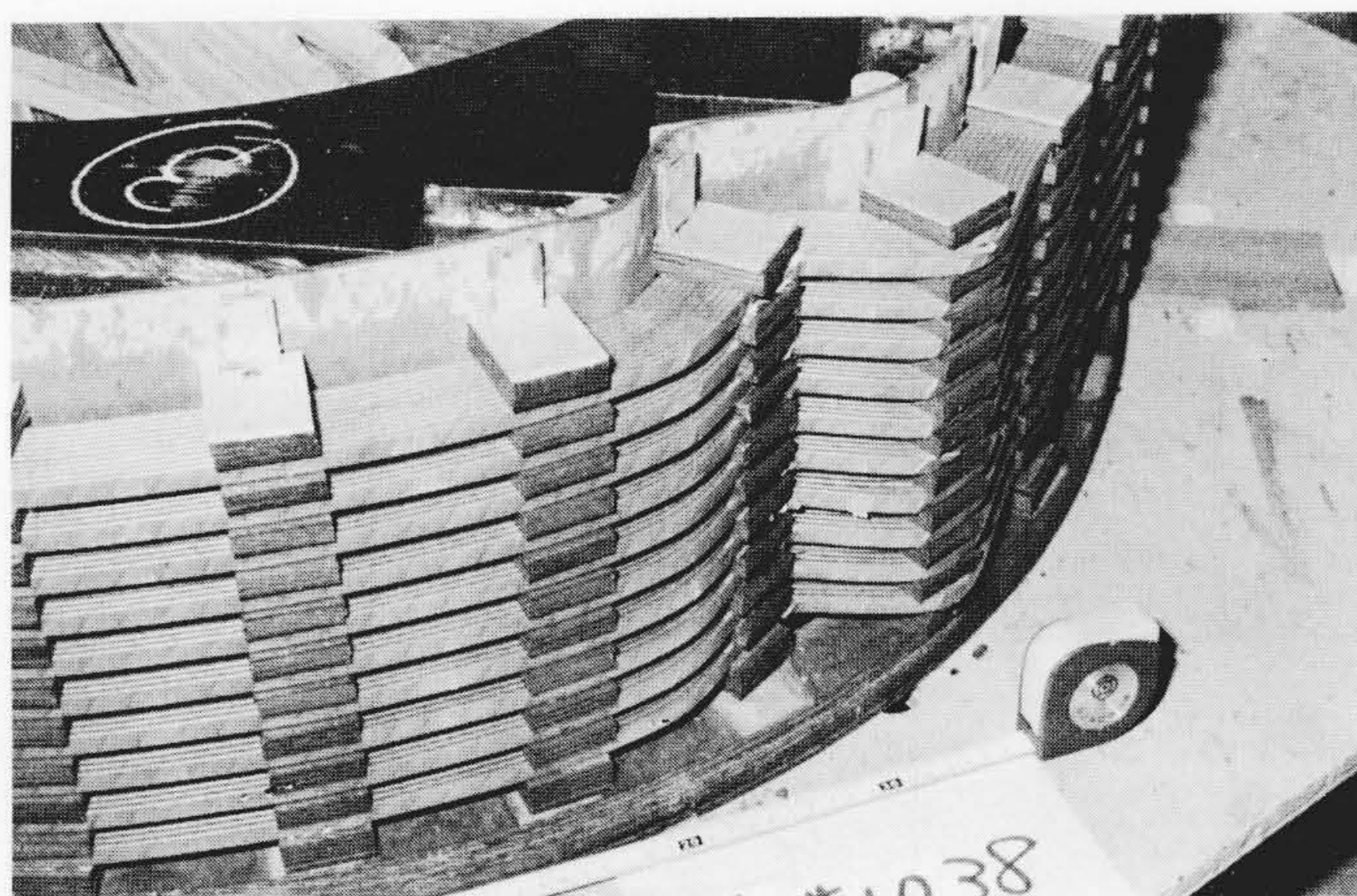


図9 巻線座屈強度検証モデル 実物大モデルにより、巻線短絡時の機械的強度を確認した。

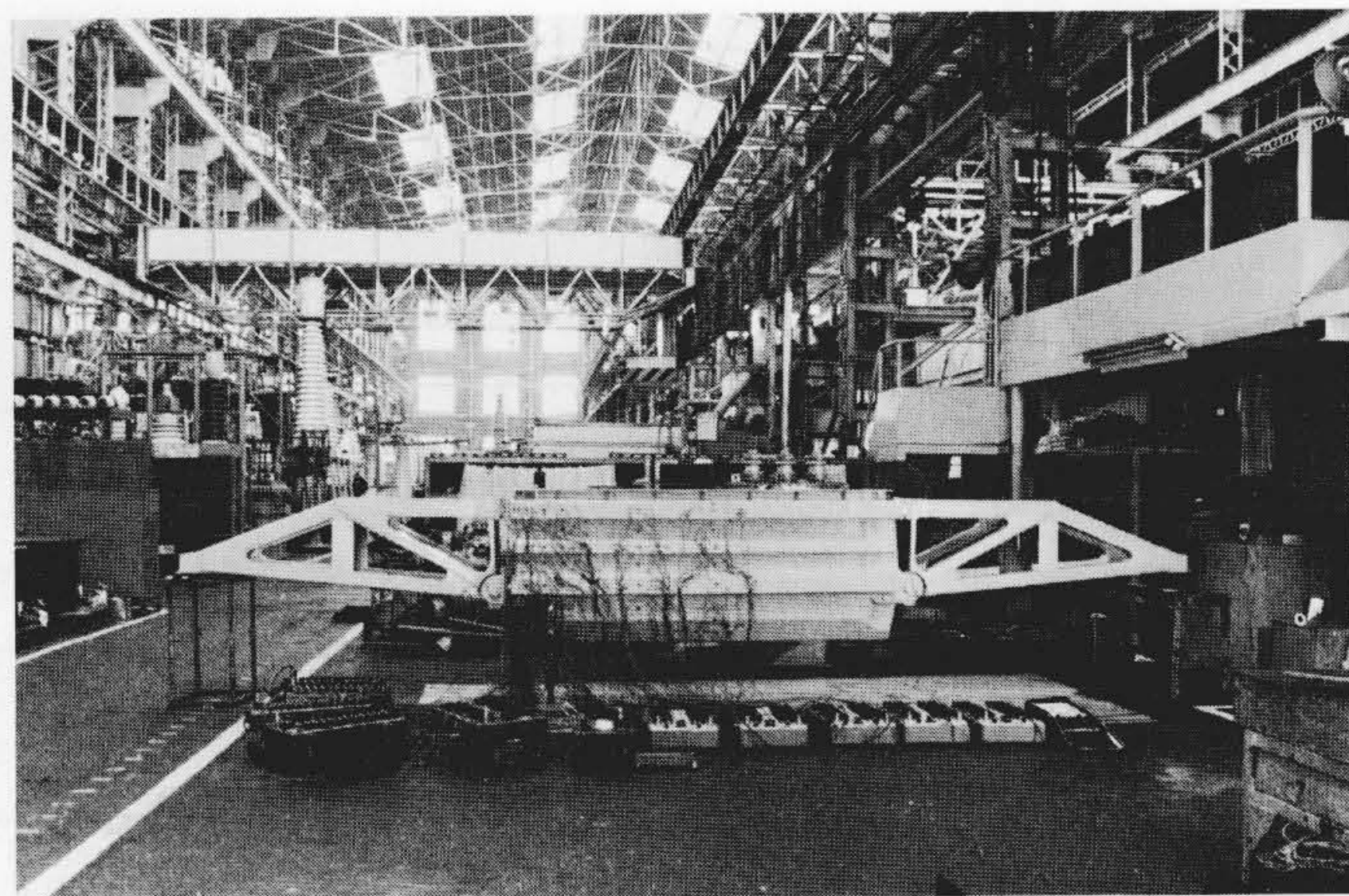


図10 タンク応力測定 $\frac{1}{4}$ プラスチック モデルで輸送時の応力を測定し、実器と比較した。

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(PCシート)によって管理している。更に、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。

検査部門では品質保証グループを設け、各作業工程について、PCシートに表われない問題点を指摘し、製造や設計部門へフィードバックを行なっている。

3.3 現地における品質管理

現地据付作業は、工場内品質と同一レベルに保持するというのが前提条件であるが、作業環境と条件が工場と異なり、また最終的な製品の品質に直接関係するために極めて重要である。

現地据付工程も工場作業と同様に、工程を作業要素別に分けPCシートを整備するとともに、指導員制度を強化し、更に重要工程については品質保証グループも参加して、品質管理と品質保証の充実を図っている。

3.4 信頼性試験

500kV 大容量変圧器の設計製作に当たっては、実績のある過去の製品のデータをフィードバックし、使用条件、環境条件を考慮して実績を超えるものがあればコンポーネント試験

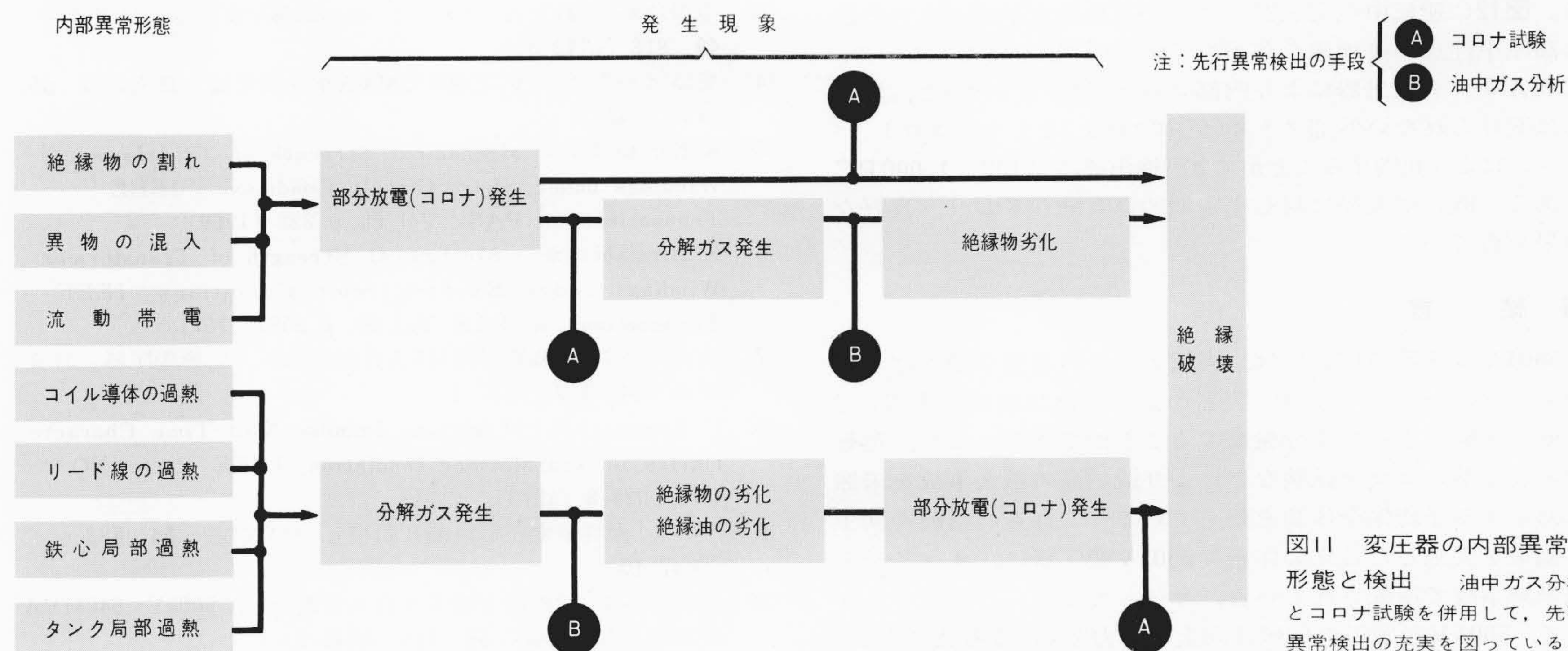
やモデル試験により確認することを原則としている。

変圧器の最重要部分である巻線と鉄心は、それぞれ独立して存在し得ないものであるが、これらについてもタンク、リード線など他の構成要素と同じく、ある性能、機能に限定して着目すればコンポーネントとして見ることができ、コンポーネント試験によりその信頼性を確認することができる。このためには実器レベルでの十分な解析とコンポーネントの決め方、試験条件の統一などが重要である。このため、日立製作所日立研究所、同機械研究所などの協力を得て巻線強度⁽⁵⁾⁽⁶⁾、冷却⁽⁷⁾、絶縁⁽⁸⁾、漏洩現象⁽⁹⁾などについてコンポーネント試験法を確立し実施している。

図9、10は、いずれも既納500kV 変圧器の信頼性確認のために実施したコンポーネント試験及びモデル試験の例を示すものである。

更に新たに要求される性能については、コンポーネント試験のほか、実器の部分試作、実器での検証も併せて実施し、信頼性の確認を行なっている⁽¹⁰⁾。

特に、巻線内の温度分布、鉄心締金具部分の巻線漏れ磁束による温度上昇、損失分布などは、単純なモデルでの解析では不十分であり、試作680MVA、1,000/3MVAなどにより、詳細な測定を行ない計算値との対比を行なっている。



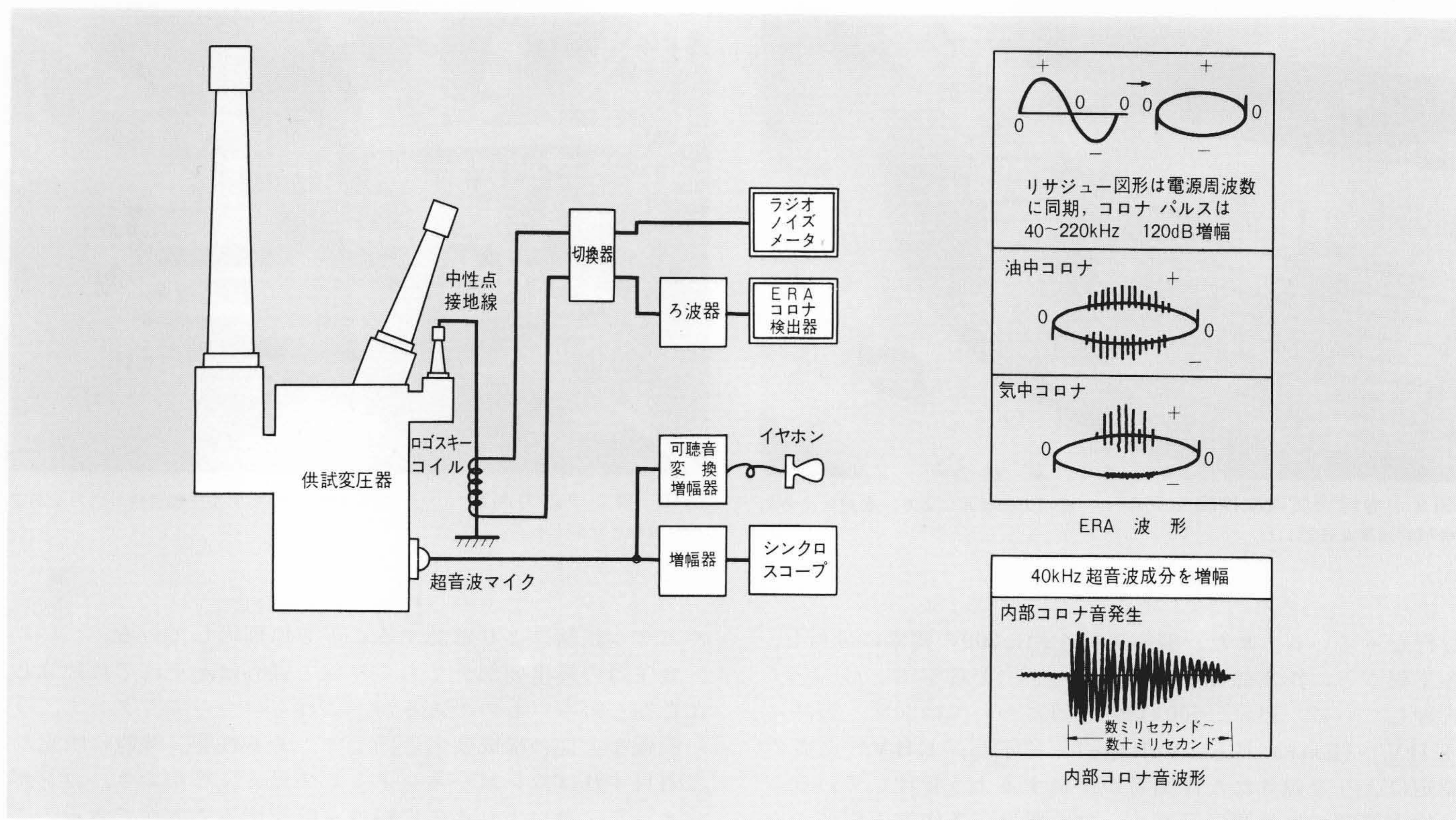


図12 運転中の変圧器のコロナ試験法 ERAコロナ検出器と超音波マイクを用いて内部コロナの検出感度の向上を図っている。油中コロナと気中コロナはERA波形が異なり、判別できる。

3.5 納入品に対する予防保全

図11に重大事故に発展する変圧器の内部異常形態とその先行異常検出手段を示す。内部異常形態は絶縁的、熱的及び機械的なものに大別できるが、これらの異常が発展するとコロナの発生、熱分解ガスの発生を経て絶縁特性の劣化、更には地絡、短絡のような絶縁破壊に進展することもある。そこで、従来より油中ガス分析により先行異常検出を行ない、異常の発見と予防処置を行ない効果をあげてきた。

しかし、油中ガス分析は過熱などのある程度緩慢に進展する異常の検出には極めて有効であるが、コロナのような絶縁性の異常に対しては検出が困難な場合がある。この欠点を補うため運転中の変圧器のコロナ試験を行なう方法を開発し、ガス分析と併用して納入品の重大事故の未然防止を図っている。図12に運転中の変圧器のコロナ試験法を示す。この方法は高圧中性点の接地線を利用してコロナ検出を行なうもので、ERAコロナ検出器により内部コロナ(油中コロナ)と、現地では避けられない外部ノイズ(気中コロナ)とをそのコロナパターンにより判別することができ、検出感度は100~1,000PCである。既に納入品に対して定期的に実施しており、良好な結果を得ている。

4 結 言

500kV変圧器の信頼性は、実績データの着実な積上げと各種のコンポーネント試験、実器の部分試作試験及び実器による確認試験によって十分検証することができた。また、運転中の変圧器のコロナ試験などにより既納品の重大事故を未然に防止する予防保全体制を整えている。これらの信頼性向上の施策を実施した日立製作所製500kV変圧器は、すべて納入以来無事故で運転されている。今後ともこれらの経験を生かして、500kV変圧器の信頼性向上に全力をあげる考えである。

終わりに、終始御指導、御援助をいただいた電力会社の関係各位に対し、厚くお礼を申しあげる次第である。

参考文献

- (1) EDISON ELECTRIC INSTITUTE "Report on Power Transformer Troubles" (1971)
- (2) 電気事業連合会統計委員会「昭和46年度電気事故統計」(1973)
- (3) 中川ほか：「BPA(アメリカ)納め525kV変圧器」日立評論 49, 818 (昭42-8)
- (4) 鹿島ほか：「500kV 1,000/3MVA単巻変圧器」日立評論 55, 219 (昭48-3)
- (5) K.Kuritaほか：「Mechanical Strength of Transformer Windings under Short-Circuit Conditions」IEEE Transactions on PAS Vol. 88 p. 222 (1969)
- (6) K.Hiraishiほか：「Mechanical Strength of Transformer Windings under Short-Circuit Conditions」IEEE Transactions on PAS Vol. 90 p. 2381 (1971)
- (7) 秋丸ほか：「275kV 660MVA負荷時タップ切替変圧器」日立評論 54, 117 (昭47-2)
- (8) U.Kamataほか：「Lightning Impulse Volt-Time Characteristics in Transformer Insulation」IEEE Paper NO C73 028-8 (1973)
- (9) 平石：「大容量変圧器の漏れ磁束」日立評論 54, 883 (昭47-10)
- (10) 福田ほか：「関西電力奥多々良木発電所納 500kV 640MVA変圧器」日立評論 56, 115 (昭49-2)