

アメリカ ボンネビル電力庁(BPA)納め

550kV, 180/3MVA単相分路リアクトル

550kV, 180/3MVA Single-Phase Shunt Reactor for Bonneville Power Administration, U. S. A.

最近の電力系統の高電圧・大容量化と社会環境の変化により、分路リアクトルも高電圧・大容量化してきており、これらに対応する新しい構造の開発と、より高い信頼性が強く望まれている。日立製作所では、このような社会情勢のもとに、超々高圧・大容量分路リアクトルの開発に着手した。高電圧・大容量分路リアクトルに、より適合した空心形構造について各種の要素試作、実器試作を実施し、工場と研究所の一貫した開発体制のもとに機器の信頼性確保を最重点として、その実用化に努めてきた。今回、我が国で製作されたものとしては最大のバンク容量である550kV, 180/3MVA単相分路リアクトルをアメリカ合衆国BPAに納入した。以下に、本器の概要について紹介する。

小幡 俊光* Toshimitsu Obata

須藤 洋治* Yôji Sudô

五反田米蔵* Yonezô Gotanda

鈴木 安昭** Yasuaki Suzuki

萩原 修哉** Syûya Hagiwara

1 緒 言

近年、500kV級基幹系統の拡大化、超高圧系統の地中ケーブル化が進み、これに伴い電力系統の進相無効電力が大幅に増大してきており、安定した電力供給を確保するために、これらの進相無効電力の補償用としての分路リアクトルが多く使用されるようになってきている。また、送電容量の増大とともに分路リアクトルも高電圧・大容量化してきており、その占める重要性も急速に高まり、よりいっそうの信頼性向上が強く望まれている。

日立製作所では、このような社会情勢を背景に、昭和51年から高電圧・大容量分路リアクトルに適しているといえる空心形構造の超々高圧・大容量分路リアクトルの開発に着手した。日立製作所では、空心形構造の電力用リアクトルとしては、直列リアクトル、中性点リアクトル、直流リアクトルなどを数多く製作し納入してきたが、機種ごとに構造面、特性面で特異性がある。このことから、空心形分路リアクトルとしての基礎研究を踏まえた段階的な方法で開発を進めてきた。要素試作から実器試作に至るまで、工場と研究所との一致協力による一貫した開発体制のもとに、機器の信頼性の確保を最重点として、その実用化に努めてきた。

今回、アメリカ合衆国エネルギー省BPA (Bonneville Power Administration: ボンネビル電力庁) に対し550kV, 180/3MVA単相分路リアクトルを製作し納入した。本器は、電圧、バンク容量ともに我が国で製作された分路リアクトルとしては最大のものである。

以下に、本分路リアクトルの開発の経緯と、その構造、試験などの一端について紹介する。

2 開発の経緯

分路リアクトルには、鉄心脚に空隙を設けた鉄心形構造と鉄心脚のない空心形構造がある。日立製作所でも、比較的容量の小さい40MVA級分路リアクトルは、鉄心形構造で製作してきた。しかし、鉄心形構造の場合、一般に、リアクトルの容量に比例して鉄心脚の空隙部の寸法が大きくなり、容量と

ともにフリンジングによる漏れ磁束、振動などが増大する。このため、鉄心形構造の大容量器では、鉄心脚を特殊な構造にするなどの対策が必要である。一方、空心形構造では、鉄心脚がないため構造がより簡単となる。空心形構造は、構造及び製作面での信頼性確保、並びに振動などの性能面で、より大容量の分路リアクトルに適した構造といえる。

日立製作所では、これらの点に着目し、高電圧・大容量分路リアクトルには空心形構造を採用することにし、機器の信頼性確保を第一として開発を進めてきた。表1に550kV, 180/3MVA単相分路リアクトル完成に至るまでの開発の経緯について示す。

2.1 要素試作

空心形分路リアクトルでは、漏れ磁束及び振動が小さくなるような、磁気シールド構造を選定することが重要である。要素試作としては、150MVA級分路リアクトルを対象とした多種多様な特性モデルを製作して、それぞれについて特性試験を実施した。図1は試作した特性モデルの一例を示すもので、磁気シールドの幾つかの構成を示した三相モデルである。このほかにもそれぞれの試作目的に応じた単相モデル、三相モデルを多数試作した。各々のモデルについて、磁界、振動などに関する基本的な諸特性を確認して、空心形分路リアクトルとしての最適な基本構造を選定した。同時に、磁界解析、振動解析により各種の計算プログラムを開発した。これらの解析法により求められた計算値は、実測値と良好に一致している^{1),2)}。

2.2 大容量リアクトル試作

要素試作に引き続いて、100/3MVA分路リアクトルの実規模試作を実施した。本試作では、大容量分路リアクトルとしての構造解析、磁界解析及び振動解析を重点的に行ない、通常の検証試験のほかに表2に示すような特殊試験を実施して、設計裕度の確認を行なっている。また、作業法の確認、試験後の各部の点検などを実施して、大容量分路リアクトルとしての信頼性を確認している。

* 日立製作所国分工場 ** 日立製作所日立研究所

表 1 大容量分路リアクトルの開発の経緯 550kV, 180/3MVA単相分路リアクトル完成に至るまでの開発の経緯を示す。

No.	項 目	年				
		1976	'77	'78	'79	1980
1	要 素 試 作	(磁界解析, 振動解析)				
	(1) $\frac{1}{10}$ 縮尺三相特性モデル					
	(2) $\frac{1}{5}$ 縮尺単相特性モデル					
	(3) $\frac{1}{2.5}$ 縮尺三相特性モデル					
2	大容量リアクトル試作 100/3MVA実規模試作	(構造解析, 性能検証)				
3	500kVリアクトル試作	(性能・絶縁信頼性検証)				
	(1) 500kV級リアクトル巻線試作					
	(2) 180/3MVA実規模試作					
4	分路リアクトルの製作納入	(バンク100MVA以上)				
		▼ 66kV, 100MVA アメリカ合衆国BPA550kV, 180/3MVA				

本試作の結果から、九州電力株式会社中央変電所納め66kV, 100MVA分路リアクトルを製作、納入した。本器は500kV変圧器の三次側に接続されるもので、単相3台を組み合わせてバンク構成としている。

2.3 500kVリアクトルの試作

空心形分路リアクトルの場合、そのインピーダンス仕様を満足させるには、一般に背が低く、直径の大きな巻線構造にしたほうがより効果的である。このため、従来の変圧器巻線に比べて、より幅の広い円板巻線を製作する必要がある。また、分路リアクトルの巻線としては、漏れ磁束による損失を減少させ、絶縁信頼性を確保することが大切であり、素線寸法のより小さな電線を使用した巻線で、循環電流及び素線接続箇所ほとんどない構造にすることが望ましい。

以上述べたことから、日立製作所では、空心形大容量分路

リアクトルの巻線には、転位電線を使用した連続円板巻線を採用することにした。この巻線は日立製作所の標準構造であるが、幅広の連続円板巻線であることに留意して、500kV級分路リアクトルを対象とした実規模大の巻線を試作した。本試作では、500kV級リアクトルの巻線としての作業性を確認して、信頼性の向上を図った。

引き続いて、500kV分路リアクトルとしての性能、及び絶縁強度を検証してその信頼性を確認するため、180/3MVA分路リアクトルの実規模試作を実施した。本試作でも、前述した試作の場合と同様に、通常の検証試験のほかに表2に示したような特殊試験、作業法の確認、試験後の各部の点検などを実施し、いずれも良好な結果が得られた。特に、絶縁検証試験では、国内仕様を想定したBIL (Basic Impulse Insulation Level) 1,550kVまで異常がなく、1.5E 1時間の長

表 2 試作で実施した主な特殊試験 実規模試作で実施した特殊試験の主なものを示す。いずれも良好な結果を得て、その信頼性を確認している。

No.	項 目	試 作 目 的	主 な 試 験 項 目
1	漏 れ 磁 束	磁束分布の把握, 確認	各部の磁束分布
2	循 環 電 流	循環電流のほとんどない構造	構造物の循環電流
3	温 度 上 昇	構造物の局部過熱防止	構造物の温度上昇
4	冷 却	冷却効果の良好な冷却構造	油の温度分布
5	機 械 的 強 度	構造物の機械的強度確認	静的な力に対する変位・応力 振動による応力
6	内 部 振 動	低振動の中身構造	振動モード・周波数特性 磁気シールドの振動
7	外 部 振 動	低振動のタンク構造	振動モード, 周波数特性 タンク振動
8	騒 音	低騒音構造, 振動との相互関係確認	騒音の周波数分析
9	絶 縁 強 度	絶縁信頼性の検証	電位分布特性 雷インパルス・開閉インパルス コロナ特性
10	飽 和 特 性	インピーダンス特性の直線性確認	インピーダンス特性 電流のひずみ率

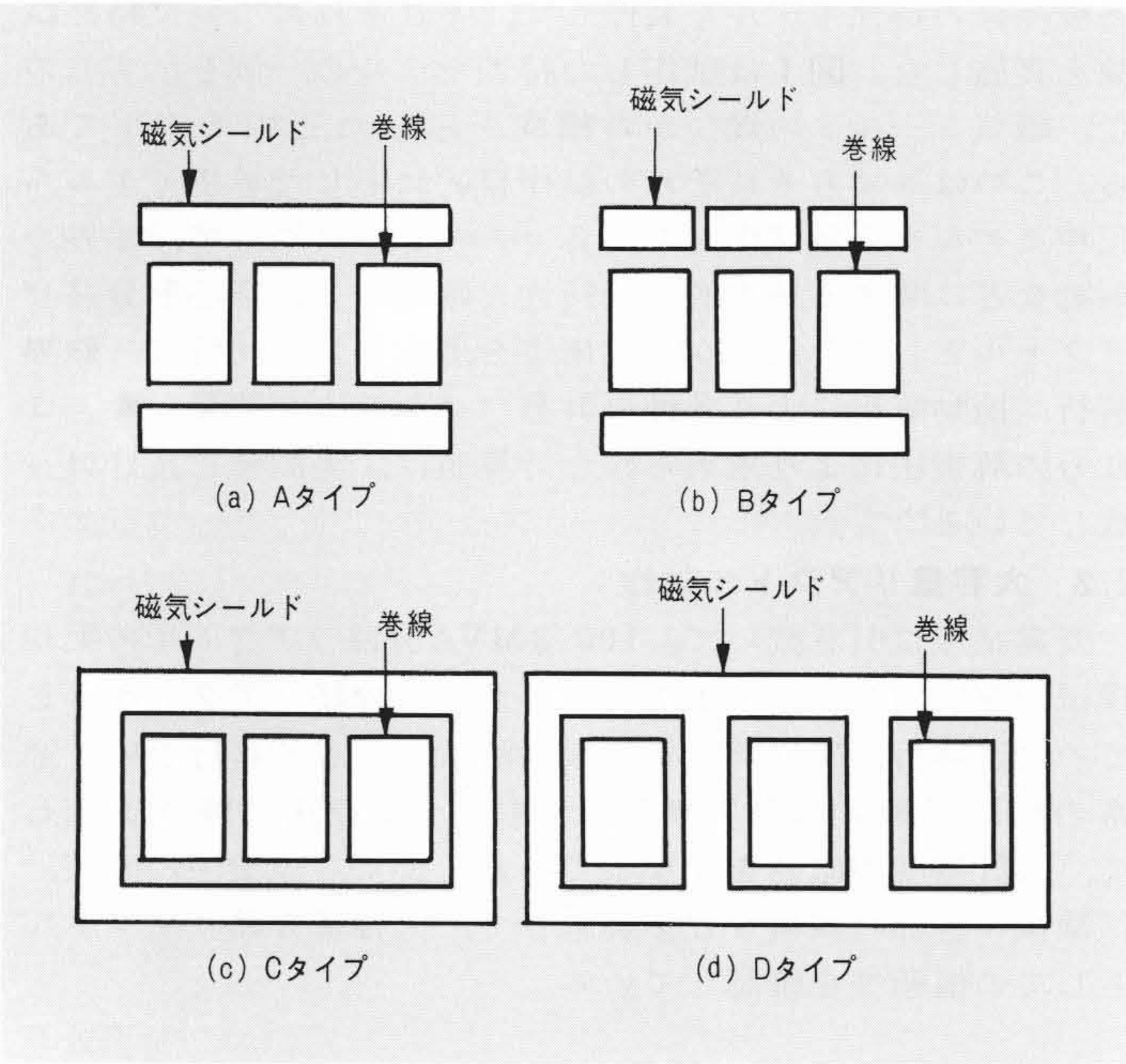


図 1 三相特性モデルの構成例 空心形三相リアクトルの磁気シールドの構成例を示す。いずれも要素試作で製作した特性モデルである。

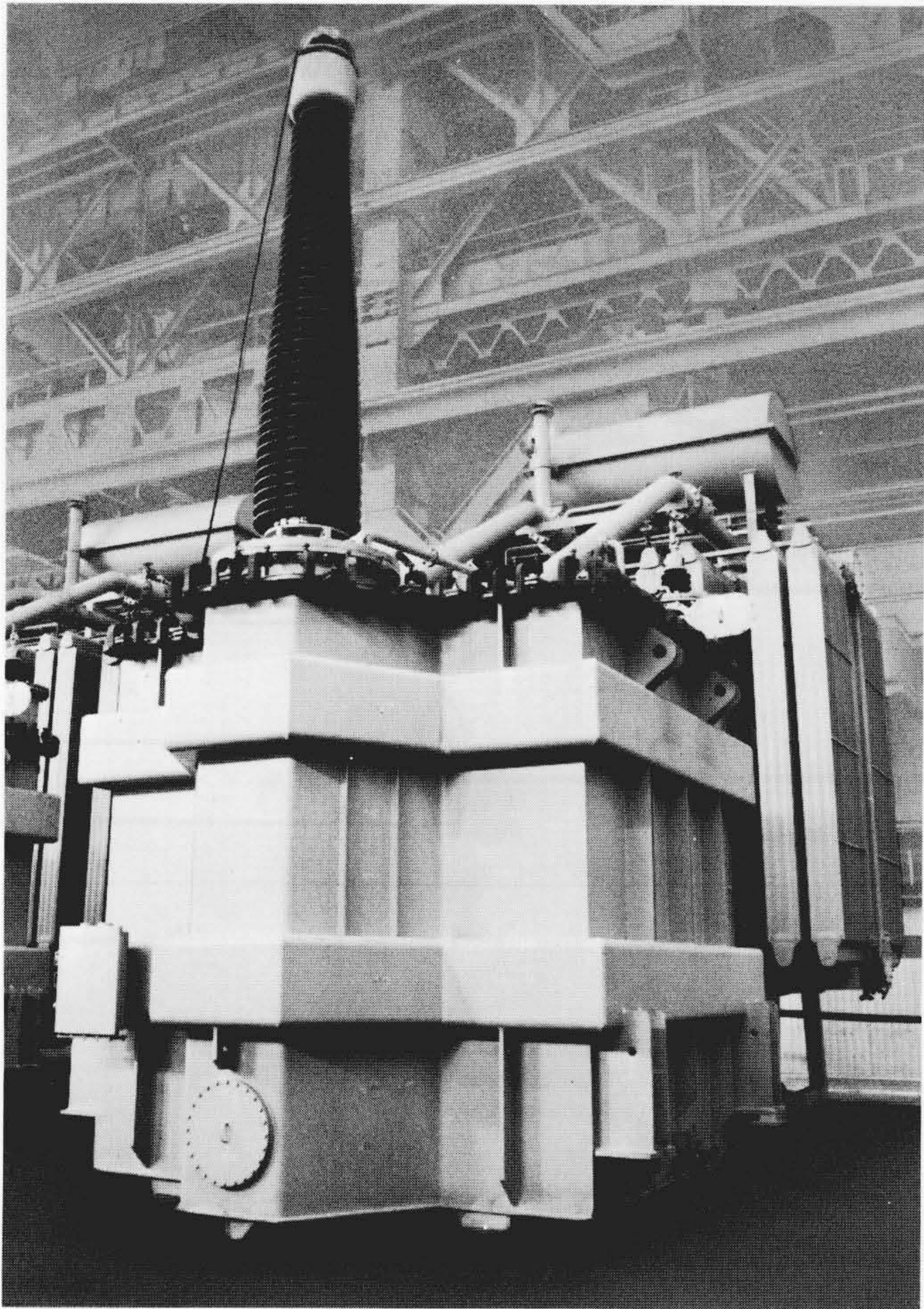


図2 550kV, 180/3MVA 単相分路リアクトル 本分路リアクトルの工場完成姿を示す。

表3 550kV, 180/3MVA 単相分路リアクトルの仕様 連続運転最大容量としては、198/3MVAである。

形 式		屋外用磁気シールド付空心形
定 格 電 圧		550/√3 kV
定 格 容 量		180/3MVA
連 続 運 転 最 大 容 量		198/3MVA
定 格 イ ン ピ ー ダ ン ス		1,680Ω/相
相 数		単 相
周 波 数		60 Hz
冷 却 方 式		油 入 自 冷 式
交 流 試 験	線 路 端	575kV
	中 性 点	34kV
雷 インパルス	線 路 端	1,300kV
	中 性 点	110kV
開閉インパルス	線 路 端	1,080kV
長 時 間 交 流 試 験		1.5E×1 時間(100μV以下)
温 度 上 昇 限 度	巻 線	65℃
	油	65℃
騒 音		85dB(A)以下
タ ン ク 振 動	側 板	100μm以下(両振幅)
	底 板	30μm以下(両振幅)
第 三 高 調 波 含 有 率		3%以下
イ ン ピ ー ダ ン ス 直 線 性		125%電圧まで一定
規 格		ANSI

注：略語説明 ANSI(American National Standards Institute)

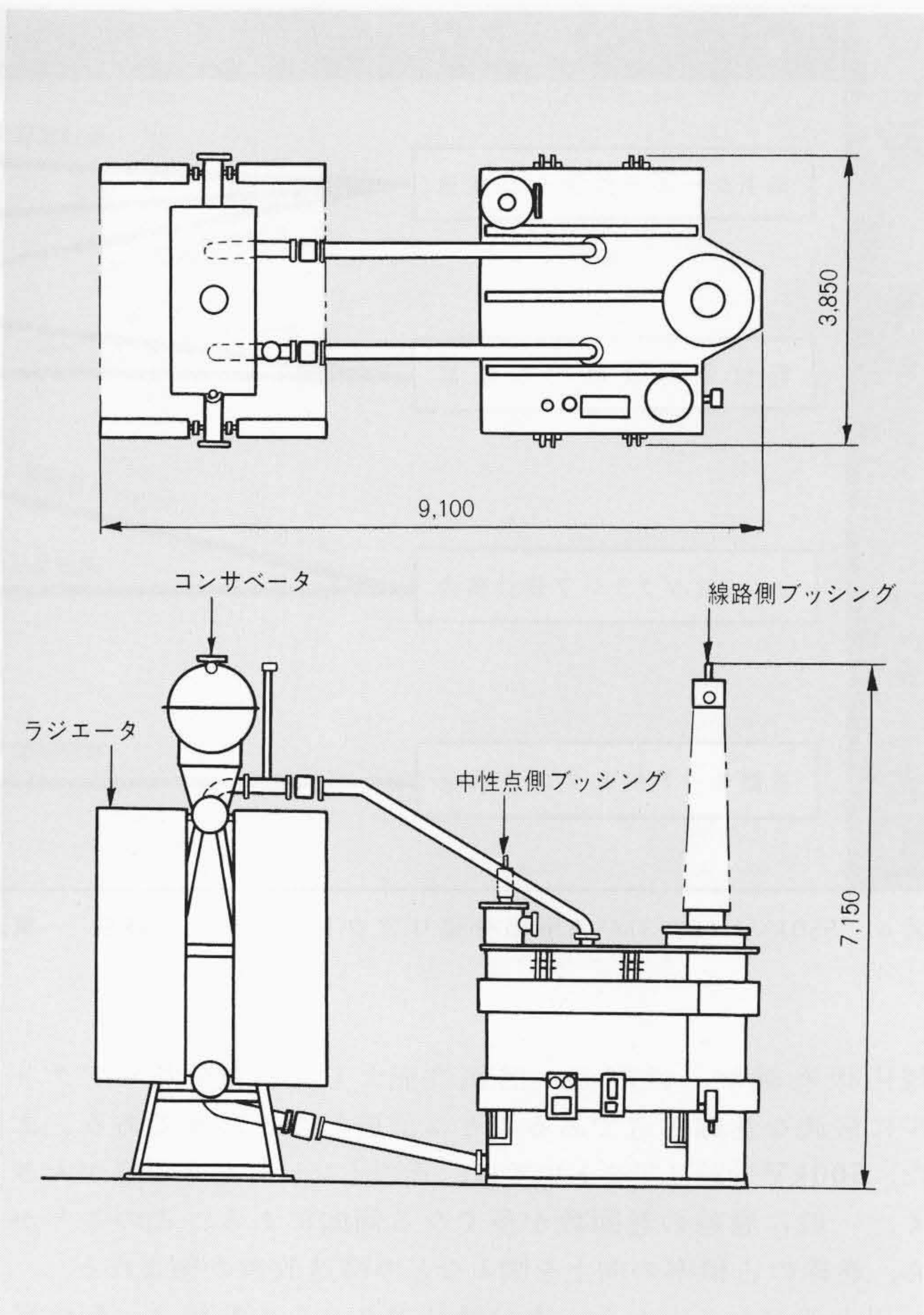


図3 単相分路リアクトルの外形寸法図 油入自冷式でラジエータは別置としている。

時間交流試験も無コロナという満足すべき結果を得た。

3 仕 様

今回製作した分路リアクトルは、アメリカ合衆国エネルギー省BPAの550kV系統に直接設置される。我が国で製作された分路リアクトルとしては最大のバンク容量であり、また、500kV級分路リアクトルとしては世界的にも最大級の製品となるもので、表3に示すような仕様となっている。本器は連続運転過電圧として定格電圧の105%が指定されており、連続運転最大容量としては定格容量の110%である198/3MVAとなっている。図2に本器の外観を、図3に外形図（主要寸法表示）を示す。

4 構造とその特長

本分路リアクトルには、磁気シールド付空心形構造を採用した。この構造については、前述したように各種の要素試作、実器試作により磁界、振動などについての諸特性を十分に確認している。本器は、分路リアクトルの実規模試作で十分に検証された構造を採り入れ、製作経験の豊富な超々高圧・大容量変圧器で実績のある構造に基づいて設計製作した製品であり、図4にその主な特長を示す。

4.1 巻線及び絶縁構造

分路リアクトルでも、変圧器と同様に巻線は機器の最も重要な部分で、構造改善と信頼性向上のため多くの努力を払ってきた。日立製作所の標準構造である転位電線を使用した連

No.	構 造	技 術	特 長
1	磁気シールド付空心形構造	検証試験で確認された解析法 磁束をシールドに吸収 対地静電容量が小さい。	中身の振動が小さい。 損失が少ない。
2	転位電線連続円板巻線	素線寸法が小さい。 接続箇所減少	絶縁の信頼性が高い。
3	ポジティブクランプ締付構造	UHV技術による500kV端部構造(ハイブリッド絶縁) 連続加圧乾燥による前締処理	締付の経年変化が少ない。
4	振動モード制御タンク構造	検証試験で確認された解析法	騒音・振動が小さい。

図4 550kV, 180/3MVA単相分路リアクトルの構造と特長 構造と主な特長について示す。

続円板巻線が、性能面、信頼性面とも大容量分路リアクトルに最適な巻線構造であることは前述したとおりである。また、500kV分路リアクトルでは、そのインピーダンス値が大きく、一般に巻線の巻回数が多くなる傾向にある。このことから、巻線の占積率の向上を図るなどの構造改善が望まれる。

以上述べたことから、本分路リアクトルの巻線は、転位電線を使用した連続円板巻線とし、線路端を下部側、中性点を上部側に配置させたいいわゆる500kV端部絶縁構造にした。この構造の概略を図5に示す。500kV端部絶縁構造は、UHV絶縁試作変圧器の長期課電試験を通じて、その信頼性を確認している。また、この構造は前述した500kVリアクトル試作でも絶縁検証試験によりその信頼性を確認している。

500kV端部絶縁構造を採用したことにより、巻回当たりの有効断面積のより大きな電線を使用した背のより低い巻線となり、巻線の占積率を向上させることができた。更に、電線の巻回当たりの剛性がより強化されるため、より安定した巻線構造になっている。また、線路端を下部側配置としたため線路側ブッシングの油中側端子との接続が合理的に行なえるようになり、線路側リード線の対地絶縁特性も大幅に改善された。

空心形構造により、対地静電容量が小さくなるという特長を配慮した円板巻線のため、雷インパルスに対する電位分布特性は計算と実測から良好であることを確認している。

巻線の締付構造としては、超々高圧・大容量変圧器で製作実績のあるポジティブクランプ方式を採用し、絶縁積層材により巻線全体を締め付ける構造にしている。巻線の経年変化に対しても細心の注意を払っており、十分な管理体制のもとに、収縮が安定するまで常時加圧による乾燥を実施した。また、中身組立まで防塵空調室内で作業するなど、品質管理に留意した管理体制のもとに製作した。

4.2 磁気シールド

空心形分路リアクトルの磁気シールドの振動は、変圧器鉄心の磁気ひずみ振動と異なり、磁気シールドに作用する電磁吸引力による振動が主体である。この種の磁気シールドは、日立製作所の大容量変圧器鉄心の角形ヨークと類似形状であ

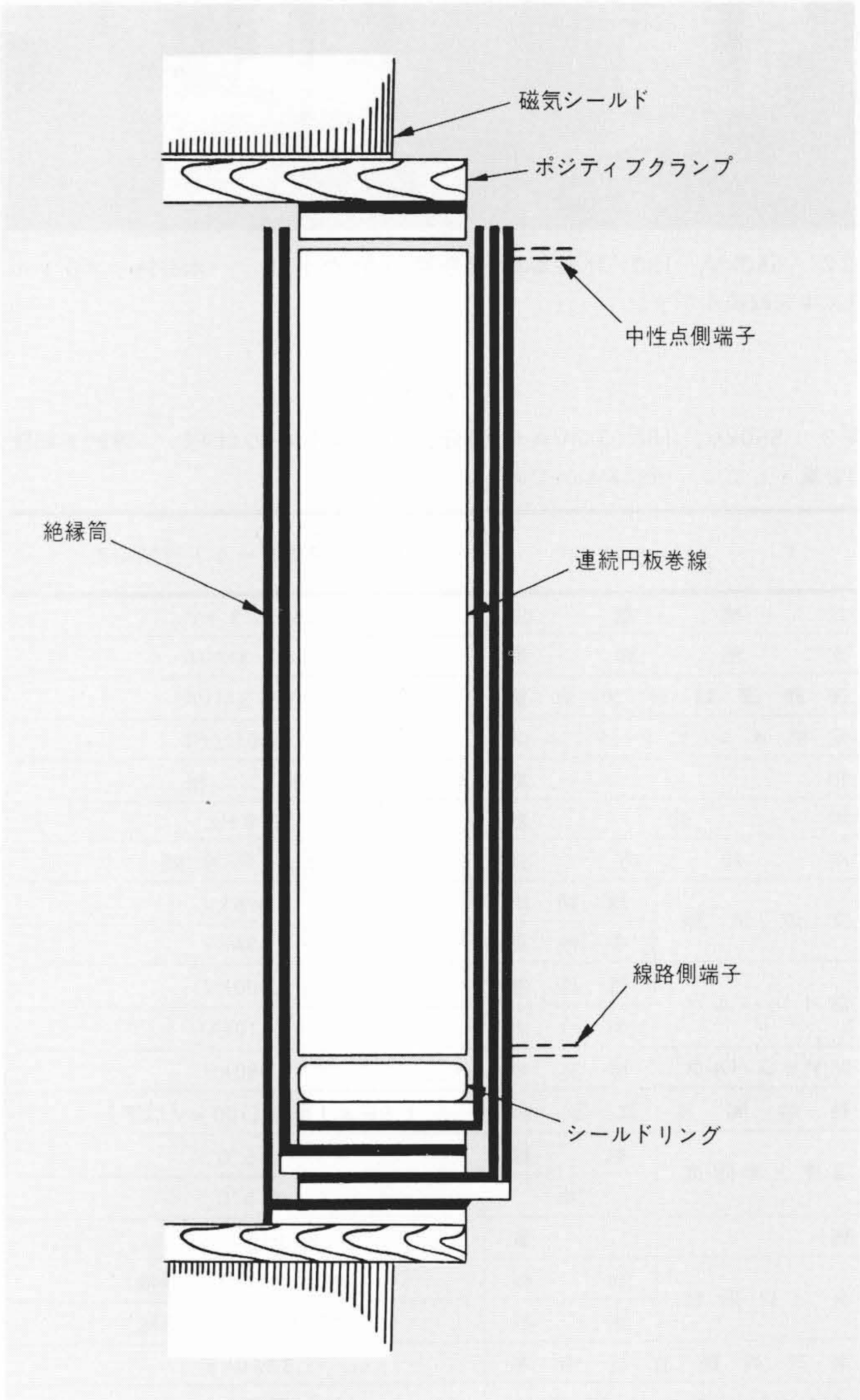


図5 550kV, 180/3MVA単相分路リアクトルの絶縁構造(巻線の縦断面) 連続円板巻線の500kV端部絶縁構造とし、試作でその信頼性を確認している。

るが、設計製作に際しては、磁界解析及び振動解析による基本的特性の把握が重要な検討事項となる。

試作で確認した構造を採り入れ、検証した解析法により各種の計算を行なって設計製作を行なった。磁気シールドの構造は、シールド内の磁束の流れ、漏れ磁束、電磁吸引力による振動などを十分に留意した構造にしている。積厚寸法などは、漏れ磁束との関係から適切な値になるよう選定した。

磁気シールドに作用する電磁吸引力は電源周波数の倍調波であり、中身全体の振動系が倍調波の加振力に対し共振しないように、磁気シールド全体の剛性を選定した。日立製作所の開発した磁気シールドの振動計算式は、巻線の振動の影響を考慮したもので、計算精度のより向上した解析法である。巻線の取扱い法としては、巻線のばねと質量を考慮したもので、分布定数系と集中定数系の方法があるが、通常のリアクトルでは両方法に大きな差異はない²⁾。本解析法は各種の試作で確認しており、その一例を図6に示す。モデルでの計算値と実測値を対比させたもので、振動モード、固有振動数とも良く一致している。

同図中の磁気シールドの振幅は、計算、実測とも見やすくするため拡大して示したものである。

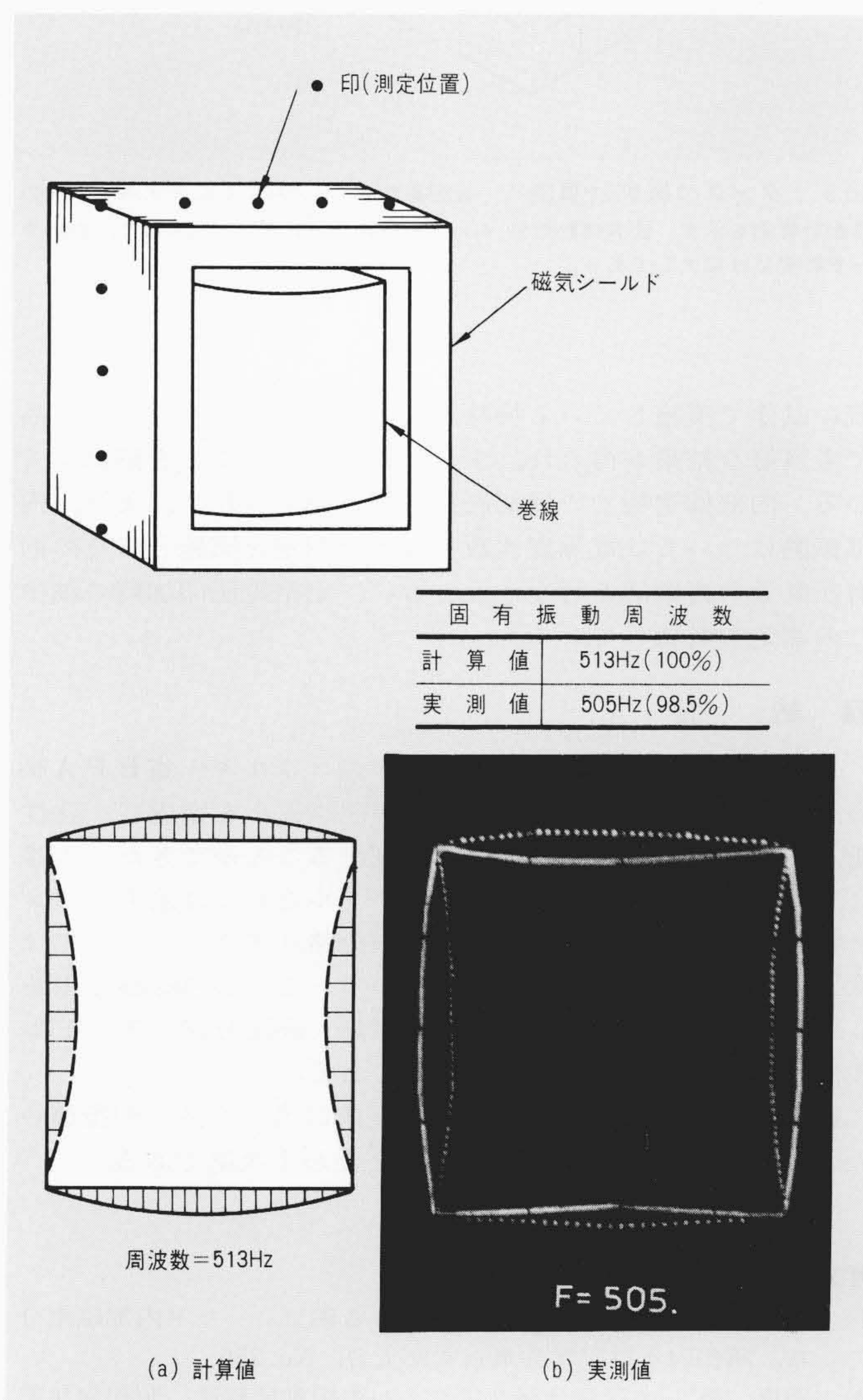


図6 磁気シールドの振動モード例 モデルでの計算と実測例で良く一致している。図示の振動モードの変位は計算(片振幅)、実測(両振幅)とも拡大したものである。

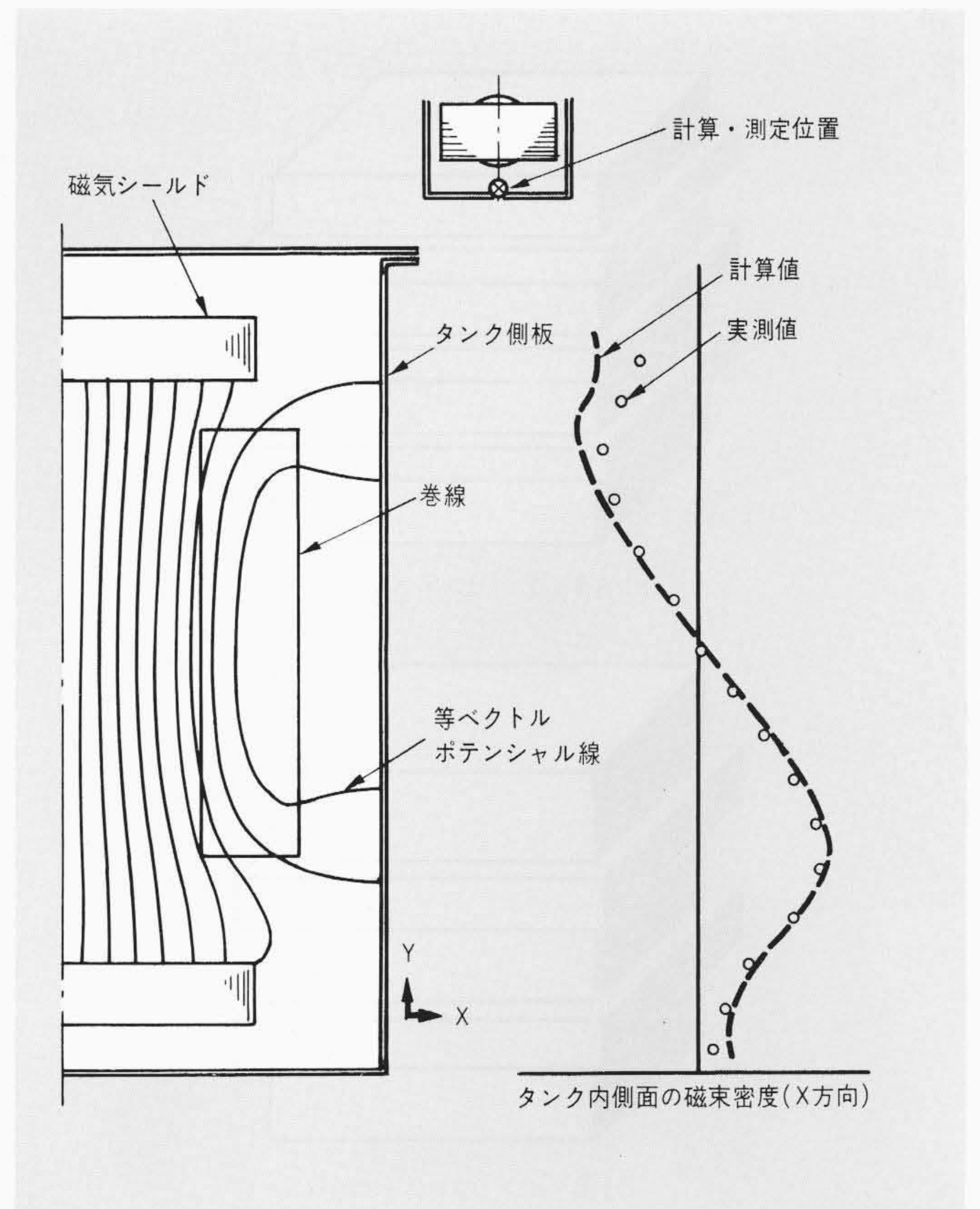


図7 漏れ磁束分布の計算と実測例 モデルのタンク内側面での計算と実測例で良く一致している。

4.3 内部構造

巻線空間部の磁束の大部分は磁気シールドに吸引されるが、一部分は漏れ磁束となる。磁気シールドの締付金具類はその材質、形状、寸法などを選定し、また、タンク内側面の一部にはタンクシールドを設けて、漏れ磁束による損失の少ない、局部過熱のない構造にした。いずれも各種の試作で確認した構造であり、また、磁界解析法に基づいて解析したものである。図7にタンク内側面での磁束分布の一例を示す。本図はモデルでの計算値と実測値を対比させたもので、磁束分布は良く一致している。

4.4 タンク

振動及び騒音の低減は、分路リアクトルとしての重要な課題の一つである。タンク構造についても、試作で確認した構造を採り入れて設計製作を行なった。振動解析も試作で検証した解析法に基づいて対処した。タンク全体及びステータ間の側板面の振動モードを求め、これらの振動モードから各点が適切な固有振動数になるように、タンク板厚、ステータの寸法、取付位置などを選定した。図8は試作で実施したモデルタンクの概略構造を示すもので、縦ステータを省略したものである。このモデルタンクでの計算の一例を図9に示す。有限要素法により解析したもので、いずれのモデルタンクについても固有振動数の計算値が実測値と良好に一致していることを確認している³⁾。

5 品質管理

本分路リアクトルについての設計製作は、信頼性向上の面から、製品の品質管理に留意した管理体制のもとに進めてきた。設計段階では、各種の解析法に基づいた性能の事前把握

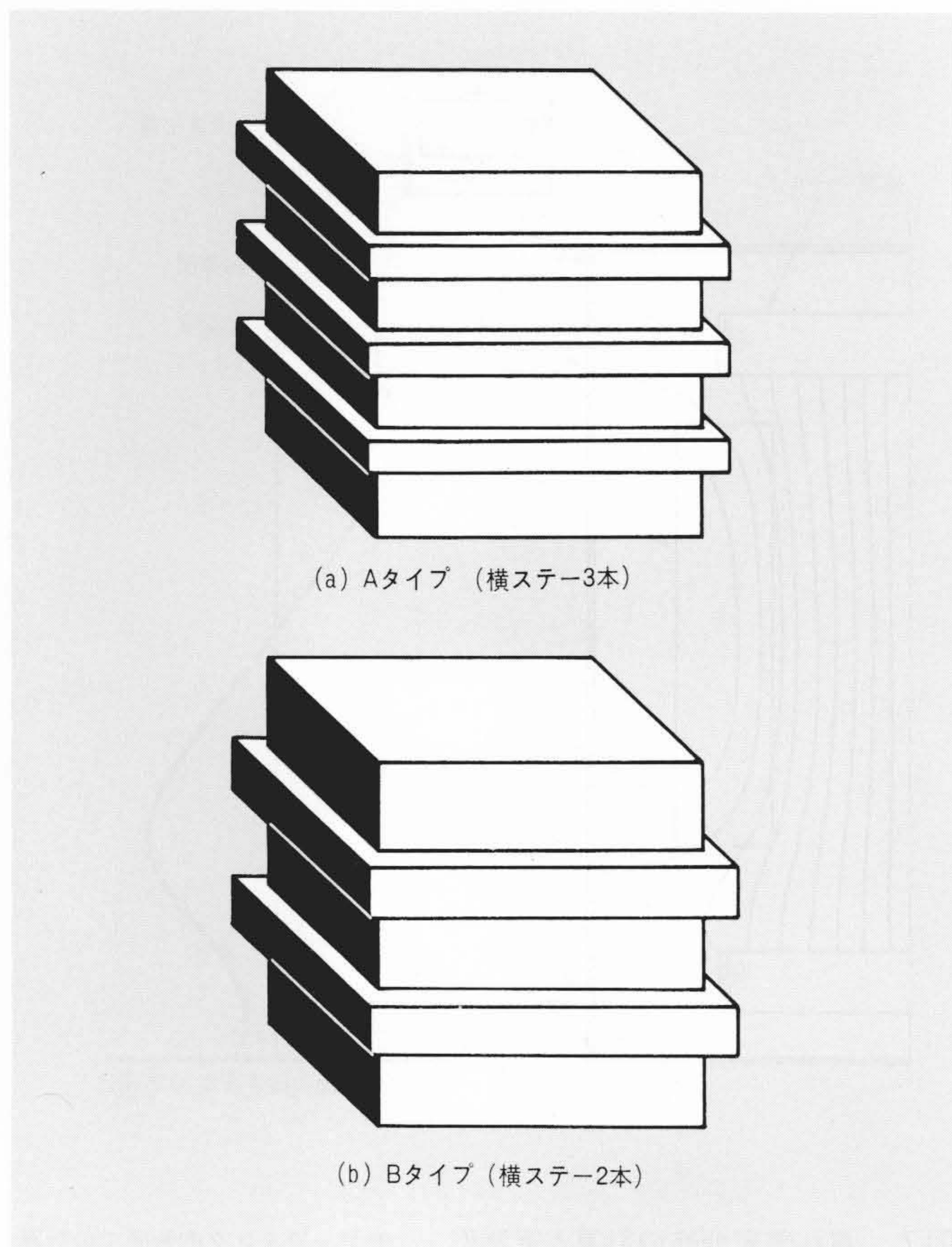


図8 モデルタンクの構成例 試作で実施したモデルタンクの構成例を示す。図示は縦ステーを省略したもので、各々のモデルタンクにつき縦ステーの寸法、取位位置を変えて試験を実施した。

はもとより、製作法、試験法に至るまで製品の信頼性、生産性、保全性などについての事前検討を行ない、その結果を設計図面に反映させた。製造技術面では、実器試作で確認した内容を十分に反映させるとともに、材料の品質管理を厳重に行なっている。特に、絶縁材料については非破壊検査によりボイド、異物の検出を行なって、事前にこれらのないことを確認したのち使用するなど、その信頼性の向上に努めている。また、超々高圧・大容量変圧器と同様な管理体制で、連続円板巻線機、防塵空調室などの製造設備のもとに製作した。更に、中身組立作業までは防塵空調室内で行なうなど、品質管理に十分留意した製作体制で実施した。

6 試験結果

完成した550kV、180/3MVA単相分路リアクトルについて、定格電圧で性能試験を実施し、すべて仕様を満足した。特に、損失、インピーダンスなどについては、設計値とほぼ一致するという良好な結果が得られた。また、振動、騒音についても、いずれも仕様値よりも大幅に小さい値であることを確認した。

インパルス耐電圧試験、交流耐電圧試験などの絶縁検証試験についてもすべて良好であった。特に、477kV、1時間印加の長時間交流耐電圧試験では、外部ノイズだけの無コロナという満足すべき結果が得られた。これらの検証試験の結果から、絶縁上の信頼性が極めて高いことを実証できたと考える。

これらの通常行なう検証試験に加え、本製品でも特殊試験を実施して、その特性を再確認した。表2に示したように、

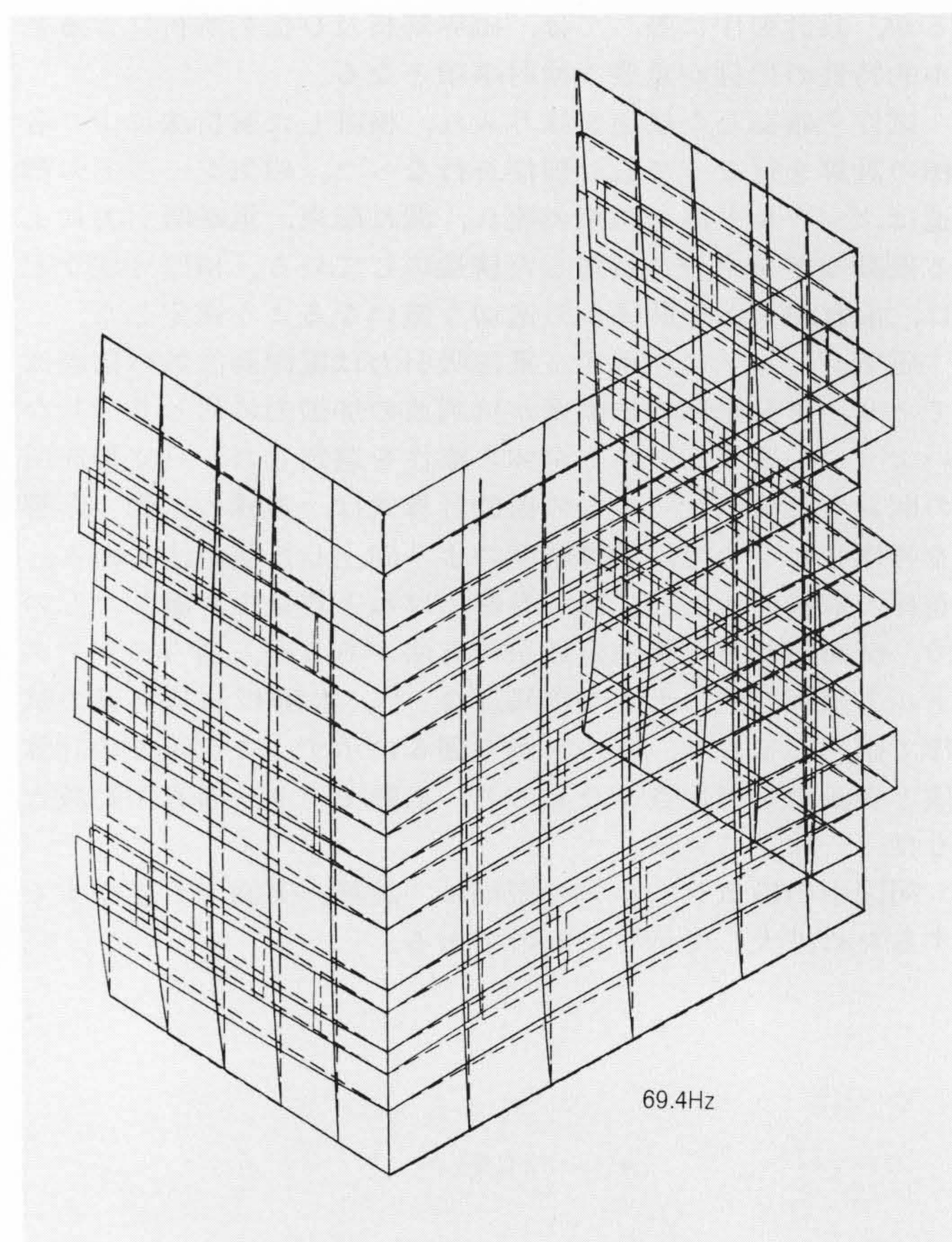


図9 タンクの振動計算例 有限要素法により解析したモデルタンクの振動計算例を示す。固有振動数69.4Hzでの振動モードを示したもので、振動モードの変位は拡大してある。

既に試作で実施している特殊試験の大部分を実施し、本製品でも良好な結果が得られ、すべて異常のないことを確認している。内部構造物での局部過熱は全く認められず、また、内部振動については電源周波数を変えた測定を実施してその固有振動数の再確認を行なうとともに、定格電圧印加時の油中での測定も実施している。

7 結 言

以上述べたように、アメリカ合衆国エネルギー省BPA納め、550kV、180/3MVA単相分路リアクトルを完成し、諸性能、絶縁強度の両面とも十分に検証することができた。本器は、我が国で製作された分路リアクトルとしては最大のバンク容量であるとともに、500kV級の分路リアクトルとしては世界的にも最大級の製品となるものである。この経験を生かし、今後は、国内仕様の超高压及び超々高圧分路リアクトルの信頼性向上に努力を重ねる考えである。

終わりに、本分路リアクトルの完成に当たり種々御指導いただいた関係各位に対し深く謝意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 鈴木、外：三相リアクトルにおける磁気シールド内部磁束分布、昭和54年電気学会東京支部大会、No. 255
- 2) 萩原、外：大容量分路リアクトルの振動計算法、昭和54年電気学会東京支部大会、No. 256
- 3) 萩原、外：大容量分路リアクトルタンクの振動解析、昭和55年電気学会全国大会、No. 584