

1,000 kV変圧器の開発

—バンク容量3,000 MVA, 1相2タンク構成変圧器—

Development of 1,000 kV Power Transformer

山形芳文* *Yoshibumi Yamagata*

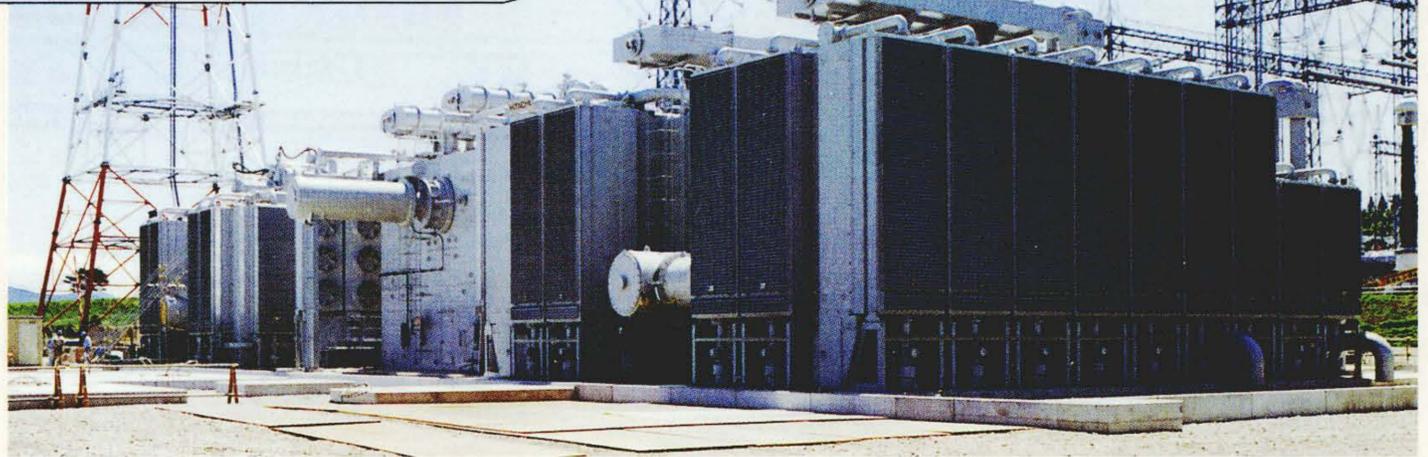
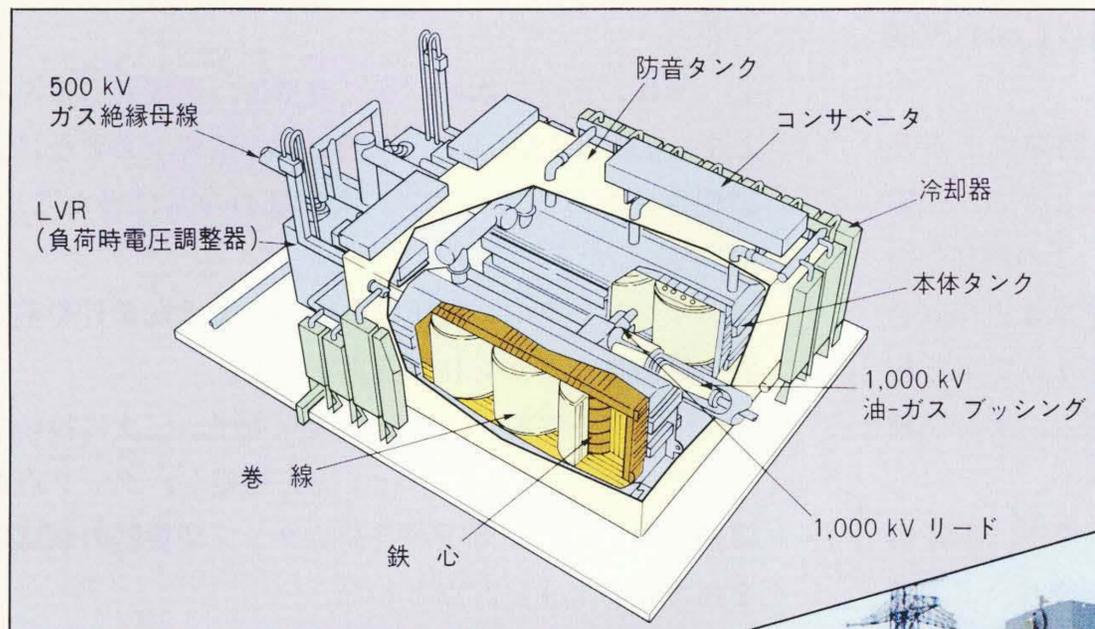
渡辺 優** *Masaru Watanabe*

稲垣恵造** *Keizô Inagaki*

田中晃司* *Kôji Tanaka*

前島正明** *Masaaki Maejima*

白坂行康** *Yukiyasu Shirasaka*



1,000 kV実証用変圧器の構造と現地据付け完了の外観

実証器は1相2分割構造で、二つのタンクをダクトによって接続して端子を引き出している。各端子はGIBに直接接続される。タップ電圧を調整する負荷時タップ切換器は、それぞれのタンクに取り付けられ、タップ差通電が可能な構造になっている。

信頼性の高い大容量の電気エネルギーを送電するため、21世紀初頭には1,000 kV送電の開始が予定されている。これに対応し、日立製作所は1,000 kV変電機器の開発を進めている。これらの変電機器の一つである1,000 kV変圧器を開発する最大の課題は、電圧が500 kV変圧器の2倍となっても、従来と同一の鉄道輸送制限寸法内で、十分な裕度を持った絶縁構造とすることである。平成7年からは、1,000 kV送電の実用化に向けて実証試験が開始される。

1,000 kV変圧器の開発にあたっては、各種パラメ

ータサーベイを実施して仕様を検討し、変圧器の1相を二つのタンクで構成し、1,000 kV側で接続して引き出す構造とした。さらに、適用新技術では各種要素試作によって信頼性の検証を行い、実用器と同規模の0号器を製作して総合的な検証試験を実施した。また、1相を二つのタンクで構成するため、変電所で据付けをする際にタンクをスライドしてドッキングする工法を新たに開発した。これらの技術を集大成して、平成7年の実証試験開始に向け変圧器1相を完成し据付けした。

* 東京電力株式会社 送変電建設本部 ** 日立製作所 国分工場

1 はじめに

電力はそのエネルギーとしての重要度が非常に高く、確実に伸びている需要に対しその安定供給がますます必要になっている。この対策の一環として、東京電力株式会社では21世紀初頭にわが国初の1,000 kV送電の開始を計画し、これに対応して現在日立製作所は1,000 kV変電機器の開発を進めている。

1,000 kV変電機器は世界的に先駆的な開発であると同時に、わが国特有の課題も想定されることから、送電開始に向け新たな技術開発が必要になる。この確立のため、東京電力株式会社では平成7年から東京電力株式会社新榛名変電所(以下、新榛名変電所と言う。)で実器相当の設備を実際の変電所と同等条件で設置し、実証試験を実施する。

ここでは、実証設備用1,000 kV変圧器(以下、実証器とも言う。)の製作に先立って実施した巻線やリードの各種要素の検証および実証器と同等設備を試作した0号器に加え、仕様や構造検討など実証器を製作、試験して据え付けるまでの過程について述べる。

2 実証器の基本仕様

1,000 kV変圧器の基本仕様を表1に示す。同表には、従来との比較を示すため、500 kV変圧器の基本仕様も併

表1 基本仕様と構造比較

1,000 kV変圧器と500 kV変圧器の仕様と構造を比較すると、各項目で約2倍になっている。1,000 kV変圧器の特長は、1相が2分割構造になっていることである。

項 目		1,000 kV変圧器	500 kV変圧器	
仕 様	形 式	屋外用, 送油風冷式 単相単巻変圧器	同左	
	定 格 電 圧	一 次	1,050/√3 kV	525/√3 kV
		二 次	525/√3 kV	275/√3 kV
		三 次	147 kV	63 kV
	定 格 容 量	一次・二次 三 次	3,000/3 MVA 1,200/3 MVA	1,500/3 MVA 450/3 MVA
イ ン ピ ー ダ ン ス		18%	14%	
一 次 タ ッ プ 幅		±7%(27点)	±5%(23点)	
試 験 電 圧	交 流	1.5E(1時間)+ √3E(5分)+ 1.5E(1時間)	1.5E(1時間)+ 2.0E(1分)+ 1.5E(1時間)	
	イ ン パ ル ス	1,950 kV	1,300 kV	
構 造	鉄 心 構 造	単相5脚鉄心	単相4脚鉄心	
	巻 線 構 造	グラディエント キャパシタンス インタリーブ	C.C.シールド	
	タ ン ク 構 成	1相2タンク	1相1タンク	

記した。

1,000 kV変圧器は、500 kV変圧器と同じ中性点切換方式単相単巻変圧器を採用した。特長は以下のとおりである。

- (1) 1,000 kV変圧器は、鉄道やトレーラなどの輸送制限から1相2分割輸送とし、現地で並列接続する構造とした。
- (2) 一次および二次のバンク容量は、送電の容量を考慮して3,000 MVAとし、三次容量は、系統上必要な最大の調相容量から一次および二次容量の40%に当たる1,200 MVAとした。
- (3) インピーダンス電圧は、1,000 kV系統条件や輸送制限、経済性などから18%を選定した。
- (4) 一次タップ幅は、系統の運転電圧、三次に接続するコンデンサ容量などから±7%を選定し、タップ点数は切換時のステップ電圧が負荷時タップ切換器の制限電圧を超えないように27点とした。
- (5) 絶縁試験で、交流試験については長時間部分放電試験とし、運転期間中に想定される運転電圧と系統の過電圧、および絶縁特性から、 $1.5E(1時間) - \sqrt{3}E(5分) - 1.5E(1時間)$ を実施して部分放電のないことを確認する(ここで、 $E=1,100/\sqrt{3}$ kV)。

雷インパルス試験については、各種の条件による系統過電圧解析結果から、一次電圧は1,950 kV、二次電圧は1,300 kVを選定した。

3 1,000 kV変圧器

1,000 kV変圧器は輸送制限から1相2分割の構造を採用したが、バンク容量は3,000 MVAであるため、1タンク当たりの容量は従来の500 kV変圧器と同一の500 MVAである。また、三次の容量は従来の一次および二次容量の30%から今回40%に増加している。

1,000 kV変圧器を開発するには、これまでの500 kV変圧器に比べ2倍の電圧を持つ巻線を、絶縁の高信頼性を維持しながら同一の制限寸法内に収めることが最大の課題となる。その設計および開発内容について以下に述べる。

3.1 基本設計

1,000 kV変圧器は、三次容量が40%に増加しており、一つのタンクの巻線を3脚並列構造にした。鉄心は、巻線の構造に合わせ単相5脚鉄心構造を採用した。

1,000 kV側となる直列巻線は、占積率向上と雷インパルスに対する巻線内電位分布を改善した、グラディエン

ト キャパシタンス インタリーブ巻線を採用した。雷インパルスに対する巻線内電位分布を図1に示す。

巻線内絶縁構造は、図2に基本構造を示す誘電率整合絶縁を採用した。誘電率整合絶縁は、巻線内の絶縁物であるプレスボードの比誘電率を低減して小形化および信頼性の向上を図っており、500 kV変圧器で先に実用化している。

3.2 主な要素試作

1,000 kV変圧器開発のため、各種要素試作を実施した。主要項目である巻線とリードについて以下に述べる。

3.2.1 巻線モデル

変圧器巻線には雷サージ、断路器サージ、地絡サージなど幅広い周波数領域の過電圧が侵入してくる。これらのサージに対して1,000 kV変圧器巻線の電位分布を改善して絶縁信頼性の向上を図るため、グラディエントキャパシタンス インタリーブ巻線を採用した。この巻線は、巻線内の直列キャパシタンスを高压線路側で大きくとり、中性点側に向け段階的に小さくすることで従来のインタリーブ巻線に比べ電位分布をいっそう均一に改善したものである。

この巻線の信頼性を検証するため、実器と同一の巻線一組(1/6相分)を製作して、電位分布特性を検証した。電位分布測定結果の一例を図3に示す。試験の結果から対

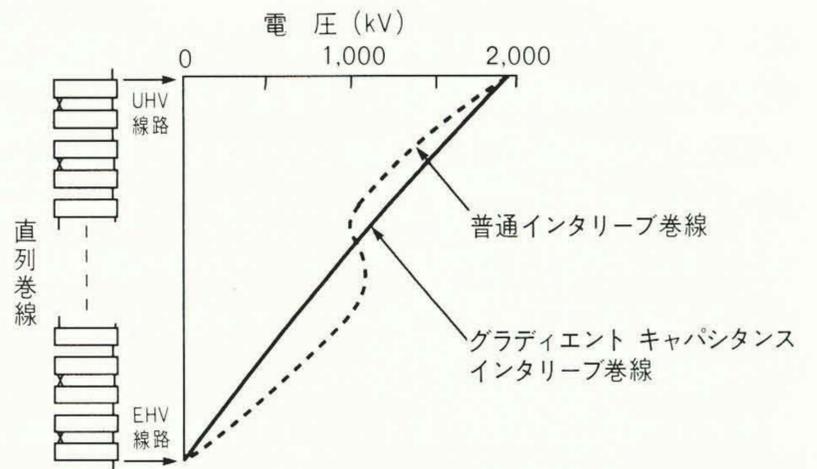


図1 グラディエント キャパシタンス インタリーブ巻線の採用均一で直線的な電位分布に改善され、巻線内の電位振動が低減される。

地電位分布およびセクション間の発生電圧は解析とよく一致して均一である。さらに、コイル内部の発生電圧を詳しく検証した。コイルのモデルに裁断波形を印加したときのコイル内部発生電圧解析結果、および測定結果を図4に示す。解析と測定結果はよく一致しており、内部に生じる電圧はコイル間最大発生電圧を超えないことを確認した。これらの結果から、1,000 kV側巻線の信頼性を検証できた。

3.2.2 1,000 kVリードモデル

1,000 kV変圧器は、その輸送制限から1相を2分割構造としたために、これら二つのタンク間をダクトにて接

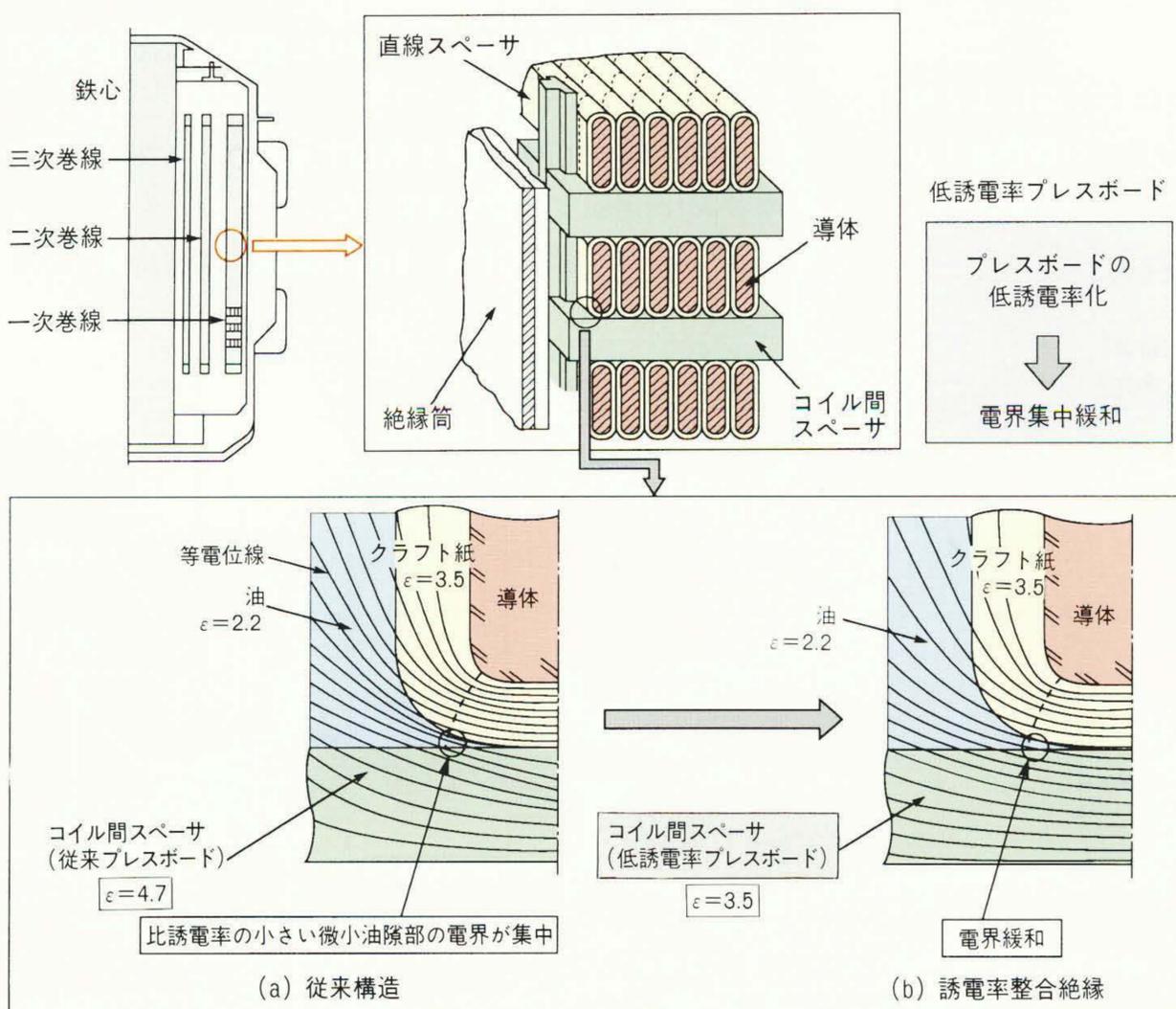


図2 誘電率整合絶縁の基本構造
誘電率整合絶縁は、プレスボードの比誘電率を、電線の絶縁被覆であるクラフト紙と同一の値まで低減し、巻線内の局所的な電界集中を緩和して絶縁の信頼性を向上させる。

続して、端子を引き出す必要がある。1,000 kV側のT分岐構造は初回採用になるため、実器相当のモデルを製作し構造、絶縁特性、輸送の影響などを検証した。T分岐部のモデル全体と接続に用いている多重バリヤリードを図5、6に示す。多重バリヤリードと巻線側の接続部は、かん合方式を採用して絶縁テーピング不要とし、組立時間の短縮と信頼性の向上を図った。

モデルの絶縁特性は、雷インパルスおよび交流耐電圧試験でほぼ設計どおりの性能を検証できた。絶縁特性試験後はモデルをトレーラに積み、工場と新榛名変電所間を往復して輸送時の信頼性検証を行った。

3.3 0号器

実証器の1タンク分(1/2相分)相当の試作器を0号器として先行試作し、絶縁限度試験などを含めた各種検証試験を実施した。0号器の製作範囲と試験状況を図7、8に示す。

試験は、一般特性試験、温度特性試験、絶縁特性試験、騒音振動特性試験など種々の試験を実施して、設計値と一致することを確認し、絶縁限度試験でも十分な性能があることを確認した。また、タンクとリードダクトの据付け・組立工法の検証も実施して、作業が問題なく計画どおりできることを確認した。

4 実証器

4.1 製作および試験

種々の要素試作、限度試験も含めた0号器による検証、およびこれまでの各種開発結果から、信頼性を十分

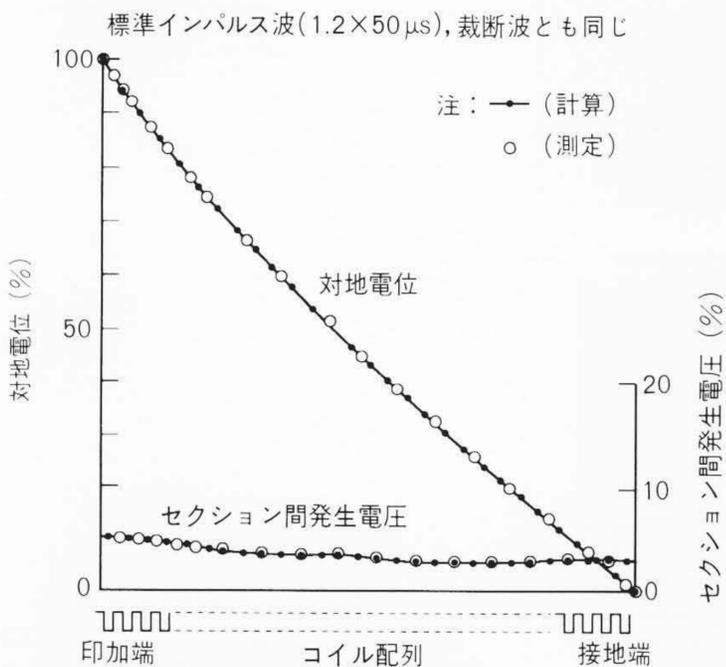


図3 直列巻線の電位分布特性

電位分布測定結果は計算値によく一致し、均一で信頼性の高い分布になっている。

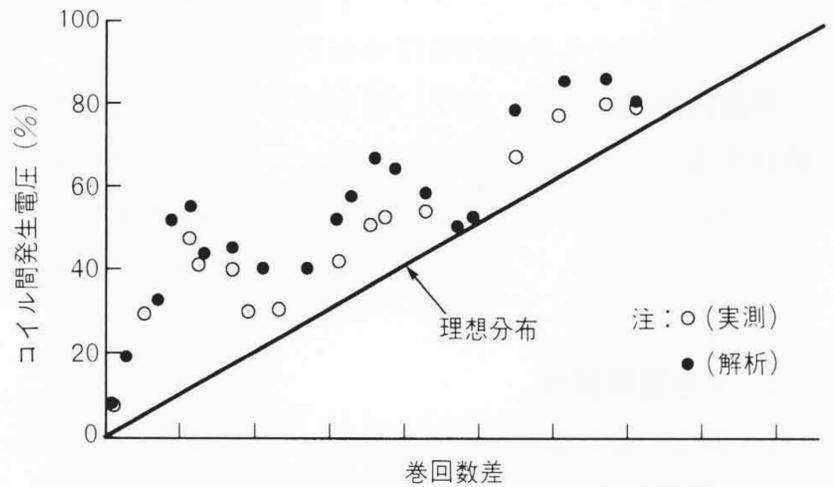


図4 コイル内部発生電圧

内部の発生電圧は、コイル間の最大発生電圧を超えることはない。

に持つ実証器の製作を行うことができることを確認した。また、絶縁特性は変圧器内部の塵埃(じんあい)などの影響を受けやすいため、実証器製作に先立ち下記の製造設備を設置し、異物および塵埃の侵入に対する品質管理の向上を図った。

- (1) 防塵空調室内の巻線作業場と巻線組立場をさらに防塵室で覆い、防塵室の二重化を図った。
- (2) 防塵空調室である中身組立室に、部品などを搬入するための搬入口用防塵室を設置した。
- (3) 鉄心の鉄板を組み合わせる積鉄の作業場を防塵室で覆った。
- (4) 現地で変圧器内部組立作業時に使用する高性能の乾燥空気発生装置を用意した。
- (5) 変圧器の油中塵埃量を低減するため、高性能の油除塵装置(汜過粒度1 μ)を用意した。

実証器は、製作完了後一般特性試験、温度試験、タッ

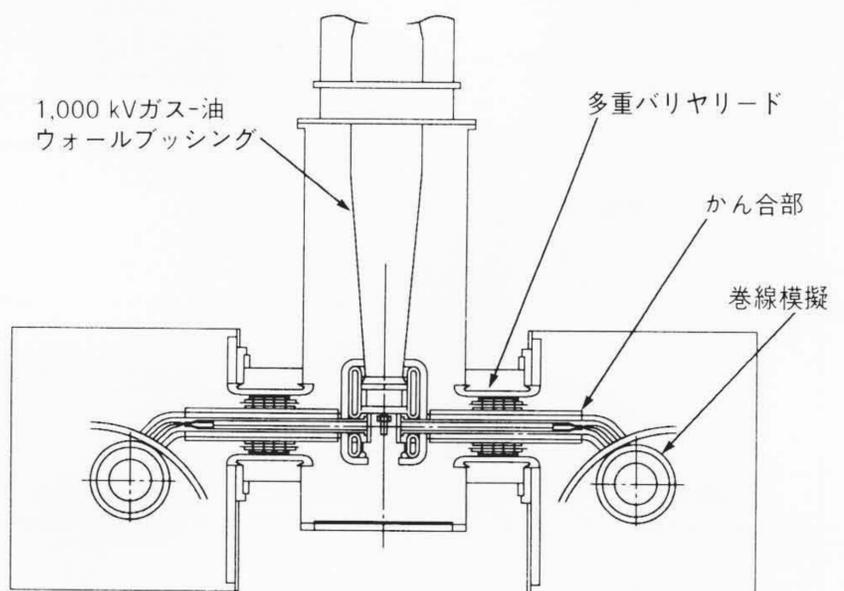


図5 T分岐モデル

二つのタンクの接続部と端子の部分を実器サイズでモデル化した。

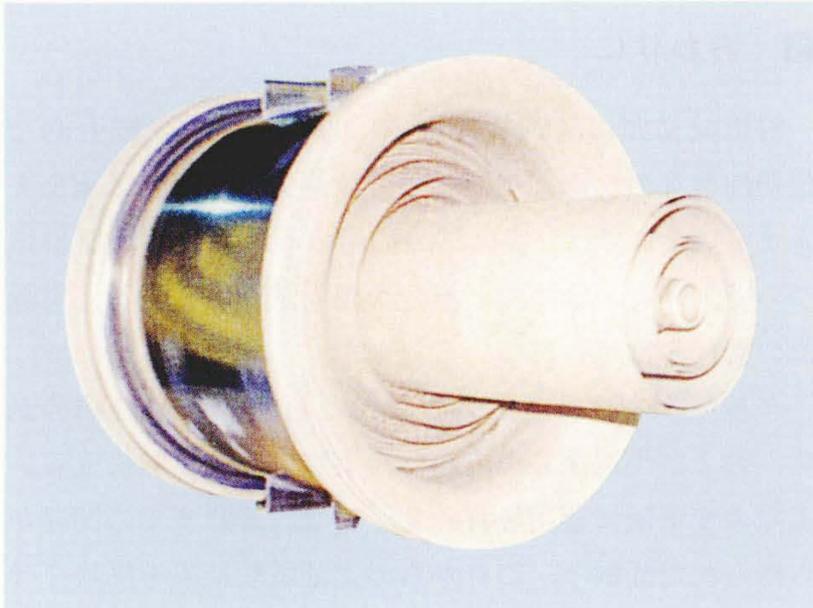


図6 多重バリヤリード

図5に示すT分岐の接続部分に採用した。高圧と接地間を多数のバリヤで油隙細分割し絶縁特性を向上する。

プ差通電試験、流動帯電試験、絶縁特性試験など製品としての検証試験を行い、設計値とほぼ同一の結果を得、十分な信頼性を確認した。実証器の工場試験の外観を図9に示す。

4.2 変圧器据付け

実証器は、工場試験終了後外部付属品を解体し、各タンクごとに新榛名変電所まで輸送した。工場からJR渋川駅までは貨車輸送とし、渋川駅から変電所までは急こう配でも輸送可能な新型のトレーラで輸送した。

変圧器の現地据付けでは、1相2分割したタンクを接続する際に、工場試験で確認した信頼性を現地でそのまま維持することが最大の課題である。今回、0号器および実証器の工場試験時に検証・確認したT分岐の多重

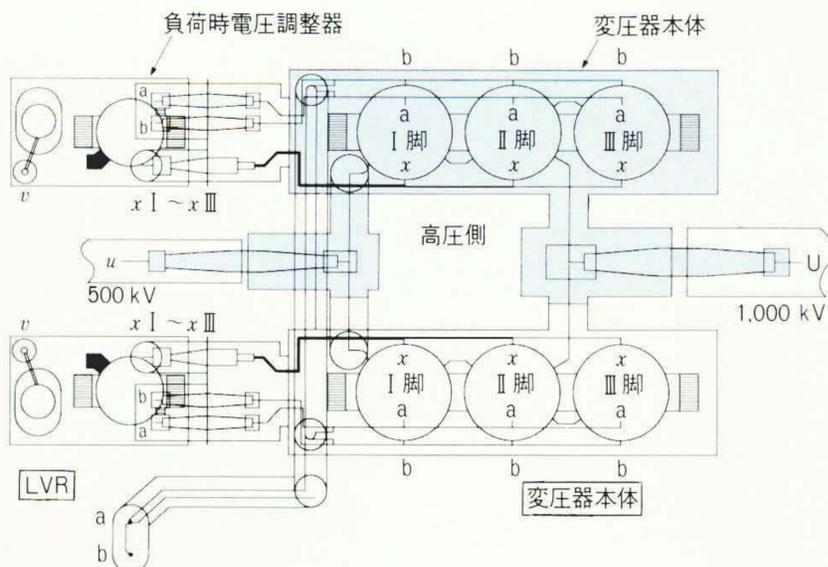


図7 0号器の製作範囲

全体は1相分を示すが、青色部の1タンク分($\frac{1}{2}$ 相分)が0号器の製作範囲を示す。



図8 0号器の試験状況

工場内のUHVホールで試験を実施した。すべての端子を気中に引き出して試験電圧を印加した。

バリヤリード構造と接続ダクト、およびタンクをスライドさせ接続するスライドドッキング工法を新たに開発した。1,000 kVリード部分がドッキングする多重バリヤの接続部は、かん合方式にして絶縁テーピングを不要とし、リードそのものはボルト接続にした。この方式の採用により、現地の気中露出作業時間を大幅に低減した。

スライドドッキング工法の概略を図10に示す。タンク開口部は防塵室で覆い、気中露出する作業の品質管理に万全を期した。この後、外部付属品などの取り付け、絶



図9 実証器

実証器の工場内完成の外観を示す。工場試験は0号器と同様にUHVホール内で実施した。

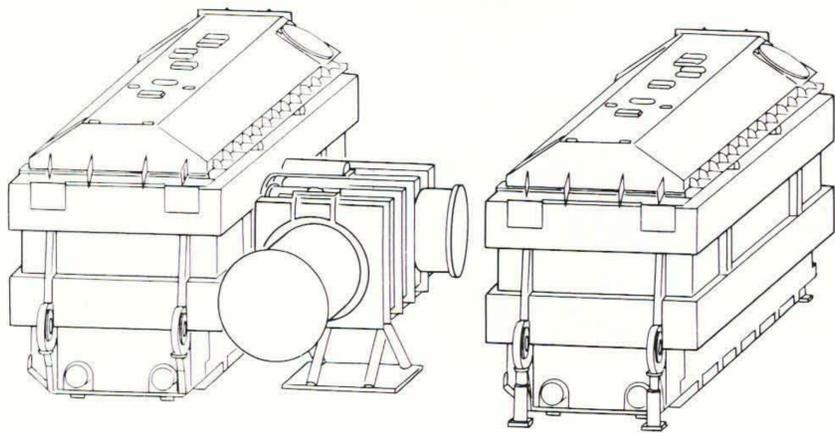


図10 二つのタンクのドッキング

一つのタンクをセット後T分岐の接続ダクト，もう一方のタンクを順番にスライドさせ，精度よくドッキング接続する。

縁処理などを完了させ，据付試験によって変圧器の健全性を確認した。

5 おわりに

21世紀初頭に計画している1,000 kV送電の総合的な信頼性検証のため，実器相当の設備による実証試験を実施する。ここでは，実証試験に用いる1,000 kV変圧器について，開発の経緯などを含め要素試作，0号器，実証器の製作・据付けについて述べた。

今後，ガス絶縁開閉装置などと組み合わせた総合試験，および現地試験を実施し，実際の実証試験に入る。実際の変電所に適用される変圧器は，これまでの開発から得られた経験と，これからの実証試験結果を反映させいっそう信頼性の高いものにする必要がある。これらを確実なものとするため，実証試験でのデータの十分な検討と蓄積を行っていくとともに，これらの開発技術を500 kV以下の変圧器へ適用拡大していく考えである。最後に，この開発についてご指導いただいた東京電力株式会社の関係各位に対し深謝する。

参考文献

- 1) 田邊：100万V昇圧に向けた技術開発・建設について，平成5年電気学会電力・エネルギー部門大会，No.585
- 2) 山田：特集：UHV交流送電，I．総論，電気学会誌，102巻，11号(昭57-11)
- 3) 稲垣，外：変圧器巻線の電位分布特性，平成5年電気学会電力・エネルギー部門大会，No.585
- 4) 唐木，外：1,000 kV変圧器の部分モデル検証，平成5年電気学会電力・エネルギー部門大会，No.582
- 5) 山形，外：1,000 kV変圧器0号器の開発，平成5年電気学会電力・エネルギー部門大会，No.581
- 6) 山形，外：1,000 kV変圧器実証器の完成，平成6年電気学会全国大会，No.962