

# 21世紀への懸け橋，1,000kV 変電機器の開発

## Development of 1,000kV Transformer and Gas-Insulated Switchgear

今後も着実に増加が予想される電力需要に対応し、東京電力㈱では21世紀初頭を目標に大容量高効率送電が可能な1,000kV (UHV: Ultra High Voltage) 系統の導入が計画されている。このUHV送電は世界的にも実績がほとんどなく、当該規格もないことから系統特性も加味しながら機器に求められる基本性能の考えかたまで掘り下げて検討を行った。

ここでは、この基本性能の考えかたから始め、従来の500kV変圧器と同一輸送制限内で2倍の電圧となる1,000kV変圧器を完成させた開発技術や、従来の500kV遮断器と同様の遮断点2点切りで完成した1,000kV遮断器などの1,000kVガス絶縁開閉装置に対する世界トップクラスの適用技術と試験評価技術の成果につき紹介する。

To meet the expected steady growth in electric power demand, The Tokyo Electric Power Co., Inc. is planning to adopt a 1,000kV ultra-high-voltage (UHV) system which will enable large-capacity, high-efficiency transmission by the beginning of the 21st century. There has been no experience in UHV transmission hitherto, and hence no applicable worldwide standard exists.

In these papers, the requisite performance characteristics of 1,000kV equipment and its basic specifications are outlined, then the state-of-the-art technologies utilized for the development of a 1,000kV transformer, and a 1,000kV gas-insulated switchgear (GIS) incorporating a 1,000kV gas circuit breaker (GCB), are described.

### 1,000kV 変電機器に求められる基本性能の考えかた

#### Basic Characteristics Required for 1,000kV Transmission Facilities

横田 岳志  
T. Yokota

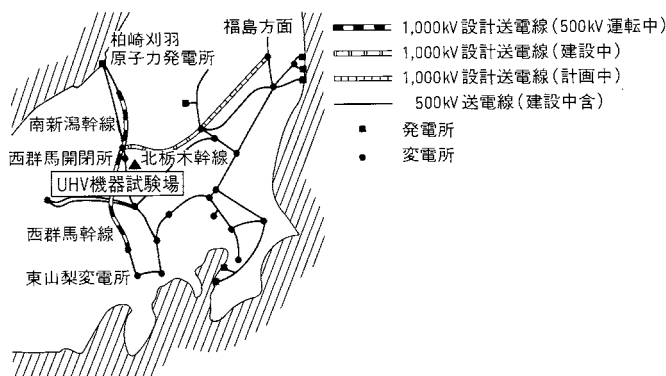


図1. 東京電力㈱の1,000kV送電計画 21世紀初頭に昇圧予定で、東西約240km、南北約190kmの大規模系統となる。

Planned 1,000kV power line network of The Tokyo Electric Power Co., Inc.

### 1 まえがき

1,000kV送電は世界的にも実績がほとんどなく、国内、海外にも当該規格もないことから、図1に示すUHV系統に特有な特性も加味しながら、各機器共通の基本仕様から機器個別の特殊仕様まで総合的な検討を行った。

### 2 系統特性から変電機器に求められる基本性能

#### 2.1 機器を小型にするための絶縁仕様の考えかた

送電鉄塔においては、各部の絶縁寸法を決定する遮断器の開閉サージ過電圧などの抑制を図り、併せて送電線両端に過電圧抑制に効果のある高性能避雷器を置くことにより、開閉サージ過電圧値を従来の500kV系統における2.0 puから、1.7 pu (1.0 pu = 定格電圧の対地分) にまで抑制することが可

能となり、従来の500kV鉄塔から外挿される大きさよりも格段にコンパクトな鉄塔が実現した。

同様に変電機器においては、その絶縁寸法を決定している雷インパルス耐電圧 (LIWV: Lighting Impulse Withstand Voltage) 仕様を可能なかぎり低く設定できるよう高性能避雷器を適用し、あわせて断路器サージも抑制を図ることとした。図2に実証試験用ガス絶縁開閉装置 (GIS)、変圧器に対する試験電圧仕様、および500kV系と1,000kV系におけるLIWV

試験電圧	LIWV	変圧器		GIS
		一次 1,950kV 二次 1,300kV		2,250kV
AC		1.5E (60分)	$\sqrt{3}E$ (5分)	1.5E (30分)
			1.5E (90分)	$\sqrt{3}E$ (1分)
				1.5E (30分)

$1E = 1,100 / \sqrt{3} \text{ kV}$

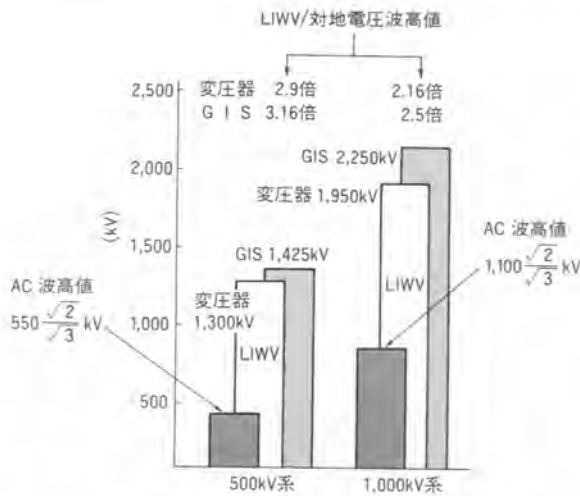


図2. 1,000kV 実証器 (変圧器, GIS) の試験電圧仕様 500kV 系に比べ、1,000kV 系は大幅な絶縁仕様の合理化が図られている。  
Testing voltage specifications of 1,000kV actual field model

と商用周波 (AC) 対地電圧の波高値の比の大きさを示す。1,000kV 系は 500kV 系に比べ 20~25% LIWV の値が低減され、機器絶縁寸法の縮小化が可能な仕様になっているのがわかる。

### 2.2 1,000kV 送電系統の特徴と変電機器への配慮事項

1,000kV 送電線は 500kV 送電線よりも運転電圧が高く、送電亘(こう)長も長いことから格段に送電線の充電容量が大きくなる。この影響としてはフェランチ現象による電圧上昇、負荷遮断時の商用周波短時間過電圧 (ACTOV: Alternating Current Transient Over Voltage) の発生、送電線事故時二次アークの継続時間が延びることによる再開路成功率の低下などの現象が出てくる。これに対応するため遮断器に対する特殊な遮断責務や、避雷器への高い放電耐量責務、送電線の高速再開路実現のための高速接地開閉器 (HSGS: High Speed Grounding Switch) の導入などが変電機器として必要となる。

## 3 代表機器の基本性能の考えかた

### 3.1 遮断器

#### 3.1.1 開閉サージ抑制のための抵抗遮断・抵抗投入方式

想定される最長線路の条件で抵抗遮断・抵抗投入解析を実施し、開閉サージ倍率が 1.7 pu に収まるような抵抗値の選定と主遮断部と抵抗遮断部の動作協調につき検討を加えた。この結果、寸法上の制約とサージ抑制を満たす最適値として抵

抗値 700Ω と遮断時の抵抗遮断部遅延時間 30ms および投入時の抵抗遮断部先行時間 10ms を選定した。

**3.1.2 遮断責務** 事故遮断責務は抵抗遮断方式の採用と高性能避雷器の適用によって、過渡回復電圧 (TRV: Transient Recovery Voltage) 峻(しゅん)度、TRV ピーク値ともに大幅に抑制され、遮断点 1 点分で見えた場合に 500kV 1 点切り遮断器より十分緩和された責務となる。一方、従来の遮断器では進み電流遮断責務の TRV 峻度が緩やかなのに対して、抵抗遮断方式を用いる場合抵抗 700Ω が挿入されることによる電流位相の変化から、 $\sin \omega t$  波形のように遮断直後の TRV 峻度が厳しい進み電流遮断責務となる。

### 3.2 断路器

断路器の開閉操作により発生する断路器サージは、雷サージよりも頻繁に GIS 内部で発生する特徴的なサージである。断路器サージは抑制対策を施さない場合には理論上 LIWV 2,250kV を超える過電圧が発生することもありうる。そこで、抵抗付断路方式によって断路器開閉時のサージを抑制することとした。抵抗値としてはサージ抑制に効果があり、断路器への実装上也影響の少ない 500Ω を選定した。

### 3.3 HSGS

HSGS は従来にない新しい機器で、送電線の再開路動作中に両端が開放された送電線を強制的に接地し、アークホーンの地絡二次アークの消弧を促進することにより、遮断器の高速再開路を確実に実現するために適用する。HSGS の動作は同じ回線の隣接する相が送電を続けているなかで行うことか

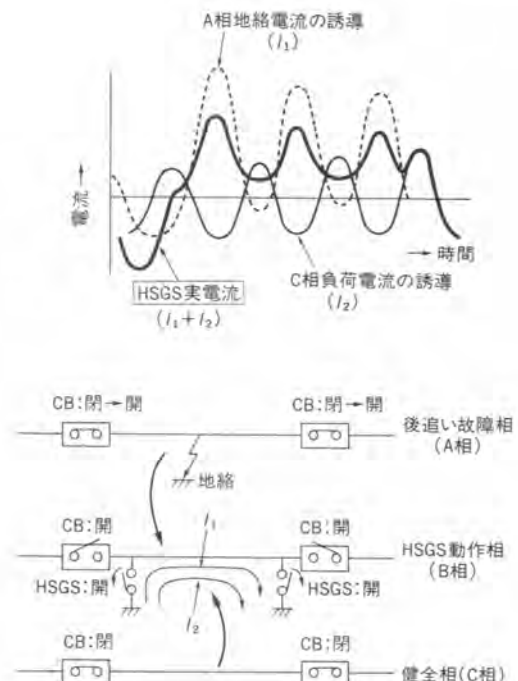


図3. 零ミス責務発生メカニズム HSGS 電流は他相の誘導を受け、電流零点がない状態となる。

Mechanism of current zero point missing phenomenon in HSGS

ら、大きな静電・電磁誘導を受けることとなる。そのため HSGS の責務は従来の送電線用接地開閉器の責務に比べ、はるかに厳しく遮断器並みとなる。評価の結果、図 3 のように特殊な責務として最長 80ms も電流零(ゼロ)点が現われない零ミス遮断責務となることが判明し、特殊な仕様として基本仕様に反映することとした。

### 3.4 避雷器

大幅な絶縁合理化設計を実現するうえでそのかなめとなる避雷器の  $V-I$  特性は、従来 500kV で実用化されている避雷器の  $V-I$  特性から外挿したものよりも、大幅に低減された  $V-I$  特性 ( $V20kA:1,620kV$ ) が求められる。このため、解析の結果、ACTOV 検出リレーで過電圧が除去されるまでの間、避雷器に注入される最大エネルギーが 1 相当り 55 MJ となることがわかり、この値を放電耐量仕様とした。

## 4 あとがき

これら基本性能に基づき開発された 1,000kV 変圧器・GIS は、図 4 に示すように東京電力(株)新橋名変電所に併設された UHV 機器試験場で 1995 年秋から長期課通電実証試験に入る予定である。



図 4. 東京電力(株)実証試験設備 (UHV 機器試験場) 矢印部が当社納入分。

Shin-Haruna 1,000kV UHV testing station

## 謝 辞

基本仕様は東京電力(株)によって検討が進められたが、当社は構成機器に対して求められたこの基本仕様をハードウェアとして実現するために必要な種々の評価・検討をさせていただいた。この結果を反映し各構成機器の最適な仕様を決定するための検討において、当社が協力させていただく機会を与えられ、新たな知見を蓄積することができたことを東京電力(株)の関係各位に深謝する。

## 1,000kV 変圧器の技術開発

Development of 1,000kV Transformer

海老沢 義人  
Y. Ebisawa

近間 敏夫  
T. Chikama

### 1 まえがき

1,000kV 変圧器は、現在の国内電力系統最高電圧である 500kV 系統と、21 世紀初頭に運転開始を予定する 1,000kV 系統を連系する変圧器であり、これまでに例を見ない高電圧大容量変圧器である。

この変圧器の開発にあたっての最大のポイントは、貨車輸送を行うため、現在の変電所向け 500kV 変圧器と同一の鉄道輸送限界 (幅 3.1 m × 高さ 4.1 m) のなかで、2 倍の電圧となる 1,000kV 変圧器を製作することであり、油入変圧器 100 年の歴史のなかで培った技術を集大成させ完成に至ったことである<sup>(1)</sup>。

ここでは、1,000kV 変圧器の概要を述べるとともに、開発の経緯と開発のポイントとなった技術を紹介する。

### 2 1,000kV 変圧器の構成

#### 2.1 変圧器仕様

図 5 に工場で作成した 1,000kV 変圧器、表 1 に仕様を示す。



図 5. 工場完成の 1,000kV 変圧器 1,000/√3kV, 3,000/3MVA 内鉄型単相巻巻変圧器。手前が 1,000kV、奥が 500kV 端子であるが現地では GIS 直結。

1,000kV transformer in factory test

表1. 1,000kV 変圧器の仕様

Specifications of 1,000kV transformer

定格容量	3,000/3MVA	試験電圧	LIWV 一次 1,950 kV AC $\sqrt{3}E$ (1.5E   時間 $\sim\sqrt{3}E$ 5分 $\sim(1.5E)$ 時間)
定格電圧	一次 1,050/ $\sqrt{3}$ kV 二次 525/ $\sqrt{3}$ kV 三次 147kV		
一次電圧タップ幅	±7% (27点)		
インピーダンス	18%		
冷却方法	送油風冷		
騒音	65 dB (IE=1,100/ $\sqrt{3}$ kV)		

この変圧器は、主変圧器と負荷時電圧調整器を組み合わせた中性点電圧切換方式の内鉄型単相単巻変圧器である。

### 2.2 変圧器基本構成

変圧器容量は、これまでの変電所向け国内最大容量 500kV 変圧器 (1,500/3 MVA) の2倍となり、鉄道輸送限界の関係から図6のように主変圧器を二分割構成とした。分割単位と

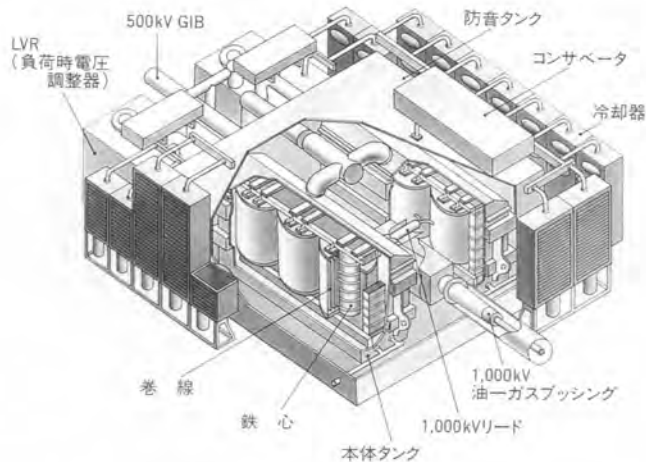


図6. 1,000kV 変圧器構造 鉄道輸送限界の関係から単相器を2分割構成。幅14m、奥行き18.7m、高さ8.9m、総重量920トン。

Structure of 1,000kV transformer

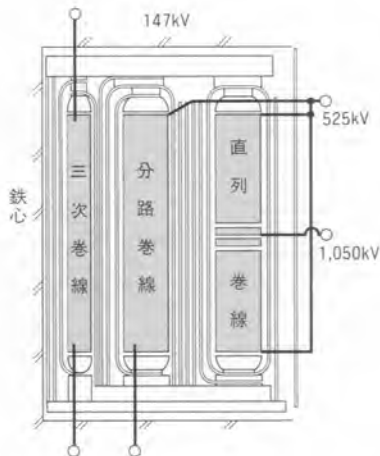


図7. 巻線配置 3巻線が同軸円筒状に配置されている。

Winding arrangement

なる2台の単位変圧器は、それぞれ単相5脚鉄心とコイル3脚で構成し、両者のタンクを油入絶縁リードダクトで並列接続している。なお、この変圧器は、UHV 機器試験場で課通電試験を行うため、2台の単位変圧器間でタップ電圧差による循環電流を流せるように、単位変圧器ごとに負荷時電圧調整器を備え、一次電圧が独立して設定できる構成である。

図7は、各コイル脚共通の巻線配置を示すコイル脚の断面である。

### 3 開発の経緯

1990年に、1,000kV 送電計画が具体化された後、1995年から実フィールドで予定される UHV 機器試験に向け、1,000kV 変圧器の開発では、特に実用化研究にもっとも注力した。

1,000kV 変圧器の新規課題は、1,000kV 絶縁に集約されるが、特に巻線内外部の絶縁構造、そして、二分割になったタンクを接続する部分の1,000kV リード絶縁構造は、実設計を基に実規模絶縁モデルを製作し、絶縁限度を見極め、絶縁設計の妥当性を実証した<sup>(2)</sup>。

実規模モデルの試験結果を反映させた1,000kV 変圧器を製作するにあたり、設計内容をあらゆる角度から最終確認するため、分割単位の方の主変圧器を同一設計で事前に製作し(0号試作器)、各種検証試験を実施した<sup>(3)</sup>(図8)。試験は、一般特性試験のほか、厳しい使用条件を設定した特殊温度試験、実器を用いた絶縁限度試験、輸送・現地組立検証などを行い良好な結果を得ることができ、最終製作に至った。



図8. 1,000kV 変圧器0号試作器試験姿 2分割構成となっている主変圧器のうち、一方の分割単位を実設計で製作し、設計・製造技術を事前検証。

Model zero 1,000kV transformer during factory test

## 4 開発のポイント

### 4.1 絶縁技術

1,000kV 変圧器の中身を 500kV 変圧器と同一の輸送制限タンク寸法に納めるためには、絶縁寸法のいっそうのコンパクト化が必要となる。なかでも、巻線間の主間隙(げき)絶縁寸法は、変圧器中身寸法を決定する重要諸元であり、縮小化がもっとも求められるところである。

図9は、巻線間の主間隙に対向する巻線部をモデル化して最新の CAE (Computer Aided Engineering) 解析技術により三次元電界解析したものである。

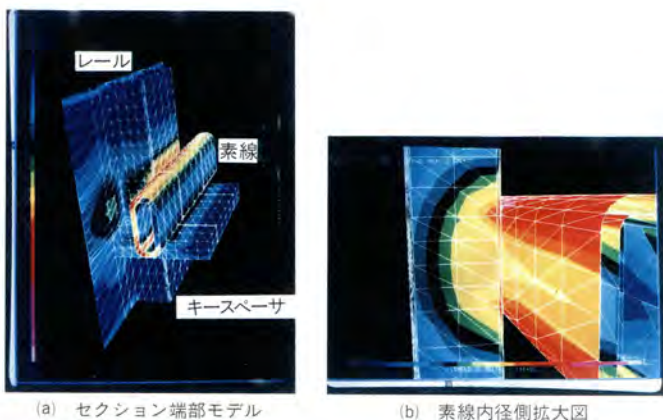


図9 巻線モデルの三次元電界解析 巻線間主間隙に対向する素線近傍の電界を定量的に解析して、主間隙の絶縁耐力向上対策を検討。

Three-dimensional electric field analysis of winding model

従来、解析が困難であった絶縁物の重なり合う巻線主間隙微小部分の電界を定量的に把握できるようになり、適切な絶縁補強対策の検討が可能となった。この検討により、主間隙の平均電界強度を従来比で約10%高めることができた。

また、電圧が500kV変圧器の2倍となることで、巻線の巻回数も2倍を超え、これまで影響の少なかった巻線内部の局所的な電位振動が新しい問題となった。これに対処するため、局所的な電位振動を打ち消し合い抑制するメカニズムをもつローカル振動抑制ハイセル巻線を直列巻線に採用した。

### 4.2 現地組立技術

単相器を二分割構成としたことで、現地据付工事内容を十分考慮した信頼性の高い変圧器構造が必要となった。

図10は主変圧器構成の概念である。主変圧器の主要部を四つのユニットで構成することにより、現地での組立て箇所を最小限として高信頼性の確保を図った。ユニット化指向は、主変圧器周辺の外装部品組立にも取り入れられ、防湿・防塵(じん)管理、そして工期短縮に大きく寄与した。

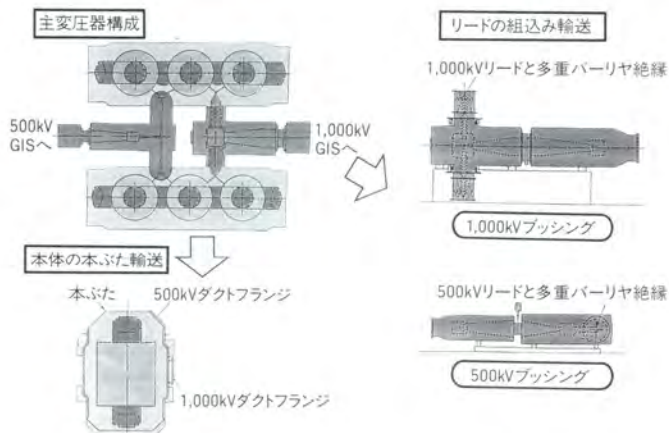


図10. ユニット構成 主変圧器の主要部を四つのユニットで構成し、現地組立箇所を最小限として、徹底した防湿・防塵管理で高信頼性を確保している。

Unit structure

## 5 あとがき

この変圧器の開発により培われた、絶縁技術、大容量化技術、現地組立技術に代表される当社の新 UHV 技術を一般の変圧器機種に適用して、高信頼性を確保したさらなる低損失・コンパクト変圧器が早期に提供できると確信している。

ここに完成した1,000kV変圧器は、現在、東京電力(株)新榛名変電所内のUHV機器試験場で無事据付工事を完了し、実証試験の開始に備えている。今後の実証試験の成功に向け、組織一丸となって万全を期していく所存である。

## 1,000kV GISの開発

Development of 1,000kV GIS

小林 昭夫  
A. Kobayashi

鈴木 克己  
K. Suzuki

### 1 まえがき

1,000kV GISは、絶縁耐力の向上という観点で、単に大型化を図るのではなくコンパクトで合理的な機器を実現させたことが特長である。もっとも重要な点は、従来の500kV機器よりも、さらに絶縁合理化を進めたことにある。表2の主要な定格事項が示すように、運転電圧が2倍になるにもかかわらず、雷インパルス耐電圧を約1.5倍まで低減したため、避雷器はより高性能な素子の開発が必要になった。また、機器が発生する開閉サージ電圧の許容値を1.6~1.7 pu以下にする

表 2. 1,000kV GIS の定格電圧と定格電流  
Rated voltage and current of 1,000kV GIS

	1,000kV GIS	500kV GIS(参考)
定 格 電 圧	1,100kV	550kV
定 格 電 流	2~8kA	2~8kA
定 格 短 時 間 電 流	50kA	50/63kA
AC 耐 電 圧	1,100kV ( $\sqrt{3}E$ )	635kV (2E)
雷インパルス耐電圧	2,250kV	1,550/1,425kV
開閉サージレベル	1.6~1.7pu 以下	2.0pu 以下

ため、ガス遮断器は従来の抵抗投入方式に加えて、新たな抵抗遮断方式を採用し、断路器も初めての抵抗付きを採用した。

そのほか、遮断器の高速度再閉路を可能にするための高速接地開閉器、機器の大型化を防ぐための空心変流器や光応用計器用変圧器などを開発した。このようにこの GIS は、ほとんどすべての機器が新方式、新原理であることが特徴である。

図 11 に送電線回線の構造断面を示す。すべてを単相構成としており、長さ方向で 500kV 機器の約 2 倍の規模になる。

## 2 GIS 機器の開発

### 2.1 避雷器

避雷器は絶縁協調のなめであるため、二つの厳しい責務が与えられている。一つは制限電圧の低減で、10kA で 1,550 kV に抑える必要がある。二つ目は前述の ACTOV 責務の 55 MJ という非常に大きなエネルギー耐量である。通常避雷器のエネルギー耐量は、線路の静電容量に基づく動作責務で決定されるが、今回はこの ACTOV 責務がそれを上回るため、この耐量となった。

図 12 に線路引込み口用の横型避雷器を示す。この避雷器は、図 12 に示すように、耐震強度を上げる目的で低く配置したブッシングに対して、電界的な悪影響を与えないように横型にしたものである。機器側についてはそのような制約がないため、据付面積の小さい縦型とした。



図 12. 1,000kV 避雷器 (線路引込み口用) ブッシングの絶縁に影響を与えないように横型にした。

1,000kV surge arrester located by entrance bushing

図 13 に縦型避雷器の断面を示す。酸化亜鉛型の内部要素を直列にして絶縁筒に収納したものを、55 MJ のエネルギー耐量をもたせるために、4 本並列に接続する構成とした。タンク直径が GIS 中で最大になったのはこのためである。

また、素子の電圧分担率を均等化するため、従来はコンデンサを使用していたが、今回は金属シールドだけという、単純な構造を採用した。シールドは上部では内部要素の全周を覆うように配置し、下部では球冠状と称するおのおのの腕に

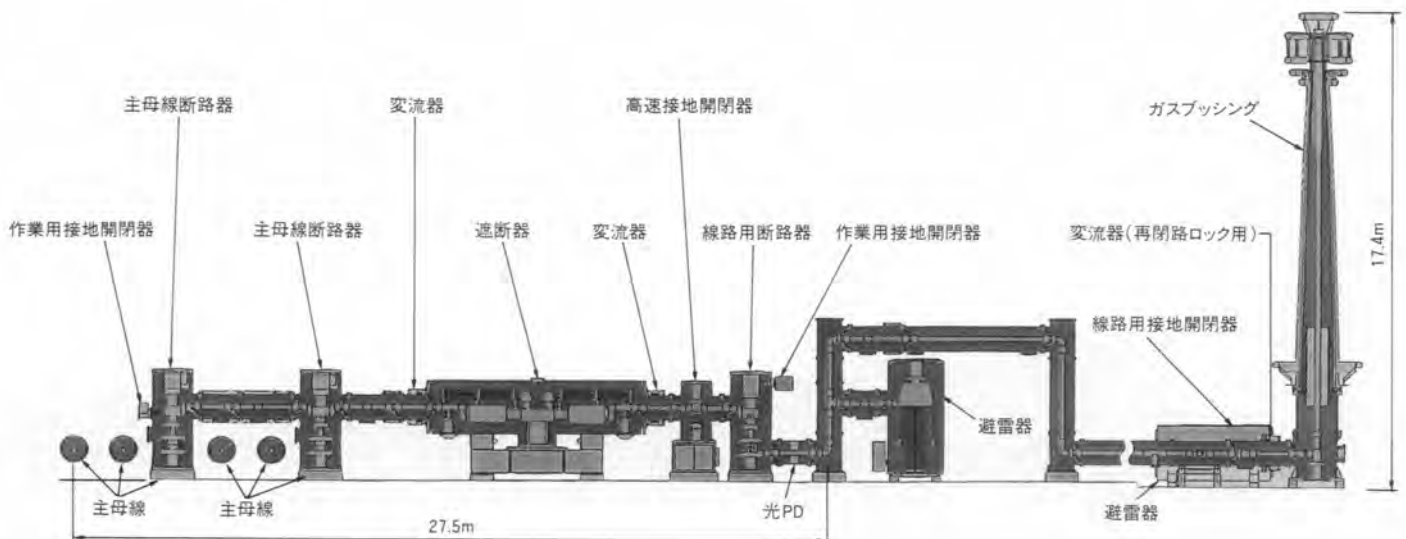


図 11. 1,000kV GIS の送電線回線構造断面 長さ方向で 500kV GIS の 2 倍の規模になる。

Cross-sectional structure of transmission-line bay in 1,000kV GIS

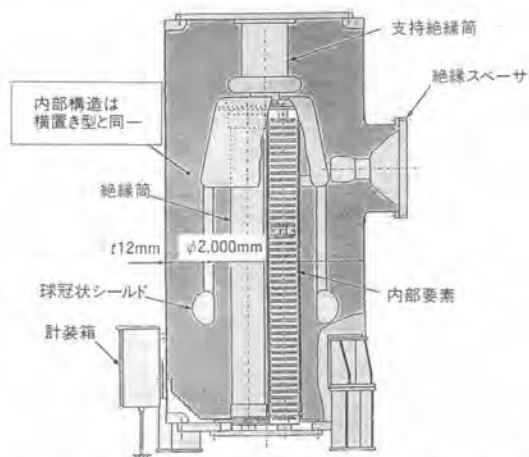


図 13. 1,000kV 避雷器の断面構造 従来よりも高性能な酸化亜鉛素子を開発した。金属シールドだけで素子の電圧分担率を均等化した。

Structure of 1,000kV surge arrester

支えられた一種玉のようなシールドを 2 個内部要素の中間部に配置した。このような配置により、素子の均等な電圧分担を達成することができた。

## 2.2 ガス遮断器

図 14 にガス遮断器の内部構造を示す。全体として 2 点切りになっており、主遮断部の上部には、133 MJ のエネルギー耐量をもつ抵抗体と、抵抗遮断部を直列に配置し、さらにこれを主遮断部と並列に接続した。また、抵抗遮断部を主遮断部より 30 ms 遅らせて開極させるため、操作機構部には主遮断部用だけでなく、抵抗遮断用の油圧操作機構を設けた。

また、抵抗遮断部の遮断責務は、短絡電流のような大電流を遮断することはないものの、進み小電流の遮断では 500kV 1 点切り遮断器の責務を電流、電圧ともに上回っている。また脱調遮断でも、電流こそ少ないものの電圧はやはり 500kV の条件を上回っている。すなわち、抵抗遮断部の接点はきわめて高い絶縁回復性能が必要である。従来の抵抗接点は投入機

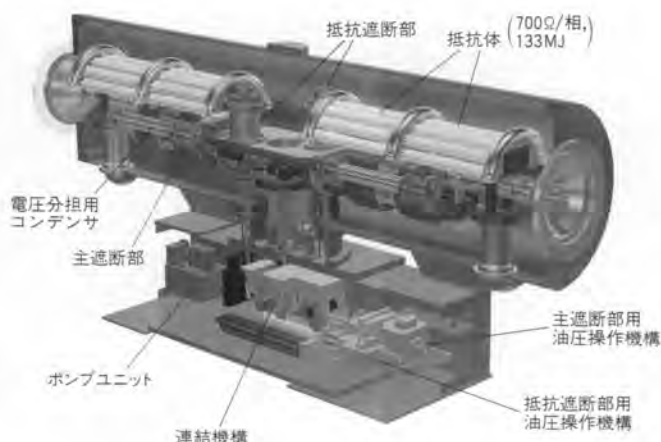


図 14. 1,000kV ガス遮断器の内部構造 2 点切り構成とした。主遮断部と抵抗遮断部を別駆動方式とした。

Structure of 1,000kV SF<sub>6</sub> gas circuit breaker

能だけでよかったため、簡単なバットコンタクトを使用していたが、それでは必要な性能を達成できないため、パuffa 型消弧室を採用した。このような構造により、前述の条件の遮断に成功した。

図 15 は可動部分だけを取り出して、連結構造を示したものである。主遮断部は 500kV 1 点切りガス遮断器と同じ消弧室を使用しており、可動および加速接触子が反対方向へ駆動されるデュアルモーション方式である。

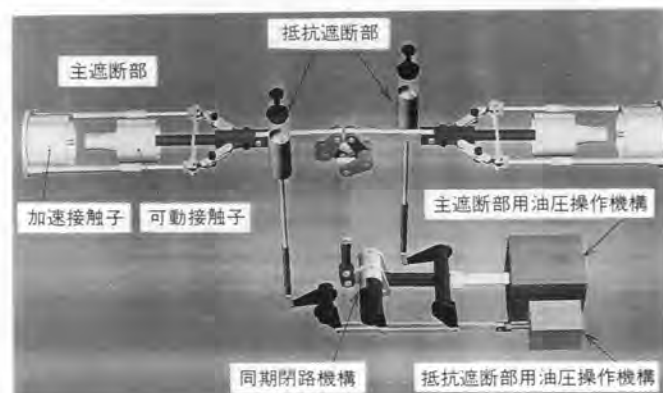


図 15. ガス遮断器の連結機構 二つの機構を同期閉路機構で連結し、抵抗投入の失敗を防ぐ。主遮断部はデュアルモーション機構を採用した。

Coupling mechanism of SF<sub>6</sub> gas circuit breaker

また、二つの操作機構から各遮断部へ連結する部分には、投入動作をするとき、二つの機構が一時的に連結する同期閉路機構を設けた。抵抗投入の失敗は他の機器に過大な開閉サージを与えるため、抵抗遮断部の操作機構に不良が発生しても、主遮断部の機構だけで投入できるようにしたものである。

また、この遮断器は従来と比較して多くの機械的な機能をもっているうえ、当社の遮断器のうち最大の操作力があるため、多くの機械的な検証試験を行って、その信頼性を確認した。

## 2.3 断路器

断路器の特徴は、開閉サージを抑制するため、GIS 用として初めての抵抗付きを採用したことである。図 16 に断路器の断面構造を示す。タンク内上部に、外部の操作機構と内部の接触子を結ぶ連結機構を配置し、その下に 500Ω の抵抗と組み合わせ合わせた接触子を配置した。

接触子の構造および開極動作を図 17 に示す。最初、接触子が離れるとアークが発生するが、電流が小さいため直ちに遮断する。しかし断路器の開極速度は遅く、極間の絶縁回復は十分でないため再点弧が起きる。接触子間の距離が増えると、この再点弧はギャップの小さなシールド電極と可動接触子の間へ移る。さらにこの間で再点弧放電を繰り返し、最後に十分な距離に達した時点で完全に遮断する。このように、放電

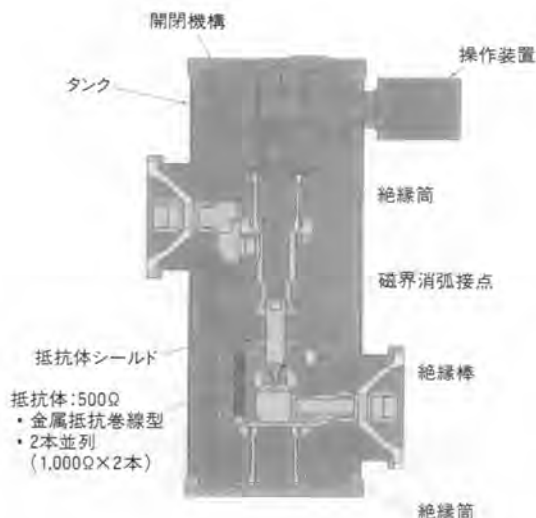


図 16. 1,000kV 断路器の断面構造 新しい方式として、抵抗付き断路器を開発した。

Structure of 1,000kV disconnecting switch

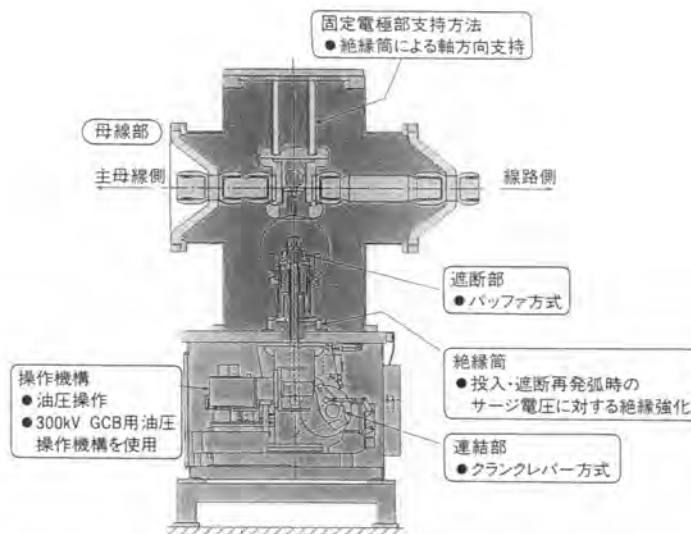


図 18. 1,000kV 高速接地開閉器の断面構造 厳しい誘導電流遮断条件のため、遮断器と同等の構造にした。

Structure of 1,000kV high-speed grounding switch

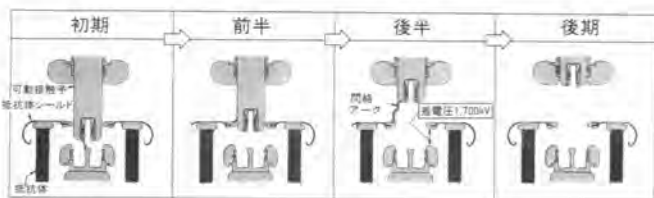


図 17. 抵抗付き断路器の開極動作 開極初期を除いて抵抗体を通して放電させ、開閉サージを抑える。

Opening operation of disconnecting switch with resistor

電圧が高くギャップが大きい領域では、つねに抵抗が放電経路に入るため、サージを抑えることができる。

抵抗体の仕様は、耐電圧が1,700kV、熱容量が20kJであり、電圧は高いものの熱容量の小さいことが特長である。遮断器用のセラミック抵抗体を使用すると、耐電圧が低く長いものが必要になる。そこで、耐電圧性能がセラミック抵抗体の4倍ある金属巻線型抵抗体を独自に開発した。この抵抗体は金属抵抗線を2層で、かつ無誘導に巻いて、エポキシ樹脂でモールドしたものである。開発に際し、金属線からエポキシ樹脂への熱伝導現象の解析を行い、問題のないこと、および2,000回の放電試験により、仕様の電圧、エネルギーを繰り返し加えて、多数回の放電に十分耐えることを確認した。

## 2.4 その他機器

新たに開発したGIS用機器は、上述以外に母線、絶縁スペーサ、高速接地開閉器、空心変流器、光応用計器用変圧器などがあるが、紙面の都合で高速接地開閉器についてだけ述べる。図18は高速接地開閉器の断面構造を示したものである。高速接地開閉器は他相が健全状態で開閉するため、誘導電流や過渡回復電圧が大きく、遮断器と同等の性能が必要である。

そのためパッファ型の消弧室を採用して、遮断能力の向上を図った。また、遮断器が再閉路動作する間に投入および遮断動作を行わなくてはならないため、高速動作が可能な遮断器用の油圧操作機構を採用した。

## 3 1,000kV GIS 機器の高電圧・大電力試験

1,000kV機器は、電力輸送の重要な拠点に設置されるため機器の基本性能と長期信頼性が要求される。この要求にこたえるためには系統現象と等価で大規模な高電圧・大電力試験による検証が必要である。1,000kV機器の試験は、500kV機器に比べて一段と高電圧・大容量となるため、大型の供試器を組み立てかつ試験できる場所を含めて、より大規模な設備と、それらを制御する高度な試験技術が必要になる。

ここでは、1,000kV機器の開発に適用した高電圧・大電力試験技術について紹介する。

### 3.1 高電圧試験技術

1,000kV機器は、開閉サージを抑制して、より絶縁を合理化しコンパクトな設計を達成しているため、従来の500kV機器よりもいっそう高度で精密な試験を行う必要がある。500kV機器の交流限度試験は1,100kVで実施したが、1,000kV機器では、1,800kVもの高電圧下で1pC以下の高感度な部分放電測定が要求される。このため、変圧器から供試器まで気中露出部がなく、試験装置側の部分放電レベルを1pC以下に抑えた2,300kVガス絶縁母線直結型交流電圧発生装置を開発した。この装置により、絶縁スペーサの耐電圧限度試験、変圧器の絶縁限度試験、図19に示す出荷前の実証試験用GIS総組立て後の耐電圧試験などで、精度の高い部分放電測定を実施することができ、各機器の良好な絶縁性能を確認した。





図 19. 工場内での GIS 総組立て試験 総組立て状態で高感度な部分放電試験および通電試験を実施した。

Dielectric test on fully assembled GIS

断路器の多数回放電試験では、再点弧サージを模擬した高峻度電圧波形を発生するために、低インダクタンス構成のインパルス電圧発生装置を用いた。断路器には、コンピュータ制御により 1,800kV の高峻度電圧を、30 秒ごとに連続で 2,000 回加えて、抵抗体、接触子構造の信頼性を確認した。

高速接地開閉器は、線路の高い誘導電圧を接地するため、低圧系のサージ電圧を低減する対策が必要である。接地端子に対策をするとともに、実際の接地メッシュを模擬した試験により、問題のないことを確認した。

### 3.2 大電力試験技術

1,000kV 機器で、電流を遮断する大電力試験が必要なものは、主にガス遮断器、断路器、高速接地開閉器である。

主として、抵抗遮断方式から発生するガス遮断器の各種遮断責務、抵抗付き断路器の進み小電流遮断責務、および高速接地開閉器の長時間アーク試験を含む特殊遮断責務など、従来の方法では試験の実施が困難なため、機器の開発と同時に、まったく新しい試験法を多数開発することとなった。

ガス遮断器の試験では、主遮断部から抵抗遮断部へ連続的に発生する複雑な遮断現象を、従来の合成試験法だけで精度よく模擬することは難しく、新たな試験法を考える必要がある。必要検証箇所は、主遮断部、抵抗遮断部およびそれぞれの遮断部間、抵抗体などいくつかに分割可能なため、マルチパート法により遮断過程を分けて複数回の遮断試験検証として行った。図 20 は、発生電圧がもっとも高く、難しい試験の一つである抵抗遮断部の全点遮断試験を実施した例である。供試遮断器の両側から逆極性の電圧を印加して、合成した電圧を電流遮断時点で遮断器極間に加える、新しい合成試験法である。

断路器の進み小電流遮断試験では、再点弧時の高周波サージを精密に模擬するため、図 21 に示すように断路器の電源側および負荷側に実規模の GIS 母線を設置して 400 回の遮断試



図 20. 1,000kV ガス遮断器の脱調全点遮断試験 世界初の大規模な抵抗遮断部の脱調全点遮断試験を実施した。

Out-of-phase switching test on complete pole of 1,000kV gas circuit breaker



図 21. 1,000kV 断路器の進み小電流遮断試験 高周波サージ電圧を精密に模擬して 400 回の遮断試験を実施した。

Capacitive current switching test on 1,000kV disconnecting switch

験を実施した。この試験により、抵抗付き断路器における過電圧抑制効果と、極間に異常放電がないことを確認した。

高速接地開閉器には、一般的な電磁誘導・静電誘導電流の遮断のほかに、特殊な場合として他の健全相の後追い故障の影響で、80ms もの長い時間電流零点がない、いわゆる“零ミス電流”を遮断する責務がある。この特殊電流を遮断するための消弧室へのくふうはもちろんであるが、性能を検証するための零ミス電流発生技術の開発が必要である。このため、図 22 に示すように 2 台の短絡発電機を用いて、最大限に直流分を入れた二つの電流源を、180 度位相をずらして投入制御し、合成して零ミス電流が発生できる試験法を開発した。また長時間アークとなるため、アークの挙動を高速カメラにより観測し、接触子間のアークが固定シールドにつくような、異

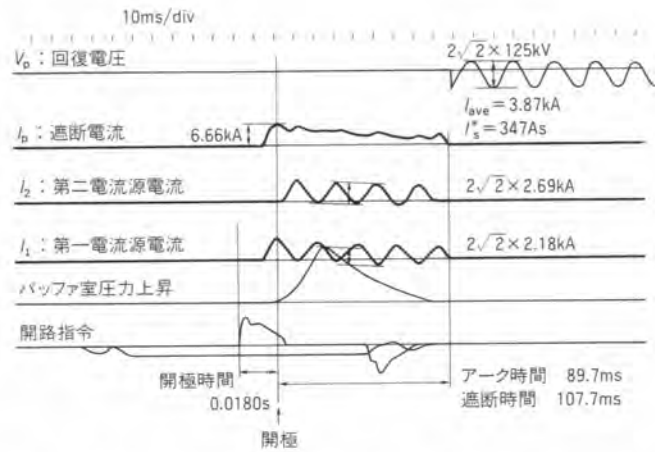
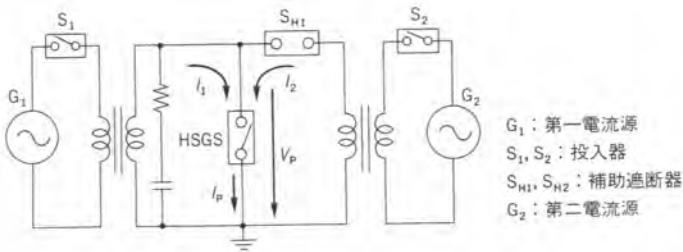


図 22. 高速接地開閉器の零ミス電流遮断試験 直流分を含んだ二つの電流位相を 180 度ずらして投入制御し、零ミス電流を発生する新試験法を開発し、遮断試験を実施した。

Delayed zero current interruption test on high-speed grounding switch

常現象が起こらないことを確認した。

このように大電流を遮断する 1,000kV 機器に対して、従来にない種々の試験法および試験回路を開発するとともに、大規模な大電力試験を実施して十分な性能を確認した。

#### 4 あとがき

世界最高電圧の 1,000kV GIS を開発し、多数の新しい試験

評価技術により、その性能と信頼性を確認した。今後の 21 世紀初頭に予定されている、1,000kV 送電の運転開始を旨として、さらに信頼性の高い機器にしていく所存である。

#### 文 献

- (1) 田中見司, 他: 1,000kV 変圧器実証器の完成, 平成 6 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 555 (1994)
- (2) 唐木繁一, 他: 1,000kV 変圧器の開発部分モデル検証, 平成 5 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 577 (1993)
- (3) 山形芳文, 他: 1,000kV 変圧器試作検証, 平成 5 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 576 (1993)



横田 岳志 Takeshi Yokota

1982 年入社。電力用変電機器のシステムエンジニアリングと開発に従事。現在、電力事業部電力変電技術部課長。  
Power Systems Div.



海老沢 義人 Yoshihito Ebisawa

1978 年入社。電力用変圧器の開発設計に従事。現在、浜川崎工場変圧器部主査。  
Hamakawasaki Works



近間 敏夫 Toshio Chikama

1967 年入社。電力用変圧器の構造設計に従事。現在、浜川崎工場変圧器部主査。  
Hamakawasaki Works



小林 昭夫 Akio Kobayashi, D.Eng.

1972 年入社。ガス遮断器、GIS の開発に従事。現在、浜川崎工場開閉装置部主幹, 工博。  
Hamakawasaki Works



鈴木 克己 Katsumi Suzuki, D.Eng.

1978 年入社。ガス遮断器、開閉装置の開発、アーク現象の研究に従事。現在、重電技術研究所電力技術開発部課長, 工博。  
Heavy Apparatus Engineering Lab.