

戸田 克敏
K. Toda

寺西 常治
T. Teranishi

池田 正己
M. Ikeda

地下変電所のコンパクト化、防災性向上に貢献する、ガス冷却式の地下変電所用 275 kV-300 MVA ガス絶縁変圧器および 275 kV-150 MVA 分路リアクトルを開発、製品化した。従来、SF₆（六弗化硫黄）ガスを循環して冷却するガス冷却式は、構造の単純化が図れるという特長があるものの、ガスの冷却能力の問題から、大容量器への適用は難しいと考えられていた。これを、最新の絶縁・冷却・材料技術を適用することにより克服し、世界に先駆けて開発、製品化に成功したものである。

ここでは、大容量ガス絶縁変圧器および分路リアクトルの冷却、絶縁などの技術開発と、完成した 275 kV-300 MVA ガス絶縁変圧器および 275 kV-150 MVA リアクトルについて紹介する。

A gas-forced-cooling type 275kV-300MVA gas-insulated transformer and a 275kV-150MVA gas-insulated shunt reactor have been developed by Toshiba. These units have the advantage of nonflammability and compactness in comparison with oil-immersed transformers. The gas-forced-cooling type was formerly considered to be applicable only to small-capacity transformers because the cooling capacity of gas is very low. However, we succeeded in developing this transformer by applying newly developed technologies for cooling, insulation, and material.

This paper describes the research and development of cooling and insulation technologies for a large-capacity gas-insulated transformer, and the development of the 275kV-300MVA gas-insulated transformer and 275kV-150MVA shunt reactor.

1 まえがき

都市部への電力需要の集中によりビルの地下に変電所が設置されるようになり、ガス絶縁変圧器の需要が急激に伸びている。また、大容量地下変電所の必要性も高くなり、これに適用する変圧器として、大容量ガス絶縁変圧器の開発が進められている。

従来、容量が 60 MVA 程度以下のガス絶縁変圧器は、発生熱量が小さいことから SF₆ガスを循環して冷却する冷却方式（以下、ガス冷却式と略記）が一般的に用いられている。一方、容量が 60 MVA 程度以上の大容量器では、ガスの冷却性能が油入変圧器における絶縁油に比べて劣るため、ガス冷却式の適用は困難と考えられていた⁽¹⁾。このため、当社ではすでに冷却媒体として不燃性で冷却性能の高いパーフロロカーボン（Perfluorocarbon：分子式 C₈F₁₆O あるいは C₈F₁₈）を用い、絶縁を SF₆ガスで行う液冷却式のガス絶縁変圧器を開発している⁽²⁾。

そしてさらに今回、最新の絶縁・冷却・材料技術を適用することにより、液冷却式に比べて構造がより単純なガス冷却式の 275 kV-300 MVA ガス絶縁変圧器および 275 kV-150

MVA 分路リアクトルを世界に先駆けて開発した。

ここでは、大容量ガス絶縁変圧器および分路リアクトルの構造概念、特長、製品の概要と、それを支える絶縁技術、冷却技術、信頼性検証などについて紹介する。

2 大容量ガス絶縁変圧器の構造概念

従来のガス絶縁変圧器は、最高使用圧力が 0.196 MPa・g (2.0 kgf/cm²・g) 以上になるとタンクが第二種压力容器としての規制を受けるため、運転中の温度上昇によるガス圧力増加を考慮して、定格ガス圧力 (20℃のときの圧力) を 0.11~0.14 MPa・g に選ぶのが一般的である。これに対して、今回開発した大容量ガス絶縁変圧器では、SF₆ガスの冷却および絶縁特性を良くするため、定格ガス圧力を 0.4 MPa・g に高めている。このため、変圧器のタンクは図 1 に示すように断面が円形の第二種压力容器タンクとなっている。

内部の鉄心および巻線は油入変圧器あるいは従来からのガス絶縁変圧器とほぼ同様のシンプルな構造としている。タンク下部から取り入れられた SF₆ガスは、巻線および鉄心を冷却してタンク上部で集められクーラに戻され冷却される。巻線は円

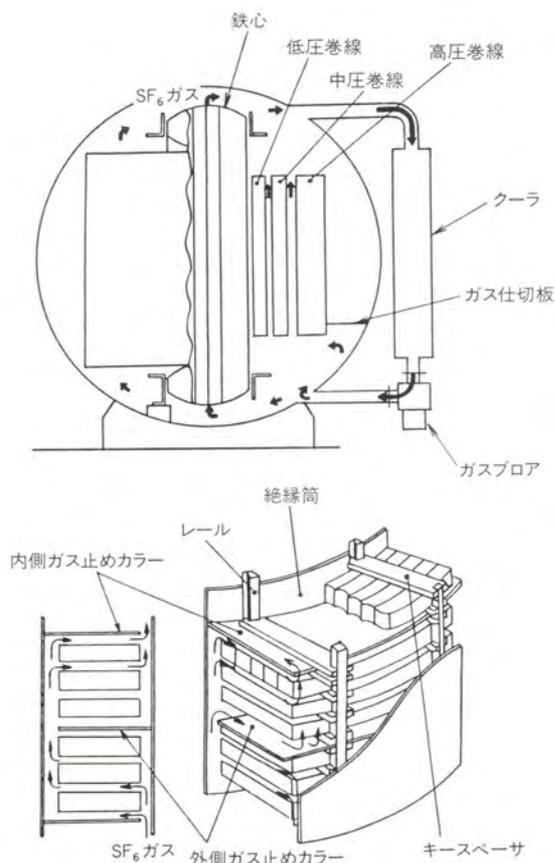


図1. 構造概念 高圧力のSF₆ガスを循環させて巻線、鉄心を冷却している。

Schematic diagram of structure

板巻線で内部のガスは、ガス止めカラーによりジグザグに流れる構成になっている。巻線のターン間絶縁には、油入変圧器に用いられる絶縁紙に比べて耐熱温度の高い、耐熱クラスBのPET（ポリエチレンテレフタレート）を使用した。

3 冷却技術

表1に示すように、SF₆ガスは絶縁油に比べて熱容量が大幅に小さいため、大容量ガス絶縁変圧器では以下に示す方法で熱容量の差を克服し冷却性能を向上させた。

- (1) 高耐熱絶縁材料により巻線の温度上昇限度を高める。
- (2) 巻線内部のガス流路構成を最新のCAE（コンピュータ支援によるエンジニアリング）解析を用いて最適化し、大量のガスをできるだけ均一に流す。

表1. 熱容量の比較

Comparison of heat capacities

	熱容量比
絶縁油	200
SF ₆ (0.125 MPa・g)	1
SF ₆ (0.4 MPa・g)	2.4

(3) SF₆ガスの圧力を0.4 MPa・gに高めて、熱容量を増やす。

(4) 高ガス圧対応のガスプロアにより大量のガスを流す。

ガスは油に比べて粘性が小さいために、狭いところも流れやすいという特徴がある。反面、粘性で流れが決まらないため、流れがアンバランスになりやすいという欠点がある。このため、CAE解析を用いてガス止めカラーを入れる位置を最適化し、大量のガスがバランスよく流れるようにすることが特に重要になる。また、0.4 MPa・gにおける冷却特性を確認するため、実際の巻線を使った実規模モデル試験を行い、解析と比較した。

3.1 巻線内ガス流、温度のCAE解析

図2に巻線内ガス流、温度のCAE解析結果の例を示す。乱流モデルとしてk-εモデルを用い、差分法による定常解析を行った。ガスの流速はガス止めカラー上では遅く、ガス止めカラーの配置によってはガスが逆流する場合もある。この解析では、この逆流現象まで含めて正確に解析することが可能になった。

巻線の温度は、ガスの流速が遅いガス止めカラーの上が高くなる(図中赤色)。この部分の温度が、絶縁材料から決まる許容温度以下になるようにガス止めカラーの配置を最適化した。

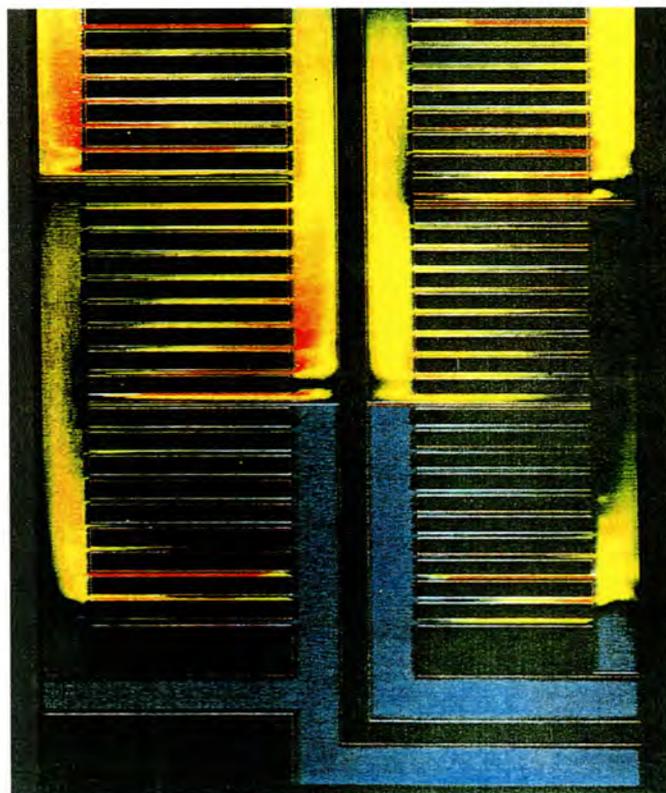


図2. 巻線内ガス流、温度のCAE解析 ガスの流速、温度を精度良く求めることができる。

CAE analysis of gas velocity and temperature in transformer winding

3.2 実規模冷却モデル

0.4 MPa・g における SF₆ ガスの冷却特性を確認することと CAE 解析の精度を確認するために、実際の変圧器とほぼ同じ大きさの巻線を使った実規模冷却モデルを製作し試験を行った。図 3 に巻線内の温度分布を実規模モデルの測定結果と CAE 解析結果を比較して示す。0.4 MPa・g の SF₆ ガスにより期待どおりの冷却特性が得られ、実測値と解析値はよく一致しており、巻線内の温度分布およびガス流形態を解明するうえで CAE 解析が有効であることがわかった。

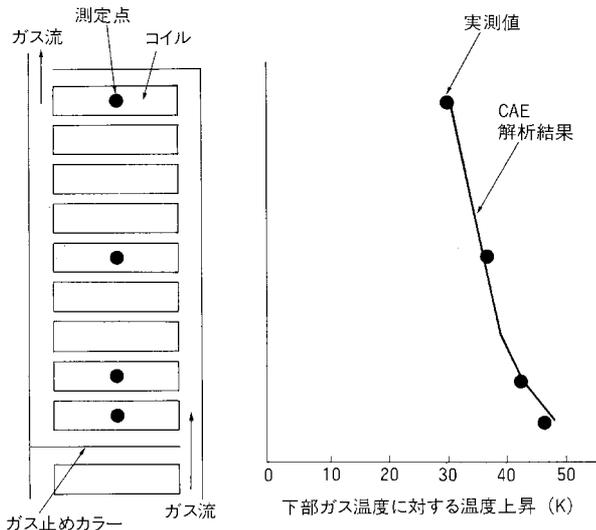


図 3. 巻線内温度の解析と実測の比較 CAE 解析と実規模冷却モデルによる試験結果は非常に良く合っている。

Temperature distribution of winding obtained by CAE analysis and model test

4 絶縁技術

この変圧器は、PET フィルムで絶縁被覆された平角銅線を導体として用いているため、導体がキースペースやレールなどの固体絶縁物で囲まれる部分にはくさび状のガスギャップが生じやすく、また、巻線間の絶縁筒とダクトピースやレールとの間には微小なガスギャップが生じやすい絶縁構造となっている。

微小ガスギャップ中の電界は固体絶縁物と SF₆ ガスとの誘電率の逆比で与えられる。ガス絶縁変圧器に使われる固体絶縁物の比誘電率はおよそ 2.5~3.5 の範囲にあるので、微小ギャップの電界は平均電界の 3 倍前後の高電界となり、この高電界部が絶縁システム全体の絶縁強度を決めてしまう。したがって、SF₆ ガス中の微小ギャップやくさびギャップの絶縁特性を解明することは、ガス絶縁変圧器の絶縁設計上きわめて重要である。

絶縁技術の確立にあたっては、このような基礎絶縁特性の研究を進めるとともに、要素モデルによる絶縁評価、実規模モデルによる検証というステップを踏んだ。さらに、ガス絶縁変圧器では巻線内にガスの流れがあるため、長期信頼性確保の観点からガスの流動帯電現象の検証も行った。

4.1 微小ガスギャップ・くさびガスギャップの絶縁特性

ギャップ長を 25 μm~5 mm の範囲で調整できる球対平板電極を使って微小ガスギャップの絶縁特性を調査した結果、2 mm 以下のギャップ長では破壊電界がパッシェン曲線より高くなることを見いだした。この現象は、0.1 MPa・g の低ガス圧では電極の被覆の有無によらず、また、0.4 MPa・g の高ガス圧では電極を被覆した場合に見られ、その理由はギャップ中の初期電子不足によると考えるとうまく説明できる^{(3),(4)}。

曲率をもった被覆電極が固体絶縁物に接するところでは、くさび状のガスギャップができる。このようなくさびギャップでは、接点からの角度が大きくなるにつれその位置での電気力線に沿ったギャップ長は長くなる。くさびギャップ中の電界は接点近傍で最大となるが、ギャップ長が小さくなるとパッシェン則に基づき破壊電界が上昇するため、部分放電が発生するのは最大電界をもつ接点近傍とは限らない。くさびギャップをもつ電極系で実験を行い、この位置が接点から 10~20° 離れたところにあり、そのときの部分放電開始電界は前述の微小ギャップの破壊現象に基づきパッシェン曲線より高い値になっていることを確かめた⁽⁵⁾。

4.2 ターン間絶縁

円板巻線のもっとも基本的な絶縁構成要素であるターン間絶縁は、被覆された平角銅線が対向する構成をもち導体接触面の両端にくさびギャップが形成される。図 4 に示すターン間絶縁要素モデルを用いてターン間絶縁の雷インパルス電圧に対する部分放電開始電圧を求めた。図 5 に試験結果を示す。絶縁被覆を厚くすると部分放電開始電圧は高くなるが、そのときのくさび部の電界は被覆厚さによらずほぼ一定で、63 kV/mm 前後となっている。この値は SF₆ ガスの理論破壊電界の約 1.4 倍であり、くさびギャップの絶縁特性から説明できる。

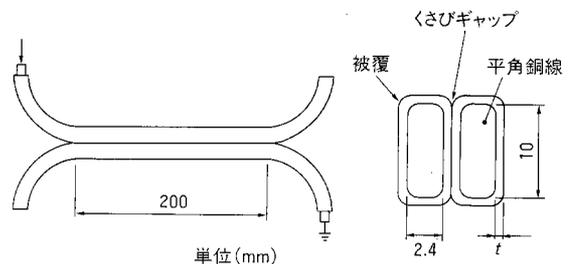


図 4. ターン間絶縁要素モデル 円板巻線の基本的絶縁要素であるターン間絶縁は導体対向部にくさびガスギャップを形成する。

Turn-to-turn insulation model

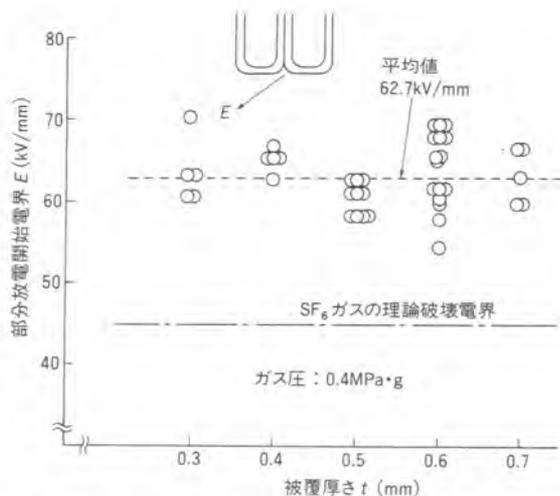


図5. ターン間絶縁の部分放電開始電界 ターン間絶縁はくさび部の電界が約63 kV/mmのとき部分放電が発生する。

Partial discharge inception stresses of turn-to-turn insulation

4.3 主間隙絶縁

巻線間主間隙(げき)は絶縁筒の間隔をダクトピースで保つ構造になっている。絶縁筒とダクトピースとの間にできる微小ガスギャップ中の電界は、ダクトピースの誘電率を小さくするほど低下するので、この部分の絶縁強度が向上する。ダクトピースの材料として、通常のプレスボード、低誘電率耐熱ボード、テフロン[®]の3種類を使ってこの効果を調査した。図6は主間隙部の一部を模擬した要素モデルの雷インパルス破壊電圧を示す。ダクトピースの比誘電率が小さくなるほど破壊電圧が高くなり、低誘電率材料適用による耐压向上の効果が大きいことを示している。

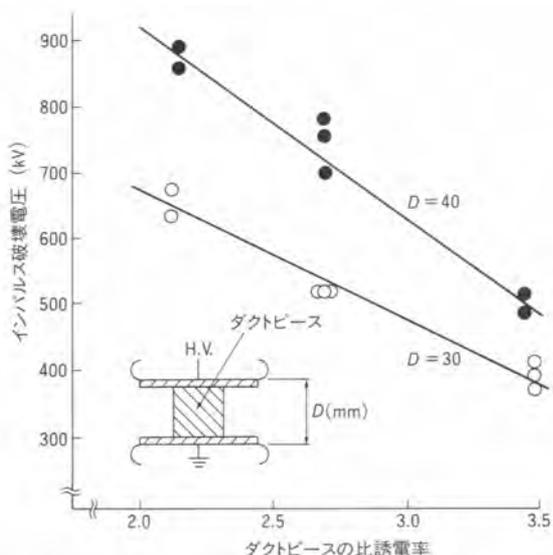


図6. 主間隙絶縁における低誘電率材料適用の効果 ダクトピースの誘電率が低くなるほど破壊電圧が上昇する。

Effect of low-permittivity materials applied to main gap insulations

4.4 ガスの流動による帯電現象調査

この変圧器は巻線内を圧力0.4 MPa・gのSF₆ガスが2 m/s程度の流速で循環している。従来、気体だけの流動によって帯電が生ずることが報告された例はないが、高圧力のSF₆ガスで実験された例がないので、SF₆ガス流による絶縁物の帯電の有無について調査した。

ガス圧0.4 MPa・gのタンクの中にこの変圧器に使われている絶縁物の板を置き、これにファンを使って高速のガス流を吹き付け、絶縁物の表面電位の変化を非接触型の表面電位計で測定した。表2に試験経過に伴う絶縁物表面電位の変化を示す。絶縁特性のよい絶縁物はよく乾燥するとある程度電荷を帯びて電位をもつ。これを真空引きすると表面の電荷が放電し電位が低下する。その後SF₆ガスを圧力0.4 MPa・gまで封入し、定格流速の約10倍にあたる20 m/sで10時間絶縁物に吹き付けたが、電位の変化はまったく認められなかった。

次に、実器と同じ断面形状をもつ巻線とガスの循環装置を製作し、長期流動帯電検証試験を実施した。図7は供試巻線

表2. SF₆ガス流動による絶縁物表面電位の変化
Changes in surface potential of insulations due to SF₆ gas flow

測定条件	表面電位(V)		
	低誘電率耐熱ボード	プレスボード	PETフィルム
初期値(乾燥後タンク内にセット)	+1,100	+800	+900
真空引き+SF ₆ ガス封入後	+100	0	+70
SF ₆ ガス流動後(10時間)	+100	0	+70



図7. 流動帯電検証試験供試巻線 実器と同じ断面形状をもつ巻線を用いて試験した。

Model coil for streaming electrification tests

6 275kV-300MVA ガス絶縁変圧器

以上述べた技術をとりまとめて、地下変電所用 275 kV-300 MVA ガス絶縁変圧器を製作した。表 3 に仕様を、図 9 に外観を示す。

表 3. 275kV-300MVA ガス絶縁変圧器の仕様
Specifications of 275kV-300MVA gas-insulated transformer

形 式		屋内用送ガス水冷式特別三相負荷時タップ切換変圧器
定 格 ガ ス 圧		0.4 MPa・g(20°C)
定 格 電 圧 (容 量)	一次	275 kV ± 27.5 kV (300 MVA)
	二次	66 kV (300 MVA)
	三次	21 kV (90 MVA)
試 験 電 圧	雷インパルス試験電圧	一次 950 kV 二次 350 kV 三次 150 kV
	AC	1.5 E ^(注) 時間 ~ 2 E 分 ~ 1.5 E 時間
	%インピーダンス	22 %
騒 音		85 dBA 以下

(注) E : 最大使用電圧

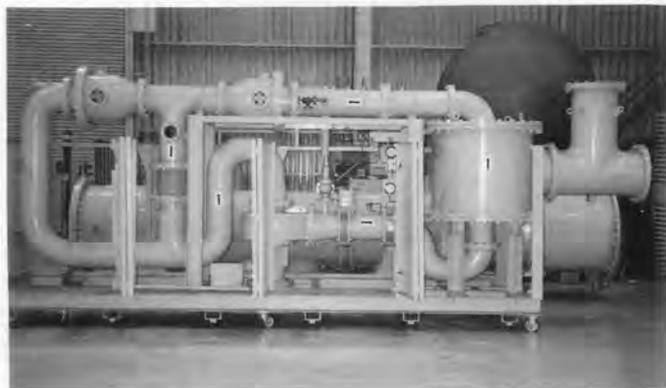


図 8. 流動帯電検証試験装置 ガスの循環装置の中に供試巻線をセットし、巻線漏れ電流、絶縁物表面電位を測定した。

Mockup for streaming electrification tests

の外観、図 8 はガスの循環装置の外観である。循環装置の一部に設けたタンクの中に供試巻線を電気的に浮かせてセットし、巻線からの漏れ電流を測定するとともに、巻線内ガス止めカラーの表面電位をプローブで常時測定できるようにした。定格流速で 2 か月、定格の 3 倍流速で 3 か月試験を行い、巻線漏れ電流は測定限界の 0.05 nA 以下、ガス止めカラー表面電位も測定限界の 10 V 以下で、絶縁物の帯電がないことを確かめた。

5 信頼性検証

ガス絶縁変圧器の信頼性を検証するため、4.4 節に述べた流動帯電以外にもさまざまな観点から検証試験を実施した。以下にその結果を示す。いずれも問題ない結果で、ガス冷却式大容量ガス絶縁変圧器の信頼性が確認された。

- (1) ガス流存在化の絶縁強度 絶縁強度の低下がないことを確認。
- (2) 異物の絶縁への影響 裸電極がないため、極端な絶縁性能低下はない。
- (3) コイル渡りの冷却への影響 コイル渡りでガス道を部分的に閉塞しても温度上昇への影響はわずか。
- (4) ガス止めカラーからの漏れの冷却への影響 ガス止めカラーと絶縁筒の間からガスが漏れても、温度上昇への影響はわずか。
- (5) 耐熱 PET フィルム 耐熱クラス B の寿命特性をもつことを検証した。
- (6) 耐熱接着転位電線 耐熱クラス B に相当する温度で、十分な強度をもつ。
- (7) 低誘電率耐熱ボード 強度、耐熱寿命ともに問題ない。
- (8) ガスブローア 6 か月の連続運転で異常なし。各部の応力や振動レベルも問題ない。



図 9. 275kV-300MVA ガス絶縁変圧器 世界初のガス冷却式大容量器で、丸形の压力容器タンクを 3 個ならべた特別三相構成になっている。
275kV-300MVA gas-insulated transformer

このガス絶縁変圧器は地下変電所に適用されるが、油入変圧器や液冷却式ガス絶縁変圧器に比べると次のような特長がある。

- (1) 不燃性のため消火設備などの防災設備が不要。
- (2) 油入変圧器のタンク上部に取り付けられているコンサベータが不要のため、変圧器の高さが低くなる。このため、地下変電所の階高を 2~2.5 m 低くすることが可能。

- (3) 0.4 MPa・g の SF₆ ガスを封入しているガス絶縁変圧器であるため、ガス絶縁開閉装置 (GIS) とガス絶縁母線を介して直結することが可能である。これにより、変電所全体のレイアウトを合理化できる。
- (4) パーフロロカーボンを使用していないため構造が単純で煩雑な液処理も不要。

7 275kV-150MVA ガス絶縁分路リアクトル

大容量分路リアクトルは、ギャップ付きのラジアル鉄心に円板巻線を巻いた構造が一般的である。ガス冷却式は構造が単純なため、ガス絶縁変圧器と同様にガス絶縁分路リアクトルにも応用可能で、高ガス圧の SF₆ ガスにより巻線および鉄心を強制冷却することで、ガス絶縁分路リアクトルが実現でき、ガス絶縁変圧器同様のメリットが得られる。

図 10 に 275 kV-150 MVA 地下変電所用ガス絶縁分路リアクトルの外観を示す。この分路リアクトルは、従来の油入分路リアクトルに比べ GIS 直結、コンサベータ不要などにより、設置容積で約 50 % と非常にコンパクトになっている。

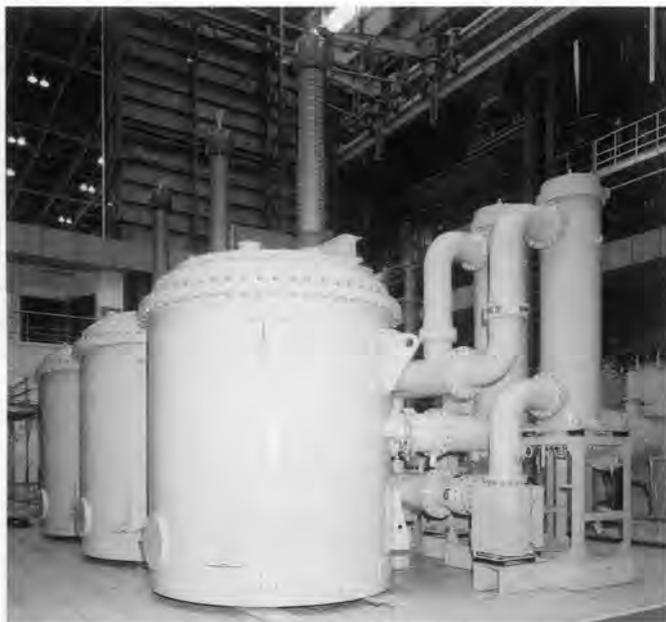


図 10. 275kV-150MVA ガス絶縁分路リアクトル 世界初の大容量ガス絶縁分路リアクトル。
275kV-150MVA gas-insulated shunt reactor

8 あとがき

世界に先駆けてガス冷却式の大容量ガス絶縁変圧器および分路リアクトルを開発・製品化した。このガス絶縁変圧器は、防災性に加えて、コンパクト性、単純な構造など優れた特長をもっている。また、小容量器から大容量器まで油入変圧器と同等の一貫したコンセプトで設計、製作できるため、信頼性が高く、安定した製品を供給することができる。

今回 275 kV 器の製品化を行ったが、技術的にはさらに大容量、高電圧となる 500 kV 器の製作が可能と考えられる。また、大容量器で開発した先端技術を小容量器に応用するというような技術の融通性も高いことから、今後 500 kV 器に向けた技術開発成果を適用して 275 kV 器や低電圧器のコンパクト化がいつそう進むことが予想される。

謝 辞

ここに紹介した開発は、東京電力㈱の指導のもとに推進したものであり、ここに感謝の意を表する。

文 献

- (1) 不燃性・難燃性変圧器調査専門委員会：不燃性・難燃性変圧器の現状とその動向，電気学会技術報告，459 (1993)
- (2) H. Muramoto, et al: Development and Application of the 275kV-300MVA Separate-Cooling/Sheet-Winding Gas-Insulated Transformer, IEEE Trans. Power Delivery, 7, 2, pp.888-894 (1992)
- (3) 花井正広，他：SF₆ガス中微小ギャップの雷インパルス電圧に対する絶縁特性，電学論 A, 109, 2, pp.255-262 (1989)
- (4) 花井正広，他：雷インパルス電圧に対する SF₆ガス中被覆微小ギャップの絶縁特性，電気学会電力・エネルギー部門大会，43 (1991)
- (5) 乾 昭文，他：SF₆ガス中くさびギャップにおける部分放電特性，電学論 A, 110, 2, pp.126-134 (1990)



戸田 克敏 Katsutoshi Toda

1981 年入社。変圧器の開発設計に従事。現在、浜川崎工場変圧器部課長。
Hamakawasaki Works



寺西 常治 Tsuneharu Teranishi, D.Eng.

1973 年入社。変圧器の開発設計，絶縁技術に関する研究・開発に従事。現在，重電技術研究所電力技術開発部主幹，工博。
Heavy Apparatus Engineering Lab.



池田 正己 Masami Ikeda, D.Eng.

1962 年入社。変圧器の開発設計に従事。現在，浜川崎工場変圧器部主幹，工博。
Hamakawasaki Works