

環境負荷の低減とメンテナンス性の向上が可能な自然由来ガスを用いた66 kV-20 MVA ガス絶縁変圧器

66 kV-20 MVA Gas-Insulated Transformer Using Natural Origin Gas with Reduced Environmental Load and Improved Maintainability

野口 直樹 NOGUCHI Naoki 石川 拓 ISHIKAWA Taku 内田 圭祐 UCHIDA Keisuke

ガス絶縁変圧器に用いられる六フッ化硫黄 (SF₆) ガスは、絶縁性・冷却性に優れたガスである。一方、地球温暖化係数 (GWP) は二酸化炭素 (CO₂) ガスの24,300倍¹⁾と非常に高く、メンテナンスの際に機器内のガスを回収するなどの厳格な取り扱いが求められる。近年、カーボンニュートラルに貢献する送変電機器が必要とされており、ガス絶縁変圧器でも、より環境負荷の低く、取り扱いの容易なガスを用いた機器が求められている。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、自然由来ガスである窒素 (N₂) ガスを用いて、66 kV-20 MVAの配電用ガス絶縁変圧器と負荷時タップ切替器 (LTC : on Load Tap Changer) を開発した。N₂ ガスを採用したことで、環境負荷の低減のみならず、取り扱いが容易なことによるメンテナンス性の向上が可能である。

Sulfur hexafluoride (SF₆) gas is widely used in gas-insulated transformers (GITs) because of its superior insulating and cooling performance. However, as SF₆ has 24,300 times higher global warming potential (GWP) of carbon dioxide (CO₂), workers are forced to abide by strict transformer handling procedures during maintenance, such as extracting SF₆ gas from the equipment, etc. From the viewpoint of achieving carbon neutrality, the need has arisen in recent years for transmission and distribution equipment, including GITs, to replace SF₆ gas with an appropriate gas possessing a lower environmental load and is easier to handle.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has developed both a 66 kV-20 MVA GIT and an on-load tap changer (LTC) using nitrogen (N₂) gas, which is an inert gas contained in natural origin gases, as a replacement for SF₆ gas, significantly contributing to reducing the environmental load, improving maintainability, and easier handling.

1. まえがき

SF₆ ガスを用いたガス絶縁変圧器は、SF₆ ガスが不燃性であることから、主に都市部の地下変電所で利用されてきた。近年は、漏油が発生しないこと、防災設備や防油堤を必要としないことなどの特性を生かし、屋外変電所への適用も増えつつある²⁾。一方、SF₆ ガスは、地球温暖化係数が高いので、メンテナンスの際に機器内のガスを回収するのはもちろんのこと、スローガスリークについても対策を要するなど、厳格な取り扱いが求められる。このため、SF₆ ガスに代わる取り扱いの容易な絶縁・冷却媒体を用いた機器へのニーズが高まっている。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、自然由来ガスを絶縁・冷却媒体に用いた、自然由来ガス絶縁変圧器³⁾の開発を推進している。ここでは、自然由来ガスとしてN₂ ガスを採用した66 kV-20 MVAの配電用ガス絶縁変圧器と、その変圧器に使用したLTCについて述べる。

2. 自然由来ガス絶縁変圧器本体

2.1 機器定格

開発した66 kV-20 MVA自然由来ガス絶縁変圧器の主要定格を、表1に示す。国内での一般的な配電用変圧器をターゲットにして、定格容量を20 MVA、定格電圧の高圧側を64.5 kV、低圧側を6.9 kV、短絡インピーダンスを15%とした。定格ガス圧(ゲージ圧)は0.14 MPa、耐熱クラスはクラスEとした。これらは、従来のSF₆ ガス絶縁変圧器と同等である。一方、自然由来ガスによる絶縁性能低下をカバーするため、一次の雷インパルス試験電圧には低減電圧を採用した。

2.2 開発課題

絶縁・冷却媒体に採用したN₂ ガスは、大気中の約80%を占める自然由来ガスであるため安全性が高く、GWP=0であるため漏えい時の地球温暖化への影響もなく、取り扱いも容易である。

一方、例えばガス圧(ゲージ圧)を0.14 MPa、ガス温度を60℃とした場合、SF₆ ガスに比べて熱容量は約27%、乱流時の熱伝達率は約42%であり、冷却性能はSF₆ ガス

表1. 主要定格

Main specifications of 66 kV-20 MVA GIT using N₂ gas

項目	仕様	
準拠規格	JEC-2200-2014変圧器	
方式	屋外負荷時タップ切替器付き 三相ガス絶縁変圧器	
定格電圧 (kV)	一次	64.5±7.5 (17タップ)
	二次	6.9
	三次	— (安定巻線)
雷インパルス試験電圧 (kV)	一次	全波：250 / 裁断波：275
	二次	全波：60 / 裁断波：65
定格容量 (MVA)	20	
短絡インピーダンス (%)	15	
ガス種	N ₂	
定格ガス圧 (ゲージ圧) (MPa)	0.14	
耐熱クラス	E	
冷却方式	導ガス風冷式	

JEC：電気学会 電気規格調査会標準規格

の約1/3となる。絶縁性能も、同ガス圧においてSF₆ガスの約1/3である。冷却性能の低下は、冷却器の増設や、巻線に使用する銅線の断面積の増大などが必要となる。絶縁性能の低下は、絶縁に必要な距離の増加に直結する。これらの結果、自然由来ガス絶縁変圧器は従来のSF₆ガス絶縁変圧器に比べて大形化する。この大形化の抑制という開発課題に対し、複数の新規技術を導入し、大形化を最小限に抑制できた。

2.3 冷却構成開発

自然由来ガス絶縁変圧器の冷却方式は、ガスブロー、放熱器、及び冷却ファンにより、主要発熱部である巻線に強制的にガスを循環させて冷却する“導ガス風冷式”を採用した。この方式は、巻線内の圧力損失を小さくするほどガス

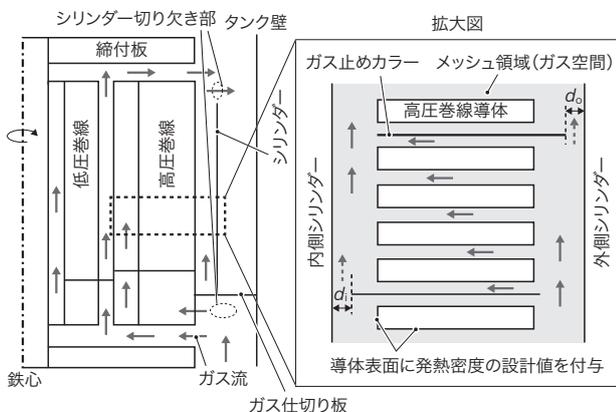


図1. 熱流体解析モデル

解析モデルでは、負荷を取らない(発熱のない)安定巻線は省略した。

GIT thermal fluid analysis model using N₂ gas

循環量が大きくなる。そこで、巻線に隣接して配置するガス道をSF₆ガス絶縁変圧器と比べ大幅に拡大し、圧力損失を小さくした。

更に、外径側に位置する高圧巻線は、図1に示すように巻線外径側に配置された円筒状の絶縁材料製のシリンダーを短くすることで巻線へのガスの出入り口を拡大させ、巻線上下端で発生する圧力損失を大幅に低減させた(シリンダー切り欠き部)。

巻線に隣接するガス道の拡大は、圧力損失の低減につながる一方、流速の低減やガスのよどみを発生させ、巻線温度を上昇させる可能性がある。そこで、熱流体解析により、巻線内の圧力損失を低減し、かつ、ガスによどみの生じない最適な温度分布となる構成を検討した⁽⁴⁾。熱流体解析モデルは、巻線を2次元断面とし、ガスが流れる空間をメッシュモデル化した。巻線の発熱は、導体を示す壁部分に発熱密度の設計値を付与することで再現した。

この変圧器では図1に示すように、ガス流を制御するためのガス止めカラーと呼ばれるガス止め板を配置し、ガス止めカラーと巻線の内径側及び外径側に配置されたシリンダーの間に、圧力損失の低減を目的として、内径側隙間 d_1 、外径側隙間 d_0 を設けている。高圧巻線の解析結果で、 d_1 と d_0 が8 mmの場合を図2に示す。巻線中央でガスの滞留による局所過熱が発生した。原因は、ガス止めカラー部分で、

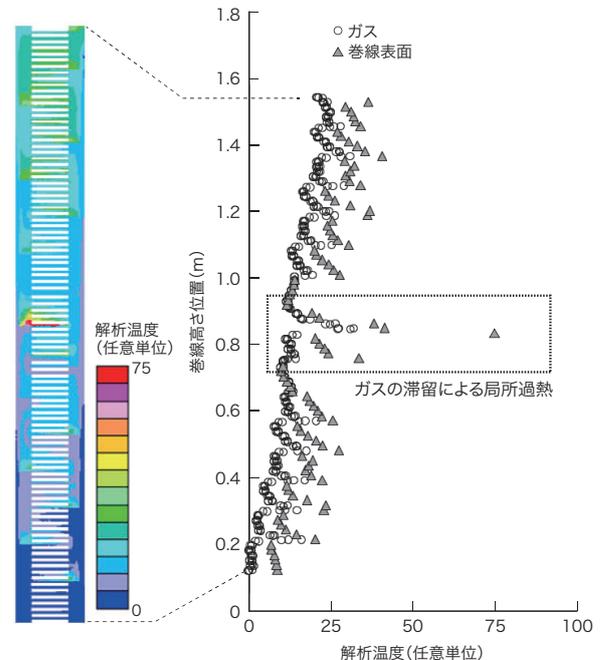


図2. 高圧巻線の解析結果 (d_1 と d_0 が8 mmの場合)

巻線高さ中央部でガスの滞留が発生して、局所過熱が発生した。

Results of simulations of high-voltage winding temperature distribution

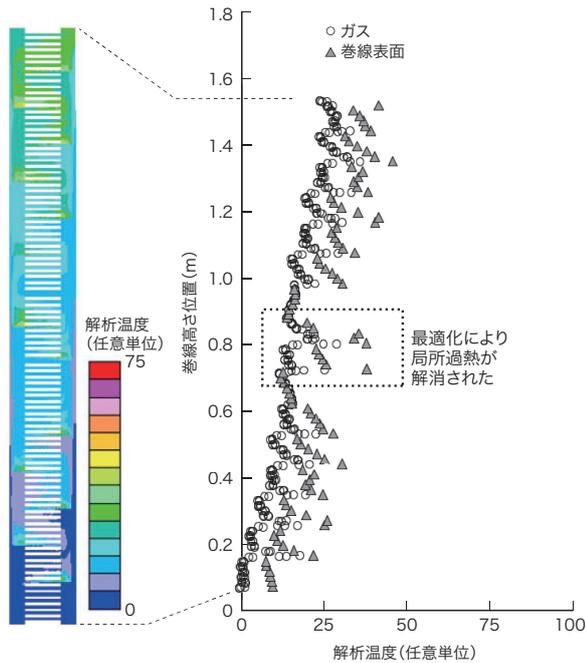


図3. 高圧巻線の解析結果 (d_i が12 mm, d_o が8 mmの場合)

d_i を拡大することで、ガス流の急変を防止でき、ガスの滞留とそれによる局所過熱が解消された。

Results of simulations of high-voltage winding temperature distribution on optimized structure

ガス流が大きく変化したからである。N₂ガスはSF₆ガスより分子量が小さいため、この結果のようにガスのよどみや、局所過熱が発生する可能性がある。

この隙間サイズを最適化することで滞留を除去できると考え、解析を実施した。 d_i を12 mmとした場合の解析結果を図3に示す。ガスの滞留とそれによる局所過熱は解消され、巻線温度は許容値以下にできた。

このように、ガス止めカラーとシリンダーの隙間サイズの最適化で、ガスの滞留を防止して温度上昇を許容値以下に抑えられることを確認した。

2.4 絶縁構成開発

巻線に雷などのサージ電圧が印加されると、巻線内に非線形の電位分布が生じる。SF₆ガス絶縁変圧器で多く適用してきた従来構造の“ハイセルキャップ巻線”と呼ばれる導体構成を、図4に示す。変圧器で一般的な円板巻線であり、導体を水平方向に円板状に巻回(けんかい)した“セクション”と呼ばれる導体列を、“セクション間”と呼ばれる一定の隙間を空けて垂直方向に積み上げて構成される。円板巻線では、電圧印加端子に近い領域のセクション間に、非線形電位分布による高い電位差が発生する。このため、セクション間の絶縁寸法の拡大や絶縁補強が必要となる。この非線形の電位分布を緩和するため、巻線内の静電容量

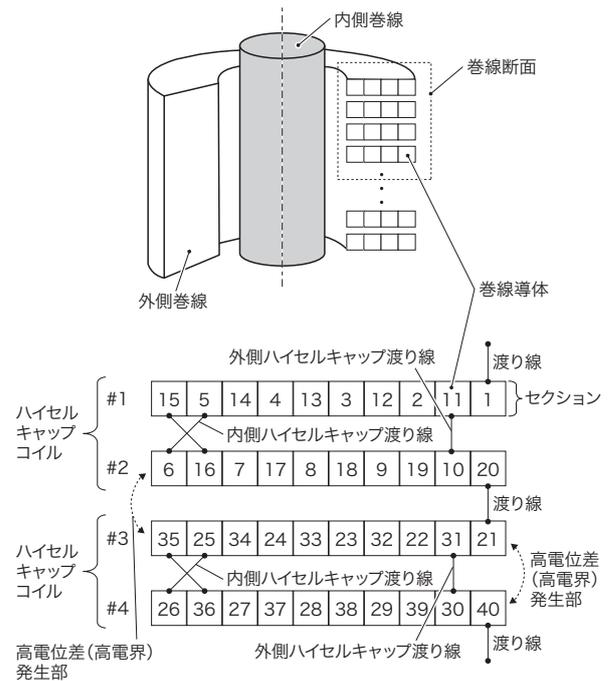


図4. 従来構造のハイセルキャップ巻線

近接する巻線導体間の巻回数差によって、巻線内径側端・外径側端で高電位差発生部が存在した(図では最大29回差)。

Conventional high series capacitance disc winding structure

(直列静電容量)を大きくする方法として、隣接した二つのセクションの間の接続方法を変更する対策がある。導体の巻回順を、図4で示す番号順にする方法である。

ハイセルキャップ巻線はその構造上、巻線内径側・外径側の両端のセクション間に発生する電位差が大きくなる。図4の例では、#2-#3の巻線内径側端及び#3-#4の巻線外径側端で巻回数差の大きい部分が存在し、巻回数差の大きな電位差が生じる。この電位差が絶縁破壊の原因となる。絶縁性能の低い自然由来ガス絶縁変圧器では、絶縁距離の拡大や絶縁補強だけでは、この電位差に対し十分な絶縁裕度を確保することが難しい。よって、この両端部セクション間に発生する電位差自体を小さくする方法を考案する必要がある。

自然由来ガス絶縁変圧器では、高圧巻線に円板巻線を採用し、図5に示す新たに開発した巻き方のハイセルキャップ巻線を採用した。#1及び#3セクションの巻回数を、#2と#4に対し1回分減らすことで、巻線内外径両端部でのセクション間の巻回数の差を小さくし、発生する電位差を抑制した。これにより、従来のSF₆ガス絶縁変圧器と同等の絶縁寸法と絶縁補強で、巻線を構成することが可能となった。

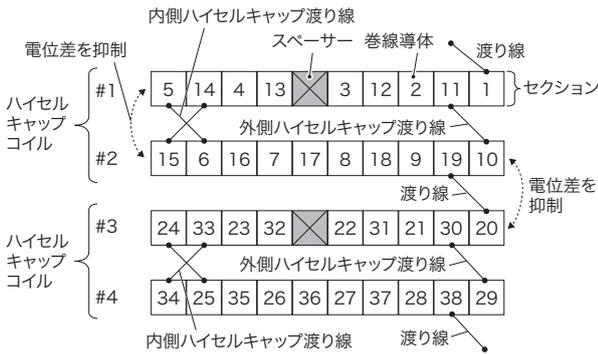


図5. 新規構造のハイセルキャップ巻線

ハイセルキャップコイルを構成する二つのセクションのうち、#1と#3セクションの巻回数を1巻分少なくすることで、巻線内径側端・外径側端での高電位差発生部の巻回数差を低減した(図では最大10回差)。

New high series capacitance disc winding structure

表2. LTC主要定格

Main specifications of LTC using N₂ gas

項目	仕様	
準拠規格	JEC-2220:2023「負荷時タップ切替装置」	
適用	三相星形接続中性点切替	
切替方式	1抵抗2バルブ式	
定格容量 (kVA)	372	
定格ステップ電圧 (V)	1,200	
定格通過電流 (A)	310	
雷インパルス試験電圧 (kV)	275	
ガス種	N ₂	
定格ガス圧(ゲージ圧) (MPa)	ガス槽内圧	0.025
	ガス槽外圧	0.14

3. LTC

3.1 機器定格

66 kV-20 MVA自然由来ガス絶縁変圧器に適用したLTCの主要定格を表2に示す。変圧器本体の要求仕様を満足するため、定格容量を372 kVA、定格ステップ電圧を1,200 V、定格通過電流を310 A、LTCと大地間の雷インパルス試験電圧を275 kVとした。

3.2 LTC開発

自然由来ガス絶縁LTCでは、変圧器本体と同様にN₂ガスを絶縁・冷却媒体とする。N₂ガスを使用したLTCの開発事例はないため、初めに要素モデルによる評価を実施した⁽⁵⁾。要素モデルでは、最も大きな電圧が印加される対地間絶縁構成を模擬したものを作成して絶縁破壊試験を実施することで、N₂ガスの絶縁性能を評価した。要素モデル試験結果と、それを用いた対地間絶縁性能の評価結果を図6に示

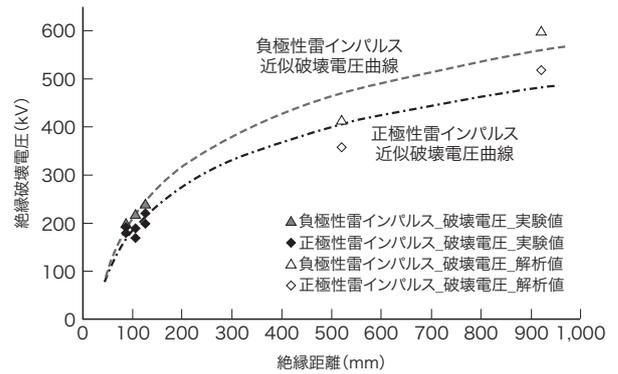


図6. 要素モデルによる絶縁性能評価結果

要素モデルでの絶縁性能評価と、電界解析による絶縁性能から、LTCに必要な対地間絶縁距離を確認した。

Insulation characteristics of N₂ gas evaluated by element model

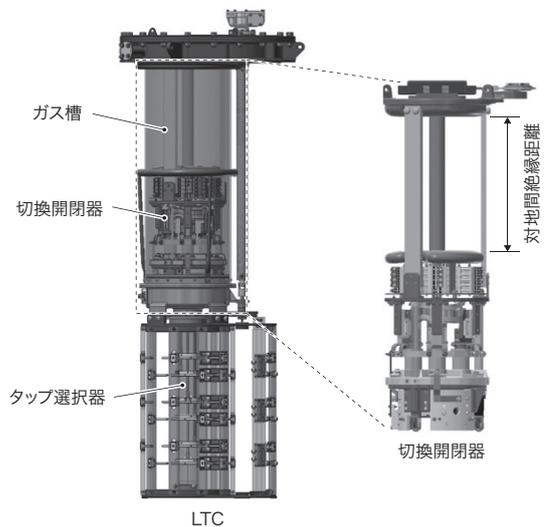


図7. LTC実器モデル

対地間絶縁設計により、主要構成を確定した。

Actual model with same structure of LTC using N₂ gas

す。試験は絶縁距離100 mm程度で実施し、絶縁破壊時の電界値を3次元電界解析で求めた。この電界値を用いて、絶縁距離が大きくなった際の絶縁破壊電圧を算出した。

要素モデル試験及び評価結果を用いて対地間の絶縁距離を決定し、図7に示す製品と同じ構造を持つ実器モデルを設計製作した。実器モデルでは、絶縁試験として雷インパルス試験を実施し、LTCに要求される絶縁仕様の1.5倍の裕度を確認した。

これにより、66 kV-20 MVA自然由来ガス絶縁変圧器向けLTCを開発・製作した。性能確認の雷インパルス試験では、問題ないことを確認できた。

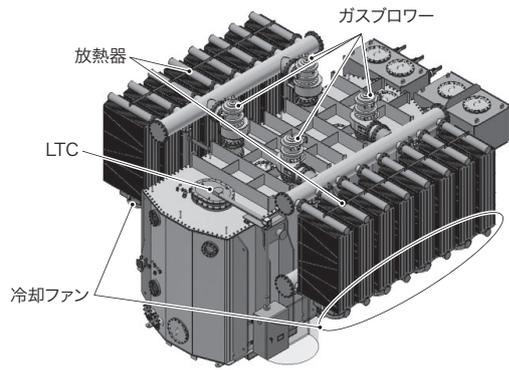


図8. 66 kV-20 MVA 自然由来ガス絶縁変圧器プロトタイプ

同定格のSF₆ガス絶縁変圧器に比べて、やや大形化している。冷却器や付属品など、使用部品は同じ物を使用可能である。

Prototype 66 kV-20 MVA GIT using N₂ gas

4. プロトタイプの設計と評価

2章と3章の開発結果を基に設計したプロトタイプの外観を図8に示す。定格は、表1と表2に示したものと同一である。プロトタイプは設計を完了し、製品化への最終的な性能確認試験の評価など、引き続き開発を推進中である。

5. あとがき

当社は、地球温暖化に影響する環境負荷の低減によりカーボンニュートラルに貢献する送変電機器の開発の一環として、従来のSF₆ガスに代わり、自然由来ガスであるN₂ガスを用いて、66 kV-20 MVAの配電用ガス絶縁変圧器とLTCを開発し、必要な要素検証及びプロトタイプの設計・評価を完了した。

今後も、製品化に向け、最終的な性能検証を進めていく。

文献

- (1) Smith, C. et al. The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity Supplementary Material. IPCC, 2021, 35p. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07_SM.pdf>, (accessed 2025-02-21).
- (2) 加川博明, ほか. 新形ガス絶縁変圧器の適用によるコンパクト屋外変電所の実現. 電気学会論文誌B, 2018, **138**, 5, p.399-411.
- (3) Noguchi, N. "SF6-free Gas Insulated Transformer using Natural Origin Gas". Cigre Paris Session 2022 - SC A2 Package. 2022-09, PS2 Question 2.1. <<https://www.e-cigre.org/publications/detail/session-2022-a2-session-2022-sc-a2-package.html>>, (accessed 2025-03-24).
- (4) 内田圭祐, ほか. "20MVA-66kV自然由来ガス絶縁変圧器の冷却設計". 令和5年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集(Web). 愛知工業大学, 2023-09, 2023, 論文番号270, p.10.2.11-10.2.12.
- (5) 石川 拓, ほか. "自然由来ガス絶縁変圧器用LTCの絶縁設計". 令和6年電気学会全国大会論文集, 徳島大学, 2024-03, 2024, p.213-214.



野口 直樹 NOGUCHI Naoki
東芝エネルギーシステムズ(株)
グリッドソリューション事業部 変圧器部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



石川 拓 ISHIKAWA Taku
東芝エネルギーシステムズ(株)
グリッドソリューション事業部 変圧器部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



内田 圭祐 UCHIDA Keisuke
東芝エネルギーシステムズ(株)
グリッドソリューション事業部 変圧器部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.