

カーボンニュートラルの実現に貢献する 自然由来ガス絶縁開閉装置

72/84 kV Gas-Insulated Switchgear Contributing to Realization of Carbon Neutrality by Using Natural Origin Gas

高尾 修平 TAKAO Shuhei 大西 智哉 ONISHI Tomoya 白井 英明 SHIRAI Hideaki

送変電機器の高電圧絶縁媒体として使用されてきた六フッ化硫黄（SF₆）ガスは地球温暖化係数が極めて高く、その削減はカーボンニュートラルの実現に大きく貢献することから、世界的にSF₆ガスフリー化の動きが進んでいる。

東芝エネルギーシステムズ（株）は、自然界に存在するガスを絶縁媒体に用いた新しい変電機器ブランドAEROXIA™の開発を進めており、その初製品として、SF₆ガスを用いない合成空気（ドライエア）絶縁の72/84 kV ガス絶縁開閉装置（GIS：Gas Insulated Switchgear）を開発した。高電圧導体の表面状態の改良やガス接地開閉器への消弧方式の最適化などによってコンパクト化を図り、東京電力パワーグリッド（株）府中変電所 GIS 更新のために納入した初号器では、リプレース可能なサイズを達成し、国内初^{（注1）}の電力用SF₆ガスフリー GISとして、2023年に運転を開始した。

Sulfur hexafluoride (SF₆) gas possesses high insulation performance and has been widely used as a high-voltage insulating medium for transmission and transformation equipment including gas-insulated switchgears (GIS). However, because of the extremely high global warming potential (GWP) value of SF₆ gas, reducing use of this gas has become an extremely important part in pursuing carbon neutrality. Developing equipment that does not make use of SF₆ gas has accelerated worldwide in recent years.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation is developing a lineup of substation equipment using natural origin gas under the AEROXIA™ brand. This includes a 72/84 kV AEROXIA™ series GIS that uses synthetic air as a replacement for SF₆ gas for the first time, as well as a compact design to accommodate the increased demand for renovating existing GIS by improving the surface conditions of high-voltage conductors and optimizing the performance of arc-extinguishing earthing switches. The first 72/84 kV AEROXIA™ series GIS was installed at the TEPCO Power Grid, Inc. Fuchu Substation, which started operations in 2023 as the first GIS using a natural origin gas in-service in Japan.

1. まえがき

SF₆ガスは、安全かつ化学的に極めて安定なガスであると同時に、優れた物理・化学的特性を持つ。電力分野では開閉器などの絶縁・消弧媒体として使用され、機器のコンパクト化とともに、送配電システムの高信頼化、省保守化、経済性向上に大きく貢献している。一方、SF₆ガスは地球温暖化係数が二酸化炭素（CO₂）の24,300倍^{（1）}と極めて高いフッ素系人工ガスであり、大気放出された場合の地球環境への影響が非常に大きいことから、欧米を中心に、SF₆ガスフリーの機器開発が活発に行われている。

東芝エネルギーシステムズ（株）は、2016年4月に産学が連携して設立した「SF₆代替ガス検討会」での議論を基に策定された適用ガイドライン「SF₆ガスフリー技術に求められる7つの要件」^{（2）}を指針とし、SF₆ガスフリー技術の研究開発を進めてきた。この検討会は、SF₆ガスフリー技術における課題を整理し、海外の最新動向や検証課題について情

報共有を図るとともに、日本国内における実現の可能性を検討する目的で設立された。表1に、前述の“7つの要件”を示す。当社は、自然界に存在するガスをを用いたGIS及びガス絶縁母線（GIB：Gas Insulated Busbar）の開発の推進を目的とし、新しい変電機器ブランドAEROXIA™を立ち上げた。その初製品として、地球温暖化係数がゼロのドライエアを絶縁媒体とする72/84 kV AEROXIA™ GISを開発^{（3）}し、初号器を東京電力パワーグリッド（株）府中変電所に納

表1. SF₆ガスフリー技術に求められる7つの要件
Requirements for GIS using natural origin gas

No.	要 件
1	安全性・環境適合性
2	使用環境の制約
3	ガスの安定供給
4	ガスの扱いやすさ
5	ライフサイクルコスト
6	既設設備とのリプレース性
7	高電圧 GIS への拡張性

（注1） 2025年2月時点、電力用SF₆ガスフリー GISとして、当社調べ。

入して、2023年に運転を開始した。

ここでは、当社がSF₆ガスフリー技術としてフッ素系人工ガスではなく自然由来ガスを選定した理由について述べた後、72/84 kV AEROXIA™ GISの開発・適用技術、及び今後開発予定の次世代AEROXIA™ GISについて述べる。

2. 自然由来ガスの選定

現在、世界のSF₆ガスフリー GISに使用されているガスは、自然由来ガスとフッ素系人工ガス(フルオロニトリル(C4-FN)など)の二つに大別される。フッ素系人工ガスは、絶縁・電流遮断性能に優れるが地球温暖化係数が1以上であり、また、安全性の懸念が完全には解消されていない。一方、自然由来ガスはフッ素系人工ガスと比較すると性能面では劣るものの、環境面や毒性といった懸念がないことが特長である。両ガスとも一長一短がある中、当社は、より環境面に配慮する観点から、自然由来ガスを選択した。自然界に存在するガスの中で、前述の7つの要件を満たしつつ、GISとしての実用上の要件、すなわち高電圧絶縁機器用ガスとしての絶縁性能とアーク遮断性能を備え、かつ材料に対する腐食性や高い反応性がないことを考慮すると、表2に示すように単体若しくは混合ガスの主ガスとして適用できるガスは窒素(N₂)、CO₂、酸素(O₂)の3種類に限定される。ドライエアは、N₂を主とした混合ガスである⁽⁴⁾。

3. 72/84 kV AEROXIA™ GISの開発

3.1 開発方針

72/84 kV AEROXIA™ GISには、ドライエアを適用した。ドライエアは、現状では、リプレース性や高電圧・大容量化への拡張性に課題があるものの、主要なリプレース対象として想定されている1970～1980年代に納入された初期のGISとほぼ同じ体格となる。一方で、入手性やガスの扱いやすさの問題は全くない。定格仕様を表3に示す。

表2. 7つの要件を具体化した選定基準としたAEROXIA™ GISに適用可能なガス種の絞り込み

Criteria for narrowing down gases applicable to AEROXIA™ series GIS

選定基準	適合するガス種の数
化学便覧に記載の全てのガス種	8,568
常温25℃で気体	189
オゾン層破壊効果がない(ClやBrを含まない)	149
毒性及び揮発性がない	69
腐食性・高反応性のガスではない	50
ガス特性の詳細が不明ではない	20
地球温暖化係数≤1	9
開閉器への使用に適合	3

3.2 72/84 kV AEROXIA™ GISに適用した技術

ドライエアは、SF₆ガスに比べて絶縁性能が1/3程度になることから、絶縁距離を確保するために機器が大きくなる問題がある。このため、ドライエア環境下において絶縁性能を向上させる技術、及び内部構造物の最適配置や部品点数削減を可能とする技術を適用し、機器を縮小した。

3.2.1 高電圧導体の対地間絶縁距離の低減

絶縁媒体にドライエアを使用するため、ドライエア絶縁設計の新しい評価基準が必要である。そこで、図1に示すφ30 mmの高電圧導体とφ90 mmの接地タンクの同軸円筒モデルを用いて、ドライエアの絶縁破壊特性を取得した⁽⁵⁾。表面粗さの異なる3種類のアリミニウム製高電圧導体の裸電極、及びエポキシ系の絶縁コーティングを施した高電圧導体を用意し、それぞれに対して雷インパルス電圧、開閉インパルス電圧、商用周波電圧を印加する実験を行った。図2は、各電極表面状態における50%破壊電界(E50)を電圧波形ごとに整理した結果を示す。電極表面

表3. 72/84 kV AEROXIA™ GISの定格仕様

Rated specifications of 72/84 kV AEROXIA™ series GIS

項 目	仕 様
定格電圧 (kV)	72/84
定格周波数 (Hz)	50/60
定格電流 (A)	主母線部：1,200/2,000/3,000 線路側：1,200/2,000
定格短時間耐電流 (kA)	31.5 (2 s)
定格雷インパルス耐電圧 (kV)	350*1
定格商用周波耐電圧 (kV)	140
遮断部	真空遮断器*2
定格ガス圧力 (MPaG, 20℃)	0.5
絶縁媒体	ドライエア

*1 定格電圧84 kVの場合、耐電圧仕様はJEC-2390:2023に規定された低減電圧を適用

*2 (株) 明電舎製作の真空遮断器 (VCB) を適用

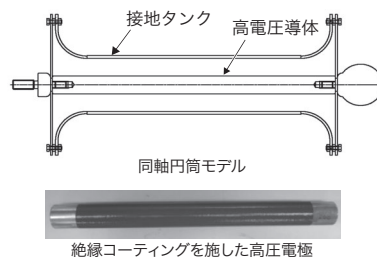


図1. 実験モデルの構造及び絶縁コーティングを施した高電圧導体電極

φ30 mmの高電圧導体の電極とφ90 mmの接地タンクの同軸円筒モデルを用いて、ドライエアの絶縁破壊特性を取得した。

Structure of experimental model and high-voltage electrode with insulating coating

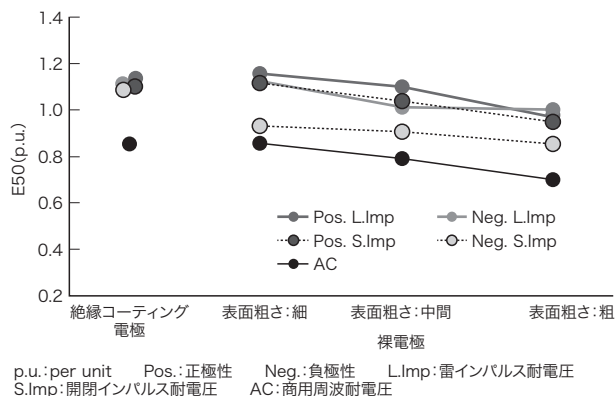


図2. 各電極表面条件における50%破壊電界

裸電極の表面粗さを細かくして平滑化すること及び電極表面を絶縁コーティングすることで絶縁破壊特性が向上し、中でも絶縁コーティングした場合に最も絶縁破壊特性が向上した。

Dependence of 50% breakdown electric field on electrode surface conditions

を平滑化することで破壊電界が上昇すること、また絶縁コーティングを施すことで各種電圧波形において破壊電界が上昇することが分かった。この結果を製品に適用することで、ガス中の高電圧導体と対地間の絶縁距離を低減でき、機器のコンパクト化につながった。

3.2.2 ガス接地開閉器のコンパクト化

コンパクト化を図るために、ガス接地開閉器においてドライエア環境下での電流開閉能力が最適になるように電流消弧方式の改良を行った。

ガス接地開閉器は、送電システムの併架による電磁・静電誘導を受けて流れる誘導電流を遮断する必要がある。誘導電流は電圧1,500 V、電流200 Aであり、遮断器と比較すると小さいものの、ドライエア中で物理的に回路を開閉するだけでは、電流開閉（電流消弧）は困難である。当社は、この電流消弧方式に吸い込み消弧形方式を適用した（図3）。吸い込み消弧形方式とは、開路動作時にシリンダーとピストンで作られる負圧室にガスを吸い込むことでガスの流れを発生させ、可動接触子と固定側接触部間に発生したアークを消弧する方式である。消弧能力を上げるには、電流遮断時に発生するアークの発生位置の制御とガス流の速度・容量の増加が重要となる。そこで、アークを接触部の中心に発生させるため、固定側接触部にはアークコンタクトを設けた構造とした。また、シリンダーとピストン構造を見直し、可動接触子の動作位置に対して適切にガス流を発生させる構造とした。この結果、操作力を増大させることなくガス中の構造物を縮小化でき、機器全体のコンパクト化につながった。

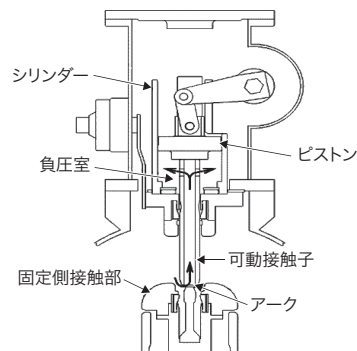


図3. 吸い込み消弧形方式のガス接地開閉器の構造

開路動作時にシリンダーとピストンで作られる負圧室にガスを吸い込むことでガスの流れを発生させ、可動接触子と固定側接触部間に発生したアークを消弧する。

Structure of earthing switch for suction arc extinguishing type GIS

表4. 72/84 kV 初期GISと72/84 kV AEROXIA™ GISの比較

Comparison of external size and installation area of 72/84 kV GIS using SF₆ gas and 72/84 kV AEROXIA™ series GIS

72/84 kV 初期GIS	外形図	
	サイズ* (%)	100 (幅) × 100 (奥行き) × 100 (高さ)
	据付面積* (%)	100
72/84 kV AEROXIA™ GIS	外形図	
	サイズ* (%)	90 (幅) × 80 (奥行き) × 90 (高さ)
	据付面積* (%)	72

DS: 断路器 ES: 接地開閉器 GCB: ガス遮断器 PT: 電圧変成器
CH: ケーブルヘッド CT: 変流器 VT: 計器用変圧器
*初期GISのサイズ及び据付面積を100%とした相対値

3.3 機器サイズとリプレース性

表4に、72/84 kV 初期GISと開発した72/84 kV AEROXIA™ GISの比較を示す。72/84 kV 初期GISと比べて、72%の据付面積となり、十分リプレース可能なサイズを達成した。開発した72/84 kV AEROXIA™ GISの初号器は国内初の電力用SF₆ガスフリーGISとして東京電力パワーグリッド（株）府中変電所にて2023年に運転を開始した（図4）。

4. 次世代AEROXIA™ GISの開発

当社は、カーボンニュートラルへの更なる貢献を目指し、



図4. 府中変電所に納入した国内初の電力用SF₆ガスフリー GIS
2023年に東京電力パワーグリッド(株)府中変電所にて運転を開始した。
Japan's first 72/84 kV GIS using natural origin gas

次のAEROXIA™変電機器として次世代GIS及びGIBの開発を進めている。特にGIBは、主に変電所内での電力伝送を担い、広範囲にわたる電力経路を構成するため、変電所内の機器の中で占める割合は多い。GIBに従来のSF₆ガスを使用した場合、膨大な量のガスが必要となり環境影響が大きくなるが、自然由来ガスを採用することで環境影響を大幅に低減できる。そのため、GIBはカーボンニュートラルの実現に貢献するための重要な開発ターゲットである。

図5は、変電所における機器構成の一例、並びに現在開発を進めている550/420 kV AEROXIA™ GIBの開発モデルを

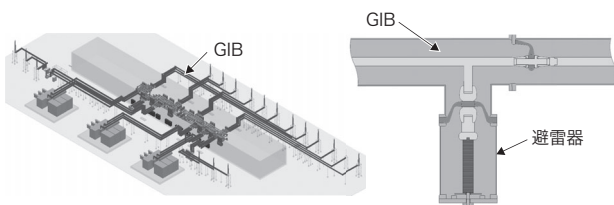


図5. 550/420 kV AEROXIA™ GIBの開発モデル

GIBの絶縁ガスを全て自然由来ガスに置き換えることで、SF₆ガスの大幅な削減が期待できる。

Structure of development model of 550/420 kV AEROXIA™ series GIS

表5. 550/420 kV AEROXIA™ GIBの基本仕様

Rated specifications of 550/420 kV AEROXIA™ series gas-insulated busbar (GIB) in development

項 目	仕 様	
定格電圧 (kV)	550	420
定格電流 (A)	4,000	4,000
定格短時間耐電流 (kA)	63 (2 s)	63 (3 s)
定格周波数 (Hz)	50/60	50/60
絶縁媒体	CO ₂ -O ₂	CO ₂ -O ₂
適用規格	JEC-2390:2023 JEC-2350:2016	IEC 62271-1 IEC 62271-203

JEC：電気学会 電気規格調査会標準規格 IEC：国際電気標準会議規格

示す。GIBを全て自然由来ガスに置き換えることで、SF₆ガスの大幅な削減が期待できる。550/420 kV AEROXIA™ GIBの基本仕様を表5に示す⁽⁶⁾。特に、550/420 kV AEROXIA™ GIBは国内最高電圧である定格電圧550 kVに対応することで、前述の7つの要件で最も難しい課題である高電圧化の要求にも応えることができる。

5. あとがき

当社は、SF₆ガスフリー技術として自然由来ガスに着目して研究開発を行っており、72/84 kVドライエアGISを製品化した。今後も環境負荷低減と信頼性向上を両立した自然由来ガスを用いた新しい変電機器ブランドAEROXIA™の開発を推進し、高電圧領域においても製品ラインアップを整備し、カーボンニュートラルの実現に貢献していく。

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/wgl1/downloads/report/IPCC_AR6_WGL1_Chapter07_SM.pdf>, (accessed 2025-02-25).
- (2) 塚尾茂之. 放電現象と絶縁技術SF₆ガス代替技術の動向と要件. 電気評論, 2020, 105, p.45-55.
- (3) 高尾修平, ほか. “72/84kV SF₆フリー GISの開発(その1)”. 電気学会全国大会講演論文集, オンライン開催, 2022-03, 電気学会, 2022, 6-047.
- (4) 内井敏之. “国内各メーカーの代替ガス機器開発に対する動向①自然由来ガスによる開閉器技術”. 電気学会全国大会講演論文集, オンライン開催, 2021-03, 電気学会, 2021, S5-54.
- (5) 安岡孝倫, ほか. “ドライエア0.55MPaにおける絶縁破壊特性-電極表面粗さの影響と絶縁コーティング効果-”. 電気学会全国大会講演論文集, 名古屋, 2023-03, 電気学会, 2023, 6-033.
- (6) 薄 拓哉, ほか. “420/550kV Fガスフリー単相GIBの開発”. 電気学会全国大会講演論文集, 東京, 2025-03, 電気学会, 2025, 403-B2.



高尾 修平 TAKAO Shuhei
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 開閉装置部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



大西 智哉 ONISHI Tomoya
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 電力変電技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



白井 英明 SHIRAI Hideaki
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 電力変電技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.