

新アブレーション材料を適用したアーク冷却技術によるSF₆ガス遮断ユニットの性能向上

佐藤基宗*
川名隆志*
中村泰規**

Improvement of SF₆ Interrupter Performance by Arc Cooling Technology with New Ablation Material

Motohiro Sato, Takashi Kawana, Yasunori Nakamura

要旨

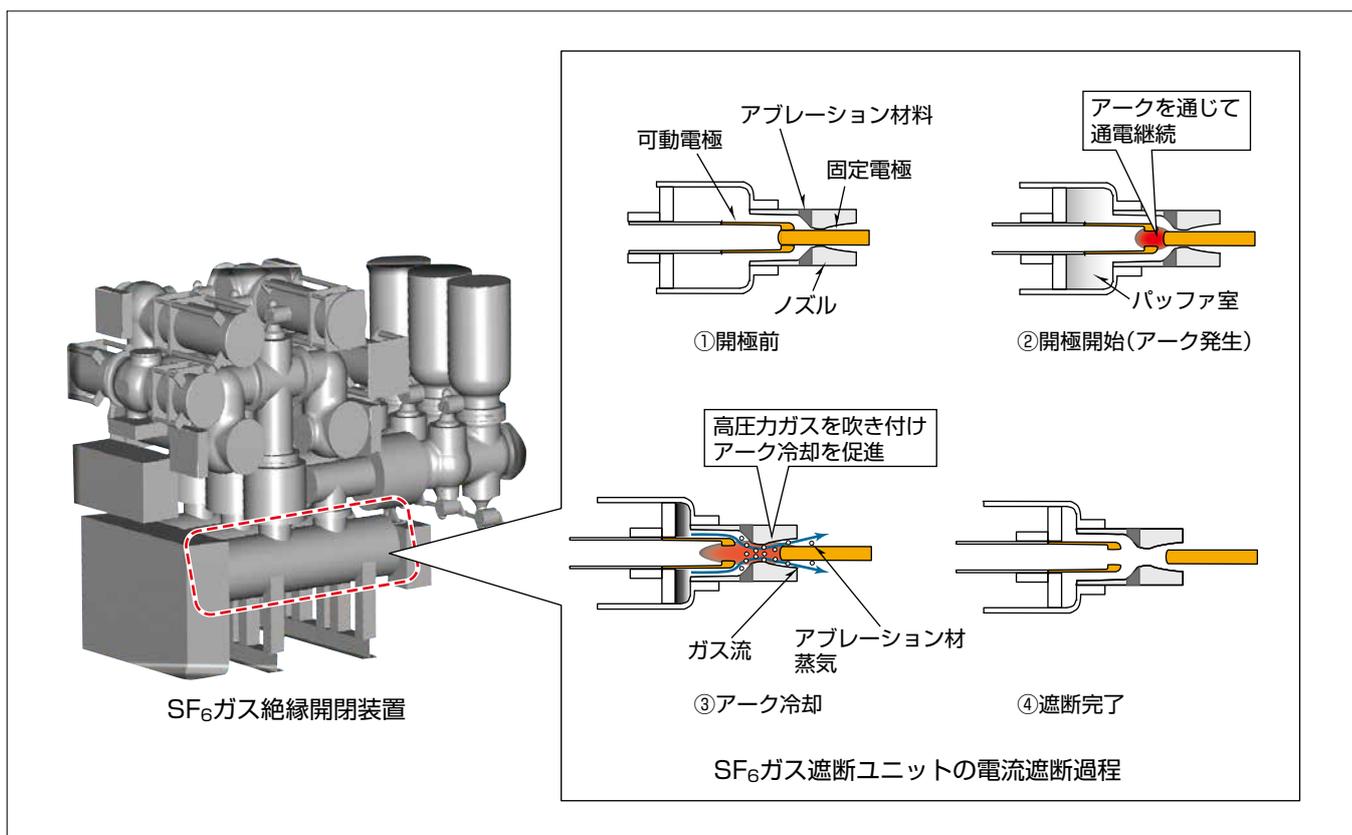
開閉装置は、電力送配電システムが正常な状態では電流を安定して流し、異常が発生した場合には事故電流を遮断して変圧器などの重要機器を保護する。電力用の高電圧ガス絶縁開閉装置(Gas Insulated Switchgear : GIS)に使用されるSF₆ガスは、その優れた遮断性能や絶縁性能で電力の安定供給に寄与する一方、国連会議COP(Conference Of the Parties) 24でまとめられた地球温暖化対策実施指針では使用量削減対象の温室効果ガスに指定されている。

GISの遮断ユニットは、可動電極と固定電極で構成され、通常時はそれらが接触した状態で電気を流している。一方異常発生時には電流遮断のためにそれら電極を切り離すが、このとき電極間に生じる高温のアークを通じて電流が流れ

続ける。そのため、従来の遮断ユニットでは、SF₆ガスの吹き付けによるアークの温度低下及び消滅によって、電流を遮断していた。

このようなメカニズムで電流遮断を行うGISの遮断ユニットで、先に述べたアーク冷却メカニズムに加えて、今回独自のアブレーション材料からもガスを噴出させてガスの吹き付け圧力を高め、アーク冷却を促進して遮断性能を向上させる技術を開発した。

三菱電機独自のこの技術による遮断ユニットの性能向上は、GISの遮断ユニット小型化や直列接続数の削減によるSF₆ガス使用量の削減に寄与できる。



アブレーション材料を適用したSF₆ガス遮断ユニットの電流遮断過程

通常時は遮断ユニットの可動電極と固定電極の接触面を通じて電流が流れている(図の①)。異常発生時には可動電極と固定電極が切り離されるが、両電極間に発生する導電性アーク(約2万℃の熱プラズマ)を通じて電流が流れ続ける(図の②)。そのため、機械的圧縮によって圧力が上昇するパッファ室からのSF₆ガスの吹き付けに加えて、アブレーション材料から発生する高圧力ガスによって導電性アークを冷却することで絶縁性ガスになり(図の③)、電極間に電流が流れなくなるため遮断が完了する(図の④)。

1. ま え が き

高電圧の大電流は、たとえその通電経路を物理的に断ち切ったとしても導電性アーク(約2万℃の熱プラズマ)が発生して通電経路を維持するため、容易に遮断できない。すなわち、電流を遮断することは、アークを冷却し、さらに消滅させることと同義である。

電力送配電システムで、短絡事故などで発生する大電流は、システムに配備された開閉装置によって速やかに遮断される。この速やかな事故電流遮断が変圧器などの重要負荷を保護してシステムの健全性を維持している。

開閉装置で電流遮断を担う遮断ユニットは可動電極と固定電極とで構成されている。遮断ユニットによる電流遮断はそれら電極の開極によって生じるアークを消滅させることで行われ、遮断ユニットにはアーク自身のエネルギーによってポリマ樹脂を分解及びガス化させてアーク冷却を促すなどの工夫が取り入れられている。このような遮断ユニットに適用されるポリマ樹脂は、一般的に熱分解温度の低い材料ほどアーク暴露による分解質量が多く、それに伴う発生ガス量も多くなることが知られている⁽¹⁾。

当社は、電力用の高電圧SF₆ GISの遮断ユニットに適したポリマ樹脂(以下“アブレーション材料”という。)を見いだし、遮断ユニットへのアブレーション材料の適用による遮断性能向上技術を開発した。

本稿では、見いだしたアブレーション材料について、SF₆アークに曝(さら)される際の分解質量特性や、アブレーション材料の分解による周囲空間の圧力上昇効果を述べる。

2. SF₆ガス中で使用するアブレーション材料の必要条件

2.1 ポリマ樹脂分解による電流遮断性能向上メカニズム

SF₆ GISの遮断ユニット内で生じるアークは、機械的に圧縮するパuffa室からSF₆ガスが吹き付けられることで冷却され、さらには消滅する。このとき、SF₆ガスの流れは、一般的にポリマ樹脂であるPTFE(ポリテトラフルオロエチレン)から成るノズルで制御される。ノズルはアークのエネルギーで分解し、アーク冷却やパuffa室の圧力増大による吹き付け圧力増加に寄与してアーク消滅を促し、遮断ユニットの遮断性能を向上させる⁽²⁾⁽³⁾。したがって、このノズルにPTFEより熱分解温度の低い絶縁樹脂を適用すれば、ノズルの分解質量が増大し、遮断性能の向上が見込める。

2.2 SF₆ガス中で使用するアブレーション材料特有の制約事項

PTFEより熱分解温度の低い樹脂として、POM(ポリアセタール)やPA6(ポリアミド6)がある。これらは低圧の

配線用気中遮断器の筐体(きょうたい)を始めとする消弧室近傍に設置する材料として検討されている⁽¹⁾⁽⁴⁾。しかしながら、これら水素をポリマ組成中に含む樹脂が、SF₆ガス中でアークを生じさせるGISの遮断ユニットに適用された例はない。

水素を材料組成中に含むそれらポリマ樹脂がアークによって分解すると、炭素(C)、酸素(O)、水素(H)、窒素(N)等に分解される。また、SF₆ガスは、アークによる分解過程で硫黄(S)やフッ素(F)に分解する。したがって、ポリマ樹脂とSF₆ガスの分解ガスが混合すると、混合ガスに含まれるH及びFの一部はガスの温度低下過程で結合して強酸性物質であるフッ酸(HF)となる。このHFはGIS内部の絶縁物の沿面絶縁性能を著しく劣化させる⁽⁵⁾。そのため、GISの遮断ユニットのノズルに適した材料は、水素を含まない絶縁材料と言える。

以上から、SF₆ガス中で使用するアブレーション材料には、従来のノズル材料であるPTFEより分解質量が多いこと、水素を持たないこと、の2条件を併せ持つことが望ましい。

3. アブレーション材料の分解質量特性

ポリマ組成中に水素を持たない絶縁樹脂を探索し、幾つかのポリマ樹脂を見いだした。それらポリマ樹脂をアブレーション材料の候補とし、SF₆アーク暴露による分解質量を測定した。この章では、最終的にアブレーション材料として選定されたポリマ樹脂の、SF₆アーク暴露による分解特性について述べる。

3.1 測定実験装置

図1(a)は、アブレーション材料から成るテストピースを取り付けるアーク装置(測定実験装置)の断面図である。テストピースはアーク装置の圧力室内部に配置され、厚み10mmの円筒形である。テストピースの外直径は70mm、内面の半径 R_w は11.5mm又は17mmとした。

また、図1(b)に示すとおり、テストピースはその内面以外をフェノール樹脂で覆われる。すなわち、可動電極と固定電極の間に生じるアークには、テストピースの内面だけが暴露される。アーク装置はSF₆ガスを0.6MPa-abs封入した密閉容器内に配置される。

アーク電流 I は60Hzの減衰性の正弦波交流であり、その第3半波目が9kA_{rms}から20kA_{rms}になるように調整される。

3.2 アブレーション材料の分解質量 M_i

テストピースはアーク装置に組み込まれる前に、実験前の初期質量 M_i を測定される。そして、アーク装置の中で複数回アークに曝された後取り出され、実験後の質量 M_a が測定される。テストピースの分解質量 M_i は、アーク暴露回数 N と、 M_i 及び M_a の測定結果から、式(1)によって導出される。

$$M_1 = \frac{1}{N} (M_i - M_a) \dots\dots\dots (1)$$

なお、この実験で、 N は5とする。

3.3 分解質量 M_1 の測定結果

図2は、アーク電流、アーク電圧及び可動電極移動距離の測定波形例、及びアーク装置での各時刻の電極配置を示している。なお同図は、電流の第3半波が20kArmsに設定されたものである。アークは時刻13.5msに発生し、その後可動電極が20mm下降した時刻23msからテストピースはアークに暴露され始める。

図3では、この開発で見いだした新アブレーション材料とPTFEの分解質量 M_1 の測定結果を示している⁽⁶⁾⁽⁷⁾。図3(a)で、

テストピース内面の半径 R_w が11.5mmのときには、アーク電流 I が9.5kArmsから20kArmsへ増大すると、新アブレーション材料の M_1 は0.24gから0.5gへ、約2倍に増加している一方、PTFEの M_1 は0.09gから0.26gへ、約2.9倍に増加している。また、図3(b)で、 I が20kArmsのときには、 R_w が11.5mmから17mmへ増大すると、新アブレーション材料の M_1 は0.5gから0.4gへ、約0.8倍に減少している。一方、PTFEの M_1 は0.26gから0.23gへ、約0.9倍に減少している。

このことから、どの測定条件でも、PTFEより新アブレーション材料の方が、SF₆アークに曝されたときの分解質量が多いことが明らかになった。

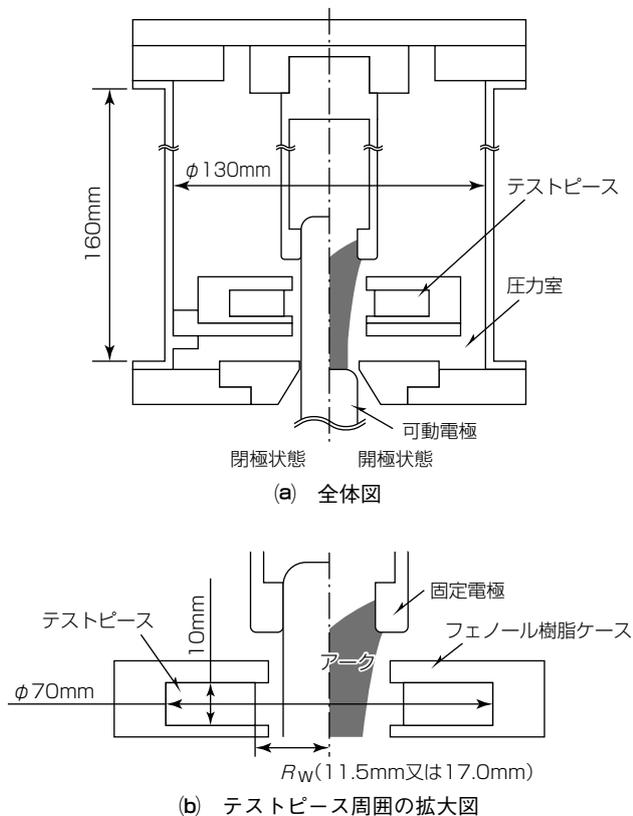
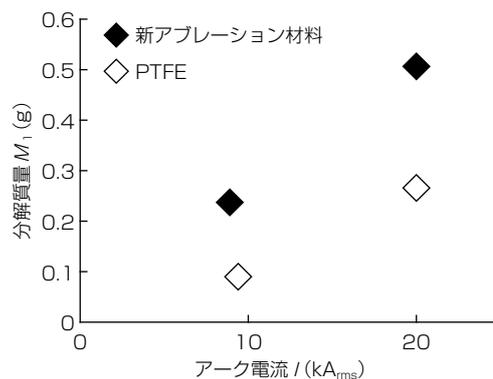
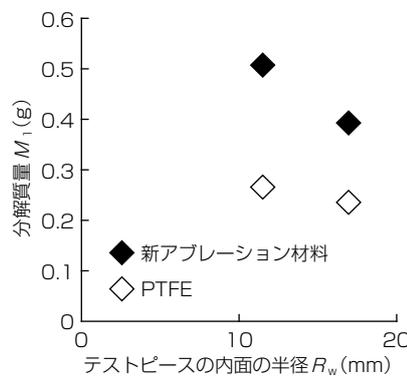


図1. アーク装置の断面図



(a) テストピースの内面半径 $R_w=11.5$ mmのときの M_1



(b) アーク電流 $I=20$ kArmsのときの M_1

図3. 新アブレーション材料とPTFEの分解質量測定結果

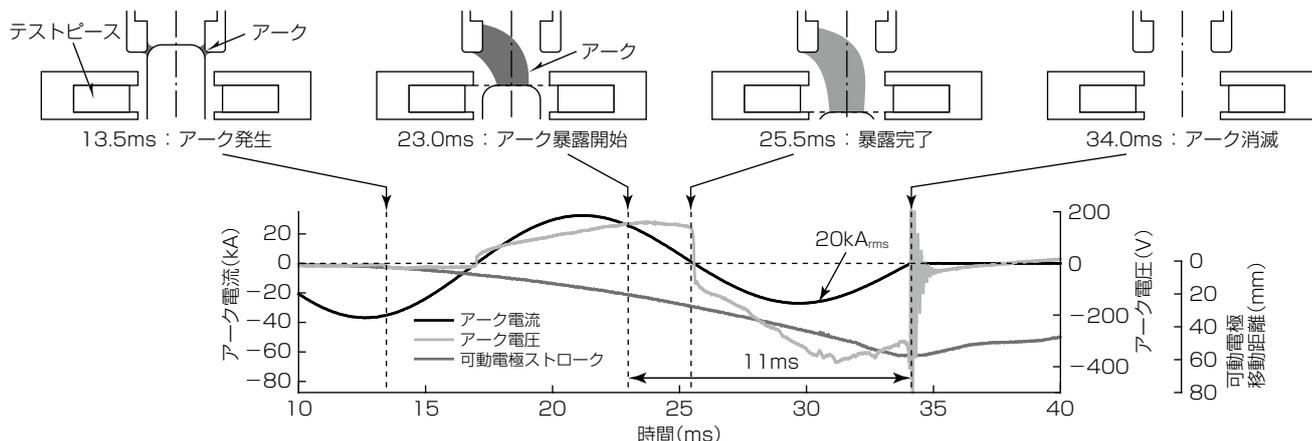


図2. アブレーション材料の分解質量 M_1 測定実験でのアーク電流・アーク電圧・可動電極移動距離の測定波形例

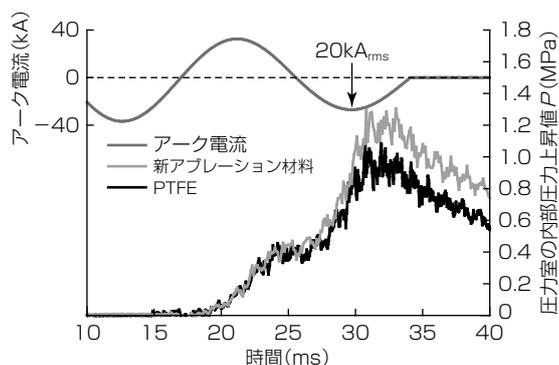


図4. PTFEと新アブレーション材料が設置された圧力室の内部圧力上昇値 P の測定結果

4. アブレーション材料の分解による周囲空間の圧力上昇効果

3章で述べたアブレーション材料の測定実験では、アークが生じている間、アーク装置のテストピースが設置される圧力室の内部圧力 P も圧電素子による圧力センサで測定していた。その測定結果から、アブレーション材料の分解による周囲空間の圧力上昇効果を評価する。

図4は、 R_w を11.5mm、アーク電流 I を20kA_{rms}とした場合での、圧力室の内部圧力 P の測定結果を示している。図で示すように、テストピース材料が新アブレーション材料の場合、 P は時刻約20msから上昇し始め、テストピースのアーク暴露が開始される時刻23msでは約0.3MPa上昇している。 P はその後も上昇を続け、電流がその波高値に達する時刻30msの周辺では約1.2MPaになる。一方、PTFEの場合、アーク電流の変化に対する P の上昇傾向は新アブレーション材料と同様であるが、テストピース内面全体がアークに暴露される時刻25.5ms辺りから、新アブレーション材料との間に差異が生じ始める。そして、同時刻以降は、PTFEの場合の P は、新アブレーション材料の場合の P より常に低くなり、両者の最大値には約0.3MPaの差が生じる。

この実験結果から、SF₆ガス遮断ユニットのノズルの一部に新アブレーション材料を使用することで、パuffア圧力が増大し、ひいては遮断性能の向上が期待できる。

5. むすび

GISに内蔵する遮断ユニットの仕様は、国内規格JEC-2300や国際規格IEC62271-100等によって厳格に定められている。そのため、遮断ユニットの電流遮断性能が必要仕様にわずかでも届かない場合、GIS遮断ユニットの直列接続数増大、遮断ユニットの構造変更、さらには操作装置

の高出力化(油圧式操作装置の適用、など)を余儀なくされる。

今回開発した新アブレーション材料のノズル適用による遮断性能向上技術は、大幅な遮断ユニット構造の変更や操作装置の出力増加を伴わないため、先に述べたような規格が求める性能に届かない遮断ユニットに対して有効な性能改善策になると考えられる。

現在、この技術を活用した遮断ユニットの性能向上開発を進めている。この開発は、遮断ユニット小型化や直列接続数の削減によるGISのSF₆ガス使用量削減につながる。加えて、この開発は、ばね操作装置のGISへの適用範囲拡大にも寄与できると考えられる。高出力な一方で高頻度メンテナンスが必要な油圧式操作装置をばね操作装置に置き換えることによって、GISの省メンテナンス化を推進していく。

参考文献

- (1) 磯崎 優, ほか: 密閉容器内における大電流気中アークの特性, 平成13年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, 416, 356~357 (2001)
- (2) Zhang, J. L., et al.: Computational Investigation of Arc Behavior in an Auto-Expansion Circuit Breaker Contaminated by Ablated Nozzle Vapor, IEEE Transactions on Plasma Science, 30, No.2, 706~719 (2002)
- (3) Gonzalez, J.-J., et al.: PTFE Vapor Contribution to Pressure Changes in High-Voltage Circuit Breaker, IEEE Transactions on Plasma Science, 43, No.8, 2703~2714 (2015)
- (4) Andre, P.: Composition and thermodynamic properties of ablated vapours of PMMA, PA6-6, PETP, POM and PE, J. Phys. D: Appl. Phys., 29, 1963~1972 (1996)
- (5) 新開裕行, ほか: 高経年GCBの耐電圧性能検証および内部絶縁ガスの調査, 電気学会研究会資料 放電・開閉保護・高電圧合同研究会, ED-11-158/SP-11-57/HV-11-62 (2011)
- (6) 佐藤基宗, ほか: ノズルアブレーション促進によるガス遮断器性能向上技術開発に向けた検討, 電気学会研究会資料 放電・静止器・開閉保護合同研究会, ED-18-050/SA-18-033/SP-18-002 (2018)
- (7) 佐藤基宗, ほか: SF₆アークに暴露されるPTFEノズルのアブレーション質量予測式の提案, 電気学会論文誌B (2019年7月号掲載予定)