

# SF<sub>6</sub>ガス／固体ハイブリッド絶縁によるGIS小形化技術

釣本崇夫\* 山本茂之\*\*  
吉村 学\*\*  
海永壮一朗\*\*

*Down-sizing of Gas Insulated Switchgear with SF<sub>6</sub> Gas/Solid-hybrid Insulation*

Takao Tsurimoto, Manabu Yoshimura, Soichiro Kainaga, Shigeyuki Yamamoto

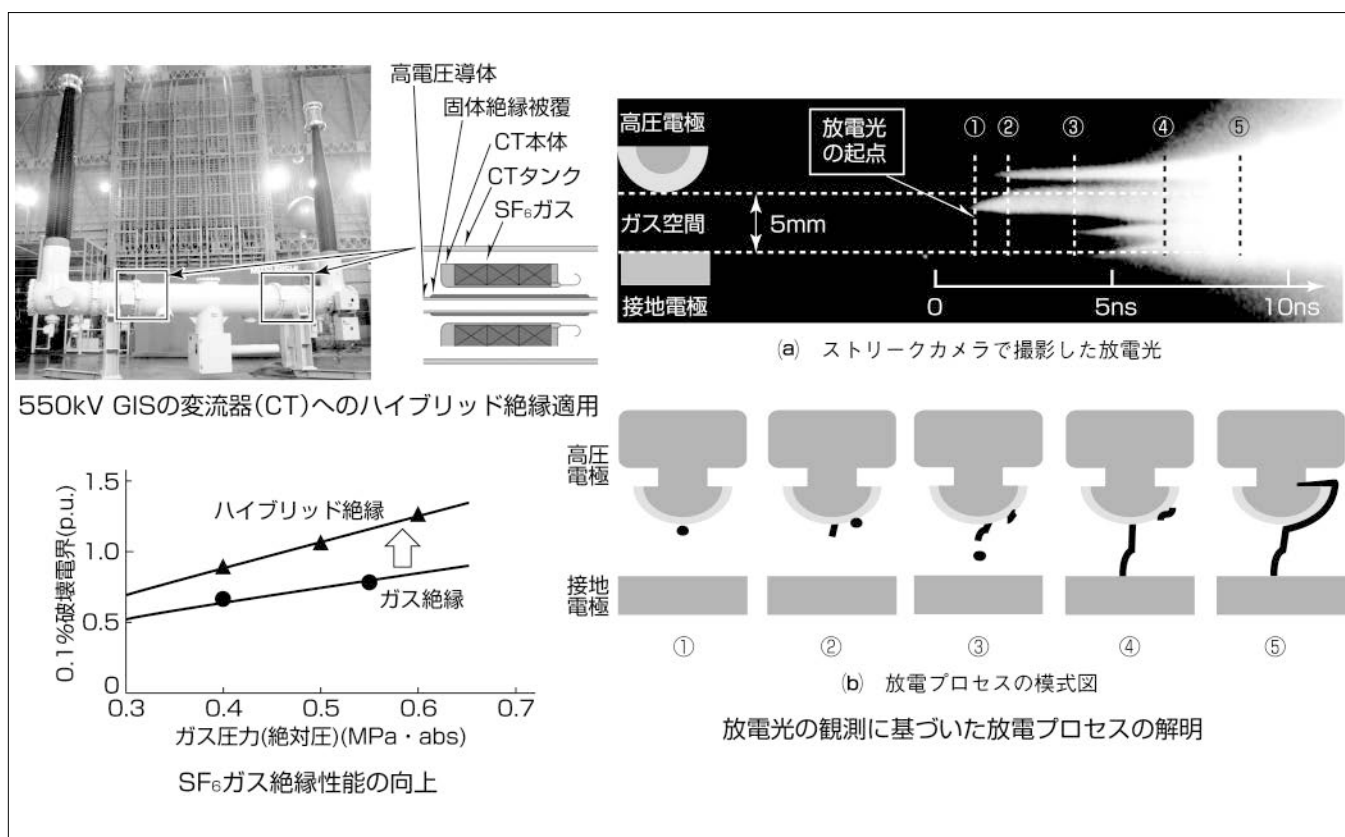
## 要 旨

ガス絶縁開閉装置(GIS)には、高い絶縁性能を持つSF<sub>6</sub>(六フ化硫黄)ガスが絶縁媒体や消弧媒体として使用されている。しかし、SF<sub>6</sub>ガスは地球温暖化係数が高いため、世界規模での環境意識の高まりの中でガスの使用量や排出量の削減といった低環境負荷への対応が求められている。

これに対して、三菱電機ではガス絶縁性能を更に向上させて機器を小形化するためのハイブリッド絶縁技術を開発した。ハイブリッド絶縁は、高電圧導体表面に固体絶縁被覆を施したもので、ガス絶縁で弱点となる電極表面上を絶縁物で覆うことで放電を抑制するものである。これによ

て、導体を被覆しない場合に比べて絶縁性能を50%向上させた。また、放電が発生して絶縁破壊するまでのプロセスを放電光の観測によって明らかにし、絶縁性能のばらつきが小さく信頼性の高い絶縁被覆を実現した。

この方式を550kV GISの変流器(Current Transformer: CT)部の導体に適用することで、接地電位となるCT収納ケースを小形化し、CT本体及びタンクの小形化とSF<sub>6</sub>ガス使用量の30%削減を実現した。今後、ハイブリッド絶縁の適用範囲を拡大することによって、GISの一層の小形化を図る。



## ハイブリッド絶縁によるSF<sub>6</sub>ガス絶縁性能の向上と550kV GISへの適用

金属電極に絶縁被覆をしない従来のSF<sub>6</sub>ガス絶縁に対して、絶縁被覆したハイブリッド絶縁の破壊電界は50%上昇する。ハイブリッド絶縁では、放電がガス空間を起点に発生して絶縁破壊の様子が確認でき、電極表面の微小突起など絶縁上の弱点の影響が抑制されるためと推定できる。550kV GISのCT部の導体を絶縁被覆してハイブリッド絶縁にすることで高電界絶縁設計を可能とし、CT本体とCTタンク径の小形化を実現した。

## 1. ま え が き

ガス絶縁開閉装置 (Gas Insulated Switchgear : GIS) は高電圧導体を絶縁特性の優れた六フッ化硫黄 (SF<sub>6</sub>) ガスが充填されたタンク内にコンパクトに配置した電力用の開閉装置である。GISのタンク径はガス絶縁設計と熱設計で決まる。このうち、絶縁設計については高ガス圧化等による高電界化が進められてきたが、既に限界に達しつつある状況である。

一方、高電圧導体の表面に絶縁物を被覆し、SF<sub>6</sub>ガス絶縁と固体絶縁を複合させたハイブリッド絶縁にすることで、SF<sub>6</sub>ガスの絶縁破壊電界が高くなることが知られている<sup>(1)</sup>。この理由は次のように解釈される<sup>(1)</sup>。金属導体の表面にはμmオーダーの微小な突起が存在しているため、ガス空間には局部的に電界が集中し、この部位が放電の起点となる。導体面積が大きくなるに従い絶縁破壊を引き起こす微小突起の存在確率が高くなるため、破壊電界は低下する。これに対して、導体表面が絶縁被覆されていると、金属の微小突起によるガス空間の電界集中が生じなくなるため、破壊電界は上昇するのである。大面積領域 (例えば実際のGISの導体面積) では破壊電界の低下が大きいいため、絶縁被覆の効果は大きくなる。

当社はハイブリッド絶縁を実器に適用するため、厚膜の絶縁被覆形成が可能な樹脂注型による導体被覆<sup>(2)</sup>や、金型が不要で導体の形状に合わせてフレキシブルに被覆形成が可能な絶縁薄膜コーティング<sup>(3)</sup>による破壊電界上昇効果の確認を実器規模で行い、また、原理検証を進めてきた。

本稿では、当社が開発したSF<sub>6</sub>ガス/固体ハイブリッド絶縁技術について述べる。

## 2. ハイブリッド絶縁による破壊電界上昇

### 2.1 絶縁被覆形成方法

導体に絶縁被覆を形成する方法として、樹脂注型と樹脂コーティングについて開発を行ってきた。樹脂注型は、厚膜形成が可能であるため被覆そのものの貫通耐電圧を高くでき、また、絶縁被覆が電圧の一部を分担するため電界不平等性の高い電極表面に適用するとガス空間の電界集中を緩和できるという利点がある。一方、被覆するためには金型が必要であるため、導体のサイズや形状などに制約がある。これに対して、樹脂コーティングは被覆厚さが薄くなるが、この制約を受けずに被覆できる方法である。ここでは樹脂コーティングで被覆を形成した薄膜ハイブリッド絶縁の破壊電界上昇効果について述べる。

### 2.2 破壊電界の上昇

図1に薄膜ハイブリッド絶縁の試験電極系を示す。高電圧電極としてアルミニウム製のリング形状の電極を用い、表面には厚さ数100μmの絶縁被覆をコーティングによって

形成した。この電極を円筒タンク内に同軸に配置し、タンク内に所定のガス圧力のSF<sub>6</sub>ガスを充填した。高電圧電極の最大電界に対して95%以上高い領域を電界解析によって求め、この面積を電極の有効面積とした。電極有効面積はリング形状の電極の数で変化させた。なお、ガス空間における電界の不平等性を示す電界利用率は0.58である。

印加電圧として負極性の雷インパルス電圧を用い、絶縁破壊するまで段階的に電圧を上昇させる昇圧法によって破壊電圧を測定した。絶縁被覆はガス空間で絶縁破壊すると同時に貫通破壊するため、その都度電極を交換しながら条件ごとに10点の破壊電圧を取得した。

図2にガス圧力0.4MPa・abs (絶対圧)における絶縁破壊電圧のデータに基づき算出した絶縁破壊確率が0.1%になる電界 (以下“0.1%破壊電界”という。)と電極有効面積との関係を示す。電界はSF<sub>6</sub>ガス0.4MPa・absでの臨界電離電界を基準 (1.0p.u.)とした。

図2から、絶縁被覆していない裸電極の場合は電極有効面積が増加するにつれて絶縁破壊電界が低下することが分かる。特に実器設計上重要な面積10<sup>5</sup>mm<sup>2</sup>以上の領域では、SF<sub>6</sub>ガスの臨界電離電界に対して破壊電界は64%に低下した。一方、樹脂コーティングによって絶縁被覆した電極の場合は、電極有効面積が大きくなるにつれて破壊電界が低下する現象が改善され、10<sup>5</sup>mm<sup>2</sup>以上の領域で臨界電離電界に対して破壊電界は89%であった。つまり、被覆によって破壊電界は40%上昇した。

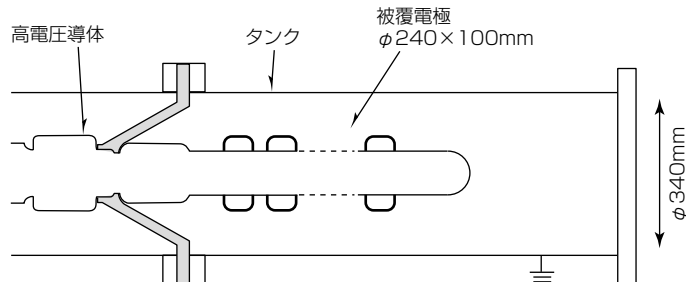


図1. 薄膜ハイブリッド絶縁の試験電極系

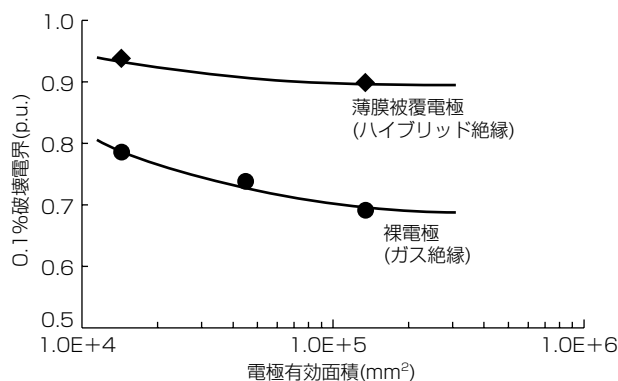


図2. 薄膜ハイブリッド絶縁による破壊電界の電極面積依存性 (ガス圧力0.4MPa・abs)

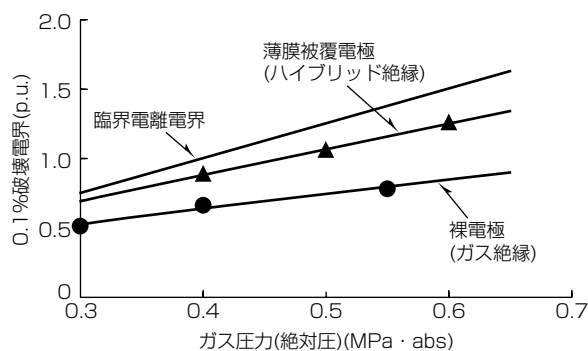


図3. 薄膜ハイブリッド絶縁による破壊電界のガス圧力依存性 (電極有効面積 $10^5\text{mm}^2$ 以上)

図3に電極有効面積 $10^5\text{mm}^2$ の領域における0.1%破壊電界のSF<sub>6</sub>ガス圧力依存性を示す。裸電極での破壊電界はガス圧力とともに上昇するものの、その上昇率はガス圧力が高いほど鈍くなり、ガス圧力の0.7乗に比例する結果が得られた。一方、被覆電極での破壊電界はガス圧力に対して0.85乗に比例した。この指数が示すように、ガス圧力が高いほど絶縁被覆による破壊電界の上昇効果は大きくなり、0.6MPa・absでは破壊電界は50%上昇した。

この結果から、薄膜ハイブリッド絶縁はGISの設計電界を飛躍的に高くできる優れた技術であるといえる。

### 3. 破壊電界上昇のメカニズム

#### 3.1 ストリークカメラによる放電光の観測方法

ハイブリッド絶縁によって破壊電界が上昇する理由は1章で述べたが、これまで放電を直接観測して論じられた例はなかった。そこで、nsオーダーの非常に短い時間で完結する放電に対して、放電光が発生してから絶縁破壊するまでの様子をストリークカメラ(NAC社, ULTRANAC FS-501)で直接観測し、破壊電界が上昇するメカニズムを明らかにした。

図4に放電光観測の試験電極系を示す。被覆電極として、真空注型によってエポキシ樹脂を被覆したアルミニウム製の半球電極を用いた。被覆の厚みは2mm又は4mm、電極の半径は被覆を含めて10mmとした。また、裸電極として半径10mmのアルミニウム製の半球電極を用いた。これらの高電圧電極に対向して平板の接地電極を配置し、ガス空間距離は5mmとした。この電極系におけるガス空間の電界利用率は0.74~0.77である。試験電極系をタンク内に設置して所定のガス圧力のSF<sub>6</sub>ガスを充填した。負極性の雷インパルス電圧を繰り返して印加し、絶縁破壊時の放電光をストリークカメラで観測した。

#### 3.2 放電進展プロセス<sup>(4)</sup>

図5に裸電極で観測されたストリークカメラの典型的な画像と、画像から推測される放電の挙動の模式図を示す。

横軸は時間、縦軸は位置を示し、電極先端の位置を破線で表した。図5から、放電光は高圧電極表面を起点に発生

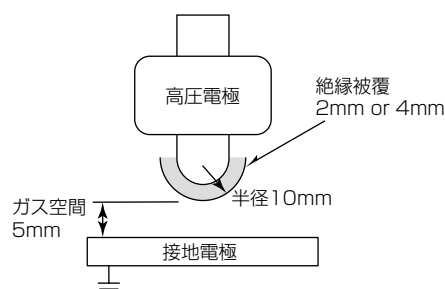
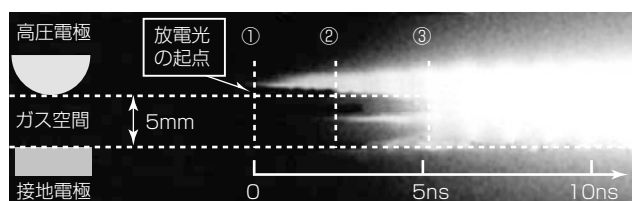
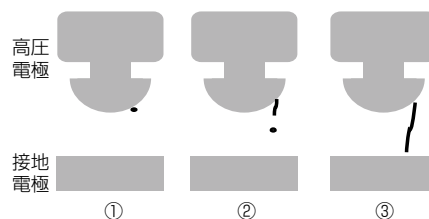


図4. 放電光観測の試験電極系

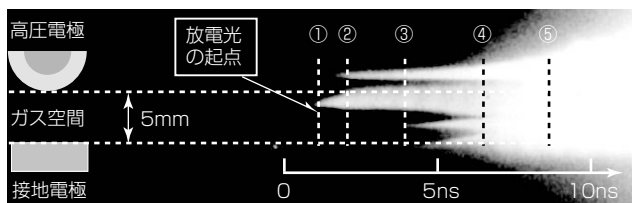


(a) ストリークカメラの画像

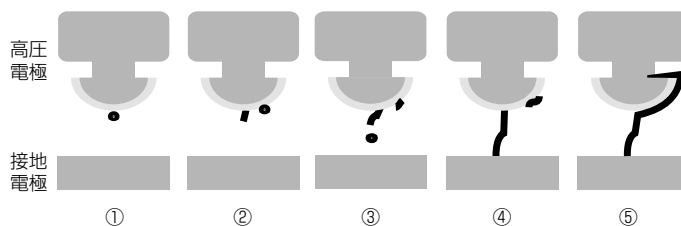


(b) 放電挙動の模式図

図5. 裸電極における放電光の開始と進展



(a) ストリークカメラの画像



(b) 放電挙動の模式図

図6. 被覆電極における放電光の開始と進展

し(①)、接地電極に向かって進展する過程でガス空間からも新たに放電光が発生し(②)、電極間を橋絡した(③)。一方、被覆電極の典型的な画像を図6に示すが、放電光は電極近傍のガス空間を起点に発生し(①)、被覆絶縁物上でも放電光が発生し(②)、さらに、ガス空間でも発生し(③)、これらがつながってガス空間を橋絡し(④)、被覆絶縁物を放電光が進展して最終的に金属電極間を橋絡して絶縁破壊へと至った(⑤)。

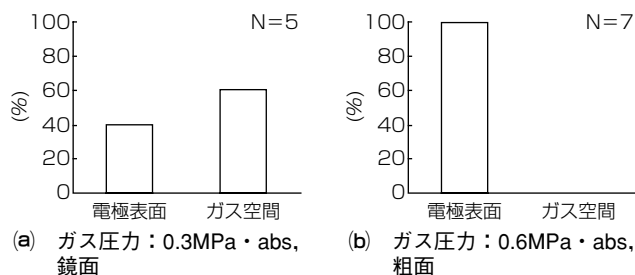


図7. 放電光の起点の位置(裸電極)

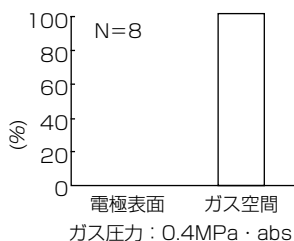


図8. 放電光の起点の位置(被覆電極)



図9. 550kV GIS

ここで、最初に放電光が観測された“起点”に着目し、電極表面とガス空間のいずれを起点に放電光が発生したかをそれぞれの電極系について図7と図8にまとめた。観測数(N)は各条件でN=5~8点である。図7から、鏡面仕上げした裸電極ではガス圧力0.3MPa · absで放電光の起点は電極表面とガス空間がほぼ半々であった。これは、電極が放電の発生に影響を及ぼしていることを示唆している。またガス圧力を0.6MPa · absに高くし、電極表面を粗面仕上げした場合、放電光は全て電極表面が起点となった。一方、図8から被覆電極ではガス圧力0.4MPa · absで放電光の起点は全てガス空間であった。

このように、ストリークカメラによる放電光観測によって、図2、図3に示したような電極の絶縁被覆による絶縁破壊電界の上昇の理由を実験的に裏付けることができた。つまり、裸電極の場合、電極表面の微小な突起が絶縁上の弱点として作用するのに対して、被覆電極の場合、電極表面が絶縁物で覆われることによって弱点として作用しなくなり、ガス空間を起点に放電が起こる。つまり、ガス本来の絶縁性能が発揮されるようになるのである。

#### 4. GISへのハイブリッド絶縁の適用

図9にハイブリッド絶縁を適用した550kV GISの外観を示す<sup>(5)</sup>。主母線に架空線を用いるH-GISと呼ぶタイプである。遮断器、断路器、接地開閉器、変流器等は直線上に設置した。変流器の高電圧導体と変流器収納ケースの間に薄膜ハイブリッド絶縁方式を適用した。これによって変流器本体及びタンク径を小形化し、SF<sub>6</sub>ガスの使用量を70%に削減した。

#### 5. むすび

当社が開発したGIS小形化のためのSF<sub>6</sub>ガス絶縁と固体絶縁を組み合わせたハイブリッド絶縁技術について述べた。当社のハイブリッド絶縁は、従来のガス絶縁に対して破壊電界が40%以上上昇し、他の報告と比較しても高い絶縁性能を持っている<sup>(6)</sup>。この理由は、導体への絶縁被覆によってガス空間が放電起点となり、ガス本来の絶縁性能を発揮できているためであることを、放電光の発生から進展までの直接観測で明らかにし、実用的な絶縁技術として確立した。

#### 参考文献

- (1) Honda, M., et al.: Impulse Breakdown Characteristics of Coated Electrodes in SF<sub>6</sub> Gas, IEEE Trans. on Power Delivery, **PWRD-2**, No.3, 699~708 (1987)
- (2) 吉村 学, ほか: SF<sub>6</sub>ガス中エポキシ樹脂モールド電極のフラッシュオーバー特性と繰り返し放電によるエポキシ樹脂の貫通破壊特性, 電気学会論文誌B, **134**, No.9, 820~825 (2014)
- (3) 吉村 学, ほか: 電極への薄膜絶縁被覆によるSF<sub>6</sub>ガス絶縁システムの高耐電圧化, 平成22年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.326 (2010)
- (4) 海永壮一郎, ほか: SF<sub>6</sub>ガス/固体ハイブリッド絶縁系における放電起点, 電気学会論文誌A, **134**, No.4, 285~290 (2014)
- (5) 貞國仁志, ほか: 新形ばね操作550kV GIS, 三菱電機技報, **86**, No.9, 490~493 (2012)
- (6) Hama, H., et al.: Cross-sectional Study between SF<sub>6</sub> and Eco-friendly Gases on Dielectric Coated Electrodes for Real-size Gas Insulated Switchgear, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, **19**, No.1, 253~262 (2012)