絶 性 縁 特 SF₆ ガ ス ()

Characteristics of SF₆ Gas as an Insulating Medium

菅	ノ又	伸	治*	鎌	田		譲*
	Shinji Sug	ganomata	1	1.000	Yuzuru	Kamata	
大	石	和	明**	塩	野	繁	男**
	Kazuak	i Ôishi			Shigeo	Shiono	

要

旨

ガス絶縁機器の設計製作に当たっては、まずガス中における絶縁特性を知らなければならない。本稿におい ては、まず電離、電子付着などの基本的現象からSF。ガスの特長を説明し、さらにガス単独ならびに固体絶縁 物の存在する場合の各種条件での絶縁特性を述べた。

1. 緒

言

電力機器の絶縁媒質としては従来油や空気が使われてきた。これ に代わって, 最近 SF₆ ガスを絶縁媒質として利用することが急速に 発展しつつある。これは、弗素化学工業の進歩によってSF6が多量 生産され価格が下がるとともに容易に入手できるようになったこと も一つの原因であろうが、むしろ SF6の高絶縁耐力による絶縁距離 の縮少と機器の小形化、あるいは低誘電率、低損失、軽量化、不燃 性、非爆性などのすぐれた特性によるものである。

SF₆ガスを電子で衝撃したときに生ずる正イオンは,発生開始電 圧の低いほうから並べると,

SF₅⁺, SF₄⁺, SF₃⁺, SF₂⁺, SF⁺, F⁺, S⁺, SF₄⁺⁺, SF₂⁺⁺ の順になる。このうち初めの三つのものについて発生開始電圧、相 対存在比を表1にまとめた(1)。この三つのイオン以外のものは存在 比が小さく,通常問題にならない。たとえば,17 eVのエネルギー の電子によって生ずる正イオンは、

 $SF_6 + e \rightarrow SF_5^+ + F + 2e$ (1)

SF6 ガスの絶縁特性についてはこれまで多くの研究が行なわれて いるが、電気的負性ガスの絶縁特性は非常に複雑である。このため ごく基礎的な研究結果から実際的な装置に対する推定をすることは 一般に困難であり、 合理的な機器絶縁を確立するためには実用的な 研究の積み上げが必要である。このような意味において日立製作所 においても SF6 ガスの絶縁に関する研究開発を行なっているが、本 稿では文献などにみられるデータを参照しながら筆者らの研究結果 をまとめた。実験にはその目的に応じて各種の装置を使用したが、 図1に実験装置の一例を示す。

2. SF₆ ガスの放電物理的特性

SF6 ガスの絶縁耐力が高いのはその電気的負性すなわち電子親和 力の大きいことに基因しており,空気などとは異なるふるまいを示 すことがある。ガス中での衝突現象すなわち電離や各種イオンの発 生などに関する研究は,主として低気圧において,マススペクトロ メータを用いて行なわれている。本章では、これらの基本的現象に ついて述べる。

なる反応によるだけであろう。

負イオンは電子エネルギーの低い領域においても, SF₆-, SF₅-, F⁻などが生ずることが知られている。図2にSF₆ガスの電子付着 断面積と電子エネルギーの関係(1)を示した。電子エネルギーが0.1 eVのところに非常に大きなピークのあるのは、次の反応

による電子の共鳴吸収である。このピークを除くと、付着断面積は 10⁻¹⁸ cm² のオーダーの値が続き、電子エネルギーとともに漸増す る形となっている。これを酸素の場合と比べてみると、酸素では付 着断面積のピークの最大値は 1.3×10⁻¹⁸ cm² であるが, SF₆ では前 記のようにガスの絶縁破壊を引き起こすに有効な電子エネルギーの

表1 正 才 1

	and the second		
イオン	SF5 ⁺	SF4+	SF ₃ +
発生開始電圧(V)	15.8	18.8	19.3
相対存在比 (70eV電子)	100	10	22

1





---- 70 -----

日立製作所日立研究所 日立製作所国分工場 **





図7 インパルスフラッシオーバ電圧の 圧力依存性

		-up+v			
雷正冰影	A	AC		インパルス	
电压仪ル	a	b	а	b	
ステンレススチール	7.8	7.8	8.4	8.8	
アルミニウム	5.8	7.8	6.0	9.0	

表2 フラッシオーバ電界強度

E = ap + b

高いほうに広いエネルギー範囲にわたって 1.2×10^{-18} cm² を越える 値となっている。SF₆ ガスと酸素との負イオン発生量の比較⁽²⁾は図 3に示すとおりである。このような特性がSF₆ ガスの絶縁耐力を高 める原因となっている。

実際の放電では種々のエネルギーの電子が存在するが、このような状況下での電離係数 α 、付着係数 η 、あるいは二次電離係数 γ などの測定も行なわれている。このような測定結果の一例を図 $4^{(1)(3)}$ に示した。図4において、Eは電界強度(V/cm)、pはガス圧力(mmHg)である。この図から明らかなように、E/pとともに α/p は増加し η/p は減少するために、($\alpha-\eta$)/pは負から正の値に変わる。すなわち電離増殖が盛んに行なわれるようになる。

タウンゼント理論によれば,ギャップ長 d のときの火花放電の条件は次式で与えられる。



図8 高気圧領域での E/p と pd の関係



SF₆ ガスの絶縁耐力におよぼす各種の要因

3.1 電 極 材 質

電気機器にはいろいろの金属材料が用いられているが、SF₆ ガス 中の絶縁特性を調べるに当たってはこのことを考慮して電極材質に よるフラッシオーバ電圧の違いを検討する必要がある。平滑に仕上 げられたステンレススチールの近似ロゴウスキー電極 (86 mm ϕ)を 用いてフラッシオーバ電圧の圧力依存性を求めた結果は、図 6、7 に 示すようにほぼ直線的な関係が得られている。アルミニウム電極に ついても類似の結果となったので、フラッシオーバ電界強度 E と圧 力pの関係を次のように一次式で表わし、

E	=ap	+b			(4)
<i>ČČČ</i> ,	E:	$kV_p/\mathrm{mm},$	<i>p</i> :	$kg/cm^2 \cdot G$	





3.2 電極表面のあらさ

電極表面の状態が悪い場合, すなわち表面の仕上げが悪くあらい 場合には, ミクロにみて多数の凹凸(おうとつ)が存在し, 凸部での電 界の集中によってフラッシオーバ電圧の下がることが予想される。 これがどの程度のものであるかを調べた結果が図10である。仕上 げ程度は上仕上げ(0.8S), 中仕上げ(12S), あら仕上げ(35S)と 3段階に変えて比較している。これから, 印加電圧の波形や電極材 質の違いによって多少の差はみられるが, 仕上げ程度が悪いと20 ~25%程度のフラッシオーバ電圧の低下をみておかなければならな いことがわかる。

仕上げ程度の異なる電極を組合せて用いると、フラッシオーバ電 Eは同じ仕上げの一対の電極の場合の中間の値となる。図11は上 図15 不平等電界での圧力依存性

ながめてみるとその凹凸面には多数の金属粉が付着している。その 数や大きさは材質や仕上げの程度によっても異なるが,筆者らの経 験によれば一般に仕上げの良いほど金属微粒子の数は少ない。

明らかに多数の金属粉の付着しているのが認められた中仕上げの ステンレススチール電極について、金属粉を取り除く処理をしたも のとしないものとの比較した結果が図12である。この結果から、中 仕上げ電極でも金属粉を取り除くことによって特性が改善され上仕 上げ電極の特性に近づくことがわかる。M.J. Mulcahy 氏⁽⁴⁾や H.C. Doepken 氏⁽⁵⁾も導電性粒子が影響を及ぼすことを述べており、ここ で述べた結果と定性的に一致している。非導電性のじんあいはフラ ッシオーバ電圧の低下をきたすような影響は少ない。たとえば電流 しゃ断後に生じる粉末が乾燥状態で電極上に存在してもフラッシオ ーバ電圧の低下は起こらず、むしろ図13のように上昇ぎみになる。 これは、約111 の容器内の上部にしゃ断器用 Ag-W コンタクトを、 下部に 60 ϕ ロゴウスキー電極を置いて、電流しゃ断後のガスのイ ンパルス耐圧を測定したものである。ガスを入れ替えると耐圧が下 がりほぼもとの値にもどるのは、粉末がガス交換時に吸湿したため と考えられる。

3.3 混入水分の影響

SF6 ガスに水分が混入した場合,水分量によってどのようにフラ

仕上げとあら仕上げのステンレススチール電極を組合わせた場合の
フラッシオーバ電圧の変化の割合を示している。インパルスの場合
には極性による違いがわずかながらみられる。
電極表面があらい場合にフラッシオーバ電圧が低下するのは、前
にも述べたようにミクロにみた凸部への電界の集中、そのための電
子放射が影響していると考えられる。しかし、このほかに金属粉の
影響も考慮する必要があるようである。金属表面を顕微鏡によって

ッシオーバ電圧が変わるかは興味のあるところである。清浄な SF ₆
ガスに水蒸気を混入した場合の水分量とフラッシオーバ電圧の関
系を図14に示した。容量比で10,000 ppm 程度まで水分量を変え
ても1,000 ppm 以上でごくわずかの下がりがみられるだけで,大幅
な差はみられない。これはSF6 ガスにわずかのほかのガスが混入し
てもフラッシオーバ電圧が下がらないという事実(4)から予想される
ものである。しかしながら、ガス中に分解生成物が存在する場合に



図 16 円筒電極端部間のフラッシオーバ 特性

10²

10



1,000



AC に対するインパルス,開閉 図 17 インパルスのフラッシオーバ電圧比

正極性

負極性

5



図18 円筒電極間のフラッシオーバ



図19 棒-平板電極の電圧-時間特性 図20 電圧-時間特性と極性効果

図 21 スペーサの形状例

は水と反応して各種の悪影響が起こることが知られており, また結 露などが起こるとフラッシオーバ電圧に悪影響を与える。さらに、 非導電性のごみでも吸湿によって導電性となるので,水分,ごみな どは慎重に管理することが必要である。

3.4 不平等電界

*

2

400

(À) 300 ⊞ 200

世 100

0.1

不平等電界中においては, 電気的負性ガスの絶縁特性に特異な様 相が現われることが知られている(6)~(8)。その代表的な一例を示す と図15のようなものである(6)(7)。フラッシオーバ電圧はある気圧 で最大値を示し、このような領域ではコロナ開始電圧とフラッシオ ーバ電圧の差が大きく,またインパルス比は1より小さい値をとる。 このような最大値の生ずる臨界気圧があるのは、コロナ放電による 空間電荷が電界を緩和する,いわゆるコロナ安定化作用によるもの と考えられている。角棒電極のような著しい不平等電界において は、開閉サージフラッシオーバ電圧はガス圧力を上げてもほとんど 変わらず、空気中の値よりも低くなる場合のあることが最近明らか にされている(9)。実際の電気機器においては、これらの例にみられ るような著しい不平等電界が生ずることはないけれども、常に極端 な電界の集中が起こらないように機器を構成することはたいせつな ことである。

実際の機器において起こり得る程度の不平等電界の例として, 180 Ø 円筒で端部 16 R の電極をギャップ長 40 mm で対向させた場 合の特性を示すと、図16,17のようである。インパルス比は1.1~ 1.5 で,開閉インパルスの耐力はインパルスとあまり違がわない。こ の電極系では端部に電界の集中はあるけれども、たとえば図15にみ られるような著しい不平等性はないので、フラッシオーバ特性とし ては特異なものは現われず、むしろ平等電界に近い特性を示してい ると言えよう。フラッシオーバの写真を図18に示す。 にさらに避雷器を置くことが必要であろう。 Binns氏と Dargam 氏⁽¹⁰⁾は 20 mm Ø 球電極のギャップ 2 mm を SF₆ ガス中における固体絶縁物 用いて空気とSF6ガスとの混合ガスにおいて、SF6ガス量の増加と ともに時間おくれが大きくなることを示している。一方,鋭利な端部 ガス絶縁機器では, 導体をなんらかの方法で支持しなければなら をもつ50¢棒電極と平板電極との不平等電界(ギャップ長50mm, ず,種々の形状,材質の固体絶縁物が使用される。固体絶縁物を利 圧力785mmHg)では電圧-時間特性は図19⁽¹¹⁾のようになり,時間の 用するに当たっては、その目的に合致した材質を選ぶことは当然必

— 73 —

短いところでは電圧が著しく高くなる。このような性質は,SF6 ガス の付着係数ηが大きいこと,ηや電離係数αの値が電界によって変 わること,不平等電界では低電界の部分が存在することなどによっ て説明される。

筆者らの経験でも、たとえばしゃ断器などで起こり得る程度の不 平等電界では図20のような電圧-時間特性が得られており、急しゅ ん波領域での電圧の立ち上がりと極性効果の逆転がみられる。電界 の不平等性は一般的には好ましくないが、ここで述べたような不平 等電界における電圧の立ち上がりは絶縁協調などを考えるうえでは 有利になる。

ここでガス絶縁開閉装置の絶縁協調についてふれておきたい。通 常の変電所においては変圧器にできるだけ近いところに避雷器を設 置するのが一般的である。しかし、ガス絶縁変電所においてはしゃ 断器,断路器,母線などすべて密閉された容器,管路によって構成 されるため,異常電圧が進入した場合大地に対してフラッシオーバ することはシースあるいはスペーサの損傷,破損などの原因となり 好ましくない。もちろん極間でのフラッシオーバは避けなければな らない。これらの点から従来方式のように変圧器保護の観点のみか ら避雷器設置位置を設定すれば,架空線から母線にはいったところ, すなわち断路器,しゃ断器の線路側はしゃ断器開極時は避雷器によ って保護されていないことになり上記の理由から好ましいことでは ない。したがって,ガス絶縁開閉装置においては装置入口の架空線 部に避雷器を設置するのが適当と考えられる。一般にガス絶縁変電 所ではしゃ断器から変圧器までの距離が短いので、入口の避雷器で 全体を保護できる場合が多いと考えられるが、距離が長く変圧器な どのように末端機器の保護が不じゅうぶんとなる場合にはその近く



^{半径比} 図23 半径比とインパルス沿面フラッシオーバ電圧比との関係



図24 リング電極をもつ絶縁棒のフラッシオーバ電圧

要である。日立製作所においてもこの種の研究が行なわれており, その成果は別稿に紹介されている。しかしながら,材料を選ぶとと もに,絶縁物を使用する個所に適した形状をとることも非常にたい せつであり,両者合わせた設計によって材料の持味もじゅうぶんに 生かせることになる。

同軸円筒配置の中心導体をささえるスペーサの形状に関しては いろいろのものが提案されている⁽¹²⁾。しかし,種々の形状を考える うえで基本となる形状としては図21(a)のつづみ形と同図(b)の そろばん球形のものがあげられる。この場合どちらの形状を選ぶか は両者の電位分布あるいは電界分布をじゅうぶんに検討したうえで 決められなければならない。平行平板電極間においても,その間に 図21のような絶縁物が介在する場合にはくさび形のガス空間に電 である。この実験では外側の円筒電極の内径を68mmに固定し,中 心導体の外径を変えて半径比を変えた。半径比を大きくすると沿面 距離は長くなるが,フラッシオーバ電圧はほどんど変化しない。一 方フラッシオーバ時の導体表面の電界強度は半径比とともに大きく なっている。このことは、中心導体を細くすることによる電界の集 中が沿面距離の伸びた効果を相殺していると考えられる。

スペーサや支持柱の絶縁耐力は、それ自身の形状のほかに、導体 との接触状態あるいは導体の取付け形状によっても左右される。導 体の形状については、たとえば図24⁽¹³⁾に示したような二つのリン グ電極では明らかにフラッシオーバ電圧に差がみられ、絶縁物と接 触している端部をおおうようないわばシールドリング形の電極のほ うがフラッシオーバ電圧が高くなる。また、導体を絶縁物でコーテ ィングするとフラッシオーバ電圧が上がるという事実から考えれ ば、電極を絶縁物中に埋込み形にするのが好結果を得られることは 直ちに理解できるであろう。しかし、この場合注意を要するのは、 電極と絶縁物との密着性である。わずかのすき間があってもそのガ ス空間(一般に低気圧)でコロナ放電を生じ、絶縁物の劣化、破壊へ とつながることがある。このようなトラブルを避けるためには、ボ イドの生じないような製作方法、構造をとることが必要である。

電極間にガスと固体と両方の絶縁物が直列にはいるようなときに は、全体の距離に対するそれぞれの部分の占める割合によってフラ ッシオーバ電圧に谷の生ずることがある。このようなことは誘電率 の違いによる分担電圧の差から考えられることであるが、この様子 を図 25 に示した。谷の位置はガス圧力の増加とともに絶縁物の割 合の大きいほうに移り、かつ谷が浅くなる傾向がみられる。

沿面フラッシオーバに対しては背後電極の有無が大きく影響す

	1111
界の集中が起こるが, 同軸円筒配置では中心導体表面近傍に電界が	る。
集中することを考え合わせれば図21(a)のスペーサでは電界的に	極が
かなりきびしいものとなる。実際に,図21(b)のようなスペーサに	電極
ついて電位分布を測定すると図22のようになり、スペーサ端部での	AC .
異常な電界集中が起こらないことがわかる。	前
同軸円筒電極の場合に,中心導体を支持する円板状絶縁物の沿面	及ぼ
耐力が電極半径比によってどのように変わるかを示したのが図23	にも
	74
	II

伯面ノブッシューバに対しては自反电極の有無が入るへ影音
る。たとえば、クラフト紙の筒の沿面フラッシオーバ電圧が背後電
極があるためにどのように低下するかを示したのが図26である。
電極間距離とともに低下の割合は増加するが、インパルスのほうが
AC よりも低下率が大きい。
前章において電極表面上の金属粉がフラッシオーバ電圧に影響を
及ぼすことを述べたが,絶縁物表面に導電性のごみが存在する場合
にも当然沿面耐力の低下を招くことになる。金属微粒子があるとフ

ラッシオーバ電圧のみならずコロナ開始電圧も低下し、それが多量 の場合にはコロナ開始電圧は清浄な場合の50%近くにも低下する ことがある。このような条件は実際に起こることはないと考えられ るが、日立製作所においては空調室防じん室を用意して清潔な環境 で製品組立を行なうようにしており、またユニット間の接続作業の ような現地作業においても内部を露出することは極力さけ乾燥空気 や窒素の流通などによってじんあいの侵入を防ぎ、万が一にも絶縁 耐力の低下をきたすことのないようにしている。

5. 結 言

本稿においてはいろいろな角度からSF6ガスの絶縁特性をながめ てきたが、ガス絶縁の利用に当たっては、絶縁媒質に対して一般的 に問題とされる水分、ごみなどの管理はもちろんのこと、SF6ガスは ある条件下では非常に特異なふるまいを示すことなどの要素をつか んで絶縁設計がなされなければならない。日立製作所においては、 このような見地から基礎的な研究と実規模装置による経験の積上げ によって信頼性のあるガス絶縁機器を開発している。しかしながら、 電気的負性ガス中での現象は非常に複雑で、必ずしもじゅうぶん解 明しつくされたとはいい得ない。問題解決のための努力は各方面で 行なわれており、ガス絶縁機器はよりいっそう合理的に設計され、 さらに信頼性のあるものとなることが期待される。 終わりに,本研究に関してご協力いただいた関係者のかたがたに 厚くお礼を申し上げる。

参考文献

- (1) J. D. Craggs & J. M. Meek: Gas Discharge and the Electricity Supply Industry, 1962, p. 338.
- (2) A. J. Ahearn & N. B. Hanny: J. Chem. Phys., 21, 119 (1953)
- (3) M. S. Bhalla & J. D. Craggs: Proc. Phys. Soc., 80, 151 (1962)
- (4) M. J. Mulcahy: IEEE paper No. 68C6-E1-91
- (5) H.C. Doepken: IEEE Paper No. 68 TP 630–PWR, Paper No. 68C6–E1–68
- (6) C. N. Works & T. W. Dakin: AIEE Trans., 72, pt. I, 682 (1953)
- (7) D. Berg & C. N. Works: AIEE Trans., 77, pt. III, 820 (1958)
- (8) P.R. Howard: Prco. IEE., 104A, 123 (1957)
- (9) 宅間,渡辺: 電研技術研究所報告 No. 68044, No. 68048 昭 43)
- (10) D. F. Binns & C. L. Dargan: Brit. J. Appl. Phys., 6, 181
 (1965)
- (11) P. Narbut et al.: Trans. AIEE., 77, 545 (1959)
- (12) 例えば, 鳥山: 電学誌 87, 1625 (1967)
- (13) K. Sieber : Elektrie, 10, 367 (1967)



- 75 -----

この考案は交流を直流に変換する整流回路において整流器へ見か け上の逆方向電流を流し,交流入力対直流出力電圧の直線性すなわ ち負荷電流の直線性を改良するものである。

Dは整流器, Cは平滑用コンデンサ, Rは負荷で交流入力端子A, Bに交流入力電圧 V_{ac} を加えると負荷Rの両端には, 直流出力電圧 V_{DC} がとり出されることは周知である。そしてその時の交流入力電 E V_{ac} 対直流出力電圧 V_{DC} による負荷電流は図2曲線aのように なり, その時の零点0と最大値Mとを結んで得られる理想特性とし ての曲線bに比べ V_{ac} 対 V_{DC} の直線性はかなり劣ることも知られ ている。

この考案は整流器Dと並列にこの整流器Dへ見かけ上の逆方向電流を流すように抵抗rとツェナーダイオードZとの直列回路を設けたもので、ツェナーダイオードZにツェナー電圧により決定される動作点F以上の電圧が加わると曲線cのように抵抗rにより定まる逆方向電流が流れ、この曲線cと前記曲線aの合成により負荷Rには曲線dのような負荷電流が得られる。

曲線 d は理想特性としての曲線 e に近似した特性になり従来例に 比較して大幅にその直線性が改良されたことになる。

この考案は以上のように整流器に見かけ上の逆方向電流を流すことにより負荷電流の直線性を改良するもので、比較的低い交流入力 電圧(たとえば10~50Vくらい)を整流する回路に適用することにより特にすぐれた直流性を発揮し計器の精度を向上しさらに入力



É

(c)

2

义

Vac

側から逆方向のサージがはいった場合でもツェナーダイオードがあるため整流器Dの破損が回避できるなどの効果がある。 (西宮)