SF₆ ガス中 接点の通電発熱による硫化皮膜生成 と通電障害への進展

正 員 堀 浩 一 (安川電機)
正 員 大 塚 正 雄 (安川電機)
正 員 原 雅 則 (九州大学)

Sulfide Layer Formation and Current Carrying Deterioration by the Joule's Heat
of Contacts in SF₆ Gas

Koichi Hori, Member, Masao Ohtsuka, Member (Yaskawa Electric Corporation),
Masanori Hara, Member (Kyushu University)

The thermal deterioration of the contacts in SF₆ gas has not been generally understood. This paper describes the sulfide formation by the direct reaction of Ag and Cu to SF₆ gas with moisture at a relatively low temperature, and the current carrying deterioration of contacts by such formation. The results are summarized as follows : 1) the thermodynamical approach shows that Ag and Cu react to SF₆ with moisture over 252°C and 165°C, respectively, and then Ag₂S and Cu₂S are produced, 2) these reaction temperatures are supported by the experiments and much sulfide is produced by higher temperature and moisture and 3) the 160-280 A current carrying tests of the Ag-WC and Cu-W contacts with high contact resistance of about 1 mΩ show that only the Cu-W contacts over the sulfide forming temperature were covered with a copper sulfide layer and therefore could not carry these currents after 55-130 hours. To examine the rise of contact resistance for the actual Ag-WC and Cu-W contacts by arc erosion, the switching tests of 200 A and 20,000 operations were also carried out and the Ag-WC and Cu-W contact resistances at 0.01 % occurrence probability were recognized to be 0.7 and 1.3 mΩ, respectively. Therefore it is concluded that the Ag-WC is sulfide reaction free but the Cu-W possibly produces copper sulfide under the above conditions.

キーワード：SF₆ガス、硫化反応、接触抵抗、通電発熱、Ag接点、Cu接点、Ag-WC接点、Cu-W接点

1、まえがき

SF₆ 開閉機器の長期通電性能を保証するためには、SF₆ ガス中での通電接点の接触抵抗の長期の特性変化を明らかにすることが必要である。SF₆ 遮断器等の通電電流の大きい場合は、通常、通電接点とアーキング接点を分離し、各々に適した接点材料を使用しているが、電磁接触器や通電電流の小さい開閉機器の場合は、通電接点とアーキング接点を共通化することが一般的であり、この場合、接点は耐アーク消耗と通電の両性能が必要となる。いずれの場合も、通電中の接点は接触抵抗によるジュール熱のため、開閉機器の構成部材の中では定常的に最も高温になっており、長期間に亘っての発熱による劣化が心配されるところである。とりわけ、アーキング接点と共用する場合は、

耐アーク消耗の面からタングステン (W) 系の材料との複合接点を使用する必要がある、アーク消耗に基づく接触抵抗の上昇は避けられず、通電温度上昇も高くなり、通電専用接点に比べ使用条件は苛酷である。

SF₆ ガスは単独ではかなり高温まで安定であるにもかかわらず、金属との接触状態では、ガス中に微量存在する水分によって比較的低温でも熱分解することはよく知られている。広岡ら⁽¹⁾によれば、250°CでのSF₆熱分解に伴う生成SO₂量は珪素鋼>銅>黄銅>鋼>アルミニウム=亜鉛メッキ鋼=ステンレス鋼の順であり、Chuら⁽²⁾は200°CではSF₆は銅、珪素鋼、軟鋼で熱分解するが、アルミニウムの場合250°Cからしか熱分解は認められないことを報告している。また、向山ら⁽³⁾によれば400°CでのSF₆熱分解による生成物としてのF⁻生成量は珪素鋼>鉄>銅

の順であった。しかしながら、これらには金属材料の種類として銅は含むものの、構造材料によるSF₆ガス分解を主としているため、接点材料として多用されている銀は含まれていない。また、SF₆分解量に着目しているため、金属材料自体の劣化や生成皮膜についてはほとんど明らかにされていないし、SF₆熱分解開始温度についての検討もなされていない。とりわけ、定常的に最も高温となっている接点材料を対象とした、SF₆熱分解に伴う接点劣化による接触信頼性についての研究は、筆者らの知るかぎり皆無である。なお、SF₆開閉機器では通常吸着剤を封入して、SF₆分解ガスと共に水分を吸着除去しているが、数100ppm程度の水分の共存は避けられない。

本論文はまず、銀 (Ag)、銅 (Cu) 単体および Ag系、Cu系の複合接点について、高温時に水分共存下でSF₆ガスとの化学反応により、硫化皮膜が生成することを実験で明らかにし、さらに理論的な検討を加えてSF₆の熱分解開始温度を与える新たな硫化モデルを提案した。次いで、高接触抵抗時には通電発熱によって想定通りに硫化物が生成され、通電障害へと発展することをモデル実験で明らかにした。また、アーキング接点と通電接点を共用しているSF₆開閉機器に使用されるCu系、Ag系の複合接点について、負荷電流開閉時の接触抵抗特性を負荷電流開閉実験によって明らかにし、通電発熱による硫化皮膜生成の可能性を検討した。

2. SF₆ガス中での接点材料の高温硫化反応

〈2.1〉 実験方法 SF₆ガス中では、一般に通電接点としてはAg、アーキング接点としてはCu-Wが広く使われているが、ここではさらにCuとAg-WC (WC: タングステンカーバイド) を加え、Ag、Cuの単体金属と複合材料であるAg-WC、Cu-Wの4種類について、高温時の硫化反応を水分量をパラメータとして実験的に求めた。

広岡ら⁽¹⁾によれば、SF₆ガスは、Cuを含む種々の金属との共存下で150~200℃から水分と反応して分解しはじめ、SO₂を生じることを明らかにしている。また、接点の接触抵抗に大きく影響する材料の軟化温度は、Agが180℃、Cuが190℃であること、さらにAg-WC、Cu-Wも分散混合組成であるので、母材のAgやCuの軟化温度がそのまま影響を及ぼすことから、この近辺の温度での硫化反応をみるため、実験は150、200、250℃の3水準を選定し、加熱時間は600hとした。硫化反応に大きく影響すると思われる水分条件は100ppm (実験前で100ppm以下、実験後は容器内壁、試料受け皿の吸着水分放出のため130~370ppm) と5000ppmの2水準に設定した。

実験容器は当初、SUS304を使用したところ、水分100ppm、150℃、200~800hでSF₆ガスと反応して容器内表面が淡黒色となり、X線回折よりFeF₂が同定されたことから、容器内表面に耐蝕性皮膜をコーティングすることとし、テフロンコーティングと金メッキについて評価した。250℃、300hの評価実験の結果、金メッキはメッキ処理の信頼性

表1 供試接点材料

Table 1. Test Samples of Contact Material

接点	組成 (wt%)	寸法 (mm)
Ag	Ag 99.99 (メーカ分析値)	15×20×3
Ag-WC	Ag 67.7, WC 32.0, Fe, Ni, Co 0.1以下	15×20×3
Cu	Cu 99.96 (無酸素銅, JIS規格値)	15×20×4.5
Cu-W	Cu 50.7, W 47.6, Ag 1.7	15×20×3

もあるが剥離、変色を生じた。一方、Ni-Cr 50μmの下地溶射後70μmのテフロンコーティングしたものが剥離、変色もなく良好であったので、以後の実験はこのテフロンコーティング容器を採用した。また、ガスケットもテフロンコーティングのSUS 304製、試料受け皿もテフロン製を使用した。バルブのみはSUS製である。容器内容積は1ℓであり、試料をセットした後、ロータリポンプで排気しながら80℃、16hベーキングを行い、その後、あらかじめ10ℓの別容器で水分調整したSF₆ガスを0.3MPa封入している。実験は恒温槽内に容器毎に入れて所定の温度、時間放置するが、実験前後にガスクロマトグラフによるガス分析および試料の重量測定を行なうとともに、実験後に試料の表面分析をXMA (X線マイクロアナライザー) とX線回折で行なっている。

供試接点材料を表1に示すが、各試料は実験前にSiC研磨紙#80 (粒径約200μm) で研磨し、フレオンTFで洗浄後、乾燥封入している。同一条件での試料数は各3個づつとし、同一容器内に3個同時にセットしている。

〈2.2〉 実験結果 図1に硫化実験後の封入ガス分析

図1 硫化実験後のガスクロマトグラフ分析例 (水分 5000ppm)

Fig.1. Gaschromatograph Chart after Sulfuration Experiment (Moisture 5000ppm)

表2 硫化実験前後のガス成分変化 (ガスクロマトグラフ定量分析による)
Table 2. Gas Contents before and after Sulfuration Experiment (by Gaschromatograph Analysis)

接点	温度 (°C)	水分 100 ppm						水分 5000 ppm					
		N ₂ (%)		O ₂ (%)		SO ₂ (%)		N ₂ (%)		O ₂ (%)		SO ₂ (%)	
		実験前	実験後	実験前	実験後	実験前	実験後	実験前	実験後	実験前	実験後	実験前	実験後
Ag	150	0.03	0.03	< 0.01	< 0.01	—	—	0.03	0.02	0.01	< 0.01	—	—
	200	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	—	—	0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	—	—
	250	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	—	0.19	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	—	0.23
Ag-WC	150	0.02	0.02	< 0.01	< 0.01	—	—	0.08	0.03	0.02	< 0.01	—	—
	200	0.04	0.04	< 0.01	< 0.01	—	—	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	—	—
	250	0.03	0.03	< 0.01	< 0.01	—	0.25	0.04	0.03	< 0.01	< 0.01	—	0.27
Cu	150	0.08	0.07	0.02	< 0.01	—	—	0.02	0.03	< 0.01	< 0.01	—	—
	200	0.07	0.05	0.02	< 0.01	—	—	0.02	0.03	< 0.01	< 0.01	—	—
	250	0.05	0.05	0.01	< 0.01	—	0.09	0.03	0.03	< 0.01	< 0.01	—	0.18
Cu-W	150	0.06	0.05	0.02	< 0.01	—	—	0.04	0.05	< 0.01	< 0.01	—	—
	200	0.10	0.06	0.02	< 0.01	—	0.10	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	—	—
	250	0.06	0.06	0.01	< 0.01	—	0.11	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	—	0.22

— : 検出できず

結果の代表例を示す。表2は硫化実験前後の封入ガス中のSF₆以外のガス成分変化をまとめたものである。N₂、O₂はSF₆封入時に混入した空気によるものであるが、実験前後で大きな変化は見られない。一方、SO₂は硫化実験によって生成したもので、150℃では全試料とも発生していないが、200℃ではCu-Wのみ発生が見られ、250℃では全試料とも発生している。水分の影響はAg系接点よりCu系接点の方が大きい、SO₂の発生量は250℃で水分100、5000ppmともAg系接点の方が多いたことが分かった。また、参考のため、試料接点を入れずに行なった実験でも、水分100ppm、250℃で僅かなSO₂が検出されており、バルブや容器材料によるSF₆ガスの熱分解が生じたものと思

われる。これらの結果は、広岡ら⁽¹⁾によるSO₂が発生するSF₆の熱分解開始温度とほぼ一致している。

図2に水分5000ppmの場合の供試接点写真を示す。Ag系に比べCu系接点の方が変色が濃く、SF₆ガスとの反応も進んでいることがうかがえる。表3に、XMAによる標準試料なしZAF補正(原子番号、吸収、蛍光励起補正)による接点表面のS元素の定量分析結果を示すが、その他の元素は材料成分以外には検出できず接点表面の生成物は硫化物のみであった。さらに、これら硫化物の同定をX線回折で行なった結果、図3に示すようにAg₂SとCu₂Sであることが確認された。Ag-WC、Cu-Wの場合もAg₂SとCu₂Sのみが同定されており、W硫化物は同定されな

図2 硫化実験後の接点写真 (水分 5000ppm)

Fig.2. Photographs of Contacts after Sulfuration Experiment (Moisture 5000ppm)

表3 接点表面のS元素分析結果(XMA)

Table 3. Amounts of Sulfur on Contact Surfaces by X-Ray Microanalyzer

接点	水分 100 ppm			水分 5000 ppm		
	150℃	200℃	250℃	150℃	200℃	250℃
Ag	0	0	0.4	0	0	4.0
Ag-WC	0	0	0	0	0	2.1
Cu	0	0.2	1.0	0	0.6	5.9
Cu-W	0	0	0	0	0.1	7.5

(定量法で求めたSの量: wt%)

表4 接点重量変化(水分 5000ppm)

Table 4. Contact Weight Variation (Moisture 5000ppm)

接点	温度 (℃)	重量変化 (mg)	推定膜厚 (μm)	接点	温度 (℃)	重量変化 (mg)	推定膜厚 (μm)
Ag	150	—	—	Cu	150	—	—
	200	—	—		200	—	—
	250	0.16	0.3		250	0.52	0.7
Ag-WC	150	—	—	Cu-W	150	—	—
	200	—	—		200	0.14	0.2
	250	0.17	0.4		250	0.45	0.8

った。

なお、硫化物生成による接点の重量変化は、測定精度が $3\sigma=0.12\text{mg}$ であることからこれ以下の微量変化は測定できず、表4のごとく水分 5000ppm、250℃全試料と200℃のCu-Wの場合のみ重量増加が認められた。重量増加が均一なAg₂S、Cu₂S皮膜と仮定したときの計算値が表中の推定膜厚である。

接点表面の硫化物生成量では、SO₂の発生とは逆にCu系接点の方が多く、また、硫化物生成温度もAg系250℃に比べ、Cu系接点は200℃とより低い温度から硫化皮膜が生成することが判明した。

〈2.3〉 硫化物生成機構の検討 広岡ら⁽¹⁾はSF₆ガスと水分は、金属の触媒作用により150~200℃で(1)式の熱分解反応によりSO₂を生成するとしており、このSO₂が金属と反応し、結果として硫化物が生成することは十分考えられる。

しかしながら、前節の実験結果より、SO₂が発生していない200℃のCuの場合でもCu₂Sが生成していることや、SO₂濃度と硫化物生成量の間に相関関係が見られないことから、(1)式以外に、SF₆と接点母材金属であるAg、Cuが、水分の共存下で直接熱分解反応して硫化物を生成していると考えの方が妥当と思われる。

Ag、Cuの直接反応として次の(2)、(3)式を考え、各々の反応の開始温度を熱力学的に検討することとする。

(2)、(3)の反応が成立するためには生成自由エネルギー ΔG

図3 硫化実験後の接点表面X線回折例(水分 5000ppm)

Fig. 3. X-Ray Diffraction Chart on Contact Surface after Sulfuration Experiment (Moisture 5000ppm)

が負になることが必要である。ここで生成自由エネルギー ΔG は次式で表される。

$$\Delta G = \Delta H^\circ_{298} - T \cdot S^\circ_{298} \quad (4)$$

ここに、 ΔH°_{298} : 標準状態、298°Kにおける生成熱 (cal/mol)

S°_{298} : 標準状態、298°Kにおけるエントロピ (cal/mol·deg)

T : 温度 (°K)

SF₆、HF、O₂ とH₂O、Ag₂S、Cu₂S、Ag、Cuの ΔH°_{298} と S°_{298} を文献 (4)、(5)からそれぞれ求め、(2)、(3)式に代入すると、

$$\text{Agの場合 } \Delta G = 69,000 - 131.4 \times T (\text{cal/mol}) \quad (5)$$

$$\text{Cuの場合 } \Delta G = 57,000 - 130.1 \times T (\text{cal/mol}) \quad (6)$$

となり、 ΔG が負になる温度は (5)、(6)よりAgの場合は525°K (252℃)以上、Cuの場合は438°K (165℃)以上となる。

また、水分がない場合のSF₆とAg、Cuの直接反応は同様な検討をすると、 ΔG が負になる温度はそれぞれ3176°Kと3088°K以上になり、本実験の温度範囲ではこれらの直接反応は考えられない。

以上の検討結果からみると、Cuの場合は(3)式の直接反応が生じたとすると実験結果をよく説明できる。しかし、Agの場合、(2)式の直接反応が252℃から生じるのに対し、実験結果では250℃でも硫化物の生成が認められているが算出データの精度や実験精度を勘案すると、理論との一致を一応みたと考えてもよからう。しかし、一方では(1)式

で発生したSO₂ガスによる硫化でAg₂Sが生じたと考えることもできる。何れにしてもAgの場合、250℃程度以上で硫化が生じることは間違いない。

ここで(1)式、もしくは(2)(3)式いずれの反応が生じた場合でもO₂ガスが生成するはずであるが、表2のガス分析結果では実験前後でO₂濃度は変化していない。この原因としては、O₂が容器壁へ吸着されているか、試料等の酸化反応で消費されている可能性が大きいが不明である。

なお、接点の接触抵抗は接触点の面積で決まるが、接点材料が軟化温度以上になると接触圧力により接触面積が増えるため、接触抵抗は小さくなり、温度が下がり安定してくる。このため接点材料の軟化温度と硫化開始温度の関係は重要である。Agの場合は軟化温度180℃に対し硫化開始温度は理論検討の結果252℃、一方Cuは軟化温度190℃に対して硫化開始温度は165℃、と筆者らの検討結果では硫化開始温度の方が低い。このためCuは軟化で接触抵抗が下がる前に硫化が始まることになり、注意が必要である。

3、高接触抵抗時の通電特性

前述の高温硫化反応が、実際に通電中の接点で生じるかどうか、また、生じた場合最終的にどうなるのかを調べるために、Ag-WC (70:30wt%)とCu-W接点 (50:50wt%)の接触面を、表5に示す接点表面処理条件で表面処理し、WCおよびW過多層を残して高接触抵抗部を作り、通電実験を行なった。Ag-WCとCu-Wの接触抵抗は未処理品では各々0.2mΩと0.45mΩ程度であることを、この表面処理によって、表5の初期接触抵抗値に示すように1mΩ前後まで高めている。実験では、高接触抵抗を保つために接触圧力を低めにし、衝撃を与えぬよう細心の注意を払って接触させている。

これらの接点条件で200A通電したとき接触点の温度が硫化開始温度以上になっているかどうかは、実測が困難なため、あらかじめ1mΩ、200A通電の条件で接触点温度上昇を理論式により推定してみた。

接点の接触点の温度上昇は、通電電流にかかわらず接点間の電圧で決まる⁽⁶⁾が、本実験で用いたWCまたはW過多層から成る高接触部を金属接触と見做すか、皮膜接触と見做すかによって接触点温度は変わってくる。ここでは両者について検討するが、金属接触の場合の理論式を皮膜がある場合にまで拡張したものがHöft⁽⁷⁾によって示され、土屋ら⁽⁸⁾が実験的に裏付けている。これによると、接触点の温度上昇(定常値) θ (°K)は次式で表され、金属接触の場合より温度上昇が低くなることが示されている。

$$\theta = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{U_K^2}{4\gamma_\infty} Y_A + \left(\frac{\gamma_0 T_0}{\gamma_\infty} \right)^2} + \sqrt{\frac{U_K^2}{4\gamma_\infty} Y_K + \left(\frac{\gamma_0 T_0}{\gamma_\infty} \right)^2} \right] - \frac{\gamma_0 T_0}{\gamma_\infty} \quad (7)$$

$$Y_A = 1 + \frac{1}{n^2} - \frac{2}{n^3} \quad (8)$$

$$Y_K = 1 - \frac{3}{n^2} + \frac{2}{n^3} \quad (9)$$

ここに、 U_K : 接点間電圧(V)、 T_0 : 周囲温度(°K)、 γ_0 : T_0 (°K)におけるLorenz定数、 γ_∞ : 高温におけるLorenz定数、 Y_A , Y_K は陽極、陰極での皮膜のKohler効果による温度のずれを示す係数であり、 n は[接点間電圧]/[皮膜にかかる電圧]である。

台金部温度(周囲温度)は実測によればほぼ80℃、接点間電圧は200mV(1mΩ×200A)である。 γ_∞ および γ_0/γ_∞ はそれぞれ 3.5×10^{-8} (V²/°K²)、0.8とした⁽⁷⁾。実験で用いた高接触抵抗部を純金属接触と見做した場合の接触部温度上昇は、 n が無限大になるので、材料にかかわらず一定の320℃となり、台金部温度を加えて接触部温度はAg-WC、Cu-Wとも400℃となる。一方、同じ高接触抵抗部を皮膜と見做せば、接触点の温度上昇は、Ag-WCとCu-Wの n の差によって、Ag-WCは140℃程度、Cu-Wでは240℃程度となり、台金部温度を加えるとAg-WC接点の接触部の温度は220℃、Cu-W接点では320℃となる。すなわち、Ag-WC接点の場合は高接触抵抗部を皮膜と見做せば硫化開始温度252℃には達していない可能性があるが、Cu-W接点では金属接触、皮膜接触のいずれと見做しても硫化開始温度165℃よりかなり高い温度になっていると推定される。

供試接点条件を表5に示すが、実験中接点は閉じたままであり、接触抵抗測定は回路を直流に切り替えDC 200Aを20秒間通電し接点間電圧を測ることにより求めた。通電電流は200/10V、5kVAトランスの1次電圧調整によって整定した。

実験結果を図4に示すが、Cu-W接点のNo.1、No.3試料では、それぞれ160Aと280A通電時に急激に接触抵抗が上昇し、130hと55hで通電不能となった。通電不能となった接点の表面には、XMAによる分析の結果、図5に示すNo.1試料の例のようにCu、S元素リッチ層が形成され

表5 供試接点条件
Table 5. Specification of Test Contacts

	Ag-WC (70:30 wt%)	Cu-W (50:50 wt%)
接点寸法	15×20×3mm	Cu台金に銀口一付け
接触圧力	4 kgf	
接点表面処理条件	NaCN(90g/l)+NaOH(15g/l)水溶液中にて100mA/cm ² , 20分間電解研磨	表面研磨後HNO ₃ 50%水溶液中30秒エッチング
膜厚	約40μm	—
ガス圧力	0.3 MPa	
実験器内容積	14 l	
水分条件	水分10ccを吸着した活性アルミナ700gを封入。初期ガス中水分量200ppm(室温)。但し、通電温度上昇によって増加する。	
初期接触抵抗値(DC200A)	No.1:0.85mΩ(200A通電) No.2:1.15mΩ(200A通電)	No.1:0.90mΩ(160A通電) No.2:0.80mΩ(200A通電) No.3:0.95mΩ(280A通電)

図4 高接触抵抗接点の通電実験結果

Fig. 4. Current Carrying Test for High Contact Resistance Contacts

図5 通電不能Cu-W接点のXMA断面写真

Fig. 5. Photographs of XMA Microsection of Cu-W Contact with Current Carrying Deterioration

ており、さらにX線回折によってCu₂Sが同定されている。これよりCu-Wの場合は、通電発熱のため接触点近傍の温度が硫化開始温度以上になることによってCu₂S皮膜が生成、成長し、このため接触抵抗が上昇していき通電不能に至ったものと推察される。

一方、Cu-W No. 2 試料は徐々に接触抵抗が下がり 0.6 mΩ レベルで安定している。500 h 経過後の表面分析でS元素が検出されていないことから、本試料は硫化反応は生じていない。この理由としては、機械的な振動等で高接触抵抗部が破壊され接触抵抗が低めに落ちていたためCuの硫化開始温度 165℃以下になってしまったと考えられる。また、Ag-WC接点は2例とも接触抵抗が高いなりに安定しているが、実験後の表面分析でS元素が検出されていないことから、接触点温度はAgの硫化開始温度 252℃以上にはなっていないものと思われる。

以上の実験結果から、Cu-Wの場合、何らかの原因でいったん接触抵抗が高くなりだすと通電発熱が増し、その結果ガス封入容器の温度上昇をもたらすことから吸着剤に吸着されていた水分が解放され、ガス中水分量が増加し硫化が急速に進むというメカニズムが推測される。Ag-WCの

場合は、本実験条件ではまだ硫化開始温度に達していないと考えられる。

複合接点ではなくAg、Cu単体接点の場合でも、異物かみ込み等何らかの原因で接触抵抗が上がり硫化開始温度以上になれば、硫化物の生成→接触抵抗の更なる上昇→温度上昇→ガス中水分増加→硫化の促進 が起り、最終的には通電不能に陥るか発弧して接点溶着に至るものと思われる。

4. アーク消耗時のAg-WC、Cu-W複合接点の接触抵抗特性

アーキング接点と通電接点を共用する場合に使用されるAg-WCやCu-W等の複合接点は開閉アークによって接点表面が消耗し、多数回の負荷開閉に伴い接触抵抗が高くなる。この時の接触抵抗特性が分かれば、接触点の温度上昇を前述の如く推定することにより、SF₆ガス中での硫化反応による通電障害の可能性を知ることができる。

図6に示すバット接触構造の供試器を用い、Ag-WCとCu-W接点の負荷電流開閉実験を行って、それら接点の接触抵抗特性を明らかにした。供試器条件と実験回路条件を表6に示す。Ag-WCとCu-W接点チップは図中の固定接点と可動接点の先端部に銀ロー付けされており、実験は同一接点材料どうしの組合せで行なった。なお、可動接点側

図6 供試器の構造

Fig. 6. Structure of test switch.

表6 負荷電流開閉実験仕様

Table 6. Experimental Specification of Load Current Switching

供試器条件	実験回路条件
接点チップ : 15×20×3 mm	電源 : AC 60Hz 330V 単相
接触深さ : 10 mm	負荷電流 : 200A L 負荷
接触圧力 : 6 kgf	開閉頻度 : 1回/20 s
開閉速度 : 1 m/s	通電率 : 80%
アーク駆動磁界 : 60 mT _{レ-ク}	開閉回数 : 2 万回
実験器内容積 : 14 ℓ	接触抵抗測定 : 通電途中
封入ガス圧力 : 0.3 MPa	9秒間 DC200A回路に切
吸着剤(活性炭): 700 g	替え電圧降下法で測定

図7 負荷電流開閉時の接触抵抗回数特性例
Fig.7. Contact Resistance Characteristics for Load Current Switching Operations

図8 接触抵抗の累積発生確率
Fig.8. Cumulative Frequency of Contact Resistances

に直列接続されたブローコイルによる軸方向磁界によって、アークは固定接点を中心に回転駆動される。接点材料は表1に示したものをを用いたが、接点消耗に影響するWCとWの平均粒径は約 $1\mu\text{m}$ である。接触抵抗の測定は、図示していないが固定接点と可動接点の台金部から電圧測定用リード線を出して接点間電圧を測り求めている。測定された接触抵抗データはA/Dコンバータでデジタル変換後パソコンで自動処理している。

図7に開閉回数-接触抵抗特性の時系列データの1部を、また図8には2万回データから求めた接触抵抗の累積発生

図9 負荷開閉実験後の接点の断面写真
Fig.9. Photographs of Microsection of Contacts after Load Current Switching Tests

確率を示す。図8より、0.01%発生確率の接触抵抗値を求めるとAg-WCは $0.7\text{ m}\Omega$ であり、Cu-Wの $1.3\text{ m}\Omega$ に比べ低く安定している。これを前節の結果と照らし合わせると、Ag-WCは200A通電で硫化の恐れが全くないのに対し、Cu-Wは本条件で使用する限り、連続通電中に硫化する可能性が高く、接点構造を接触抵抗が低くなるように改良する必要がある。Ag-WCとCu-Wの実験後のXMAによる表面写真を図9に示す。Cu-Wの場合は表面にWリッチ層ができ接触抵抗が高くなるのに対し、Ag-WCではWCが飛びAgリッチ層が残ることが接触抵抗を低くしている原因である。

5. むすび

本論文では、SF₆ガス開閉機器の接点材料として多用

されているAgやCuが、SF₆ガス中の微量水分によって比較的低温で硫化反応することを実験的、理論的に検討した。また、アーキング接点と通電接点を共用する時に使用される複合接点であるAg-WCやCu-Wについて、高接触抵抗時の通電発熱による硫化を実験的に調べるとともに、実際に負荷電流開閉試験を行ってアーク消耗による接触抵抗の上昇度合いを統計的に明らかにし、通電発熱による硫化皮膜生成の可能性を推定した。得られた結果を要約すると、次のようである。

(1) SF₆ガス中では微量水分の存在によって、Agは252℃以上、Cuは165℃以上で、下式に示す直接反応が生じ、Ag₂SやCu₂Sが生成されると考えられる。

(2) SF₆ガス中の水分量と温度を変えて硫化発生の有無を実験的に確認した結果、Cuは150℃で硫化せず200℃でCu₂Sが認められ、上記(1)で得られた硫化開始温度165℃が裏付けられた。一方、Agの方は理論的な反応開始温度252℃に対し、250℃でAg₂Sが生成したが、数値誤差を考慮すれば理論との一致を一応みたといえる。

(3) 高接触抵抗処理したAg-WCとCu-Wによる200A近傍の通電実験の結果、接触点の温度が硫化開始温度以上になったと推定されるCu-Wの2例で、Cu₂S皮膜の生成による接触抵抗増加のために55hと130hで通電不能が発生し、実接点の通電発熱に基づく硫化によるSF₆中接点劣化現象が明らかになった。

(4) アーキング接点と通電接点を共用しているAg-WC(70:30wt%)とCu-W(50:50wt%)接点による200A、2万回の負荷開閉実験を行った結果、0.01%の確率で発生する接触抵抗値はそれぞれ0.7 mΩと1.3 mΩになった。この結果バット接触で通電接点とアーキング接点を共用する場合、200A程度の負荷開閉に対して、Ag-WCは通電による硫化皮膜発生の恐れは全くないが、Cu-Wではジュール熱による硫化皮膜生成に基づく通電劣化が生じる可能性があることが分かった。

これらの結果より、SF₆ガス中接点の硫化による通電劣化現象が明確になり、Cu系およびAg系接点の使い分けや適用方法等をガス開閉機器の接点設計に反映させることが可能となった。

最後に、本研究を遂行するに当たり御支援を賜った(株)安川電機基礎研究所、押山所長をはじめ、種々御助力頂いた同研究所各位に深甚の謝意を表します。

(平成7年8月24日受付、同7年12月25日再受付)

文 献

- (1) 広岡紘一・白井満：「六フッ化硫黄の熱的特性」、日本化学会誌、No. 2、165～169、(1980)
- (2) F. Y. Chu: "SF₆ Decomposition In Gas-Insulated Equipment", IEEE Trans. Elect. Insulation, vol. EI-21, 693, (1986)
- (3) 向山翼 他：「ガス絶縁変圧器の各種内部異常による主要な分解生成物」、電学論B、vol. 111, No. 12、1335～1342、(平成 3)
- (4) 伊. 八. 加. 他：「無機ふっ化物の主要性質便覧」、日ソ通信社、(昭 54)
- (5) (社) 日本金属学会編：「金属データブック」、丸善、(昭 49)
- (6) K. Holm: "Electric Contacts", Springer-Verlag, Fourth Edition, p60, (1981)
- (7) H. Höft: "Die Übertemperatur an elektrischen Kontakten mit Fremdschicht", Wissenschaftliche Z. Hochschule f. Elektrotech Ilmenau 12, 2, (1967)
- (8) 土屋金弥・玉井輝雄：「接点表面に皮膜がある場合の接触部温度の評価について」、信学技報、EMC 69-33、(昭 45)

堀 浩一 (正員) 1941年12月15日生まれ。64年3月九州大学電子工学科卒業。同年(株)安川電機入社。同社研究所においてガス開閉機器、配電用光センサの研究開発に従事。89年より電力開発室にて配電用制御機器の開発に従事。94年より基礎研究所にて電力技術の研究に従事。95年 4月より九州大学社会人博士後期課程。電子情報通信学会会員。

大塚 正雄 (正員) 1944年7月5日生まれ。71年3月九州工業大学大学院修士課程修了。同年(株)安川電機研究所入所。同所にてパワーリードスイッチ、ガス開閉機器の研究開発に従事。85年より光ファイバセンサ、配電用光センサの研究開発に従事、現在に至る。電子情報通信学会会員。

原 雅則 (正員) 1942年 4月13日生まれ。1972年 3月九州大学大学院工学研究科博士課程修了。同年4月九州工業大学講師、73年3月同助教授。75年 4月九州大学工学部助教授、86年 6月同教授。工学博士。主として、高電圧工学、放電工学、大気環境工学、超電導工学、バイオ工学に関する研究に従事。80年電気学会論文賞、82年静電気学会論文賞。IEEE Senior、低温工学協会、静電気学会会員。