SF₆ ガス中 Cu-W 接点の負荷電流域における アーク消耗特性

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)

Arc Erosion Characteristics of Cu-W Contact at Load Current Range in SF₆ Gas
Koichi Hori, Member, Masao Ohtsuka, Member (Yaskawa Electric Corporation),
Masanori Hara, Member (Kyushu University)

In order to develop SF₆ gas-insulated switches with long service life and high reliability for medium voltage ratings, it is necessary to decrease arc erosion of contacts in SF₆ gas. In this paper the effects of SF₆ gas pressure and magnetic field for arc blow-out on the erosion were studied experimentally in detail using sintered Cu-W contacts. The test current, SF₆ pressure and magnetic field were 100 to 400 A, 0.1 to 0.6 MPa and 0 to 50 mT, respectively. The results show that the arc erosion rate increased linearly with the SF₆ pressure and the magnetic field was effective for the reduction of anode erosion (i.e. the application of a mere 50mT lowered the erosion rate to 1/3 to 1/4). These phenomena may be attributed respectively to the increase of the evaporation rate according to the shrinkage of arcing spot areas by the SF₆ pressure and the decrease of the evaporation rate according to high speed movement of the arcing spot on the anode by the magnetic field. But the cathode erosion was insensitive to the magnetic field. The influence of W grain size and composition ratio of Cu to W on the erosion rate was also studied and the smaller W grain at Cu content of 50 to 70 wt % was found to be best for the suppression of erosion under the present test conditions. Furthermore the increase of N₂ mixture ratio to SF₆ under constant total gas pressure greatly decreased the contact erosion.

キーワード：SF₆ガス、Cu-W接点、アーク消耗、陽極、陰極、磁気ブロー

1、まえがき

SF₆ ガス開閉機器のアーキング接点としてはその優れた性能から、銅とタングステンの複合材料であるCu-W接点が多用されている。従来、ガス遮断器を対象にしたkA級以上の大電流域におけるCu-W接点のアーク消耗については、Gessinger氏等⁽¹⁾やKaminski氏⁽²⁾の報告があり、電流特性では、藤原氏⁽³⁾、Labrenz氏⁽⁴⁾やCheng氏等⁽⁵⁾の報告が知られている。しかし、高圧ガス電磁接触器等で重要な数百A以下の負荷電流域を対象に、材料特性から、ガス圧力や磁気ブロー等の機器条件に至るまで、SF₆ ガス中アーク消耗特性を系統的に調べた例はないようである。

この負荷電流域では、高圧電動機用をはじめ開閉頻度の高い用途が多く、数10万回もの開閉寿命が必要となる場合があり、遮断器に比べて電流は小さいものの極めて苛酷な

使用条件となっている。一般に、ガス開閉機器の電流開閉寿命を決める要因としては、接点のアーク消耗と、これに伴う封入ガス消耗(SF₆の分解消耗)の二つが考えられるが、ガス消耗量は接点消耗量にほぼ比例し⁽⁶⁾、また、封入ガス量は、予め消耗分や漏れ分を見越して余分に封入することができることから、ガス消耗に対する対応は容易である。一方、接点体積を増やすことは実用上難しく、結局、接点消耗が開閉寿命を決めることになり、高圧ガス電磁接触器をはじめ長寿命のガス開閉機器を実現するには、接点材料、機器条件の両面からそのアーク消耗特性を明らかにし、最適な条件を決めることが極めて重要である。

以上の観点から、本論文は、高圧電磁接触器の定格として最も一般的な200Aの電流を主体として、Cu-Wのバット接触接点構成を用い、接点材料組成やガス圧力、磁気ブロー等の機器条件に対する、SF₆ ガス中アーク消耗特性

図1 実験回路
Fig.1. Experimental Setup.

図2 試験電流、電圧波形 (磁気ブロー 50mT_{peak})
Fig.2. Test current and voltage waveforms.
(with magnetic blow-out 50mT_{peak})

とその消耗機構を明らかにしたものである。

2、実験方法

図1に実験回路を示す。アークによる接点消耗量は、接点体積が一定であれば、アーク時間内に通過する電流の波高値とクーロン量によって影響を受けるので、実験はコンデンサ共振放電回路を用い、供試器の接点の開極直前の動きを検出して、サイリスタを始動させることにより、接点の動きに同期した正弦波半波電流を発生させて、試験条件を一定にした。コンデンサの充電電圧は 1000V、電流値は実効値で 200A、振動周波数は 52Hz に設定した。図2に電流とアーク電圧波形を示す。アーク電圧は、図3の負荷側端子とブローコイル-可とう電線接続部間の電圧を測定し、導体部抵抗による電位降下は 1V 以下である。接点の開極は、アーク時間をできるだけ長く取れ、開極バラツキの影響が小さくなるよう、電流の流れ始めから 1.2ms に設定した。この条件での 1 回当りのアーク電流クーロン量は正弦波を仮定すると 1.65C である。以降の接点消耗量表示の $\mu\text{g}/\text{C}$ はこの値を用いている。なお、開極バラツキの標準偏差は 0.03ms であった。また、波形写真からも

図3 供試器の構造
Fig.3. Structure of test switch.

分かるように、電流零点直前にはアーク電圧が上昇し電流波形が若干変歪するが、その影響の強くでる磁気ブローありの場合でも、正弦波を仮定した場合のクーロン量より 2% 程度の減少に過ぎず、大きな影響はない。

図3に供試器の構造を示す。供試接点は 20mm×15mm×3mm 厚を用い、Cu 台金に銀ロウ付けしている。接点の接触深さは 2mm、接触圧力は 4kg、開極速度は 1m/s 一定、開極距離は 20mm である。また、固定接点を中心に円筒電極を配置し、磁気ブローありの場合はその外側にブローコイルを巻いて回路電流を直列に流し、円筒電極の軸方向に磁界を発生させて、アークを円周方向に駆動している。このとき、コイル内側円筒電極の二次誘起電流のため磁界は電流に対して 45度の遅れを生じており、電流位相 135度のとき磁界はピークとなる。磁気ブローありの場合の磁束密度ピーク値は、ブローコイルの巻数を調整することによって発弧部 (ブローコイル中心部) で、10mT から 50mT の範囲に設定した。この磁気ブローにより、可動接点側アークは、消弧直前に円筒電極に移行する場合があります。可動接点側のアーク消耗量が減少することが考えられるので、ガス圧力 0.1と0.6MPa、磁気ブロー 50mT、4千回開閉の条件で、固定接点と可動接点の極性を入れ変えて実験し、両接点の消耗量を測定した。その結果、同一極性であれば固定接点側でも可動接点側でも消耗量は変わらず、円筒電極へのアーク移行の影響は無視できることが確認できた。

複合材料である Cu-W 接点の場合、アーク遮断を繰り返すうちに低沸点の Cu が蒸発し、接点表面が W 過多になるため、初期状態と回数が進んだ状態では消耗形態が異なってくるので遮断回数はできるだけ多い方が望ましい。図4に遮断回数と接点消耗量の関係を示すが、2千回以上ではほぼ比例しており、消耗形態も安定していると考え、以降の実験は4千回の遮断回数に統一した。図5に4千回遮断後の接点表面組成例を示す。なお、遮断頻度は 400回/時とした。

接点材料は特に説明のない限り、平均W粒径 $1\mu\text{m}$ で組成が Cu 50 wt%、W 50 wt%の粉末焼結法によるCu-W接点を用いた。また、接点消耗量は、実験前後の可動、固定両接点の合金込みの重量測定より求めた。

図4 遮断回数と接点消耗量

Fig.4. Relation between number of switching operations and contact erosion.

図5 4千回遮断後の接点表面部断面写真 (走査電子顕微鏡反射電子像)

Fig.5. Microsection on the contact surface after 4000 switching operations. (SEM Image)

3、機器条件の影響

〈3・1〉 SF_6 ガス圧力特性 SF_6 開閉機器の封入ガス圧力は、通常、絶縁や遮断性能で決まるが、 SF_6 分解ガスの吸着除去による圧力減少や、ガスリークによる圧力減少を見込んで、高めに設定する必要がある。そのためには、アークによる SF_6 ガス分解量を知る必要があるが、ガス分解量はほぼ接点消耗によって決まる⁽⁶⁾ので、封入ガス圧力に対する接点消耗特性を明らかにすることは実用的にも重要である。

図6に封入ガス圧力と接点消耗の関係を示す。 SF_6 中では、陽極消耗の方が陰極消耗に比べ圧倒的に大きく、ガス圧力の影響は、陽、陰極とも顕著であり、ガス圧力が高くなるほど接点消耗は大きくなる。

図7は SF_6 と N_2 の混合ガスの接点消耗特性を調べたものである。陰極側は、陽極に比べ、ガスの混合比による

図6 SF_6 ガス圧力と接点消耗率

Fig.6. Relation between SF_6 gas pressure and contact erosion rate.

(a) 陽極消耗

(b) 陰極消耗

図7 SF_6 と N_2 混合ガスの接点消耗特性

Fig.7. Contact erosion characteristics for mixture gas of SF_6 and N_2 .

接点消耗量にあまり顕著な変化は見られない。一方、陽極側はN₂の比率が増えると大幅に接点消耗は減少し、各混合比での消耗量は、SF₆とN₂各分圧に対する消耗量の和に近いようである。また、N₂ 100%のときの陽極、陰極の消耗量を比較すると、SF₆の場合とは異なり、ほとんど同じ程度であり、接点消耗機構が両方のガスで全く異なっていることがうかがえる。いずれにせよ、N₂ガスに比べ、SF₆ガス中では、陽極消耗の方が陰極消耗より全般的に大きく、特に、開閉機器で使用するガス圧力が比較的高い領域では、陽極消耗が支配的であり、消耗量自体も大きい。N₂等の接点消耗の少ないガスとの混合ガスを使用することによって、全ガス圧力を高くして絶縁、遮断性能を保ちながら、接点消耗を減らすことができる可能性も十分考えられる。

ガス圧力を、さらに下げたときの接点消耗については、SF₆ガスではないが、図8に示すように、大気圧以下でのN₂ガス圧力とCu接点の陰極アーク消耗特性を調べた例⁽⁷⁾がある。このガス圧力領域では、陽極消耗に比べ陰極消耗が支配的であり、ガス圧力が高くなるにつれ陽極スポットが発生し陽極消耗が増えてくる。同図より、ガス圧力を大気圧以下に下げていくと接点消耗は極小値を示し、さらに真空領域に入ると逆に増加することが分かり、この傾向はSF₆ガスの場合も同様と思われる。

〈3・2〉磁気ブロー特性 図6で磁気ブローの影響を見ると、陰極消耗に及ぼす磁気ブロー効果はわずかであるのに対し、陽極消耗は大きく影響を受けている。そこで、陽極消耗に対する磁気ブローの効果を整理し直したのが図9である。磁束密度が大きくなると、消耗率の低下は飽和してくるが、それでも50mTの印加によって、陽極消耗は磁気ブローなしの場合に比べ1/3から1/4にも減少している。しかも、陽極消耗量そのものが陰極に比べ大きいいため、接点寿命を延ばす手段として磁気ブローを強める効果は実用的にも大きい。

4、電流の影響

電流の大きさによって、接点消耗量がどのように変わるかは、実用上極めて重要である。一般に、接点のアーク消耗量は、電流のべき乗に比例することが知られているが、SF₆ガス中の並切りアークの場合、アーク時間を半サイクル一定としたときのアーク遮断1回当たりの接点消耗量は、電流の1.65乗に比例している⁽³⁾。100~400Aの範囲ではあるが、磁気ブローがある場合の電流値とアーク消耗量の関係を図10に示す。磁気ブロー条件は200A（実効値）時、10mT（ピーク値）即ち0.05mT/Aであり、電流によって磁束密度は変わる。この条件で、接点消耗量は電流値の1.25乗にほぼ比例している。さらに磁気ブローを強くすれば、大電流になるほど磁気駆動力が強まるためアークスポットがますます高速駆動されるようになり、同一電流での接点消耗は少なくなる。その結果、接点消耗量は電流値の1乗比例の方に变化していくものと考えられる。

図8 低圧N₂ガス中でのCu陰極消耗特性⁽⁷⁾
Fig.8. Cathode erosion rate of Cu contact in low pressure N₂ gas⁽⁷⁾.

図9 陽極消耗に対する磁気ブロー効果
Fig.9. Magnetic blow-out effect for anode erosion rate.

図10 磁気ブロー時の接点消耗電流特性
Fig.10. Current characteristics of contact erosion.

5、Cu-W接点材料の影響

〈5・1〉 W粒径と接点消耗特性 Cu-W接点のアーク消耗に対するW粒径の影響を調べるために、表1に示す接点材料を用いて実験した。結果を図11に示すが、接点組成は50 wt% Cu-Wである。実験結果より、一般的にW粒径が小さいほど接点のアーク消耗は少なくなっている。2.5 kAのSF₆ガス吹付けアークの場合⁽¹⁾でも、5 μ m以上の実験結果ではあるが、W粒径の小さい方が消耗は少ないことが示されており、同様の傾向である。しかし2.5 kAでは10 μ m以下の粒径で接点表面にクラックを生じること

表1 供試Cu-W接点の特性 (W粒径の影響)

Table 1. Properties of Cu-W Contacts (Influence of W Particle Size)

W平均粒径 [μ m]	密度 [Mg/m ³]	硬度 [H _{MV} (0.5)]	導電率 [M S/m]
1	11.7	177	38.4
3	12.5	153	37.7
8	12.5	142	33.0
16	12.4	130	31.4

(a) 陽極消耗

(b) 陰極消耗

図11 W粒径と接点消耗率

Fig. 11. Relation between W particle size and contact erosion rate.

から、クラックを避けるなら20 μ m程度のW粒径が最適であるとしている。本実験では粒径1 μ mでもクラックは発生しておらず、数百A以下の電流域では1~16 μ mの範囲ではあるが、実用的にもW粒径は小さい方がよいことが分かった。

なお、W粒径に対する接点消耗量のこの傾向は空気中と油中においても同様である⁽⁸⁾。

〈5・2〉 Cu-W組成と接点消耗特性 CuとWの組成

表2 供試Cu-W接点の特性 (組成比の影響)

Table 2. Properties of Cu-W Contacts (Influence of Cu Content)

組成 [wt%]	密度 [Mg/m ³]	硬度 [H _{MV} (0.5)]	導電率 [M S/m]
30%Cu-70%W	14.2	195	28.7
40%Cu-60%W	13.2	193	31.1
50%Cu-50%W	12.0	172	39.2
70%Cu-30%W	10.8	117	44.8
80%Cu-20%W	10.1	102	36.3
90%Cu-10%W	9.5	70	51.1

(a) 磁気ブローなし

(b) 磁気ブロー 10 mT_{peak}

図12 Cu-W組成比と接点消耗率

Fig. 12. Relation between Cu content in Cu-W contact and contact erosion rate.

比を変えた場合のアーク消耗特性を調べるため、表2に示す接点材料を用いて実験した。W粒径は1 μ mで粉末焼結法で製造されている。実験結果を図12に示す。ここで接点消耗量として、陽極、陰極を合計した体積消耗率 cm³/Cで表示したが、これは組成比率によってCu-W比重が変化するため、実用的には体積消耗量で接点の寿命が決まることから、この単位を選んだ。体積消耗率からみると、Cu含有量が50~70 wt%と多めの方がよく、この範囲の組成比では、通常遮断器等で使われるWリッチのCu-Wに見られるようなWスケルトンとはもはや形成されておらず、Cuの中にW粒子が分散している状態と考えられる。電流がもう少し大きい領域になると、Cu含有量が若干少なめで最小消耗率を示すようになるが、ほぼ同様の結果がLabrenz氏⁽⁴⁾によって得られている。Gessinger氏等⁽¹⁾によれば、2.5 kAのSF₆吹付けアークの場合、Cu含有量が62 wt%のとき30~40 wt%のものに比べ6倍もの体積消耗率になっており、本実験とは逆の結果が得られている。これは、大電流ガス吹付けアークの場合、Wスケルトンの形成が消耗に対して重要な要因であるとされているのに対し、数百Aの磁気ブローアークでは、別の消耗機構が支配的であることを示している。

図12やLabrenz氏⁽⁴⁾による、SF₆ガス中のCu-W組成比と電流域による消耗特性の傾向は、Zessack氏⁽⁹⁾による油中での結果とよく合っている。

6. SF₆ ガス中Cu-W接点のアーク消耗機構

SF₆ガス中接点のアーク消耗機構としては、1) 化学腐食による消耗（溶融または高温の接点表面金属が、直接反応性の強いSF₆の構成原子あるいはイオンと化合し消耗するもの）、2) 接点金属の蒸発による消耗、3) 金属塊の飛散、脱落による消耗、の三つが考えられる。以下に数百Aまでの電流域におけるSF₆ガス中Cu-W接点の場合、どの機構が支配的かを考察する。

アーク遮断後の生成物の同定より、接点金属とSF₆ガスの反応は、以下の式で示す化学反応であることが判明している⁽¹⁰⁾。

ここで、SF₄はガス状で、水と容易に反応する。CuF₂は絶縁性の白色粉末、WF₆は室温以上ではガス状であるが、水と反応し絶縁性粉末であるWOF₄やWO₃となる。Cu、Wともに100%反応したとすると、50 wt% Cu-W接点の理論的なSF₆ガス消耗比（接点1gが消耗したときのSF₆ガスの分解による消耗重量）は2.34となる。同様に、Cu接点の場合は2.30、W接点の場合で2.38となる。図13に、50 wt% Cu-W接点を用いてガス圧力を変えたときのガス消耗比を、また図14には、Cu-W接点の組成比を変えた場合のガス消耗比を示す。SF₆の消耗重量の測定は、分解ガス（SF₄）をNaOH水溶液に吸収させ、生成されたNa₂SO₃を塩酸で逆滴定することによ

って求めている。図13の0.5 MPa以下のガス圧力や、図14で、Cuの含有量が50~70 wt%のCu-Wでは、ガス消耗比の実測値は2.75となり、理論値に近い一定値を示している。この場合は、消耗接点の100%がSF₆ガスと反応

図13 SF₆ ガス圧力とガス消耗比の関係
Fig. 13. Relation between SF₆ gas pressure and gas decomposition rate.

図14 Cu-W組成比とガス消耗比の関係
Fig. 14. Relation between Cu content in Cu-W contact and gas decomposition rate.

図15 SF₆ ガス中 Cu 接点の消耗特性
Fig. 15. Erosion characteristics of Cu contact in SF₆ gas.

図16 SF₆ガス圧力によるアーク痕跡の変化

Fig.16. Variation of crater formed by arc spot to SF₆ gas pressure.

していることを示しており、1) の化学腐食か、2) の蒸発金属がアークで分解されたSF₆の構成原子と反応したものか、どちらかによるものと考えられる。もし、アークによって分解したSF₆ガス成分による化学腐食が、陽極、陰極とも同程度の反応速度であり、しかも大きな割合を占めるとするなら、図7(b)において、ガスをSF₆100%から、不活性なガスであるN₂100%へ変化させたときの陰極消耗率も、陽極消耗率同様大きく変化するはずであり、実験結果は大きな変化がないことから、化学腐食は無視できる程度と考えられる。

また、図13の0.6MPa以上の場合や、図14でCuの組成が50~70 wt%以外の接点材料の場合、ガス消耗比が低下していることから、この領域では(1)、(2)式の反応以外の消耗が増えていることになり、3)の金属塊の飛散、脱落が発生したものと考えられる。なお、Cu100%の場合の接点消耗特性を図15に示すが、磁気ブローなしの条件では3)の金属塊の飛散、脱落が大きいことを裏づけるように、陰、陽極とも消耗量は大きくなっている。わずか10mTではあるが、磁気ブローによってアークスポットを動かすと大幅に接点消耗は少なくなり、3)の飛散、脱落から2)の蒸発消耗へ近づいているものと考えられる。

以上、数百Aまでの電流域におけるSF₆ガス中Cu-W接点の場合、蒸発消耗が支配的であることが分かったので、次に蒸発消耗に対するガス圧力、磁気ブロー作用を考察する。

アークスポットに注入されるエネルギーによって接点材料は蒸発するが、注入エネルギー一定とするとアークスポ

ットの面積と膠着時間によって蒸発量は決まる。面積が大きくなるとエネルギー密度が減るので、蒸発以外のエネルギー損失の割合が増え、接点の蒸発量は減少する。同様に、アークスポットの膠着時間が短くなると蒸発温度に達するまでの時間の割合が大きくなるため、蒸発に費やすエネルギー量が少なくなり、接点の蒸発量は減少する。

ガス圧力を変えたときのアーク痕跡の写真を図16に示す。接点开極瞬時から2ms間、DC 200Aアークを発生させているが、ガス圧力が高くなると陰極スポット、陽極スポット痕跡ともに小さくなっており、接点消耗のガス圧力効果をよく説明できる。この現象は、ガス圧力が高くなるとアーク柱が絞られ、細くなることが原因である。

また、磁気ブローアークのアーク速度は、磁束密度に比例して速くなり、ガス圧力の平方に反比例していることが知られている⁽¹¹⁾。アークスポットはアークによって引きずられ、飛び飛びに移行するので、膠着時間はアーク速度が増すと短くなることになり、磁気ブローの効果が説明できる。なお図6で、陰極消耗の磁気ブロー効果がありなことを示したが、この理由はよく分かっていない。ただ陽極側消耗が圧倒的に多いことから、磁気ブローのないとき、すなわちアークスポットが比較的静止しているときは陽極から蒸発した接点金属が陰極側へ転移し、見掛け上陰極消耗が少なくなり、逆にアークスポットが磁気ブローで動かされだすと転移が少なくなり、結果として磁気ブロー効果が出にくくなっている可能性はある。

7. むすび

本論文では、数百Aまでの電流域での、SF₆ガス中、Cu-W接点のアーク消耗特性を明らかにしたが、得られた結果を要約すると、次のようである。

(1) 通常、ガス開閉機器で使用される機器条件では、陽極消耗が支配的である。

(2) 0.5MPa までのガス圧力範囲で、Cu 組成が 50~70 wt%のCu-W接点のアーク消耗機構は、化学腐食や金属塊の飛散、脱落ではなく、接点金属の蒸発による消耗が支配的である。

(3) ガス圧力が高くなるとアークスポットが絞られ、入力エネルギー密度が増し、接点消耗は大きくなる。

(4) 磁気ブローを増すと、アークスポット着着時間が短くなり陽極消耗は減るが、この傾向はガス圧力が低い方が顕著である。しかし、陰極消耗に対しては、磁気ブロー効果は小さい。

(5) 電流値に対する消耗特性は、磁気ブローのないときの1回当たり接点消耗が電流の 1.65 乗に比例するのに対し、磁気ブローを強めると電流の 1 乗に近づいていき、磁束密度 10mT (200A時) で電流の 1.25 乗に比例する。

(6) Cu-W接点材料では、W粒径は小さい方がよく、組成ではCu 50~70wt%のとき消耗は最も少なくなる。

これらの成果によって、SF₆ガス圧力を低くするか、あるいはN₂等の接点消耗が少ないガスとの混合ガスを用いてSF₆分圧を下げ、磁気ブローを強くすることによって、接点寿命の長い開閉機器が実現できることが分かった。

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4月24日受付、同10月11日再受付)

文 献

- (1) G.H. Gessinger & K.N. Melton : "Burn-off Behaviour of W-Cu Contact Materials in an Electric Arc", Powder Metallurgy International, vol. 9, No. 2, 1977
- (2) J.H. Kaminski : "The Burn-up Behavior of Nozzle with Strong SF₆ Flow", Proc. of 9th Intr. Conf. on Elect. Contact Phenom., 25~29, (1978)
- (3) K. Fujiwara : "Arc Quenching Behavior of Rotary Arc in Sulfur Hexafluoride", Proc. of 7th Intr. Conf. on Elect. Contact Phenom., 266~272, (1974)
- (4) F. Labrenz : "Abbrand von Kontaktstücken für Schaltgeräte der Elektrischen Energietechnik", ETG Fachber, 8, 93~97, (1981)
- (5) Cheng L., et al. : "Experimental Investigations on Motion and Erosion of a Rotating Arc in SF₆", Proc. Int. Conf. on Elec. Contacts, Arcs, Apparatus and Their Applications, Xian, 33~37, (1989)
- (6) 大塚正雄・堀浩一 : 「Cu-W接点のアーク消耗とSF₆ガス消耗の関係」、昭54 電気四学会九州支部連大、No. 330
- (7) C.W. Kimblin: "Cathode Spot Erosion and Ionization Phenomena in the Transition from Vacuum to Atmospheric Pressure Arcs", J. Appl. Phys., Vol. 45, No. 12, 5235~5244, (1974)
- (8) H. Schreiner & W. Haufe: "Einfluß des Gefüges von Wolfram-Kupfer-Tränkwerkstoffen auf das Abbrandverhalten im Hochstromlichtbogen", High Temperatures-High Pressures, Vol. 14, 101~110, (1982)
- (9) I. Zessack: "Burn-up Behaviour of Sintered Contact Materials Tested Repetitively at Currents Ranging from 400A to 7000A in Oil", Proc. of 9th Intr. Conf. on Elect. Contact Phenom., 19~24, (1978)
- (10) 千足一弘 他 : 「遮断電流とSF₆ガス分解量との関係」、昭45電気学会全大、No. 295
- (11) 藤原一志 : 「ロータリアーク式SF₆ガスしゃ断器のアークの挙動としゃ断特性」、電学論B、Vol. 101、No. 4、181~188、(昭56)

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。