Effect of Magnetic Field Strength and Admixture Gas on Current Interrupting Capability of a CO₂ Rotary-Arc Type of Load-Break Switch

Toshiro Matsumura Member (Nagoya University, Japan)

Yasunobu Yokomizu Senior Member (Nagoya University, Japan)

Daisuke Kanda Student Member (Nagoya University, Japan)

Takao Kumazawa Member (Chubu Electric Power Co., Inc.)

Takashi Furuhashi Member (Energy Support Corporation)

Kunio Mitsukuchi Member (Energy Support Corporation)

Keywords: load-break switch, alternative quenching-gas to SF₆, coil turns, current-interruption, CO₂ gas mixture

Gas load-break switches adopting SF₆ as quenching media have been used in power-distribution systems. However, SF₆ is a greenhouse gas and thus it is desirable to use an environmentally benign gas as the quenching medium. On the basis of the previous research results, the CO₂ has been found to be candidate as the alternative quenching-gas for the load-break switches.

Some of the load-break switches employ arc-extinguishing method called a rotary-arc type. This type of load-break switch has a ring-electrode and an interrupting arc runs on the inner surface of the ring electrode, owing to application of magnetic flux. This type of load-break switch is considered to have various factors affecting the interrupting capability: (a) material of the ring electrode; (b) strength of magnetic flux; (c) admixture of other gas to CO₂ and (d) gas pressure. Until now, we have investigated the effect of the above item (a) on the arc behavior and on the interrupting capability. As the next stage, the first purpose of the present research is related to the item (b), being to measure how great rate an arc rotational velocity and a current-interrupting capability increases with the strength of the magnetic flux. The second aim of this research is related to the item (c), being to find out effect of CO₂ mixtures on the current-interrupting capability.

Firstly, experiments were performed, concerning the item (b). In these experiments, the turns of coil for generating the magnetic field was changed. Augment in the coil turns for 1 (arbitrary unit) to 1.8, 2.5 and 3.6 proved to raise the rotational velocity of the arc from 3.1 to 4.5, 6.2 and 8.6 revolutions/ms with the 0.801 power, for the current with a peak value of 2 kA. Figure 1 shows the dependence of interrupting capability on the coil-turns. Same increase in the coil-turns leads the interrupting capability to rise from 2.6 to 3.2, 3.5 and 4.1 kA. This result indicates that the interrupting capability rises with 0.349 power of the coil-turns.

Secondly, the turns of coil was adjusted to be 3.6 to measure the

Fig. 1. Current-interrupting capability for different numbers of turns

Fig. 2. Current interrupting capability as a function of mixed-gas concentration

current-interrupting capability for CO₂ mixtures. Figure 2 presents the interrupting capability as a function of the mixed-gas concentration for various gases. Adding either air or N₂ to CO₂ at the concentration of 30% result in decrease in the interrupting capability to 3.7 and 4.0 kA. In contrast, the switch for CO₂-He(30%) and CO₂-O₂(30%) shows the interrupting capability of 5.2 and 4.6 kA, respectively. These magnitudes are higher than that for the pure CO₂. In other words, admixing He or O₂ to CO₂ at the concentration of 30% have effect in increasing the interrupting capability.

CO₂ ロータリーアーク型負荷開閉器における印加磁界増加 およびガス混合による電流遮断能力の向上特性

正員 松村 年郎* 上級会員 横水 康伸*
 学生員 神田 大輔* 正員 熊澤 孝夫**
 正員 古畑 隆*** 正員 三ツ口邦夫***

Effect of Magnetic Field Strength and Admixture Gas on Current Interrupting Capability of a CO₂ Rotary-Arc Type of Load-Break Switch

Toshiro Matsumura*, Member, Yasunobu Yokomizu*, Senior Member, Daisuke Kanda*, Student Member,
 Takao Kumazawa**, Member, Takashi Furuhashi***, Member, Kunio Mitsukuchi***, Member

Firstly, current interrupting experiments were performed for a rotary-arc type of load-break switch filled with pure CO₂ at a total pressure of 0.1 MPa. Augment in the coil turns for generating magnetic field from 1 to 1.8, 2.5 and 3.6 (arbitrary unit) proved to raise the current interrupting capability from 2.6 kA to 3.2, 3.5 and 4.1 kA. Secondly, experiments were performed for CO₂ gas mixture under the condition of the coil turns of 3.6. Gases of He, O₂, N₂, and air were admixed to CO₂. Adding either He or O₂ to CO₂ at the concentration of 30% allows the switch to have the higher interrupting capability than using of pure CO₂.

キーワード：負荷開閉器，SF₆ 代替ガス，コイル巻数，電流遮断，CO₂ 混合ガス

Keywords: load-break switch, alternative quenching-gas to SF₆, coil turns, current-interruption, CO₂ gas mixture

1. まえがき

ガス開閉器およびガス遮断器では，SF₆ ガスが消弧ガスとして用いられている。しかし，SF₆ ガスの地球温暖化係数は極めて高いため，地球温暖化現象への影響が懸念されている。この背景のもと，点検・部品交換時などにおける大気へのSF₆ 放出量を極力小さくすることが実施されるとともに，その一方では，SF₆ に替わる消弧ガスを見いだすこと，およびその消弧ガス中でのアーク遮断特性を明らかにすることが期待されている。

そこで，筆者らは，配電システムにおけるガス開閉器を対象と

して，環境保全ガスを用いた負荷開閉器における電流遮断の特性および向上技術を検討している。これまでに，ロータリーアーク型負荷開閉器をはじめとする各負荷開閉器において，各種ガス下での電流遮断特性を明らかにしてきた⁽¹⁾。さらにはガス流安定化アークについて，残留アークコンダクタンスの低下過程を理論的に提示してきた⁽²⁾。これらの結果から，CO₂ が代替消弧ガスの有力候補であることを示してきた⁽¹⁾⁽²⁾。そこで，現段階として，CO₂ アークの基礎特性および電流遮断能力の向上特性を検討している。

ロータリーアーク型負荷開閉器の消弧過程では，アークに外部磁界を印加し，電磁力駆動によってアークをリング電極上で高速に回転走行させている。アークが消弧ガス中を高速走行することによって，アークは消弧ガスの対流を受け，アークには対流損失が発生していると考えられる。このため，無走行時に比べてアーク損失が増大し，アークを消弧に導いていると考えられる。したがって，このような消弧過程を有する負荷開閉器では，次の要素が遮断性能に影響を与えられられる。

- (1) リング電極の材料
- (2) 印加磁界の強さ
- (3) CO₂ への他種ガスの混合
- (4) ガス圧力

これまでに，(1)に着目して，銅リング電極の場合の遮

* 名古屋大学 大学院工学研究科 電子情報システム専攻
 〒464-8603 名古屋市千種区不老町
 Department of Electrical Engineering and Computer Science, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603

** 中部電力（株）技術開発本部 電力技術研究所お客さまネットワークグループ 配電チーム

〒459-8522 名古屋市緑区大高町字北関山 20-1

Chubu Electric Power Co., Inc.

20-1, Kitasekiyama, Odaka-cho, Midori-ku, Nagoya 459-8522

*** エナジーサポート（株）

〒484-8505 犬山市字上小針 1

Technical Department, Energy Support Corporation

1, Kamikobari, Inuyama 484-8505

断能力はステンレス鋼の場合よりも高いことを明らかにしてきた⁽³⁾。さらに、この原因として、リング電極の抵抗値によって、印加磁界の発生状況が変化することを理論・実験の面から示してきた⁽³⁾。

同負荷開閉器においては、リング電極の外枠のコイルにアーク電流を通電することによって、外部磁界を発生させている。よって、印加磁界の強さを高くすれば、電磁力が大きくなり、ひいてはアーク回転速度が速くなり、遮断能力が上昇すると考えられる。しかし、印加磁界の増加に対してアーク回転速度および遮断能力がどの程度上昇するのかは、ほとんどわかっていない。そこで、本研究では、(2)に着目して、コイル巻数（相対値）を1から1.8倍、2.5倍および3.6倍と増加させることによって印加磁界の強さを高くし、この増加に伴う純粋CO₂下のアーク回転速度および遮断能力の上昇特性を実測によって明らかにした。

さらに、(3)に関して、CO₂への他種ガス混合による遮断能力の変化も、ほとんどわかっていない。そこで、本研究では、CO₂にHe、O₂、N₂およびAirを混合し、混合ガス種および混合率の相違による遮断能力への影響を検討した。その結果、CO₂-He混合ガスおよびCO₂-O₂混合ガス下での遮断能力は純粋CO₂の場合よりも高くなることがわかった。

2. 遮断実験の方法

〈2・1〉 負荷開閉器と電流発生回路 図1は、ロータリーアーク型負荷開閉器の内部構造の概略を示している。アークはリング電極と可動接触子との間に点弧する。リング電極の外側には、コイルが配置されている。遮断電流はこのコイルを流れ、アークに磁束を印加する。この磁束印加によって、アークに電磁力が発生し、アークは、リング電極の内側表面上を走行する。リング電極の材料として、銅を用いた。

図2は、遮断電流の供給回路を示している。遮断すべき電流は減衰正弦波交流であり、その電流はコンデンサ3580μFとリアクトル1.9mHのLC放電により発生させた。また、過渡回復電圧上昇率を調整するために、コンデンサを負荷開閉器に並列に接続しており、その容量C_{rrv}は0.003μFである。その結果、過渡回復電圧上昇率dv/dt[kV/μs]と電流波高値I_{peak}[A]との間には、dv/dt = 2.93 × 10⁻⁴ I_{peak}の関係があることを実験で確認している。

これまでにリング電極付きコイルがつくる磁束密度を実測してきた⁽³⁾。その結果から、磁束密度の位相は電流より56度遅れており、遮断が達成される電流零点付近でさえも、磁束密度が発生していることがわかっている。したがって、ロータリーアーク型負荷開閉器では電流零点付近でさえも、アークを電磁力駆動させている。また、コイルの巻数が増加しても、位相差は変化せず、磁束密度の実効値が比例的に増加することを確認している。

上述した磁束の発生状況については、実測のみならず、理論的検討も実施してきた⁽³⁾。その結果、コイルの自己イン

図1 ロータリーアーク型負荷開閉器の内部構造の概略

Fig. 1. Outline of rotary-arc type of load-break switch.

図2 遮断実験回路

Fig. 2. Circuit for interruption experiment.

ダクタンス L_{01} だけでなく、リング電極の抵抗 R_2 および自己インダクタンス L_{02} も、リング電極の内部空間における磁束の発生状況に関与していること、すなわち、実効値 I_{rms} の遮断電流がコイルに流れるとき、発生磁束の実効値 Φ_{rms} は、

$$\Phi_{rms} = b I_{rms} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

$$b = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L_{02})^2}} \frac{L_{01}}{N_1} \dots \dots \dots (2)$$

で表されることを見いだしてきた。さらに、係数 b および L_{01} は、遮断電流の供給回路におけるリアクトル1.9mHよりも、それぞれ3桁および2桁小さいことがわかっている。

〈2・2〉 コイル巻数の増加 消弧ガスとして純粋CO₂を圧力0.1MPaで封入した。コイル巻数（相対値）を1から1.8倍、2.5倍および3.6倍に増加させ、その増加によるアーク回転速度および遮断能力の上昇特性を以下のように測定した。なお、この測定は、遮断電流の第2半波に対して実施した。これまでの検討から、電流の第1半波よりも第2半波において、アークの回転速度が高まり、その結果、開閉器の遮断能力も高まることが判明しているからである。

(1) 回転速度 コンデンサの充電電圧を2.5kVとし、第2半波の遮断電流波高値を約2kAに設定し、負荷開閉器に遮断動作を行わせた。高速度ビデオカメラによってアークの挙動を観測した。得られた画像から、リング電極上におけるアーク位置の時間的変化を測定し、回転速度を求めた。

(2) 電流遮断能力 各コイル巻数に対して、コンデンサの充電電圧を様々に変化させ、第 1 半波に 0.6~7 kA の電流を負荷開閉器に課し、遮断成否を測定した。得られた結果から遮断成功領域を導出し、その領域における電流波高値の最大値を電流遮断能力とした。

なお、〈2・1〉節で述べたように、アークへの印加磁束は、コイルに遮断電流を通電することによって発生している。電流遮断能力の測定実験においては、様々な波高値の遮断電流を負荷開閉器に課すため、コイルの巻数が同一であったとしても、アークへの印加磁束密度の波高値は遮断電流の波高値ごとに異なる。このような状況を考慮して、本研究では、磁束密度ではなく、コイル巻数を取り上げて、実験データを整理した。

〈2・3〉 混合ガス ここでは、コイル巻数を最も大きい値、すなわち 3.6 に設定した。消弧ガスとして、全圧力 0.1 MPa の CO₂ 混合ガスを使用した。CO₂ への添加ガスとして、He, O₂, N₂ および air を用いた。

はじめに、いずれの添加ガスも、混合率（全圧力に対する添加ガスの圧力比）30%で CO₂ に混合させた。コンデンサの充電電圧を変化させ、様々な電流波高値の電流遮断を負荷開閉器に課した。上記と同様な方法によって、電流遮断能力を求めた。

後述のように、CO₂-He（混合率 30%）の場合における遮断能力は、他種混合ガスおよび純粋 CO₂ の場合よりも高いという結果が得られた。そこで、CO₂-He については、He 混合率 10, 50, 70 および 100% で変化させ、同様に電流遮断能力を求めた。

上述のように、本実験では、各混合ガスにおける電流遮断能力を測定したが、以下に示す理由からアーク回転速度を測定しなかった。電磁力が一定でも、消弧ガス種が変わることによって、抗力が変化し、アーク回転速度が変わる。しかし、これらの変化と同時に、消弧ガス種の相違によって、高温域における消弧ガスの導電率および熱伝導率などの諸特性も異なる。異なる消弧ガス種に対しては、アーク回転速度の変化よりも、むしろ消弧ガスの諸特性の方が遮断能力を大きく左右すると考えられる。

3. コイル巻数の増加による遮断能力の上昇に関する結果

〈3・1〉 アーク回転速度 図 3(a) は、コイル巻数 1 の場合における電流および接点間電圧の波形の例を示している。電流第 1 半波の波高値は 2.9 kA、第 2 半波の波高値は 2.0 kA である。同図 (b) は、第 2 半波電流の波高値から零点までの期間約 4.2 ms におけるアーク位置の時間的変化を示している。同期間においてアークは電極上を 13.2 周走行しており、この例の回転速度は 3.1 回転/ms である。

図 4 は、各巻数における回転速度を示している。巻数が 1 の場合の回転速度は約 3.1 回転/ms である。巻数を 1.8, 2.5 および 3.6 に増加させると、速度はそれぞれ 4.5, 6.2 および 8.6 回転/ms に上昇している。言い換えれば、印加

図 3 アーク電流、電圧およびアーク位置の測定波形例（コイル巻数：1）

Fig. 3. Example of waveforms of current, voltage and arc root position (coil turn of 1).

図 4 磁界印加用コイルの巻数に対するアーク回転速度の依存性

Fig. 4. Rotational speed of arc as a function of the number of turns of coil.

磁界を 1.8, 2.5 および 3.6 倍に増加させると、回転速度は 1.5, 2.0 および 2.8 倍に上昇する。

〈3・2〉 電流遮断能力 図 3(a) に示される例の場合、時刻 4.0 ms においてアーク電圧が発生していることから、同時刻において接点が開極し、アークが接点間に点弧しはじめていると言える。その後、時刻 4.2 ms で波高値 2.9 kA となり、電流は時刻 8.4 ms において電流は第 1 半波の零点になる。しかし、引き続き電流が流れ、負荷開閉器は遮断に失敗している。次に、電流が波高値 2.0 kA になった後に、時刻 16.8 ms において電流は第 2 半波の零点になり、そこでは負荷開閉器は遮断に成功している。この波形例における電流第 1 半波のアーク時間は 4.4 ms であり、電流遮断までのアーク時間は 12.8 ms である。

図 5 は、電流遮断実験の結果を遮断成否の観点からまとめて示している。同図は、コイル巻数 1 の場合において得られたものである。横軸に電流の波高値、縦軸にアーク時間を取り、各半波の電流波高値の実測値および各半波の零点までのアーク時間の実測値に対応する位置に、遮断成否を○および×印でプロットしている。また、第 2 半波において遮断成功境界線を破線で示している。この境界線より左を遮断成功領域とみなし、その遮断成功領域における最大電流波高値のものを電流遮断能力とした。同図から、純

粋 CO₂ 封入時の電流遮断能力は 2.6 kA と求められる。

図 6 は、コイルの各巻数における遮断能力を示している。巻数が 1 の場合における遮断能力は 2.6 kA である。巻数を 1.8, 2.5 および 3.6 に増加させるにつれて、遮断能力は 3.2 kA, 3.5 kA および 4.1 kA に増大している。言い換えれば、コイル巻数を 1.8, 2.5 および 3.6 に増加させ、それによってアーク回転速度を上昇させると、遮断能力は 1.2, 1.4 および 1.6 倍に向上することがわかった。

〈3・3〉 アーク回転速度および電流遮断能力の向上特性

第 1 章で述べたように、本負荷開閉器では、アークは消弧ガス中を電磁力によって走行している。このため、アークは消弧ガスの対流を受け、アークには対流損失が発生していると考えられる。したがって、コイル巻数の増加は回転速度を増加させ、その結果、対流損失パワーを上昇させ、さらには電流遮断能力を増大させていると考えられる。しかし、これまでに、コイル巻数の増加によってアーク回転速度および遮断能力がどの程度上昇するのかは明らかにされていなかった。そこで、以下に示すように、図 4 および 6 に示された測定値を、最小 2 乗法によってコイル巻数（相対値）の関数で表し、上昇特性を数式の形で表現した。

図 4 から、アーク回転速度 ω [回転/s] は、 $\omega = 2960N^{0.801}$

図 5 純粋 CO₂ 封入時における電流遮断実験結果（コイル巻数：1）

Fig. 5. Results of current-interruption experiment obtained for pure CO₂ (coil turn of 1).

図 6 磁界印加用コイルの各巻数における電流遮断能力

Fig. 6. Current-interrupting capability for different numbers of turns.

で表されることがわかった。したがって、コイル巻数を増加させるにつれて、アーク回転速度は 0.801 乗の特性で上昇すると言える。図 4 中の実線は、この近似曲線を示している。一方、図 6 から、遮断能力 I_c [A] は、 $I_c = 2590N^{0.349}$ で表されることがわかった。よって、遮断能力はコイル巻数の増大に対して 0.349 乗の特性で向上すると言える。図 6 中の実線は、この近似曲線を示している。

ここで得られた近似式は、コイル巻数の増加による回転速度および遮断能力の上昇効果を示すものである。たとえば、近似式を利用することによって、遮断能力をコイル巻数 1 の場合に対して 2 倍に高めるためには、コイル巻数を $N = 2^{(1/0.349)} = 7.29$ に設定することを予測できる。あるいは、近似式は今後のアーク遮断過程の数値モデルなどの構築にとって有用である。

4. CO₂ 混合ガス下での実験結果

〈4・1〉 測定波形例 図 7 は、電流第 2 零点付近における電流および接点間電圧の波形例を示している。図 7 (a) は純粋 CO₂ 封入時、図 7(b) は CO₂-He（混合率 30%）封入時であり、電流第 2 半波における電流波高値は各図とも 4.2 kA である。図 7(a) に示すように、純粋 CO₂ の場合、電流第 2 零点後も電流が流れ続け、遮断に失敗している。一方、図 7(b) にみられるように、CO₂-He(30%) の場合、電流第 2 零点で遮断に成功している。

〈4・2〉 遮断能力 図 8 は混合率に対する電流遮断能力を示している。

(1) 混合ガス種の効果（混入率 30%） 純粋 CO₂ 封入時の電流遮断能力は 4.1 kA である。CO₂ に N₂ および air を 30% で混合させた場合、その遮断能力は 4.0 kA および 3.7 kA であり、純粋 CO₂ の場合よりも低下している。しかし、He あるいは O₂ を 30% で混合させた場合には、その遮断能力は 5.2 kA および 4.6 kA である。よって、CO₂-He(30%) および CO₂-O₂(30%) の場合の遮断能力は、純粋 CO₂ の場合よりも上昇することが明らかになった。以上の結果から、CO₂ への He および O₂ 混合は遮断能力の向上効果をもたらすと言える。

図 7 電流第 2 零点付近におけるアーク電流および電圧（電流波高値：4.2 kA）

Fig. 7. Example of waveforms of current and voltage. (Peak value of current: 4.2 kA).

図 8 混合率に対する電流遮断能力

Fig. 8. Current interrupting capability as a function of mixed-gas concentration.

(2) 混合率に対する遮断能力の変化 前述のように、CO₂-He(30%) の場合、遮断能力は純粋 CO₂ の場合よりも高く、さらには CO₂-O₂(30%) の場合よりも高い。そこで、He 混入率を 10, 50, 70 および 100% に変化させ、遮断能力を測定し、図 8 にプロットした。He 混合率を 50% に増加させると、遮断能力は 4.2 kA であり、純粋 CO₂ の場合とほぼ等しくなってしまう。He 混合率をさらに増加させると遮断能力は次第に低下してしまい、純粋 He の場合の遮断能力は 1.7 kA に低下している。したがって、多量の He 混合はむしろ遮断能力を低下させてしまうと言える。

〈4・3〉 混合ガスの遮断能力向上に関する検討

(1) 熱破壊領域 電流遮断の過程においては、遮断すべき電流の零点に達した時点では、接点間にはまだ導電性の高い高温ガスが残留している。その直後の熱破壊領域において、残留アークの導電性が速やかに低下することが、遮断成功において重要である。

一方、まえがきで述べたように、ロータリーアーク型負荷開閉器では、アークが消弧ガス中を高速走行することによって、アークは消弧ガスの対流を受け、アークには対流によるエネルギー損失が発生していると考えられる。このため、同負荷開閉器では、無走行時に比べて、アーク損失が増大し、アークを消弧しやすくしていると考えられる。

これまでに、数種のガス流安定化アークに対して、電流零点付近のアークコンダクタンスの低下状況を理論的に解析してきた⁽⁴⁾。このアークは、アーク軸方向に沿うガス流を受けている。その結果、主たるエネルギー損失機構は対流損失であり、ロータリーアーク型負荷開閉器におけるエネルギー損失機構と同一であると見なせる。そこで、消弧ガス種の相違によるガス流安定化アーク・コンダクタンス低下状況の違いを検討した。

図 9 は、He、O₂、CO₂、N₂ および air 中におけるアークコンダクタンスの計算結果を示している。同図は、初期状態を 50 A の定常アークとし、電流瞬時値が変化率 0.3 A/μs で 0 A に低下した場合に得られたものである。電流零点直後において、He および O₂ 雰囲気における残留アークのコンダクタンスは、CO₂ 雰囲気におけるそれに比べ急激に低

図 9 各種ガス吹付け安定化アークコンダクタンスの減衰状況 (電流減衰率 $di/dt = 0.3 \text{ A}/\mu\text{s}$)

Fig. 9. Dynamic conductance around current zero for arc sustained in axial gas flow.

表 1 SF₆ に対する各種ガスの絶縁耐力⁽⁵⁾

Table 1. Dielectric strength of certain gases relative to SF₆⁽⁵⁾.

Gas	Dielectric strength
CO ₂	0.35
He	0.02 - 0.06
O ₂	0.33
N ₂	0.37
Air	0.37
SF ₆	1.0

下している。すなわち、He および O₂ 雰囲気は残留アークのコンダクタンスの急速な低下をもたらすといえる。一方、図 9 にみられるように、電流零点直後において、N₂ および air 雰囲気における残留アークのコンダクタンスは、CO₂ 雰囲気の場合よりも遅く低下している。

上記の理論計算から判断して、CO₂ に He あるいは O₂ を混合させた消弧ガスの場合、純粋 CO₂ の場合よりも残留アークのコンダクタンスの低下速さを促進させると思われる。このコンダクタンスの急速低下が、ひいては遮断能力を上昇させると考えられる。このようなプロセスによって、図 8 に示したように、CO₂-He 混合ガスおよび CO₂-O₂ 混合ガスにおける遮断能力は高くなったと考えられる。

(2) 誘電破壊領域 残留アークのコンダクタンスが十分に低下した後は、高電圧下での接点間残留高温ガスの絶縁性が高いことが重要であるといわれている。これまでに、高温ガスの絶縁破壊電圧は 2000 K 以下の範囲では温度に反比例で低下することが分かっている⁽⁴⁾。このことは、常温における各種ガスの絶縁耐力を相互比較すれば、高温での絶縁耐力を相互比較できることを示している。表 1 は SF₆ に対する各種ガスの常温での絶縁耐力を表している⁽⁵⁾。常温での絶縁耐力から推測すると、高温 He の絶縁耐力は CO₂ の場合よりも極めて低いと考えられる。そのため、He

を CO_2 に多量に混合させると、誘電破壊領域において、高温 He の低耐力性が現れてしまい、その結果、電流遮断能力が低くなったと考えられる。

5. あとがき

配電用ロータリーアーク型負荷開閉器において、はじめに、 CO_2 を消弧ガスとして用い、磁界印加用のコイル巻数の増加によるアーク回転速度と遮断能力の向上特性を測定した。ここでは、コイル巻数（相対値）を 1 から 1.8 倍、2.5 倍および 3.6 倍に増加させた。その結果、アーク回転速度は、1.5、2.0 および 2.8 倍に 0.801 乗の特性で増加し、ひいては遮断能力は 2.6 kA から 3.2、3.5 および 4.1 kA に向上し、0.349 乗の特性で上昇することが測定された。ここで得られた上昇特性は、コイル巻数の増加による回転速度および遮断能力の向上効果を示すものであり、さらには今後のアーク遮断過程の数値モデルなどの構築にとって有用である。

次いで、巻数 3.6 のコイルを用いて、 CO_2 への他種ガス混合による遮断能力の向上効果の検討に着手した。 CO_2 に N_2 あるいは air を混合率 30% で添加した場合には、その遮断能力は 4.0 および 3.7 kA であり、純粋 CO_2 の場合よりも低下してしまう。しかし、 He あるいは O_2 を 30% で混合させた場合には、その遮断能力は 5.2 および 4.6 kA であり、純粋 CO_2 の場合よりも増大することを明らかにできた。今回の実験によって、 CO_2 への He および O_2 混合は、遮断能力の向上効果を有していることを示すことができた。

ここでの電流遮断能力の測定値は、1 遮断条件で得られたものである。しかし、 CO_2 混合ガスアークに関する貴重なデータを提示している。また、〈4・3〉節では、混合ガス種の相違による電流遮断能力の変化をガス流安定化アークのコンダクタンス低下状況と高温ガスの絶縁耐力とから説明した。今後、混合ガス種の相違による電流遮断能力の変化を、さらに詳細にアーク物理・現象に基づいて解明していく予定である。

実験の一部を行ってくれた松本偉（元、名古屋大学大学院工学研究科大学院生）氏に感謝いたします。

（平成 18 年 7 月 28 日受付，平成 18 年 11 月 17 日再受付）

文 献

- (1) S. Matsumoto, S. Hirata, Y. Yokomizu, T. Matsumura, A. Ishikawa, T. Furuhashi, and K. Mitsukuchi: "Comparison of Current Interrupting Capability of Rotary-arc Type of Load Break Switch filled with CO_2 , He and H_2 ", The Papers of Joint Technical Meeting on Electrical Discharges, Switching and Protecting Engineering and High Voltage, IEE Japan, ED-03-232/SP-03-154/HV-03-147 (2003-11)
松本 偉・平田修一・横水康伸・松村年郎・石川 晃・古畑 隆・三ツ口邦夫:「 CO_2 、 He および H_2 ロータリーアーク型負荷開閉器における電流遮断性能の相互比較」, 電気学会放電・開閉保護・高電圧合同研資, ED-03-232/SP-03-154/HV-03-147 (2003-11)
- (2) Y. Yokomizu, K. Ito, and T. Matsumura: "Approach to Decaying Process of Arc Conductance after Current Zero on the basis of Thermodynamic and Transport Properties of High Temperature Gases", *IEEE Trans. PE*, Vol.123, No.4, pp.450-456 (2003-4) (in Japanese)

横水康伸・伊藤一将・松村年郎:「高温ガスの熱力学・輸送特性に基づく残留アークコンダクタンスの低下過程の解明」, 電学論 B, **123**, 4, pp.450-456 (2003-4)

- (3) Y. Yokomizu, S. Matsumoto, S. Hirata, T. Matsumura, A. Ishikawa, T. Furuhashi, and K. Mitsukuchi: "Arc Behavior in Rotary-arc Type of Load-break Switch and its Current-interrupting Capability for Different Environmentally Benign Gases and Electrode Materials", *IEEE Trans. PE*, Vol.125, No.11, pp.1070-1076 (2005-11)
- (4) T. Matsumura, Y. Yokomizu, P.C. Almiron, K. Yamamoto, D. Ohta, and M. Shibuya: "Breakdown Voltage of CO_2 at Temperatures around 4000 K and in Range from 300 to 700 K", *IEEE Trans. PE*, Vol.125, No.11, pp.1063-1069 (2005-11)
- (5) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編: 放電ハンドブック, p.264, オーム社 (1998)

松 村 年 郎（正員） 1979 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程満了。同年 4 月名古屋大学助手、1987 年 2 月同大学講師。1989 年 3 月京都大学講師。1992 年 1 月名古屋大学助教授、1995 年 4 月同大学教授、現在に至る。工学博士。主として、大電流制御、次世代電力システムに関する研究に従事。

横 水 康 伸（上級会員） 1990 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程満了。同年 4 月名古屋大学助手、1997 年 10 月同大学講師。1998 年 10 月～2002 年 3 月同大学理工学総合研究センター併任。2000 年 2 月同大学助教授、現在に至る。工学博士。主として、大電流現象、電力伝送現象に関する研究に従事。

神 田 大 輔（学生員） 2005 年 3 月名古屋大学工学部電気電子・情報工学科卒業。2005 年 4 月名古屋大学大学院工学研究科電子情報システム専攻博士課程前期課程に入学、現在に至る。環境調和型ガスにおけるアーク遮断過程の研究に従事。

熊 澤 孝 夫（正員） 1958 年 6 月 26 日生。1983 年 3 月岐阜大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月中部電力（株）に入社。現在、同社電力技術研究所にて高分子絶縁材料の劣化様相解明や電力ケーブル・機器の劣化診断に関する研究等に従事。1995 年 3 月岐阜大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。2006 年電気学会論文賞受賞。日本原子力学会員。

古 畑 隆 (正員) 1982 年 3 月愛知県立小牧工業高校機械科卒業。同年 3 月高松電気製作所(現, エナジーサポート(株))入社。現在, 配電機器事業部第 1 技術部において 6kV 級開閉器関連の研究および開発に従事。

三ツ口 邦 夫 (正員) 1969 年高松電気製作所(現, エナジーサポート(株))入社。1974 年 4 月愛知工業大学機械工学科卒業。現在, エナジーサポート(株)配電機器事業部製造部において 6kV 級開閉器関連の製造および開発に従事。