各種プラスチック蒸気が混入した 器壁安定化空気アークの過渡減衰特性

正員 伊藤 裕 幸 (金沢大)

正員 作田 忠 裕 (金沢大)

正員 小林 正 (日東工業)

Decaying Process of Wall-Stabilized Air Arc Contaminated with Plastic Vapor

Hiroyuki Ito, Member, Tadahiro Sakuta, Member (Kanazawa University) and
Tadashi Kobayashi, Member (Nitto Electric Works., LTD.)

A number of study on the transport and thermodynamic properties have been reported on the SF_6 gas arcs for high voltage, high current circuit breakers with including the impurity contamination of Cu vapor, Al vapor or PTFE ($-\text{C}_2\text{F}_4-$) vapor. Until now, there are few study for the general plastic vapor contamination. This paper describes the transport, thermodynamic and wall-stabilized arc properties of air contaminated with plastic vapors found in arc-chamber of low-voltage but considerably high-current circuit breakers. Total 31 chemical species were took into account in the calculation of plastic vapor contaminated air, which were produced by chemical interactions between mixed particles such as OH, CO, NH, CN, etc.. The plastic material considered here is polymethylpentene ($-\text{C}_5\text{H}_8-$), polybutylene ($-\text{C}_4\text{H}_8-$), polymethylmethacrylate ($-\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2-$), polybutyleneterephthalate ($-\text{C}_{12}\text{H}_{14}\text{O}_4-$) and polycarbonate ($-\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{O}_3-$). Calculation results showed that the electrical conductivity σ below 7,000K is decreased by the plastic vapor contamination compared to the pure air, especially, in the case of plastic material having no oxygen atom. The thermal conductivity κ is, on the contrary, increased by the plastic vapor contamination, especially at around 3,600K, where κ takes three-times larger value compared to the pure air due to H_2 and OH dissociation reactions. Based on the transport and the thermodynamic properties thus obtained, transient characteristics of the wall-stabilized air arc were calculated for the current decreasing ratio dI/dt of the alternating current 1,000A(rms.) around the current zero. The time-dependent decaying properties of the temperature distribution and the arc conductance were discussed for various plastic contaminated conditions.

キーワード：アーク、プラスチック蒸気、酸素原子、輸送特性、熱力学的特性、アーク遮断

1. はじめに

配線用低圧機器内のアーク遮断過程では、電極からの金属や消弧室材料である有機物等がアーク柱内に蒸気として混入し、アークは純粋な空気ではなく複雑な組成をした混合気体中で点弧している。従って、アーク特性ならびに遮断性能は、これら混入蒸気の影響を受けていると考えられる。これまでに、作田らが電力用遮断器の電極材料である銅蒸気及び絶縁ノズル材料である PTFE 蒸気($-\text{C}_2\text{F}_4-$)が SF_6 ガスに混入した場合の電子密度や導電率等を計算した報告^[1-2]や、同氏らが空気に銅やアルミニウム等の金属蒸気が混入した場合の輸送特性と熱力学的特性を算出^[3-4]して

いる。その結果に基づき器壁安定化アークの電界の強さを計算した報告^[5]、及び加藤らが空気に水蒸気が混入した場合の空気アークの電界の強さ-電流特性を求めた報告^[6]等もなされているが、一般的なプラスチック蒸気の影響を考慮した計算例はあまり見られない。

そこで、本論文では、低圧機器で通常使用されているプラスチック材料5種類について、これら蒸気が混入した空気アークの輸送特性及び熱力学的特性を求め、その結果に基づき交流電流の零点へと向かう器壁安定化アークの温度分布、コンダクタンス及び電流密度等の過渡特性を計算し、これら特性に及ぼす各種プラスチック蒸気の影響について理論的に検討している。検討対象である低圧機器は、

通常、大気圧で使用されるため、本論文では圧力 0.1MPa の場合について計算を行っている。以下、第 2 章では、高温プラズマ中の各種粒子間の衝突断面積に基づいて、輸送特性及び熱力学的特性を計算し、プラスチック材料混入の影響を理論的に述べると共に、これまでに報告されている消弧媒体としての SF_6 ^[1-2,7] や PTFE (ポリテトラフルオロエチレン) 蒸気^[8] の計算結果との比較・検討を行う。ここでは、プラスチック蒸気が混入した空気の導電率は、7,000K 以下の温度領域では純粋な空気の場合より顕著に低下することを示す。また、プラスチック蒸気の混入は 3,600K 付近の低温度領域における熱伝導率の極大をもたらす、これは空気の約 3 倍となり、純粋な空気よりも高い遮断性能を有する可能性が有ることを示す。第 3 章では、電流零点近傍において直線的に低下する di/dt に対する器壁安定化空気アークの過渡特性を算出し、各種プラスチック蒸気の混入によりアーク導電半径が細くなり、これに起因してアークコンダクタンスの低下が速まることを示す。最後の第 4 章では本論文で得られた主要な結果を要約している。

2. 各種プラスチック蒸気が混入した空気アークの輸送特性と熱力学的特性

<2・1> 構成粒子と衝突断面積

本論文ではポリメチルペンテン ($\text{-C}_3\text{H}_6\text{-}$)、ポリブチレン ($\text{-C}_4\text{H}_8\text{-}$)、ポリメチルメタクリレート ($\text{-C}_5\text{H}_8\text{O}_2\text{-}$)、ポリブチレンテレフタレート ($\text{-C}_{12}\text{H}_{14}\text{O}_4\text{-}$)、及びポリカーボネート ($\text{-C}_{16}\text{H}_{18}\text{O}_3\text{-}$) の 5 種類のプラスチックを対象として計算を行った。プラスチック蒸気が混入した空気アークの構成粒子として、次の合計 31 種類を考慮した。

- ① 空気中の粒子： N_2 、 O_2 、 NO 、 N 、 O 、 N_2^+ 、 O_2^+ 、 NO^+ 、 N^+ 、 O^+ 、 N^{2+} 、 O^{2+}
- ② プラスチックより発生する粒子： C_2 、 H_2 、 CH 、 C 、 H 、 H_2^+ 、 CH^+ 、 C^+ 、 H^+ 、 C^{2+} 、 (O_2) 、 O 、 O_2^+ 、 O^+ 、 O^{2+}
但し、()内はプラスチックに酸素が含有されている場合のみ考慮した。
- ③ 前二者が結合して生成される粒子： OH 、 CO 、 NH 、 CN 、 OH^+ 、 CO^+ 、 NH^+ 、 CN^+
- ④ 各粒子の電離により生成される電子： e

但し、ここでは 1,000K 以上の温度領域を計算対象としているため、上述した以外にプラスチック分解過程で中間的に形成される可能性がある高次分子等は考慮しないこととした。この温度領域では、それらは例え存在したとしても微量で、アーク特性の計算結果には大きな影響を及ぼさないものと考えられる。また、3 価以上の多価イオンは、これらの電離電圧が極めて大きいため 30,000K までの温度領域ではほとんど存在しないので考慮しないこととした。

輸送特性及び熱力学的特性を計算する第一段階として、熱平衡状態における粒子組成の温度特性を Saha の式、純粋空気ならびにプラスチックの組成比、気体の状態方程式、電気的中性条件式、及びプラスチック蒸気混入率 $[X_p]$ の定義式からなる 31 元の非線形連立方程式を Newton-

Raphson 法を用いて計算機により算出した^[9-10]。非線形連立方程式を解く手法は、作田らが空気に銅蒸気が混入した組成を求めたアルゴリズム^[11]と同じである。各種プラスチック蒸気が混入した空気アークの輸送特性と熱力学的特性は、「First Chapman-Enskog」近似^[12]に基づいて算出した。本計算に必要な各構成粒子間の衝突断面積については以下の様に定めた。 N_2 、 O_2 、 NO 、 N 、 O 、 NO^+ 、 N^+ 、 O^+ 等、空気固有の粒子間の各温度における運動量変換、粘性の両断面積については、Yos の値^[12]を用いた。C-C 間の衝突断面積は、Abrahamson^[13]による原子間相互作用ポテンシャルを用い、Monchick^[14]の表から計算した。 H_2 - H_2 、 H - H 及び H_2 - H 間の衝突断面積については、Yos の値^[12]を用いた。 C_2 - C_2 、 OH - OH 、 CO - CO 、 NH - NH 、及び CN - CN 間の衝突断面積については、基底状態における原子間の平均距離 r_0 ^[11]を用いて、 $4\pi r_0^2$ とした。これは、いわゆる古典的衝突断面積で運動量変換断面積と粘性断面積との区別はなく、また温度依存性もない。また、その他の異種粒子間の衝突断面積については、「Empirical Combining Law」^[15-16]に基づいて計算した。 C-C^+ 、 $\text{N}_2\text{-N}_2^+$ 、 $\text{H}_2\text{-H}_2^+$ 、 CH-CH^+ 等の同種原子-イオン間、ならびに同種分子-イオン間については、運動量変換断面積に共鳴電荷交換効果^[17]を考慮して計算した。 H-H^+ 間の衝突断面積は、Yos の値^[12]を用いた。粘性断面積に対しては、電荷交換の影響は全く無いので、中性原子間の断面積に等しいとした。 N-C^+ 、 N-H^+ 、 H-N^+ 等の異種粒子-イオン間の衝突は、非共鳴電荷交換衝突であるので断面積の大きさは通常の気体力学的な値となるので、中性粒子間の衝突断面積に等しいとした。また、中性粒子と 2 価イオンとの衝突は、これらが共存する温度領域が少ないため、ここでは考慮しないこととした。 $e\text{-N}_2$ 、 $e\text{-O}_2$ 、 $e\text{-H}_2$ 、 $e\text{-NO}$ 、 $e\text{-N}$ 、 $e\text{-O}$ 、 $e\text{-H}$ の運動量変換断面積については、Yos の値^[12]を用いた。 $e\text{-C}_2$ 、 $e\text{-CH}$ 、 $e\text{-OH}$ 、 $e\text{-CO}$ 、 $e\text{-NH}$ 、 $e\text{-CN}$ 、 $e\text{-C}$ の運動量変換断面積については、基底状態における原子間の平均距離 r_0 ^[11]を用いて、 πr_0^2 とした。また、粘性断面積については、運動量変換断面積に等しいとした。電子及びイオン間の荷電粒子間断面積については、実効クーロン衝突断面積^[12]を用いた。なお、計算条件は、圧力 0.1MPa、温度範囲 1,000~30,000K である。

<2・2> 導電率

図 1 は、全圧力 0.1MPa で、導電率 σ の温度依存性を各種気体について比較したものである。同図は、プラスチック蒸気混入率 50% の場合について示しているが、これは実際の機器ではプラスチック蒸気の混入量は電流等の条件により 0~100% まで様々であるため、ここでは代表例として中間の 50% を主として説明する。同図より、7,000K 以下の温度領域では純粋な空気の場合よりプラスチック蒸気が混入した方が導電率は低下することが分かる。例えば、 $T=5,000\text{K}$ の場合、空気で 30S/m であるが、組成に酸素原子を含有していないポリメチルペンテンの場合 9.5S/m、酸素原子を含有しているポリメチルメタクリレートの場合 13.9S/m で、それぞれ空気の約 1/3 及び 1/2 に減少してい

図1. 導電率に及ぼす各種プラスチック材料の影響
Fig.1. Temperature dependence of electrical conductivity at plastic vapor concentration $X_p=50\%$ ($P=0.1\text{MPa}$).

る。これに対し、7,000~12,000Kの温度領域では、プラスチック蒸気が混入した方が純粋な空気より導電率は若干高くなり、12,000K以上では両者の差はほとんど認められない。一方、 SF_6 と比較した場合^[7]、4,000~12,000Kの温度領域ではプラスチック蒸気が混入した空気の方が導電率が低いことが分かる。また、空気にPTFEが50%混入した場合^[8]と比較して、全温度領域においてプラスチック蒸気混入の結果は、これとほぼ一致し、低電子密度条件を作り出している。

図2は、全圧力0.1MPaで、温度をパラメータとして、導電率のプラスチック蒸気混入率に対する依存性を示したものである。図2における実線はプラスチックの組成に酸素原子が含有されているポリメチルメタクリレート等が混入した場合、また、破線は組成に酸素原子が含有されていないポリメチルペンテン等が混入した場合の導電率をそれぞれ示している。同図より、6,000K以下の温度領域において、プラスチック組成に酸素原子が含有されているポリメチルメタクリレート等は、その混入量の増加に伴って導電率は徐々に低下し、100%付近において急激に減少する。これに対し、組成に酸素原子が含有されていないポリメチルペンテン等は、その混入量の増加に伴って酸素原子が含有されているものよりも大きな割合で導電率は低下するが、逆に、100%付近において急激に導電率が増加する。この6,000K以下の温度領域での導電率の相違の要因は、空気中に含まれる酸素原子の絶対量の相違と5,000K以下の低温度領域におけるC原子の安定性による電子密度の変化に起因している^[10]。すなわち、組成に酸素原子を含有していない場合は、プラスチック蒸気混入率が増加すると空気からしか酸素が供給されないため、相対的に酸素原子の密度は減少する。一方、組成に酸素原子を含有している場合は、空気とプラスチックの両者から酸素が

図2. 導電率のプラスチック蒸気混入率依存性
Fig.2. Dependence of electrical conductivity upon the plastic vapor concentration X_p ($P=0.1\text{MPa}$).

供給されるため、含有していない場合よりも酸素原子の密度は相対的に高くなる。また、C原子は5,000K以下の低温度領域では単独で存在するよりも酸素原子と結合して、CO分子で存在した方が安定するため、他の分子から酸素原子を吸収する。その結果、NO分子の密度が低下し、電子の供給源である $\text{NO} \rightleftharpoons \text{NO}^+ + e$ の電離反応がプラスチック蒸気混入率の増加と共に減少するため、組成に酸素原子を含有していない場合の方が含有している場合よりも大きな割合で電子密度が低下することとなる。さらに、混入率の増加と共にC原子の密度は増加し続け、逆に、NO分子は減少する。極端な混入率100%付近ではC原子の電離電圧が11.3eVと窒素、酸素及び水素の電離電圧、それぞれ14.5eV、13.6eV及び13.6eVと比較して低いためC原子の熱電離が他の原子よりも先行する。酸素原子を含有していない場合は、C原子の粒子密度が増加するため電子密度は混入率100%付近において急激に増加することとなる。

以上の様に、酸素原子の絶対量の差が電子密度に影響を及ぼし、その結果、プラスチック組成の相違により導電率が大きく異なるものと結論できる。これに対し、6,000~12,000Kの温度領域では酸素原子の有無による差はほとんど認められず、導電率は純粋な空気の場合よりわずかに増加している。また、12,000K以上でも酸素原子の有無による差は認められず、プラスチック蒸気混入率が増加しても導電率はほとんど変化していない。

〈2・3〉熱伝導率

図3は、全圧力0.1MPaで、熱伝導率 κ の温度依存性を比較したものである。同図より、空気の場合、熱伝導率は3,600K、6,900K及び14,700Kに極大値が存在することが分かる。これらは、それぞれ O_2 の解離、 N_2 の解離及びN、Oの電離に伴う反応熱伝導率に起因するものである。これに対し、プラスチック蒸気混入の場合、3,600Kにおける

図3. 熱伝導率に及ぼす各種プラスチック材料の影響
Fig.3. Temperature dependence of thermal conductivity at $X_p=50\%$ ($P=0.1\text{MPa}$).

極大値は急激に増加し、逆に、6,900K 付近の極大値は若干減少する。さらに、14,700K の極大値にとって代わって 16,400K 付近に緩やかな極大値が認められ、全体として熱伝導率は純粋な空気の場合より高くなる傾向にある。これら極大値の変化は、それぞれ H_2 , OH の解離(3,600K 付近)、 N_2 , CO の解離(6,900K 付近)及び H , N の電離(16,400K 付近)による反応熱伝導率の寄与によるものである。また、消弧性能が高いとされる SF_6 の場合、良く知られている様に [2,7,18] 3,000K 以下に SF_6 分子の解離に伴う極大値が存在する。特に、導電率がほとんど零である 2,000K 付近の極大値は $0.659\text{W/m}\cdot\text{K}$ とプラスチック蒸気混入の場合の約3倍である。一方、PTFE 蒸気が 50%混入した場合、6,500K 付近に N_2 , CO , CN の解離による極大値 [9] があるのみで、アーク消弧に重要な 5,000K 以下の低温度領域では極大値は存在していない。むしろ、この PTFE 蒸気の混入により純粋な空気の場合 3,600K に存在した O_2 解離に伴う極大値の顕著な低下をもたらしている。

アークが消弧する電流零点付近では、アークは冷却され 10,000K 以上の高温・導電領域から 5,000K 以下の低温・非導電領域へと移行する。従って、この非導電領域において熱伝導率の高い媒体は、アーク熱を放射し易く冷却速度が速いため、アーク消弧に対し有利と考えられている。

3. 各種プラスチック蒸気が混入した器壁安定化空気アークの過渡減衰特性

<3・1> 計算方法

本解析では、簡単化のため一次元円筒対称モデルを採用し、電界はアーク軸方向成分のみに存在するとした。この様なアークに対し局所熱平衡状態を仮定し、質量、運動量及びエネルギー保存式が成立するとした [18]。エネルギー保存式は、式(1)で表される。

$$\rho C_p \frac{\delta T}{\delta t} = \sigma E^2 - \rho C_p V_r \frac{\delta T}{\delta r} + \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} \left(r \kappa \frac{\delta T}{\delta r} \right) - W_{rad} \quad (1)$$

ここで、 ρ は質量密度、 C_p は比熱 (エンタルピー h の温度微分)、 σ は導電率、 E は電界の強さ、 V_r は半径方向の流速、 r はアーク半径、 κ は熱伝導率、 W_{rad} は放射損失である。ただし、質量密度 ρ とエンタルピー h は文献 [19] に具体的な値を示してある。式(1)の右辺第一項はジュール損失を、第二項は半径方向の対流損失を、第三項は熱伝導損失をそれぞれ表している。式(1)の半径方向の流速 V_r は、式(2)で表される質量保存式から導かれる。

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} (r \rho V_r) = 0 \quad (2)$$

ここで、オームの法則は式(3)である。

$$I(t) = 2\pi E(t) \int_0^{r_w} \sigma r dr \quad (3)$$

但し、 I はアーク電流、 E は電界、 r_w は器壁半径である。アークの初期状態 ($t=0$) は、定常状態のエネルギー平衡式 (Elenbaas-Heller) より得られる。

$$\sigma E^2 - W_{rad} + \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} \left(r \kappa \frac{\delta T}{\delta r} \right) = 0 \quad (4)$$

本計算においてはまず、式(3)と(4)から電流 $I=20\text{A}$ 、 $t=0$ における定常状態を計算し、この結果を初期値として式(1)と(2)から、その後電流零点へ向かって減衰するアークの過渡特性の算出を行った。電流 I は、交流電流実効値を 1,000A とした場合の正弦波の減衰率 di/dt を直線近似し、初期電流値 $I=20\text{A}$ から $0.525\text{A}/\mu\text{s}$ の一定割合で電流が減衰するとし、第2章で求めた輸送特性及び熱力学的特性を用いてアーク温度分布、アークコンダクタンス及びアーク電流密度等の過渡特性を算出した。この電流減衰率では、 $t=38\mu\text{s}$ で $I=0\text{A}$ となる。また、各支配方程式は Patankar のコントロールボリューム法 [20] を適用して離散化している。本論文では、以下の仮定の下で計算を行っている。① アークは軸対称、② 器壁アーク半径 $r_w=2.5\text{mm}$ 一定で、その温度は 300K、③ 11,000K 以下の減衰過程を対象とするので放射損失は無視、④ 圧力は 0.1MPa 一定、⑤ アーク長は 10mm 一定としている。径方向の分割数は 600、時間刻み $\Delta t=1\mu\text{s}$ としている。

<3・2> アーク温度分布

図4は、アーク電流 20A で定常状態 $t=0$ における半径方向のアーク温度分布を比較したものである。同図より、アーク半径 0.9mm 以内の中心領域では純粋な空気の場合よりプラスチック蒸気が混入した方がアーク温度は高く、逆に、それ以上の半径領域ではプラスチック蒸気が混入した方がアーク温度が低下することが分かる。すなわち、プラスチック蒸気が混入することによりアーク温度分布は、空気の場合より絞られ、細くなっていることが分かる。例えば、アークの中心温度は、空気の場合 10,460K であるが、組成に酸素原子を含有していないポリメチルペンテンの場合 11,540K、酸素原子を含有しているポリメチルメタ

図4. プラスチック蒸気が混入した器壁安定化空気アークの定常温度分布

Fig.4. Temperature distribution of wall-stabilized air arc contaminated with plastic vapor at $X_p=50\%$ ($P=0.1\text{MPa}$, $I=20\text{A}$, $t=0\mu\text{s}$).

リレートの場合 11,520Kである。一方、温度 5,000K の半径に着目すると空気の場合 2.13mm、ポリメチルペンテンの場合 1.68mm、ポリメチルメタクリレートの場合 1.63mmである。このアーク半径の顕著な収縮は、図3に示した 3,600K における熱伝導率の極大が大きく寄与している。SF₆ の場合、中心部分ではプラスチック蒸気が混入した場合よりもアーク温度は低い、外周へ行くに従いプラスチック蒸気混入の場合よりも温度が高くなり、全体として緩やかな温度勾配となっている。又、PTFE の場合、中心部分で 300K 程度純粋な空気よりも温度は高い、外

周へ行くに従い空気の結果とほぼ一致している。

図5は、初期電流値 20A から $di/dt=0.525\text{A}/\mu\text{s}$ で電流が減衰した場合の半径方向のアーク温度分布の時間依存性を示したものである。同図(a)はポリブチレン(-C₄H₈-)が 50%混入した場合、図(b)は空気の場合、図(c)は SF₆ の場合、図(d)は PTFE 蒸気が 50%混入した場合である。同図には、 $t=0$ から $t=100\mu\text{s}$ までは $\Delta t=20\mu\text{s}$ ごとに、 $t=100\mu\text{s}$ から $t=500\mu\text{s}$ までは $\Delta t=100\mu\text{s}$ ごとに図示してある。同図より、 $t=0$ におけるアーク中心での温度は、前述した様にプラスチック蒸気混入の場合が最も高く、次いで PTFE、空気、SF₆ の順に低くなっていることが分かる。しかし、時間の経過、すなわち、電流の減衰に従ってアーク温度も低下し、 $t=100\mu\text{s}$ ではプラスチック蒸気混入が最も温度が低く、PTFE、空気、SF₆ の順に高くなっている。具体的に、 $t=100\mu\text{s}$ におけるアーク中心でのそれぞれの温度は 5,720K、6,470K、6,540K 及び 7,960K である。以上のことから、プラスチック蒸気混入した場合、初期状態でのアーク温度は高いが、温度の減衰割合が大きい、すなわち、アークの冷却速度の指標としての時定数が小さいことが分かる。消弧性能の高い SF₆ の場合 (同図(c))、アーク温度の低下はさほど顕著ではない。これは、本解析に用いた器壁安定化モデルでは、半径 2.5mm の点を温度 300K と強制的に固定している。これに対応して図9にも示すが SF₆ の場合、導電半径は約 1.5mm となっており空気や PTFE 蒸気混入とほとんど同じである。このため、アーク温度低下に差が認められなかったと考えられる。実際の遮断条件下では SF₆ アークの半径は自由空間内では自ら収縮すると報告^[21]されている。これが、SF₆ の消弧性能を高める要因となっている。なお、アーク温度の減衰時定数は、半径の二乗にほぼ比例する。すなわち、アーク半径が広がるほど時定数が大きくなり、アークの温度低下が遅くなることが知られている^[22]。

図5. 各種ガス中アーク温度分布の過渡減衰特性

Fig.5. Decaying process of arc temperature for various gas conditions ($P=0.1\text{MPa}$, $I=20\text{A}$, $di/dt=0.525\text{A}/\mu\text{s}$).

図6. 電流零点付近におけるアーク中心温度の時間的変化
Fig.6. Transient behavior of the axis temperature of arc at $X_p=50\%$ around current zero
($P=0.1\text{MPa}$, $I=20\text{A}$, $di/dt=0.525\text{A}/\mu\text{s}$).

図6は、初期電流値 20A から $di/dt=0.525\text{A}/\mu\text{s}$ で電流が減衰した場合のアーク中心温度の過渡推移を比較したものである。同図より、プラスチック蒸気が混入した場合、電流が 0A となった $t=38\mu\text{s}$ から $t=150\mu\text{s}$ まで急激に温度が低下し、他の媒体と比較してアークが急速に冷却されていることが分かる。また、 $t=500\mu\text{s}$ の時点でプラスチック蒸気が混入した場合 $2,950\text{K}$ 、 SF_6 の場合 $3,850\text{K}$ 、 PTFE の場合 $3,950\text{K}$ 、空気の場合 $3,960\text{K}$ とかなりの時間高温気体が消弧空間に残留していることが分かる。ここでも、プラスチック蒸気混入の方が、他のいずれの気体の場合よりも温度は低い。

〈3・3〉アークコンダクタンスとアーク電界

アークコンダクタンス G は、式(5)より算出した。

$$G = 2\pi \int_0^{r_w} \sigma r dr \quad \dots\dots\dots(5)$$

図7は、初期電流値 20A から $di/dt=0.525\text{A}/\mu\text{s}$ で電流が減衰した場合のアークコンダクタンス G の時間依存性を比較したものである。同図より、 $t=40\mu\text{s}$ におけるアークコンダクタンスは、プラスチック蒸気が混入した場合5種類の平均で $1.36\text{mS}\cdot\text{m}$ 、空気の場合 $3.09\text{mS}\cdot\text{m}$ 、 SF_6 の場合 $13.2\text{mS}\cdot\text{m}$ でプラスチック蒸気混入の方がそれぞれ約 $1/2$ 倍及び $1/10$ 倍アークコンダクタンスが低く、さらに、プラスチック蒸気を混入した方が速くアークコンダクタンスが低下することが分かる。また、プラスチック組成に酸素を含有していないものの方が、含有しているものよりもアークコンダクタンスが低いことが分かる。例えば、 $t=40\mu\text{s}$ の場合、組成に酸素を含有していないポリブチレンの場合 $1.16\text{mS}\cdot\text{m}$ であるが、酸素を含有しているポリメチルメタクリレートの場合 $1.31\text{mS}\cdot\text{m}$ で、前者の方が約 11% アークコンダクタンスが低い。

図8は、初期電流値 20A から $di/dt=0.525\text{A}/\mu\text{s}$ で電流が

図7. アークコンダクタンスの時間的変化
Fig.7. Transient behavior of the arc conductance at $X_p=50\%$ ($P=0.1\text{MPa}$, $I=20\text{A}$, $di/dt=0.525\text{A}/\mu\text{s}$).

減衰した場合のアーク電界の時間依存性を示したものである。同図より、プラスチック蒸気が混入した場合、 $t=10\sim 38\mu\text{s}$ の消弧時間域で純粋な空気よりも高い値を示している。さらに、プラスチックの中でも組成に酸素を含有していないものの方が含有しているものよりも電界が高く、すなわち、同一電流に対し酸素を含有していないものの方がアーク電圧が高くなることを示している。これは、図7に示したアークコンダクタンスの時間変化と対応しており、プラスチック蒸気が混入した方が、導電性が低く、電界が高い過渡アーク状態が実現されていることを示す。また、 SF_6 の場合、全体的に他の媒体と比較して低電界であることが分かる。

図8. アーク電界の時間的変化
Fig.8. Transient behavior of the electric field of arc ($P=0.1\text{MPa}$, $I=20\text{A}$, $di/dt=0.525\text{A}/\mu\text{s}$).

〈3・4〉 アーク導電半径

式(3)で表される全電流 I の90%が流れる半径位置をアークの導電半径と定義し、各媒体についてアーク導電半径の時間依存性を比較したものが図9である。さらに、プラスチック蒸気混入率によるアーク導電半径の依存性を明確にするため、同図には混入率90%の結果についても図示してある。同図より、 $t=0$ の定常状態におけるアークの導電半径は、プラスチック蒸気が90%混入した場合5種類の平均で0.90mmと最も細く、次いで、混入率50%の1.04mm、PTFE蒸気混入の1.35mm、 SF_6 の1.49mm、空気の1.61mmの順である。すなわち、プラスチック蒸気の混入によりアーク導電半径は、空気の場合と比較すると混入率90%で約1/2に、混入率50%で約2/3に収縮し、混入率の増加と共に細くなる。さらに、プラスチック蒸気混入率50%の場合、 $t=8\mu\text{s}$ 以降に導電半径は増加傾向となるが、一方、混入率90%の場合、電流の減衰に比例して常にアーク導電半径は減少する。すなわち、プラスチック蒸気混入率の増加によりアーク導電半径は顕著に収縮することが分かる。これは、プラスチック蒸気混入率90%の場合、混入率50%の場合よりも熱伝導率の極大値の増大とアーク温度の低下が強調されるためである。

また、プラスチック蒸気混入率90%で $t=0$ の場合、アーク導電半径は酸素を含有していないポリブチレンの場合0.86mm、酸素を含有しているポリメチルメタクリレートの場合0.91mm、 $t=36\mu\text{s}$ ではそれぞれ0.75mm、0.79mmとプラスチックの組成に酸素を含有していないものの方が含有しているものよりもアーク導電半径が細いことが分かる。なお、消弧性能が高いとされる SF_6 もプラスチック蒸気混入率90%の場合と同様、時間の経過と共に常に導電半径が減少する傾向を示している。具体的には、 $t=0$ では1.49mmであったのが、 $t=36\mu\text{s}$ では1.42mmと定常状

図9. アーク導電半径の時間的变化

Fig.9. Transient behavior of the current conducting radius ($P=0.1\text{MPa}$, $I=20\text{A}$, $d/dt=0.525\text{A}/\mu\text{s}$).

態の95%程度に導電半径が収縮している。

“消弧性能”には、一般的に高温アークを冷却する能力と消弧後の絶縁耐力を素早く回復させるという二つの性能が含まれる。すなわち、アーク導電半径が細いと冷却速度は速いが、直ちに“消弧性能”が優れているとは言えない。消弧性能が高いとされる SF_6 は、後者、すなわち、電流零点後の電界印加時における絶縁回復特性が、他の媒体と比較して特に優れていることが知られている。

4. まとめ

低圧機器で通常使用されている5種類のプラスチック材料が、空気に蒸気として混入した場合の導電率、熱伝導率及びその他の熱力学物性を圧力0.1MPa、プラスチック蒸気混入率50%の場合について熱平衡を前提として理論的に算出した。また、これらのデータを用いて局所熱平衡の仮定の下で器壁安定化アークの過渡特性を計算し、空気、 SF_6 及びPTFE蒸気混入の計算結果と比較した。以下、本論文で得られた主要な結果を要約する。

(1) 各種プラスチック蒸気が混入した空気の導電率 σ は、7,000K以下の温度領域では純粋な空気の場合より、さらに、4,000~12,000Kの温度領域では SF_6 の場合より顕著に低下する。これは、空気中に含まれる酸素原子の絶対量と5,000K以下の低温度領域におけるC原子の安定性により、電子の供給源である $\text{NO} \leftrightarrow \text{NO}^+ + e$ の電離反応がプラスチック蒸気混入率の増加と共に減少するためである。特に、この傾向はプラスチックの組成に酸素原子を含有していないものの方が顕著であり、例えば、 $T=5,000\text{K}$ の場合、空気では30S/mであるが、組成に酸素原子を含有していないポリメチルペンテンの場合9.5S/m、酸素原子を含有しているポリメチルメタクリレートの場合13.9S/mである。

(2) プラスチック蒸気の混入により熱伝導率 κ は、純粋な空気の場合より全体として高くなる。特に、3,600Kにおける極大値は、空気の約3倍となる。これは、 H_2 、 OH の解離により反応熱伝導率が増加するためである。

(3) 器壁安定化空気アークの温度は、プラスチック蒸気が混入することにより導電半径がかなり収縮し、電流零点に向かってより速く低下する。具体的には、アーク中心温度は $t=0$ の時、空気、10,460K、ポリブチレン蒸気混入、11,600Kであったのが、 $t=100\mu\text{s}$ でそれぞれ6,540K、5,720Kとプラスチック蒸気を混入した方が1.5倍程度減衰割合が大きい。

(4) アークコンダクタンス G は、プラスチック蒸気混入の場合、 $t=40\mu\text{s}$ で空気の約半分であり、これは SF_6 と比較しても低い。これに起因して、プラスチック蒸気混入はアークコンダクタンスを速く低下させる効果を有する。従って、プラスチック蒸気が混入した場合、アーク温度分布形状の速い変化により、アークの導電半径が絞られ、純粋な空気よりも高い遮断性能を有する可能性がある。

(平成11年6月24日受付、同11年10月12日再受付)

【 文 献 】

- [1] 作田忠裕・桑野明弘・加藤紀光・石川雅之：「SF₆ガス遮断器アーク特性の解明」，電気学会開閉保護装置研究会資料，SPD-91-16，p.99~108，(1991年6月)
- [2] 作田忠裕・寺地進・高嶋武・石川雅之：「銅およびPTFE蒸気混入を加味した高圧力・高温 SF₆ ガスの輸送特性」，電気学会論文誌 B，Vol.113-B，No.4，p.342~350，(1993年4月)
- [3] 作田忠裕・鬼頭幸生・宮地巖：「銅蒸気が混入した高温空気の導電率・熱伝導率およびエンタルピー」，電気学会論文誌 A，Vol.101-A，No.4，p.241~248，(1981年4月)
- [4] 鬼頭幸生・作田忠裕・杉山修一：「アルミニウム蒸気が混入した高温空気の導電率・熱伝導率およびエンタルピー」，電気学会論文誌 A，Vol.102-A，No.1，p.49~54，(1982年1月)
- [5] 作田忠裕・鬼頭幸生・宮地巖：「銅蒸気混入による器壁安定化空気アークの電界の強さの低下」，電気学会論文誌 A，Vol.100-A，No.4，p.181~188，(1980年4月)
- [6] 加藤昌浩・田中康規・横永康伸・松村年郎：「水蒸気が混入した空気アークの電界の強さ-電流特性」，電気学会開閉保護・高電圧合同研究会資料，SP-96-74，HV-96-146，p.121~130，(1996年10月)
- [7] K. C. Paul, T. Sakuta & T. Takashima : "Transport and Thermodynamic Properties of SF₆ Gas Contaminated by PTFE Reinforced with Al₂O₃ and BN Particles", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.25, No.4, p.786~798, (1997)
- [8] 大野英之・長縄廣司・作田忠裕・鬼頭幸生：「PTFE分解ガス混入アーク中の輸送特性」，電気学会開閉保護装置研究会資料，SPD-89-13，p.11~20，(1989年6月)
- [9] 伊藤裕幸・小林正・作田忠裕：「各種プラスチック蒸気が混入した空気アークの粒子組成」，平成10年電気学会電力・エネルギー部門大会，No.494，(1998年8月)
- [10] 伊藤裕幸・作田忠裕・小林正：「空気アーク中の電子密度に及ぼすプラスチック蒸気混入の影響」，平成10年度電気関係学会東海支部連合大会，No.145，(1998年9月)
- [11] 作田忠裕・鬼頭幸生・宮地巖：「銅蒸気混入による高温空気中の電子密度の増大」，電気学会論文誌 A，Vol.98-A，No.4，p.209~214，(1978年4月)
- [12] J. M. Yos : "Transport Properties of Nitrogen, Hydrogen, Oxygen, and Air to 30,000°K", Research and Advanced Development Division AVCO Corporation, Technical Memorandum, RAD-TM-63-7, (1963)
- [13] A. A. Abrahamson : "Born-Mayer-Type Interatomic Potential for Neutral Ground-State Atoms with Z=2 to Z=105", Physical Review, Vol.178, No.1, p.76~79, (1969)
- [14] L. Monchick : "Collision Integrals for the Exponential Repulsive Potential", The Physics of Fluids, Vol.2, No.6, p.695~700, (1959)
- [15] K. S. Yun & E. A. Mason : "Collision Integrals for the Transport Properties of Dissociating Air at High Temperatures", The Physics of Fluids, Vol.5, No.4, p.380~386, (1962)
- [16] J. O. Hirschfelder, C. F. Curtiss & R. B. Bird : "Molecular Theory of Gases and Liquids", p.168, (1954), John Wiley & Sons
- [17] D. Rapp & W. E. Francis : "Charge Exchange between Gaseous Ions and Atoms", The Journal of Chemical Physics, Vol.37, p.2631~2645, (1962)
- [18] K. C. Paul, T. Sakuta, T. Takashima & M. Ishikawa : "The dynamic behaviour of wall-stabilized SF₆ arcs contaminated by Cu and PTFE vapours", J. Phys. D: Appl Phys., 30, p.103~112, (1997)
- [19] 伊藤裕幸・作田忠裕・小林正：「各種プラスチック蒸気が混入した器壁安定化空気アークの減衰特性」，電気学会開閉保護・高電圧合同研究会資料，SP-99-67，HV-99-73，p.31~37，(1999年6月)
- [20] S. V. Patankar : "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", New York, (1980), Hemisphere
- [21] 高橋正文・畑澤重則・K. C. Paul・作田忠裕：「SF₆・N₂大気圧誘導プラズマの分光学的特性」，電気学会開閉保護・高電圧合同研究会資料，SP-98-28，HV-98-37，p.7~12，(1998年6月)
- [22] Thomas E. Browne, Jr. : "Circuit Interruption, Theory and Techniques", p.153, (1984), Marcel Dekker, INC.

伊藤 裕幸

(正員) 1969年1月17日生。93年3月名城大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月日東工業(株)入社。98年4月金沢大学大学院自然科学研究科博士後期課程入学、現在に至る。主として漏電遮断器および配線用遮断器に関する研究に従事。

作田 忠裕

(正員) 1950年1月3日生。80年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了。同年4月同大学工学部助手。88年4月金沢大学工学部電気情報工学科助教授、94年1月同学部教授、現在に至る。主として高気圧熱プラズマアークの診断、応用研究に従事。工学博士。IEEE会員。

小林 正

(正員) 1949年10月15日生。74年3月信州大学大学院工学研究科修士課程修了。75年10月日東工業(株)入社。現在、技術部部長。主として半導体電力変換装置、漏電遮断器および配線用遮断器に関する研究に従事。