

論 文

高温空気中のコロナ放電特性

出口 義博*, 鈴木俊男*, 杉本 勉*

(1983年2月2日受理)

Corona Discharge Characteristics in High Temperature Air

Y. DEGUCHI,* T. SUZUKI* and T. SUGIMOTO*

(Received February 2, 1983)

This study reports the experimental results of corona discharge features, current characteristics and flashover voltage under normal air conditions from atmospheric temperature up to 500°C by using various sets of discharge electrodes. The main conclusions are as follows; 1) There exists the optimum spacing of discharge electrode which gives the maximum corona current. 2) The generalized expression of corona current is proposed for a various sets of the electrode configuration. 3) Flashover voltage of negative polarity is usually higher than that of positive polarity and they have a tendency to decrease proportionally to relative air density with an increase of the gas temperature. In some case, especially at high temperature, positive polarity flashover voltage shows peculiar features which come from the change of discharge phase and should be taken in account at the decision of the gas temperature for coal burning ESP. 4) There is the possibility that the operation of electrostatic precipitators with positive DC voltage would give higher efficiency than that with negative one in high temperature.

1. まえがき

近年、脱石油に対する一方策として石炭火力の導入が推進されており、それに伴って電気集塵装置（以下 EP と略記する）の性能向上が要望されている。さらに、ガス温度による低温運転（約 150°C）と高温運転（約 400°C）の選択も緊急の課題となっている。

EP 中の放電現象の研究は歴史が古く、内外で実験的にも理論的にも数多く検討されてきた¹⁻⁴⁾。しかし、これらの研究の中には、高温空気中についての報告がいくつかあるものの^{5,6)}、その大半は常温ガスを対象としたものであり、実際の EP は半経験的に設計、運転されているのが現状である。

本論文は、高性能 EP を開発するために、EP 中の放電現象を基礎的に解明することを目的とした実験研究の結果である。常温から 500°C までの清浄空気中において放電極の形状やその配置による、コロナ開始電圧、コロナ電流、フランシオーバ電圧等の放電特性を実験的に検討し、コロナ電力から見た集塵効率により、正極性運転

の可能性を考察したものである。

2. 実験の装置と方法

実験回路を図 1 に示す。実験は先端半球棒（単独）対平板ギャップの垂直電極系と、線対平板ギャップの平行電極系について行なった。垂直電極系の場合、放電極は先端の曲率半径 (r) が 2.5 mm と 5.0 mm の半球棒と半径 50 mm の球を使用し、平板電極は 80×80 cm の正方形で、周囲は曲率半径 50 mm で湾曲させてある。また、平行電極系は、図 2 に示すように 2 枚の平行平板（EP の集塵極に相当）とその中央に平板電極と平行に設置された放電極とから構成される。平板電極の大きさは 30×80, 25×84, 10×84 ($L_v \times L_h$) cm の 3 種類を、放電極には 5 mmφ の丸棒 (CR electrode) と、5 mmφ の丸棒に太さ 1 mmφ、長さ 3.5 mm の針を 35 mm 間隔に十文字型に取り付けた針付棒 (CRN electrode) の 2 種類を使用した。

実験装置は、容器内温度を常温から 500°C まで任意に設定できる、容積 1 m³ の高温容器の中に上記電極系を設置した。容器の側面には 1 対の観測窓があり、コロナ放電形態を観測するために、この窓にビデオカメラと静止カメラを設置した。放電極と平板電極はそれぞれ容器と絶縁し、コロナ電流とブッシングのもれ電流等による

* 電力中央研究所 (201 猪江市岩戸北 2-11-1)
Central Research Institute of Electric Power Industry, 11-1, Iwato-kita 2-chome, Komae, 201 Japan

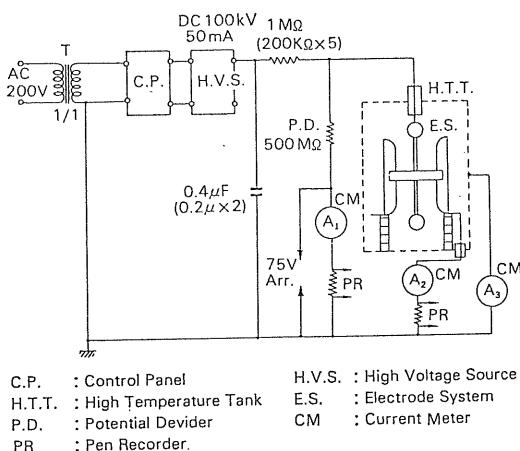


図1 実験回路

Fig. 1 Experimental circuit.

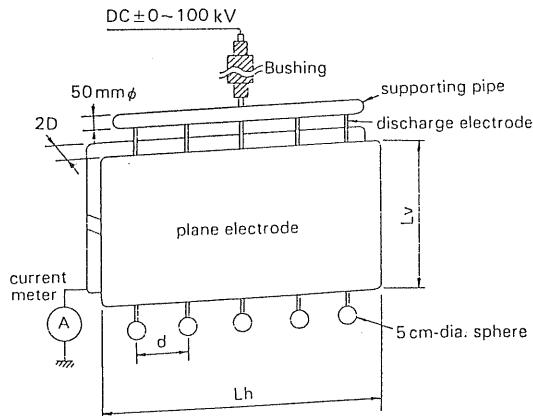


図2 電極装置

Fig. 2 Electrode system.

容器のケース電流とを分離して測定した。

平行電極系の放電極は、5cm 間隔で 13 個の穴を有する支持パイプに、所定の間隔 (d)、本数 (n) に吊り下げた。各放電極の先端には半径 25 mm、重さ約 0.5 kg の球を取り付け放電極の振れ防止と先端からのコロナ発生を防止した。以上の両電極系の材質はすべてステンレス製である。

電流の測定は、電圧をゼロから上昇させることにより、コロナ開始からフラッシュオーバ直前まで測定した。コロナ開始電圧とフラッシュオーバ電圧は 3 ~ 5 回の測定から平均値を求めた。

3. 実験結果

3.1 コロナ放電形態の概要

定量的な結果を述べる前に、実験中に観測されたコロ

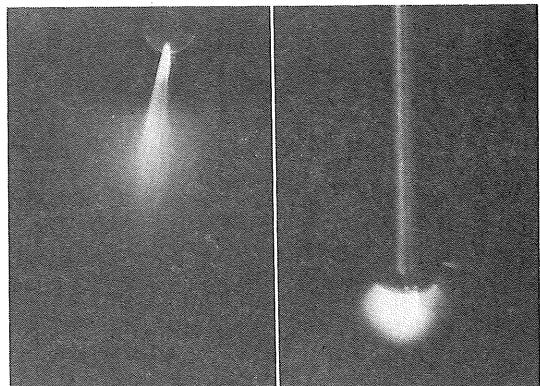
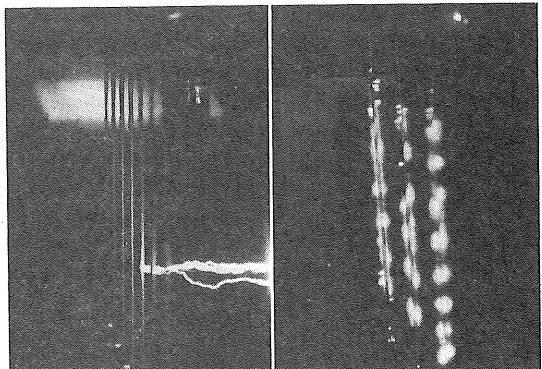
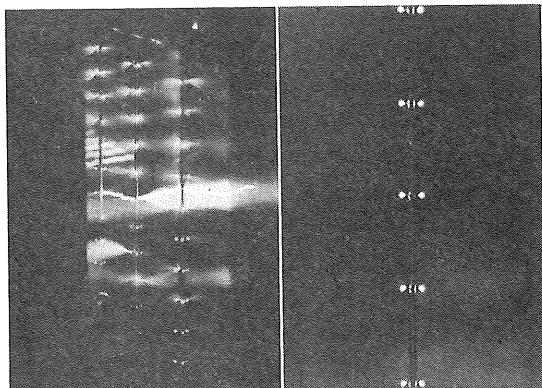
(a) $r=5 \text{ mm}$ rod, $L=17 \text{ cm}$ (b) $r=5 \text{ mm}$ rod, $L=17 \text{ cm}$
 Voltage : Pos. 92 kV Voltage : Neg. 60 kV(c) CR electrode
 $2 D=25 \text{ cm}, d=10 \text{ cm}, n=7, T=25^\circ\text{C}$
 Voltage : Pos. 78.5 kV (d) CR electrode
 $2 D=25 \text{ cm}, d=20 \text{ cm}, n=3, T=25^\circ\text{C}$
 Voltage : Neg. 90 kV(e) CRN electrode
 $2 D=25 \text{ cm}, d=30 \text{ cm}, n=3, T=25^\circ\text{C}$
 Voltage : Pos. 73 kV (f) CRN electrode
 $2 D=25 \text{ cm}, n=1, T=25^\circ\text{C}$
 Voltage : Neg. 100 kV

図3 コロナ放電の形態

Fig. 3 Corona and flashover features.

ナ放電の形態について簡単に述べる。

垂直電極系、および平行電極系の丸棒電極において、

正極性電圧を順次上昇させてゆくと、ある電圧でコロナ放電が開始されるが、このときのコロナはプラン状のコロナである。このプラン状コロナから直接フラッシュオーバーする場合もあるが、フラッシュオーバーしないときには、さらに電圧を上昇させるとプラン状のコロナは消え、電極表面を覆うような膜状のコロナが現われる。この膜状コロナはフラッシュオーバーまで続くが、電圧上昇中にこの膜状コロナと同時にプランコロナが発生する場合がある（図3(a)）。このプランコロナからストリーマが伸展し陰極に到達してフラッシュオーバーを引き起こす（図3(c)）。この初期のプランコロナが発生している領域をA領域、膜状コロナに変わってからをB領域と仮称する。負極性電圧を印加した場合は、放電極に発生するグロー放電のプランコロナが発生と消滅を繰り返し、あたかもコロナが動き回っているように見える（図3(b)、(d)）が200°C以上の高温になると、このプランコロナが数箇所に集中して静止する現象を観測した。また、丸棒電極に正極性電圧を印加したとき、温度が200~300°C程度で、電極間隔がある条件を満足すると、プランコロナもしくは膜状コロナからほっすコロナになる場合がある。

針付棒電極の場合には、正極性電圧を印加すると、コロナ開始時に針先からプランコロナが発生し、電圧の上昇に伴ってその長さは長くなり、対極に到達してほっすコロナになる。さらに電圧を上昇させると、このほっすコロナの発生している針先からストリーマが伸び出し平板との間でフラッシュオーバーが起きる（図3(e)）。高温時には針電極と対応する平板上にプラン状のアーススポットが現われる場合がある。また、負極性電圧を印加した場合には、コロナ開始時に針先からグローコロナが発生し、電圧を上昇させても輝度は強くなるが長さはあまり長くならず、そのままフラッシュオーバーへ移行する（図3(f)）。

3.2 コロナ開始電圧

コロナ開始電圧 (V_c) は、コロナ放電特性の重要なパラメータである。本実験においては、平板電流が暗流から急増したとき（約 0.5 μA 以上）の電圧をもってコロナ開始電圧とした。

図4に容器内温度とコロナ開始電圧の関係を示す。コロナ開始電圧は温度が上昇するに従って低下する。図に示した曲線は、常温時の値を基準に、相対空気密度 δ の関数としてコロナ開始電圧 (V_c) を試算したものであるが、次式が成立することがわかる。

$$V_c \propto \delta^\alpha \quad (1)$$

ただし、 $\delta = 0.386 \times P / (273 + T)$ 、 P は圧力 (mmHg)、 T は温度 (°C)、 $\alpha = 3/4$ (丸棒電極)、 $1/2$ (針付棒電極)。

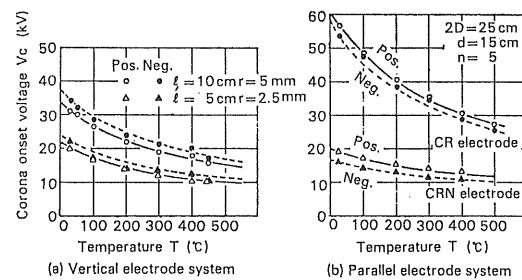


図4 温度とコロナ開始電圧の関係

Fig. 4 Corona onset voltage as a function of temperature.

現在までに、0~200°Cの温度範囲については、コロナ開始電圧は相対空気密度と密接な関係があるとの報告がある⁵⁾。また、ギャップ中の静電界分布がわかっているときのコロナ開始電圧は、空間電荷効果を導入したストリーマ理論から計算できることも報告されている⁷⁾。図4の(a)、(b)の丸棒電極の曲線は、後者の理論計算の結果とほぼ等しい。

3.3 コロナ電流

垂直電極系および平行電極系における、常温から高温（約 500°C）までの結果の一例を図5から図7に示す。

これら印加電圧とコロナ電流の特性から得られた常温時の基本的な結果は、次のとおりである。

垂直電極系におけるコロナ電流は、

- i) 印加電圧の上昇に伴って増加し、同一電圧に対しては、ギャップ長が大きいほど小さい。
- ii) 正極性より負極性のほうが大きい。
- iii) 電極半径の大きいほうが、半径の小さいものに比べて印加電圧によるコロナ電流の増え方が大きい。

平行電極系においては、上述 i) ~ iii) のほかに

- iv) 放電極の間隔が一定のときには、その本数に比例

して増加する（図8）。

- v) 放電極の本数が一定のときには、その間隔が広くなるほど増加するが、その増加の割合は、間隔が広くなるに従って飽和する。

上述の iv) と v) より、放電極を配置するスペースが一定とすれば、放電極間隔とその本数はコロナ電流の大きさに対し、相反する影響を与えることになる。そこで、平板間隔を 25 cm 一定とし、放電極の本数と間隔を変化させてコロナ電流を測定した。結果を図9に示す。これによれば、コロナ電流が最大となる最適電極間隔は丸棒電極で 15~20 cm、針付棒電極で約 10 cm と推定できる。

さらに、図5~図7から、温度の関数としてコロナ電流をプロットすると図10が得られる。同図より、垂

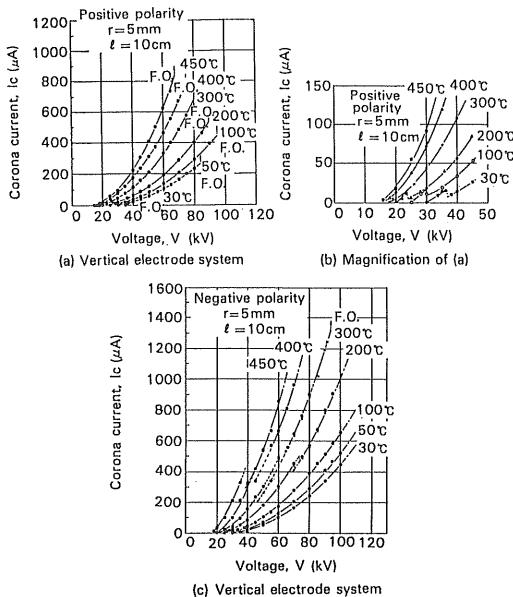


図5 印加電圧および温度とコロナ電流の関係
垂直電極系： $r=5\text{ mm}$ 半球棒

Fig. 5 Corona current from rod-plane as a function of voltage and temperature.

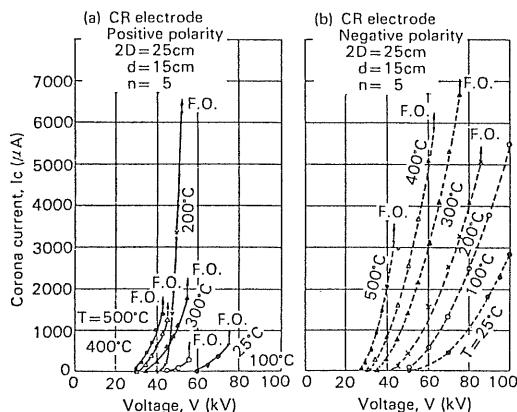


図6 印加電圧および温度とコロナ電流の関係
平行電極系：丸棒電極

Fig. 6 Corona current from cylindrical electrodes (CR) as a function of voltage and temperature.

直、平行両電極系とともにコロナ電流は温度の上昇に従ってほぼ指數関数的に増加することがわかる。

また、図5(b)の電流がいったん減少する不連続点は3.1節で述べたコロナがA領域からB領域に移行する点であり、図6(a)の200°Cで電流が急増しているのは、丸棒電極ではすっコロナになった場合である。

次に、常温から約500°Cまでの温度変化に対するコロ

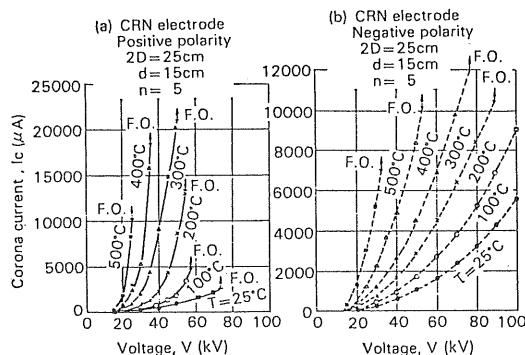


図7 印加電圧および温度とコロナ電流の関係

平行電極系：針付棒電極

Fig. 7 Corona current from cylindrical electrodes with needles (CRN) as a function of voltage and temperature.

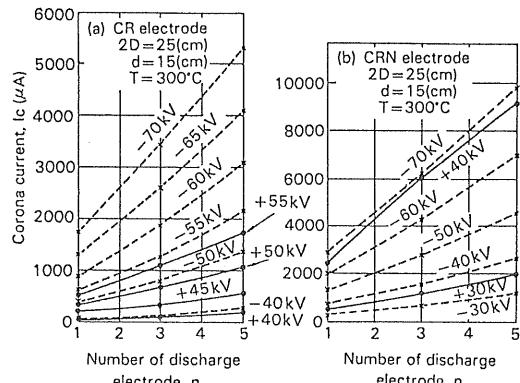


図8 放電極本数とコロナ電流の関係

Fig. 8 Relation between corona current and the number of the discharge electrode.

ナ電流の実験式を導入する。

垂直電極系の負極性の場合は、図5(c)から

$$I = AV(V - V_0) \quad (2)$$

という Warburg の式¹⁾が成立する結果が得られた。ただし、 V_0 はコロナ開始電圧 (V_c) である。 A は温度 (T) とギャップ長 (L) の関数であり、

$$A = A_0 \cdot L^{-a} \cdot \exp(b \cdot T) \quad (3)$$

と表わすことができる。ただし、 A_0 、 a 、 b は放電極先端の曲率半径の大きさによって決まる定数で表1の値をとる。したがって(3)と(2)式より垂直電極系に対する次の実験式が得られる。

$$I = A_0 \cdot \exp(b \cdot T) \cdot L^{-a} \cdot V(V - V_c) \quad (4)$$

正極性の場合には、(2)式よりも

$$I = K(V - V_c)^m \quad (5)$$

のほうが近似度が高いが、同式の K 、 m を量化する

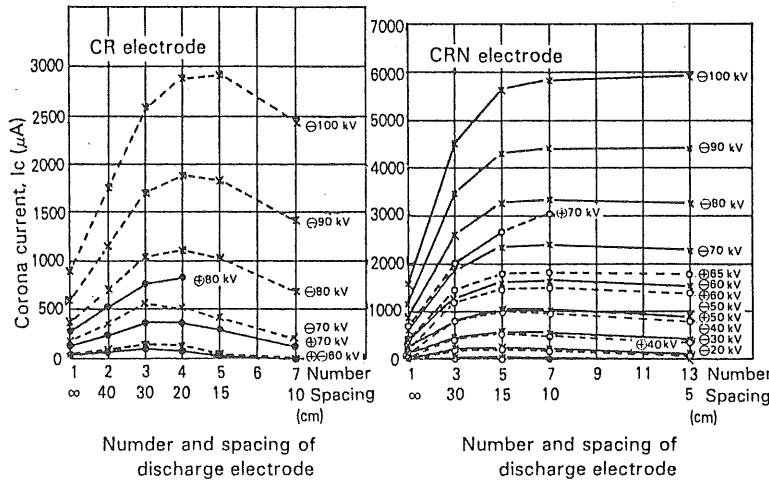


図9 放電極の本数および間隔とコロナ電流の関係

Fig. 9 Corona current as a function of number and spacing of discharge electrode.

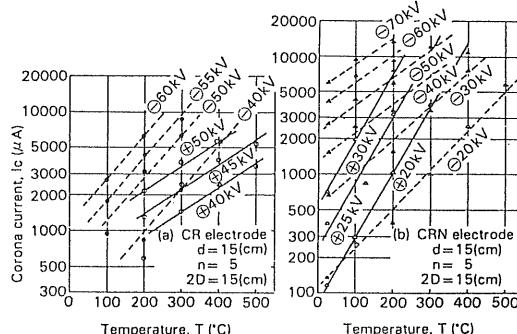


図10 温度とコロナ電流の関係

Fig. 10 Corona current as a function of temperature.

表1 コロナ電流実験式の定数（垂直電極系）

Table 1 Constants for corona current (vertical electrode system).

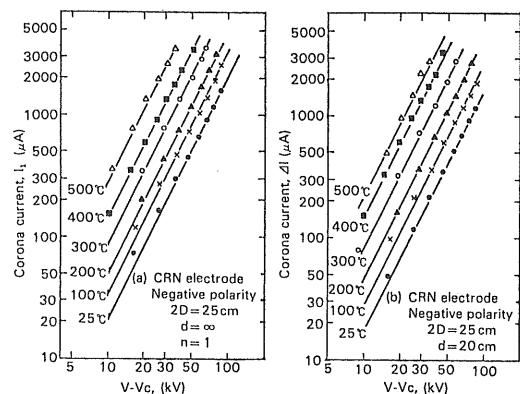
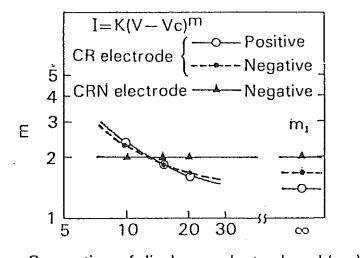
r (mm)	A_0 (A/kV^2) ^a	b	n
5.0	2.29	4.18×10^{-3}	1.80
2.5	1.28	4.52×10^{-3}	1.40

までには至らなかった。

平行電極系のコロナ電流は、放電極の本数に比例して増加する(図8)。したがって放電極の本数を n , $n = 1$ のときの電流を I_1 , 1本増えたときの電流の増加率を ΔI とすれば、 n 本のときのコロナ電流 I_n は

$$I_n = I_1 + \Delta I(n-1) \quad (6)$$

となる。温度をパラメータにして $(V - V_c)$ の関数として I_1 と ΔI を示した例が図11である。図からわかる

図11 コロナ電流 (I_1 , ΔI) の特性Fig. 11 Corona current from cylindrical electrodes with needles (CRN) as a function of $(V - V_c)$.図12 放電極間隔と定数 (m , m_1) の関係Fig. 12 Constants of m and m_1 as a function of the separation of discharge electrodes.

ように、平行電極系のコロナ電流は印加電圧に対し(5)式の形で表わすことができる。ここで m は温度に無関係な定数であり、放電極間隔 (d) によって図12の値を

表2 コロナ電流実験式の定数 (平行電極系)

Table 2 Constants for corona current (parallel electrode system).

Discharge electrode	Polarity	$K_1 (\times 10^{-2})$	$K_0 (\times 10^{-8})$	a	$b (\times 10^{-3})$
Cylindrical rod	Positive	12.83	8.53	4.38	2.52
	Negative	4.73	8.53	4.38	3.63
Cylindrical rod with needles	Negative	0.60	33,300	0.91	5.50

とる。また、 K は温度 (T) と (d) との関係として

$$K = K_1 \exp(b \cdot T) \quad (7)$$

$$K_1 = K_0 d^a \quad (8)$$

で表わすことができる。ここで K_1 , K_0 , a , b の値は表2のとおりである。

そこで(7)式を(5)式に代入すると、放電極1本の場合のコロナ電流式

$$I_1 = K_1 \exp(b \cdot T) \cdot (V - V_c)^m \quad (9)$$

が得られ、(8)と(7)式を(5)式に代入すると放電極が1本増加したときの増加分

$$\Delta I = K_0 \exp(b \cdot T) \cdot d^a \cdot (V - V_c)^m \quad (10)$$

が得られる。そこで(9)と(10)式を(6)式に代入することにより、放電極 n 本のコロナ電流の式が得られる。さらに、この式にコロナ電流が放電極の有効長 (L : 放電極が平板電極より長いときには平板電極の縦方向の長さ) に比例する結果を加えると、平行電極系のコロナ電流は次式で表わすことができる。

$$I_n = \exp(b \cdot T) \{ K_1 (V - V_c)^{m_1} + (n-1) K_0 d^a (V - V_c)^m \} L \quad (11)$$

ただし、 m_1 , m は図12に示す定数。 K_1 , K_0 , a , b は表2に示す定数。 V_c は(1)式によるコロナ開始電圧。 L は放電極の有効長。

なお、上式は平板間隔 ($2D$) が 25cm, 放電極間隔 (d) が 10~20cm の場合で、丸棒電極の半径 2.5mm, 針付棒電極の針の取付間隔 35mm, 針の長さ 3.5mm に対する実験式であり、高温時の放電形態の変化によってコロナ電流が急増する正極性電圧に対する針付棒電極の場合には成立しない。

3.4 フラッシュオーバ電圧

図13および図14に垂直電極系における容器内温度とフラッシュオーバ電圧の関係を示す。図には常温の値を基準にして δ 補正による推定値を併示した。これらの図より次の結果が得られる。

- 平行電界に近いギャップのフラッシュオーバ電圧は、温度の上昇により低下し、 δ 補正值と非常によく一致する(図13)。
- 不平等電界ギャップのフラッシュオーバ電圧は、負極性では温度の上昇により低下するが、 δ 補正值と

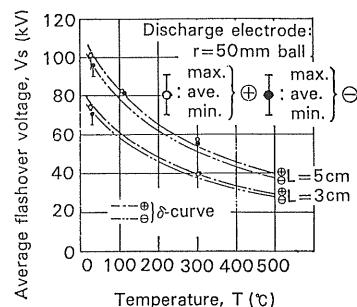


図13 溫度とフラッシュオーバ電圧の関係 (準平等電界)

Fig. 13 Flashover voltage as a function of temperature in quasi-uniform field (ball-plane gap).

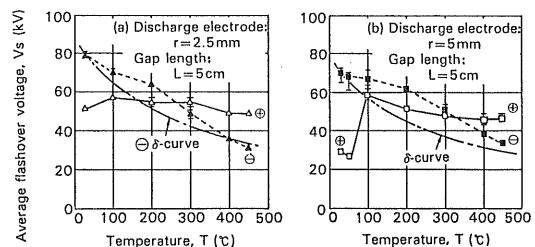


図14 溫度とフラッシュオーバ電圧の関係 (不平等電界)

Fig. 14 Flashover voltage as a function of temperature in non-uniform field (rod-plane gap).

は一致しない。また、正極性では常温付近で極端に低く、100°C 以上で急にジャンプし、その後 500°C 近くまであまり変化しない場合(図14(b))と常温から 500°C 付近までほぼ一定の値を示す場合がある(図14(a))。この現象は放電形態に関係し、前者の低い値はA領域のプラシコロナからフラッシュオーバしたものであり、前者のジャンプ後の値と後者の値はB領域の膜状コロナになってからフラッシュオーバしたものである。

図15と図16に平行電極系における容器内温度とフラッシュオーバ電圧の関係を示す。図には、常温または100°C を基準にして δ 補正による推定値を併示した。これらより次の結果を得る。

- 丸棒電極の場合、負極性では温度の上昇によりフ

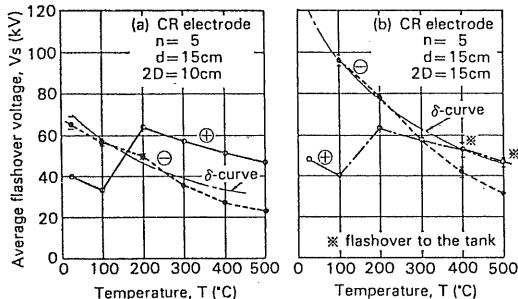


図 15 溫度とフラッシュオーバ電圧の関係(丸棒電極)

Fig. 15 Flashover voltage as a function of temperature in cylindrical rods (CR)-plane gap.

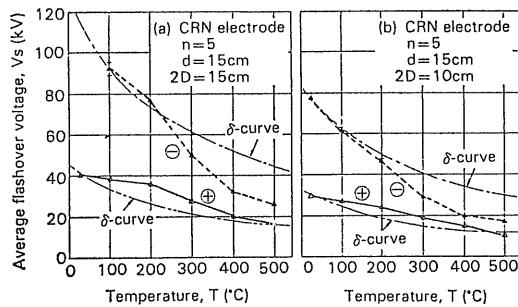


図 16 溫度とフラッシュオーバ電圧の関係(針付棒電極)

Fig. 16 Flashover voltage as a function of temperature in cylindrical rods with needles (CRN)-plane gap.

ラッシュオーバ電圧は低下する。しかし、正極性では常温から 100°C に比べ 200 から 500°C のフラッシュオーバ電圧は極端に高くなる。これは基本的に垂直電極系の正極性の場合と同じで、常温から 100°C まではA領域のプラシコロナから、 200 から 500°C ではB領域の膜状コロナになってからフラッシュオーバしたときの値である。

ii) 針付棒電極の場合、正、負両極性ともに温度の上昇によりフラッシュオーバ電圧は低下する。また、 δ 補正の推定値と比較すると、負極性では温度が 300°C 以上になると実測値のほうが低くなり、この傾向は温度が高いほど著しい。

以上より、空気中の温度とフラッシュオーバ電圧の関係については、平等および準平等電界中では常温の測定値から高温時の値を δ 補正により推定することが可能であるが、不平等電界中では推定することはできない。とくに正極性の場合にはコロナ放電の形態の相違によりフラッシュオーバ電圧に大きな差が生じる。

3.5 コロナ電力

電気集塵装置の集塵効率(η)は、一般的に次式で表わ

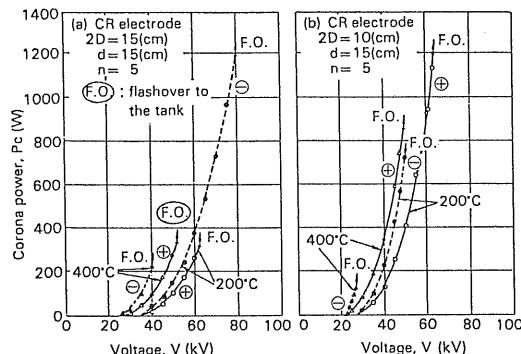


図 17 溫度によるコロナ電力の相違(丸棒電極)

Fig. 17 Corona power as a function of temperature for cylindrical rods electrodes.

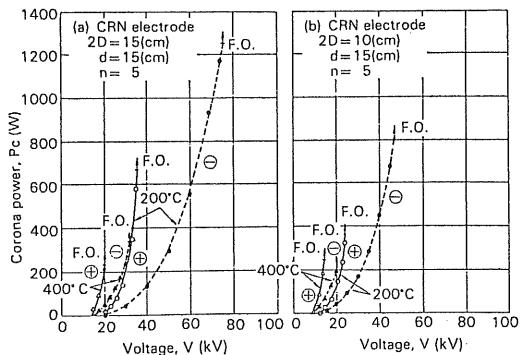


図 18 溫度によるコロナ電力の相違(針付棒電極)

Fig. 18 Corona power as a function of temperature for cylindrical rods with needle electrodes.

される³⁾。

$$\eta = 1 - \exp [(-A/v)w] \quad (12)$$

ここで、 A 、 v 、 w はそれぞれ実効集塵面積、ガス流速、粒子移動度であり、 w は経験的にコロナ電力($P_c = V \cdot I_c$)に比例することが知られている。

$$w = K(P_0/A) \quad (13)$$

すなわち集塵効率はコロナ電力が大きいほど高いことになる。

図 17 と図 18 は平行電極系の丸棒電極と針付棒電極の、 200°C と 400°C におけるコロナ電力を示したものである。これらより、高温電気集塵装置に関して次のことがいえると考えられる。

i) 丸棒電極の場合

同一運転電圧に対するコロナ電流は、負極性のほうが正極性よりも大きく、本質的には負極性運転のほうが有利である。しかし、 300°C 程度以上の高温ではフラッシュオーバ電圧が負極性よりも正極性のほうが高くなり、正極性のほうがコロナ電力として大きくなる領域が存在す

る。

ii) 針付棒電極の場合

同一運転電圧に対するコロナ電流は正極性のほうが負極性より大きく、本質的に正極性運転のほうが有利である。しかし、フラッショーバ電圧は負極性のほうが正極性よりも著しく高いため ($T \approx 200^{\circ}\text{C}$ 附近)，通常は負極性運転が採用されている。しかし、正、負両極性のフラッショーバ電圧が接近してくるような高温 ($T \gtrsim 400^{\circ}\text{C}$) では、正極性運転のほうがコロナ電力として大きくなる領域が存在する可能性がある。

以上は清浄空気中の実験からの結果であり、今後燃焼ガスの入った実機規模での検討が必要であるが、石炭火力における高温集塵で正極性運転のほうが高い集塵効率が得られる可能性を示唆するものである。

4. 結論

本論文は、常温から 500°C までの高温中における、コロナ放電特性の結果と、それから導いたコロナ電流の実験式、さらにコロナ電力から検討した集塵効率について述べたものである。おもな結果は次のとおりである。

- 1) 放電極を配置するスペースが一定でコロナ電流を最大にするためには、放電極の形状に固有な最適放電極間隔が存在する。
- 2) 印加電圧、空気温度、電極形状が変化した場合のコロナ電流の実験式を導いた。
- 3) フラッシュオーバ電圧は、基本的には温度の上昇により低下するが、丸棒電極による正極性のフラッシ

オーバ電圧は、 100°C から 200°C 附近で急に高くなり、その後は 500°C まであまり低下しない。

4) 高温電気集塵装置では正極性電圧で運転するほうが集塵効率が上がる領域が存在する可能性がある。しかし、これは清浄空気中にて行なった実験結果であり、実用に際してはダストの入った状態での実験結果が必要である。著者らは今年度中に実機に近い規模で実証実験を行なう予定である。

最後に、本研究を実施するにあたり終始ご支援いただいた電力中央研究所所有の龍夫電力技術研究所長、同所瀬田泰助副所長に深く謝意を表します。また、卒業研究として実験に協力された相模工業大学卒論生の綿島義紀君に感謝します。

参考文献

- 1) E. Warburg : Ann. Phys. Folg. 3, 67 (1899) 69
- 2) P. Cooperman : Trans. Am. Inst. Electr. Eng., 75 (1956) 64
- 3) H.J. White : *Industrial Electrostatic Precipitation*, Addison-Wesley Publishing Co., Massachusetts (1963)
- 4) 羽野光夫, 足立宜良: 静電気学会誌, 4 (1980) 353
- 5) 赤崎正則, 原 雅則, 副島和昌, 宮島義昭: 放電研究会資料, No. ED-76-28, 電気学会 (1976)
- 6) C.C. Shale and J.H. Holden : IEEE Trans., IGA-5 (1969) 34
- 7) 新藤孝敏, 出口義博, 鈴木俊男: 電力中研報告, No. 181019 (1981)