

論 文

電子ビームを応用した電気集塵の模擬負荷装置

飯 島 歩*, 塚 本 哲 生*

(1987年3月24日受理)

Dummy Load Equipment with Similar Characteristics by Using
Electron Beam for Electrostatic Precipitator

A. IIJIMA* and T. TSUKAMOTO*

(Received March 24, 1987)

There has been no good dummy load for the testings of electrostatic precipitator (ESP) power supplies, owing to the difficulties in simulating the non-linearities of corona discharges under high voltage condition. The authors have developed a novel dummy load equipment using electron beam (EB). This equipment enables an excellent simulation of the $V-I$ characteristics of ESP's, with the simulated corona starting voltage easily controllable by changing grid bias-voltage of EB. Good agreements in both voltage and current waveforms with industrial ESP's are experimentally confirmed. This device would facilitate the off-site performance testings of ESP high-voltage power supplies.

1. まえがき

電気集塵装置の電圧、電流特性はコロナ放電による非線形となるため、従来は実用的な模擬負荷装置がなかった。そこで電気集塵用電源装置の開発、改良に際しては、便利的に高電圧用の抵抗器と並列に高電圧用コンデンサを接続して使用していた。この方法ではコロナ開始電圧に相当するような抵抗値が急速に変化するものが多く、かつ集塵負荷のような低い動作抵抗も得られないため、電源装置の試験条件が実際の使用状態と大きく異なり、満足な結果が得られなかつた。したがって社内試験をした後に実際の集塵装置を借用して、現場に電源装置を仮設置し、実負荷試験を実施していた。しかし、実負荷による試験は良い結果が得られる反面、借用の困難性と多額の経費と時間がかかっていた。

今回新しく電子ビームを応用した模擬負荷装置を試作し、電気集塵装置の負荷特性に似た特性が得られ、実用化のめどがついたので以下に報告する。

2. 電気集塵装置の負荷特性と等価回路

電気集塵装置は一般に放電極に負の高電圧を印加し、集塵極との間隙でコロナ放電を発生させている。コロナ放電の電圧・電流特性は指數関数的な非直線の特性を示すため、高压電源装置により負荷特性に適合した各種データを測定または予測することが困難である。また、電気集塵装置の構造および処理ガスの性状が変わると、コロナ放電特性が大幅に変化する。従来は、電気集塵装置の負荷を模擬する方法として、抵抗とコンデンサを並列に接続して使用していた。

図1に電気集塵装置のコロナ電圧・電流特性の一例を示し、模擬負荷として抵抗を使用したときの様子も表示している。同図から明らかなように同じ出力電圧・電流のP点で、電気集塵負荷と抵抗負荷では動作抵抗が異なり、電気集塵負荷の動作抵抗はかなり小さい値である。P点における電気抵抗 R_0 および動作抵抗 r_d は、 $\tan \theta_0$, $\tan \theta_d$ で表わせる。抵抗器とコンデンサによる方法では、電気集塵装置のようにコロナ開始電圧以下で電気抵抗値が無限大近くに変化しないため、集塵装置自身の静電容量とコンデンサの容量を大略同じ値にすると、単相全波整流波形の電圧を印加した場合、集塵装置に印加したときの波形よりもかなり脈動分の大きい波形となる。

したがって電気集塵装置に似た負荷特性で、直流高圧電源装置の各種の動作試験を行なうためには、コロナ開始電圧に相当する負荷特性が必要である。

電気集塵装置のコロナ電圧・電流特性は、実用範囲において利用できる近似式として(1)式に示すものがある¹⁾。

$$I = A(V - V_c)^B \quad (1)$$

I : コロナ放電電流 (mA), V : 印加電圧 (kV), V_c :

* オリジン電気株式会社 (171 東京都豊島区高田 1-18-1)
Origin Electric Co., Ltd., 18-1, Takada 1-chome,
Toshima-ku, Tokyo, 171 Japan

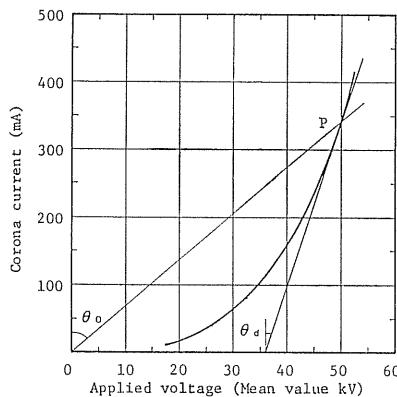


図 1 電気集塵装置のコロナ放電特性

Fig. 1 Corona V-I characteristics on electrostatic precipitator.

コロナ開始電圧 (kV), A, B : 電気集塵装置により決まる定数

したがって、電気集塵装置の電気抵抗 (R_0) は印加電圧により変化し、近似的に (1) 式より次式のようになる。

$$R_0 = V / \{A(V - V_c)^B\} \quad (2)$$

動作抵抗 (r_d) は印加電圧により変化し、近似的に次式で与えられる。

$$\begin{aligned} r_d &= dV/dI \\ &= 1 / \{AB(V - V_c)^{B-1}\} \\ &= (V - V_c)^{1-B} / AB \end{aligned} \quad (3)$$

図 1 に示したコロナ放電 V - I 特性を (1) 式に測定値として $V_c = 13, V_1 = 20, I_2 = 18, V_2 = 50, I_2 = 350$ を代入して算出すると (4) 式が得られる。

$$I = 0.561106(V - 13)^{1.78231} \quad (4)$$

(4) 式に示したコロナ放電 V - I 特性と動作抵抗 (r_d)

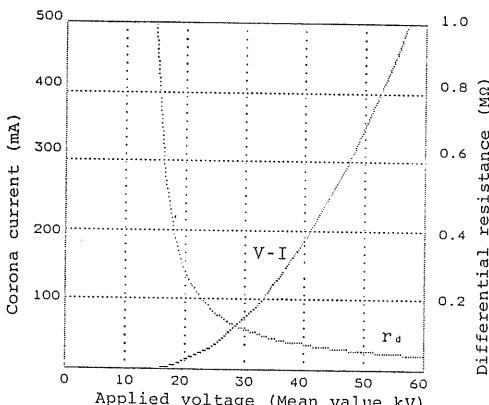


図 2 電気集塵装置のコロナ放電特性と動作抵抗

Fig. 2 Corona V-I characteristics and differential resistance on electrostatic precipitator.

を数値計算したものを図 2 に示す。同図から明らかなように動作抵抗は、印加電圧 15 kV で $0.975 \text{ M}\Omega$, 25 kV で $0.163 \text{ M}\Omega$, 35 kV で $0.089 \text{ M}\Omega$, 45 kV で $0.061 \text{ M}\Omega$, 55 kV で $0.047 \text{ M}\Omega$ になり、印加電圧の上昇とともに急速に低下していくことがわかる。

電気集塵装置の等価回路の一例を図 3 に示す²⁾。同図の定電圧ダイオード Z_n はコロナ開始電圧に相当し、 Z_n に直列に接続されている $Z_1 \sim Z_{n-1}$ と $R_2 \sim R_n$ の並列回路は、コロナ放電特性を折れ線で近似している。図 4 は図 3 に示した等価回路での負荷特性の一例を示すものであり、電気集塵装置のコロナ放電特性に似ていることが

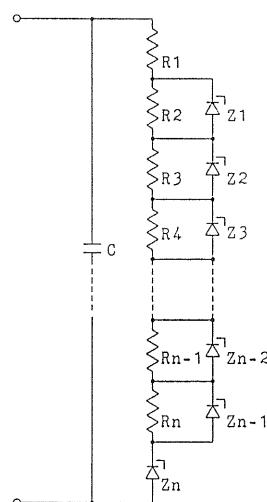


図 3 電気集塵装置の等価回路

Fig. 3 Equivalent circuit for electrostatic precipitator.

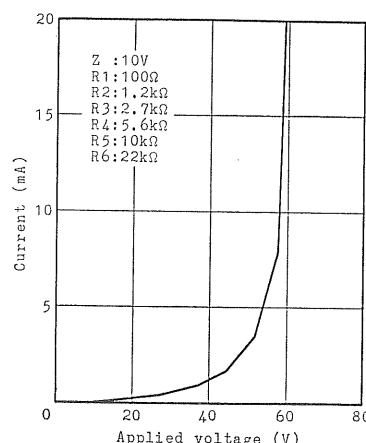
図 4 等価回路における V - I 特性の一例

Fig. 4 A typical V-I characteristics on equivalent circuit.

わかる。このようにして電気集塵装置の等価回路を作成することができるが、実際問題として 50 kV の高電圧で数百 mA の大電力の等価回路の模擬負荷を作ることは困難である。かりに、定電圧ダイオードと抵抗器を何十万個使用して作ったとしても、コロナ開始電圧に相当する Z_n 値の可変および同一の印加電圧に対する動作抵抗を変化させることが非常に困難で実用にならない。

新方式の電気集塵電源を開発または改良したときには実際の集塵装置を使用して長期間にわたり、試験を行ないデータを採取していた。また、集塵装置を借用するにも種々の制限があり、改造工事も必要で多額の経費がかかった。したがって、実用的な集塵装置の模擬負荷の開発が必要である。

3. 電子ビームを応用した模擬負荷装置

3.1 模擬負荷装置の構造

3.1.1 電子ビーム機器の概要

電子ビームを応用した機器は産業界に幅広く利用されている。たとえば、電子顕微鏡、電子ビーム露光装置、電子ビーム画描装置のような微少電力のものから電子ビーム溶接、電子ビーム溶解装置のように大電力のものまで多機種に及んでいる。電子ビームを応用した機器で比較的大電力の機器は、電子ビームの電力密度の高いことを利用してビームが当たるところを熱的に溶解するものである。電気集塵装置の模擬負荷としては電力が大きくかつビームが当たってもその場所が溶解しないように放熱をよくし、ビームの電力密度を低く抑えなければならないという、従来使用されていた電子ビーム機器と性質がまったく異なるものが要求される。

グリッド付きの電子ビーム機器は真空管の三極管の特性に似ている。一般に三極管の特性は次式で示される。

$$I_p = G(V_p + \mu V_g)^{3/2} \quad (5)$$

I_p : プレート電流, V_p : プレート電圧, V_g : グリッド電圧, G : パービアンス, μ : 増幅率

三極管の特性は図 5 に示すように V_g を変化させることによりカット・オフ電圧を変化させることができる³⁾。また、図 6 に示す電圧・電流特性の傾斜は抵抗分に相当し、この値は陽極に到達する熱電子量を増減する。すなわちグリッド電圧 V_g を変化させることにより可変にすることができる⁴⁾。この点に着目し、電子ビームを応用して電気集塵装置の模擬負荷の検討を行ない、その製作を行なった。

3.1.2 システム構成

製作した模擬負荷装置の外形寸法は、幅 : 1,400, 奥行き : 1,000, 高さ : 1,750 mm (高電圧ブッシングの高

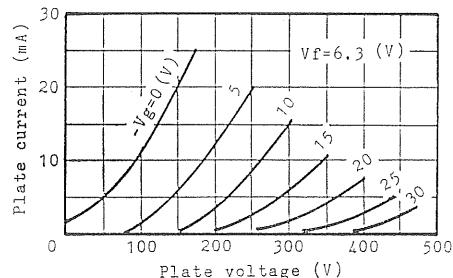


図 5 三極管のプレート電圧・電流特性

Fig. 5 Plate V - I characteristics on triode.

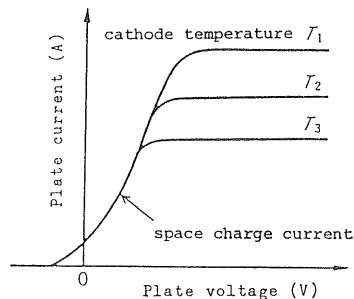


図 6 二極管の電圧電流特性

Fig. 6 V - I characteristics on diode.

さ : 580 mm を除く) であり、その外観を図 7 に示す。

本模擬負荷装置は三極管の構造に似ているが、排気系、冷却用ポンプ等の付属物があり、電気系統の概要は図 8 に示すようなシステム構成にしている。同図において WP はターゲットプレート冷却用の水循環ポンプ、RP, DP はターゲット・チャンバ内を真空中に維持するための

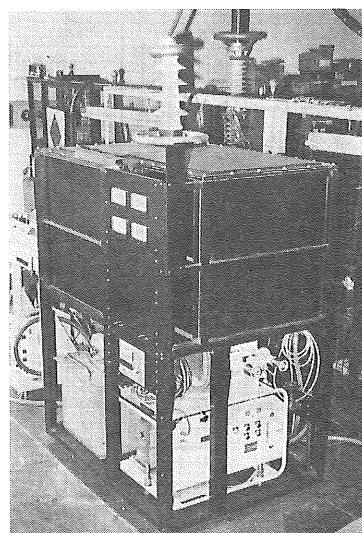


図 7 模擬負荷装置の外観

Fig. 7 Appearance of a dummy load equipment.

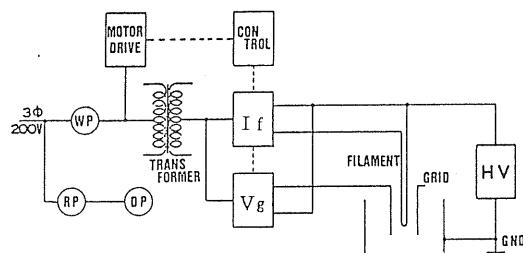


図 8 電気系統図

Fig. 8 Schematic diagram for dummy load equipment.

排気系で、それぞれ油回転ポンプ、油拡散ポンプである。 I_f は電子銃のフィラメント電源、 V_g は制御用グリッド電源であり、高電圧にフロートされているため、高電位テーブル内に配置されており、高電圧用絶縁変圧器から電源を供給している。これらのフィラメント、制御用グリッド電源は高電圧部にフロートしているため、絶縁シャフトで連結した低電圧側にある駆動モータにより調整できるようにしている。

図 9 に模擬負荷装置の主要部であるターゲット・チャンバの断面を示す。ここで使用しているフィラメントは、後述しているような長いヘヤーピン形のタンクステン・フィラメントを使用し、制御用グリッドは $1\text{ mm}\phi$ のステンレス線を籠形にして使用した。電子銃の入力は絶縁材料で製作したパイプ内に導体として、フィラメント用 2 本、グリッド用 1 本、合計 3 本の銅パイプを正三角形に配置し、電子銃セラミック内のコネクタと接続している。ターゲットにしているプレートは厚さ 10 mm

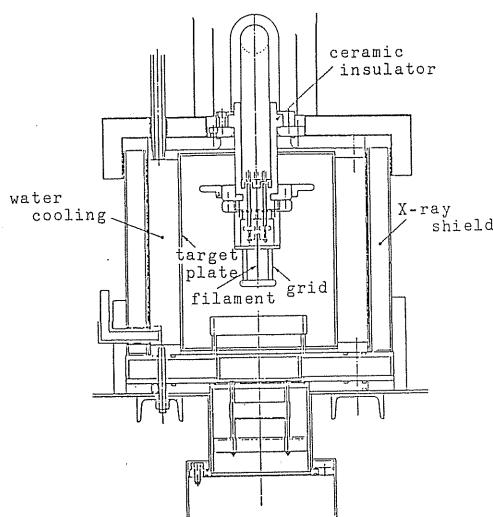


図 9 ターゲットチャンバの側面

Fig. 9 A side of target chamber.

のステンレスパイプを使用している。電子ビームの射突による温度上昇を防止するため、その外側に冷却水を循環させるパイプが配置されている。

また、ターゲットのプレートに電子ビームが射突すると、その部分から多量の X 線が放出する。このためターゲット・チャンバの周囲はすべて X 線遮蔽用の鉛で覆われており、排気系に通じる配管にも同様に X 線遮蔽が施されている。X 線の減衰は距離の二乗に反比例するため、本装置のように X 線の発生源近くで遮蔽するには、非常に厚い鉛が必要となり、全体を 30 mm の鉛で覆うことにより、X 線測定器のバックグラウンド 0.1 mR 以下にすることができた。この X 線量は、電離放射線障害防止規則で決められている。線量が 1 週間に 30 ミリレム 以下であるので、管理区域を必要としない微少なものである。したがって、業務従事者の受ける線量が 3か月間に 3 レム 以下の人体安全許容値に対して十分安全な値である。

図 10 に模擬負荷装置の平面図を、図 11 に電子銃の外観を示す。

図 7 に示した筐体の上部は変圧器用絶縁油の油槽を設け、ターゲット・チャンバ部の他に高電圧にフロートした電子銃用のフィラメント電源、制御用グリッド電源が高電位テーブル内に配置されている。下部にはターゲット・チャンバの排気系、水冷用ポンプおよび高電圧にフロートする部分の耐圧をもたせるための絶縁変圧器が配置されている。模擬負荷装置に印加される電圧は油入タンク上部に設置している高電圧用ブッシングに接続するようになっている。

電気集塵装置の模擬負荷として製作した電子ビーム装置の仕様を次に示す。

最大負荷電力	16 kW
最大負荷電圧	60 kV
最大負荷電流（連続）	200 mA

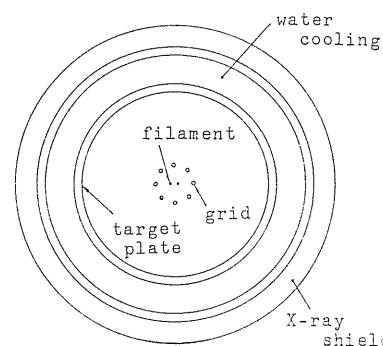


図 10 模擬負荷装置の平面図

Fig. 10 Plan on a dummy load equipment.

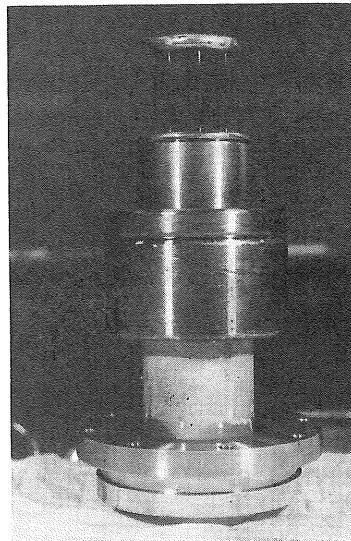


図 11 電子銃の外観

Fig. 11 A view of electron beam gun.

最大負荷電流 (10 分間) 600 mA

X線遮蔽 0.1 mR 以下

電子ビームが射突されるターゲット内壁は非常に高い電力密度になるため水冷にしているが、ターゲットの上昇温度に制限されて最大負荷容量が決定される。

3.1.3 フィラメント

真空中で金属を高温に加熱すると、その伝導帯にある自由電子の一部は金属表面と真空との電位障壁を乗り越えて外部に放出される。放出される電子流密度の大きさ (J_{th}) は、リチャードソン・ダッシュマンの式として知

られ、次式で表わされる⁵⁾。

$$\begin{aligned} J_{th} &= \eta A_0 T^2 \cdot \exp(-e\phi/kT) \\ &= A_0 T^2 \cdot \exp(-e\phi/kT) \\ A_0 &= (4\pi mek^2)/h^3 \\ &= 120 \text{ [A/cm}^2 \cdot \text{K}^2] \\ A_0 &= \eta A_0 \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 k ：ボルツマン定数、 T ：絶対温度、 e ：電子の電荷、 m ：電子の質量、 h ：プランク定数、 η ：透過率（表面状態により変化）、 A_0 ：物質により異なる普通定数、 A_0 ：熱電子放出定数、 ϕ ：仕事関数（金属の仕事関数は表 1 参照⁶⁾）

電気集塵装置の模擬負荷として使用するためには、制御グリッドを挿入した状態で数 100 mA の電流を流すため、かなりの電力容量が必要である。

本試作装置の最大負荷電流 600 mA の仕様を満足するためには、フィラメントは制御グリッドを動作させない状態で数 アンペア程度の電子を放出できるものが必要であり、フィラメント電圧 13 V；フィラメント電流；7~13 A を選択し、次に示すフィラメントを使用した。

フィラメントの寸法は、直径 0.35 mm、有効長 (L) 30 mm のタングステンを使用し、熱電子放射面積 (s) = $2\pi rL = 0.33 \text{ cm}^2$ のものを採用した。したがって、 $I = sJ_{th}$ の関係より図 12 に示す特性が得られる。同図より、負荷電流を 1 A 程度必要としてもフィラメント温度 T は 2,750 K であり、200 mA 程度の負荷電流を得るには図 13⁵⁾ で示されるように真空白熱電灯と同じ 2,550 K となり、ターゲット・チャンバ内部の真空が良ければ真空白熱電灯みなみの寿命が得られる。

表 1 金属の仕事関数

Table 1 Metal work function.

(I-III)	Li	K	Cs	Cu	Ag	Au	Al	Ba	Sr
ϕ (eV)	2.4	2.2	1.9	4.6	4.5	4.9	4.2	2.5	2.1
T_e (°K)	750	360	320	1040	1010	1200	1170	675	626
$(\phi/T_e) \times 10^3$	3.2	6.1	5.9	4.4	4.5	4.1	3.6	3.8	3.4
(IV-VI)	Ti	Zr	Hf	Th	Ta	Mo	W	Nb	
ϕ (eV)	3.9	4.1	3.5	3.4	4.1	4.2	4.5	2.2	
A_0	—	—	14	70	37	55	70	—	
T_e (°K)	1600	2100	2120	1919	2680	2230	2860	2400	
$(\phi/T_e) \times 10^3$	2.4	1.9	1.6	1.8	1.5	1.9	1.6	1.7	
(VII-VIII)	Re	Fe	Co	Ni	Os	Ir	Pt		
ϕ (eV)	4.7	4.5	4.4	4.6	4.7	5.3	5.3		
A_0	700	26	41	30	—	63	32		
T_e (°K)	2660	1320	1420	1330	2580	2220	1860		
$(\phi/T_e) \times 10^3$	1.8	3.4	3.1	3.5	1.8	2.2	2.8		

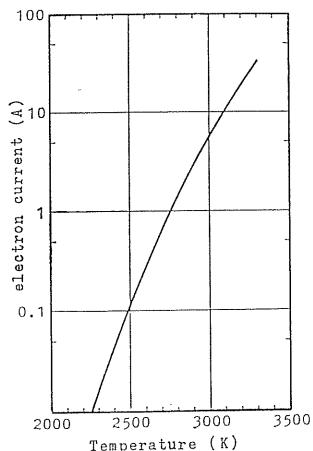


図 12 タングステン線の熱電子放出特性

Fig. 12 Termionic electron current emission characteristics on tungsten filament.

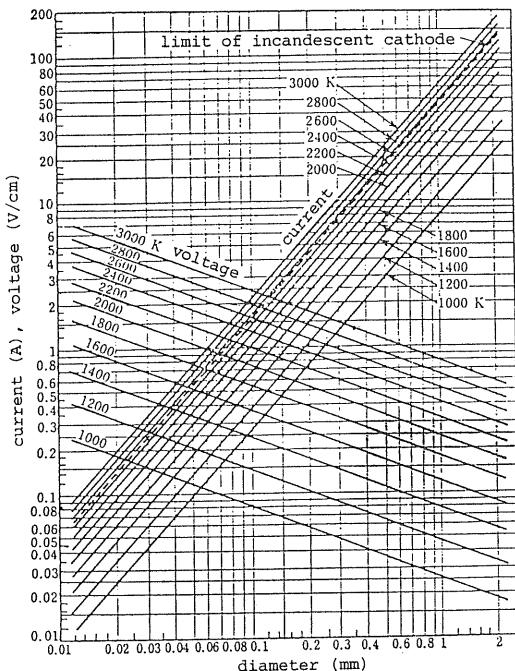


図 13 真空中のタングステン線の加熱電流・線径および温度の関係

Fig. 13 Characteristics of heat current, diameter and temperature on tungsten filament in vacuum.

3.1.4 制御グリッド

本装置は三極管と同様にフィラメントとターゲットの中間に制御グリッドを挿入し、これに負の電圧を印加することにより、フィラメント表面の電界を弱めターゲットに到達する電流を制御できるようにした。三極管の空

間電荷電流特性は制御グリッド面で仮想の陽極をもつ等価二極管で表わすことができる⁶⁾。本装置を等価二極管と見なしたときの空間電荷電流 I_{ps} は円筒型電極構造により決定され、

$$I_{ps} = 14.66 \times 10^{-6} V_0^{3/2} (L/b\beta^2) \quad (7)$$

$$V_d = V_g + (V_p/\mu) \quad (8)$$

ただし、

b : 仮想陽極までの半径 [2.5 cm]

L : フィラメントの有効長 [3.0 cm]

β : 表 2⁶⁾ より、 r/a により決まる値 [1.07] ただし、

$$b=r$$

a : フィラメントの半径 [0.0175 cm]

V_d : 集成電圧

以上の値を挿入して計算した結果を図 14 に示す。

表 2 (r/a) と β の関係Table 2 β for (r/a).

r/a	β^2	r/a	β^2	r/a	β^2
1.00	0.00	6.0	0.838	20.0	1.072
1.50	0.116	7.0	0.887	30.0	1.091
2.00	0.275	8.0	0.925	45.0	1.095
2.50	0.405	9.0	0.955	67.0	1.089
3.00	0.512	10.0	0.998	122.0	1.072
4.00	0.665	12.0	1.012	221.0	1.053
5.00	0.775	16.0	1.051	735.0	1.023

here

$$\beta = \log \left(\frac{r}{a} \right) - \frac{2}{5} \left(\log \frac{r}{a} \right)^2 + \frac{11}{120} \left(\log \frac{r}{a} \right)^3 - \frac{47}{3300} \left(\log \frac{r}{a} \right)^4 + \dots$$

a =radius of cathode

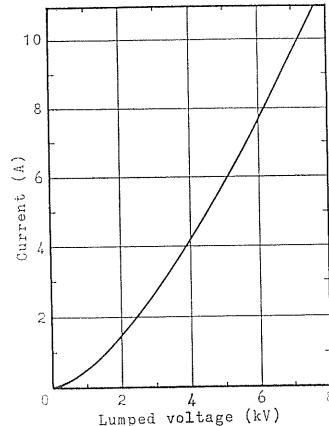


図 14 等価二極管の空間電荷電流

Fig. 14 A space current for equivalent diode.

4. 実験結果と考察

電気集塵装置の模擬負荷装置としての特性をとる前に電子ビーム装置としての基本的な特性を測定した。

図 15 にフィラメント電流 I_f をパラメータとしたときのビーム電圧 V_p , ビーム電流 I_p 特性を示す。

図 16 に本装置の三極管特性として、フィラメント電流 (I_f) を 10 A にしたときのビーム電圧 V_p , ビーム電流 I_p 特性を示す。これらの特性は、前に述べた三極管特性の V_p-I_p (V_g パラメータ) と類似しており、電気集塵装置のコロナ放電特性とよく似ている。

図 16 の特性を電気集塵装置のコロナ放電特性の近似

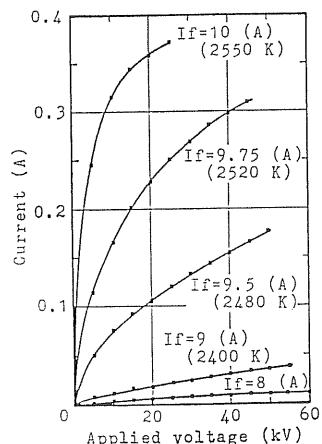


図 15 模擬負荷装置の I_f をパラメータとした V_p-I_p 特性
Fig. 15 V_p-I_p characteristics with I_f parameter on dummy load equipment.

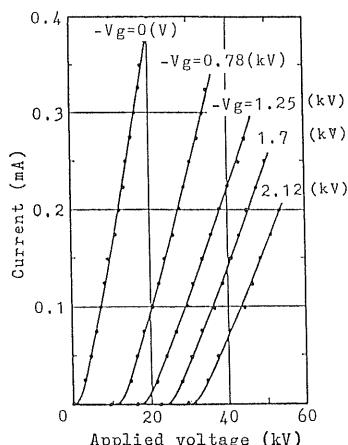


図 16 模擬負荷装置の V_g をパラメータとした V_p-I_p 特性 ($I_f=10$ A)
Fig. 16 V_p-I_p characteristics with V_g parameter on dummy load equipment.

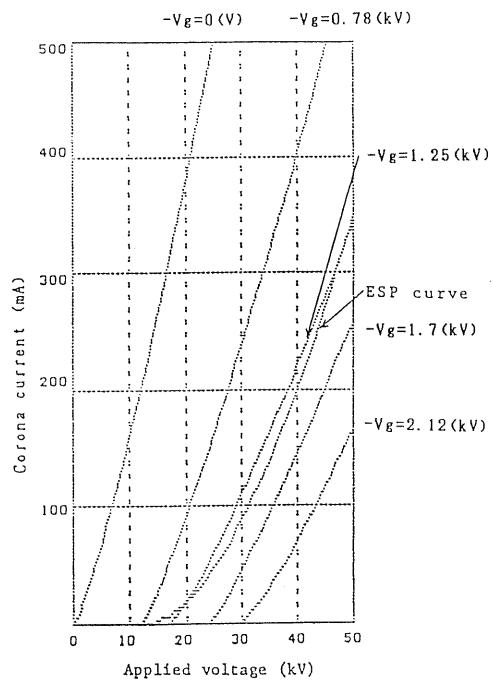


図 17 模擬負荷装置の $V-I$ 特性と電気集塵装置のコロナ $V-I$ 特性
Fig. 17 $V-I$ characteristics on dummy load equipment and corona $V-I$ characteristics on electrostatic precipitator.

式(1)に代入して数値計算をしたものを図 17 に示す。同図の特性において、(1)式の定数 B の値は 1.19~1.25 の範囲である。なお、同図には図 1 に示した電気集塵装置のコロナ $V-I$ 特性 (ESP-V-I) を記入しているが、模擬負荷装置の $V-I$ 特性は電気集塵装置の $V-I$ 特性に近いことがわかる。図 16 に示した $V-I$ 特性の $-V_g=1.25$ kV について、 $V-I$ 特性と動作特性を数値計算したものを図 18 に示す。動作特性も図 2 に示した値に近いことがわかる。したがって、試作した装置は電気集塵装置の模擬負荷装置として使用できることが実証された。

本模擬負荷装置を使用して電気集塵電源の定電流特性を測定したものを図 19 に示す。この場合、模擬負荷装置のフィラメント電流 (I_f) 10 A を流した状態で、電気集塵電源の定電流値を 100 mA, 200 mA に設定し、グリッド電圧 (V_g) を変化させたときのビーム電圧 (V_p), ビーム電流 (I_p) 特性である。このデータから明らかなように定電流特性を簡単に連続して測定することが可能である。

電気集塵装置は静電容量をもっているため、単相全波整流電圧を印加すると出力電流にカット・オフを生じ、

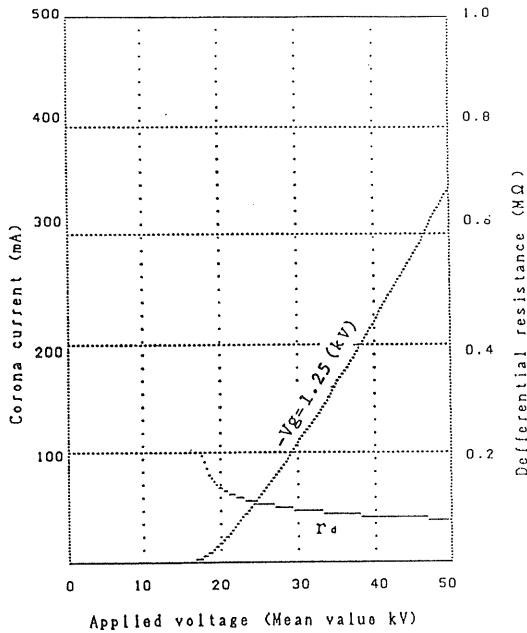
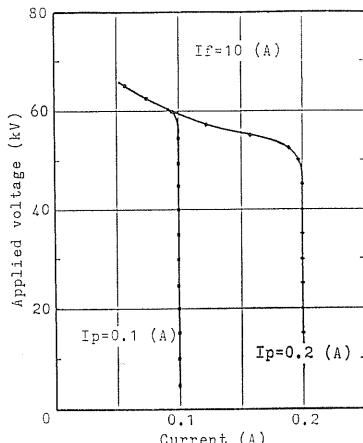
図 18 模擬負荷装置の V - I 特性と動作抵抗Fig. 18 V - I characteristics and differential resistance on dummy load equipment.

図 19 模擬負荷装置を使用して測定した電気集塵電源の定電流特性

Fig. 19 Measured V - I characteristics of a high-voltage power supply for electrostatic precipitator using dummy load equipment.

図 20 に示すような出力電圧、電流波形になる。

模擬負荷装置と並列に高電圧コンデンサ $0.05 \mu\text{F}$ を接続したときの電源装置の出力電圧、電流波形を図 21 に示す。同図から明らかのように電気集塵装置での電圧、電流波形とよく似ていることがわかる。

従来使用していた電気集塵装置の模擬負荷として、抵

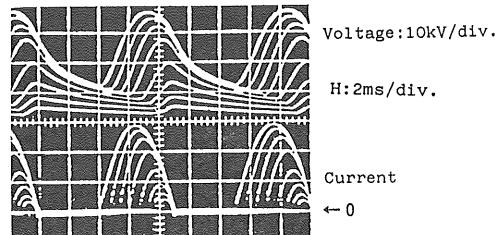
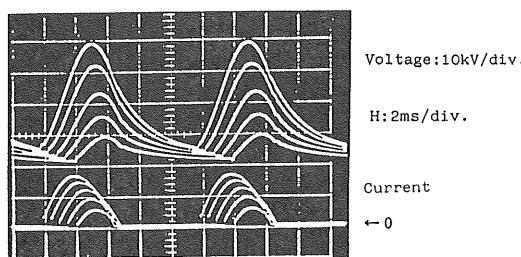


図 20 単相入力電源における電気集塵装置の印加電圧・電流波形

Fig. 20 Waveforms on the applied voltage and current in the full scale electrostatic precipitator.

図 21 模擬負荷装置に並列に $0.05 \mu\text{F}$ のコンデンサを接続したときの印加電圧・電流波形Fig. 21 Waveforms on the applied voltage and current in the dummy load equipment when condenser ($0.05 \mu\text{F}$) connected in parallel.

抗器とコンデンサを並列に接続したものでは、抵抗値が集塵装置の動作抵抗よりも高いため、模擬負荷装置で電源装置の制御特性を測り安定に動作していたものが、集塵装置に使用したときにハンチングを生ずることがあった。新しく開発した模擬負荷装置を使用すれば、動作抵抗が集塵装置と同様に小さくできるため、集塵装置に使用したときにハンチングを生ずることがなくなった。

本模擬負荷装置を使用することにより、電気集塵用電源の開発、改良に当たって、従来のように電源装置を実際の電気集塵装置の現場に仮設して実負荷による試験をすることなく、社内で多くの特性を測定することができるようになった。

5. 結論

新しく開発した、電子ビームを応用した電気集塵装置用模擬負荷装置により、実際の集塵装置に近いコロナ開始電圧、動作抵抗のものが得られ、工場において各種試験ができるので非常に有効である。電源装置の各種特性を測定するために高電圧の電圧、電流をグリッド・バイアスのポリウムの摘みを回転するだけで連続して可変できるので測定が簡単になった。

試作した模擬負荷装置は、短時間定格で電流値が、600 mA 流せるので中容量の電源まで試験できる。今後、さらに容量の大きい電源の試験をするには、負荷電流が 1.5 倍程度の容量アップが望まれる。電流容量の制限は、ターゲットプレートの温度上昇で決定されるため、冷却方式、ビームの散乱、高融点のターゲット材料等の技術的検討が必要である。試作した装置の材料費が、数百万円であり、現時点では、容量アップについての技術的問題解決および材料費が相当高価になるため困難と思われる。

最後に、貴重なご意見とご指導をいただいた東京大学

教授増田閃一博士、およびオリジン電気(株)木村達夫研究開発副本部長、藤木裕氏に謝意を表する。

参考文献

- 1) 飯島 歩、増田閃一：静電気学会誌, 11 (1987) 110
- 2) 飯島 歩、塙本哲生：静電気学会講演論文集, p. 45 (1982)
- 3) オーム社無線工学ハンドブック編：新版無線工学ハンドブック, pp. 6-14, オーム社 (1954)
- 4) 電子通信学会編：電子通信ハンドブック, p. 487 (1979)
- 5) 日本学術振興会編：電子・イオンビームハンドブック, pp. 22-24, 日刊工業新聞社 (1973)
- 6) 中村新太郎：電子管工学, p. 61, 誠文堂新光社 (1956)