



Title	EGD発電に関する実験的研究
Author(s)	矢野, 利明; Yano, Toshiaki; 伊藤, 献一 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 69, 29-38
Issue Date	1973-11-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41183
Type	departmental bulletin paper
File Information	69_29-38.pdf



EGD 発電に関する実験的研究

矢野利明* 伊藤献一* 深沢正一*

(昭和48年4月28日受理)

Experimental Study on EGD Electrical Power Generation

Toshiaki YANO Kenichi ITO and Shoichi FUKAZAWA

(Received April 28, 1973)

Abstract

An electrogasdynamic (EGD) generator produces electricity by using a moving gas to transport charged particles from a low potential region to a high potential region. An EGD generator consists of a corona ion source, a conversion channel and a charge collector.

In this paper, we have dealt with the design problems of an EGD generator and have experimentally investigated the corona discharge characteristics, the effect of channel length and the charge collector geometry which affect the performance of the EGD electrical power generation process.

The experimental results are as follows. A large number of ions which have been transported into the channel can be obtained by the high velocity of working gas. Thus the electrical power output is proportional to the gas velocity. It is necessary to increase the voltage supplied to the ion source to match the increase of the gas velocity. As to the effect of the channel length, the maximum power output is given by the optimum channel length. In order to increase the output current, it was found to be more effective to seed the working gas with liquid and solid powder particles.

1. ま え が き

増加するエネルギー需要により化石燃料を使用したさいの排出物による大気汚染が社会的問題となっており、また資源の有効利用の点からも一次エネルギーを効率よく直接電気エネルギーに変換する新しい方法が研究、開発されている。従来火力発電は熱エネルギーを機械エネルギーに替え電気エネルギーを得るといふ機械的運動の仲介を必要とする。このため、これらのプラント効率はランキンサイクルの制約を受け、永年の努力にもかかわらず40%台が限度とされている。この限界を越すためには流体のもつエネルギーを直接電気エネルギーに変換する方式が有効であると考えられる。

直接発電には現在太陽電池、燃料電池、熱電子発電、MHD発電などが考えられ実用になっているものもあるが、最近になって電気流体力学 (Electrostatic: EGD) 発電も注目をあびるようになった。

EGD 発電は高電圧、低電流の電源としては有望であるが、同じ直接発電である低電圧、大電流の MHD 発電に比べ用途範囲は狭くなる可能性がある。その反面 EGD 発電は高温で作動さ

* 機械工学科燃焼工学講座

せる必要がないから耐久性と安全性に富み、また磁石を必要としないから出力重量比を MHD 発電よりも大きくすることができるなどの利点を有する。

本研究では EGD 発電機の設計上の問題点を考察し、実際に試作した円筒等断面の形状を有する EGD 発電機を用いて、つぎのような運転条件が発電性能におよぼす影響について検討を加えた。

(1) コロナ極性の影響, (2) コロナ放電特性による影響, (3) イオン発生域, エネルギー変換域, 集電域などの形状による影響, (4) 作動流体速度の影響, (5) 作動流体に液体噴霧, 固体粉末噴霧を行ったときの効果。

2. EGD 発電機の設計上の問題点

2.1 発電の原理

EGD 発電の原理は電界と単極性の荷電粒子を含む気体流れの相互作用によるものであり、この作用により気体の流れから電力をとり出すことができる。すなわち電界と荷電粒子間に働く電気力が中性気体分子との衝突による抗力と釣り合い、流体のエネルギーの一部が荷電粒子を運搬することにより有効な電気エネルギーに変換される。発電機はイオン発生域, エネルギー変換域, 集電域から成り立っている。イオン発生域で流れ中に生じたイオンは作動流体により下流に押し流される。エネルギー変換域においてイオンは流体のエネルギーによって外部負荷を通る電流により生ずる逆方向の電界に逆って移動することにより、電気エネルギーに変換される。この電気エネルギーを集電域にて捕集し、外部負荷を通して使用する。つぎに EGD 発電機の設計上の問題点を発電各域について考察してみる。

2.2 イオン発生域

イオン発生域においては正または負のいずれか一方の極性のイオンのみを流れ中に発生させる必要がある。単極性のイオン発生法には熱電極からの熱電子放射を利用する方法、セシウムイオン等を注入する方法などがあるが、一般にはコロナ放電が用いられる。これは先の鋭い針状電極 (Needle Electrode) とこれに対し円筒または 2 枚の平行平板電極 (Attractor Electrode) を組み合わせ、この両電極間に直流高電圧を印加してコロナ放電を発生させる。このとき問題となるのはできるだけ多くのイオンを連続的に発生させそれをエネルギー変換域に押し流してやることである。このとき発生したイオンには、作動流体によりエネルギー変換域に押し流そうとする速度 \vec{u}_a と、両電極間の電界 \vec{E} によりアトラクタ電極に引きつけられる速度 \vec{u}_r が働き、イオン速度 \vec{u}_i は¹⁾

$$\vec{u}_i = \vec{u}_a + \vec{u}_r = \vec{u}_a + K\vec{E} \quad (1)$$

となる。ここで K はイオン移動度である。このため発生したイオンはエネルギー変換域に押し流されるイオンのほかに一部のイオンはアトラクタ電極に引きつけられる。このときのコロナ放電効率 η_d は次のように定義される¹⁾。

$$\eta_d = \frac{i_p}{i_n} \quad (2)$$

ここで i_n をニードル電流, i_a をアトラクタ電流とすると, $i_p = i_n - i_a$ である。イオン発生消費電力を小さくし、発電効率を高くするにはコロナ放電効率を大きくする運転条件が望まれる。そのためには電極形状, 電極間距離, 作動流体速度, 印加電圧等が問題となってくる。またイオン発生密度を高くするために複数の電極を設けることも考えられる。電極材質, 表面仕上げなどについても放電による損傷を少なくし、長期にわたる安定したイオン発生をおこなえるよう設計す

る必要がある。

2.3 エネルギー変換域

イオン発生域から流入したイオンはエネルギー変換域で流体のエネルギーの一部を獲得して電気エネルギーに変換されるが、発電効率を高くするにはできるだけ多くのイオンが集電域で捕集されるエネルギー変換域形状が要求される。エネルギー変換域でイオンの発生消滅がなくすべてのイオンが集電域で捕集されるとすると、単位体積当りの電気出力 w は次式で与えられる²⁾。

$$w = j_x E_x = en_i(u - K_i E_x) E_x \quad (3)$$

ここで j_x は電流密度、 E_x は軸方向の電界、 e は単位電荷量、 n_i はイオン密度である。

エネルギー変換域内においては、コレクタ電位 V による軸方向の電界 E_x と空間電荷による半径方向の電界 E_r が働きイオンは半径方向の速度を有する³⁾。一般に粘性を有する流体が流れるとき壁の近傍において境界層が生じる。イオン速度 $u_i(x, r)$ は⁴⁾

$$u_i(x, r) = u(x, r) - k_i E(x, r) \quad (4)$$

で与えられるので、イオンが境界層に落ち込むと、 $u_i(x, r)$ が次第に小さくなり、(3)式より電気出力は低下する。また $u_i(x, r)$ が零に近づくとイオンがある部分に集積されその位置の電位が高くなり、ついにはチャンネル壁の絶縁破壊を引き起こす。このような現象を避けるためにはイオンが境界層に落ち込む前に集電域で捕集できるようなエネルギー変換域を設計する必要がある。そのためにはチャンネル径 d と長さ L の変化割合 $\Delta d/L$ がつぎのような関係を有する末広形のチャンネルを設計する²⁾。

$$\frac{k_i E_r}{u - k_i E_x} < \frac{\Delta d}{L} \ll 1 \quad (5)$$

または流体の速度 u を大きくするか、チャンネル長さ L を十分に短くすることによりイオンが境界層に落ち込む前に集電域にて捕集することができる。しかし u を大きくすると摩擦損失が増し、 L を短くすると最大出力電圧 V_{\max} は

$$V_{\max} = E_b L \quad (6)$$

で与えられ発電機出力が小さくなる。 E_b は流体の破壊電界強さである。以上のことを考慮してエネルギー変換域の形状を設計する必要がある。

2.4 集電域

集電域におけるイオン捕集機構は不明な点が多いが、コレクタ電極形状は上流から押し流されてくるイオンを出来るかぎり捕捉する構造が望ましい。ここでチャンネル内を流れるイオン電流 i_p に対するコレクタ電極で捕集されるコレクタ電流 i_c の比をイオン捕集率 η_c とすると

$$\eta_c = \frac{i_c}{i_p} \quad (7)$$

であらわされる。 η_c はチャンネル形状、流れの速度などによっても変化するが、コレクタ電極の構造、配置によっては流れの状態を著しく乱し発電能力の低下の原因になる可能性もあり、集電域の設計にはこの点に留意する必要がある。

3. 実験装置および実験方法

実験装置の概要を図1に示す。発電機形状、実験条件は以下に示す。

チャンネル形状：円筒等断面

チャンネル径： $d=6, 18, 44 \phi$

チャンネル長さ： $L=20, 40, 60, 80, 100, 120 \text{ mm}$

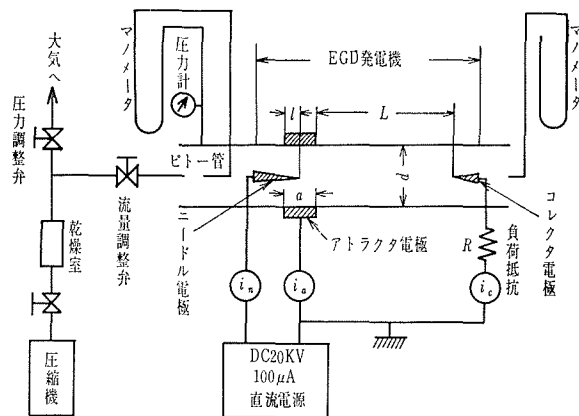


図1 実験装置概要

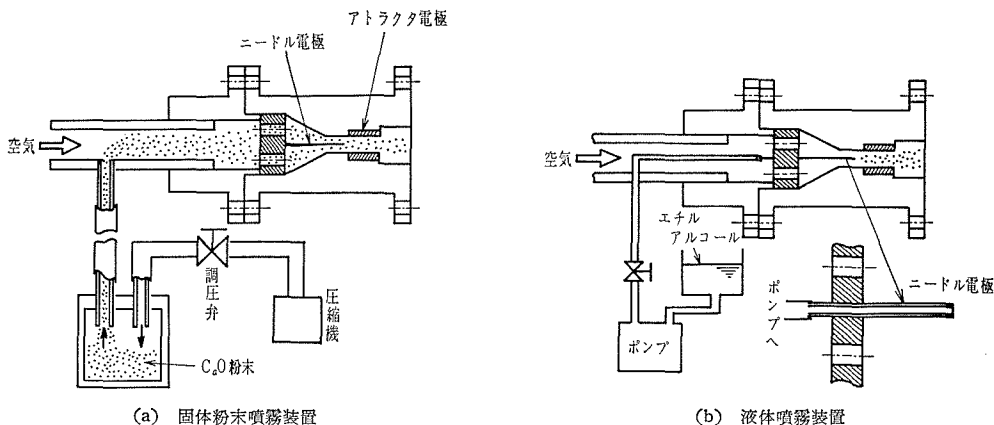


図2 作動流体中に液体噴霧，固体粉末噴霧を行ったときの装置概要

ニードル位置： $l=0, 5, 8$ mm

アトラクタ巾： $a=2, 5, 10$ mm

コレクタ形状：ニードル（長さ 22 mm，径 1 mm，尖端曲率 3/50 mm），円筒（長さ 10, 30, 60 mm），金網（32 メッシュ）

作動流体速度： $u=160\sim 340$ m/s

負荷抵抗： $R=1\times 10^6\sim 1\times 10^{10}\Omega$

作動流体は圧縮機よりの乾燥空気を流量調整弁により任意の流量に設定し発電機本体に送り込む。流速測定は発電機入口にピトー管 ($d=6\phi, 18\phi$) オリフィス ($d=44\phi$) を設けて行った。イオン発生にはコロナ放電を用いた。発生したイオンがエネルギー変換域へ押し流されるチャンネル内電流 i_p はニードル電流 i_n ，アトラクタ電流 i_a より求めた。コレクタ電流（出力電流） i_c は負荷抵抗を通してエレクトロメータ（測定範囲： $1\times 10^{-12}\sim 1\times 10^{-2}$ A）にて測定した。イオン移動度を小さくして発電効率を高くする一手段として作動流体に液体噴霧，固体粉末噴霧を試みたときの実験装置を図2 (a) (b) に示す。

4. 実験結果

4.1 コロナ極性が発電諸性能におよぼす影響

チャンネル内を流れるイオンまたは荷電粒子の極性は，ニードル電極を正，アトラクタ電極を

負としたとき正イオンが生じ、このときを正電場、ニードル電極を負、アトラクタ電極を正としたとき負イオンが生じ、このときを負電場とする。正電場と負電場ではコロナ放電の性質が異なるため、ニードル電流、コレクタ電流、その他の性能に違いが生じる。これまでの研究結果^{5,6,7)}より、印加電圧、チャンネル径、作動流体速度等を一定とし、両電場について比較すると表1のようになる。

第1表 正電場と負電場の諸性能比較

	正電場	負電場
コロナ放電開始電圧 V_c	高い	低い
ニードル電流 i_n	小さい	大きい
チャンネル内電流 i_p	小さい	大きい
イオン捕集率 η_c	大きい	小さい
コレクタ電流 i_c	大きい	小さい
電氣的入出力比 η_p	大きい	小さい
コロナ放電安定域	広い	狭い

ニードル電流 i_n は同一印加電圧、流速、電極間距離では負電場の方が大きく、またチャンネル内電流 i_p も大きい。これは負イオンの方が正イオンよりもイオン移動度が小さいため、(1)式の半径方向の速度 \vec{u}_r が小さくなるためと考えられる。しかしイオン捕集率 η_c は正電場の方が大きく、コレクタ電流 i_c も大きい。このためイオン発生に要する入力電力と出力電力の比すなわち電氣的入出力比 η_p は正電場の方が大きい。このことより発電効率は正電場の方がよいが、コロナ放電安定域が狭く、特に η_p が最大となるコロナ放電開始付近において極めて不安定であり、 i_c も不安定となる。このため実験目的に応じてコロナ極性を選ぶ必要がある。

4.2 コロナ放電特性と発電性能

先に述べたようにイオン発生域では、できるだけ多くのイオンを発生し、これをエネルギー変換域に押し流すことが重要である。現在、高速気流中のコロナ放電に関する研究は少なくその特性については不明な点が多い。コロナ放電特性は電極形状、電極間距離、印加電圧、流れの状態により影響される。ここでは放電が安定な負電場におけるコロナ放電特性と発電諸性能の関係を考察する。

図3に示すようにニードル、アトラクタ電極間の印加電圧 V_a を高くしてゆくとある電圧 V_c (コロナ放電開始電圧) においてニードル電流 i_n は流れはじめ、 V_a の増加にともなって増大する。流速 u が大きくなると V_c は高くなり、また V_a に対する i_n の増加割合も小さく、一定量のイオン生成に要する印加電圧は高くなる。印加電圧を増してゆくと i_n は増加するが、図4に示すように $u=170$ m/s ではチャンネル内電流 i_p はほぼ一定である。流速を大きくすると i_p は V_a の増加にともない大きくなる。また図5に示すコロナ放電効率 η_a は V_a が大きくなるにしたがい低下し、 u を大きくすると大きくなる。このことは V_a が大きくなると(1)式の半径方向の速度 $\vec{u}_r (=KE)$ が大きくなりアトラクタ電極に引きつけられるイオン量が増大し、 u を大きくすると軸方向の速度 \vec{u}_a が大きくなり i_p が増大し、 η_a も大きくなる。コレクタ電流 i_c は図6に示すように V_a を高くすると増加してゆくが、ある電圧以上になると一定となってくる。また u を大きくすると i_c の最大値は大きくなる。図7に電氣的入出力比 η_p と印加電圧、流速の関係を示す。 $u=170\sim 240$ m/s では η_p は V_c 付近で最大となり、 V_a を高くするにしたがい減少する。 $u=320$ m/s では V_c よりも高い電圧で η_p は最大となる。本実験条件では η_p の最大値は $u=240$ m/s のとき $\eta_p=0.3$ である。 η_p を大きくするためにはコロナ放電開始電圧付近において多量のイオンを生成し、 i_p を大きくする電極形状が要求される。つぎにイオン発生域形状を変化させた場合のコロナ放電特性について考察してみる。

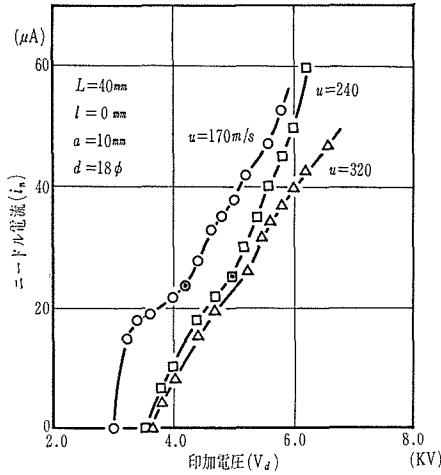


図3 ニードル・アトラクタ電極間の印加電圧とニードル電流の関係

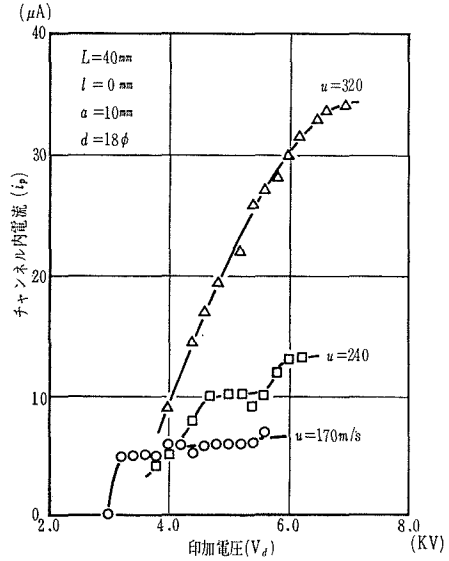


図4 印加電圧とチャンネル内電流の関係

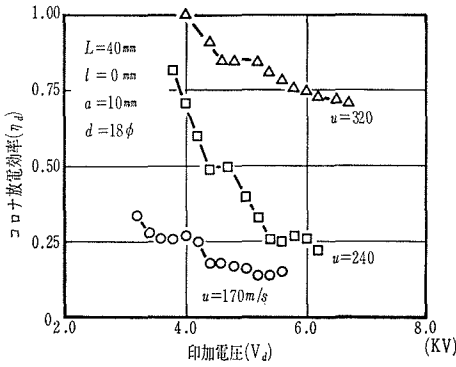


図5 印加電圧とコロナ放電効率の関係

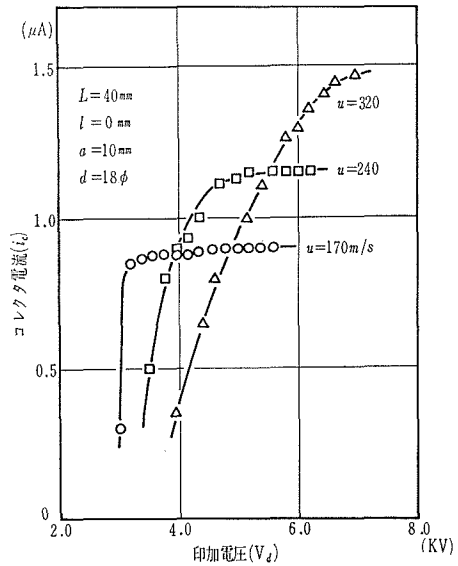


図6 印加電圧とコレクタ電流の関係

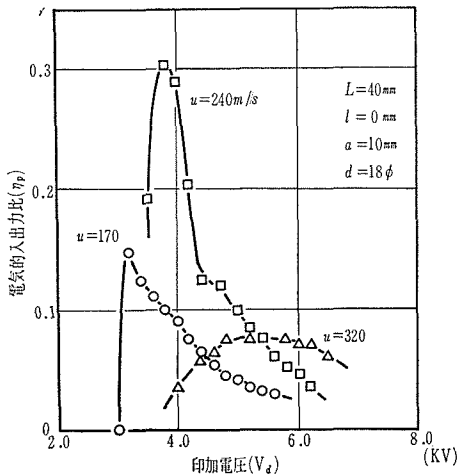


図7 印加電圧と電気的入出力比の関係

4.3 イオン発生域形状が発電性能におよぼす影響

ニードル電極の先端に生じたイオンは電界の作用を受けてアトラクタ電極に引きつけられる。アトラクタ電極はコロナ放電に必要な不平等電界を作ることのみ寄与すればいいわけで、イオンがアトラクタ電極に到達しないようなイオン発生域形状が望ましい。図8にアトラクタ電極巾 $a=10\text{ mm}$ とし、ニードル電極位置 $l=0, 5, 8\text{ mm}$ と変化させた場合のチャンネル内電流 i_p の変化を示す。 $u=190\text{ m/s}$ では V_a を高くしても $l=0, 5, 8\text{ mm}$ と i_p はほぼ一定である。 $u=350\text{ m/s}$ では i_p は $l=0$ のときが最も大きく、コロナ放電開始電圧も最も低い。コロナ放電効率 η_a は図9に示すように $u=190\text{ m/s}$ では $l=0, 5, 8\text{ mm}$ とあまり変化しない。 $u=350\text{ m/s}$ では

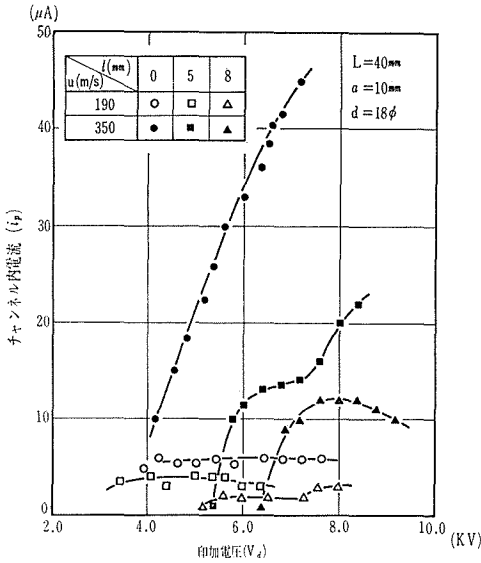


図8 ニードル電極位置を変化させた場合の印加電圧とチャンネル内電流の関係

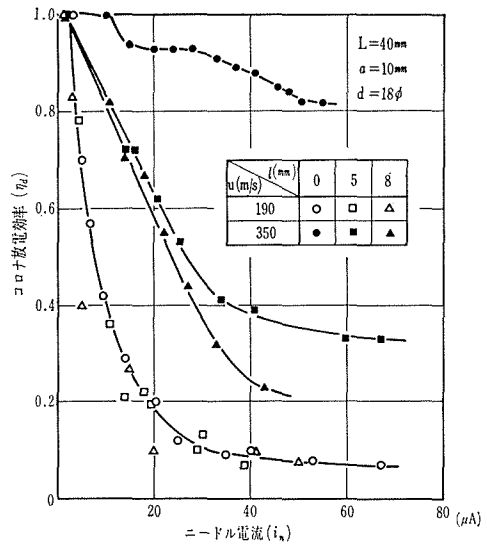


図9 ニードル電極位置を変化させた場合のニードル電流とコロナ放電効率の関係

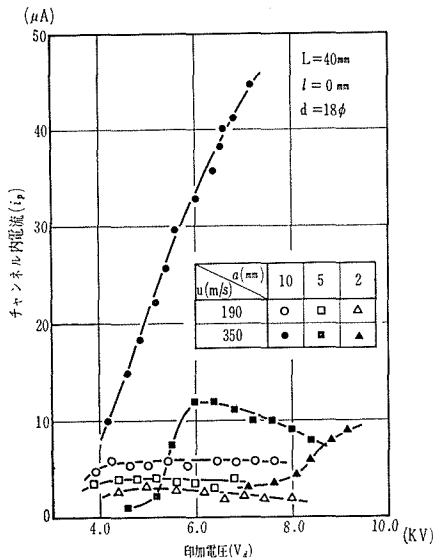


図10 アトラクタ電極巾を変化させた場合の印加電圧とチャンネル内電流の関係

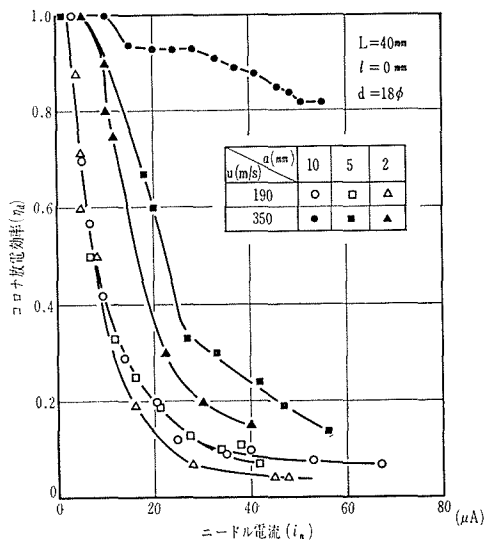


図11 アトラクタ電極巾を変化させた場合のニードル電流とコロナ放電効率の関係

$l=0$ の場合に最も大きい。図 10, 図 11 に $l=0$ mm とシアトラクタ電極巾 $a=2, 5, 10$ mm としたときの i_p, η_a の関係を示す。 a を小さくするとコロナ放電に要する印加電圧は高くなり、 i_p, η_a も小さくなる。以上の結果より流速、印加電圧によって最も効果的なイオン発生域形状を考える必要がある。

4.4 チャンネル長さとお出力特性

等断面積流路を有する発電チャンネル長さとおコレクタ電流 i_c 、電気的入出力比 η_p の関係を図 12, 図 13 に示す。実験条件は $d=44 \phi, l=0$ mm, $a=10$ mm, $u=190$ m/s である。 i_c と L の関係は $V_a=10, 12, 14$ KV ではいずれも同様の傾向を示しており、 $L=60\sim 80$ mm の間で i_c が最大となる。これはチャンネル内の電界が一様であると仮定し、空間電荷、コロナ放電域の電界の影響を無視して、 $V_a=14$ KV におけるアトラクタ電極とおコレクタ電極間に生じる電界 E およびチャンネル内の軸方向の平均イオン速度 \bar{u}_i を計算すると表 2 のようになる。 L が小さいときには \bar{u}_i が小さくまたコレクタ電極が中心に位置しているため半径方向の電位傾度は大きくなり、イオンの拡散が大きくこのため i_c が小さい。 L が大きくなると \bar{u}_i が大きくなり i_c が増加する。しかしある距離以上になると境界層に落ち込むイオン割合が大きくなりコレクタ電極にて捕集不可能になり i_c が減少するものと考えられる。 η_p も同様に i_c が最大となる $L=80$ mm 附近で最大となる。今回の実験では等断面積流路についてのみ行ったが、今後は種々の流路形状についても検討を加え、イオンの挙動等を検討し、最適形状を求める必要がある。

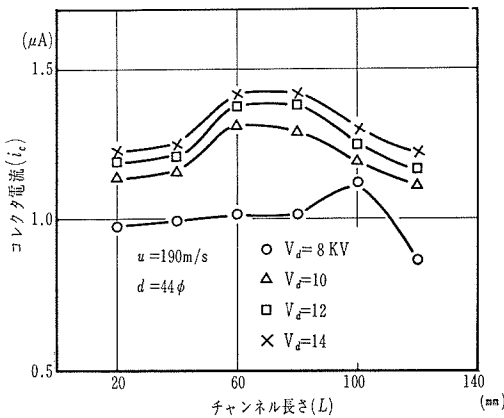


図 12 チャンネル長さとおコレクタ電流の関係

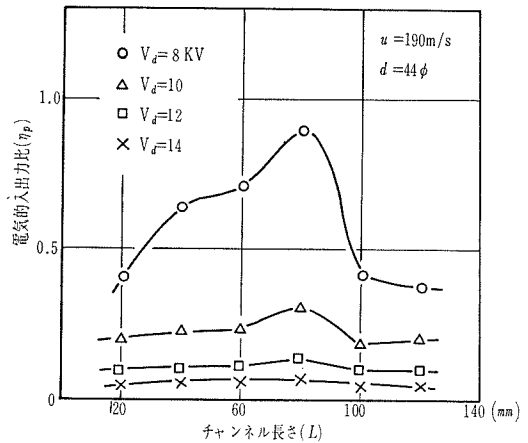


図 13 チャンネル長さとお電気的入出力比の関係

第 2 表 $u=190$ m/s, $V_a=14$ KV におけるチャンネル内の電界強度 E と平均イオン速度 \bar{u}_i

L (mm)	20	40	60	80	100	120
E (v/m)	6.15×10^5	3.13	2.37	1.78	1.33	1.03
\bar{u}_i (m/s)	109	149	159	167	172	176

4.5 集電域形状とお出力特性

集電域の形状としては種々の形が考えられる。ここでは針状(ニードル)、円筒状、網状コレクタによるコレクタ電流 i_c の変化を図 14 に示す。実験条件は $d=8$ mm, $L=40$ mm, $l=0$ mm, $a=10$ mm とし、印加電圧は各流速における i_c が最大となる印加電圧である。その結果、 i_c を大きくするにはニードルコレクタが最も効果的であった。その長さについてはあまり関係なく

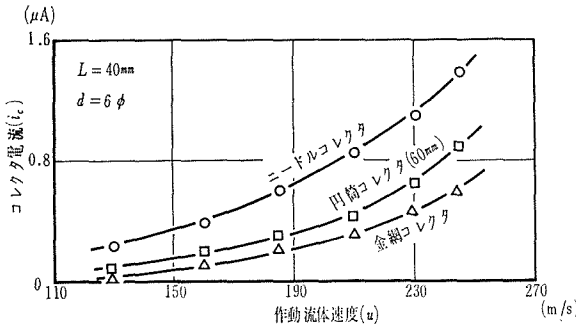


図 14 コレクタ電極形状を変化させた場合のコレクタ電流

i_c はほぼ一定であった。円筒コレクタについてはその長さが大きい程 i_c は大きくなる。つぎに最も効果の大きいニードルコレクタについてイオン捕集率を高める試みとして、複数の電極を設けた実験結果を図 15 に示す。図に示すような位置に電極数 $N=1, 2, 3, 4$ 本とし、 $d=18\phi, u=190\text{ m/s}$ のときの η_c である。 $N=2$ のときが最も大きく、 N を多くしても η_c はかならずしも大きくならない。以上の結果より、イオン捕集機構については不明な点が多いが、電界が集中する電極形状が比較的效果があることが判明した。

4.6 液体噴霧、固体粉末噴霧の効果

EGD 発電を実用化する一方法として作動流体に燃焼ガスを用いて、その中に含まれるフライアッシュにイオンを吸着させこれをエネルギー変換域へ押し流す方法が考えられている。本研究では燃焼ガス中のフライアッシュと類似の働きをするものとして液体噴霧、固体粉末噴霧を試みた。液体噴霧にはエチルアルコール、固体粉末噴霧には CaO 粉末を用いて行った実験結果を図 16, 図 17 に示す。液体噴霧を行うと正電場、負電場ともその効果が著しく、 i_c は約 4 倍増加する。固体粉末噴霧については、負電場においてその効果が著しく、正電場ではあまり効果的でなかった。このように i_c が増加する理由としては、噴霧微粒子に付着したイオンの移動度は空気の場合よりも小さくなりイオン速度が大きくなるためと考えられる。本実験では噴霧量を定

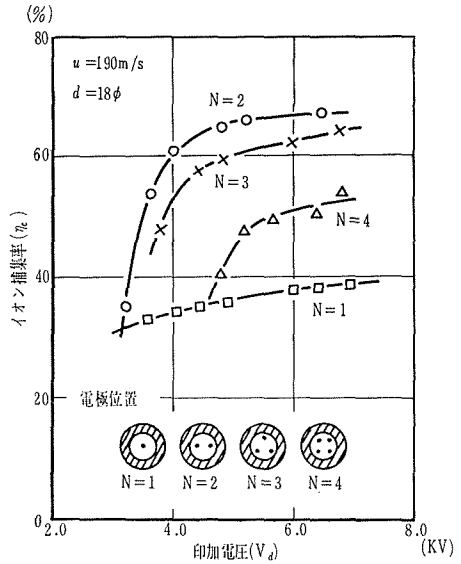


図 15 ニードルコレクタ電極数を変化させた場合のイオン捕集率

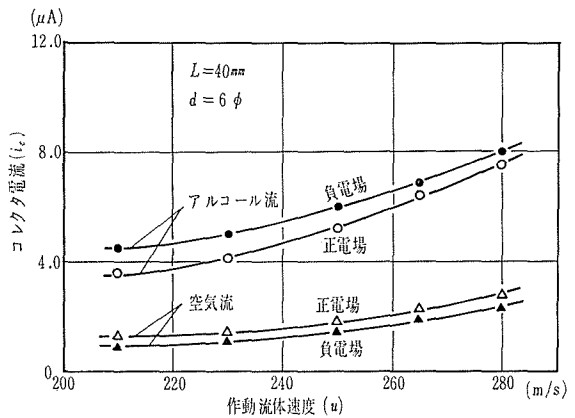


図 16 作動流体に液体噴霧を行ったときのコレクタ電流の変化

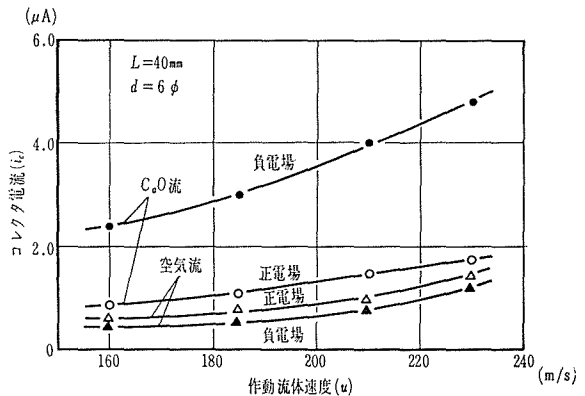


図 17 作動流体に固体粉末噴を行ったときのコレクタ電流の変化

量することができなかったが、今後は噴霧量、噴霧微粒子径によりコレクタ電流がどのように変化するかを知る事が重要である。

5. あとがき

本研究では EGD 発電に関する設計上の問題点をイオン発生域、エネルギー変換域、集電域について考察し、種々の発電機を試作し実験を行った。その結果、コロナ放電によるイオン発生法ではイオン量を大きくするには印加電圧を高くする必要があるが、印加電圧を高くしてゆくと発生したイオンの大部分はアトラクタ電極に引きつけられチャンネル内を流れない。チャンネル内に押し流されるイオン量を増大するには作動流体の速度を大きくしなければならない。しかし作動流体の速度を大きくするとイオン発生に必要な印加電圧は高くなり入力電力が大きくなる。このため電氣的入力比を最大とする最適流速値が存在する。印加電圧に対する電氣的入出力比はコロナ放電開始電圧付近で最大となる。チャンネル形状については等断面積流路の発電性能について検討を行った。その結果、コレクタ電流、電氣的入出力比ともチャンネル長さの影響を受け、最適長さが存在する。集電域形状については電界が集中する電極形状が比較的效果がある。液体噴霧、固体粉末噴霧を行うとコレクタ電流は増大する。

EGD 発電の研究は着手されてから日も浅く多くの問題点が浅っているが、今後の問題点として、(1) 単一極性イオンの大量生成法、(2) 破壊電界強さの大きい流体と、移動度の小さいイオンまたは荷電粒子の発生法、(3) 最適チャンネル形状、(4) 効率の良い集電方法、(5) 発電機を直列、並列に接続したときの性能等が考えられる。

最後に本研究を行うにあたり、実験、データ整理に多くの労力を費やして下さった、山根清隆技官、当時学部学生齋藤英一君、琴浦貞行君に厚く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Musgrove, P. J. and A. D. Willson: Energy Conversion, Vol. 12, (1972).
- 2) Gourdine, M. C. and D. H. Malcolm: Engng. Developments in Energy Conversion, ASME (1965).
- 3) Kahn, B. and M. C. Gourdine: AIAA, Vol. 2, (1964) No. 8.
- 4) Decaire, J. A. and M. O. Lawson: 8th Symp. on the Engng. Asp. of Magnetrohydrodynamics. (1967).
- 5) 矢野利明, 伊藤献一, 深沢正一: 日本機械学会北海道支部講演論文集 No. 702-1 (昭 45).
- 6) 矢野利明, 伊藤献一, 深沢正一: 日本機械学会北海道支部講演論文集 No. 712-1 (昭 46).
- 7) 矢野利明, 齋藤英一, 伊藤献一, 深沢正一: 日本機械学会講演論文集 No. 720-13 (昭 47).