

# 粉体静電気応用の進歩と将来展望

東京大学名誉教授・福井工業大学学長  
増田 閃一

## 1. 粉体静電気応用の必然性

### 1-1) 静電気応用の概念規定

静電気応用は本来的には「静電界」または「静電荷」に起因する固有の諸現象を応用する工学分野であると定義する事が出来る。しかしこの定義は現実の静電気応用を規定するにはいさか狭すぎると言わざるを得ない。そこで静電気の厳密な概念を拡張し、時間的に変動する電界であっても、また電荷の移動つまり電流を伴っても、それらにより生ずる「磁界の効果が電界の効果に比べて無視できる程度に小さい場合」も含めた広義の概念をとり、「電界または電荷の存在に起因する諸現象を応用する工学」とするのがより実際的である。また、この様な工学分野に共通の体系と方法論を見いだす事が出来、一つの工学分野として考える事に意味が出てくるのである。

ただ、電荷は必ず電界を形成し、電界は電磁波の形態をとる場合を除き電荷に終端するから、「電荷」と「電界」のどちらを主とするかは単に便宜上の問題に過ぎないと考えるべきである。そこで、ここでは一応「電界」に着目して論ずる事としよう。

### 1-2) 静電気応用の基礎をなす静電現象

電界に固有の現象には極めて多くの種類のものがあるが、その工学的応用として現在までに広く利用されているものには自ずから限りがあり、その主なものとしては次のものがある。勿論、今後この他の種々の静電現象が利用される様になる可能性は否定出来ない。

①力学現象：クーロン力、映像力、グレーデイエント力、分極力等々、各種の電気力に起因する静力学的ないし動力学的現象。電気力学、電気流体力学等。電界が求められれば電荷と電界の相互作用としての電気力が求まり、力学過程を計算できる。厳密にはマックスウェル・ストレス

2

$$F = (1/2) \epsilon E^2 \quad (1)$$

のベクトル的表面積分ないし空間積分から、ある物体または空間領域の媒質に働く総合的な電気力が計算出来る。換言すると  $E$  の値の空間分布が求まれば、少なくとも理論上は式(1)の積分から電気力が得られる筈であるという事になる。こう見ると力学的静電現象の問題は「電界の解析」に帰する事となる。

(1)

②放電現象：電界によって電子が加速され衝突電離を生じてガス中、液体中、固体中プラズマを生じ、電気を通ずるようになる。これが放電現象で、その根本原因は電子の電界による力学現象である。したがって、その限りでは基本的には①と異なる所はないと言える。しかし、その力学過程が電子なるが故に独特の色彩を帯びてくる。つまりマクロな物体の力学的過程と異なり、各種の化学反応、加熱、着火物の着火・爆発を生じ、また電離の結果として単極性や両極性のイオンを生じる。放電の現象形態は媒質の種類と状態（圧力・温度）、電極系の構造と寸法、印加電圧の大きさとその時間的変化によって無数の形をとり、非常にバラエティに富んだものとなる。

③光学現象：光の偏光面が電界によって回転する現象。ポッケルス効果とよばれ、光のモジュレーション、電界の測定、空間電荷の可視化等に利用できる。

### 1 - 3 ) 力学的静電現象の特徴と粉体静電気応用の必然性

電荷は一般に物体の表面に分布して存在するのが普通で、この様な電荷を「表面電荷」という。しかし、固体、液体、気体の内部に空間的に分布して存在する事もあり、この様な電荷を「空間電荷」という。そこで電界が前者の帶電物体に及ぼす電気力はその表面に働く「表面力」となり、後者に及ぼす電気力は空間に分布して働く「空間力」となる。

「表面力」 $F_s$ は一般にその物体の表面積に比例して大きくなるから、まず静電力がものを言うのは何よりもその体積に比して面積の大きな物体、つまり微細な粒子、細い纖維、薄いシートといった特別の形態を有する物体となる事がわかる。

この事から、粉体の操作に静電力を利用すると極めて効果的である事、換言すると粉体静電気応用の必然性が発生する。勿論、同じ理屈から、静電気による粉体の器壁への付着や、製品の汚れといったマイナスの作用が発生する事も無視する事が出来ない。

この場合、しかばどの程度の大きさの粉体から静電力の効果が現れてくるのであらうかを考えて見よう。いま粉体を球形として、その直径をDとすると、静電力はDの自乗に比例する。ところで一般にある力による力学現象支配の程度を判断するのには、その力と協働ないし拮抗するいま一つの力をとり、それとの比である無次元量を見てみるのが普通である。レイノルズ数はその例で、これは流体中の物体に流体が及ぼす「慣性力」と「粘性力」の比である。主たる作用力がこの2つのみである場合、両者の比であるレイノルズ数が等しければ流れに「相似則」が成り立つ事は周知の通りである。

この考え方を静電力に適用する場合、 $F_s$ の対抗力として物体が比較的大きい場合（10micron以上）には重力や慣性力等の「質量力」 $F_m$ （粉体ではDの3乗に比例）、比較的小さい場合（1 micron以下）には「粘性力」 $F_v$ （Dの1乗に比例）をとるのが理にかなっている。そこでこれらの比をとると、

$$a) D \geq 10 \mu m : F_s / F_m = k / D \quad (1)$$

$$b) D \leq 1 \mu m : F_s / F_v = m D \quad (2)$$

となり、通常、直徑が数100  $\mu m$ 以下になると、 $F_s$ が $F_m$ よりも優勢となって、力学現象が静電力で支配されるようになる。しかし、 $D$ が約1ミクロン程度以下の領域では流体の粘性力が効きはじめ、0.1ミクロン以下では後者の方が優勢となる。したがって力学的静電現象の応用対象となる粉体は、大体 $D$ が1～数100  $\mu m$ の範囲の微粒子であるという結論が得られるのである。

つまり、静電力の応用はもともとミクロな粉体に向いており、この事は従来の静電気応用を見ても、集塵、電子写真、静電塗装、静電粉体塗装等々、その殆どが「粉体微粒子」を対象とするものである事からも明らかである。

## 2. 粉体静電気応用の現状（古典的応用）

上に述べた種々の静電現象はすでに極めて広い分野に応用されて、我々の生活に役立っている。先ず粉体を含む種々の対象に対する静電気の、従来からの主な応用に目を向けると第1表の通りである。

第1表 従来の静電気応用

応用の基礎現象	応用の種類	補助現象
静電力	電気集塵・静電塗装・静電粉体塗装・静電植毛 静電分離・静電選別・インクジェットプリンタ	コロナ荷電 補助電界
	静電チャック・静電保持装置・静電ピンセット	短間隙
	電子複写・レーザービームプリンタ	コロナ荷電 光伝導
	障害（絡まり・付着・堆積・毛羽立ち）	乾燥・高抵抗
放電	荷電装置	コロナ放電
	除電装置	交流コロナ放電
	着火爆発災害（爆発性混合気体・可燃性粉体）	酸化性ガスの存在

この表を見ると、上述の様に静電力の応用において粉体が主力を演じている事が判る。

一方静電気には、有用な応用面とは別に、日常生活に不快な感じをあたえる「静電気ショック」や、上記①の力学現象に起因する静電気のマイナス面、すなわち静電気による衣服の人体への絡まり、あるいは生産工程を阻害するプラスチックシートの機械への絡み付き、粉体のパイプやホッパへの付着、纖維の毛羽立ちといった「障害現象」、あるいは②の放電現象に起因する爆発性混合気体や可燃性粉体の着火・爆発といった「災害現象」があり、「静電気障害災害」として特異な分野を形成している。

以上の従来応用の中で、最も大きな経済的、社会的インパクトを有するものは「電子複写」であり、またコンピュータ出力用の「レーザービームプリンタ」であるが、今世紀初等から現在に至までの長い間、環境問題と工業発展との両立を可能ならしめたと言う意味で「電気集塵」の重要性は計り知れないものがある。また自動車や家電製品との関連では「静電塗装」・「粉体静電塗装」や「静電植毛」も大きな重要性をもち、更に今後、廃棄物処理やリサイクルとの関連で「静電選別」の活躍が期待される。

### 3. 粉体静電気応用の新分野と将来展望

次にこ粉体に対する静電気の新しい応用を考える場合、次の幾つかの方向性があると言えよう。

- (a)よりミクロな領域への応用（マイクロマシン・細胞融合・DNA分離）
- (b)放電応用の化学分野への拡張（非平衡プラズマ応用・オゾン・ケミトロニクス）
- (c)電界のバリエーション（不平等交番電界・不平等進行波電界・パルス電界）
- (d)従来応用の高度化と拡張（ボクサーチャージャ・SPCP除電器・空気清浄・クリーンルーム・高度静電植毛等々）

これらは、いずれも静電現象についての理解と理論の最新の進歩を反映し、かつ関連工学分野、特に「新素材」や「高電圧エレクトロニックス」の進歩、それに大きく変化する社会的ニーズにも触発されたものである。つまり静電気応用とは言いながら、従来の静電気の狭い概念を大きく踏みだして、よりダイナミックに新しい工学分野を開拓しようとするものである。

粉体を視点の中心に据えて、これら新しい静電気応用の代表的なものとそのインパクト、今後の課題等を第2表にまとめてみた。

次節以下に、第2表の中から幾つかの代表的な応用例を選んで、より詳細に説明することとしよう。

第2表 新しい静電気応用の例

新しさの方向	応用の種類	周辺技術の進歩
(a) ミクロ化	マイクロマシン、細胞融合、細胞操作 DNA分離	フォトリソグラフィー パルス、DNA操作
(b) 非平衡 プラズマ	PPCP分解 (NOx, SOx, AirToxics, 溶媒, 悪臭) PPCP表面処理(プラスチックバンパー)  SPCP分解 (NOx, SOx, Fron, Trichlen, Toluene) SPCPオゾナイザとその応用(脱臭・空気浄化 水浄化・殺菌・脱色・フォトレジスト除去 SPCP・CVD (セラミック超微粒子フィルタ) SPCPアイオナイザ (ボクサーチャージャ) SPCP除電器 (管路式除電器)	ナノセカンドパルス 技術  セラミックSPCP エレメント
(c) 電界のバリ エーション	定在波電界カーテンとその応用(払落し) 進行波電界カーテンとその応用(大気中と 真空中の輸送・連続粉体塗装・連続静電 植毛)	セラミック電界カーテ ンエレメント
	各種 PPCP プロセス、電気集塵装置のパルス 荷電、進行波コロナ電送ライン	ナノセカンドパルス 電源・電極技術
(d) 従来技術の 高度化と 拡張	ボクサーチャージャ、SPCP除電器・空気清浄 クリーンルーム・高度静電植毛・静電配向に によるセラミック繊維強化金属	セラミックSPCPエレメ ント、フィルタ、触媒 センサ

#### 4. マイクロ・マシン

半導体で使われている「フォト・リソグラフィー」の手法を用いてシリコンウェーハから極めて微細な歯車等の機械要素を作り、それを静電力で駆動・操作するもので、従来の機械で行いえなかった種々のミクロ領域での操作（体内の手術・血管内のコレステロール除去等）の新しい手段として期待されている。

図1はその1例で、この技術で製作した「静電モーター」を示す。図2は同く「静電アクチュエーター」の写真である。

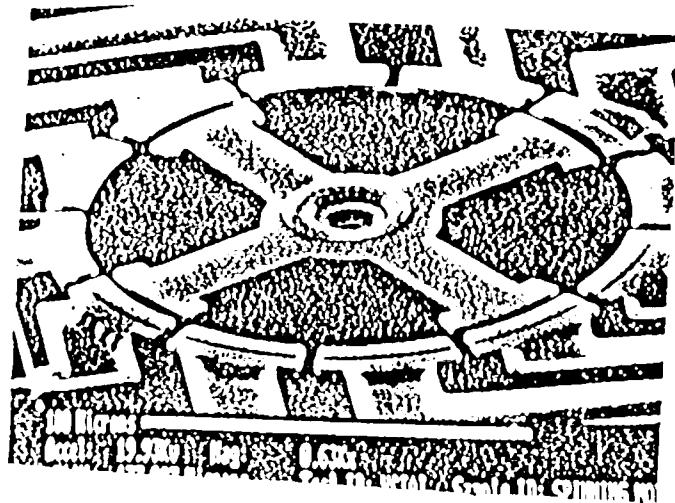


図1 静電マイクロ・シンクロナス・モーター（UC - Berkley）

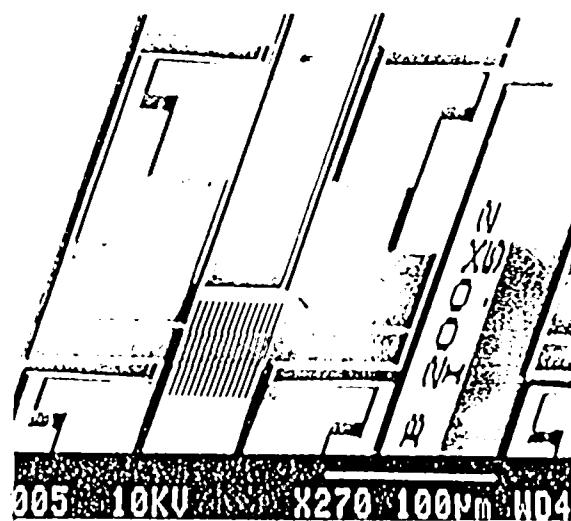


図2 静電マイクロ・アクチュエーター（東京大学）

## 5. マイクロ・バイオ操作

静電力で細胞を選別し、運搬し、接触させた上、電気的パルスによって2個の異なった細胞を融合させる。この様な静電気的手法による細胞の操作を「静電的細胞操作」、また電気的な細胞の融合操作を「電気的細胞融合」(1)とよび、バイオエンジニアリングの最も重要な革新技術となっている。これを更に押し進めてDNAの運搬、選別、分析等を静電力により行う手法も最近開拓され、バイオ技術の最新の成果として注目されている(2、3)。

図3はフォトリソラフィーの手法で作った、「電気細胞融合装置」、図4はその主要部をなす「融合領域」を示す。2つの微小電極間の中間に絶縁物の隔壁があり、中央に穴(融合領域)がある。

いま、両電極間に比較的低圧の高周波電圧を印加しておき、隔壁で隔てられた2つのチャンネルを経由して、ピエゾ・ポンプを備えた2つのセルから異種細胞を導入する。左右のチャンネルを経由して上方のセルから運ばれて来たそれぞれの細胞は電流流線が絞られて電界が集中する穴(融合領域)の近傍に来ると、その中央部に向かって「グレーディエント力」を受け、2つの細胞はここに引き込まれて接触する(図4(a))。

次いで両電極間に数千Vのパルス電圧を印加すると、電圧低下の大部分が両細胞の接触部に加わって、ここがパンクし、同時に接触部周縁が熱的に縫合され、双方の細胞膜が一体となり、両者の内容物が合体して細胞融合が完了する(図4(b))。

融合完結後の合体細胞(ハイブリドーマ)は、電気力によって穴(融合領域)から取り出し、下方のいずれかのチャンネルを経由してシャーレに移送し、培養・選別する。

## 6. 非平衡プラズマ化学操作:

あらゆる化学反応は帰するところ原子や分子の外殻軌道上の電子の配置替えであるという事が出来る。従来はこれを行うエネルギー源として温度・圧力・光・放射線等が用いられ、そ所要レベルを低くするための手段として触媒が用いられて来た。しかし、外殻軌道電子の操作には外部から直接エネルギーの高い電子を原子や分子にぶつけてやる手法がより直接的である。その一つが「プラズマ化学」と呼ばれる方法で、これから粉体技術にも大きなインパクトを有する。

この場合衝突に際して「エネルギー保存則」と「運動量保存則」の二つの基本的力学法則が成立しなくてはならない。イオンはその質量が原子や分子のそれにはほぼ等しいので、単純な玉突的衝突で両法則が満たされ、衝突を受けた原子や分子はイオンの運動エネルギーを貰って撥ね飛ばされる。つまりイオンの運動エネルギーは、そのまま原子や分子の運動エネルギーに転換して、これらの温度を上昇させる。しかし、イオン運動エネルギーの原子や分子の「内部エネルギーへ」の分配、つまり外殻軌道電子への影響は殆ど起こらない。これに対して電子はその質量が原子や分子に比べて極めて小さいので、その運動エネルギーの

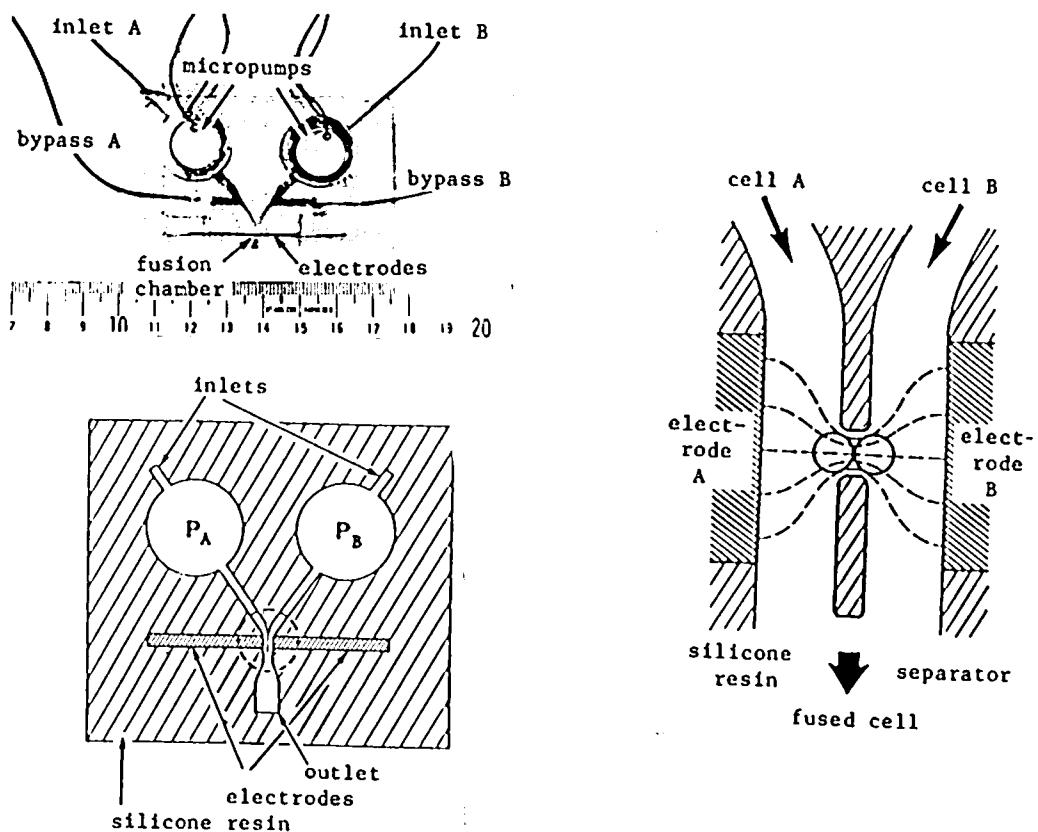
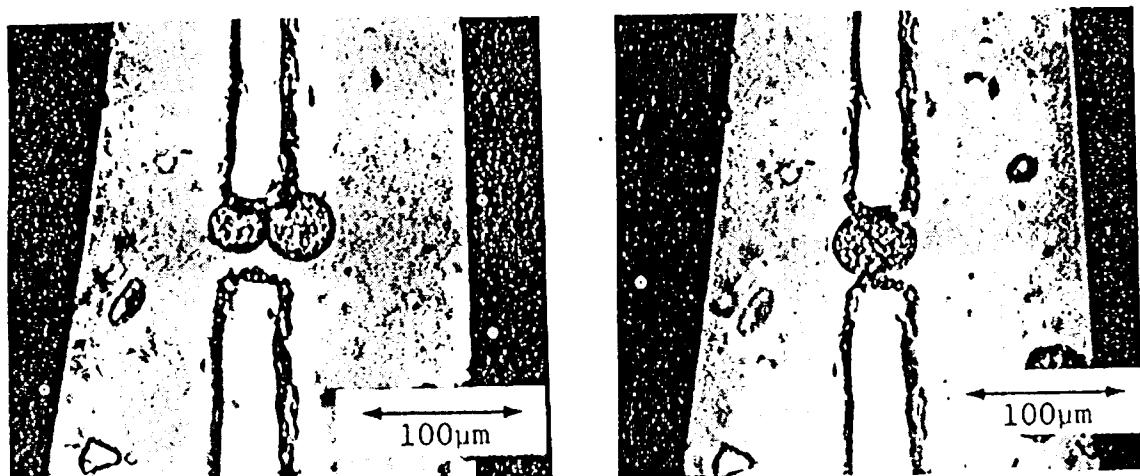


図3 フォト・リソグラフィーで作った静電細胞融合装置（1）



(a) 融合領域への静電吸引と接触

(b) 融合完了・ハイブリドーマ生成

図4 静電細胞融合の写真（1）

相当部分がこれら衝突相手の内部エネルギーに分配されないと上記の両法則が満足出来ないのである。その結果、たとえ常温・常圧のもとでも、相手を「解離」・「励起」・「電離」して、化学的に活性な「ラジカル」を生成、種々の「プラズマ化学反応」を起こさせる。

即ち、アーク等の「熱プラズマ」を除き、「プラズマ化学反応」に寄与するプラズマ中の構成要素は電子のみで、イオン全く寄与しないと言えるのである。

そこで、電子のエネルギー（電子温度）のみ著しく高くし、イオンのエネルギー（イオン温度）を低いままで保つてやると、常温のもとで有効な「プラズマ化学操作」を行う事が可能となる。この様に電子温度のみ高く、イオン温度が低いプラズマを特に「低温・プラズマ」または「非平衡プラズマ」と呼ぶ。非平衡と称するわけは、「エネルギー等分配則」にもとづき、平衡状態に達すると電子温度もイオン温度も等しくなるからで、電子温度のみが著しく高い状態は熱的に非平衡な、過渡的状態だからである。

そこで、常温での「プラズマ化学操作」を行うに当たっては、電界で電子のみを加速しイオンは加速しない様に「選択的加熱」を行う事が必要となる。イオンを加速してイオン温度をあげると原子や分子との衝突を通じて分子温度が上がり、熱電離が始まって、火花の前駆体である光った細いチャンネル 「リーダー」 → 「火花」 → 「アーク」となって「熱プラズマ」を生じ、プラズマ中の電界が大幅に低下して電子の十分な加速が不可能となるからである。

この様な、「低温プラズマ」ないし「非平衡プラズマ」は、新しい「表面処理」・「ガス状汚染物質 ( $\text{NO}_x$ ・ $\text{SO}_x$ ) や有害ガス (Hg蒸気・トリクロレン・ダイオキシン) の分解」・「気相合成」・「粉体表面改質」等々の手段として注目を集めている。

「低温プラズマ」の生成には

- ①電子のみの選択的加熱
- ②電子の原子・分子との衝突による原子温度・分子温度上昇の防止

の2条件を満足する事が要求される。

従来はこれを真空中で高周波放電を利用する事によって満たして来た。つまり高周波電界では質量が著しく小さく  $e/m$  比の大きな電子は加速出来てこれに電界からエネルギーを注入できるが、質量の大きいイオンは電界変動に追随できず、電界からエネルギーを受け取って加熱されることがないので、条件①が満たされる。

また真空中では平均自由行程が長く、電子と分子ないし原子との衝突確率が減って、条件②が満たされるのである。

しかし、殆どの工業的操業は、真空中ではなく常圧雰囲気中で行う事が必須条件であり

常圧の大気またはガス中で非平衡プラズマを発生させる事が出来れば、その応用領域は格段に広がって多くの有用な利用分野が生まれてくる。

このような「常圧・低温プラズマ」は次の3種類の方法で達成できる。

- ①ナノセカンド・パルスコロナ放電を利用したプラズマ化学操作 (P P C P = Pulse Corona Induced Plasma Chemical Process) (4、5)
- ②高周波沿面放電を利用したプラズマ化学操作 (S P C P = Surface Discharge Induced Plasma Chemical Proces) (4、5)
- ③オゾナイザ放電を利用したプラズマ化学操作

いずれも放電のプラズマ領域で電子射突によって雰囲気ガスの分子から反応性に富んだラジカル (OH, O, O<sub>3</sub>, NH, NH<sub>2</sub>, N, 等々) を生成し、これを上記のプラズマ化学操作に利用する。

#### ①P P C P :

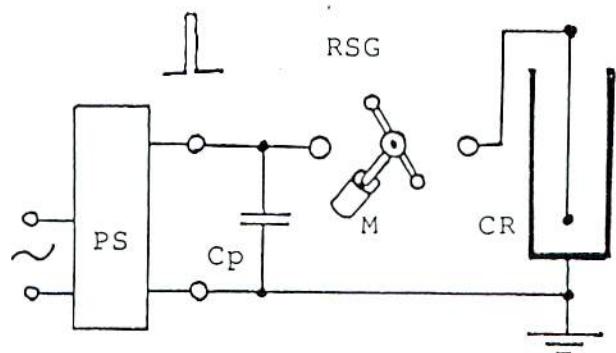
これは、立ち上がりが極めて急峻 (50 - 100 ns) で、幅も極めて狭く (200 - 500 ns) 、ピーク値が極めて高い (100 - 200 kV) 「極短パルス高電圧」、いわゆる「ナノセカンドパルス高電圧」を発生する「ナノセカンドパルス高圧電源」(図5) に、「コロナ電極」と「対向電極」からなる「コロナ電極系」を組み合わせて構成し、気相プラズマ反応によって「ガス処理」を行うも(図6(a))、プラスチックや金属の「表面処理」を行うもの(図6(b))等がある。

前者は燃焼排ガス中の NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, Hg ガス等の各種有害ガス成分、種々の生産工程で発生する溶媒蒸気や有毒ガス成分 (A i r T o x i c) , あるいは悪臭等の分解に用いられる(4、5)。例えば、ゴミ焼却炉廃ガス中に含まれる 水銀蒸気はP P C Pによる「プラズマCVD】によって酸化水銀、あるいは塩化水銀の微粒子に転換され、後置集塵装置で完全に除去される。

図7はP P C Pによる水銀蒸気の酸化除去の実験結果を示す(6)。

後者は自動車用「ポリプロピレン・プラスチック・バンパー」等のプラスチックの表面処理による塗装性、接着性の付与・向上(7)、あるいは金属の表面処理(窒化・還元・酸化)等に用いられる。

図8は「P P C Pバンパー処理装置」の回路を示す。また図9(a)はその電極システムの写真、図9(b)は処理中の「ナノセカンドパルス・コロナ放電の写真を示す。



PS : Charging Pulser  
 Cp : Pulse Forming Condenser  
 RSG : Rotary Spark Switch  
 M : Servo-Motor  
 CR : Corona Reactor

( a ) 回路図



( b ) 外観写真

図 5 P-P-C-P 用ナノセカンド・パルス高圧電源  
(エルダイン・パルサー T-5)

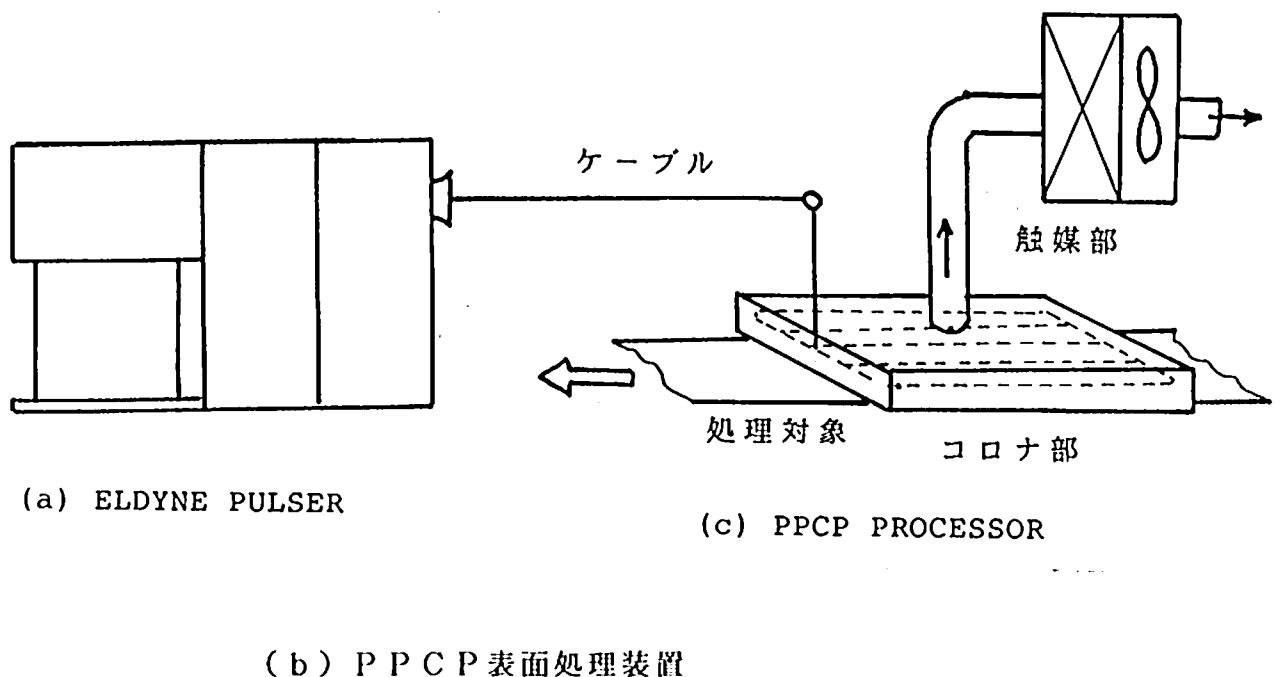
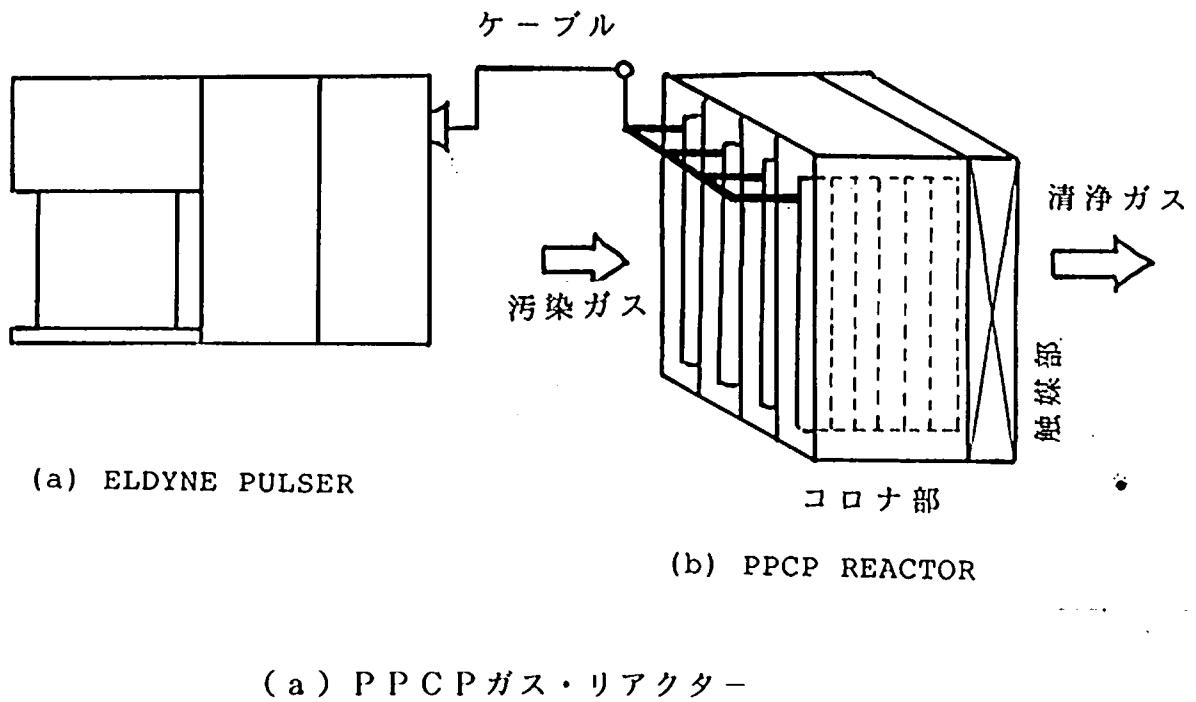


図6 PPCPのシステム構成

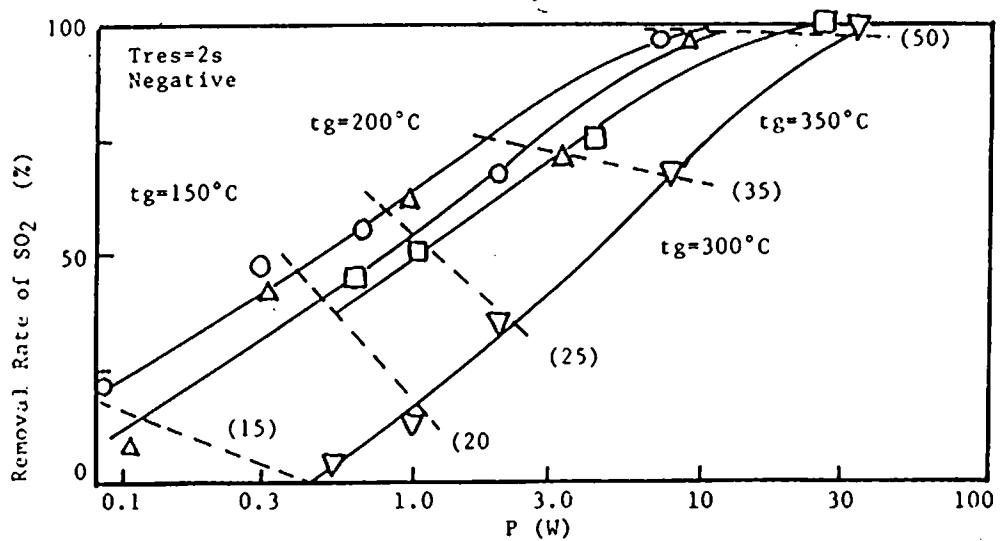


図7 ゴミ焼却炉燃焼廃ガス中の水銀蒸気のPPCPによる除去

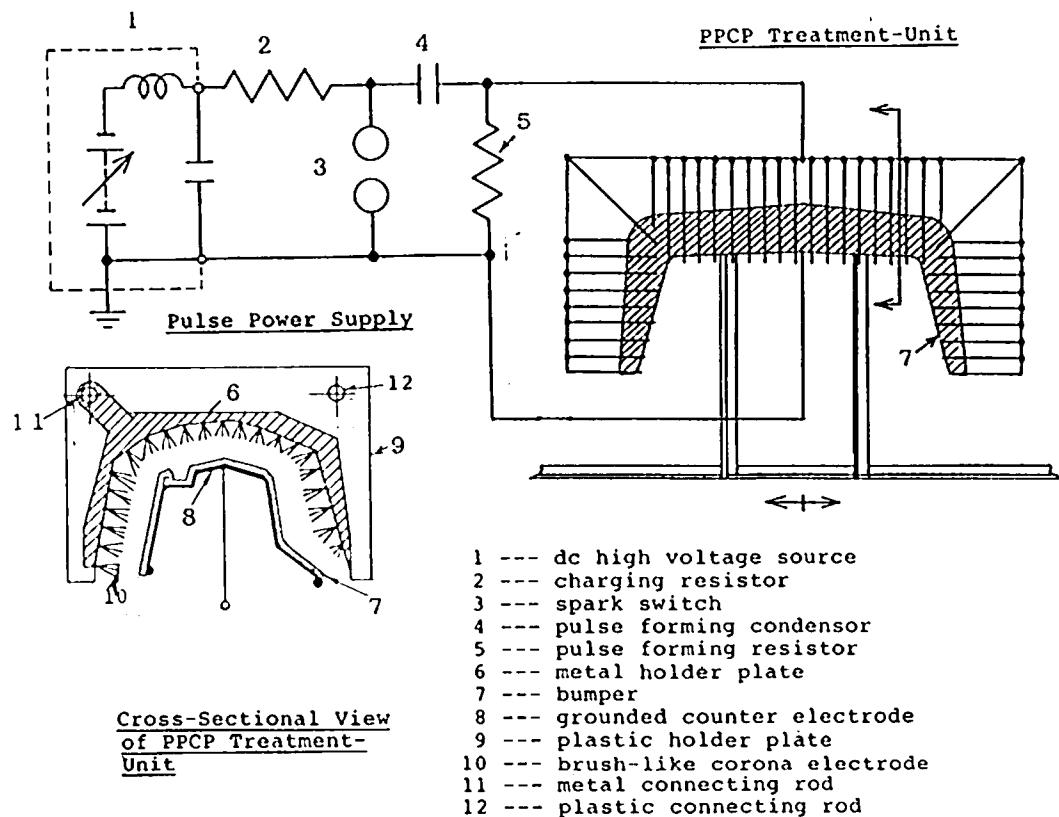
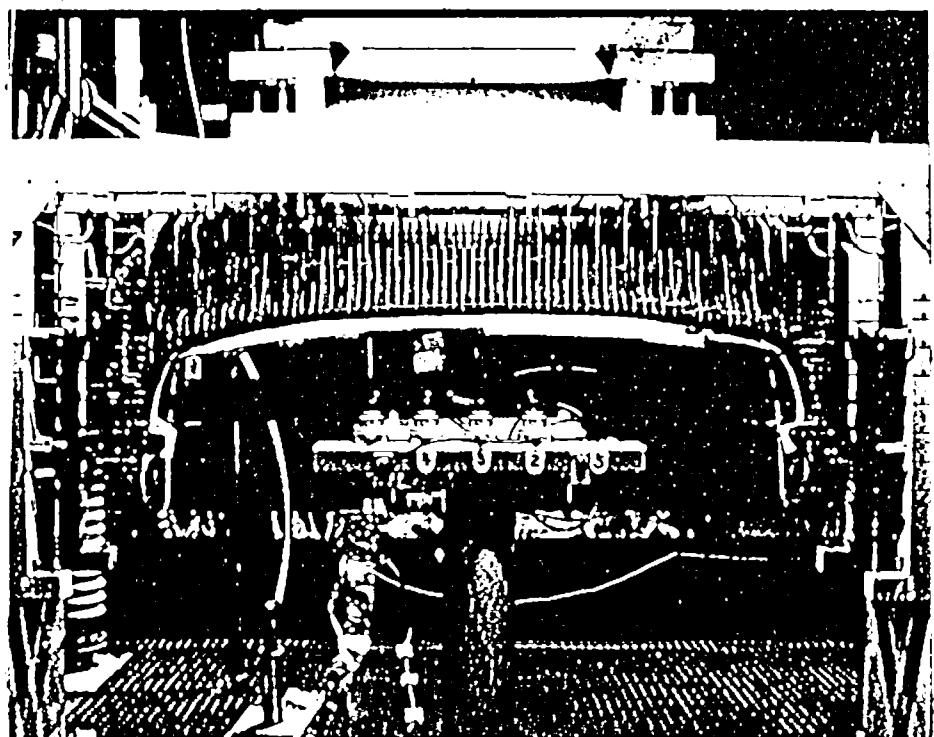
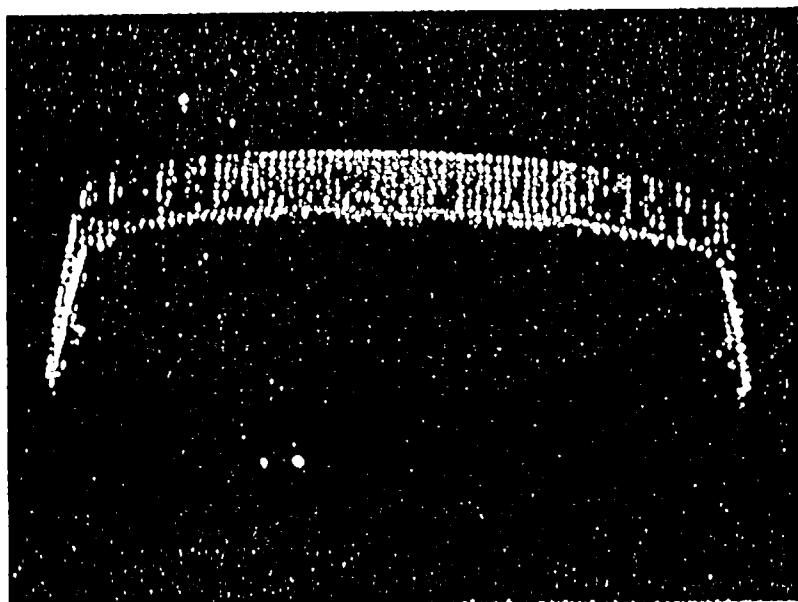


図8 PPCPによる自動車用ポリプロピレン・  
バンパー表面処理装置（電気回路）



( a ) 処理電極の外観



( b ) パルス・コロナ放電

図9 P P C Pによる自動車用ポリプロピレン・  
バブパー表面処理装置（処理電極系）

## ② S P C P :

これはセラミック等で構成した「沿面放電素子（S P C P エレメント）」（図10（a），（b））と、これらの素子に高周波高電圧を印加するための「電源」（図11）からなる（4、5）。

「S P C P エレメント」は図12または図13に示す様に、高純度アルミナ・セラミック基板の表面にタンゲイステンよりなる線状の「放電極」を、また基板の内部あるいは背面にやはりタンゲイステンよりなる膜状の「誘導電極」を有し、両電極間に高周波高電圧を印加すると放電極の周縁から基板表面に沿って、高周波沿面放電が発生する（図14）。

この「高周波沿面放電プラズマ」の中では電子温度は格別に高くなり、それに応じて極めて反応性の高いラジカルが生成する。その上、冷却がよく、過熱を防止できて高周波を利用出来るので、装置が著しく小型・安価となり応用範囲が格段に広くなる。

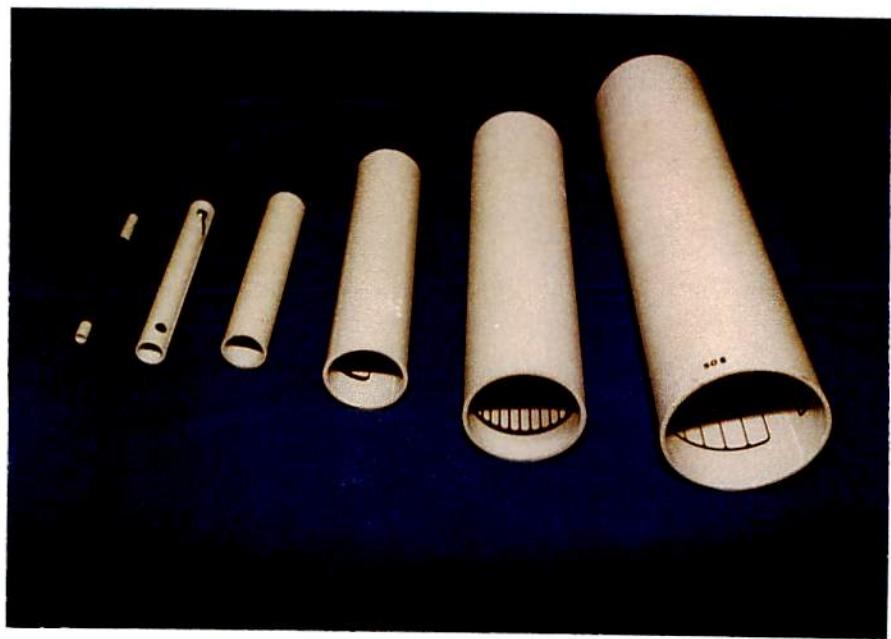
S P C P は現在、広くオゾン生成に利用され（8）、更にオゾンを利用した脱臭・殺菌・上水や下水のオゾン浄化・養殖漁業池の水浄化等々に応用されている。

またS P C P は各種の有害溶媒蒸気（フロン・トリクロレン・トルエン等）の分解除去にも極めて有効である（9、10）。図15はS P C P を利用したこれら溶媒蒸気の分解装置「S P C P ガスロセッサー」、図16はS P C P によるフロンガス（C F C - 113）分解の実験結果を示す。

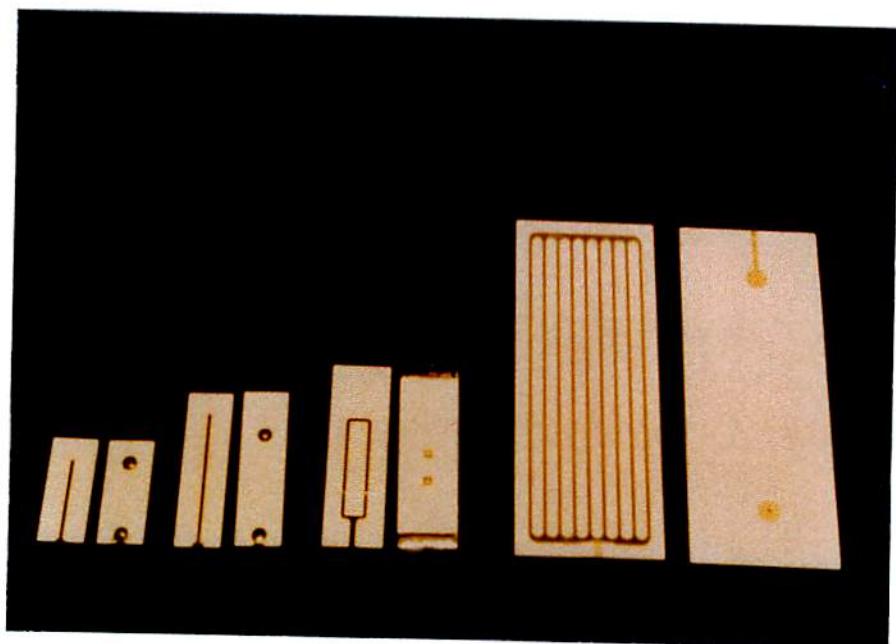
図17はS P C P を利用したプラズマC V D方式「S P C P ・ C V D」による「セラミック超微粒子」と「セラミック超フィルター」の静電的製造法式（11、12）の原理を、また図18はこれに用いる「S P C P エレメント」と「電源」を示す。

沿面放電プラズマの領域内で「S P C P ・ C V D」によりシランガス・アンモニア・窒素ガスから気相合成で「窒化珪素の超微粒子」が生成される。直流電源の作用でプラズマ域から中心部に向かって負イオンが引き出され上記超微粒子に射突してこれを負に荷電する。荷電された超微粒子は直流電界によるクーロン力で中心へと駆動され、正の直流高圧を印加された円筒状「吸引電極」を取り巻く目の粗い円筒状の多孔質セラミックセラミックの「担持体」の外表面上に付着・堆積する。

この際超微粒子は直流電界中で分極しており、分極粒子の静電的相互作用の結果、付着は「数珠玉状」に行われる。この現象を「パール・チェーン・フォメーション」（13）と呼び、粉体の静電操作上、極めて重要な現象の一つである。ついで付着層を付けたままセラミック・キャリヤー円筒を炉に入れて加熱すると、超微粒子同志の接触点が焼結して「パール・チェーン」が纖維状となり、それらが互いに絡まりあって「超フィルター」



( a ) 円筒型 S P C P エレメント



( b ) 平板型 S P C P エレメント

図 1 0 セラミックえん面放電素子 ( S P C P エレメント )

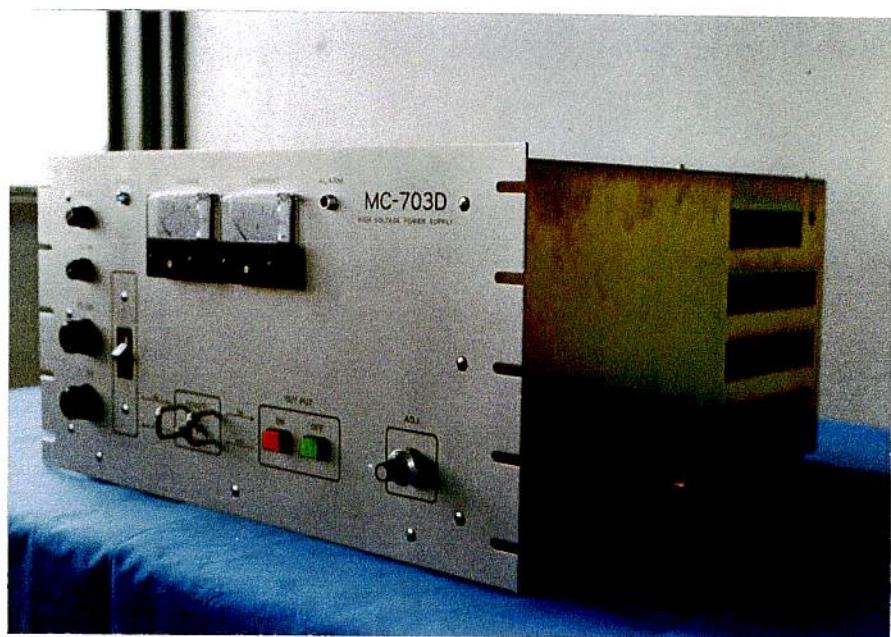


図 1 1 S P C P 用高周波高圧電源 (M C - 7 0 3 - D)

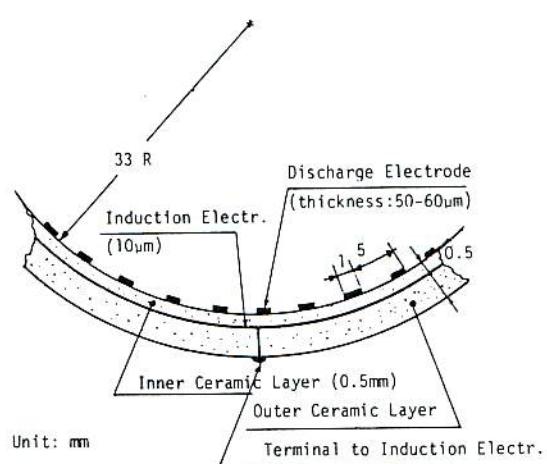
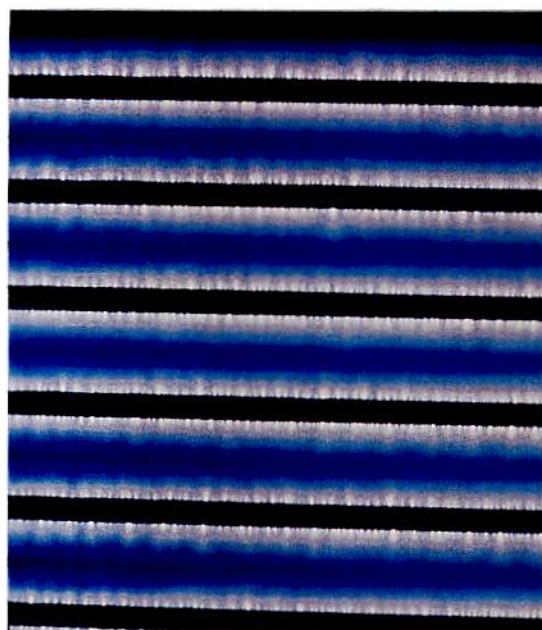


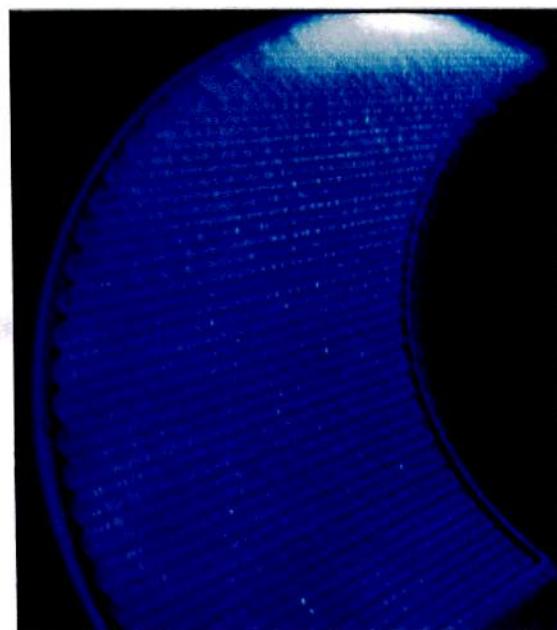
図 1 2 円筒型 S P C P エレメント  
断面図



図 1 3 平板型 S P C P エレメント  
断面図



( a ) 平板型



( b ) 円筒型

図 1 4 S P C P エレメントにおける高周波沿面放電

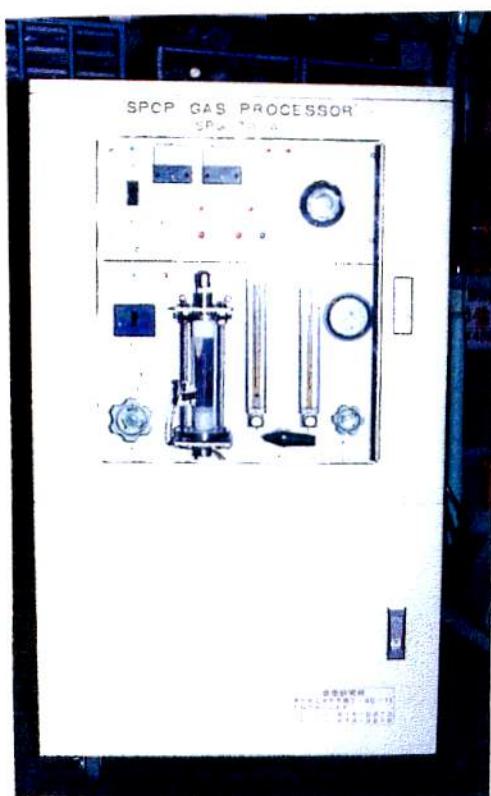


図 1 5 S P C P ガスプロセッサー

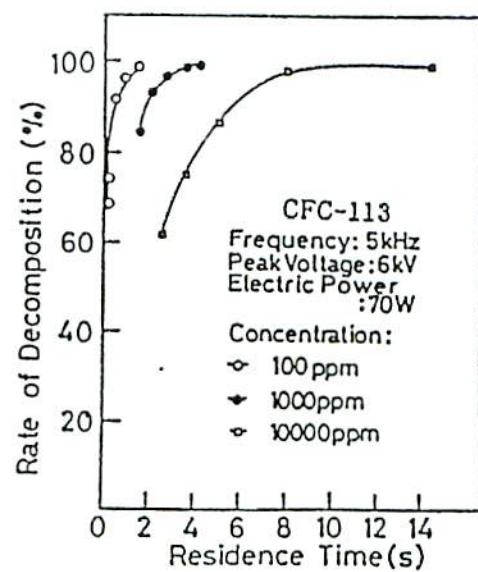


図 1 6 S P C P によるフロン分解データ

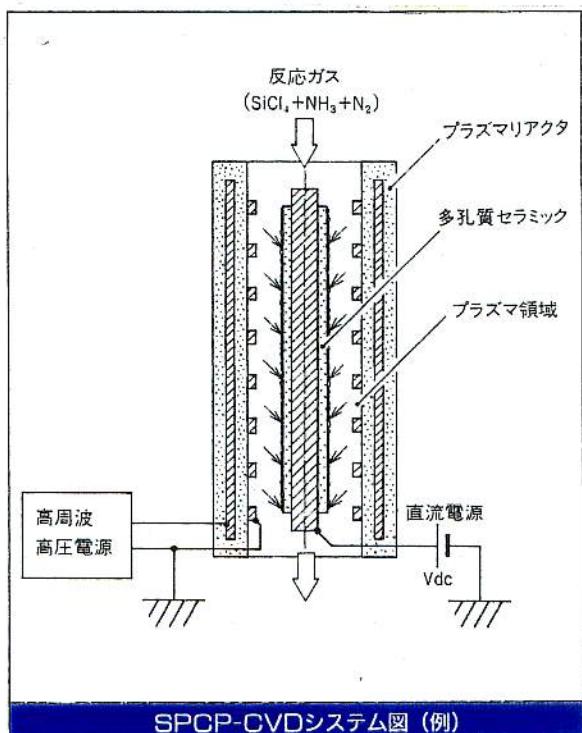


図 17 S P C P ・ C V D の原理

■電源ユニット  
使用電源：単相100V、500W  
寸法：253W×290T×170H  
重量：10kg

■プラズマリアクタユニット  
形状：円筒状 (70φ × 300L)  
材質：ファインセラミック  
最高使用温度：400°C

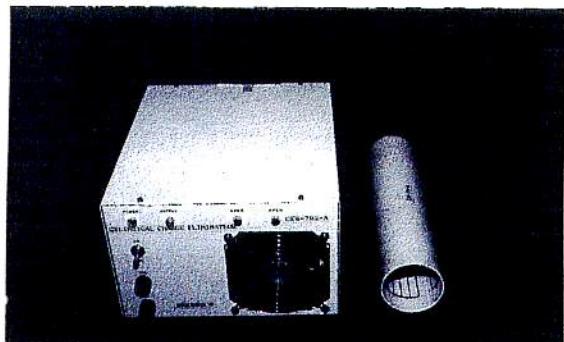


図 18 S P C P ・ C V D用セラミック  
エレメントおよび電源

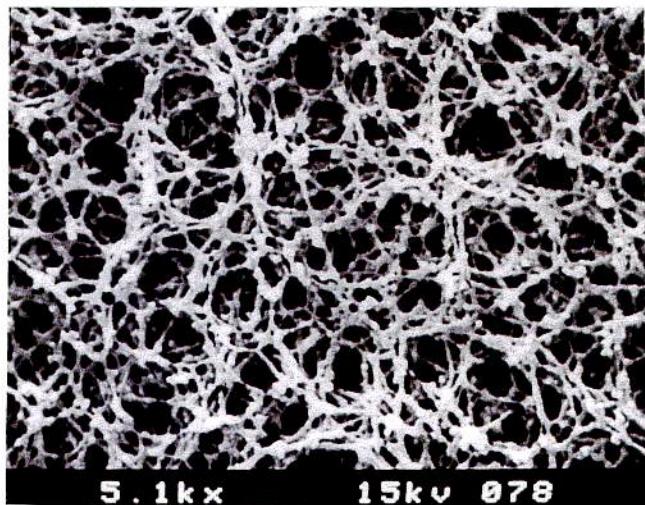
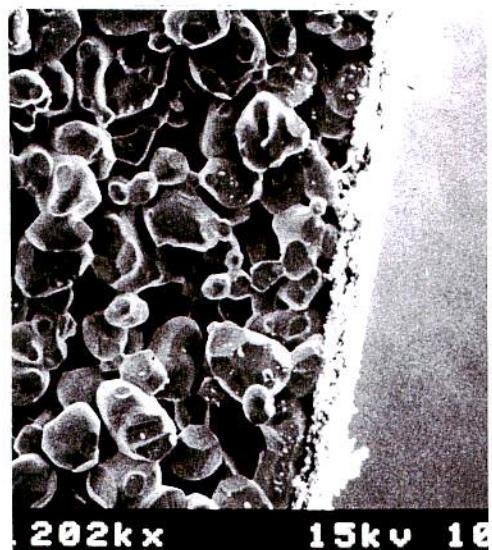


図 19 S P C P ・ C V Dで製作した窒化珪素セラミックの超フィルター

図19)が形成される。

この方法によって、空隙率95%、ポア・サイズ $0.3\mu\text{m}$ の窒化珪素の「超フィルター」が生成された。また酸化珪素、アルミナ、チタニヤ、テフロン等の超フィルタを作る事も出来る。これらの「超フィルター」は、高温度・高腐食性のガス雰囲気や液体中に分散する超微粒子の捕集に利用でき、且つ燃焼等による再生にも適している。

## 7. 電界カーテン:

誘電体の内部に多相(3相ま、6相、12相等)の線状電極を埋設し、これに相順に多相交流高電圧を印加すると、誘電体の表面に相順方向に進行する「進行波不平等電界」が出来、予備荷電ないし誘電体との接触帶電で帶電した微粒子や纖維等を「電気力学的」に浮上させ、更には浮上状態で進行波の方向に輸送する事が出来る(14、15)(図20)。これを「進行波電界カーテン」と言う。

線状電極の内の1相分を誘電体の表面に露出させて、交流コロナを起こさせイオンを供給出来る様にすると、上記の効果を一層強くする事が出来る。これを「1相露出型電界カーテン・パネル」という(図21)。

また、電極を単相にすると誘電体表面には「定在波不平等電界」が出来、その電気力学的作用で帶電粒子または付着粒子を反発・除去する事ができる。これを「定在波電界カーテン」という。

電界カーテンは閉じたブース内で静電粉体塗装を連続的に行える新しい「電界カーテン塗装装置」(図22)として実用化され、また静電植毛を閉空間で行う「電界カーテン植毛装置」も開発されつつある。また従来の静電粉体塗装ブースの内壁一面に張り付け、壁に静電力で付着し、払い落としが困難な粉体塗料の「瞬間払い落とし」による「色替え」の容易化を可能とした「電界カーテン塗装ブース」(図23)も実用化されている(16)。

また粉体を電界の作用のみで水平・垂直に輸送できる「電界カーテン・コンベヤー」も開発され、これをを利用して長形のスチールパイプの内面、あるいはアルミニウ・コラプシブルチューブの内面にポリエチレン粉体を静電塗着し熱成膜する技術も実用されている。

また、今後の半導体の真空雰囲気中でのプロセッシングに関連して、真空中でのシリコン・ウエーハーや微小物体輸送にもその活躍が期待だれている。

## 8. 新しい荷電技術と除電技術

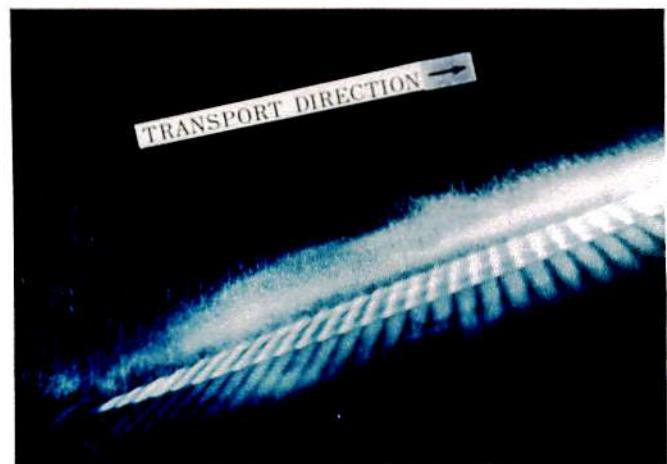


図20 電界カーテンによる粉体の電気力学的輸送

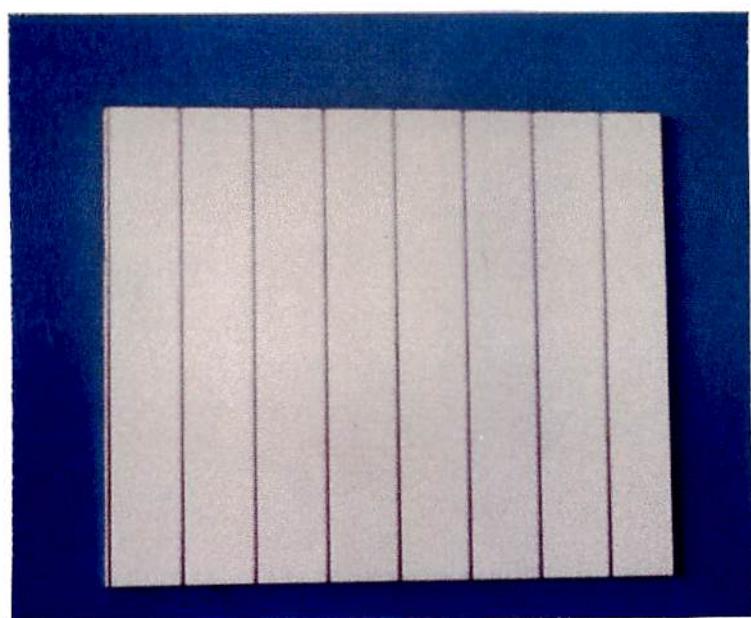


図21 1相露出型3相電界カーテン素子 (100W X 120L)

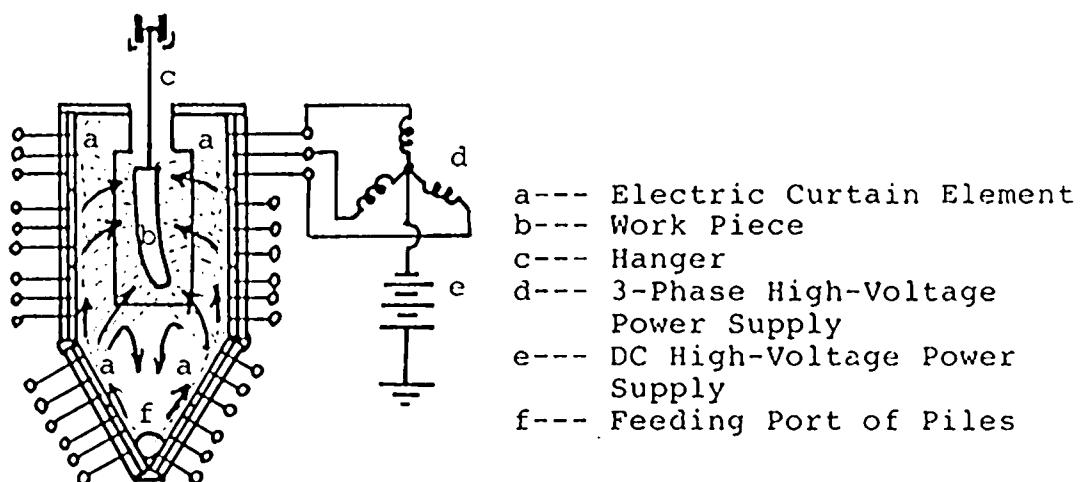


図22 電界カーテンを用いた粉体塗装装置

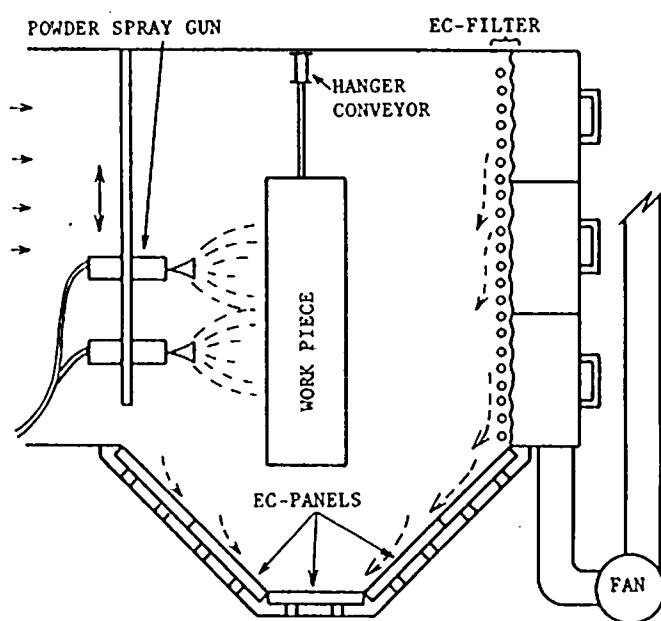


図23 電界カーテン払落とし機能付き粉体塗装用色替えブース

S P C P は多量の正負イオンの供給源としても利用でき、これを用いたあたらしい荷電と除電の技術が開発され、実用に供されている。

### ① ボクサー・チャージャー：

従来の直流コロナ放電による荷電では荷電された粉体が大部分対向電極に付着し、満足に次段の「静電操作領域」に十分に電荷を持った粉体を供給する事が出来なかった。

この難点を解決したのが図 2 4 に示すボクサー・チャージャー（17、18）である。ボクサー・チャージャーは荷電電界を交流にし、これに同期して「荷電空間」を挟んで対向配置されたイオン源である 1 対の「S P C P エレメント」を交互に励起する。この時、励起されて高周波沿」放電が生じたプラズマから単極性イオンが引き出され、励起されていない相手の「S P C P エレメント」にむかって「荷電空間」を横切って走行する。主電圧の極性が変わると現象が反転し、逆方向に同一極性のイオンが走行する。その結果、単極性イオンが左右から交互に「荷電空間」に導入された粉体粒子に射突して荷電を行う。

図 2 5 はボクサー・チャージャーの「荷電ユニット」の 1 例、図 2 6 はその「電源」である。図 2 7 は「荷電ユニット」の主要部をなすセラミック製の「荷電エレメント」で、円筒型のものは高温使用に適している。

図 2 8 はボクサー・チャージャーを利用した「S P C P ・ C V D システム」の原理を示す。これは「吸引電極」が使えない場合の絶縁物体表面への超微粒子の成膜等に利用される。円筒型の「荷電エレメント」の内部に対象物体（例えばガラス・ファイバー）を入れる。左右のプラズマ部分で生成・荷電された微粒子が交番静電力で振動し、対象物体に射突して、付着・成膜する。

### ② S P C P 除電器：

電気抵抗の高い粉体体の各種「化学工学的操作」（粉碎・攪拌・混合・乾燥等）や「空気輸送」の過程で、「粉流体と器壁」、ないし「粉流体同志」の激しい摩擦によって、一般に粉流体に強力な「摩擦帶電」を生ずる。その結果、粉流体の「粉碎不能」・「攪拌困難」・「混合困難」・「異常付着」・「コーティング形成」等々、種々のトラブルを生じ、さらには「着火性放電」（火花放電・ストリーマーコロナ）を生じて「可燃性蒸気」・「爆発性混合気体」・「可燃性粉体」等の着火・爆発・火災等の障害を生ずる事もある。

その有効な対策は、静電気を発生するプロセス・空気輸送ラインの内部または出口に、正負イオンを発生・放出する機能を持った「除電器」を設けることである。これによって、帯電した粉流体は自分の有する電荷と逆極性のイオンをクーロン力によって「除電器」

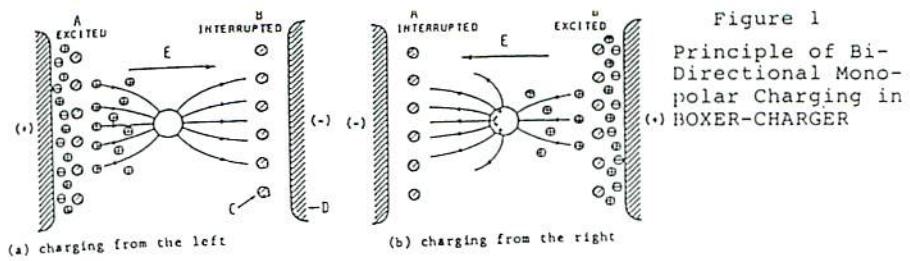
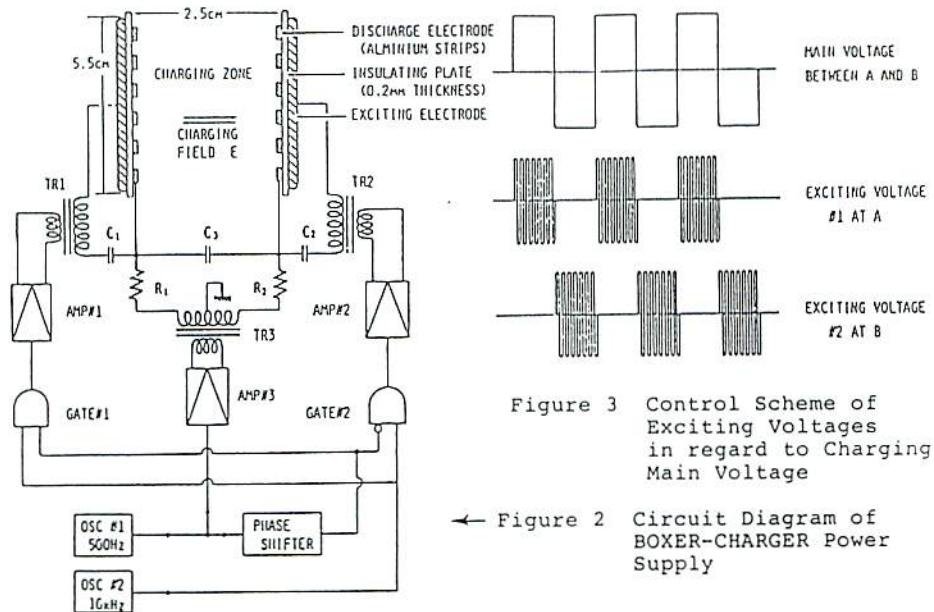


Figure 1  
Principle of Bi-  
Directional Mono-  
polar Charging in  
BOXER-CHARGER



← Figure 2    Circuit Diagram of  
BOXER-CHARGER Power  
Supply

Figure 3    Control Scheme of  
Exciting Voltages  
in regard to Charging  
Main Voltage

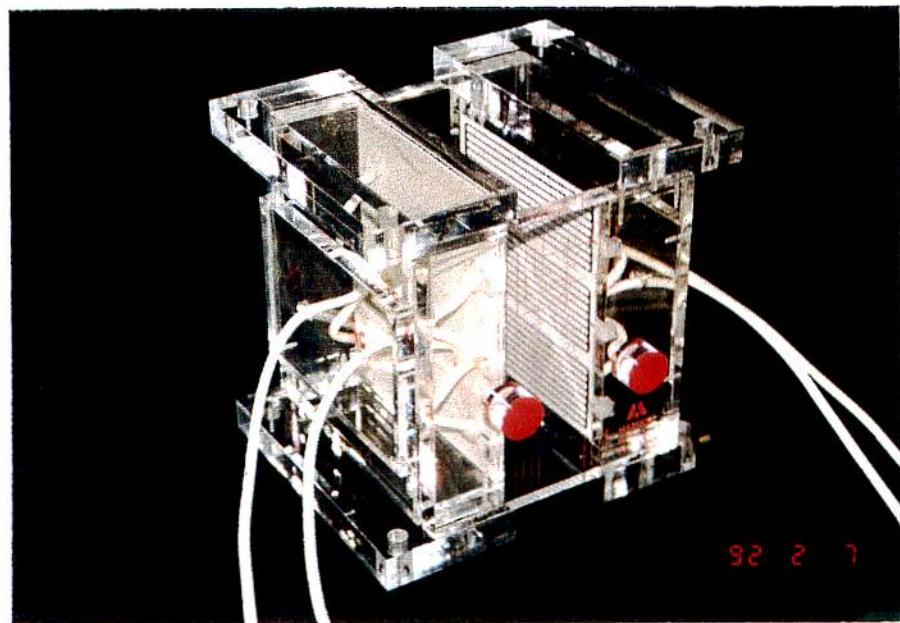


図 2 4 ボクサー・チャージャーの原理  
(矩形ダクト・タイプ)

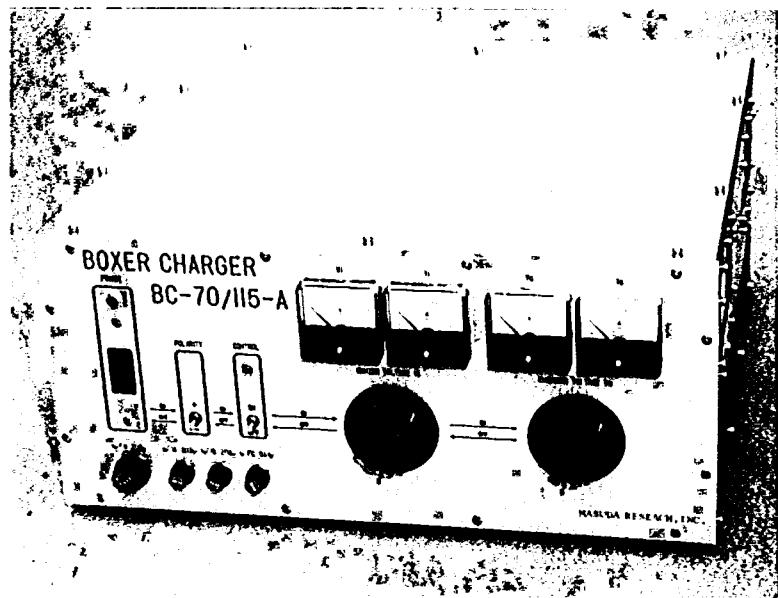


図26 ボクサー・チャージャー用標準電源  
(BC-70/115-A)

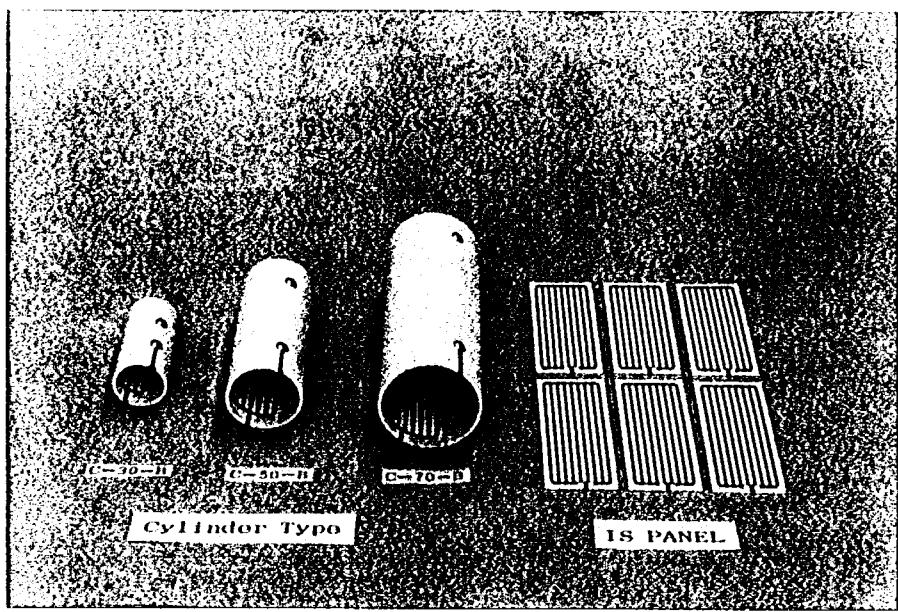
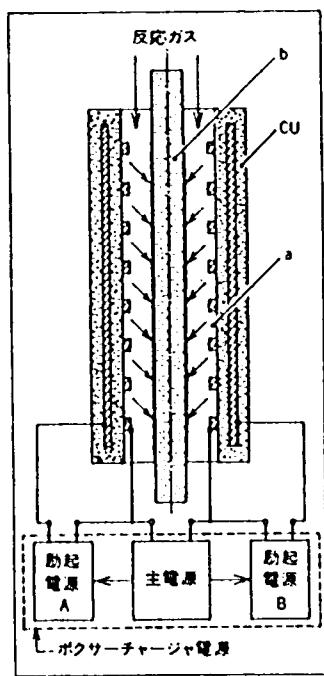


図27 ボクサー・チャージャー用荷電エレメント



円筒状荷電ユニット Cu内に導入された反応ガス ( $\text{SiCl}_4 + \text{NH}_3 + \text{N}_2$ ) はプラズマイオン源領域(a)におけるCVD作用で $\text{Si}_3\text{N}_4$ の超微粒子を生成し、これが荷電されてセラミックロッド(b)の表面に沈着します。(多段プロセスによって多層の傾斜成分膜の成膜も可能)。これを焼結処理して $\text{Si}_3\text{N}_4$ の原膜を生成します。

図28 ボクサー・チャージャー式 SPCP/CVD方式

のプラズマ領域から引き出し、中和・除電される。

この場合使用すべき「除電器」の形態・構造は対象プロセスによって大きく異なるが、共通に必要な条件は、その「イオン放出能力」が十分大きいという事で、これが大きいほど除電が急速かつ完全に達成される。

この「イオン放出能力」は、単位面積の除電器正負イオン源から単位時間当たりに放出出来る单極性イオンの量、換言すると除電用「イオン電流密度」が十分大きいという事でこの「イオン電流密度」の上限値（飽和値）は、その「除電器」のイオン生成部たるプラズマで、単位時間・単位面積当たりに生成する正負イオン量「イオン生成率」で抑えられる事となる。

従来ひろく用いられてきた「交流コロナ放電」を利用した「コロナ式除電器」に比べて、高周波沿面放電を利用する「S P C P 除電器」はこの「イオン発生率」において著しい差異を有し、その結果比較にならぬ優れた「除電性能」を有する。

図29は円筒型の「管路式S P C P 除電器」の電源および冷却用アルミ・フィンを着けた「円筒型除電エレメント」の写真をしめす。また図30はこの「除電エレメント」の断面図を示す。これを図31に示す様に粉体の空気輸送管の途中ないし出口にフランジ接続によって装着する使用する（19-21）。

図32は「イオン噴射式S P C P 除電器」で狭い間隙を隔てて対向配置した2枚の「平板状S P C P エレメント」の間を通って高速で空気を噴射し、気流に同般して豊富な正負イオンを帯電した対象物に供給・除電する。図33はこれを粉体の空気輸送管内に挿入して使用する例を示す（21）。

図34は粉粒体のシート出口とその下方ダクトの左右の壁に「平板型S P C P エレメント」を取り付ける事によって構成した「平板型S P C P 除電器」を示す。また図35はホッパーの出口にグリッドを設け、その格子上に多数の「平板状S P C P エレメント」を取り付けて「グリッド型S P C P 除電器」を構成し、ホッパーから落下する帶電粉粒体にこのグリッドを通過させて除電するものである（21）。

図36は「電界カーテン式除電器」で、密閉されたトラフの床上に「1相露出型電界カーテン・エレメント」（図21）を敷き並べて「電界カーテン・コンベヤー」を構成し、電気力学的作用で粉体を輸送する途中で、露出電極からイオンを供給し、帶電粉体の電荷量を最低レベルまで除電・減少させるものである。

## 9. 静電気配向による新しい繊維強化複合材料の製作法

#### 図 仕様例

- 電源ユニット  
単相100V入力、500W、253<sup>W</sup>×290<sup>T</sup>×170<sup>H</sup>、10kg
- 除電ユニット（水冷又は空冷）  
70<sup>W</sup>×300<sup>L</sup>、除電率=95%

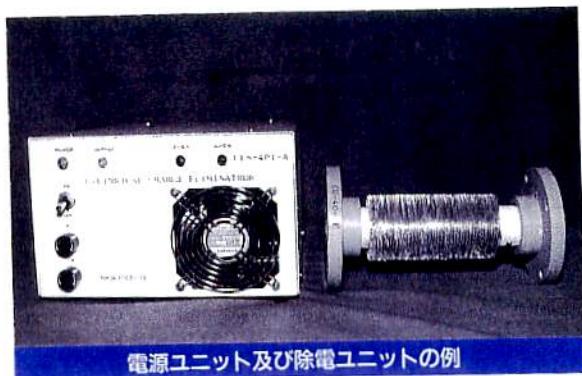
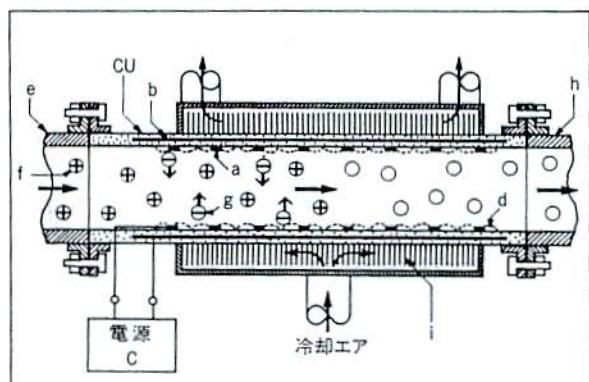


図 2 9 管路式 S P C P 除電器



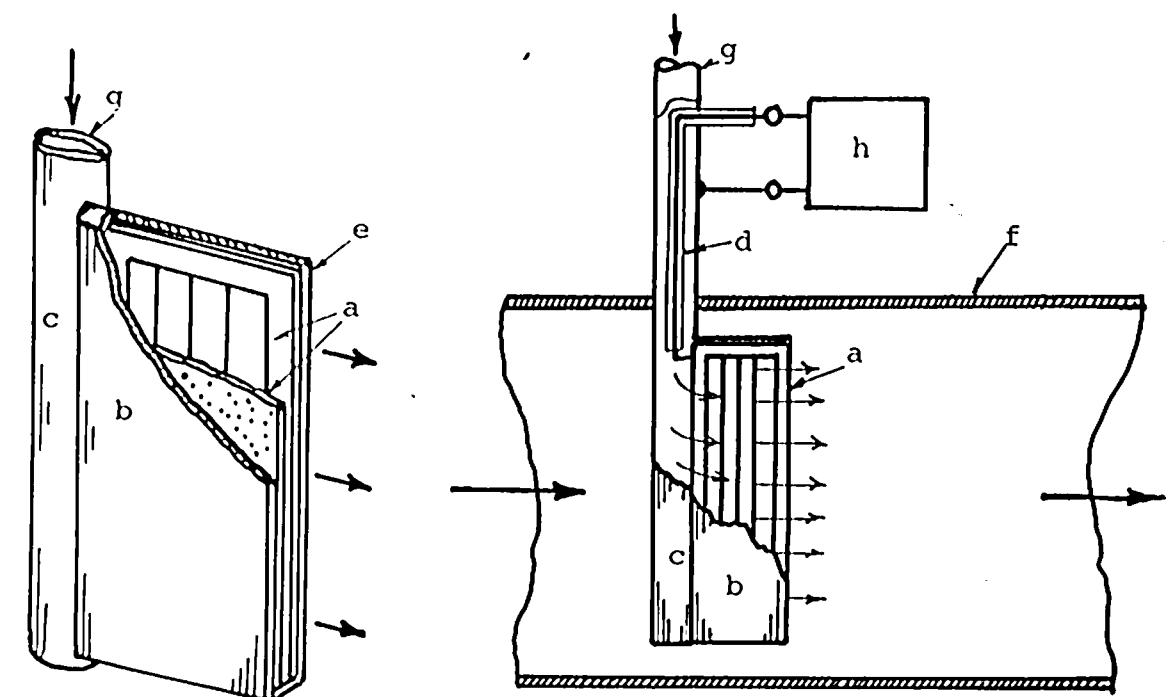
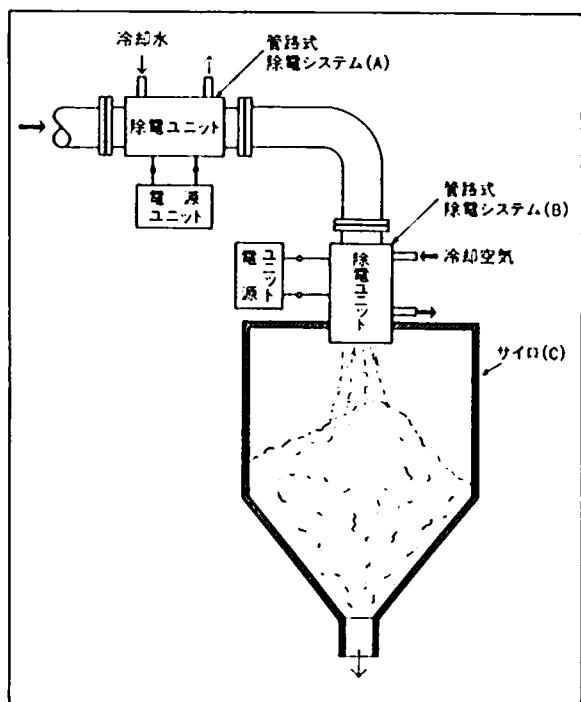
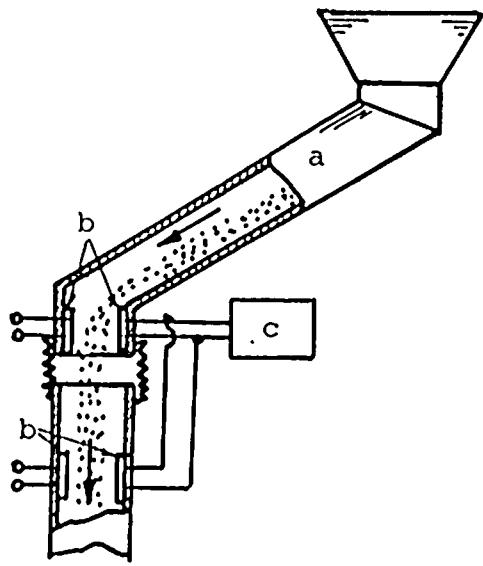
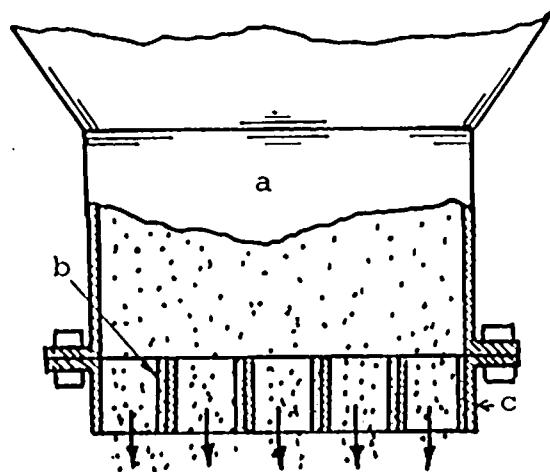


図3-2 イオン噴射式S P C P 除電器

図3-3 イオン噴射式S P C P 除電器  
の粉体空気輸送管路への取付



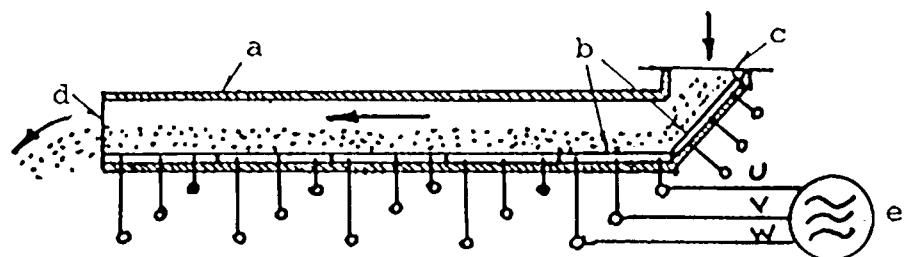
a: Shoot, b: IS-Panels  
c: Power Supply



a: Hopper Outlet, b: IS-Panels  
c: Charge Eliminator Grid

図3 4 粉体ショット出口への平板型  
SPCP除電器の取付

図3 5 ホッパー出口へのグリッド型  
SPCP除電器の取付



a: conveyor trough, b: Electric Curtain Panel  
c: Powder Inlet, d: Powder Outlet,  
e: 3-Phase Powder Supply

図3 6 電界カーテン式除電器

金属やプラスチックの中にアルミナ等のセラミック短纖維を入れる事によって、その強度を著しく向上する事が出来、この様な複合材料は「纖維強化金属」、「纖維強化プラスチック」と呼ばれている。この場合、もし材料中の纖維を1方向に配向した状態に出来れば、「引張強度」、「曲げ強度」、「摩擦係数」等の特性、特に高温におけるこれらの特性を大幅に向上出来る。

そこで、強化材料となる纖維を予め1方向に配向させ上、これをテープ状に形成し、溶融金属を注入する「型」の中にこのテープを仕込んでおいて、注入すれば、この様な「配向纖維強化金属」を作る事が可能となる。

このような「配向纖維テープ」の製作は、図37に示す様に、予めセラミック纖維を「フレオン」や「シリコン」等の適当な不燃性溶媒に分散させた後、直流電圧を印加した2つの電極間に導いて、いわゆる「静電配向」を起こさせる事により、極めて簡単に行う事が出来る(22)。

即ち、電界の作用で個々の纖維が分極し、その分極電荷にクーロン力が働いて回転モーメントを受け、纖維は先ず電界の方向に「静電配向」する。次に配向した纖維同志の間には、その分極電荷同志が引き合って細長い「纖維のチェーン」が形成される。これを「静電チェーン形成」という。最後に平衡に並んだ「静電チェーン」同志の間に、それぞれの単位纖維の分極電荷同志が横に引き合う力が働いて、チェーンが集まり、図38の様に羽毛状の「纖維フロック」が出来る。これを「静電フロック形成」という。

一旦このフロックが出来ると、急速に沈殿し、底部に「静電配向纖維」から成る、マットが沈積する。このマットを系外に取り出して乾燥。固定すると、上記の「配向纖維テープ」が出来るのである。

図39(a), (b)はアルミナ短纖維の「非配向纖維」を有する通常の「纖維強化アルミニウム金属」の2つの断面の写真で、纖維の配向がランダムである事がわかる。これに対して、図40(a)は上記方法で作ったアルミナ短纖維の「静電配向纖維」を有する「纖維強化アルミニウム金属」の配向軸に垂直な断面の写真、図40(b)は同じく配向面に平行な断面の写真で、金属中で纖維が綺麗に配向している事が判る。

纖維を溶媒中で静電配向させる場合の基本量は、 $M = (\text{分極電荷}) \times (\text{纖維長さ})$ で与えられる分極の「双極子モーメント」で、このうち配向運動の方程式を立ててみると「分極電荷」が配向速度を決定する最も重要なパラメーターである事が判る。

この「分極電荷」は、電界を加えた瞬間には「媒質の誘電率」と「纖維の誘電率」および纖維の直径・電界に対する角度という幾何学パラメーターのみで定まり、これを「誘電分極」という。「誘電分極電荷値」は「媒質の誘電率」に比べて「纖維の誘電率」が大き

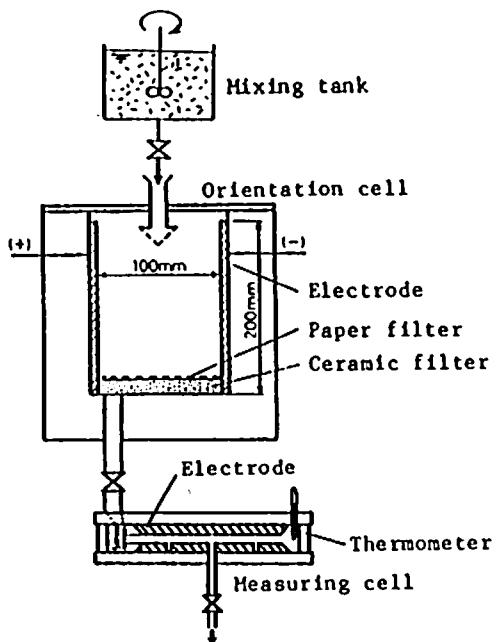


図 3 7 静電配向纖維テープの製作装置

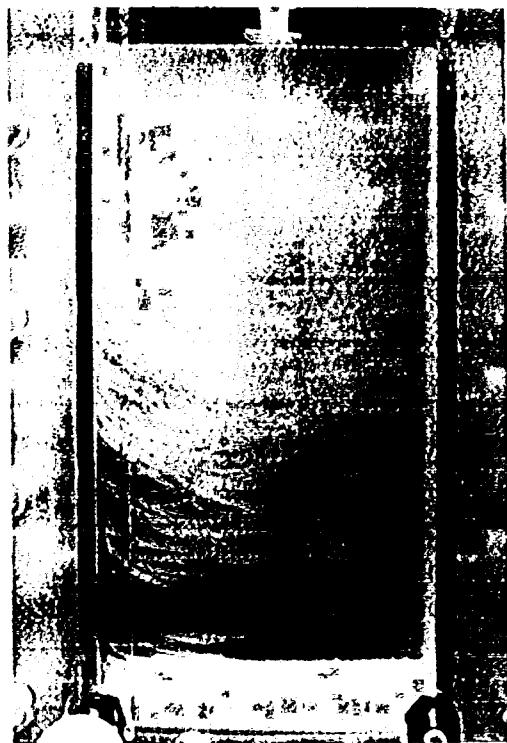


図 3 8 静電フロック形成

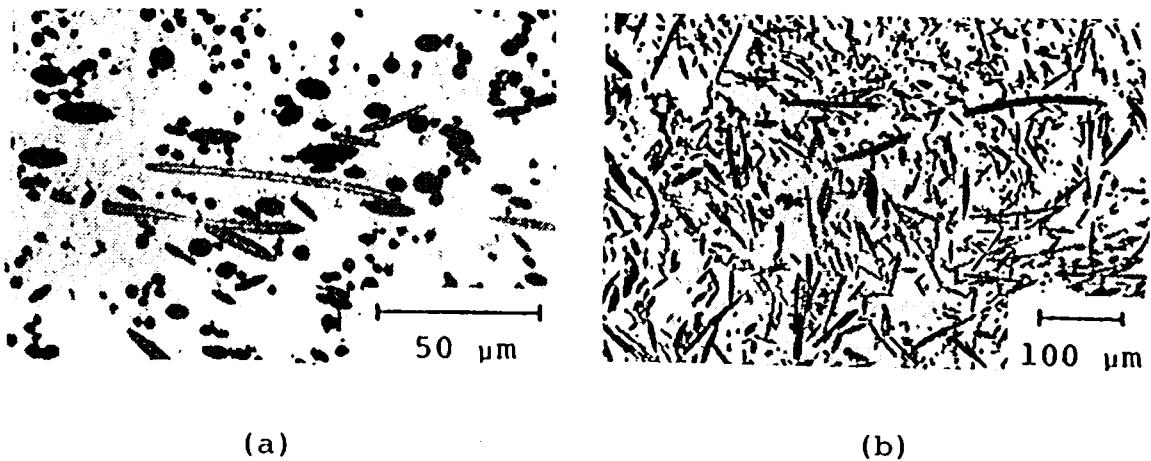


図3-9 従来の非配向アルミナ短纖維を用いた  
纖維強化アルミニウム金属の断面写真

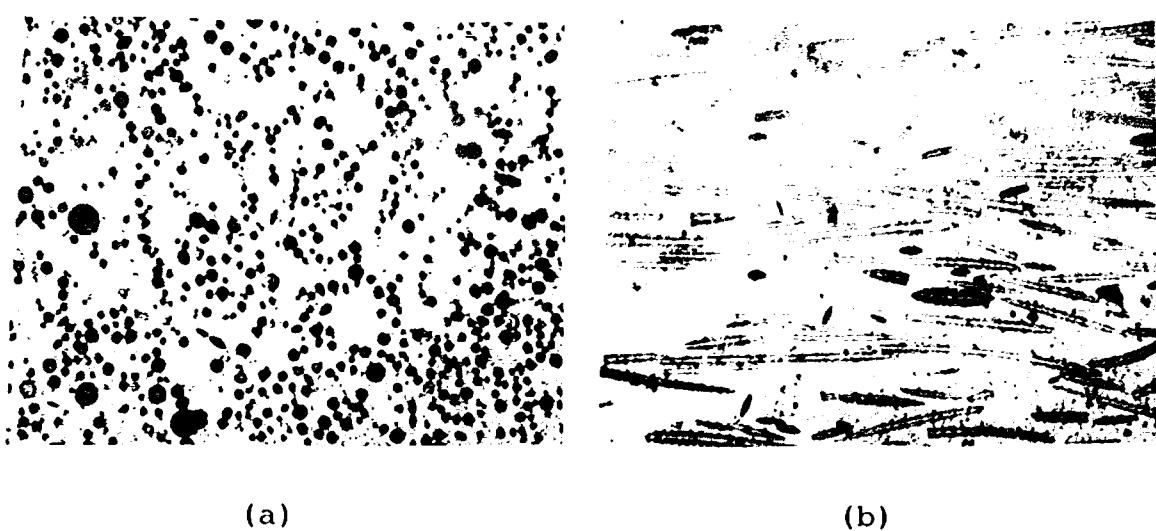


図4-0 静電配向アルミナ短纖維を用いた纖維  
強化アルミニウム金属の断面写真

い程大きくなる。

しかし時間と共に纖維の内部および表面吸着層を通って電荷の移動が起こり、一定の時間後には纖維が導体であるとした場合と同じ「分極電荷値」となる。この「導電分極電荷」は「纖維の誘電率」を無限大とした場合の「最大誘電分極電荷値」と一致し、これ以上の分極電荷値はあり得ない。そして、「誘電分極状態」から「導電分極状態」に移行する速度は、纖維の内部ないし表面吸着層を通って電荷が移動する速さで定まり、纖維の内部「実体導電率」ないし、その表面吸着層の「表面導電率」が高いほど早くなる。

実際の「静電配向プロセス」で問題となるのは「誘電分極電荷値」ではなく、是よりも大きい「導電分極電荷値」である事は言う迄もない。従って、基本的には何如に纖維の「実体導電率」ないし「表面導電率」を上げるかが、先ず問題となる。

しかし、金属ないし半導体の様に「実体導電率」の高い纖維では、「静電配向」、「静電チェーン」の形成自体は早いが、これが電極間を橋絡すると、「短絡電流」が流れて火花や発熱を生じ、「静電配向プロセス」自体が不可能となる。従って、技術の現段階ではアルミナ等の絶縁物短纖維のみが静電配向に適した纖維材料となる。

このような「絶縁物短纖維」で「誘電分極」から「導電分極」への移行を早め、「静電配向」効果を高めるには、媒質中に適當な「界面活性剤」を滴量添加し、その分子を纖維の表面に吸着させて、適正な値の「表面導電率」を付与させるのが最上の方法である。ここに適正な値とは：

- ①短時間に所要の「静電フロック」を形成して十分な生産性を確保出来るに足る大きさであること。したがって、添加すべき界面活性剤の濃度に下限値  $C_{min}$  がある。
- ②界面活性剤の濃度が高すぎると溶媒中を流れるイオン流の大きさが過大となり、これが溶媒自体に乱流（電気流体力学的流れ）を生じ、纖維の「静電配向」、「静電チェーン形成」、「静電フロック形成」が阻害され、「静電配向プロセス」自体が不可能となる。従って、添加すべき界面活性剤の濃度には上限値  $C_{max}$  が存在する。

結局、このプロセスの運転期間を通じて、上記の  $C_{min}$  と  $C_{max}$  との間のスロットに来る様に界面活性剤の濃度をコントロールする必要があるのである。この濃度は、図 3-9 に示す様に、「静電配向セル」から溶媒を抽出して下方の「導電率測定セル」に導き、溶媒の導電率を測り、その値から間接的に推定する。即ち界面活性剤は溶媒中に可動性イオンを供給して溶媒の電気伝導の主役を演ずるので、その導電率は、近似的に界面活性剤濃度に比例する。

図 4-1 は「静電配向アルミナ短纖維」を有する「纖維強化アルミニウム」と通常の「非配向アルミナ短纖維」を有するものについて、「高温曲げ強度」を比較した試験結果を

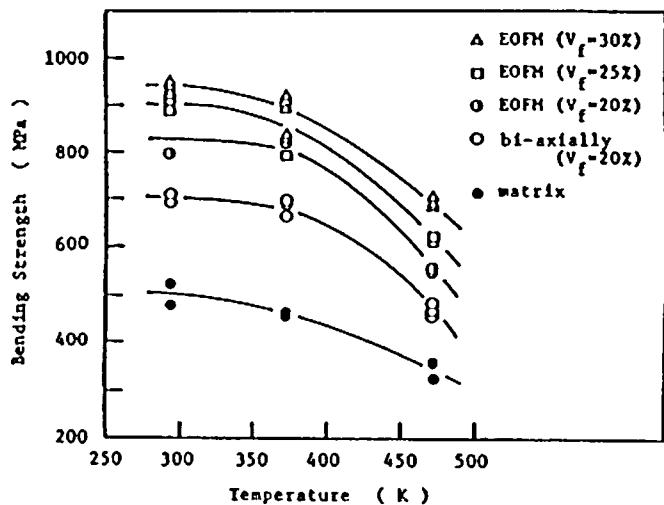


図 4-1 静電配向アルミナ短纖維と非配向アルミナ短纖維を有する  
纖維強化アルミニウム金属の高温曲げ強度の比較

fiber orientation	Thermal expansion coefficient ( $10^{-6}/K$ )
EOFH	12.8
EOFH	23.4
bi-axially	21.2
matrix	23.4

12. Thermal expansion coefficient of FRM (samples without heat treatment; measured at 303 ~ 573 K; FRM's with  $V_f = 20\%$ ).

図 4-2 静電配向アルミナ短纖維と非配向アルミナ短纖維を有する  
纖維強化アルミニウム金属の熱膨張係数の比較

を示すもので、前者の優越性が判る（22）。

また図42は、両者について、熱膨張係数を比較した測定結果で、前者の配向方向の熱膨張係数が大幅に小さくなる事が判る（22）。

## 10. おわりに

以上、最近の静電気応用とその将来動向について、幾つかの例を挙げて説明した。いずれも従来の静電気応用の概念からみると、大きく逸脱した感があるが、いずれも「電界」、「放電」、「静電力」という基本的静電現象の新しい工学分野への応用である事には変わりがない。

全ての技術は新しい「科学的発見」、それに基づく「発明」が生み出す「イノベーション」が生み出す「新しいシーズ」と、時代の変化が絶え間なく生み出す「新しいニーズ」の両方を母体として進歩・発展・変化するものである。静電気応用についても同様で、フレキシブルな発想と絶えざる研究をもって、時代の要求に答えて行く事が重要であろう。

特に、今まで余り注目されて来なかった「静電現象の多様な性格」について科学的思考と実験的評価を行い、静電気応用のさらなる新分野を開拓する事が何よりも重要であると考えるものである。

筆者の拙い講演に御興味を抱いて頂ければ、望外の喜びである。

## 11. 参考文献

- (1) U. Zimmermann, G. Pilwat and H. Pohl: Electric-field-mediated cell fusion, Biol. Phys., Vol. 10, pp. 43-50 (1982).
- (2) S. Masuda, M. Washizu and T. Nannba: Novel Method of Cell Fusion in Field Constriction Area in Fluid Integrated Circuit, IEEE-IA Trans., Vol. 25, No. 4 (July/August, 1989), pp. 732-737 (1989).
- (3) M. Washizu, T. Nannba and S. Masuda: Handling of Biological Cells Using a Fluid Integrated Circuit, IEEE-IA Trans., Vol. 26, No. 2 (March/April, 1990), pp. 352-357 (1990).
- (4) S. Masuda: Control of Air Toxic Material by Novel Plasma Chemical Process - PPCP and SPCP, Proc. EPRI Symposium on Managing Hazardous Air Pollutants - State of the Art (Oct., 1991 in Washington, USA).
- (5) S. Masuda: Destruction of Gaseous Pollutants and Air Toxics by Surface Induced PlasmaChemical Process (SPCP) and Pulse Corona Induced Plasma Chemical Process (PPCP), Proc. NATO Symposium on Non-Thermal Plasma for Pollution Control

- (Sept., 1992 in Cambridge, UK)
- (6) S. Masuda, Y. Wu, T. Urabe and Y. Ono: Pulse Corona Induced PlasmaChemical Process for DeNO<sub>x</sub>, DeSO<sub>x</sub>, and Mercury Vapour Control of Combustion Gas, Proc. 3rd Int. Conf. on Electrostatic Precipitation, pp. 667-676 (Oct., 1987 in Padova, Italy).
- (7) S. Masuda, I. Tochizawa, K. Akutsu, K. Kuwano and A. Iwata: Surface Treatment of Plastic Material by Pulse Corona Induced Plasma Chemical Process - PPCP, Proc. IEEE/IAS 1991 Annual Conf. (Sept./Oct., 1991 in Dearborn, Michigan, USA)
- (8) S. Masuda, K. Akutsu, M. Kuroda, Y. Awatsu and Y. Shibuya: A Ceramic-Based Ozonizer Using High-Frequency Surface Discharge, IEEE/IA Trans., Vol. 24, No. 2 (March/April, 1988), pp. 223-231 (1988).
- (9) S. Masuda, X.-L. Tu, K. Sakakibara, S. Kitoh and S. Saiki: Destructio of Gaseous Pollutants by Surface Discharge Induced PlasmaChemical Process - SPCP, Proc. IEEE/IAS 1991 Annual Conf. (Sept./Oct., 1991 in Dearborn, Michigan, USA).
- (10) T. Oda, T. Takahashi, H. Nakano and S. Masuda: Decomposition of Fluorocarbon Gaseous Contaminants by Surface Discharge Induced Plasma Chemical Process-ing, ibid.
- (11) H. Yamamoto, S. Shioji and S. Masuda: Synthesis of Ultra-Fine Particles by Surface Discharge-Induced Plasma Chemical Process and Its Applications, Proc. IEEE/IAS 1990 Annual Conf. (Oct., 1990 in Seattle, Washington, USA)/
- (12) H. Yamamoto and S. Masuda: Electrostatic Deposition of CVD Particles for Fabrication of Ultrafine Ceramic Filter, IEEEIA Trans., Vol. 27, No. 2 (March/April, 1991), pp. 307-310 (1991)/
- (13) 静電気学会編集：「静電気ハンドブック」、オーム社出版。
- (14) S. Masuda, K. Fujibayashi and K. Ishida: Elektrodynamisches Verhalten auf-geladener Aerosolteilchen im inhomogenen Wechselfeld und seine Anwendungs-moeglichkeiten in der Staubtechnik, Staub - reinhaltung der Luft, Bd. 30, Nr. 11, S. 449-456 (1970).
- (15) S. Masuda and Y. Matsumoto: Contact-Type Electric Curtain for Electrodynamical Control of Charged Dust Particles, DECHEMA-MONOGRAPHIEN, Vol. 72/1974, 3-11 (2974).
- (16) S. Masuda, T. Itoh, I. Ando, M. Yamamoto and Y. Okamoto: Electric Curtain Booth for Powder Costing, Proc. IEEE/IAS 1977 Annual Conf., pp. 887-891 (1977).
- (17) S. Masuda, M. Washizu, A. Mizuno and K. Akutsu: BOXER-CHARGER - A Novel Charging Device for High Resistivity Powders, Proc. IEEE/IAS 1978 Annual Conf., pp. 16-12 (1978).
- (18) S. Masuda, M. Washizu and T. Ohtani: BOXER-CHARGER - A Bi-Directional Monopolar Charging Device, Proc. 2nd World Congress PARTICLE TECHNOLOGY (Sept., 1990 in Kyoto, Japan).

- (19) S. Masuda, T. Sonobe and T. Saito: Charge Elimination in Pneumatic Conveyor Line of High-Resistivity Powders, IEEE-IA Trans., Vol. 19, No. 6, pp. 1112-1117 (1983).
- (20) 荷福正治、増田閃一：粉粒体空気輸送用円筒型除電器の除電特性、静電気学会誌、Vol. 11, No. 3, pp. 178-184 (1987).
- (21) S. Masuda and S. Hosolawa: Novel Charge Elimination Method in Powder Handling and Transport Using Surface Discharge, to be presented at 7th Int. Conf. on Electrostatics (May 11-14, 1983 in Lahnstein, Germany).
- (22) S. Masuda and T. Itoh: Electrostatic Means for Fabrication of Fiber-Reinforced Metals, IEEE-IA Trans., Vol. 25, No. 3 (May/June, 1989), pp. 552-557 (1989)/