

高性能静電液滴捕集と排液処理技術の開発（第一報）

Development of High Efficiency Electro-Static Scrubber and Drain Treatment Technique (1st Report)

山口 達信*
Tatsunobu Yamaguchi

伊勢 賢郎**
Kenrō Ise

安達 嗣雄***
Tsugio Adachi

萩谷 宏三****
Kōzō Hagiya

芦川 正行*****
Masayuki Ashikawa

吉田 尚弘*
Naohiro Yoshida

要 約

従来のフィルター設備に代わり、予備荷電と荷電液滴の組合せにより高効率の捕集性能を持つ静電捕集装置の開発を行った。

今回の実験では処理風量 $9 \text{ m}^3/\text{min}$ のモデル装置を製作し、性能試験を行った。その結果、定格風量時で最大捕集率95.8%を得た。また、予備荷電による捕集率の上昇も確認された。

これと並行して荷電液滴装置から排出されるドレーン水の処理に電気泳動分離法を用い、分離技術の確立と実用化試験を行った。その結果、純水を溶媒とし高分子剤等を加えることで十分な分離ができたが、電導度の高い溶媒に対しては、ジュール熱の発生等で十分な分離ができないことがわかった。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 静電液滴捕集技術
- §3. 排液処理技術
- §4. 実験内容
- §5. 実験結果及び検討
- §6. おわりに

§1. はじめに

現在、バイオ施設、原子力施設等の給排気設備では、HEPA フィルター (High Efficiency Particulate Air filter) と呼ばれる超高性能フィルターとプレフィルターが併用されている。このフィルター設備は十分な捕集能力はあるが、その反面、次のような欠点がある。

- ① 一定期間毎に交換が必要である

- ② 運転中に圧力損失が上昇し、給排気系の負荷が増加するため、初期の性能を維持できない
- ③ バイオ施設等では、フィルターに付着した細菌等の処理が困難で、フィルター上での増殖を防止できない
- ④ 原子力施設では、HEPA フィルターの塵埃保持容量が少ない上にろ材・スペーサ・枠が同時に汚染され、極めて嵩高な廃棄物となっている

以上のような在来設備の欠点を完全に取除くことを目的として、予備荷電と荷電液滴による静電捕集に置き換えた高効率の捕集技術の開発に取り組んだ。

また、静電液滴捕集では水を利用するため、排出されるドレーン水の処理技術も水の循環使用、放射性廃棄物の減容という面から重要であり、今回は電気泳動分離法という新技術の開発を試みた。

本実験装置はたまたま技術研究所が新築工事中のため、大和機材センターの御好意により工場内の一画を借りて実験を行った。この装置は、Nishimatsu Electro-static Scrubber SYstem の頭文字をとって、NESSY (ネッシー) と呼称している。

*技術研究部建築技術課
**技術研究部副部長
***技術研究部建築技術課副課長
****技術研究部原子力室
*****関東支店機械課

なお、本技術開発は科学技術庁より放射性廃棄物処理技術開発促進費補助金の交付を受けて三ケ年（昭和58年度下期～昭和60年度）計画で行っているもので、初年度に多少の知見を得たのでここに報告する。

§ 2. 静電液滴捕集技術

帯電水滴を用いて、これと逆極に帯電したダスト粒子を捕集する方法は、1940年代初期 Penny によって提案されて以来、各所で研究がなされているが、今日いまだにこの方法を用いた装置は普及していない。その主な理由は、この方法では多量の水を使うことによって集塵性能を高く維持しており、同等の効率であれば電気集塵装置の方がより経済的だからである。しかし、液滴捕集には、利点や応用面が多々あり、それを実現すべく今回は液滴捕集装置に改良を加え、電気集塵効果を付加することにより、液ガス比の減少と捕集効率の向上を目標とした。

2-1 静電液滴捕集の概要

静電液滴捕集のフローシートを Fig. 1 に示す。塵埃を含む汚染空気はファンによって装置内部へ導かれ、まず、コロナ放電部を通過する。このときコロナ放電により放出されたイオンが電界により加速され、塵埃の表面に捕そくされたり、イオンの熱運動による拡散で塵埃の表面に捕えられたりして塵埃を帯電させる。（以下、この予備荷電装置をプリチャージャーと呼ぶ）また、電界の安定性と電極近傍への塵埃の付着による逆電離の発生を防ぐため、この部分での風速を30m/sec と高速にしている。

帯電した塵埃は、立上り整流ダクトを通り荷電噴霧域へ入る。この荷電噴霧は水滴に高電圧を印加した際、水滴の帯電量による分散力が、表面張力に勝った瞬間に分裂して霧化する現象を利用したものである。この噴霧域では水滴と塵埃の間のクーロン力、空間電荷及び配管系と集塵極板間の電界等の静電力による集塵の他、慣性衝突による集塵も行われている。（以下、この荷電噴霧捕集

装置を CDS : Charged Droplet Scrubber と呼ぶ）塵埃を含む水滴は集塵極板等で成長し、ドレーン水として装置より排出される。

2-2 静電液滴捕集装置の特徴

前項で述べたように、この装置は静電霧化現象を利用したもので、一般の電気集塵装置に比べ次のような特徴を持つ。

- ① メンテナンスが容易である
- ② 湿式であるため集塵極板での逆電離と再飛散がない
- ③ SOx, HCl など水溶性ガスを吸収できる
- ④ 排水処理設備を必要とする

また、フィルター設備と比較して、次のような問題がある。

- ① 処理風量に対し装置が大型となる
- ② クリーンルーム等の給気設備では湿度の改善や、コロナ放電により発生するオゾン、二酸化窒素の処理が必要となる
- ③ 停電時の対策が必要である

2-3 プリチャージャーの設計

針状曲面電極を用いてコロナ放電に必要な不平等電界を形成した。針状電極は電荷の集中をはかるために、針先端を鋭く、針の高さは製作上の限界である3mmとした。また、ピッチについては放電が放射状に伸びるため、間隔が密な方が好ましく9°ピッチで40本取り付けけた。

針状電極を取り付ける筒電極の大きさは、実験に使用した高圧直流電源（Max.±30kV）の最大電圧近くまで印加できるようにギャップをとり、外径を60mmとした。

以上の検討に基づいて製作したプリチャージャーを Fig. 2, Photo 1 に、この装置の特性を Table 1 に示す。

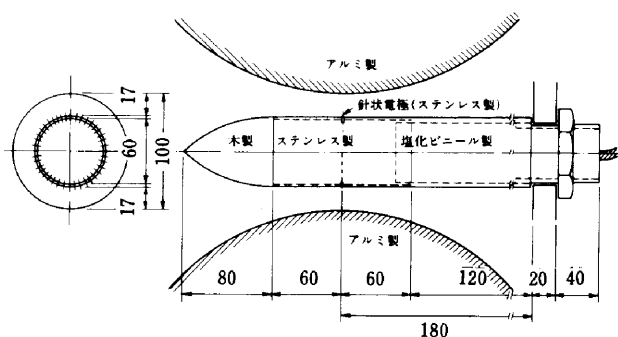


Fig.2 プリチャージャー

この比電荷は、試料を関東ローム（JIS 11種）・粉塵濃度を18mg/m³として最大電圧を印加した時、吸引式ファラデーケージを用いて測定した値である。

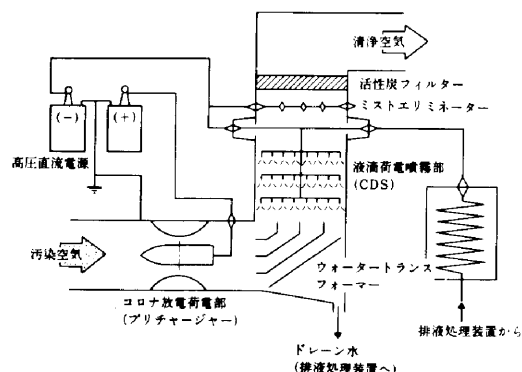


Fig.1 静電液滴捕集フローシート

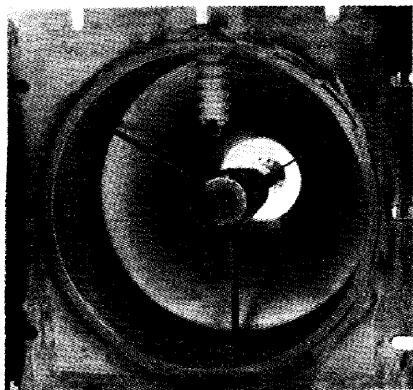


Photo1 プリチャージャー

Table1 プリチャージャーの特性

極性	最大印加電圧 [kV]	最大電界強度 [kV/cm]	比電荷 [C/g]
+	17.0	10.0	1.16×10^{-6}
-	27.0	15.9	3.20×10^{-5}

2-4 CDSの設計

CDS 装置の設計では次の二点が特に重要である。

- ① 各液滴荷電ノズルからの滴下の均一性
 - ② 噴霧域での高圧碍子表面の絶縁の確保
- ①については、針状電極と配管の接点で流体抵抗をもたせる方法と、ノズルの内径により流体抵抗をもたせる方法とがあるが、後者は夾雑物による閉そくが考えられるため前者の方式を採用し、スクリュー釘を電極として滴下の均一化を試みた。
- ②については、噴霧域からの隔離を考え、清浄空気となる箇所に碍子室を設けたが、碍子部のトラブルを極力避けるため、配管支持は最少限必要な2ヶ所とした。

上記の二点を考慮して製作した CDS 装置を Fig.3、Photo 2 に示す。

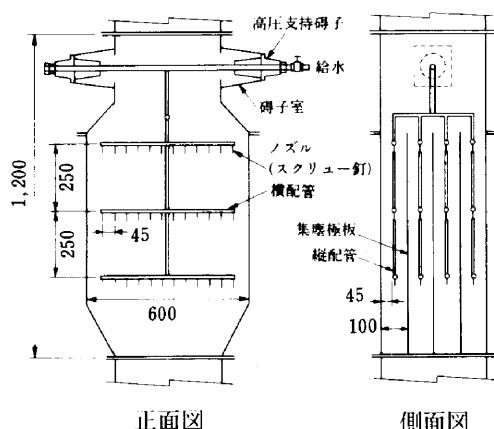


Fig.3 CDS

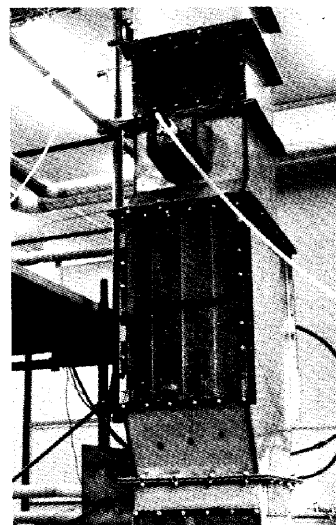


Photo2 CDS

配管と集塵極板との離隔距離は、プリチャージャーと同様に最大印加電圧30kVと想定し45mmとした。また、ノズルの間隔は45mmとした。

CDS 本体の大きさは、噴霧部での風速が定格風量時に1 m/sec 以内になるように400mm×600mmで設計した。

§3. 排液処理技術

液滴捕集で排出されるドレーン水からの塵埃分離方法には、一般に重力沈殿、ろ過、凝集沈殿などがあるが、重力沈殿はコロイド粒子(粒径1 nm～1 μm)に対し十分でなく、ろ過は放射性塵埃を対象とした場合に減容化の主旨に反し、凝集沈殿では添加割合の管理が困難である。そこでこれらに代わるものとして電気泳動分離(以下、泳動分離と称する)を検討した。

3-1 泳動分離

粗懸濁物質は重力沈殿で分離できるが、コロイド粒子は長時間静置しても沈殿による分離は起こらない。これはコロイド粒子が、イオンを吸着し同極帯電しているため斥力が働き、相互の接触結合を妨げられ安定な状態に保たれているからである。

コロイド溶液中に二つの電極を入れ、直流電圧を印加して電界を形成すると、負に帯電したものは正極へ、正に帯電したものは負極へ集まる。この現象が電気泳動であり、この現象を利用してコロイド粒子を極板へ付着させ分離する方法を泳動分離と呼ぶ。

泳動度、すなわち泳動モビリティは帯電量に左右されるが、泳動分離の特徴として、粒子が一定の表面密度で

帯電した場合、粒子が微小になるほどクーロン力が重力より相対的に大きくなり、その結果、微小の粒子まで分離が可能となる。

3-2 泳動モビリティの改善

コロイド粒子の帯電の大きさはゼータ電位で表わし、粒子の泳動速度はスモルコフスキーの式で求めることができる。

$$v = \varepsilon \cdot E \zeta / 4\pi\eta \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで v は泳動速度、 E は電界強度、 η および ε は媒質の粘度及び誘電率、 ζ はコロイド粒子のゼータ電位である。

上式より泳動速度は電界強度とゼータ電位に比例するが、電界強度を高くすると電流の上昇を伴い、これにより発生するジュール熱が対流を促し分離に悪い影響を及ぼす。そのためゼータ電位を改善する方が良策となる。

ゼータ電位を変化させる方法として、コロイド粒子に吸着されるイオン量を増加させる方法があり、一般には、高分子剤や界面活性剤を添加する。

3-3 装置への応用

コロイド粒子を分離する場合に連続処理を行うと、溶液の流動による乱れが起こるが、これを防止するためにはバッチ式の処理が現実には必要となる。

電極については電界強度を一定と仮定すると、泳動時間が距離により決まり、時間が長くなると対流の影響を受け易くなるため、電極間隔には限度がある。また、左右平行極板とした場合には沈殿や電極板からの剥離が起こり、かき取り装置が底板でも必要となり、さらに電気分解により発生したガスの気泡が浮き上り乱れを起こす。これら二点の対策として上下に電極を配置する。

上部電極を針状または筒状にし、下部電極は平板として、ここで分離されたスラッジをかき取り排出する。

泳動分離槽を含めた一連の排液処理フローシートを Fig. 4 に示す。

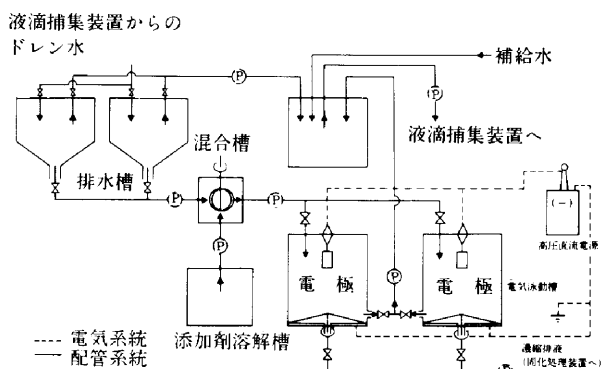


Fig.4 排液処理フローシート

§4. 実験内容

4-1 静電液滴捕集実験

(1) 測定箇所及び測定項目

測定箇所を Fig. 5 に、測定項目を Table 2 に示す。

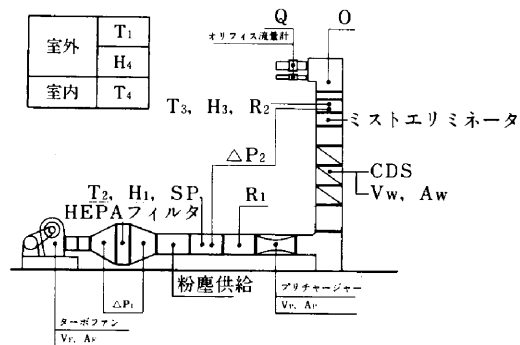


Fig.5 実験装置及び測定箇所

Table2 測定項目

記号	内 容	記号	内 容
V	電 圧	SP	静 圧
A	電 流	R	粉塵濃度
T	温 度	O	オゾン濃度
H	相対湿度	Q	風 量
ΔP	二点間の圧損		

(2) 処理風量

プリチャージャーのスロート部での風速を30m/secとした時の風量9 m³/minを定格風量とした。この風量でのCDS内の計算平均風速は、0.94m/secである。

(3) 粉塵の種類、濃度

粉塵として日本工業規格試験用ダスト11種（関東ローム）を採用し、HEPA フィルターで清浄化した空気中に供給した。粉塵濃度は日本空気清浄協会の第二次性能試験に準じて3 mg/m³ Airとした。

Fig. 6 に本装置内での粒径別度数分布を、Table 3 に化学組成を示す。

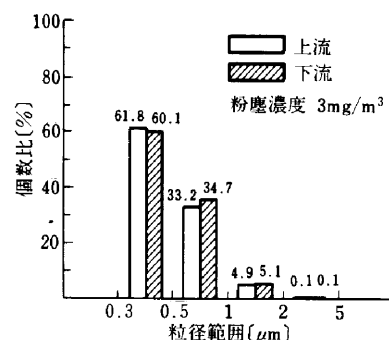


Fig.6 11種の粒径別度数分布

Table3 11種の化学組成

成分	重量百分率[%]
SiO ₂	34～40
Fe ₂ O ₃	17～23
Al ₂ O ₃	20～32
CaO	0～3
MgO	3～7
TiO ₂	0～4
強熱減量	0～4

(4) 捕集率測定時のパラメータ

パラメータは、

- ① プリチャージャーの印加電圧
- ② CDSの印加電圧、極性
- ③ CDSの噴霧水量（液ガス比）

等があり、これら諸パラメータの組合せにより捕集率を測定し比較検討をした。

(5) 捕集率の評価

デジタル粉塵計（柴田科学工業）を用い相対濃度法で測定した。捕集率の評価は上、下流の粉塵計を D₁、D₂として次式によった。

$$A = (BR_1 - B_1) / (BR_2 - B_2) \dots\dots\dots (2)$$

$$\eta = \frac{(R_1 - B_1) - (R_2 - B_2)A}{R_1 - B_1} \times 100 [\%] \dots\dots\dots (3)$$

ここで A：D₂のブランク値

BR₁：稼動前の D₁による上流側粉塵濃度

BR₂：稼動前の D₂による下流側粉塵濃度

B₁：D₁のバックグランド

B₂：D₂バックグランド

η：粉塵の捕集率

R₁：稼動中の D₁による上流側粉塵濃度

R₂：稼動中の D₂による下流側粉塵濃度

4-2 泳動分離実験

(1) 各種分散質のベンチ試験

分散質の特性による泳動現象の相違を確認するために、試料として関東ローム、ベントナイト、フライアッシュ及びセメントを対象としてビーカ試験を行った。

(2) 高分子剤添加によるベンチ試験

(1)の結果で泳動分離の最も不良であった関東ロームを対象として高分子剤（強アニオン—分子量500～600万、強カチオン—分子量300万）を添加してゼータ電位の変化による泳動分離を確認した。

(3) ベンチ試験の方法

ベンチ試験は Table 4 に示す条件で行った。測定項目は電流、液温、pH、濁度として、10分ごとの変化を求

めた。

(4) 物性値の測定

(1)、(2)で得られたデータを、工業技術院公害資源研究所の“ゼータ電位/沈降速度スペクトルアナライザー”を用いてゼータ電位、泳動速度等の測定を行った。

Table4 ベンチ試験の条件

項目	条件
分散媒	純水 pH 5.9
溶 液	500ppmで攪拌後20分静置し、上澄部分200cc使用
使用電極	(+)極φ60mm銅板、(-)極φ1mm銅針
電極距離	50mm
印加電圧	DC 200V
測定試料	上澄部分 5 ccをピペットで採取
濁度の評価	10mmセルを使用し、濁度計の読み(%)で評価

§ 5 . 実験結果及び検討

5-1 静電液滴捕集

(1) CDS 単独捕集率の測定

CDS 単独運転時の捕集率測定結果を Fig. 7 に示す。電圧を変化させた場合、両極性とも20kVぐらいまでは、捕集率にほとんど差は認められないが、さらに電圧を上げていくとマイナスでは高い伸びを示した。最大印加電圧はマイナスで28kV、プラスで24kVであり従って最大捕集率の差はさらに広がった。

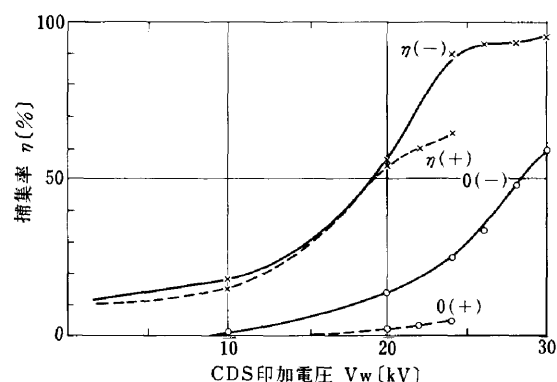


Fig.7 CDS 単独捕集率

(2) 総合運転による捕集率の測定

CDS、プリチャージャーを各々最適条件で組み合わせると、Fig. 8 に示すような相乗効果が見られた。CDS—28kV、プリチャージャー+17kVで最高捕集率 95.8%を得た。また、CDS の印加電圧の高い領域での相乗効果が大きいことがわかった。これは、CDS の印加電圧が高くなるほど水滴の分散性がよく、かつクー

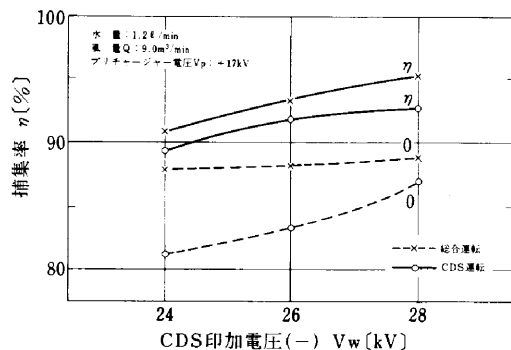


Fig.8 総合運転捕集率

ロン力が増大するためと考えられる。次に、極性を入れ替え CDS を+24kV、プリチャージャーを-24kVにした場合には、捕集率は81%と低い値であった。

CDS の水量 (液ガス比) を変化させ捕集率を測定した結果を Fig. 9 に示す。水量1.2ℓ/min時に最高を示し、それ以上では急激に悪くなった。水量1.2ℓ/min時に各針状電極からの水量は8.1cc/minであり、噴霧水滴が微細で分散密度が高く、それ以上では液ガス比の増加にかかわらず噴霧水滴が均一性を失ない、かつ平均粒径が粗く分散密度が低くなり捕集率が低下したものと考えられる。

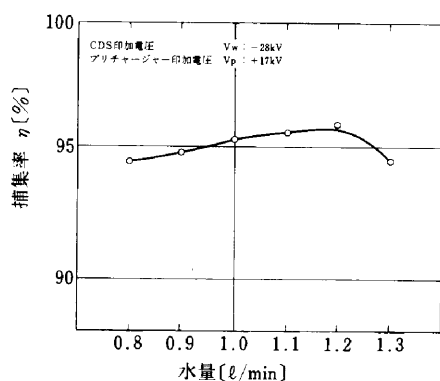


Fig.9 水量別捕集率

(3) 部分捕集率の測定

パーティクルカウンター (リオン KC-11) を用いて総合運転時の部分捕集率を求めた結果を Fig. 10 に示す。粒径0.3~0.5μmのサブミクロン領域での捕集率は92%程度であり、今後更に向上させなければならない。

(4) 排気温湿度、オゾン濃度

送風開始から装置の連続運転までの変化を Fig.11 に示す。この装置の定常運転時における清浄空気は相対湿度75%前後、オゾン濃度はおよそ900ppbである。

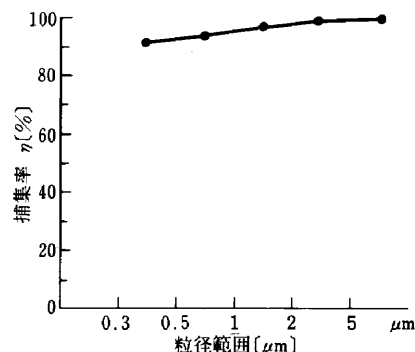


Fig.10 部分捕集率

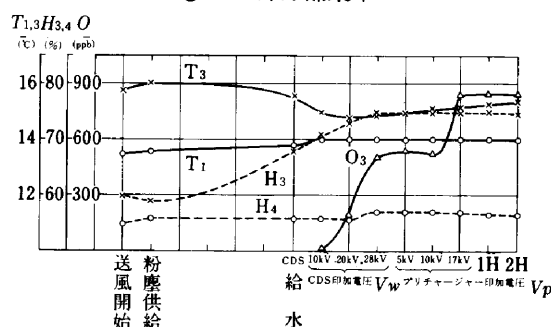


Fig.11 温湿度、オゾン濃度

この程度のオゾン濃度であれば、排気の場合に大気の拡散により問題はないが、給気の場合には湿度、オゾンとも処理を必要とする。

(5) 捕集実験のまとめ

今回の実験では当装置の最適運転条件として下記の結果を得た。

- ① CDS の極性 : (－)
- ② プリチャージャーの極性 : (＋)
- ③ 印加電圧 : 両方共、火花放電移行直前の電圧
- ④ CDS の水量 : 約 8 cc/min・本

以上の条件で定格風量時 (9 m³/min) の捕集率は 95.8%であった。

なお、風量を減ずることにより捕集率が上昇することも確認できた。しかし経済性を考えた場合にはある限界があり、定格運動時の捕集率の向上が今後の重点になる。そのためのパラメータとして、プリチャージャー荷電効果の向上、印加電圧の波形、CDS 段数による液ガス比の増加、電気集塵効果の上昇のための同極による方法等が残っており、それらを究明してゆくことで捕集率のアップが期待できると考えている。

5-2 泳動分離

(1) 各種分散質の泳動分離

ビーカ試験による泳動分離の濁度の変化を Fig. 12 に示す。また、同溶液のゼータ電位、平均泳動速度等の物性値を Table 5 に示す。

Table5 各種分散質の物性測定

試料名	ゼータモビリティ [$\mu\text{m}/\text{sec}/\text{V}/\text{cm}$]	ゼータ電位 [mV]	平均泳動速度 [m/sec]	比伝導度 [$\mu\text{mhos}/\text{cm}$]	pH	相対濁度 [JTU]
関東ローム 100ppm	-1.885×10^{-8}	-24.20	-8.917×10^{-5}	2.494×10^{-4}	5.60	-4.286×10^{-1}
関東ローム 500ppm	-1.946×10^{-8}	-24.98	-9.203×10^{-5}	3.221×10^{-4}	6.07	-3.709×10^{-1}
関東ローム 1,000ppm	-1.956×10^{-8}	-25.11	-9.241×10^{-5}	4.425×10^{-4}	6.33	-3.389×10^{-1}
ベントナイト 1,000ppm	-3.316×10^{-8}	-42.45	-1.568×10^{-4}	2.444×10^{-3}	9.31	-4.659×10^{-1}
フライアッシュ 1,000ppm	8.785×10^{-9}	11.28	4.156×10^{-5}	1.561×10^{-3}	8.85	-4.325×10^{-1}
セメント 1,000ppm	-1.502×10^{-8}	-19.28	-7.103×10^{-5}	2.937×10^{-4}	6.00	-4.051×10^{-1}

※表中の値は、2回の測定の平均値である。

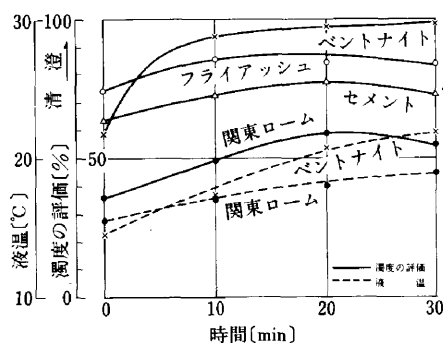


Fig.12 各種分散質の泳動分離

Fig.12 からわかるように、ベントナイト粒子は泳動分離が良好であり、関東ロームは分離が悪い。これは Table 5 で関東ローム (500ppm) のゼータ電位が -25mV 、ベントナイト -42mV と差があり、泳動分離がゼータ電位に左右されているからである。また、関東ロームやセメント溶液では泳動の過程で泳動コロイドの拡散及び電極に付着したものの再浮遊が起り、清澄度が低下している。この原因の1つは電極間のジュール熱発生に伴う温度差による対流である。

(2) 高分子剤添加による泳動分離

関東ロームのコロイド溶液に高分子剤を添加し、添加量による効果をアニオン系 (Fig. 13)、カチオン系 (Fig. 14) について示す。例としてカチオン系で泳動分離の最もよかったものを Photo 3 に示す。関東ロームが負に帯電しているにもかかわらず、今回使用した高分子剤の中ではアニオン系よりカチオン系の方が効果が認められた。

これらの高分子剤にはゼータ電位を変化させる作用と架橋作用とがあり、その結果、凝集沈殿を引き起すが、添加攪拌後20分間静置し、コロイド溶液のみを対象としているので、後者による作用は無視できると考えられる。

高分子剤添加による物性値の変化を Fig. 15 に示す。添加量を増すことでゼータ電位も高くなっている。さらにアニオン系5%、カチオン系0.5~0.7%での電

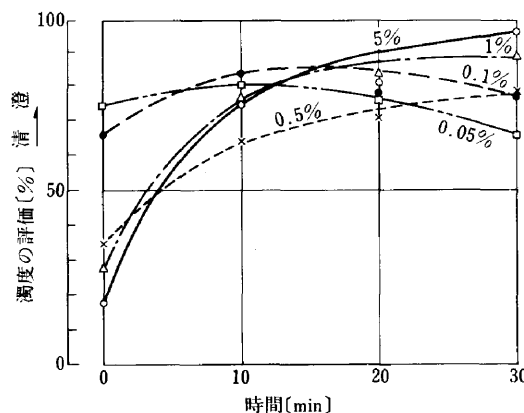


Fig.13 アニオン系高分子剤添加

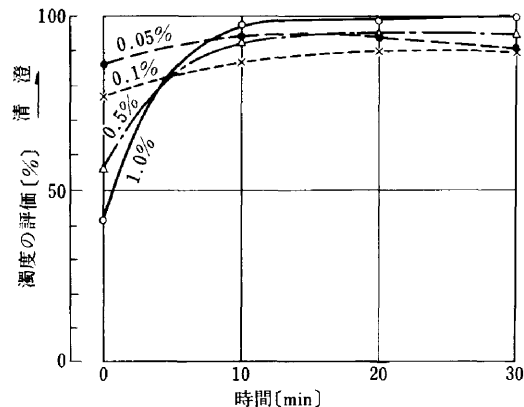


Fig.14 カチオン系高分子剤添加

位の大きさはほぼ等しくなっているが、ビーカ試験でも同様な分離が行われている。これは他の条件が一定の場合には、泳動分離はゼータ電位の大きさで決定されることを裏付けている。

(3) 泳動分離実験のまとめ

泳動現象や分離の可能性をビーカ試験によって確認し、ここでは詳述しなかったが、他に界面活性剤添加によるゼータ電位の改善と泳動分離、電流値を抑えるための冷却定温泳動分離の実験も行った。その結果、前者では、電導度が急激に増加する点に問題があり、後者では泳動モビリティまで抑制してしまい、十分な

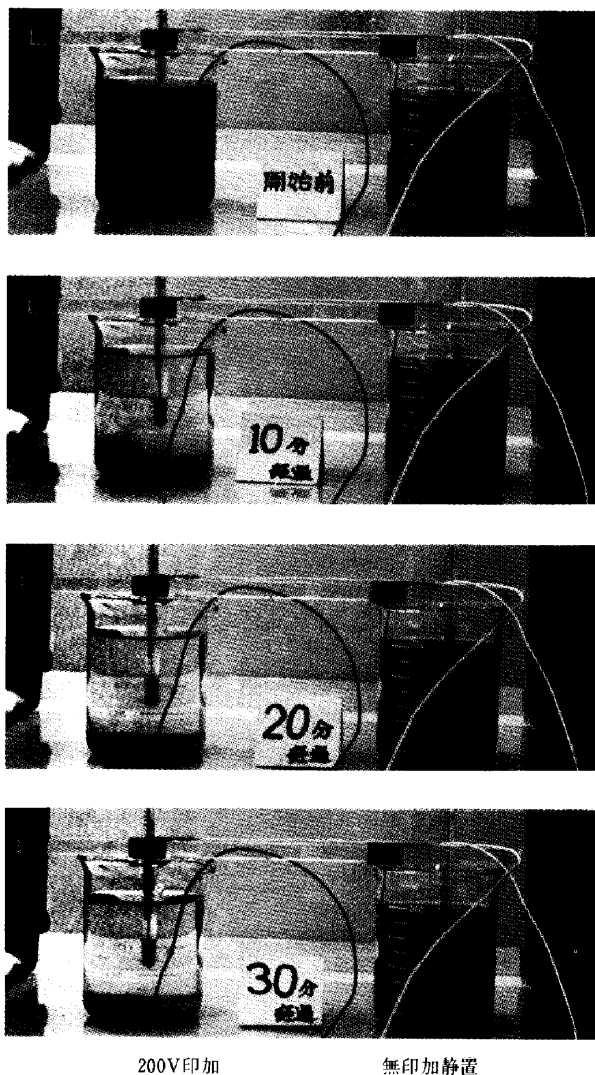


Photo3 泳動分離状況

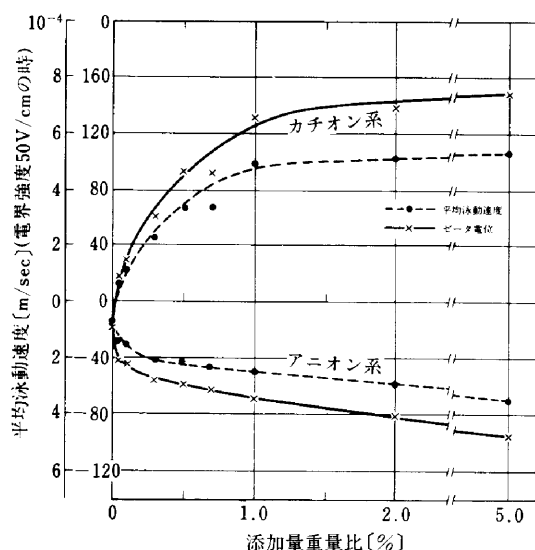


Fig.15 高分子剤添加による物性値の変化

分離が行えなかった。これらの実験のすべては、電導度の低い純水を使用し電流を小さくし、ジュール熱の発生を極力抑える方法で行っており、水道水や地下水等の電導度の高い水に対しては前処理（イオン交換樹脂等）が必要となる。また、泳動分離による清澄水も電導度が高くなる傾向にあり、循環使用を考えた場合にはこれらの改善も必要となる。

§6. おわりに

第一報を報告する時点では静電液滴捕集の効率は、当初目標にしていた HEPA フィルターと同等の値まで至らなかったが、§5.で述べたとおり改善の余地は多々あり、これらをつずつ解決して行くことにより目標に達し得ると確信している。今後の成果は第二報以下で報告する。

電気泳動分離は、このような分野で過去に前例がなく新しい技術の開発であった。その結果、電導度に関係点を残し、液滴捕集との組み合わせによる排水処理用としては実用化が即可能の域には達していない。むしろ、今後はこの分離技術を他方面で活用する方向で研究を進めたいと考えている。

なお、はじめに述べたが本開発は科学技術庁の補助金を受けて行われているもので、その好意ある御援助に対し深く感謝する次第です。また、本開発に懇篤なる御指導を頂いた東京大学工学部増田閃一教授及び装置の製作あるいは改造に終始御協力頂いた千代田アール・アンド・デイ社の塩田博一社長と当社平塚工場の皆様に対して心から御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 静電気学会編「静電気ハンドブック」オーム社
- 2) 静電気学会講演論文集, 1981
- 3) 静電気学会誌, 1983, VOL.7, No.1
- 4) 近藤保他「コロイドと界面の科学」三共出版