

高性能静電液滴捕集と排液処理技術の開発（第二報）

Development of High Efficiency Electro-Static Scrubber and Drain Treatment Technique (2nd Report)

吉田 尚弘*
Naohiro Yoshida

伊勢 賢郎**
Kenrō Ise

安達 嗣雄***
Tsugio Adachi

萩谷 宏三****
Kōzō Hagiya

山口 達信*
Tatsunobu Yamaguchi

芦川 正行*
Masayuki Ashikawa

要 約

前報に引き続き高効率の静電液滴捕集装置及び排液処理装置の開発について報告する。静電液滴捕集ではモデル装置に種々の改良を加える一方、新方式のミストエリミネーターを組み合わせるにより、 $0.3\mu\text{m}$ の粒子に対して99.999%以上の捕集率を達成することができた。

また、排液処理については、新しい手法として凍結濃縮法を利用したゾーンメルティング装置を開発し、基礎実験を行った。その結果、排液から循環使用可能な水を分離できることなど排液処理に有効な手がかりを得ることができた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 初年度の問題点およびその対策
- § 3. 実験結果および考察
- § 4. おわりに

§ 1. はじめに

当社技術研究部が、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開発中のNESSY (Nishimatsu Electro-static Scrubber SYstem) は、初年度の性能試験の結果95.8%の捕集率を得た。しかし、目標としているHEPAフィルターの基準性能の一つ（粒径 $0.3\mu\text{m}$ の粒子に対して99.97%以上の捕集率を有すること）を到底満足するものではなかった。

電気泳動分離による排液処理については、ジュール熱

による対流現象等の問題があり、この方法には今後さらに基礎的研究が必要である。

本年度は初年度の実験結果から装置の改良を行うことはもとより、集塵部についてはサブミクロン粒子の捕集を対象とした新方式ミストエリミネーターの開発、排液処理については凍結濃縮法を利用したゾーンメルティング装置の開発を行った。

§ 2. 初年度の問題点及びその対策

2-1 静電液滴捕集

装置の概要については前報を参照されたい。

プリチャージャー（予備荷電装置）が捕集率に与える相乗効果は初年度明らかになった。しかし、その荷電効果に対する詳細な評価は行われておらず、プリチャージャーの形状等が荷電効果に与える影響は明らかではない。そこで、本年度は吸引式ファラデーケージ（粉塵帯電量測定器）を用い、粉塵の比電荷 (C/g) を測定することにより、性能を比較検討し、より性能のよいプリチャージャーの開発を進めた。

初年度、プリチャージャーについて問題となったのは

*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長
****技術研究部原子力室

以下の2点である。

- ①電界形成極下流部に粉塵が付着しており、この粉塵が無荷電状態で再飛散する恐れがある。
- ②プリチャージャー通過後のガス流に乱れが生じており、下流での粉塵捕集に悪影響を及ぼすと考えられる。

粉塵の付着については、その原因が電界形成極下流部に生じた電界による集塵作用と考えられる。よって下流部の形状を半球状とし、下流に進むにつれて電界が弱まるようにした。ガス流の乱れは、プリチャージャー部がスロート状に絞られているために生じている。そこで、スロート下流断面をより滑らかに広がる形状にし、ガス流の乱れを最小に押えた。

また、プリチャージャーの荷電性能を高めるための改良も行った。粉塵荷電に必要な電子の放出量をふやすために、針状電極の本数を40本から72本に増した。さらに、ポテンシャルの高いコロナ放電を行わせるために、針状電極の針先をより鋭角にし電界の集中度を高めた。Fig.1に示すのはその新型プリチャージャーである。

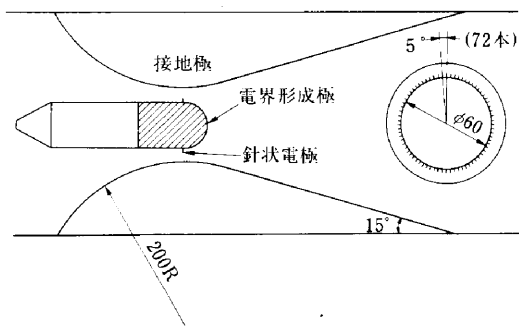


Fig.1 新型プリチャージャー

CDS (Charged Droplet Scrubber: 荷電噴霧捕集装置) は、粉塵捕集において最も重要な装置である。CDSで問題となったのは以下の2点である。

- ①液滴噴霧空間に縦配管が存在し、同極の噴霧液滴を反発してしまい無噴霧域を形成している。これが捕集率の低い原因の1つと考えられる。
- ②各分岐管への給水が不均一で、また、水量の調整も困難である。

以上により、CDS内の縦配管をなくし各段独立支持とした。さらに、水量の調整を容易にするため、各分岐管に水量調整バルブを取付けた。また、各配管への均一な給水を得るため、ノズルに流体抵抗の大きいパイプ状ノズルを採用して圧力のバランスを保つ一方、ノズルの本数も約2倍にした。Fig.2, Photo 1に示すのはその新型CDSである。その他の改良としては、CDSに乱れの少ないガス流を導くために、ダクト立ち上がり部のガイ

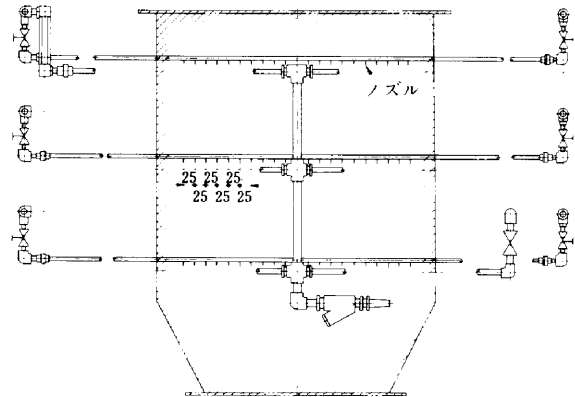


Fig.2 新型CDS配管図

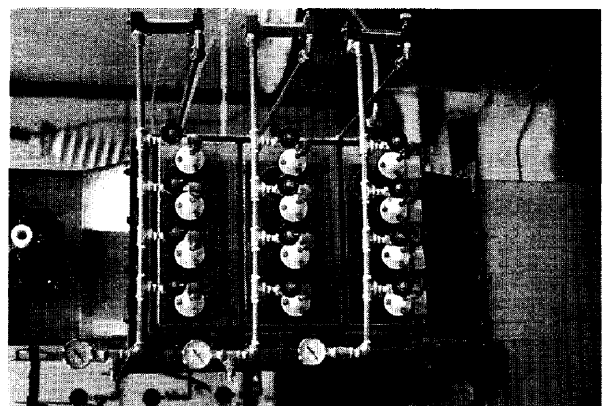


Photo 1 新型CDS

ドベーンの改良も併せて行った。

2-2 排液処理

前報にも述べたように電気泳動分離による排液処理には種々の問題があり、この種の排液処理には有効な方法ではないと判断した。新しい排液処理方法として、凍結濃縮法を利用したゾーンメルティングを採用した。

凍結濃縮法とは、分析化学における微量成分の分離濃縮法としてJoseph Shapiroによって提唱された方法である。この方法は、溶液が結晶する際には、その結晶中に不純物を含まないという原理を利用したものである。その特長としては

- ①溶質のすべてが濃縮される
- ②揮発性成分や熱に弱い成分の分離濃縮ができる
- ③添加剤を必要としない

また、欠点としては

- ①溶質濃度が高くなると溶質の回収率が悪くなる
 - ②塩分の多い溶液は結晶状の氷を作るのが難しい
- などが上げられる。

この方法を利用して排液を処理し、清澄な水を噴霧水として再使用する。

さらに結晶状の水を部分的に溶融 (ゾーンメルティン

Table 1 プリチャージャーの荷電効果

種類	粉塵の種類	印加電圧 (kV)	コロナ電流 (mA)	粉塵濃度 (mg/m ³)	比電荷 (C/g)
旧型プリチャージャー	関東ローム	+16.3	+0.6	18.0	+9.7×10 ⁻⁷
		-22.0	-1.4	18.0	-3.4×10 ⁻⁵
新型プリチャージャー		+16.0	+1.2	18.0	+3.1×10 ⁻⁶
		-23.0	-1.4	18.0	-5.7×10 ⁻⁵

グ) し、繰り返し凍結濃縮を行うことで、高度の分離濃縮をめざす。

§ 3. 実験結果及び考察

3-1 静電液滴捕集

(1) 新型プリチャージャーの性能試験

吸引式ファラデーケージを用いて新旧プリチャージャーによる帯電量を、粉塵重量に対する電荷量すなわち比電荷として測定した。その結果をTable 1に示す。

比電荷により新旧プリチャージャーの粉塵荷電効果を比較すると、新型の方がやや優れていた。また、極性別荷電効果をみると、新旧とも負コロナ放電では10⁻⁵C/g、正コロナ放電では10⁻⁶~10⁻⁷C/gのオーダーであった。これは負コロナ放電が正コロナ放電に比較し、印加電圧(電界強度)を高くでき、コロナ電流も大きくなるためである。以上により負コロナ放電を利用した方がより有効なことがわかった。

次に電界形成極への粉塵付着量を測定した結果、これも新型プリチャージャーの方が少なく、期待どおりの効果を発揮した。また、接地極スロート部の形状改良により、プリチャージャー下流部の風速分布は、旧型では平均風速±33%程度のばらつきを見せていたものが、新型では平均風速±19%と改善された。

(2) 改良型CDSの性能試験

前章で述べた改良型CDSの性能試験では、初年度と同条件で96.4%の捕集率を得た。これは、初年度の実績をわずかに上回った値である。

風速分布については、ダクト立ち上がり部に翼型ガイドベーンを採用することにより、今まで併設していた多孔板に頼ることなく、ばらつきの少ない風速分布を得ることができた。このガイドベーンの改良とプリチャージャー接地極スロート部の改良により、CDS内の風速分布をより均一なものとする事ができた。

(3) 同極印加による捕集率測定

CDS単独運転時の捕集率を極性により比較すると、初年度の実験によりマイナスの方でより高い捕集率を得られることがわかっている。そこで、この捕集性能の高いマイナス印加のCDSと、荷電効果の優れているマイナス

印加のプリチャージャーを組み合わせた場合(同極印加)の捕集率を求めた。改良型CDSを用いた実験では、プリチャージャーに逆極(プラス)印加したときの捕集率は96.4%であり、同極印加したときの捕集率は97.4%であった。同極印加したときに、より高い捕集率が得られるのは、次の2つの捕集機構によるものと考えられる。1つはプリチャージャーの極性により、CDSの集塵部が代るためである。すなわちプリチャージャーにプラス印加したときはエレクトロードが集塵部として働き、これとマイナス印加したときに集塵部として働くコレクティングプレートとの集塵面積の差が、捕集率に影響を与えていると考えられる。もう1つはCDS自体が一段式電気集塵機として働いており、この場合プリチャージャーでの荷電は補助的な意味しか持たず、CDSと逆極印加したときには、むしろCDSでの粉塵荷電を阻害しているからである。

(5) 平行極板型CDSの実験

CDS内の平等電界域を広げるために、Fig.3のようにエレクトロードを改良し実験を行った。なおCDS内での粉塵荷電効果を高めるために、ノズル間にコロナ放電極として釘も取り付けられた。このCDSを用いた実験の結果をFig.4に示す。電界域を広げることにより捕集率は上昇した。最終的には同極印加時に99.1%という高い捕集効果が得られ、さらにこのCDSは微細な粒子に対しても高い捕集率を記録した。これは、今までのCDSで問題となっていた微細な粒子の高捕集率化に活路を見い出すも

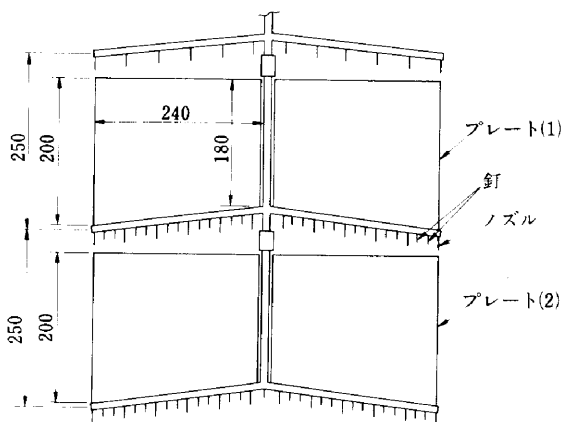


Fig.3 エレクトロードの改良

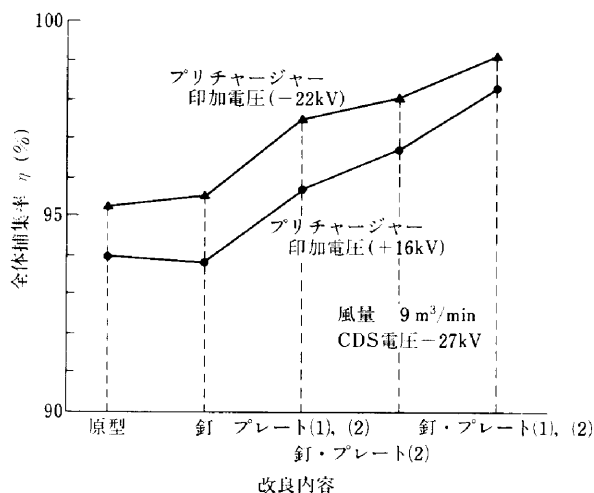


Fig.4 エレクトロードの改良実験

のである。

(6)ミストエリミネーターの開発

当装置はTable 2に示すように、粉塵の粒径が小さくなるに従い捕集性能が低下している。そこで、このCDSでは捕集しきれない微細なミストや粉塵粒子を捕集するために、前述の平行極板(パラレルプレート)を用いることとし、Photo 2のようなミストエリミネーターを開発した。一般に電気集塵機の捕集率ηは次式で表わされる。

$$\eta = 1 - e^{-wf}$$

この式をドイツの式といい、 f =集塵極板面積/ガス流量であり、 w は粒子の見かけ移動速度で装置固有のパラメータである。この式から集塵極板面積を広げることにより捕集率が上昇することがわかる。よってミストエリミネーターの集塵極板間隔を狭め極板枚数をふやす

Table 2 PC+CDSの捕集率

粒径範囲(μm)	0.3~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~5.0
捕集率(%)	92.6	94.9	97.8	99.8

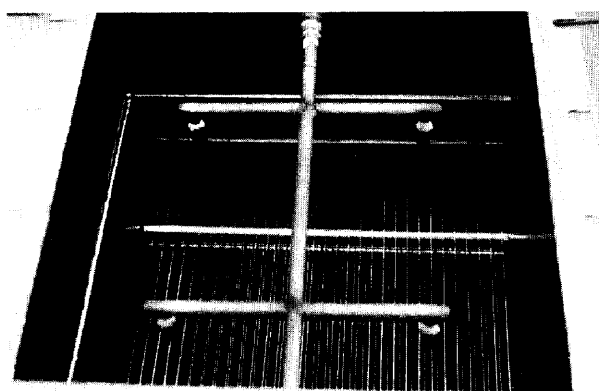


Photo 2 ミストエリミネーター

ことにより、極板面積を広げた。また、この極板間隔は製作上の精度を保つことのできる6mmとした。

このミストエリミネーター単独運転時の粒径別捕集率をTable 3に示す。表から明らかなように、粉塵の粒径が小さくなるほど捕集率は上昇しており、この方式がサブミクロン粒子に対して有効であることを示している。

CDS下流側にミストエリミネーターを配置し、いわゆる段階的捕集による実験を行った。その結果をFig. 5に示す。ミストエリミネーターの構造上、極性が捕集率に与える影響はないと思われたが、実際には若干の差があった。この原因としては極板端のわずかなコロナ放電の影響が考えられる。また、印加電圧を見ると、-3kV時に最も高い捕集率を示した。したがって、以後総合実験ではミストエリミネーターは-3kV印加とすることにした。

Table 3 ミストエリミネーター単独捕集率

粒径範囲(μm)	0.3~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~5.0
捕集率(%)	71.9	61.1	50.3	47.3

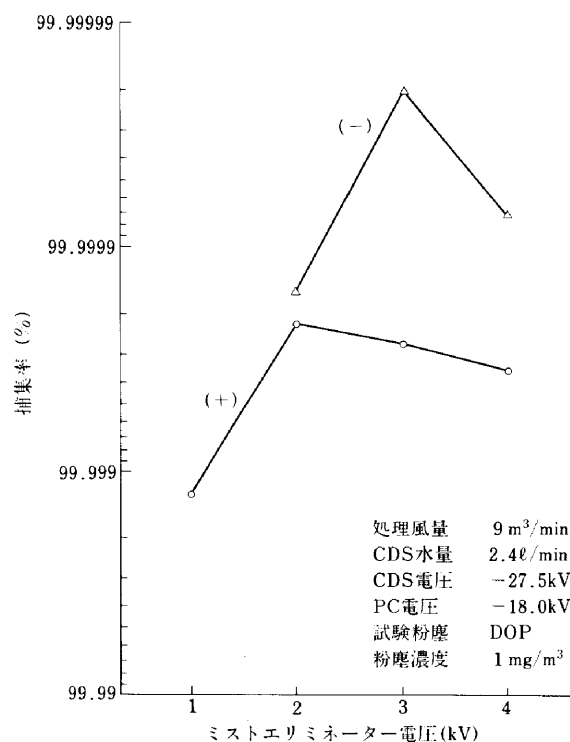


Fig.5 ミストエリミネーター電圧極性変化による捕集率

(7)装置性能の総合評価

今年度の最終実験に用いた装置のフローシートをFig. 6に示す。

今年度は実験条件の見直しを行い、特に粉塵供給部、ダクト等に改良を加え、ダクト内の粉塵濃度の均一化も

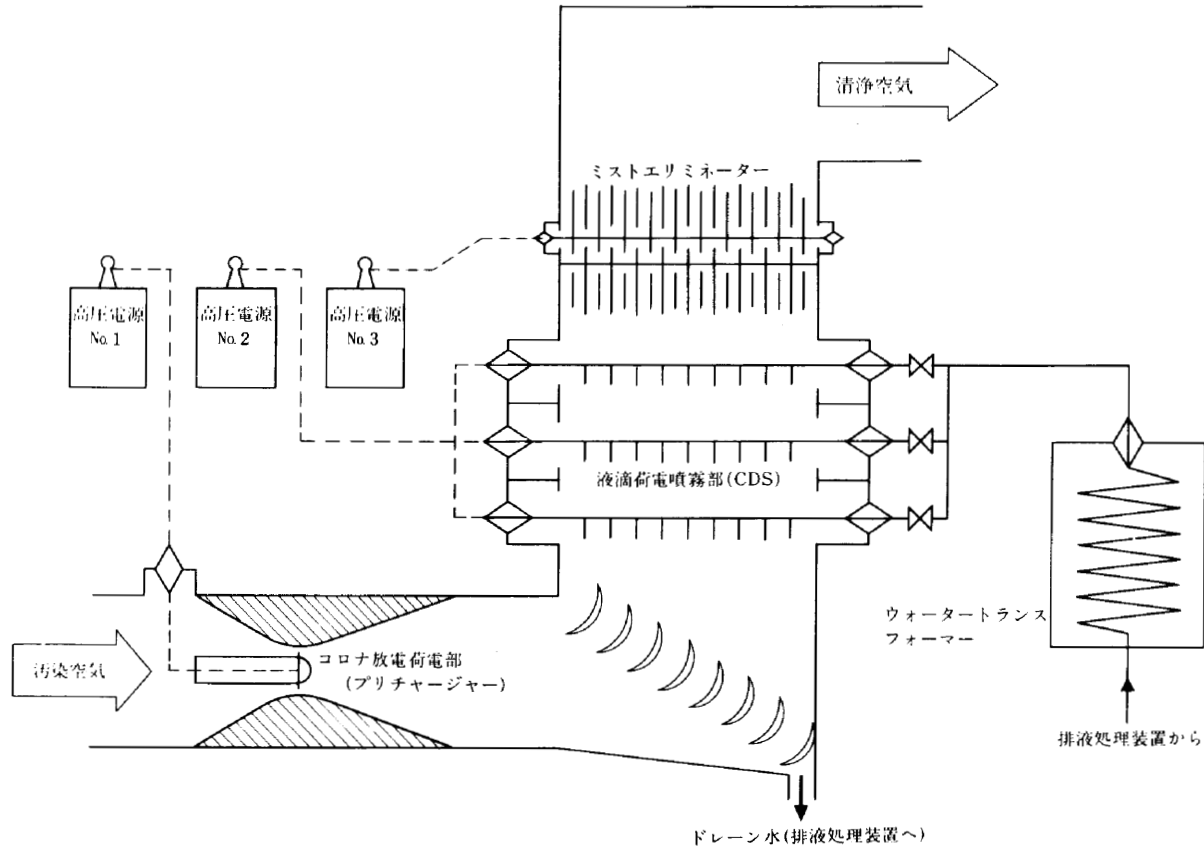


Fig.6 液滴捕集装置のフローシート

図った。実験に使用した試験粉塵は、関東ローム(JIS試験用ダスト11種)及びHEPAフィルターの性能試験に用いられるDOP (Diocetyl Phthalate: JIS試験用ダスト13種)である。

Fig.7にデジタル粉塵計を用いて測定した捕集率を示す。比較のため、ミストエリミネーターを運転しなかった場合の捕集率も併せて示す。捕集率は処理風量(9~13 m³/min)及び粉塵濃度(3~21mg/m³)の変動の影響を受けず、高い効率を維持している。

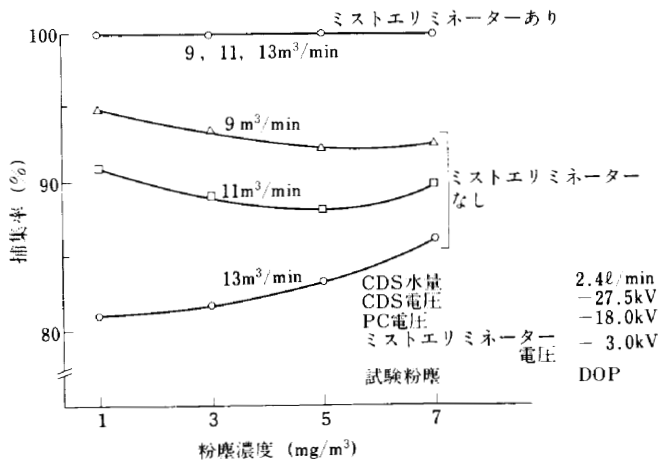


Fig.7 全体捕集率

Fig.8に示すのは処理風量 9 m³/min, 粉塵濃度 3 mg/m³での粒径別捕集率である。総合運転時にはミストエリミネーターの効果が発揮され、サブミクロン粒子まで高効率で捕集されていることがわかる。

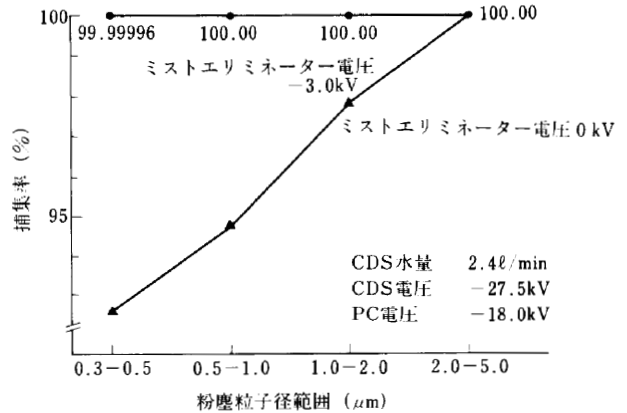


Fig.8 粒径別捕集率

デジタル粉塵計を用いた場合、処理風量及び粉塵濃度が捕集率に与える影響はないとの結果が出た。これは、デジタル粉塵計が相対濃度計であるがゆえに、極低濃度の粉塵検知が困難であるためと考えられる。また、高性能フィルターでは、捕集率を粉塵粒子の個数から評価する方法が一般的である。そこで粉塵粒子の個数そのもの

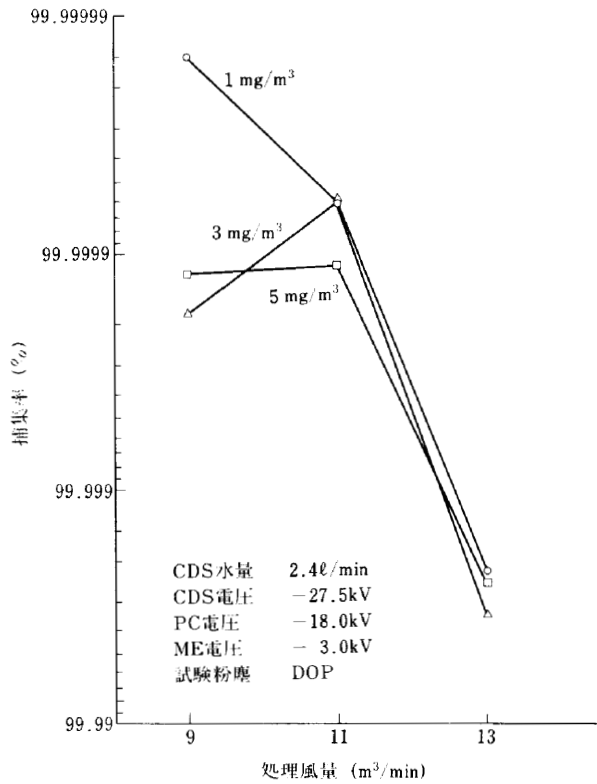


Fig.9 風量および粉塵濃度別捕集率

凍結濃縮法を排液処理に利用するにあたり、その有効性を確認するために、凍結濃縮装置 (Photo 3: 大洋科学工業社, FC-4) を用い、凍結濃縮分離に関する基礎実験を行った。この装置は、溶液を入れたフラスコを寒剤内で回転させるフラスコ回転型の装置である。溶液はフラスコ内面に着水し、徐々に氷として成長し凍結濃縮を行う。

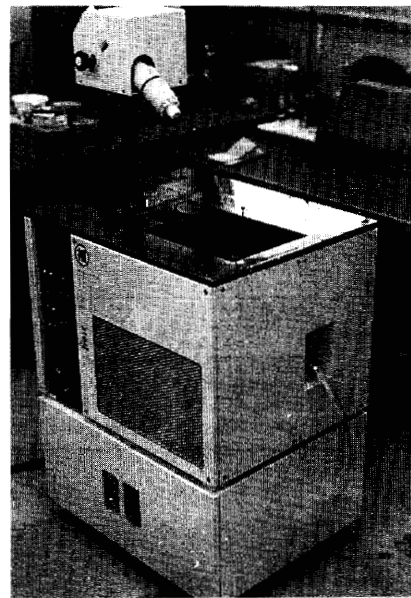


Photo 3 凍結濃縮装置

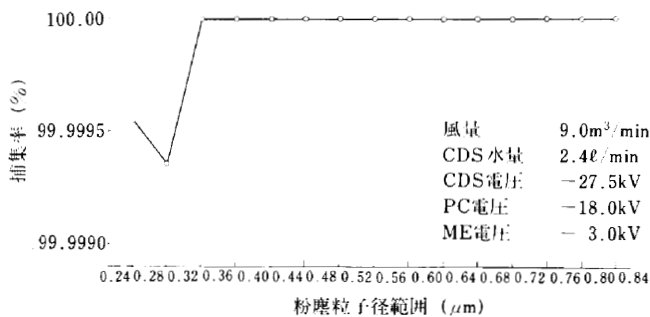


Fig.10 レーザーパーティクルカウンターを用いた粒径別捕集率

を粒径別に測定するパーティクルカウンター (リオン社 KC-11) を用い、処理風量及び粉塵濃度が捕集率に与える影響を調べた (Fig.9 参照) 結果、粉塵濃度は捕集率に大きな影響を与えず、また、処理風量に関しては、風量がふえるに従って捕集率が低下する傾向がみられた。最後に、開発の目標とした HEPA フィルター相当の性能が得られているかを調べるために、レーザー光源のパーティクルカウンター (PMS 社, ASAS-X) を用いて捕集率を測定した。その結果が Fig.10 である。0.28~0.32 μm の粉塵粒子に対して 99.999% 以上の捕集率を示しており、目標は達成された。

3-2 排液処理

(1) 凍結濃縮分離の実験

実験は捕集実験でも使用した関東ロームの 100ppm 溶液を試料として行った。Fig.11 に凍結濃縮時間の導電率毎の推移を示す。また、Fig.12 には濁度の推移を示す。凍結水の導電率は 1~2 μS/cm、濁度は 0~2% で、ともに時間的変化を見せておらず、また、この凍結水は捕集装置で循環使用可能なものである。以上により凍結濃縮法による排液処理の可能性を見出した。

(2) ゴーンメルティングのベンチ試験

ゴーンメルティングを行うには、排液容器を凍結濃縮部及び加熱融解部中で移動させ、融解、凍結を繰り返す必要がある。そこで、まず容器に試験管を用い、寒剤に

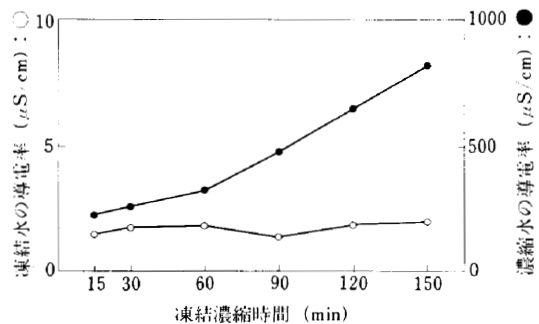


Fig.11 凍結水及び濃縮水の導電率

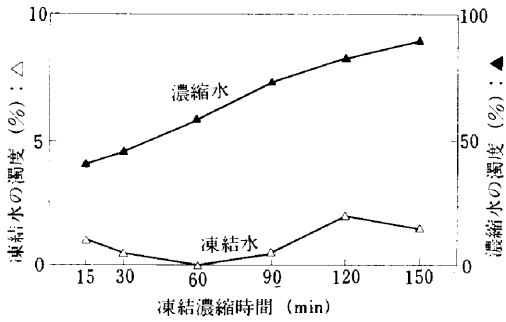


Fig.12 凍結水及び濃縮水の濁度

ドライアイス+食塩水(-5℃)を使用し、100ppm関東ローム溶液を凍結濃縮した。その結果をPhoto 4に示す。凍結濃縮効果は見られるが、管中央部に溶質の巻き込みを生じ理想的な分離を行うことはできなかった。この原因として、試験管移動速度とその変動及び凍結開始時の着氷不良が考えられる。その対策として、試験管の移動はギヤ式昇降装置を用いて、機械的に行うようにした。この装置による実験結果をPhoto 5に示すが、写真に見られるように良好な結果が得られた。なお、(1)の実験及び文献によると、凍結濃縮については、-10~-2℃が適当な寒剤温度であった。

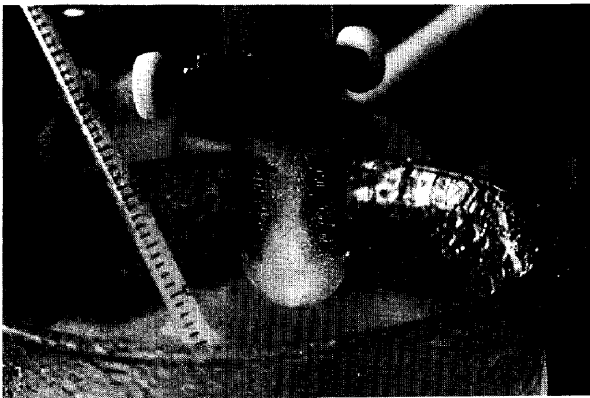


Photo 4 ゾーンメルティングベンチ試験



Photo 5 ゾーンメルティングベンチ試験

(3)ゾーンメルティング装置の試作とその運転

(1)、(2)の結果をもとにゾーンメルティング装置を設計、製作した。この装置の配管フロー図をFig.13に示す。冷凍機は着氷用、凍結濃縮用と2台あり、これにより着氷-濃縮サイクルの切換えを迅速に行うことができる。寒剤には75%ナイブリンを用い、温度の制御は最終的にダイアトロール温度指示計を使用した。試験管を移動させるスライドジャッキの移動速度は0~100mm/hの間で自由に設定可能である。

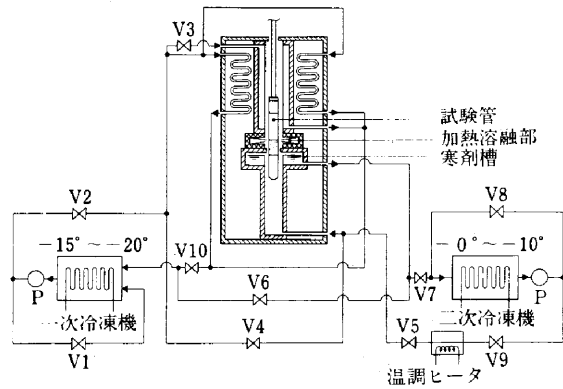


Fig.13 ゾーンメルティング配管フロー図

以下にこの装置を用いた凍結濃縮実験の結果を述べる。

着氷過程では、ベンチ試験に反して試験管の先端を浸した程度では全く着氷しなかった。さらに試験管を沈め着氷させると、Photo 6のように白濁した関東ロームを巻き込んだ氷ができた。そこで着氷を効果的に行わせるために、試験管先端に熱伝導性の高い金属(当実験ではタングステン)を埋め込んだ。その結果、寒剤の温度-20℃のもと、数十秒で着氷を完了することができた。

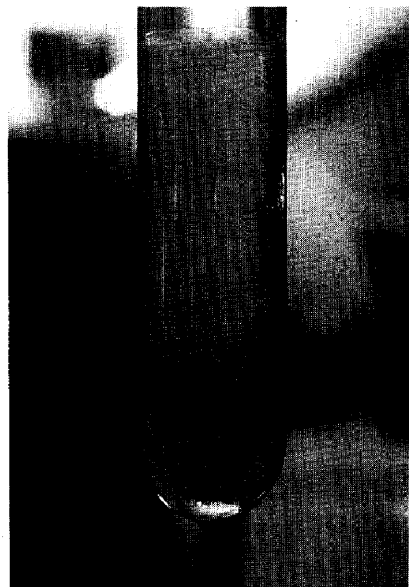


Photo 6 凍結濃縮例(I)



Photo 7 凍結濃縮例 (II)

濃縮過程では、着氷後、寒剤の温度を -5°C に上げ 10 mm/h の速度で試験管を降下させたところ、氷柱にPhoto 7のような縞模様を形成した。この原因を追求するために、まず寒剤の温度変動を調べてみると、20分周期で $-6.5\sim-3.5^{\circ}\text{C}$ の間を変動していることがわかった。また、氷柱の縞模様が 3 mm の間隔で規則正しく並んでおり、試験管が 3 mm 降下するにはおよそ20分かかることから、原因は寒剤の温度変動によるものと考えられる。そこでより精度の高い温度調節器を用い、これらの点を改良した後凍結濃縮を行ったものがPhoto 8である。縞模様の形成は見られないが、氷柱中心部に白濁した部分及び気泡が見られた。



Photo 8 凍結濃縮例 (III)

溶融過程については遠赤外線ヒーターを用いた実験を行ったが、現段階では良好な結果は得られていない。さらに、高周波を利用した溶融も検討し、マイクロ波加熱装置を製作中である。

§ 4. おわりに

CDSと新たに開発した平行極板式ミストエリミネーターを組み合わせるにより、目標としていた高効率捕集を達成することができた。しかし、当システムとフィルター方式では捕集機構が異っており、さらに詳細な比較実験が必要である。また、CDSについては捕集された粉塵の再飛散防止のため、電極上の均一な水膜形成が課題となり、実用化に向けての耐久試験も必要である。

ゾーンメルティングは、凍結濃縮分離の可能性を実証できたものの、試作した装置では濃縮過程におけるいくつかの問題が残った。溶融過程は現在製作中の高周波を利用した加熱装置が、予備実験段階で良好な結果を出しており、この装置に期待したい。

最後に、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、及び装置の制作に御協力頂いた千代田アール・アンド・デイ社に対して心から御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 「空気清浄ハンドブック」日本空気清浄協会編 オーム社
- 2) 「除じん・集じんの理論と実際」大野長太郎 オーム社
- 3) 「静電気ハンドブック」静電気学会編 オーム社
- 4) 「静電気学会講演論文集'85」静電気学会
- 5) 「高性能静電液滴捕集と排液処理技術の開発(第一報)」西松建設技報第8号