# 高性能静電液滴捕集と排液処理技術の開発(第三報)

Development of High Efficiency Electro-Static Scrubber and Drain Treatment Technique (3rd Report)

> 吉田 尚弘\* 伊勢 賢郎\*\* Naohiro Yoshida Kenrō Ise

安達 嗣雄\*\*\* Tsugio Adachi 萩谷 宏三\*\*\*\* Kōzō Hagiya

#### 要 約

過去三ケ年にわたる静電液滴捕集技術及び排液処理技術の開発研究について最終の報告 を行う.

静電液滴捕集では、装置の実機化を目指し耐久性試験を行った。種々の改良を加えた結果,通算250時間に及ぶ運転の間,高い捕集率(0.3µmの粒子に対して99.97%以上)を維持し、安定した性能を発揮した。

排液処理では前報に引き続きゾーンメルティングの基礎実験を行う一方,新たに冷却コ イル型凍結濃縮法についても検討を行った.その結果,HEPA フィルターと比較し1/10程 度の減容が可能であることを確認した.

#### 目 次

- §1. はじめに
- §2. 静電液滴捕集技術
  - 2-1 耐久性試験
  - 2-2 静電液滴装置の改良
  - 2-3 改良装置による耐久性試験
  - 2-4 各種粉塵に対する性能
- §3. 排液処理技術
  - 3-1 凍結濃縮実験
  - 3-2 高周波加熱装置を用いた溶融実験
- 3-3 冷却コイルを用いた凍結濃縮実験
- §4. おわりに
- §1. はじめに

科学技術庁より補助金の交付を受け行ってきた高性能

\*\*\*\*技術研究部原子力室

静電液滴捕集と排液処理技術の開発も最終年度を迎える こととなった。静電液滴捕集は当初の目標であった HEPA フィルターと同等又はそれ以上の捕集性能を発 揮した。しかし、この性能は長時間運転を行った場合、 時間の経過とともに低下することも考えれ、その安定性 を明らかにすることが実用化に向けて必要であった。

そこで、昨年度の装置を使用し連続運転を行い、その 不良箇所を明確にした上で改良型の装置を製作した。

排液処理については前年度に引き続き凍結濃縮法によ る実験を行った。前年度と同様のゾーンメルティング法 とともに冷却コイル型凍結濃縮法についても基礎実験を 行い、その優位性を確認した。

### §2. 静電液滴捕集技術

これまでの静電液滴捕集装置の開発経過をたどってみ ると以下のようになる。

開発当初においては、プリチャージャー(以下 PC と 略す)により粉塵に予め電荷を与えておき、荷電噴霧捕

<sup>\*</sup>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

集装置(以下 CDS と略す)部で逆極に帯電した水滴により、その粉塵を捕集することを試みた.しかし、目標とする捕集率に達することはできなかった.

そこで、水滴の均一噴霧のための改良, PC の改良等を 行った. さらに、平行極板型の CDS を開発するに至り、 この形の CDS が高い捕集能力を有することが確認さ れ、この原理を利用したミストエリミネーター(以下 ME と略す)を新たに開発した. この ME を CDS 後段 に配置し、目標とする捕集率に達することができた.

装置の実用化に際し残された問題は、この装置が長時 間にわたり高い捕集能力を維持することができるかとい う点である。

### 2-1 耐久性試験

昨年度の実験装置を使用し、耐久性試験を行った。しかし、15時間で碍子部の絶縁破壊が起こり運転続行が不可能となった。ここで確認された支障個所は以下の通り である。

## (1) PC 部

前報の改良により粉塵の付着は解決したと判断してい たが、この運転でかなりの粉塵付着が見られた (Photo 1). そのため、何らかのクリーニング方法を検討しなけ ればならない.



Photo 1 PC粉塵付着状況

(2) CDS 部

碍子ボックス内に粉塵や水滴が付着し絶縁破壊が起り アクリル製ボックスの一部を焼損した.さらに,集塵極 板下部ではその撥水性のため均一な水膜が形成されず縞 状の粉塵付着が生じた (Photo 2).

(3) ME部

ME 部の電極板の洗浄は、CDS からの飛散ミストで 行うことを考えたが、その量は予想外に少なく粉塵の再 飛散が見られた。



Photo 2 集塵極板の水膜切れ状況

#### 2-2 静電液滴装置の改良

2-1の連続運転で問題となった箇所に以下のような 改良を行った。

(1) PC部

PC部にかなりの粉塵付着が見られそのクリーニング 方法に検討を要すること、この部分で装置の圧力損失の 大部分が生じていること、予備荷電が捕集効果にほとん ど寄与していないことなどを考え合わせるとむしろデメ リットの方が多い.そこで、今年度はシステムから PC を 除くことにした.

(2) CDS 部

CDS 部での課題は、次の2点である。

## ①碍子部の絶縁維持

### ②集塵極板の効果的洗浄

①に対しては,碍子ボックス内にエアパージを行える 構造とし,さらにエアパージ効果を高めるため碍子に円 筒の被いを取り付けた.改良後の碍子ボックスを Fig.1 に示す.この結果碍子ボックス内はかなり高い洗浄度を 保ち絶縁維持が可能となった.

②についてはステンレス板表面に撥水性があり極板表 面の水膜形成を阻害していると考えられたので、極板表 面をサンドペーパーで処理し親水性を高めた.その結果, 極板上の洗浄不良箇所は見られなくなった.

## (3) ME部

極板の洗浄をスプレーノズルによるシャワー洗浄で行 うことを考えたが、良好な洗浄効果は得られなかった. その上、極板に付着したミストが凝集して水滴となり、 火花放電を誘発し、また、CDS にも悪影響を及ぼした. そこで極板上の水滴による火花放電の影響を極力少なく するため、極板間隔を6mmから10mmに広げた.この結果 極板枚数は減じたが、極板一枚当たりの面積をふやすこ とにより総面積を改良前と等しくした.また、水滴よけ

82





### ターボファン HEPAフィルター

#### Fig.3 実験装置および測定箇所

プレートを取り付けることにより,碍子部を水滴から保 護した (Fig.2 参照). さらに CDS への悪影響を除くた め,ME 極板下辺を逆V字型にしてダクト壁面へ水滴を 導き,CDS には水滴が降りかからないようにした.極板 は CDS 同様サンドペーパー処理とした.改良後の ME を Photo 3 に示す.

以上のような改良を行った装置全体を **Photo 4** に示 す.



Photo 3 改良後のME



Photo 4 静電液滴捕集装置

#### 2-3 改良装置による耐久性試験

改良を加えた実験装置の連続運転を行い耐久性を検討 した、実験装置及び測定箇所を Fig.3 に示す.

試験条件を以下に示す。

試験粉塵の種類・濃度	:JIS 11種3mg/m³
処理風量	:15m³/min
CDS 印加電圧	$:-27 \mathrm{kV}$
ME 印加電圧	:-9 kV
洗浄水量	:1.6ℓ/min

この条件下での連続運転結果(24時間)の一部を Fig. 4 に示す.0.11µm 以上の粉塵粒子の下流側個数は既ね 50個/0.01CF におさえられており,上流側個数は300万 個程度(上流側濃度1000CPM=3 mg/m時)である.捕 集率は0.11µm 以上の全粒子に対して99.99%以上を維 持している.この試験も含め,断続的に装置の運転を繰 り返した結果延べ250時間に達したが,絶縁破壊は起こ



らず碍子表面の汚染も全く見られなかった。

2-4 各種試験粉塵に対する性能

連続運転では関東ロームを試験粉塵とした.装置の実 機化に向けてさらにいろいろな粉塵に対する装置の性能 を把握することが必要である.そこで,関東ローム以外 の粉塵(Table 1 参照)についても捕集率を測定し,装 置の性能を確認した.その結果を Fig.5~10に示す.こ の装置の定格風量である 9 m<sup>4</sup>/min においては,すべて



Fig.5 タルクの風量別捕集率

		まり毛	化学組成	粒径分布
JIS規格	名柄	具比重	成分…質量[%]	粒径畑…ふるい上[%]
9種	タルク超微粒	2.7~2.9	SiO <sub>2</sub> 60~63	2·····79±5
			$Fe_2O_2 \cdots 0 \sim 3$	$4 \cdots 55 \pm 5$
			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> $\cdots$ $0 \sim 3$	$8 \cdots 23 \pm 5$
			CaO 0~ 2	$16 \cdots 6 \pm 3$
			MgO30~34	
			強熱減量… 3~ 7	
10種	フライアッシュ	3.0~2.3	SiO2 …45以上	$2$ ······ $82 \pm 5$
	超微粒		Al2O3 …20以上	$4 \cdots 60 \pm 5$
				$8 \cdots 22 \pm 3$
				$16\cdots 3\pm 3$
11種	関東ローム超微粒	2.9~3.1	SiO <sub>2</sub> 34~40	1······65 ± 5
			Fe <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 17~23	$2$ ······50 $\pm$ 5
			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 26~32	422±5
			CaO 0~ 3	6 8±3
			MgO … 3~ 7	$8 \cdots 3 \pm 3$
			$TiO_2 \cdots 0 \sim 4$	
			<b>強熱減量… 0~ 4</b>	
12種	カーボンブラック	1.7~1.9	物理化学特性	0.03~0.2…100
	超微粒		DBP吸収量 …25~34	
			よう素吸着量…22~30	
13種A	DOP	0.981	化学式	
		at25°C	$C_6H_4(COOC_8H_{17})_2$	中位径 ×50μm
			分子量	0.3
			390.57	幾何標準偏差
				1.15
15種	混合ダスト		8種(中位径8μmの関東ローム)	
			12種	
			コットンリンタ 3%	

Table 1 JIS試験粉塵

84



Fig.6 フライアッシュの風量別捕集率





の粉塵に対して HEPA フィルターと同等の性能を有し ていることがわかった.

## §3. 排液処理技術

昨年度行ったゾーンメルティングの基礎実験では排液 の濃縮過程でいくつかの問題が生じた.また、溶融過程



Fig.8 関東ロームの風量別捕集率



においては高周波利用の加熱装置を試作するに留まった。今年度は凍結濃縮については、試験管を用いた実験 をさらに進めその有効性を検討し、溶融については高周 波利用の加熱装置を用いた実験を行った。さらに、排液 中に冷却コイルを浸し、凍結濃縮を行わせる方法につい ても検討した。

### 3-1 凍結濃縮実験



Fig.10 混合ダストの風量別捕集率

Table 2 試験管サイズ別最適凍結濃縮温度

試験管外径[mm]	20	25	30
項目	(1.2)	(1.5)	(1.8)
凍結濃縮温度[℃]	-1.0	-1.5	-2.0

( )内の数値は肉厚[mm]である。

武験管外径[mm]	20		25		30	
項[1] (原液物性值)	凍結部	液部	凍結部	液部	凍結部	液部
導電率[µs/cm]	180	210		250	80	
(200~210)	3	5	130	1	5	275
	210	230		260	82	
рН[-]	7.0	7.2		7.5		
(7.0~7.2)	5	\$	7.2	\$	7.0	7.3
	7.2	7.6		7.8		
濁度[ppm] (82~86)	50	10	45	10	15	10
量 [ml]	15	35			54	81

#### Table 3 凍結濃縮実験結果

注1 原液の濃度は、関東ローム50pmとする。

 $50m\ell(20mm)$ ,  $80m\ell(25mm)$ ,  $135m\ell(30mm)$ 

注3~凍結濠縮時間は、20時間とした。

凍結濃縮については試験管サイズ,試験管降下速度及 び寒剤温度を様々に変化させ,凍結濃縮が行われる最適 な状態を定量的に把握した。その結果,試験管降下速度 は管サイズ並びに寒剤温度に関係なく、5 mm/hr が最適 であることが判明した。また,管サイズ毎にその最適と 考えられる寒剤温度をまとめたものが Table 2 である.



Photo 5 凍結濃縮開始2時間後



Photo 6 凍結濃縮開始6時間後



Photo 7 凍結濃縮開始20時間後

管サイズが大きくなるに従って最適寒剤温度は低下す る.これは試験管と溶液の容積がふえたために,熱容量 が増大したためである。また,この最適状態のもとで凍 結濃縮を行った結果を Table 3 に示す.導電率及び pH から判断すると導電性物質は確かに凍結分離が行なわれ ている.しかし,濁度をみた場合凍結部の濁度が高い. これは,液中に含まれる比較的大きな関東ローム粒子の 沈降速度が溶液の凍結速度に優ったために,氷中に粒子

注2 原液の量は、各試験管に入れて同じ高さを示す量とした。

が含まれたためである。管サイズ別にみると外径30mmの ものが優れている。Photo5~7 は外径25mmの試験管に よる凍結濃縮過程である。凍結濃縮開始後2時間程度で 中心部に巻き込みを生じる。写真から、凍結は曲面状に 進んでいき濃縮された溶液は中心部に集まるのがわか る。底部に氷が生成された状態では管側面からの凍結速 度が速くなり、上部へ不純物を押し出す前に凍結してし まう。結果的に中央部に不純物を巻き込むことになる。

#### 3-2 高周波加熱装置を用いた溶融実験

高周波を利用した加熱装置で身近なものとして電子レ ンジがある。この加熱方式は以下に示す特徴がある。 〇物質自身の分子運動により発熱させる加熱方式であ

る.

- 周波数と電圧を適当に選ぶことにより、物質の内部ま で急速にしかも均一に加熱できる。
- ○非接触加熱ができる。
- ○操作が簡単で加熱温度の調節が容易である.
- ○周囲の空気や装置自身を熱せずに加熱できる。

ゾーンメルティングの溶融過程にこの加熱装置の導入 を図った.装置は永久磁石形マグネトロンを使用した周 波数2,450MHz,最大600Wのマイクロ波(高周波の一 種)を発振させるものである.Table 4 に装置仕様を, ゾーンメルティング装置に組み込んだ様子を Photo 8 に示す.

所用電力	AC200V 3 相1.5kVA
マイクロ波出力	50~600W連続可変
発振周波数	$2,450\pm30\mathrm{MH}z$
出力安定数	電源電圧±10%の変化に 対して±5%以内
応 答 速 度	10秒以下
マグネトロン	非平滑
電 源	全波整流方式
製造所	日本高周波(株)

Table 4 加熱装置仕様

外径30mmの試験管を用い溶融実験を行った.溶融の状態を見やすくするため、ポスターカラーで着色した水を 凍結し使用した.

数度の実験から,出力を徐々に上昇させ400Wとなった 時点でさらに15秒間照射を続けるとほぼ理想に近い溶 融ができることがわかった.照射前,照射後の状態を Photo 9,10に示す.ふく射及び伝導により外部から溶 融させる赤外線ヒーター方式と比較すると,高周波加熱 方式が優れていた。



Photo 8 高周波加熱装置



Photo 9 高周波照射前



Photo 10 高周波15秒照射後



Photo 11 冷却コイル型凍結濃縮実験装置

#### 3-3 冷却コイルを用いた凍結濃縮実験

試験管を用いた凍結濃縮においては、中心部の不純物 巻き込み、Table 3 から明らかなように処理量が少ない などいくつかの課題が残った。そこで凍結濃縮の新しい 方法として冷却コイルを溶液中に浸しコイル表面上に氷 を成長させる方法を試みた。Photo 11 に実験装置を示 す。冷却コイルは銅管(外径6、8、12mm)を使用し1 1のビーカーに納まるようにU字型に加工した。また、 寒剤温度の管理は、冷却コイルの寒剤入口、出口及びビ ーカー内に熱電対を設置しダイアラトロール温度指示計 を用いて行った。

Table 5 は、寒剤温度別に凍結濃縮を行い生成した氷 の物性値をまとめたものである。寒剤温度は生成する氷 の純度に影響を与えず、その純度も純水に近い。氷の生 成量は、当然のことであるが寒剤温度が低いほど多い。 Photo 12 はコイル表面に生成した氷である。

冷却コイルの外径の違いが生成する氷の物性値に与え る影響についてまとめたものが Table 6 である。導電率 及び pH は外径 6 mmの場合若干他よりも高い傾向にあっ た。総合的に判断すれば、外径 8 mmのものが最適である。

この冷却コイル型凍結濃縮法で、どの程度まで濃縮で きるかを実験した.その結果を Table 7 に示す. 導電率 から判断すれば、20,000ppm(2%)の関東ローム溶液か ら純粋に近い水を取り出すことが可能である.仮に静電 液滴捕集装置で使用可能な水の導電率を10以下とすれ ば、200,000ppm(20%)の関東ローム溶液から噴霧水を 回収することが可能である. この濃度は排液1m<sup>s</sup>中にお よそ200kgの関東ロームを含んでいることになるので、

寒剤	関東ローム	導電率	pН	濁度計の	生成した
温度[℃]	溶液濃度			指示值	氷の量
	[ppm]	[µs/m]	[-]	[%]	[mℓ]
	50	7.1	6.3	100	21.0
- 5	500	6.2	\$	86.0	24.0
	1000	2.5	6.8	98.0	22.5
	50	3.7	6.4	99.0	53.5
-10	500	2.7	\$	100	57.0
	1000	2.0	6.8	98.5	44.5
	50	3.65	6.2	98	86.5
- 20	500	2.5	\$	97.5	72.5
	1000	2.24	6.6		69.0

Table 5 冷却コイル型凍結濃縮実験結果(I)

注 外径8mmの銅管を使用し30分間の凍結濃縮結果

Table 6 冷却コイル型凍結濃縮実験結果(II)

冷却	関東ローム	導電率	рH	濁度	生成した
コイル めな[]	溶液濃度				氷の量
ንኮ1ድլտጠյ	[ppm]	$[\mu s/cm]$	[-]	[ppm]	[mℓ]
	50	12.5	7.3	2~3	38.0
6	1000	4.1	6.9	10	36.5
	10000	28.5	7.6	80	39.0
	50	3.7	6.7	5	43.5
8	1000	2.0	6.5	0	41.5
	10000	2.2	6.1	15	36.0
12	50	4.7	6.5	5	84.0
	1000	2.0	6.1	10	85.0
	10000	4.5	6.6	5	83.5



Photo 12 冷却コイル表面に生成した氷

これを放射性塵埃と考えれば、HEPA フィルター(18kg /m<sup>3</sup>)と比較してその減容比は1/10以下となる。

#### §4.おわりに

本開発研究は、原子力発電所等から発生する低レベル 放射性廃棄物,特に使用済 HEPA フィルターの量的低 減化を目的としてきた.すなわち現行の HEPA フィル ターを静電液滴捕集装置に置き換え,その交換のわずら

関東	導電率	pН	濁 度	生成した
D-4				氷の量
液濃度[ppm]	$[\mu s/cm]$	[-]	[ppm]	[m <b>l</b> ]
1,000	2.0(21.5)	6.6	0	41.5
3,000	1.6(22.0)	6.5	$2\sim 3$	44.4
5,000	1.8(21.0)	6.7	10	44.5
7,000	1.6(21.0)	6.6	7	45.0
10,000	2.2(22.5)	6.1	10	36.0
20,000	1.9(20.0)	6.6	45	45.0
30,000	11.5(19.5)	6.7	NM	47.0
30,000*	3.9(18.5)	6.6	80	28.5
100,000*	4.2(18.5)	6.6	200	32.0
200,000*	8.7(17.0)	6.6	NM	32.5
300,000*	29.0(18.0)	7.0	NM	32.0

Table 7 冷却コイル型凍結濃縮実験結果(III)

注1 濃縮時間は、30分とした。

注2 \*印は、スターラーのかくはん効率を上げるために関東ローム 液量600mℓ(通常1ℓ)とした。

注3 NMは,濃度が高すぎて,測定不能であることを示す。

注4 銅,管外径は8㎜,寒剤温度は−10℃である。

わしさを除くこと, さらに液滴捕集の結果生じる排液の 減容化を目標として始まった.

静電液滴捕集では、当初の PC と CDS の組み合わせ から数度形を変え、その捕集機構にも多少の変化があっ た.最終年度には PC を除き、CDS+ME という組み合 わせにより高効率捕集と運転の持続性が確認された.こ の装置についてはまだ基幹となる部分の開発が終了した 段階であり、実機化の見通しはついたものの、さらに細 かな点についての検討が必要である.

排液処理は、当初電気泳動法による処理を試みたが、 実用化するには問題があり、次いで凍結濃縮法を利用し たゾーンメルティング法による処理を行った.凍結濃縮 自体には優れた点はあったが、凍結濃縮と溶融を繰り返 さなければならないためゾーンメルティングには問題が あった.しかし、冷却コイルを用いた凍結濃縮では凍結 溶融を繰り返すことなく、純度の高い水を回収できるこ とが判明した.また、冷却コイルを用いる場合、装置も 冷却コイル、コイルに寒剤を送る装置及び排液のかくは ん装置のみで済み、簡単、小型であり、スケールアップ も容易である.この凍結濃縮法は実機化すること自体難 しいことではないし、他にも利用可能な分野は多いと考 えられ今後も検討を続けていきたい.

最後に、三年間にわたり懇篤なるご指導を頂いた東京 大学工学部増田閃一教授ならびに科学技術庁の皆様、ま た装置の製作に御協力頂いた㈱千代田R&Dに対して心 から御礼を申し上げます.

### 参考文献

- 1)「静電気ハンドブック」静電気学会編 オーム社
- 2)「空気清浄ハンドブック」日本空気清浄協会編 オー ム社
- 3)「集塵工学」井伊谷鋼一著 日刊工業新聞社
- 4)「冷凍空調便覧」 日本冷凍協会編
- 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
- 6)「高性能静電液滴捕集と排液処理技術の開発(第二
  - 報)」 西松建設技報第9号