(色材, 52〔9〕526-544. 1979)

除 じ ん 技 術

橋 爪 稔*

1. は し が き

労働環境改善のための局所排気装置からの排気は、ダスト、フューム、ミスト、ガスまたは蒸気によって高度に汚染されている。そのためこれをそのまま大気中に放出するときは、工場内環境を悪化し、風向によっては開いた窓などから再び作業室内に汚染空気流が侵入することになる。煙突あるいは高い位置の排出口からこれを放出するときは、その付近の居住者などに被害を与え、工場公害の原因となる。現在工場地帯の大気汚染が深刻な問題としてますますクローズアップされつつある状態から考えても、今後局所排気装置を設置する場合には、適切な用後処理を設置してダスト、フュームは勿論ミストあるいはガス・蒸気もこれを分離除去して、できる限り清浄な空気として大気中に放出しなければならない。

気体中に浮遊分散している固体または液体の粒子状物質（このような状態の系を気体膠質あるいはエアロゾルという）をその気体中から分離捕集または分離除去する操作をそれぞれ集じんまたは除じんといい、(i) 有用物である粒子状物質（以下粒子と略す）を分離捕集すること、すなわち粒子がプロセス生成物であるような場合や、気体を清浄にして工業生産物として利用すること、すなわち気体がプロセス生成物であるような場合に、この分離操作を集じんといい、(ii) 気体も粒子も共に不用であるが労働衛生上および大気汚染防止上気体中から粒子を分離除去し、清浄気体として大気中に放出するような場合に、この分離操作を除じんといい、狭義の集じんである。

粒子は粉体工学あるいはエアロゾルサイエンスの対称であるが、やっかいなものとされているのは種類が千差

万別で、その特定の定義や測定法および特性表示法すら確立していない分野が多いからで、これを体系的に取り扱うことはむずかしい。そして気固2相流としての含じん気流あるいはエアロゾル気流を完全に固気分離する装置としての除じん装置は、その流れも、分離機構も、機械的電気的あるいは物理化学的であるが複雑で、現在のところ解析的に取り扱うことは不可能な範囲が多い。したがって除じん装置の基礎的研究は勿論実用上の研究も十分でなく、実際上は経験をたよりに設計製作をしている所が多い。

労働環境内の発生源（色材・顔料工業においては、粉碎機、ふるいわけ機、混合機、秤量袋詰め作業、諸機械あるいは装置への粉体の投入口または取り出し口など）からある速度をもって発生する粒子状汚染物質が、まわりの空気中に混合分散する以前に、できるだけ高濃度の状態で、局所的にこれらを吸込み気流によって捕捉制御しようとする方法を局所排気法といい、この局所排気装置は、吸込みフード、ダクト、除じん装置および排風機から構成されている。したがってこの除じん装置は、労働衛生工学上からは、フード、ダクトおよび排風機の設計をふくみ、また大気汚染防止上からは煙突の設計配置にまで関連をもつ一つのシステム工学的な考え方が必要になる工業プロセスである。

本文においてはこの除じん装置の選定基準、除じん方法の原理と除じん装置の種類、除じん装置の設計方法および性能の概要を述べて、色材および顔料工業に関係される方々への参考とすることが目的であるが、色材工業および顔料工業特有の問題は筆者不勉強のため省略し、一般論を述べてその責をふさがせて頂くことにする。

2. 除じん装置の選定基準

2.1 は し が き

局所排気系の対称である汚染空気は一般に常温に近い場合が多く、その粉じん濃度は非常に薄いところで0.01 gr/Nm³、濃くても10 gr/Nm³程度でプロセス集じんの

昭和 54.8.9 受理
Control Techniques for Particulate Matters
Minoru HASHIZUME

* 労働省産業医学総合研究所
川崎市多摩区長尾 6-21-1 (〒213)

場合に比して余り高くないのが普通であるが、含有している粒子の粒径範囲は 0.01 から 100 ミクロンの広範囲にわたっている場合が多い。しかし電気製鋼炉の直接吸引のような場合には、プロセス集じんと同じで、対象汚染ガスの温度は高く、かつその粒子はフェームといわれ、高濃度・極微少粒子を処理しなければならないこともある。

一方除じん装置側から眺めると、粉じん粒子が 10 ミクロン以上の場合には簡単に分離され得るから問題は少なく、0.1 ミクロン以下の場合にはその分離は非常に困難であるが、一般に量が少なく余り問題にされないことが多い。したがって 1 ミクロン前後特にサブミクロンが除じんに対する主要な対象粒子径範囲となり、かつサブミクロン領域になるとその分離に相当な困難があって高価な装置を使って、なお注意深い操作を必要とするようになる。

ガス中に浮遊分散しているこれら粒子を分離除去する機構あるいは原理としては、粒子と気体のもつ特性の差異を利用することであるが、(i) 重力、(ii) 慣性力あるいは遠心力によるもの、(iii) 水滴ないし水膜に粒子を付着させ、これを 2 次粒子に成長させてからガス中から分離するもの、(iv) 繊維の織物クロスないし繊維層によって粒子のみをろ過するもの、(v) 電気力によるもの、(vi) その他熱力、音波によるものなどが上げられる。重力による方法は粗粒子にのみ有効で 10 ミクロン以下ではほとんど考慮する必要はなく、熱力、音波による方式も特殊以外有効でないので実装置に使用されていない。この分離機構に基づいて除じん方法を分類すると表-1 および表-2 のようになる。比較的粗粒子（数ミクロン以上）のみを除じんする場合は遠心力によるサイクロンか簡単な洗浄方式が用いられる。一方、最近の環境衛生および公害問題に対処するための除じん装置としては、大気汚染防止法による規制排出濃度を満足するだ

けでは不十分のことが多くなってきた。粉じんが人間の目ではほとんど見えない濃度は $0.03 \sim 0.05 \text{ gr/Nm}^3$ 以下といわれ、一方労働衛生上の許容濃度の値が $0.1 \sim 0.5 \text{ mgr/Nm}^3$ の物質が非常に増加してき、この程度まで分離することができる除じん方法としてはサブミクロン微粒子まで完全に分離し得るものでなければならず、粒子の特性にもよるけれども、一般に次の 3 つの種類の除じん方式に限定される。

- (i) 高性能ろ過除じん方式：バッグ・フィルター
高性能エアーフィルターなど
- (ii) 電気力除じん方式：乾式または湿式電気除じん装置など
- (iii) 高性能洗浄除じん方式：ベンチュリスクラパーなど

したがって、この 3 つの方式に基づく除じん装置について主として記述するが、この他前述の遠心力除じん方式のサイクロンも補助的または、前置き除じん装置としてなお有効に用いられるであろうからこれについても若干ふれることにする。

除じん方式またはその方式に基づく除じん装置の選定は、まず対象粉じん粒子に対して規制される大気放出濃度 C_0 またはこれを受けて定まる必要除じん率 η 、および対象粉じん粒子に対する粒径残滓分布とから求まる必要除じん粒子径と各除じん方式個々の除じん限界粒子径とから、方向づけられ、ついで処理される粉じん粒子とガスの性状、装置の設備費と運転費、および総経費をその耐用年数である 7 年ないし 10 年の展望を行ったうえで最終的に決まる。

2.2 所望除じん率と必要除じん粒子径に基づく除じん装置の選定

前述の除じん原理に対してその方式の選定上まっ先きに取り上げられるべき因子は、対象粉じん粒子の大きさの分布（粒子径分布）と大気放出濃度を受けて定まる所

表-1 各種除じん装置の概要

分離除じんの機構	代表的除じん装置	除じん限界粒子径 (ミクロン)	圧力損失 (mmH_2O)	最適ガス流速 (m/sec)	設備費
慣性力分離法	ルーバー形慣性除じん装置	10~30	30~50	30	小
遠心力分離法	サイクロン	3~10	100~200	15~20	小
ろ過分離法	繊維層フィルター	0.1~5	~50	1~3	中
	バッグ・フィルター	0.1>	~200	0.01~0.1	大
洗浄分離法	スクラパー	1~50	~200	10~30	中
	ベンチュリ・スクラパー	0.1>	250~1,000	60~100	中
電気力分離法	電気除じん装置	0.1>	~50	2~3	大

望除じん率である。換言すると大気放出濃度をその規制値以下にするには、どの程度の微細な粒子までつかまえる必要があるかということである。

各種粉じん粒子およびエアロゾルの粒径分布は粒径範囲の形で表-2 に概略されているが、一般の粉じんについて調べてみると、相当大きい粒子から非常に微細なものまで、その粒子の大きさはある範囲にわたって分布している。そこでこれらの粉じん粒子の中である狭い範囲の粒子径に属するものを選び出して、その重量または個数が全粉じんの重量または個数の何%に相当するかを調べてみると、これが統計的にある規則的な分布を持つことがわかる。これを粒径頻度分布 f % または度数分布といい、重量を基準にとった場合の分布を重量分布、個数を基準にとった場合の分布を個数分布と呼ぶ。除じん装置の設計には重量分布が多く用いられる。ついでこれら粉じん粒子の中で、ある値より大きい粒子径を有するものが全粉じんの何%あるかを表わす分布を残滓分布またはふるい上分布 R % といい、粒径 0 に対して $R=100$ %、粒径 ∞ に対して $R=0$ % である。この残滓分布は後述のように除じん装置の設計には重要な値である。

図-1 はある粉じん粒子について重量基準による頻度分布 f (%) と残滓分布 R (%) を測定した結果を記したもので、粒子径 $d_p=2\mu$ に対する頻度分布 $f=8$ % は、それが全体の粉じんに対して重量比で 8% 占めることを表わし、残滓分布 $R=80$ % は、粒子径 d_p が 2μ より大きい粒子が全体の 80% を占めることを表わしている。

除じん装置の性能を表わす一つとして重量基準で示す除じん率 η がある。装置の入口側と出口側のガス量が一定であれば、除じん率 η は、次式で示されるように、装置の入口側と出口側の粉じん濃度の差 $C_i - C_o$ と装置の

入口側の粉じん濃度 C_i との比で表わされる。

$$\eta = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100 = \left(1 - \frac{C_o}{C_i}\right) \times 100$$

装置の入口側濃度 C_i を予備調査または測定で求めておき、装置出口側濃度 C_o を対称粒子の大気放出規制濃度以下になるようにするには、前式から除じん率をいくらにしたらよいかわかる。したがってこの必要除じん率の値と前述の残滓分布から、何ミクロンの粒子径の粒子まで捕えればよいかที่ただちに求められる。これを必要除じん粒子径という。たとえば図-1 のような粒径分布をもつ粉じん粒子を 10 gr/Nm^3 の濃度で含む含粒子気流を浄化して、かりに大気放出規制濃度 $= 2 \text{ gr/Nm}^3$ まで粉じん濃度を下げたい場合には、必要除じん率 $\eta = 80$ % となる。一方前記のようにこの粉じん粒子は 2μ 以上の粒子を 80% 含んでいるから、これを逆にいうと、大気放出濃度をふまえて得られた除じん率 80% を得るためには 2μ 以上の粉じん粒子を全部捕えればよい。すなわちこの場合の必要除じん粒子径は 2μ となる。このように、除じん率と必要除じん粒子径の関係は、対象となる粉じん粒子の残滓分布と粒子径との関係に等しい。また後述される部分除じん効率曲線において部分除じん率が 50% を示す粒子径として定義された除じん限界粒子径、または Cut size が簡単化した除じん性能として現在広く用いられているが、必要除じん率 η の値に等しい残滓分布 R の値に相当する入口粉じん粒子の粒子径を平衡粒径と定義し、今後これを除じん限界粒子径として用いることは理論的にも合理的であり実用上もより便利である。

除じん装置の性能を表わす最も主要な因子の一つに除じん率 η があり、普通よく除じん率が 99% とか 99.9% などとカタログなどに記載されて除じん装置の性能を η の値の大小で評価する傾向があるが、労働衛生上あるいは大気汚染防止のために除じん装置が存在している以上、除じん率の重要度は二次的なものにすぎないのである。たとえば、大容量の排ガスを大気中に放出する重油専焼ボイラーに設置すべき除じん装置の粒子濃度 $C_o < 0.05 \text{ gr/Nm}^3$ に対して、不連続運転のごみ焼却炉に設置されるそれは $C_o < 0.8 \text{ gr/Nm}^3$ などと規制することと同じである。 C_i の値が小さければ、 η はさほど大きい値ではなくても、 C_o の値を規制値以下にすることができる。反対に C_i がきわめて大きければ η の値が仮に 99.5% であっても、 C_o の値は許容値を越す場合もありうる。一般に、労働衛生上または大気汚染防止の立場から、除じん装置の価値評価の本質的に対称となるものは大気放出粒子濃度、さらには大気放出粒子の総重量の値

図-1 頻度分布 f と残滓分布 R (ふるい上分布)

図-2 部分除じん率 $\Delta\eta$

をもってしなければならない。

2.3 部分除じん率と除じん限界粒子径

除じん装置は、その方式、種類および対称粉じん粒子の大きさによって、分離除去し得る粒子の大きさに差があり、一般的には大きい粒子は捕えやすく、小さい粒子は捕え難い。したがってある粒径分布をもつ粉じんを除じん装置に通すと、大きい粒子分はよく分離除去され小さい粒子分は除じんされずに系外に出てくる。この結果、各大きさの粒子に対する除じん効率は図-2となる。このように、ある特定の大きさの粒子だけについて、何%分離除去されたかを表す値を部分除じん率 $\Delta\eta$ といひ、 η と $\Delta\eta$ との関係が次式で示される。 $(\delta$: 粒径, R : 残滓分布)

$$\eta = \int_{\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} \Delta\eta \left[-\frac{dR(\delta)}{d\delta} \right] d\delta$$

この例では、粒径 8μ 以上の粒子に対する部分除じん率は100%であるが粒径 2μ の粒子に対する部分除じん率は60%にすぎない。図-3に各種除じん方式に対する概略の部分除じん率を示す。

この部分除じん率 $\Delta\eta$ を全粒子径にわたって加えたものが先記のいわゆる除じん率 η となるのであるが、これは実際的にはある大きさより大きい粒子は全部捕えられ、それより小さい粒子は全部系外に逃げてしまうと考へた結果と大して違わない。そこでこのような限界の大きさを有する粒子径を、その除じん方式あるいは除じん装置の除じん限界粒子径という。この限界粒子径は除じん方式あるいは除じん装置固有な値であり、表-2および表-3にその大略が示されている。

2.4 含じんガス中の粒子および気体の性状を考慮した機種選定

2.4.1 ダストとフューム

一般に固体粒子状物質の種類は業種により、また同一業種でもその扱うプロセスあるいは操作により千差万別であり、いろいろな名称で呼ばれている。しかしながらこれらをコロイド化学的に分類すると次のように簡単にダストとフュームに大別され得る。

石炭、岩石、金属、穀物、木材など地球に存在する有機・無機のあらゆる固体状物質が掘さく・爆破、破碎・粉碎、切削・孔あけ、研削・研磨・パフ仕上げなどのプロセスにおいて、機械的エネルギーによって、“微細化”されるとき生成される固体粒子状物質を、またすでに細分化された固体状物質(粉体、粉末など)が袋あけ、ふるいわけ、秤量、混合、袋詰め、移送あるいは噴霧塗装などのプロセスにおいて、機械的あるいは手動式に処理されるとき発生する固体粒子状物質をダスト (Dust) といひ、その化学組成は元の物質の組成に等しく、その

表-3 各種除じん方式の特性の概要

	圧 損 (mmH ₂ O)	除じん限界粒 子径 (μm)	設 備 費	運 転 維 持 費	備 考
サイクロン	～ 200	3～10	安	中	<400°C
スクラバー	～ 200	1	中 低	中	排水、スラッジ処理要す
ベンチュリ・スクラバー	～ 1,000	0.3	中 低	高	〃
バッグ・フィルター	～ 200	0.1>	中 高	中	<250°C 高湿不可
乾式電気除じん	～ 50	0.2>	高	中	<400°C
湿式電気除じん	～ 50	0.1>	高	中 高	排水スラッジ処理要す
繊維層エアフィルター	～ 50	0.1～5	安	低	ろ材使い捨て
充てん層 (塊状)	～ 200	1	中 低	中	湿式か移動層形式
静電植毛ろ布除じん	～ 50	1	中 低	低	ろ材自動再生

図-3 各種除じん方式の概略の部分除じん率

大きさはある程度空气中に分散浮遊し得る大きさで、その粒度は数 10μ から 1μ (場合によってはそれ以下) まで広範囲に分布している。

これに対して、相状態の変化を伴う化学的または物理的プロセスから発生する固体粒子状物質を総称してフェーム (Fume) という。

(i) 固相物質の加熱・高温・溶融の熱プロセスにおいて、固体は液相を経て蒸発して生成される気相物質が、あるいは昇華の結果直接生成される気相物質が空气中に放出されるとき、その気相物質は冷却・凝固 (一般に酸化反応を伴って) して固体の粒子状物質が生成される。

(ii) 可燃性固液物質、特に有機物質の燃焼プロセスにおいて、 O_2 不足による不完全燃焼の結果、固体の粒子状物質が生成される。

(iii) 相変化を伴う化学反応または光化学反応の結果、固体の粒子状物質が生成される。

このようにして生成される固体粒子状物質をフェーム (Fume) といい、その化学組成は元の物質と異にする。粒子の大きさはほとんど空气中に分散浮遊したままの状態の大きさであり、 0.01μ から 1μ の範囲に分布している極微粒子である。粒子の化学的および物理的活性が著しく高い。表-1 に粒子および気体膠質の特性を示した。

粉じん粒子の粒径分布について除じん機構ないし作用に影響をおよぼす因子として、付着力、粒子の比重およびかさ比重、粒子濃度、親水性または疎水性、粘着性、電気固有抵抗などがあげられる。

2.4.2 粒子径と付着力

粒子径が小さくなるほど、表面積が大きくなり、粘着力が大になる。粒子が微細になる程粉じんは付着しやすくなり、遠心力除じんやろ過除じんにおいては、かき落とし困難による目詰り、電気力除じんにおいては、電極へのダスト堆積を起こしやすい。

表-4 代表的粒子の比重、見かけ比重

粒子の種類	真比重 (A)	見かけ比重 (B)	A/B
微粉炭ボイラ	2.1	0.52	4.0
セメントキルン	3.0	0.6	5.0
重油専焼ボイラ	1.98	0.2	9.8
硫化鉱溶焼炉	4.17	0.53	7.9
酸素製鋼炉	4.75	0.65	7.3
カーボンブラック	1.9	0.025	76
セメント原料粉	2.76	0.29	9.6
砲金炉	5.21	0.16	32.6
骨材ドライヤ	2.9	1.06	2.7
黄銅用電気炉	5.4	0.36	15.0
製紙用黒液炉	3.11	0.127	24.5

2.4.3 比重に対する考慮

粒子の比重は、重力、慣性力、遠心力除じんでは、その性能を大きく支配する。表-4 に、代表的プロセスから発生する粒子の直比重および見かけ比重を示す。一般に見かけ比重が小さい程、粒子の分離はむずかしく、また分離捕集した粉じんの再飛散、逸出を起こしやすい。このため適正ガス流速より処理ガス速度を小さくすることになり、装置が大きくなる。

2.4.4 粒子濃度に対する考慮

(i) 燃焼などの化学反応によって生成された粒子は、一部燃焼時に溶着されるが、ガス温度の低下に伴い、粒子は互いに凝集し粗大化する。

(ii) 重力、慣性力、遠心力分離では、一般に含粒子量が多いほど、除じん率は高くなる。

(iii) ベンチュリスクラパー、ジェットスクラパーなどの洗浄除じんでは、スロート部の摩耗、ノズルの詰りなどから、通常 10 gr/Nm^3 以下が望ましい。

(iv) ろ過除じんにおいては、粒子濃度が低いほど、圧力損失の増加が少なく、払い落とし間隔を長くでき望ましい。高濃度の場合には、間欠式払い落としが使用できなくなり、連続式払い落としのみが使用されるが、多少の粒子の逸出がおきる。

(v) 電気力除じんでは粒子濃度は少ないほうが望ましいが、通常 30 gr/Nm^3 前後以下で用いている。

2.4.5 親水性または疎水性に対する考慮

洗浄除じんでは親水性、水溶性、吸湿性が、とくにその性能を大きく支配する。一般に親水性の少ないものでは、親水性の大なるものに比較して、使用水量が数倍必要となる。

2.4.6 粘着性に対する考慮

粒子中に、硫酸分、塩化物、有機物などの凝縮成分な

どを含む場合、ろ過除じん装置のろ布の目詰り、洗浄除じん装置の腐食が激しい。

2.4.7 電気固有抵抗

電気力除じんにおいては、粒子の見かけ電気抵抗が、最も大きく性能を支配するが、理想的な電気力分離が行われる $10^4 \sim 10^{10} \Omega\text{-cm}$ の範囲であれば、ほとんど影響はない。

2.4.8 処理ガスの状態に対する考慮

労働環境改善の局所排気系においては、その処理ガス流量はフードの設計から与えられる数値で、変動はほとんどないが、一般に最大流量を除じん装置の処理風量とすべきである。

処理ガスの温度、湿度、圧力、腐食性、有害性、および爆発限界を考慮に入れないと、選定された除じん装置の安全かつ確実な操作運転を期待できない。特に温度と露点に対しては十分考慮しなければならない。

2.4.9 ガス温度に対する考慮

(i) 遠心力除じんにおいて、ガス温度が高いほど、ガス粘度は高くなり、粒子の分離はむずかしくなる。一方前述のように、燃焼などで生成された素粒子の、温度降下に伴っておきる凝集効果が少なく、除じん率は低下する。

(ii) 洗浄除じんにおいては、ガス温度が高くなるほど、使用水量は増加し、湿分および同伴ミスト量が増加する。したがって、処理後のガスの拡散、同伴ミストの除去に十分な考慮が必要である。

図-4 粉じんの処理ガス温度と見かけ電気固有抵抗の関係

OF: 平炉ダスト

CK: セメントキルン

PF: 微粉炭ボイラ

%: $\text{H}_2\text{O Vol. \%}$

図-5 重油燃焼排ガス中の SO_3 濃度と露点との関係

(iii) ろ過分離においては、ろ布の耐熱温度まで、ガス温度を下げて使用する。通常ガラスウールもので $200 \sim 250^\circ\text{C}$ 、ノーメックスで 200°C である。

(iv) 電気力分離においては、一般に 500°C 以下で使用する。粒子の見かけ電気固有抵抗が、図-4 に示すように、処理ガス温度で大幅に異なるので、理想的電気力除じんの行われる範囲に、ガス温度を選ぶ。

2.4.10 酸露点に対する考慮

図-5 に、ボイラー排ガス中の SO_3 量と露点との関係を示す。ガス中の SO_3 量はその量が微少であっても、図でわかるように大幅に露点を高める。重油専焼ボイラーでは、 O_2 を絞り低 O_2 運転を行うと、 SO_3 の生成量は少なくなるが、一方粉じん量は逆に増加する。

2.5 除じん装置の設備費、運転費、および総費用

一般に各除じん方式について一定ガス量を処理する場合、経済的にそれぞれ最適のガス流速が存在する。これは過大なガス流速を採用すると圧力損失が増大し、動力費がかさむためであり、過少のガス流速をとると装置が大きくなり設備費がかさむためである。一方各除じん方式の性能上の最適の通過ガス流速も存在する。そしてこの経済上と性能上の最適ガス流速は当然ながら一致しないのが普通であるから、両者の要求を勘案して適当な妥協点を見つけるのが選定上の一つの決断である。この関係を概念的に図示したものが、図-6 と図-7 である。従来採用されている各種除じん装置の代表的ガス流速は経験による最適値で、一般に表-5 のような数値をとればよいであろう。

除じん装置の総経費とは前記設備費と動力費(電力代)のほかに人件費、補給部品費および投下資本の利子を加算したものを意味する。図-8 は Lothar H. Engels が作成したもので、処理ガス量 $Q_N = 100,000 \text{ m}^3/\text{Hr} = 1,670 \text{ m}^3/\text{min}$ 、10 年間にわたる総稼動時間を $8,000 \text{ h}$ としたときの単位ガス量 m^3/Hr 当たりの各種除じん装置の総

図-6 除じん装置の所要経費の流速依存性

図-7 除じん装置の性能の流速依存性

表-5 代表的なガス流速 u (m/sec)

除じん装置	ガス流速 u (m/sec)	測定位置
サイクロン	15~25	サイクロン入口
バッグ・フィルター	0.01~0.05	ろ布面
繊維充てん層	1~3	充てん層面
洗浄集じん (一般)	2~30	洗浄主要部
ベンチュリ, スクラバー	60~100	スロート部
電気集じん	2~3	電極間

費 DM (ドイツマルク)/ m^3/Hr を除じん率または通過率に対してプロットしたものである。ここに電力代は 0.06 DM/kWh, 水道料金 0.4 DM/ m^3 , 労賃 12 DM/k, および資金利子は 5% としたものである。

これについて見ると, たとえば除じん率を同じくする ($\eta=99.5\%$) 装置を考えると, 処理ガス量 $1 \text{ m}^3/\text{Hr}$ 当たりの総費用は, バッグ・フィルターが 14DM, ベンチュリスクラバーが 18DM, 湿式電気除じん装置は 23DM となる。すなわち湿式電気力除じん方式の総経費はバッグ・フィルターによるろ過除じん方式のその 1.64 倍

図-8 処理ガス量, $Q_N=1,000,000 \text{ m}^3/\text{h}$, 10 年この運転総時間を 80,000 h としたときの各種型式の除じん率と総経費 (= 設備費 + 運転, 保守および人件費)

近くに達する。しかし処理ガス流量がさらに大きくなり, 円筒形のバッグを使用している限り, この総費用の比較は大分異なったものとなり, 場合によってはその順序が逆転することもあり得る。

3. 各種除じん装置

3.1 除じん装置設計の基礎

一般に除じん装置は形式ごとに最適ガス流速 u (m/sec) が表-5 のように与えられるから, ガス流量 Q を u で割ってその商として装置断面積 $A (=Q/u \text{ m}^2)$ が求まる。 A がきまれば後は従来の経験から装置の設計寸法はきまってくる。処理風量が $Q=300 \text{ m}^3/\text{min}$ の時, ろ過速度 $u=1 \text{ m/min}$ のバッグ・フィルターを使用すればろ布面積 $A=300/1=300 \text{ m}^2$ となり, 通過速度 $u=1.5 \text{ m/sec}$ の電気除じん装置では断面積 $A=300/(60 \times 1.5) \div 3 \text{ m}^2$ となる。

3.2 遠心力分離方式とサイクロン

次記 3 つの主除じん方式と装置の補助的または前置き除じん装置として, 次のような場合になお有効に用いられる。

(1) 粉じん濃度が高すぎるとき

粉じん濃度が数 gr/m^3 以上の場合は採用した方がよい。というのは、ろ過除じんの場合には、払い落としがひんぱんになり、電気力除じんの場合には、荷電が不十分になるからで、主除じん装置の粒子濃度による過負荷を防止するためである。

(2) 異物、火の粉、粗粒液滴などを含むとき。

主除じん装置の摩耗、破損、焼損、閉そく、腐食などを防止するためである。

遠心力分離方式の原理は、図-9 のように、含じん気流を円筒に対して切線方向に導入すると、粒子は気流が旋回運動の間に、その遠心力のために外方に分離されて周壁に沿って落下除じんされる。

接線入口式と軸流案内羽根入口式の2つに大別されるが、前者は圧力損失が大きく除じん効率が高い。後者は処理風量が大きく除じん効率は低い。マルチクロンは小形のサイクロンを複数並列配置し据え付け面積や占有空間を縮小したものであり、これはサイクロンが一般に小形ほど除じん効率が高くかつ圧力損失は変わらないという性質を利用したものである。なお1つのサイクロンの最少直径としては10cm位が限度でそれより小形では製作も面倒で粉じんによる閉そくも起こりやすく実用上好ましくない。一方サイクロンの直径が1m以上になると除じん効率が低くなるのでマルチクロンにすることが望ましい。

サイクロンの除じん効率は入口流速が大きいほど高く

図-9 接線入口式サイクロンの標準設計(寸法比)

なるが、圧力損失が急激に大きくなるので25m/sec位が実用上の上限である一方、粉じんの付着や閉塞を防止するために10m/sec位が下限である。

大体の仕様は次のとおりで、その寸法比は図-9に、設計と運転上の各因子の性能に及ぼす影響は表-6に示してある。入口流速 $u_1=10\sim20\text{m/sec}$ 、圧力損失 $\Delta p=100\sim200\text{mmH}_2\text{O}$ の場合の除じん限界粒子径 D_{pc} は図-10に示してある。

図-10 サイクロンの除じん限界粒子径

表-6 サイクロンの性能に影響を及ぼす因子

因子	性能向上		
	性能向上	圧力損失減少	捕集効率増加
入口風速 u_1	小*	15-25 m/s	
大きさ	ほとんどなし	小形*	
出口管径 d	大*	× 小形*	
円筒部直径 D	小	× 大	
円筒部長さ L	長	適当	
円錐部長さ H	長	やや長く*	
円錐角 $2\arctan(D-d/2H)$	小	20°~30°*	
入口面積 a	小*	ほとんどなし	
粒子真密度 ρ_p	ほとんどなし	大*	
粒子径 D_p	ほとんどなし	大*	
ガス温度 T	高	× 低	
ガス粘度 μ	大	× 小	
内部障害あるいはあらさ	大*	× 小	
集じん室気密	ほとんどなし	吸引式では是非必要*	
入口粉じん濃度 C_i	大*	ほとんどなし	
ガス密度 ρ	小*	ほとんどなし	

注) 1. *印は影響の大きいことを示す。

2. ×印は影響が圧力損失と捕集効率で逆になることを示す。

圧力損失 Δp は次式によって計算できる。

$$\Delta p = \frac{30bh\sqrt{D}}{d^2\sqrt{L+H}} \cdot \frac{\gamma u_i^2}{2g}$$

ただし、 bh は入口面積 (m^2)、 D はサイクロン直径 (m)、 d は出口管径 (m)、 L は円筒部長さ (m)、 H は円錐部長さ (m)、 γ はガス比重量 (kg/m^3) で常温常圧の大気では約 1.2、 g は重力加速度で $9.8 \text{ m}/\text{sec}^2$ 、 u_i は入口流速 (m/sec) である。 $\gamma u_i^2/(2g)$ はガスの動圧で常温常圧の空気では $0.06 u_i^2$ となる。

なおサイクロンは小形ほど同一圧力損失で捕集性能がよくなるので、小形を複数個並列にならべたマルチクロンがしばしば用いられる。最小直径としては 10 cm 位が限度で、それより小形では製作も面倒で粉じんによる閉そくも起こりやすく実用上好ましくない。

常温常圧 $Q=200 \text{ m}^3/\text{min}$ での接線入口式サイクロンを設計する場合、入口流速 $u_i=20 \text{ m}/\text{sec}$ とすれば、入口断面積 $A=Nbh=200/(60 \times 20)=0.17 \text{ m}^2$ となる。図-9

を参照して入口幅 $b=0.2 \text{ m}$ 、入口高さ $h=0.45 \text{ m}$ 、 $N=2$ 個とする。したがってサイクロン直径 $D=1 \text{ m}$ 、出口管径 $d=0.5 \text{ m}$ 、同筒部高さ $L=1 \text{ m}$ 、円錐部高さ 2 m 、集じん室口径 $d'=0.4 \text{ m}$ となる。図-11 は上記寸法のダブルサイクロンの設計図である。粒子密度 $\rho_p=2 \text{ g}/\text{cc}$ とすれば図-10 より分離径は約 $5 \mu\text{m}$ となるから、入口粒径分布において $5 \mu\text{m}$ の篩上重量を求めればそのまま除じん率 η として大体的見当がつけられる。一方圧力損失 Δp は次のようになる。

$$\Delta p = \frac{30 \times 0.2 \times 0.45 \sqrt{1}}{0.5^2 \sqrt{1+2}} \times 0.06 \times 20^2 = 150 \text{ mmH}_2\text{O}$$

3.3 ろ過除じん方式とバッグ・フィルター

ろ材によってろ過する方法であるが、ろ材の目開きは粒子径よりも一般に大きく、粒子の付着橋かけ現象によってろ材上に粒子一次層が堆積形成されてろ過層として作用する場合が多い。局排用の除じん装置として最も推奨できる形式である。

現在実用されている乾式除じん装置の中で一番除じん効率の高い方式で、特に中小規模の工場に適している。処理空気が高湿度が露点に達するような場合は好ましくないが、その場合は保温あるいは加熱をして利用することもある。またろ布が高湿には弱いのでろ布の材質の選定あるいは処理空気の冷却に留意する必要がある。表-7 にはろ布の特性を示してあるが、実際にろ布を選定する場合には処理空気の温度だけではなく成分なども考慮しなければならない。ろ布には織布とフェルトがあって、払い落とし方法によって表-8 のように使いわけられる。一般に材質としてはテトロンまたは、ナイロンが常用され、高温 ($140 \sim 250^\circ\text{C}$) の場合はガラス繊維が使用される。寿命は 1 年以上 3 年程度までが普通の場合である。払い落しを頻繁に行くと除じん効率がその直後吹抜けのため低下するし寿命も短くなる。図-12 は払い落しが除じん効率および圧力損失に与える影響を示す。ろ過速度は遅いほど除じん率が高く、圧力損失は速度に比例して低くなる。

表-9 は、各種因子の性能に及ぼす影響を示す。

3.3.1 振動払い落とし方式

織布円筒状バッグを使用し、円筒内面でろ過し、円筒外面は清浄ガス側である。ろ過速度は遅く、 0.5 (ガラスろ布) から $1.5 \text{ m}/\text{min}$ の範囲で、普通 $1 \text{ m}/\text{min}$ 位にとる。払い落しは良好で付着性ダストでも問題は少ない。一般にろ布上端より毎分 400 回程度で振幅数 cm の振動を与える場合が多く、払い落とし時間は 2~3 分間度よいが、その際除じん気流をダンパーでとめる必要がある。

図-11 ダブルサイクロン設計例 ($200 \text{ m}^3/\text{min}$)

表-7 各種ろ材の特性

特 性 名 称	物 理 特 性				化 学 特 性			備 考	
	総合強度	比重	含水率 (%)	最高連続使用温度 (耐熱性) (°C)	耐酸性	対アルカリ性	有機溶剤	耐摩耗性	そ の 他
木 綿	強	1.55	~7	80	弱	中	安 定	強	安 価
紙	弱	1.5	~10	80	弱	中	安 定	弱	安 価
ナイロン(ポリアミド系)	強	1.14	5	100	中	強	フェノール濃ギ酸	強	払い落とし良好
テトロン(ポリエステル系)	強	1.38	0.4	130	強	中	フェノール	強	利用広し
カネカロン, エクスラン (アクリルニトリル系)	中強	1.2	1	120	強	強	温アセトン	中	
サラン, クレハロン (ビニリデン系)	中	1.7	0	70	強	中	ほぼ安定	強	
バイレン(ポリプロピレン系)	強	0.95	0	100	中	中	ほぼ安定	中	安 価
トヨフロン, テフロン (四フッ化エチレン系)	中	2.3	0	250	強	強	安 定	中	高価, 高温用
ビニロン(酢酸ビニル系)	強	1.3	5	120	中	強	弱	強	安 価
ノ メ ッ ク ス	中	1.38	5	200	中	中	ほぼ安定	中	高温用, 高価
ガ ラ ス	弱	2.5	0	250	中	中	安 定	中	織布は高温用
黒鉛化繊維	弱	~2.0	~10	250	中	強	安 定	弱	高 価

表-8 各種払い落とし方式によるバグフィルターの形式分類

払い落とし方式	ろ 布	平均ろ過速度 (u m/min)	ろ 布 形 状	ろ 過 方 向
振 動 式	織 布	0.5~1.5	円 筒	外 向 き
逆 風 圧 式	織 布	0.5~1.2	{ 円筒または 封 封 }	外 向 き
	またはフェルト	1~2		内 向 き
パルスジェット式	フェルト	2~5	円 筒	内 向 き
脈動逆流式	フェルト	2~5	封 筒	内 向 き

表-9 バグフィルターの性能に影響を及ぼす因子 (ガス流量一定)

因 子	圧力損失減少	除じん効率向上	ろ布寿命向上	設備費低廉
ろ 過 速 度 u	低*	低*	低*	高*
払い落とし作用力	大*	小*	小*	小
払い落とし周期 T	短*	長	長*	(長)
ガ ス 温 度 θ	低	低	低*	低
ガ ス 湿 度 RH	?	高?	低	低
ガ ス 密 度 ρ	影響少ない	影響少ない	影響なし	影響なし
粒 径 RD_p	大*	大*	小	大
入口粉じん濃度 C_i	小*	大	小	(小)
粉 じ ん 密 度 ρ_p	影響少ない	(大)	(小)	影響少ない

注: *印は影響の大きい因子

ろ布の大きさは直径 100~300 mm で長さ数mまで可能である。また、ろ布の上端における張力はろ布の自重程度で小さくする。

図-13 は本形式の一例である。払い落としのための振動によって隣接したバグが互いに接触し摩耗するので、なるべく離して吊下げるとよいが、据え付け面積が大きく

なるから、バグ円筒の半径程度の間隔とする。次に例題で設計手順を説明するが連続的に使用する場合は多室形式とし一室ごとに順次払い落としを行う。

常温常圧で粉じん濃度 $C_i=5\text{g/m}^3$ の含じん空気 $Q=200\text{m}^3/\text{min}$ を処理する場合を考える。

粉じん粒子は特にろ過困難なものでない限り、ろ過速

図-12 バグフィルターの払い落としとろ過効率および圧力損失の関係

図-13 振動払い落とし方式円筒形バグフィルターの例

度 $u=1\text{m/min}$ とする。したがって

$$\text{ろ布面積 } A = Q/u = 200/1 = 200\text{m}^2$$

バグ1本を直径200mm, 長さ5mとすると, その表面積 $a = 0.2\pi \times 5 = 3.14\text{m}^2$ となる。したがってバグの必要本数 N は $A/a = 200/3.14 = 64$ 本となる。

払い落としを考慮して4室に分割すると, 1室20本とすれば十分である。1室のバグが払い落とし中の場合は3室60本で除じんし, 全室除じん中は4室80本になるので, 平均ろ過速度は $u = 200/3.14 \times 80 = 0.80\text{m/min}$ となる。実際には払い落とし直後の室は抵抗が少ないためこの2倍以上のろ過速度となるし, 払い落とし直前の室は半分以下のろ過速度となる。

さてろ布上の堆積粉じん量と圧力損失の関係は現場実験で測定すべきであるが, 一応払い落とし後の最高2次堆積粉じん量(粉じん負荷ともいう)を 200g/m^2 とすると, ろ過速度は平均を用いて, 除じん期間は次式で求まる。

$$T_1 = 200/(C_i u) = 200/(5 \times 1) = 40\text{min}$$

したがって払い落とし期間を最大5minとして, 払い落とし周期 $T = T_1 + 5 = 40 + 5 = 45\text{min}$ となり, 4室の払い落

図-14 4室払い落としスケジュールの例
(除じん40分, 払い落とし5分)

しスケジュールは図-14 のとおりとなる。

実際の払い落としはこのように時間プログラムによる場合と, 最高制限圧力損失になったら払い落としを実施する差圧による場合とがある。

3.3.2 逆風圧払い落とし形式

除じん気流をしゃ断して逆気流を導入し, その抵抗力により, 堆積粉じん層を払い落とす方法である。円筒バグでは一般に外向きろ過であるから, 逆気流は内向きに流れ円筒が圧かい(コラプス)するので, 内側に堆積した粉じん層が脱落する。しかし, 長いの布の場合全体が圧かいすると上方の粉じんは円筒内部を下方に落下できなくなるし, 下方は, 張力が弱いために先に圧かいするので上方まで逆気流を吸引することができなくなるおそれもある。これらの不都合を防止するために約1~2m間隔で中間リング(リティナー)を円筒に取り付けるとともに, 上端におけるつり上げ張力をろ布と全堆積粉じん層の合計重量以上にとり, ろ布の損傷は少ないのでガラス製のろ布も使用することができ現在の大容量用のバグフィルターは本方式をとっているものが多い。図-15 にそ

図-15 逆風圧払い落とし方式封筒形バグフィルターの例

の構造の一例を示すが、気流切換用に一室毎にダンパー弁を2個必要とする。多くは織布が利用されるが、払い落とし容易な粉じんに対してはフェルトが利用されることもある。なお、封筒状ろ布における払い落としもほとんど本方式で行われ、払い落とし困難な粉じんの場合は逆気流に回転弁などで脈動を与える形式も開発されている。なお封筒状ろ布では内向きろ過で、ろ布は内部に支持枠をもち、払い落としは外向き逆風によるが、特徴は装置がコンパクトにまとまっていることである。

3.3.3 パルス・ジェット払い落とし方式

近年発達した圧縮空気を逆流させてごく短時間吹込む方法で、払い落とし作用が強力なためほとんどすべての種類の粉じんに対してもフェルトが使用でき、ろ過速度を従来の払い落とし方式の2~3倍にとることができる。したがってろ過面積が半分以下となり、装置が小形となるため、圧縮空気系統の費用を考慮してもなお利用価値がある。封筒状ろ布にも若干使われ始めたが、主として円筒状ろ布で支持枠がついており、内向きろ過で払い落としジェット気流が外向きであるのが一般的である。さらに除じん操作中であってもパルスジェットにより払い落としが可能であるため、多室構造としなくても一室で連続ろ過が可能である。本方式では0.1秒以下のパルスジェットを発生させるための特殊電磁弁やジェットノズルについてやや精密な工作をしなければならず、設計、施工には専門的な知識技術を必要とする。図-16にその構造例を示す。

図-16 パルスジェット払い落とし方式 バッグフィルター例

3.4 電気力分離方式と電気除じん装置

電気除じん装置にはいくつかの方式と、大小いろいろな容量のものがあるが、いずれも粉じんあるいはミストなどの微粒子を帯電させ、それを電極板に付着させて捕集することを原理にしている。これはF. G. Cottrell(米)の発明によるもので、1907年にはじめて工業的に成功した。発明者の名前をとってコットレルあるいはElectric Precipitatorを略してE. P. と呼ぶことが多い。

近年、電気機器の改良進歩とともに、いろいろな形式のものが開発され、一般産業のミストや粉じん捕集用の中小容量から、焼却炉・セメントキルン・窯業・火力発電所などの粉じん捕集用の大容量のものまで、広い分野にわたって用いられている。

3.4.1 特徴

電気除じん装置には用途に応じていくつかの方式があるが、他の方式に比べて一般的に次のような特徴がある。

(長 所)

- (1) きわめて微細な粉じんやミストをきわめて高い効率で捕集することができる。
- (2) 噴霧水洗、薬液噴射などによって性能を高めたり、有害ガスも同時に処理することができる。
- (3) 約350°Cまでの含じん空気流を扱うことができる。
- (4) 圧力損失が小さく、一般に10~30 mmH₂O程度である。
- (5) 運転維持費が少なくすむ。
- (6) 大容量の設備に適する。

(短 所)

- (1) 粉じんの電氣的性質によって除じん効率が左右される。
- (2) 電氣的性質が不適切な粉じんに対しては、温度、湿度調節などの前処理が必要である。
- (3) 可燃性粉じんに対しては原則として適用できない。
- (4) 可燃性の気体をともなう場合は、前段で燃焼させるか爆発下限界以下の濃度にななければならない。
- (5) 他の方式に比べて設備費が高く特に小容量のものは割高になる。

3.4.2 種類

捕集の対象とする微粒子に荷電を与える方式から分類すると図-17に示すように1段式と2段式とがある。

- (1) 1段式：微粒子に負の電荷を与える荷電部と、荷電された微粒子を電極板に付着させる捕集部とを同一電界内に設置した方式である。この方式は高い電圧を用

図-17 電気式除じん装置の荷電形式

図-18 アラバマ発電会社 Gorgas 発電所における電気除じん装置の粉じん粒子の大きさに対する部分除じん効率

いて強力なコロナ放電をさせることができるので効果的であり、含有粉じん量が多い場合や処理空気量が多い場合にも適用することができる。普通、電気除じん装置、コットレル、あるいは E.P. と呼ばれているのはこの方式のもので、図-18 に示すように、微細な粉じんに対してもすぐれた除じん効率を持っている。

(2) 2 段式: 荷電部と捕集部とに分かれており正コロナを利用して微粒子に正の電荷を与え、これを電氣的に負の電極板に捕集する形式である。正コロナは火花放電の状態に移行しやすいので、電圧の大きさが 1 段式に比べてはるかに低い値に制限される。このため用途は含有粉じん量が少なく、処理風量が小さい場合に限られ換気清浄用エアークリーナなどに用いられている。

電極板に付着した粉じんを払い落とす方式から電気除

じん装置を分類すると、槌の機械的衝撃力により払い落とす乾式と、水で洗い流す湿式とがある。

これらの方式のうち代表的なものの本体内部の構造と選択・計画上の要点を表-10 に示す。

3.4.3 原理

最も一般的な 1 段式電気除じん装置について説明する。図-19 に示すように、放電線を負極、電極板を正極として、この間に約 3 万～4 万 5 千ボルトの直流電気によってコロナ放電をする。この放電によって放電線のまわりの空気は正 (+) と負 (-) のイオンに電離される。+ のイオンはただちに負の放電線に吸収されて電荷を失なうが、- のイオンは正極の電極板に向かって流れる。その途中に粉じんあるいはミスト粒子があるとそれに衝突して電荷を与え、負に帯電させる。負に帯電した粒子はクーロン (Coulomb) の力で電極板に引かれて移動し、電氣的に付着して捕集される。

直径 d_s の粒子が帯電量 q を持ち、電界の強さ E の場にあるとき、空気の粘性係数を μ とすると、この粒子が電極板に引かれて移動する速度 u_s は次式で表わされる。

$$u_s = \frac{qE}{6\pi d_s \mu}$$

一例として、真比重量 $2,620 \text{ kg/m}^3$ のいろいろな大きさの粒子について、温度 20°C の標準大気中におけるブラウン (Brown) 運動速度 u_b および重力による落下の終末速度 u_t と、電界の強さ 2.5 KV/cm の場合の移動速度の計算例を比較すると表-11 のとおりである。この表から微細な粉じんに対しては、帯電による移動速度は他の速度よりもはるかに大きく、そのため粒子の捕集に効果的であることがわかる。

なお、実際の装置では、イオンの運動によって放電極から電極板に向かってイオン風と呼ばれる気流が生ずる。この風速は約 $0.5 \sim 1.0 \text{ m/sec}$ に達し、微粒子の帯電による移動速度よりも大きく、粒子の除じん効果を助長して

図-19 電気式除じん装置の原理

表-10 電気除じん装置の代表的な形式

名 称 形式	別名	形 状	選 択・計 画 上 の 要 点
乾式 コット レル	乾 式 E P		<ol style="list-style-type: none"> 1. 放電極(負)と電極板(正)との間のコロナ放電によってガスを電離させ、負イオンを粉じんに衝突させる。このため、粉じんは負に帯電し、電氣的に電極板に引かれ捕集される。 2. 電極板に付着した粉じんを周期的に槌(つち)打ちによって払落す。 3. 粉じんの電氣的特性によって適用範囲が制約され、固有抵抗が$10^4 \sim 10^{11} \Omega \text{cm}$の場合に適する。 4. 前段で水あるいはアンモニアなどの薬品を露点に達しない範囲で噴射することによって、温度低下、固有抵抗の調節、酸・アルカリ性の中和を行うことができる。 5. 設備費がややかさむが、運転維持費が安く、大風量の場合に適する。
2 段 荷 電 形	2 段 E P		<ol style="list-style-type: none"> 1. 放電極を正、電極板を負として、1万ボルト前後の低電圧で放電する。 2. 粉じんは電極板間を通過するとき正に荷電され、接地電極間および中間電極板に引付けられ付着する。 3. 付着した粉じんが一定量になると空気流によって離れ、後段のロールフィルターによって捕集される。 4. 一式を箱形ケースに収納した構造とし、すえ付け、運転取扱いを簡易にしたものが多い。 5. 室内空気清浄、無菌室用などに適する。
湿 式 コット レル	湿 式 E P		<ol style="list-style-type: none"> 1. 鉛直円筒形の電極を用い、これに上から水を流し水膜をつくる。 2. 捕集された粉じんは水で洗い流されるので、捕集された粉じんによる逆放電、再飛散などのトラブルがなく、性能が安定して捕集効率が高い。 3. 粉じんの電氣的特性にかかわらず用いることができ利用十圍が広い。 4. ガス、粉じんは水分を含んでも差しつかえないので、十分な薬液処理ができる。 5. 粉じんのほか硫酸ミスト、タールミストなどの捕集も可能である。

いる。

また実際上は、粉じんの種類によっても移動速度が異なることが経験されていて、図-20 にその測定値の例を示す。

3.4.4 除じん率

電気除じん装置内で負に帯電した粉じん粒子は、理論的にはクーロンの力で電極板に引かれるが、実際には必ずしもすべての粒子が電極板に捕集されるとは限らない。すなわち、粒子相互の干渉、ガス成分と速度の不均一、電極板に堆積している粉じん量と形などの影響を受ける。それらの作用の程度を理論的に計算しても除じん

効率を的確に知ることができないので、普通は実用的に次のように除じん効率を計算している。

長さ L の平行な電極板の間に粉じんを含む気流が流速 u_a で流れるとする。流れの方向の単位長さ当たりの電極板面積を a 、流路の断面積を A 、粒子の電極板への移動速度を u_s 、粉じん濃度を入口で C_i 、出口で C_e とし、 $Aua=Q$ (流量)、 $aL=S$ (電極板の面積)、 $S/Q=f$ とすると、除じん効率 η は次式で表わされる。

$$\eta = 1 - (C_e/C_i) = 1 - \exp(-fu_s) \quad (3.2)$$

この式は、電極板への粒子の移動速度 u_s および f の値が大きいかほど除じん効率が大きくなることを示してい

表-11 粒子の移動速度の比較

粒子径 d_s [μm]	Brown 運 動速度 u_b [cm/sec]	重力落下終 末速度 u_t [cm/sec]	帯電による 移動速度 u_s [cm/sec]	(u_s/u_t)
0.1	0.0028	0.00008	2.8	35,000
0.2	0.0016	0.00032	2.8	8,700
1	0.00058	0.008	2.94	370
2	0.00039	0.032	5.88	183
10	0.00017	0.80	29.40	32.6
20		3.20	58.80	18.6
40		13.20	117.60	8.9

図-20 粉じん粒子の粒子径と帯電による粒子の移動速度との関係

図-21 比捕集面積と除じん効率の関係

る。このため f (sec/m) の値は性能を左右する重要な因子で比捕集面積と呼ばれている。

なお (3.2) 式を書き直すと

$$f = \frac{S}{Q} = \frac{1}{u_s} \ln \frac{1}{1-\eta} = \frac{2.30}{u_s} \log_{10} \frac{1}{1-\eta} \quad (3.3)$$

と書くことができ、この式から与えられた粉じんの種類と風量および所定の除じん効率に対して必要とする電極

図-22 電極板の寸法

板の面積 S を求めることができる。図-21 はこの関係を描いたものである。

3.4.5 本体の寸法

除じん装置本体を図-22 のように考え、長さ L 、高さ H の電極板が間隔 B_1 で数列平行に立てられていて、全体の幅を B とし、これに速度 u_a で含じん気流が流されるとする。

通路の数を n とすると $Q = Au_a$ (流量), $A = BH = nB_1H$ (流路の断面積) であり、

$$u_a = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{nB_1H} \quad (3.4)$$

また電極板の粉じん捕集面積 S は

$$S = 2nLH \quad (3.5)$$

と書くことができる。これらの関係を用いると式 (3.3) で定義した比捕集面積 f は

$$f = \frac{2nL}{u_a B} = \frac{2L}{u_a B_1} \quad (3.6)$$

で表わされる。

3.5 洗浄除じん方式とスクラバ

スクラバは湿式除じん装置、洗浄除じん装置とも呼ばれている。液体（多くの場合は水または水に適当な添加物を加えたもの）を捕集媒体にした除じん装置である。液滴、液膜（液にぬれた壁）に粉じんを付着させて捕集するか、含じん空気を液中にくぐらせることによって清浄化する方式である。微細な粉じん粒子に対する主要な捕集機構は、液滴による粒子捕捉であると考えられる。

スクラバは、固体粒子だけではなく、ミストやフェーム、またはこれらが混在しているような場合にも適用できる。また、スクラバは一種の気液接触装置であるから、除じんと同時に有害ガス成分の吸収除去、酸性ガス成分やアルカリ性ガス成分の化学的中和などを行うことができる。

スクラバは湿式除じん装置であるから給水装置を必要

表-12 スクラバの形式

イン ピン ジャ ー		<ol style="list-style-type: none"> 1. 環状のスリットから約 10 m/sec の速度で液面に吹付ける。 2. 圧力損失 150~400 mm Aq 水ガス比 0.1~0.3 l/m³ 	噴 霧 塔		<ol style="list-style-type: none"> 1. 数段の噴口から水を噴射する。 2. 水の噴射は気流と並行にするものと逆方向にするものがある。 3. 上段にエリミネータを設ける。 4. 噴射口がつまりやすいので特別な工夫を要する。 5. 他の除じんあるいは吸集装置の前段に設け、増湿、冷却、ブレダスターとして用いる。 6. 圧力損失 2~20 mm Aq 空塔速度 0.2~1.0 m/sec 水ガス比 0.2~1.5 l/m³
充 て る		<ol style="list-style-type: none"> 1. 本体内に表面積の大きい固体を数多く充てんし、ガス・粉じんと水との接触効果を大きくしている。 2. 接触効率がよいので、硫酸工場の液ガス吸収装置にも使用。 3. 空塔速度 0.3~1.0 m/sec 圧力損失 50~200 mm Aq 水ガス比 0.5~2.0 l/m³ 4. ガス量多い場合は不利 	ビー ボ デ イ ス ク ラ バ		<ol style="list-style-type: none"> 1. 数段の多孔板を設け、上段から水を流す。 2. 粉じんを含んだ気流は多孔板を通るとき気流はうたがえられて粉じんは落下し、除じんとガス吸収の効果が助長される。 3. 構造が簡単で過負荷に耐え、性能もよい。 4. 硫酸工業では焼炉ガスの除じんとガス処理に用いられる。 5. 空塔速度 2 m/sec 圧力損失 150~200 mm Aq 水ガス比 2~4 l/m³
人 塔		<ol style="list-style-type: none"> 1. 多孔板上にガラス球を充てんし、接触面積を多くしている。 2. 水は中間段で下向きに噴霧し、上側の充てん層は飛まつのエリミネータを兼ねる。 3. 粉じんの捕集とガス処理を効果的に行うことができる。 4. 洗い落された粉じんはスラッジコンベヤでかきあげる。 5. 中小容量のろ徐じん、鋳物工場除じんに適する。 6. 圧力損失 50~200 mm Aq 水ガス比 0.5~1.0 l/m³ 	ロー ト ク ロ ン		<ol style="list-style-type: none"> 1. 粉じんを含んだガスを案内板の間に通し、ここで水とカクハンされるようにしてある。 2. 微細な粉じんに対しては除じん効率が高い。 3. 中小容量の集じんとガス処理に適する。 4. 水は捕集した粉じんの排出、かきあげに伴われる量を補給するだけでよい。 <p>圧力損失 150~200 mm Aq 水ガス比 0.05~0.3 l/m³</p>
も れ だ な 式		<ol style="list-style-type: none"> 1. 開口比15~30%の多孔板のたなを設け、水を上の段から順次下の段に降らす。 2. 除じんと同時にガスの吸収効果が大きく、排ガスの SO₂ 処理に適する。 3. 1 基 10³ m³/min 程度の処理空気量まで可能。 4. 圧力損失 20~40 mm Aq 水ガス比 2~3 l/m³ 	エ ア タ ン プ ラ ー		<ol style="list-style-type: none"> 1. 下部に水をためた渦巻室に粉じんを含んだガスを切線方向から導入し、水を数回かき上げさせる。 2. 水滴に付着した粉じんは遠心力によって壁面に分離され洗い落される。 3. 比較的粗い粒子に対して効果的で、サンドブラストの粉じん捕集などに適する。 4. 圧力損失 100~150 mm Aq 水ガス比 0.05~0.3 l/m³

遠心排風機で中心より噴霧し、回転羽根の代わりに多数の棒状羽根があって、その間に固定棒が存在する。この装置自身圧力を発生するので排風機は不要

ベンチュリ・スクラバ

- ダクトの断面積を狭め、40~100 m/sec の風速にし、水を噴射する。
- 水の拡散がよく、粉じんを効果的に水滴に付着させる。
- 粉じんを捕そくした水滴は落下させるか、サイクロンで捕集する。
- ガス吸収性も良好である。
- 圧力損失
30~1200 mm Aq
水ガス比
0.3~2.0 l/m³

表-13 代表的スクラバの特性 (目安)
(含水量とガス量との比、真の水ガス比はもっと大きい)

	充てん塔	ロータスクロン	ベンチュリ・スクラバ
分離径 (μm) $\rho_p=2.6$	1.0以上	0.4~1	0.1~0.4
ガス流速 (m/s)	1以下	25~40	40~100
圧力損失 (mmH ₂ O)	50~200	150~200	300~800
水ガス比 (l- ¹ /m ³ -ガス)	0.5~2	0.05~1	0.3~1.5
ガス動力 ($\frac{\text{kWh}}{1,000\text{m}^3}$)	0.1~1	1~1.2	2~5
水動力 ($\frac{\text{kWh}}{1,000\text{m}^3}$)	0.01~1	—	0.1~2

とすることはもちろんであるが、スクラバ自体は単に空気中の粉じんを水中に移しかえるだけであって、捕集された粉じんや吸収された有害ガス成分は水とともに排出されてくる。したがって、スクラバの設置にあたっては固液分離などの排水処理装置についてよく検討しておくなければならない。

スクラバは、乾式の除じん装置にくらべて腐食が激しい。装置内の水にはガス中の酸成分やアルカリ成分などが吸収され、捕集された粉じん中の可溶成分も溶出してくる。これらを考慮して装置材料を選定しなければならない。液面の近くなどで、局所的な腐食が進行する場合も多いので注意しなければならない。

表-12 に示したように、スクラバには数多くの形式がある。表-13 には、代表的なスクラバの特性を示した。

タイゼン・ワッシャと、ベンチュリ・スクラバを除けば、スクラバの圧力損失は一般に 100~200 mmH₂O 程度であり、除じん限界粒子径は 1 μm 程度である。したが

って、3.1 に述べられている重力沈降室や慣性除じん装置、3.2 に述べられているサイクロンよりも除じん性能は高い。冷却やガス吸収をかねた前処理装置、前置き除じん装置としては効果的である。

タイゼン・ワッシャは、除じん装置自体が遠心排風機をかねているので、100~400 mmH₂O 程度の風圧を発生し、設備面積は少なく済む。サブミクロン粒子までも洗浄して 99% 以上の高い除じん効率を得られるといわれているが、ワッシャの後に水滴分離装置を必要とするし、動力費も大きい。

スクラバでもっとも高い性能を有する形式は、ベンチュリ・スクラバである。適切な設計と適正な運転条件のもとでは、電気除じん装置に匹敵する除じん性能が得られるといわれている。圧力損失は 200~800 mmH₂O、水ガス比は 0.3~1 l/m³ 程度のものが多いようであるが、高い除じん率を得るためには、圧力損失を 400 mmH₂O 以上に、水ガス比も 1 l/m³ 以上にすることがある。図-23 は、ベンチュリ・スクラバの圧力損失と、除じん限界粒子径との関係を示す目安である。この図からわかるように、1 μm 程度までの粉じんを捕集するのであれば 300 mmH₂O 程度の圧力損失でよい。しかし、サブミクロン粒子まで捕集する高性能ベンチュリ・スクラバでは、ベンチュリのスロートを細くして気流速度を高くしなければならないので、圧力損失は 1,000 mmH₂O 以上になる。

ベンチュリ・スクラバの圧力損失は、ベンチュリの形状や仕上げ具合にも影響されるが、およその値は、スロート部のガス流速と水ガス比とから計算することができ

図-23 ベンチュリースクラバの圧力損失と除じん限界粒子径の関係 (目安)

る。標準的形状のベンチュリースクラバの圧力損失は、

$$\Delta P = (a + bL) r_g u_t^2 / (2g) \quad (1)$$

となる。ここに、 ΔP は mmH₂O であらわした圧力損失、 L は l/m³ であらわした水ガス比、 r_g は kg/m³ であらわしたガスの比重、 u_t は m/s で、あらわしたスロートのガス流速、 g は重力の加速度で 9.8 m/s² である。(1)式の右辺にある係数 a 、 b の値は、ベンチュリの形状や仕上げの程度によって変化するが、ミストセパレーターの圧力損失を含めて、目安としては、 $a=b=1.0$ としてよいであろう。すなわち、

$$\Delta P = (1.0 + L) r_g u_t^2 / (2g) \quad (2)$$

となる。(2)式を変形すると、

$$u_t = \{2g\Delta P / (1.0 + L) r_g\}^{1/2} \quad (3)$$

すなわち、除じん率の立場から図-23などを参考にして ΔP や L の値を設定すると、(3)式によってベンチュリースクラバのスロート部におけるガス流速 u_t を計算することができる。

処理ガスを Q (m³/min) とすると、スロート部の断面積 A_t (m²) は、

$$A_t = Q / (60 u_t) \quad (4)$$

として求めることができる。スロート断面形状は長方形が多いが、小型の場合には円形もある。

〔例〕 常温常圧の空気を 300 m³/min 処理する高性能ベンチュリースクラバのスロート部の断面積を求めてみよう。

高い除じん率を得たいので、 $\Delta P=500$ mmH₂O、水ガス比 $L=1$ l/m³ に設定する。常温常圧空気の比重 $r_g=1.2$ kg/m³、処理ガス量 $Q=300$ m³/min である。

まず、(3)式に数値を代入してスロート部のガス流速 u_t を求める。

$$u_t = \left[\frac{(2)(9.8)(500)}{\{1.0 + 1.0\}(1.2)} \right]^{1/2} = (4083)^{1/2} = 64.0 \text{ (m/s)}$$

次に、(4)式に $Q=300$ m³/min、 $u_t=64.0$ m/s を代入してスロート部の断面積 A_t を求める。

$$A_t = (300) / \{(60)(64.0)\} = 0.078 \text{ (m}^2\text{)}$$

断面を円形とすると 0.107 スロート部の直径 D_t は、

$$D_t = \left\{ \frac{0.078}{(3.14)/4} \right\}^{1/2} = 0.32 \text{ (m)}$$

参考文献

- 1) 井伊谷：集塵技術マニュアル，日刊工業新聞社 (1972)
- 2) 大気汚染研究全国協議会編：大気汚染ハンドブック (2) 除じん装置編，コロナ社 (1976)
- 3) U. S. Dept. of Health, Education & Welfare : Control Techniques for Particulate Air Pollutants, Public Health Service, AP-51 (1961)
- 4) U. S. Environmental Protection Agency : Air Pollution Engineering Manual, AP-40 (1973)
- 5) 井伊谷：集塵装置，日刊工業新聞社 (1965)
- 6) 通商省公害保安局：公害防止の技術と法規 (大気編) (1972)
- 7) 労働省衛生課，作業環境改善室：局所排気装置の標準設計法等に関する専門部会，第2分科会資料，(1977~1979)
- 8) Amer. Ind. Hyg. Asso. : Air Pollution Manual, Part (1958)
- 9) Faith W. L.: Air Pollution Control, John Wiley (1959)