

# 第1章 大気汚染

## 第1節 大気汚染の概況

### 1 概 要

大気汚染物質として、硫黄酸化物、窒素酸化物、浮遊粒子状物質、一酸化炭素、光化学オキシダントなどがあるが、近年P C B、フロン、二酸化炭素なども問題視されている。これらの物質が多量に発生する主原因は、人口増加、生活水準や生活意識の急変、産業、技術の発達などに伴うエネルギー、食料、鉱工業製品等の大量消費と新材料や新製品の開発である。

大気の定常主成分は、窒素、酸素、二酸化炭素（炭酸ガス）、アルゴンなどで、そのほか微量の水素、ネオンなどが含まれる（表5.1参照）。大気中に、火山の噴火などの自然現象や人間の生活活動によって生じた物質が持込まれ、今まで含まれなかった物質の生成や、特定物質の通常比率以上の増加が起こる。このような状態を「汚染」といい、その物質を汚染物質という。

大気中の汚染が拡大し、人間の健康や生活環境に影響を与える状態を「大気汚染による公害」という。ただし、火山噴煙等の自然現象に伴う排気物汚染は、法的には公害としない。また、鉱業の生産活動等に伴って汚染物質が発生した場合を「鉱害」という。

表5.1 乾燥空気<sup>注)</sup>の定常主要成分

成 分 名	記 号	容積比 [%]	重量比 [%]
窒 素	N <sub>2</sub>	78.10	75.51
酸 素	O <sub>2</sub>	20.93	23.01
アルゴン	A r	0.9325	1.286
二酸化炭素	C O <sub>2</sub>	0.03	0.04
ネ オ ン	N e	0.0018	0.0012
ヘリウム	H e	0.0005	0.00007
クリプトン	K r	0.0001	0.0003
クセノン	X e	0.000009	0.00004

注) 乾燥空気：水蒸気を除いた空気

### 2 鉱山、製錬所における大気汚染の特色

有史以前の古い時代には、天然に金属の状態で産出した金、銀、銅などが使われていた。その後、装飾品、貨幣、工具などの需要が増し、天然金属が不足を来したために、不純物の多い鉱石から製錬によって金属を採取するようになった。銅、鉛、亜鉛などの鉱石は硫化物が主体であるので、化合している硫黄を除去しなければならない。このため近代の製錬技術では、銅は鉱石を硫化物のまま熔融濃縮した後、更に硫黄を燃焼させる方式、鉛・亜鉛は鉱石中の硫黄を燃焼させ、一度酸化物の形に変えて製錬する方式が中心になっている。

製錬設備が大規模になるに従って、まず農作物の被害が大きくなり、その解決を迫られた。わが国の非鉄金属製錬の歴史を振り返ると、煙害問題の解決が重要な課題であったことが分かる。

1893年、別子銅山の銅鉱の焙焼・製錬工程から発生した硫黄酸化物が、周辺の農作物に大きな被害

を与える事件が発生した。製錬設備が拡張され、処理鉱量が増加したことが直接原因であった。この対策として、1895年、製錬設備を陸地より引き離し、洋上の無人島に移転した（四阪島製錬所）。当時の銅山年間収入100余万元に対し、この計画実行に80万円を要したといわれている。

日立鉱山では、鉱山の隆盛とともに、1912年には煙害地域が4町24村に及び、周辺の農業、林業に大きな被害を与えた。このため、1914年、当時世界一を誇った155m高さの煙突を標高207.5mの山頂に建設し、高煙突からの廃煙拡散による二酸化硫黄ガスの希釈を計った。一方、緑化工事では、やしやぶし、大島桜、黒松、あかしやなどの植栽を積極的に進めた。

このほか、瀬戸内海の直島、契島両製錬所、佐賀関半島先端の佐賀関製錬所などは、いずれも廃煙による大気汚染を考慮して遠隔地に建設された。

一般に、非鉄金属製錬の廃ガスは、次のような特色をもっている。

- ① 操業工程の変化によって、ガス量、および濃度が変動しやすい。
- ② 経済的に硫酸を製造することが難しい低濃度の二酸化硫黄が発生することが多い。
- ③ 廃ガス中に多量のダスト類を含有している。
- ④ 焙焼工程より発生する微量の炭化水素によって、製造された硫酸が着色することがある。

最近の二酸化硫黄廃ガス処理は、そのほとんどが硫酸、石こうなどの形で回収する方式を採用している。なお、排煙中のばいじんには、カドミウム、鉛、ヒ素などの重金属類を含んでいることが多く、これらの完全回収は大気汚染防止上のみでなく、土壤汚染防止上からも極めて重要である。

### 3 汚染物質別大気汚染の状況

#### (1) 硫黄酸化物

硫黄酸化物は代表的な大気汚染物質であり、主体は二酸化硫黄（ $\text{SO}_2$ 亜硫酸ガス）と三酸化硫黄（ $\text{SO}_3$ 無水硫酸）であるが、最近では硫酸ミスト等による汚染も発生している。硫黄酸化物の発生は、石炭、石油など硫黄を含む化石燃料の燃焼や、硫化鉱などの製錬に伴うことが多い。

硫黄酸化物のうち二酸化硫黄が事物に与える影響が最も大きいため、汚染度は二酸化硫黄測定値で判定する。大気中の二酸化硫黄濃度測定は、主要都市および工業地帯に国が設置した測定局や、地方自治体が管理する測定局で実施されている。環境庁の報告では、1966～67年度をピークに減少の傾向を示し、1967年度の平均値  $0.059 \text{ ppm}$  が、1997年度には  $0.009 \text{ ppm}$  に激減した。

このような改善は、硫黄酸化物に対する排出規制や総量規制の強化に伴う、低硫黄重油の積極的使用、重油低硫黄化および排煙脱硫技術の進歩などによるものである。なお、重油の低硫黄化は重油直接脱硫法の採用による。その主流技術は水素化脱硫法であり、触媒を用いて化合物から硫黄を切り離して水素と置換し、硫黄それ自身は、水素と化合させ硫化水素として除去する。

#### (2) 窒素酸化物

窒素酸化物は、一酸化窒素（ $\text{NO}$ ）および二酸化窒素（ $\text{NO}_2$ ）の総称で、物質の燃焼に伴い発生する。大気中の窒素が酸化された場合と燃焼中の窒素が酸化された場合とがある。一般には

燃焼条件によってその発生量は大きく変化し、燃焼温度が高いほどまた燃焼時間が長いほど多く燃料消費量と生成熱エネルギー量にほぼ比例する。

主な発生源は自動車の排ガスであり、自動車排ガス測定局の測定値が0.06 ppmを超えた地点は、いずれも自動車排ガスの多い大都市に所在する。

### (3) 浮遊粉じんと浮遊粒子状物質（エアロゾル）

大気中に浮遊する粉じんの総称が浮遊粉じんであり、また、浮遊粉じんのうちその粒子径が $10\mu\text{m}$ 以下の物質を総称して浮遊粒子状物質SPM: Suspended Particulate Matter（エアロゾル: Aerosol）という。SPMには次のような物質がある。

- ・粉じん 工学的には固体微粒子の総称で、物の破碎、選別、たい積、運搬などによって発生する。ダスト（Dust）ともいう。
- ・ヒューム（Fume） 固体から発生した蒸気が大気中で再度固化して微粒子となったもの。金属の溶解に際して、液融面から発生する金属ヒュームは代表的な例である。
- ・スモーク（煙, Smoke） 不完全燃焼から生じ、主として可燃物および灰分などの微粒子が燃焼ガス中に混在浮遊した状態のものをいい、通常「色」を有する。
- ・ミスト（Mist） 常温常圧のもとで液体の微粒子。液滴ともいう。

なお、ばい煙（鉍煙）は物の燃焼、合成、分解などに伴い発生し、その中に含まれるすすなどのダストやヒュームなどの固体微粒子がばいじんである。微小粒子状物質PM<sub>2.5</sub>とは、大気中に浮遊している50%粒度 $2.5\mu$ の粒子を指し、SPMよりも小さい。

### (4) 一酸化炭素

一酸化炭素は物の不完全燃焼によって発生するが、主な大気汚染発生源は自動車である。工場排煙中の一酸化炭素が問題になることはほとんどない。

### (5) 光化学オキシダント

大気中で二酸化窒素と炭化水素が共存し、これに太陽光が作用して光化学反応を起こして生成される酸化性物質の総称である。（オゾン、パーオキシン・アセテル・ナイトレート（PAN）とその同族体を含み、光化学反応で生成される二酸化窒素は除く）。主成分はオゾンであり、オキシダント量の測定はオゾン濃度に基づく。ただし、通常大気中には0.05 ppm程度のオゾンが存在している。

液体燃料の精製、流通、および貯蔵時、有機溶剤類の揮発、物の不完全燃焼時などに炭化水素が発生するが、自動車等の排気ガス成分として大気中に放出される場合には、汚染が広範囲に及ぶこともあり、特に光化学オキシダントの広域発生に関連するものとして注目する必要がある。

## 4 フロンおよび酸性雨問題

### (1) フロン

フロンの正式名称は、クロロフルオロカーボン（CFC）で、冷媒、噴射剤、発泡剤および洗浄剤として大量に使用されてきた。しかし、1974年米国のローランド教授らがフロン類によるオゾン層の

破壊の可能性について指摘し、1987年には「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」が採択され、国際的に生産等が規制された。大気オゾン層破壊に関与する特定フロンは15種類を数える。大気中フロン11の濃度は、1988年には270 p p tに達したが、最近はほとんど止まっている。

## (2) 酸性雨

当初、雨水に二酸化硫黄や二酸化炭素等が十分に溶けて平衡状態に達すると、p H5.6と成ることから、「p H5.6以下の雨を酸性雨」と定義したが、米国「全国酸性雨降下調査計画」報告書では「自然条件を考慮してp H5.0を大気の清浄な場所での雨水のp Hとし、これ以下を酸性雨」と定義した。現在では、雨などの湿性降下物のほか、大気中の浮遊粒子状物質を吸着して降下する乾性降下物を含めた降下物を、広義に酸性雨と呼んでいる。

酸性雨は、欧州諸国、北米等において森林の枯死、湖沼の魚の死滅など様々な形で生態系に影響を与えている。我が国では、欧州諸国、北米等に比べて生態系に対する影響は顕著化していないが、1993年～1995年の環境庁の調査結果報告では、p H4.8～4.9の欧州並の酸性物質を含む雨が全国的に観測されている。

## 5 アスベスト（石綿）問題

アスベスト（石綿）は、ILO（国際労働機関）では、『岩石形成鉱物の蛇紋岩および角閃石グループに属する繊維状の無機けい酸塩』と定義している。

鉱物学的には、天然に産する鉱物群のうち、高い抗張力と柔軟性を持つ絹糸状光沢の特異な繊維状集合をなすものの俗称で、アスベストという名称は使われていない。天然の鉱石では、蛇紋石系（クリソタイル：温石綿、白石綿）と角閃石系（クロシドライト：青石綿、アモサイト：茶石綿）に大別される。

工業的にはクリソタイル（ $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ）石綿が広く利用されており、世界の生産量の95%を占めている。アスベストは単独で使用することは少なく、石綿スレートのように他の原料と混合して使用することが多い。日本では、2006年以降、石綿および石綿をその重量の0.1%を超えて含有する製品の、製造、輸入、譲渡、提供および使用が禁止されている。

## 第2節 大気汚染の発生機構

大気汚染物質の発生原因は天然汚染、人為汚染、天然人為汚染に分類することができる。わが国では、大気汚染物質として、大気汚染防止法で表5.2の物質が定められている。特定物質（表5.3参照）は、大気汚染に関係が深い、大気汚染防止法関係法規以外の法律で規制されているものもある。

天然汚染 火山の爆発、噴火など火山活動によるガス・粉じんの発生、炭田・油田地域より噴出する天然ガス、風で吹き飛ばされる砂じん、植物の花粉など天然現象に起因する汚染。

人為汚染 各種の生産活動、物の輸送、交通機関、家庭生活などの人間活動に伴って発生する人為

的原因によるもので、大気汚染による公害の主要なものである。

天然・人為的汚染 二酸化窒素や炭化水素などの人為汚染による発生物が、太陽光線などの自然の力によって反応し、二次汚染物である光化学オキシダントなどを生成する場合がこれに該当する。

## 第3節 大気汚染による影響

### 1 人体に与える影響

#### (1) 大気汚染と人体

一般に大気の汚染物質が高濃度の場合は、急性の呼吸器の炎症を引き起こし、死亡する場合すらある。低濃度の場合は、長期間継続して反復されると、感冒、気管支炎、肺炎などの呼吸器系の病にかかりやすくなり、特に呼吸器、心臓に障害のある人々が強く影響を受ける。また、肺の換気機能欠損、ヘモグロビンによる血液の酸素輸送などの生理機能障害を直接起こす物質、あるいは慢性の病気や潜伏性の病気を発生するものもある。

また、汚染物質や有害物質が1種類のときよりも複数種類が混合した状態、あるいは有害ダストに有害ガスが吸着した状態などの場合のほうが、一般に障害の程度が大きい。

汚染物質の人体に及ぼす影響を次に示す。

表 5.2 大気汚染防止法規制対象物質一覧

規制物質	物質の例示	発生形態	発生施設	規制基準	規制措置等
ばいじん 煙	硫黄酸化物	SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub>	物の燃焼	ばい煙発生施設	排出基準（総量規制, K値規制）
	ばいじん	すす, 煙灰など	物の燃焼	ばい煙発生施設	排出基準（濃度規制, 施設の種類規模など）
	有害物質	Cd, Pb, F <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> , 及びその化合物, NO <sub>x</sub>	物の燃焼, 合成分解など	ばい煙発生施設	排出基準（濃度規制, 物質の種類施設の種類のごと）
粉じん	セメント粉, 石炭粉, 鉄粉など	物の粉碎, 選別, 堆積など	粉じん発生施設	構造, 使用, 管理基準	基準適合命令
自動車排出ガス	CO, HC, Pb, NO <sub>2</sub> など	自動車の運行	特定の自動車	許容限度	交通規制, 整備, 命令など（他法による）
特定物質	表1.3参照	物の合成等の化学的処理中の事故など	特定施設	なし	事故時の措置命令

表 5.3 特定物質と関連業務

物 質 名	化 学 式	関 連 業 種
ふ っ 化 水 素	HF	化学肥料製造、窯業、アルミニウム工業
硫 化 水 素	H <sub>2</sub> S	石油精製、ガス工業、アンモニア工業、パルプ
二 酸 化 セ レ ン	SeO <sub>2</sub>	金属製錬
塩 化 水 素	HCl	ソーダ工業、プラスチック処理
二 酸 化 窒 素	NO <sub>2</sub>	硝酸製造、燃焼を伴う業種
二 酸 化 硫 黄	SO <sub>2</sub>	硫酸製造、重油燃焼各産業
塩 素	Cl <sub>2</sub>	ソーダ工業、その他化学工業
ふ っ 化 け い 素	SiF <sub>4</sub>	化学肥料製造ど
ホ ス ゲ ン	COCl <sub>2</sub>	染色工業
二 硫 化 炭 素	CS <sub>2</sub>	二硫化炭素製造
シ ア ン 化 水 素	HCN	青酸製造、製鉄、ガス工業、化学工業
ア ン モ ニ ア	NH <sub>3</sub>	化学肥料製造、めっき工業、その他
三 塩 化 り ん	PCl <sub>3</sub>	医薬製造、二塩化りん
五 塩 化 り ん	PCl <sub>5</sub>	三塩化りん、オキシ酸化りん
黄 り ん	P <sub>4</sub>	りん製錬、りん化合物製造
クロルスルホン酸	HSO <sub>2</sub> Cl	医薬製造、染料製造
ホルムアルデヒド	HCHO	ホルマリン製造、皮革、合成樹脂
ア ク ロ レ イ ン	CH <sub>2</sub> =CHCHO	アクリル酸製造、合成樹脂
り ん 化 水 素	PH <sub>3</sub>	りん酸製造、りん酸肥料
ベ ン ゼ ン	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	石油精製、ホルマリン製造、塗装工業
メ タ ノ ール	CH <sub>3</sub> OH	メタノール製造、ホルマリン製造、塗装工業
ニッケルカルボニル	Ni(CO) <sub>4</sub>	石油化学、ニッケル製錬
硫酸 (SO <sub>3</sub> を含む)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	硫酸製造、肥料工業など
臭 素	Br <sub>2</sub>	染料、医薬、農薬
一 酸 化 炭 素	CO	ガス工業、金属製錬工業、内燃機関
フ ェ ノ ール	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	タール工業、化学薬品、塗装工業
ピ リ ジ ン	C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N	化学工業など
メ ル カ プ タ ン	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> SH	石油精製、石油化学、パルプ製造など

① 硫黄酸化物 (SO<sub>x</sub>)

二酸化硫黄 (SO<sub>2</sub>) が最も重要な汚染物質であり、大気中で紫外線的作用あるいはある種の微粒子の触媒作用などで酸化されて三酸化硫黄 (SO<sub>3</sub>) になることがある。三酸化硫黄は吸湿性が高く、二酸化硫黄に比べて人体に5倍程度強く作用する。また、微粒子などに吸着した二酸化硫黄は、特に強く人体に影響を与える。二酸化硫黄の人体に対する影響は、3～5 p p mで臭気の感知、20 p p mで顕著な刺激感、100 p p m濃度のガスを毎日8時間吸入すると肺組織に障害を起こし、300 p p mで呼吸困難になり、500 p p mでは死亡することがある。

② 窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>)

主に、一酸化窒素 (NO)、二酸化窒素 (NO<sub>2</sub>) および二酸化窒素が酸化されてできる五酸化窒素 (N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) が、人体に影響を与える。高濃度の二酸化窒素を吸入すると気管支炎、肺気腫などの呼吸器障害を起こす。一酸化窒素は、二酸化窒素に比べその作用は1/5程度であるが、二酸化炭素と同じく血液中のヘモグロビンと結びついてニトロソヘモグロビンを形成し、血液の酸

素輸送機能を害する。

### ③ 一酸化炭素 (CO)

一酸化炭素は、血液中のヘモグロビンと結合してカーボキシヘモグロビンを作る。ヘモグロビンは、肺内に吸入された酸素と結合して体内の組織の各所に輸送する働きを持っているが、一酸化炭素は酸素よりヘモグロビンとの結合力ははるかに強いので、酸素との結合が損なわれる。

### ④ オゾン (O<sub>3</sub>)

オゾンは、かつて人体に良い影響を与えるとされていたが、ある量的水準を超えれば有害になる。オゾンは水に溶け難いため、肺の深部まで到達しやすく、炎症を起こす。

### ⑤ 浮遊粒子状物質

大気中に浮遊する各種微粒子の粒径範囲と、それらを吸入したときの呼吸器内残留率の概略を、図5.1に示す。これにより、次のことが分かる。

- 浮遊している金属粉じんの粒度範囲は大きく、およそ0.2～20 μmに及ぶ。
- 20～10 μm程度の粒子を吸込むと、その90%以上は上部気道の口腔や気管支にある鼻毛や粘液面で捕捉される。

- 0.2 μmの極微粒子では、体内残留率は

25%以下である。残留率が最も多い粒子径は、1～2 μm前後であり、すべて下部気道（最少気管支）および肺胞（血液に酸素を供給する器管）に残留する。

ミストのような液体粒子や可溶性物質は、血液によって体内の各器管に運ばれ固有の毒性を呈したり、解毒・中和後、体外に排出されたりする。また、不溶性、難溶性のダスト類は、残留部位が上部気道の場合には、せき、鼻汁などとともに体外へ排出されるが、肺胞にまで到達し残留した場合には、もはや体外への排出が不可能となる。

一方、ダストのたい積によって組織は繊維化され、やがて固化・死滅して、血液への酸素供給機能が失われる。これがじん肺である。じん肺は不治の病であり、青年期に罹病すると病状の悪化が早く、余病を併発しやすいなど、多くの悪条件を備えた難病である。

また、年平均(24時間値)濃度が0.1 mg/m<sup>3</sup>の地域における慢性気管支炎症状の有症率は、それ以下の濃度の地域に比べて明らかに多い。

### ⑥ フロンおよび酸性雨

フロン自体が直接人体に影響を及ぼすことは少ないが、高空で紫外線により分解され、その生成物の塩素がオゾン層を破壊するため、中波長紫外線の地上への到達量が増え、その結果、皮膚がんの発生率が増加する。オゾン層が1%減少すると細胞がんが約4%増加するといわれている。

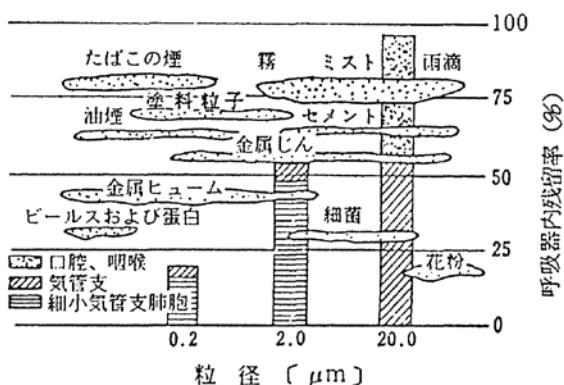


図 5.1 大気汚染物質粒径と呼吸器内残留率(%)

酸性雨は、湖沼、森林等の生態系に大きな影響を及ぼす。日本では人への直接被害の報告はない。

⑦ アスベスト（石綿）粉じん

アスベストに起因する疾病には、石綿肺、肺がん、胸膜と腹膜の悪性中皮腫および胸膜肥厚斑等がある。多くは呼吸器疾患であるが、最近では、胃がん、喉頭がん、結腸がん等の消化器系のがんと関連も強く疑われている。ばく露量が高濃度では石綿肺および肺がんが、低濃度の場合には胸膜肥厚斑と悪性中皮腫等が起こる。また、肺ガンと悪性中皮腫は、それぞれ石綿肺、胸膜肥厚斑の出現よりかなり遅れて発生するといわれている。

石綿肺は、アスベスト粉じんを吸入することにより起こる肺繊維症であり、じん肺の一種である。吸入されたアスベストは、肺に入り、細い気管支や肺胞を刺激し細気管支肺炎を起こす。肺胞が繊維化すると、細い気管支が引っ張られて拡張する。こうした繊維化が広範囲に及ぶと肺の弾力性がなくなるとともに、肺胞の壁が厚くなり、空気を吸っても酸素が血液の中に入り難くなり、呼吸困難な症状を示す。石綿肺は、じん肺と同様、その進行は潜行的で緩やかであり、臨床症状の発症まで10年以下のことは希である。じん肺と同様、現代医学では不治の病であり、早期診断が重要である。

## 2 植物に与える影響

### (1) 大気汚染と植物

植物に顕著な被害を及ぼす有害物質には、古くから二酸化硫黄が知られており、次いでふっ素が問題となる。最近では、窒素酸化物、炭化水素などが太陽光線によって光化学反応を起こし、2次的に発生するオゾンも注目されている。

各種有害物質が植物に与える障害を化学的に分類すると、表5.4のようになる。

表5.4 植物に対する各種有害物質による障害

植物への障害	有機物質
① 酸化的障害	オゾン (O <sub>3</sub> ) , 塩素 (Cl <sub>2</sub> )
② 還元的障害	二酸化硫黄 (SO <sub>2</sub> ) , 硫化水素 (H <sub>2</sub> S) , 一酸化炭素 (CO)
③ 酸性障害	三酸化硫黄 (SO <sub>3</sub> ) , ふっ化水素 (HF)
④ アルカリ性障害	アンモニア (NH <sub>3</sub> )
⑤ 物理的障害	浮遊粉じん

### (2) 環境と被害

被害の発生は、大気中に含まれる有害物質の「濃度×量」に影響されるが、同じ濃度や量であっても植物の置かれた環境、すなわち、ガスの種類、接触時間、接触時における光線の強弱、温度の高低、空中湿度、土壌水分、植物の種類、品種、植物の生育期などによって、被害状況は大きく異なる。

植物の気孔の開閉は、細胞内の水分の多少によって変わり、降雨、空気湿気、土壌水分の多いとき



気孔は大きく開き、乾天続きのときは小さい。このため、小雨時や空中湿気の高いときに、急性煙害が多く発生する。一般に植物の葉は光が当たると気孔が開く性質がある。この現象は被害の発生が夜間より昼間に多い原因となっている（ただし、ばれいしょ、かんしょの葉などは夜間になっても気孔を閉じない）。

このほか、他のガスの存在による相乗作用（二酸化硫黄＋オゾン）、農薬との相乗作用（ボルドー液＋亜硫酸ガス）などもある。また、海岸線に沿った工業地帯では潮風害（塩害）を受けることが少なくないが、塩素などのガス害と混同されやすいので注意が必要である。

### (3) 被害の特色

#### ① 亜硫酸ガス（ $\text{SO}_2$ ）

植物が二酸化硫黄に接触すると、葉の周辺部や葉脈間に組織の壊変が見られる。このような葉の部分的変色を一般に煙ばん（斑）と呼んでいる。煙ばんは白色～褐色系が一般的であるが、そら豆等は黒かつ色で、松類は針葉全体が緑色を失い次いで赤褐色に変わり脱落する。

#### ② ふっ素（F、HFなど）

ふっ化水素の被害は、二酸化硫黄の場合に類似し、若葉の尖瑞や周辺に黄化現象を起こす。

#### ③ オゾン（ $\text{O}_3$ ）

葉の赤色化、葉の上表面の漂白化、白色のそばかす状のはん点、暗褐色の点状はん点などある。葉の上表面に発生する白色または暗褐色の点状はん点が、最も特徴的である。

#### ④ 指標植物

特定の環境条件に対して敏感な生物を指標生物というが、陸上では主として植物が利用される。植物を用いる方法では、広域にわたり、長期的かつ連続的に環境汚染を把握できる。指標植物には、汚染物質に対して感受性が高く耐性が低いものを選定する（表5.5参照）。

表 5.5 大気汚染の指標植物(例)

大気汚染源	指 標 植 物
① フッ素化合物	グラジオラス、ソバ、ブドウなど
② オゾン	タバコ、ハツカダイコン、インゲンマメ、アルファルファ、ホウレンソウ、アサガオなど
③ 硫黄酸化物	アルファルファ、ソバ、ゴマ、アカマツなど
④ 二酸化硫黄を含む複合汚染	地衣類（ウメノキゴケなど）

## 3 その他の影響

### (1) 動物への被害

大気汚染は、人間に対してと同様に、犬や猫などの家畜類にも影響を与える。犬や猫の症状としてはせき、くしゃみ、結膜の充血、呼吸困難、鼻水、はきけ、下痢、食欲不振、倦怠感などがある。

養蚕の被害としては、桑の葉が煙害を受けて飼料に適さなくなるほか、粉じんなどが付着した葉を食べた蚕が消化器障害を起こし、まゆの収量が大きく減少する。

## (2) 器物への被害

大気汚染による器物の被害は、すす、煙灰などの固体微粒子の付着による洗濯物や器物の汚れ、絶縁不良現象の出現など物理的現象によるものと、金属、塗装面、ゴム、石油化学製品などが腐食・変質する化学的作用によるものがある。

ゴム割れの主原因は、オゾンである。また酸性雨による文化財、コンクリート構造物などの被害が取上げられている。

# 第4節 大気汚染防止技術 (1) — 鉱煙・ばい煙

## 1 燃焼およびばい煙防止

### (1) 燃 料

燃料とは、酸素(空気)の存在で容易に燃焼し、経済的に燃焼熱を利用できるものである。このため、供給が容易で、貯蔵、運搬、取扱いが便利でなければならない。燃料は一般に天然物であるが、そのまま用いる場合は少なく、分別、精選、加工した後使用する。

燃料は気体、液体、固体に大別される。可燃部分の組成は炭素主体で、水素、酸素等が結合している。一般に固体燃料は、液体燃料に比し、酸素含有率が大きく水素が少ない。

主要な燃料の性状および用途を表5.6に示す。

#### ① 気体燃料

気体燃料は、天然ガスを除けば、液体および固体燃料から製造する。以下の理由で、大気汚染防止に適した燃料である。

- a) 燃焼効率が高く、わずかな過剰空気で完全燃焼でき、すすが発生しない。
- b) 燃料中に硫黄を含まないものが多く、燃焼排ガス中に $\text{SO}_2$ を含まない。
- c) 灰分がほとんどなく、ダストを発生することがない。

LPG(液化石油ガス:Liquefied Petroleum Gas)は、貯蔵、輸送は液体で、燃焼時は気体で取扱いも簡単であり、家庭用のほか自動車や工業用にも需要が増加している。ただし、比重が重いいため低所に滞留し思わぬところで引火することがある。

表 5.6 燃料の性状および用途

## 気 体 燃 料

気体燃料			成 分 (%)											高発熱量 (kcal/m³) (MJ/m³)	主 用 途		
			CO <sub>2</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>2n</sub>			O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub>						N <sub>2</sub>	
				C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>				C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>				C <sub>5</sub>
石	天 然	乾性	3.4	-	-	-	0.1	-	-	94.6	-	-	-	-	1.9	9000 { 37.7}	化学工業原料用
	ガ ス	湿性	0.7	-	-	-	-	-	-	75.4	13.6	7.5	2.8	-	-	12000 { 50.2}	都市ガス用 発電用
油 系	油	熱 分 解 ガ ス	3	21	12	-	1	7	20	28	2	0	-	-	6	9700 { 40.6}	都市ガス
		ガ 接 触 分 解 ス ガ ス	8	9	1	-	0	15	48	16	2	0	-	-	1	5400 { 22.6}	都市ガス
		ナ フ サ 改 質 ガ ス	21	0	0	-	0	3	63	13	0	0	-	-	-	3250 { 13.6}	原料ガス用, 都市ガス用
	石 油 ガ ス	1 種 1 号	-	-	4.0	0.2	-	-	-	-	0.6	90.8	4.4	-	-	24500 { 102.6}	家庭用, 業務 用
		2 種 4 号	-	-	-	3.0	-	-	-	-	-	1.1	95.4	0.5	-	31900 { 133.6}	工業用, 自動 車用, 原料用
製 油 所 ガ ス			0	0	0	-	0	0	58	16	15	8	-	-	-	7760 { 32.5}	ボイラ用, 都市ガス用
石 炭 系	気体燃料		成 分 (%)											高発熱量 (kcal/m³) (MJ/m³)	主 用 途		
			CO <sub>2</sub>	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>		O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub>		N <sub>2</sub>						
	石 炭 ガ ス	2.5	3.0		0.7	9.9	52.1	27.3		4.5		5000 { 20.9}	都市ガス用, 窯炉用				
高 炉 ガ ス	17.7	-		-	23.9	2.9	-		55.5		900 { 3.77}	窯炉用, ボ イラ用					

## 液 体 燃 料

液体燃料	主 成 分	沸 点 範 囲 (°C)	高発熱量 (kcal/kg) {MJ/kg}	主 用 途
揮 発 油	C, H	30~200	11000~11500 {46.1~48.1}	ガソリンエンジン用
灯 油	C, H	180~300	11000~11500 {46.1~48.1}	石油発動機用, 暖ちゅう房用
軽 油	C, H	200~350	11000~11500 {46.1~48.1}	小形ディーゼル用, 焼玉機関用, 加熱用
重 油	C, H (O, S, N)	230~	10000~11000 {41.9~46.1}	各種ディーゼル用, ボイラ用, 工業炉用

## 固 体 燃 料

固体燃料	主 成 分	高発熱量 (kcal/kg) {MJ/kg}	主 用 途
石 炭	C, H, O (N, S)	4500~8000 {18.8~33.5}	ボイラ用, 窯炉用, ガス及びコークス製造用, 家庭用
コークス	C (H, O, S)	6000~7500 {25.1~31.4}	製鉄用, 溶銑用, ガス製造用

## ① 気体燃料

液体から気体になるとき蒸発熱90~100kcal/kg (377~419kJ/kg) が必要なので, 使用時には配慮しなければならない。

天然ガスには,  $\text{CH}_4$ からなる乾性ガスと,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_8$ など高級炭化水素を含む湿性ガスがある。我が国はほとんど輸入に頼っており,  $-162^\circ\text{C}$ に冷却したLNG(液化天然ガス: Liquefied Natural Gas)を冷凍タンカで受け入れ, 保冷貯蔵後, 再ガス化して消費地へ送る。

## ② 液体燃料

液体燃料資源には原油, オイルシェール (Oil Shale: 油母頁岩), タールサンド (Tar Sand: 油砂) などがある。現在は原油系がほぼ大半を占めているが, 採油技術向上に伴い, オイルシェール, タールサンド系のものが増大する可能性がある。

液体燃料を蒸留、分解、改質、水素処理、溶剤処理などを組み合わせて精製し、液化石油ガス、ガソリン、灯油、軽油、重油を得る。工業用燃料としては重油の使用量が最も多い。我が国は原油の大部分を中東地域から輸入しているが、一般にこれらの原油は硫黄の含有率が高く、硫黄分の分布は重質油のC重油が多い。

天然ガスの供給の増大に伴い、ナフサ、LPG、原油などの炭化水素や石炭などを原料としたSNG(代替天然ガスSubstitute Natural Gas /合成天然ガスSynthetic Natural Gas)が開発されている。

液体燃料は、工業用に、次のような有利な特徴を持つ。

- a) 発熱量が高い。
- b) 一般に発熱量当りの価格が安い。
- c) ほぼ均質である。
- d) 貯蔵、運搬が容易である。
- e) 燃焼が容易で、制御しやすい。
- f) 配合などによって硫黄分を調整できる。

欠点としては、燃焼温度が高いため局部加熱を起こしやすい、使用バーナによっては騒音を発生する、火災・逆火などによる事故を伴いやすい、などが挙げられる。

### ③ 固体燃料

固体燃料には、薪材、泥炭、亜炭、れき青炭、無煙炭などのような天然物と、コークス、半成コークスのように加工して得られるものがあり、炭素、水素、窒素、硫黄などから成る可燃性高分子化合物、灰と呼ばれる無機物質、および水分を含んでいる。

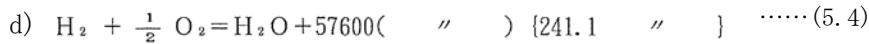
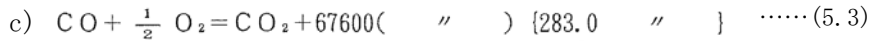
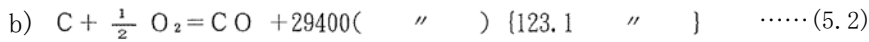
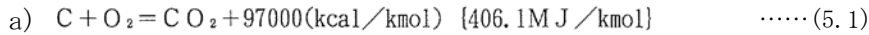
工業的には主にれき青炭が用いられる。燃料流体化に伴い、燃料消費量に占める固体燃料の割合は著しく低減したが、近年石炭が見直され、クリーンエネルギーとして利用拡大が見込まれている。固体燃料は、パイプ輸送に乾燥・粉碎などの前処理が必要、燃焼後灰を残すなどの課題がある。

コークスは、粘結炭が主体の原料炭を高温乾留して得られる二次燃料である。その主成分は炭素で、揮発分はほとんどなく、灰分は原料炭中の灰分が全部残留する。着火し難いが、ほとんど揮発分を含まず、燃焼時に煙を発生しない。発熱量は $25.1 \sim 31.4 \text{ MJ/kg}$  [ $6,000 \sim 7,500 \text{ kcal/kg}$ ]程度である。

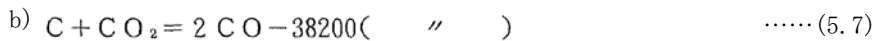
## (2) 燃焼計算

### ① 燃焼反応式

燃焼反応を取扱う場合には次の反応が主なものである。



これらはいずれも反応速度が大きく，発熱反応であるが，燃焼方法によっては吸熱反応を伴うことがある。



### ② 固体および液体燃料の燃焼に要する空気量および燃焼ガス量とガス組成

固体または液体燃料の燃焼に要する酸素量あるいは空気量は，その元素組成が明らかであれば正確に求められる。理論空気量 ( $A_0$ ) の値は燃料の組成で定まるため，それぞれの燃料固有の値となる。各種燃料の

表 5.7 各種燃料の理論空気量の概略値 ( $A_0$ )

燃 料	$A_0$ [ $\text{m}^3_{\text{x}}/\text{m}^3_{\text{x}}$ ]	燃 料	$A_0$ [ $\text{m}^3_{\text{x}}/\text{kg}$ ]
天然ガス乾性	8.8～9.0	燃 料 油	10～13
オイルガス	4.5～11.0	れ き 青 炭	7.5～8.5
石 炭 ガ ス	4.5～5.5	無 煙 炭	9～10
高 炉 ガ ス	0.7	コ ー ク ス	8.5
		炭 素	8.9

$A_0$ の概略値を表5.7に示す。

### ③ 最大炭酸ガス量 ( $(\text{CO}_2)_{\text{max}}$ )

燃焼装置の燃焼状態を判定するため，排ガス分析を行う。燃料を構成する主要元素は，C，H，NO，Sであり，燃

焼で生じるガス成分は $\text{CO}_2$ ， $\text{H}_2\text{O}$ ， $\text{SO}_2$ と過剰の $\text{O}_2$ および $\text{N}_2$ 等である。

理論空気で完全燃焼すると仮定すると，燃焼ガス中の

表5.8  $(\text{CO}_2)_{\text{max}}$  の概略値

燃 料	$(\text{CO}_2)_{\text{max}}$ (%)	燃 料	$(\text{CO}_2)_{\text{max}}$ (%)
天然ガス湿性	10.6	燃料油	15～16
天然ガス乾性	11.5	れき青炭	18.5
オイルガス	11.4～12.2	無煙炭	19～20
L P G	13.8～15.1	コークス	20.6
石炭ガス	11	炭 素	21
高炉ガス	24		

$\text{CO}_2$ 濃度は最大になる。この $\text{CO}_2$ ガス量を最大炭酸ガス量といい、 $(\text{CO}_2)_{\text{max}}$ で表す。 $(\text{CO}_2)_{\text{max}}$ は燃料中のCの量によって定まるので燃料に特有な値をとり、排ガス中の $\text{CO}_2$ の分析値と比較することによって燃焼状態の

目安となる。各種燃料の $(\text{CO}_2)_{\text{max}}$ の概略値を、表5.8に示す。

### (3) ばい煙発生とその防止技術

従来、燃焼管理は、合理的な燃焼方法や熱経済が中心課題であったが、大気汚染が社会問題となるに従い、その起因物質であるすす、二酸化硫黄、窒素酸化物などが規制され、ばい煙除去・抑制技術が重点となった。

#### 1) すすの生成

炭化水素の燃焼工程で、燃料の分解、脱水素、縮合、重合などの反応を経てすすが生成する。すすの生成過程は燃料の種類、火炎の性状によって異なり、一般的にはC/H比の大きいものほど生成しやすい。例えば、同じ気体燃料の燃焼でも、拡散燃焼では不活性ガスの添加によってすすの生成量の低下が見られるが、予混合燃焼では逆に増大する。

一方、火炎中で生成したすすの性質は、火炎の形成、燃料の性質および生成条件等ではほとんど変わらない。すすは、一般に約1～6%程度の水素を含み、直径10～1,000Åの球形粒子がじゅうずのように結合した形状や、更に複雑な構造やひも状の形状をしたものがある。

#### 2) 窒素酸化物の生成抑制技術

##### ① 燃焼による窒素酸化物の生成

- ・ Thermal (サーマル)  $\text{NO}_x$  空気を用いて燃料を燃焼させるとき、空気中の $\text{N}_2$ と $\text{O}_2$ の反応によってNO、 $\text{NO}_2$ などを生成する。このNO、 $\text{NO}_2$ をThermal  $\text{NO}_x$ と呼ぶ。

NO生成の反応は気温が高いほど、酸素分圧が高いほど、高温域に滞在する時間が長いほど生成量が多くなる。実際の燃焼装置では、燃焼ガス中に含まれる窒素酸化物のうち、NOが95%以上で、 $\text{NO}_2$ は5%程度である。しかし、温度が下がるに従って平衡ガス組成は $\text{NO}_2$ に偏る。

- ・ Fuel (フューエル)  $\text{NO}_x$  燃料中に含まれる各種の窒素化合物の一部が燃焼に際して酸化されてNOとなる。このNOをFuel  $\text{NO}_x$ と呼んでおり、窒素化合物のNOへの変換率は5～50%位である。このように変換率が異なる理由は、燃料と空気との混合特性が大きく影響するためである。一般には、酸素分圧が高いほど変換率は高い。

一般には固体、液体、気体燃料の順に $\text{NO}_x$ の生成量は少なくなる。 $\text{NO}_x$ の発生を抑制するためには、次の原則に従う。

- a) 有機窒素化合物含有率の低い燃料を使用すること。
- b) 燃焼域での酸素濃度を低くすること。
- c) 高温域での燃焼ガスの滞留時間を短くすること。
- d) 燃焼温度を低くする。特に局所的な高温域をなくすこと。

NO<sub>2</sub>生成要因，抑制原理，抑制方法の関係を，図5.2に示す。

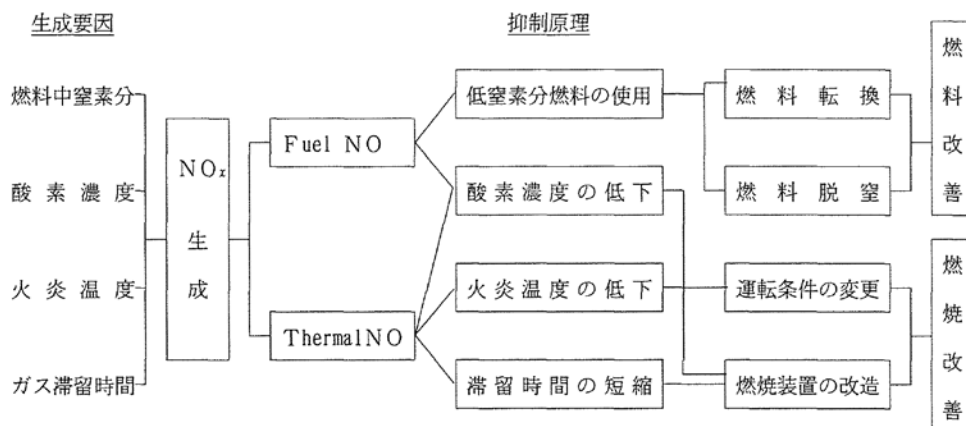


図 5.2 NO<sub>2</sub>抑制技術

## ② 窒素酸化物の抑制方法

燃焼技術によるNO<sub>x</sub>の抑制方法としては，運転条件の変更によるもの，低NO<sub>x</sub>化を目的として開発された新しい燃焼方法によるもの，燃料の転換によるものなどがある。

### a) 運転条件の変更による方法

低空気比燃焼，燃焼室負荷の低減，燃焼用空気の前熱温度の低減策などがある。これらの方法は，既設の装置に比較的簡単に適用できるが，改造燃焼法に比べてNO<sub>x</sub>の抑制効果は少ない。

### b) 装置の改造による方法

- ・ 二段燃焼法 燃焼用空気を2，3回に分けて供給する。第一段階では理論空気量より少ない空気では燃焼させ，第二/第三段階では不足空気を補充し，全体として完全燃焼させる。本法は火炎温度の低下とN<sub>2</sub>と結合するO<sub>2</sub>の減少を図り，NOの生成を抑制する。Fuel NO<sub>x</sub>抑制にも効果がある。
- ・ 排ガス循環燃焼法 排ガスの一部を燃焼空気に混ぜて，火炎の温度の低下と均一化を図るとともに，相対的に酸素濃度を下げ，NO<sub>x</sub>減少を図る。再循環排ガスの温度が低く，循環量が多いほど抑制効果大きい。火炎の安定性などから限界があるため，排ガスの送入方法が重要な因子となる。Thermal NO<sub>x</sub>には効果があるが，Fuel NO<sub>x</sub>には効果がない。
- ・ 二段燃焼と排ガス循環燃焼との組合法 二段燃焼法による抑制効果に排ガス循環法の効果をプラスしてより大きな効果を期待する方法である。この組合法による抑制効果は各々を単独に実施した場合の低減効果の和に近い。
- ・ 低NO<sub>x</sub>バーナ 本バーナは比較的簡単な改造で既設の装置に適用できるため，装置の大小に関係なく採用されている。二段燃焼や排ガス再循環的要素をバーナ自体に取り入れたものや，



燃料と空気との混合を良好にして非常に薄い表面積の大きな火炎で急速に燃焼させる方法、火炎を分割することによって放熱量を増大させて火炎温度の低下を図る方法などがある。

## 2 鉱煙の大気拡散

### (1) 大気汚染と拡散

大気中へ排出された汚染物質は、風によって流されながら次第に拡散し、生活圏である地上付近へも広がる。従って、汚染物質の大気中における拡散希釈状態を把握して、環境濃度を許容値以下に保つように排出を規制することが重要である。

煙突から排出された煙は吐出速度（運動量）と温度（浮力）の効果で大気中を上昇し、周囲の大気と混合してやがて上昇が停止し、中心軸が水平になる（図5.3参照）。この有効煙突高度  $H_e$  [m] は、煙突高さ  $H$  [m] と上昇高度  $\Delta H$  [m] との和である。

上昇高度  $\Delta H$  は、一般に排ガスの運動量（吐出速度×排ガス量）が大きいほど、排出熱量が大きいほど高く、また安定度が高いと低い。また、排煙と周囲の大気との温度差が大きいほど高くなる。

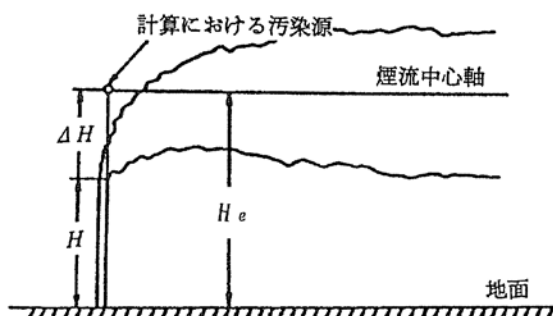


図 5.3 煙流が上昇する様相

### (2) K 値規制と最大着地濃度

高煙突による鉱害防止は、古くからわが国では試みられてきた。サットンの拡散幅推定式から、煙流の最大着地濃度は有効煙突高度（実煙突高度と排ガス上昇高度の和）の2乗に反比例すること、鉛直拡散幅が増すと濃度が大きくなり水平拡散幅が増すと小さくなることが分かる。

$\text{SO}_2$  の K 値規制では、1本の煙突から排出できる  $\text{SO}_2$  の上限量が有効煙突高度の2乗に比例するとし、次式を提示している。

$$q = K \times 10^{-3} H_e^2 \quad \dots\dots\dots (5.8)$$

ただし、 $q$  は  $0^\circ\text{C} \cdot 1$  気圧に換算した  $\text{SO}_2$  の排出上限量 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]、 $H_e$  は有効煙突高度 [m]、 $K$  は地域ごとに決められた係数である。 $K$  には東京特別区、名古屋、大阪などにおける3.0から汚染のない地区の17.5までの16ランクに分けた値を適用する。

## 3 排煙処理技術

### (1) 排煙脱硫技術

#### ① 排煙脱硫技術の分類

硫化鉱の製錬、石炭・石油等燃料の燃焼時に、鉱石および燃料中の硫黄は、二酸化硫黄、三酸化硫黄等の硫黄酸化物として排出される。硫化鉱ばい焼時に発生するような、高濃度二酸化硫黄を含む排ガスは、硫酸製造の原料ガスに利用されるが、重油燃焼排ガスのように数100 p p m か

ら数1,000 p p m程度の比較的低濃度の二酸化硫黄を含む排ガスは、排煙から除去する必要がある。

現在実用化されている排煙脱硫法を、表5.9に示す。

表 5.9 排煙脱硫技術の分類

形 式	処 理 方 法
湿 式 法	石灰石スラリー吸収法
	水酸化マグネシウムスラリー吸収法
	水酸化ナトリウムまたは亜硫酸ナトリウム水溶液吸収法
	酢酸ナトリウム水溶液吸収法
	アンモニア水溶液吸収法
	塩基性硫酸アルミニウム水溶液吸収法
	希硫酸吸収法
半 乾 式 法	炉内吹き込み水噴霧法
	スプレードライ法
乾 式 法	石灰石炉内添加法
	吸 着 法

## ② 湿式法

### a) 石灰石スラリー吸収法

吸収剤として、炭酸カルシウム（石灰石）または水酸化カルシウム（消石灰）を用いる。いずれも水への溶解度が極めて低いため、5～15%のスラリーとして排ガスを洗浄する。

石灰石スラリー吸収法では吸収効率を高めるためにアルカリ領域で運転するが、石灰法の問題点であるスケールトラブルはアルカリ領域で多く、酸性域では少ない。このため、吸収スラリーの濃度、pHの調整、適当な液ガス比の選定等による過飽和溶液の生成減少、スケールの付着し難い形状・材質の吸収塔設置等が試みられている。スケールの生成防止と脱硫率向上のため、少量のNa化合物、水酸化マグネシウム、アジピン酸、ギ酸等を添加することがある。

二酸化硫黄吸収後のスラリーの主成分は亜硫酸カルシウムであり、一部排ガス中の $O_2$ により酸化されて硫酸カルシウム（石こう）となる。使用済み吸収剤の処理法として、廃棄法と石こう回収法がある。

### b) 水酸化マグネシウムスラリー吸収法

吸収剤として水酸化マグネシウムを用いるが、この溶解度は $0.0098\text{g}/100\text{gH}_2\text{O} \cdot 18^\circ\text{C}$ と極めて小さいので、5～30%のスラリーとして $\text{SO}_2$ を吸収させる。

吸収工程では亜硫酸マグネシウムの一部は酸化されて硫酸マグネシウムとなる。硫酸マグネシウムの溶解度は $35.5\text{g}/100\text{gH}_2\text{O} \cdot 20^\circ\text{C}$ と大きく、ほとんど水溶液となるため、石灰－石こう法のようなスケールトラブルは発生しない。

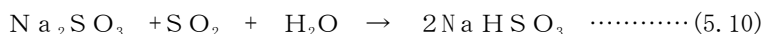
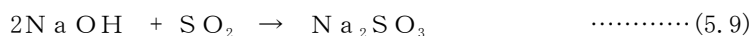
吸収液の大部分は循環使用する。循環吸収液は、 $\text{SO}_2$ を吸収して生成した酸性亜硫酸マグネ

シウムを含むため、水酸化マグネシウムを加えてpHを調整し、亜硫酸マグネシウムを再生する。空気酸化後海域に放流する放流廃棄法のほか、高濃度SO<sub>2</sub>回収法および石こう回収法がある。

#### c) 水酸化ナトリウムまたは亜硫酸ナトリウム水溶液吸収法

吸収剤として水酸化ナトリウムまたは亜硫酸ナトリウム水溶液を用いる。これらの吸収剤は溶解度が大きく、二酸化硫黄との反応が速いため吸収塔が小型になるが、吸収剤の価格は高い。

水酸化ナトリウムまたは亜硫酸ナトリウムと二酸化硫黄の反応は次式のとおりである。この式から、液中のNaOHとSO<sub>2</sub>のモル比が2:1になるまではSO<sub>2</sub>の平衡分圧は0である。反応は水酸化ナトリウムと二酸化硫黄の間で進行し、SO<sub>2</sub>の比がこれより大きくなると亜硫酸ナトリウムと二酸化硫黄との反応が始まる。



二酸化硫黄吸収後の吸収液の処理には、酸化してすべて硫酸ナトリウムとして廃棄する方法、水酸化ナトリウムを加えて亜硫酸ナトリウム回収する方法、吸収液に石灰石を加えて石こうを回収する方法などがある。

#### d) 酢酸ナトリウム水溶液吸収法

亜硫酸ナトリウム水溶液吸収-石こう回収法の改良法である。亜硫酸-石こう法では亜硫酸ナトリウムの酸化により生成する硫酸ナトリウムに硫酸、亜硫酸カルシウムを加え、亜硫酸水素ナトリウムに変成する工程が必要であるが、酢酸ナトリウムを用いることによって、この変成工程が省略できる。

#### e) アンモニア水溶液吸収法

アンモニア水溶液は亜硫酸ガスをよく吸収するが、pH7以上ではアンモニアの分圧が高く、排煙中への損失が大きくなるので、一般には亜硫酸アンモニウム水溶液を用い、亜硫酸ガスを吸収して酸性亜硫酸アンモニウムを生成する。吸収液温度が50℃付近では、pHが5以下になるとSO<sub>2</sub>の平衡分圧が急激に上昇して吸収効率が低下するので、アンモニア水を補給してpH6前後で吸収を行う。

循環吸収液の一部は抜き出して再生工程に送り、副製品として硫酸アンモニウム、石こう、亜硫酸ガスを回収する。

#### f) 塩基性硫酸アルミニウム水溶液吸収法

塩基性硫酸アルミニウムとして、工業用の液ばん(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 8%)あるいは粉末の硫酸ばん土(Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>・16~18H<sub>2</sub>O)を用い、水に溶解する。これに石灰石粉を添加してSO<sub>4</sub>の一部を石こうとして沈でんさせ、所定の塩基度に中和させる方法である。塩基性硫酸アルミニウム[(1-X)Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>・XAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>]の水溶液は無色透明の溶液でよくSO<sub>2</sub>を吸収する。吸収液のpHは3~3.5程度であるため、酸化反応は速く、石こうによるスケールトラブルもほとんど発生しない。

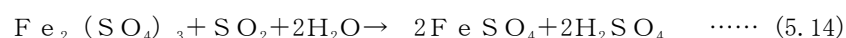
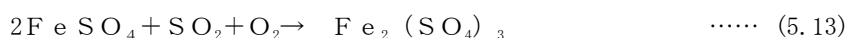
吸収液は、空気酸化して硫酸アルミニウム溶液とし、吸収塔に循環する。また吸収液の一部を

抜きとり石灰石を加えて吸収液を再生すると同時に石こうを回収する。

O<sub>2</sub>濃度が高くかつS O<sub>2</sub>濃度の変動の大きなバッチ操業の発生源にも適用できるため、金属、非鉄金属製錬施設での実用例が多い。

#### g) 希硫酸吸収－石こう法

S O<sub>2</sub>酸化触媒を用いる方法である。酸化触媒としてはMnが一般的であるが、55℃以上の温度域では、F eとMnの酸化活性はほとんど同じのため、価格の安いF eを使用する。酸化率はほぼ100%である。この方法における吸収反応は次のとおりである。



排ガスは、冷却器にて水冷・除じんして吸収塔に送り、2～3%の希硫酸で洗浄してS O<sub>2</sub>が吸収除去する。吸収塔内でも、排ガス中のO<sub>2</sub>および鉄触媒の作用で亜硫酸の一部が酸化され硫酸となるが、亜硫酸を含む吸収液は酸化塔に送り、空気を吹き込んで更に酸化し硫酸として吸収塔に還流する。吸収液の一部は石こう工程に送り、石こうを回収する。

### ③ 半乾式吸収法

現在わが国で実用化されている排煙脱硫法の大部分は脱硫率の高い湿式法である。湿式法は脱硫率が高い反面、プロセスが複雑で、運転操作に高い技術が要求され、また、コストも高い。一方、海外では脱硫率を犠牲にしてもコストの安い簡易法に対する要望が強く、排煙脱硫技術開発研究の初期に提案された半乾式の実用化が進んでいる。国内では主として廃棄物焼却炉の排ガス（塩化水素）処理等で実用化されている。吸収剤には主に石灰石、消石灰を用いる。

#### a) 石灰石炉内吹き込み－水噴霧法

本法は乾式吸収法の改良法で、米国等では早くから実用化されている。処理は2段で行う。一次反応は、石灰石を燃焼室内に吹き込み、熱分解により生成するCaOとS O<sub>2</sub>との反応で、硫酸カルシウムが生成する(900℃～1,200℃)。次いで、空気余熱器後段の130～150℃の排ガス中に水を噴霧して二次脱硫を行う。脱硫率は、C a / S モル比が2～3のとき、70～80%である。

#### b) 消石灰ダクト内吹き込み－水噴霧法

ボイラの空気余熱器出口ダクトに消石灰の粉末を吹き込み、その後段の吸収塔内に水を噴霧して加湿し、1段で脱硫反応を行う。なお、石灰石は反応性が低く、吸収剤に使用できない。脱硫率はC a / S モル比1.5で70%程度。装置設置面積および操業費は湿式石灰法の約1/2である。

#### c) スプレードライヤ法

吸収塔に120～160℃のボイラ排ガスを導き、塔頂部から消石灰スラリーを噴霧する。排ガスでスラリー乾燥時に、S O<sub>2</sub>を吸収しC a S O<sub>4</sub>を生成する。脱硫反応生成物、未反応消石灰粉末、フライアッシュ等は後段の集じん装置で捕集する。吸収剤等の捕集粉体は吸収剤スリータンク

へ循環，廃棄あるいはセメント混和剤とする。 $\text{Ca}/\text{S}$ 比1.5で，脱硫率は75～85%と高い。

d) アモルファスけい酸カルシウム含有スラリー Sprey 法

石炭灰（20%），生石灰（または消石灰）および反応生成物の硫酸カルシウムを混合し，熱水中で養生することによりアモルファスけい酸カルシウムを含む活性度の高い吸収剤を生成させる。この吸収剤をスラリー状で排ガス中に噴霧して  $\text{SO}_2$  を除去する。反応生成物は乾燥した粉末状で，集じん装置で分離する。脱硫率は80～90%を予想。

e) 石灰石炉内吹き込みスラリー吸収法

石灰石炉内吹き込み水噴霧法とスプレードライヤ法を組み合わせたプロセス。石炭焚きボイラ用に研究されている。温度差6～7℃のときの脱硫率は，75～85%程度である。

#### ④ 乾式脱硫法

湿式脱硫法は脱硫率が高いが，処理後の排ガス温度が低いいため煙突から大気への拡散が悪いこと，排水処理を必要とするなどの問題がある。このため，数々の乾式法が試みられた。現在実用化されている方法は，半乾式法の要素技術として用いられている石灰石炉内添加法，排煙脱硫－脱硝法として用いられている活性炭法，五酸化バナジウム等を触媒とし排ガス中の  $\text{SO}_2$  を  $\text{SO}_3$  に酸化する接触酸化法等である。

### (2) 排煙脱硝技術

窒素酸化物は，窒素の酸化物の総称であり，化学式  $\text{NO}_x$  からノックスとも呼ばれる。ボイラ，加熱炉，焼結炉，溶解炉等の固定発生源や，自動車等の移動発生源の燃焼排ガス中に含まれる窒素酸化物は， $\text{NO}$  および  $\text{NO}_2$  である。 $\text{N}_2\text{O}$  は還元燃焼等の特殊な燃焼の場合にのみ発生する。 $\text{NO}_x$  の95%以上は  $\text{NO}$  であり， $\text{NO}_2$  は3～5%程度である。

排ガス中の  $\text{NO}_x$  濃度は燃料の種類，燃焼条件，燃焼装置の構造等により異なる。燃焼条件をコントロールして  $\text{NO}_x$  を低減することができるが，その低減率には限界がある、数 ppm から数十 ppm にするには，排ガスから除去する排煙脱硝技術を採用しなければならない。

ボイラ等固定発生源の排煙脱硝では，アンモニア選択接触還元法と無触媒還元法が実用化されており，アンモニア接触還元法が主流である。また，金属表面処理施設等の  $\text{NO}_2$  濃度の比較的高い排ガス処理では，湿式酸化吸収法が用いられる。

排煙脱硝技術の分類を，表5.10に示す。

表 5.10 排煙脱硝技術の分類



## ① 乾式法

## a) アンモニア選択接触還元法

接触還元法では、触媒の存在下で窒素酸化物を還元剤と反応させて、 $\text{NO}_x$ を $\text{N}_2$ に還元する。

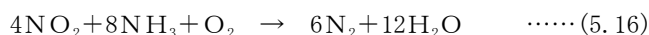
**触媒** 触媒には、硫酸化されにくいバナジウム、鉄等の遷移金属酸化物を用いる。触媒の形状は、ダストを含む排ガス処理にも適用可能なダストスルータイプが一般的で、ハニカム状目開き(3～10mm, 厚み1～2mm), 格子状, あるいは板状(板の厚み0.3mm, 板の間隔は8mm程度)のいずれかである。また、触媒担体としては、硫酸塩化されにくい二酸化チタン(チタニア。 $\text{TiO}_2$ )を用いる。

なお、還元触媒にはPt等の貴金属があるが、 $\text{SO}_2$ が共存する燃焼排ガス処理では、 $\text{SO}_2$ に被毒されて急速に活性を失う。また、アルミナ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )は $\text{SO}_2$ と反応して硫酸アルミニウムとなり、細孔が閉塞し、触媒活性が低下するため適していない。

**還元剤** 重油や石炭の燃焼排ガス中には数百100 p p mの $\text{NO}_x$ の他に3～5%の $\text{O}_2$ , 約10%の $\text{H}_2\text{O}$ , 数100 p p mの $\text{SO}_x$ が含まれている。還元剤にアンモニアを用いれば、 $\text{NO}_x$ との反応が優先して進む。このような還元剤を用いる方法を選択接触還元法といい、アンモニアのほか、アンモニア水や尿素( $\text{CO}(\text{NH})_2$ )も使用される。

接触還元法では、通常触媒の固定層が用いられるが、 $\text{NH}_3$ の分解が生じない範囲では、反応温度が高いほど反応速度が大きくなる。

$\text{NH}_3$ と $\text{NO}_2$ の反応は次のとおりである。



$\text{O}_2$ の存在下で、 $\text{NH}_3$ 1モルと $\text{NO}$ 1モルが反応し、1モルの $\text{N}_2$ が生成する。 $\text{NH}_3/\text{NO}$ モル比を大きくすると脱硝率は向上するが、未分解のアンモニアが排出する。脱硝率80%程度を目標とするときは、 $\text{NH}_3/\text{NO}$ モル比は0.9程度に抑える。

チタニア-バナジウム系ハニカム触媒の性能の一例を、図5.4に示す。

アンモニア接触還元法の触媒として、粒径25mm以下の鉄鉱石を用いる方法が製鉄所で実用化されている。触媒の寿命は2～3か月と短いので、活性の低下した触媒は製鉄原料として高炉に入られて銑鉄となる。この方法は高炉を有する新製鉄所でしか採用できないが、触媒コストは安く、廃触媒処理の問題がない。普及率は余り高くない。

## b) 無触媒還元法

本法では触媒を用いず、排ガス中にアンモニア、炭化水素などの還元剤を加え、気相反応により $\text{NO}_x$ を $\text{N}_2$ に還元する。触媒、反応器などの補器を必要としないので設備費が安く、高ダストのダーティ排ガス処理にも適用できるが、高温域での反応時間が0.4秒以上必要であり、低濃度の $\text{NO}_x$ と $\text{NH}_3$ の混合が難しい。

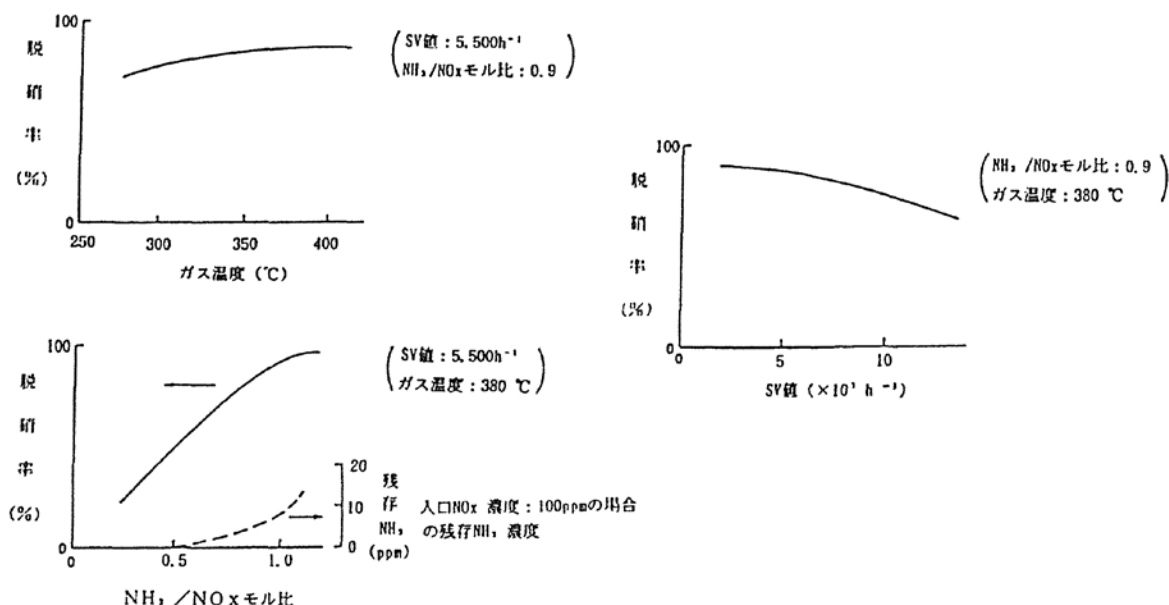


図 5.4 ハニカム触媒の脱硝技術

## ② 湿式法

現在実用化されている排煙脱硫法が湿式法であることから、排煙脱硝法についても湿式法の研究開発が進められている。

## a) 水・アルカリによる吸収

$\text{NO}$ に対する溶解度は極めて小さいので、 $\text{NO}$ 主体の排ガス中の $\text{NO}_x$ を水洗により除去することは不可能である。 $\text{NO}_2$ の溶解度は $\text{NO}$ の約20倍であり、 $\text{N}_2\text{O}_3$ ではさらに溶解度が大きい。しかし、常温常圧下では、この $\text{NO}_2$ および $\text{NO}_2$ の2量体である $\text{N}_2\text{O}_4$ の平衡濃度は極めて小さいので、低濃度の排ガス処理への適用は難しい。

## b) 酸化吸収法

$\text{NO}$ は反応性に乏しく、あらかじめ $\text{NO}_2$ に酸化する必要がある。 $\text{NO}$ の $\text{O}_2$ による酸化は速度定数が負の温度係数を持つ特異な反応であり、低温ほど酸化速度が大きい。 $\text{NO}$ の酸化速度は $\text{O}_2$ 濃度および $\text{NO}_x$ 濃度の二乗に比例するので、排ガス中の $\text{NO}_x$ では、酸化時間が数10分かかる。

## c) 還元法

液相還元剤を用いて $\text{NO}_x$ を $\text{N}_2$ に還元する方法であり、還元剤としては、亜硫酸ナトリウム、チオ硫酸ナトリウム、硫化ナトリウム、尿素などが知られている。尿素との反応を除いて、いずれも $\text{NO}_2$ との反応であり、前処理として $\text{NO}_x$ を $\text{NO}_2$ に酸化する必要がある。

## (3) 排煙脱硫・脱硝同時処理技術

1つのプロセスで、排煙脱硫と脱硝を行う方法は、理想的な排煙処理技術といえる。

乾式法では、活性炭（活性コークス）法と電子線照射法の実用化研究が行われている。

湿式排煙脱硝法では $\text{NO}_x$ の大部分を占める $\text{NO}$ が水にもアルカリ溶液にも溶解しないため、酸化剤を用いて $\text{NO}_2$ や $\text{N}_2\text{O}_5$ に酸化する必要がある。乾式法に比べ、排水処理を含むシステム面でもコスト面でも劣るため、ほとんど実用化に至っていない。

#### ① 活性炭式脱硫・脱硝法

活性炭を用いる方法は、乾式脱硫法として開発されたが、活性炭の消耗が大きく、循環使用による活性低下等から実用化されなかった。しかし、活性炭はアンモニア還元触媒として活性を持つことから、同時処理法として評価されることとなり、現在実用化研究が行われている。

#### ② 電子線照射法

燃焼排ガスに電子線を照射して、 $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$ を同時に除去する方法である。脱硝率は高く、放射線量および時間の増加により向上する。反応温度が高いと効率が低下するので、排ガスはスプレー冷却器で $60\sim 70^\circ\text{C}$ まで冷却し、反応器に入る前に $\text{NH}_3$ を添加する。電子線照射により、排ガス主成分の $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 分子と電子が衝突して、 $\text{OH}$ 、 $\text{O}$ 、 $\text{HO}_2$ などの遊離基が生成される。生成反応時間は遊離基 $10^{-8}$ 秒、硫酸および硝酸 $10^{-5}$ 秒、硫酸安および硫酸安 $10^{-1}$ 秒と短い。なお、発生するX線の遮へいに巾1m程度のコンクリートの壁が必要である。

火力発電所の排ガス処理では、電子線発生装置の消費電力は発電量の1%程度である。温度の低い排ガス処理では加熱等の前処理が不要であるため、 $\text{NH}_3$ 接触還元法よりも有利と思われるが、電子線発生装置の大型化、長時間運転による性能の信頼性確認などの課題がある。

## 4 除じん・集じん技術

### (1) 除じん装置・集じん装置

ガス流または大気に含まれる固体粒子（ダスト）および液体粒子（ミスト）を分離する機械を集じん機または除じん機という。JIS B9909

（集じん装置の仕様の表し方）では、集じん機本体とその前処理および付帯設備を含めて「集じん装置」と規定している。処理用気体を供給して清浄気体として排出するブロワ、ダクト、フード、スタック（排気煙突）などがそれに該当する。ここでは、特に集じん機単体を「集じん装置」として記述する。

#### (2) 集じん装置の主な性能

##### 1) 集じん率（集じん効率）

集じん装置の能力や、集じんの効果を判定には、集じん率（集じん効率） $\eta$ （%）

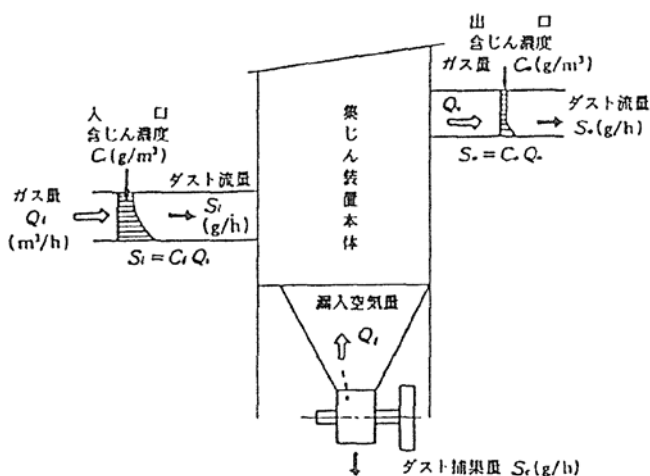


図 5.5 集じん装置の集じん性能に関する量記号



を用いる。集じん率は、装置の入口および出口のダスト流量または装置の捕集ダスト流量を用い（図5.5参照）、次の3式のいずれかで求めることができる。

漏入空気やガス漏れは、主に捕集ダストの排出部気密不良に起因することが多い。正確には(5.18)式を原則とするが、実際には(5.19)式による場合が多い。ただし、②および③の方法は、現場では $S_o$ の値を求めることが著しく困難なため、あまり利用されない。集じん率が高ければ、排出ガスはより清浄化されたことになるが、現実には100%になることはない。

① 出入口ダクト内のダスト流量またはダスト濃度から求める方法

$$\eta = (1 - S_o / S_i) \times 100 = (1 - C_o Q_o / C_i Q_i) \times 100 \quad \cdots \cdots (5.18)$$

なお、装置に漏入空気やガス漏れがない場合は、 $Q_i = Q_o$ となり、次式で求められる。

$$\eta = (1 - C_o / C_i) \times 100 \quad \cdots \cdots (5.19)$$

② 入口ダクト内のダスト流量と集じん装置の捕集ダスト量から求める方法

$$\eta = S_c / S_i \times 100 \quad \cdots \cdots (5.20)$$

③ 出口ダクト内のダスト流量と集じん装置の捕集ダスト量から求める方法

$$\eta = S_c / (S_c + S_o) \times 100 \quad \cdots \cdots (5.21)$$

ここに、 $\eta$ ：集じん率（％）

$S$ ：ダクト内のダスト流量（g/h）＝ $CQ$

$C$ ：ダクト内のガス状態におけるダスト濃度（g/m<sup>3</sup>）

$Q$ ：ダクト内のガス状態におけるガス流量（m<sup>3</sup>/h）

$S_c$ ：集じん装置の単位時間当たり捕集ダストの質量（g/h）

添字 $i$ は入口ダクトの諸量を、 $o$ は出口ダクトの諸量を示す。

2) 通過率、浄化係数

集じん率が極めて高い、例えば $\eta = 99.99 \cdots \%$ のような場合は、装置が捕集したダスト量を対象とする代わりに、装置を通過した量の比率で表す。これを通過率 $P$ といい、次式で求める。

$$P = \frac{S_o}{S_i} \times 100 \quad \cdots \cdots (5.22)$$

$$Q_i = Q_o \text{ の場合は, } P = \frac{C_o}{C_i} \times 100 \quad \cdots \cdots (5.23)$$

$$\text{または, } P = 100 - \eta \quad \cdots \cdots (5.24)$$

ここに、 $P$ ：通過率（％）  $S_o, S_i$ ：装置出入り口のダスト流量（g/h）

$\eta$ ：集じん率（％）  $C_o, C_i$ ：装置出入り口のダスト濃度（g/m<sup>3</sup>）

また、 $C_o$ と $C_i$ の比率 $C_o / C_i$ で表される浄化係数（ $f_0$ ）、あるいは浄化係数の常用対数をとった浄化指数などがある。 $P$ の値は小さいほど、浄化係数および浄化指数の値は大きいほど、集じん率は良くなる。

### 3) 圧力損失

集じん装置内で降下する圧力を圧力損失という。圧力損失は、集じん装置の種類によって大幅に異なり、通常水柱で数10～数100mmになる。この値が小さいほど少ない動力で運転できる。ガスが流入するファンまたはブロワの消費電力を、装置の圧力損失と処理ガス流量を用い、次式で求める。

$$P = 0.273 \times 10^5 Q \Delta p \quad \dots\dots (5.25)$$

ここに、P：消費電力（kW）、Q：処理ガス流量（m<sup>3</sup>/h）、Δp：圧力損失（mmH<sub>2</sub>O）

### (3) 集じん装置の分類と原理および機能

#### ① 分類

集じん装置は、基本となる集じん作用（集じん力）ごとに7種類に分類できる。利用する集じん力には、重力、慣性力、遠心力、熱力、拡散力、電気力、音波力などがあり、集じん装置では単独または複数の集じん力を利用している（表5.11参照）。

表 5.11 集じん装置の分類

集じん力 装置名	重 力	慣性力	遠心力	熱 力	拡散力	電気力	音波力	乾湿式 の区分
重力集じん装置	◎							◇
慣性力集じん装置	○	◎	○					◇
遠心力集じん装置	○	○	◎	△				◇
洗浄集じん装置	○	◎		△	◎	△		◆
ろ過集じん装置	○	◎			◎	△		◇
電気集じん装置	○	○			○	◎		◇ ◆
音波集じん装置	○		○				◎	◇

（注）◎及び○印は主な集じん作用、△印は凝集効果に利用、◇印は乾式、◆印は湿式。

また、捕集すべきダストを水その他の液体で「濡らす」集じん装置を「湿式」といい、洗浄集じん装置の大部分がこれに該当する。これに対し、ダストを濡らさないものを乾式という。ただし、集じん装置本体に流入するガスや気体の冷却・調湿だけに水または液体を噴霧するものは、湿式といわない。

#### ② 集じん装置の直列運転

集じん装置は、排ガスやダストの特性に応じて機種を選定するが、単独では万能ではないため、異なる機種の集じん装置を2台以上直列に運転することが多い（図5.6参照）。なお、直列運転でダストの一次流入側に置いた集じん装置を

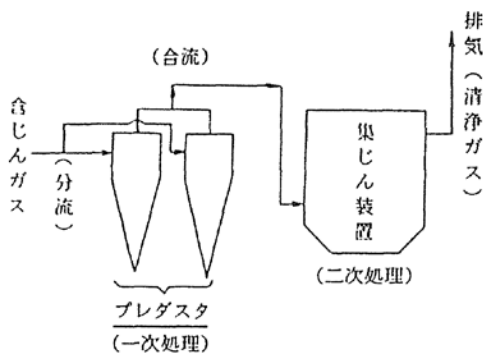


図 5.6 プレダスタを用いた集じん回路

プレダスタ (Preduster) という。ダストが高濃度の場合は、一次側の集じん装置で粗大なダストを分離捕集し、二次側の集じん装置で微小なダストを捕集する方法を用いる。

微小なダストが多い場合、プレダスタには、ダストを凝縮する効果を持つ静電凝縮器、音波集じん装置、ガス中のミストキャッチャーとなる重力沈降室や慣性力集じん装置などを用いる。

### ③ 原理と機能

#### a) 重力集じん装置 (重力沈降室)

重力集じん装置では、重力による自然沈降によって水平に流れている含じんガス中のダストを分離捕集する。この装置は、集じん率が低いため、通常プレダスタとして用いられる。

分離速度が粒子径の二乗に比例するため、小さな粒子ほど分離が難しい。実用的な分離限界粒子径はせいぜい $50\sim 60\mu\text{m}$ までである。

#### b) 慣性力集じん装置

含じんガスに急激な方向転換を与え、また、各種の障害物に衝突させ、慣性力を利用してガス中の粒子を分離捕集する。邪魔板、ルーバ、トラップおよび屈曲管などを用いて分離する「反転式」や、粒子の衝突を数多く重ねてガスから分離する「衝突式」がある。

慣性とは、与えられた運動を持続する性質で、質量の大きなものほど強い。例えば、含じんガス流に板を挿入すると、慣性力の大きい粒子はそのまま直進して板に衝突し落下する (図5.7参照)。実用的な分離限界粒径は $20\mu\text{m}$ 前後で、集じん率は重力沈降室よりも高く、通常プレダスタやミスト捕集用に用いる。

慣性力集じん装置の捕集性能を高めるために、次のような対応が考えられる。

- ・ 反転式では、邪魔板は間隔をせばめ、方向転換の回数を多くする。
- ・ 衝突式では、衝突直前のガスの速度はできるだけ早くし、装置出口のガス速度は小さくする。
- ・ ダストホoppaは、分離したダストが再びガス流に混入しないような形状とし、水などですばやく捕集する。

#### c) 遠心力集じん装置 (サイクロン)

含じんガスに旋回運動を与え、粒子に作用する遠心力により、ガスから分離する装置である。

サイクロンの入口ガス流速は $10\sim 25\text{m/s}$ とされ、数値の小さい方は小形機、大きい方は大形機に適用される。実用的サイクロンでは、圧力損失は $100\text{mmH}_2\text{O}$ 程度で数 $\mu\text{m}$ 前後の粒子を分離できる。プレダスタとしてはもちろん最適であり、単独でもかなりの集じん効果が期待できる。構造は簡単で可動部がないため、設備費もそれほど高くなく、保守管理も容易である。ただし、硬い粒子のダストでは、機体の摩耗が著しく、材質の選定に注意を要する。

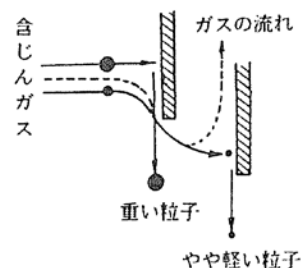


図5.7 邪魔板に対する含じんガス流の挙動

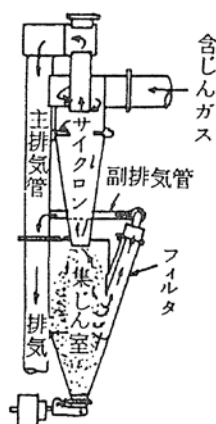


図5.8 ブローダウン型  
サイクロン

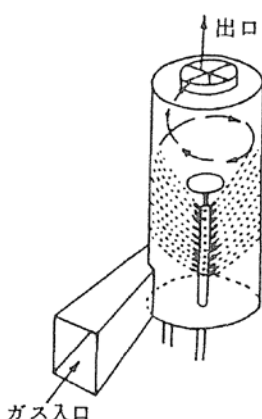


図5.9 サイクロンスクラバ

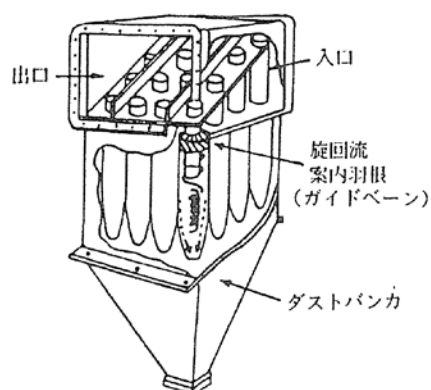


図5.10 マルチクロン

旋回流の作り方は、接線式と軸流式に大別される。集じん性能は接線式が幾分よいが、圧力損失は一般に大きく、同一圧力損失ならば、処理ガス量は軸流式の1/3程度しかない。

ダストパンカに気流が吹き込み、捕集したダストを巻き上げて、集じん率の低下を招く現象を防ぐため、一部の気流(5~10%)を抽気したブローダウン(Blow Down)型がある(図5.8参照)。この形の装置は、仮想円筒に気流を巻き込む力を弱める作用をすることにもなるので、理論的にサイクロンとしては集じん率が最もよい。

サイクロン内部に水を噴霧して、更に捕集効果を上げようとしたものが、サイクロンスクラバである(図5.9参照)。この装置は、通常洗浄集じん装置に分類される。

小型で細長いサイクロンは、微粒子の分離捕集能力が優れているが、単体では処理能力に劣る。大量の含じんガスを処理する場合は、小型サイクロンを多数並べ、ガス流を並列分割して処理する方式を採る。慣例として、小型サイクロンを集合させたものについて、2本並列をダブルクロン、4本並列をテトラクロン、6本以上並列のものをマルチクロン(マルチ・サイクロンの短縮語)と呼ぶ(図5.10参照)。

#### d) 洗浄集じん装置

洗浄集じん装置は、普通「スクラバ(Scrubber)」と呼ばれるものの総称で、慣性・衝突・拡散作用、凝集作用などを利用し、洗浄液(水)あるいは含じんガスの分散で生成された液滴、液膜、気泡などによって含じんガス中の粒子を分離捕集する。

ガスの冷却によって粒子表面に生じた凝縮水が、比較的疎水性粒子の水滴や水面に対する付着を促進させる。また粒子間の結合が起これ、見掛け粒径が増大して、捕集されやすい状態を作る。

含じんガスを気泡状に分散させる方法では、気泡が小さく、その運動が激しいほど粒子の捕集効果はあがる。

洗浄集じん装置には液滴、液膜、気泡等の生成と洗浄方法に種々の方式がある。機能を考慮して大別すると、含じんガスを液中へ通す溜水式、水流を加圧して水滴群を作りダストを捕集する加圧水式あるいは噴霧式(図5.11参照)、充てん塔や流動層スクラバを用いる充てん槽式、ファンの回転を用いた回転式などがある。

#### e) 音波集じん装置

微粒子を音波によって互いに凝集させ、見掛け粒径を大きくして他の集じん装置、例えばサイクロンなどで集じんする。音波は、サイレン、笛、電空などで発生させる。 $1\mu\text{m}$ 程度の粒子を凝集するには、周波数1000Hz以上、音圧レベルで150dB以上の音が必要である。ダスト濃度 $5\text{g}/\text{m}^3$ 程度までのガス処理に有効であるが、まだ騒音や経済性などに課題がある。

#### f) ろ過集じん装置

含じんガス中の固体粒子をろ布を通して分離捕集する。ろ過集

じんでは、慣性付着、遮り付着、拡散付着、重力付着などの集じん作用が利用される。表面ろ過方式と内面ろ過方式に大別される(図5.12参照)。

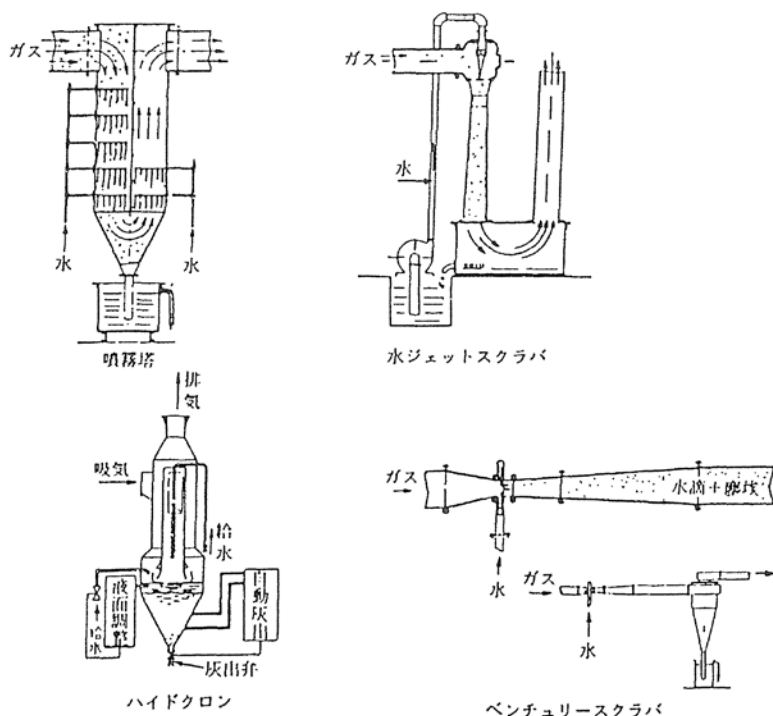


図 5.11 加圧水式・噴霧式洗浄集じん装置の例

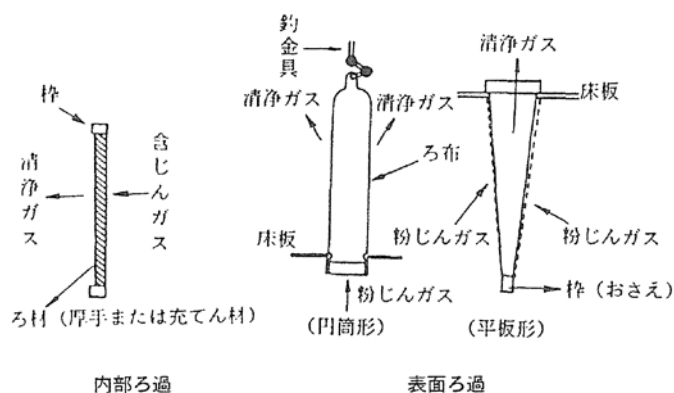


図 5.12 内面ろ過と表面ろ過 (平板形の点線部はろ布)

表5.11 各種ろ布材の特性比較

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) (℃)	耐 酸 性	耐ア ルカ リ性	有機溶剤	耐 摩 耗 性	その他
天 然 物	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
合 成 繊 維 ・有 機 物	ポリアミド系 (ナイロン)	強	1.14	5	100	中	強	フェノール濃蟻酸	強	払い落し良好
	ポリエステル系 (テトロン)	強	1.38	0.4	150	強	中	フェノール	強	利用広し
	ポリアクリルニトリル系 (カネカロン)	中強	1.2	1	120	強	強	温アセトン	中	
	ポリ塩化ビニリデン系 (サラン)	中	1.7	0	80	強	中	ほぼ安定	強	
	ポリプロピレン系 (バイレン)	強	0.95	0	100	中	中	ほぼ安定	中	安 価
	四フッ化エチレン系 (テフロン)	中	2.3	0	250	強	強	安 定	中	高 価 , 高温用
	酢酸ビニル系 (ビニロン)	強	1.3	0	100	中	強	弱	強	安 価
無 機 物	ガラス繊維	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
	ステンレス繊維	強	8	0	400	強	強	安 定	強	高 価

表面ろ過方式では、比較的薄いろ布を袋状（円筒）またはV形断面を持つ平板状にして、主にろ布の表面でダストを分離捕集する。本方式はバグフィルタに採用されており、排ガス処理に広く用いられている。一方、内面ろ過方式は充てん層フィルタとも呼ばれ、比較的厚手のろ材を詰めた充てん層の内部でダストを分離捕集し、主として空気の浄化に利用する。

バグフィルタのろ布材では、新しいろ布に含じんガスを通したとき、ろ材表面に薄い粒子の層（一次付着層、初層）を作らせることが重要な因子となるため、一次付着層を作りやすいことが必要な条件である。

ろ布の材質は天然物、合成繊維、無機質など色々あるが、高温度に弱いものが多く、高湿度やミストおよび粘着性のダストを含む排ガスには目詰まりを起こして適用できない。処理ガス温度が150℃以下で上記の性状が要求される場合は、一般にポリエステル系のろ布が多く利用されている。250℃までは主としてガラス繊維のろ布が多く利用されている。また、最近では耐酸、耐

熱用に黒鉛化繊維，静電気を帯びた高抵抗ダストの処理にステンレス繊維を織り込んだもの，あるいはグラファイト処理したろ布などが用いられている。

各種ろ布材の特性比較を，表5.11に示す。

バグフィルタは，一般的に円筒形のろ布（図5.12参照）を多数組み合わせ，更に幾つかの室で区分した多重型である。含じんガスはろ布の下部から入り，粒子をろ布の内側に分離附着させて清浄ガスとなり，外部へ排出される。この場合，粗い粒子は主として慣性衝突により，微粒子は拡散作用および遮り作用によりろ布に附着し，一次附着層を形成する（図5.13参照）。

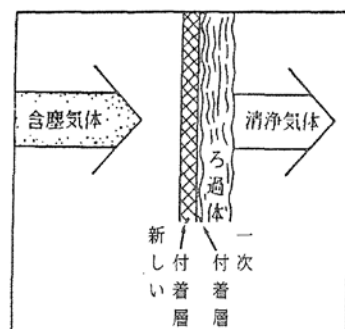


図 5.13 一次附着層の生成

この一次附着層は，曲折した多数の細孔を持ち，この細孔によって微細な粒子の捕集が行われる。従って，バグフィルタではろ布の目詰まりを防ぐため，処理ガス温度は酸露点以上で運転することが必要である。微粒子を有効かつ，定常的に捕捉するため必要な一次附着層の生成には，ろ布の性状見掛けろ過速度を適正に維持することである。見掛けろ過速度 $V_f$ は，次式のように処理ガス量 $Q$ をガスが通過するろ布分布（有効ろ布面積 $A$ ）で除したものである。

$$V_f \text{ (cm/s)} = [ (Q \text{ (m}^3/\text{s)}) / A \text{ (m}^2) ] \times 100 \quad \cdots \cdots (5.26)$$

排ガスの性状や希望する集じん率によって異なるが，一般に $V_f$ の値は10cm/s以下で，微粒子捕捉には1cm/s前後にする。

長時間ろ過を続けると，分離附着した粒子層が厚くなり，ガスの通過量が減退するので，附着したダストの払い落としが必要となる。払い落としには，ろ布を幾つかずつに区分して配置した室を順次1室ごとに処理ガスを遮断して行う間欠式（振動形，逆気流方，洗浄形等）と，一部のろ布の払い落としを順次行っていく連続式（パルスジェット型，リバーシジェット型，ソニックジェット型あるいはパルスジェット型と振動型の併用等）がある。

#### g) 電気集じん装置

電気集じん装置は原理的に微細な粒子の捕集が容易で，ガスおよびダストの性状による影響が少ないため，古くからばい煙の処理をはじめ，有価物の回収，空気調和などに利用されている。

電気集じんでは，平行する極板（集じん極）の中央に高圧（数万ボルト）の直流放電極を置いて通電し，放電

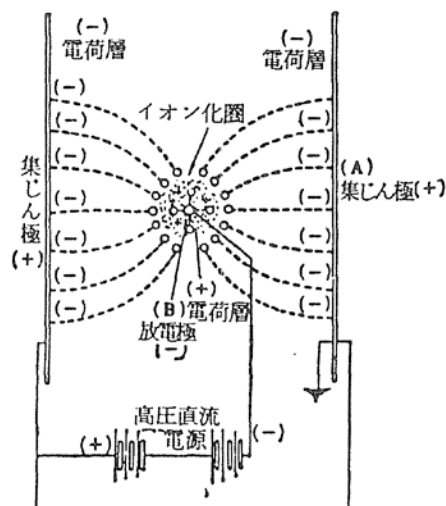


図 5.14 平板型電気集じん機の不等電界

極周辺に正負両符合のイオンを発生させ、通過したダストのイオンを吸着して帯電させる。

ダスト粒子はクーロン力で放電極と逆の極性の集じん極に引き付けられて捕集される。

工業用集じん装置の場合、普通は放電極は負（－）をとる。しかし、この極性でコロナ放電をすると、オゾンや $\text{NO}_2$ などの有害ガスが発生しやすいので、「空気浄化」を主目的とした装置では正（＋）極性が選ばれる（図5.14参照）。

電気集じん装置の集じん率 $\eta$ については、集じん室の幾何学的形態と大きさ、ダストの凝集や再飛散、あるいは処理ガス速度などを考慮すると、集じん率の算定は集じん極の形式によって、次のように示される。

$$\text{平板形の集じん率} \quad \eta = 1 - e^{-w_e \cdot LK/Vb} \quad \dots\dots (5.27)$$

$$\text{管形の集じん率} \quad \eta = 1 - e^{-w_e \cdot LK/VD} \quad \dots\dots (5.28)$$

ここに、 $w_e$ ：移動速度（cm/s）

L：集じん極のガス流方向の全有効長さ（cm）

V：処理ガス速度（cm/s）

b：集じん極と放電極の距離（cm）

D：集じん極の直径（cm）

K：集じん室の幾何学的形態、その凝集、再飛散などによる補正係数

電気集じん装置は、現在実用化されている単体集じん装置では、最も集じん率の高い装置の一つであり、圧力損失が少なく、 $0.1 \mu\text{m}$ 以下の粒子やヒュームを捕集できる。しかし粗大粒子が多く粉じん濃度が高いと集じん率が低下するので、このような場合は、先にプレダスタを用いる。

実際の集じん率は、粒子および集塵極に付着した粒子層の見掛けの電気抵抗率に大きく左右される。このため、ダスト見掛け電気抵抗率を正常領域内（ $10^4 \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ ）に保つ必要がある。また、適正なガス流速値は、乾式では $1 \sim 2 \text{ m/s}$ 、湿式は $3 \sim 4 \text{ m/s}$ 以下である。

#### (4) 集じん装置を構成する機器

##### ① フード (Hood)

フードは、発生した含じんガスや有害ガスを直接集じん装置に導入できない場合に使用する、含じんガス飛散を抑制し吸い集める「囲い」である。開口部の形状は円形および方形で、この部分からの吸い込みによって含じんガスを捕捉し、ダクトを経て集じん装置に送り込む。

有害物発生箇所になるべく近づけ、開口部はガス飛散方向に対向させて設置する。高温ガスならば上向きに、比重の大きい粒子に対しては下方に、それぞれ吸引を行う。発生源に近づけて設置ができない場合は、プッシュプル方式を採用する。プッシュプル方式では、プッシュ（吹出し）フードから吹出した空気、で、分散している有害物質を包み込み、プル（吸込み）フードまで運んで吸引する。

##### ② ダクト

フードで集めた含じんガスや有害ガスを、集じん装置や排ガス処理装置まで運ぶ導管である。



そのため、ガス流が持つ機械的エネルギーが、管内壁の摩擦や、流れの収縮、広がりなどで損なわれないような構造とする。また、管の曲がり部、分岐点（集合点）などをなるべく少なくし、接合部における漏気や抵抗の増大に注意する。

ダクトが含じんガスを集じん装置まで運ぶ速度は、対象物質によって異なる。特に、粒子が管内に沈降・たい積しないために必要な速度（搬送速度）の目安を、表5.12に示す。

表 5.12 搬 送 速 度

粒子の性状	搬送粒子（例）	搬送速度（m/s）
きわめて軽いもの	ガス、蒸気、金属ヒューム、木粉	1.0
中比重の乾燥体	ゴム、ベークライト粉、穀物粉	1.5
一般工業粉じん	サンドブラスト粉、 グラインダ粉、 泥	2.0
重 い 粉 体	鉛、鉄粉、旋盤切屑	2.5
比 重 大	ぬれた粒子（特にぬれた重金属粉体）	2.5 <

### ③ スタック（Stack）、ファン（Fan）およびブロワ（Blower）

スタックは排気筒（煙突）で、排気口からの騒音伝播や、排ガスの拡散を考慮して設置する。

ファンとブロワは集じん装置に含じんガスを導入する送風機（排風機）で、吐出圧力が3.4～4.9 kPa（350～500mmH<sub>2</sub>O）以下をファン、147～196kPa（1.5～2.0 kgf/cm<sup>2</sup>）以下をブロワと呼ぶ。

有害ガスや硬いダストによる羽根およびケースの腐食・摩耗を低減するため、集じん装置の出口側とスタックの間に設置し、吸引式（減圧式）にするのが一般的である。通常、圧力損失が少ない多翼ファン、ラジアルファン、ターボファンなどを用いる。

### (5) 集じん装置選定の要領

集じん装置の選定に当たっては、次項目について考慮する。

- ① 粒子の物性：ダストの粒径分布、付着性、比重、見掛け電気抵抗など。
- ② ガスの物性：ガスの温度、粘度、腐食性、爆発性など。
- ③ 含じん濃度、処理ガス量
- ④ 設備費、運転費など：集じん装置設備費、運転費、運転性、維持管理の難易度、必要な集じん率など。

各種集じん装置の実用性能を、表5.13に示す。

表 5.13 各種集じん装置の実用性能

名 称	処理可能粒 度 ( $\mu\text{m}$ )	基本流速 ( $\text{m} / \text{s}$ )	圧力損失 ( $\text{mm A q}$ )	集じん率 ( % )	設備費	運転費
重 力 沈 降 室	1000 ~ 50	1 ~ 3	10 ~ 15	40 ~ 60	小	小
ル - バ ( 慣性式 )	100 ~ 10	15 >	30 ~ 70	50 ~ 70	小	小
サ イ ク ロ ン ( 遠心式 )	100 ~ 3	10 ~ 25	50 ~ 150	60 ~ 80	中	中
ベンチュリスクラバ(洗浄式)	100 ~ 0.1	60 ~ 90	300 ~ 900	85 ~ 95	中	大
音 波 集 じ ん 機	100 ~ 0.1		60 ~ 100	80 ~ 95	中以上	中以上
バグフィルタ ( ろ過式 )	20 ~ 0.1	0.3 ~ 10	0 ~ 200	90 ~ 99	中	中以上
電 気 集 じ ん 機 ( 湿式 ) ( 乾式 )	20 ~ 0.05	1 ~ 3 0.5 ~ 2	10 ~ 20	80 ~ 99 ~	大	中以上

## 第5節 大気汚染防止技術 (2) — 粉じん

### 1 粉じんの定義

粉じんとは鉱山保安規則によると、「物の破砕、選別、その他機械的処理またはたい積に伴い発生し、または飛散する物質をいう。」と定義されている。同じ粒子状物質でも、ばいじんは「物の燃焼、加熱、あるいは化学的变化により発生する物質」と定義されており、発生状態により明確に区別している。従って、法でいう粉じんには、ヒューム（加熱により発生した蒸気が、大気中で冷却または酸化して再び固体粒子に変じたもの）、すす、煙灰等は含まれない。なお、工学上の分野では、粉じんは固体の粒子状物質の総称であり、ばいじんと区別はない。

### 2 粉じん発生施設および処理施設

#### (1) 粉じん発生施設

粉じんを発生・排出・飛散させる鉱山施設のうち、排出・飛散する粉じんが大気汚染の原因となる設備を指す。その種類、規模、構造、使用および管理の基準（大気汚染防止法 施行規則別表第6）を、表5.14に示す。

#### (2) 粉じん処理施設

粉じん発生を防止する施設で、集じん機および附属するダクト、フード、散水施設等である。

#### (3) 粉じん発生施設に対する法的規制

粉じん発生施設には、ばい煙発生施設とは異なり、次の理由により粉じんの排出基準はない。

- ・ 特定の排出道から排出されることが少なく、排出量や濃度測定が著しく困難、または不可能。
- ・ 粉じん粒子は比較的大きく一般に飛散範囲が狭いので、被害が発生施設付近に限られる。
- ・ それゆえ、環境や人の健康に対する影響が比較的少ない。

### 3 粉じん発生施設における粉じん防止対策（発生源対策）

粉じん発生施設から大気中に排出または飛散した粉じんの捕集は難しい。このため、粉じんの発生源において極力粉じんの発生を抑制し、処理することに重点をおいた粉じん防止対策が必要である。そこで、粉じん発生施設では、表5.14に示す管理基準に適合した粉じん処理施設や粉じん防止対策を実施する。

表5.14 粉じん発生施設と管理の基準

規則	施設名	規模	構造、使用、管理の基準
1	鉱物の貯鉱場、捨石、鉱さい、坑水または排水の処理による沈でん物のたい積場または貯炭場	面積 1,000m <sup>2</sup> 以上	イ 粉じんが飛散しにくい建屋内に設置。 ロ 散水設備による散水。 ハ 防じんカバーでおおう。 ニ 薬液の散布または表層の締固め。 ホ これらと同等以上の有効な措置。
2	坑外設置の破砕機および摩砕機（湿式および密閉式を除く）	原動機定格 出力75kW以上	イ 1のイと同じ。 ロ 1のロと同じ。 ハ 1のハと同じ。
	坑外設置のふるい（湿式および密閉式を除く）	原動機定格 出力15kW以上	ニ フードおよび集じん機の設置。 ホ これらと同等以上の有効な措置。
3	坑外設置のベルトコンベヤ（密閉式を除く）	ベルト幅 0.75m 以上	イ 1のイと同じ。 ロ 1のロと同じ。
	坑外設置のバケットコンベヤ（密閉式を除く）	バケット容積 0.03m <sup>3</sup> 以上	ハ 1のハと同じ。 ニ コンベヤの積込部、積降部にフードおよび集じん機を設置。それ以外の粉じん飛散部分は、上記のロまたはハと同じ。 ホ これらと同等以上の有効な措置。
	石灰石（ドロマイトを含む）の機械消化施設の排出口		イ 集じん機を設置。 ロ 散水設備による散水。 ハ これらと同等以上の有効な措置。

#### 1) 鉱物、土石等のたい積場

鉱物、土石等のたい積場では、風によるたい積物の飛散防止と、積込みおよび積卸し時の発じん防止が重要である。

##### ① 建屋内たい積場

たい積物が比較的小量の場合、飛散しやすい微細な粉体や雨水を避ける必要がある場合、あるいは有害成分を含む場合には、建家内にたい積することが多い。建屋内は、風による飛散が避けられ、積込み・積卸しを含め、粉じん飛散防止は比較的容易である。飛散しやすい粉体では、隙間風が入らない構造とし出入口の構造に注意する。防風壁、防風カーテン、エアカーテンを設置すると、なお有効である。最近、貯炭用にドーム、サイロ、切妻屋根方式の屋内貯炭方式が普

及している（図5.15参照）。

屋内たい積方式の長所は次のとおりである。

- 炭じん飛散，騒音および雨水，散水による排水など環境保全対策に極めて効果的である。
- 風雨，日照による風化，冬季の凍結防止，表面水分の増加防止に有効。
- 荷崩れの心配がなく，積付け高さが高くできるため土地利用効率が高い。
- 受入れ，払出しの自動化が容易である。

一方，次のような短所が考えられる。

- 建設費が高い。
- サイロ方式は，ホッパの詰まりやアーチング現象に対する強制払出しが必要。
- 積込み時の発塵，発生ガス，自然発火（屋外貯炭でも一部同様の防災対策が必要）。

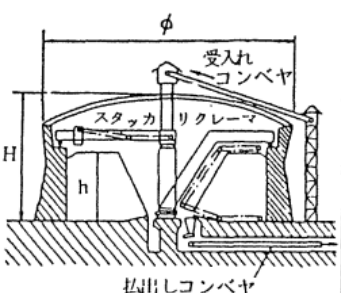
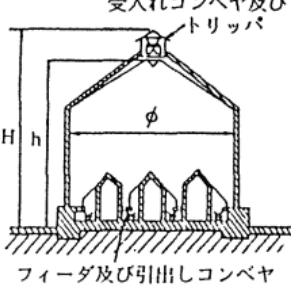
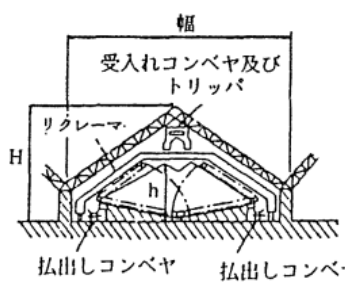
	ドーム方式	サイロ方式	切妻屋根方式
			
概略寸法	容量：15万トン 直径：120mφ、H：50m、 h：20m	容量：10万トン 直径：60mφ、H：90m、 h：80m	容量：20万トン 幅：65m、H：36m、 h：20m、l：500m

図 5.15 屋内貯炭方式例の概略図

## ② 野外たい積

たい積物が大量の場合や雨水を特に考慮しない場合は，野外にたい積することが多い。野外たい積では，風による飛散防止と，積込みおよび積卸し時の発じん防止に重点を置き，年間の主な風向，風速など風の影響を重視して場所を選定する。たい積の形態は，断面が山形か台形状が一般的である（図5.16参照）。なるべく低くたい積する。ただし，低いほど広い面積が必要である。

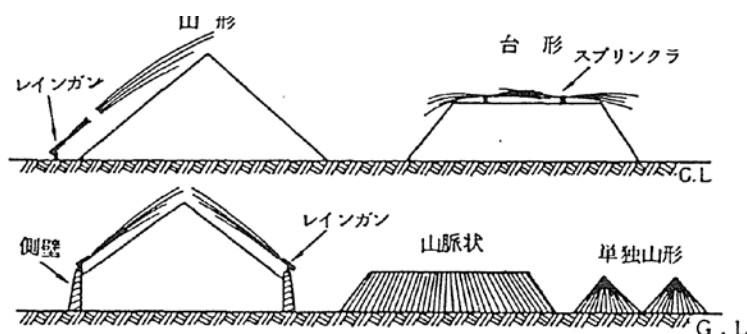


図 5.16 たい積状態の種類

山形状たい積場では、散水設備の能力を考慮すると、高さは最高20m位が限度である。単位面積当たりのたい積量を増すためには、側壁（高さ2～5m）を設ける。

台形状は、風の影響が少なく、表面を押し固めることができる利点があるが、小形のブルドーザなどが必要である。

表 5.16 主な粉粒体の安息角（度）

粉粒体の種類	石灰石（粗粒）	石灰石（粉碎物）	砂 利(球)	砂 利(破碎)
安 息 角	25	47	30	40

たい積側表面の傾斜角は、安息角以下になるようにし、たい積場の崩れ落ちによる発じんを防ぐ。主な粉粒体の安息角を、表5.16に示す。

## 2 破碎機，摩砕機およびふるい

### ① 密閉建屋内設置

粉じんが飛散・流出しにくい密閉建屋内に機械や装置類を設置することが、粉じん防止対策の基本である。建屋内の粉じんが操業上や作業環境上問題となる場合は、発じん箇所へ散水、防じんカバーまたはフード設置による集じん対策をとる。建屋全体をフードとして集じんする建屋集じん方式もある。ただし、建屋容積が大きいと、発じん源に対する十分な制御風速が難しくなる。

### ② 散水設備

発じん箇所付近に孔あき散水管，シャワー散水器，あるいは噴霧器（スプレー）などを設置し，鉱石を破碎機等に給鉱する前に散水して湿らせる（与湿）方法と，破碎等によって生じた粉じん雲に散水して沈静させる方法とがある。与湿方式が一般的で効率が良い。

### ③ 防じんカバー

発じん箇所だけを覆う局部的密閉方式で，建屋密閉しにくい場所に適用する。適切な制御風速が得られるならば，集じんのフードとして用いる。

### ④ フードおよび集じん方式

最も効果の期待できる防じん対策で，散水と併用するとさらに有効ことが多い。

フードにより含じん空気を吸引する場合の原則は，

- フードをなるべく発生源に近づける。
- 発じん部を局所的に吸引する。
- フードの開口面積を小さくする。
- エアカーテンやシャッターを活用する。
- 十分な捕捉速度を維持する。
- 能力的に余裕のある送風機を選ぶ（通常30％程度の余裕），などである。

作業別によるフードおよび集じん機の選定例を，表5.17に，破碎機，摩砕機，ふるいに適用するフードの形式例を，各々図5.17，図5.18および図5.19に示す。

表 5.17 作業別によるフードおよび集じん機の選定

作業の種類	対象設備	フード形式	集 じ ん 機 の 種 類
粉碎，混合	粉碎機，ミキサ	囲い形，側方形	① サイクロン＋バグフィルタ
ふるい分け	各種ふるい分け機	同 上	② バグフィルタ
袋詰，梱包	袋 詰 機 包 装 機	側方形，下方形 囲い形，側方形	③ 洗浄集じん機 ④ サイクロン
輸 送	バケットコンベヤ ベルトコンベヤ 運 搬 車	囲 い 形 同 上 同 上	この他，電気集じん機もあるが， その使用例は極めて少ない。 通常バグフィルタが最も多く用 いられる。
鉱山，採石	カッタドリル	囲い形，側方形	

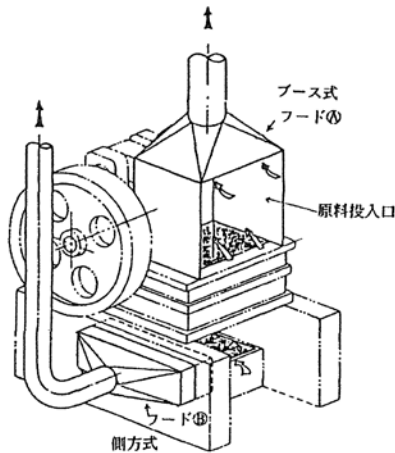


図 5.17 破碎機(ジョークラッシャ)

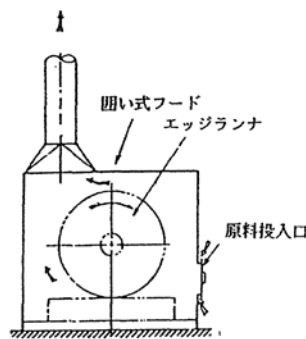


図 5.18 摩砕機

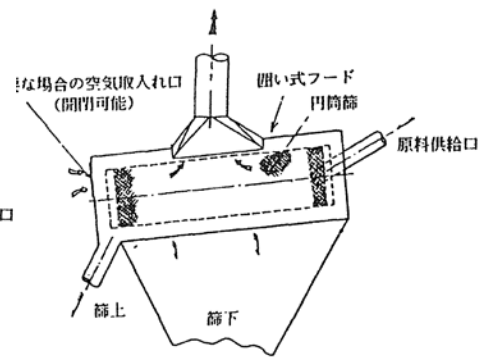


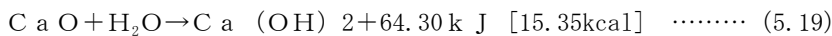
図 5.19 ふるい(回転式)

### 3) 石灰石（ドロマイトを含む）の消化施設

#### ① 発じん源

生石灰または苦土生石灰（ $Mg \cdot CaCO_3$ ）を消和（水和）して消石灰（ $Ca(OH)_2$ ）または苦土消石灰（ $Mg \cdot Ca(OH)_4$ ）を製造する装置を消化施設という。

生石灰から消石灰への消和反応は，次式で示す発熱反応を生じる部分（消化機）と，末消和部分の反応を成長促進させ，あるいは余剰水を蒸気として放散させる部分（熟成槽）から成る。



反応によって発生した水蒸気に，微小消石灰あるいは未反応の微小物が付随して大気中に飛散し，浮遊の状態に至る。中でも消化機内における発じんが量的にも，また飛散速度の点でも著しく大きい。

#### ② 防じん・集じん対策

消化施設で発生する粉じんは，微粒子が多く，粉じんおよび随伴空気が水分を多く含み，強い

アルカリ性を示す。

集じん機には、微粒子捕集能力の優れた機種が必要である。ただし、消和反応を良好な状態で完了させるためには、発生熱と発生水蒸気を大気中に逃すことなく、十分に利用しなければならない。このため、集じん操作に必要な強制通風は消和反応を妨害するため、適用が難しい。

### ③ 機械消化装置

機械消化装置は自動消化装置ともいわれ、完全密閉槽形で、消和に必要な用水を集じん用シャワー排水により供給する（図5.20参照）。シャワーから上向きに噴射された水が、装置右端上段に落ち、サービスタンクから供給された生石灰に添加されて消和が始まる。以下スクリーコンベヤで攪拌・混合を3段にわたって繰返して製品（消石灰）として排出（右端・下段）する。

添加水供給と粉じん捕集用スプレーを兼ねた機械消化装置を、湿式集じん機という。また、このような形式の消化装置を湿式集じん機付き消化装置と呼ぶ。

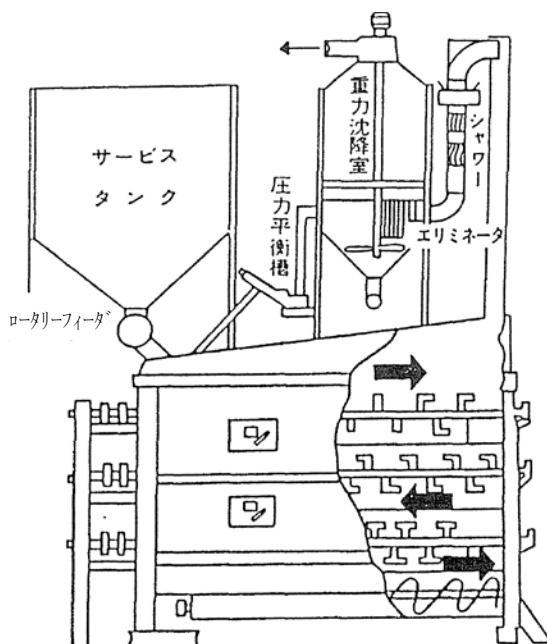


図 5.20 石灰自動消化装置（秩父式の例）

## 4 露天採掘および積込み等における防塵対策

### 1) さく岩，発破，積込み作業

- ① さく岩機（クローラドリル等）は集じん機付きのものをを用いる。
- ② 爆破された原石を下段に落とすオープンシュート工法は行わない。粉じん防止の立場からは、切羽造りの初期、搬出路完成までのごく短期間以外、この方法をとるべきではない。
- ③ 積込時バケット操作はなるべく低位置で行う。大き目の積込機を用いて爆破物の移動回数や機械の操作回数を減らすよう心がける。
- ④ 発破に係る粉じんは、現実的には発生防止対策がない。このため、発破は、一般に一時的であるため、風向、風速、その他煙や粉じんの拡散に係る気象条件、発破時刻などの考慮、爆破物崩落高さの縮減（ベンチ高さの低減化）、過装薬等による爆破物の過粉碎防止などに取り組む。

### 2) 運搬・搬出路対策（トラック等使用時）

- ① 路面の固化および平滑化を計る。道路幅員や曲率半径は十分に余裕を持たせ、トラックの運転性を向上させて荷くずれを防止する。
- ② 路面固化の方法として散塩がある。これは塩などの吸湿性物質が大気中の水分を吸収して潮解

する現象を利用し、粉じんを湿らせ固着させるものである。降雨量、降水頻度が少なく、凍結しやすい地域の道路防じんとして効果が期待できる。

- ③ 非舗装道路は散水を主体とした対策を行う。道路際にあらかじめスプリンクラ等の散水器を設置しておき、遠隔操作で散水を調節する方法もある。
- ④ 車両の洗浄。最も簡単な洗車装置としては通路にピットを作り、これに水をためた方式（ため水式、貯水式）のものがある。ただし、洗浄水の交換を怠ると、かえって微細泥を外部に持出す結果になるので注意を要する。

### 3) 植栽および緑化帯

植栽による防じんは、ともすれば美観調整の効果の域を出ないことが多かった。しかし、

- ・最低限2列植えとする。
- ・喬木(きょうぼく：高木)と灌木の組合せを採用する。
- ・最低4～5mの高さまでを覆う。

などの配慮をすれば、防じんスクリーンとしての効果が出る（図5.21参照）。ただし、芝生は粉じんの再飛散防止に効果はあるが、浮遊粉じんの漏えい・拡散防止効果はほとんど望めない。

## 5 漏煙・漏じん防止技術

漏煙・ばい煙の発生施設には、それぞれ煙突、煙道、集煙フード、集じん装置などが設置され、漏れガス、粉じんの発生を極力少なくするよう設計・設備されている。

粉じんの発生しやすい箇所はできる限り密閉構造とし、工程、設備の特性上密閉が不可能な箇所はフードと集じん機を設けて粉じんの排出を防止する。また場内、工場床面にこぼれた粉鉱石、粉じんは、風で飛散しやすいのでスイーパーなどで清掃し常に取り除く。

漏煙、漏じんの主な発生箇所とその防止対策の概要を、表5.18に示す。

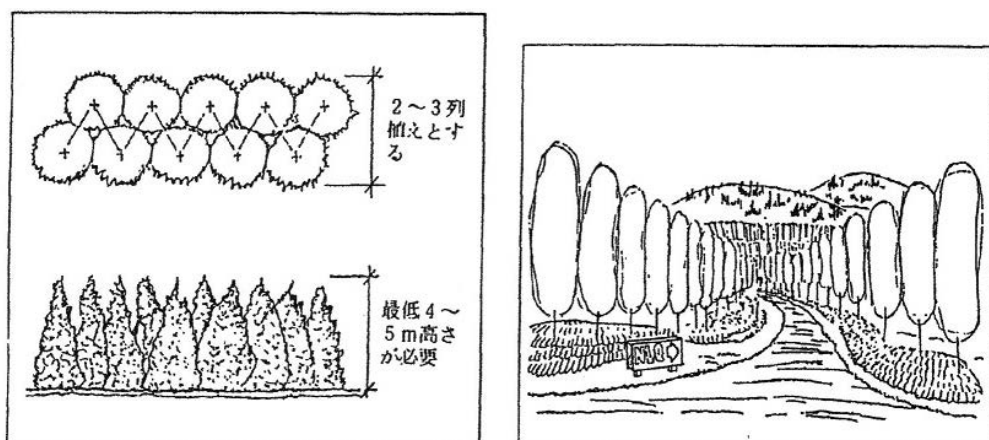


図 5.21 防じんスクリーンとしての植栽例



表5.18 漏煙，漏じん発生箇所と防止対策

工 程	発生箇所	防 止 対 策
選 鉱	破碎機，摩鉱機，篩機，コンベヤ	散水，防じんカバー，集じん設備 機器の湿式化，密閉化
原 料 荷 揚	船内ハッチ，アンローダ，ショベルカー，ダンプトラック，ホッパ，搬送コンベヤ	散水 コンベヤカバー取付，集じん設備 ダンプトラックシートカバー取付，密閉式運搬車 ホッパ密閉にエアカーテンの使用 ダンプトラック車輪洗浄設備
貯 鉱 (原料，中間品)	貯鉱場，搬送コンベヤ，スタッカ，ショベルカー，リクレーマ	貯鉱舎の建設，散水 塩ビシートなどによるカバー セメントまたは有機物による表面コーティング コンベヤカバー取付，パイプコンベヤ 集じん設備 スーパーによる床面清掃
石灰消化施設	消化機 その他	散水 局所排気および集じん設備，排ガス処理施設 建屋の密閉 スーパーなどによる床面清掃
廃 滓	たい積場 その他	散水 塩ビシートなどによるカバー 覆土植栽

## 第6節 測定技術

### 1 大気中の粉じん濃度・量および粒径分布の測定方法

大気中の粉じんには，降下ばいじんと浮遊粉じんがある。前者は比較的大きい粒子が沈降してたい積したものであり，後者は微細な粒子が大気中に長時間浮遊しているものである。大気汚染防止法では，粒径 $10\mu\text{m}$ 以下の粒子を「浮遊粒子状物質」と規定し，環境基準の濃度と測定法を定めている。

#### (1) 降下ばいじんの測定方法

降下ばいじんは，法の規制はなく，測定法も規格化されていないが，古くから大気汚染の指標として広く測定されている。

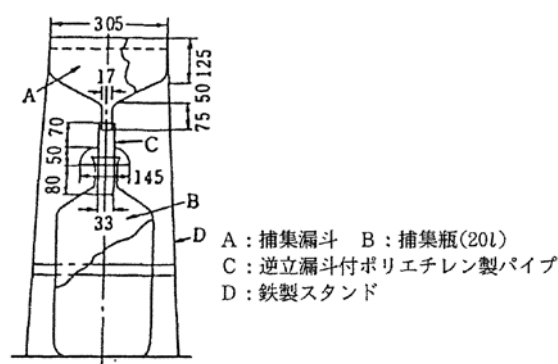


図 5.22 国産デポジットゲージ (mm)

通常、1か月間測定器を野外に置き、自然に沈降する降下ばいじん粒子を、雨水とともに容器に受けて捕集する。測定器には、デポジットゲージまたは簡単なバケツ形のダストジャーがある(図5.22参照)。捕集した試料は水溶性と非水溶性のばいじんを合わせ、 $t/\text{km}^2 \cdot \text{月}$ の単位に換算して表示する。

## (2) 浮遊粒子状物質(浮遊粉じん)の測定方法

大気汚染防止法では、浮遊粒子状物質の環境基準等(質量濃度)の測定に、ろ過捕集法、光散乱法、圧電天びん法、および $\beta$ 線吸収法を用いることを定めている。

### 1) ろ過捕集法

粒径 $10\mu\text{m}$ 以上の粒子を分離する分粒装置(多段沈降板または小形サイクロン)を通して大気を吸引後、 $10\mu\text{m}$ 以下粒子をろ紙に捕集する。分粒装置付のローボリュームエアサンプラ(L.V)が広く用いられる(図5.23および図5.24参照)。通常、大気を $20\text{ l}/\text{min}$ の吸引流量で48時間以上吸引して、ろ紙に捕集した浮遊粒子状物質を天びんで秤量し、吸引した空気量から質量濃度を求める。ろ紙の秤量は、湿度50%の状態ですべて一定時間放置した後に行い、24時間の平均値を求める。

一方、粒径を制限しない浮遊粉じんの測定器では、ハイボリュームエアサンプラ(H.V)が広く使用されている。ろ紙は大形の $20 \times 25\text{cm}$ を用い、吸引流量は約 $1.5\text{ m}^3/\text{min}$ で、24時間大気を吸引後、ろ紙を秤量し質量濃度を求める。H.Vは降下ばいじんを除くフィルタ付のものが多く、各種分粒装置付のH.Vもある。なお、捕集した試料は濃度の他金属成分等の化学分析を行う。

L.VとH.Vは、機能的に短時間測定が難しい。このため、環境基準など1時間値の連続測定が必要な場合には、以下の3測定法を用いる。

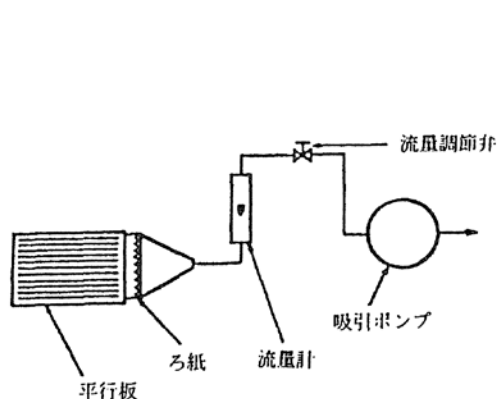


図 5.23 ローボリュームエアサンプラの構造図(平衡版付)

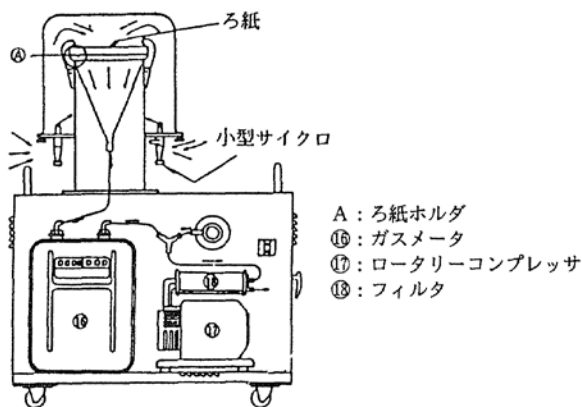


図 5.24 ローボリュームエアサンプラの構造図(小型サイクロン付)

### 2) 光散乱法

吸引した大気に、光束を投射して得られる散乱光量を光電子増倍管により電気量に変換し、相対濃

度を測定する。分粒装置はない。質量濃度への換算は、 $L \cdot V$ の同時測定値から補正係数を算出して求める。測定器の構成を、図5.25に示す。

### 3) 圧電天びん法

圧電素子（水晶発振子）の表面に、粉じんを静電捕集により付着させると、発振周波数が減少するが、この場合付着した粉じんの質量と周波数との間に直線的比例関係があり、周波数の変化を測定することにより、質量濃度を求める

ことができる原理を利用したもので、測定感度は極めて高く、 $180 \text{ Hz} / \mu\text{g}$ 前後である。 $1 \text{ l/min}$ の吸引流量で、 $10 \mu\text{m}$ 以上の粒子を除く分粒装置のインパクタ（慣性衝突の原理を利用した細塵計数計）を通して大気を吸引し、圧電素子上に粒子を捕集して周波数の変化を測定する。

### 4) $\beta$ 線吸収法

ろ紙に捕集した粉じんの $\beta$ 線吸収量を測定して、質量濃度を求める。通常 $20 \text{ l/min}$ の吸引流量で大気を吸引し（ $10 \mu\text{m}$ 以上の粒子を除く分粒装置を通す）、テープ状のろ紙（幅 $3 \text{ cm}$ ×長さ $60 \text{ m}$ ）に捕集し、捕集前後の $\beta$ 線吸収量を測定して、質量濃度を求める。 $\beta$ 線源は $100 \mu\text{Ci}$ 以下の $^{14}\text{C}$ （半減期 $5,000$ 年）または $^{147}\text{Pm}$ （半減期 $2$ 年）を用い、 $\beta$ 線の検出器にはGM管、シンチレーションカウンタ（電離放射線計数装置）などを用いる。現在、浮遊粒子状物質の質量濃度の測定に最も多く使用されている。

## (3) 浮遊粉じんの粒径分布の測定方法

大気中の浮遊粉じんおよび排ガス中ダストの粒径分布の測定には、その濃度が中～大の場合は、慣性衝突を利用したカスケードインパクタ法の測定器が多く使用され、一方、濃度が低い場合は、光散乱法を利用した粒径分布の自動測定器が広く使用されている。

### 1) カスケードインパクタ法

空気または排ガスを、小さなノズルから捕集板（ガラス板など）に向かって高速で吹きつけ、慣性力でその中の粒子を捕集板上に衝突、分離捕集する測定法。ノズルの口径を次第に小さくした数段のインパクタ（計数装置）から成り、吹き付け速度を次第に大きくして、下流ほど微細粒子を分離捕集する。各段で捕集した粒子の質量を天びんを用いて秤量し、質量基準で粒径分布を求める。JIS K 0302「排ガス中のダスト粒径分布の測定方法」（1989）では、本法が採用されており、測定範囲はおおむね $0.005 \sim 30 \mu\text{m}$ である。

浮遊粉じん用のアンダーセン式エアサンプラを図5.26に、各段の粒径測定範囲を表5.19に示す。

### 2) 光散乱法

光散乱法の測定原理を利用し、粒子に対する散乱光のパルスの計測と波高分析により、粒子の個数と粒子の大きさを自動的に測定する。粒径の測定範囲は $0.1 \sim 20 \mu\text{m}$ で、個数基準で表される。最近

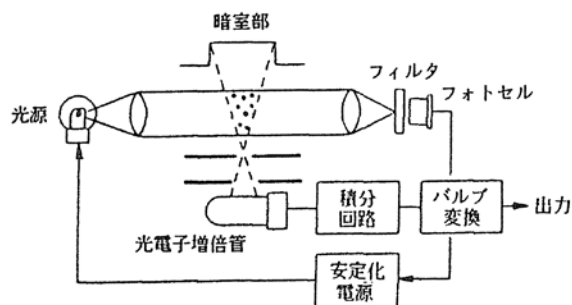


図 5.25 光散乱式浮遊粉じん測定法の構成

は、光源にレーザを用いるものが増えている。

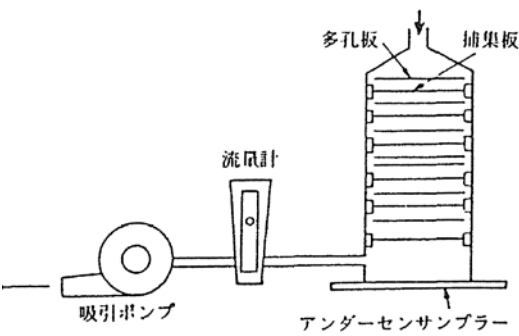


図5.26 アンダーセン式サンプラの構造

表 5.19 アンダーセン式エアサンプラの  
各段の粒径測定範囲

ステージ数	粒径範囲 (μm)
0	～ 9.0
1	～ 5.8
2	～ 4.7
3	～ 3.3
4	～ 2.1
5	～ 1.1
6	～ 0.7
7	～ 0.4
バックアップ	0.4 ～