

大型集塵機採用の背景

集塵機のニーズ

- じん肺防止対策
- 環境意識の向上
- ISO-14000 環境管理
(CO₂ 削減)
- ISO-16000 労働環境
(環境改善)
- 近隣環境の保全
- 農産物被害防止
- 建設イメージの向上
- 建設コスト削減
- 厚生労働省・ずい道等建設
工事における粉塵に関する
ガイドラインの制定

集塵機の導入

導入の効果

- 坑内環境の清浄化
- 坑外への粉塵公害防止
- 視界改善による事故防止
- 作業員の定着率向上
(習熟効果=作業効率向上、事故率低下)
- 送風量低減・ファンの少容量化
ファン電力コストの大幅削減
- 坑内騒音の静音化
- 坑壁汚損防止
- ディーゼル車吸気フィルターの延命
- ガイドライン対応
(切羽から 50m 以降 3 mg/m³ 以下に清浄化)

粉塵処理の案件

1. 粉塵の特性

- (1) 石英岩、砂岩等は、 SiO_2 (結晶質シリカ、遊離珪酸) 含有率が非常に高く危険です。
- (2) 粒子径は、 $0.5\sim 2\mu\text{m}$ が中心粒子径となる微細粒子で自然沈降時間は1時間以上必要です。
- (3) 粉塵量は大きく変化しますが、吹付時の実績は $13,800\text{ mg/min}$ の測定値でした。
- (4) 吹付粉塵は SiO_2 含有率は4.5%と少なく、ほとんどセメント粒子です。
但し、シリカフェーム含有の場合は、 SiO_2 含有率がそのまま含有率となるので危険になります。
- (5) ディーゼル排ガスのSPM(浮遊粒子状物質)が大量に発生し、その量はトンネル内で発生する浮遊粉塵の半分以上にも達します。

2. 許容濃度

人体に対する吸入性粉塵($7.07\mu\text{m}$ 以下)の許容濃度は、以下のように規定しています。

- (1) 遊離珪酸率による吸入性粉塵の許容値(日本産業衛生学会)

$$M = \frac{3.0}{0.59Q + 1} \text{ mg/m}^3$$

Q : SiO_2 (結晶質シリカ) 含有率

M : 許容濃度

Q=50%のとき → 0.1 mg/m^3 以下 Q=100%のとき → 0.05 mg/m^3 以下

吹付粉じん Q=4.5%のとき → 0.82 mg/m^3 以下

- (2) 粉塵濃度目標レベル(厚生労働省・ずい道等建設工事における粉塵に関するガイドライン)

粉塵濃度目標レベルは、換気装置の効果を確認するための規準になります。

工学的に現状達成可能な目標レベルとして吸入性粉塵 3 mg/m^3 としています。

(じん肺防止のための許容濃度は第一種粉塵で 0.5 mg/m^3 、遊離珪酸含有率50%で 0.1 mg/m^3)

当面目標の 3 mg/m^3 も換気技術の向上により達成が容易となった時点では、更に目標レベルは強化されることが予想されます。また、切羽から 50m 地点で 3 mg/m^3 とは、常時防塵マスク着用を義務づけ、作業員の吸入量を 0.15 mg/m^3 以下に抑制し、作業員への粉塵曝露を低減させるためのもので、発生源である切羽部から後方坑内全域の汚染の拡散を防止することをねらっているものです。

3. 対策方法

坑外からのクリーンエアを取入れ発生した粉塵を大量の新鮮空気で希釈拡散する方法は、物理的に、また経済的に困難となります。

トンネル内壁を大きなフードと見立て、粉塵を拡散させず切羽からダクト吸引し集塵機で清浄化、処理する方法が合理的で、PUSH-PULL(汚染空気を吸引し清浄空気で置換する)を効率的に行う方法です。

集塵機は、掘削断面積に適合した容量(処理風量)と処理された空気の清浄度が高いことが重要となります。

4. 集塵機の要件

- (1) 清浄度(mg/m^3)

集塵機通過後の清浄度はできるだけ大気塵($0.05\sim 0.07\text{ mg/m}^3$)に近い清浄度が求められ、遊離珪酸含有率の高い時の許容濃度 0.1 mg/m^3 以下が最低保証される必要があります。

- (2) 処理風量(m^3/min)

定格風量, 最大風量

- (3) その他

- ・ 所要動力(消費電力)
- ・ 運転騒音
- ・ 重量, 寸法
- ・ メンテナンス

集塵機の容量選定

トンネル集塵機の容量は、ほぼ施工長や粉塵量に関係なくその断面に作用します。
 粉塵の封じ込めを行う粉塵制御風速(=坑内風速)によって集塵機の処理風量が設定されます。
 その制御風速(坑内風速)は、集塵工学書では 0.2~0.5m/sを設定しています。
 また、換気における坑内風速と同様の基準量であり、以下のような提案がなされております。

建災防指針 推奨値	0.3	m/s	
国際トンネル協会 安全施工指針	0.17	m/s	
諸外国の基準	0.2~0.3	m/s	
英 国	0.2166	m/s	
米 国	0.25~0.5	m/s	

これらのデータをもとに、国内ではTBM用集塵機およびNATM用大型集塵機の容量を決定しており、実績値は

TBM	: 日本道路公団	φ5mクラス	0.25	m/s	
		導水路	φ2.3~5.5	クラス	0.2~0.3 m/s となっています。
NATM:		60~100 m ² クラス	0.3~0.4	m/s	

NATM工法では、重機の排ガス希釈等の所要換気量に対して 集塵風量が 0.25 m/s以下では集塵バランスが不完全となり、後方の清浄度に支障をきたす場合があるため、坑内風速を 0.3 m/s以上確保できる集塵容量が必要になります。

V=0.3 m/sとすると、一般的なトンネル断面の例では

$$\begin{aligned}
 Q &= A \cdot V \\
 &= 75 \text{ m}^2 \times 0.3 \text{ m/s} \times 60\text{s} \\
 &= 1350 \text{ m}^3/\text{min}
 \end{aligned}$$

よって、集塵機の性能は以下の能力となります。

処理風量	: 1350 m ³ /min 以上
清浄度	: 0.1 mg/ m ³ 以下保証

先端集塵換気システム Q&A

(2002 改訂)

Q1. なぜ集塵機が必要か

トンネルの粉塵発生源はほとんど切羽に集中しているので、ここで 100%クリーンにできればトンネル換気が合理的にできます。

Q2. なぜ粉塵対策が重要か

トンネルの作業環境の測定結果では、有害ガス(NOx)はズリ処理中でも 3~4ppm であり時間加重平均濃度は許容値(25ppm)を大きく下回っているのが現状で、さらに今後規制が強化され、よりNOx低減化する見通しです。

これに対し、粉塵の時間加重平均濃度は許容値の 4~6 倍と危険な状況です。

防塵マスクの着用はもちろんですが、環境を改善して曝露を最小限に押さえる必要があります。

厚生省粉塵ガイドラインでも、じん肺防止を目指しより一層の清浄化が求められ、ますます集塵機の需要が多くなっております。

また最近、トンネル坑口周辺の環境保全も求められ清浄化対策はますます必要になってきています。

Q3. 粉塵の許容濃度は

厚生労働省で 2000.12 月に、ずい道内の吸入性粉塵許容濃度として 3 mg/m^3 以下とガイドラインで制定されました。

これを受け建災防換気技術指針では、吹付コンクリート施工時の粉塵希釈風量は 137 現場の測定データを元とした統計的算出法 $\text{掘削断面} \times 90 \text{ mg/min/m}^2 \times \text{粉塵低減率}$ の式で算出となります。

ちなみに発破粉塵量は換気時間により違い、機械掘削・ずり出し時の粉塵量は不定であるとして希釈風量計算は現在では定められておりません。

このように現状では、許容値をクリアするためには膨大な希釈風量が必要になります。

Q4. 吸入性粉塵とは

人体に有害な $7.07 \mu\text{m} \sim 0.5 \mu\text{m}$ の粒子径の粉塵を吸入性粉塵と言います。

ちなみに肺胞への粉塵沈着率は $1 \mu\text{m}$ 前後がピークとなっています。

$1 \mu\text{m}$ 粒子の自然沈降速度は 0.07 mm/s (1 メートル沈降するのに 4 時間かかる)なので、トンネル内の浮遊粉塵はほとんど吸入性粉塵と言えます。

また、デジタル粉塵計は $7 \mu\text{m}$ カットフィルターがついており、吸入性粉塵を計測するようになっています。

Q5. トンネルはどんな粉塵環境か

各作業中の浮遊粉塵濃度(吸入性粉塵)の、平均的な換気量($1200 \text{ m}^3/\text{min}$)での測定値

吹付粉塵	$1 \sim 11.5 \text{ mg/m}^3$	$1200 \sim 13800 \text{ mg/min}$
発破	2000 mg/m^3 (ずり量当たり)	一過性
機械掘削	$5 \sim 20 \text{ mg/m}^3$	$6000 \sim 24000 \text{ mg/min}$
ずり処理	$1 \sim 10 \text{ mg/m}^3$	$1200 \sim 12000 \text{ mg/min}$

Q6. 捕集効率・除塵効率と清浄度の関係は

$$\text{捕集効率} = \frac{\text{捕集粉塵量}}{\text{発生粉塵量}} \times 100(\%)$$

トンネルの場合は切羽付近の内空をフード(囲い)として見なし、吸引風量で PUSH-PULL(送気-集塵バランス)の流れを作り捕集効率を高めることができます。

トンネル断面風速が制御風速となり、 $0.2 \sim 0.3 \text{ m/s}$ 以上が必要です。

$$\text{除塵効率} = \left(1 - \frac{\text{集塵機出口濃度}}{\text{集塵機入口濃度}} \right) \times 100(\%) \quad \text{JISB-9909}$$

除塵効率が高いほど効率が上がりますが、トンネルでは空気清浄装置と同様に集塵機出口クリーン度の保証が重要になります。
 ようするに、除塵効率がいくら 100%近くの好成績であっても入口濃度が高い分、出口濃度も高いようでは数字の見かけだけであって、実用的ではありません。
 よって、トンネル内の環境浄化のためには入口濃度がどんなに高くても大気塵(0.07 mg/m³)並に処理できるようなクリーン度が不可欠です。
 ちなみにPシリーズの出口濃度は0.03~0.05 mg/m³となっています。

Q7. 他の集塵方式は

集塵機各種比較	清浄度(7 mg/m ³ 処理時)	運転動力	メンテナンス
湿式(水処理式)	2~6 mg/m ³	水処理方式により大小	濁水・ドレン処理を怠るとトラブル・汚染(毎日)
	大きい粒子の荒い粉塵をある程度低減させるものについては適しているが、人体に有害な微粒子に対してはほとんど効果がなく、濁水処理・メンテナンスが大変。		
電気式	2~6 mg/m ³	圧損が低い分小さい	人為的に水洗浄・濁水処理(毎日~毎月)
	小さい粒子で濃度が低い粉塵に対して最適。濃度が高い粉塵(2 mg/m ³ 以上)を吸引すると浄化性能を望めなくなる。トンネル用で清浄度を求める場合、放電極・集塵極の面積拡大と吸引動力の増大が必要となる。また、高電圧によりオゾン、NO ₂ の有害ガスが多量に発生する。		
弊社乾式Pシリーズ(フィルター)	0.03~0.05 mg/m ³	圧損が低い分小さい	30,000h以上メンテナンスフリー ダスト排出は毎1~6ヶ月
	清浄度・メンテフリーである事からトンネルには最適。常時フィルター再生により風量は安定。吸引ファン圧力・動力に余裕があり、吸引ダクト方式や集塵機排気ダクトの延長や低床型構造化等の応用が利く。インバータ・ダストセンサでの自動運転により電気代が大幅に省エネとなる。		

トンネル集塵機の条件とは...

- 清浄度が高いこと (常時 0.1 mg/m³ 以下が保証できるか)
- フィルター清掃等のメンテが不要であること (30,000H 以上メンテナンスフリー)
- 大風量処理ができること (送風量 ÷ 70~90%)
- 経済的であること (消費電力、運転騒音、寸法、連続耐久、ダスト処理費)

Q8. NOxなどの有害ガス対策は

集塵機フィルターでは微粒子が対象ですので、有害ガスは処理できません。
 ただし、粉末活性炭をフィルターコーティングさせる事により、NOx・CO・アンモニア等のガスや臭気が吸着され、低減化が可能です。
 これは弊社のダイオキシン吸着、VOCガス吸着の技術をトンネル用に応用したものであり、吸着効果を持続させるため、新しい粉末活性炭をフィルターコーティングさせる粉体自動供給装置もオプションで用意しています。
 またトンネル粉塵の場合、フィルターには排気ガスの「すす」が常時滞積するので特別な措置をとらずともNOxは20%は低減する事が分かっています。

Q9. どんな粉塵でも問題ないか

トンネル内の吹付セメント粉塵やディーゼル黒煙も全く問題なく使用できます。
 ただし、雲のように霧がかかった飽和状態の水蒸気飽和空気や油煙のみを常時吸引させるといった用途には向いておりません。
 粉塵はフィルター表面に積層していき、そのままでは目詰りしますが、一定間隔の衝撃波パルスによりプレコーティング層を残して積層粉塵は常に剥離され続けます。
 またフィルターはポリエステル繊維を熱圧着した成形フィルターで水洗いもできます。
 弊社のフィルターは、セメントミルクプラント、温水生コン、アスコンクラッシャー、精米用など、付着力の強い粉体でも実績があります。

Q10. 集塵機の設置方法は

粉塵を拡散させないためにはできるだけ切羽直近に設置するのが望ましいですが、坑内重機などのレイアウトによりどうしても後方になる場合があります。
 (1)機械堀削の場合、堀削ドラム近くに吸引ノズルを設けフレキホース、サイクロン、ブースターファン

- を掘削機に搭載し、ダクトで集塵機へ導入する方法が考えられます。(=実績有り)
- (2) 吹付・ずり出し他作業の場合は、吸引ダクトか誘引ファンで集塵機に誘引する方法があります。
(=吸引ダクト方式特許取得【第3883483号】)
- (3) 集塵機による封じ込めは PUSH-PULL を利用しますが、換気流は慣性(空気量×風速)があるためこれを静止させ、PUSH-PULL(車風によるエアカーテン)を確実にする工夫が必要です。静止させるゾーンは、トンネル等価値径の5倍以上を確保し PUSH-PULL の形成が効果を上げています(集塵機の放風ダクトを50m後方に伸ばす、または集塵機吸引ダクトが50m以上)
- (4) 送気風量は、集塵機風量の70~90%に設定します。
送気用ファンとの風量差を作るため集塵機との連動運転が必要です。送気用ファンもインバータを使用されていますと連動・自動制御ができますので操作が非常に楽にできます。

Q11. コスト的なメリットは

前述のように集塵換気方式では、送風量は必要最低限ですむため大幅なコストダウンができます。送気ファン損料やダクト費用もありますが、電気料金が大きく節減できます。2000m級の試算では、機器設備費用を差し引いても2千万円以上のコストメリットがあります。この他に重機類のクリーナーエレメントなど、メンテ費用の低減、内壁汚損の低減など副次的効果もあります。

Q12. ランニングコストは

Pシリーズのランニングコストは、消耗品がほとんど無いため電気代だけとなります。細かく述べると、集塵機フィルターは30,000H交換・掃除が不要(実績)であるため、INV・comp 消耗品、滞積ダストの処理だけがメンテナンス費となります。発生粉塵量にもよりますが、通常滞積ダストは、毎月~半年に一回位でかき出しをします。処理はよく、ずりと共に搬出されるか、インバートに埋め戻しを行われる事が多いようですが、滞積ダスト内に油や有害物質が多く含まれる場合は、産廃処理等の別途処理が必要な場合があります。電気代は消費される動力によって決定されます。各機種別の風量に対してのモーター動力は大きく余裕を持たせる設計としてあるため、吸引ダクト・本体形状変更等への余力があります。また、標準がインバータ制御でありますので必要に応じた風量制御を行なうと省エネ(動力は風量(=運転周波数)の3乗に比例)となり、ダストセンサーを付けて自動運転(オプション)を行なう場合は、粉塵量によって細かく自動制御されるため積算電力は大きくおさえられます。

RE-1000P	(37kW×2)	→	運転実負荷	50kW	→	自動運転時平均動力	15kW
RE-1500P	(55kW×2)	→	"	75kW	→	"	22kW
RE-2000P	(80kW×2)	→	"	110kW	→	"	33kW
RE-3000P	(150W)	→	"	120kW	→	"	35kW

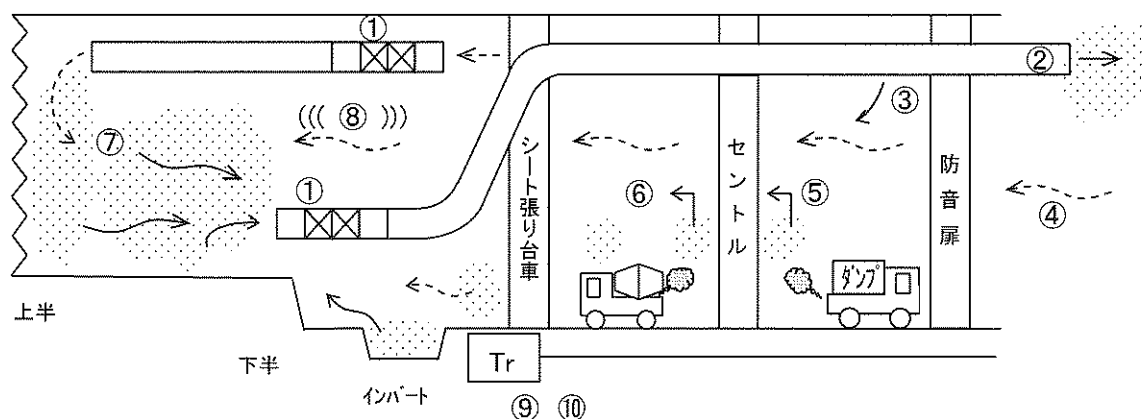
Q13. 送・排気方式との比較

送・排気方式は集塵機と同様、切羽の粉塵を坑内に拡散させない点では共通するものの、多くの問題があります。

- (1) 坑道入気のため坑口付近は清浄なもの、切羽方向へ排ガス・巻き上げ粉塵・インバートとセントルの打設粉塵などが逆流するため、汚染が累積・滞留し、切羽に近づくにつれ汚染がひどくなる。
- (2) 排気ガスを含んだ濃度の高い粉塵を、新鮮な空気として切羽に送気せざるを得ない。
- (3) 切羽への送風循環ファンが必要で坑内騒音が大きくなる。
- (4) ダクトの漏風を見越した大きな風量のファンが必要で、動力、電気料、ダクト資材費、換気台車など大幅なコスト高になる。
- (5) トンネル周辺への環境汚染が問題になる。
- (6) 盛替えに手間がかかる。

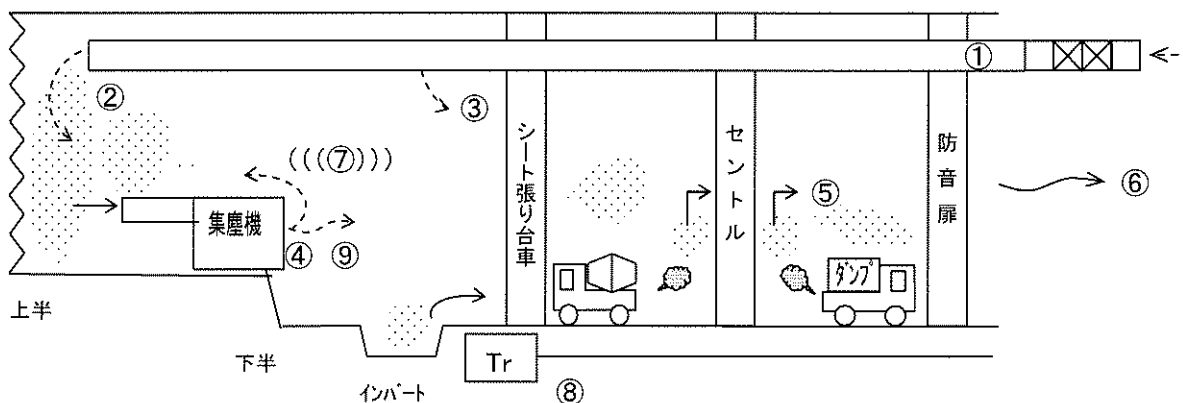
換気方式の比較

【送・排気方式】



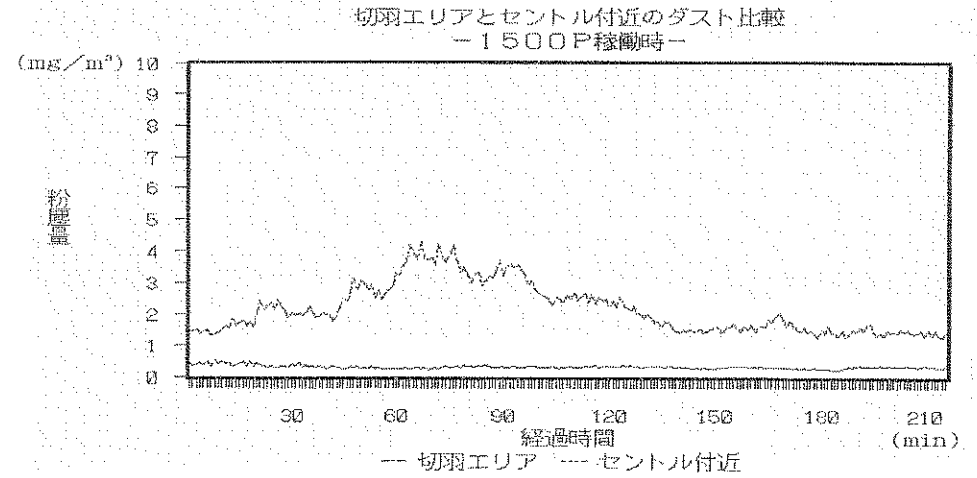
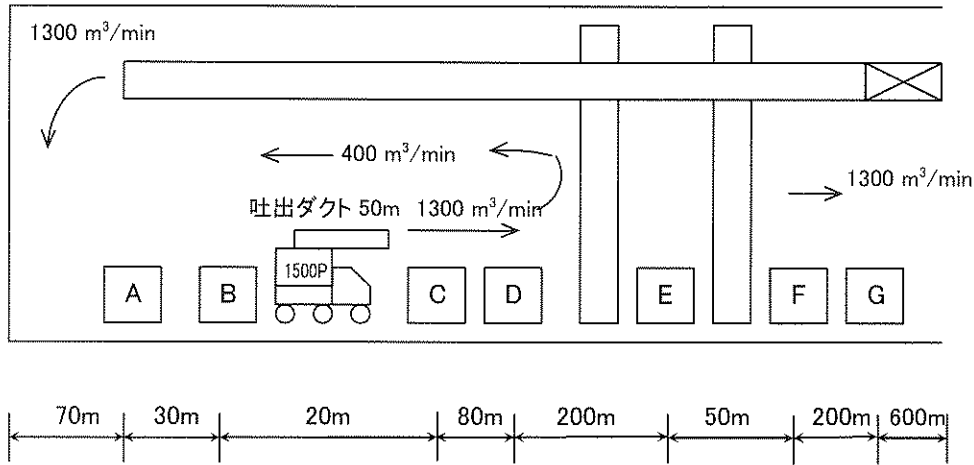
- ① 送気循環ファンと漏風を見込んだ大型の排気ファンが必要になる。
- ② 坑内より汚染空気を排気するため近隣住民、農産物の被害が発生する。(警報発令濃度 2 mg/m^3 をはるかに超える)
- ③ 汚染空気がダクトより漏風し、循環する。
- ④ フレッシュエアは坑口より入気する。
- ⑤ ダンプ、ミキサー車の煤煙が累積されフレッシュエアが汚染される。
- ⑥ セントル打設のディーゼル煤煙がさらに累積されフレッシュエアが汚染される。
- ⑦ 排ガス、漏風が逆流するため切羽に近付く程汚染され、切羽が晴れない。(ガイドライン保守困難)
- ⑧ 大型ファン、循環ファンが集中し、坑内騒音対策が必要となる。(84dB(A) 以内保守)
また、サイレンサーの劣化目詰りが激しい。
- ⑨ 坑内に大型ファンを設置するためダウントランス、ケーブルなど電力設備費用が up する。
- ⑩ ファン、制御盤、トランスなどの共通台車が大がかりになり架設費が up する。
また、電源ケーブル、ダクトの展伸作業が大変である。

【大型集塵機吸引・捕集方式】



- ① 基本的には、有害ガスに対する所要風量を満足するファンですみ、容量が送・排気方式より小さくなる。
- ② 切羽にはフレッシュエアが送られ急速に回復できる。
- ③ 漏風はクリーンであるため漏風率をあまり勘案する必要はない。
- ④ 大型集塵機で 100%捕集・清浄化されるのでリフレッシュエアを再利用し坑道換気する。
- ⑤ セントル打設、ずり処理などディーゼル煤煙は坑口方向に排気され、防水シート工、セントル工は常に清浄に保つ。
- ⑥ 坑口の排気濃度は送・排気方式より非常にきれいで近隣被害の恐れがない。
- ⑦ 集塵機本体はサイレンサー構造となっているため坑内騒音は排気方式よりかなり静音化している。
- ⑧ 坑内の電力負荷が小さいため電力架設費や総動力コストが安くなる。
- ⑨ 11t 車マウントで架設が容易でコストも安く、ダクト、ケーブルの展伸も容易である。
- ⑩ 切羽直下での集塵により、ガイドラインを容易にクリア可能(集塵機+吸引ダクトまたは切羽設置により)

先端集塵換気システムによるダスト低減効果(城端トンネル例)/全断面/発破掘削の場合



<吹付作業中>

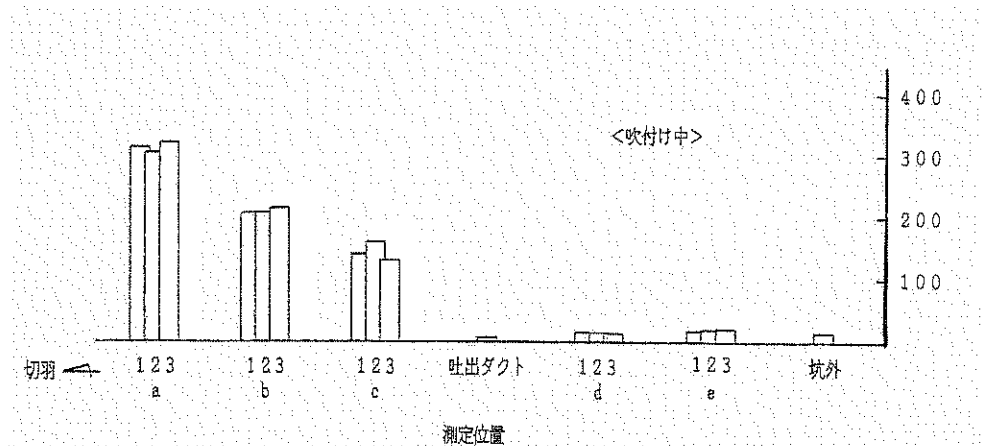
柴田化学 デジタル粉塵計 P5-H₃ (CPM)

A	B	C	D	E	F	G
317	209	142	15	18	-	-

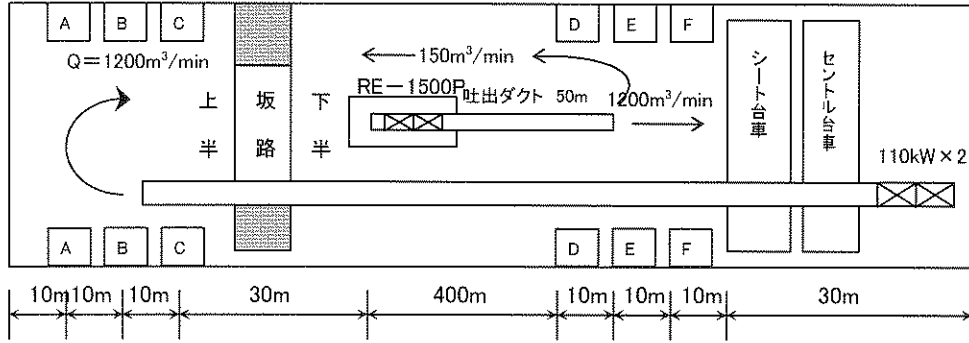
参考 K 値 0.0068 を用いて換算した粉塵濃度

測定器バックグラウンド値...8 (mg/m³)

A	B	C	D	E	F	G
2.10	1.37	0.91	0.05	0.07	-	-



先端集塵換気システムによるダスト低減効果/上半先進/機械掘削の場合

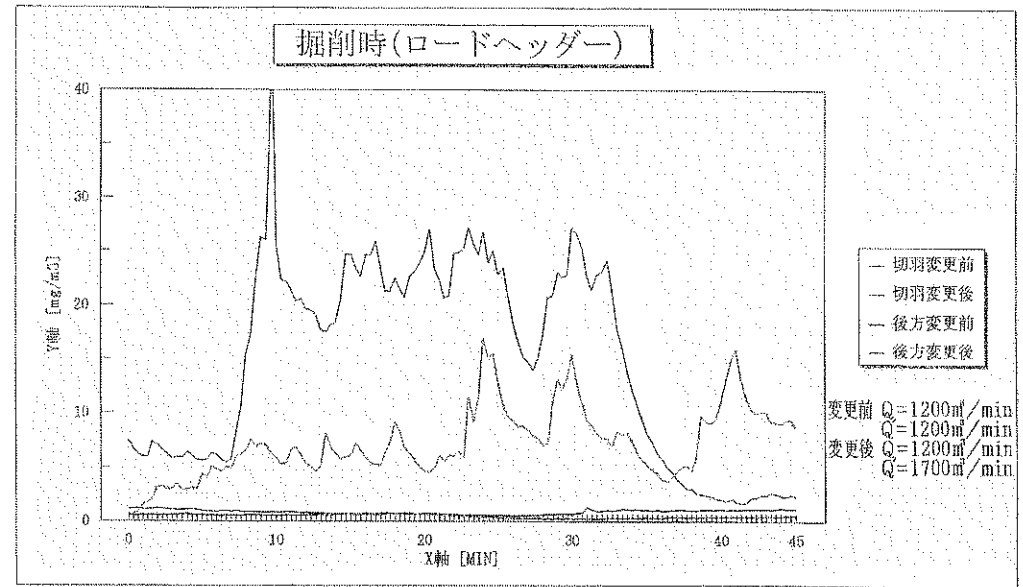
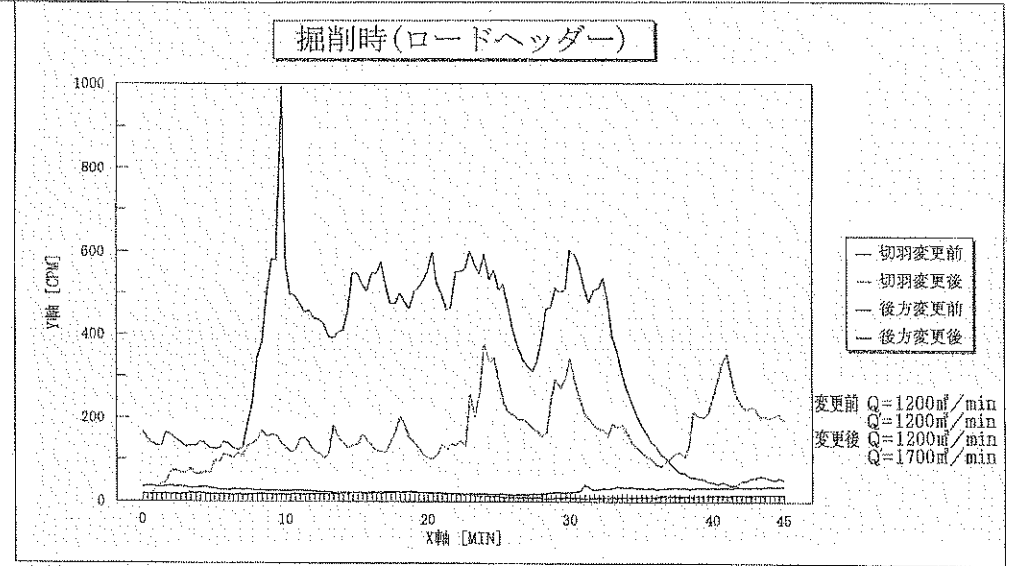


[CPM] 柴田化学デジタル粉塵計 P5-L (1-後方/切羽) × 100

作業状況	計測地点		後方側 (DEF)		低減(捕集効率)	
	切羽側 (ABC)	後方側 (DEF)	平均值	最大値	平均值	最大値
掘削 A (ロードヘッダー)	328	994	23	39	92%	96%
掘削 B (ブレーカー)	85	256	21	35	75%	86%
コンクリート吹付	158	907	19	30	87%	96%
ずり積込・搬出	221	623	22	30	90%	95%
最高濃度 (ブレーカー掘削+ずり出し時)	228	1000以上	17	31	92%	96%以上

[mg/m³] 柴田化学デジタル粉塵計 P5-L (1-後方/切羽) × 100

作業状況	計測地点		後方側 (DEF)		低減(捕集効率)	
	切羽側 (ABC)	後方側 (DEF)	平均值	最大値	平均值	最大値
掘削 A (ロードヘッダー) (切羽:K=0.045, 後方:K=0.033)	14.76	44.73	0.76	1.29	94%	97%
掘削 B (ブレーカー) (切羽:K=0.063, 後方:K=0.033)	5.36	16.13	0.69	1.16	87%	92%
コンクリート吹付 (切羽:K=0.030, 後方:K=0.055)	4.74	27.21	1.04	1.65	78%	96%
ずり積込・搬出 (切羽:K=0.064, 後方:K=0.077)	14.14	39.87	1.69	2.31	88%	94%
最高濃度 (ずり出し+ブレーカー掘削時) (切羽:K=0.073, 後方:K=0.033)	16.64	73以上	0.56	1.02	96%	98%以上

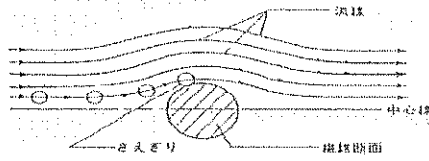


粒子捕集メカニズム

粒子が繊維に捕集されるメカニズムは、以下の5機構に大別されます。

実際には、これらが総合に作用しています。

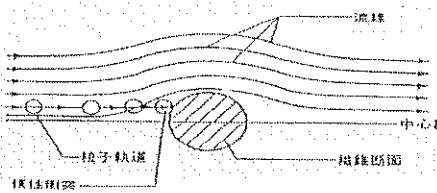
1. さえぎり 湿式



バップル 10 μm まで

慣性、ブラウン運動が無視できる場合の機構です。粒子が気流の流線にそって移動し、繊維表面から1粒子半径以内に達したとき、繊維に接触して捕集されます。粒径が大きいほど、また繊維径が細かいほど、この効果は顕著です。

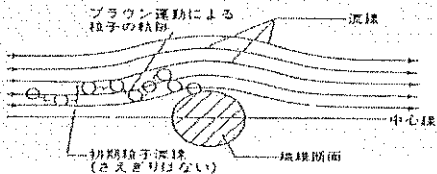
2. 慣性 湿式



サイクロン 5 μm まで

粒径が大きく流速も速いとき顕著となる機構です。流線が繊維近くで急激に変化すると、粒子は慣性のために流線を離れ、繊維に衝突して捕集されます。

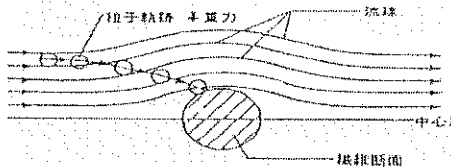
3. 拡散 乾式



1 μm 以下

粒径が小さく、繊維径が細かいほど、そして流速が遅いほど顕著となる機構です。粒子が繊維によってさえぎられない流線上を移動しているときや、繊維を通りすぎてしまった場合でもブラウン運動(ブラウン拡散)によって繊維に接近して捕集されます。

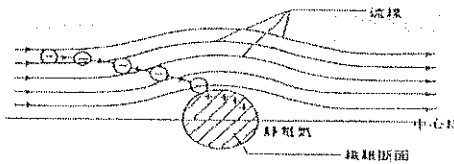
4. 重力沈降



10 μm 以上

粒径および比重(密度)が大きく、流速が遅いとき顕著となる機構です。重力により、粒子が流線から離れ、繊維に衝突して捕集されます。

5. 静電気 電気集塵機



2mg/m³ 以上の粉塵量だと処理できない

粒子、繊維の一方あるいは双方が帯電しているときに顕著となる機構です。粒子は静電気効果により、繊維に引き寄せられて捕集されます。

捕集理論の引用： オーム社『空気清浄ハンドブック』日本空気清浄協会

静止媒体中におけるブラウン運動の平均移動距離

粒径 D_p (μm)	空気中 (μm)	
	ブラウン運動の距離 (λ)	重力沈降の距離
0.1	29.4	1.73
0.25	14.2	6.30
0.5	8.92	19.9
1.0	5.91	69.6
2.5	3.58	400
5.0	2.49	1,550
10.0	1.75	6,090

産業・工業界バグフィルタについての実態調査の結果

(社)日本粉体工業技術協会によるアンケート調査結果

(a)機種別の割合

集塵機の名称	使用台数 台	使用割合 %
1)バグフィルタ	4,661	81.7
2)電気集塵機	219	3.8
3)湿式集塵機	467	8.2
4)その他集塵機	359	6.3
計	5,706	100.0

(b)ろ布の種類

種類	割合 %
1)織布	55.5
2)フェルト	44.5

(c)ろ布の形

ろ布の形状	割合 %
1)円筒	81.3
2)封筒	18.7

大型集塵機の採用状況 (2005.5月末現在)

