

進化するトンネル換気技術

西村 章

トンネルの換気技術は、トンネルじん肺訴訟やトンネル粉じん対策のガイドラインを踏まえ急速に進んできたが、現状では経済性を優先し対策が形骸化している状況も散見される。

トンネルの機械化施工、高速長距離化に伴い換気設備はますます重要性を増しており、粉じんの有害性の知見による規制強化、CO₂削減など新たな課題も出ている。

本報文では、最新の換気技術と今後予想される換気技術をとりまく動向について紹介する。

キーワード： 吸引捕集方式、吸引ダクトシステム、結晶質シリカ、フィルター式集塵機、清浄度

1. はじめに

トンネル工事では大気の 100 倍近い高濃度で粉じんに曝露するため現在もトンネルじん肺は発生しつづけており、トンネル工事に携わる者にとって最大の健康リスクであると同時に国家的損失でもある。

今年は第三次トンネルじん肺訴訟がはじまり、トンネル坑内の環境改善をあらためて認識・対策を進めていく必要があるが、最近の低価格入札などによる経済性優先の要求から対策技術が後退している局面も見られる。

国はじん肺対策に取り組み、2000 年 12 月に厚生労働省が「ずい道等建設工事に関するガイドライン」を示し、2002 年 3 月に建設労働災害防止協会「ずい道等建設工事における換気技術指針」を全面改訂し、これが現在の設計・計画・施工・管理の基本となっている。これらの取り組みにより、換気技術は大きく進展し、坑内の環境改善が格段に進んだ。

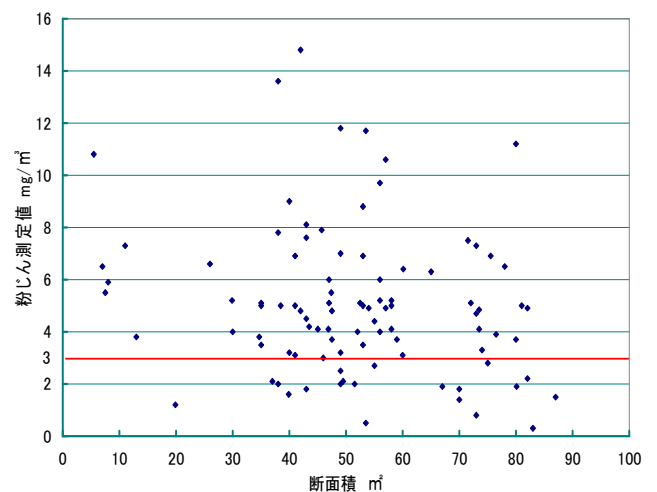
一方、工事の大型化・機械掘削の増加、AN-F0 発破の増加、トンネルの長大化などにもなう新たな課題も発生している。

特に、機械掘削粉じんや発破粉じんに含まれる遊離けい酸 (SiO₂; 結晶質シリカ) の粉じんは、アスベストと同じ発ガン物質 **A1** に区分され、許容濃度もガイドライン制定時より 5 倍も厳しく依然として健康リスクが内在している。

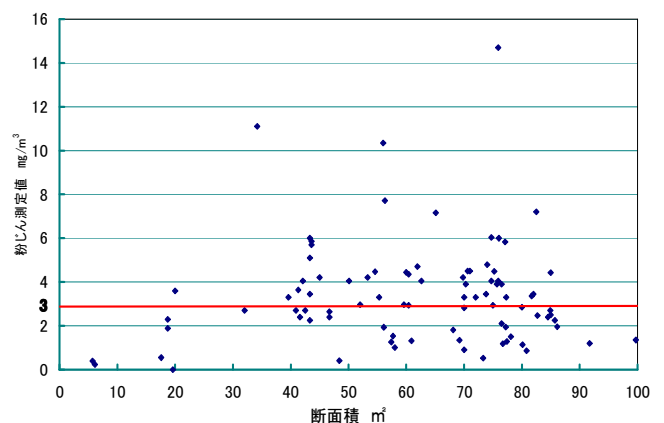
本報文では、「ガイドライン」前後の換気・環境の状況と最近の換気技術の課題を分析する。また、最新の換気技術の紹介と今後の開発動向について説明する。

2. 「ガイドライン」後の現状

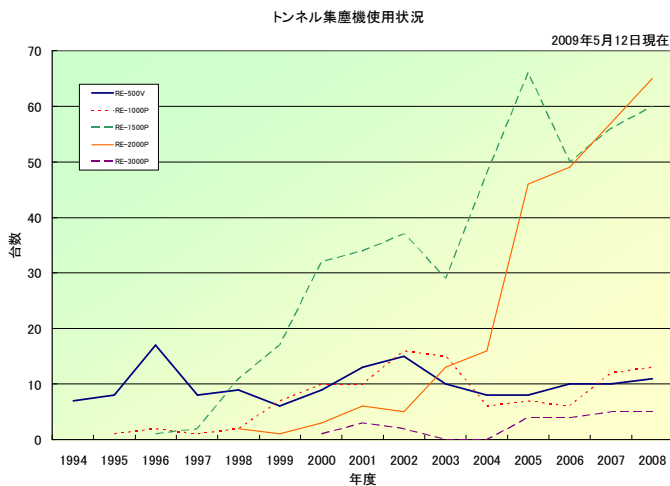
トンネル粉じん対策の「ガイドライン」に基づき、発注者・施工者の共通の目標として環境改善が進んだ。代表的なコンクリート吹付粉じんの調査データを比較する。



「ガイドライン」以前 1998 年建災防調査データ



「ガイドライン」後 2005 年日本建設機械化協会データ



「ガイドライン」の粉じん濃度目標値 $3\text{mg}/\text{m}^3$ に対して「ガイドライン」以前は $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以上が約 80%であったが、2005 年の調査では $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下が 50%と、かなり改善が進んだことがわかる。

大型集塵機の採用件数推移は、「ガイドライン」に前後して急速に普及が進み、 $2000\text{m}^3/\text{min}$ クラス、 $3000\text{m}^3/\text{min}$ クラスが主流になっている。

一方、2005 年の調査からもわかるように、未達成が 50%もあり、トンネル粉じん対策は多くの障害があることが判りその要因として以下のことが上げられる。

- ① 粉じん対策が良好な現場が多く出ている一方、対策が不十分な現場もあり大きな開きが見られる。
- ② データーでは「 $3\text{mg}/\text{m}^3$ 」付近に集中しており、数値のみが一人歩きし「 $3\text{mg}/\text{m}^3$ 」を少しでも下回れば良しとするような経済合理性が優先している。
(粉じん濃度目標レベルは換気設備の良否判定)
- ③ 大型換気設備（ファン・集塵機・ダクト）の損料・電気量・維持費など経済的な負担が大きい。
- ④ 拡散希釈方式が多く採用されているが粉じん発生量が多い場合、限界がある。
- ⑤ 技術指針では機械掘削時の粉塵対策について具体的方法を提示していない。

3. 換気技術の課題

(1) 粉じん低減対策の基本

工学的に粉じん対策の優先順は、以下のように実施することが基本であり、効果が高く経済的である。また、トンネル生産システムの作業にできるだけ支障のない対策を講じる必要がある。

発生源対策

粉じんの発生量そのものを減少させる対策

- ・ 液体急結剤、粉じん低減剤、
- ・ スラリーショット、エアレス吹付
- ・ 含水爆薬、スリット工法
- ・ 排ガス対策



拡散防止

発生エリアを封じ込め拡散を防止し、少ない風量で対策することができる

- ・ 風門、間仕切カーテン
- ・ 吸引排気、伸縮移動風管
- ・ 集じん機、エアカーテン



拡散・希釈

大風量の新鮮空気希釈換気し、安全レベルに濃度を薄める

- ・ 大風量送風
- ・ 局所拡散ファン

(2) 封じ込め効率の向上

トンネル粉じん対策も同様であり発生場所からの拡散防止を優先する。

集じん対策では「拡散防止」対策と「清浄化」対策を区分して考えることが重要で、切羽の対策は「拡散防止」対策を効果的に実施することが重要である。

ある機関の調査では、集塵効率の高い大型換気設備を導入したにもかかわらず、封じ込め効果が弱く、半分程度の清浄化効果しか得られていない現場が半数であった。

一般的に切羽の気流環境は、送風ダクト先端からの強い噴流により大きな運動エネルギーを与えられ坑口方向への気流は乱流域にある。

ここに集塵機単体を設置した場合、集塵機の捕集効果は低くなるばかりでなく、集塵機の出口ノズル噴流によるジェットファン効果が作用し、かえって汚染を拡散する結果となっている。

弊社で研究した流体シミュレーションの結果からも、送風ダクト先端の噴流による乱れは切羽後方 80~100 mでやっと収束する結果となり現場での計測結果と一致する。

集塵機の採用に際しては、封じ込め効率を高めるためのシステムが不可欠である。(エアカーテンダクト、放風減速ダクト、間仕切カーテンなど)

(3) 清浄度の確認

換気技術指針では、集塵機の要件について「微細な吸入性粉じん（粒径 $7.07\mu\text{m}$ ~ $0.5\mu\text{m}$ ）に対しても捕集効

率は少なくとも95%以上」としている。トンネル集塵機は一般工場用と異なり処理した吐出空気を坑道内換気として二次利用することから、大気レベルにきれいに清浄化することが望ましい。

トンネル内で発生する粉じんは、多様・特殊・苛酷であり集塵機の性能は安定した清浄化機能を維持する必要がある。

最近の調査によると、集塵機の採用比率は、フィルター方式83%静電気方式15%スクラパー2%であった。

客観的知見でフィルター方式と静電気方式の特性を比較する。

	フィルター式	電気式
原理	<p>大面積のフィルターに通気させフィルター表面に吸着ろ過する方式</p> <p>付着したダストを断続的にエアパルスで払い落とし、通気抵抗が増大しないような自動クリーニング機能が装備されている</p>	<p>空気入口で放電極により気体中の粉塵粒子を帯電させ、その後方にある逆帯電極の集塵極に静電クローン力で付着させる方式</p> <p>集塵極板にダストが付着し積層すると、クローン力が弱まり集塵効率が低下するため間欠的に集塵極の洗浄が必要</p>
特長	<p>大気と同レベルの高い清浄度で安定した風量が得られメンテナンスフリーで信頼性が高い</p> <p>フィルター通気抵抗が電気式より大きいためファン動力が大きい(2000m³/min 定格負荷は81kW)</p>	<p>通風抵抗が少ないためファン動力がフィルター方式の約半分(2000m³/min 定格負荷は43kW)</p> <p>集塵効率は運転時間経過と共に効率が急速に低下する</p>
集塵特性	<p>① 集塵効率は99%以上と高く安定した運転ができる</p> <p>② 出口清浄度は入口粉塵濃度にかかわらず大気レベルの0.1 mg/m³以下を保証している</p> <p>③ 高濃度粉塵でも全く問題なく安定して清浄化できる</p> <p>④ フィルターに添着したゼオライトやダストによりNO₂など有害ガスが吸着され清浄化される</p> <p>また、活性炭粉体の添加によりANFO発破後のアンモニアガスも清浄化できる</p>	<p>① 集塵効率は初期80%からダスト保持で60%以下に低下するなど安定しない(6~10Hで限界)</p> <p>② 発破粉塵、機械掘削粉塵など高濃度の粉塵は効果が小さい</p> <p>③ 原理的に導電率の高いスス粒子は捕集されない、⊕負荷をもつため、履工後のトンネル内壁や機械に付着し汚損する</p> <p>④ 高電圧印加のプラズマにより、有害なオゾンが発生している(2ppm前後>許容値0.1ppm)</p>
換気効果	<p>① 高い清浄度のため透明感のある視認距離を得られ、坑内全域が清浄化できる</p> <p>② ファン圧力に余裕があり、エアカーテンダクトによる粉塵の封じ込めができる</p> <p>③ 坑外への粉塵流出が押さえられるため環境への負荷が少ない</p>	<p>① 出口濃度が高く、リフレッシュエアとして使えない集塵風量、送気風量ともフィルター方式に較べ30%以上大きく設定する必要がある</p> <p>② 坑外へ粉塵が流出する恐れがある</p> <p>③ 洗浄再生に90分/回(2~3回/日)かかるため稼働率が低下する</p>
ランニングコスト メンテナンス	<p>① ダストは断続的に自動クリーニングされ、3~6ヶ毎に機外へ排出処分される</p> <p>基本的に運用時はメンテナンスフリーである</p>	<p>① 濁水設備への負荷が増加、処理費用が発生する</p> <p>② 集塵極セルはセメント成分急結剤などによりスケールが付着、2~3ヶ月毎に薬品洗浄が必要である、放電線の交換も必要である</p>

4. 希釈換気から封じ込め換気へ

(1) 希釈方式の限界

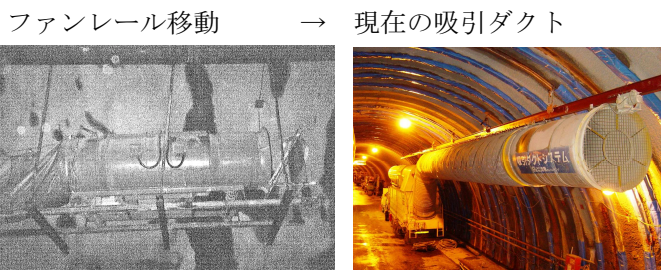
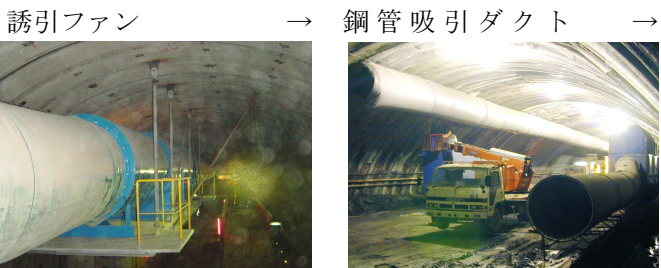
建災防・換気技術指針の計算例では、拡散希釈方式を示しているため大多数の現場では所要風量を拡散希釈により算定し換気設備を計画している。

ディーゼル排出ガスなど有害ガスに対する所要風量よりも粉じんの所要風量は大きく、粉じん濃度目標レベルの $3\text{mg}/\text{m}^3$ を下廻る希釈風量で算定されている。

コンクリート吹付量の増大や機械掘削粉じんなど発生量が多い場合は大風量希釈となるため、換気ファンや集塵機は設備可能な物理限界に達している。

(2) 封じ込め方式の開発経緯

切羽で発生する粉じんの拡散防止の取り組みは最も効果的であることから、制約が多い現場の理解を得ながら試行錯誤を重ね開発してきた。



作業が輻湊する切羽直下から粉じんを吸引・捕集し後方の集塵機で大気レベルに清浄化する「吸引ダクトシステム」は厚生労働省の「好事例集」(H14 年度)にも取り上げられ、すでに 50 現場を越える実績となっている。

(3) 吸引ダクトシステムの開発

吸引ダクトシステム(特許取得)は 2002 年に開発以来改良を進め、現在 SUPER LIGHT として完成度を高めてきた。

① 吸引ダクトの開発コンセプト

- ・切羽でのトンネル生産システムに支障がないこと
- ・切羽面から 1.5D 以内に接近できるシステム
- ・ジャンボ、吹付ロボット、積込機の待機スペースを

確保すること

- ・勾配・急曲線に対応できること

② SUPER LIGHT の開発

SUPER LIGHT は従来型を見直し、徹底的な軽量化と現場運用性を重視し、今後の普及を目指し転用性や仮設コストなどの大幅な改善を目標とした。

	従来型	SUPER LIGHT
総重量 (100m)	11,000kg	5,000kg
負圧耐圧 $\phi 1500$	2kPa	3kPa
収縮率	1/4	1/5
圧力損失	1.5kPa	1.2kPa
伸縮スピード	15m/min	36m/min
最小半径	200R	150R
上り勾配	3%	5%

開発に当っては、伸縮ダクト(製法特許)は PC 鋼線から FRP コイル及び軽量フレームガイドに変更、固定管は亜鉛メッキ鋼板から強化プラスチック製に変更するなど重量を半減し、運搬・仮設コストの低減及び落下リスクを大幅に軽減した。

また駆動部は飛石、粉じん、漏水を考慮したレール下面摩擦駆動方式を開発して、0.4kW モーターで 400kg f のけん引力を確保しつつ、大幅な軽量化、高速化が実現した。

また超軽量ダクトによってオーバーハングノズルを標準化し無支持で 15m 切羽側へ接近でき、より効果的な吸引・捕集が可能になった。



オーバーハングノズル付



レールシステム

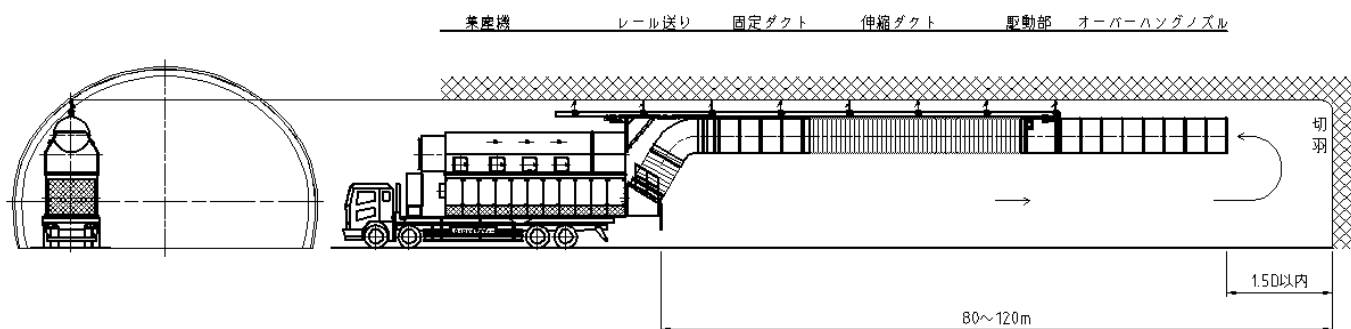
(4) 吸引捕集方式のメリット

- ① 所要風量は粉じん希釈から有害ガス希釈に置き替り換気設備がコンパクトになる。
- ② 粉じん対策と有害ガス対策を分けて処理するため換気対策の大幅な省エネになる。
- ③ 発破作業では、粉じん低減待機時間が大幅に短縮し、生産性を高める。また肌落ち災害防止に役立つ。
- ④ 機械掘削作業では切削ドラムが視認できるため余掘が減少し経済的。(NO_x, CO)
- ⑤ ずり出し作業ではディーゼル排出ガスのばく露を低減できる。またコンベア工法のクラッシャー粉じんも一括して捕集できる。

- ⑥ 吹付作業では粉じん低減剤が不要でコンクリート品質に専念できる。
- ⑦ 上半、下半、インバートなど各作業の形態に合わせて吸引口を移動、対策できる。

(5) 換気方法の比較

目標濃度の強化によって、従来の換気設備ではコストアップになるが、吸引捕集方式では、粉じん量によらず、トンネル断面積に依存するため、コストはほとんど増えない。また、省エネルギーに大きく貢献する。計算例を以下に示す。



管理濃度の強化による換気設備比較

目標濃度	3mg/m ³ の場合		2.5mg/m ³ の場合		2mg/m ³ の場合	
換気方式	吸引捕集	拡散希釈	吸引捕集	拡散希釈	吸引捕集	拡散希釈
必要風量	1,395m ³ /min	1,733m ³ /min	1,395m ³ /min	2,070m ³ /min	1,395m ³ /min	2,575m ³ /min
ファン動力	80kW×2	110kW×2	80kW×2	110kW×4	80kW×2	110kW×4
集じん機能力	2,000m ³ /min	3,000m ³ /min	2,000m ³ /min	3,000m ³ /min	2,000m ³ /min	1,800m ³ /min×2
総動力	320kW	370kW	320kW	590kW	320kW	660kW

モデル：発破工法 2,000m 75m² 算定方法：建災防「ずい道建設工事における換気技術指針」による

5. トンネルの環境技術

(1) ディーゼル排出ガス規制と換気設備

坑内で発生する有害ガスは、ディーゼルエンジン排出によるものが支配的で、今後の排出ガス規制により所要風量の低減に伴ない換気設備の負荷が軽減される。

モデル：発破工法 2,000m 75m²
ダクト φ1,600 2,000m

算定方法：建災防「ずい道建設工事における換気技術指針」による

NO_x 規制基準による換気設備比較

	第1次基準	第2次基準	第3次基準
希釈風量	4.9m ³ /min・kW	3.2m ³ /min・kW	1.9m ³ /min・kW
所要換気量	2,242m ³ /min	1,464m ³ /min	869m ³ /min
必要圧力	5.7kPa	2.5kPa	0.8kPa
ファン	160kW×2 3,000m ³ /min	55kW×2 1,500m ³ /min	37kW 1,000m ³ /min
実動力	320kW	110kW	37kW
比較	—	▲210kW	▲283kW

ダクトを一定として試算したが、実際には風量に合わせた適当な口径が選定されるため、実動力は増加する。有害ガスは発破残ガスや自然ガスの発生も勘案する必要があるが、ディーゼルのクリーン化により換気設備は小さくて済むことになり吸引・捕集方式への転換に拍車をかけると考えられる。

(2) 換気技術における省エネ

トンネル工事においても CO₂ 削減など環境負担軽減の要求は強くなると思われ、換気技術においてもさまざまな技術開発に取り組んでいる。

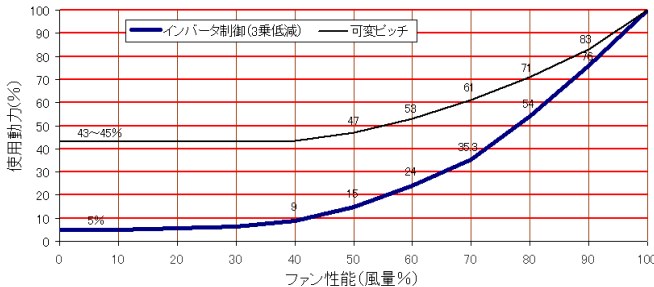
① 換気ファンの容量制御

換気ファンは可変容量型のファンを指定していることが多く、可変ピッチプロペラ方式とインバータ方式がある。

モーター軸端に何もつけず商用交流電源で運転すると、何も仕事をしないにも関わらず、定格電流値の 43%前後流れる。これを無効電力という。

インバータ運転の場合は、一旦交流を直流に変換した後、スイッチング素子で擬似交流を作り、周波数・電圧・電流を制御している為、無効電力は発生しない。このため、両方式には電力量（省エネ特性）で大きな差がある。

可変ピッチとインバータ制御の特性

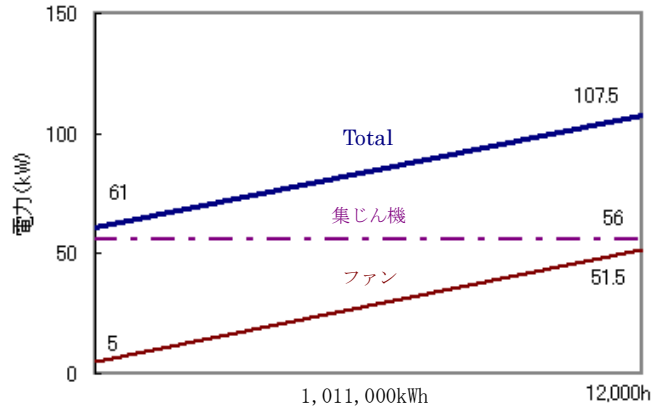


② インバータ自動制御の省エネ

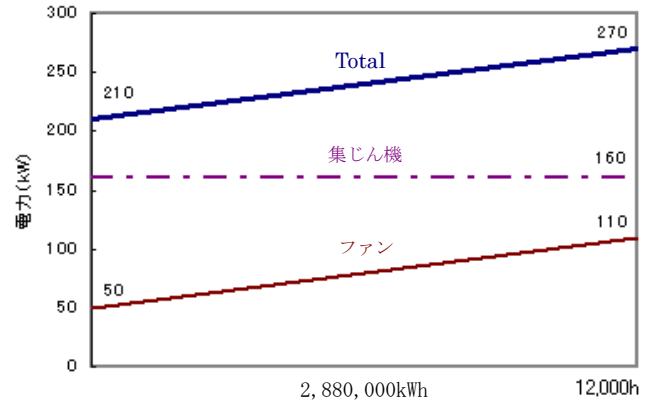
インバータ自動制御方式では、坑内の粉じんレベルに応じた風量を自動的に運転制御し、大きな省エネ効果がある。モデルでは、固定運転に対して 35% (1,011,000kWh ÷ 2,880,000kWh = 0.351) の電力量となり、大幅な省エネができる。

- モデル : 発破工法 2,000m 75m²
月進 100m 延べ 12,000h
サイクルタイムの粉じん発生タイムシェア 35%
- 換気設備 : 送気ファン 55kW × 2
集じん機 80kW × 2
インバータ下限運転 20kW (40%風量)

インバータ自動制御時の電力量



スターデルタ固定方式時の電力量



③ 中間機種のラインアップ

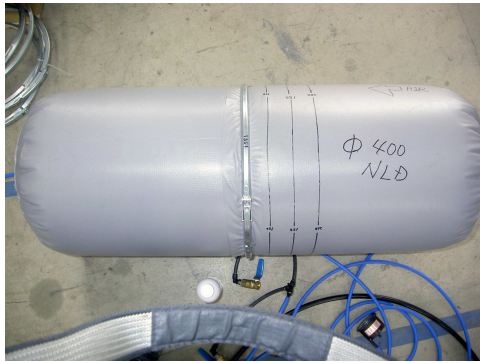
トンネルの延長が短い場合は、同じ風量であっても静圧が低くて済む。従来は大は小を兼ねていたが、受電設備や仮設費、騒音等を考慮しトンネル延長に見合った中間機種を開発し環境負荷を低減している。

2000 m³/min 級の送風機の例

機種	風量	静圧	動力	トンネル適用
RE-130IW110	2000	4.7kPa	220kW	2000m
EZ-2000Q	2000	2.9kPa	150kW	1000m 以内
RE-140ES75	2000	1.5kPa	75kW	500m 以内

④ ダクトエネルギー損失低減

ファンの省エネはダクトに大きく依存し、ファンの動力はダクト直径比の 5 乗に反比例する。例えば、同じ風量、ダクト長では、φ1,500 を φ1,700 と大きくすることで (φ1,500 ÷ φ1,700)⁵ = 0.534 となり、ファン動力は 53.4% の動力で済み、省エネや CO₂ 削減に大きく寄与する。また、ダクトの漏風は直接大きなエネルギーロスとなるため、漏風のないノンリークダクトを開発した。



φ400 ノンリークダクト リーク試験風景 20kPa (110 m³ /min 相当) リーク量 0.5ℓ/min (漏風率 β = 0.00005)



φ900 ノンリークダクト
運用試験風景



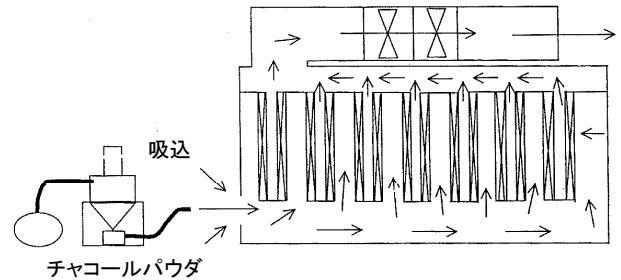
φ1500 ノンリークダクト
試験風景

⑤ 有害ガス吸着浄化

フィルター式集塵機では、粉じんについては大気レベル(0.1mg/m³以下)に清浄化でき、リフレッシュエアとして再利用するが、有害ガスについても活性炭パウダー、活性ゼオライト等の機能性吸着剤を自動投入しフィルター表面で有害ガスを吸着し、発破残ガスやディーゼル排出ガスに含まれる有害ガスを除去することに成功した。

必要風量の設備が困難な、超長距離トンネルや、備蓄トンネル、大深度トンネル、地下発電所などへ展開を進めている。

	CO	NOX	NH3	
処理前	50	100	20	ppm
処理後	30	15	5	ppm
除去率	40%	85%	75%	



AN-F0 発破におけるチャコールパウダー付き集塵機のガス吸着能力を測定。BFG-21 300kg をフィルターにコーティング。北川ガス検知器での測定。

⑥ 坑内、暑熱対策

切羽作業では、大きなエネルギーが消費され高温・暑熱により熱中症のリスクが高い。

外気取入れ換気方式では、大風量・大型換気設備が必要となるが、夏場のみの需要が多く、不経済である。冷水ドライミストを大量に発生させ、大空間の局所冷房が可能なFA-COOLを開発した。



冷却能力 180kW 風量 2100 m³/min

6. おわりに

吸引捕集方式は先進的なユーザーに採用されているものの本格的普及には至っていない。

粉じん対策の優位性はもとより、トンネル生産性向上や、CO₂削減など経済性、環境性に大きな効果が認められ期待が寄せられている。本格普及のためには、換気技術指針や発注者サイドの設計見直しを期待すると同時に、さらなる改善・改良を加え、トンネルじん肺根絶に貢献していきたい。