

災害調査報告書

トンネル掘削中の爆発災害

(要約版)

労働安全衛生総合研究所

1. 災害の概要

本災害は日本海側の山間部にて発生した。本トンネルはパイプラインの一部区間である。被災した2名の労働者は掘削作業に従事していた者であった。爆発は深夜1時ごろに発生し、発進側坑口から約860m地点の切羽付近で作業中の2名が死亡した。そこから約260m離れた位置で送風管の修理を行っていた別の2名は負傷なしであった。死亡した労働者はカッターローダによる掘削作業を行っていたと見られる。本トンネルは全長約1.6km、直径約2mで計画され、被災日の約8ヶ月前に掘削が開始し、それまでは順調に進んでいた。

2. 発生状況の調査

2. 1 坑内における観測値の推移

メタンと酸素濃度を測定する検知機が100m間隔で設置され、切羽付近では硫化水素のセンサーも設置されていた。全てのセンサーにおける応答値は坑外の事務所で10秒毎に記録されていた。メタン検知機は値が爆発下限界の20%に達すると警報が鳴るものであった。

図1は爆発があった切羽後方における可燃性ガスのメタンガス換算濃度(C_{CH_4})の経時変化を示す。 C_{CH_4} ではメタンの爆発下限界濃度(5 vol.%)を100として、その濃度を示している。爆発発生日前日20:00から発生日0:00までの4時間には、 C_{CH_4} の値に変化がほとんど見られない。ところが、その後、0:30頃より濃度に増減が現れ始め、0:37頃に少し大きな反応が発生している。この反応は掘削作業に関連して実施された発破の時刻にほぼ一致する。次に、爆発があった1:20頃に値は最大の67%を示している。その後、44%程度に減少し、値は約25分程度一定値を示している。そして2:00頃に値は10%程度まで再度減少している。

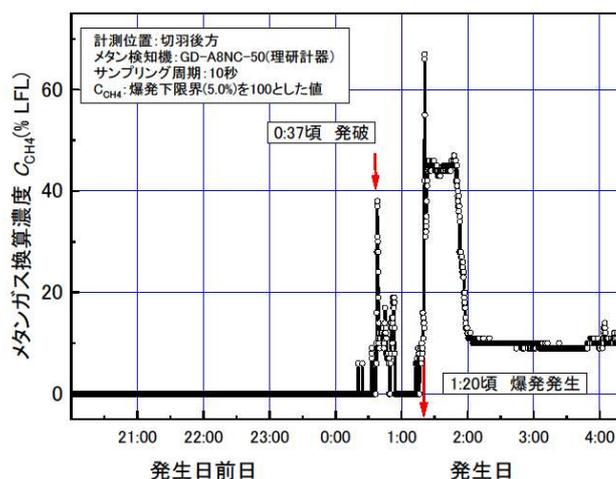


図1 爆発のあった切羽後方におけるメタンガス換算濃度の経時変化

2. 2 災害発生時における作業

災害発生前の0:37頃に掘削のための発破が行われた。これは後述する爆発の43分前である。この実施に先立って作業車両を坑外に移動させ、換気(吸気)は5分程度停止した。この停止によると思われる C_{CH_4} 濃度の増加が先の図1にも見られる。また、発破による反応が各検知機の記録に現れている。

その後の爆災発生時には坑口から 610 m 付近において送風管の交換作業が行われていた。送風管とは坑内を換気するためのものである。同径で 2 本の風管が坑内の空気を排気するために設置されていたが、1 本が 600 m 地点で外されていた。従って、当時の換気は残りの 1 本のみで行われていた。この作業は約 10 分程度のものであったが、その間には排気能力の低下が生じた。

爆発は交換作業中に発生した。しかしそれまでの間に、ガスの突出によるものか、換気の停止によるものかその原因は明らかでないが、メタンガス濃度の上昇が記録されている。

死亡した 2 名の労働者は爆発時に切羽にてカッターローダによる掘削を行っていた。両被災者はともに 2 度から 3 度のやけどを負っていた。その負傷範囲は体の前面側に集中したものであり、背中側には特にやけどが見られなかった。

切羽部に取り付けられていた支保工と矢板には比較的大きな曲げが生じていた。また、木片やヘルメットのかげらが 40 m から 50 m の距離に渡って飛散しており、爆発の威力を示していた。

なお、他 2 名は坑口から 640 m 付近、すなわち切羽から 200 m 離れた位置にいた。この 2 名は爆発音を感じたが熱は感じなかったと当時の状況を述べている。災害発生後もメタンガス等の濃度の計測は継続されていた。その値は安定しているものの、排気を停止すると値は上昇することが確認された。

3. 爆発原因の検討

3. 1 発生地域の地質

爆発のあったトンネル工事現場の周辺の地質について、地質調査所が発行する資料「地域資質研究報告 5 万分の 1 地質図幅」により調査した。現場周辺の拡大図を図 2 に示す。

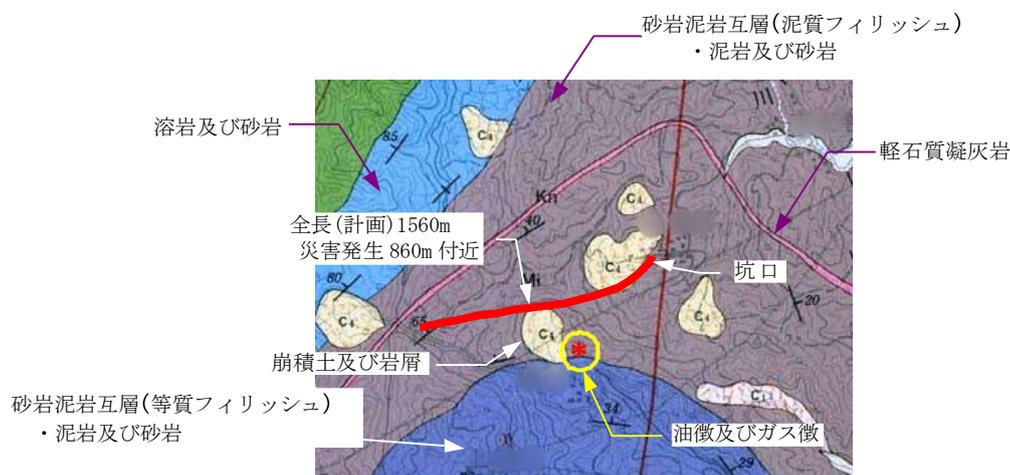


図 2 トンネル工事現場の周辺地図と地質

掘削箇所周辺の地質は「砂岩泥岩互層(泥質フリッシュ)・泥岩及び砂岩」が主要となっている。その他には「崩積土及び岩屑」の分布も見られる。砂岩泥岩互層は砂岩と泥岩の層が交互に規則的につみ重なったものであり、さらに砂岩と泥岩の量の大小から砂質フリッシュ(砂岩が泥岩より多い)、等量フリッシュ(砂岩が泥岩と同量程度)、泥質フリッシュ(砂岩が泥岩より少ない)に分けられる。

トンネルのルート上には部分的に崩積土及び岩屑が分布しており、トンネルはこの間をかすめるように計画されていた。提出された届出には機械掘削と報告されていた。しかし、実際には途中遭遇した硬

い地質において発破が用いられていた。災害は坑口から約 860 m 付近で発生した。当時も硬い地質を掘削中であったと工事関係者は述べていた。この地質を機械で掘削することが困難となったため、発破に方法が変更されていた。地図上に爆発の推定位置を黒点で示す。爆発位置の右下には「*」が印されており、これは「油徴及びガス徴」を意味する。爆発はこの印に近い場所で発生している。可燃性ガスが湧出する可能性が高い工事現場であることが資料から確認された。

3. 2 爆発原因物質について

ここでは、爆発原因物質を同定するために、爆発が生じたと思われるトンネル先端部分において、気体および壁面から漏出している液体を採取し、成分分析を行なった。また、排気ガス中の可燃性物質の濃度も測定した。それらの結果を報告する。

(1) 試料の採取場所

試料の採取場所は以下の 3 カ所である。気体試料は A, B, C, E, F の 5 種類であり、液体試料は a, b の 2 種類である。括弧内には採取日を示す。

【トンネル先端壁面のダイナマイト挿入用穿孔から】

(気体試料 E) 切羽中央高さ約 50 cm の穿孔から排気ポンプを 5 分間停止後に気体を採取(災害当日)

(気体試料 F) 切羽左下約 40 cm の穿孔から排気ポンプを 5 分間停止後に気体を採取(災害当日)

(液体試料 a) 切羽左下端の穿孔から漏出液体を採取(災害翌日)

【トンネル先端部から】

(気体試料 A) 排気ポンプ停止 5 分後に採取(災害当日)

(気体試料 B) 排気ポンプ停止 10 分後に採取(災害翌々日)

(液体試料 b) カッターローダの下(災害翌日)

【トンネル入口の排気口から】

(気体試料 C) 排気口から採取(災害の 4 日後)

(2) 気体試料の成分分析

5 種類の気体試料(A, B, C, E, F)について成分分析を行なった。分析は、対応する成分毎に、以下①～④の分析方法を用いて行なった。

- ① 水素, 二酸化炭素, メタン;ガスクロマトグラフィー 【熱伝導度型検出器】
- ② 一酸化炭素, 炭化水素;ガスクロマトグラフィー 【水素炎イオン化型検出器】
- ③ 硫化水素, 二酸化硫黄;ガスクロマトグラフィー 【炎光光度型検出器】
- ④ 窒素酸化物;JIS K0104 【亜鉛還元ナフチルエチレンジアミン吸光光度法】

5 種類の気体試料(A, B, C, E, F)の定性分析結果および気体試料 C および気体試料 F の定量分析結果を表 1 に示す。

表 1 気体試料の分析結果

試料番号			A	E	F		B	C	
					定量分析				定量分析
採取日			被災日 当日	被災日 当日	被災日 当日	被災日 当日	被災日 翌々日	被災日 4日後	被災日 4日後
採取場所			トンネル 先端部	切羽中央 高さ約50 cmの穿孔	切羽中央 左下約40 cmの穿孔	切羽中央 高さ約50 cmの穿孔	トンネル 先端部	排気口 出口	排気口 出口
成分	爆発 下限界 濃度 LEL (%)	定性 分析の 検出 感度 (ppm)	成分濃度 (ppm)						
水素	4	5	0	60	130		0	0	
一酸化炭素	12.5	5	0	60	20		0	0	
二酸化炭素		5	730	660	570		760	490	
メタン	5	100	1000	9000	23000	23600	4000	300	338
エタン	3	1	110	1100	4000	3900	290	20	24
エチレン	2.7	1	0	4	0		0	0	
アセチレン	2.5	1	0	0	0	<1	0	0	
プロパン	2.1	1	150	1400	7800	7500	350	20	25
ブタン	1.8	1	150	1000	12000	11000	310	20	20
硫化水素		0.1	0				0		
二酸化硫黄		1	0				0		
窒素酸化物		5	0				0		
Σ (% LEL)			4.02	34.60	171.48	164.66	12.57	0.89	1.00

いずれの気体試料も、その主成分は、メタン、エタン、プロパン、ブタンの炭素数 1~4 の炭化水素であることがわかった。これらの炭化水素は、爆発下限界濃度を越えれば容易に着火爆発する。個々の成分毎が着火しうる濃度に達していたか判断するため、それぞれ爆発下限界濃度 (LEL) に対してどれだけの割合であったかを調べた。この場合、注意しなければならないのは、個々の成分が爆発下限界濃度に達していなかったとしても、全体として十分な濃度の可燃性物質が存在すれば着火、爆発することである。表中下段に示した Σ (%LEL) は、 $\Sigma (\%LEL) = \Sigma (\text{各成分の濃度} / \text{その成分の爆発下限界濃度}) \times 100$ で求められるが、この値が 100 を越えると可燃性物質全体としての爆発下限界を越えていることになる。表を見ると気体試料 F の定量分析の Σ (%LEL) が 165 を示し爆発下限界を越えており、着火源が存在すれば着火することになる。

(3) 液体試料の成分分析

トンネル先端壁面から採取した液体試料 a およびカッターローダの下から採取した液体試料 b について常温における揮発性ガスの成分分析を行なった。分析は、それぞれの試料をバイアルビンに封入し、常温でのヘッドスペースガス (揮発性ガス) を採取し、ガスクロマトグラフ質量分析計にて行なった結果を表 2 に示す。

表 2 液体試料の揮発成分分析結果

液体試料a	液体試料b
ブタン	ブタン
2-メチルブタン	2-メチルブタン
2-メチルペンタン	2-メチルペンタン
3-メチルペンタン	メチルペンタン
ヘキサン	ヘキサン
メチルシクロペンタン	メチルシクロペンタン
シクロヘキサン	シクロヘキサン
ヘプタン	ヘプタン
1, 3-ジメチルシクロペンタン	1, 3-ジメチルシクロペンタン
メチルシクロヘキサン	メチルシクロヘキサン
3-メチルヘキサン	3-メチルヘキサン
トルエン	トルエン
シス-1, 3-ジメチルシクロヘキサン	シス-1, 3-ジメチルシクロヘキサン
オクタン	
エチルシクロヘキサン	
キシレン	

液体試料 a, b からの揮発性ガスの分析結果から、いずれの試料も炭素数 5(ペンタン類)～炭素数 7(ヘプタン類)の炭化水素が主成分であった。これらが爆発に関与した可燃性物質の一部であった可能性がある。

(4) 液体試料の引火点

トンネル先端壁面から採取した液体試料 a およびカッターローダの下から採取した液体試料 b について引火点を測定した。装置はセタ密閉式引火点試験器を用いた。液体試料 a および液体試料 b のいずれも室温において引火性を示した。さらに冷却した液体を使って約 5℃以下での引火も確認した。

3. 2 着火源について

着火原因としては、静電気火花、電気機器、接触火花、タバコなどの裸火等が考えられる。トンネル内の湿度を考えると静電気は考え難く、また、裸火が存在したことを示す証拠もない。

切羽付近では、防爆仕様でない投光器が 3 台使用されていたなど、電気設備がいくつかあることから、それらの火花の可能性はある。しかし、カッターローダを操作していたと見られる被災者の火傷の範囲が上半身の正面側のみであり、被災者が後方に飛ばされていることから、爆心はカッターローダ前方と推定されていること。またいずれの電気設備も被害状況から爆心と推定される前方には存在しておらず、それぞれの設備周辺には爆心であったことを示す証拠もみられなかったこと。これらふたつの事実から、電気設備が着火源であった可能性は低い。

残るのは、カッターローダ稼働部による金属同士あるいは金属と岩石との接触火花の可能性である。作業員の供述から、過去にカッターローダ先端の刃と岩石との間で火花が飛ぶ様子が何度か観察されていたこと、および他の作業員の供述やカッターローダの状態から、災害当時カッターローダは稼働中で

あったと見られることから、着火源はカッターローダ先端の刃と岩石との接触(摩擦)火花の可能性が高い。

3. 3 構内の換気状況

可燃性ガス等が漏出したとしても十分に有効な換気対策が実施されていたならば、爆発性雰囲気形成することなく可燃性ガスを排出することができ、爆発を防ぐことができたはずである。この現場の場合、排気ダクト2本で切羽付近の可燃性ガスや粉じんの排出を行っていた。これらの排気設備は、粉じんの排出を目的として、カッターローダの上方に配置され、トンネル内の風速は0.5 m/secの仕様で設計されていた。さらに災害当時、図3に示すように2本のうち1本が修理のためトンネルの途中で切断されており、災害時の排気能力は通常時の半分程度となっていた。実際に使用していた送風機の排気流速の測定結果を表3に示す。

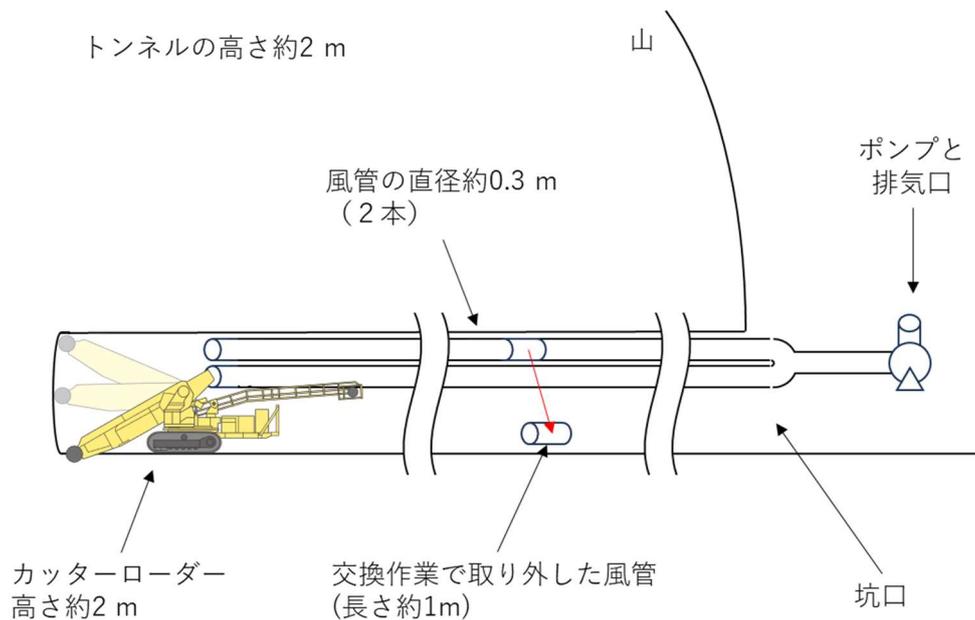


図3 トンネル内での配管工事の様子

表3 送風機による切羽地点での風管内の平均流速測定結果

	風管A(災害当時, 一部取り外したもの)	風管B
風管Aを接続して計測	14.0(m/s)	13.0(m/s)
風管Aを災害時と同様に 一部取り外して計測	0.27(m/s)	14.9(m/s)

この現場では、引火点5°C以下の引火性の高い液体が湧出しており、その空気より重い蒸気はトンネル下部に滞留する。排気設備はトンネルの上方に設置してあり、湧出した引火性液体の蒸気を効率よく排気することはできなかった。

また、可燃性ガスによるガス溜りからの急激に大量のガスの放出があつて爆発した場合は、ここでいう配管が2本か1本かといった程度の排気能力の違いは、爆発が生じるかどうかにはほとんど影

響を与えないと考えられるが、定常的に可燃性ガスや可燃性液体が漏出しているような環境においては、排気能力の減少によって可燃性ガス濃度が上昇し、爆発下限界に至らなかつたとしても、より少ない可燃性ガスや蒸気の噴出で爆発が生じる状況であった。

すなわち、2本から1本になることで、配管工事を爆発の主原因とすることはできないが、配管工事の影響が決して無視しうるようなものではないといえる。

4. 発生原因

被災後の現場状況を見ると、作業員が上後方に吹き飛ばされていることから、相当の圧力を発生する事象が前方下部で発生したこと。そして作業員が熱傷を負っていることから、その爆風がかなりの高温であったことが推定できる。この地域の泥岩層からはメタンガスや石油が湧出することが知られており、事前のボーリング調査でも高濃度の可燃性ガスが検出されていたことを踏まえると、可燃性の物質が掘削壁面から放出されて、着火爆発した可能性が高い。そこで、現場から採取した物質中の可燃性成分の分析、着火源の存在の検討、換気の状態の検討を行なった。

4. 1 爆発に関与した物質

現場から採取した気体の成分分析を行なったところ、災害後にも切羽面から放出されているガスはメタン、ブタン等の可燃性ガスであり、爆発下限界濃度を超える高濃度の可燃性ガスが存在している穿孔があることもわかった。この穿孔から事故当時大量のガスが噴出したとは断定できないものの、このような高濃度の可燃性ガスが噴出する可能性のある穿孔が壁面に存在することが確認された。従って、他にも多数あるこれらの穿孔のいずれかから噴出してきた高濃度の可燃性ガスが爆発原因物質のひとつであった可能性が高い。ここではメタン等の空気より軽い可燃性ガスと、プロパン等の空気より重い可燃性ガスが検出されている。

プロパン等の重いガスが、後で述べるように前方下部が爆発の中心と考えられる状況に合致するのは勿論であるが、メタン等の空気よりも軽い気体であっても、噴出場所が下部の穿孔からだったとすれば、これもまた爆発の原因物質であったと考えて矛盾はしない。

同様に穿孔等から漏出していた液体も常温で引火性を持つヘキサン等の可燃性液体であることがわかった。この液体の蒸気もまた、切羽付近での爆発原因のひとつである可能性がある。他に周辺に存在するのは岩石粉じんのみである。従って、爆発に関与した物質はメタン、ブタン等の可燃性ガスとヘキサン等から発生する可燃性蒸気の混合物と推定できる。

4. 2 着火原因

作業員のヘルメットの飛散状況と身体が投げ出された方向およびカッターローダの災害後の位置から、圧力の発生源(着火場所)は、前下方と推定される。これは、作業員の熱傷の状況(上半身表側のみ火傷)と矛盾しない。また災害後の他の作業員から、カッターローダで切羽面の岩を破砕、運搬している最中に、先端の刃と岩との間で何度も火花が発生するのを見たことがあるとの供述があり、このことから着火原因としては、カッターローダ先端の刃と岩石との接触(摩擦)火花の可能性が高い。

他には、前方のカッターローダの稼働部なども着火源となる可能性は否定できない。なお、カッターローダを運転していた作業員の後方には、カッターローダの電源盤やファン、警報機など、着火源とな

りうる電気設備が存在しているが、圧力の発生源が前方と考えられること、およびそれらの電気設備が爆発の中心であったことを示す形跡が全くないことから、今回の爆発には関与していないと考えられる。

4. 3 換気の中断と濃度上昇

着火源が存在する環境下に可燃性ガス等が放出されても、その濃度が爆発限界に入らなければ、爆発は起らない。本作業現場では、切羽面近くの上部に送風機を設置して、2本の排気管で切羽面周辺の空気、粉じんを坑外に排出していたが、下部に滞留した重い可燃性ガスや可燃性蒸気を効率よく排気できなかった。さらに、この爆発発生の直前に、排気管の内の1本が、構内の別の場所で破損のため一部交換作業が行なわれていた。この交換作業の間は、排気能力が通常時のほぼ半分になっていたことが推定される。このために、事故当時切羽面周辺の可燃性物質の濃度が高まった可能性がある。

4. 4 爆発までの推定プロセス

以上の通り、地盤中に存在していた可燃性ガス、可燃性液体が漏出して、それらのガスおよび蒸気が切羽付近で爆発下限界濃度を越えていた時にカッターローダによる作業を行なったため、岩石と先端部との接触火花が発生して切羽付近で着火爆発した可能性がある。

カッターローダ上で作業していた被災者およびその後方で作業していたもう一人の被災者が、爆風で後方に吹き飛ばされ、上半身前部の火傷を負った。排気管の交換作業は、可燃物濃度を上昇させ、爆発下限界を越えることになった一因と考えられる。

5. 再発防止対策

岩石とカッターローダの刃との間で火花が発生するなど、切刃作業中に着火源を完全に除去することは、その作業内容から困難と考えられる。作業員が現場にいる以上、酸素を遮断することもできない。このような環境下で爆発を防止するためには、可燃性ガス/蒸気の濃度が爆発下限界濃度を超えないように、放出を極力押さえ、また十分な換気をすることが重要である。

5. 1 可燃性ガスの存在確認

トンネル工事を行う場合は通過予定地および周辺の地形、地質等について予備調査を行うとともに、現場周辺における過去の工事および施工中の工事についても十分な調査を行わなくてはならない。可燃性ガスの発生が予想される場合はボーリングその他の方法により可燃性ガスの有無と状態について、必要な調査を行う。

5. 2 十分な換気の実施と火源の管理

施工区間にガス田、油田、炭田地帯及び温泉地帯が存在し、さらにこの地帯が破碎帯や亀裂の多い岩質の箇所、泥岩や炭層を挟む地質等である場合には有害ガス、可燃性ガス等の湧出する場合が多いので注意しなければならない。作業時にはガス検知機を用いて可燃性ガスや有毒ガスの濃度を測定し、状況によっては換気、火気使用の禁止、坑内使用機器の防爆化、待避入坑禁止措置を講じなければならない。

坑内に可燃性ガスの発生する場合，または存在する場合にはその種類，性状，賦存状態，発生状況等を把握し，火源となるおそれのあるものを排除した後に換気を十分行うことにより，速やかに安全な濃度まで希釈して坑外に排出しなければならない．特に，想定外のガス溜りからのガス噴出により，ガス濃度が排気能力を超えて急上昇した場合には，ガス濃度上昇の程度により，掘削作業を一時中断したり，坑外への一時避難したりするなどの対策も実施する必要がある．

5. 3 作業の連絡調整

今回の災害は，換気が不十分なために災害現場周辺の可燃性ガス濃度が高まった可能性が高い．プロパンやブタンなどの重いガスやヘキサンなどの可燃性液体から生じる蒸気は，トンネル下部に滞留しやすいため，切羽付近下部のガス濃度測定や換気を十分行う必要がある．また，排気能力が半分になるような重要な作業が行なわれる時は，切羽面での作業を中断すべきと考えられるが，切羽面の作業者と配管を交換していた作業者との間で十分な情報の交換が見られず，二つの作業が並行して行なわれていた．このようなことを無くすため，適切な施工計画を作成するとともに作業員同士が常に互いの作業内容を充分把握できるようにすること，また非定常作業が行なわれる場合は，そのリスクの評価を事前におこない，ある作業により他の作業に影響を与えると考えられる場合には，一方の作業を中断するなど，作業の連絡調整が必要である．