

トンネル火災事故の分析と対策  
**The Analysis and Preparation of Tunnel Fire**

辻本誠研究室 西村和也

# 目次

ページ番号

第1章 序論	
1.1. 研究背景	3
1.2. 研究目的	6
1.3. 日本のトンネル火災の現状	8
1.4. 海外のトンネル火災の現状	10
1.5. 第1章参考文献	14
第2章 過去のトンネル火災の分析	
2.1. BART 海底トンネル火災	16
2.1.1. サンフランシスコ海底トンネル	16
2.1.2. トンネル全体の設備	16
2.1.3. トンネルの各所ごとの設備	18
2.1.4. 火災	19
2.1.5. 対策の分析	20
2.2. モンブラントンネル火災	23
2.2.1. モンブラントンネル	23
2.2.2. トンネルの換気方式	24
2.2.3. 非火災時の換気状態	25
2.2.4. 火災時換気の切り替えの時間経過	25
2.2.5. 火災発生後の換気状態	26
2.2.6. 中立点と空気の流れ	26
2.2.7. 煙	27
2.2.8. 火災概要	30
2.2.9. 対策の分析	31
2.3. ユーロトンネル火災	32
2.3.1. 英仏海峡トンネル	32
2.3.2. トンネル設備	33
2.3.3. 火災	34
2.3.4. 対策の分析	36
2.4. 第2章参考文献	37
第3章 今後の火災への有用な手段	
3.1. トンネル基準	38
3.2. 煙制御	39
3.2.1. 煙の動き	41
3.2.2. 火災プルーム	41
3.3. モンブラントンネル火災の検証	43
3.3.1. フェーン現象の影響	43

3.3.2. 煙流動性状の推定	49
3.3.3. 避難の推定	57
3.3.4. 遡上阻止風速	58
3.4. まとめ	60
3.5. 第3章参考文献	62
第4章 謝辞	62

付録 Sergiu F. Luchian : TASK FORCE FOR TECHNICAL INVESTIGATION OF  
THE 24 MARCH 1999 FIRE IN THE MONT BLANC VEHICULAR TUNNEL  
Report of 30 June 1999、2003

# 第1章 序論

## 1.1. 研究背景

現代の都市交通において、最も輸送能力が優れているのは鉄道である。鉄道は小さな空間を有効利用して多くの旅客を運ぶ交通機関である。また、2002年12月末の自動車保有台数は約7730万台<sup>1)</sup>、自動車1台当たりの人口は1.65人(2002年3月末)であり、車社会といわれる現代において自動車なしの生活は考えられない。このように社会に欠かせない存在となった列車と自動車だが、その存在は人間に移動の便利さだけを与えるものではない。それに付随して災害も運んでくる。災害の中で最も古いものの1つで文明の発達とともに起きてきたもので火災がある。例外なく列車や自動車も大いに関係のある災害である。では、現在の日本社会では列車と自動車の火災はどうなっているのか。

火災を考えるために、火災の動向を考える必要がある。火災が今後減っていくなら、それに対する非常用設備なども減らしていけばいい、逆に火災が増えていけば非常用設備も増やして新たな対策を講じていかなければならない。そこで「列車火災、自動車火災の発生は走行キロにほぼ比例する」<sup>2)</sup>という火災の傾向をつかむものを利用する。

列車火災事故についてこの研究では、1962年～1974年、1979年～1991年では走行キロと火災件数は表-1.1.1.<sup>4)</sup>と表-1.1.2.<sup>1)</sup>を用いて図-1.1.1.をつくったところほぼ線形の関係があることがわかっている。火災頻度については1962年～1974年で0.00444/百万走行キロ、1979年～1991年で0.00267/百万走行キロと減少傾向にあるとっている。では、近年はどうなっているのか。表-1.1.3.<sup>1)</sup>をもとに図-1.1.1.の1992年～2002年の部分をつくったところこれもやはり、線形の関係があることがわかる。

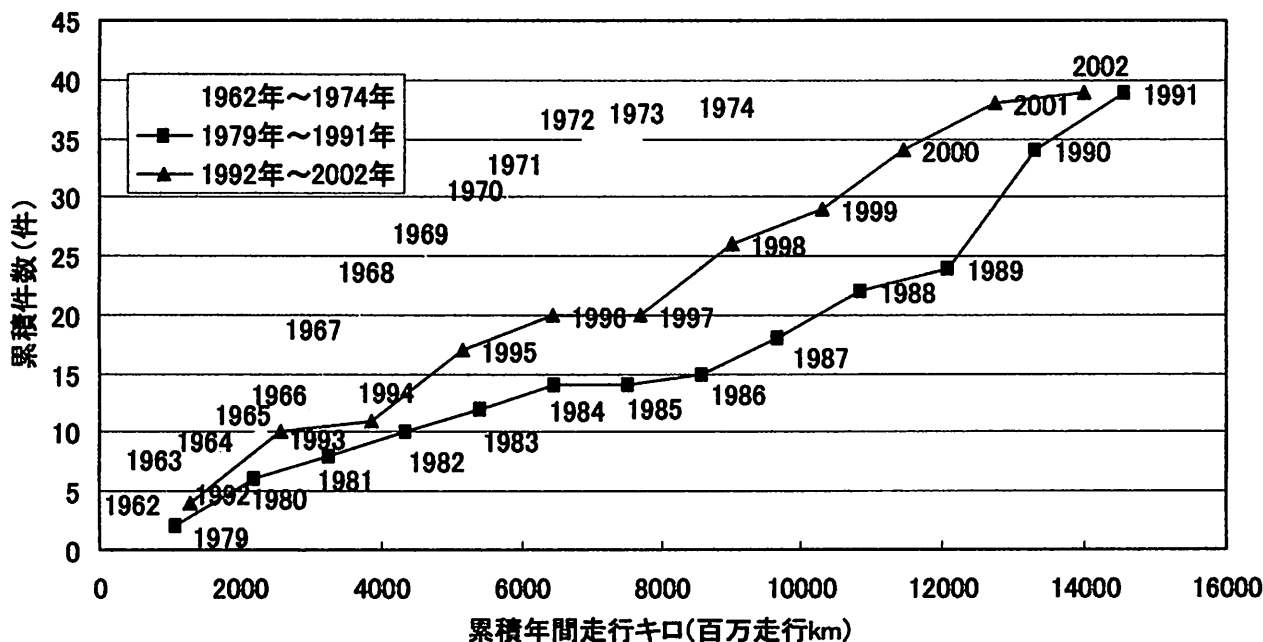


図-1.1.1. 列車火災件数と年間走行キロの推移



表-1.1.1. 列車火災事故の状況(1)[年間走行キロの単位:百万km]

	1962年	1963年	1964年	1965年	1966年	1967年	1968年	1969年	1970年	1971年	1972年	1973年	1974年
件数	2	4	2	2	2	7	4	3	3	3	3	0	2
年間走行キロ	539	583	588	588	617	613	638	691	700	667	733	682	690

表-1.1.2. 列車火災事故の状況(2)[年間走行キロの単位:百万km]

	1979年	1980年	1981年	1982年	1983年	1984年	1985年	1986年	1987年	1988年	1989年	1990年	1991年
件数	2	4	2	2	2	2	0	1	3	4	2	10	5
年間走行キロ	1099	1092	1074	1074	1065	1053	1058	1074	1096	1161	1223	1243	1255

表-1.1.3. 列車火災事故の状況(3)[年間走行キロの単位:百万km]

	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年
件数	4	6	1	6	3	0	6	3	5	4	1
年間走行キロ	1283	1291	1291	1278	1297	1265	1318	1291	1128	1297	1270

さらに火災頻度は 1992 年～2002 年では 0.00278 件/百万走行キロと 1979 年～1986 年よりやや増えている傾向にあることがわかる。

自動車火災について、同研究では列車と同じ方法で自動車火災の発生頻度を計算している。1979 年～1989 年での走行台キロと火災件数の累積は、図-1.1.2.のようになっている。これは表-1.1.4.<sup>1)2)</sup>をもとにつくられ、列車の場合と同様に線形の関係がある。百万走行台キロ当たりの自動車火災件数は 1979 年～1989 年で 0.00797/百万走行台キロである。ここでの走行中の自動車火災件数は、消防白書の車両火災件数から走行中にはほとんど起こらない放火と放火の疑いの件数を引いたものであり、走る前に放火されて走行中に燃え出した場合と、走っている時にエンジンが過熱されて止まってから燃え始めた場合で差し引きゼロと判断した。では近年はどうなっているのか。同研究の手法を用いて表-1.1.5.<sup>1)2)</sup>より図-1.1.2.をつくった。1990 年～2002 年でも同様に走行台キロと火災件数には線形の関係があることがわかる。百万走行台キロ当たりの自動車火災件数は 0.00752 件/百万走行台キロとやや減っている。

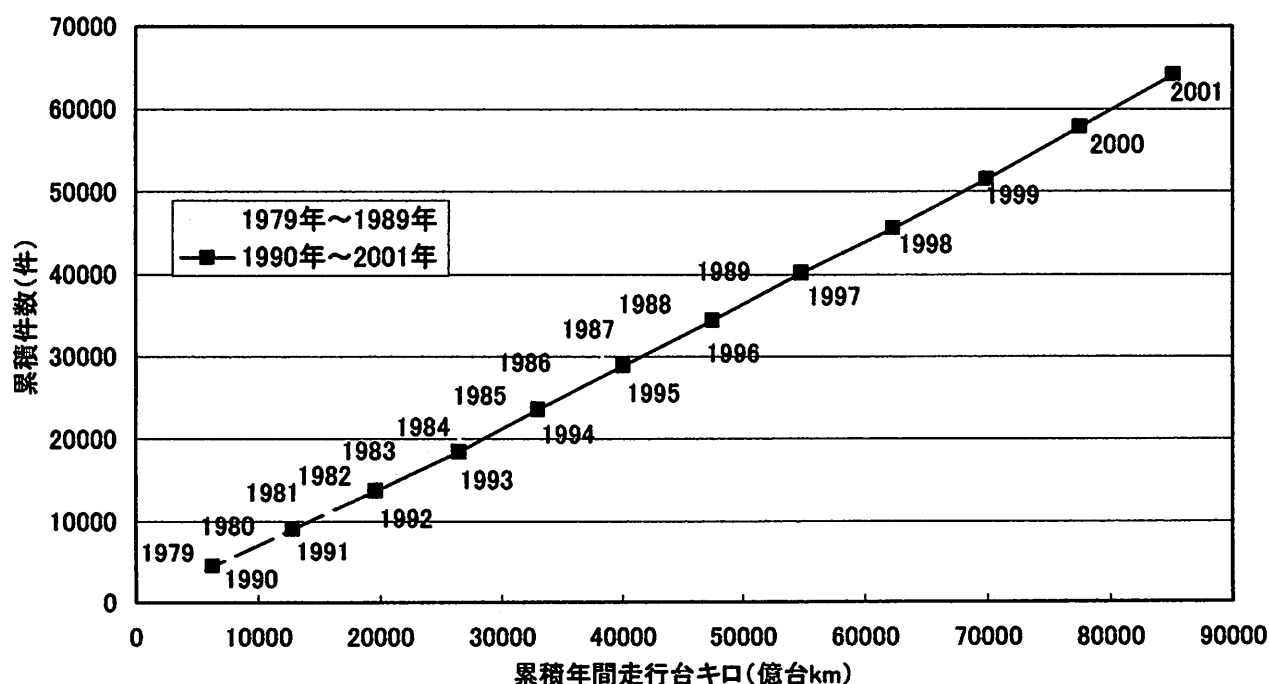


図-1.1.2. 走行中の自動車火災件数と年間走行台キロの推移

表-1.1.4. 自動車火災事故の状況(1)[年間走行台キロの単位:億台km]

	1979年	1980年	1981年	1982年	1983年	1984年	1985年	1986年	1987年	1988年	1989年
件数	2713	2764	2847	3004	3126	3504	3548	3688	3868	4074	4263
年間走行台キロ	3820	3891	3947	4031	4089	4155	4284	4416	4579	4702	5012

表-1.1.5. 自動車火災事故の状況(2)[年間走行台キロの単位:億台km]

	1990年	1991年	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年
件数	4529	4590	4595	4734	5135	5352	5544	5622	5520	5853	6351	6319
年間走行台キロ	6286	6573	6782	6838	6493	7119	7378	7368	7461	7651	7588	7666

表-1.1.4.と 1.1.5.をもとにして自動車の走行 km での出火率は図-1.1.3.に示されるように、約 20 年間一定である。火災率が最も高かった 1992 年で 1.48 件/億台 km、最も低かった 1987 年で 1.18 件/億台 km である。その差 0.3 件/億台 km であり、数値的にもほとんど変化がないことが分かる。

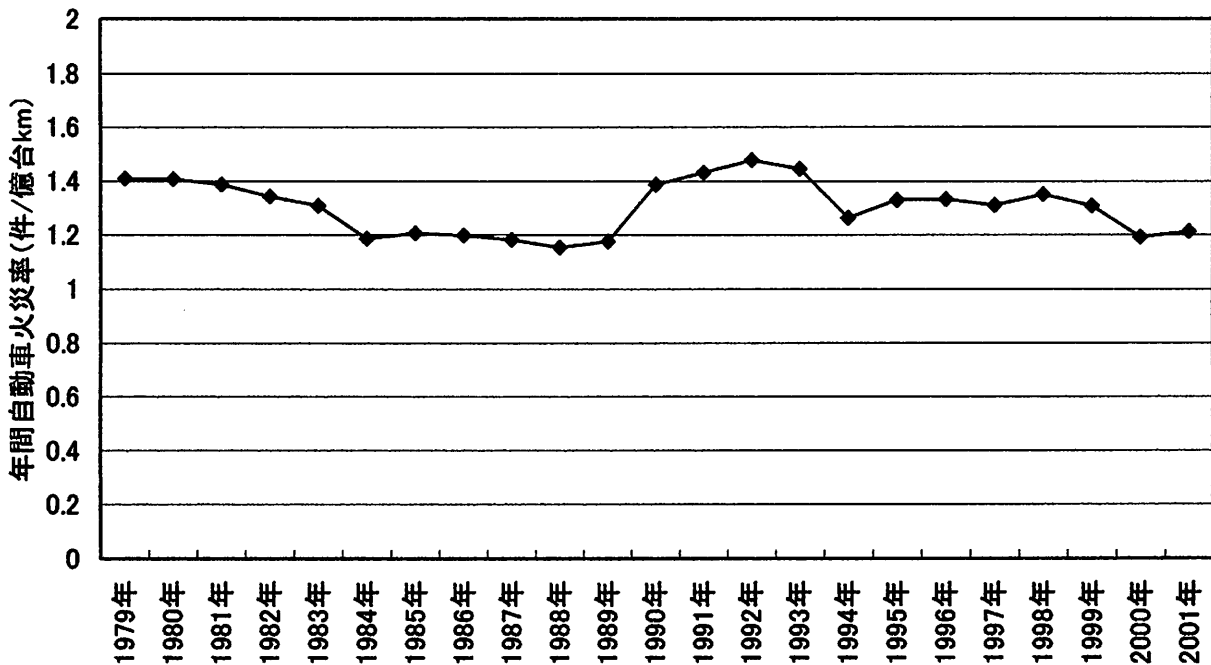


図-1.1.3. 年間自動車火災率の推移(件/億台km)

そんななか、大都市圏での都市機能の集中は著しく、今後もこの流れは避けられないだろう。少しでも多くの空間を利用するために大都市では空間の高度利用が進んでいる。このような状況下で、都市機能を健全に維持、発展させ、都市住民の生活を快適で利便性の高いものにするために、都市の新たな空間資源の開発が必要不可欠である。都市の長期的な展望には欠かせない。そのためには計画的かつ着実に整備する必要がある。しかし、住宅や都市施設が密集し、土地価格が高騰している現在において、鉄道施設をさらに発展させる空間の確保は困難であり、道路も似たような状況で、その整備が遅々として進まないとともに、建設費が増大してしまっている。そこで、用地買収の必要の

ない既存の鉄道の地下空間や、既存の地下構造物を避けたより深い地下構造物の導入が考えられるようになってきた。都市の残された空間のひとつである地下空間は、こういった経緯で新たな空間資源として注目を集めるようになった。

地下施設の構造的特殊性から、想定される災害はさまざまである。地震による構造的破壊で地上に出られなくなること及び圧死、火災時の煙による避難困難と窒息死、そして窓がないために、もし爆発がおきれば即座に炎に包まれ焼死してしまうかもしれない。現在、地下鉄、道路トンネルといった地下空間で起きている火災は図-1.1.4.<sup>3)</sup>のようになっている。2000年5月に「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」が公布され(2001年4月1日施行)、これにより、土地利用者に補償することなく、地下40m以下の部分を一定の手続きにより使用することが可能となった。今後整備が進むことが予想されるこの大深度地下を利用した施設をはじめ、現在すでにある地下鉄や道路トンネルにおいて、幸いにも、図-1.1.4.に示した期間の火災では、地下空間が完全に崩壊するという大事故には至っていないが、地下鉄では地下道の深化、トンネルでは車両の大型化、増大する交通量、運搬物の多様化によって、今後ますます火災の危険が高まると懸念される。

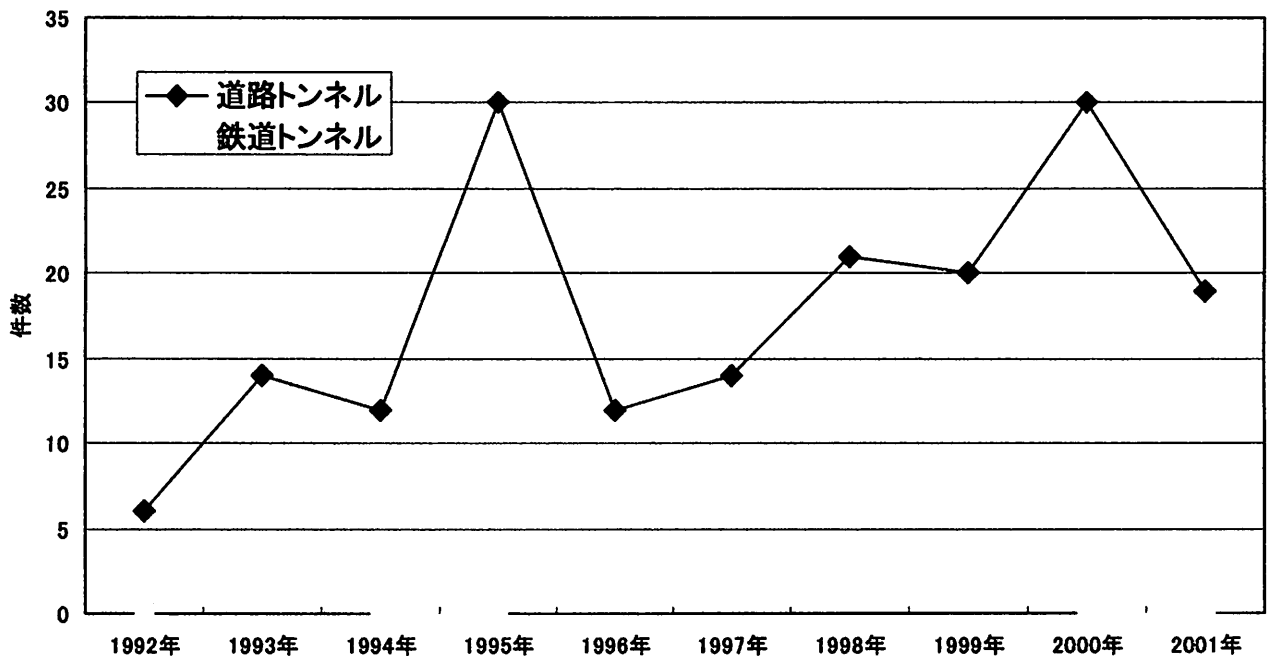


図-1.1.4. 日本のトンネルにおける火災事故の推移

## 1.2. 研究目的

図-1.2.1.<sup>3)</sup>は1992年～2001年に発生した火災すべてにおいて、放火自殺者を除いた火災による死因別死者発生状況を示したものである。図-1.2.1.より、一酸化炭素中毒・窒息、火傷、打撲・骨折はここ10年死因割合は変わっていない。阪神大震災のあった1995年は死因不明の人が急増したが、その年以外は一酸化炭素中毒・窒息死は常に4割を占めていることに注目した。この地下空間での火災危険がどのようなものであるかを類推するために、発生数が多く、統計の整っている建築火災について概観する。

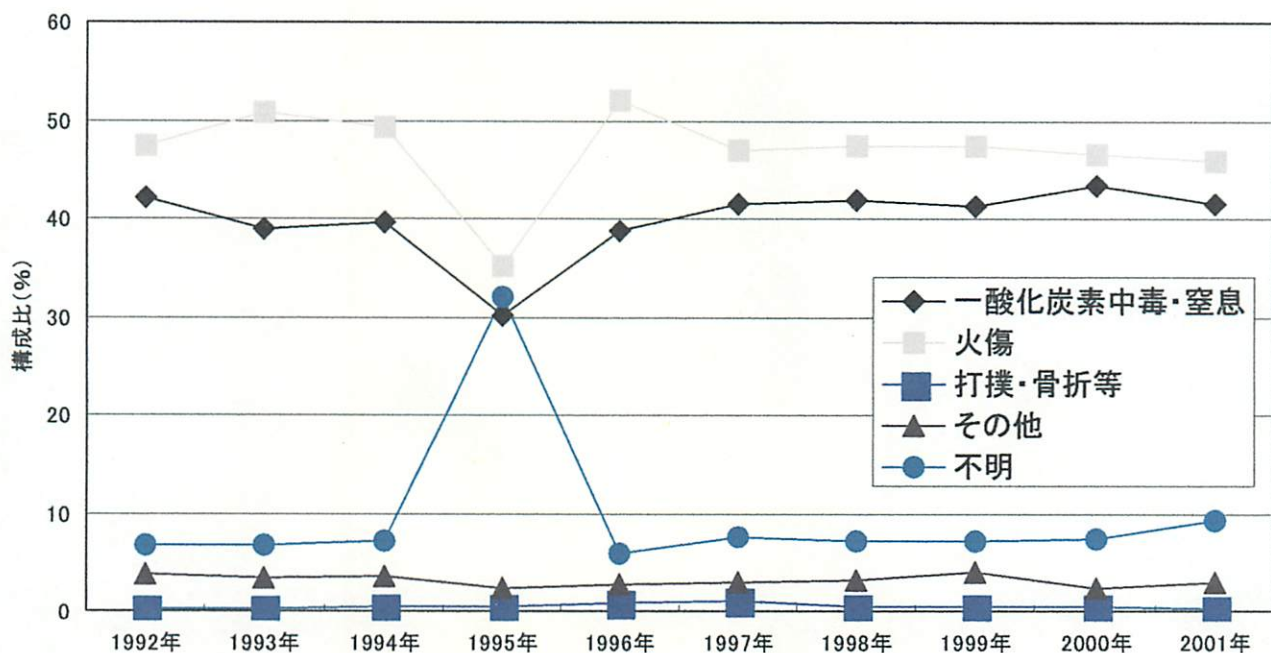


図-1.2.1. 火災による死因別死者発生状況の推移 (放火自殺者は除く)

図-1.2.2.は 1932年～1980年までの建物火災のうち、より詳しく調査された112例<sup>5)</sup>からとった統計である。対象を建物火災として焦点をしぼると、一酸化炭素中毒・窒息、火傷は変わらず割合は高いが、それに加えて墜落という死因が上位にきた。一酸化炭素中毒・窒息死は建物火災になると6割に及ぶことが分かる。この死因と密接な関係にある空調設備を中心に、本論では地下空間火災における問題点を講じていくことにする。

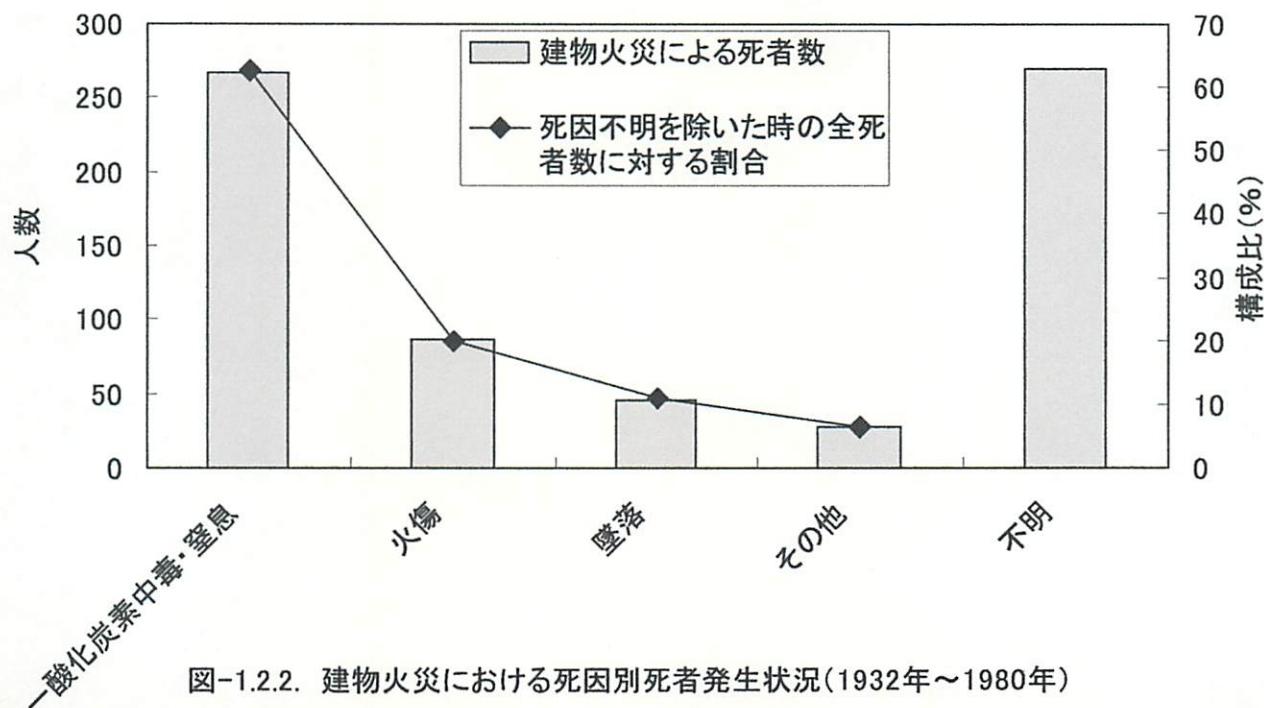


図-1.2.2. 建物火災における死因別死者発生状況(1932年～1980年)

### 1.3. 日本のトンネル火災の現状

日本のトンネル火災の現状はどうなっているのか。まず鉄道トンネルについて、図-1.3.1.<sup>6)</sup>に火災発生状況を示した。施設内よりも列車での火災の方が多い。放火を除くと絶縁不良、スパークといった電気系統の故障に起因する火災が列車火災全体の約 2/3、電源系などのトンネル施設火災が全体の約 1/3 である。これらの火災原因は入念な点検によって防ぐことが可能である。設備不良から生じた火災の代表例として第 2 章で BART 海底トンネル火災を取り上げている。この火災例を通じて、対策を考える。

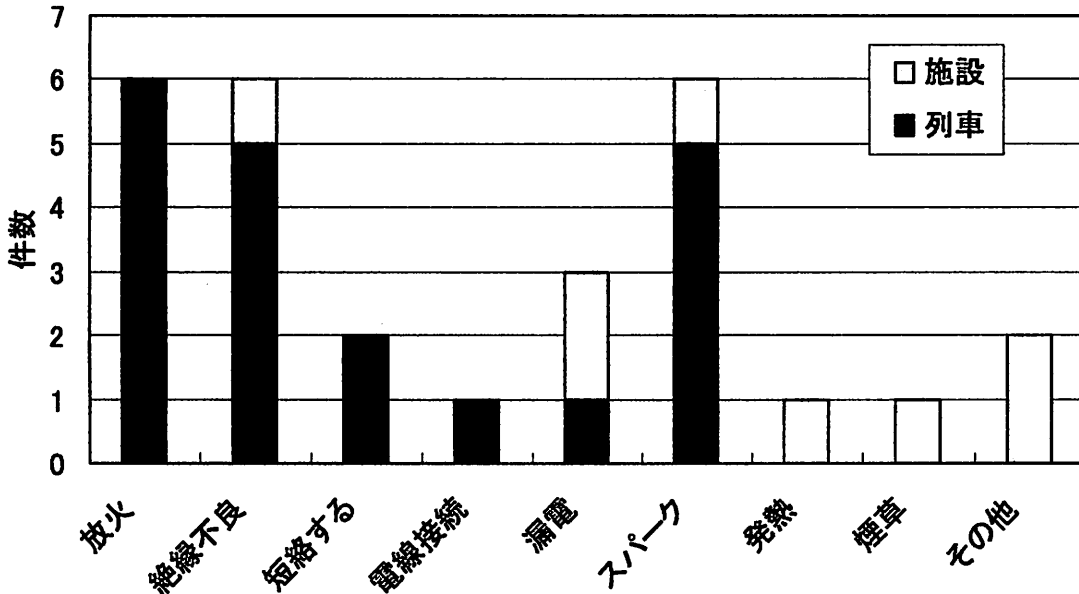


図-1.3.1. 日本の鉄道トンネルにおける原因別火災発生状況 (1976-1994年)

次に道路トンネルについて、図-1.3.2.<sup>7)</sup>は火災発生状況を示した。各原因で多くの割合を占めているのがトラックから起きた火災である。そして乗用車、二輪車と続く。トラック火災では排気管接触、乗用車火災では衝突と電気配線関係が多かった。日本の道路トンネル火災において、大きな影響を及ぼしているのはトラック火災であり、この代表例として第 2 章でモンブラントンネル火災を取り上げている。この火災例を通じて、トラック火災の現状とその対策を考える。

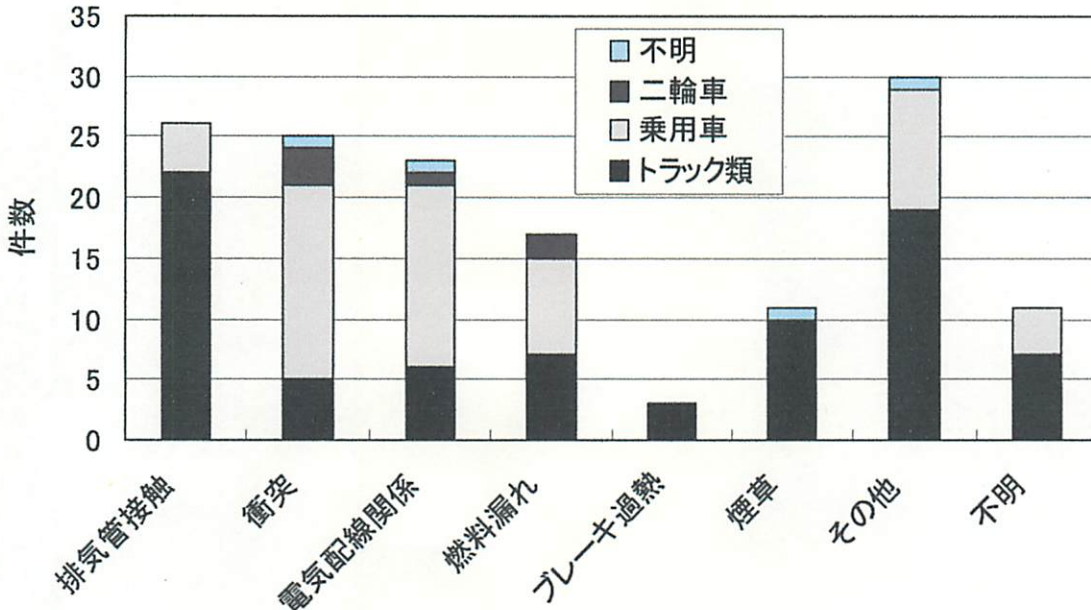


図-1.3.2. 日本の道路トンネルにおける原因別火災発生状況 (1976-1994年)

表-1.3.1.<sup>7)</sup>に日本の道路トンネル延長距離と火災事故発生頻度との関係を示す。2km未満のトンネルは何本あるのかは不明である。しかし、おそらく多くの本数があると思われる、そのため火災件数が多くなっている。同表から、トンネル延長が2~4kmでは火災事故発生率(件/(本・年))が0.01程度であるのに対して、4km以上になると0.07以上と7倍になる。これより、トンネル延長が長くなると火災事故発生率が増加することが分かる。

表-1.3.1. 日本のトンネル延長別火災事故発生頻度

延長	トンネル本数	件数	件/(年・本)
2km未満	-	100	-
2~3km	80	16	0.0105
3~4km	37	7	0.01
4km以上	16	23	0.076

では、高速道路トンネルのどの位置において火災が発生しているのかを図-1.3.3.<sup>6)</sup>に示す。表-1.3.1.と同様に短いトンネルでは火災数が多い。トンネル延長が長くなるほど火災件数は減っている。これは本数が少ないからで、火災事故発生頻度で考えると表-1.3.1.と同じような結果になるだろう。図-1.3.3.より、トンネル延長の大小にかかわらず入り口から出口までトンネル内でほぼ均等に火災が発生していることをわかる。

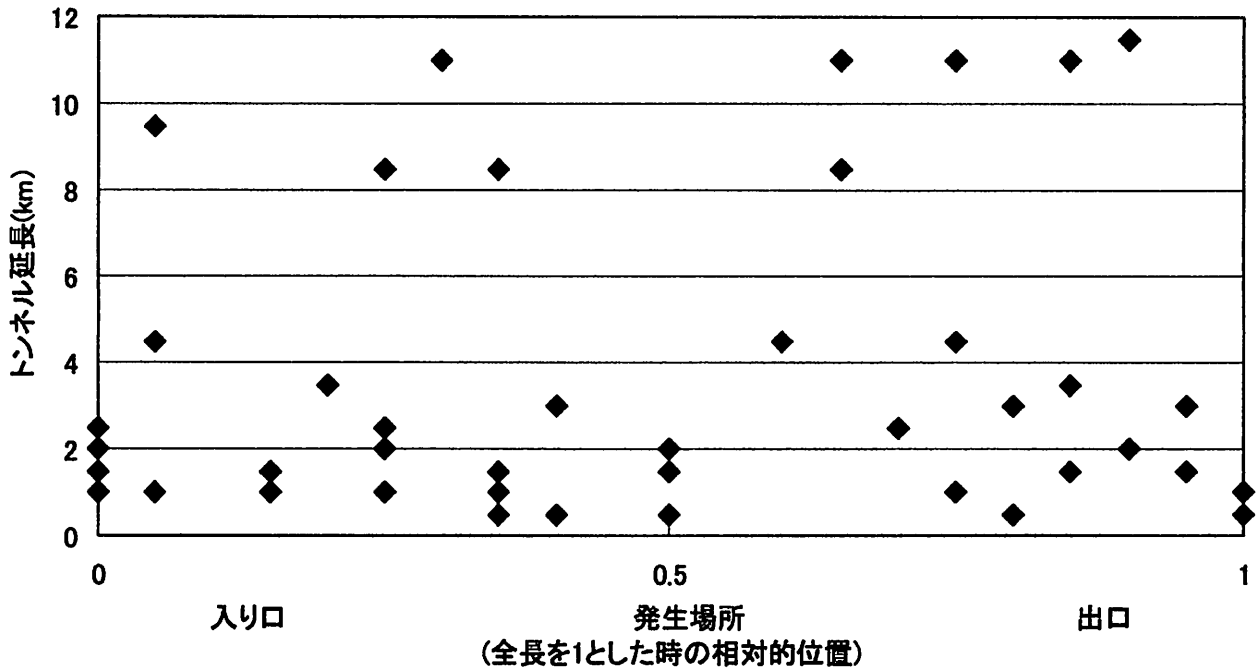


図-1.3.3. トンネル内の火災事故発生場所

#### 1.4. 海外のトンネル火災の現状

日本のトンネル火災の現状が前項のようであったのに対して、海外のトンネル火災の現状はどうなっているのか。日本のトンネルの場合と同じようにデータで検証していく。図-1.4.1.<sup>8)</sup>では海外のトンネルにおける火災事故件数の推移を示している。ここで対象になっている火災事例は国内で話題になったものを中心に 35 件をとりあげている。調査対象としては、道路トンネル火災が 25 件であり、鉄道トンネル火災が 10 件である。この項で取り上げている統計はこれをもとにしている。実際にはこの他にも火災はあるわけだが、今回は海外の火災傾向の一端が覗ければという考えからこの統計とした。

図-1.4.1.より、鉄道トンネルでは火災発生件数に大きな変化はないが、道路トンネルでは近年になるにつれて、火災発生件数が増加している。この理由としては、道路トンネルの延長の増加と自動車台数の増加が考えられる。



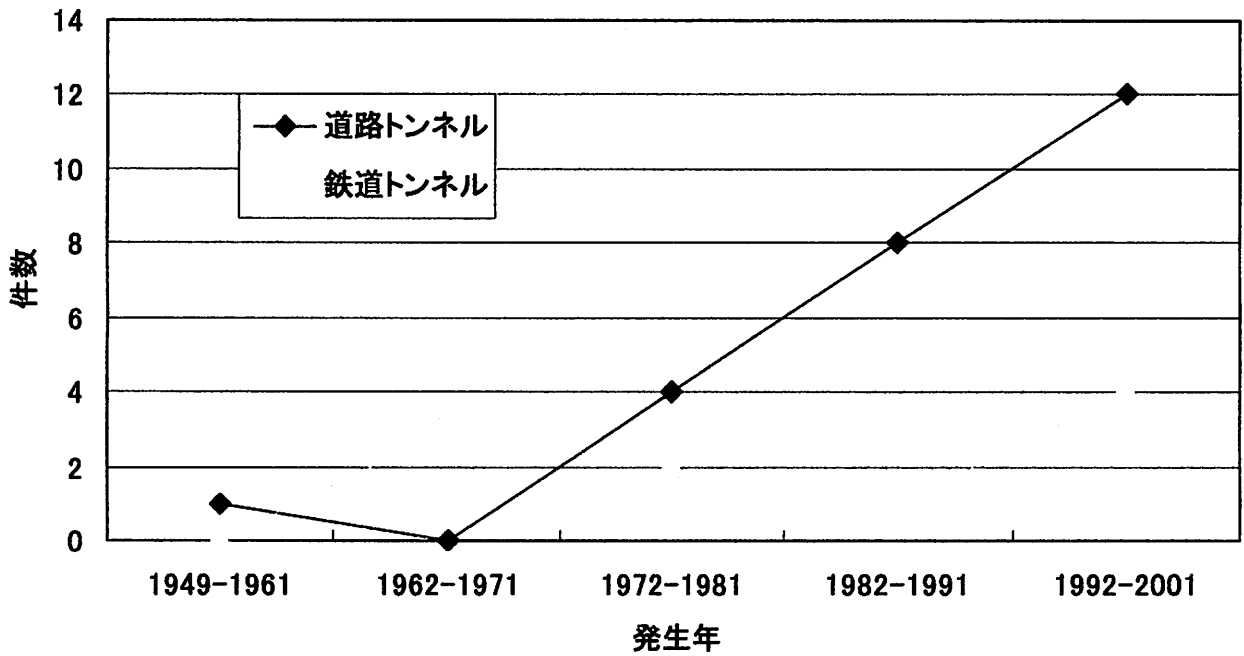


図-1.4.1. 海外のトンネルにおける火災事故件数の推移

ではどんな原因で火災は発生しているのだろうか。図-1.4.2.<sup>8)</sup>は海外トンネルにおける原因別火災発生件数を示している。日本では排気管接触が一番だったのに対して、海外トンネルでの最多は衝突で全体の38%である。これは車両同士またはトンネル構造物への衝突である。エンジンからの出火、電気系統からの出火、ブレーキからの出火などは日本での状況と類似しているが、日本では煙草による火災が上位にあったのに対して、海外では搭載荷物かわの出火がそこそこあることが特徴的だ。



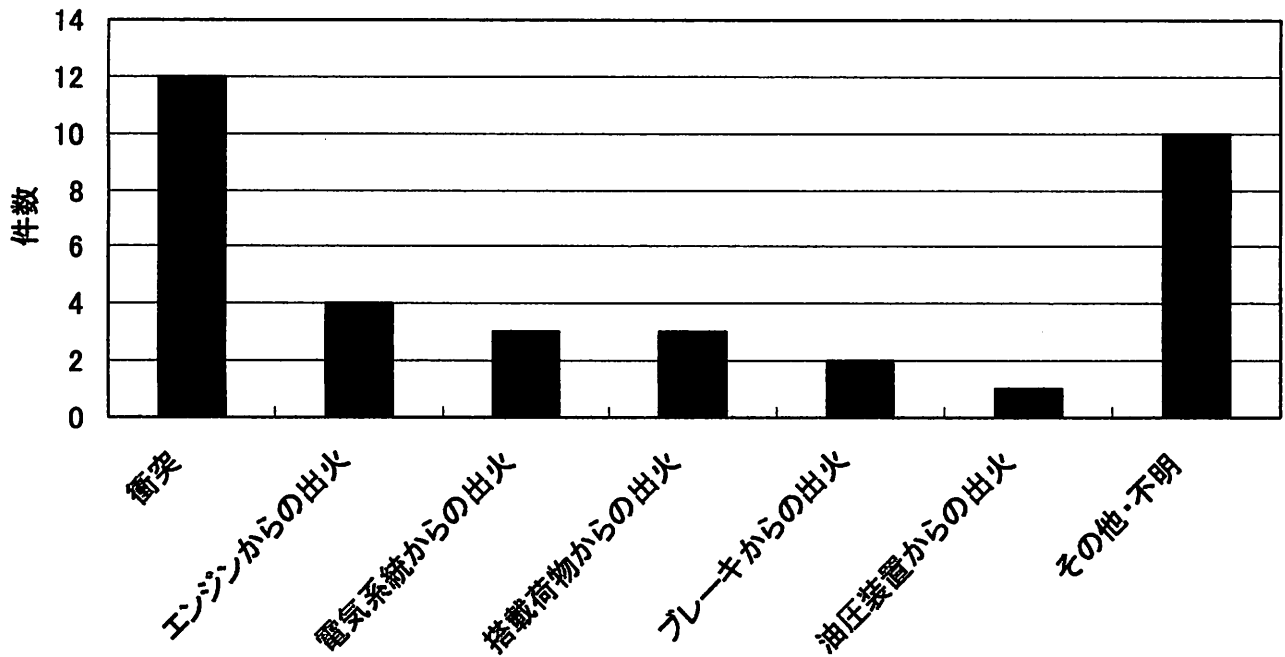


図-1.4.2. 海外トンネルにおける原因別火災発生件数

トンネル延長別の火災発生件数を図-1.4.3.<sup>9)</sup>に示した。2000m 未満のトンネルに関して、この火災発生件数の母数は注目されたトンネル火災であるので、その中において火災の割合多い理由としては、短いトンネルは日本の場合と同様に数が非常に多いからではないかと考えられる。また、5000m 以上のトンネルでも多い理由としては、大きいトンネルでの火災は大火災に発展しやすく、ニュースに取り上げられ話題にのぼりやすいからではないかと考えられる。

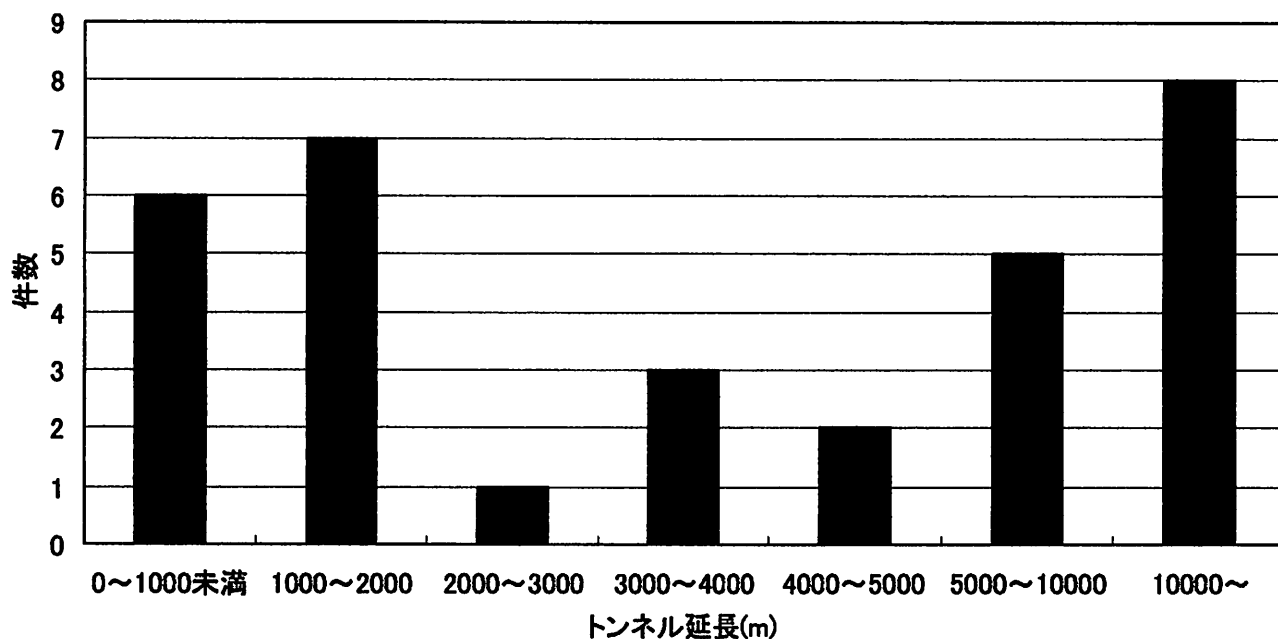


図-1.4.3. 海外トンネルにおけるトンネル延長別火災発生件数

火災発生から消火までの時間について図-1.4.4.<sup>9)</sup>に示した。不明を除き約半数が1時間未満となっている。しかし、トンネル構造や火災車両の積載物によって消火時間は大きく左右される。現実問題としては、人命救助が最優先なので、人が救出できるならば何時間燃えてもかまわないのかもしれない。しかし、トンネルの多くがそこを迂回せず進みたいと思うところにある訳で、復旧の早さも人命には及ばないものの重要な要素である。消火に長時間を要した事例として、モンブラントンネル火災がある。以上に日本と同様に図-1.3.2.で示される通り海外でもトラックによる火災の多い現状をふまえると海外のトンネル火災で言えることは、大差なく日本にも適応できると考えられる。

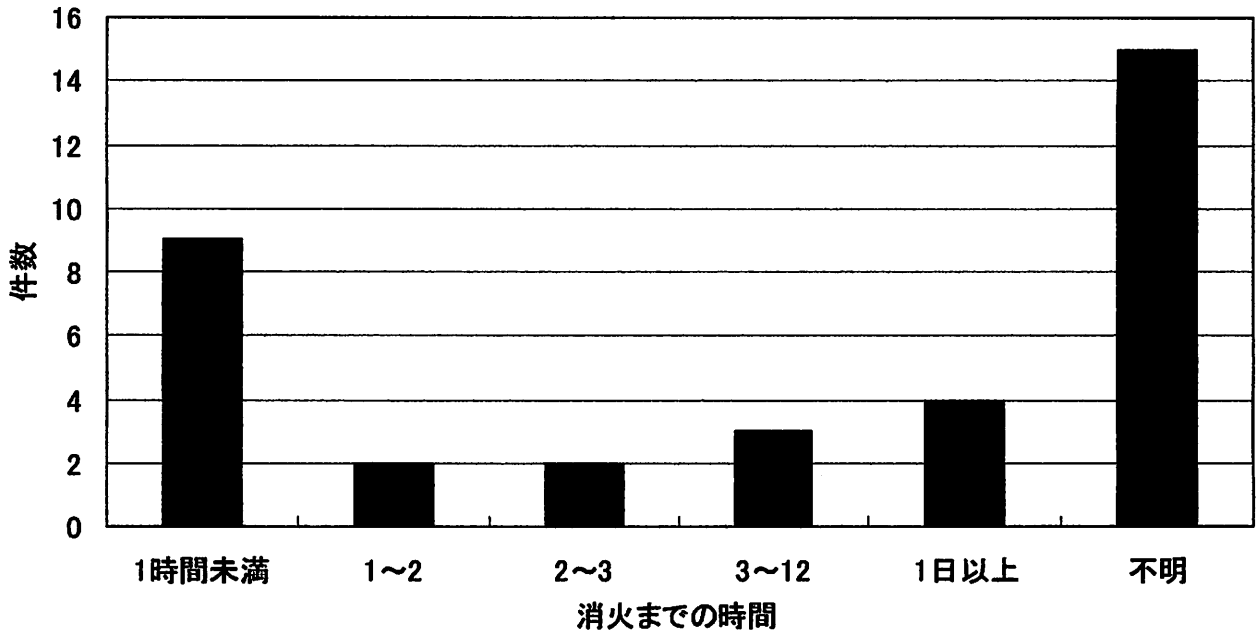


図-1.4.4. 海外トンネルにおける消火までの時間別件数

日本のトンネル火災では図-1.3.2.より、トラック火災が最も多かった。海外のトンネル火災の場合も図-1.4.5.<sup>8)</sup>からもわかるようにトラックによる火災が最も多い。自動車トンネル火災を中心として、次章でトンネル火災事故を分析して、未来の問題に何があるかを明らかにする。

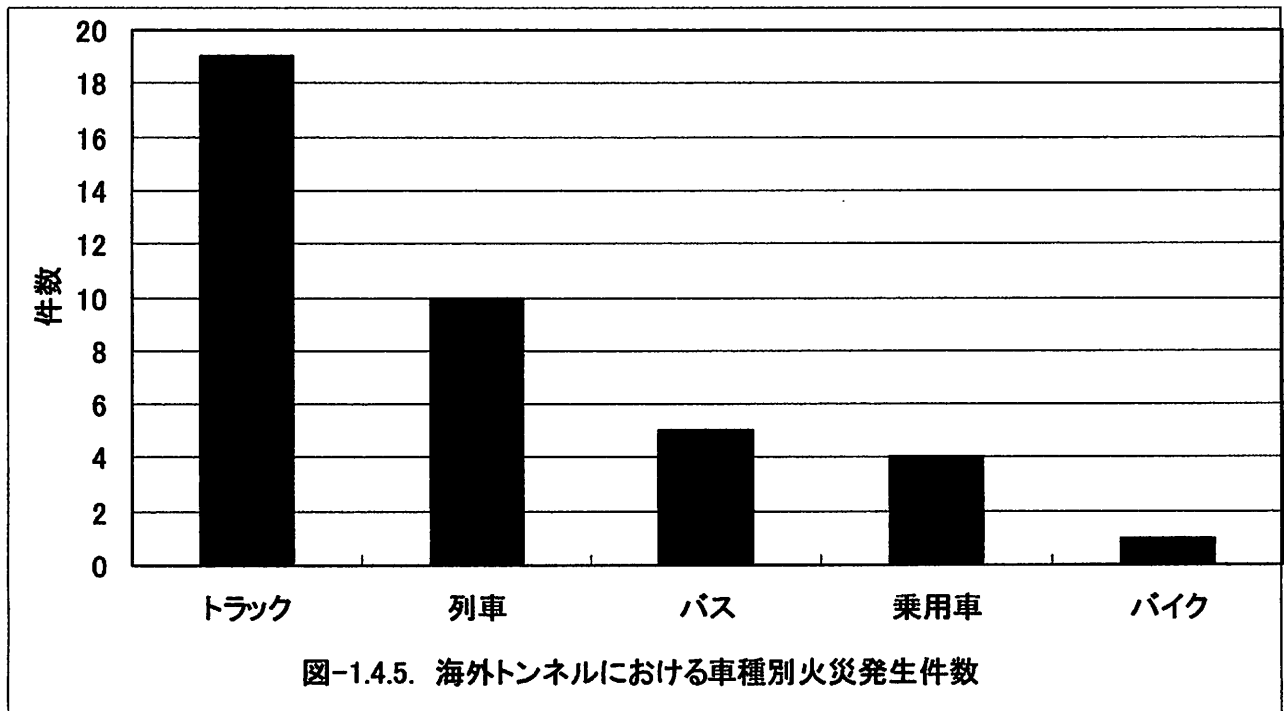


図-1.4.5. 海外トンネルにおける車種別火災発生件数

- 1) 内閣府：交通安全白書
- 2) 辻本誠ほか：都市の地下空間、鹿島出版会、1998
- 3) 消防庁：消防白書
- 4) 財団法人消防科学総合センター：地下空間における消防防災対策に関する調査研究報告書、1991.3
- 5) 東京消防庁行政研究会編：火災の実態から見た危険性の分析と評価―特異火災事例 112―、全国加除法令出版、1981
- 6) 道越真太郎ほか：超高強度コンクリートを用いた RC 柱の耐火性、大成建設技術研究所報、第 28 号、pp141-148、1995
- 7) 森田武ほか：耐火性に優れた超高強度コンクリートの仕様と施工、コンクリート工学、Vol.39、pp18-23、2001.11
- 8) 社団法人日本コンクリート工学協会編：コンクリート構造物の火災安全性研究委員会、2002.6

## 第2章過去の火災事例の分析

本章では過去のトンネル火災のうち代表的なもの、情報の良いものから以下の3つを分析した。

### 2.1. BART 海底トンネル火災（文献 1～4 をもとに作成）

#### 2.1.1. サンフランシスコ湾高速鉄道（通称 BART : Bay Area Rapid Transit の略称）

##### （1）目的<sup>1)</sup>

- ・都心の通勤者の車による混雑の緩和
- ・車による大気汚染の緩和
- ・大量公共輸送システムによるガソリン消費量の減少

サンフランシスコ湾に架かるオークランドベイブリッジの渋滞対策をきっかけとして建設が計画され 1972 年 9 月に開通した。郊外では地上、そして都心では地下鉄となっている。

省エネルギーという観点から、可能な限りコンピュータにより、切符販売も含め運転も無人となっている。ただし、監視と開扉を担当する添乗員は乗務している。

##### （2）位置

アメリカ合衆国カリフォルニア州中部のサンフランシスコ市内にある。サンフランシスコ湾、オークランド市、東湾のアラメダとコントラコスタ地方に及んでいる。

##### （3）トンネル延長

全長 114km の複線。地下空間は 30.6km あり、この他に、延長 5.8km の湾横断トンネル区間がある。

##### （4）地下空間

単線の並列トンネルで、片側に連続した歩道が設置されている。305m 以下の間隔で横断連絡坑および扉が設置されている。

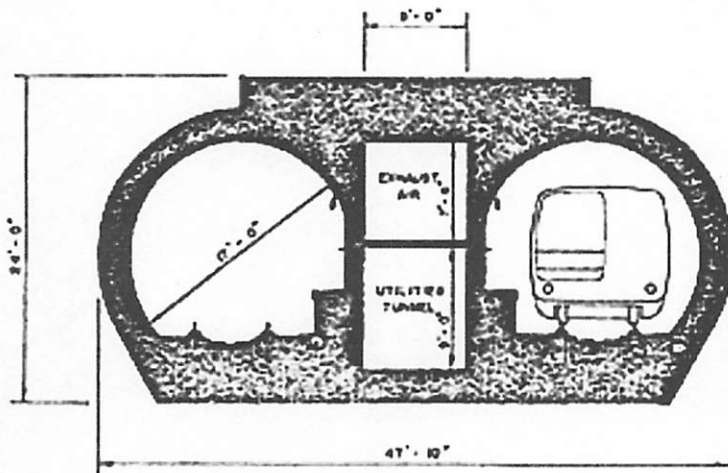


図-2.1.1. BART 断面図<sup>1)</sup>

#### 2.1.2. トンネル全体の設備

### (1) 設計段階における安全システムの重点

全体システム系・地下駅とトンネル部分の火災対策

- ・地下駅とトンネル部分の排煙
- ・駅部分の不燃材料

車両系・内装材料の不燃化

- ・電気配線の合理化
- ・車内の火災通報システム（車内に煙感知器設置）

### (2) 車両<sup>2)</sup>

車両は少なくとも A 型車両と B 型車両の 2 両、および A 型車両 2 両 B 型車両 8 両の計 10 両で構成されている。A 型車両は自動列車制御装置（コンピュータによる中央運転制御装置）および双方向連絡装置を装備しているが、B 型車両は装備していない。

### (3) 地下空間の非常用換気装置<sup>2)</sup>

非常用換気装置は各地下駅の端部に設置されている。地下空間は 98 区間に分割され、換気機は口径 1.9~2.13m、風量 56.6~66 m<sup>3</sup>/s、で、出力は 85~100Hp の可逆送風機である。これらの換気装置は高い信頼性を有する必要があり、このため綿密な維持管理を行っている。

### (4) 非常時の排煙制御<sup>2)</sup>

トンネル内各部に配備された換気ファンは、中央監視室において直接制御される。火災初期の段階で中央監視室にとって火災車両、火災位置の特定は非常に重要である。しかし、車両位置の特定は、車両が緊急に停止してもピストン作用により煙は進行方向に流れるため困難である。また車両運転士がマイルポストの確認は行うにも煙は数秒間で前方の流れ、視界を阻害する。そこでマイルポストは 32m ごとに設置され、運転士の視界確保が可能なように配慮している。車両火災時には、乗客が風上側へ逃げることを原則としているため、車道内風の風下側のファンを排気、風上側のファンを送気運転する。

### (5) 非常時の換気システム<sup>2)</sup>

トンネル内に設置された換気機は、火災時には自動的に排気状態（半横流式）、給気・送気状態の組み合わせ（縦流式）および部分送排気方式に投入される。これら 3 種類の方式は主として、トンネル構造形式によりその運転状態が決定され、排気状態のみの運転方法は、湾横断トンネル区間に適用され、給気・送気状態の組み合わせはパークレーヒルズトンネル区間、部分送排気式は他区間、駅部区間に適用される。

### (6) EFOR(Emergency Fan Operating Regime)

BART が 1977 年に Smoke Control Test を実施し、開発した。これは火災による熱と煙を最短時間でトンネルから排出しようとするもの。

以下の図-2.1.2.は火災の際、換気設備をどう運転するかをまとめたフローチャートである。この図中の語句について文献より推測した。"Trip 3rd Rail"とは本線と平行して設置されている Sub-Tube へ避難することである。"ED"ダンパーは排気ダクトのダンパーのことである。指令とは EFOR で決められたその状況ですること。特別条件

をみるとはその火災に対して通常の火災対応と違うところがあるか否かの確認のこと。

#### (7) 非常時の避難<sup>2)</sup>

列車火災は、通常初期段階では小規模なものであり、発生後 15～20 分経過しないと大規模なものとはならない。その後の数分間で火災規模は急激に拡大する。ガソリン放火による火災は発火後急激に拡大する。BART 列車の空調システムは、一例として、照明設備のような他の付帯設備から分離することはできない。したがって、煙が列車内に侵入した場合、煙を遮断する設備が必要となる。横断連絡坑の扉は乗客の避難に供するものであり、消防隊にも利用される。しかしながら、扉は長い時間開放された状態であってはいけない。

火災時対応—火災の発見については車両ごとに、前後に緊急電話があり乗客が電車の先頭にいる乗務員に

連絡することを想定している。運転手は位置を確認して、セントラルステーションに連絡し、

その後ステーション、運転手、乗客間で連絡を取り合って処理する。

- ① すぐに停車して、乗客を区画された隣のトンネルへ防火扉から避難させる。
  - ② 駅まで走る。
  - ③ 外気まで走り抜ける。
- ①～③を判断する基準は不明確である。

### 2.1.3. トンネルの各所ごとの設備

#### (1) 地下駅<sup>2)</sup>

可燃物がゼロに近いにもかかわらず、徹底的にスプリンクラーが配置されている。すべての地下駅部が 2 台以上のファンにより換気が行われている。駅部のファンは、一般的に送気システムが用いられているが、一部の駅では排気システムを採用している。駅部で列車火災が発生した場合、排気運転を行うことにより、入り口部および避難路から新鮮空気が流入するシステムとなっている。

#### (2) 地下鉄区間<sup>2)</sup>

2 本に分離されたトンネルであり、本線に平行した歩道と 305m 間隔の横断連絡坑が設置されている。また Sub-Tube が本線と平行して設置されており、火災時等にはそこに乗客を誘導するという安全ゾーンが準備されている。ここには、火災時には、新鮮空気が注入され、加圧されるシステムになっている。軸流ファンが各トンネルの駅の端部に設置されており、換気立坑のダンパー閉鎖により、換気流は軸流ファンへ流れ、送気または排気運転を行うことができる。送排気システムの運用により、煙および熱を一定区間に限定することができる。

#### (3) 湾横断トンネル<sup>2)3)</sup>

サンフランシスコ湾を横切るための海底トンネルでありチューブ式を使用している。東西に走るこのチューブは、共同の壁、天井及び床を持つ、長さ約 5800m の平行して並ぶ 3 本の独立したチューブからなっている。北側のボアは、サンフランシスコ行き（西行き）の列車が通過するずい道で、南側のボアはオークランド行き（東行き）列車が通過するずい道である。これら 2 つのボアの間には、幅約 2.5m のギャレ

リーがあって、ギャレリーの両壁にはそれぞれのボアに出入りするためのドアが約100mの間隔で互い違いに設置されている。ギャレリーは進入及び救助のための通路として設計されているが、また、BARTシステムを運行するための大量の電気機器を保管するためにも使われている。保管区域は長方形に仕切られており、不定間隔でギャレリー全長の2/3を占めている。

全長約10kmに渡るこの部分がサンフランシスコ市およびオークランド市消防局が最も心配した部分である。BART建設に当たって、サンフランシスコ・オークランド消防当局の要望がほとんど取り入れられた。そのため、海底トンネル部分に対しては、他の部分よりも特に材料系および排煙系システムの安全率が大きくなっている。

このトンネルの両端部は、換気装置用構造体に接続されている。それぞれの軌道トンネル間には2つのダクトが設置されており、上側ダクトは排気ダクト、下側ダクトはケーブル・配管スペースとなっている。排気ダクト断面は、2.29m×2.44mであり、305m間隔でダンパーが設置されている。排気ダクトは125Hpの2台の遠心送風機に接続されており、各ファンの風量は53 m<sup>3</sup>/sである。ダンパーは常時閉鎖されており、非常時の全開までに5分かかる。

#### (4) パークレーヒルズトンネル<sup>2)</sup>

このトンネルはロックブリッジ駅とオリンダ駅間の延長5.15kmにわたる並列山系トンネルである。避難用連絡坑は約305mごとに設置されている。排気ファンは東坑口に各方向毎に2台設置され、ファン稼働前に列車が坑口近くに接近していないことを確認の上、ローリングドアを閉鎖し、換気機による集中排気、あるいは集中送気を行う。

### 2.1.4. 火災

#### (1) 火災原因

363号車列車から外れたカバーの衝撃で、電源レール、または同保護カバーのブラケットが、調整不良となり、117号列車の接触シュー・アセンブリが壊れてショートし、火災となったものと思われる。

#### (2) 被害<sup>4)</sup>

物的被害：車両5両全焼、1両半焼。

人的被害：死者1名、負傷者56名。

#### (3) 火災発生状況<sup>1)</sup>

1979年1月17日(水) 16:30

BART363号列車は、サンフランシスコ湾下の海底トンネルを、ディリーシティに向けて通過中に、オークランド側から1.6km付近で緊急停止した。同車両の運転確認操作員(車両の監視と開閉を担当する者)より、BART運転・制御センターに次のような緊急報告があった。「M-1線において、車中火災発生」。この火災は、まもなく終わった。たまたま乗り合わせたBARTの技術者が、車両を調べたところ、脱線防止用のバーの取り付けが不完全であることがわかった。ライン開閉Boxの金属カバーに打たれて、列車から脱落して発生したものであることが判明した。同列車は、まもなく運転を再開した。そして、その後続の2列車に対し、BARTセンターは、低速運転及び、M-1トラックの状況を再確認することを指示した。その後、7列車が同地点を無事通過した。



同日 18:05

サンフランシスコ行きの BART117 号がオークランド側から西行きボアに入った。

同日 18:06

乗客 40 名の BART117 号（ディリーシティ行）が同地点を通過したところで、同車両運転操作員から、BART センターに「異常過負荷・火災発生、大量の煙が車内に流入中」と緊急報告があった。同列車をチューブ内の 1600m の所で停車させたが、濃煙が列車を包んでしまったため正確な位置がわからなくなってしまった。

まもなく列車の 7 車両全部の中に薄い煙が出始めた。運転操作員及びたまたま乗り合わせていた BART の管理者ポール・グラベル氏は、40 人の乗客全員を前部 2 車両に集めて救助隊の到着を待った。

BART センターは、直ちに排煙システムをスタートさせたが、不適當なダンパーを OPEN する等のミス制御のため、排煙作業が困難をきわめた。また、乗客救助のために、1500～2000 名を乗せた BART111 号列車を現場に送る等、混乱が発生していた。

一方、本線チューブと平行してある Sub-Tube 部分は、設計上では安全ゾーンとして加圧されることになっていた部分である。しかし、オークランド消防局のエリオット氏が、火災地点付近の Sub-Tube 内で死亡した。

同日 22:00

鎮火したが、車両は焼け落ちた。

事故後の改善点—カリフォルニア州公益事業委員会からの指示<sup>4)</sup>

- ① トンネルの 3 ヶ月間の閉鎖と車内の内装材の取り替え。
- ② 部外関係機関との連携。
- ③ 職員の教育訓練の強化

Harden と称する防火対策プログラムを準備し、すべてのポリウレタンシートを LS200 ネオブレンシートに交換した。さらに、車両内部のポリエステル仕上げも難燃化材料に交換した。BART の駅舎内部についても不燃化を実行。

BART はこの指示に従って、座席の難燃化、列車火災時のマニュアルの整備、職員訓練などに努めて営業を再開。

#### 2.1.5. 対策の分析

今回の火災は位置的には最悪の場所だが、湾横断トンネルの火災対策は“やりすぎ”といわれるほどの万全という前評判だったので容易に収束しそうな印象だった。しかしそんな中、死者や負傷者が出たことから、100%安全はありえないこと、また、危険箇所と経験的・学術的に判断されているところは、やはり危険であるということが教えられた。安全ゾーンといわれる場所で人が亡くなっていることからそれは明らかだ。安全ゾーンとして後から加圧されることになっていたが、火災と同時に自動的に加圧されるシステムか、

常に加圧されているようにするべきだ。危険箇所ができるのはやむをえないとして、ここからの避難・脱出方法の優先順位をあげて考えるべきだ。この事故をきっかけに、アメリカでは、海底トンネルおよび地下部分での火災時には車両を、止めずに、通過させてしまう意見が出た。実際現在はトンネル火災ではこの方式が常識となっている。その際に、仮に電車内での火災の場合に電車を動かすことで発生するピストン風によりさら

に火災が広がることに対しての対抗手段を考慮する必要がある。

このトンネルでは排気運転のみの縦流式をとっており、その場合生存者のいる箇所への給気対応ができない。そこで、たとえ縦流式でも何らかの給気方法を設けるべきだ。

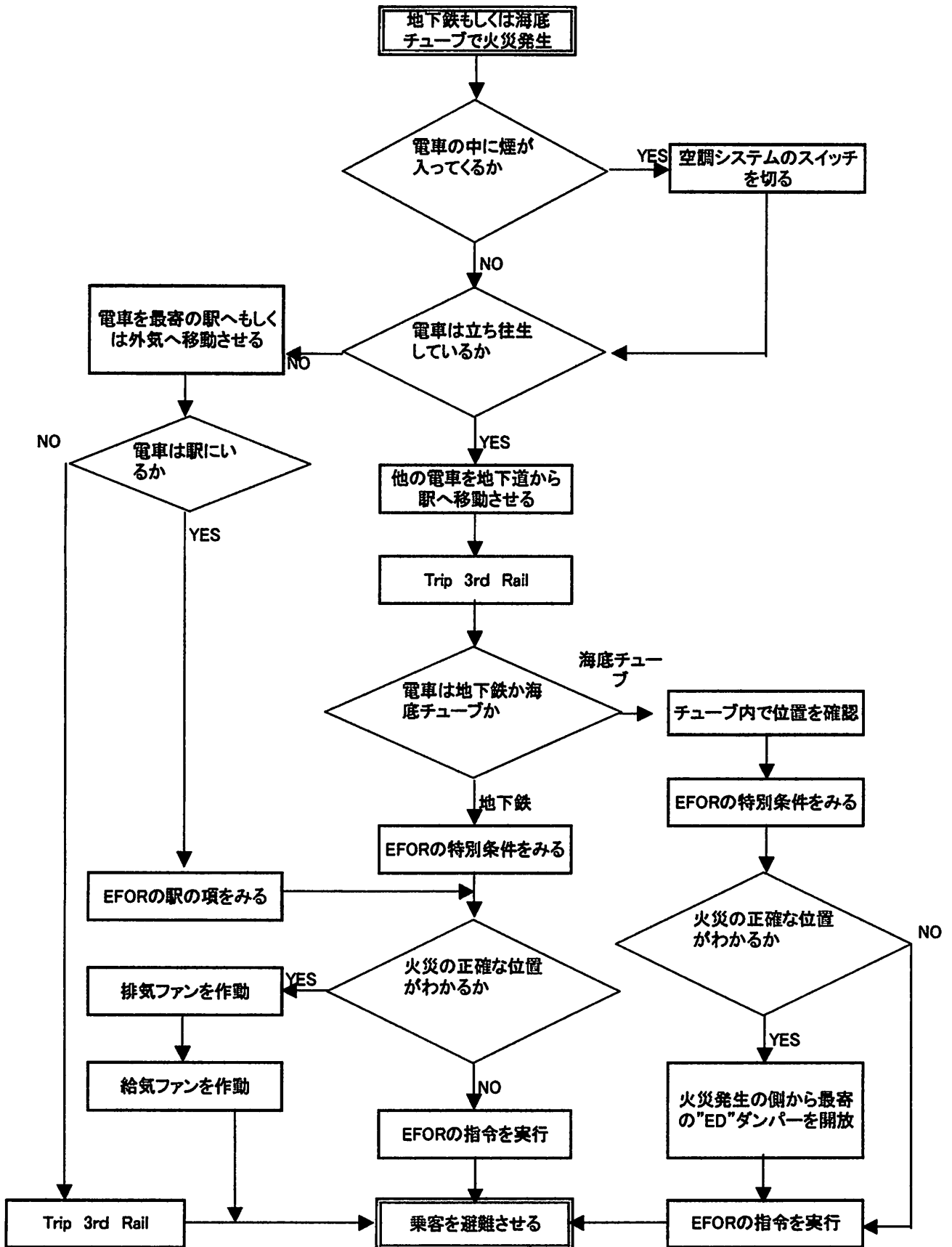


図-2.1.2. BART緊急換気のフローチャート

## 2.2. モンブラントンネル火災（諸数値は文献 5、6 を参照）

### 2.2.1. モンブラントンネル

#### （1）歴史

1953年3月4日にフランスとイタリアで共同して建設され、1965年に開通。

#### （2）長さ

モンブラントンネルの全長は 11600m でフランスの領土はフランス側の入り口から 7640m、イタリアの領土はイタリア側の入り口から 3960m である。フランス側の操作範囲はフランス側の入り口から 5800m、イタリア側もまた 5800m である。

#### （3）地形

フランス側の入り口（シャモニー）標高 1274m

イタリア側の入り口（アオスタ）標高 1381m

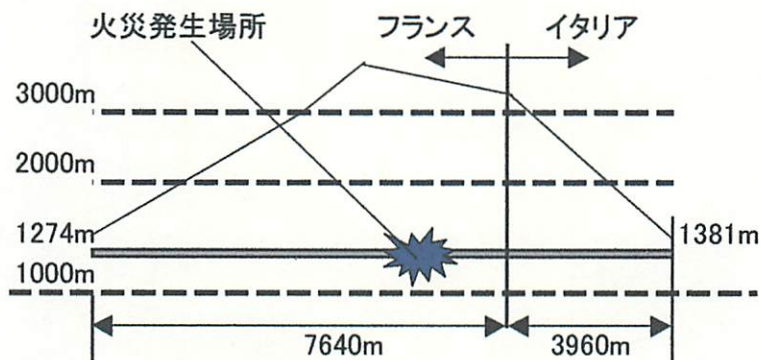


図-2.2.1. トンネル断面図①

#### （4）トンネル内部

車道幅員が 7m、両側に 0.8m の歩道がある。断面積は 40 m<sup>2</sup>（図-2.2.2.より西村が計算）。

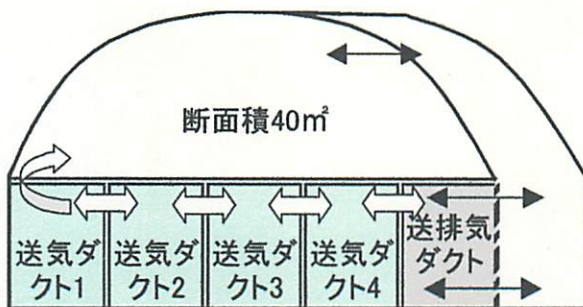


図-2.2.2. トンネル断面図②

#### （5）トンネルの防災設備

- ・ 駐車帯幅 3.15m、長さ 30m で、車道の端に 300m ごとに互い違いに位置し、フランス→イタリア方向に 1~36 と番号付けられている。この反対側にトラッ

クのための U ターン場所がある。

- ・ 人員用避難所—別名：シェルター。600m ごとに駐車帯にあり、新鮮空気を供給し、2 時間耐火で守られている。
- ・ セイフティボックス—100m ごとにあり、自動警報装置と消火器 2 本が設置。
- ・ 消防士用消火栓—300m ごとに駐車帯とその反対側の U ターンエリアにあり、電話と自動警報装置を備えている。

#### (6) 管理会社

フランス側—ATMB イタリア側—SITMB

両会社で換気設備の改善方法は共通ではなく、どちらにも他社の操作するトンネル換気に関して完全な知識を持ったオペレーターがいない。

#### 2.2.2. トンネルの換気方式

<基礎知識>トンネルの換気方式には次のようなものがある<sup>7)</sup>

自然換気—・風力、浮力換気 ・気圧差換気 ・交通換気

機械換気—・縦流式換気 ・横流式換気 ・半横(縦)流式換気

トンネルに沿う流れを縦流、トンネルを横切る流れを横流という

#### モンブラントンネルの換気方式—局所排気付送気半横流式

モンブラントンネルは、当初縦流式で考えられていたが、立地上立坑の設置が困難なこと、車道内風速が高くなること、1949 年アメリカのホーランドトンネルの火災を教訓(縦流風による延焼の恐れ)とし、交通量の増加に伴う対処の方法等から最終的に局所排気付送気半横流式が採用された。

この方式は、10m ピッチに設けられる送気フリューによって新鮮空気を均等に送気をし、汚染空気は 300m ピッチに設置される排気口により排気される。この場合の換気ダクトは、立坑等に換気ダクトを設置することが困難なためトンネル下部に設けられている。

換気ダクトの位置—トンネルのフランス、イタリアそれぞれの入り口からダクト(送気、排気とも)を道路の下に通してトンネル内を換気している。換気ダクトには送気用のダクト No.1~4 と、送排気可能なダクトの No.5 がある。

#### ・ 送気みのダクト No.1~4

送気能力—設計値 それぞれのダクトあたり  $75 \text{ m}^3/\text{s}$ 。No.1~4 を合計すると  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  となり、

これはフランス側、イタリア側ともに等しいので、トンネル全体では  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  となる。

換気範囲— 上記 No.1~4 の 1 つのダクトにつき、トンネル内の 1450m (5800m/4) に

送気している。車道への送気口のピッチは 10m である。

#### ・ 送排気可能なダクト No.5

送気能力—設計値 150 m<sup>3</sup>/s

排気能力—設計値 おおよそ 150 m<sup>3</sup>/s (フランス側、イタリア側ともに)

トンネル開通後の試験値 フランス—179 m<sup>3</sup>/s

イタリア—224 m<sup>3</sup>/s

※ フランス側はイタリア側の約 3/4 の能力でファンを運転している。それは、ファンの過振動による破壊を考慮したため。

換気範囲—フランス：約 2000m単位の 3 ブロックに分かれ、ブロックごとに排気を操作でき、

1～3 ブロックの範囲で排気口を開閉できる。排気口の間隔は 300mで、排気口の

数は全部で 19 個

イタリア：排気口全 19 個のうち、2～4 個単位で開閉が可能。

詳細な能力—フランス：全ての排気口を開く→排気能力 17 m<sup>3</sup>/s/km

1 ブロックのみ排気→ 44 m<sup>3</sup>/s/km

イタリア：全ての排気口を開く→ 22 m<sup>3</sup>/s/km

最初の 3 つの排気口のみ開く→57 m<sup>3</sup>/s

(3 つの排気口の合計)

### 2.2.3. 非火災時の換気状態

#### ・フランス側 (5.8km)

送気—レベル 2/4 (最大能力の約半分)、送気口は 10m ピッチ

送気量 = 300 m<sup>3</sup>/s × (2/4) = 150 m<sup>3</sup>/s

排気—レベル 1/2

排気量 = 150 m<sup>3</sup>/s × (1/2) = 75 m<sup>3</sup>/s

送排気のバランスでトンネル部から排出される風量

= 150 m<sup>3</sup>/s - 75 m<sup>3</sup>/s = 75 m<sup>3</sup>/s

#### ・イタリア側 (5.8km)

送気—ダクト No.1～4 はレベル 2/3、ダクト No.5 はレベル 1/2

送気量 = 300 m<sup>3</sup>/s × 2/3 + 150 m<sup>3</sup>/s × (1/2) = 275 m<sup>3</sup>/s

排気—排気はしていない

送排気のバランスでトンネル部から排出される風量

= 275 m<sup>3</sup>/s

### 2.2.4. 火災時換気の切り替えの時間経過 (火災概要は 2.2.7 に記述)

#### ・フランス側 (5.8km)

送気ダクト —10:58 以降に、No1～4 の送気ダクトのうち、入り口付近のダクト No1 のみ 3/4 の力で

運転、ダクト No2～4 は 100% の力で運転。

送排気ダクト—10:58 以降に、トンネル中央付近の 1 ブロックのみ 3/4 の力で

### 排気運転。

#### ・イタリア側 (5.8km)

送気ダクト — 火災発生から 11:01 までの間に全てのダクトを 100%で送気運転。

送排気ダクト— 火災発生から 11:02 まで 100%で送気運転。11:13 に送気をしているダクト No.5 を逆転させ、排気を駐車帯 No.20 に集めるよう開口を調整する換気制御が命じられた。11:14 にこの火災時制御は効果を無くし、11:15 に再び送気に戻った (※)。

(※) イタリア側の証言：排気運転をしなければならなかったが、送気運転を行っていた。このことを上司がみつけて、11:13 に排気をしようとしたが、不可能であった。なぜ不可能であったのかは未確認。

### 2.2.5. 火災発生後の換気状態

#### ・フランス側

送気—ダクト No1 はレベル 3/4、ダクト No2~4 は 100%運転

$$\text{送気量} = 75 \text{ m}^3/\text{s} \times (3/4) + 75 \text{ m}^3/\text{s} \times 3 = 281.2 \text{ m}^3/\text{s}$$

排気—レベル 3/4 (トンネル中央付近の 1 ブロックのみ)

$$\text{排気量} = 150 \text{ m}^3/\text{s} \times (1/3) \times (3/4) = 37.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\begin{aligned} \text{送排気のバランスでトンネル部から外へ排出される風量} &= 281.2 \text{ m}^3/\text{s} - 37.5 \text{ m}^3/\text{s} \\ &= 243.7 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

#### ・イタリア側

送気—ダクト No.1~5 まで 100%運転、

$$\text{送気量} = 75 \text{ m}^3/\text{s} \times 4 + 224 \text{ m}^3/\text{s} = 524 \text{ m}^3/\text{s}$$

排気—排気はしていない

$$\text{送排気のバランスでトンネル部から外へ排出される風量} = 450 \text{ m}^3/\text{s}$$

### 2.2.6. 中立点と空気の流れ

中立点とは・換気時にその両側で給気過剰の換気が行われる場合に存在する

- ・中立点では軸方向 (トンネルに沿う方向) の空気の流れがない
- ・中立点の両サイドでは、この点から離れるにつれて空気の流れが速くなる

普段はトンネル中間よりややイタリアよりの駐車帯 No.22~24 付近にある

トンネル内の空気の流れ及び中立点を決める要素

- ・仏伊それぞれのトンネル断面での送排気量
- ・フランスの入り口での排気ファンの役割
- ・2つの入り口間の気圧差 (仏伊での気象状況の違いに依存)
- ・イタリア入り口がフランスよりも 107m 高いことによるトンネル内部と外部の大気間の温度差での煙突効果
- ・車、特にトラックが移動方向にトンネル内の空気を押すピストン効果

空気の流れ

フランス→イタリア方向への煙突効果による空気の流れは、フランス←イタリア方向にトンネル空気を押す空気の流れ（フェーン現象）があり、相殺された（フェーン現象は年に20回くらい起きている）

（参）フェーン現象とは

フェーン現象は高い山脈を越えた気流が風化山麓へ高温かつ乾燥した気流となって吹き降ろす現象である。これはヨーロッパのアルプス地方で生じる特異な山越えの気流に対して名付けられたものであるが、地形条件が似たところであればどこでも生じる。このフェーン現象は高温・乾燥だけでなく、かなりの強風を伴う。したがって、この現象が生じている最中に大火がしばしば発生する。

気流が山脈を越す場合、まず風上側において気流は斜面を上昇するため雲が生じ雨となる。この雨混じりの雲中における気温低減率は100mにつき0.5℃である。一方、この気流が山脈の稜線を越えて下降し始めると、気流の温度は上昇し雲は消散する。その時、風下側斜面を下降する気流は、100mにつき1℃という風上側よりはるかに大きい乾燥断熱低減率で上昇する。これによって風上側と風下側とで温度差が生じる。

↓

結果として、発火点（駐車帯 No.21 付近）でフランス←イタリア方向の空気の流れは、フランスとイタリアの換気レベルの違いで起きた。火災前後の換気の流れを知ること、火災時の中立点を求めることができる

① イタリア入り口の風速計と煙の観察

- ・ 火災の際に煙が強くフランス方向へ流れ、イタリア方向には100～130m だけしか進まなかった

↓

つまり、No22～24 付近にあった中立点がイタリア→フランス方向に移動した

② 火災前の換気レベルを火災後のそれに変えると、熱を考慮しない換気計算では中立点をイタリア→フランス方向に500m 移す傾向があることが判明

## 2.2.7. 煙

3月24日では：燃焼生成物に周囲の大気に加えられて、煙と混合空気の体積を合計した煙のような混合物の状態だった

↓

つまり、火災によって発生した煙と換気空気が混ざっている。このときの煙の体積はわずかに換気空気の体積よりも大きいだけ、それはもともと燃焼で生じるものがごく少量だから。

火災時の災害の順番：視界の欠如→有毒ガス→過度の温度

3月24日の煙の動き

フランス入り口からトラック（VolvoFH12）が入る

↓

駐車帯 No.4 の煙濃度計はトラックの排ガスレベルの反応（このときは白煙）

↓

駐車帯 No.9 の煙濃度計はトラックの排ガスレベルの反応

↓

駐車帯 No.14 の煙濃度計が限界値を示す（これはCO 感知計よりも数分早い）



つまり、No.9 と No.14 の間でトラックからの発煙が突然進行した

↓

駐車帯 No.18 の煙濃度計が限界値を示す (10:52)

↓

駐車帯 No.21 でトラック停止 (この後はずっと黒煙)

↓

No.21 よりイタリア側—No.22 には 1 時間の間、ほとんど煙は進行せず

駐車帯 No.21—縦流空気はフランス←イタリア方向に 1~1.5m/s

No.21 よりフランス側の煙の流れ

- ・ 駐車帯 No.19 では 2~2.5m/s (火災前よりもわずかに遅い)
- ・ 駐車帯 No.9 では 3.5~4m/s (火災前 2~2.5m/s)
- ・ フランスの入り口では 6~6.5m/s (火災前 3~3.5m/s)

では煙と送気・排気量の関係はどうなっていたのか。これを図-2.2.3.に示した。断面積については値がなかったため推測した。図-2.2.2.をもとに計算すると約 40m<sup>2</sup>になった。この時、火災前の数値誤差は少ないが、火災後の値は誤差が大きい。

火災前

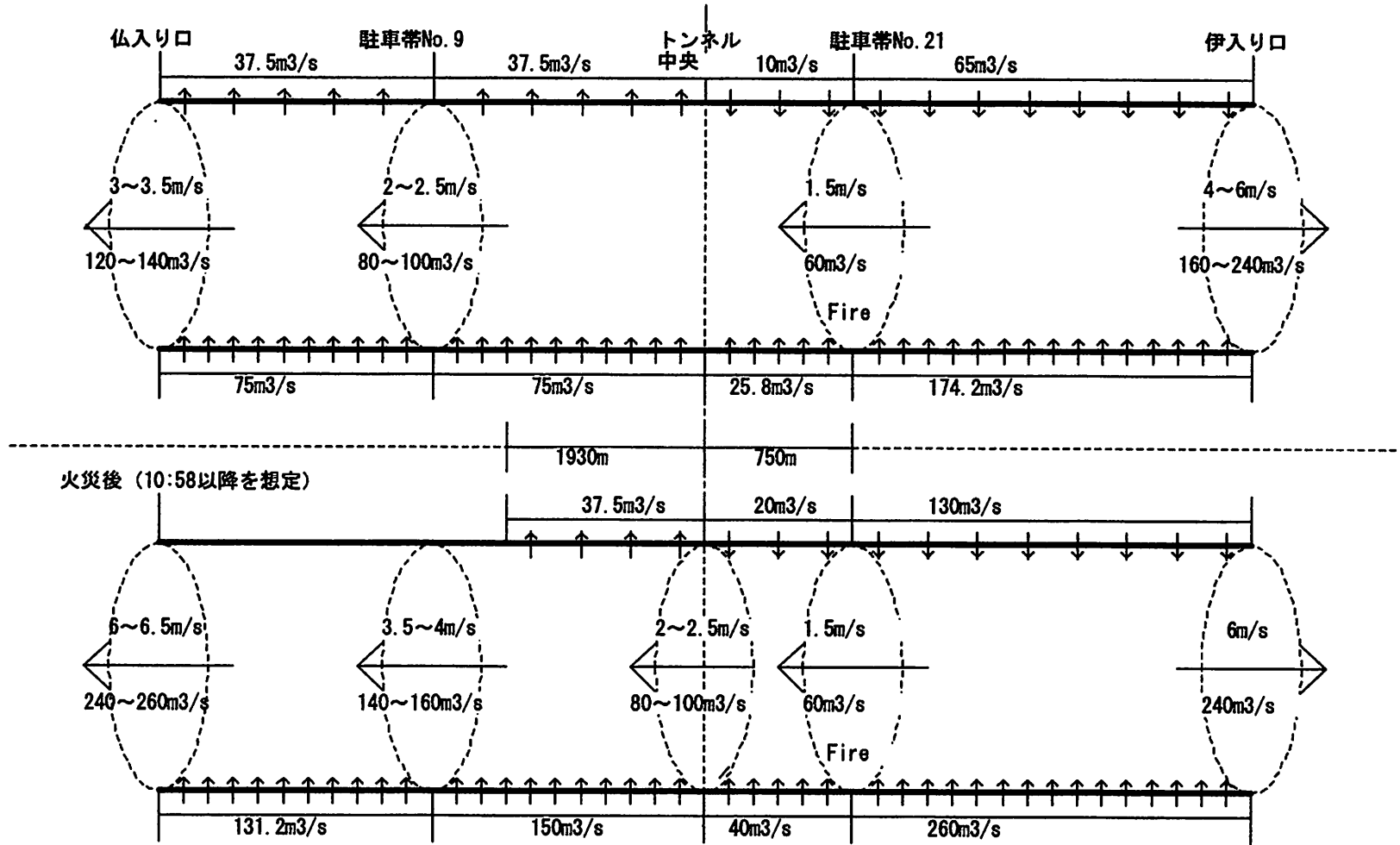


図-2.2.3. トンネル断面積を40m<sup>2</sup> (西村が図-2.2.2. から計算) とした場合のトンネル内での気流計算

### 2.2.8. 火災概要

1999年3月24日10:53火災車両の牽引トレーラー (VolvoFH12) はマーガリン 9ton と小麦粉 12ton を積んだ冷凍車であり、それが駐車帯 No.21 で停止。

同日 10:54

イタリアのコントロールルームに駐車帯 No.22 から電話での通報がある。

同日 10:55

1200m ごとにある信号のフランス→イタリア方向のものが赤に変わる。

同日 10:56

同様の信号でイタリア→フランス方向のものが赤に変わる。

同日 10:57

フランス側から ATMB の職員が内部の偵察に向かう。

同日 10:58

フランス側から ATMB の小型ポンプ車 (職員 4 名) がトンネル内へ。しかし、駐車帯 No.17 で動けなくなり、避難所 No.17 へ避難。ATMB のオートバイ隊員が炎上しているトラックの 6~7m まで接近する。SITMB 職員と協力し、事故車の運転手他全員 (12 名) をイタリア側からトンネル外に連れ出す。

同日 10:59

フランス側から ATMB の救助車 (職員 2 名) がトンネル内へ。しかし、駐車帯 No.17 で動けなくなり、避難所 No.17 へ避難。

同日 11:10

フランス側からシャモニーの大型ポンプ車 (消防士 6 名) がトンネル内へ。しかし、駐車帯 No.12 の避難所へ避難。

同日 11:32

フランス側からシャモニーの小型消防ポンプ車 (消防士 5 名) がトンネル内へ、そして、大型ポンプ車の消防士を救出する。

同日 11:45~15:00

フランス側のダクト No.5 を排気から送気に切り替えて、消防士 2 名と ATMB 職員 2 名が救出に向かう。ATMB 職員 1 名が負傷そして、引き返す。残りの 3 名で救助に向かうが、ダクト内に煙が充満してきたため避難所 No.5 に戻る。そこで、小型ポンプ車の消防士 2 名を発見。救助隊員 1 名と消防士 2 名を残し、先に進んだ消防士 3 名を発見するために、消防士 2 名は先に進んだ。避難所 No.11 で消防士達がダクトを利用している間に進入した救急車の要員 1 名と医師 1 名を発見。その 2 名は大型消防車の消防士 2 名を治療中。駐車帯 No.11、12 で避難している消防士 2 名を発見し、避難所 No.11 まで戻るように指示する。駐車帯 No.2 で 5 名の消防士を発見。この 5 名と避難所 No.11 の 2 名、計 7 名を回収。そして、脱出。

イタリア側から、Courmayeur の消防車（消防士 5 名）は避難所 No.22 と駐車帯 No.21 の間で前進できなくなり、避難所 No.24 まで戻り動けなくなる。

避難所 No.24 の消防士 5 名は、排気ダクトを利用し脱出する。

同日 16:00 過ぎ

フランス側から駐車帯 No.12 と避難所 No5 の消防士が救出される。

同日 17:25

フランス側から負傷者の救出。シャモニーの病院へ 6 名、サランシュの病院へ 8 名。

同日 18:35

フランス側から避難所 No.17 の ATMB 職員 6 名がサボア県の消防隊の車両にて救出される。

同日 19:05

PCO は、駐車帯 No.18 で 3 名の犠牲者を発見。

#### 2.2.8. 対策の分析

火災による死者は車両内で 29 名、車両外で 10 名の合計 39 名だった。消防士の証言によると死因は、一酸化炭素や様々の燃焼生成物による窒息であり、火に焼かれる前の最初の数分間に死亡したと思われる。このことから、空調設備、とりわけ排煙設備にもっと留意していれば、死者は激減していたことが容易に推測される。では、実際の火災規模に対して、排煙風量の想定値は適切であったのか。

表-2.2.1. 換気システムの設計に用いる放熱速度と煙流量の概略値

車両の種類	放熱速度[MW]	煙流量[m <sup>3</sup> /s]
乗用車 1 台	5	20
乗用車 2~3 台または乗用バン	8-15	30
バン 1 台(小型トラック)	15-20	50
バス 1 台または危険物を積載していないトラック 1 台	20-30	60-80
重量貨物自動車 1 台(最悪のケース)	100	200
石油タンクローリー 1 台(最悪のケース)	200-300	300

表-2.2.1.<sup>6)</sup>はフランスにおけるトンネルの非常用施設を決めるための条件を示している。1MW というのは、電気ストーブの発熱量に換算すると、約 2000 個分に当たる。一般的なトンネル計画を行う場合、フランスでは 30MW の火災規模を標準として、そのときの発煙量 80m<sup>3</sup>/s を排気するため 110m<sup>3</sup>/s の排気量を決める。モンブラントンネルでも排煙風量の設定に当たっては、30MW 程度の火災を想定している。30MW の火災に対する発煙量 80m<sup>3</sup>/s をもとに、設計排気量 150m<sup>3</sup>/s が決められた。この排気量は一般的な値より、やや多いと考えられるが、今回の火災では、75MW~110MW の火災が 1 時間~2 時間続き、その後、別の車両に燃え移り最大 150MW~190MW が、7 時間~13 時間続いている。平均としては 100MW が 50 時間続いた。100MW 規模の火災を想定して、排煙設備をつくることは経済性の面で難しいところではあるので、通る車両の種類

を規制してはどうだろうか。モンブラントンネルは 40t トラックまで通行可能であるが、積載物の関係で 30MW 規模の発熱量になるトラック等は、規制をすべきではないか。

## 2.3. ユーロトンネル火災（各数値は文献 8～12 を参照）

### 2.3.1. 英仏海峡トンネル（以下、EURO Tunnel：ユーロトンネルと称す）

18 世紀中頃 フランスの地質学者が、ドーバー海峡に海底トンネルを建設してはどうかと、国王に進言したことが端緒。

1985 年 4 月 英仏両国政府によりユーロトンネルの設計、施工、運用管理および資金調達に関する公示。

1986 年 1 月 英国首相サッチャー、仏国大統領ミッテランにより同プロジェクトの確定と、ユーロトンネルグループが宣言。

1993年 完成。

1994 年 5 月 6 日 開通。

位置— ドーバー海峡（英国フォークストン郊外ウォータールー駅とフランスのカレー駅を結ぶ）

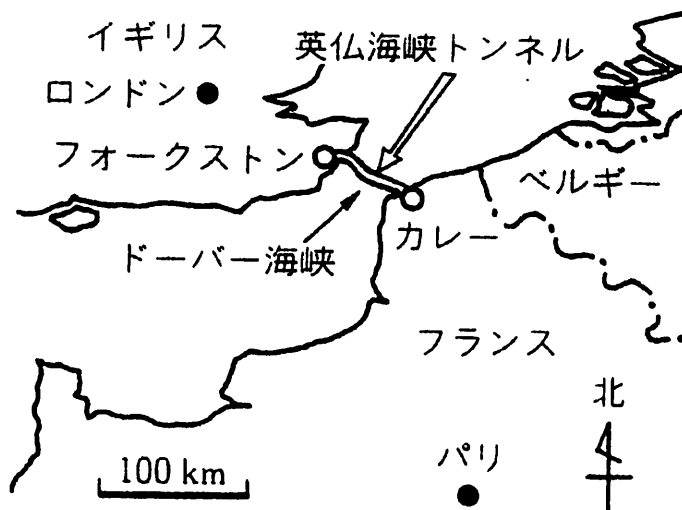


図-2.3.1. ユーロトンネルの位置<sup>9)</sup>

トンネル延長— 全長 49.2km、海底部はイギリス側のシェイクスピア・クリフからフランス側のサンガットまでの 37.5km。

主要地層— チョーク層（石灰岩質）

掘削方式— 機械シールド工法で、イギリス側では開放型のスコットランド製掘削機、フランス側では密閉型の日本製掘削機。履工にはセグメントを使用。

構造— 直径 7.6m のメイントンネルが 2 本と、直径 4.8m の中央トンネル（サービストンネル）1 本の計 3 本で構成されている。メイントンネルとサービストン

ネルはそれぞれ 15m ずつ離れている。

保守および緊急時のためにメイントンネル間で電車を行き来させる海底渡り線坑道が、イギリス・フランス側それぞれ 1ヶ所ずつ設置されている。

列車走行時の風圧軽減のために、南北のメイントンネル間は 250m 置きに直径 2.0m のダクト（ピストン風緩衝ダクト）で結ばれている。

メイントンネルとサービストンネルは作業および緊急避難のために、375m おきに直径 3.3m の横断連絡坑でつながれている。この連絡坑にはエアロックが設置され、ピストン風の漏洩による急激な圧力変化を防止し、サービストンネルと車道トンネルの圧力比を調整している。

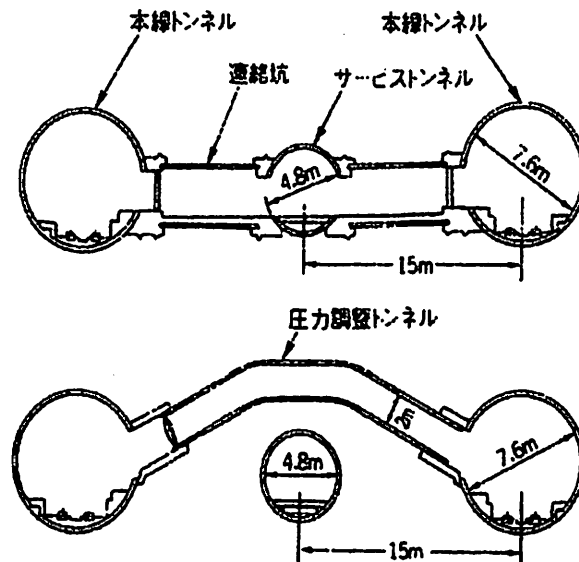


図-2.3.2. ユーロトンネル断面図<sup>8)</sup>

交通機関— 乗用車・トラック輸送を行う往復列車（名称はル=シャトル）、高速客列車（ユーロスター）、直通貨物列車、直通夜行列車の 4 種類。

運営管理— ユーロトンネル社

## 2.3.2. トンネル設備

### 換気設備

ユーロトンネルにおける換気設備の目的は以下のとおりである。

- ・ トンネル利用客のための安全性と快適性の維持
- ・ 火災発生時の車道部及びサービストンネルにおける火煙の制御
- ・ 機電室への新鮮空気の供給

2 種類の換気設備が本設備として運営されている。

#### 平常時換気システム<sup>9)</sup>

平常時—新鮮空気の供給は、英仏両側の 2 箇所立坑より中央のサービストンネルを経由して、横断連絡坑から車道トンネルへ供給される。新鮮空気は列車のピストン作用により車道トンネル内で混合され、トンネルの出口より出ていく。

火災時一横断連絡坑に設置される送気口およびダンパーは遠方制御により閉鎖される。列車の進行方向等の状況にあわせて、鉄道管理センターで操作される。

本線トンネルにおける火煙制御のための補助的換気システム<sup>9)</sup>

両方向のトンネルは、英仏両側 2 箇所補助的換気装置を設置している。空気は、送気・排気の形式で一方のトンネルから他方のトンネルへ循環する形式となっている。両側の換気所は 2 台の可逆送風機が設置されている。各トンネル 1 台（1 台は他トンネルのバックアップ用）。火災時に、補助的換気装置が必要となると、ピストン風緩衝ダクトのダンパーおよび横断連絡坑扉は遠方制御により閉鎖される。平常時換気システムの換気流速比は、乗客の避難のため横断連絡坑、サービストンネルへの煙の侵入防止のため調整し、換気流速は低下する。

### 煙感知器

3 種類（イオン式、光電式、一酸化炭素）の煙感知器が、トンネル内上部に約 120m 間隔で設置されている。また、火災警報装置については、2 種類（紫外線と赤外線）が設置されている。

### 管理設備

イギリスのフォークストンにある鉄道管制センター（Rail Control Center : RCC）、そのバックアップ機能を持つカレーの管制センター。緊急時初動チーム（First Line of Response Team : FLOR）が待機している消防署。FLOR は各ターミナルの救助センターに属する安全・救助チームで救助作業や火災発生時の初期活動に従事する。イギリス側トンネル入り口近くに設けられた防火設備管理センター（Fire Equipment Management Centre:FEMC）。FEMC は防火作業の中心となるセンターで、消火活動の監督や作業慣行、トンネル内の火災に結びつく潜在的危険の処理に責任を有する。各ターミナルでは、トンネル入り口にこれを設けている。

### 火災時対応

トンネル内上部に設置されている煙感知器、炎感知器及び熱感知器により火災を検知。現在のところ、火災発生の確認手順では、トンネル内に設けられた異なるタイプの煙感知器が 2 つ作動するか、シャトルの車載警報感知器が作動するかのいずれかを必要条件としている。

↓

検知された火災情報は RCC に表示・警報され、フランス側の消防署へ情報が連絡される。

↓

RCC には全ての情報が集まる。そこでは、第 1 にトンネル内の風向きを火災発生場所の状況に応じて変える。第 2 に 375m ごとにある横断連絡坑を開放し、乗客等を避難させる。この際、サービストンネルは、メイントンネルからの煙が侵入しないように空気は若干高めに加圧され、火災トンネルとは反対方向のトンネルの列車で救出されるまでの避難所としての役目を果たす。

### 2.3.3. 火災

火災発生場所—フランス→イギリスへのトンネルのフランス側から 18km 地点

火災原因— 後ろから5両目の無蓋貨車に積載されたトラック（ポリスチロールを多く積んだトラックと推定）から出火。

↓

何故燃え始めたのか？

↓

列車がトンネルに入る前に火がついているのを警備員が確認していることから、放火ではないか。

火災温度—トンネル坑内推定温度：部分的に 1000℃以上

消火方法—消防隊の放水

人的被害—乗客3名、救急隊3名の計6名が煙を吸い込み入院

物的被害— トラック15台、車両10両、後部機関車1両。それに加えて500mの区間でコンクリートセグメントに亀裂や局所的破壊、火源40m間は75%のセグメントで爆裂を起こし鉄筋が露出。セグメント厚40cmのうち30cmの剥離箇所もあった。

火災発生状況<sup>10)</sup>

1996年11月18日21:42

全長800mのシャトル列車（2群の貨車各14両と客車1両、及び前後の機関車の計31両）がCoquelles駅から英国へ向かって出発した。

同日21:49

列車が最初のトンネル内煙感知器の前を通過し、感知器が作動した。

同日21:52

この時刻までに、さらに4つのトンネル内煙感知器が作動した。

同日21:53

フォークストンにある鉄道管理センターは確認済みの火災警報を受け取った。この時点で、列車はトンネルに入って5kmの地点にいた。

この後、規定の作業手順に従い次のような措置が取られた。

①運転士は、トンネルを抜けるために運転を続行した。

↓

世界中の鉄道トンネルと同様に、ユーロトンネルにおいても、トンネル内で火災を起こした列車は消火作業のためにトンネル外に引き出すことになっている。

②RCCはトンネル内の他列車のすべてに対して、速度を時速100kmに落とすように指示した。

③トンネル間の煙の移動を防ぐためピストン風緩衝ダクトを閉じるように指示した。



④RCC は、火災を起こした列車の直後に続いていた列車の運転士に対して、列車を制御停止するよう指示した。そして、後続列車のトンネルへの進入が禁止された。

同日 21:56

支援が必要な場合に備えて、フランスの緊急時初動チームが Coquelles からサービストンネル内に入った。2 本ある海底渡り線坑道の横断ドアは、2 本の鉄道トンネルを空力的に分離するために閉鎖された。運転士はトンネルを脱するために列車を走らせつつづけていたが、フランス側の渡り線を越えたところで運転席の停止ランプが点灯した。これは支持ループの喪失が明らかになったため警報が作動し、運転士は列車を制御停止させた。この時点で火は後方接続の 5 両の車両に広がっており、停止後は前方にも広がった。

制御停止の場合、375m ごとに設けられた、鉄道トンネルとサービストンネルとを結ぶ横断連絡坑の前に、客車が来るように列車を止めることになっている。

↓

支持ループの喪失とは

荷物の積み下ろしの際に下げて列車を安定させるジャッキの 1 つが、下げた状態になっていることを示した可能性があることで、もし列車がトレーリング・ジャッキを下ろしたままで走行を続けていたとしたら、特に列車がイギリス側の海底渡り線坑道を通る際に脱線していた可能性がある。

横断連絡坑のドアは RCC からの遠隔操作か、ドアの内と外の装置によって開くことができる。RCC がそのドアを開いた時、予定通り、火災が起きた鉄道トンネル内に空気が流入し、煙を排除することができた。これは、サービストンネルの方が常に、鉄道トンネルよりも空気圧が高くなっているためである。

補助的換気システムを使えば、列車前方にあった煙を数分間で排出することができ、乗務員も乗客の避難をいっそう迅速に行うことができたはずである。しかし換気システムの設定を変え、煙を排出できるようにするまでには 25 分を要した。

31 名の乗客と 3 名の乗務員はサービストンネルに無事避難できた。

同日 23:24

救出した乗客を乗せた列車が Coquelles ターミナルに到着した。これは、火災を起こしたシャトル列車が停車してから 86 分後のことだった。

11 月 19 日 5:00

鎮火宣言。

#### 2.3.4. 対策の分析

ユーロトンネルは最新の設備を備えていた。長大トンネルということで避難用のサービストンネルはしっかり機能した。補助的換気システムの不手際を示されるように最新でより複雑になっていくほど管理員が使いこなせなくなる。このことは全ての高性能設備をそなえたトンネルに言えるのではないか。結果として死者はでなかったが列車火災では火災初期段階は小規模であるが今回のような放火による火災はその段階がなく、すぐに激しく燃える。より迅速な対応が求められる中、機能重視の設備を追い求めるには

疑問が減る。単純な設備で小さな機能しかない場合と、複雑な設備で大きな能力のある場合どちらが火災に有効なのか、これは今後の課題とする。

#### 2.4. 第2章参考資料

- 1) 日本建築防災協会：建築防災、1979.9
- 2) 社団法人土木学会、安全研究委員会、トンネル安全施設調査研究小委員会：トンネル安全施設調査研究小委員会報告書
- 3) 東京連合防火協会：防災 206 号
- 4) 財団法人消防科学総合センター：大深度地下における危険性物品の規則等のあり方に係る調査検討報告書、1995.3
- 5) (財) 高速道路技術センタートンネル研究部会：欧州におけるトンネル非常用施設及び最新施工技術に関する調査、2000
- 6) Sergiu F. Luchian：TASK FORCE FOR TECHNICAL INVESTIGATION OF THE 24 MARCH 1999 FIRE IN THE MONT BLANC VEHICULAR TUNNEL Report of 30 June 1999、2003
- 7) 石原正雄：建築換気設計、1969
- 8) 土木施工、1994年9月号
- 9) 社団法人土木学会、安全問題研究委員会、トンネル安全施設調査研究小委員会：トンネル安全施設調査研究小委員会 報告書
- 10) 月刊フェスタ、1999年11月号
- 11) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の火災安全性研究委員会 報告書、2002.6
- 12) セイフティエンジニアリング、1999、106号

### 第3章 今後の火災への有用な手段

#### 3.1. トンネル基準

1979年の日本坂トンネル火災（死者7名、負傷者2名）を契機として、消防庁としては、自動車トンネルの火災対策について、建設省と検討を重ねてきた。昭和56年4月、「トンネルにおける自動車火災防止に関する非常用設備について」（昭和56年4月25日消防予防第96号各都道府県知事宛消防庁次長通知）を通知している。

この通知では図-3.1.1.に示すように、トンネルの延長と交通量によって定まるトンネルの等級区分に応じ、表-3.1.1.に示す非常用施設を設置することとしている。最も等級が高いAA区分のトンネルについては、水噴霧設備などさまざまな安全対策を行わなければならない。

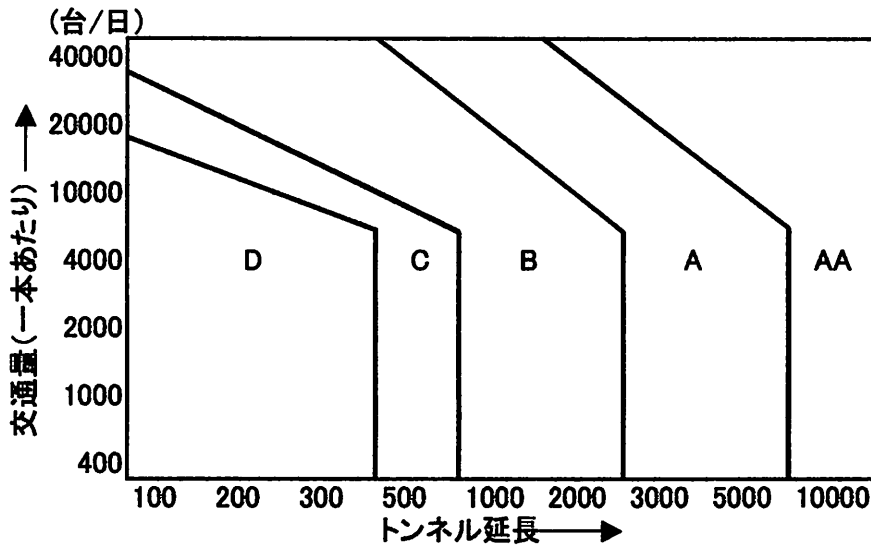


図-3.1.1. トンネル等級区分

表-3.1.1. トンネル等級別の非常用施設

非常用施設		トンネル等級				
		AA	A	B	C	D
通報・ 警報 装置	非常用電源	○	○	○	○	
	押しボタン式通報装置	○	○	○	○	
	火災検知器	○	△			
	非常警報装置	○	○	○	○	
消火 備設	消火器	○	○	○		
	消火栓	○	○			
避難 誘導 設備	誘導表示板	○	○	○		
	排煙設備または避難通路	○	△			
その 他の 設備	給水栓	○	△			
	無線通信補助設備	○	△			
	ラジオ再放送設備または拡声放送設備	○	△			
	水噴霧設備	○	△			
	監視装置	○	△			

避難誘導設備は、トンネル内で、火災その他の事故に遭遇した運転者などをトンネル外へ安全に誘導、非難するために設備で、その中で、排煙設備は換気設備を利用して、避難環境の向上をはかるための設備である。その設計に関しては、常時の換気方式、交通方式等に留意するという基準のみである。図-3.1.1.が示すように、トンネル延長が3000m未満で、交通量が5000台/日以下のトンネルでは、排煙設備を設ける必要はない。これは、この程度の距離ならば煙はトンネルの出入り口から排出され、避難に大きな支障が生じないという前提に基づくものであろうがこの前提は正しいのであろうか？以下にいくつかの検討を各等級のトンネルではどの程度火災が発生するのだろうか（出火率の推定）。各等級のトンネルごとに1.1.で算出した数字を使い火災発生件数を出す。

表-3.1.2. トンネル等級別出火頻度(ただし、トンネル内外で出火率は変化しないものとして1.1.で算出した0.0075件/百万キロを使用。各トンネル2車線とした。またAAを除き各等級の上段ではトンネル延長が、下段では交通量が最大となるようにした。)

トンネル等級	交通量(台/日)	トンネル延長(km)	年あたりの出火率	平均出火間隔
AA	40000	10	2.19	-
A	5000	10	0.27375	3.7
	40000	1	0.219	4.6
B	5000	3	0.082125	12.2
	40000	0.5	0.1095	9.1
C	5000	1	0.027375	36.5
	40000	0.1	0.0219	45.7
D	5000	0.5	0.0136875	73.1
	20000	0.1	0.01095	91.3

この計算によると、2車線10kmのAA級道路トンネル(通行車両台数40000台/日・車線:出火率0.00752件/百万走行台キロ)では自動車火災は1年に約2.2回起きることになる。トンネル内外で出火率は変化しないものとしているが、無視できない数字である。また、AAを除く各A~Dの等級では上段ではトンネル延長をその等級の中で最大になるようにとり、その時、交通量をその中で最大になるようにとった。下段ではその反対に交通量が最大となるようにとり、トンネル延長はそれの中で最大をとっている。その際に同じ等級にもかかわらず、等級Aでは平均出火間隔で約0.9年、等級Bでは約3年、等級Cでは約9年、等級Dでは約18年と大きな違いとなる。トンネル延長と交通量とともに火災出火率も考慮して設備を置くべきではないだろうか。

列車トンネルについて、地下空間の線的な利用である列車トンネルの出火率がトンネル内であるか否かに影響しないとして計算すると、以下の例のようになる。

複線50kmの大深度地下鉄道(1日240往復:出火率0.00267件/百万走行キロ)では、列車火災の発生は約40年に一度のレベル( $2.3 \times 10^{-2}$ /年)となる。地下鉄の使用期間が40年未満とは考えられないことから、こういった地下鉄をつくるならば、まずこの地下鉄では火災は発生することを前提として非常用設備を考える。これは当然として、データからこの地下鉄の使用期間中に、まず火災は発生すると考えられる。その火災がどの程度の規模になるのかはわからないのだから、人命を確実に確保できる設備をつくらなければならない。

### 3.2. 煙

トンネルの非常用設備には表-3.1.1.のようなものがあるが、序論で述べたように、人が生存できるか、できないに大きく関与するものが煙である。当然、それを制御しなけ

ればならない。その煙制御の目的には2つあり、1つは人が外部などの安全な空間へ避難するまで、避難に使用される空間の煙濃度を許容値以下にたもつことであり、もう1つは消火活動を行っている間、それに必要な空間の煙濃度を許容値以下に保つことである。

まず基本事項の確認。煙を制御する上において、建築的な区画化がもっとも重要である。煙を区画内に閉じ込めることができれば、煙制御の目的の大部分は達成できる。しかし、地下空間において地下駅はまだしも、トンネルを建築的に区画することは不可能である。さらに、地下駅にしても避難や消火活動のための扉が開放されたり、扉などの隙間が存在したりすると、火源の温度上昇に伴い、煙は確実に拡散する。また、火源付近の被災者の避難時間を確保するために、煙の降下を防止する必要がある。

(参) 2)送風機には大別して2種類がある一・遠心送風機  
・軸流送風機

遠心送風機— 渦巻き形のケーシングの中にある羽根車が回転することによって、軸方向の吸込み口から入った空気は羽根の外周へ出て、ケーシングの吹き出し口から吹き出す。送風機がつくり出す圧力は主として羽根車の回転方向に対する羽根の角度（翼角 $\beta$ ）による。その方向を次の3種に分けている。

(1) 後曲翼  $\beta < 90^\circ$  (2) 放射角  $\beta = 90^\circ$  (3) 前曲翼  $\beta > 90^\circ$

翼角が増せば圧力は増加し、同じ寸法の羽根車では流量も増加する。前曲翼送風機は一般に、同じ羽根車の径および羽根周速に対して最も高い圧力、流量が生じる。特に流量は吸込み口で縮流を生じないようにベルマウスをつけ、できるだけ大きくとる（したがって半径方向の羽根の深さを小さくするとともに羽根の枚数を増す必要が生じる）ことによって著しく増加する。羽根車の両側に吸込み口をとる形式（両吸込み）はさらに大なる流量を得られる。前曲翼送風機の容積はコンパクトであるので、一般の建物の換気に使用されるが、その効率は75%以上を得ることは難しい。後曲翼および放射翼送風機は羽根車の幅が狭く、羽根数は少なく（6～16枚、前曲翼は30～60枚）深さは大きい。最近、後曲翼は翼形断面をもつ羽根を使うことによって従来の板羽根の効率80%に対して、90%という高い効率が得られている。後曲翼送風機は効率が良いので大規模な換気（トンネル、鉱山など）に用いられる。放射翼送風機および翼形後狂曲翼送風機は局所換気、高所ダクト、ボイラー通気などに用いられる。

軸流送風機— 空気全体の流れが羽根の軸方向に平行に流れる形式。普通は翼形の断面を持つ羽根の先端と円筒形のケーシングとの間はできるだけ小さい隙間になっている。吹き出される気流は羽根のトルクによって回転方向の速度成分を持っている。だから、吹き出し気流の絶対速度は軸方向速度よりも常に大きい。したがってまた羽根によって生じた全圧の一部は有効な全圧とはみられないわけである。案内羽根

を設けることによって、回転成分を減らし、効率を高めることができる。案内羽根の配置に関しては下記のような3種がある。

- (1) 羽根車の下流に固定案内羽根を設ける方法
- (2) 羽根車の上流に羽根車の回転と逆の回転を与えた前置回転羽根を設ける方法、良い設計では吹き出し気流が完全に軸方向になる。
- (3) 羽根車の下流に第2の羽根車を設け、反対方向に回転させ、回転成分を除く方法で、このような組み合わせは「反転送風機」といわれるもので最大の有効静圧が得られる。

軸流送風機は同じ羽根径と周速をもつ遠心送風機に比べて圧力は一般に低い、流量は大きくすることができる。効率は案内羽根のない場合約75%まで、大きな下流案内羽根を設けると90%近くまで上げられる。

### 3.2.1. 煙の動き<sup>3)</sup>

煙の制御を試みる上で、煙の動きにも注目する必要がある。地下空間を煙が流れる時、煙の流れは空間的な広がりをもつので、一般に流れを記述するためには3個の空間座標が必要である。このような流れを3次元流れという。しかし、3次元流れの解析はたいへん難しいので、2次元流れで解析されることが多い。地下空間での流れも奥行き方向には平均速度を考慮することによって2次元流れとできる。さらに、トンネルは流れの方向がほぼ一定に限定されていることを利用して、厳密には半径方向あるいは高さ方向に流速分布をもつ2次元流れであるが、平均流速を考慮することにより1次元流れとして取り扱うことにする。1次元流れには閉水路流れ（管路の流れ）と開水路流れの2種類があり、閉水路流れはトンネル内を煙が充満して流れるもので、開水路流れは自由表面をもち、煙が空気に接しながら流れるものである。

もう1つある熱量に対してどの程度煙は発生するのだろうか。煙流動を把握するために、火源によって生じる熱プルームの性質を知る必要がある。

### 3.2.2. 火災プルーム<sup>4)</sup>

火災領域よりさらに上方には、燃焼を完了した燃焼生成物と空気との混合気体の熱気流、すなわち火災プルームが形成される。プルームは流体のある点に熱が加えられ、そのために生じた密度差による浮力によって、流体が浮力をもち上昇する過程で、周囲の空気を巻き込んで、円錐状の上昇気流に発達したものをいう。円形火源上の火災プルームは、周囲の空気が静穏で火災プルームを吹き倒すような流れなどがなければ、火源上の鉛直軸を気流中心軸とする軸対称な上昇気流となる。またさらに火源面が厳密に円形でなくとも火源からの高さが大きくなるに従い次第に軸対称に近づいていく。火源からの高さが十分大きいところでは、気流は燃焼の発熱が一点に集中した点熱源上の軸対称とみなすことができる。ジェット、プルームなどの用語についてここで整理しておく。

「噴出液体と周囲流体との間に密度差が存在せず、運動量のみを有して噴出される場合を噴流（ジェット）と呼ぶ。放出される流体が初期運動量をもたず、浮力のみを有する場合をプルームと呼び、この2つが両端に位置することになる。これらの中の場合、すなわち、初期運動量と密度差の両方を備えている場合を密度噴流と呼ぶ。」火災初期には、火源から天井に向かってプルームが形成され、次第に拡大すると考えられるから、プルームの挙動を知ることは火災時の煙挙動を解析する上で重要である。

Yih の論文から、プルーム内の温度、速度分布と上昇気流の式を示す。Yih は次元解析と実験結果から以下の式を得た。

$$-\left(\frac{z^5}{\rho G^2}\right)^{\frac{1}{3}} \Delta\gamma = 11.0e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{0.084z}\right)^2} \quad (3.2.1.)$$

$$\left(\frac{\rho z}{G}\right)^{\frac{1}{3}} u = 4.7e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{0.072z}\right)^2} \quad (3.2.2.)$$

$$V = 0.153\left(\frac{Gz^5}{\rho}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.2.3.)$$

ただし、 $G = -\int_0^{\infty} 2\pi r u \Delta\gamma dr$

$z$  : 熱源からの垂直距離[m]

$\rho$  : 流体の密度

$\Delta\gamma$  : 高さ  $z$  におけるプルーム内外の比重量の差

$u$  :  $z$  軸方向の速度

$r$  : 半径方向の距離

$V$  : 高さ  $z$  での上昇気流の体積[m<sup>3</sup>/s]

上述の定義から  $G = \frac{Q}{C_p T_0}$

$Q$  : 熱源からプルームに与えられた熱量[kcal/ sec]

$C_p$  : 空気の定圧比熱[kcal/kg · K]

$T_0$  : 周囲空気の絶対温度[K]

(3.2.1.)~(3.2.3.)式を、計算が容易になるように  $G = \frac{Q}{C_p T_0}$  をもちいて書き直すと

$$\Delta\theta = 11.0\left(\frac{T_0 Q^2}{\gamma^2 C_p^2 g}\right)^{\frac{1}{3}} z^{-\frac{5}{3}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{0.0084z}\right)^2} \quad (3.2.4.)$$

$$u = 4.7\left(\frac{gQ}{\gamma C_p T_0}\right)^{\frac{1}{3}} z^{-\frac{1}{3}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{0.0072z}\right)^2} \quad (3.2.5.)$$

$$V = 0.153\left(\frac{gQ}{\gamma C_p T_0}\right)^{\frac{1}{3}} z^{\frac{5}{3}} \quad (3.2.6.)$$

ただし。  $\Delta \theta$  : 周囲の空気との温度差  
 $\gamma$  : 流体の比重量[kg/m<sup>3</sup>]  
 $g$  : 重力加速度[m/s<sup>2</sup>]

ここで、式(3.2.6.)において

$$g=9.8$$

$$\gamma = 1.2$$

空気の温度を 20°C として、 $C_p=0.24[\text{kcal/kg} \cdot \text{K}]=1[\text{kJ/kg} \cdot \text{K}]$

$$T_0=293$$

$$Q [\text{kcal/ sec}]=4.186Q [\text{kJ/sec}] \quad \text{より}$$

$$V = 0.153 \left( \frac{9.8 \times 4.186 \times Q}{1.2 \times 293} \right)^{\frac{1}{3}} z^{\frac{5}{3}}$$
$$= 0.153 (0.12Q)^{\frac{1}{3}} z^{\frac{5}{3}} \quad \text{となる。}$$

このような特徴を持つ煙であるが、第 1 章で言及したように、非常に危険な存在である。具体例を出し、煙性状を推定していく。そこで、第 2 章の過去の事故例を見てみる。

BART トンネル火災：排煙制御失敗

モンブラントンネル火災：排煙制御失敗、排気容量の不足

ユーロトンネル火災：排煙作業成功

検証例としては排煙制御に失敗しているモンブラントンネルを使う。

### 3.3. モンブラントンネル火災の検証

#### 3.3.1. フェーン現象の影響

普段はトンネル出入り口の高度差によりフランス→イタリア方向へ空気は流れている。しかし、火災当日はこの煙突効果による空気の流れに対して、フェーン現象によるフランス←イタリア方向にトンネル空気を押す空気の流れがあり、相殺された。フェーン現象は年に 20 回くらい起きている。今回の火災を検証する上でフェーン現象による空気の流れの影響は大きかったと判断し、フェーン現象が発生し、換気の影響がない時の空気の流れはどうなっていたのかを調べた。ここでは、文献 5 より、イタリア側の出口がフランス側より 50kg/m<sup>2</sup> 気圧が高かったという記述を参考に推定した。



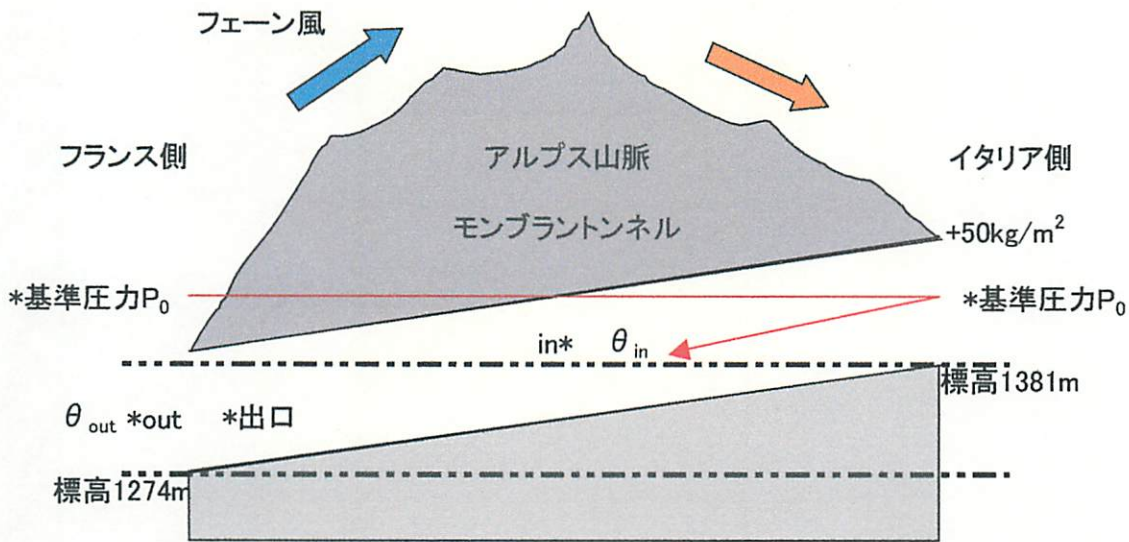


図-3.3.1. フェーン現象時のモンブラントネル

トンネル内温度  $\theta_{in}$ (°C)、トンネル内流速  $V$ (m/s)を一定とする。その際、トンネル内圧力損失差  $\Delta P$  は

$$\Delta P = \frac{\xi \gamma V^2}{2g}$$

重力加速度  $g=9.8$  (m/s<sup>2</sup>)

総合抵抗係数  $\xi$  = 入り口の形状抵抗係数  $\xi_1$  + 出口の抵抗係数  $\xi_2$  + 摩擦抵抗  $\xi_3$

(参) 2) 流れを大別すると層流と乱流とに分けられる。

層流—流体粒子が管壁に平行に整然と流れている状態

乱流—流体粒子が互いに不規則に乱れ、混ざり合いながら流れている状態。乱流の場合、速度や圧力はすべてある時間間隔の平均値であり、流体粒子の速度の瞬間値を測定することは非常に難しい。

工学的利用における流れは、ほとんど乱流であり、自然風や室内気流は乱流の場合と層流の場合がある。自然換気における毛細管や隙間の流れは層流とみなされる場合が多い。

層流から乱流への移行は Reynolds によって無次元数  $Vr/\nu$  [ $V$  は平均流速 (m/s)、 $r$  は管の半径 (m)、 $\nu$  は動粘性係数 (m<sup>2</sup>/s)] によって決まることが発見されている。半径  $r$  の代わりに直径  $d$  を用いた無次元数  $Re$

$$Re = \frac{Vd}{\nu}$$

これをレイノルズ数といい、層流から乱流への移行点は  $Re \approx 2000$  であり、これを臨界(限界)レイノルズ数という。これ以下の  $Re$  数においては管入り口にどのような攪乱を与えても、乱れは次第に減衰して層流になるので、特にこの値を下限臨界レイノルズ数という。V.W.Ekman は管入り口にベルマウスを用い、滑らかな管材料を用い、慎重な実験を行って、 $Re=50000$  の臨界値を得たという。これらの高い値を上限臨界レイノルズ数といっているが、実際に上限値が存在するかどうか、はなはだ疑わしい。ま

た管壁の粗さによって生じる局所的な剥離が乱流への移行の原因となることは認められているが、そのメカニズムについてはすべてわかっているとはいえない。

空気の動粘性係数  $\nu = 13.2 \times 10^{-6}$  (m<sup>2</sup>/s)

トンネルの直径  $d = 7\text{m}$

そこで今回  $V$  が未知数なので、 $Re$  数を求めるために  $V$  の仮定を行い、イテレーション計算を行うことにする。

<1> $V = 8\text{m/s}$  と仮定する。

$$Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{8 \times 7}{13.2 \times 10^{-6}} = 4.24 \times 10^6 > 2000 \text{ より、トンネル内は乱流である。}$$

入り口の形状抵抗係数  $\zeta_1 = 0.5$

また、出口の速度圧は外に拡散されるので、出口の抵抗係数  $\zeta_2 = 1$

摩擦抵抗  $\zeta_3 = \frac{\lambda L}{d}$  である。

トンネル長さ  $L = 11800$  (m)

トンネル断面積  $d = 45$  (m<sup>2</sup>)

摩擦抵抗係数  $\lambda$  について様々な計算方法があり、1つずつ検証する

1) 空気力学的に滑らかな円管に用いられるブラジウスの式より、

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{\frac{1}{4}}} = \frac{0.3164}{(4.24 \times 10^6)^{\frac{1}{4}}} = 0.007$$

2) 空気力学的に粗な円管に用いられる式より、

$$\lambda = \frac{1}{\left(1.74 - 2 \log \frac{\varepsilon}{r}\right)^2}$$

ここで、半径  $r = d/2 = 3.5\text{m}$

また、トンネルはコンクリートなので、表面の絶対粗さ  $\varepsilon = 3.0 \times 10^{-3}$

$$\lambda = \frac{1}{\left(1.74 - 2 \log \frac{3.0 \times 10^{-3}}{3.5}\right)^2} = 0.004$$

3) トンネルはコンクリートなのでレイノルズ数と摩擦抵抗係数の関係より

$$\lambda = 0.03$$

ここでは3)が適切と判断し  $\lambda = 0.03$  を使用。

ゆえに、 $\zeta_3=7.87$

総合抵抗係数  $\xi = 0.5 + 1 + 7.87 = 9.37$

さらに、トンネル外温度  $\theta_{out}$  とトンネル内温度  $\theta_{in}$  の差を  $5^\circ\text{C}$  と仮定し、

$$\theta_{in} = \theta_{out} + 5$$

標準空気比重量  $\gamma = \frac{353.25}{273.17 + \theta}$  より、

$$\text{out 点での標準空気比重量 } \gamma_{out} = \frac{353.25}{273.17 + \theta_{out}}$$

$$\text{in 点での標準空気比重量 } \gamma_{in} = \frac{353.25}{273.17 + \theta_{in}} = \frac{353.25}{278.17 + \theta_{out}}$$

以上より、

$$\Delta P = \frac{\xi \gamma V^2}{2g} = \frac{9.37 \times 353.25 \times V^2}{19.6(273.17 + \theta_{in})} = \frac{3310V^2}{19.6(278.17 + \theta_{out})} = \frac{3310V^2}{5452.1 + 19.6\theta_{out}} \quad \dots A$$

仮定 1: 報告書<sup>5)</sup>の「フェーン現象によりイタリア側がフランス側より、 $50\text{kg/m}^2$  高くなった」という記述を、

フランスの気圧 = 基準大気圧  $P_0 + 50\text{kg/m}^2 + \text{高低差} \times \gamma_{出口} - \Delta P$  と考えて

① 外気経由の圧力換算

$$P_{out} = P_0 + \gamma_{out}(1381 - 1274) = P_0 + 107 \gamma_{out}$$

② トンネル経由の圧力換算

$$P_{出口} = P_0 + 50 + 107 \gamma_{出口} - \Delta P$$

この  $\gamma_{出口}$  は出口点での比重量、また前提条件よりトンネル内温度は一定なので

$$\theta_{出口} = \theta_{in}$$

$$\text{そこで } P_{出口} = P_0 + 50 + 107 \gamma_{in} - \Delta P$$

$P_{out}$  と  $P_{出口}$  は等しくなるので、①②より

$$P_0 + 107 \gamma_{out} = P_0 + 50 + 107 \gamma_{in} - \Delta P$$

$$\text{よって } \Delta P = 50 + 107(\gamma_{in} - \gamma_{out}) = 50 + 107 \frac{353.25}{278.17 + \theta_{out}} - 107 \frac{353.25}{273.17 + \theta_{out}} \quad \dots B$$

A、Bより

$$\frac{3310V^2}{5452.1 + 19.6\theta_{out}} = 50 + 107 \frac{353.25}{278.17 + \theta_{out}} - 107 \frac{353.25}{273.17 + \theta_{out}}$$

$$V^2 = \frac{5452.1 + 19.6\theta_{out}}{3310} \left( 50 + 107 \frac{353.25}{278.17 + \theta_{out}} - 107 \frac{353.25}{273.17 + \theta_{out}} \right)$$

$$\text{ゆえに } V = \sqrt{\frac{5452.1 + 19.6\theta_{out}}{3310} \left( 50 + 107 \frac{353.25}{278.17 + \theta_{out}} - 107 \frac{353.25}{273.17 + \theta_{out}} \right)}$$

また、トンネル外温度  $\theta_{out}$  とトンネル内温度  $\theta_{in}$  の差を  $10^\circ\text{C}$  と仮定したときは、

$$V = \sqrt{\frac{5550.1 + 19.6\theta_{out}}{3310} \left( 50 + 107 \frac{353.25}{283.17 + \theta_{out}} - 107 \frac{353.25}{273.17 + \theta_{out}} \right)}$$

これらの仮定の  $V$  を図示すると以下のようになる。

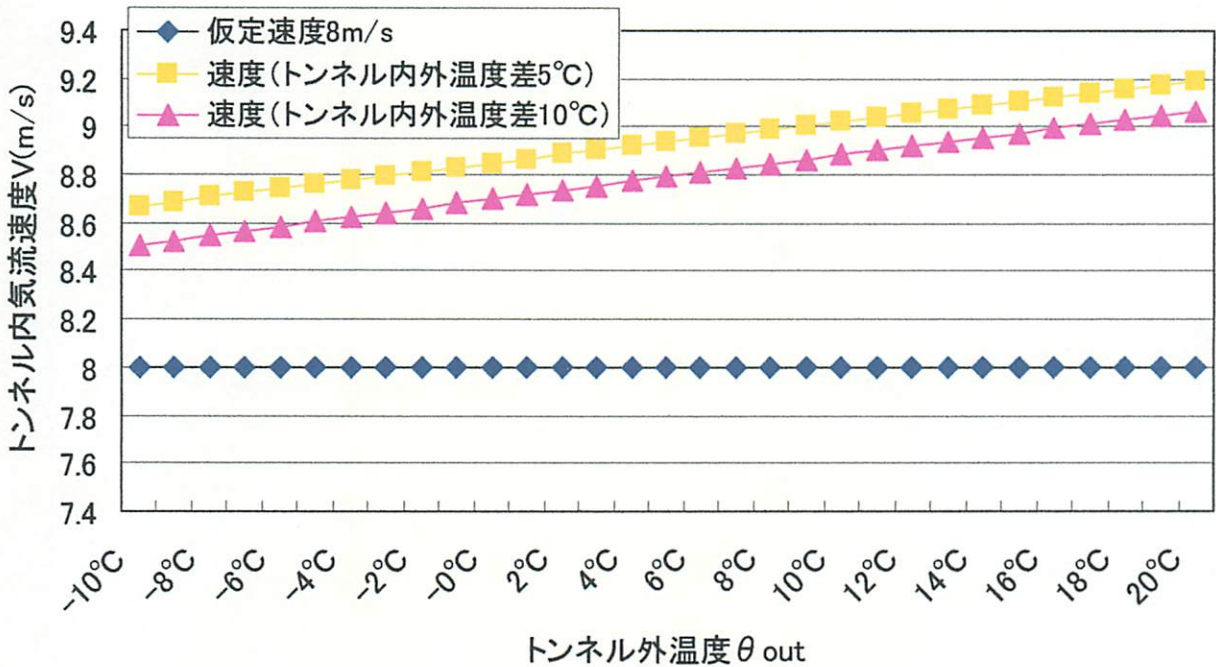


図-3.3.2. 仮定速度8m/sでのトンネル内気流速度

よって、 $V=8\text{m/s}$  の仮定は不適である。

<2> $V=9\text{m/s}$  と仮定する。

$Re=4.77 \times 10^6 > 2000$  より、トンネル内は乱流である。

<1>と同様の計算を行うと図-3.3.3.のようになる



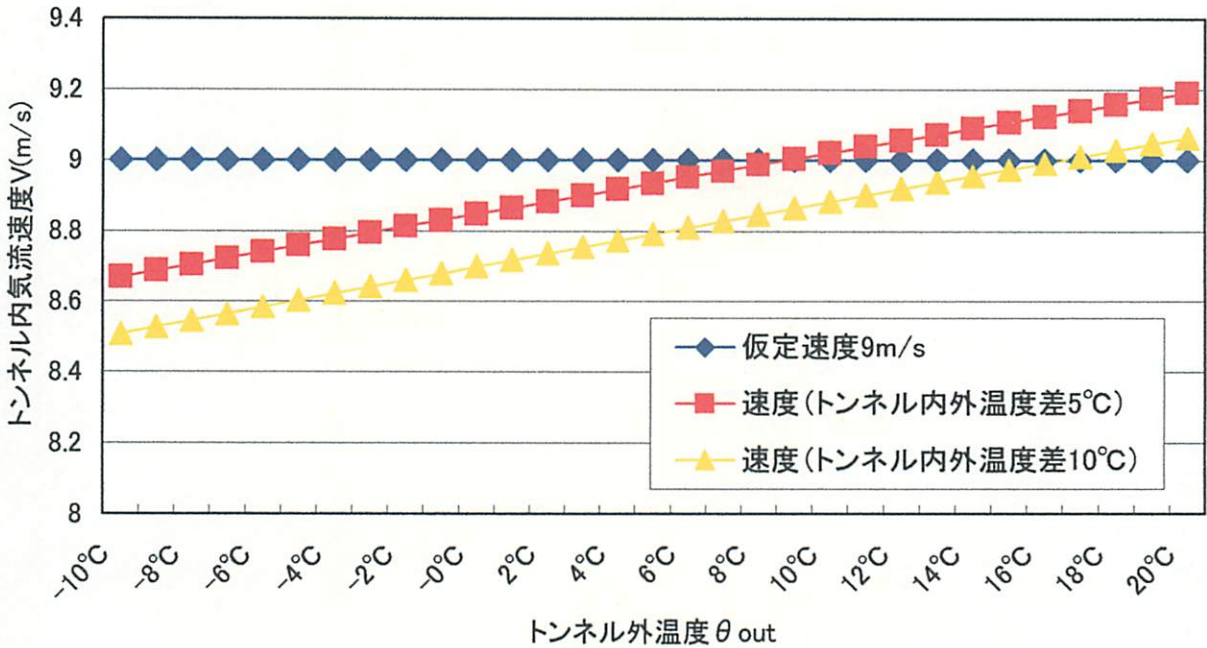


図-3.3.3.1. 仮定速度9m/sでのトンネル内気流速度

トンネル内流速  $V$  はトンネル内外の温度によって、多少変化するが  $V=9\text{m/s}$  であってもよいと判断できる。モンブラントンネルでは、換気流速を考慮せず、フェーン現象が発生していない時、イタリア側からフランス側へ  $9\text{m/s}$  の空気が流れているといえる。

仮定 2：報告書<sup>5)</sup>の「フェーン現象によりイタリア側がフランス側より、 $50\text{kg/m}^2$  高くなった」という記述を、

フランス側の気圧  $P_{\mu}$  = イタリア側の気圧  $P_{\text{伊}}$  -  $50\text{kg/m}^2$  と考えて

$V=17.5\text{m/s}$  と仮定する。

$Re=9.27 \times 10^6 > 2000$  より、トンネル内は乱流である。

①  $P_{\mu} = P_{\text{伊}} - 50$

② トンネル経由の圧力換算

$$P_{\mu} = P_{\text{伊}} + 107 \gamma_{\text{in}} - \Delta P$$

①②より

$$\Delta P = 50 + 107 \gamma_{\text{in}} = 50 + 107 \frac{353.25}{273.17 + \theta_{\text{in}}} \quad \dots B$$

A、Bより

$$\frac{3310V^2}{5355 + 19.6\theta_{\text{in}}} = 50 + 107 \frac{353.25}{273.17 + \theta_{\text{in}}}$$

$$V^2 = \frac{5355 + 19.6\theta_{in}}{3310} (50 + 107 \frac{353.25}{273.17 + \theta_{in}})$$

$$\text{ゆえに } V = \sqrt{\frac{5355 + 19.6\theta_{in}}{3310} (50 + 107 \frac{353.25}{273.17 + \theta_{in}})}$$

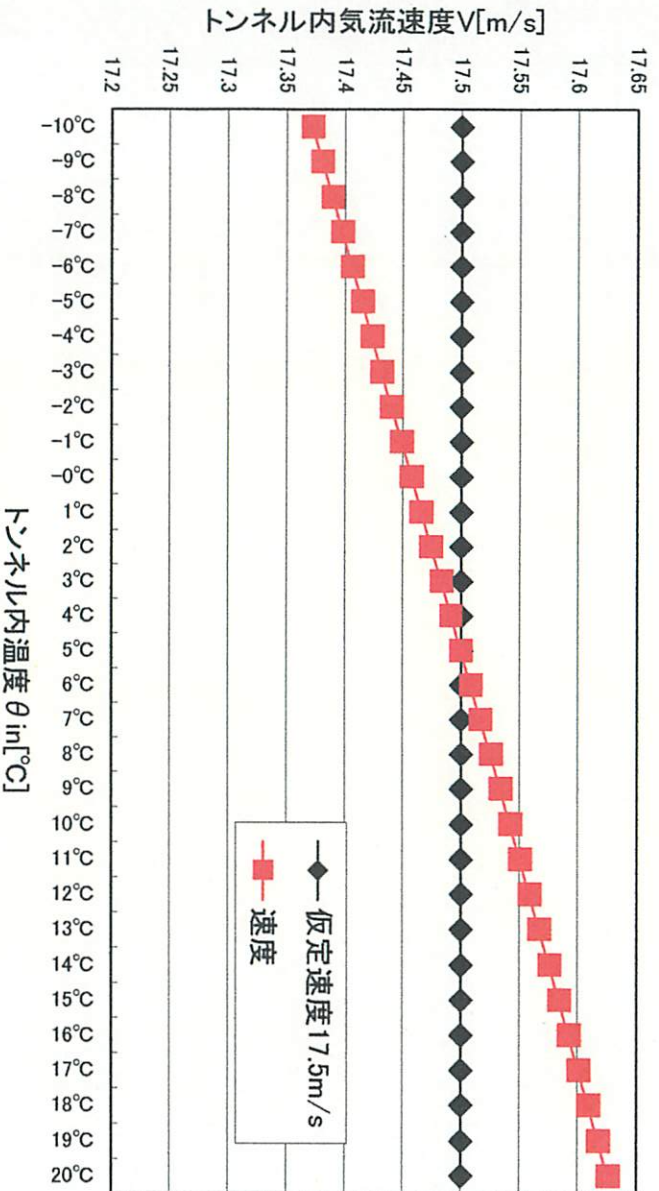


図-3.3.2. 仮定速度17.5m/sのときのトンネル内気流速度

図より、気流速度 17.5m/s となることがわかる。しかし、これは適切ではないので、仮定 1 が正しい。

### 3.3.2. 煙流動性状の推定

#### (1) 発熱量

火災は 1999 年 3 月 24 日 10:53～3 月 26 日 16:00 まで続いた。資料より初期火災時には、1.5m/s の風が送られ、75～110MW の火災が 1～2 時間続いた。その後別の車両に燃え移り最大で 150～190MW が 7～13 時間続いた。平均としては 100MW が約 50 時間続いたとある。文献 6 を参考に、発熱量  $Q=100\text{MW}$  とする。

(2) 機械換気等が無い場合の流れが開水路流れ、管路流れのどちらになるかの検討 (壁面への熱損失を含む)

仮定：トンネル内の気流は開水路流れだったとする。

#### (2-1) トンネル出口付近での煙の状態

境界条件：トンネルを長方形に模式化して考え、 $F_r^*=1$ 、また暫定で  $L=3\text{m}$  とする。これはもし二層流 (開水路流れ) になるとすれば、煙と下部の流入する空気の流れで半分ずつになると考えるのが妥当なため。この条件で開

口部での空気量を求める式に以下のものがある

$$G_{out} = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\gamma_s(\gamma_{out} - \gamma_s)} (L)^{\frac{3}{2}} \quad [\text{kg/s}]$$

このとき、 $G_{out}$  : 出口での煙重量[kg/s]

$\alpha$  : 流量係数

$B$  : トンネルの幅[m]

$\gamma_s$  : トンネル内空気 (煙) の比重量[kg/m<sup>3</sup>]

$\gamma_{out}$  : トンネル外空気の比重量[kg/m<sup>3</sup>]

$L$  : その流れを特徴付ける代表的な長さ (この場合は煙厚さ) [m]

① 流量係数について

$$\alpha^2 = \frac{1}{\zeta} \quad \zeta : \text{抵抗係数}$$

単純な開口では $\zeta$ は約2なので、 $\alpha = 0.7$

② 開口部の幅、代表的な長さ

$$B = 7\text{m}$$

$$\text{境界条件より } L = 3\text{m}$$

③ 比重量

トンネル内空気 (煙) の比重量、ここで  $T_s$  : 煙の温度[°C]

$$\gamma_s = \frac{353}{273 + T_s}$$

トンネル外空気の比重量

トンネル外空気=0°Cなので

$$\gamma_{out} = \frac{353}{273 + 0} = 1.2932 = 1.3$$

よって、

$$\begin{aligned} G_{out} &= \frac{2}{3} \times 0.7 \times 7 \times \sqrt{2 \times 9.8 \times \frac{353}{273 + T} \left( 1.3 - \frac{353}{273 + T_s} \right)} \times 3^{\frac{3}{2}} \\ &= 16.98 \times \sqrt{\frac{6918.8}{273 + T_s} \left( 1.3 - \frac{353}{273 + T_s} \right)} \end{aligned}$$

煙温度と流出煙重量の関係は図-3.3.4.のようになる。

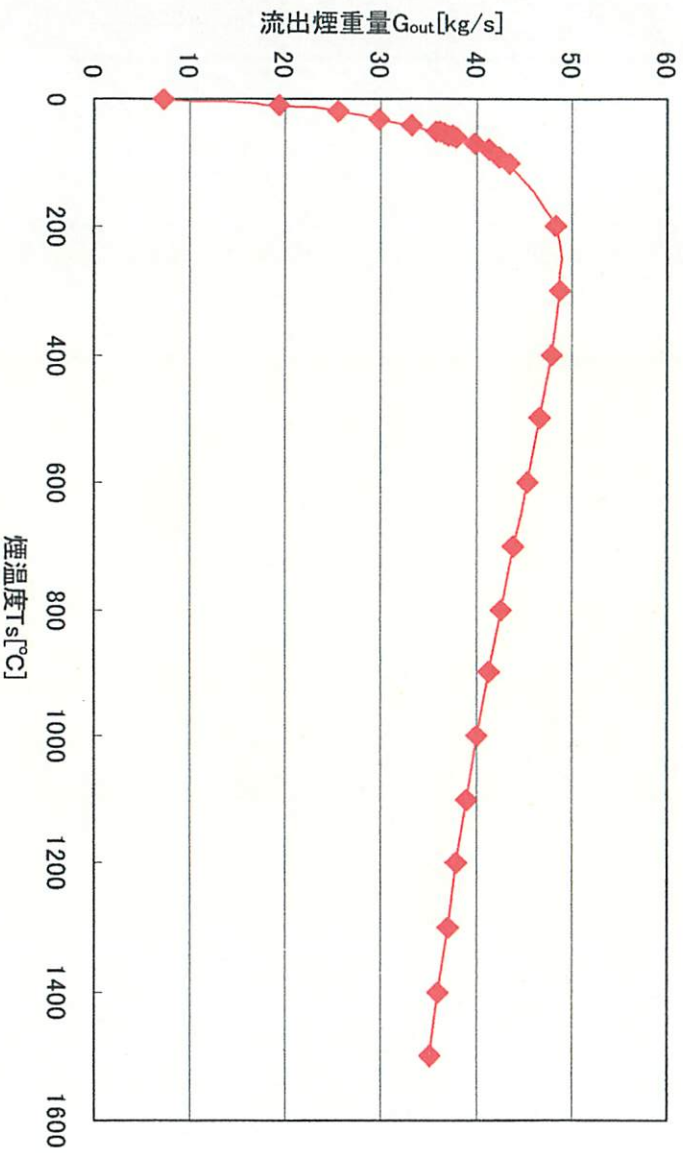


図-3.3.4. 煙温度 $T_s$ と流出煙重量 $G_{out}$ の関係

そこで、 $Q_{out} \times 10^3 = G_{out} \times C_p \times \Delta T$ より

ただし、 $Q_{out}$  : トンネル外への流出熱量 [MW]

$C_p$  : 煙の定圧比熱 [kJ/kg·K]

$\Delta T$  : 煙とトンネル外の温度差 [K]

- ① 煙の定圧比熱  
空気と同じなので  $C_p=1$

- ② 煙とトンネル外の温度差  
今煙の温度を  $T_s$ 、トンネル外温度を  $0^\circ\text{C}$ としているので  
 $\Delta T = T_s - 0 = T_s$

以上より、流出熱量と煙の温度の関係は

$$Q \times 10^3 = G_{out} \times 1 \times T_s$$

$$Q = 16.987 \times 10^{-3} \times \sqrt{\frac{6918.8}{273 + T_s} \left( 1.3 - \frac{353}{273 + T_s} \right)}$$

これを図示すると、図-3.3.5.のようになる。



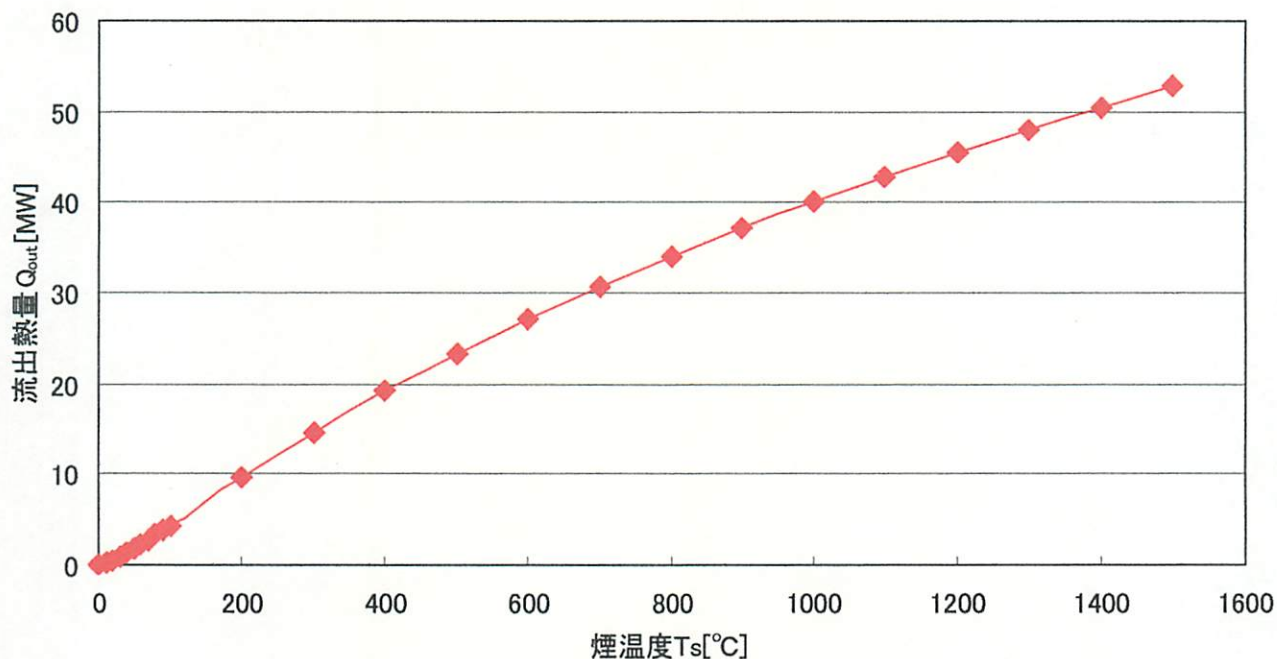


図-3.3.5. 煙温度Tsと流出熱量Q<sub>out</sub>の関係

今回の火災では発熱量が 100MW であり、それが片方の出口の向かって流れていくと想定すると、流出熱量は 50MW である。図より流出熱量 50MW のとき、煙の温度は約 1400°C となる。

(2-2) 7) トンネル中央部での煙の状態

3.2.2.で述べたように、水平に置かれた面積Aのアルコールパンに火をつけたとき立ち上がり煙量を求める式に Yih の式がある。ここでは、より危険側の Thomas の式を使う。火災はトンネル中央でおきたとし、アルコールパンをトラックと見立てて計算をする。この際の Z は図-3.3.6.のように  $Z_1 + 1.5\sqrt{A}$  を用いる。

$$\text{熱プルーム基礎式} : v_s = 0.225 \left( \frac{gQ \times 10^3}{\gamma_a C T_a} \right)^{\frac{1}{3}} Z^{\frac{5}{3}} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

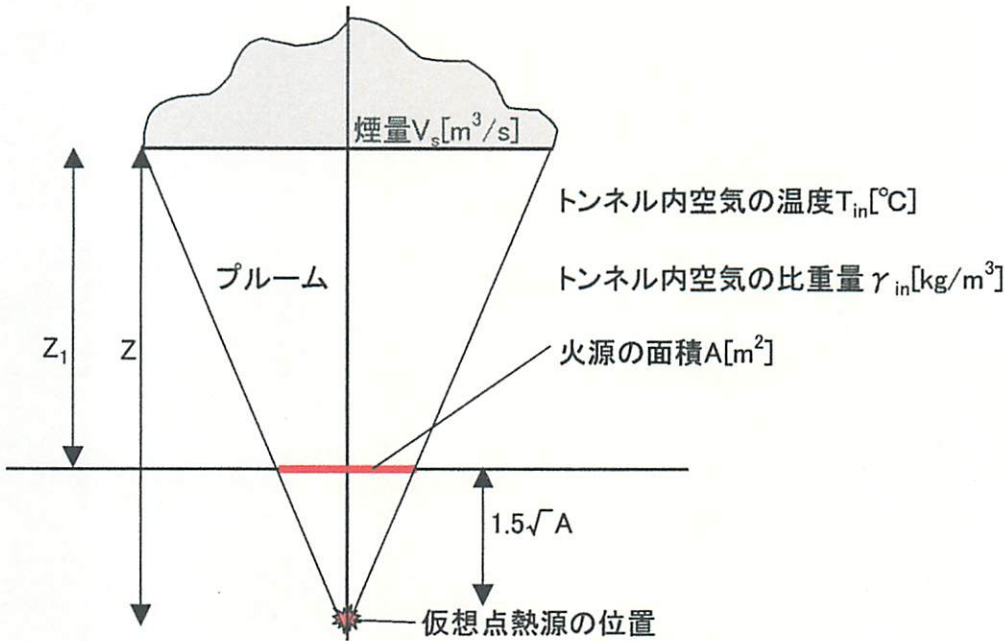


図-3.3.6. 仮想点熱源でのプルーム

① 発熱量について

前述より  $Q=100\text{MW}$

② 火源との距離について

モンブラントンネルでは、トラックが燃えたので  $A=36\text{m}^2$ 、 $Z_1=L=3\text{m}$  より仮想点熱源の条件  $Z=Z_1+1.5\sqrt{A}$  を考慮して、 $Z=12$

③ 比重量

トンネル内空気温度  $T_{in}=20^\circ\text{C}=293\text{K}$  として

$$\gamma_{in} = \frac{353}{273+20} = 1.2\text{kg/m}^3$$

よって、 $V_s = 0.225 \left( \frac{9.8 \times 100 \times 10^3}{1.2 \times 1 \times 293} \right)^{\frac{1}{3}} 12^{\frac{5}{3}} = 199.5 = 200[\text{m}^3/\text{s}]$

つまり、トンネル中央の火源からは  $200\text{m}^3/\text{s}$  の煙が発生する。

ではそのときの煙の温度はどうだったのだろうか。火源から煙への熱伝達を考えて、

$$V_s \times \gamma_{s0} \times C_p \times \Delta\theta = Q_0 \times 10^3$$

ただし、 $\gamma_{s0}$  : トンネル中央での煙の比重量  $[\text{kg}/\text{m}^3]$

$\Delta\theta$  : 煙の温度上昇  $[\text{C}]$

トンネル内温度を  $20^\circ\text{C}$  としているので

$$\gamma_{s0} = \frac{353}{273+20+\Delta\theta} \text{ となる。}$$

$Q_0$  : 発熱量  $Q$  の対流成分。対流成分 : 放射成分 = 1 : 1 となると考え、 $Q_0=Q/2$  より、 $Q_0=50[\text{MW}]$

$$200 \times \frac{353}{273 + 20 + \Delta\theta} \times 1 \times \Delta\theta = \frac{100 \times 10^3}{2}$$

$$\frac{70600\Delta\theta}{293 + \Delta\theta} = 50000$$

$$70600\Delta\theta = 1465 \times 10^4 + 50000\Delta\theta$$

$$\Delta\theta = 711^\circ\text{C}$$

仮定 1：二層流により煙が混合しないでトンネル中央から出口まで到達する

トンネル中央部での煙の温度が  $711^\circ\text{C}$  であり、このときのトンネル中央の煙重量  $G_0[\text{kg/s}]$  は

$$G_0 = V_s \times \gamma_{s0}$$

$$= 200 \times \frac{353}{273 + 20 + 711} = 70.4 \text{ kg/s}$$

片側出口のみを考えて、二層流により煙が混合しないでトンネル中央から出口まで到達するとすると流出煙重量  $G_{\text{out}} = 35.2 \text{ kg/s}$  となる。

図-3.3.4.より、 $G_{\text{out}} = 35.2 \text{ kg/s}$  となる煙の温度は 2 種類ある。

1 つ目は約  $1500^\circ\text{C}$  のときである。このときの流出熱量  $Q_{\text{out}}$  は、図-3.3.5.より  $52 \text{ MW}$  である。しかし、中央での発熱量の対流成分を  $50 \text{ MW}$  としており、なおかつここでは片側出口のみを考えているので、煙による流出熱量が  $52 \text{ MW}$  となることはありえない。

2 つ目は約  $50^\circ\text{C}$  の時である。このときの流出熱量  $Q_{\text{out}}$  は、図-3.3.5.より  $1.8 \text{ MW}$  である。トンネル片側で考えた時、中央で煙がもつ熱量は  $25 \text{ MW}$  で、 $23.2 \text{ MW}$  以上が火源からトンネル端までの間に壁面に吸収されるような条件になれば  $G_{\text{out}}$  を保存するには、

$L > \text{トンネル高さ}/2$

となるので、煙は二層流にならずトンネル全体に充満して流れることとなる。

$$\theta_{s \rightarrow w} = \frac{Q_{s \rightarrow w} \times 10^3}{\alpha \times S}$$

ただし、 $\theta_{s \rightarrow w}$ ：煙層と壁面の平均温度差[K]

$Q_{s \rightarrow w}$ ：壁面に吸収される熱量[MW]

$\alpha$ ：表面熱伝達率 [ $\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s}$ ]

$S$ ：煙に接するトンネル表面積 [ $\text{m}^2$ ]

① 壁面での表面熱伝達率について

$$\alpha = 0.024$$

② 表面積

代表的な長さ（ここでは煙層厚さ） $L = 3 \text{ m}$ 、トンネル幅  $7 \text{ m}$ 、トンネル半分の長さ  $5800 \text{ m}$  より煙に接するトンネルの表面積  $S$  は、

(代表長さ×2+幅) ×片側のトンネル長さ=(3×2+7)×5800=75400 m<sup>2</sup>  
 トンネル壁面が吸収する熱量  $Q_{s \rightarrow w}=23.2\text{MW}$  より、

$$\theta_{s \rightarrow w} = \frac{23.2 \times 10^3}{0.024 \times 75400} = 12.8\text{K}$$

つまり煙が開水路流れになる遷移値は、煙層と壁面の平均温度差が 12.8K の時である。トンネル片側で考えて、中央での煙温度は対流熱量 25MW なので、図-3.3.5より、約 600℃、また出口での煙温度が 50℃なので、平均的な煙温度は約 325℃である。また、トンネル壁面の初期温度が約 0℃と考えると、火災が盛期に入ってから数十分程度は温度差  $\theta_{s \rightarrow w}$  が遷移値より大きいと判断される。

以上のことより、煙は二層流（開水路流れ）とならずトンネル全体に充満して流れる管路流れであったと推定される。

(3)通常時換気状態での流れの分析<sup>2)</sup>(アルプス山脈前後でのフェーン現象の影響を含む)

トンネル内への給排気量は通常時にいくつかのモードで測定されている。 $V_n$ : n 地点での換気風量[m<sup>3</sup>/s]、 $L_n$ : n 地点でのトンネル長[m]、 $\lambda$ : 摩擦抵抗係数として、

$$\frac{\gamma_{in} \left( \frac{V_{仏出口}}{d} \right)^2}{2g} \pm \sum \frac{\lambda L_n \gamma_{in} \left( \frac{V_n}{d} \right)^2}{2dg} - \frac{\gamma_{in} \left( \frac{V_{伊出口}}{d} \right)^2}{2g} = 0$$

を用い、各断面の流速（①より断面方向に分布がないと仮定）を計算した（ただし、ダクト径≪トンネル径より合流抵抗は無視した）。図-3.3.7、図-3.3.9、図-3.3.10はそれぞれ火災の発生を考えずに2つの換気モード（図-3.3.7: 通常換気モード、図-3.3.9: 火災盛期に運転された換気モード、図-3.3.10: 図-3.3.9にフェーン現象の影響を加えたもの）でのトンネル内の空気の流れを計算したものである。図-3.3.8、図-3.3.11はそれぞれの換気モードで火災時に測定されたトンネル内の空気の流れである。



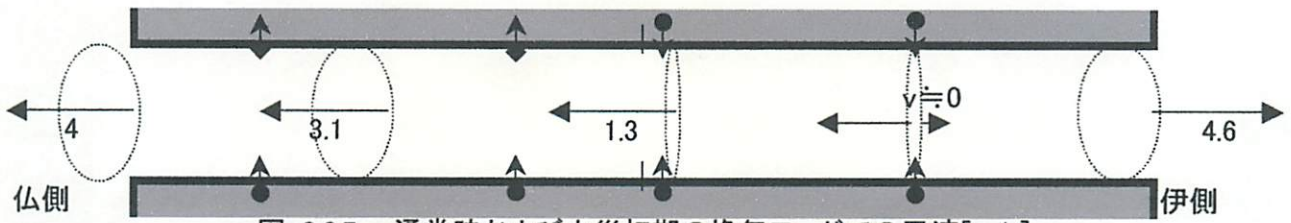


図-3.3.7. 通常時および火災初期の換気モードでの風速[m/s]  
(フェーン現象の影響は考えていない推定値)

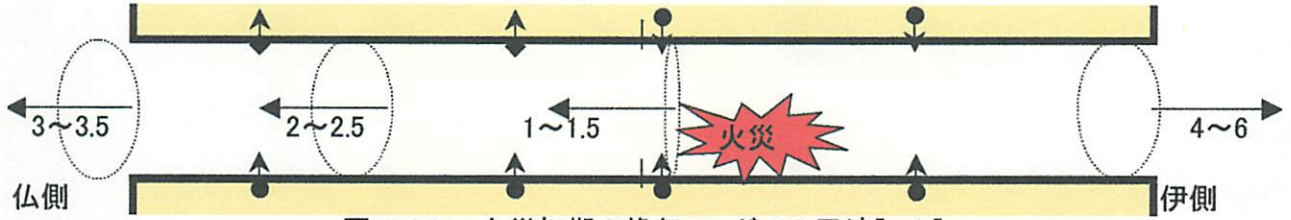


図-3.3.8. 火災初期の換気モードでの風速[m/s]  
(フェーン現象の発生していた事故当日の実測値)

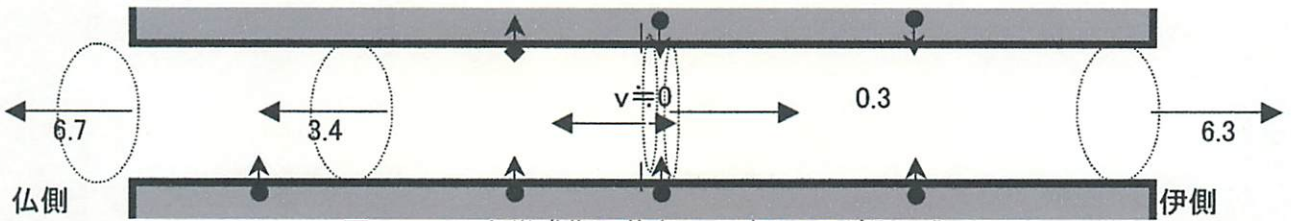


図-3.3.9. 火災盛期の換気モードでの風速[m/s]  
(イタリア側のファン切り替えはなかったと考え、フェーン現象の影響のない推定値)

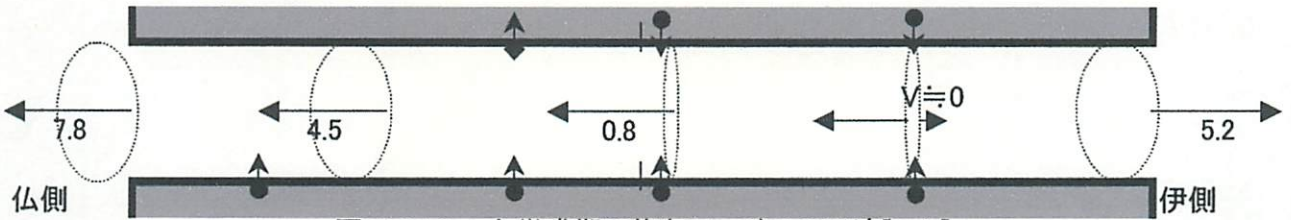


図-3.3.10. 火災盛期の換気モードでの風速[m/s]  
(イタリア側のファン切り替えはなかったと考え、フェーン現象の影響の入った推定値)

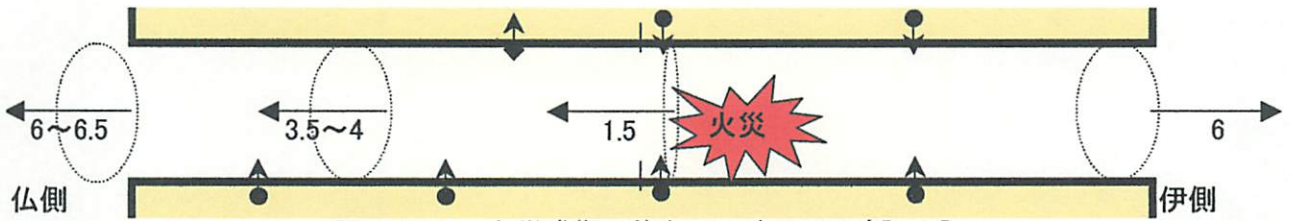


図-3.3.11. 火災盛期の換気モードでの風速[m/s]  
(フェーン現象が発生していた事故当日の実測値)

排気 給気 風速

(4)上記の(1)~(3)をふまえた分析

図-3.3.7、図-3.3.8 および図-3.3.9、図-3.3.10 の比較から、火災の発生（100MW：自動車1台の発熱量が約3MWであり、30台が燃えたのに等しい火災）によっても換気の全体系にはほとんど影響が無いことが分かる。ゆえに、通常時の換気状態を丁寧に観測することで、トンネル内の煙制御が可能となると判断される。

### 3.3.3. 避難の推定

条件：1999年3月24日のモンブラントンネル火災と同じ状況（ただし、被害の大きかったフランス側をとりあげた。）

#### (1) トンネル中央付近での煙の状態

3.3.2.より煙の発生量は  $200\text{m}^3/\text{s}$  で、これがそれぞれの出口に流れていくので片方は  $100\text{m}^3/\text{s}$  となる。ここで、断面積を  $42\text{m}^2$  とすると、煙の速度は  $2.38\text{m/s}$  となる。また資料より、中心付近では火災前の状態で  $1.5\text{m/s}$  の縦流空気があったとあるので、煙の移動風速  $v_0$  は  $3.88\text{m/s}$  である。

#### (2) 文献6からみる、実際の煙の動き

モンブラントンネル火災では、10:53~11:30でフランス側の出口から6550m離れた火源からトンネル出口に煙が到達したとある。つまり、2220秒で6550m進んでいるので、実際の煙移動風速  $v$  は  $2.95\text{m/s}$  である。 $v$  と  $v_0$  の間の差  $0.93\text{m/s}$  は排煙設備の影響である。煙に対して有効に働いた排煙量は  $39\text{m}^3/\text{s}$  であるとわかる。この煙の速度  $v$  が避難速度より遅ければ全員が無事に避難できると考えられる。

#### (3) 避難速度

今回の火災に限らず、避難速度は算定しにくい。人間の足の速さには個人差があり、火災を認識するまでも個人差があり、認識しても逃げるまでに時間のかかる場合もあるからだ。ここでは、資料8より避難速度を参考にして考えてみる。

表-3.3.1. 要避難者の行動能力

種類	例示	群集の行動能力				
		歩行速度(m/s)		流出係数(人/ m/s)		
		水平	階段	水平	階段	
A種	自力のみで行動できにくい人	重病者、老衰者、乳幼児、精薄者、身体障害者など	0.8	0.4	1.3	1.1
B種	その建物内の位置、経路などに慣れていない一般の人	旅館などの宿泊客、商店・事務者などの来客、通行人	1	0.5	1.5	1.3
C種	その建物内の位置、経路などに慣れている心身強健な	建物内の勤務者、従業員、警備員など	1.8	0.8	1.8	1.4

表-3.3.1.よりトンネル内に存在しそうな種類の人を考える時、A種の人はずいぶん少なかろう。そこで便宜上B種とC種の人が半分ずつとすると、避難速度は  $1.4\text{m/s}$  とできる。火災が起きて煙が広がるまでの時間と、人が火災を認識し避難しだすまでの時間が同等とすると煙の移動速度 < 避難速度  $1.4\text{m/s}$  とならなければならない。今回の火災では、煙の移動速度は  $3.8\text{m/s}$  であるので、煙の移動速度 > 避難速度となり煙に多くの人がかき込まれた。今回、火災の死者の大半は窒息死である。序論でも述べたように、火災で窒息死には多大な注意を払うべきことがここで再確認できた。そこで、窒息死を避けるために常にトンネル内が、煙の移動速度 < 避難速度という状態であればいいことに思い至る。

#### (4) 必要風量

煙の移動速度と避難速度の差は  $2.44\text{m/s}$  である。断面積を  $42\text{m}^2$  としているので、この差分の速度を押し返すには  $103\text{m}^3/\text{s}$  が必要である。モンブラントンネルの換気方式は局所排気付送気半横流式である、これは要するに横流式の換気方式である。この換気方式では煙を押し返すことを考える時、給気で行えば倍の風量の  $206\text{m}^3/\text{s}$  がいる。排気の場合は  $103\text{m}^3/\text{s}$  でよい。

給気での火災対応を考えると、煙の速度を給気することによって押し返すとする場合、①のように火源上で給気をしてしまうと、火災を助長させてしまう。②のようにすでに煙が通り過ぎた所で給気を行うと煙の移動速度あげることになる。唯一有効なのが、③のように煙の来る前の箇所で押し返そうとすることだ。しかしこれも一歩タイミングを間違えたり、押し返せなかったりすると②のケースになってしまう。この換気方式での給気は慎重に行わなければならない。

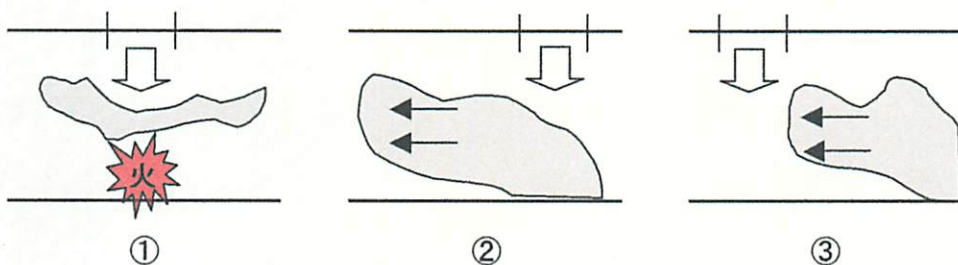


図-3.3.12. 給気対応

排気での火災対応を考えると、給気での火災対応と違い、どのあたりで排気してもそれなりに有効である。④のように煙の中で行えば当然有効である。⑤のような場合も、結果として煙が移動し④の状況になるので有効である。排気は煙への対応に有効であるが、煙の移動速度を抑えられるのかということに関しては疑問が残る。

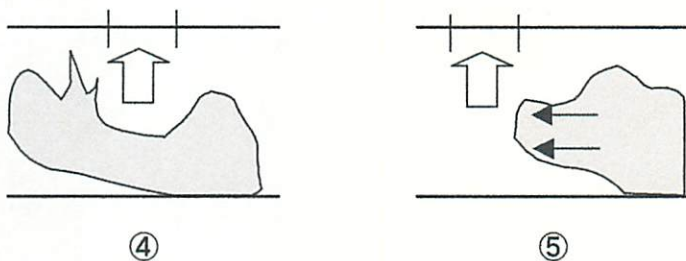


図-3.3.13. 排気対応

### 3.3.4 遡上阻止風速

3.3.3 で述べたようなことは可能であるが、表にあるように一般化しても  $0.8\text{m/s}$  ~  $1.8\text{m/s}$  と避難速度はさまざまである。 $1.4\text{m/s}$  で助かるように換気システムを作っても、 $0.8\text{m/s}$  の人は助からない、理想は全員助けることである、そこで煙の移動速度 < 避難速度という考えをもう 1 つ発展させて、煙の移動速度 = 0 にすれば、煙にまきこまれないですむ。このような状態をつくる排気風速を遡上阻止風速という。

Oka&Atkinson は 1/10 模型を用いて火災実験を行い実大との相似則を確認するとともに、遡上阻止風速に上限値が存在することを実験的に示した。この関係は以下の式で



ある（ただしこれはトンネルが水平な場合の式であり、今扱っているモンブラントンネルはやや傾いている。ここは水平であると考えて計算する）。この式は縦流式のものであり、モンブラントンネルは半横流式の換気方式である。よって、ジェットファンを導入すると仮定をして話を進める。

$$Q^* = \frac{Q \times 10^3}{\rho_0 C_p T_0 \sqrt{gH^5}} \text{ において、 } Q^* < 0.124 \text{ のとき } V^* = 0.35(0.124)^{\frac{1}{3}} Q^{\frac{1}{3}}$$

$$Q^* > 0.124 \text{ のとき } V^* = 0.35$$

そして、 $V^* = \frac{V}{\sqrt{gH}}$  より、遡上阻止風速を算出する。

ただし、 $Q$  : 発熱量 [MW]

$\rho_0$  : 空気の密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$C_p$  : 空気の比熱 [kJ/kg · K]

$T_0$  : 空気の温度 [K]

$H$  : トンネル高さ [m]

$V$  : 遡上阻止風速 [m/s]

$\rho_0 = 1.2 \text{ kg/m}^3$ 、 $C_p = 1 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 、 $H = 7 \text{ m}$  とする

$$Q^* = \frac{Q \times 10^3}{1.2 \times 1 \times 293 \sqrt{9.8 \times 7^5}} = \frac{Q}{142.7}$$

$$Q^* < 0.124 \text{ のとき、 } V^* = 0.35 \times (0.124)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{Q}{142.7} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{そして、 } V = V^* \sqrt{gH} = 0.7 \left( \frac{Q}{142.7} \right)^{\frac{1}{3}} \times \sqrt{9.8 \times 7} = 5.8 \left( \frac{Q}{142.7} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$Q^* > 0.124 \text{ のとき、 } V = V^* \sqrt{gH} = 0.35 \times \sqrt{9.8 \times 7} = 2.9$$

これらを図示すると図-3.3.14.になる。



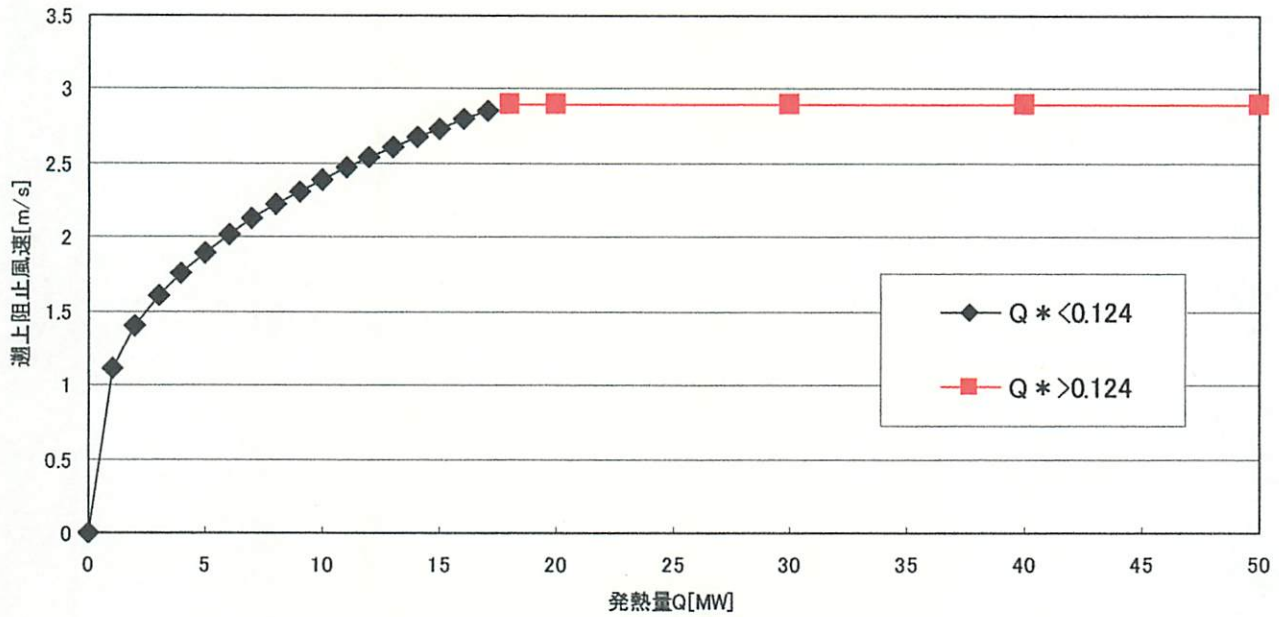


図-3.3.14. 発熱量と遡上阻止風速の関係

図より、高さ7mのモンブラントンネルではどの規模の火災が起きても、2.9m/sの風速を発揮できるジェットファンがあれば、煙を広げられないようである。

### 3.4. まとめ

ここまで、煙を退ける方法を検証してきたが、これは何を防ぐためかという点、トンネル火災で最も恐ろしい一酸化炭素を防ぐためだ。一酸化炭素は無色、無臭で毒性が高いため、閉鎖空間では特に注意を要する。一酸化炭素は血液中のヘモグロビンと結合しやすく、体内の酸素供給能力を妨げ、酸素欠乏状態を引き起こす。これにより手足がしびれるなどの運動障害を生じ、避難行動がとれない状態に陥ってしまう。一酸化炭素中毒の程度は、吸入濃度、吸入時間に大きく左右されるが、だいたい表-3.4.1.<sup>2)</sup>の症状が見られる。

表-3.4.1. 一酸化炭素中毒の状態

CO濃度(ppm)	吸引時間と中毒症状
200ppm	2~3時間で前頭部に軽度の頭痛
400ppm	1~2時間で前頭痛・吐き気、2.5~3.5時間で後頭痛
800ppm	45分間で頭痛・めまい・吐き気・けいれん、2時間で失神
1600ppm	20分間で頭痛・めまい・吐き気、2時間で死亡
3200ppm	5~10分間で頭痛・めまい、30分間で死亡
6400ppm	1~2分間で頭痛・めまい、10~15分間で死亡
12800ppm	1~3分間で死亡

モンブラントンネルのような避難トンネルの無いトンネルでは最悪のケースとして多くの距離を走って逃げなければならない。煙の移動速度が避難速度よりも速ければ当然煙に巻き込まれることは明白である。そんな中、火災後のモンブラントンネルには新しい換気システムができた。「空気を1箇所にとどめ、拡大させない」という考えのもと、

トンネルにジェットファンを新たに設け、フランスとイタリアの気圧差によって発生する自然風をそのファンによって打ち消すことを目指す。この空気が動かない場所を0ポイントといい、火災発生時には火災発生場所に0ポイントを移し、その空気が動かないように換気システムを運転する。こうすることで150m<sup>3</sup>/sの排気が可能になり、一方の入り口に煙が集中することなく、フランス、イタリアの両側から消防隊が近づけるようになる。

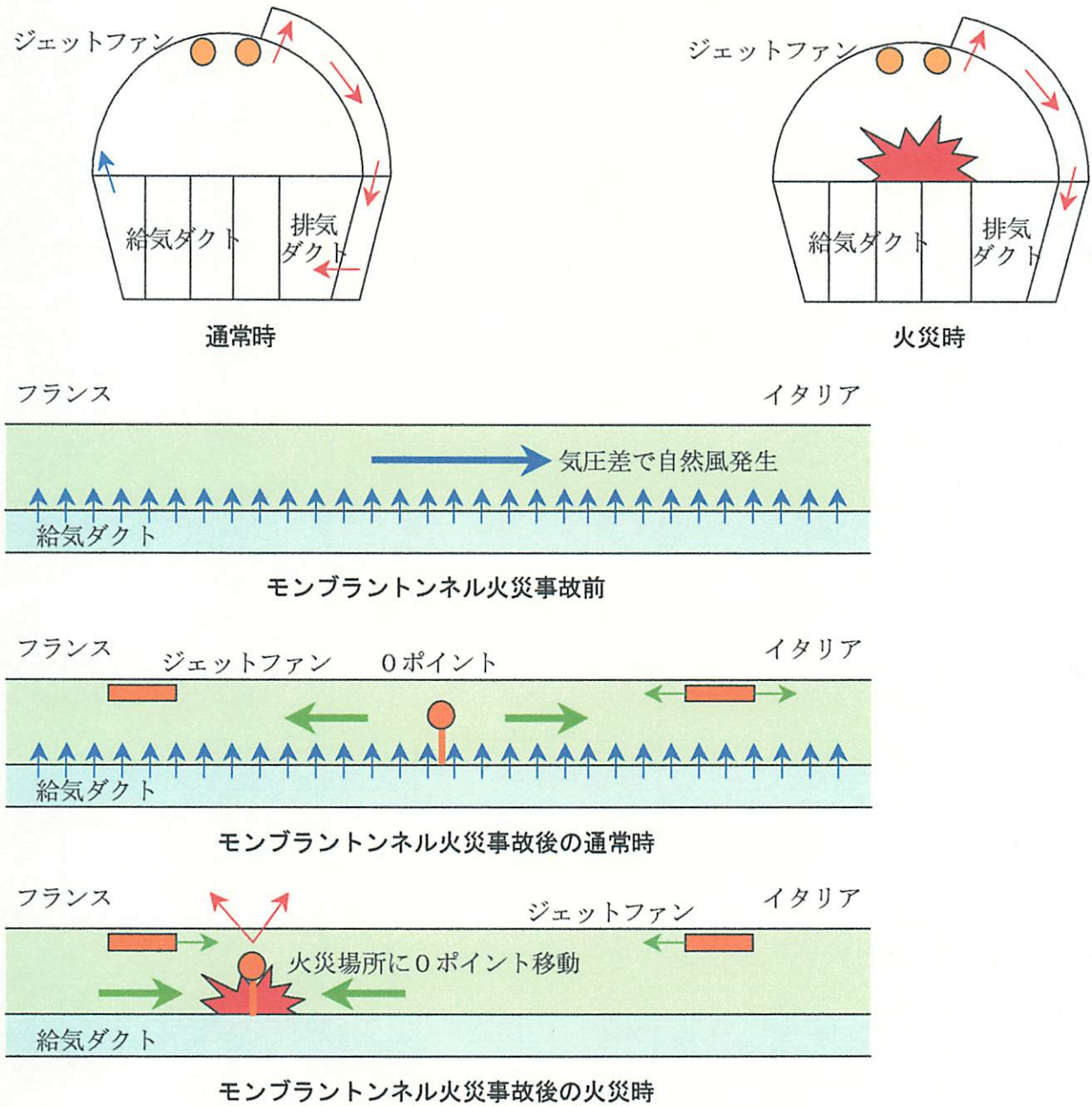


図-3.4.1. システム概要<sup>5)</sup>

図のようにし、8.4MWの水素を火源として使用した実験を行ったところ排煙されたようだ(資料[8]による)。さらに、このシステムを開発した Scetauroute 社はコンピュータシミュレーションを実施し、150MW規模の火災まで耐えられることを解明している。このシステムはシンガポールの地下鉄でも採用されている。しかし、実際に火災が起き

ていないことから、どれだけの火災の程度、煙に対応できるかは不明である。煙の速度、広がり方はたいへん重要であり、この例のように煙を広げさせないという考えに基づいたシステム開発は一見理にかなっているように見える。しかし現行のシステムすら使いこなせていないのに、さらに複雑なものを使いこなせるのだろうか。もっと人の力を信じ、通常時の換気状態を丁寧に観測することから始め、トンネル内のどの箇所で火災が起きたら、煙の速さはどのくらいになるのかを把握するようにすべきである。それを把握し、管理者のトンネル理解度をより深めれば、こんなシステムに頼らずとも、煙を制御できるようになると考えられる。

### 3.5. 第3章参考文献

- 1) 日本火災学会：火災便覧第3版、共立出版、1999.5
- 2) 石原正雄：建築換気設計、朝倉書店、1969
- 3) 椿東一郎：水理学I、森北出版、1973
- 4) 辻本誠：火災時の建物内煙流動に関する研究、1981.2
- 5) 藤井信宏：欧州調査ヒアリングメモ、2003.11
- 6) (財)高速道路技術センタートンネル研究部会：欧州におけるトンネル非常用施設及び最新施工技術に関する調査、2000
- 7) (財)日本建築センター：排煙設備技術基準、新日本法規、1975.8
- 8) 運輸省：地下鉄道最適排煙方式研究報告書、1978.3

## 第4章謝辞

モンブラントンネル英文を訳すとき、毎回チェックしていただき、本論を作成の上で、適切なアドバイス、文献を紹介していただいた辻本誠先生にはただただ感謝します、ありがとうございました。

卒業論文発表会用のパワーポイント作成の際、すごく手伝ってくれた研究室の先輩徳永さんありがとうございました。

図、表の作成の際、困った時にアドバイスをくれた研究室の先輩林さんありがとうございました。

付録

***NOTE:*** *This is a direct translation from the French report, as close as possible in content and meaning to the original document. (It should be noted that this translation retains the use of mixed verb tenses found in the original.) If you have any questions, please call me at 617-946-3050 or e-mail me at sergiu@aol.com.*

*Sergiu F. Luchian, P.E.*

*CA/T, Boston, MA*

*February 11, 2004*

(Minister of the Interior, Ministry of Equipment, Transportation and Housing - 30 June 1999)

**TASK FORCE FOR TECHNICAL INVESTIGATION**

モンブラン自動車トンネルでの 1999 年 3 月 24 日の火災

**OF THE 24 MARCH 1999 FIRE**

に関する技術調査特別委員会

**IN THE MONT BLANC VEHICULAR TUNNEL**

**Report of 30 June 1999**

**1999 年 6 月 30 日の報告書**

Minister of the Interior  
Ministry of Equipment, Transportation and Housing  
Inspector General of the Administration  
Board of Bridges and Highways

Report of the Task Force for Technical Investigation of the 24 March 1999 Fire in the Mont Blanc Vehicular Tunnel presented by:

Mr. Pierre Duffé, Inspector General, and Mr. Michel Marec, State Engineer of Bridges and

## Highways

with the collaboration of:

Mr. Mathias Pestre-Mazieres, Administration Inspector, and Mr. François Barthélemy, Chief Engineer of Mines, Colonel Gérard Gilardo, Chief Inspector of Defense and Civil Safety, Mr. Jacques Demoulin, Board of Bridges and Highways, Lieutenant Colonel Jean Michel Vergnault, Defense and Civil Safety, and Mr. Didier Lacroix, Chief Engineer of Bridges and Highways.

June 1999

## SUMMARY

### INTRODUCTION

#### 1. MONT BLANC TUNNEL – DESCRIPTION

モンブラントンネルの描写

##### 1.1. Tunnel geometry

トンネルの形状

##### 1.2. Ventilation

換気

##### 1.3. Smoke extraction capacities

排煙 能力

##### 1.3.1. Smoke removal requirements in French bulletin no. 81.109 of 29 December 1981 on vehicular

1981年12月29日に発表された自動車トンネルの安全のための排煙設備に関する  
tunnel safety

フランスの公報

##### 1.3.2. Recommendations of the Committee of Vehicular Tunnels of the World Highways Association

世界主要自動車トンネル組織委員会の勧告

##### 1.3.3. Regulations in proposed new French bulletin currently in preparation

現在フランスで準備中の新しい公報で提案される法規

##### 1.4. Tunnel operating procedures

トンネル操作の手順

##### 1.5. Traffic rules for moving and halted vehicles

## 自動車の移動・停止に関する交通規制

### 1.5.1. Distance between vehicles

車間距離

### 1.5.2. Speeds and passing

速度と追い越し

### 1.5.3. Traffic signals

## 1.6. Evolution of traffic since the opening

## 1.7. Comparison with similar vehicular tunnels

### 1.7.1. Geometry

### 1.7.2. Means of evacuation and protection of motorists

### 1.7.3. Safety equipment

### 1.7.4. Hazardous cargo

### 1.7.5. Response team

## 2. ORGANIZATION OF TUNNEL SAFETY

### 2.1. Original institutional framework

### 2.2. Common administrative organization

### 2.3. Intergovernmental control commission (CIG)

### 2.4. Organization of rescue efforts by the operators

#### 2.4.1. Original documents contain few specific instructions on this subject

#### 2.4.2. Organization of the operators' rescue assets

#### 2.4.3. Explanations of the choice of a rescue service on the French side for the entire tunnel

#### 2.4.4. Firefighting drills

### 2.5. Public safety plans

### 2.6. French-Italian cooperation

## 3. DEVELOPMENT OF EVENTS

### 3.1. Traffic conditions and tunnel functioning, before and after the alarm

#### 3.1.1. Traffic status before the alarm

#### 3.1.2. Alarm conditions

#### 3.1.3. Tunnel closure

### 3.2. Rescue operations



- 3.2.1. The alarm
- 3.2.2. The response
- 3.2.3. Information given to public authorities and rescue services
- 3.2.4. First response by French rescue assets
- 3.2.5. Organization of Italian rescue assets
- 3.2.6. Comments on organization and implementation of the rescue services
- 3.2.7. Smoke reversal attempts
- 3.2.8. Contacts between French and Italian firefighters
- 3.2.9. Firefighters' response
- 3.3. Results of the catastrophe

- 3.3.1. Human loss
- 3.3.2. Physical damage to the tunnel

#### 4. ANALYSIS OF CAUSES OF THE CATASTROPHE

##### 原因分析

- 4.1. Operational characteristics of the Mont Blanc Tunnel  
モンブラントンネルの運転上の性質
- 4.2. Historical review of accidents and fires in vehicular tunnels
- 4.3. Review of truck fires in the Mont Blanc Tunnel
  - 4.3.1. Seventeen truck fires in the tunnel since 1965
  - 4.3.2. Circumstances of the five other major fires
- 4.4. Sizes of the fires and smoke volumes of the truck fires and their cargos
  - 4.4.1. Caloric potential
  - 4.4.2. Thermal power  
熱の力
  - 4.4.3. Smoke emission  
煙の放出
  - 4.4.4. Smoke characteristics  
煙の性質
  - 4.4.5. Truck flammability  
トラックの燃焼性

- 4.5. Circumstances of development of the first fire  
火災初期の進行状況
- 4.5.1. Description of the development of the first fire  
火災初期の進行の描写
- 4.5.2. Specifics of the truck and its cargo  
トラックの詳細とその荷物
- 4.6. Ventilation conditions  
換気状態
- 4.6.1. Ventilation levels before and after the alarm  
警報前後の換気レベル
- 4.6.2. Consequences of ventilation levels on smoke movement and development of the fire  
煙の動きにおける換気レベルの影響と火事の進展
- 4.6.3. Spreading of the fire among the vehicles  
自動車火災の広がり
- 4.6.4. Comments on the ventilation procedures put into effect during the fire  
火災中での換気行動の影響の解説
- 4.7. The role of the other systems  
他のシステムの役割
- 4.7.1 Electrical equipment  
電気設備
- 4.7.2 Traffic signals  
交通信号
- 4.7.3 Refuge areas  
避難所
- 4.7.4 Safety corridors  
安全 corridors
- 4.7.5 Other equipment  
他の設備
- 5. Conclusion  
結論



## **INTRODUCTION**

After the 24 March 1999 Mont Blanc tunnel fire catastrophe, the Minister of the Interior and the Minister of Equipment, Transportation and Housing assigned a technical investigation to Mr. Pierre Duffé, Inspector General of the Administration, and to Mr. Michel Marec, State Engineer of Bridges and Highways.

Their written orders (attached) were to investigate and determine the reasons why this tragedy reached such a magnitude, to examine the tunnel safety systems and their functionality, and to present proposals to enhance the operational safety of vehicular tunnels of this kind.

The technical investigation task force includes:

- Mr. Pierre Duffé, Inspector General, and Mr. Mathias Pestre-Mazieres, Inspector of the Administration, assisted by Colonel Gilardo and Lieutenant Colonel Vergnault, for the Ministry of the Interior (DDSC);
- Mr. Michel Marec, State Engineer of Bridges and Highways, assisted by Mr. François Barthélemy, Chief Engineer of Mines, Mr. Jacques Demoulin, Board of Bridges and Highways, and Mr. Didier Lacroix, Chief Engineer of Bridges and Highways, for the Ministry of Equipment, Transportation and Housing.

The task force was supported by additional experts as necessary.

A status report was submitted on 13 April 1999. Its goal was to present as rapidly as possible information on the circumstances and causes of the catastrophe. The very brief period in which it was prepared (two and a half weeks) did not always permit performing all the necessary verifications and in-depth research. Nevertheless, this report revealed the basic circumstances of the catastrophe. We repeat them here:

- the speed and magnitude of the fire development in the first truck, which caused the fire, and its spreading to other vehicles;
- the smoke extraction limitations of the tunnel ventilation;
- the manner in which the ventilation was activated.

In addition, other circumstances were exposed:

- the insufficient coordination between the two companies;
- the inadequacy or poor functioning of certain equipment.

This report clarifies all of the above, while providing in-depth information on the circumstances of the accident.

The authors have attempted to rank the various causes leading to the magnitude of the catastrophe. In-depth studies will be necessary to recreate as much as possible the development of the fire and define the role of each of the factors leading to it, particularly the ventilation.

Proposals for restoring service in the Mont Blanc Tunnel, in accordance with the most modern tunnel safety requirements, and the lessons learned for other tunnels in terms of equipment, operation and organization of rescue forces, are the subjects of the joint report developed with the Italian administrative task force.

This report is attached to the joint report.

Chapter 1 describes the tunnel. Chapter 2 describes the legal background and its evolution, as well as the role of the common administrative organization and the intergovernmental control commission. The development of events and particularly the rescue operations are the subject of Chapter 3. Chapter 4 analyzes the causes of the catastrophe. Chapter 5 consists of a conclusion. The recommendations of the task force, together with those of the Italian task force, are included in the joint report.

1. MONT BLANC TUNNEL - DESCRIPTION  
モンブラントンネルの概容

The tunnel was built jointly by France and Italy and opened in 1965. It is 11,600 m long. The longest

トンネルはフランスとイタリアで共同して建設され、1965年に開通した。長さは11,600 m。

part is on French territory: 7,640 m, with 3,960 m in Italy. Two operating entities were created, the

最も長い部分はフランスの領土で7,640 m、イタリアでは3,960 mである。2つの運営組織が

STMB (Société du Tunnel du Mont Blanc) in France, which became ATMB (Autoroute et Tunnel du

つくられ、フランス側はSTMB社(後のATMB社)、イタリア側はSITMB社がそれぞれ

Mont Blanc), and SITMB (Societa Italiana del Traforo di Monte Bianco) in Italy, each operating half of

トンネルの半分ずつを担当した。

the tunnel.

## 1.1 Tunnel Geometry

トンネルの形状

Connecting, in the direction France-Italy, the Chamonix Valley with the Val D'Aoste, located at

フランス→イタリア方向にシャモニー（フランス側の入り口で海拔 1,274 m）と elevations 1,274 m (French portal) and 1,381 m (Italian portal), at the top of a severe slope (up to 7%)

アオスタ（イタリア側の入り口で海拔 1,381 m）をむすび、極度の厳しい勾配（最高で 7%）が

about 4 km long on the French side, the tunnel has a 7 m wide highway with two 0.8 m walkways on the

フランス側に約 4km ある。モンブラントンネルは、車道幅員が 7m で、両側に 0.8m の歩道が

sides; every 300 m there are vehicle rest areas, 3.15 m wide by 30 m long, situated on alternating sides of

ある；300m ごとに駐車帯がある。それは 3.15m の幅と、30m の長さがあり、

the highway and numbered from 1 to 36 in the France-Italy direction; opposite each area there is a

車道のサイドに互い違いに位置し、フランス→イタリア方向に 1～36 と番号付けられている；

designated U-turn for trucks. Every other rest area has a safe refuge area (also called shelter) for people,

それぞれの駐車帯の反対側には、トラックのための U ターン場所がある。残りの全ての supplied with fresh air and protected by an enclosure with a two-hour fire rating.

Safety niches every

駐車帯には人員用避難所（またはシェルターと呼ばれる）があり、新鮮空気を供給し、

100 m contain a fire pullbox and two fire extinguishers. Fire niches every 150 m provide water supply

2 時間耐火で守られている。100m ごとにあるセイフティボックスには自動警報装置と

for firefighters; they are across from the rest areas and are equipped with telephones and pullboxes.

消火器 2 本がある。150m ごとに消防士用の給水栓がある；それらは駐車帯の向こう側に

あり、電話と自動警報装置が装備されている。

## 1.2 Ventilation

### 換気

The ventilation had been designed, at the outset, to be identical for the two halves of the tunnel, starting at

当初は、同一径で二分されたトンネルのそれぞれの入り口からダクトを始めて、道路の下を

each of the portals, with ducts underneath the roadway. Four supply air ducts, numbered from 1 to 4, start

通してトンネル内を換気するようにデザインされた。空気を供給するダクトは No1～4 の 4 本

from each portal and each services a quarter (1,450 m) of the half length of the tunnel by

ventilation slots

であり、そのダクトはそれぞれの入り口から始まり、二分されたトンネルの 1/4 ずつの長さに

located every 10 m at the bottom of the lateral wall in the Italy-France direction. Each duct can supply 75

送気をしている。そして、イタリア→フランス方向の横壁に 10m 間隔で換気口がある。m<sup>3</sup>/s of fresh air, which corresponds to a maximum flow of 300 m<sup>3</sup>/s at each portal, and 600 m<sup>3</sup>/s total. A

4 本のダクトそれぞれは 75 m<sup>3</sup>/s の外気を供給することができ、それぞれの入り口で最大 fifth duct was originally built to exhaust air polluted by traffic. In principle, it is capable of removing 150

300 m<sup>3</sup>/s の流れに相当して、トンネル両端の合計で 600 m<sup>3</sup>/s になる。原則として、駐車帯の

m<sup>3</sup>/s from each half of the tunnel by exhaust openings located in the ceiling at the level of the rest areas,

天井の高さにある排気口によって、二分されたトンネルそれぞれから 150 m<sup>3</sup>/s ずつ排気できる。

i.e., every 300 meters, in the France to Italy direction. It should be noted that, originally, the extraction of

また、フランス→イタリア方向に排気口は 300m ごとにある。この換気システムはもと

fire smoke was not a design criterion for the ventilation system.

火災の煙を排出するにはデザインされていないことに注目すべきだ。

In 1979, modifications were made to the exhaust at each portal in order to use the exhaust ducts for

1979 年に、交通による大気汚染（特に、トラック）が証明されて、外気を追加で供給する

additional supply when air pollution by traffic (especially trucks) justifies it. This way a total of

ために排気ダクトを使用することになり、それぞれの入り口で排気ダクトが修正された。300+150= 450 m<sup>3</sup>/s can be supplied starting from each portal, or 900 m<sup>3</sup>/s of fresh air in the entire tunnel.

300+150=450 m<sup>3</sup>/s となるこの方法で、それぞれの入り口から外気を供給し始め、トンネル全体

The exhaust is then completely removed through the portals.

では 900 m<sup>3</sup>/s の外気を供給できるようになった。それからこの排気ダクトは入り口から完全に

取り除かれた。

In 1980, in the half operated by the French, motorization allowed the exhaust of any of the one-, two- or

1980 年に、フランスがトンネル半分に作業を行い、動力によってトンネル半分のうちの three-thirds of the half length. On the Italian side, individual motors were installed in 1997 at each

1/3～1の空気が排気されるようになった。イタリア側でも、1997年にそれぞれの排気口で

exhaust opening. These motors allow exhaust from two, three or four openings.

個別のモーターを導入した。これらのモーターは2～4の穴から排出される。

In 1981-1982, an old service tunnel used during construction and situated in the main tunnel axis, with the

1981-1982年に、古いサービストンネルは建設期間中に主要トンネルの中心軸を定めるのに

connection to the main tunnel located 110 m from the French portal, was modified to exhaust with a

使われた。その主要トンネルのフランス側の入り口から110mの位置で、トンネル同士が

maximum flow of 450 m<sup>3</sup>/s, which was the total exhaust previously coming out of the portal.

This was to

つながった。そして、本来トンネルの入り口から排出される合計450 m<sup>3</sup>/sの排気を、

mitigate air pollution on the French side and permit better control of the air flow in the tunnel.

この古いトンネルから排出されるように修正された。これによって、フランス側の大気汚染が軽くなり、トンネル内の空気の流れがよりよくなった。

### 1.3. Smoke Extraction Capacities

#### 排煙能力

In each of the two tunnel halves, smoke caused by a fire is extracted by reversible duct no. 5 under the

二分されたトンネルそれぞれにおいて、火災による煙は道路下の切り替え可能なダクトNo5

roadway. The direction of the air flow in these ducts can be reversed to permit the extraction of smoke in

によって排出される。これらのダクトの空気の流れの方向は、火災による煙を排出するために

case of fire (approximately 150 m<sup>3</sup>/s for each tunnel half). It has been seen above that the operator can

逆向きにすることが出来る(二分されたそれぞれのトンネルにおいておおよそ150 m<sup>3</sup>/s)。

remotely control the activation of all or some of the exhaust openings:

オペレーターは全ての動作やいくつかの排気口を遠隔操作できるとされている。

In the French half of the tunnel, there are three exhaust sections and it is possible to concentrate the

二分されたトンネルのフランス側では、3つの排気セクションがあり、それらのうち1～3個を

extraction on any one, two or three of them; in the Italian half of the tunnel, it is possible to concentrate

集中させることができる; イタリア側では、排気エリアの中で2～4個の排気口を集中させる

the extraction on two to four openings in the smoke area.  
ことができる。

However, the utilization of these possibilities greatly varies the extraction flow actually available.

しかし、これらの可能性の利用は、現実に利用できる排気の流れを非常に大きく変化させる。

According to various flow measurements in the past, the smoke extraction capacities are the following:

過去の様々な流れの測定によると、排煙能力は以下のとおりである。

these values are significantly lower than those measured at the head of duct no. 5 during the startup

トンネル全体における排煙において独自の装置による当初のテストでは、これらの利用価値は

testing of the original installation, with extraction over the entire length: 179 m<sup>3</sup>/s on the French side and

ダクト No5 の通路で測定された排煙能力よりはっきり低い：フランス側では 179 m<sup>3</sup>/s、224 m<sup>3</sup>/s on the Italian side.

イタリア側では 224 m<sup>3</sup>/s

In France, this is due partially to the fact that the exhaust fans are not being used at full capacity 4/4, but

フランスにおいてこれは、排気ファンの最高能力のうち 3/4 しか使われていないという at level 3/4 only; it was indicated that this is due to the risk of fan vibrations.

不十分な事実による；それはファンの振動による危険が指摘されたからである。

In France and Italy, the dampers installed for smoke control are without a doubt leaking air. It is also

フランスとイタリアでは、煙を調節するために導入されたダンパーから空気が漏れることは

possible that there are other leaks within the ducts and the tunnel.

間違いない。ダクトとトンネル内では他の漏出の可能性もある。

Given the margin of tolerance due to test conditions and the accuracy of the instrumentation used for the

テスト時の許容限界と違うテストで使われた器具の正確さが与えられると、いずれかの different tests, it can be stated that, according to where the extraction is concentrated, the flow actually

排気の集中によって、ダクト No5 がトンネル半分から実際に取り除く排気量は以下の変域

removed by duct no. 5 from half of the tunnel may vary between these maximum limits:

であると言う事ができる。

- from about 15 m<sup>3</sup>/s with only one active opening on the Italian side,  
イタリア側で排気口 1 つだけが稼動する約 15 m<sup>3</sup>/s から
- to 100-135 m<sup>3</sup>/s when all duct openings are active on the French or the Italian side.  
フランスかイタリア側で、全てのダクト排気口が稼動したときの 100～150 m<sup>3</sup>/s まで

Narrowing down to a one-kilometer of extraction, the ventilation capacity varies within these limits:

排気を 1 km に限定したとき、換気能力は以下の範囲で変わる：

- in France, from 17 m<sup>3</sup>/s/km (conservative flow assumption for removal over three thirds) to 44 m<sup>3</sup>/s/km (optimistic flow assumption for removal over one third),  
フランスでは、17 m<sup>3</sup>/s/km (3/3 に排気エリアを広げたときの控えめな量) ～44 m<sup>3</sup>/s/km (1/3 に排気エリアを狭めたときの楽観的な量)
- in Italy, from 22 m<sup>3</sup>/s/km (measured in 1998 over the entire length of duct no. 5) to 57 m<sup>3</sup>/s per 900 m  
イタリアでは、22 m<sup>3</sup>/s/km (1998 年にダクト No5 全体で測定された量) ～57 m<sup>3</sup>/s per 900 m  
(activation of the first three openings).  
(はじめの 3 つの排気口の合計)

It is interesting to compare the smoke extraction capacity of the Mont Blanc Tunnel with those of

モンブラントンネルの排煙能力を、規制値や推薦された開通後の出版物での値と比較する

regulations or recommendations published after the initial opening of the tunnel. This is the subject of the

ことは興味深い。これは次の 3 つのパラグラフでの主題である。

following three paragraphs.

### 1.3.1. Smoke Removal Requirements in French Bulletin No. 81.109 of 29 December 1981 on Vehicular

1981 年 12 月 29 日に発表された自動車トンネルの安全のための排煙設備に関する Tunnel Safety  
フランスの公報

The 29 December 1981 bulletin, still current at the time of the fire, doesn't exactly apply to the Mont

1981 年 12 月 29 日の公報での基準は、今回の火災の時でさえ、モンブラントンネルに厳密に

Blanc Tunnel. Signed 16 years after the commissioning of the tunnel, it applies only to new vehicular

適用されていない。モンブラントンネルが運用されだして 16 年後に承認されたことなの



で、  
tunnel construction projects in the French national network, especially those in non-urban areas and of

フランス国内のネットワークの新しい自動車トンネル建設計画にしか適用されていない。  
more than 1,000 m in length. However, it is recommended to apply the requirements of this bulletin to

特に、田舎のものと 1000m 以上の長さのものだけである。しかし、もし交通状況が  
older tunnels, if at all possible, especially if this becomes necessary due to changing traffic conditions.

変わることによってこの基準が必要になるなら、古いトンネルにもできるだけこの必要物を

Incidentally, it does not apply directly to binational tunnels.

適用するよう薦められている。ついでながら、2つの国籍をもつトンネルにはこれが直接適用できない。

The bulletin sets forth the following requirements (article 3.1 - Ventilation):

公報では次の4つの必要事項を示している。

"The case of a tunnel fire must be studied and the following practical measures must be taken:

トンネル火災のケースを研究し、次の実用的な基準をとらなければならない。

Dimensioning of the mechanical ventilation:

機械換気の特質

- semi-transverse or transverse ventilation (Mont Blanc Tunnel): provide an exhaust of 80 m<sup>3</sup>/s/km

半横流式または横流式換気（モンブラントンネル）：トンネルでは2つの方式で  
for a two-way tunnel; the possibility of concentrating this removal in the immediate fire area must be

80 m<sup>3</sup>/s/km の排気ができる；火災エリアをただちに集中排気できるように研究しなければ

studied.

ならない。

Ventilation levels:

換気レベル

The levels to be used during fires will be studied case by case by a special commission made up of

火災中に使用された換気レベルは、土建業者やトンネルデザインセンターや地方民間防衛

representatives of the contractor, the Tunnel Design Center and the local directorate of Civil Defense. All

理事会の代表によって構成される特別委員会によって、一件一件調査されるだろう。

measures shall be taken as regards both structure and equipment to avoid the total destruction

of

全ての基準で、構造と設備の両方において火災中の換気装置の全壊を避けるようにすべきだ。

ventilation during a fire."

In the Mont Blanc case, the initial actual extraction flow, of 179 m<sup>3</sup>/s (French side) or of 224 m<sup>3</sup>/s (Italian

モンブラントンネルの場合、フランス側は 179 m<sup>3</sup>/s でイタリア側は 224 m<sup>3</sup>/s という最初の

side), gave only an average range of 31 to 39 m<sup>3</sup>/s/km, this being at the time weaker at the portals (about

実際の排気量は、そのときトンネルの中心へ向かう排気の流れの増加により、31~39 m<sup>3</sup>/s/km

8 m<sup>3</sup>/s/km) than in the center of the tunnel (around 45 m<sup>3</sup>/s/km) due to an increasing exhaust flow toward

の平均の範囲しかなかった、これはトンネルの中心付近が 45 m<sup>3</sup>/s/km なのに対して端のほうは

the middle of the tunnel. It has been shown that the average extraction flow over an entire half tunnel

約 8 m<sup>3</sup>/s/km 弱かった。トンネル半分の全域の平均排気量は 17~22 m<sup>3</sup>/s とされている。length is from 17 to 22 m<sup>3</sup>/s. On the French side, if the flow is at its highest, it will result at

best in 44

フランス側でもし排気量が最大になったとしても、せいぜい 44 m<sup>3</sup>/s/km だろう。それは m<sup>3</sup>/s/km, which is about half of the value required by the 1981 bulletin. On the Italian side, removing

1981 年の公報での基準で要求される値の約半分である。イタリア側では 3 つの排気口から

through three openings achieves from 47 to 57 m<sup>3</sup>/s over 900 m, which is still significantly lower than the

47~57 m<sup>3</sup>/s (900 m 間で) 排気できる、そしてそれは公報基準の 80 m<sup>3</sup>/s/km に全然及ばない。

80 m<sup>3</sup>/s/km of the bulletin.

The reasons cited for not increasing these ventilation capacities after the tunnel commissioning include

トンネル運用後、換気能力を増加できなかった理由として、トンネル中央で 1600m のわたる

the thickness of the tunnel's rock cover (over 1,600 m at the center) which would have made drilling

岩盤の厚さがある。そのため換気坑道の中に穴をあけることが不可能であった。

intermediate ventilation galleries impossible.

It is appropriate to point out that this bulletin, applicable to new projects, is currently being revised (see 新しき計画に使用できるように、この公報は現在改正されている (以下の 1.3.3.を参照) 1.3.3. below).  
ことが指摘できる。

### 1.3.2. Recommendations of the Committee of Vehicular Tunnels of the World Highways Association (PIARC) 世界主要自動車トンネル組織委員会への勧告

On the international level, one single technical association works on the operation and safety of vehicular tunnels and makes recommendations on this subject. This is the World Highways Association (formerly called Permanent International Association of Roadways Congress, which explains the initials PIARC), and more precisely, its Committee of Vehicular Tunnels.  
国際的なレベルでは、ある 1 つの技術組織が自動車トンネルの運転と安全のために働いており、この目的の勧告を作っている。この組織は世界主要道路組織 (以前は、常設国際道路学会と呼ばれ、頭文字をとって PIARC) であり、より正確にはその団体の自動車トンネル委員会。

The recommendations of PIARC are generally established during the Roadway World Congresses held every four years. They don't actually provide an extraction flow but give the necessary guidelines to define it.  
4 年ごとに開かれる国際道路会議会議で、PIARC の勧告はしだいに定着している。彼らは実際に排気をするわけではなく、それを決定するのに必要なガイドラインを与えている。

The report of the Committee of Vehicular Tunnels at the 1987 Brussels Congress indicates the thermal power and the smoke volume from personal vehicle, bus, truck, or gasoline spill fires and presents ventilation configurations allowing control of smoke propagation within certain limits. For example, a smoke flow of 50 m<sup>3</sup>/s would require an exhaust of 80m<sup>3</sup>/s/km of tunnel so that the length of  
1987 年にブリュッセルで行われた自動車トンネル委員会の報告で、個人の車やバスやトラックからのガソリンがこぼれて発生する火災での放熱量と煙の量に注意を向けていて、ある範囲内での煙の蔓延をコントロールする換気設備の配置を提案している。例えば、

propagation

50 m<sup>3</sup>/s の煙の流れに対して、安定状態のトンネル内で煙の蔓延を 600m 以内に at stable levels would be limited to 600 m.

制限するためには、80m<sup>3</sup>/s/km の排気量が必要である。

The report for the 1995 Marrakech Congress gives operational procedures during fires but does not

1995 年のマラッカ会議の報告では、排気量に取り組むのではなく、火災中の対処操作を address exhaust dimensioning.

与えている。

The report for the last Congress which took place in Montreal in 1995 complements the Brussels

1995 年にモントリオールで開かれた最近の会議の報告書は、Eureka 499 "Firetun" 計画の Congress information, by using the results of the Eureka 499 "Firetun" project, but only shows the

結果を使うことよってブリュッセル会議での情報を補足している。しかし、それは methods of studying smoke removal, the principles of ventilation, or examines the importance of fire

煙の除去と換気の目的の研究方法を示し、火災探知と消火システムの重要性を detection and extinguishing systems. Fire probabilities and their analysis are given, but no flow

調査しているだけである。火災の可能性とその分析はされているが、煙の特性はわからない。

dimensioning is provided.

A report titled Control of Fires and Smoke in Vehicular Tunnels, issued before the 24 March 1999 fire,

1999 年 3 月 24 日の火災以前にできた自動車トンネル内での火災と煙の制御という名前の

has just been published. It contains general recommendations on the use of transverse and semi-

報告書がちょうど出版されている。そこでは横流と半横流換気方式（モンブラントンネルの

transverse ventilation systems (as in the case of the Mont Blanc Tunnel), but it does not give flow

ような) の使用についての一般的な勧告を扱っているが、流動特性については扱っていない。

dimensioning values. It indicates that the extraction value of 80 m<sup>3</sup>/s is too low for a fire in a truck not

80 m<sup>3</sup>/s の排気量では、危険な荷物を運んでいないトラック火災にさえ足りないということ

carrying hazardous cargo, but there is no consensus on recommending another value.

指摘している。しかし、これは他の推奨基準と一致している意見ではない。

### 1.3.3. Regulations in Proposed New French Bulletin Currently in Preparation 現在フランスで準備中の新しい公報で提案される法規

The previously referenced bulletin of 29 December 1981 is currently under revision and a draft has been

以前に参考にだした 1981 年 12 月 29 日の公報は、現在修正中であり、その草稿は 1999 年 3 月

proposed (before the 24 March 1999 fire). This gives more accurate and complete recommendations than

24 日の火災以前に提案されている。ここではすでに存在する原文より現実的で、完全な勧告を

the existing text. For a tunnel like the Mont Blanc, the following requirements must be satisfied, based on

与えている。モンブランのようなトンネルでは、放熱量 30MW で発煙量 80 m<sup>3</sup>/s に発展する

a design fire for a truck developing a thermal power of 30 MW and generating 80 m<sup>3</sup>/s of smoke:

トラック火災に対応するために以下の必要事項を満たさなければならない。

"- The goals are to maintain to the best ability the natural smoke stratification at the higher part of the

道路付近でのきれいな空気の層を守るために、トンネルの高い位置で自然に煙が層になる

tunnel to preserve a layer of clean air near the pavement, and to extract the fire smoke by a system of

ような最高の能力を維持することと、天井付近の排気システムによって煙を排出することが

removal at the ceiling level. The exhaust of design fire smoke must be obtained over a length of 600 m

目標である。都市部でないトンネルでは 600m の長さに渡って排煙しなければならない。

for non-urban tunnels.

- These goals are made more difficult by the longitudinal air flow that has to be controlled in such a way

トンネルの上部で煙が層状になるように調整し、多くの広がりを持続しなければ

that the smoke stratification in the high area of the tunnel be maintained to the greatest extent possible.

ならなくなる縦流空気によってこれらの目標はより難しくなっている。

To this effect, in the fire area the longitudinal air flow speed must be reduced as much as possible. In

この縦流空気の影響のために、できるだけその速度を落とさなければならない。

bidirectional tunnels of more than 3,000 m, the ventilation system has to be able to limit the

average

3000m 以上の双方向のトンネルでは、気象状況のために逆方向に空気が進むのが当然  
speed of longitudinal air flow to 1.5 m/s across the section of the tunnel, even during  
reasonably

である間ですえ、換気設備によってトンネル内のセクションを通過する縦流空気の  
adverse meteorological conditions.

平均風速を 1.5 m/s までに制限できなければならない。

- In areas where there may be motorists, it is required to provide a certain amount of fresh air  
運転手がいるかもしれない場所で、ある合計量の新鮮空気を供給する必要がある  
(longitudinally from tunnel areas with smoke or transversely through fresh air registers).

However,

(煙を伴うトンネルの場所では縦流、または送風装置を通した横流)。しかし、  
maintaining the natural smoke stratification, where present, implies not moving fresh air to  
the ceiling

煙の層を維持することは天井付近の新鮮空気を当然動かないようにし、低い位置の側  
壁の

and providing fresh air at the bottom of lateral walls at low levels.

底に新鮮空気を供給することが必要である。

- When the tunnel has a permanent surveillance system, it is recommended to extract the  
smoke through

トンネルが常設の監視システムを持っているとき、天井の通風口の遠隔操作により  
remotely controlled ceiling openings. This system is the most efficient, if correctly used, as

it permits

排気をすることが勧められている。もし正確に使えたら、火災地点付近の集中排気を  
concentration of the exhaust near the fire site. The openings are spaced at a maximum of

100 m in the

行うのにこのシステムは最適である。都市部にないトンネルでは、通風口は最大 100m  
non-urban tunnels. In all tunnels longer than 3,000 m, this requirement is mandatory.

間隔で置く。3000m 以上の全てのトンネルでは、この要求を満たすことは義務である。

- The exhaust flow has to be greater than the smoke flow to account for the additional volume  
of fresh

排気量は、排気位置で新鮮空気追加量を加えた煙の量より多くなければならない。

air at the level of removal. An increase of one third will be used for ceiling openings. For

the design

増加の 1/3 は天井通風口で使われるだろう。火災設計(煙量 80 m<sup>3</sup>/s に進展する)では、  
fire (which develops 80 m<sup>3</sup>/s of smoke), this results in a minimal exhaust capacity of 110

m<sup>3</sup>/s. This

これは最小排気能力 110 m<sup>3</sup>/s に起因する。これは都市部でないトンネルでは

will be distributed over a maximum of 60 m of non-urban tunnel. Openings that are not

located in the

最大 60m に割り当てられるだろう。側壁上部の左右ではなく、天井に位置しない通風  
口では、

ceiling, but laterally at the top of side walls, are less efficient and are not allowed unless the removal

効果が少なく、モデリングに基づいた特別な根拠により、十分な排気能力の増加がない限り

capacity is increased significantly with specific justification based on modeling."

認められない。

This draft document is therefore much more precise and more stringent on several subjects than the 1981

それゆえ、この草案は 1981 年の公報よりいくつかの項目にとっても正確できびしい。

bulletin; although it doesn't yet have regulatory status, it is well known by the experts. The main

それはまだ規制をできる状況ではないけれども、専門家にはよく知られている。

differences between the recommendations in this document and the systems in the Mont Blanc Tunnel

この草案の勧告とモンブラントンネルの装置の間での主な違いは：

are:

- the smoke extraction capacity, already discussed:

すでに議論した排気能力：

- on the French side, it doesn't go up to 110 m<sup>3</sup>/s but to 85 m<sup>3</sup>/s, and it covers 2,000 m as opposed to

フランス側では、110 m<sup>3</sup>/s に近づいていなく、85 m<sup>3</sup>/s だけである。そして、

600 m,

600m に対抗して 2000m を扱っている。

- on the Italian side, it exhausts either 85 m<sup>3</sup>/s over 1,200 m, or 35 m<sup>3</sup>/s over 600 m.

イタリア側では、1200m で 85 m<sup>3</sup>/s か、600m で 35 m<sup>3</sup>/s のいずれかで排気している。

- control of the longitudinal air flow in the fire area, which was never studied (although it seems it must

火災地点での縦流の制御は、まだ研究されていなかった (3 月 24 日の火災の発端では

have been lower than 1.5 m/s at the outset of the 24 March fire);

1.5 m/s より低かったに違いないようだけれども)

- the supply of fresh air at the bottom of the lateral walls, required by the Mont Blanc Tunnel operating

横壁の底での新鮮空気の供には、火災の場合は最大レベルにするモンブラントンネルの

procedures to be put at maximum levels in case of fire, whereas the proposed draft document and

通風口の操作が必要であった。だが一方で、提案された草案や広い範囲の実行では

widespread practice recommend a very low level.  
とても低いレベルが勧められている。

#### 1.4. Tunnel Operating Procedures トンネル操作の手順

The requirements pertaining to fire ventilation levels are defined by the safety procedures included in the  
5つの換気設備での必要条件は、両社で共通の操作規則を含む安全運転方法によって  
operating regulations common to both companies.  
定義されている。

For fresh air, they evolved over the years.  
新鮮空気に関しては、その規制は年々発展した。

The regulation of 29 March 1967 required that fresh air supply be completely cut throughout the tunnel  
1967年3月29日の規制では、火災中のトンネル内での新鮮空気の供給を完全に止めるように  
during a fire.  
求めた。

The regulation of 14 September 1969 had the same requirements.  
1969年9月14日の規制でも同じ要求だった。

Then smoke removal tests were performed on 5 October 1972 with a fresh air supply at level 1/2, or half  
それから1972年10月5日に排気テストが新鮮空気の供給レベル1/2、またはその最大能力の  
of its maximum capacity.  
半分で行われた。

The regulation of 1 February 1974 directed that the fresh air supply be at the maximum during a fire.  
1974年2月1日の規制では、火災中は新鮮空気を最大レベルで供給するように指示した。

The last regulation, of 23 May 1985, repeats the same requirement.  
1985年3月23日の最新の規制では、同じ要求を繰り返した。

Over the years, the trend has been to increase the fresh air flow. This is to allow the motorists closer to  
年々、新鮮空気の量は増加の傾向がある。これは道路上に10mごとに位置する通風口により  
the fire area to breathe fresh air supplied by openings located every 10 m at roadway level.  
供給される新鮮空気を、火災エリアに近い運転手が吸えることをしめす。



**But this fresh air feeds the fire and heats the air in the tunnel if it comes at high speed and in great**

**しかしもしこの新鮮空気が速い速度と多くの量で送られてきたら、トンネル内に火災と quantity.**

**熱風を供給することになる。**

**The operating procedure of 23 May 1985, applied to the Mont Blanc Tunnel, doesn't appear to have been**

**1985年3月23日のモンブラントンネルに適用された通風口操作は適切であったようではない。**

**appropriate.**

**As for the smoke extraction, the safety procedures of the Mont Blanc Tunnel never changed.**

**All**

**煙の排出に関して、モンブラントンネルの安全運転方法は決して変わらなかった。**

**operating requirements issued directed that exhaust be set at the highest level.**

**全通風口に発せられた要求は、排気は最高レベルで行うというものだった。**

## **1.5. Traffic Rules for Moving and Halted Vehicles**

### **1.5.1 Distance Between Vehicles**

**There are tunnel traffic rules included in the prefectural ordinance of 31 January 1997, which require a distance of 100 m between moving vehicles (and 200 m for hazardous cargo vehicles). This rule aims to prevent chain-reaction accidents but does not protect stopped vehicles from the risk of fire spreading nor does it protect motorists from smoke. At the beginning of the tunnel operation there was a detection system for vehicles not keeping to the 100 m distance with a signal alarm, but that system has been removed. From statements by the operating companies, it was not obeyed and some drivers had fun triggering it; it caused maintenance problems.**

### **1.5.2. Speeds and Passing**

**The regulation sets both the maximum (80 km/h) and minimum (50km/h) speeds and prohibits passing. Joint teams of French and Italian police were tasked to enforce these rules. The operators repeatedly notified police of nonobservance of these rules.**

### **1.5.3. Traffic Signals**

**There are traffic signals every 1,200 m in the tunnel (at rest areas 3, 7, 11, 15, etc.). They are not located above the lanes, but on the sides; they are three-color signals.**

## **1.6. Evolution of Traffic Since the Opening**

As shown on the following graphic, the increase of traffic has been constant since commissioning of the tunnel on 19 July 1965. For tourist vehicles (passenger cars, motorcycles, and tour buses), the numbers went from 548,000 in 1966 (the first full year of tunnel operation) to 1,221,000 in 1998, or more than double (over 33 years, not a significant increase). For trucks, the increase in traffic was much greater, since it went from 45,000 in 1966 to 777,000 in 1998: the truck traffic was multiplied by a factor of 17 in 33 years. In all, this accounts for more than 45 million vehicles, of which a third were trucks, that had passed through the tunnel by 31 December 1998. Moreover, the size of trucks has significantly increased.

The following table shows the distribution of 1998 traffic by category and direction. It should be noted that trucks represent 39% of the total, and tour buses 1.4%.

However, the significance of the preceding numbers must not be misinterpreted. If the Mont Blanc traffic, especially the trucks, increased greatly, it still remained relatively low as an absolute value. A traffic flow of 5,473 vehicles per day is much lower than a roadway of the same capacity can take.

Actually, the capacity of a tunnel is set not only by its geometry but also by its equipment and safety setup. The toll revenue generated by this traffic was 518 million francs in 1998.

## 1.7 Comparison with Similar Vehicular Tunnels

There are 14 vehicular tunnels of longer than 8,000 m currently in service in the world. Five of these tunnels have two bores (three in Japan, one in Italy, one in Switzerland). Three others have only one bore, but their traffic is very low (Norway and Japan). The remaining six tunnels (including the Mont Blanc) have only one bore with two lanes and significant two-way traffic, and their features are relatively similar.

A longer tunnel, with a single bore 24,500 m long, is currently being built in Norway between Aurland and Laerdal.

In the following table, only the Mont Blanc and Fréjus tunnels cross national borders.

The other major border tunnels, especially the Karavanken (7,864 m long) between Austria and Slovenia and the Grand-Saint-Bernard (5,828 m long) between Switzerland and Italy, are shorter.

The Mont Blanc Tunnel is the oldest of all these preceding tunnels. Only Switzerland has tunnels commissioned at around the same era but they are much shorter (San Bernadino with a bore 6,600 m long opened in 1967, Grand-Saint-Bernard with a length of 5,828 m opened in 1964).

The table includes only toll mountain tunnels, except for the Saint-Gothard tunnel where the

regular highway tax sticker is required. Only at the Mont Blanc and Fréjus tunnels are there barriers at the entrance toll plazas.

### 1.7.1. Geometry

The pavement of these tunnels varies in width from 7 to 7.8 m, except in the Fréjus and Gleinalm tunnels, where it is 9 m wide. The authorized vehicular width is 4.5 m, except in the Saint-Gothard tunnel where it is 4 m.

The horizontal alignments include wide curves or sharper curves toward the ends.

The vertical profiles have a high point, except for the Fréjus tunnel, which is on a continuous slope of 0.54%. The Mont Blanc Tunnel has a steeper slope (2.4%). Following it is the Arlberg tunnel, with a slope of 1.67%, then the Saint-Gothard tunnel, with 1.4%.

### 1.7.2. Means of Evacuation and Protection of Motorists

Only the Saint-Gothard tunnel has a parallel safety tunnel, pressurized and with access from the main tunnel every 250 m. The Mont Blanc and Fréjus tunnels are the only ones with pressurized refuges. In the Saint-Gothard tunnel, the access galleries between the main and the safety tunnels are built as refuges. The Austrian tunnels have no safety tunnel or pressurized refuges.

Only in the Fréjus tunnel can the fresh air duct be used for access by rescue teams.

Only the tunnel of Gleinalm has no rest areas. In the other tunnels, a passage across from each rest area allows truck U-turns (with difficulty).

### 1.7.3 Safety Equipment

From the equipment standpoint, these six tunnels are relatively similar. They all have safety niches in their side walls. Because of the location of the fire standpipe, the fire niches are only on one side, whether or not they are in the safety niches.

They all have interconnected electrical power at each end.

The tunnel lighting is carried on two distinct circuits in the Mont Blanc and Fréjus tunnels, while it has only one circuit in the Swiss and Austrian tunnels. Only in the Arlberg tunnel is there a continuous drainage system for roadway spills.

The ventilation system is transverse in all cases. The six tunnels, with the exception of the Mont Blanc, have several intermediate ventilation rooms connected on one side with vertical ducts and on the other with two ducts (supply and exhaust) in the tunnel ceiling. Because of the thickness of its cover, the Mont Blanc Tunnel has only one ventilation room at each portal. The numerous ventilation ducts are located under the roadway.

The ventilation system in the Mont Blanc Tunnel has been modified to account for the increase in traffic and to improve smoke removal. The French part of the Fréjus tunnel has recently been equipped with remote-controlled exhaust openings. The other tunnels do not have remote-controlled exhaust openings.

All the tunnels have traffic signals, an alarm network, CCTV, two-way radio, and a fire detection system (except the Fréjus tunnel), managed from a unique command and control center (PCC). The exception is the Mont Blanc Tunnel, which has two PCCs, one at each portal, independent of each other. The Saint-Gothard tunnel also has a PCC at each end, but they alternate every two weeks.

#### 1.7.4 Hazardous Cargo

Hazardous cargo transit is regulated in the six tunnels. In the Mont Blanc Tunnel, it is allowed only in limited quantities. In the Saint-Gothard tunnel, it is allowed in larger quantities. It is the same in the Arlberg tunnel, which has either hour restrictions or mandatory escort. Just recently, all authorized hazardous cargo in the Fréjus tunnel is required to have a double escort. There do not seem to be any restrictions in the Plabutsch and Gleinalm tunnels.

#### 1.7.5 Response Team

The Saint-Gothard tunnel has an around-the-clock firefighting team at each end of the tunnel for the quickest possible response. After the severe 1997 truck fire, the team changed from three to four firefighters. The additional person is especially responsible for the evacuation of motorists from their cars to a safe area.

In the Fréjus tunnel, there is a first response team with a fire engine at each entrance; the technical staff is made up of voluntary firefighters. They are trained to respond to any incident inside the tunnel with the equipment provided by the safety chief.

In the Mont Blanc Tunnel, a team made up of a firefighter and volunteers is stationed at the French entrance and has specialized vehicles; it can be mobilized for response throughout the tunnel (see chapter 2).

## 2. ORGANIZATION OF TUNNEL SAFETY

### 2.1. Original Institutional Framework

The original framework sought to closely tie safety and operations through unified management of the tunnel. The 14 March 1953 convention between France and Italy relating to the construction and operation of a tunnel under Mont Blanc established the role of the toll companies and of the governments in the operation and safety of the tunnel. Two organizational levels were defined. On the one hand, the French and Italian toll companies (article 7) were supposed to relinquish the common management of the tunnel to an operational

branch. This French-Italian company would have had responsibility for ensuring global consistency of the operation and therefore safety of the tunnel. On the other hand, a French-Italian control commission (article 8), an intergovernmental body, received the mission to control the operation, maintenance and preservation of the tunnel.

This framework was repeated and defined by the lease documents and contracts of 7 July 1959 that specified the safety obligations of both companies. Article 7 of the French lease document returns to the principle of one French-Italian branch "for the operation on both the French and Italian sides". A framework "to limit as much as possible the danger of a vehicular fire in the tunnel" was requested of the companies (article 16 of the French contract). Additional works to ensure a better operation of the tunnel or better safety could be proposed by the government and the lessee (article 18). It was also requested of the lessee to establish rules for the operation and "the functioning of the safety system both for appropriate ventilation and firefighting measures".

## 2.2. Common Administrative Organization

The institutional organization based on a common operating company was never accomplished. At the opening of the tunnel in 1965, a so-called temporary and flexible coordination framework was established between the French and Italian companies. It endured to this day, following several major modifications.

The pact of 23 March 1965 established (article 1) that the tunnel would temporarily be operated by both toll companies working together, as the common branch was not yet set up.

To limit the effects of this institutional change departing from the principle of a unified management, article 2 of the pact required that each company commit to taking all measures necessary to operate the entire tunnel. A common administration committee was created to replace the common branch. This committee was responsible for organizing the liaison between the two companies and taking all measures necessary to operate the tunnel, "as a branch company would have done". The collaboration agreement of 27 April 1966 between the two companies specified, "pending the development of the statutes of the common operating company", the operational framework of the common administration committee. A single operations director, employed by either one of the two companies, was to be named by both companies (article 6), although his authority was not clearly defined. Functionally, the operations director would appear to act on the decisions of the common committee, although actually appointed by the two companies.

The shortcomings of this compromise, acceptable for a temporary framework but crippling for the long term, have had important consequences on the efficiency of tunnel management since 1966. Little by little, the operation moved toward two overlapping managements for the two halves of the tunnel, without sufficient coordination. Thus, since 1968, a minor disagreement

on the operation of the tunnel has been reflected in the works of the common committee. The companies were debating over the hierarchical authority -- common committee or employing company -- of the operations director. In 1972-1973, the committee decided, without modifying the 1966 agreement, to substantially modify the principle and the organization chart of the common management. Two operations directors, French and Italian, were placed at the head of the common management. This two-headed organization repeated and reinforced the uncertainties of the 1966 agreement, the two directors being appointed by the common committee but "having decision powers given by the two companies".

In 1979, the separation into two operating entities was finalized. By then, each of the two companies had a full-time operations director specifically responsible for half of the tunnel. This new reform did not, however, eliminate the need for a common operation. In February 1999, a new debate shook the common committee, with two opposing positions. For some, the two directors should continue to report to the common committee while, for others, they should both represent their companies and act according to their companies' instructions.

In this context, the capital improvements for safety, especially for ventilation, were planned and implemented without coordination between the two companies. The common administration committee saw its funding decision-making powers limited, or even opposed, by the two companies, on their way to "take control". This was the case with the updating of the ventilation openings, implemented in 1980 by the French company and in 1997 by the Italian company, and for the tunnel safety service organization. Similarly, to date, the tunnel operation and control appear only partially coordinated. For example, at the time of the accident, the ATMB operator was not fully aware of the status of the ventilation on the Italian half, and vice versa. Aware of this shortcoming, in 1990 the companies started to implement an upgrade program that they hoped would be coordinated. The common committee supervised this program. This flexible approach to the coordination of capital improvements initially started with lighting, wall finishes, and tunnel signals. The two companies mutually informed each other of their progress and tried to coordinate it. An additional step toward a strengthened coordination of safety capital improvements was made starting in 1996 with the centralized technical management program, then in 1998 with the automatic incident detection program. In these two projects, one company was designated as leading the study and contract formation for the entire tunnel.

Finally, it should be noted that the coordination and consistency of capital improvements has been set back seriously by different procedures of the two companies. These procedures, particularly cumbersome for the Italian company, explain the major delays between the deciding on and the implementation of the capital improvements.

### 2.3. The Intergovernmental Control Commission

The French-Italian control commission, made up of representatives of the two governments, is responsible for the control and supervision of tunnel safety, according to article 8 of the 1953 convention. The 1 March 1966 exchange of correspondence between the French and Italian foreign ministers directed that the commission control the execution of additional works needed

to improve the tunnel operation and to increase its safety.

However, the control commission appears to have met several obstacles in this mission.

First, the inexact definition of responsibilities and the absence of formal ties between the commission, the common committee, the common management and the two companies appear to have presented an obstacle early on. In 1967, the common committee pointed out to the government that the control commission could not give instructions to the companies and, even less, to the common management. But it was above all on the issue of safety that the relationship between the control commission and the common committee failed. On its side, the common committee had protested since 1967 the terms of the 1 March 1966 correspondence confirming the control power of the commission. The latter regretted not being informed until after the fact of the work inside the tunnel and recalled, in support of their case, the need for the tunnel to appear to the motorists as a unique and homogenous entity, both in its operation and its looks.

In 1988, a legal study was finally conducted to clarify the authority of the control commission to approve contracts. A classification into three categories was adopted, in strict adherence to the letters of 1 March 1966. While the commission would simply be informed after the fact about regular maintenance work and before the fact for major repair work, it has to review any supplementary construction. This classification has been correctly applied since 1990 with regard to the updating of the tunnel.

Secondly, starting in 1973, the rapid growth of vehicular traffic, especially trucks, led the control commission to focus its efforts on two recurring and sensitive subjects, the adjustment of tolls and access to the tunnel, while disregarding safety issues, which took a back seat in the discussions. The rules of hazardous cargo traffic in the tunnel, which the commission has the authority to submit, were regularly addressed. Likewise, in 1982, the emergence of a mutual aid project between the two countries in the case of a disaster was initiated by the commission. A draft convention was put together by the Foreign Ministry. This convention was only completed in 1992, and it was not published until 1995.

Finally, the ever-changing composition of the commission, difficult to avoid since the majority of its members were appointed, plus its formality and the frequency of its meetings, appear to have raised a third obstacle to a quality follow-up of the safety issue.

## **2.4. Organization of Rescue Efforts by the Operators**

### **2.4.1. Original Documents Contain Few Specific Instructions on this Subject**

The lease contract of 7 July 1959 states that the tunnel operation is at the risk of the lessee (article 7), which has to ensure its safety and operational continuity (article 8).

The operating procedures do not further specify the operator's organizational duties and the assets to be used in case of fire. An operating procedure must nevertheless provide for a fire

safety system.

#### 2.4.2. Organization of the Operators' Rescue Assets

The operating procedures of 23 May 1985, common to both operators, describe the alarm procedures, the rescue vehicles at each portal, the roles of the operators and motorcycle patrols and, only for the French side, firefighters.

A major organizational difference can be seen between the available assets on the French and Italian sides:

##### On the French Side

- 6 professional firefighters (all volunteers at the rescue centers of Chamonix or d'Aiguebelle) work 3 shifts of 8 hours;
- 6 motorcycle patrols work on the same schedule;
- the toll takers are all would-be volunteers during a potential rescue operation.

Every day, a firefighter and a motorcycle patrol are on duty.

Complemented by the toll takers, the team can go up to 10 people a day, with a minimum of 4 people at night. The team is available 24 hours a day.

As for the fire and rescue vehicles:

- an FPTL (2,000 liter light pumper engine) with extinguishers and individual breathing devices (ARI);
- a PS (600 liter first rescue vehicle) with extinguishers and ARI;
- an ambulance (VSAB).

##### On the Italian Side

- a team of eight motorcycle patrols;
- a multi-use fire vehicle with three extinguishers staffed by a driver "accompanied by voluntary Italian employees for rescue operations".

The operating and safety procedures state that "inside the tunnel, the firefighter is responsible for the use of vehicles and equipment, the response techniques, as well as the safety of motorists and employees". The first response service available on the French side is therefore aimed at the entire tunnel.



This response method actually excludes the scenario on 24 March when the first response could come only from the Italian side. In fact, aside from the motorcycle patrol, this entrance had neither firefighters nor volunteers, since for reasons of principle none of the employees had signed a response agreement (minutes of the common administration committee of 25 October 1972).

#### 2.4.3. Explanations of the Choice of a Rescue Service on the French Side for the Entire Tunnel

In 1971-1972, the two companies acknowledged in the common administration committee that they had to improve their rescue assets. A decision was made to set up a permanent rescue team made up of a firefighter, a coordinator and a driver.

However, the local circumstances eventually led to a situation depriving the Italian side of both firefighters and volunteer operators for combating fires.

A review of the minutes of the common administration committee shows that the two companies initiated contact with Chamonix and Courmayeur. Finally, ATMB decided to hire five firefighters to be located at the French portal and placed under the common operator while, on the Italian side, the SITMB was being asked by the administration of Aoste for a financial contribution to implement a fire station at Courmayeur.

The investigating commission did not find, in the 1971 and 1972 minutes of the intergovernmental control commission, any trace of these decisions, nor its own formal agreement to this asymmetrical rescue organization by the operators.

#### 2.4.4. Firefighting Drills

Since the implementation of this service, the common administration committee sought to organize common drills between the tunnel and the rescue centers of Chamonix and Courmayeur.

Two such drills were organized and were the subject of reports by the fire and rescue services of Haute-Savoie. The first (15 October 1972) addressed smoke tests in the tunnel. The second (25 March 1973) was a real rescue drill including the firefighters and the tunnel rescue teams, but involved only the French teams.

The conclusions of the report by Lieutenant Colonel Leverage were formal:

"in all circumstances and at any time during the year, four specially trained men must start simultaneously from each side immediately after the alarm is triggered, without regard to the size of the accident or the support of the rescue centers of Chamonix and Courmayeur".

These drills led the committee to increase the personnel presence during the night on the French side. No other follow-up was mentioned in the following meeting minutes.

The commission did not know of any other fire drills inside the tunnel. The 1989 drill, according to witnesses, took place on the Italian side and was aimed at training the Italian firefighters in rescuing trapped motorists from their vehicles.

The common operating procedure does not actually require the organization of drills for the tunnel teams alone or with adjacent public service firefighters.

The major fire of January 1990 did not lead the operators to plan further, although the common administration committee meeting minutes of 26 January 1990 state that all lessons learned from this fire will be applied.

The question would be frequently raised by the French firefighters within the framework of cooperation started in 1996, but without actually resulting in a French-Italian drill. The prefect of Haute-Savoie had planned for 1999 a rescue drill inside the tunnel with the goal of establishing a first response plan common to Haute-Savoie and Val d'Aoste.

## 2.5. Public Safety Plans

There is no common French-Italian public safety plan.

On the French side, the specialized safety plan developed by the Haute-Savoie prefecture is dated 1 July 1994. Currently, a specialized plan is not mandatory for tunnels.

On the Italian side, the equivalent safety plan (piano di emergenza) was developed in 1995 by the civil defense services of the autonomous region of Val d'Aoste, the president of the region acting as the prefect in matters of civil defense.

The two plans are very different in both form and content.

The French plan seems more complete. It recalls the role and the methods of first response of each operator. But it also indicates, wrongly, in an appendix titled "Participation of Rescue from Val d'Aoste" that, on the Italian side, the first response is provided by a team of 2 to 6 operators. Actually, as noted earlier, besides the motorcycle patrols, there are no firefighting team and no volunteer operators for first response on the Italian side. The Italian plan does not mention this team and it only refers to the three-extinguisher fire vehicle that the operators were not trained to use, as the SITMB stated to the investigating commission.

Regarding the possible support to be provided by a government on the side of the tunnel under the jurisdiction of another government, the two rescue plans refer to the establishment of an ad hoc agreement. However, the Italian plan proposes that the Italian and French rescue teams work in collaboration throughout the length of the tunnel under the coordination of the

jurisdictional government authority.

## **2.6. French-Italian Cooperation**

Since 1996, the organization of the tunnel safety has been the focus of genuine French-Italian efforts, but with no real results so far.

The starting point was the 10 September 1995 French-Italian convention on mutual assistance during disasters. Article 16 of the convention states that agreements and special arrangements may be reached to establish the first response conditions for the neighboring country in the Mont Blanc Tunnel. On this basis, between 1996 and 1998 the civil defense services of Haute-Savoie and Val d'Aoste and the firefighters from each country developed an administrative agreement setting the practical framework of requests for assistance, and planning common communications and training activities, as well as drills. This proposed agreement did not, however, get signed, pending the Rome agreement received by the president of the Val d'Aoste region... on 24 March 1999.

Besides working out of this agreement, the development of regional French-Italian cooperation has been intense, especially in 1997 and 1998, with the goal of acquiring the INTERREG European funding. It is thus that two agreements to improve safety in the tunnel were signed on 2 October 1997 and on 19 February 1999 between the prefect of Haute-Savoie, the president of the Val d'Aoste region, and the president of the administrative board of the fire and rescue services of Haute-Savoie. Activities to inform and train firefighters from Haute-Savoie and Val d'Aoste, common drills, and the construction of a firefighting training facility for response in confined spaces have been planned and introduced for EU financing. Only the activities to inform and train the French and Italian firefighters, by making tunnel visits, took place before the 24 March 1999 fire.

## **3. DEVELOPMENT OF EVENTS**

### **3.1. Traffic Conditions and Tunnel Functioning, Before and After the Alarm**

#### **3.1.1. Traffic Status Before the Alarm**

The traffic was of average intensity before the alarm, but increasing:

- from 08:00 to 09:00, in the direction France-Italy, 131 vehicles, of which 82 were trucks,
- from 09:00 to 10:00, 163 vehicles, of which 85 were trucks.

In the minutes preceding the alarm, the number of vehicles coming from France passing through

the tolls averaged 4 per minute. If a tunnel speed of 60 km/h is assumed, the average distance between vehicles would be 250 m. If a tunnel speed of 90 km/h is assumed, the average spacing would be 375 m. In actuality, two vehicles or several could have followed each other more closely, but it cannot be said that there was congestion. In fact, traffic was flowing.

The fact remains that, during the 9 minutes separating the entry of the truck which caught fire first (10:46) and the tunnel closure at the time of the alarm (10:55), one motorcycle, 10 passenger vehicles, including one pickup truck, and 18 trucks entered the tunnel. Four trucks passed the truck on fire after it had stopped. There were 26 vehicles caught in the fire, including the motorcycle.

At 10:55, five vehicles had passed the tolls in that minute, but 2 out of the 5 continued into the tunnel. The 3 others were stopped by the ATMB siren.

### 3.1.2. Alarm Conditions

A detailed chronology of the facts is found in the Appendix. Only included here is the part that appearing to the task force to have particular importance.

The access closure at the two tunnel portals occurred at 10:55, i.e., within the first one or two minutes following the alarm. It should be noted that the clocks are not coordinated between the two tunnel entrances, nor between the various teams, and that the times indicated can differ, despite the recalculations effected, by about 1 minute.

The truck that ignited and started the fire had entered at 10:46.

9 minutes passed between these two events. What happened in the meantime?

The truck stopped at the toll plaza at 10:46. It started to enter the tunnel; accelerated, seemingly reached its cruising speed and then, realizing it emitted smoke, slowed down and stopped at rest area 21; it was about 10:53. We know from prior studies that the average speed of trucks going from France to Italy is about 56 km/h. This is consistent with the fact that the truck covered 6,700 m from the toll plaza between 10:46 and 10:53, in about 7 minutes. It can be concluded that, when the smoke was observed on the screens at 10:53, the truck had just stopped (or was close to stopping).

The functioning of the other alarm equipment:

At 10:52 (French time) or 10:51 (Italian time) in rest area 18, the obscuration monitor gave a "coefficient Westinghouse" value of more than 30%. That set off an audio and visual alarm at the French operator's station. That station is equipped with such alarms, which do not exist on the Italian side. In the same minute, the obscuration meter in rest area 14 had also indicated surpassing 30% (maximum saturation of the obscuration monitor). But that was not reported on the main board in the control room.

### On the French Side

The 30% saturation level of the monitors in rest areas 14 and 18 at 10:52 had automatically activated the display on the control screens of the camera images for this zone, without automatically triggering the register.

At 10:53 the French operator cleared the alarm, i.e., indicated to the system that it had been acknowledged. He observed the camera images at rest area 18 and those at rest areas 16, 17 and 19 and saw the smoke in the tunnel.

The French fire detection system measures temperatures and detects those which go beyond 50°C at sensors located every 8 m. The sensors did not trigger during the truck's travel, which is not unusual. They did detect the high temperatures later on.

The temperature measurements are recorded and kept in memory for four days, then are automatically replaced by the measurements of the day. Unfortunately, in the four days following the outbreak of the fire, the system was not stopped and these numbers were not collected, and therefore are no longer available.

### On the Italian Side

The Italian fire detection system works on a different principle (based on heating of a gas in tubes 70 to 80 m in length). According to the Italians, the system gave frequent false alarms and, because of one of these coming from the sensor in rest area 21 (where the Belgian truck on fire stopped), the relevant section had been placed out of service the night before.

Several other elements confirmed the alarm:

- a phone call around 10:54 from a person at rest area 22, received by the Italian control center,
- an alarm from rest area 21 around 10:57 (usage of a fire pullbox), followed around 10:58 by an alarm showing the lifting of a fire extinguisher in the same rest area.

#### 3.1.3. Tunnel Closure

On March 24, when the alarm had been given by the French and Italian control centers after telephone communications and following the appearance of thick smoke on the control screens of both countries between rest areas 16 and 21, the siren was set off at the French portal at 10:54. At 10:55, all the traffic signals in the France-Italy direction turned red. A truck that was entering was quickly backed up to make way for emergency access, and vehicles which had already cleared the tolls were removed from the entrance. The Italian entrance was simultaneously closed at 10:55 and 10:56, by setting off the siren, turning the signals to red, and closing the gate.

## **3.2. Rescue Operations**

### **3.2.1. The Alarm**

#### **On the French Side**

The Central Alarm Center (CTA) in Annecy, where all communications are clock-dated and recorded, was alerted at 10:58:30. It immediately forwarded the alarm to the Main Rescue Center (CSP) in Chamonix, allowing the first rescue vehicle to leave its base at 11:02 and arrive at the tunnel at 11:10.

With regard to for the alarm and dispatch of the first rescue vehicle, there was no unusual delay.

#### **On the Italian Side**

The Courmayeur firefighters were alerted at 11:02, according to the telecommunications operator's records.

The first firefighting vehicle from Val d'Aoste left the Courmayeur rescue center at about 11:04 and arrived at the tunnel entrance at 11:11.

### **3.2.2. The Response**

#### **On the French Side**

The initiation of the private and public rescue tunnel operations was carried out in accordance with the "Mont Blanc Tunnel" Specialized Rescue Plan, adopted by the Haute-Savoie Prefect on 1 July 1994.

Two rescue plans were activated by the Haute-Savoie Prefect:

- at 13:04 the Specialized Rescue Plan for the tunnel,
- at 13:35 the Red Plan, given the foreseeable number of injured after the entrapment of the firefighters and ATMB personnel in the tunnel .

Two Command Posts were installed:

- the base Command Post (CP) at the Prefecture at 14:00, led by the chief of staff who, as of the following day, together with the mayor of Chamonix attended to the sensitive issue of calling the affected families and determining the number of victims;
- the site CP at the ATMB facility at the French entrance. The Bonneville deputy prefect, present at the site since 15:00, represented the Prefect in leading the rescue operations.

Lt. Colonel Laurent, director of the regional rescue and fire fighting services (SDIS), took command of the rescue operations, starting at 13:32.

The SDIS had anticipated the decision to activate the Red Plan and deployed the major assets requested by the plan (rescue and paramedic vehicle [VSAB] - helicopters, etc.).

This brought out the assets called for in the first and second stages of the Specialized Rescue Plan.

On March 24 at 15:00 the following assets were dispatched on the French side: 26 firefighting and rescue vehicles and 98 firefighters, including ten equipped with airpicks (ARICF).

A medical outpost was installed at the site and staffed by SAMU and SDIS personnel, but would be used only for the benefit of the rescue workers, since nobody could reach the motorists trapped inside the tunnel.

#### On the Italian Side

The activation of the Italian rescue plan (piano di emergenza) was not initiated by the president of the Val d'Aoste region, responsible for civil defense, who did not consider the plan justified, based on the information given to him by his staff around 12:00: no need for coordination presented itself, the situation relating only to the firefighters already dispatched. The regional services took the necessary actions concerning traffic.

The rescue operation was directed by the fire chief of the province of Aoste, Engineer Badino, and by Captain Marlier, the Courmayeur fire chief, without the formal installation of an operational command post in the SITMB center, or setting up a means of communication for contact with the French firefighters.

#### 3.2.3. Information Given to Public Authorities and Rescue Services

It is important to emphasize the fact that the French and Italian public authorities and the rescue services did not have, during the course of the first day and even until Thursday, information from the operators on the possibility of there being motorists trapped in the tunnel.

The density of the smoke from the first minutes on the French side had rendered the surveillance cameras incapable of reporting the number of vehicles and people trapped in the tunnel. However, a pullbox alarm was set off in rest area 22 on the Italian side, and an alarm followed by removal of a fire extinguisher was registered at 10:57 on the French side in refuge area 21.

These uncertainties would last until Thursday at 22:30, even after the discovery of three victims on Wednesday at 19:04 in the vicinity of rest area 18. According to the ATMB, this can be explained by uncertainties in interpreting, without risk of error, the information lists from the French toll plaza, given the lack of a system for counting vehicles present in the tunnel or

control at the exit.

#### **3.2.4. First Response by French Rescue Assets**

Only the main events will be recorded here, with the detailed chronology included in the Appendix.

From 10:55 to 11:36, all rescue vehicles entering the tunnel were successively blocked, far from the Belgian truck on fire.

The chronology of the stopped vehicles indicates the speed of the smoke propagation:

10:53 - stoppage of the Belgian vehicle in the tunnel at the level of refuge area 21;

10:55 - an ATMB agent enters the tunnel and is stopped shortly after rest area 18, i.e., about 750 m from the Belgian truck;

10:57 - the ATMB fire engines enter and are blocked at refuge area 17 (about 1200 m from the truck);

10:59 -

11:10 - the first Chamonix vehicle enters (FPTGP with six men) and is blocked at rest area 12 (about 2700 m from the truck);

11:36 - the second Chamonix vehicle enters (FPTL with five men) and is blocked at refuge area 5 (about 4800 m from the truck).

Priority was then given to rescuing the 17 people who were trapped. This operation began at 12:55 with the entry into the duct no. 5 of a team directed by Captain Comte, head of the Chamonix Rescue Center, through the ventilation ducts. It ended at 18:35 with the evacuation of the six ATMB personnel.

This effort to rescue the trapped firefighters and operating personnel was efficiently carried out. It was very dangerous.

The courage of the rescuers, like that of the trapped personnel, certainly led to the avoidance of a greater human loss. It must, however, be recalled that a junior officer of the Chamonix center died shortly after his evacuation and a total of 14 firefighters were hospitalized.

On the French side, it was therefore impossible to attempt any rescue operation of the motorists, about whom it must be remembered that the rescuers did not know anything and whose survival time, for those who had not found shelter, must have been short because of the enormous quantities of carbon monoxide and other toxic gases generated by the fire.



The emergency equipment was adequate; in all, the assets of four departments were mobilized, to which must be added the firefighters and the marine firefighting equipment of Marseille and Geneva. It was impossible to use them on Wednesday to combat the fire, despite the very short reaction time of the ATMB safety personnel and the Chamonix firefighters.

### 3.2.5. Organization of Italian Rescue Assets

Between 10:57 and 11:01, the tunnel was successively entered by an SITMB agent, the French patrolman, who was at the Italian portal at the time of the alarm, and the three-extinguisher fire engine, i.e., three men and three vehicles. The second, in his vehicle, crossed through the smoke between rest areas 21 and 22 and came within some 10 meters of the Belgian truck on fire, stopped at rest area 21. Exposed to danger, he had to back up and quickly return to rest area 22, where he found his Italian colleagues. Together they decided to evacuate the drivers from the trucks (including the Belgian driver), whose vehicles were stopped in the Italy-France direction about 300 m from the truck on fire. The passenger vehicles had succeeded in making U-turns and exiting toward Italy.

The first vehicle from the Courmayeur Center (FPTGP with three men) arrived at the portal about 11:11. It entered the tunnel and arrived at rest area 22 at about 11:16. It could not continue its path toward the truck on fire.

Blocked, they tried to proceed toward the truck on fire, first with their vehicle, then on foot, carrying their breathing devices. But, unable to see through the smoke, they had to turn around and return to rest area 24. They were joined there at 11:45 by two firefighters in a vehicle from the d'Aoste center carrying airpicks (ARICF).

Sheltered since 12:02 in rest area 24, the five firefighters were evacuated at about 15:00 by Captain Marlier, head of the Courmayeur center who reached them by ventilation duct no. 5.

For March 24, the count on the Italian side: 9 vehicles, 10 men with 2 airpicks and 19 breathing devices from the Courmayeur and Aoste centers. The Turin assets were not mobilized on either Wednesday or the days following, the rescue chief preferring to rely on the firefighting teams familiar with the tunnel.

### 3.2.6. Comments on Organization and Implementation of the Rescue Services

The PCO (Operation Command Post) on the French side was set up in the offices of the ATMB, since there was no planned control room. The available office was small and lacked an adequate number of communication equipment. The head of the rescue operations had to share the ATMB safety director's office, where his only means of communication was the director's telephone.

The setup of the PCO was not without consequence on its functionality. According to witnesses, the operator played an important role in the rescue operations, going beyond his normal role of technical adviser in carrying out a rescue plan.

The advanced medical post, thanks to its own setup, functioned well.

### 3.2.7. Smoke Reversal Attempts

On Wednesday the 24th and Thursday the 25th, the operator made attempts to reverse the direction of the smoke and facilitate the access of the French firefighters who were unable to proceed due to the smoke and heat.

All these attempts did not succeed in facilitating the operations of the French firefighters, and probably delayed the decision to transfer the assets to the Italian portal in order to concentrate them toward the entrance where it was possible to proceed, as testified by the Italian firefighters who, as of Thursday morning, had extinguished the fire in the trucks stopped in the direction Italy-France and approached the truck which started the fire.

From the beginning of the fire, the tunnel situation was notably different on the French and Italian sides, due to the direction of the smoke:

- at about 11:05, the French patrolman was about ten meters from the Belgian truck (on the Italian side), while the first firefighters' vehicle from Chamonix was stopped 2,700 m from the truck on the French side at 11:15;
- between 11:20 and 11:30, the Italian firefighters came within about 300 m of the truck, then were forced to go back to refuge area 24, which was 900 m from the truck, while the second Chamonix firefighters' vehicle was stopped at 4,800 m.

### 3.2.8. Contacts Between French and Italian Firefighters

Until Wednesday evening, communications were few: the fire chiefs informed each other briefly of their response activities, particularly concerning the evacuation of people trapped in the tunnel.

Thereafter, lacking liaison officers and also due to the communications difficulties previously mentioned, they were not in a position to examine the overall situation together and arrive at a common strategy.

When, during the night of Wednesday into Thursday, an offer of a "fresh" reinforcement team equipped with breathing devices was proposed to the leaders of the Italian rescue effort, it was first accepted and then declined, due to the expected arrival of Italian reinforcements.

A clear but after-the-fact review of the assets mobilized at each portal shows that the proposed transfer of assets toward Italy was wise and timely, coming immediately at the end of the rescue operations on the French side.

The lack of experience and operational coordination, lack of practice and the difficulties with

equipment and communications explain in part the delay of the proposed concentration of the assets on the Italian side.

It must be recalled that the proposed transfer of assets was considered on the French side and decided upon Thursday morning, but could not take place until the night of Thursday into Friday because of bad weather conditions on Thursday afternoon.

### 3.2.9. Firefighters' Response

This fire, exceptionally serious due to its strong caloric power, presented particular extinguishing difficulties due to its location and the impossibility of approaching it from the French side because of the density of the smoke. It should be noted that it took 53 hours to extinguish the fire.

The only person who saw the vehicle that started the fire was the French patrolman, at about 11:05. He has repeated his testimony that, at that moment, the fire could have been fought. Although this patrolman is not a professional firefighter, he did participate in extinguishing the truck fire in January 1990.

It must be stated, however, that even if the fire had been addressed at that moment, it cannot be confirmed that it could have been extinguished and the motorists saved, given the density of the toxic smoke which had already permeated the tunnel where the motorists were trapped at 10:55 (the time when the first ATMB agent was stopped on the French side at 750 m from the truck on fire).

All the French and Italian firefighters experienced great hardship with their response: almost no visibility, extreme heat, and great difficulty with airpicks in a very hot environment. The status report mentioned the need for training before using this type of equipment, and the fact that the ATMB breathing devices were not compatible with those of the firefighters. In general, all the team leaders have insisted that this kind of response requires a high level of physical and psychological strength, in addition to special training.

The response also revealed technical problems: insufficient water pressure on the French side of the tunnel, short-circuited pump, standpipe connection incompatibility for the different teams, and communication problems inside the tunnel, a portion of the communication equipment having been quickly damaged by the fire, complicating and increasing the psychological pressure on the firefighters during their rescue efforts.

Finally, the response proved the important role of foggers, relatively rare equipment brought in from Marseille and Geneva on the Italian side.

## 3.3. Results of the Catastrophe

### 3.3.1. Human Loss 人的被害

Besides the two ATMB emergency vehicles, 23 trucks, 10 passenger vehicles and 1 motorcycle were

2 台の ATMB の緊急車両に加えて、トラック 23 台、乗用車 10 台、バイク 1 台が壊されていた。

destroyed.

All these vehicles were between rest areas 19 and 23, in the tunnel half operated by the Italian company,

これらの車全ては、イタリアの会社が操作する側でフランスの会社が操作する部分に近い

close to the part operated by the French company (see attached map).

トンネル内駐車帯 No19 と 23 の間にあった。(付属の地図を参照)

38 victims were identified. Among these, 27 were found in their vehicles, 2 in other vehicles, and 9

38 人の犠牲者が確認された。これらのうち、27 人は彼らの車内、2 名は他人の車内、outside of vehicles. To these must be added the death of Chief Tosello of the Chamonix fire department

そして 9 名は車外で見つけられた。これらに対し、彼らの避難後に亡くなったシャモニ

after his evacuation.

消防局 Tosello チーフの死を加えなければならない。

Two drivers of trucks up front, and thus close to the fire, left their vehicles and fled toward France. They

火源に近い先頭のトラックの運転手 2 名は、彼らの車を残してフランスに向かって逃げた。

probably died of asphyxiation, after having gone about 200 to 240 meters. We do not know what their

彼らはおそらく約 200~240m 移動した後に窒息死した。彼らは速く歩くかあるいは走る

speed was: whether they walked quickly or ran and covered this distance in 1 to 2 minutes, or whether

によって 1~2 分間でこの距離を進んだのか、または彼らは窒息し始めるかあるいは視界が

they were delayed by the beginning of asphyxiation or by the lack of visibility and needed more time to

悪くなって遅れてこの距離を進むための時間がもっと必要であったのかという

cover it.

彼らの速さに関することはわからない。

Most of the other drivers, both in trucks and in passenger vehicles, stayed inside or near their vehicle. At

残りのトラックと乗用車のほとんどの運転手が車の中にとどまった。火災の初期と火災が

the beginning of the fire and doubtless for a certain period before the fire spread to neighboring vehicles,

広がる前のある期間内はおそらく、彼らは火を見ることができなかった。

they couldn't see the fire. The black smoke quickly filled the entire tunnel section, as shown by the

黒い煙がまるでテレビのスクリーンのようにトンネル全体を急速に覆った。そして

television screens and attested by the truck drivers coming from Italy who had passed the first truck on

火源である最初のトラックを通過してイタリア側から来たトラックの運転手が

fire.  
それを証言している。

We know that the Italian motorcycle patrol who was headed toward Italy sought shelter in refuge area 20,

イタリアに向かって進んだイタリアのパトロール員が乗用車の運転手を追跡して、

followed by the driver of a passenger car. Both of them died in this refuge, which was located close to

避難所 No20 を探したことをわれわれは知っている。彼らの両方とも避難所内で亡くなった。

the fire that lasted for more than 50 hours.

そしてそこは火源に近い位置で火災は 50 時間以上続いた。

Among the drivers or occupants of the cars stuck in line, four also left their vehicles. They died of

直線状に、動けなくなった運転手や乗客のうち、4 人が車から離れた。彼らは約 100～500m asphyxiation after going about 100 to 500 m.

進んだ後に窒息死した。

Of the 10 passenger vehicles, 4 had started to make U-turns, but were stopped practically at their point of

乗用車 10 台のうち、4 台が U ターンし始めたが、彼らの出発地点でほとんど止まってしまった。

departure.

All these facts attest to the speed with which the entire tunnel section was filled with dense smoke, which

これらの事実の全てが、トンネル全体に広がって視界を急速に制限し抑えたに違いない濃い煙

must have quickly limited or suppressed all visibility. This smoke was probably very toxic.

の速度の証拠となる。この煙はおそらくとても有毒だった。

The circumstances surrounding the outbreak of the fire and the conclusions that can be drawn

will be

描写することができる火災発生を取り巻く状況とその結論は、この報告書の中で discussed further in this report.

かなり議論されるだろう。

### 3.3.2 Physical Damage to the Tunnel

In addition to this terrible human loss, there were significant material losses, currently difficult to evaluate; damage for a length of over 900 m to the tunnel crown, and more localized but on significant lengths, of the roadway pavement and slab. In addition, tunnel equipment over a considerable distance was destroyed or severely damaged by the high temperatures and fire byproducts.

The vehicles traveling from France to Italy, which burned, were found between rest areas 19 and 21, over a distance of 600 m. The 8 trucks traveling from Italy to France, which stopped before arriving at the level of the first truck on fire, were evacuated by their occupants and burned between rest areas 22 and 23, over a distance of about 200 m.

In addition, the ATMB firefighting vehicle (FPTL), as well as another light rescue vehicle (PS), deserted by their occupants shortly beyond refuge area 17, were also destroyed.

## 4. ANALYSIS OF CAUSES OF THE CATASTROPHE

### 原因分析

### 4.1. Operational Characteristics of the Mont Blanc Tunnel

#### モンブラントンネルの運転上の特質

The Mont Blanc Tunnel was built as a result of the French-Italian convention of 4 March 1953 and

1953年3月4日、フランスーイタリア間の協定の結果として、モンブラントンネルは建設さ

opened in 1965. The lease and contract documents of 7 July 1959 established the role of the lessee.

れ、1965年に開通した。1959年7月7日の賃貸契約文章によって賃借人の役目が創設された。

Capital investments follow, as has been seen before, a complex process involving the common

以前に見られたように、最も重要な投資には、公共の管理委員会と会社を巻き込んだ複雑な administration committee and the companies, a process that does not necessarily result in a coherent

過程や、必ずしも筋の通った技術的な解決の結果でない過程やその同時の計画がついて回る。

technical solution or synchronized schedule. In recent years, the capital improvement coordination had,

しかし近年、主要な改善や調整は、コンピュータ化された中央の管理や自動化された事故探知

however, been implemented for computerized central management, automatic incident detection and

機によって実行された。しかしこれらのシステムは火事の実験場における場合だけだった。

variable message signs, but these systems were only at an experimental stage at the time of the fire.

This dual operation for the same facility is at the base of various difficulties of great importance with

同じ能力のこの二つの運転は、安全に関してたいへん重要でさまざまな困難に基づいて

regard to its safety. The two companies have agreements to share the regular revenue and expenses for

いる。その二つの会社は、維持や運転のための一般的な歳入と支出を共有し同意を得ている。

maintenance and operation, but capital improvement funds are completely independent, so that safety

しかし、主な改善資金は完全に独立しており、特に換気能力の安全修理は対等でない方法で

modifications of the facility, especially the ventilation, were made by the two companies in a non-

二つの会社によって行われた。

coordinated way: for example, the work on the exhaust openings on the ATMB-operated side was

例えば、ATMB の操作する側の排気口作業は 1980 年に行われた。一方、SITMB 側の

performed in 1980, while different work on the exhaust was performed on the SITMB side starting in

排気の違う作業は 1997 年に行われた。

1997.

What appears more serious is that the operation of the two tunnel halves is only partially coordinated

より深刻なことは、半分の二つのトンネルは二社の間で部分的にだけ同じで、どちらにも

between the two companies, neither of the operators having a complete knowledge of the status of

他者の操作するトンネルの換気に関して、完全な知識をもったオペレーターがいないという

ventilation on the tunnel side operated by the other company.

ことである。

The procedure requiring that, during an alarm, the first operator alerted takes operational command is not

警報時に、最初に警報をだしたオペレーターが運転上の命令を出すのに必要な処置が、  
really applicable in the absence of central command and control.  
中央管理室が不在のとき実は効果がないということだ。

#### 4.2. Historical Review of Accidents and Fires in Vehicular Tunnels

Vehicular tunnel accidents are infrequent and data is available for only a few of them. The accident rate (number of incidents for 108 vehicles.km) has a limited significance and must be interpreted very carefully.

The results of a survey of several French tunnels are shown on the following table. It should be noted that the category of "large tunnels with two-way traffic" includes only the Mont Blanc and Fréjus tunnels.

It can be seen that roadway safety in large two-way tunnels, such as Mont Blanc, is better than that of open roadways in the same category (national highways) and is, rather, comparable to non-toll divided highways.

There are some tunnels with high accident levels. This is due mainly to a peculiarity which is difficult to correct. Narrow lanes, unusual alignments (sharp curves) and profiles (severe slopes), or a mixture thereof, cause accidents. Poor pavement or traffic congestion are also causes of accidents.

The most serious tunnel accident in the records caused 11 dead and 35 injured (the Melarancio tunnel on the Autostrada del Sole in Italy in 1983). This occurred between a heavy truck and a school bus in a tunnel bore operating with two-way traffic due to work in the other bore.

In vehicular tunnels, fires are rare events.

Statistical data has been established for fires between 1965 to 1992 in the Mont Blanc Tunnel and from 1980 to 1991 in the Fréjus tunnel. The following table summarizes the results.

Whatever the roadway type, the ratio of passenger vehicle fires is the same. On the other hand, it can be seen that the ratio of truck fires is much higher in large, two-way tunnels (Mont Blanc and Fréjus) than in tunnels on highways or in urban or semi-urban areas.

The average annual number of truck fires is similar and the fire ratios are identical for the Mont Blanc and Fréjus tunnels. It should be noted that both these tunnels are located at about 1,200 m of altitude at the top of long climbs. This could explain, at least partially, the higher likelihood of fire in the trucks using them.

All the fires recorded in the survey started spontaneously and none resulted from an accident. No deaths occurred. One major fire was recorded in the Fréjus tunnel: a fire in a truck carrying plastic drums damaged a roof slab that had to be reinforced; there were no victims.



The world's major vehicular tunnel fires causing death or a large number of injuries are summarized in the following tables. In the first table, only fires not caused by hazardous materials are shown. The most serious caused 8 deaths. The second table shows fires involving hazardous cargo. The most serious caused 7 deaths. The majority of these fires followed a collision.

#### 4.3. Review of Truck Fires in the Mont Blanc Tunnel

##### 4.3.1. Seventeen Truck Fires in the Tunnel Since 1965

Most of these were put out with extinguishers on board or available in the tunnel. At least 5 fires were followed up with response by firefighters, on an average of one every 5 or 6 years. These fires were rapidly controlled, although the 11 January 1990 fire presented certain response difficulties.

For these five fires, the fire durations and nature of the damages were:

In four cases out of five, trucks caught fire probably due to overheated engines from the steep climb. None of the fires described above was detected by the tunnel equipment, other than the television cameras.

They were all able to be approached and extinguished by the fire services.

None of these fires spread to a second vehicle.

Attempts have been made to reconstruct the ventilation conditions after the alarm for each of these fires. Unfortunately, until now the only information has come from the reports of these fires. These include the following information:

In conclusion, it appears that: the fresh air supply was set at 1/2 or 4/4 levels, according to the case. Whenever functioning, the exhaust duct was used to extract at maximum levels in the fire area. This is in accordance with the safety procedures.

##### 4.3.2. Circumstances of the Five Other Major Fires

28 January 1974: Vehicle on fire at 0.45 km (French portal). At 0.15 km, close to the fire, the air flow was 4 m/s in the Italy-France direction. The response team coming from the French portal passed through very dense smoke at the tunnel entrance to the "penetration limit". They were able to fight and extinguish the fire very quickly because the truck was only 450 m from the entrance. The cargo was 21.5 tons of steel billet.

15 April 1978: The vehicle was on fire at 400 m from the Italian entrance it had just passed. The air speed was more than 5 m/s in the France-Italy direction. A French motorcycle patrol coming from France was the first to see the truck on fire. He stopped the vehicles (escorted convoy) following him, went through dense smoke, evacuated the four passenger vehicles

stopped behind the truck, and alerted the Italian operator. The alarm was triggered and rescue assets coming from France arrived at the scene, followed by those of Courmayeur. The cargo, consisting of shoes, wood and marble, did not burn.

17 September 1981: The truck was going from France to Italy. The fire took place at 4.5 km. The air flow speed is not known. Abundant smoke was coming out of the engine, but the vehicle did not catch on fire. The report does not mention how the fire was extinguished. It does not mention the nature of the cargo.

2 September 1988: The truck on fire was at 5.05 km. No information on the air speed. Toward 07:10, when the driver stepped down from the cab, he saw flames on the right front of the truck, gave the alarm with the pullbox at rest area 16. He fought the fire with an extinguisher and succeeded in controlling it. At 07:17 the Italian motorcycle patrol arrived and, since the fire had reignited, the patrolman put it out with two extinguishers, one from rest area 16 and the other from his vehicle. At 07:22 the French rescue team arrived after crossing 500 m through thick smoke. The fire started to ignite the cargo. The fire was then completely extinguished. The cargo consisted of 800 bags of 25 kg Hostalit chemical powder, not classified as hazardous, since these powders apparently had low combustibility levels.

11 January 1990: The truck was going from Italy to France. It stopped, on fire, at 5.81 km between rest areas 19 and 18. The driver had observed smoke since about 1.6 km, but tried to continue on until flames appeared in his cab. He gave the alarm by telephone from rest area 18 at 10:42, then returned and turned back a passenger car coming from France. At 10:50, the safety personnel coming from France and Italy, about 8 minutes after the alarm, were blocked by the smoke, the former at rest area 18 and the latter at rest area 19. However, at 10:52 the two French firefighting patrols succeeded in coming within 3 m of the truck on fire with their tanker engine (CCI) and fighting the fire. At 10:55, the fire in the truck cab was extinguished; the entire back of the truck was on fire, but the truck nevertheless accessible. At 10:58, when the Courmayeur firefighters arrived, they were able to control the fire. The cargo consisted of 20 tons of industrial cotton spools, wrapped in plastic bags, 10 to 12 tons of which burned.

What conclusions can be drawn from these five fires?

In all cases, the alarm was given only when the truck on fire was stopped.

No fires were ever observed at the tunnel entrances.

After the alarm, the longitudinal air flows in the fire areas were not recorded.

No testimonial mentioned stratified hot smoke. This is not surprising, as a relatively weak (1.5 to 2 m/s) longitudinal air flow is enough to homogenize smoke in a tunnel section.

After the alarm, the fresh air levels were set at 1/2 of their capacity or at maximum capacity, according to the case.

In 4 out of 5 cases, the smoke extraction was set at maximum. In the fifth case, it did not function at all.

The cargo was either inert (steel), or undetermined (when it was not ignited), or combustible (shoes, wood, cotton or thread), or of unknown combustibility (Hostalit chemical powder).

#### 4.4. Sizes of the Fires and Smoke Volumes of the Truck Fires and Their Cargos

In the following, information is given on heat quantities produced by truck combustion (caloric potential), released thermal power, smoke volumes, their toxicity and the inflammability of a truck.

##### 4.4.1. Caloric Potential

It is relatively easy to estimate the caloric potential of a vehicle and its cargo, in other words, the quantity of energy released if they burn completely. This estimation can be made by adding the caloric potential of all the parts of the vehicle, its fuel and its cargo. The result is generally expressed in GJ (giga-joules, or billions of joules, the joule being the legal energy measuring unit).

The currently agreed-upon values are from 5 to 12 GJ for a passenger vehicle, according to its size, about 50 GJ for a bus, from 150 GJ for a tractor trailer carrying a cargo of medium combustibility, and 1,000 GJ for a tanker carrying 30,000 liters of gasoline.

Actually, the caloric potential of trucks can vary widely, according to their cargos. Therefore, some cargos, not classified as hazardous in the strict sense of the rules, generate when burning caloric potentials close to those of inflammable liquids (classified as hazardous cargo). This is especially the case with margarine (present in the first two trucks coming from France, that burned) and of polyethylene (carried by two other trucks coming from France). Thus for burning cargo, the caloric potential varies from several dozen GJ (fruits, vegetables) to about 900 GJ (all margarine cargo). For the vehicle that started the fire (PL0), the cargo caloric potential was between about 500 and 600 GJ.

Compared with these numbers, the caloric potential of tractor trailers is relatively low: from about 5 to 10 GJ. Semi-trailers and trailers (without cargo) add 20 to 30 GJ each, as well as the fuel carried (17 GJ for 500 liters of diesel).

A rough estimation results in a total caloric potential of 5,000 to 7,000 GJ for the total number of vehicles entering from France, that burned (or the caloric potential of from 5 to 7 gasoline tanker trucks), and from 1,100 to 1,800 GJ for those which entered from Italy and burned.

##### 4.4.2. Thermal Power

熱の力

While caloric potentials may be easily estimated, this is not the case for the thermal power

emitted at each

総熱量が簡単に予測される一方で、その時々<sup>の</sup>放熱量や放熱速度はそうではない。

moment, or the speed of energy released. This would require knowing the fire dynamics and there is,

これには火の動力学を知る必要があるだろうが、不幸にもこの目的のための情報は unfortunately, little information on this subject. The thermal power is usually measured in MWs

ほとんどない。熱量はたいてい MWs で測られる。(メガワット、100 万ワット) (megawatts, or millions of watts, the watt being the legal unit of power).

Numerous tests have been run over the years to study fires in tunnels. Unfortunately, most of these tests

トンネル内火災を研究するための多くのテストが一年中繰り返し行われている。不幸にも、

used pans of hydrocarbon liquids for fuel, and it is difficult to establish the relationship with vehicular

これらほとんどのテストでは燃料用の炭化水素の液体をパン内で使用しており、火の動力学に

fires, in regard to fire dynamics. However, some tests used actual vehicles, notably in the EUREKA

に関して、それによって自動車火災との関連をつくることは難しい。しかし、1992～1995 年に project involving nine European countries from 1992 to 1995, and in which French public and private

かけてヨーロッパの 9 つの国々を巻き込み、フランスの公私の存在が広く参加した EURAKA

entities widely participated.

プロジェクトではいくつかのテストで明白に、現実の自動車が使われた。

Currently agreed-upon values representing power levels over periods of time are from 2 to 5 MW for a

現状で認められている、継続時間内の放熱量を代表する値では、乗用車では 2～5MW passenger vehicle (fire duration of about 45 min.), of about 20 MW for a bus (fire duration of about 1

(火災期間は約 45 分)、バスでは約 20MW (火災期間は約 1 時間)、可燃性商品を運ぶ hour), approximately 30 MW for a truck carrying mildly combustible merchandise (fire duration of about

中距離トラックではおおよそ 30MW (火災期間は約 1～1.5 時間)、そして石油を運ぶタンク

1-1/2 hours), and from 100 to 200 MW for a tanker truck carrying liquid hydrocarbons (fire duration from

ローリーでは 100～200MW (火災期間は 2～3 時間)。

2 to 3 hours). However, values clearly higher than the 30 MW indicated above are possible for a truck

しかし、上述した明らかに 30MW 以上の値は危険な荷を運ばないトラック

not carrying hazardous cargo: a tractor trailer carrying furniture released more than 100 MW during

でも可能である：EURAKA テストのうちの1つで、家具を載せたトレーラーを牽引する車が

several minutes in conditions of very strong ventilation during one of the EUREKA tests. In general, the

非常に強い換気状態で数分間に、100MW 以上を放熱した。前述した放熱量には

powers previously mentioned are not reached immediately, but after at least ten minutes in the case of

すぐには達しない、しかし少なくとも10分後には、そのトラックの場合と同じになる。trucks.

It is not possible at this time to reconstruct the exact thermal history of the 24 March 1999 fire, and it

現在、1999年3月24日の火災時の正確な熱の推移を再現することはできない、そして、would be difficult to proceed on this subject. At best, some of the elements which allow an estimation of

この目的を追及することは難しいだろう。せいぜい、放熱量を評価するいくつかの要素が

the thermal power can be cited: dividing the total caloric potential in the vehicles (from 6,000 to 9,000

例証できるぐらいだ：全火災期間（約50時間）で車の合計の熱のポテンシャルを分けると

GJ) by the total duration of the fire (about 50 hours) results in an average power for the duration of the

30～50MW の間ぐらいの平均的な放熱量になる。

event of between 30 and 50 MW. It is certain, however, that higher power was released during some time

しかし、その間には、より強い放熱が行われる時があれば、弱い放熱の時もあることは

periods and lower during others; moreover, the available oxygen at the fire level limited the release of

確かである。；その上、火災のレベルの利用できる酸素によって、どんな瞬間の放熱量も power at any moment. There is actually a known relationship between the quantity of energy released by

限られる。実際に、有機物の燃焼時の放熱量と酸素の使用量の間には周知の関係がある。

the combustion of an organic matter and the mass of oxygen being used. This matter will be discussed

この量は後に議論されるだろう。

later.

#### 4.4.3. Smoke Emission

煙の放出

In order to understand the development of events in the tunnel, it is very important to estimate the amount

トンネル内での火事の進展を理解するために、火災によって発生する煙の総量を評価すること

of smoke generated by the fire. It would be convenient to first define the terms used. In fact, to be able

は重要だ。はじめに、使われた条件をはっきりさせると便利になるだろう。実際に、周りの

to pinpoint generated volumes, it is necessary that the smoke must not mix with the surrounding air: the

空気と煙が混ざらないようにするために、正確な位置で煙を発生させることができる必要が

smoke is then made up of the combustion gases and gases that have crossed the fire core without burning

ある。: 煙は燃焼ガスと燃えずに火の中心を通過したガスから成り立っている。

(unburned nitrogen and oxygen from ambient air). This is what can be found in a tunnel when smoke

(周囲空気の燃えていない窒素と酸素)。トンネル内の天井付近が煙で満ちているときに、stratifies close to the ceiling. When the combustion products are fed with ambient air, they form a

これが確認される。燃焼生成物に周囲の大気が供給され、煙と混合物である新鮮空気との

mixture that looks like smoke, with a volume that is the sum of the volumes of smoke and mixed-in fresh

合計の体積を持つ煙に見える混合物を形成する。

air. It is essentially this latter condition which occurred during the 24 March fire.

3月24日の火事中には本質的にこの後者の状態が起きた。

The smoke emission values generated by vehicular fires are agreed upon when the smoke is stratified in

トンネル内で煙が層を形成するとき、自動車火災による煙の発生量は決まっている。: 乗用車

the tunnel: about 20 m<sup>3</sup>/s for a passenger vehicle, 50 m<sup>3</sup>/s for a van, 80 m<sup>3</sup>/s for a truck carrying mildly

では約 20 m<sup>3</sup>/s、小型トラックでは 50 m<sup>3</sup>/s、可燃物運搬用の中距離トラックでは 80 m<sup>3</sup>/s、combustible cargo, 200 to 300 m<sup>3</sup>/s for a gasoline tanker truck. Actually, it is the nature and quantity of

ガソリンのタンクローリーでは 200~300 m<sup>3</sup>/s。現実には、その自然状態と荷の量がトラックの

the cargo that determine smoke emission for trucks. The tractor trailer that burns alone would generate

煙の発生量を決める。トレーラー牽引車はそれだけで燃えると、20~40 m<sup>3</sup>/s の煙しか発生

from 20 to 40 m<sup>3</sup>/s of smoke.

しないだろう。

When the smoke emitted by the fire is mixed with air brought in by ventilation, as was the case of the 24

3月24日の火災のように、火災によって発生した煙が換気空気と混ざるとき、煙の体積 March fire, at least between the core and the French entrance, one could probably estimate that the

(例えば、燃焼物の混合物と換気空気の燃えていない部分)は、火の中心とフランスの入り口

volume of smoke (i.e., the mixture of combustion products and the unburned portion of the ventilation

間では少なくとも高温による気体の膨張を考慮して、わずかに換気空気の体積よりも

air) is slightly higher than the volume of the air brought in by ventilation, giving consideration of course

大きいと評価できるだろう。

to gas dilation due to high temperatures. In fact, oxygen represents only 21% of the air present in the fire

実際、空気のわずか21%である酸素は火の中心に存在するのに、その他の4/5は

core, the other four fifths not being really part of the combustion. The combustion does not generate a

この燃焼部分には存在しない。(温度上昇の効果を除いて)使われた酸素の体積よりも

gas volume much higher than that of the oxygen used (aside from the effect of rising temperature). In

大きい体積の気体は、燃焼によって発生しない。

total, the gas volume coming out of the fire core does not exceed by much (at the maximum about 20%)

同じ温度のとき、合計として火の中心から生じる気体の体積は、吸い込まれた気体の体積を

that of the drawn gases, given the same temperature.

それほど(最大でも約20%)こえない。

#### 4.4.4. Smoke Characteristics

##### 煙の性質

The main dangers presented by smoke are:

煙による主な危険は：

- obscurity, which prevents people from fleeing due to lack of visibility;

煙濃度、それは視界を減じて人々の避難を妨げる。

- toxicity, which incapacitates, a condition preventing flight and finally causing death, its effects

有毒さ、それは人々を移動できない状態にさせて、最後には死亡原因になる。その効果は

depending on the nature of the poisonous elements present in the smoke, their concentration, and the

煙内にある有毒要素の種類、その濃度、その曝露期間に依存する。

duration of exposure;

- temperature, which also incapacitates and may cause death, depending on exposure.

温度、それもまた曝露により移動できなくさせ、死亡原因になる。

These hazards usually occur in this order: loss of visibility, then exposure to toxic gases, then excessive

これらの災害は普通次の順番で起きる。: 視界の欠如、それから有毒ガスにさらされること、

temperature. It is important to note that the alarms triggered the 24 March followed this succession of

それから過度の温度。3月24日の火災がきっかけとなった警報は、煙がフランス側にむかって

events as the smoke progressed toward the French side. Triggering the obscuration sensors of rest areas

いるとき、この出来事の連続に従って起きたことを指摘することは重要だ。駐車帯 No.14、14 and then 9 (alarm at 20% very quickly followed by a reading higher than 30%) preceded by minutes

そして No9 での煙濃度計 (30%以上で反応するはずが、とても早く 20%で反応した) は that of CO detectors (alarm at 150 ppm quickly risen beyond 250 ppm). As for the fire alarm, it triggered

CO 感知計よりも数分先に反応した。(250ppm 以上で反応するはずが、150ppm で反応) at a temperature of 50° C at the level of rest area 15, only 15 minutes after the over-the-limit CO reading

駐車帯 No.14 で CO の限界をこえた後 15 分だけ、火災の中心から 300m 離れている at rest area 14, although this was located 300 m farther from the center of the fire.

駐車帯 No.15 の火災警報が 50°C で反応した。

While the temperature is dependent upon the thermal power released by the fire, the obscurity and smoke

温度が火災からの放熱量に依存する一方で、煙濃度や有毒な煙は燃焼物や燃焼状態に大きく

toxicity largely depend upon the burning materials and the combustion conditions. Some data is available

依存する。トンネル内自動車火災による煙濃度や CO の生成にはあるデータを利用できる。

on obscurity and carbon monoxide (CO) produced by tunnel vehicular fires. Among the other very toxic

火災中に放出されている残りのたいへん有毒なガスは、ポリビニールの燃焼によって特に

gases that could have been released during the fire can be cited hydrochloric acid, released especially by

発生する塩酸、広く冷蔵庫などの保冷に使われるポリウレタンの燃焼によって発生する PVC combustion, cyanhydric acid, generated, as well as nitrogen oxides, by the combustion of 窒素酸化物、それと同様に発生するシアン酸、マーガリンの燃焼によって発生する



polyurethane, widely used for refrigerated trailer insulation, and acrolein, produced by the combustion of

アクロレイン、それらを参考にできる。

margarine. Toxic gas production is usually increased when the combustion lacks oxygen, which was

燃焼中に酸素が不足すると、有毒ガス発生物は増加する。そして、火災の最初の数分を除いて

probably the case during most of the fire, with the exception of the first minutes.

ほとんどの火災でこのケースとなる。

#### 4.4.5. Truck Flammability

##### トラックの燃焼性

Truck fires similar to that of the Volvo truck on 24 March 1999, but also like truck fires in other 他 の 条 件 で の ト ラ ッ ク 火 災 も あ る が 、 1999 年 3 月 24 日 の ボ ル ボ ト ラ ッ ク に よ る 火 災 の よ う な

circumstances, can develop very quickly, and especially increase in the few seconds immediately upon

トラック火災ではとても進行が早く、トラックの速度が落ち止まる数秒の間に

the truck's slowing down and then stopping. In fact, the fire is no longer limited by the travel air speed.

特に火の回りが速くなる。実際、火災は移送される大気の数によって制限されない。

Thinking about the flame of a candle: if one blows too hard, one extinguishes it; if one blows gently, one

ろうそくの火について考えてみる。: もしそれを強く吹いたら、火は消える; もし優しく feeds it.

吹いたら、火は勢いを増す。

The dramatic consequences that may be generated underground by the development of such quick fires

そのように進行の早い火災が地下で発生するかもしれない重大さが、それに対する安全基準が

lead to the question of what the safety rules have to say on the subject.

どうなっているのかという疑問にわれわれを導く。

It is known that no fire resistance standard exists for truck gas tanks, which are sometimes made of plastic

トラックのガスタンクには耐火基準がなく、それはときどきプラスチックでできていることは

(this was not the case of the Volvo truck that caught on fire, which was a light alloy). It is known that the

知られている。(発火したボルボトラックはこの場合ではなく、軽合金製だった)

volume authorized for these tanks has been increased. Since 1 January 1997, the capacity can reach 1500

これらにタンクの公認容積は増えてきているということも知られている。1997年1月1

日から、

liters, of which 500 liters are for the trailer tanks.

容積は 1500L まで可能で、トレーラーのタンクは 500L まで可能である。

Nothing is mentioned concerning the flammability risks of trailers or semi-trailers. The shells of

トレーラーやセミトレーラーによる可燃の危険性を考え言及するものは何もない。

refrigerated trailers may be combustible. In today's industrial and urban civilization, the number and

冷蔵車の外殻は燃えるかもしれない。今日の産業化され都市化された文明では、

length of underground roadways will likely continue to increase. It appears very desirable that the safety

地下道の数や長さが増え続けている。火災の危険に関するトラックやトレーラーの安全資格が

requirements for trucks and their trailers be improved with regard to fire risk.

改善されることがとても望ましい。

#### 4.5. Circumstances of Development of the First Fire

火災初期の進行状況

##### 4.5.1. Description of the Development of the First Fire

火災初期の進行の描写

The vehicle which caught fire was a tractor trailer consisting of a Volvo FH12 cab and a refrigerated

発火したのはボルボ FH12 と考えられる牽引トレーラーで、その運転席からだった。

trailer containing margarine (9 tons) and flour (12 tons).

それはマーガリン (9ton) と小麦粉 (12ton) を積んだ冷凍車だった。

The task force is quite familiar with the conditions in which the fire developed in this first truck, thanks to

最初のトラックの運転手と、トラックの停止後に双方向に通り過ぎていった車の運転手達の

the testimonies of its driver and the drivers of vehicles which passed the truck in both directions after it

証言のおかげで、特別委員会はこのトラックによる初期火災の進行状況に、

had stopped.

かなり精通している。

The first signs of smoke were reported by trucks coming from Italy, passing the Volvo truck in the

煙による最初のサインには、イタリアから来てボルボトラックと反対方向に通り過ぎていった

opposite direction. This happened toward km 2 or 3, thus 2 or 3 minutes after the truck entered the tunnel.

トラックたちによって報告されていた。トラックがトンネルに入った2、3分後に、2～3 kmの

**White smoke was coming out of the cab, passing under the trailer and coming out behind and swirling up**

あたりでこれは発生した。白い煙は運転席から発生して、トレーラーの下を通り、  
**toward the ceiling.**

背後から現れて天井に向かって渦巻いていた。

**When the driver, alerted by flashing headlights, looked into his rear view mirrors, he saw the white smoke**

運転手がヘッドライトを光らせて周りに注意を喚起し、バックミラーをのぞいたとき、彼は

**behind his truck, on the right.**

トラックの右側の背後で白い煙を見た。

**He slowed down and stopped. He allowed a truck passing him in the opposite direction to go by and then**

彼はスピードを落としてトラックを止めた。彼は反対方向に進むトラックをやり過ぎて、

**got out. White smoke was coming out of the cab and rising up between the cab and the trailer. He tried**

トラックから出た。白い煙は運転席から出て、運転席とトレーラーの間を揚がっていった。

**to reach his extinguisher located under the seat of the cab on the left side. At that moment, for the first**

彼は運転席の左側シートの下にある消火器を取ろうと努力した。その瞬間に、はじめて  
**time, flames burst out on both sides of the cab. He stepped back and could not do any more.**

シートの両側から突然火が出た。彼は後ずさりをして、もはや何もできなかった。

**From this time on, all testimonies described the smoke as black.**

この時から、全ての証言で黒煙だったと言っている。

**The fire had quickly entered the cab.**

火災はすぐに運転席に入った。

**The fire only spread to the trailer afterwards. Nevertheless, one testimony noticed the beginning of a fire**

以後はトレーラーにだけ火は広がった。やはり、ある証言でトレーラーの上から発火した

**on top of the trailer; this was offered by the driver of a truck passing the truck on fire in the opposite**

ことを述べている。; このことは発火したトラックと反対方向に通り過ぎたトラックの  
**direction.**

運転手たちによって申し込まれた。

At the present time, the source of the original white smoke is not known. The continuing investigation of

現在、最初の白い煙の原因はわからない。このことを明らかにするためにトラックの調査が

the truck will reveal this.

続いている。

#### 4.5.2. Specifics of the Truck and its Cargo

トラックの詳細とその荷物

The tractor trailer's fuel tank was built of a light aluminum alloy. It had a capacity of 920 liters and

その牽引トラックの燃料タンクは軽いアルミ合金でつくられていた。それは容量が 920L で

contained about 550 liters of diesel at the time of the fire. The tractor pulled a refrigerated trailer.

火災時には軽油 550L を入れていた。牽引車は冷蔵車を引っ張っていた。

The refrigerated trailer was constructed of an isothermal foam shell which was easily flammable. The

冷蔵車は等温フォームシェルによって出来ており、それは簡単に燃える。

cargo of margarine, as it melted, was transformed into very combustible liquid oils capable of spreading

その荷のマーガリンは溶けることによって、かなりの火災のきっかけになる一方で、

onto the roadway while setting off a fire of considerable power. The investigations taking place will try

道に広がりやすい可燃性のオイルに変わる。行われている調査では、マーガリンが溶けて

to determine how long it took for the margarine to melt and the strength of the fire caused by the

できるこの可燃性のオイルによる火災でどのくらいの強さをもつのか調べるようにしている。

combustion of this oil. The type of wrapping of each packet of margarine should be considered. The role

この火災の燃焼における小麦粉の役割も、できるだけ調査する予定だ。

of the flour in the combustion of this fire will also be estimated as much as possible.

#### 4.6. Ventilation Conditions

換気状態

##### 4.6.1. Ventilation Levels Before and After the Alarm

警報前後の換気レベル

Since the tunnel's control stations did not have computerized command control systems (aside

from a

トンネルの中央管理室はコンピュータ化された命令調整システムをもっていなかった  
ので

partial system on the French side called "mini GTC"), it was not always easy to know what  
actions had

(フランス側で“mini GTC”と呼ばれた一部のシステムは別にして)、どんな行動が  
been taken. Nevertheless, the gathering of testimonies, and data provided by certain  
recordings and by

とられたかを知ることは容易ではなかった。にもかかわらず、証言や記録及び視覚によ  
る

visual observation, allow the following reconstruction of events:

観察によって得られたデータを集めることで、以下に出来事を再構築できた。

**Before the alarm:**

警報以前

**The fresh air ducts:**

外気送気ダクト

**On the French side:** the supply was at level 2/4, or about half of maximum capacity. This is  
normal for

フランス側：送気はレベル 2/4、換言すると最大能力の約半分である。これは  
average traffic levels.

平均的な交通レベルのときの標準である。

**On the Italian side, they were working at level 2/3.**

イタリア側では、送気レベル 2/3 で動いていた。

**The reversible supply/exhaust ducts:**

(切り替え可能な) 送/排気ダクト

**On the French side, the duct had worked in exhaust at level 1/2 since the morning.** It had been  
set in

フランス側では、事故の朝までレベル 1/2 で排気をしていた。ダクトは排気用に固定的  
に

exhaust position, as was sometimes the case when staff were performing work inside the tunnel,  
per their

セットされていた。というのは、ときどきスタッフが必要に応じてトンネル内で作業す  
ること

request.

があったから。

**On the Italian side, the duct was used as supply of fresh air and was working at level 1/3.** This  
is

イタリア側では、ダクトは新鮮空気の供給用として使われ、レベル 1/3 で運転していた。

**completely normal, being the most economical way to improve air quality inside the tunnel during normal**

これは完全に標準で、通常時の交通状態の際、トンネル内の空気状態を整えるためにも

**traffic conditions.**

経済的な手段とされている。

**The exhaust at the French entrance:**

フランス側の入り口の排気

**The fan installed in the old corridor to extract tunnel air coming to the French side was working at 2/3 of**

フランス側に来るトンネルの空気を排出するために古い corridor に設置されたファンは、**its maximum capacity.**

最大能力の 2/3 で働いていた。

**After the alarm:**

警報以後

**The supply ducts:**

送気ダクト

**On the French side, three out of four ducts were set at full level and the one servicing the first part of the**

フランス側では、4 つのダクトのうちの 3 つが最大限のレベルでセットされ、トンネルの

**tunnel was only set at level 3/4.**

入り口にある最初のダクトのみレベル 3/4 でセットされた。

**On the Italian side, the four ducts were raised progressively to level 3/3. This level was attained at about**

イタリア側では、4 つのダクトが次第にレベル 3/3 まであげられた。このレベルには 11 :

01

11:01.  
ごろに到達した。

**The reversible supply/exhaust ducts:**

(切り替え可能な) 送/排気ダクト

**On the French side, the reversible duct, which was in exhaust even before the alarm at level 1/2, was**

フランス側では、警報前にレベル 1/2 で排気が行われていた送排気ダクトは、レベル 3/4 に

**raised to 3/4 with concentration of the exhaust in area 3, apparently toward the center of the tunnel in the**

上げられて、排気はエリア 3 に集められた。そして、火に近いゾーンでは明らかにトン

ネルの

zone close to the fire.

中央に向かった。

On the Italian side, the reversible duct, which was in a supply position at level 1/3 before the alarm, was

イタリア側では、警報前にレベル 1/3 で送気位置にあった送排気ダクトは、送気状態を保持

left in this position and the level went gradually to 3/3, attained at about 11:02.

しつ次第にレベル 3/3 になっていった。そして、11:02 にそのレベルに到達した。

At 11:13 on the Italian side, fire ventilation procedure was ordered, by reversing the duct to exhaust and

11:13 にイタリア側では、排気ダクトを逆転させ、排気を駐車帯 No.20 に集めるよう開口を調整

configuring the openings for a concentrated exhaust around rest area 20. At 11:14 this fire configuration

する火災時の換気制御が命じられた。11:14 にこの火災時制御は効果を無くし新鮮空気の供給に

was deactivated, returning to supply of fresh air. The fan levels were lowered.

戻った。ファンのレベルは下がった。

At 11:15, the Italian duct returned to supply.

11:15 にイタリアのダクトは送気に戻った。

From 11:43 to 12:04, the levels of supply ventilation were increased by this reversible duct.

11:43～12:04 まで、送気のレベルは送排気ダクト（が送気に戻ったこと）によって増加した。

Starting at 12:29: still by the same duct, an attempt was made to run a fire procedure by exhaust and

12:29 開始：同じ送排気ダクトによって火災制御が試みられ、排気口の配置を排気が駐車帯

configuration of exhaust openings to concentrate around rest area 24, then at 12:40, a return to supply.

No.24 の付近に集中するようにされた。それから、12:40 に送気に戻った。

These operations are discussed in more detail later.

これらの運転方法は後に詳細に論じられている。

The exhaust at the French entrance:

フランス側の入り口の排気

After the alarm, the fan in the old corridor was set at its maximum exhaust capacity for the tunnel air

警報の後、古い corridor にあるファンはトンネル内の空気がフランス側入り口に来るよ

う、  
coming to the French entrance.  
排気能力を最大にされた。

#### 4.6.2. Consequences of Ventilation Levels on Smoke Movement and Development of the Fire 煙の動きにおける換気レベルの影響と火事の進展

At this preliminary stage of the studies to determine what happened during the catastrophe, it is too early

災害中に、何が起きたのかを決定するための研究のこの準備段階では、時期が早すぎて火事の

to reconstruct the actual development of the fire, and further studies on this subject will be difficult, due

現実の進展を再構築できない。そして、利用できる情報の欠如のために、この研究を進める

to the lack of available information. At best, an attempt can be made to give some yet uncertain and

ことはさらに難しくなるだろう。よくても、火事の初期について不確かで比較的一般的な

relatively general indications about the beginning of the fire.

示唆を与えられるくらいだろう。

The contents of the following paragraphs show that the air flow that carried the smoke mostly toward

火事が発生した時、煙を運ぶ空気の流れがほとんどフランスに向かっていたのは、本質的に、

France at the beginning of the fire was essentially due to the unbalanced ventilation levels between the

二分されたトンネル間の換気レベルが不均衡だったことによることを、以下のパラグラフの

two halves of the tunnel (higher supply of fresh air and absence of exhaust on the Italian side, exhaust at

内容で示している。(新鮮空気の過剰な供給と、イタリア側とフランスの入り口での排気の

the French portal).

不在)

This imbalance created a relatively weak air flow (1 to 1.5m/s) in the Italy-France direction at the level of

この不均衡が、ベルギーのトラックから火災が発生した時に、イタリア→フランス方向の

the Belgian truck that started the fire. It explains the speed with which the smoke reached the vehicles

比較的弱い空気の流れ (1~1.5m/s) をつくりだしていた。それが、煙がトラックの背後に



stopped behind the truck, surrounding all the people there, then moving faster and faster toward the

停まっていた車や、その周りの人々に追いつき、ますます速くフランス側の入り口の排気口

French portal exhaust. On the other side, the smoke advanced only slowly in the direction of the Italian

にむかった説明である。これに対して、イタリア側の入り口への煙は、空気の流れに portal, against the air flow, over a distance that did not go beyond 300 meters in over an hour. This is

反して、1時間に300mを超えないくらいの距離をゆっくり進んだ。このことによって、 what allowed all the people who entered by the Italian portal to escape.

イタリア側の入り口から入った全ての人々は逃げる事ができた。

The reading of paragraphs 4.6.2.1 to 4.6.2.3 and 4.6.3, all very technical, is not necessary in order to

パラグラフ 4.6.2.1～4.6.2.3 と 4.6.3 のパラグラフは全て技術なことであり、このレポートの

understand the rest of this report.

残りを理解するのに必ずしも読む必要はない。

#### 4.6.2.1. Air Movements in the Tunnel

##### トンネル内の空気の動き

As usually utilized and notably before and during the 24 March fire, the tunnel ventilation system

3月24日の火災の間とそれ以前から特に利用されていたトンネル換気システムは、 supplies much more air into the tunnel than it exhausts. The additional air exhausts by the two portals

排気よりも多くの空気を供給していた。余剰の空気は、いつも空気が流れ出る2つの where the air is always flowing out. On the French side, this takes place slightly more than 110 m from

入り口から排気されている。フランス側では、排気ファンがトンネルの全空気をいつも the portal where the exhaust fan usually collects the entire air flow coming out of the tunnel. 集めている入り口から、110m離れたところでこれが起きている。

With the air exhausting this way through the two openings, there is always a point in the tunnel called

2つの穴を通して排気をするこの方法では、“中立点”と呼ばれる場所がいつも存在し、 "neutral point", where there is no longitudinal air flow. On each side, the air flow is directed to each

そこでは軸方向の空気の流れはない。それぞれのサイドで、空気の流れは中立点から離れるに

portal, with a speed that increases as it gets further from the neutral point. The air movements inside the

つれて速さを増し、それぞれの出口の方に流れる。それゆえトンネル内部での空気の流



Italy shows that, at the level of the truck that started the fire, there was a relatively limited air flow

限られた空気の流れがあり（おそらく 1~1.5m/s）、それがフランス方向に向いていたことを

(probably about 1 to 1-1/2 m/s) and it was directed toward France. This is consistent with a neutral point

示している。これはトンネルの中間での駐車帯 No.22~No.24 の中立点がイタリアからフランス

from rest areas 22 to 24 and therefore to an Italy-France air flow direction in the middle of the tunnel.

方向に移動したことに一致している。

Simple calculations, not taking into account thermal effects produced by the fire, show that passing from

火災の生み出す熱の効果を考慮しない単純な計算では、火災前の換気レベルから火災後の

the ventilation levels prior to the fire to those after the fire started had a tendency to move the neutral

それに変化することは、中立点をイタリアからフランスにわずかに（約 500m）移す傾向が

point slightly from Italy toward France (about 500 m). The air exhaust speeds were increased at the two

あったことを示している。排気スピードは2つの入り口で増加したが、フランスから車が

portals but the air flow in the area where the vehicles entering from France were was not modified and

入ってくる場所では空気の流れは変化せず、イタリア→フランス方向のままだった。

remained in the Italy-France direction. Since the smoke coming from rest area 21 toward Italy closed in

ほとんど1時間も経たずに、No21 駐車帯からイタリアに入ってくる煙は No22 駐車帯に progressively on rest area 22, without, however, passing it during almost an hour, it can be guessed that

近づいたので、ベルギーのトラックが止まったとき中立点は駐車帯 No.24 に近く、それから

the neutral point was closer to rest area 24 when the Belgian truck stopped, and then moved toward rest

駐車帯 No.22 に向かって動いたと推測することができる。

area 22. This scenario is compatible overall with the Italian portal anemometer measurements that

このシナリオはイタリア入り口付近の風速計の測定と全体として矛盾しない。これは火災の

indicated widely varying values (due to vehicular traffic) between 4 and 6 m/s before the fire, and more

起きる前に 4 と 6m/s の間のさまざまな値（車の通行による）を考慮し、それ以後はより stable, around 6 m/s, afterwards.

安定して 6m/s のあたりの値を指し示した。

**These simple calculations show that at the beginning of the fire, the chimney effect going in the France-**

火災の起きた所では、フランスからイタリア方向への煙突効果とその時の地熱が、多かれ

**Italy direction and due at that moment to the natural heat (geothermal) of the rock and not of the fire,**

少なかれ反対側への大気の影響と相殺したに違いないと、これらの簡単な計算は示している。

**must have been more or less compensated by opposing atmospheric effects. The 24 March there was a**

3月24日に、トンネル空気をイタリアからフランスに押す傾向の

**current of warm air (föhn) that tended to push the tunnel air from Italy toward France. Such conditions**

暖かい空気の流れ（フェーン現象）があった。

**occur about twenty times a year, the air moving from France to Italy the rest of the time. In these**

そのような状況は年に20回くらい起きており、それ以外のときはフランスからイタリアに

**conditions where the chimney effect and exterior winds almost compensated each other, the unbalanced**

空気は動いている。煙突効果と外の風がほとんど相殺しあうこのような状況では、

**air flow that went toward France at the level of the Belgian truck was due mostly to the imbalance of**

ベルギーのトラックの位置でのフランスに向かっていた不安定な空気の流れは、

**ventilation levels between the two tunnel halves (higher fresh air supply and lack of exhaust on the Italian**

二分されたトンネル間での不均衡な換気レベルによるものだった。（イタリア側での side, exhaust working at the French portal).

より多くの新鮮空気の供給と排気の欠如、フランス側での排気の働き)

#### 4.6.2.2. Consequences of Smoke Movement

##### 煙の動きの結果

**The chronological graph (Appendix 3) shows two distinct phases of smoke emission by the Belgian truck.**

時間毎のグラフ (Appendix3) では、ベルギートラックによる煙の放出の目立った2つの段階を示している。

**The first phase is related to the truck's travel in the tunnel until it stopped at rest area 21:**

**While the rest**

最初の段階は、駐車帯 No.21 でトラックがとまるまでのトンネル内での移動に関係している：

**area 4 and 9 obscuration sensors sent an almost normal obscuration value during the truck's**

passage, those

駐車帯 No.4,9 の煙濃度計がトラック通行時の煙濃度の基準値を示していたのに対して、  
of rest areas 14 and 18 reached their maximum limits very quickly. This seems to show that  
the truck's

駐車帯 No.14,18 ではかなり早くに限界値に達していた。このことは駐車帯 No.9 と  
smoke emission developed suddenly between rest areas 9 and 14, remained the same to rest area  
18, then

No.14 の間でトラックからの発煙が突然進展し、駐車帯 No.18 までそのままで進み、  
decreased while the truck continued beyond. Under the effect of the air flow from Italy to  
France, and

トラックを過ぎたとき減少した。イタリアからフランスへの空気の流れと横壁から供給  
された

also due to dilution by fresh air supplied at the bottom of the side walls, this first smoke  
emission, which

外気による希釈の影響のもとで、最初に発生し、居合わせた人によって色が明らかにさ  
れた

was clear in color according to observers, almost disappeared after 6 minutes at rest area 18 and  
14

この煙は駐車帯 No.18 では 6 分後に、No.14 では 14 分後にほとんど消えた。

minutes at rest area 14. The exit of the diluted smoke slug in the French direction saturated  
the obscurity

徐々に煙が薄まっていったフランス側の出口では、1、2 分間で駐車帯 No.9 での煙濃度  
値が

reading at rest area 9 for 1 or 2 minutes, while the obscurity sensor of rest area 4 later sent only  
a brief

飽和した、一方で、駐車帯 No.4 の煙濃度計では後に煙濃度が上記の値よりわずかながら  
increase of the obscurity at a slightly lower level.

低いレベルの値を示した。

The second phase is related to the stopping of the Belgian truck, with the sudden start of the fire,  
as has

第二段階は、ベルギーのトラックの停止、突然の火災の発生に関係し、目撃者により  
been described by witnesses:

記述されている。

The smoke become darker and thicker than in the first phase and was pushed with increasing  
speed

最初の段階に比べて煙は徐々に暗く厚くなり、フランスの入り口に向けてスピードを上  
げ

toward the French portal, successively saturating the four obscurity sensors. It took only  
about 6

連続して 4 つの濃度計の値を飽和させていった。駐車帯 No.14 と No.18 の煙濃度計の  
minutes between the exhaust of the first phase smoke and the arrival of the second phase smoke,  
at the

場所では最初の段階の排煙と第二段階の煙の到達の間には 6 分しかかかっていない。

level of the obscenity sensors of rest areas 14 and 18. During this period, the visibility was mediocre but

この間、視界は中位であり、ラッシュアワーでの平均的換気状態では許容された。  
acceptable for normal operation at rush hour.

The second phase smoke behavior will be examined in more detail. It has been seen that at the beginning

第二段階での煙のふるまいはより詳細に調査される。この火災の始まりでは、

of the fire this smoke advanced progressively toward Italy from rest area 21 to rest area 22, but didn't pass

煙は次第にイタリア方向に駐車帯 No.21 から駐車帯 No.22 へ進んでいたが、駐車帯 No.22 へは

the latter for almost an hour. This is what allowed the people who had entered at the Italian side to escape.

ほとんど一時間進まなかったと見られている。これはイタリアから入り、逃げた人によって認められていることである。

The phenomenon of smoke advancing against the longitudinal air flow inside the tunnel is well known (it

トンネル内での縦流空気に反して煙が進んだ現象はよく知られている (それは英語で is called "backlayering" in English). It happens when the longitudinal air speed is lower than the speed

“backlayering”と言われている)。それは縦流の空気のスピードが “critical speed” と呼ばれる

called "critical speed", depending mainly on the fire's magnitude. The smoke rises to the ceiling over a

スピードよりも遅いときに起きており、主に火災の大きさに依存する。煙は火災の放熱量、

distance related to the thermal power of the fire, the air flow speed, and the tunnel slope. It may stay up

空気の流れのスピード、トンネルの勾配に関係した範囲で天井に上がる。天井の位置で再生

for quite some time, forming a rather thick smoke layer that regenerates at the ceiling level or, if longer, it

され形作られたかなり厚い煙の層は、かなりの時間上がったままであるかもしれない。または

may cool down and descend to the pavement where it is again drawn in the direction of the fire. もっと長い時間そのままなら、冷えて地面に降りそこで火災の方向へ再び引き戻されてくるかもしれない。

This latter phenomenon was observed by the ATMB patrolman, who drove his vehicle within meters of

11:05 後に、火災の中心数m以内を少し車で通った ATMB の警備員が、この後半の現象を

the fire core shortly after 11:05: coming from rest area 22, he first passed through a "wall" of smoke

見ていた：駐車帯 No.22 からやって来て、彼はまずトンネル断面全体を 100~200m の長さで

filling the cross section of the tunnel for 100 to 200 m, then, when he saw the truck in flames, found

満たした煙の“壁”を通過した。それから、炎に包まれたトラックを見た時は、 himself in an area which at his level was clear and where the smoke, while very hot, was locally stratified

彼のレベルでは視界が明瞭で、そこでは天井でとても軽い煙が層になっていた。 at the ceiling.

On the other hand, toward France the smoke seemed to have been completely mixed with fresh air. The

一方で、フランスに向かった煙は完全に外気と混じっていたようだ。空気の流れはほとんどの

air flow drew most of the air mix – smoke over the entire length separated the fire zone from the exhaust

混合空気を引き寄せた一トンネル全長に広がった煙は、火災のゾーンをフランスの入り口の

corridor close to the French portal. This happened despite the exhaust, which was apparently 近くの排気 corridor から引き離した。これは排気にもかかわらず発生し、フランス操作側の

concentrated on the third third of the French-operated side. In this section, the flows before the fire were

1/6 に集まった。このセクションでの火災以前の風量は送気用が約 25 m<sup>3</sup>/s/km で、排気用が

about 25 m<sup>3</sup>/s per km for fresh air and 15 m<sup>3</sup>/s per km for exhaust. After the start of the fire, they

約 15 m<sup>3</sup>/s/km であった。火災以後の風量は送気用が約 50 m<sup>3</sup>/s/km、排気用が約 44 m<sup>3</sup>/s/km increased to about 50 m<sup>3</sup>/s per km for supply and about 44 m<sup>3</sup>/s per km for exhaust. The exhaust did not

に増加した。この2つのケースではどちらも排気は送気とつりあわなかった。そして、 match the supply, in either of these two cases, and could exhaust only a limited amount of smoke.

限られた煙しか排出できなかった。

It has been previously estimated that the longitudinal air flow was about 1 to.5 m/s toward France at the

火災を発生したトラックの位置での縦流空気は、フランス方向に約 1~1.5m/s だったと level of the truck that started the fire. Due to the continuous fresh air supply over the tunnel length,

以前に推定されている。排気とつりあっていなかった、トンネル全体にわたる連続した which was not balanced by the exhaust, this air flow was accelerating with its progression

toward the

外気供給によると、この空気の流れはフランスに向かって進行し加速していった。

French portal. Without accounting for the thermal effects that later increased these values, the simple

熱効果を見込まない単純な計算では、空気の流れ、それに伴う煙の流れは

calculations mentioned above show that the air speed, and therefore the smoke, must have been as follows,

火災が始まった後の換気レベルにより、以下のものであったに違いない。

with the ventilation levels used after the beginning of the fire:

- from 2 to 2.5 m/s (slightly less before the fire) at the level of rest area 19 (located closed to the middle

駐車帯 No.19 の位置 (トラックが燃えた後、トンネル中央付近から 100m に位置する) では

of the tunnel, 100 m after the last burning truck)

2~2.5m/s である (火災の前よりわずかに遅い)

- from 3.5 to 4 m/s (2.5 to 3 m/s before the fire) at the level of rest area 9 (in the middle of the part

駐車帯 No.9 の位置 (フランス会社による操作範囲の中央部分) では operated by the French company)

3.5 ~4 m/s である (火災前では 2.5 ~ 3 m/s)

- from 6 to 6.5 m/s (3 to 3.5 m/s before the fire) at the French portal.

フランス側入り口では 6 ~ 6.5 m/s である (火災前では 3 ~ 3.5 m/s)

First, it should be pointed out that these speeds are higher than those at which most people, even in good

始めに、これらのスピードは健康な人々がある距離を避難できるスピードよりも速い

health, can flee over a certain distance. Then, it is worth noting that these are the speeds with which the

ということに注意すべきだ。それから、以下のことを指摘しておくことには価値がある。

smoke traveled while exceeding the range of the obscurity sensors:

すなわち、これらのスピードは煙が煙濃度計のあるレンジを超えて移動したときのものである。

- obscurity of 20% measured at rest area 14 at 11:11, at rest area 9 at 11:19 (or an advancing speed of a

煙濃度 20%は 11:11 に駐車帯 No.14 で測定された、11:19 に駐車帯 No.9 (2 つの濃度計

little more than 3 m/s between the two sensors), at rest area 4 at 11:25 (a smoke speed of a little more

間では 3 m/s 以上の速さで前進する)、11:25 に駐車帯 No.4 (先の濃度計では 4 m/s than 4 m/s from the preceding sensor).



以上の煙の速さである)

#### 4.6.2.3. Effects of the Fire Development

##### 火災の進展の結果

As previously indicated, it has been extremely difficult to reconstruct the development of the fire and

以前に指摘した通り、火災の進展や特に熱の動力学、煙の拡散を再構築することはかなり

especially the dynamics of heat and smoke release.

難しい。

For the smoke, it was first estimated that, when it was not stratified, the release volume only slightly

始めに、煙が層になっていないときの放出量はわずかだけ、トンネル内を移動する気体の量を

changed the volume of gas traveling through the tunnel (with the condition, of course, of allowing for

変えるというように見積もった (もちろんそれは熱の拡散状況に応じてである)。

heat dilation). Actually, combustion gases do not take up a much larger volume than the oxygen being

現実に、燃焼により生じる気体は使われた酸素の量よりずっと多くにはならない。そして、

used, and this does not represent more than a fifth of the ambient air volume, at a maximum.

Therefore,

これは最大でも空気全体の量の 1/5 以上にはならない。それゆえ、放出された煙が

whatever the volume of the released smoke, it is the longitudinal air flow that governs its travel, and not

どんな量でも煙の移動スピードは縦流空気が支配し、火災の特性に支配されることはない。

the characteristics of the fire.

The longitudinal air flow speed helps explain that, in the French direction, no more than 10 minutes were

縦流空気の速さがフランス方向に、火災を発生したトラックと駐車帯 No.18 の間隔 900m を

needed to fill the 900 m length between the truck that started the fire and rest area 18 with smoke. This

煙で充満させるのに 10 分でできるということを説明する。

speed depends very little on the size of the smoke release. On the other hand, the composition and thus

この速さは煙の放出サイズにほとんど依存しない。一方で、移動する空気と煙の混合物の、

the obscurity, the toxicity and the temperature of the traveling mixture of air and smoke are

directly

構成、煙濃度、毒性、温度は、煙の生成、タイプに直接に関係する。

related to the generation and the type of released smoke.

Since the smoke characteristics in various areas at the beginning of the fire and their evolution are not

火災の初期におけるさまざまな場所での煙の特性、発生はよく知られておらず、

well known, it is hard to learn from available observations the released quantity of smoke and thermal

入手できる観察結果から煙の放出量や放熱量を知ることは困難だ。

power.

At this point, it is only possible to give the maximum limits of the thermal power, based on the available

この時点では、利用できる酸素量に基づく放熱量の最大のみ与えることができる。

oxygen volume. In fact, in an organic material combustion, very common with vehicular fires, the

実際に普通の自動車火災における有機物の燃焼では、酸素 1kg の燃焼は 13.1 MJ の

burning of a kilogram of oxygen corresponds to a thermal energy release of 13.1 MJ (mega-joules, or

放熱量に相当する。

millions of joules).

At the level of the vehicle starting the fire, the estimated longitudinal air flow between 1 and 1.5 m/s

自動車が火災を始めたレベルで観測された 1~1.5 m/s の間の縦流空気は、最大放熱量にして 7

allowed a maximum thermal power between 75 and 110 MW. These are values that assume that no more

5~110MW に相当する。ここでは火災域を通過する空気に含まれる酸素の最大 1/2 が

than half of the oxygen from the air that crossed the fire area was burned, which is likely. At these

燃焼したとみなされており、これは妥当である。

combustion speeds, the fire duration for this tractor trailer would be between an hour and a half and more

これらの燃焼速度において、牽引トレーラーの燃えていた時間は、熱量を約 600 GJ と

than two hours, accounting for a caloric potential of about 600 GJ. It is worth noting that, in regard to the

計算すると 1 時間半~2 時間の間であろう。以下のことを指摘しておくことは価値がある。

thermal power released by the first tractor trailer, the supply through the opening of duct no. 5 at the

すなわち、最初の牽引トレーラーが放った放熱量に関して、駐車帯 No.21 の天井での ceiling level of rest area 21 did not have a significant impact, because it was upstream of the truck and

ダクト No5 排気口を通した外気の供給は、十分な影響力を持っていなかった。なぜなら、had flows of up to 10 m<sup>3</sup>/s, compared to the 50 to 70 m<sup>3</sup>/s brought in by the longitudinal air flow.

給気はトラックの上流でかつ 10 m<sup>3</sup>/s だったのに対して、縦流空気による流れは 50~70 m<sup>3</sup>/s だったからだ。

The same type of reasoning could be used for the group of vehicles between the truck that started the fire,

同じ種類の理由を、火災を起こし駐車帯 No.21 で停車したトラックと、最後に入ってきて

located at rest area 21, and the last vehicle, located 100 m before rest area 19. It must recognized,

駐車帯 No.19 の前で停車したトラックの間の自動車群に使ってもうまくいった。しかし、however, that the ventilation conditions had definitely changed: this will be an issue to be discussed later.

換気の状態ははっきりと変わっていたことを認識しなければならない：これは後に議論をする

With the disputable assumption that the ventilation conditions were the same, there were available in this

問題になるだろう。換気の状態が同じだったという議論の余地のある認識では、area 46 to 70 m<sup>3</sup>/s brought in by the air flow coming from rest area 21 in the direction Italy-France

駐車帯 No.21 と 22 それぞれ備え付けられているダクト No4 によって、横壁の下から供給される

(assuming that the oxygen was not already burned by the fire of the trucks which had entered from Italy

25 m<sup>3</sup>/s の外気と同様に、このエリアでイタリア→フランス方向での駐車帯 No.21 から吹く

and stopped between rest areas 22 and 23), as well as 25 m<sup>3</sup>/s supplied at the base of the side walls by

46~70 m<sup>3</sup>/s の空気の流れ (イタリアからトンネルに入り駐車帯 No.22 と 23 の間で止まった

duct no. 4 and 10 m<sup>3</sup>/s provided in each of the rest areas 21 and 20. In these conditions, the maximum

トラックの火によって、酸素がまだ燃えていないという想定下)を用いることができる。

possible power for the entire area where the vehicles which had entered from the French side were, would

このような状況では、利用できる酸素の最大量の半分が燃焼したとみなされており、

be between 150 and 190 MW, still assuming that, at maximum, half of the available oxygen was burned.

フランス側から入った自動車の全エリアでの最大放熱量は、150~190MW の間だろうと

At similar combustion speeds, all the vehicles in this area could have burned in 7 to 13 hours,

which

されていた。同様な燃焼スピードで、このエリアの全自動車は 7~13 時間燃えることができ、

clearly shows the conservative nature of these estimations.

これらの概算は控えめな値だろうとされていた。

It should be noted that gases from overheating the vehicles and their cargoes, without burning due to the

加熱により車やその積荷から発生したガスは、酸素不足で燃焼できずに駐車帯 No.19 を lack of oxygen, could have progressed beyond rest area 19 and burned farther away, when the oxygen

越えて進み、かなり遠くで横壁の下での外気の供給により酸素が利用できたとき、

became available due to the supply of fresh air at the base of the side walls.

燃えたことに注意すべきだ。

#### 4.6.3. Spreading of the Fire Among the Vehicles

##### 自動車火災の広がり

The question remains as to how the fire was able to spread to such a large number of vehicles, some of

火災が、お互いに距離がある、多くの車にどのように燃え広がったのかは

which were distant from each other.

疑問のままである。

##### 4.6.3.1. Vehicles That Burned

##### 車の燃え方

Two groups of vehicles can be distinguished, on the one hand based on whether they entered at the

車を 2 つのグループに見分けることが出来る。一方はそれらがフランスの入り口かイタリアの

French portal or the Italian portal and, on the other hand, the ATMB vehicles:

入り口から入ったのかどうかに基づいて。もう一方は ATMB の車である

- Vehicles entering at the French portal behind the Belgian tractor trailer (PL0):

ベルギーの牽引トレーラーの後ろでフランスの入り口から入ってきた車

26 vehicles which burned were found behind the Belgian truck, including the truck: 15 tractor trailers

ベルギートラックの後ろに、トラックを含めて 26 の燃えた車が見つかった: セミトレーラーと

with semi-trailer and/or full trailer, a pickup truck, 9 passenger vehicles, and the SITMB agent's フルトレーラー、を含む牽引トレーラーが 15 台、集配トラック、乗用車が 9 台、SITMB motorcycle. The distances between the remains of the tractor trailers varied from 3 meters to almost 45

社員のオートバイ。燃え残った牽引トレーラーたちの間隔は3mから45mまでの meters. The passenger vehicles and the motorcycle were interspersed among them. All of these remains

範囲で変わった。乗用車やオートバイはそれらの間に点在していた。これらのすべてが were located between about 100 meters beyond rest area 19 (in the direction of the traffic) and rest area

駐車帯 19 の前方約 100m (通行方向に) と駐車帯 No.21 の間に位置していた、 21, i.e., over a stretch of about 500 meters.

すなわち約 500m の範囲内に。

- Vehicles entering at the Italian portal:

イタリアの入り口から入ってきた自動車

The eight tractor trailers that burned had stopped between about 100 meters beyond rest area 23 (in the

燃えた 8 台の牽引トラックは駐車帯 No.23 を約 100m (トラックの進行方向に) こえた 所と

direction of their route) and rest area 22, i.e., over about 200 meters. The distances between the vehicles

駐車帯 No.22 の間で停止した、すなわち約 200m の間に。自動車間の距離は 2~約 20m 変化した。

varied from 2 to almost 20 meters. The closest to the Belgian truck was 290 meters from it. It should be

ベルギートラックに最も近いもので、そこから 290m だった。トラックの背後で車を

recalled that the passenger vehicles driving behind the trucks had made U-turns and that the tunnel

運転していた乗客は U ターンしたことと、トンネルオペレーターが駐車帯 No.22 を

operators had backed up the first tractor trailers to free up rest area 22, which brought the vehicles closer

解放するために一番先頭の牽引トレーラーを後退させ、自動車同士の間隔をより近づけたが

together but distanced them slightly from the Belgian truck.

ベルギートラックからはわずかに距離が開けたことを思い出すべきだ。

- ATMB rescue vehicles:

ATMB の救助車

The ATMB fire engine (FPTL) stopped shortly before rest area 18, and the rescue vehicle (PS) shortly

ATMB 消防車 (FPTL) は駐車帯 No.18 のすこし前で止まり、救助車 (PS) は駐車帯 No.17 の

after rest area 17. The former, located 450 meters behind the last tractor trailer entering from the French

すこし奥で止まった。前者は、フランス入り口から最後に入ってきた牽引トラックの

side, also burned. The latter, stopped 230 meters behind, was greatly heated up and damaged,

but did not

背後 450m に位置し、燃えた。後者は、消防車の背後 230m で停止し、とても熱くなり、burn.

傷ついたが燃えなかった。

#### 4.6.3.2. Ways by Which Fire Spreads

##### 火の広がり方

A certain number of causes can lead to the spread of fire from one vehicle to another, or from one group

ある自動車から別の自動車や、ある自動車のグループから別のグループへの火に広がり方には

of vehicles to another. This report will mention those that could have occurred during the fire of 24 to 26

いくつかの原因がある。その原因は一般的な考えでの重要な順番にもとづくべきだが、March, although the numbers should only be taken as orders of magnitude, giving a general idea:

このレポートでは 3 月 24～26 日の火災中に起こったことについて言及するつもりだ。

##### - Flame and radiation

炎と放射

The fastest way fire can spread at short distances is by flame and thermal radiation greatly heating the

火災が短い距離を広がるのに最速の方法は、炎と熱放射により自動車の表面を熱し、surface of another vehicle and leading to its catching on fire.

着火させることである。

##### - Convection

対流

Heat may be carried by convection or by movement of very hot gases. This convection usually occurs in

熱は対流や高熱気体の動きによって運ばれ得る。この対流はたいてい

the direction of the tunnel air flow, but it may happen counterflow, under certain conditions, as has been

トンネル空気の流れる方向に起きる、しかし、3 月 24 日 11:05 以降に ATMB の警備員が testified by the ATMB patrolman when he came close to the fire core shortly after 11:05 on 24 March.

火災の中心に近づいたときの証言によると、ある条件下では逆流も起こりえる。

Materials catch on fire most often by self-ignition generated by the thermal fluxes they receive. 物質は熱流で引き起こされる自然発火によって、しばしば火がつく。

Numerous polymers, present in various ways in vehicles, start to decompose from 200 to 300° C. Some

自動車の中に様々な用途で存在する多数のポリマーが、200～300℃で分解し始める。

of them, when heated, produce gases that are easily flammable by a spark or an open flame starting from

熱しられた時、それらのうちいくつかは火花もしくは裸火で 300~400℃で簡単に発火する

300 to 400° C. Even without the spark, the same gases can self-ignite, starting from 400 to 500° C. Truck

ガスを発生する、または炎をあげる。同じ気体で火花なしでも、400~500℃になると自然発火

fuel may itself be a spreading agent, due to its relatively low self-ignition temperature (260°C).

できる。トラックの燃料はその比較的低い自然発火温度 (260℃) のために、それ自体が火災を広げる

媒介になるかもしれない。

Moreover, an electrical fire can occur if the heat creates short circuits in the vehicle's electrical equipment.

さらに、熱で車内の電気系統内にショートが発生したら、電気に関する火災が起こる。

One particular way of spreading fire by convection is related to the "backdraft" phenomenon: combustion

対流によって火災が広がる時の特殊な方法に、“backdraft”現象に関連したものがある:

lacking oxygen, as certainly was the case during some periods of time, can produce unburned gases that

ある時間内に、酸素不足の燃焼性が高い可燃性不完全燃焼ガスを生成する。

are highly flammable. The cloud thus formed is drawn by the ventilation air flow and can violently ignite

こうして形作られたガスは換気空気の流れによって引き寄せられて、空気が混ざるやいなや

whenever air mixes in. There can also be a sudden ignition of the cloud, i.e., an explosion.

激しく燃え始める。またそのガスは突然燃焼するかもしれない、すなわち爆発。

#### - Burning liquids

燃焼液体

Fire can also be spread by a burning liquid that flows on the pavement or in the drainage system.

Some

火は燃焼液体が車道や排水溝を流れることによっても広がる。そのような液体には

of the likely liquids are diesel fuel, margarine, and polyethylene.

ディーゼル重油やマーガリン、ポリエチレンがある。

#### - Pavement combustion

舗装道路の燃焼

Another possible way of spreading fire could be the combustion of the bituminous wearing layer covering

火が燃え広がる別の方法に、道路を覆っている瀝青質層の燃焼がある。

the roadway slab. If it is clear that the bitumen can burn, and it burned in certain areas of the roadway, it

瀝青は燃え、道路のある領域でそれが燃えたことは明らかだが、それが道路の is not known at this time in what conditions it can spread fire when it is used as roadway pavement.

舗装に使われる時に、どんな状況で火が燃え広がるのかは知られていない。

#### 4.6.3.3. Likely Ways the Fire Spread From Vehicle to Vehicle

車から車に火が広がるのに起こりそうなこと

The progress of studies to date is still not adequate to ascertain what were the actual mechanisms that led

火の伝達を導く仕組みは、現在研究が続いているがまだ十分明らかになっていない。

to the propagation of the fire.

The flame and the radiation may certainly explain the fire spreading from a truck cab to its trailer, as well

トラックの運転席から近くの車へ、それと同様にそのトレーラーへ火が広がったのは炎と

as to a nearby vehicle. The convection-related phenomena may have caused the ignition of all other

放射によって説明されるかもしれない。ベルギートラックの背後の全ての車で燃焼し、

vehicles behind the Belgian truck and backed up over 500 m behind it. But propagation by a burning

その後ろに 500m 逆流したのは、対流に関連した現象のせいかもしれない。さらに、

liquid spill is equally possible, at least nearby. The case of the ATMB FPTL is perhaps more complex,

すくなくとも付近では燃料がこぼれたことによる燃え広がりの可能性も同様にある。

but appears not to relate to anything other than convection, i.e., backdraft.

ATMB 消防車の場合はより複雑であるが、対流すなわち backdraft 以外の何ものにも、関連が現れていない。

The most difficult explanation is the one regarding the ignition of the eight trucks that entered from Italy

最も説明が困難なことは、イタリアから入ってきた 8 台のトラックが、290m の車のない場所を

across a 290 m long area free of vehicles. The 100 m long area ahead of the first of these vehicles is

はさんで燃焼したことである。これらの先頭の車の前方 100m エリアでは、天井の損傷が

remarkable for the minor damage to the ceiling (cables and light fixtures are still there), while the areas

例外的に小さかった（ケーブルやライトの設備はまだ残っていた）、一方でそのエリアの ahead and behind are very damaged.



前後はとても損傷がひどかった。

If propagation was by convection, it could have been a layer of smoke traveling at a temperature high

もし対流による（火災の）拡大があったとしたら、トラックのうちの1つを燃え上から enough to ignite one of the trucks but insufficient to cause much damage to the ceiling or even to

せるのに十分な高さの温度ではあるが、天井や装備へ多大な損傷を負わせるには不十分な

equipment. It is also possible that a spill (of margarine, for example) developed from the first two trucks

温度の煙の層の移動があったことになる。流出（例えば、マーガリン）がおそらく 50、100、

over perhaps 50, 100 or 150 m (the slope is gentle: 0.5% toward Italy). The fire from this spill (with

または 150m をこえて最初の 2 台のトラックの方へ広がっていった可能性もある（傾斜は

relatively high flames) would have destroyed the equipment and the pavement in the "very damaged" area,

ゆるやかで、イタリアに向かって 0.5%)。この流出による火が、(比較的高い炎で) 深刻な

causing a spreading by the pavement fire (short flames) to the level of the first tractor trailer of the group

損傷のエリアにてトンネルの装備や道路を壊したのだろう、そして(PL-1)グループの先頭の

(PL-1). Another hypothesis could be a burning liquid flow or hot gases traveling through a ventilation

牽引トレーラーの位置へ(小さい炎の)道路の火災によって広がった。燃料が流れたり、duct.

換気ダクトを通じて熱気が移動したとの別の仮説もある。

#### 4.6.4. Comments on the Ventilation Procedures Put Into Effect During the Fire

火災中での換気行動の影響の解説

From all this, the following statements can be made.

この全てから、以下の意見書がつけられた。

The fire procedure for supply of fresh air requires full levels in the entire Mont Blanc Tunnel, including

新鮮空気を供給する火災手順は、火災エリアを含むモンブラントンネル全体に最大レベルで

the fire area. This was done. It has been noted that this procedure had changed since the commissioning

必要とする。そしてこれがなされた。トンネルが供用され始めてからこの手順が変わっていた

of the tunnel (initially, supply air was not provided). In fact, it is normal to supply fresh air to help people

ことを注記しておく（開通当初は、送気をしなかった）。実際、火災エリアに人々がいる who could be in the fire area, but too much supply churns up the air and mixes it with the smoke, pushing

可能性があり、それを助けるために新鮮空気を送気するのは普通である、しかし大量の送気は

it far inside the tunnel and feeding the fire.

空気をかき混ぜ、煙と混合し、それをトンネルの内側へ押しやり、火災を大きくした。

It is also generally recommended to have the supply air partially, rather than fully, open.

また完全に換気口を開けるより、部分的に空気を供給する方が一般的に推薦されている。

The exhaust procedure in the case of fire calls for a maximum exhaust in the fire area.

火災時の排気手順では火災エリアにて最大限の排気を必要とする。

This was not done on the Italian side where, on the contrary, the operator configured for maximum supply.

しかしながら、イタリア側ではオペレーターは反対に送気を最大にして、これをしなかった。

He had seen on the CCTV at rest area 22, 300 m east of the fire, vehicles making U-turns to return to Italy.

彼は火災から 300m 東の駐車帯 No.22 の CCTV によって車がイタリア方向に U ターン

He declared that, after observing the situation, he sincerely thought this is what he needed to do to save

してくるのを見ていた。この状況を観察した後で、これが命を救うために必要なすべきこと

lives. Later, at 11:13, a short exhaust command was attempted in the presence of his supervisor, by

だと真に考えたと断言した。後の 11:13 に、集中した排気で排煙する設備を導入した会社の

simulating a fire at rest area 20, with the participation of a technician from the company which had

技術者として参加していた彼の上司はその場に同席していて、駐車帯 No.20 まで及んできた

installed the equipment allowing the extraction of smoke by concentrating exhaust. It lasted only a

(ように見えた) 火災に対して短い時間の排気命令を下した。それはわずかに 1 分だけ minute. Another attempt was made between 12:29 and 12:40 by simulating a fire at rest area

24. The

続けられた。駐車帯 No.24 まで及んできた火災に対して、12:29～12:40 の間に別の試みが

managers of the Italian company confirmed that the smoke extraction equipment was in good working

行われた。イタリア会社の経営者は、排気設備はよく働いていたということと命を救う

ために

order and that it was, in fact, a voluntary decision on the part of the operator and then eventually his

新鮮空気の供給したのはオペレーターや彼の上司の自発的な決定であると確信していた。 supervisors to supply fresh air to save lives. It must be noted that, according to Italian personnel

イタリア職員の報告書によると、12:29での排気の試みではイタリアの入り口に位置する

statements, the exhaust attempts, even that of 12:29, did not lead to smoke arrival at the exhaust stack of

ダクト No5 の排気場まで煙は到達しなかったということに言及しなければならない。

duct no. 5, located at the end of the Italian approach. Perhaps they did not last long enough for that.

おそらく、彼らは煙が到達するのに十分な時間、操作を続けなかったのだろう。

Although it is not known to what effect the short exhaust attempts were made, the task force does not

この短い排気の試みでの効果は知られていないが、特別委員会はそれを考えたスタッフが

doubt the good will of the staff who thought this was the best approach.

最善を尽くそうとした良い意志を疑ってはいない。

However, this was against the procedures designed for such situations. Moreover, it is indisputable that

しかし、これはそのような状況で予定されている行動に反している。さらに火災が

this contributed instead to feed the fire, and helped destratify the hot smoke and push it toward France and

進展するのに寄与し、熱い煙がフランスとイタリア方向に進むのを助けたことは明白だ。 toward Italy.

At about 11:45, five Italian firefighters, who had entered the tunnel, took shelter in refuge area 24. They

11:45 ごろにトンネルから入った 5 人の消防士が No24 の避難シェルターについた。

would be eventually rescued through the reversible duct which supplies fresh air. This would not have

彼らはいつかは新鮮空気を供給していた送排気ダクトによって助けられるだろう。

been possible if, at that moment, between three and four hours after the alarm, it had carried exhaust air.

警報後 3~4 時間は排気が行われていたため、そのときはこれが可能でなかった。

#### 4.7. The Role of the Other Systems

他のシステムの役割

##### 4.7.1. Electrical Equipment

## 電気設備

Very quickly, that is from the first minutes, the lighting equipment was destroyed in the fire area; besides

火災が始まって最初の数分間に、火災エリアで照明設備が壊れた；その上、煙による妨害と

the difficulty caused by the smoke, the lack of lighting probably increased the hardship to motorists,

照明の不足によって運転手の困難は増しただろう、一方この設備が壊れたために、他の設備へ

while the destruction of this equipment resulted in short circuits leading to the progressive shutdown of

パワーを供給していた電気回路の停止を引き起こしたショートが起こった。

electrical circuits affecting power supply serving other equipment.

This is what happened to the fire sprinkler on the French side and the exhaust dampers on the Italian side.

これがフランス側のスプリンクラーとイタリア側の排気ダンパーに起きたことである。

It is clear that the tunnel electrical equipment does not have automatic redundant systems necessary to

トンネル電気設備は、フェイル・セーフモードや難しい状況で機能する時に必要になる冗長な

function in a failsafe mode or in difficult situations and that, generally, the safety equipment (such as

システムを持っていない、そして安全装置（スプリンクラーや排気ダンパーのような）は必ず

sprinklers or exhaust dampers) must be able to function and should therefore have a viable electrical

機能できるようにし、独立電源を持つべきことは明らかである。

system.

These issues must be carefully studied again during preparations to recommission the tunnel, then verified

トンネルを再建するための準備期間に、これらの問題を再び慎重に研究し、それから on paper during safety studies, and finally tested in real life during site drills.

安全研究を通じて机上で確かめ、最後に現場訓練で実際に試さなければならない。

### 4.7.2. Traffic Signals

#### 交通信号

In the tunnel, there are traffic signals every 1,200 m (at the entrance, then at the levels of rest areas 3, 7,

トンネルには、1200m 毎に信号がある（入り口、それから例えば駐車帯 3,7,11,15 の位置）。

11, 15, etc.). According to the testimonies received, these signals turned red in the France-Italy direction

受け取った証言によると、フランス→イタリア方向では 10:55 に、イタリア→フランス方向

at 10:55 and in the Italy-France direction at 10:56. There is, however, some doubt as to the effective

では 10:56 にこれらの信号は赤に変わった。しかし、多くの安全装置が働いている状況で

functioning of the red lights, even if the command was actually given, because there is no reliable

確実な記録システムがないために、たとえ現実に命令が与えられても、赤信号が

recording system for the working conditions of the major safety equipment. The traffic lights at the

効果的な機能を果たしていることにたいしていくつかの疑問がある。トンネルにて

French entrance to the tunnel were indeed working and at least one motorist saw them, but there is doubt

フランスの入り口にある信号は実際に働いており、少なくとも 1 人の運転手がそれを見た、

as to the functioning of the traffic lights in the tunnel. If, in fact, the lights had turned to red, some

しかしトンネル内の信号の機能については疑問がある。もし実際に信号が赤に

motorists could have run through them either unintentionally (the lights are not very visible) or in

変わっていたとしても、何人かの運転手は無意識のうちに（その信号はとても見えにくい）、

thinking that, in the absence of visible danger, they could do so without risk.

もしくは目に見える危険がないために、危険もないのに点いていると考えているうちに、通り過ぎてしまった。

On the other hand, if even one motorist had stopped for a red light, that would have required the vehicles

一方、もし赤信号で 1 人の運転手でも止まっていれば、同時にその次の車も停止する必要が

following him to do the same and, several minutes later, the stopped vehicle or vehicles would have been

でき、数分後には停止した車が、トンネルを調査する役の Mr. Roiget によって送り出され

passed by Mr. Roiget, the Italian operator, who had departed to inspect the tunnel, and the number of

犠牲者の数はそれに応じて減少していただろう。

victims would have been reduced accordingly. As that did not happen, there are only two hypotheses:

それが起きなかったために、2つの仮説のみ存在する：運転手たちが赤信号でも中に

either the motorists ran through the red lights, or else the red lights in the tunnel were not all functioning.

入っていったのか、またはトンネルの赤信号がまったく機能していなかったのかのどちらかだ。

#### 4.7.3. Refuge Areas

##### 避難所

Since the opening of the tunnel, there have been 6 closed areas which could qualify as refuge areas. But

トンネルの入り口から、避難所とみなされる6つの閉じた場所があった。

neither their fire resistance, nor their ventilation, nor their interior equipment corresponded to what can

しかし、それらには耐火性能、換気設備、内側の装備といった避難所に必要な really be called refuge areas.

ものがなかった。

After the serious fire of 11 January 1990, the two companies installed 18 real refuges, located in every

1990年1月11日の深刻な火災の後で、2つの会社は18ヶ所の本当の避難所を導入した、 other rest area, every 600 m. It must be noted, however, that, on the French side, these refuges are at the

これは駐車帯としては1つおきで600m間隔である。しかし、これらの避難所は

level of the odd-numbered rest areas and, on the Italian side, at the level of the even-numbered rest areas;

フランス側では奇数の駐車帯ごとに、イタリア側では偶数の駐車帯ごとに設けられたため、

thus there are two consecutive rest areas in the center of the tunnel without refuge areas, leaving a length

トンネル中央では避難所同士が900m離れてしまったことが注記されねばならない。

of 900 m without a refuge.

The refuges are supplied with fresh air by the ventilation ducts, are represented as fire resistant during two

避難所は換気ダクトによって新鮮空気が供給され、2時間の間火に耐え(2時間耐火相当)、 hours (2-hour fire rating), and are connected by telephone to the control rooms. These shelters

played an

コントロールルームと電話でつながっている。これらのシェルターは乗客を救うために

essential role in saving the lives of the firefighters and operating company personnel working inside the

煙の満ちたトンネル内で作業する消防士と会社の人間の命を救うことを

smoke-filled tunnel to rescue passengers. On the French side, refuge 17, where 6 ATMB personnel found

本質的な役割としている。フランス側では、ATMBの職員6名が見つけた避難所 No17 は

shelter, protected them from toxic smoke and heat for nearly 7 hours. On the Italian side, the

**firefighters**

有毒な煙や熱を7時間近く防いだ。イタリア側では、同様に消防士が避難所 No24 の similarly took shelter in refuge 24. They were protected there until their evacuation.

Unfortunately, it

シェルターに着いた。彼らの避難までそれらを防いだ。不幸にも、SITMB の代表を含む wasn't the same for refuge 20, where two people, including an SITMB representative, died. It

is very

2名が死亡した避難所 No20 は同じようにいかなかった。たとえこれらの避難所が4時間耐火

likely that, even if these refuge areas had been fire-rated at 4 hours, their deaths would not have been

できていても、彼らの死は避けられなかつただろう。

avoided. In fact, the fire burned for more than 50 hours.

実際、火は50時間以上燃え続けた。

The problem of locating the refuge areas, given the lack of visibility, must also be noted.

They are

視認性の欠如した避難所の位置問題にも注意すべきだ。それらの位置は

indicated by a lighted panel above the door (the refuges on the Italian side have two doors), carrying the

ドア（イタリアの避難所にはドアが2つある）の上の、"refuge"と書かれ（フランス側では

sign "refuge" (in French on the French side, in four languages on the Italian side), and by graphics for

フランス語で、イタリア側では4カ国語でかかっている)、"extinguisher"と"telephone"の "extinguisher" and "telephone". In the conditions of poor visibility due to the smoke, the

panels above the

絵が描かれている電光板によって指示される。煙により視界が悪い状況では、ドアの上の

doors were probably hardly visible and the exterior appearance of the refuge with the light visible through

電光板はおそらくほとんど見えなかつただろう、そして窓を光がかすませて見せる避難所の

glazed windows differs little from other technical rooms of the tunnel, which are neither protected from

外観はトンネルの他の技術室とほとんど変わらない。これらの部屋は火から守られていなく、

fire nor ventilated.

換気も行われていない。

Fresh air is supplied into the refuges by a direct link with one of the ducts on the French side, and by a

避難所への新鮮空気の供給はフランス側では全ダクトのうちの1つから直接行われており、

local ventilation system on the Italian side. This results in a real constraint in the operation of

tunnel

イタリア側では局所的な換気システムがある。このために火災の際、トンネル換気の操作が

ventilation in case of a fire, since it is necessary to assure a minimum flow in the fresh air ducts to assure

が制限される、それは人々が避難所にいる時、またはいそうな時にそこへの十分な送気を

a sufficient supply in the refuges when people are present or likely to be there (flow greater than half of

するために、新鮮空気のダクトで最低限の流れを確保する必要があるからである the maximum, on the French side).

(フランス側では、その流れは最大流量の半分より多い)。

#### 4.7.4. Safety Corridors

安全 corridors

Generally, a safety corridor parallel to a main tunnel can serve to evacuate people in danger and facilitate

一般に、主要トンネルに平行してある安全 corridor は危険時に人々が避難できるようにしたり、

access for emergency personnel.

職員が非常用通路として使ったりできる。

The Mont Blanc Tunnel does not have any.

モンブラントンネルはそれを持っていない。

With regard to the evacuation of people in the case of this fire, it has been shown that the majority of the

今回の火災での避難に関して、犠牲者の大多数が車の中に取り残されていたことが victims did not leave their vehicle. They apparently did not attempt to reach an emergency exit.

示されている。彼らは明らかに非常用出口に着こうとしていない。

Therefore, they would not have been saved by a safety corridor. The victims who did get out of their

それゆえ、彼らは安全 corridor によって救われなかっただろう。車を出てトンネル内で vehicle and died in the tunnel did not enter a refuge area. They were surrounded by smoke and in

亡くなった犠牲者は避難所に入れなかった。彼らは煙に取り囲まれ、暗闇の中にあつた darkness (the lighting was out from 11:01 on). They must have simply tried to flee via the tunnel. It is

(照明は 11:01 に消えていた)。彼らは単純にトンネルを通過して避難しようとしていたに likely, given past experience noted in other vehicular tunnel fires around the world, that they would not

ちがいない。もし彼らに世界中の自動車火災の過去の経験が与えられていれば、

have reached an emergency exit without having been led there by qualified personnel. On the



other hand,

資格を持つ職員の案内なしで非常用出口に着こうとしなかっただろう。一方、  
the 2 victims who died in refuge 20 could have without a doubt been saved, if it had been linked  
to a

もし安全 corridor.がつながっていたら、避難所 No20 で亡くなった 2 人の犠牲者は疑いなく

safety corridor.

助かっていたら。

The 1981 internal policy circular requires that, "if a pedestrian safety corridor cannot reasonably be made

1981 年の内部政策は以下のことを要求した “もし歩行者専用の安全 corridor.が利用できない

available, then:

ならば、そのとき :

- either provide refuge areas at U-turns,  
Uターンできる避難所をつくるか、
- or provide fresh air ducts for the purpose of using them for the evacuation or shelter of passengers".  
避難中の人々やシェルター内の人々のための新鮮空気ダクトをつくれ。 “

Refuge areas were therefore chosen for the Mont Blanc Tunnel (every other rest area). They were not

それゆえにモンブラントンネルでは避難所が選ばれた (駐車帯 1 つおきに)。避難者用の  
connected to fresh air ducts for the evacuation of users, probably because that would have  
required

新鮮空気ダクトはつながらなかった、おそらくそれにはトンネルを拡張するための爆破  
significant rock excavation with explosives and an extended tunnel closure.

に耐えられる十分な岩の厚さがなかったからだろう。

On the other hand, the reversible supply/exhaust duct may be used, but only in difficult and uncertain

一方、安全な部屋では煙が排出される限り、難しく不確かな状況でだけ、送/排気ダクト  
が

conditions, as a safety room, as long as no smoke is exhausted at that time. On the Italian side, this

使われるかもしれない。イタリア側では、駐車帯 No.24 の避難所に閉じ込められた消防  
士の

allowed the evacuation of the firefighters trapped in the refuge area of rest area 24. On the  
French side, it

避難時にこれが使われた。フランス側では、Chamonix の消防士を助けにきた Captain  
Comte の

allowed the partial progress of Captain Comte, who came to rescue the other Chamonix  
firefighters

部分的な前進の際に使われた。しかし、彼らの避難には役立たなかったし、ATMB の職員は

trapped in the tunnel. It did not, however, allow their evacuation, nor that of the ATMB agents trapped in

駐車帯 No.17 に閉じ込められたというのは排気ダクト以前に、新鮮空気の換気の際に rest area 17, for it was too filled with soot, brought in by the fresh air ventilation, as a result of its

すすでいっぱいになっていたからである。

previous function as exhaust duct.

#### 4.7.5. Other Equipment

##### 他の設備

##### 4.7.5.1. Emergency Telephone Network

##### 非常電話回線

The tunnel is equipped with 72 telephones installed on opposite sides of the tunnel in the rest areas or the

トンネルには駐車帯の反対側やUターンエリアに 72 個の電話が装備されている。

U-turn areas across from them. Calls made from these telephones go to control rooms and the caller is

これらの電話をかけるとコントロールルームとつながり、電話をかけた人はオペレーターと

then in touch with an operator. It should be noted that the niches between the rest areas are not equipped

連絡をとる。駐車帯と駐車帯の間には電話は装備されていないことに注意すべきだ。

with telephones.

During the fire, a telephone call from rest area 22 was received at about 10:54 by the Italian control room.

火災のとき、駐車帯 No.22 からかかってきた電話は 10:54 ごろイタリアのコントロールルームで

Then several telephone communications were established with rest areas 5, 9, 12 and 28. The French

受け取られた。それからいくつかの電話連絡が駐車帯 No.5,9,12,28 から行われた。

operator attested to several communications with the ATMB agents trapped in rest area 17, but no record

フランスのオペレーターが駐車帯 No.17 に閉じ込められた ATMB の職員からのいくつかの

appears in the mini-GTC listing (see further in report).

連絡を証言している、しかし mini-GTC の記録には残っていなかった。

It should be pointed out that the Chamonix firefighters attested to difficulties in reaching the

operator by

Chamonix の消防士が駐車帯 No.12 の電話を使うことによって、オペレーターと連絡を using the telephone in rest area 12. This statement is contested by the ATMB agents, who say they spoke

とることの困難さを証言していたことに注意すべきだ。この報告に対し、駐車帯にいた人と

with the occupants of this rest area. The listing shows that "telephone hang-ups" did indeed occur in rest

会話をしたと、ATMB の職員が異議を唱えている。駐車帯 No.12 では“電話は area 12. It would seem that the communication could not always be established between the tunnel and

切れていた“状態だったことをそのリストは示している。トンネルとコントロールルームの

the control room, but it could be in the other direction.

間では常に連絡が確立していたわけではなかったが、別の方向からの連絡は確立されていたようだ。

The emergency telephone network played an important role for the operators during the alarm phase. In

警報時に非常用電話回線はオペレーターにとって重要な役割を演じていた。特に、 particular, the equipment allowed them to maintain contact with the rescue team trapped in the tunnel. A

トンネルに閉じ込められた救助隊と連絡を維持するためにその装備は使われていた。

reservation must nevertheless be expressed concerning a seemingly unequal functioning on the French

それにもかかわらず、フランス側では見たところ同様にない機能を果たしたに違いない。

side. It was cut completely from 15:49, however, eliminating all direct communications between the two

しかし、15:49 から 2 つの入り口の間すべての直接的な連絡は portals.

なくなり、完全に電話は断たれた。

#### 4.7.5.2. Extinguishers

##### 消火器

Six-kilogram ABC powder extinguishers are located in groups of two every 300 m in the rest areas and in

2 つで 1 組の 6kg の ABC 粉末消火器が駐車帯とその反対側の U ターンエリアに 300m ごとに置かれている。

the U-turn areas opposite them. Between these rest areas, they are also located every 100 m in niches

これらの駐車帯の間には、ある側と反対の側の壁にかわるがわる 100m おきに消火器が situated alternately on one or the other side wall. Thus four pairs of extinguishers were available every

置かれている。こうして 4 組の消火器が 300m ごとに利用できる。

300 m.

In each control room, an alarm is triggered when an extinguisher is lifted and the zone of the rest area

それぞれのコントロールルームでは、消火器が持ち上げられると警報が作動し、その消火器が

where it is located is indicated.

置かれた駐車帯が表示される。

It is thus that at 10:58 an unhooked extinguisher in rest area 21 was signaled. However, after a visual

10:58 に駐車帯 No.21 の消火器の掛け金が外され、信号が送られた。しかし、

examination of the spot, it does not appear that an extinguisher was actually lifted: it is possible that the

その場所を見て調査してみると、現実には消火器が動かされているようではなかった :

alarm was created by a faulty cable which passed on the information.

誤ったケーブルによって情報が送られてきて警報が鳴った可能性がある。

With the exception of rest area 21, for which a slight doubt remains, it must thus be concluded that the

駐車帯 No.21 を除いてそれについてはわずかな疑問を残しながらも、3月24日の火災時に

extinguishers were not used during the fire of 24 March. A great majority of fires in vehicles (including

消火器が使われなかったということは、結論づけなければならない。しかしながら、

trucks) which break out in tunnels are, however, put out with such extinguishers: in the Mont Blanc

トンネルで起きている自動車火災の大半は（トラックを含む）そのような消火器によって

Tunnel, 14 out of 21 fires which occurred previously were extinguished in this manner. The driver of the

消されている : モンブラントンネルでは以前に起きた火災 21 回のうち 14 回をこのやり方で

Belgian truck tried to take the extinguisher from his vehicle, but was unable to do so because of the fire in

消火した。ベルギートラックの運転手は彼の車から消火器を取り出そうとしたが、火災が

the cab. He did not, it seems, attempt to use a tunnel extinguisher. Without a doubt, the strength of the

運転席から起きたためにそれができなかった。彼はトンネルの消火器を使おうとしなかった

fire core had already gone beyond the level which such an apparatus could successfully combat.

ようだ。疑いなく、火災の中心の強さはすでにそのような道具でうまく立ち向かえるレベルを

超えていた。

#### 4.7.5.3. Fire Protection System

##### 防火システム

Fire hydrants are available to rescue services in the tunnel every 150 m along the southern side wall (on

消火栓はトンネル内の南の側壁沿いに 150m ごとにあり救助隊に利用できる (フランス →

the right in the France-Italy direction). There are in fact two different water systems in each half of the

イタリア方向をむいて右手)。実際にトンネルの半分ずつそれぞれに 2 つの違う水系がある。

tunnel. They are not interconnected and thus do not allow a mutual rescue operation.

それらは相互に連結していなく、相互的な救助作業に使えない。

On the French side, the installation took place in 1991-1992. Mountain water seeping into the tunnel is

フランス側では、その装備は 1991～1992 年に設置された。トンネル内にしみ込んでくる collected in a 120 m<sup>3</sup> reservoir at rest area 16. Because of the limited water infiltration, the fill time is

山水は駐車帯 No.16 の 120 m<sup>3</sup> の貯水池に集められる。その浸透水は限られているために、 about eight hours. A pump under the reservoir feeds the standpipe on the French side and provides a flow

満水になるのに約 8 時間かかる。貯水池の下のポンプからフランス側の給水用パイプを介して、

of 60 of m<sup>3</sup>/h for two hours under a minimum pressure of 6 bars at each hydrant, which conforms to the

それぞれの消火栓に最低圧力 6 パールで、2 時間で 60 m<sup>3</sup>/h の流量で

requirements of circular no. 81-109 of 29 December 1981 relative to safety in vehicular tunnels. Each

水を供給する。そして、それは自動車トンネルの安全に関連した 1981 年 12 月 29 日での fire niche contains two 65 mm diameter connections, compatible with the French firefighting equipment.

条例 no81～109 の要求水量を満たす。それぞれの火災用ニッチはフランスの消防士用の装備として共用できる直径 65mm の 2 つの連結部を持つ。

The Italian system, installed later in 1997, has generally similar characteristics. The tank is located at rest

イタリアのシステムは 1997 年に遅れて導入され、一般的には似たような特徴を持つ。タンクは

area 29 and has a capacity of 117 m<sup>3</sup>. Its fill time is shorter than on the French side, since the water

駐車帯 No.29 にあり 117 m<sup>3</sup> の容量を持つ。岩の多い連峰からくる水がフランスより豊かなので、

coming from the rocky massif is more abundant. Pressure pumps assure a flow of 96 m<sup>3</sup>/h under 7 or 8

タンクを満水にするのにかかる時間はフランスより短い。ポンプの圧力はそれぞれの消火栓で

bars at each hydrant. The connections, built to Italian standards, all have adapters for French equipment.

7~8 バールで 96 m<sup>3</sup>/h の流れを保証する。イタリアの基準でつくられた接続部はすべてフランス製装備用のアダプターを持っている。

During the 24 to 26 March fire, only the Italian standpipe was used to combat the fire. Water was

3月24~26日の火災の間、イタリアの給水用パイプだけが火に立ち向かうために使われた。

available at 60 m<sup>3</sup>/s over a period far longer than the two hours set par the French circular mentioned

水は前述したフランスの平均の2時間よりもはるかに長い時間 60 m<sup>3</sup>/s で利用することができた。

earlier.

A power outage occurred on the French side at about 21:42 on 24 March, due to a short circuit caused by

3月24日の21:42ごろに、駐車帯 No.18 の天井のケーブルが交わっているところが破壊された

the destruction of cables crossing in the rest area 18 ceiling. The pump was returned to service by the

ためにショートが起き、フランス側で停電が起きた。3月26日の夜になって、ポンプは firefighters only in the evening of 26 March. The standpipe then fed a fogger and a hose set up in rest

消防士たちによって再び動かされた。そのとき給水用パイプは霧を供給しており、

area 17, but when the tank was emptied, new repairs were required by the pump's power supply.

ホースは駐車帯 No.17 にあった。しかし、タンクが空になったとき、新たにポンプのパワー

の供給を修理する必要が生じた。

#### 4.7.5.4. Radio Rebroadcasting

##### ラジオ再放送

Radio transmissions cannot be received underground. Since 1995, over the total length of the tunnel,

地下ではラジオを受信できない。1995年から、トンネル全体にわたって天井に

radiax cables installed in the ceiling enabled the transmission of certain two-way radio services (French

ラジオケーブルが導入された。それによって運転手が自分の車のラジオで聞くことのできる

and Italian operators, police and fire services of the two countries), as well as four FM stations (two

一般的な公共放送 FM4 局 (フランス語のものが 2 つ、イタリア語のものが 2 つ) とともに

French and two Italian) for the general public which can be listened to by motorists on their car radios.

2 種類のラジオ放送 (2 国で、フランス語とイタリア語のオペレーターが警察と消防の

The control room operators have the ability to break into these latter stations, to broadcast alarm messages

サービスを伝える) の受信が可能になった。コントロールルームのオペレーターは

(the French operator can only insert messages on the French FM frequencies and the Italian operator only

警報のメッセージを放送するために、後者の 2 局に出入りすることができる。(フランスの

on the Italian frequencies).

オペレーターはフランスの FM 周波数にメッセージを掲載できるだけ、イタリアの

オペレーターはイタリアの周波数にだけ)

Such messages were broadcast on the French frequencies at about 11:15. In addition, the two-way radio

そのようなメッセージは 11:15 ごろにフランスの周波数で放送された。加えて、

system was extremely valuable in allowing staff from both companies who were in the tunnel to 双方向のラジオシステムは、トンネルのコントロールシステムで連絡をとっている両方

の

communicate with the control rooms. A radio connection on the SITMB frequency was maintained for

会社のスタッフにとってかなり役に立った。SITMB 周波数でのラジオ連絡は、後に

about an hour with the motorcycle patrol who later died in the refuge at rest area 20.

駐車帯 No.20 の避難所で亡くなるバイクのパトロール員と約 1 時間行われていた。

The firefighters of the two countries were able, in the same way, to stay in contact with their control room

2 つの国の消防士がトンネルに始めて入るとき、同じ方法でコントロールルームと連絡を

during their first entries into the tunnel. However, it appears that, at least on the French side, there were

取り続けることができた。しかし、少なくともフランス側だけにはカーラジオを積んだ車が

only mobile radios installed in the vehicles: when they left them, the firefighters lost the possibility of

あり、彼らとその車を通り過ぎたとき、消防士たちはラジオによってコントロールルームと

communicating with the control room by radio and became dependent on the telephone stations in the

連絡を取り合えなくなった。そして、300m 離れているトンネル内の電話に依存するよ

うに  
tunnel, located 300 meters apart.  
なった。

#### 4.7.5.5. Fire Detection

##### 火災探知

Two different fire detection systems were installed in the two halves of the tunnel. The Italian system,

トンネルの半分ずつそれぞれに2つの違った火災探知システムが導入されていた。  
installed at the beginning of the 1990s, detected temperature increases by measuring pressure variation in

1990年の始めに導入されたイタリアのシステムは、天井の頂上に位置する70~80mの長さの

70 to 80 meter long tubes located at the top of the ceiling.

チューブで圧力変化を測定することによって温度上昇を探知した。

On the French side, a cable installed on the ceiling linked temperature sensors located every 8 meters. An

フランス側では、天井にあるケーブルが8mごとに位置する温度センサーにつながっていた。

alarm is triggered by this cable when it measures a local increase in temperature in relation to the average

近隣の読みとり機の平均に対して、このケーブルで局所的な温度増加、または50℃を  
of the adjacent readers, or a temperature above 50° C. The data on exceeding the set thresholds is

超えたときに警報が鳴る。限界値を超えたデータはオペレーターに送られる。

transmitted to the operators.

The Italian system provides for the automatic start up of smoke removal ventilation, after confirmation

イタリアのシステムはオペレーターが確認した後、煙の除去が自動的に行われる。

from the operator. However, this detection system had registered numerous false alarms: it was for this

しかし、この探知システムは多くの誤報を記録した：例えば、火災の前夜に駐車帯 No.21に

reason, for example, that the section located at rest area 21 had been placed out of service the evening

位置するセクションでサービスを停止したのはこのためだ。

before the fire. During the fire, the cable which collects data was lost very quickly: after input on a fault

火災中、データを集めるケーブルはとてもはやくになくなった：10:57に故障をインプット

at 10:57, communication was lost at 11:02 between the data acquisition cabinet at rest area 23



and the

した後で、駐車帯 No.23 のデータ他をとるキャビネットとイタリアのコントロールルームの

Italian control room.

連絡は 11:02 に途切れた。

On the French side, the first alarm occurred at 11:13 from the rest area 19 zone. The next alarms occurred

フランス側では、駐車帯 No.19 から 11:13 に最初の警報は起きた。次の警報は 6 分後に 6 minutes later at rest area 18 and then at intervals of approximately 4 minutes from rest areas 17, 16 and

駐車帯 No.18 で、それからおおよそ 4 分間隔で駐車帯 No.17、16、15 の順に鳴っていった。

15. At 16:51 there was a loss of data coming from the zone from rest area 11 to rest area 19.

16:51 には駐車帯 No.11～19 から来るデータは失われた。

The data acquisition system connected to the cable records the temperatures measured by the readers and

ケーブルとつながっていたデータ入手システムは、読み取り機によって測定された温度を

saves them for four days. In effect, current day readings erase and take the place of those recorded four

記録し、4 日間それらを蓄える。実際は、現在の記録は以前の 4 日間の記録に取って代わる。

days earlier. Because of this record, it should have been possible to reconstruct the development of the

この記録のおかげで、データ入手システムがなくなるまでのフランス側半分のトンネル内の

rising temperature in the French half of the tunnel until the loss of the data acquisition system.

In reality

温度の上がり方を再構築することができるはずだった。火災の終わった後もそのシステムが

this data was lost, since the system was evidently allowed to continue functioning after the end of the fire

明らかに機能し続けたために、火災中の読み取り記録が消されて、このデータは失われた。

and thus erased the readings recorded during the fire.

The Italian fire detection system did not notify the controller of the presence of a fire and also did not

イタリアの火災探知システムは火災の生起を制御装置に通知しなかった、そして

allow the temperature's evolution to be followed. All in all, the fire detection systems on the two sides

温度の進展にもついていけなかった。結果として、双方の火災探知システムは適切な

did not give the alarm in time and did not record data that could actually be used afterwards. They were

タイミングで警報を出せず、後で実際に利用されるであろうデータも記録しなかった。

both based on temperature measurements, as is most often the case in vehicular tunnels. In reality, in the

自動車トンネルの多くの場合のように、それらは両方とも温度測定に基づいていた。

majority of fires, obscuring increases much faster than temperature, and the detection of the former often

実際に火災の大多数では、見えにくさの増加は温度増加よりも速く、前者の探知は警報を

occurs too late to give an alarm.

発するにはたいてい遅すぎる。

#### 4.7.5.6. Video Surveillance

##### 監視ビデオ

The first video surveillance system was installed simultaneously by the two companies in the entire tunnel

最初のビデオ監視システムは 1974 年に 2 つの会社がいっせいにトンネル全体に導入し、in 1974 and was renovated in 1994. Today it includes 40 color cameras. Each control room has access to

1994 年に改装された。現在、40 のカラーカメラがある。それぞれのコントロールルームから

all screens and can control them as it wishes.

すべてのスクリーンにアクセスでき、自在にコントロールできる。

In the tunnel, each camera surveys a rest area zone and is directed toward the nearest portal (toward

トンネルでは、それぞれのカメラは駐車帯を調査し、最寄の入り口方向が割り当てられている

France between the French entrance and the middle of the tunnel, toward Italy beyond). Therefore, the

(フランスの入り口とトンネルの中間の間ではフランス方向、その向こうではイタリア方向

cameras are located about every 300 meters. Some additional cameras were installed to allow complete

を向いている)。それゆえ、カメラは 300m ごとに設置されている。トンネル内部の範囲を

video coverage of the tunnel.

ビデオで完全にカバーするために、追加のカメラが導入された。

In the control rooms, five monitors are normally used for a cyclical visualization of the tunnel.

コントロールルームでは、通常 5 つのモニターによってトンネルを周期的に確認している。

Supplementary monitors are assigned to alarms (lifting of the extinguisher, pullbox, unhooking

the

追加のモニターを警報用（消火器の移動、自動警報装置、受話器のはずれた電話等で鳴る）と

telephone, etc.) and to certain cameras chosen by the operator. In case of alarm, the five cyclical monitors

オペレーターによって選ばれたカメラ用に割り当てている。警報が鳴った場合、

are automatically assigned to the camera aimed at the zone in alarm and to those located on both sides. In

5つの周期的にいろいろな場所を映していたモニターが、自動的に警報のあったゾーンを映す

addition, a recording is automatically started on the alarm zone camera.

カメラと、その両側を映すカメラの画像に切り替わる。加えて、自動的に警報のゾーンの

カメラの記録が始まる。

The television system allowed the two operators to see the smoke in the tunnel, when they had already

すでに警報が鳴っていたとき（フランス側の煙濃度計による警報とイタリア側の駐車帯 No.22

been alerted (the alarm from the obscuration sensor on the French side, the telephone call from rest

からの電話により)、そのテレビシステムは2人のオペレーターにトンネル内の煙を

area 22 on the Italian side). In these two cases, the screen images of the affected zones allowed the

確認させた。これらの2つの場合では、作動したゾーンのスクリーンの映像は、

operators to very quickly realize the gravity of the situation. The video surveillance equipment thus

オペレーターに状況の重大さをより早く理解させた。こうしてビデオ監視システムは

played a very important role in the very first moments at the beginning of the fire; then the images were

火災のとても早い時期にはたいへん重要な役割を演じた；それからの映像は濃い煙の進出の

no longer useful because of the dense smoke advancement.

ためにもはや役に立たなかった。

While the video recording in the Italian control room allowed afterwards for important observations on

イタリアのコントロールルームでのビデオの記録は、後に火災中の確かな出来事を知るための

certain events during the fire, no French recording is available. ATMB states that the operator put an

たいへん重要な資料になっている、一方フランスの記録は利用できていない。ATMBは

unrecordable cassette into the video recorder and did not realize this. Whatever the reason, the absence of

オペレーターが記録できないカセットをビデオレコーダーに入れ、これをわからなかつ

たと

such a recording, essential to understanding the fire, is to be strongly regretted.

述べている。どんな理由があるにせよ、火災を本質的に理解するためのそのような記録の

欠如はとても残念に思う。

It can also be regretted that the systematic recording of vehicles entering the tunnel was not carried out,

トンネルに入ってきた車の体系的な記録は実行されていないことを残念に思う。

which would have more quickly provided the number and type of vehicles present at the time of the

これがあれば災害時により早く、存在する車の数と種類を提供できる。

catastrophe.

#### 4.7.5.7. Automatic Incident Detection

##### 事故自動検知装置

In 1994, during the installation of the new video surveillance system, arrangements were made to allow

新しいビデオ監視システムが導入されていた 1994 年に、以前に入れられた画像分析に基づく

the later installation of automatic incident detection equipment based on image analysis.

事故自動検知装置が改善された。

Since that date, studies have progressed: a bid was offered and a company was hired. The work was to

それ以来、研究は進展した：提案が行われ、会社が雇われた。その仕事はトンネル全体を

cover the entire tunnel. A first full-scale test was to take place on Monday, the 29 March 1999: eight

見張るためのものだった。最初のフルスケールの検査は 1999 年 3 月 29 日の月曜日に

cameras located throughout the tunnel were to be linked up to a video processor. Completion of the

行われるはずだった：トンネルの至るところに位置していた 8 個のカメラをビデオ処理装置と

installation of all 40 cameras in the tunnel was planned for the summer vacation period of 1999.

Each

つなげることになっていた。トンネル内に全部で 40 個のカメラを取り付けを、1999 年の

control room, in both France and Italy, would have then initiated the same procedures to generate an

夏季休業中に完了することを企画していた。フランスとイタリアのそれぞれのコントロール

alarm when a vehicle stopped in a lane or in a rest area, when traffic slowed down, or when a

single

ルームでは、道路や駐車帯で車が停止したとき、通行速度が落ちたとき、  
vehicle traveled slowly. This would have allowed a small time gain for an alarm.

1 台の車がゆっくり移動したときに警報を発生させる装置を設置するはずだった。これ  
なら  
短時間に警報を鳴らせられたらう。

#### 4.7.5.8. Computerized Central Management (GTC)

コンピュータ中央管理

From the beginning, information regarding the traffic management equipment (traffic signals),  
the air

当初から、電話、消火器、自動警報装置の状況に関する情報と同様に、交通管理設備  
quality sensors (obscurity and CO monitors), as well as status information relating to  
telephones,

(信号機)、空気質センサー（煙濃度と CO 探知装置）に関する情報は歩道の地下にある  
extinguishers and fire pullboxes, has been sent simultaneously to the two ends of the tunnel by  
cables

ケーブル ("DMR"や"telemetry"と呼ばれる) によってトンネルの両端の同時に送られて  
いる。

(called "DMR" and "telemetry") routed under the walkway.

On the French side, during 1992 and 1993, an interim computerized central management system  
(called

1992～1993 年の間フランス側では、仮のコンピュータ中央管理システム (ATMB によっ  
て

"mini-GTC" by ATMB) was implemented as a test. Although not perfect, it allowed the  
reduction of the

"mini-GTC"と呼ばれる) が試験的に実行された。完全ではないけれども、それらの  
data from the tunnel, and the processing and recording on a printer of the status changes of  
certain alarms,

導入によってトンネルからのデータを減らし、入ってきた時点で警報時の状況の変化を  
as they come in.

処理しプリンターによって記録することになった。

The information traveling on the DMR cable was transmitted to the control centers (and  
processed by the

DMR ケーブルを通る情報は 13:19 までにコントロールルームに送られた (そして  
mini-GTC

mini-GTC) until 13:19 and the telemetry (obscurity and CO levels) until 13:35. After this  
time, no other

によって処理された)、同様に無線の情報 (煙濃度と CO のレベル) は 13:15 まで

information was received. Therefore, the mini-GTC worked well for as long as the  
information came to

送られた。このとき以降、情報は全く受けていなかった。それゆえ、mini-GTC は the French side.

フランス側から情報が来る間はよく働いた。

The mini-GTC's role was, however, limited for the following reasons:

しかし mini-GTC の役割は以下の理由のために限られていた

- the number of available twisted pair cables did not allow the collection of all the data coming from the tunnel (some of them were connected in parallel);  
利用できる 2 つの寄り合わされたケーブルの総数ではトンネル内からくる全てのデータを  
集められなかった (それらのいくつかは並列につながっていた) ;
- the transmission architecture was not redundant and the loss of the DMR and telemetry cables halted the system;  
伝達の構成には余裕がなく、DMR と telemetry ケーブルの欠如はシステムの停止をまねいた。
- the wealth of information sometimes caused the loss of some of the data.  
豊富な情報はときどきいくつかのデータ欠如の原因となった。

The available records from the mini-GTC seem reliable, but are not very detailed: there could have been

mini-GTC からの利用できる記録は信頼できるが、あまり詳しくはない:そこには記録され

data that was not recorded. It is regrettable that a tunnel of the importance of the Mont Blanc did not

なかったデータがあったのだろう。現在全ての新しいトンネルで利用されている本当の GTC が

have a real GTC, currently available in all new tunnels. The installation of a GTC was, however, under

モンブランの重要なトンネルになかったのは残念だ。しかし、GTC の導入は 2 社の対等な

way in a coordinated effort by the two companies which, on the 24 March, were in the process of

努力によって進行していた、そして 3 月 24 日にはコンサルタントを選択する途中だった。  
selecting a consultant.

#### 4.7.5.9. Control of Tunnel Environment

トンネル環境のコントロール

The obscurity and the air concentration of carbon monoxide are monitored by nine obscurity sensors and

煙濃度と CO の濃度は、トンネルの入り口付近と約 1500m ごとに置かれている 9 個の  
nine carbon monoxide (CO) monitors installed close to the portals and in the tunnel  
approximately every

煙濃度計と 9 個の CO モニターによって監視されている。全ての測定はそれぞれの  
1,500 m. All measurements are recorded as a graph in each control room. This equipment,  
checked

コントロールルームでグラフとして記録されている。定期的に検査されるこの設備は  
periodically, was all working on 24 March.

3 月 24 日も全て働いていた。

In the case of high obscurity increase, two threshold levels are applicable to the equipment  
readings:

視界の悪化がかなり進行した場合、2 つの閾値が設備の読み取りに適用される :

- a very rapid increase threshold if the difference is higher than 5% (Westinghouse unit)  
between two

2 つの読み取り間での差が 5% 以上になる急速な増加のための閾値  
readings,

- an alarm threshold at 20% Westinghouse obscurity, which corresponds to the motorist to the  
Westinghouse 煙濃度 20% の警報閾値、これは運転手が運転を遅らせるかもしれない  
appearance of smoke that may impede driving.

煙の出現に相当する。

The obscurity sensors proved to be very valuable, and gave the first alarm in the French control  
room: an

煙濃度計はとても価値があることを証明した、そしてフランス側コントロールルームで  
最初に

obscurity alarm coming from rest area 18 was triggered at 10:52 and automatically concentrated  
the video

警報を鳴らした : 駐車帯 No.18 からきた煙濃度への警報は 10:52 に鳴った、そして  
coverage in that area, where the smoke could be visually verified. As the response time of the  
equipment

そのエリアの範囲のビデオが自動的にそこを映したら、煙は視覚で確認できた。

was very fast, the exceeding of the thresholds recorded by the mini-GTC and the reading of the  
printouts

その設備の反応時間はとても速いので、mini-GTC によって記録される閾値の超過と  
give an accurate image of the evolution of the ambient air transparency and of the smoke  
development;

プリントアウトされた読み取り値は、周囲の空気の透明度と煙の進展の展開を精密な  
these latter led to a rapid saturation of the equipment, which has a scale limit of 30%  
Westinghouse.

画像として与えている ; ただし、これらの後者は急速に飽和した。というのは測定限界  
値が Westinghouse30% だから。

The CO monitors also have two concentration thresholds, with an alarm at 150 ppm and a scale limit of

CO モニターも 2 つの濃度閾値を持つ。警報は 150ppm であり、測定限界値は 300ppm である。

300 ppm. These sensors are infrared and require some response time, due to the piping bringing tunnel

これらのセンサーは赤外線によるもので、トンネル空気をその装置に運び入れるための air to the equipment. They thus give a slightly different image of the pollution characteristics. 反応時間が必要である。それゆえ、2 つのモニターは汚染状況についてわずかに違うイメージを与える。

#### 4.7.5.10. Anemometers

##### 風速計

The control and recording of the air speed is accomplished by three vortex anemometers, which replaced

風速の調整と記録は初期のプロペラ風速計に取って代わった 3 つの渦風速計によって the original propeller anemometers. The equipment is placed close to each portal, as well as in the middle

成されている。この設備はトンネル中央の駐車帯 No.18 と同様に、それぞれの入り口の近くに

of the tunnel at rest area 18. Two units are operated by the French company and the third by the Italian

もある。フランスの会社が 2 つのユニットを操作し、イタリアの会社が 3 つ目を操作する。

company.

On the French side, it is very regrettable that the units have not been operational since 1996-1997. The

フランス側では、1996-1997 からそのユニットを運転していないことを非常に後悔している。

operators, rescue services and investigating teams therefore did not have the measured values at the

そのオペレーター達、救助隊、調査隊らは、トンネル内の空気と煙の動きを理解するのに

French portal and in the middle of the tunnel that could have been a great help in understanding the air

大きな助けになると思われるフランスの入り口とトンネル中央の測定値を得られなかった。

and smoke movement inside the tunnel. However, on the Italian side, the anemometer was functioning; it

しかしイタリア側では、風速計は機能し続けていた、それは 3 ヶ月ごとに検査されていて、

is checked every three months, it was serviced in 1997, and its calibration was verified in the



smoke tests

そのサービスは 1997 年に始まった、その目盛は 1998 年 10 月の煙試験によって確認された。

of October 1998. In general, the readings from tunnel anemometers must be considered more as an order

一般的にトンネルの風速計からの読み取り値は、主要な空気の流れと車が起こす乱気流に

of magnitude, due to the unknowns such as the position of the unit with relation to the main air flow and

影響を受ける測定ユニットの位置のような未知の要素により、あるオーダーを示すものを

the turbulence generated by moving vehicles. However, the information delivered by the Italian

考えなくてはならない。しかし、イタリアの風速計によって送られてくるその情報は

anemometer is very important in order to understand what happened. It appeared to match the various

何が起きているのかを理解するためにたいへん重要である。イタリアの風速計の値は initial data (obscurity) and the calculations attempting to reconstruct the air flows.

さまざまな最初のデータ（煙濃度）および空気の流れを再構築しようとする計算結果と一致するように見えた。

## 5. CONCLUSION

### 結論

The catastrophe which occurred on 24 March 1999 in the Mont Blanc Tunnel is the result of several

モンブラントンネルで 1999 年 3 月 24 日に起きた大惨事はいくつかの同時に発生した原因の

concurrent causes.

結果である。

- The truck that caused the fire was particularly combustible, for a vehicle which did not carry 火災を起こしたトラックは、法律に基づく範囲内でいわゆる危険物を運んでいなかった

hazardous cargo in the legal sense of the term. The smoke released by its combustion was very toxic.

ために、かえって燃えやすかった。その燃焼によって放出された煙は毒性が強かった。

- The strong supply at the roadway level and the air flow at the ceiling contributed, together with the 道路の高さでの強力な空気の供給と天井での空気の流れが、一緒に縦流となって火災を

longitudinal air flow, to feed the fire and destratify the smoke, which instead of staying at the ceiling

進展させ煙をださせた。そして、天井の高さにとどまり運転手の位置を鮮明にする代

わりに、

**and clearing up at the motorists' level, filled the entire cross section of the tunnel.**

煙はトンネルのセクションを渡って全体に満ちた。

- **The hot and toxic smoke was not extracted in sufficient quantities; due to, on one hand, the exhaust**

熱く有毒な煙が十分な量排出されなかった；それは、一方ではこのトンネル排気量の

**capacity limitations of this particular tunnel and, on the other hand, the use of exhaust ducts in supply**

限界だったのに対して、他方では排気ダクトを送気モードとして使用していたことによる。

**mode.**

**The role played by each one of these factors in the magnitude of the catastrophe will be estimated only**

コンピュータによって火災の進展が再構築されるときになってようやく、この大災害で

**when the fire development will be reconstructed by calculations. This work will take several months.**

これらの要素がふるまった役割が評価されるだろう。

**The vehicles stopped a very short distances from each other. This contributed to the rapid propagation of**

車は互いにとても近い距離で停止した。これは火災がより早く広がることと有毒な煙で

**the fire and to trapping of the motorists in a toxic smoke cloud.**

運転手を閉じ込めることにつながった。

**In the tunnel, there are traffic signals every 1,200 m. They were turned to red several minutes after the**

トンネルには、1200mごとに信号がある。それらは警報後数分で赤に変わったが、

**alarm, but they did not limit the losses, either because some of them were not working or because they**

それらのいくつかが働かなかったか、それに従わなかったために（これらの信号はほとんど

**were not obeyed (these signals are hardly visible).**

見えない)、損失を抑えられなかった。

**With regard to the rescue assets of the operators, the fire configuration made the first response, which**

近づくことができない火災形状だったので、オペレータの救助利点である初期対応が

**could not come close to the fire, extremely difficult.**

たいへん難しかった。

**The analysis of the fire's circumstances brought to light numerous other factors that had or could have had**

火災状況の分析は、負の効果を持っていたか、または持っていたであろう

**a negative effect:**

他の多くの要素を明るみに引き出した。

- **The tunnel does not have a safety corridor (allowing the approach of the rescue teams or the evacuation of people in refuges).**  
トンネルは safety corridor を持っていない (救助隊が近づくためや、避難民を保護するため)。
- **The tunnel has two distinct control centers, one at the Italian portal and one at the French portal. Their coordination is not good.**  
トンネルには 1 つはイタリアの入り口にあり、もう 1 つはフランスの入り口にある 2 つの別個のコントロールセンターがある。それらの協調性は良くない。
- **The operators did not know, even approximately, the number of motorists present inside the tunnel.**  
オペレータはトンネル内のおおよそ運転手の数でさえ知らなかった。
- **The tunnel is operated by two different companies, and their actions have not always been well coordinated.**  
トンネルは 2 つの別の会社によって運転されていて、その行動はいつもあまり協調的ではない。
- **Some of the tunnel equipment, although an upgrading program started in 1990, was not at the level of those of new tunnels. This slow catch-up is due partly to disagreement between the two leasing companies on capital investments.**  
1990 年に品質を高める計画が始まっていたけれども、いくつかのトンネルの装備は新しいトンネルで段階になかった。この緩やかな改進は主要な出資を行った 2 つの賃貸会社の不一致の一部よっている。
- **The existence of the intergovernmental control commission did not change this situation.**  
政府間の調整委員会の存在ではこの状況を変えられなかった。
- **The safety requirements dating from 1985 did not apply to fires.**  
1985 年にできた安全装備では火災に対応できなかった。
- **The number of fire drills performed was completely inadequate.**  
消防訓練の回数は完全に不足していた。

- The operators' first response assets were inadequate: on the Italian side, there was a fire engine that  
オペレータの最初の行動は不適當だった：イタリア側では、消防車はあったが  
could not be used immediately for lack of qualified personnel.  
運転できる職員がいなかったのでただちに使用できなかつたろう。

Besides the analysis of circumstances surrounding the fire and the activities to implement its control, the

火災の周辺状況の分析と火災をコントロールしようとした活動に加えて、イタリアチームと

task force in close collaboration with the Italian team has proposed recommendations for the Mont Blanc

協力した特別委員会は、モンブラントンネルに対して共同レポートを考慮するように勧告した。

Tunnel that are contained in the joint report.

These will not be discussed in detail here. The following overview includes only those that are applicable

これらはここでは詳しく議論するつもりはない。以下の概観は似たようなトンネルにのみ

to similar tunnels.

適用できる。

The general goal of these recommendations is to avoid the tragic chain of events leading from a technical

これらの勧告の一般的な目標は、大災害に起こりがちな技術から発生する悲劇の連鎖を incident to a catastrophe. Their implementation will have to be adapted to the specific facilities: length,

避けることである。道路長、1車線か2車線、交通量、場所、救急センターまでの距離等が

one-way or two-way, traffic, locale, and distance from a public rescue center... It will be recalled that

決まってから安全計画をつくる必要があるだろう。モンブラントンネル火災の

interministerial task forces established after the Mont Blanc Tunnel fire are already working on these

後に設立された政府の特別委員会は、これらの勧告に基づいてすでに行動している recommendations.

ということに思い至るだろう。

1. The truck that started the Mont Blanc fire leads to the examination of means to diminish the

モンブラントンネル火災を引き起こしたトラックは、火災の内的危険を減らすための

potential risks of truck fires. This especially raises the issue of fuel tanks (type and

capacity), and

検査に送られている。ここでは特に、燃料タンク（形と容量）と牽引車の運転席や  
the materials used to build a tractor cab and refrigerated trailer. It also points to the possibility of a

冷蔵車に使われている材質の問題を挙げている。また大きな山間トンネルに入る前に、

quick truck inspection before entering large mountain tunnels.

すばやくトラックを検査するよう指摘している。

2. The truck cargo – margarine and flour – raises the issue of reexamining the hazardous cargo

マーガリンや小麦粉のトラックの荷は危険な荷物として再検査するようあげられている。

definition. It must take into consideration the caloric power and the possible smoke quantity that

可燃性の食料によって発生する熱量と煙の量を考えなければならない。

could be produced by flammable food products. This must necessarily be part of the international

これは必ず国際的な危険荷物に関する輸送法の枠組みの一部にしなければならない  
framework of hazardous cargo transit regulations.

3. An automatic incident detection system was being installed on the French side of the Mont Blanc

事故自動検知装置はモンブラントンネルのフランス側で導入された。全ての大きな Tunnel. The use of this type of installation appears necessary in all large tunnels.

トンネルにはこのタイプの装置の使用が必要なようだ。

4. The analysis carried out by the investigating task force demonstrates the need for a unified operating

特別調査委員会で行われた分析で、2つの国籍をもつ賃貸されたトンネルに対して

and investment policy for each of the binational leased tunnels. This must be accomplished by one

統一された操作と投資のための方針が必要であることが協調された。賃貸会社から operating company, a branch of the lessees.

派生する1つの操作会社によってこれは達成されるにちがいない。

5. For binational tunnels, it appears mandatory to implement a unique control center as well as an

2つの国籍をもつトンネルにとって、装備の管理を統合することと同様にその国独特の

integrated equipment management.

コントロールセンターを改善することは義務である。

6. The importance of a speedy operator response during an alarm requires a command and

control

警報中のオペレータのすばやい反応のためには、トンネル内の車の数を  
system providing continuous awareness of the number of vehicles inside the tunnel and  
ensuring that

切れ目なく知らせ、オペレータによってすばやく信頼できる初期対応が行われること  
を

quick and reliable first response be taken by the operator.

保証する命令・制御システムが必要とされる。

7. In general, the tunnel equipment and especially the electrical system must be protected from failing

一般的に、トンネル内の装備のうち特に電気装備は火災中、故障から守られなければ

during a fire. In particular, the securing of networks must allow communications inside the tunnel,

ならない。特に、ネットワークの確保は危機の時トンネル内で連絡には

indispensable during a crisis.

不可欠なものである。

8. In order to prevent motorists from parking behind the vehicle starting the fire, risking being trapped

運転手が火災の起きた場所の背後に駐車したり、煙によりトラップされて危険に

by the smoke and having their vehicle quickly engulfed in fire ("domino effect" as seen in the Mont

さらされたり、早いうちに彼らの車が火災に巻き込まれたりすること (

Blanc Tunnel), it is recommended, on the one hand, to install systems, at least in longer tunnels with

モンブラントンネルで見られたのは“ドミノ効果”)を防ぐために、ある一方では、  
no recurrent congestion, which allow spacing of moving and stopped vehicles as well as an effective

少なくとも長いトンネルには混雑が頻発しないように、装置を導入することが

stop signal system and, on the other hand, to better inform motorists in case of emergency, perhaps

薦められている。その装置とは、効果的な停止信号と車を移動と停止をさせる  
by radio.

空間(余裕)である。また他方では、非常事態時におそらくラジオによって運転手に

それを知らせることが推薦されている。

9. Faced with a fire, motorists should be able to easily find a shelter close by which is protected,

火災に直面した時、運転手はそれによって守られる装備が備わっており、目立つ、  
近くの

equipped, and clearly marked. Information on these rescue installations must be made available to

避難所を容易に見つけることができるべきだ。これらの避難装置の情報は前もって  
the motorists in advance. If possible, these installations must be linked to an evacuation  
corridor. In

運転手が利用できるようにすべきだ。可能なら、これらの装置は避難廊下とつなげ  
ておく

general, it is worth looking at the interior architecture and finishes of tunnels.

べきだ。一般的に、内部構造物とトンネルの仕上がりを見ることに価値がある。

10. The operator must organize a first rescue service which is identical at each portal, allowing  
around-

オペレータは同一のそれぞれの入り口に対して、3人から5人のチームで24時間中、  
the-clock response by a team of three to five, led by a professional firefighter and capable  
of

専門の消防士を導き、警報時の最初の5分間に反応できる初期避難対応を  
responding in the first five minutes of an alarm.

認識しなければならない。

11. An internal safety plan must be developed by the sole operator, based on a safety study.  
For

内部の安全計画は安全研究に基づいて、1人のオペレータによって開発されなけれ  
ば

binational tunnels, the internal safety plan will consist of bilingual flash cards. It will  
provide for the

ならない。2つの国籍をもつトンネルでは、内部の安全計画を2ヶ国語でかかれた  
alarm conditions for public agencies, the formation of rescue teams, and the activities to  
be

短いプログラムで認識するだろう。公的な人たちに対する警報、救助隊の形態や  
conducted.

その指揮による行動の情報が送られるだろう。

12. A unified public rescue plan must also be developed for binational tunnels. These plans  
must

2つの国籍をもつトンネル用に統一された一般的な救助計画が開発されなければな  
らない。

require at least one annual drill and clarify the principle of unified command and control:  
the public

これらの計画には少なくとも年1回の訓練が必要であり、統一された命令と

authority having jurisdiction. In general, the stringent requirements of firefighter  
activities in a

コントロールの目的を明らかにしなければならない：管轄権を持っている公共事業  
機関。

confined environment, such as a tunnel, demand specialized training and recruitment  
efforts.

一般的に、トンネルのような限定された環境での、消防活動への厳格な必要条件は  
特別な訓練と補強の努力である。

13. For binational tunnels, the intergovernmental control commissions must have real legal powers, i.e.,

2つの国籍からなるトンネルでは、内部調整機関は法的な力を持たなければならない。

their composition must be stable and especially be supported by a technical safety committee

例えば、それらの組織は安定的であり、特に一般人の保護と安全というトンネルの consisting of technical local and headquarters staff, competent in subjects of tunnels, civil defense

主題に対して適任な職員を、支社と本社から集めた技術安全委員会によって支援 and safety. This committee must be able to query the operators, to review the need for safety

されなければならない。この委員会は安全調査での必要事項を再審査するためと、 investments, to control the organization and the equipment of rescue teams, and to report to control

救助隊の組織と装備を調整するため、そして調整委員会に報告するためにオペレータに

commissions.

質問できるようにしなければならない。

14. For tunnels that are not binational, it will be worthwhile to implement the legal basis allowing

国内を通るトンネルでは、建設と運転以前に法的な基準を満たすことが必要になるだろう。

control before construction and operation. For important tunnels and following safety studies and

重要なトンネル、安全研究、そして交通レベルの進展に関する文章には

traffic level evolution, the documents must require the organization of a first response service at each

それぞれの部門で、初期避難サービスを組織的に記しておかなければならない。

end. In all cases, it will be mandatory to develop an internal safety plan.

すべての場合で、内部安全計画を開発することは義務になるだろう。



# トンネル火災事故の分析と対策 The Analysis and Preparation of Tunnel Fire

辻本誠研究室 西村和也

## 1. はじめに

20世紀に登場し社会に欠かせない存在となった自動車だが、その存在は人間に移動の便利さだけを与えるものではなく災害も運んでくる。交通事故を除いて自動車と密接な関係のある災害として火災があり、自動車火災は年間約8000件発生している。これを自動車の走行kmで出火率にしてみると図1に示されるように、約20年間一定である。火災率が最も高かった1992年で1.48件/億台km、最も低かった1987年で1.18件/億台kmである。このような状況下で地下空間の有効利用促進を掲げて都市圏での大深度地下トンネルの建設も計画されている。本論では車両の大型化、増大する交通量、運搬物の多様化によって、今後ますます火災の危険が高まると考えられる地下トンネルの安全対策、主にその煙制御について考える。

## 2. 煙対策の重要性

図2は全火災を対象とした1992年～2001年に発生した火災において、放火自殺者を除いた火災による死因別死者発生状況である。図2より、一酸化炭素中毒・窒息、火傷、打撲・骨折はここ10年で死因割合は変わっていない。阪神大震災のあった1995年は死因不明の人が急増したが、その年以外は火災による一酸化炭素中毒・窒息死は常に4割を占めている。このことはトンネル火災においても煙対策が重要であることを視わせる。

そこで、近年多くの一酸化炭素中毒による死者を出したモンブラントンネル火災を例に問題点を分析した。

## 3. モンブラントンネル火災<sup>3)</sup>

### (1) モンブラントンネル

フランスからイタリアにまたがるトンネルで長さ11600m(図3)。そのうち仏領土は7640m、伊領土は3960mであるのに対し、仏側操作・監視範囲は5800m、伊側も同じ。フランス側の入り口は標高1274m、イタリア側の入り口は標高1381mである。断面積は約40m<sup>2</sup>で換気方式は局所排気付送気半横流式である(図4)。

### (2) 火災概要

1999年3月24日10:53にマーガリン9tonと小麦粉12tonを積んだ冷凍車が仏側入り口から約6kmの地点で燃え始め、この火災は3月26日16:00まで続いた。延焼した車両34台、死者39名を出し、その大半が一酸化炭素中毒によるものである。

### (3) 煙流動性状の推定

文3)記載の推定値から火災発熱量Qを100MWとし、  
 ①機械換気等が無い場合の流れが開水路流れ、管路流れのどちらになるかの検討(壁面への熱損失を含む)。  
 ②通常時換気状態での流れの分析(アルプス前後でのフェーン現象の影響を含む)。  
 ③上記①②の合成で何が不都合だったか、どのような対策がありえるかの手順で分析した。

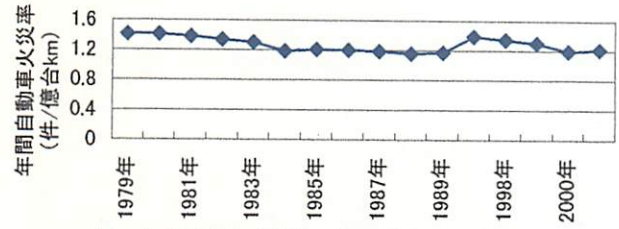


図1 年間自動車火災率の推移(件/億台km)<sup>1)2)</sup>

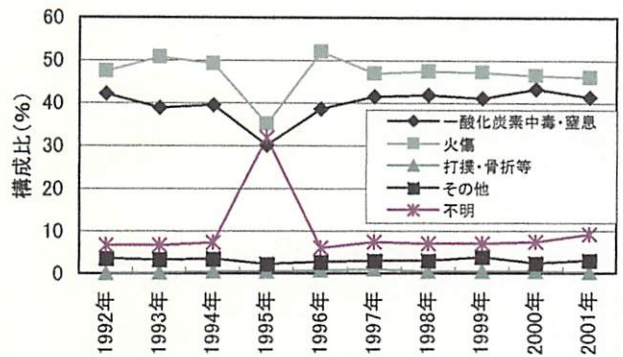


図2 火災による死因別死者発生状況の推移

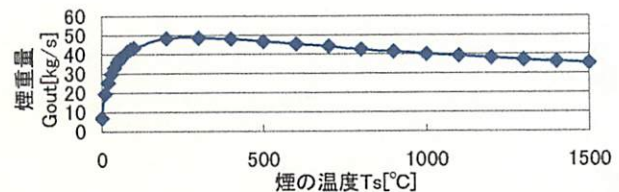
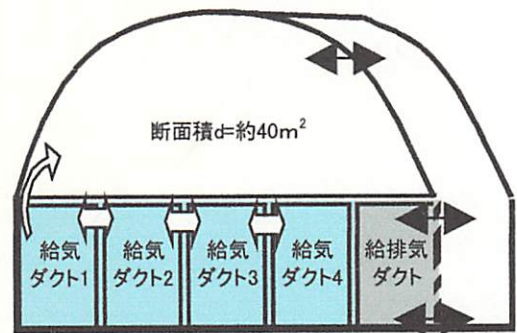
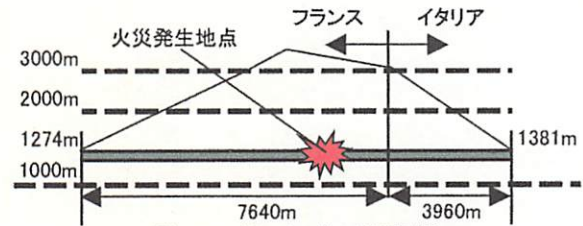


図5 トンネル出口での煙の温度と煙量の関係



①開水路流れ、管路流れの検討—境界条件：Fr\*<sup>2</sup>=1、また暫定でL=3mとする<sup>4)</sup>。これはもし二層流（開水路流れ）になるとすれば、トンネルを長方形と模式化して考えて煙と下部の流入する空気の流れで半分ずつになると考えるのが妥当なため。この条件で開口部での空気量を求める式<sup>5)</sup>に以下のものがある。

$$G_{out} = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\gamma_s(\gamma_{out} - \gamma_s)} (L)^{\frac{3}{2}} \quad [\text{kg/s}] \quad (\text{式1}), \text{このとき, } G_{out} :$$

出口での煙重量[kg/s]、 $\alpha$ ：流量係数、B：トンネルの幅7m、g：重力加速度9.8[m/s<sup>2</sup>]、 $\gamma_s$ ：トンネル内空気(煙)の比重量[kg/m<sup>3</sup>]、 $\gamma_{out}$ ：トンネル外空気の比重量1.3kg/m<sup>3</sup>、L：代表長さ(ここでは煙層厚さ)3m、流量係数について $\alpha=1/\zeta$ 、 $\zeta$ ：抵抗係数、単純な開口では $\zeta$ は約2なので $\alpha=0.7$ 、トンネル内空気(煙)の比重量 $\gamma_s=353/(273+T_s)$ 、 $T_s$ ：煙の温度[°C]。よって煙の温度と煙重量の関係は図5のようになる。また火源における煙量には、熱プ

$$\text{ームの基礎式：} Z=Z_1+\sqrt{A}, V_s=0.225 \left( \frac{gQ \times 10^3}{\gamma_m C_p T_m} \right)^{\frac{1}{3}} Z^{\frac{5}{3}} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (\text{式2})$$

を用いた。 $\gamma_{in}$ ：トンネル内空気の比重量=1.3[kg/m<sup>3</sup>]、 $C_p$ ：空気(煙)の定圧比熱1[kJ/kg·K]、 $T_{in}$ ：トンネル内空気の温度=20[°C]として、トラックが燃えたので火源面積A=36m<sup>2</sup>、 $Z_1=L=3\text{m}$ より仮想点熱源の条件も考慮してZ=12mとなり、おおよそトンネル中央にある火源からは200m<sup>3</sup>/sの煙が発生する。煙温度は火源から煙への熱伝達を考慮して、 $\Delta\theta=Q_0/(V_s \times \gamma_{s0} \times C_p)$ (式3)(ただし、 $\gamma_{s0}$ ：トンネル中央での煙の比重量=353/(273+20+ $\Delta\theta$ )[kg/m<sup>3</sup>](式4)、 $\Delta\theta$ ：煙の温度上昇[°C]、 $Q_0$ ：発熱量の対流成分。対流成分：放射成分=1：1となると考え、 $Q_0=Q/2$ ただし、 $Q=50$ )より、 $\Delta\theta=712$ °C。また、中央での煙重量G=70.2kg/s

二層流により煙が混合しないでトンネル中央から出口まで到達するとすると煙重量G<sub>out</sub>=70.2kg/s。ここで片側の出口のみを考えて、図5よりG<sub>out</sub>=35.1kg/sとなる煙の温度は2種類ある。1つ目は約1500°Cのときであるがこれは通常考えられない。2つ目は約50°Cの時でのときの流出熱量Q<sub>out</sub>はG<sub>out</sub>×C<sub>p</sub>×(50°C-外気温0°C)=1.8MW。トンネル片側で考えた時、中央で煙がもつ熱量は25MWで、23.2MW以上が火源からトンネル端までの間に壁面に吸収されるような条件であれば、煙は二層流にならずトンネル全体に充満して流れることとなる。煙に接するトンネルの表面積は煙層厚さを3mとすると7.54×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>であるので、表面熱伝達率を0.024kW/m<sup>2</sup>·Kとすれば、平均の煙層と壁面の温度差12.8Kが遷移値である。煙の平均温度が300°C、トンネル壁面の初期温度が0°Cとして、火災が盛期に入ってから数十分程度は温度差が遷移値より大きいと判断されるので、煙は二層流とならずトンネル全体に充満して流れていたと推定される。

②流れの分析—トンネル内への給排気量は通常時にいくつかのモードで測定されている。V<sub>n</sub>：n地点での換気風量[m<sup>3</sup>/s]、L<sub>n</sub>：n地点でのトンネル長[m]、 $\lambda$ ：摩擦抵抗係数として、

$$\frac{\gamma_m}{2g} \left( \frac{V_{n,出口}}{d} \right)^2 \pm \sum \frac{\lambda L_n \gamma_m}{2dg} \left( \frac{V_n}{d} \right)^2 - \frac{\gamma_m}{2g} \left( \frac{V_{n,入口}}{d} \right)^2 = 0 \quad (\text{式5}) \quad \text{の式6)}$$

を用い、各断面の流速(①より断面方向に分布がないと仮定)を計算した(ただし、ダクト径≪トンネル径より合流抵抗は無視し

た)。図6、図8、図9はそれぞれ火災の発生を考慮せずに2つの換気モード(図6：通常換気モード、図8：火災盛期に運転された換気モード、図9：図8にフェーン現象の影響を加えたもの)でのトンネル内の空気の流れを計算したものである。図7、図10はそれぞれの換気モードで火災時に測定されたトンネル内の空気の流れである。

③上記の①②をふまえた分析—図6、図7および図8、図9の比較から、火災の発生(100MW：自動車1台の発熱量が約3MWであり、30台が燃えたのに等しい火災)によっても換気の全体系にはほとんど影響がないことがわかる。ゆえに、通常時の換気状態を丁寧に観測することで、トンネル内の煙制御が可能となると判断される(火災盛期における換気流量は文献3で断面風速に整合するよう修正し伊側の風量を図6と同様であるとした)。

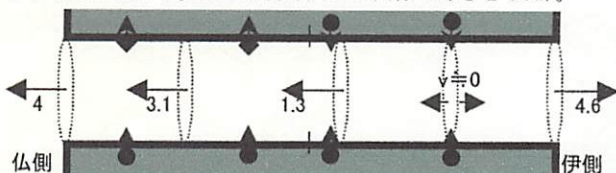


図6 通常時および火災初期の換気モードでの風速[m/s](フェーン現象の影響は考えていない推定値)

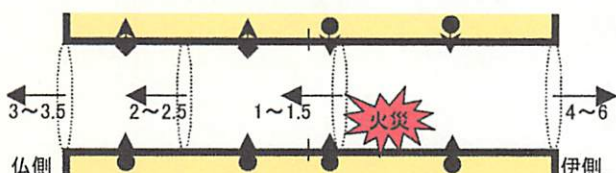


図7 火災初期の換気モードでの風速[m/s](フェーン現象の発生していた事故当日の実測値)

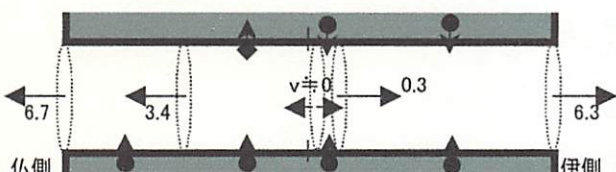


図8 火災盛期の換気モードでの風速[m/s](イタリア側のファン切り替えはなかったと考え、フェーン現象の影響のない推定値)

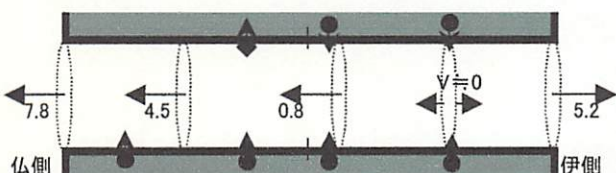


図9 火災盛期の換気モードでの風速[m/s](イタリア側のファン切り替えはなかったと考え、フェーン現象の影響の入った推定値)

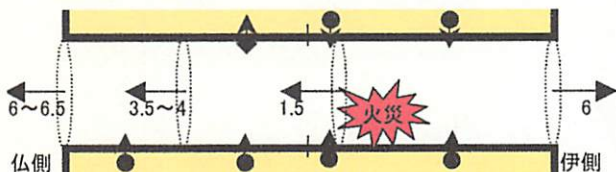


図10 火災盛期の換気モードでの風速[m/s](フェーン現象が発生していた事故当日の実測値)

◆ 排気    ▲ 給気    ↑ 風速

(参考文献)

- 1)消防白書、1980～2002年版
- 2)交通安全白書、1980～2002年版
- 3)Sergiu.F.Luchian:TASK FORCE FOR TECHNICAL INVESTIGATION OF THE 24 MARCH 1999 FIRE IN THE MONT BLANC VEHICULAR TUNNEL Report of 30 June 1999, 2003
- 4)橋東一郎：水理学Ⅰ、森北出版、1973
- 5)(財)日本建築センター：排煙設備技術基準、新日本法規、1975
- 6)石原正雄：建築換気設計、朝倉書店、1969