

## 「日・欧の高速鉄道と超長大鉄道トンネルについての視点」

太田 義和 （武蔵工業大学 昭和42年卒）



### 略歴

1967年 武蔵工業大学(現東京都市大学)工学部土木工学科卒業

現在 太田技術事務所(OTA Engineering) を設立。

以来業務の大半を海外(欧州および東南アジア)の道路トンネル計画に従事。

- ・日本トンネル技術協会 ITA(国際トンネル地下空間協会)対応幹事会顧問
- ・オーストリアグラーツ工科大学機械工学科国際科学委員会委員
- ・ノルウェートンネル協会(NFF)国際科学技術委員(2017年度まで)

### 1初めに

前回の緑土会投稿原稿は2016年11月“超ガラパゴス化が進む日本の高速道路トンネルの安全性”についてでした。今回は鉄道トンネルについて日本と欧州との最善技術についての相違を概括的に記述したいと思います。

私の関係するアジア諸国、欧州でのコンサルタント業界では道路、鉄道の垣根はありません。そんな訳で、海外での私は「交通トンネルコンサルタント」として扱われています。このような前提で本文をご笑読いただけたら幸いです。

前回の原稿でも申し上げました通り、最善技術に到達する過程では関係する技術対象、国土の地理的条件、社会経済、国民性等、すべての条件が複雑に絡んで最善策に到達いたします。私が海外で関係する道路、鉄道トンネルでは「安全」、「人的要素」、「陸上」、「国境」がキーワードでしょう。

日本においてもこれら道路・鉄道のような純国内施設は行政組織、文化、日本人の性格などが色濃く反映される一方、国際空港、国際港湾施設のように日本の領域に航空機、船舶のような外国国籍の輸送施設がアクセスするような施設の設計コンセプトは、ほぼ強制的に国際規格に準拠することが要求されます。このことが結果として純国内施設と国際共通施設との姿・形の違いになって表れます。

本稿では近年話題の多い世界最長の鉄道トンネルの開通、青函トンネル新幹線開業等、世界と日本の高速鉄道について一般的かつ特徴的に記述したいと思います。

## 2 過去の代表的な大規模鉄道事故

### 2.1 北陸トンネル列車火災

#### 1)概要

- ・1972年 11 月 6 日 火災検知
- ・単線トンネル延長 13、870km。在来工法による施工
- ・列車は南坑口から 5、3KM 内部で停止
- ・列車は17両連結、全長 316m
- ・電気機関車 EF7062 型 による牽引。
- ・犠牲者 30名内1名は客室乗務員
- ・負傷者 714名

#### 2) 火災事故からの教訓

- ・客車には木材、織物など可燃物が使用されていた
- ・列車は当時の国鉄の運転規則に基づいて列車火災時には「トンネル内で停止」することとなっていた。
- ・当時の火災対策として消火設備、換気装置等が設置されていなかった。
- ・無線通信設備は設置されておらずトンネル側壁に 300m間隔で有線非常電話が設置されていたのみであった。



図1 火災事故車両と同型の EF7062 型電気機関車<sup>1)</sup>

火災当日私は北陸自動車道、日野トンネルの設計業務で武生市に滞在しており、現地に足止めされ数日間帰京できませんでした。その後この単線の北陸トンネルは軌道が撤去され地方道として再利用されました。

一方で北陸本線はルート変更され複線として新設され現在に至っております。

私は廃線後にトンネル内を徒歩で通行いたしました。路線バス一台がやっと通行できる狭小な空間であったと記憶しています。火災時には狭小なトンネル坑内は極端な高温と高煤煙濃度に達したと想像できます。図2に示す通り多くの犠牲者は高温と煤煙による気道損傷が原因であると想定されます。

この大惨事の教訓から当時の国鉄では列車の安全運航について大きな改革を実行いたします。

✓ 車両の不燃化、難燃化への技術開発の取り組み

✓ 運転規則書の見直しと運行係員の再教育

これらに関連し1972年－73年において鉄道技術研究所では猿峠隧道において実大列車火災実験を実施しました。これは世界初の実大列車実験となりました。この結果、

✓ 従来、トンネル内での火災発生時には列車を緊急停止させていたのを大転換し、火災状況のまま列車を明かり区間まで走行させることとしたのです。

✓



図2 鎮火後トンネル坑外まで牽引された列車内から救出される犠牲者<sup>2)</sup>

図3は最も高温に達したと思われる火災発生源となった食堂車の車体の状況と思われれます。鋼製車体の大きな特徴として天井部分が高熱で陥没状態となっているのが容易に確認できます。一般に鋼材は常温状態の初期強度を100%とした場合約600℃に達するとほぼ0%になってしまいます。この現象は後述するノルウエー、レツパフィヨルドトンネルでの実大列車火災実験の結果と見事に符合します。したがって北陸トンネル火災、ノルウエーでの実大トンネル火災ともに車両天井部の温度は600℃以上には達して

いたものと推定できます。



図3 保線区に搬出された車両<sup>2)</sup>

## 2.2 オーストリア、カプラン村、キッツシュタインホルンケーブルカー火災<sup>3)</sup>

2000年11月11日、オーストリア、ザルツブルグ郊外、カプラン村、キッツシュタインホルン峰中腹の氷河地帯へ向かうケーブルカーで悲惨な火災事故が発生いたしました。このケーブルカーは全長 3,900mの内、急勾配の延長 3.3Km（平均勾配 42.8%、再急勾配 50%）のトンネルを含む欧州でも有数のスキーリゾート地です。この火災で乗客全員167名の内12名が生存し155名が犠牲者となる大惨事となりました。出発地点は海拔、標高 911m、到達地点は 2,466mであります。犠牲者155名ではオーストリア人を除いてドイツ人37名、次いで10名の日本人スキーヤーも含まれています。当時日本でも大きく報道され責任の所在と補償に対して各国の被害者遺族から訴訟が相次ぎ最近まで裁判が続いていました。

この車両は山頂部の機械室でのエンジン駆動によりワイヤーで牽引する方式で車体には燃料、駆動装置は搭載されておらず、電気暖房装置と非常電話のケーブルが敷設されているのみです。最後(底)尾車両部に低電圧電気式暖房機がありそのためのケーブルが設置されているのみでありました。図4にケーブルカー概要図を示します。

火災の主たる原因は清掃等維持管理の不十分さによる乗客の衣服、雪山道具による埃等の車両内への累積、が車両最後部の電気ヒーターに着火したとするのが最有力とされています。加えて車輪軸受部等への残存グリースなどへの着火も原因と考えられています。

この事故の約6か月後、国際トンネル協会(ITA)トンネル耐火構造作業部会(WG5)で私が暫定的にこの事故の解析を担当することとなり部会にレポートを提出したことを覚えております。

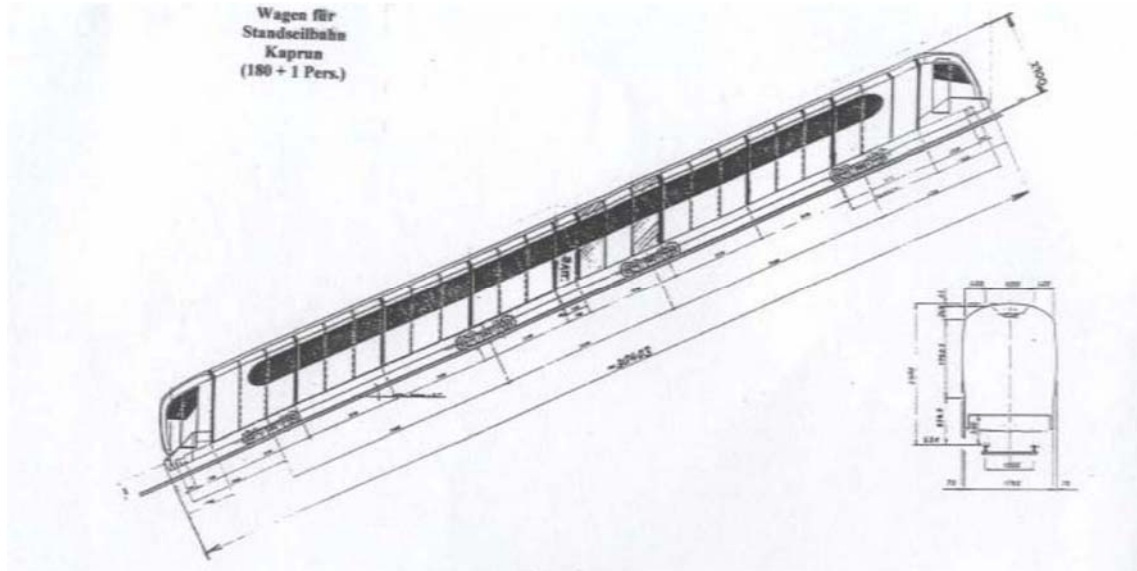


図4 ケーブルカー概要図

図5は トンネル区間の標準断面となります。トンネル径 3.4m 側道約 70cm。

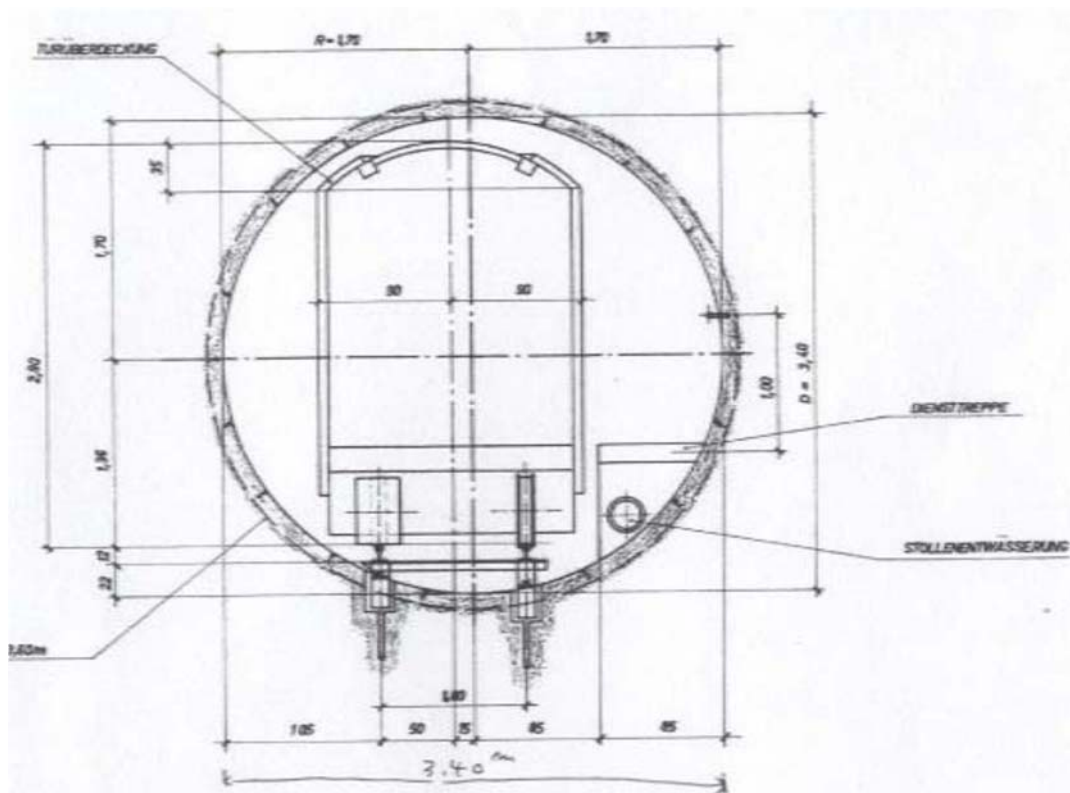


図5 トンネル区間の標準断面



図6 トンネル内の状況、鎮火後の内部 →

トンネル内は階段の側道があるものの非常に狭く可燃物が(最後尾電気ヒーター付近から)着火すれば火煙はごく短時間に車体全体を覆うように拡散する筈です。加えて牽引式のため車体は軽量化のためアルミニウム合金で作られていました。車両は図6(右)に示す通り消(焼)失してしまつて火源の特定も困難な状況に陥ってしまいました。アルミニウム合金の融解温度は 660°Cですし、焼損物の判定もつかず、遺体の確認も困難を極め DNA 鑑定にたよらざるを得ない状況になりました。このようなことから坑内温度は1000°Cには達していたものと推定されます。加えて、車両の窓にはアクリルガラスが用いられていたのも要因の一つに考えられます。現在のウインタースポーツ用ウェア、登山用具、スキー板、スノーボード板等全てが石油関連製品といつても過言ではありません。即ち、酷な表現かもしれませんが、乗客の所有物である「容易に着火する可燃物」を搭載し、満員の乗客を載せて氷河のスキー場へ向かっていた状況でした。

図7 ケーブルカー再開(2002年10月)

この事故以降、乗客の所持品、搭載貨物などが列車事故の安全計画における「熱出力」の設定に大きな影響を与えることとなり、計算条件に加わることになりました。



### 2.3 英仏海峡トンネル(ユーロトンネル)鉄道火災<sup>4)</sup>

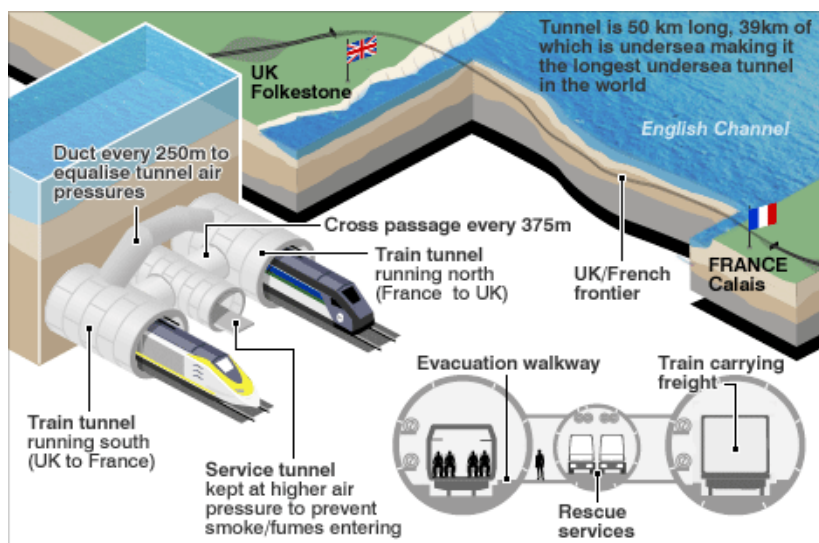


図8 ユーロトンネル概要図<sup>4)</sup>

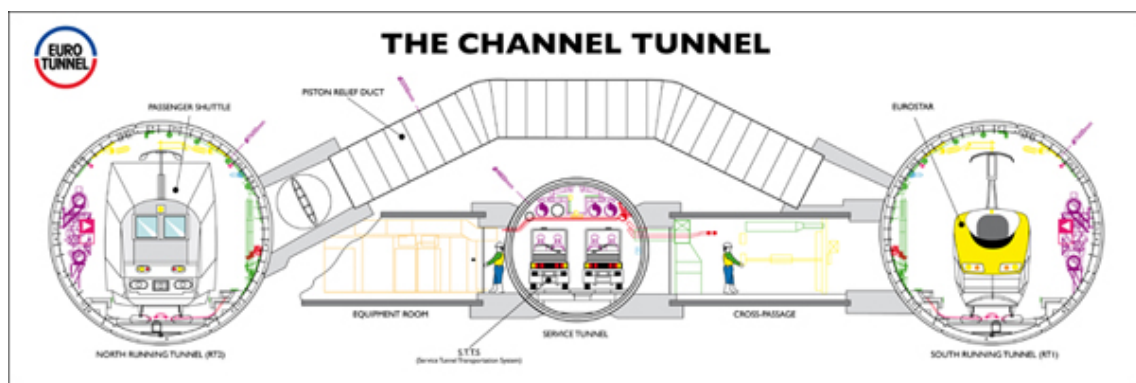


図9 ユーロトンネル標準横断図<sup>4)</sup>



図10 トンネル内部



図11 火災による躯体損傷<sup>5)</sup>

ユーロトンネルは TBM で施工された海底区間 38Km,全長 50Km の双設、単線鉄道トンネルで、中央部に避難、サービストンネル、天井部には列車走行によって生ずる強大な空気流(ピストン風)を反対側トンネルに迂回させ、列車の走行抵抗の低減を図るレリーフダクトが装備されている(図9)のが特徴です。このトンネルはレリーフダクトの設置をもつてしても列車空間断面積に対する車両断面積(占積率)が大きく、高速走行に伴う空気抵抗は強大で結果として走行速度は最高 160km/hrが上限とされています(ユーロトンネル技術者談)。

このトンネルでは1994年に開業以来4回の火災事故が発生しています。2008年に起きたトンネル火災では死者は出ませんでした。32名の乗客が避難を余儀なくされ14名の乗客が負傷しました<sup>5)</sup>。火災の発生は列車に搭載された貨物自動車からのものですが、熱源から壁面までの距離が近く高熱によりトンネル覆工構造は大きな損傷を受け、その上煙濃度も高濃度に達したものと想像できます。

加えて排煙制御を含むトンネル構造が複雑で計画通りに機能しなかったこともあります。

### 3 列車火災に関する近年の実大実験

#### 3.1 EUREKA 火災実験<sup>6)</sup>

欧州各国では交通トンネルの長大化と輸送量の増大に鑑みて、EU 政府で地下空間の安全計画に関する非常に大規模な研究が加盟各国の分担で活発に行われるようになりました(EUREKA 計画)EUREKA 計画では鉄道車両および各種自動車の実大火災実験を鉄道廃線となったノルウエーのレツパフィヨルドトンネル(単線)で実施されました。実験項目は多岐にわたり約2年をかけた解析の結果は多くの国々のトンネル安全設計に大いに役立ちました。

実験は列車、自動車共に各車種別の坑内最高温度、発煙量及び最高濃度、発生熱量、最高熱出力等多岐にわたります。

図12に示す実験に用いられた車両は非常に旧型で内装に木材、可燃性繊維などが用いられているため火災発生時の最高温度、火煙の発生量は現在の車両に比べて大きく見積もられています。しかしながらこのEUREKA 実験では危険物積載ではない普通貨物列車の実大火災実験<sup>\*</sup>、乗客の手荷物を含む火災実験が含まれていなかったため、更なる火災実験が北欧諸国において実施されることになりました。

\* )但し、貨物火災実験は大型トレーラートラック火災実験で代替。



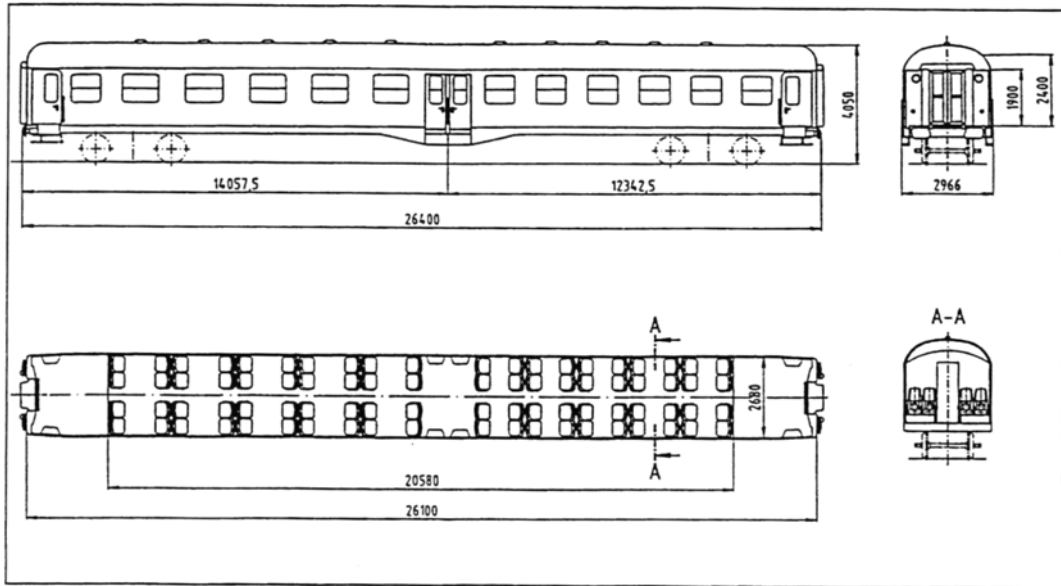


図12 火災実験用列車構造<sup>6)</sup>

図13は火災実験後の車両内部の様子、図14はトンネル坑外に引き出された車両の外観です。金属部分を除き、木製部、繊維部分は焼滅しています。焼損後の車両は図3に示しました北陸トンネル火災の車両と同様に火元付近の天井部が陥没しています。



図13 火災実験後の車両内部<sup>6)</sup>



図14 火災実験後車両外観<sup>6)</sup>(北陸トンネル火災車両に酷似)

### 3.2 スウェーデン火災科学研究所(SP)による火災実験<sup>7)</sup>

EUREKA 火災実験では実験トンネル内は自然換気で燃焼に必要な酸素の供給は熱対流に依存しておりました。加えて客車内の内装に難燃材料が使用されるようになったことと乗客の荷物、衣類等の燃焼も無視できなくなりました。さらに火源の位置を車両下部の電気系統からの出火を想定したことが特徴的です。このため国際的に火災研究に関する技術評価の高いスウェーデン SP で再度実大トンネル列車火災実験が実施されました。



図15 実験車両<sup>7)</sup>

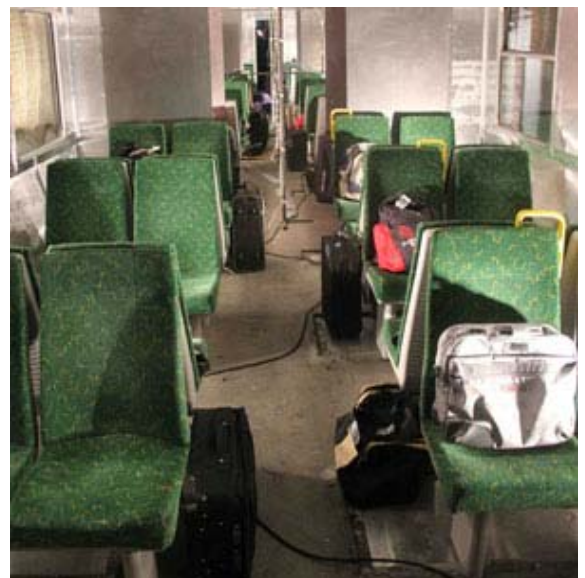


図16 火災前内部<sup>7)</sup>



図 17 火災後の内部<sup>7)</sup>

さらに今後の長大トンネルは機械換気装置(排煙装置)の設置(日本では青函トンネルに換気装置が設置)が見込まれることから機械換気装置が導入されました。

火災発生時の強制換気(排気)風量は避難環境の確保の重要な要素である反面、酸素供給過多による燃焼促進(温度上昇)、一方で酸素供給不足(不完全燃焼)での黒煙の増加等、二律相反の要素があるため、適切な風速の設定は火災規模との関係において重要な設計要素となっています。このため、新鮮空気供給量と煙発生量、熱出力との関係についての調査のため移動式換気設備が導入されました。



図18 換気装置<sup>7)</sup>

これらの実験結果として、旅客鉄道火災規模は道路トンネルにおける大型貨物火災よ

り熱出力は遥かに小さいことと、事故確率も低い事です。しかしながら事故を無視することはできません。

#### 4 日本新幹線(高速鉄道)と長大鉄道トンネル

##### 4.1 日本的高速鉄道(新幹線)と欧州高速鉄道トンネル

日本の新幹線と欧州の鉄道網および交通計画とは大きな違いがあります。

即ち欧州の鉄道網は、

- 国境を跨ぐ国際ネットワークとなっている。
- 貨物輸送が主力である。
- 国際間移動の旅客が多く手荷物等が多い。
- 同一軌道を多国籍の列車が運行される。
- 車両本体と輸送施設の所有者が異なり各々法的拘束力を持っている
- 同一軌道(標準軌)を高速旅客列車と貨物列車で100km/H以上の速度差をもって運行される。
- 原則24時間運行である。
- EU政府として列車規格、交通管制、等各国共通の規格を整備している。
- 欧州の鉄道関係者は列車事故の可能性を高く見積もっている。

現在の日本はJR各社が独立した企業体ではあっても、一国、一省庁の監督下で行政的に統一されています。このような形態の高速鉄道は日本以外にありません。したがって欧州の路線の持つ特徴は日本と対極にあるものと言えます。

表1 世界的高速鉄道トンネル<sup>8)</sup>

No	路線	トンネル名	延長(Km)	備考
1	ALP Transit	Gotthard base	57.1	スイス 単線 双設
2	オーストリアー イタリア	Brennar base	55.4	単線 双設 2029年開通 予定
3	JR 北海道	津軽海峡線(青函)	53.9	複線 単設
4	スペイン国鉄	MondAmbin base	52.1	単線 双設 計画
5	英仏海峡	Euro tunnel	50.5	単線 双設 1994年
6	スイス国鉄	Lotchberg base	34.6	単線 双設 施工中
7	オーストリア国鉄	Koralmb	32.8	単線 双設 施工中 2022年
8	スペイン国鉄	Guadarrama	28.4	単線 双設 施工中
9	JR 東日本	八甲田	26.5	複線 単設 2010年
10	JR 東日本	岩手一戸	25.2	複線 単設 2002年

表 1 における世界のトンネルベストテンで青函トンネルを含む日本の3か所の複線単設トンネルを除きすべて単線双設トンネルです。

現在運行中の、フランス TGV、英仏海峡ユーロスター、ドイツ ICE の路線においては貨物輸送が中心で高速旅客鉄道は貨物列車の運行ダイヤの隙間に運行されているのが実態です。これは計画中を含むトンネルでも同様の背景と思われます。

青函トンネル以外では標準軌で同一軌道上を高速鉄道と貨物列車が併用します。即ち前述の社会、文化、地理的条件の相違によって結果が異なってくるのです。終戦後青函トンネル計画の初期的段階においても高速列車(弾丸列車)計画は構想として存在していたようですが具体化には至りませんでした。1964年東京オリンピックを契機として東海道新幹線が開業いたしました。

開業当初、列車がトンネルに侵入の瞬間の空気騒音、あるいは車両内での気圧変化による不快感(耳ツン現象)等が問題化いたしました。周辺環境、車両の改善などが1970年代に入ってから、積極的な研究で改善され、車両の軽量化と高剛性化、換気ダクトダンパの改良などによって現在の新幹線の快適性は世界最高水準になりました。

同様の研究は狭小、単断面で計画された英仏海峡トンネルにおいてもスコットランド、ダンディー大学を中心として積極的に研究され、1980年代の初頭の国際会議では、日本と英国とで研究成果が競うように講演が行われました。

総合的に計画された英仏海峡トンネル構造におけるユーロスターの最高速度は160Km/H が限界で、この理由として大きなピストン効果による空気抵抗が最大の要因であると当時の技術者から伺いました。

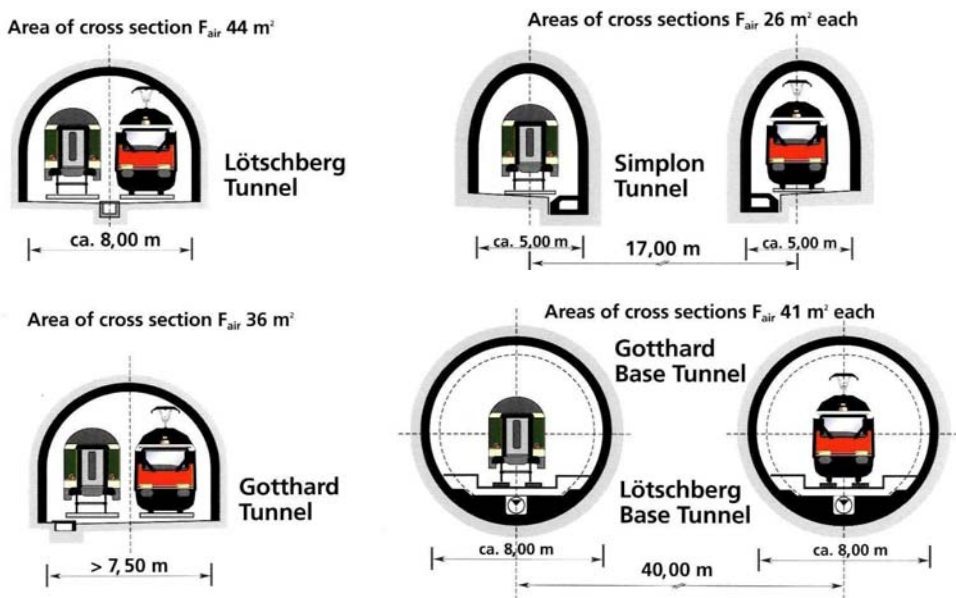


図 19 スイスの長大鉄道トンネルの変遷<sup>9)</sup>

図19に示す通りスイスの長大鉄道トンネルを例にとれば1980年代までに建設されたトンネルは日本と同じ複線単設トンネルでした。しかしながら1990年代に入り、高速鉄道トンネルが具体化してくると、同一軌道上における主体的な貨物列車輸送と、その間を割って運行される高速旅客鉄道の大きな運行速度差によって生じる事故発生に対する安全性の観点から、1993年、スイス連邦建設局では単線双設トンネルで建設することに決定いたしました<sup>9)</sup>。スイス連邦鉄道当局ではおよび欧州鉄道網では貨客併用鉄道に対してトンネル延長10KMを超える高速鉄道における複線単設トンネルの建設は現在認めておりません<sup>15)</sup>。

## 4.2 日本の高速鉄道における安全性



図20 新幹線車両の代表例<sup>10)</sup>

図20は種々の新幹線車両ですがこのように多様な鉄道車両が同一国内規格(JR規格)で製造、運用されるような事例は他国にはありません。日本の長大鉄道トンネルではトンネル構造体に付随する安全対策については、1964年の新幹線開業以来、運行速度の向上、安全性の確保、乗客の快適性等、「輸送システムとしての安全対策は輸送車両への飽くなき改善」によってなされています。これは国鉄時代から現代にいたるまでである意味徹底した思想で貫かれており、東北新幹線八甲田トンネルをはじめとする日本の長大鉄道トンネルには青函トンネルを除いて、欧州のトンネルにみられるような大規模な安全施設は設置されていません。このコンセプトは、鉄道関係者、トンネル技術者、鉄道利用者に広く認知されている実態であり、社会的に疑う余地はありません。

このコンセプトに関する欧州との明確な違いが結果的に構造物、車体、列車管制システムの統合的な違いとなっています。

## 4.3 青函トンネル（JR北海道、津軽海峡線）

図21に青函トンネルの構造概要、図22に内部空間の状況を示します。青函トンネル

に関しましては多くの書籍が発行されていますので細部は省略いたしますが、計画自体は戦前1930年代に始まり、戦後1954年の海峡連絡船洞爺丸沈没事故を契機に調査、研究が加速され幾多の困難を乗り越え1988年3月に開通しました。

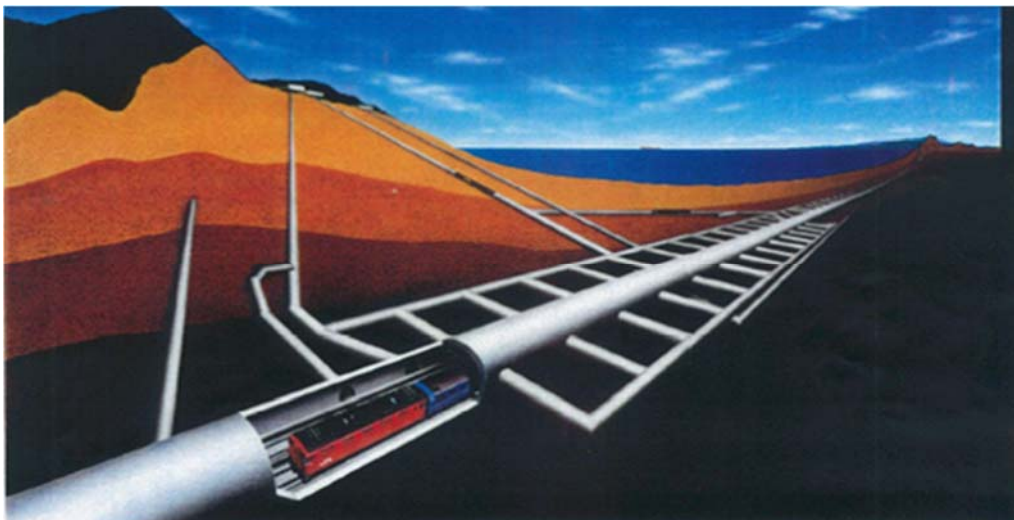


図21 青函トンネル概要<sup>11)</sup>

青函トンネルは狭軌、と標準軌を併設する3線方式の複線で高速旅客鉄道と在来線貨物を走行させます。この方式は山形新幹線、秋田新幹線にも部分採用されております。



図 22 青函トンネル内部(3線軌条方式)<sup>12)</sup>

図22の通り進行方向右側に見える外側のレールが新幹線用のレールとなります。

複線断面における高速鉄道との対面通行方式の場合、トンネル内で両方の列車のすれ違い時に発生する風圧によって、貨物列車に生ずるローリングによって、コンテナ等貨物列車積載物の荷崩れ、最悪の場合には脱線等の重大事故が懸念されます。

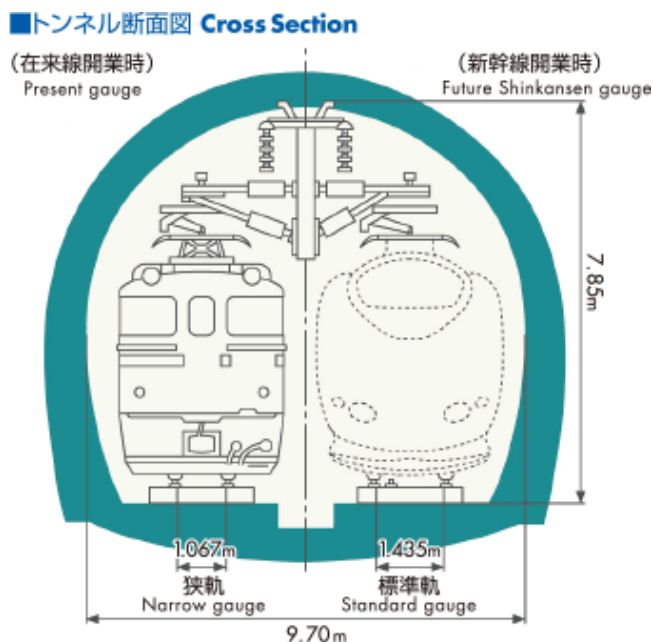


図23(A) 青函トンネル標準断面<sup>11)</sup>

図23に示しますように青函トンネルは列車空間断面積と通過車両の前面投影面積の占める占積率が非常に大きく、車体側面とトンネル側壁との距離は 1m未満です。このことが非常に大きな風圧を列車車体(特にコンテナ)に生じさせる要因で新幹線の運行速度を 140Km/H に設定せざるを得ませんでした。

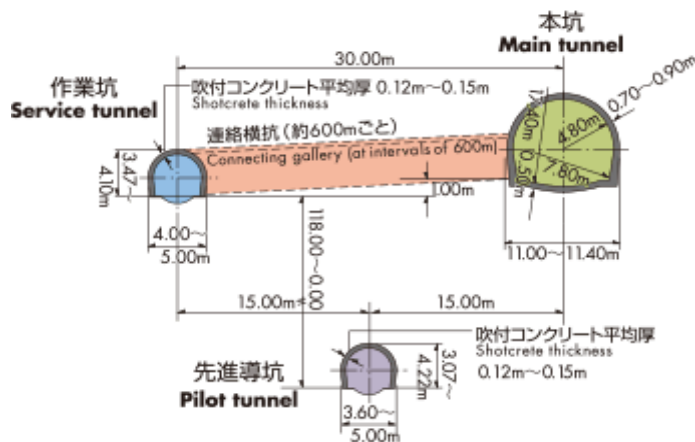


図 23(B) 青函トンネル標準断面(本線と連絡坑)<sup>11)</sup>

青函トンネルおよび世界の鉄道トンネルに関しては、持田豊著「青函トンネルから英仏



海峡トンネルへ(中公新書 1198)」に平易に記述されています。青函トンネルは現在に至っても「鉄道建設・運輸施設整備支援機構:JRTT」および JR 北海道において維持管理、トンネル躯体、漏水調査等が綿密なプログラムに基づき確実に実行されております。

## 5. スイス、ゴットハルド鉄道トンネルと ゴットハルド道路トンネル、そして日本

2016 年6月、スイスアルプスを南北に縦断するゴットハルド鉄道トンネルが開通いたしました。トンネル全長は57Km で単なる坑口間距離では青函トンネルを凌いで世界最長になりました。この超大規模プロジェクトを総人口1000万人にも満たないスイス一国の技術力と経済力で完成させ、他国鉄道の通行および維持管理費、償還計画もスイス国鉄での予算で賄う事で合意され(即ち無料通行)となりその資金力、技術力には驚嘆の限りです。

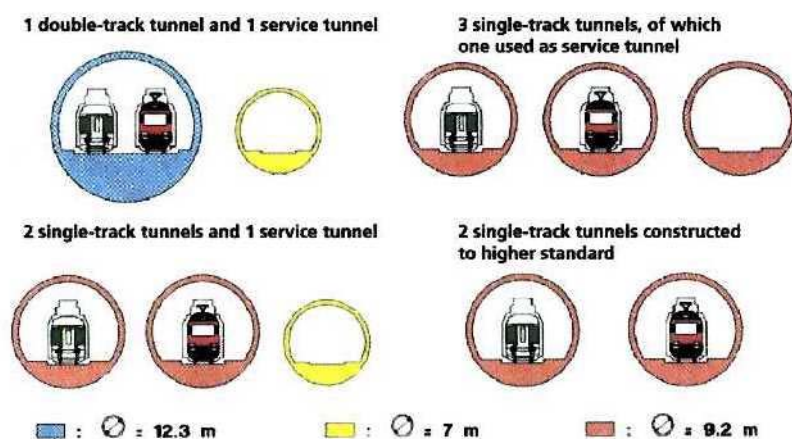


図24 計画当初の横断面案<sup>13)</sup>

図24は1980年代計画当初の標準断面案を示します。重大事故想定と維持管理を考慮して右下の双設トンネル案以外は本線にくらべてやや小径のサービストンネルの併設案でありましたが結果としてトンネル径 9m、内径 8mの図25に示す案に決定されました。同図において避難連絡坑の設置間隔は 310~325mとされこの間隔は道路トンネルとほぼ同様の間隔となっています。トンネル区間2か所にある緊急プラットフォームには排気ダクトが設置され新鮮空気の供給と排煙が隣接する換気機械室による調圧によって制御され、避難乗客の吸煙による被害が防止されるものとしております。

青函トンネルの内径が 9.7mで複線断面ですからゴットハルド鉄道トンネルの内径8mの単線断面はかなり余裕のある断面と言えます。日本的に考えれば図24左上(青色断面)の複線断面+サービストンネルがコスト的にはかなり妥当性があるものと考えられますが(それでも内径 12.3m)、EU(スイスはEU加盟国ではありませんが)高速鉄道に関する技術的総合判断からこの案は破棄されました。

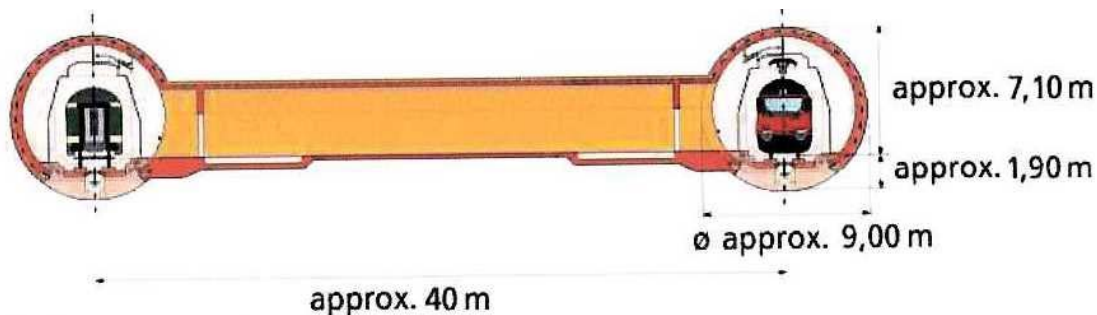


図 25 最終決定標準横断面(トンネル内径 8m、中心間距離 40m)<sup>13)</sup>

図 26 の縦断面に示す通り;ゴットハルド鉄道トンネルは標高 500m付近のスイスアルプスを南北方向に縦断し、ほぼ平行した位置でスイス、チューリッヒ、イタリア、ミラノを結ぶ幹線道路 E35 号線上にゴットハルド道路トンネルが位置しています(全長約 17Km,対面通行)。

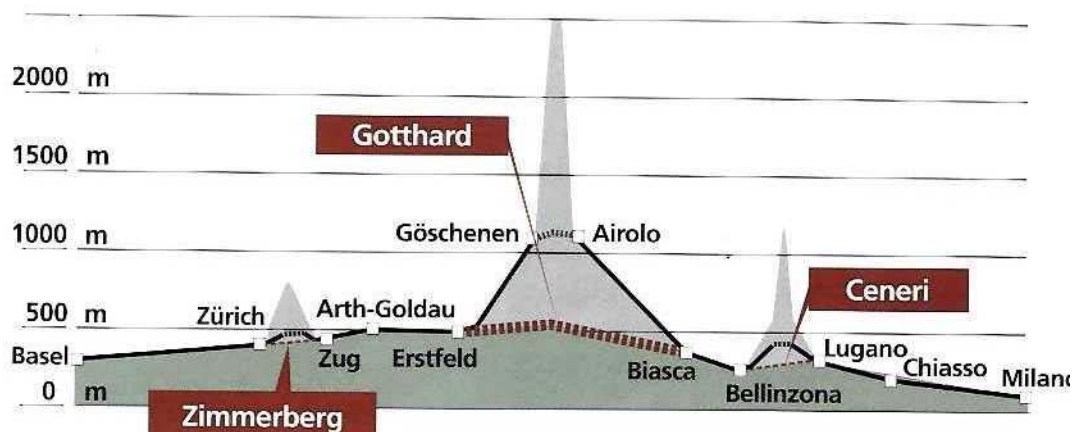


図 26 ゴットハルドトンネル縦断面<sup>9)</sup>

この路線はスイス、イタリアの大都市を連結しているため外国籍大型貨物の混入率が40%を超えます。このためスイスアルプスへの環境保護に対する世論が 10 数年来非常に厳しいものとなり、欧州全体からも貨物輸送への転換が急がれるような情勢となりました。その詳細は省きますが、欧州諸国は EU 統合以前から国境通過のための税関検査が実施されてきた経緯から国境通過の大型貨物車の過積載は現在でも厳しく規制されており、現在も事前に通行ルートに関係する情報が各国のトラック運転手にも徹底して通達されています。それでも依然として、大型貨物車の排出ガス条件、煤煙発生条件は火災発生時の対応と並んで、世界共通の課題であり、道路トンネル計画の最重要要素といっても過言ではありません。

最近(2015年)もゴットハルド道路トンネルを私自身車で運転して通行してきましたが、

対面通行で、トラックが非常に多くトラック車体で前方の視野が遮られ、さらに前方からの大型トラックとの接近、すれ違い速度 160Km/H を繰り返しながら平均速度約 80km/H での超長大トンネルの通過は個人的な印象としてかなり疲労感を覚えます。

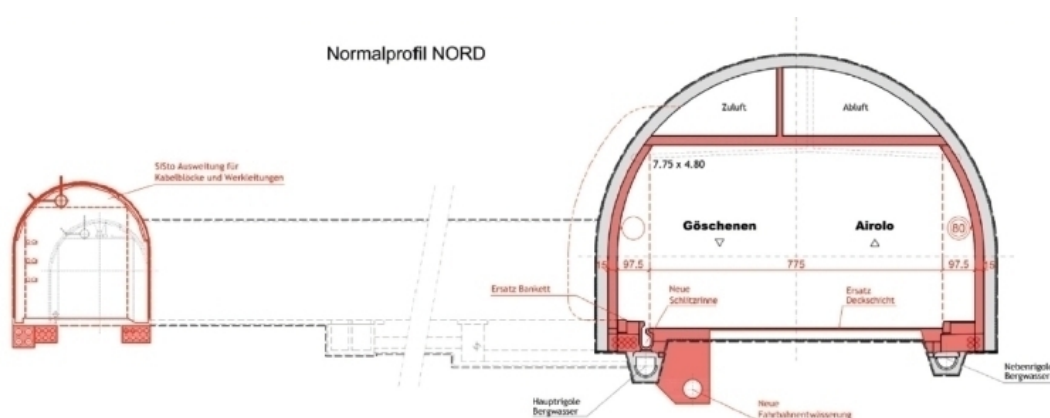


図27 ゴットハルド道路トンネル標準断面図<sup>10)</sup>

図27に図26の縦断面図の上部に位置するゴットハルド道路トンネルの標準横断面図を示します。この路線は最高で全体交通量の内大型車が 40%位を占める欧州でも特異なトンネルであるとのことでした(トンネル管制室)。本トンネルは全長約 17Km、対面交通で2001年に大型トラック数台を含む大火災事故が発生いたしました。このトンネル事故の詳細は省略いたしますが、高速道路トンネルの交通管制上の考え方で日本とは大きな違いが明らかになりました。

この路線はチューリッヒ国際空港、ミラノ国際空港に貨物機が集中する時間帯から 3～4 時間後に大型トラックがトンネル付近に到達することになります。このことから2001年の大火災事故の発生を踏まえトンネル手前約 30Km 程度区間から大型トラックへの交通管制を強化し十分な車間を確保させトラック相互の多重事故を防止し結果としての熱出力の低下、トンネル構造物への損害の軽減を図る措置が取られたことです。

日本ではそれとは逆に大型車が道路走行で“団子状態のグループ走行”がよく見られます。これはトラックドライバーの方々から“前方車両の尾灯を視線誘導灯として走行すると疲労軽減”になるとの理由であるものと聞いたことがあります。加えてこの走行状態が車両の相対的前面投影面積を増加(車両の空気抵抗の増加)させる結果、交通換気力の増大につながり、結果として換気動力費の低減効果があるとみている道路管制官もおります。日本のような他国に例を見ない大型トラックの混入率の高さではゴットハルド道路トンネルのようなコンセプトとは相容れません。

この事故が鉄道トンネルの開通時期を加速させたことは間違いありません。現在第二期工事として一方交通化の検討が進んでおりますがそのトンネルもう一本の建設には国民投票が必要とのことでその詳細は明らかになっておりません。

これ等の欧州の物流の実態及び EU 政府のエネルギー、運輸政策から鉄道貨物輸送への転換が積極的に図られています。

図 28 にゴットハルド鉄道トンネルの構造概要を示します。図33も同様ですが、トンネル中間部の立坑、排気、避難連絡坑、等主要なトンネル構造の概念は関越トンネル、東京湾アクアライントンネル等、日本の長大道路トンネルに酷似しています。

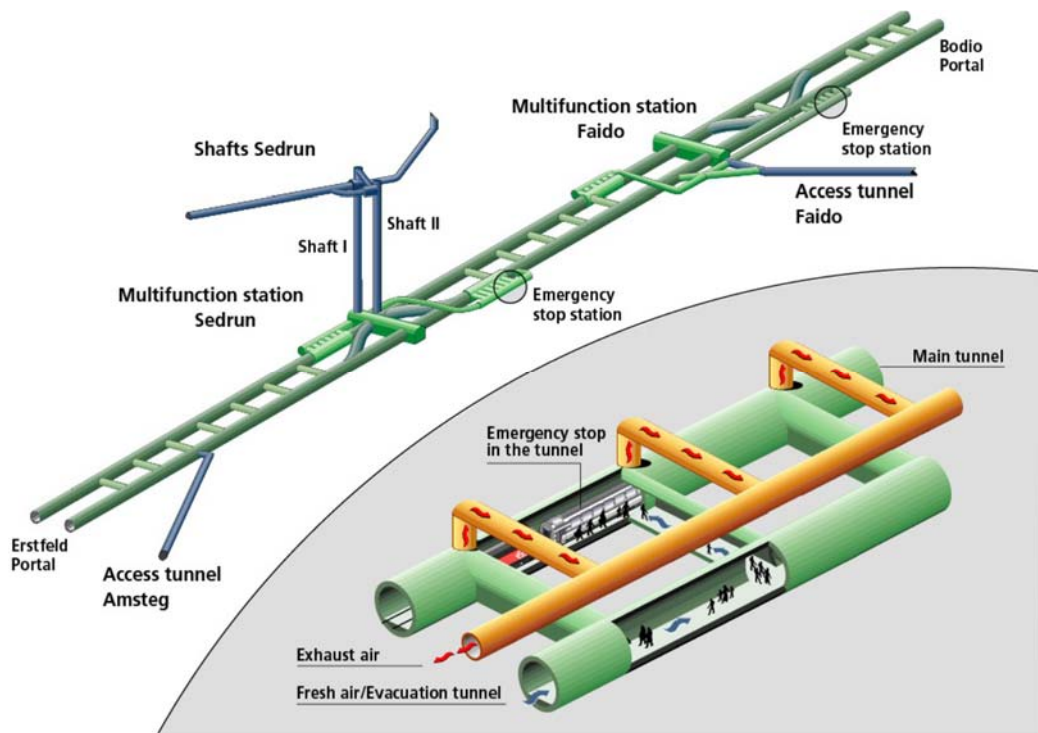


図28 ゴットハルド鉄道トンネル構造概要 9)



図 29 ゴットハルドトンネル貫通時(TBM 区間)16)

図 29 は施工区間貫通時の写真です。中央上部にこのプロジェクトの実施会社アルプトランジット社の社旗が掲げられています



図 30 トンネル内部列車空間(非常停車帯部分)<sup>17)</sup>

図 30 は試運転時の内部空間で照明設備は非常時を想定した全点灯状態になっています。



図 31 スイス国鉄高速鉄道車両<sup>17)</sup>

図 31 はスイス国鉄保有の高速鉄道車両の外観です。ゴットハルトンネルの供用時にはスイス国鉄をはじめ、ドイツ、イタリア、フランス、オーストリア等の高速鉄道車両が通過することとなりますが、トンネル通行経費の一切がスイス政府負担で合意されているようです(アルプトランジット鉄道会社 CEO、レンツォ シモーニ氏談)。

列車火災発生時(図 32)の対策ですが、EUの車両安全規格(TSI)<sup>18)</sup>によって火災発生時(火だるま状態:フラッシュオーバー)には最低条件として、時速 80Km/H で 15 分間の走行(走行距離 20Km)が可能となる車両の設計、製造が義務付けられています。

したがって延長20Kmを超えるトンネルでは内部に最低1か所以上の非常停車帯(地下駅)の設置が義務付けられます。したがってゴットハルド鉄道トンネルの場合には延長57Kmとなりますので全長を約3等分した区間に2か所の地下駅が設置されています。この地下駅が設計上の大きなコントロールポイントになり、地質構造と地形条件から立、斜坑、換気ダクト、機械室が結合されています(図28、図33)。

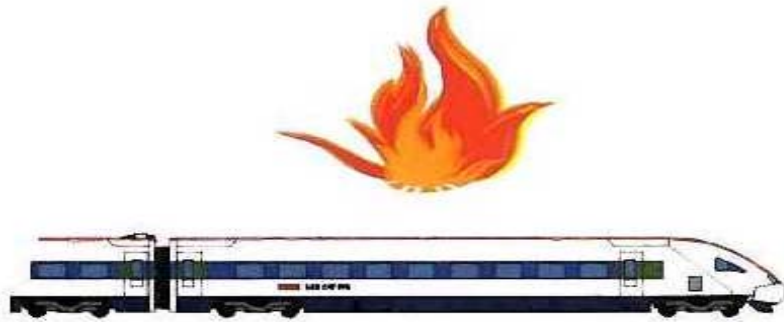


図 32 火災時の運転計画 <sup>15)18)</sup>

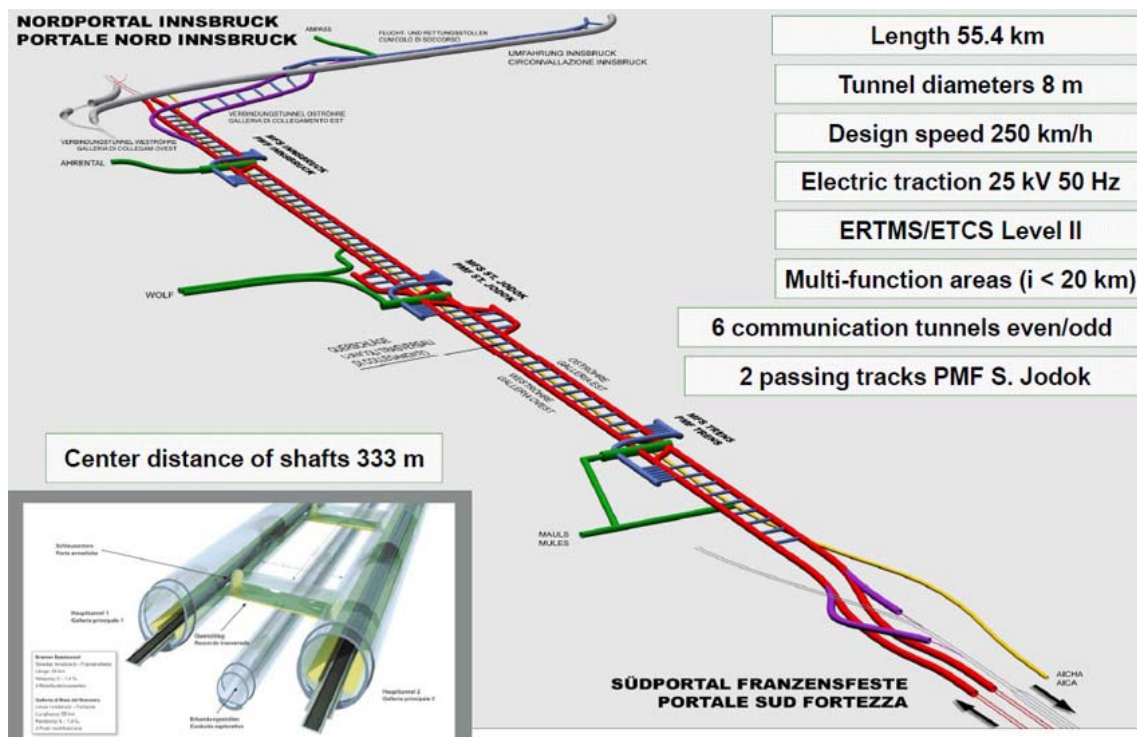


図 33 プレンナー鉄道トンネル計画(オーストリアーイタリア間)概要 <sup>19)</sup>

図 33 は現在施工中のプレナー鉄道トンネル(オーストリア:インスブルックーイタリア:フォテツア間:2025年完成予定)の概要です。トンネルの基本構造はゴットハルド鉄道トンネルと変わりませんが地山の地質状況に不明な部分も多く悪条件が予測され

たため、詳細なリスクアセスメントとを実施した結果、本坑のほぼ中央部にパイロットトンネルを設置することになりました。地下駅の配置は本線に接続するアクセストンネルの延長も含み結果として3駅になりました。ゴットハルド鉄道トンネルで活躍したトンネル技術者の方々が現在ブレンナートンネルの中心的立場で活躍しています。

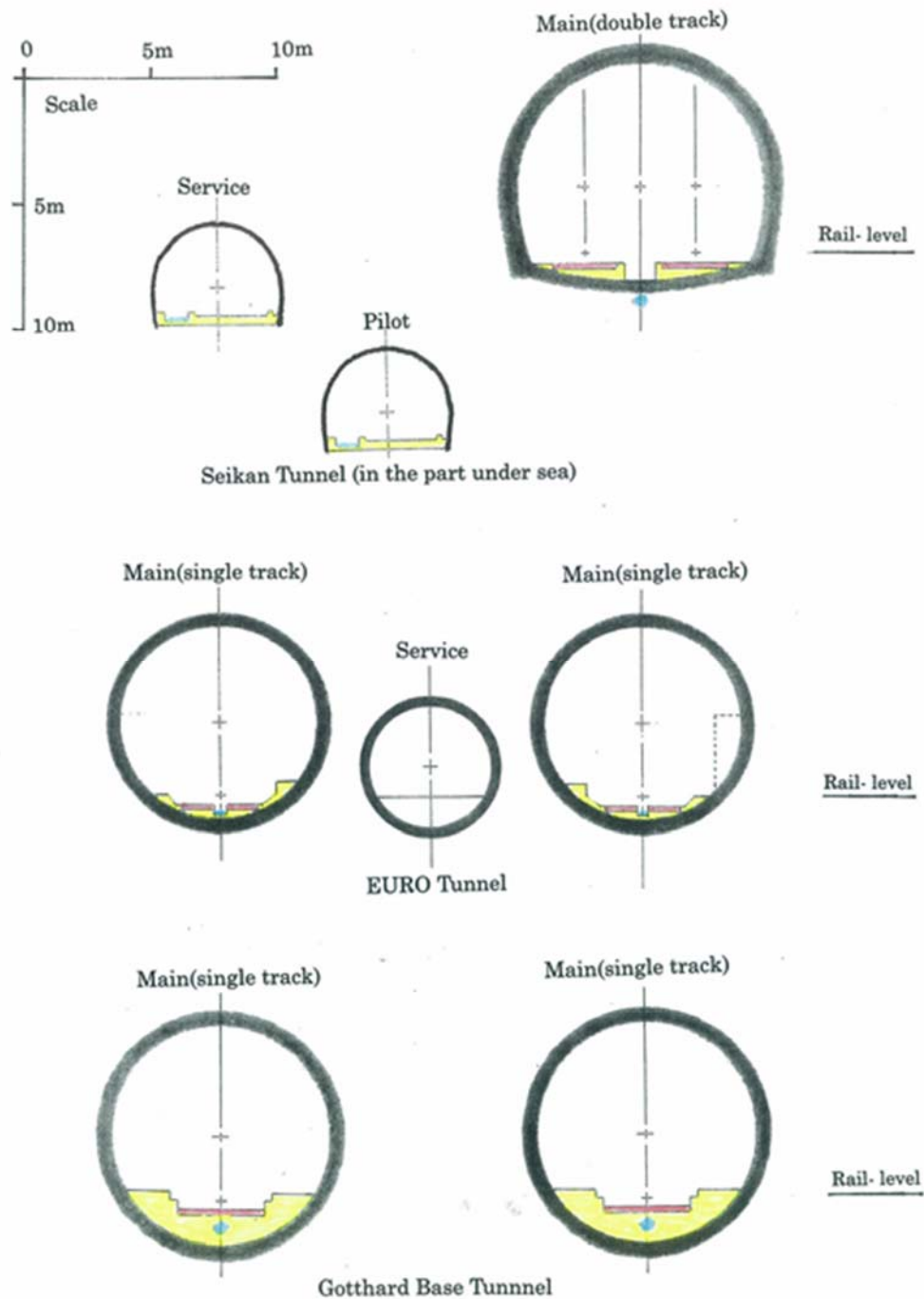


図 34 内空断面比較(上から、青函、ユーロ、ゴットハルドの各トンネル)<sup>20)</sup>

図 34 に同一スケールでの3か所のトンネル断面を示します。

## 6 欧州の鉄道ネットワーク

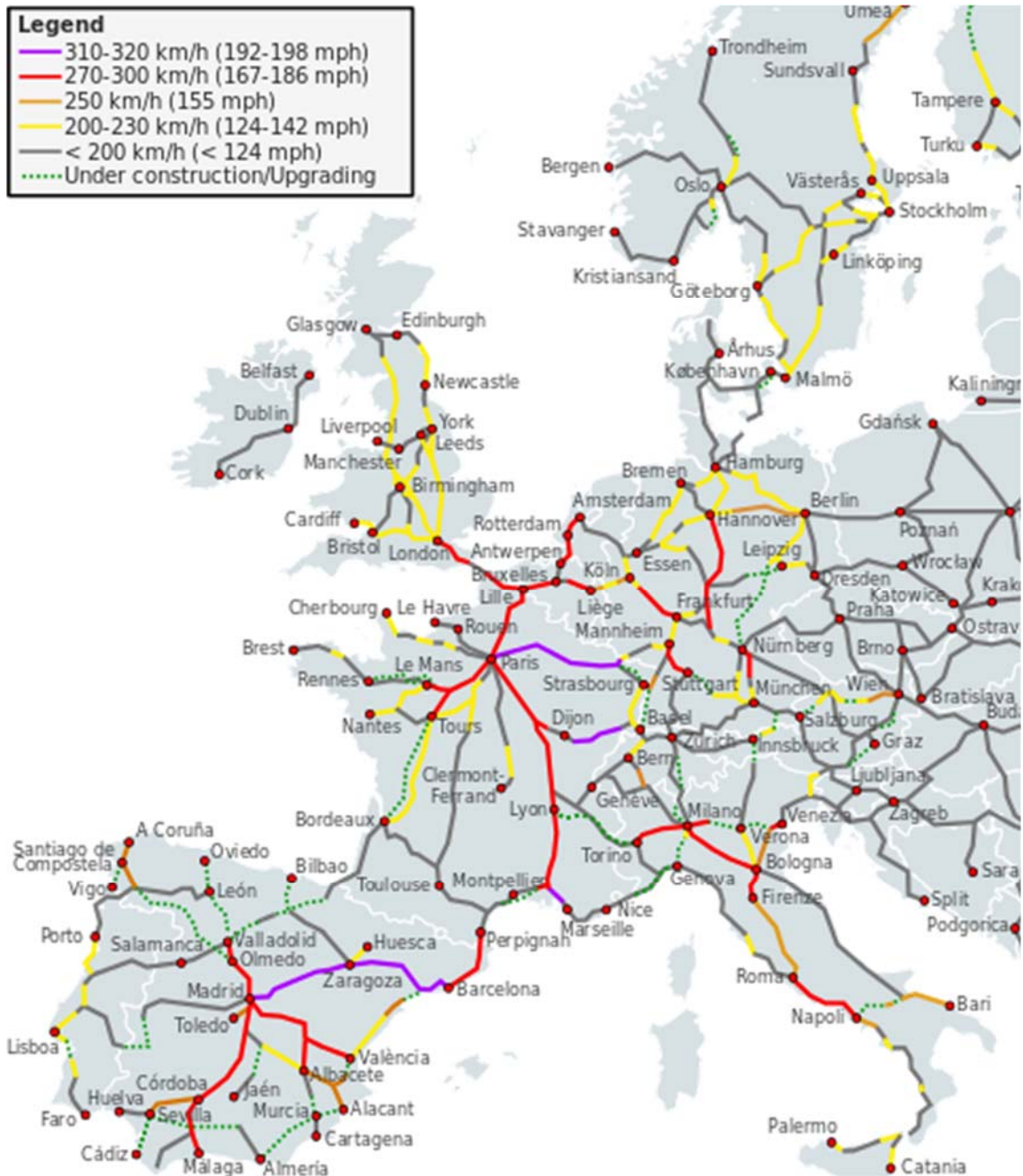


図 35 欧州の鉄道ネットワーク<sup>21)</sup>

高速鉄道の運行速度は各路線によって異なりますが、現在、主として、フランス、英国、ドイツ、オーストリア、イタリア、スペインの国有鉄道によって運行されていますが多くの路線が高速自動車国道(EU規格)とほぼ並行に配置されています。

近年高速鉄道網の発達によって人の移動は道路と列車、列車に自動車を積載(ピギ



一バック方式)、物資輸送は列車、などの区別がかなり明確になりつつあります。結果として欧州では新規高速道路建設の時代から既存道路トンネルの安全性向上のための大規模改修、改善(拙文、緑土会2016年11月号)と新規高速鉄道網による物流システムの構築の時代に入っているのです。まさしく「骨太の社会インフラ整備」です。



図 36 ドイツ国鉄高速鉄道 ICE <sup>22)</sup>



図 37 イタリア高速鉄道フレッチャロッサ(FRI)<sup>22)</sup>

図 36、図37 はゴットハルド鉄道トンネルが開通後スイス国鉄(図 31)と同様にほぼ同時期にトンネル内を走行するドイツ国鉄ICE、とイタリア国鉄FRです。これらの3か国車両は何れもドイツ、シーメンス社製(フランス SNCF-TGV はアルストム社製)でほぼ同一車体です。将来は広く欧州各国の車両がスイス国内にアクセスするものと予想されますが、現在のところ、ゴットハルトトンネル通過を含む総ての運行経費は旅客運賃にも転嫁されることなくスイス政府が負担をすることを約束しています。

## 7 中国 鉄道 <sup>23)</sup>

中国を出発した貨物列車が今年1月18日、約1万2000キロを走破して初めて英口

ンドンに到着しました。欧州との通商関係を強化したい中国にとって大きな前進で、列車は卸売業が盛んな中国東部の都市、浙江省義烏市を出発し、列車は途中、カザフスタン、ロシア、ベラルーシ、ポーランド、ドイツ、ベルギー、フランスを經由し、英仏海峡トンネルを経て18日間かけてロンドン東部のバーキング駅に到着しました。積み荷は家財道具や衣類、布地、バッグといった商品だということです。中国が2013年から始めた「一帯一路」構想の一環として、同国と鉄道網で結ばれた欧州の都市は、ロンドンが15カ所目となります<sup>23)</sup>。

私は2014年のITA 国際トンネル協会総会(スイスジュネーブ)に出席の際以前から面識のあった中国鉄道西南科学研究院副院長、ITA 副会長 Jinxin Yan 氏に中国高速鉄道の欧州大陸とのネットワーク展開について尋ねました。その答は一言、「必然的にそうなるわよ！」でした。同時にオーストリア国鉄の方にも同じ質問をしました。答は「EU ネットワークに繋がる！」で同じ答えでした。

中国からロンドンまで到達したことは鉄道の軌道条件、列車管制システムに互換性があるという証左にほかなりません。この事実は非常に注目すべきことで、日本のように(島国であるとの地理的条件から)独自の列車管制と安全システムを構築して新幹線、在来線を別軌条として整備され、現在に至ったものとは異なり、この貨物鉄道を高速旅客鉄道と併用することは技術的にさほど困難なことではなく、今まで述べてきた欧州高速鉄道のコンセプトと全く一致いたします。

将来はユーラシア大陸全体に広がることを示唆しています。



図38 1月18日、中国を出発した貨物列車が約1万2000キロを走破して初めて英ロンドンに到着した(2017年 ロイター/Stefan Wermuth)<sup>23)</sup>

## 8 終わりに

日本は島国であり輸送ネットワークは基本的に閉ループです。自動車輸送において、伝統的に過積載車両の規制は現在に至っても十分ではありません。加えて大型車混入率の異常とも思える高さ、路面の損傷、騒音、排出ガスなど環境問題への影響は欧米と比較になりません。日本の道路管理者は過酷な状況に置かれています。この現象は「決定的に日本」です。実際、私自身の経験として海外の道路トンネル設計時点に採用される欧州の自動車専用道路の大型貨物車の混入率は日本に比べてかなり低く、トンネル計画などの設計値で15~20%位が一般的です。

このように大規模インフラは計画された時代背景、社会、国民性、地勢などによって最善策および結論が日本とは大きく異なる方向に導かれていることに気づきます。このことは一国にとっての最善策は可能な限りの科学技術を駆使しても複数の解が存在することの証でもあらうと思います。

私が2008年4月にオーストリアグラーツ工科大学に滞在しておりました時、ITA-COSUF（国際トンネル協会：地下施設の安全と管理に関する委員会、会議はEUルールで英語）が開催されることを聞き、滞在をさらに数日延期し飛び入りでCOSUF会議に参加することにいたしました。この会は限定されたメンバーのみの参加でありました。日本人は私一人、参加者の多くは欧州のドイツ語圏を中心とした交通トンネル技術者でしたが、私がITA、グラーツ工科大学等に関係していたため、以前から懇意にしている人達も多く会議の雰囲気違和感はありませんでした。

参考文献15)に引用いたしましたスイス連邦運輸局 Martin Känzig 氏の講演の席上、「延長10Kmを超える単坑、複線での鉄道トンネルは“レッドカード”」を提示したのです。

私は日本の状況に照らして疑義を感じ、(正規会員ではないのに)議長へ発言を要求いたしました。私の質問は以下の二点です。

- 1) 日本では1964年の開業以来新幹線の鉄道トンネルでは単坑、複線として建設、運用し、何の問題も起こしていないし社会的合意形成もできている。
- 2) むしろ単線、双設トンネルの方が火災時に坑内が高温度傾向となり、煙濃度の面からも不利である。なぜレッドカードなのか？

この私の質問で会議は紛糾し数十分間停滞いたしました。参加者に多くの知り合いもいたためと思われませんが率直に私への“集中口撃”が始まりました。

彼らの日本に対する意見の要点は下記のとおりです。

- 1) 日本の新幹線は一国一制度であり、旅客輸送のみ、しかも24時間運転もしていない。
- 2) その反面、新幹線に並行する幹線高速道路のトラック輸送の比率は世界的に見て異常なほどの高比率(\*実際、深夜の東名、名神高速などでのトラック比率は90%以上)であり、輸送エネルギー効率、環境問題からしても好ましくない。

3) 単線狭小断面についての火災時には太田の指摘の可能性があり熱環境解析についてはさらに検討を行う用意がある。

私は、会場で悔しい思いをしたことは今でも鮮明に覚えています。一方でこれら複数の指摘はある面事実であり、「よく日本のことを調べている」との印象でした。会場での発言者が以前からメールをやり取りする親しい仲間であったから率直な議論であったことは尚更だっただと思います。

この悔しさを引きずって日本に帰国後、旧国鉄、現在の新幹線建設の最高幹部の方々とこの件で面談をする機会を得ました。持って帰った資料の総てを提供し、説明をいたしました。私にとっては少し意外でしたが、日本の(一部の)関係者には欧州のこれらの決定プロセスが広く、十分に行き渡ってはいませんでした。私は日本関係者の海外からの技術情報収集力不足を思い知らされ、意外でした。

日本国内でメディア、鉄道関係者からもよく耳にする「日本の新幹線技術は世界最高」などの美辞麗句を否定するものではありませんが、同一軌道上を大きな速度差を持って貨物輸送と旅客輸送を列車管制する経験は日本にありません。

日本の新幹線技術を海外に展開することには大賛成ですが現在話題に上っているインドネシア、インド、タイ、米国などの高速鉄道は何れも国境を跨ぐ国際路線に拡大成長することは必須であると思われ、欧州各国との受注競争になることは間違いない情勢であろうと思います。世界には異なるシステムを最善策とする考え方も存在することを理解しなければいけません。日本国内のシステムを国際ネットワークへの適合を目指して大きく改変しない限り受注には大きな困難が伴うでしょう。

日本での報道と若干ニュアンスは異なりますが、現在供用中の台湾高速鉄道を展開の場合でも日本固有の技術文化が現地の技術文化と大きな齟齬が生じ大変な苦勞が伴いました。この状況は昨年頃まで続いていました。日本企業は大きな授業料を払っています。一方で中国鉄道は日本では評判が良くないですがその将来像は大きな脅威です。

今年6月にはゴットハルド鉄道トンネルの設計、施工管理等、主要幹事会社であったスイス、ロンバルディエンジニアリング(Lombardi SA)の元技師長、元スイストンネル協会会長、A. HENKE 氏夫妻が全くのプライベートで来日されます。彼は30年以上ゴットハルド道路トンネルに関係し、引き続き鉄道トンネル計画にも深くかかわってきました。私とも25年以上の長きにわたりお互いに情報交換、第三国プロジェクトにも関係してきました。今年、ゴットハルドトンネル開通一周年を記念して東京で(私の)行きつけの居酒屋でささやかに懇談するのを楽しみにしております。

## 参考文献

- 1) <http://www.jnr-photo.com/EF70/EF70-No7.htm>
- 2) 張田吉昭(有限会社フローネット)中尾政之(東京大学工学部附属総合試験所総

合研究プロジェクト・連携工学プロジェクト(in Japanese)

- 3) Huber Schupfer, Fire disaster in the Tunnel of the Kitzsteinhorn funicular in Kaprun on 11 Nov,2000.
- 4) <http://www.eurotunnelgroup.com/uk/the-channel-tunnel/infrastructure/>  
The channel tunnel infrastructure
- 5) Kirkland, C.J. (2002). "The fire in the Channel Tunnel." Tunnelling and Underground Space Technology, 17, pp 129-132
- 6) Eureka report; Fires in Transport tunnels, Report on Full -Scale Tests. Conducted by the 9 European countries, Austria, Finland, France, Germany, Great Britain, Italy, Norway, Sweden, Switzerland, Nov, 1995.
- 7) <http://www.fireproductsearch.com/news/metro-tunnel-fire-tests-in-sweden>
- 8) 日本トンネル技術協会資料から編集
- 9) NRLA. New Railway through the Alps. 1st edition
- 10) 2006[http://www.tunnel-online.info/en/artikel/tunnel\\_1099174.html](http://www.tunnel-online.info/en/artikel/tunnel_1099174.html)
- 11) <http://www.jreast-shinkansen.com/e6/technology/index.html>
- 12) <http://www.jrhokkaido.co.jp/seikan/02.html>
- 13) 青函トンネル Web 東奥 東奥日報社 2016年4月7日
- 14) D. Fabbri, The gotthard Base Tunnel : Fire/Life safety System. Annual tunnelingl conference. Sydney. Aug/2004
- 15) Martin Känzig. Safety Upgrading of the Swiss Railway Tunnels Federal Office of Transport (FOT).Swiss ,Ministry of Environment, Transport, Energy and Communication. 23.4.2008 ITA-COSUF Workshop 2008
- 16) Gotthard -Basistunnel- der längste Tunnel der welt  
Das jahrhunertbauwerk entsteht
- 17) <http://www.swissinfo.ch/eng/in-depth/gotthard>
- 18) Union Rail system. Subsystems Infrastructure, Energy, and Rolling stock、TSI "Safety in Railway Tunnels". Technical Specification for Interoperability. 26/06/2012
- 19) Patrik Reynolds, Brenner project takes a major leap forward Feb 2011
- 20) M. Shimokawachi Constitution and Facilities of Long Railway Tunnel at Great Depth in Japan. International Conference on Railway Tunnel Safety Technology 6/ Oct/ 2014.
- 21) File:High Speed Railroad Map of Europe 2015.svg
- 22) Highspeed rail .com Europe
- 23) ニュースウィーク日本語2017年1月19日

以上