

論 說 報 告

土木學會誌 第十一卷第六號 大正十四年十二月

隧道工に於ける換氣量

會員 工學士 瀧 山 與

内 容 梗 概

隧道工に於ける換氣に關しては從來坑内に蓄積する炭酸瓦斯の量を人體に無害の程度まで低下することを目標として其數量を定めたるも、本文は之を爆破瓦斯中に含む酸化炭素の緩和に改め、且高潤なる隧道にありては坑内作業者の勞働能率を維持するため爽涼用空氣量を追加せんとするにあり。

目 次

	頁
緒 言.....	3
第一篇 隧道の換氣.....	8
第一章 坑内の自然換氣.....	8
第二章 設備の方式.....	8
第三章 換氣量に關する學說.....	10
第四章 既設隧道の施設.....	13
第二篇 坑内清淨用換氣量.....	14
第一章 隧道内空氣の汚濁.....	14
第一節 化學的不淨化.....	14
第一項 人畜の呼吸.....	14
第二項 照 燈.....	16
第三項 爆 破.....	16
第四項 有機物の分解.....	18
第五項 蒸氣機關車の煤煙.....	18
第六項 地山及び地下水より噴出する惡瓦斯.....	19
第二節 石 粉.....	19
第三節 上記惡因を緩和する方法.....	19

第二章 悪瓦斯許容限度	22
第一節 酸素缺乏	22
第二節 炭酸瓦斯	22
第三節 酸化炭素	24
第四節 沼氣	24
第五節 水素	25
第六節 硫化水素	25
第七節 窒素其他	26
第三章 悪瓦斯緩和用空氣量	26
第一節 坑内機械より放出する空氣	26
第二節 導坑に於て消費する爆藥量	26
第三節 爆破後休憩時間	28
第四節 坑内従業者員數	29
第五節 空氣量計算	29
第一項 計算法	29
第二項 炭酸瓦斯緩和	30
第三項 酸素補給	32
第四項 酸化炭素緩和	33
第五項 沼氣其他緩和	34
第三篇 坑内爽涼用換氣量	35
第一章 鬱熱を惹起する原因	35
第一節 鬱熱	35
第二節 氣温及び湿度昇騰	36
第一項 人畜	36
第二項 照燈	37
第三項 爆破	37
第四項 地熱	38
第五項 坑内氣温に及ぼす他原因	42
第三節 上記悪因を緩和する方法	44
第二章 労働に支障なき雰圍氣状態	45

第三章 入氣の坑内氣温に及ぼす影響	49
第一節 坑外大氣の温度及び湿度	49
第二節 通風の坑内進入に伴ふ暖化	50
第三節 蒸發及び凝固	52
第四節 壓搾空氣解放に基く温度低下	53
第四章 空氣量	54
第一節 作業熱吸收	54
第二節 限度	55
第一項 最小	55
第二項 最大	58
結論	59

緒 言

延長に於て世界に冠たる Simplon T. は工事中地熱高くして 56°C に達し且屢々熱湯の湧出に會し最大空氣量 1,200 sl に及びたることありしも 7 箇年にして能く其功を竣へたり、又 1913 年開通せし Lötschberg T. は其延長 9 哩を超ゆるも起工後 5 年 5 箇月を以て完成したり、之を前世紀に施工せられたる Mont Cenis T. の 13 年 4 箇月、並に St. Gotthard T. の 7 年 8 箇月に比するときは竣功期限に於て多大の懸隔あり、泰西に於て輒近竣成せし隧道の工事期限短く且工費の低廉なるは其原因鑿岩機を始め器具機械の進歩其他多様ならんも、換氣施設の完備も亦その主要なるもの、一ならずんばならず。

Weyl's Handbuch der Hygiene には自 1881 年至 1885 年間伊太利人各職業者につき年齢各期に於ける男子 100 人中の年平均罹症回数を記載す、即ち次表の如し

職 別	年 齡		
	15-30才	30-45才	45-60才
鑛山の坑夫	30.9	30.5	37.1
研師 (Schleifer) 及び炭鑛坑夫	31.4	27.7	28.2
仲仕及び木樵	28.6	27.6	31.5
裁縫師	14.5	18.4	19.3
出版業及び小間物商	14.3	17.3	19.6
美術家、官公吏及び牧師	11.2	16.5	19.6

此統計より推すに鑛山又は炭坑の坑夫と類似の労働に従ふ所の隧道坑夫も亦疾病に罹り易きことは明らかなり。

坑内の空氣状態良好にして氣温亦中和なるときは従業者をして其労働能率を充分發揮せしむることを得るのみならず罹症回數を減少することを得べし。

我邦に於ては従來労働者は衛生的智識を缺きたれば如何なる勞作にも唯々として服従したりしも、輒近労働問題は擡頭し來りたれば今後の工事には衛生的施設を完備し労働者の待遇を改善する代りに彼等をして労働能率を充分に發揮せしむるの方策を採らざるべからず、而してこれ畢竟工事費を低廉ならしむる唯一の方法なり。

隧道内の労働は一般土木工事中最も非衛生的のものと見做さるゝが故にこれが技術を掌る者は従業者の労働能率上より、又大にして言はば人道上よりも彼等の健康保持に留意すべきなり。

我邦既成又は工事中の隧道にありても坑内に於て發生する有害瓦斯を緩和して空氣状態を改善する方法、即ち換氣設備 (Lüftungs-anlage) を施せるものありと雖も空氣量に確固たる標準なきため經費の關係上姑息に流るゝもの多し。換氣設備をなすに當り空氣量は根本にして最も重要なる問題なるにも係らず、之を徹底的に論究せる文献なきが故に建設中工事にして遺憾を感じながら之か設備を缺くものも亦尠しとせず。

著者嘗て國有鐵道丹那隧道の工事計畫をなせし際鑿岩機及び坑内運搬用機關車の撰擇乃至所要動力の決定等には何等苦慮せざりしも、換氣量問題には著しく悩まされたり、爾來書籍及び雑誌の類を涉獵して一私案を得たれば之を發表して高評を仰がんと欲す、若し卑稿にして隧道技術家の注意を惹き、諸賢の研究を俟つて本問題を充分に解決することを得んには著者の本懐之に過ぎざるなり、本論文を編纂するに當り参考せし文献並に使用せし畧語は次の如し。

文 献

隧道に關する件

Röll, Enzyklopädie des Eisenbahnwesens.

Handbuch der Ingenieur-Wissenschaften, I Bd. V Abt.

Dr. K. Pressel, Bauarbeiten am Simplon Tunnel.

Geschichte der Eisenbahnen der öster.-ungar. Monarchie.

Dolezalek, Der Eisenbahntunnel, Bd. I.

Lucas, Der Tunnel, Bd. I.

Lauchili, Tunneling.

Prelini & Hill, Tunneling.

工學博士田邊朔郎著とんねる

笹子隧道工事報告

宇治川電氣株式會社水力事業沿革誌

鐵道省熱海線地質報告書

同 研究資料 (技師吉田謹平氏論文)

採鑛工に關する件

Heise-Herbst, Bergbau-kunde.

Glückauf, Berg-u. Hüttenmännische Zeitschrift.

Österreichische Zeitschrift Berg u. Hüttenwesen.

Transactions of the Institution of Mining Engineers.

Safety & Efficiency in Mine Tunneling (Bulletin of Bureau of Mines,
Washington D. C.)

通風及び清涼に關する件

Hans Karl Schwanche, Lüftung u. Entstaubung.

Dr. Curt Schubert, Lüftung im Tunnelbau.

Dr. E. Wiesmann, Künstliche Lüftung im Stollen-u. Tunnelbau.

Dr. Dietz, Ist es möglich, die Grubentemperatur vor Ort dauernd unter
28°C zu halten?

Coal mine Ventilation (Bulletin of Federal Board for Vocational Education,
Washington D. C.)

Robert Wabner, Ventilation in Mines.

Walsh, Physics & Chemistry of Mining & Mine Ventilation.

E. Mermier, La Ventilation et la Refrigeration du Tunnel du Simplon.

Transactions Institution of Mining & Metallurgy (London).

的場中著 通風論

水曜會雜誌 (工學博士小田川達郎氏論文)

筑豊石炭鑛業組合月報 (厚見利作氏論文)

室内通風に關する件

Grierson, Some modern Method of Ventilation.

Allen & Walker, Heating & Ventilation.

爆薬に關する件

Leopold Lisse, Das Sprengluftverfahren.

Calver, High Explosives.

Oscar Guttman, Blasting.

Investigations of Explosives used in Coal Mines (Bulletin of Bureau of Mines, Washington D. C.)

毒瓦斯に關する件

Dr. Otto Brunck, Die Chemische Untersuchung der Grubenwetter.

Glaister, Gas Poisoning in Mining & other Industries.

氣象に關する件

馬場信倫著 氣象學

日本帝國統計年鑑

衛生に關する件

Weyl's Handbuch der Hygiene, IV, VII, VIII Bd.

陸軍衛生學

日本豫防醫學會發行國民衛生 (醫學博士富士貞吉氏, 醫學士野村仁氏, 同森田公平氏論文)

略 語

at	氣 壓
°C	攝氏溫度
ccm	立方仙米
cbm	立方米突
cu ft	立方呎
°F	華氏溫度
ft	呎

g	瓦
gal	英ガロン
H. E. Hefner-einheit	ヘフナー燭光
kg	庇
Ltr	リートル
m	米突
min	分
qcm	平方仙米
qm	平方米突
sek	秒
sl	毎秒リートル
sq ft	平方呎
st	時
T.	隧道
tägl	1 日即ち 24 四時間
W. E. Wärme-einheit	庇カロリー
yd	碼

人名詳解

Dr. Haldane	Dr. J. S. Haldane
Prof. Herbst	Prof. Fr. Herbst
Dr. Hill	Dr. Leonard Hill
Dr. Hunt	Dr. W. E. Hunt
Mezger	Vermessungsingenieur Chr. Mezger
Dr. Rubner	Dr. Max. Rubner
Schmid	Ernst Schmid
Dr. Schubert	Dr.-Ing. Curt Schubert
Dr. Sedoux	Dr. A. R. Sedoux
Stadlmayr	L. Stadlmayr
Dr. Stapff	Dr. F. M. Stapff
Vernon	E. Vernon Hill

第一篇 隧道の換氣

第一章 坑内の自然換氣

人畜、照燈、有機物の分解等其他より發生する熱度並に空氣中に浮漂する石粉に起因して坑内の空氣は箇所に依り其比重を異にす、茲に於て交和 (Diffusion) の原則に従ひ相互混和せんとする傾向ありて氣流を生ず、この空氣の交和適宜に行はるゝときは坑内空氣の不良状態は大に緩和せらるものなり、隧道内外に於ける温度の差違はまた坑内に氣流を惹起し自然的換氣を助くるものなり、爆藥を使用せし隧道にして自然の通風のみを倚賴し開鑿せし延長を調査するに次の如し

隧道名	導坑の大きさ qm 空氣式鑿岩機を使用せし隧道	自然通風の限度 m
Diestelnsen		50-100
Rudersdorf	11.0-15.0	100 坑口に高さ 25 m の煙突を樹立す
Heinsberg	9.0	200
Giersky	5.1	200
Waldwiese		300
Pfaffensprung	頂設導坑 底設 ” 5.5-8.0	630 340
	手掘にて進工せし場合	
Rhberg	頂設導坑 3.3	50
Ricken	6.0	80
Runsun		90

地方風の存する箇所に於ては風下に坑口を有する隧道は自然通風の距離長し、東海道線大津京都間線路變更の工事中新逢坂山隧道 (延長 7,629.5 ft) 大津口は地方風の風下にあるため導坑の進行 3,000 ft に達せしとき換氣施設なきに係らず作業者の呼吸にさしたる困難を感じざりき、然るに東山隧道 (延長 6,118 ft) は地方風なきため導坑 1,500 ft に進捗せし頃より多小の苦痛を覺えたりと云ふ、然れども自然通風は坑内空氣の轉換上確實性に乏しきものなれば延長の大なる隧道にありては導坑の 300 m に達せざる間に換氣の方法を講ずるを可とす。

第二章 設備の方式

普通行はる、換氣の設備は坑門換氣法 (Portalventilation) と稱せられ坑口外に換氣機を据付け同機と導坑先端部との間を空氣管を以て連結す、同管の口徑は疊

築工完成箇所にて大にして、切換及び導坑部にありて小なり、而して疊築工の進捗に伴ひ漸次管の布設替を行ふものとす。

隧道延長の特に長大なるものにありては坑内にも小なる換氣機を据付く、同機は上記坑門換氣法に依りて坑内に吹込まれたる空氣を吸込み、之を更に小口径の空氣管を経て導坑深部に送風するものなり、此施設を導坑換氣法 (Stollenventilation) と稱す、即ち坑外大氣は坑門及び導坑換氣兩法の併用に依り 2 段に導坑深部に送風せらるゝなり。

坑門換氣法のみに依りて換氣の目的を達したる隧道中其延長の最も大なるものを列擧すれば次の如し

Col-di-Tenda	8,098 m
Häfenstein-basis	8,135
Grenchenberg	8,510

又導坑換氣法を併用せしは Simplon I. T. 及び Lötschberg T. なり。

次に換氣法は空氣管内通風の方向に依りて又

(甲) 吹込法 (Einpressende Methode)

(乙) 吸出法 (Aussangende „)

の 2 種に區別することを得るが、各得失あり甲にありては導坑爆破より發生する惡瓦斯 (坑外空氣の注入により不良状態は大に緩和せらると雖も) の坑内作業箇所全區域を通過して坑外に排出せらるゝ結果同瓦斯の坑内多數労働者を悩ますの不利あり、又乙にありては疊築及び切換箇所にて既に惡化したる空氣の導坑に向ひて移動進行し隧道諸工中最も進捗を計るべき導坑の從業者に對し不淨空氣を供給するの缺點あり。

導坑爆破の直後一時に發生する毒瓦斯を迅速に坑外に排除するため吸出法(乙)を十數分間行ひ、作業者の再び導坑に復業する前より吹込法(甲)を行ふときは導坑爆破瓦斯のために坑内全員を煩はすことなく、又導坑從業者には常に清鮮なる空氣を供給することを得べし、かくの如く時期に依りて通風方向を變換し甲乙兩法を併用するときは各法の缺點を除去し長所のみを利用することを得べし。

甲乙兩法の併用は換氣機に接續する空氣管の配置並に開閉弁の挿入に依りて行ひ得るが (丹那隧道は此法に依る) American Blower Co. Detroit の製作に係る "Sirroco," Reversible Fan も亦採擇に値す。然れども吸出法より吹込法に轉換す

る場合には坑内に於て氣流の衝突を來すため隧道内は一时无風状態に陥り、導坑部に残留せる煤煙は或作業區域に固定するため同箇所にある労働者を懊惱せしむること大なり、然るに爆破に起因する煤煙の全部を吸出法に依りて坑内より排泄することは殆んど不可能なれば結局兩法併用は理想に止まり、之が實施は困難なり、故に何れか一法のみ依る隧道多し、而して歐洲にありては専ら吹込法を用ひ、米國に於ては吸出法を採用せるもの多し。

第三章 換氣量に関する學說

坑内に於て發生する惡瓦斯緩和のため坑外より注入すべき必要の空氣量として Handbuch der Ingenieur-Wissenschaften 及び Röhl, Enzyklopädie des Eisenbahnwesens には次の數量を掲ぐ

照燈を携帯する労働者 1 名に付	240 cbm/tägl=10 cbm/st
馬 1 頭に付	850 cbm/tägl=35.42 cbm/st
ダイナマイト 1 kg に付	300 cbm

Prelini & Hill には英度量衡を用ゆるも前記同様の數字を載す、即ち次の如し

照燈を携帯する労働者 1 名に付	240 cu yd/tägl=10 cu yd/st
馬 1 頭に付	850 cu yd/tägl=35.42 cu yd/st
ダイナマイト 1 lb に付	150 cu yd

茲に一隧道工あり坑内の従業者 300 名にして馬 4 頭を使役し、1 日間に 180 kg のダイナマイトを消費するものと假定するとき 1 時間に所要の換氣量は Handbuch der Ingenieur-Wissenschaften によれば

$$\frac{240 \times 300 + 850 \times 4 + 300 \times 180}{24} = 5,392 \text{ cbm/st}$$

となる。

Lauchli は隧道の換氣量は専ら坑内に於て發生する CO₂ の分量を無害程度まで低下する目的を以て算出すべしとなし、人畜並に爆破より發生する CO₂ の量を次の如く推定したり。

照燈を携帯する労働者	1.53 cu ft or 43 Ltr/st
馬	8.5 cu ft or 241 Ltr/st
ダイナマイト 1 lb に付	3.5 cu ft or 99 Ltr

即ち 1 kg に付 218 Ltr

而して換氣量に關して次の公式を與ふ

$$V = \frac{C(1-a)}{a-b} - R$$

茲に V ; 24 時間内に坑内に注入せらるべき空氣量
 C ; 人畜照燈並に爆破に起因する CO_2 の總容量
 a ; CO_2 の無害限度
 b ; 大氣中に含有せらる CO_2 の量
 R ; 労働者の従業せる區間に於ける坑内空間容積

今上記同様の隧道工を想像するとき

$$C = 0.043 \times 300 + 0.241 \times 4 + 0.218 \times 180 = 53.104 \text{ cbm}$$

約 53 cbm なり猶 Lauchli は

$$b = 0.0004$$

$$a = 0.002 \quad (\text{此値は不適當なり第二篇第二章參照})$$

と定めたり今當面の隧道を鐵道單線型とし

$$R = \overset{\text{斷面積}}{25 \text{ qm}} \times \overset{\text{作業區間延長}}{200 \text{ m}} = 5,000 \text{ cbm}$$

と見做すときは

$$\begin{aligned} V &= \frac{53(1-0.002)}{0.002-0.0004} - 5,000 \\ &= 28,059 \text{ cbm/tägl or } 1,169 \text{ cbm/st} \end{aligned}$$

となる。

又導坑に注入すべき換氣量としては下記公式を掲ぐ

$$V' = \frac{\frac{C'(1-a)}{a-b} - R'}{T}$$

茲に C' ; 1 回の爆破に際し發生する CO_2 の量
 R' ; 導坑部に於ける空間容積
 T ; 爆破後休憩時間

導坑の爆破に消費するダイナマイトの量を 20 kg とするとき

$$C' = 0.218 \times 20 = 4.36 \text{ cbm}$$

となる。而して

$$R' = \overset{\text{斷面積}}{6.5 \text{ qm}} \times \overset{\text{延長}}{50 \text{ m}} = 325 \text{ cbm}$$

$$T = 15 \text{ min or } 1/4 \text{ st}$$

と假定するとき

$$V' = \frac{\frac{4.36(1-0.002)}{0.002-0.0004} - 325}{1/4}$$

$$= \frac{2,720 - 325}{1/4} = 9,580 \text{ cbm/st}$$

V' の方 V より大なれば換氣量としては V' を採用すべきなり。

又 Brunton & Davis の著作に係る Safety & Efficiency in Mine Tunneling には次の如く記述す。

➤導坑爆破後労働者が最小の休憩時間を以て復業するためには、爆破瓦斯及び煤煙の排除に力を盡くさざるべからず、爆破直後汚染せらるゝは普通導坑面より 150 ft の區間なり、導坑の斷面積を 70 sq ft (6.5 qm) とするとき爆破に依りて汚染せらるゝ空氣量は $70 \times 150 = 10,500 \text{ cu ft}$ なり、然れども此空氣量を吸出するため數分時を費す間に惡瓦斯は導坑面より 150 ft 以外の區域に蔓延すべく、猶通氣管は爆破に際し飛來すべき岩片に毀損せらるゝを防ぐため其吸出口を通常導坑面より約 100 ft 後方に置くが故に汚染空氣の全部を吸出すこと難し、故に安全を期するため上叙數量を 6 倍すべし、而して此量を 15 min 間に吸出に必要な換氣量は

$$\frac{10,500 \times 6}{15} = 4,200 \text{ cu ft/min}$$

$$(= 7,136 \text{ cbm/st})$$

なり<

かくの如く同一條件下にある隧道工を想像して換氣量を省察するに其數量は著書に依り上述の通り各様なり、之を再記すれば即ち次の如し

著 書	換 氣 量 cbm/st	關 係 事 項
Handbuch der Ingenieurwissenschaften	5,392	坑内に従業する人畜及び爆藥量
Lauchli, Tunneling	9,580	{ 導坑 1 回の爆破に要する爆藥量, { 坑内空間, 爆破後休憩時間
Safety & Efficiency in mine Tunneling	7,136	導坑斷面積, 爆破後休憩時間

上記三著書に據る換氣量は關係事項を異にし、且數量の差異も相當大なるのみならず何れも有毒瓦斯分量の根本的研究を缺き甚しきはCO₂の無害限度を誤るが故に吾人は隧道の計畫に際し直に之に信賴して換氣機を注文をなし能はざるを遺憾とす。

第四章 既設隧道の施設

U. S. A. に於ける隧道工の施設は次表の如し

隧道名	空氣管の換氣量		空氣管の口徑	換氣機に於ける		換氣の方法
	最大延長	(機械の公稱數量)		壓力		
	呎	毎分立方呎	吋	lbs/口"		
Carter	7,600	1,560	15	0.41		吸出法
Central	9,500	5,540	19	1.93		同上
Laramie Poudre	9,200	3,900	14½	3.34		同上
Los Angeles Aqueduct						
{ Elizabeth Lake	13,000	6,350	18	4.14		吹込及吸出
{ Little Lake	3,000	2,500	12	1.23		兩法併用
{ Grapavine	1,500	2,500	12	0.63		
Lucania	12,000	3,120	18½	0.87		吸出法
Marshall-Russel	11,000	4,160	12½	8.30		同上
Mission	13,000	2,500	10	10.25		兩法併用
Nisqually	5,000	2,400	14	0.87		吸出法
Rawley	6,200	2,500	12½	2.02		同上
Roosevelt	15,700	4,800	16½	4.38		同上
Siwatoh	5,000	1,560	10	1.94		同上
Snake Creek	14,000	4,650	16	4.27		同上
Strawberry	19,000	4,000	14	7.50		同上
Utah metals	11,880	4,880	12	13.24		同上

次に歐洲に於けるものは次の如し (前表と對照上便なる故に英の衡量を用ゆ)

隧道名	隧道の延長	空氣管の最大延長		換氣量	空氣管口徑		換氣機に於ける壓力
		哩	呎		導坑	其他箇所	
				毎分立方呎	吋	吋	ounce/口"
Wochein	3.9			北口 12,720 南口 5,300	11.8	19.7	
Karawanken	5.0			12,720			
Tauern	5.3	北口	19,680	14,840	19.7	31.5	
		南口	6,560				
Bosruck	3.0			北口 5,300 南口 12,300			

隧道名	延長 (呎)	換氣機種類	電動機馬力	換氣量 (cu ft/min)	その他
Hauenstein-basis	5.1			10,600	19.7 39.4 11-15
Ricken	5.3			13,120 7,420-10,600	13.8 31.5 11
Lötschberg	北口 8.5 南口			9,580-89,060 9,320-33,930	17.7 47.3 6
Simplon	北口 12.4 南口			73,580 69,970	7.9 15.8 6

我邦に於ける例は次の如し

隧道名	延長 (呎)	換氣機種類	電動機馬力
生駒山	11,038	何れも	50
宇治川電氣第七號	9,952	東口 西口	100 40
東山	6,118	使用す	5

又目下建設中に係る丹那及び清水兩隧道に於て運轉せる換氣機は下記の通りにして隧道の進捗と共に同一型の機械を連結使用するものなり

隧道名	丹那	清水
延長	25,612 ft.	31,805 ft.
型	Turbine	Centrifugal Fan
空氣量	5,000 cu ft/min	5,000 cu ft/min
空氣壓力	5 lb/□"	18" (11 ounce/□")
通風管徑	30"	23"
馬力數	180	36

現に丹那隧道にありては同型のもの2臺を据付け、吸出法に依り 10,000 cu ft/min の空氣量を坑内より坑外に排除す。

第二篇 坑内清淨用換氣量

第一章 隧道内空氣の汚濁

第一節 化學的不淨化

第一項 人畜の呼吸

人畜は空氣を呼吸することに依りてその生を保てるが、空氣にして一度肺臟に吸入せられたる吐出氣は唯に水分に富むのみならず著しく其成分を異にするものなり、今人類呼吸を乾燥し定量したる成分を普通大氣の乾燥したるものと對照するに次の如し

大氣	成分	呼吸
79.02 %	N ₂ (Argon を含む)	79.50 %

20.95	O ₂	16.00
0.03	CO ₂	4.40

これを以て見るに呼氣は大氣に比し O₂ の約 5% を失ひ、CO₂ を百數十倍加す。抑も成年男子安靜時の呼吸數は普通 1 分間 16 回にして 1 呼吸量は約 $\frac{1}{2}$ L (L=肺臓の最大活量) ならば 1 時間内に於ける呼氣は $16 \times 60 \times \frac{1}{2} L = 480 L$ なり、今呼氣中に於ける CO₂ の分量を上表に依り 4.4% とすれば 1 時間に吐出する CO₂ の量は $\frac{480 L \times 4.4}{100} = 21.12 L$ となる、普通 $L = 0.001 \text{ cbm}$ ならば成年男子の安靜時に於て毎時間吐出する CO₂ の量は 0.02112 cbm なり、然るに勞働時に於ける此量は呼吸量と共に増加す、Pettenkofer 其他の實驗結果を一表に示せば次の如し

實驗者名	勞働者の状態	年 齡	體 重	毎 1 時間 に 放 散 する
				CO ₂ 容 量
		才	kg	cbm
Pettenkofer	屈免なる勞働者作業中	28	72	0.0363
	同 上 休 憩 中	28	72	0.0226
Scharling	成 年 者	28	82	0.0186
	未 成 年 者	16	57.75	0.0174
Speck	體重 1 kg に付 364 ccm なりと云ふ體重を 72kg とすれば			0.0262
Lauchli				0.0283

隧道内の勞働者は成年者多數を占むるのみならず、何れも相當の活動をなすものなれば著者は坑内從業者 1 人の 1 時間に吐出する CO₂ の量を 0.03 cbm と見做すべし。

次に畜類は人類に比すれば遙に多量の CO₂ を排出するものなり、即ち下表の如し

著 者 名	動物名並に其状態	體重 1 kg に付 1 時間内に
		放出する CO ₂ の量
		ccm
Klimmer	動物一般但し體重 400 kg	300
Zung u. Hagemann Stoff- wechsel des Pferdes (20 頭に付きて測定せし 平均)	馬 { 休 憩 中 勞 役 中	241
		1,643
Boussengault	牛	320

畜類は坑内にありて連續的に勞役に服するものにあらず、今上表中馬匹のみに就き勞役時間 1 に對し休息時間 3 と考へ體重 1 kg に付 1 時間内に放出する CO₂ の容量を算出するに約 600 ccm なり、而して馬の重量を 400 kg と假定すれば馬

1 頭の坑内に於て毎時間周圍空氣中に放散する CO_2 容量は 0.24 cbm となる Lauchli も同様 8.5 cu ft = 0.24 cbm となせり、著者は此量を 0.24 cbm 即ち従業者 8 人分に相當のするものと見做すべし。

第二項 照 燈

携帶電燈及びガソリン燈 (Ligroin) は空氣を惡化すること絶無、又は頗る微小なれどもその價格高ければ未だ隨所に使用するに到らず、輒近盛んに用ゐらるゝはアセチリン燈なり、同燈及び菜油燈の毎時間に放散する CO_2 の量は Wedding に依れば次の如し

燈 種	原料消費量 1g に付 Litre
菜 油	1.50
アセチリン	0.55

Dr. K. Schaum に據れば菜油燈は普通 1 時間に原料油 15.5 g を消費すと、今此説に従ひ油燈の發生する CO_2 の量を計算すれば毎時間 0.0233 cbm なり、又アセチリン燈に對し同氏はカーバイトの消耗量毎時間 18—30 g なりと云ふ、熱海線丹那隧道に於てミツピン印改 206 號燈に付き實驗せし所に據れば 25 g なりき、今例をミツピン燈に採りて同燈の毎時間放散する CO_2 の量を計算すれば 0.01375 cbm となる、又 Lauchli に依れば此量は 0.53 cu ft (= 0.015 cbm) なり、上記の通りアセチリン燈の發生する惡瓦斯量は油燈に比し僅小なれば、輒近前者の後者を隧道工より驅逐するに到りしは衛生的見地より言ふも故なきにあらざるなり。著者はアセチリン燈 1 個の毎時間發生する CO_2 の量を 0.015 cbm 即ち坑内労働者 1 人の $\frac{1}{8}$ に相當するものと見做すべし

第三項 爆 破

隧道工に於て主として使用せらるゝ爆藥はダイナマイトなり、就中綿火藥 (Nitrozellulose) を主體とし、之にナイトログリセリン (Nitroglycerin) を吸收せしめたる Gelatine-dynamit 賞用せらる、鑛山火藥の類用ひられざるにあらざれども稀有の事なれば本項に於ては主としてダイナマイトに就て記述すべし。

先づ爆破に依りて發生する瓦斯の容量(水蒸氣を除く)を調査するに、ノーベル會社製に係るダイナマイトは綿火藥及びナイトログリセリンの配合割合に依り相異あるも溫度 0°C 氣壓 760 mm の場合には爆藥 1 kg に付 550—675 Ltr なり、

Heise に據れば 406 にして我陸軍衛生學には 530.3 と記載したり、著者は Dr. Schubert の説に倣ひて之を 550 Ltr と見做すべし。

我隧道工に於て最も廣く使用せらるゝは Gelatine-dynamit に屬する Gelignite (官製櫻印及び會社製山櫻印) なり、此種の爆破に依り發生する瓦斯の成分は

CO ₂	48%—53%
CO	0 — 12
N ₂	40 — 47
O ₂	0 — 1

なり、Heise に據れば Gelatine-dynamit の爆破瓦斯中には CO を含有せず、猶輒近我邦に於て試用する液化空氣 (Spreng-luft) の爆破瓦斯中 CO は皆無又は極少量なりと雖も、同瓦斯は最も有毒のものなれば著者は坑内従業者の安全を期するため其存在を認め、ダイナマイト 1 kg の爆破に依りて發生する各種瓦斯の割合及び容量を次の如く見做すべし

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 & 550 \times \frac{50}{100} = 275.0 \text{ Ltr} \\ \text{CO} & \text{,,} \times \frac{12}{100} = 66.0 \\ \text{N}_2 & \text{,,} \times \frac{35}{100} = 162.5 \\ \text{O}_2 & \text{,,} \times \frac{3}{100} = 16.5 \end{aligned}$$

導火索の燃焼に依り發生する瓦斯量は Colver に依れば普通品長さ 1 m に付 3.39 Ltr なり、而してダイナマイト 1 kg の爆破に際し消費する導火索の延長は著者の經驗上 8 m と考へ大差なきを以て、ダイナマイト 1 kg の爆破に關聯して導火索の發生する瓦斯量は $3.39 \times 8 = 27.12$ Ltr なり、又其成分は A. L. Hyde に依れば次の如きものとなる

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 & 27.12 \times \frac{32.7}{100} = 8.9 \text{ Ltr} \\ \text{CO} & \text{,,} \times \frac{23.4}{100} = 6.3 \\ \text{N}_2 & \text{,,} \times \frac{23.8}{100} = 6.5 \\ \text{O}_2 & \text{,,} \times \frac{1.4}{100} = 0.4 \\ \text{CH}_4 & \text{,,} \times \frac{4.1}{100} = 1.1 \\ \text{H}_2 & \text{,,} \times \frac{13.8}{100} = 3.7 \end{aligned}$$

$$\text{H}_2\text{S} \quad 27.12 \times \frac{0.8}{100} = 0.2 \text{ Ltr}$$

雷管に起因する瓦斯は少量なれば之を省略することゝすれば、ダイナマイト 1 kg の爆破に依り發生する總瓦斯量及び其割合は次表の如し

瓦斯名	瓦斯容量 Ltr			割合 %
	爆薬	導火索	計	
CO ₂	275.0	8.9	283.9	49.2
CO	66.0	6.3	72.3	12.5
N ₂	192.5	6.5	199.0	34.5
O ₂	16.5	0.4	16.9	2.9
CH ₄		1.1	1.1	0.2
H ₂		3.7	3.7	0.6
H ₂ S		0.2	0.2	0.1
計	550.0	27.1	577.1	100.0

爆破に起因する悪瓦斯の緩和用空氣量を後段に於て省察するに當り著者は上表に則り

CO ₂	280 Ltr/kg
CO	70
CH ₄	2
H ₂	4
H ₂ S	1

なる數字を用ゆべし。

第四項 有機物の分解

支保木材の腐敗及び尿尿の分解は坑内空氣を汚濁す、即ち空氣中より O₂ を奪ひて CO₂ を形成し、NH₃ 及び H₂S を發生す。成年者の一日に排泄する尿尿の量は大約尿 150 g 尿 1,300 g なり、今坑内従業員数を 3 交替を通じて 1,000 人とし、その 2 割が坑内に於て排尿し、且全員の放尿する場合を考ふるときは坑内に於て毎日排泄せらるゝ尿尿の量は

尿—重量	30 kg	容量	0.03 cbm
尿— ”	1,300 kg	”	1.16

となる、かくの如く長大なる隧道にありては相當多量に上るを以て之が處置に考慮を要す。

第五項 蒸氣機關車の煤煙

蒸氣機關車の隧道内運轉は (1) 塵埃の飛散、(2) 坑内氣温の昇騰、(3) 水蒸氣の

發生、並に煤煙瓦斯の吐出を伴ひ坑内空氣を不淨ならしむ、上記 4 項中尤も重要なるは (4) にして石炭の燃焼は空氣中より O_2 を奪取し CO_2 を始め CO , CH_4 , H_2S , 及び SO_2 等を發生す。

第六項 地山及び地下水より噴出する惡瓦斯

地殻の龜裂又は洞穴内に潜在する惡瓦斯の隧道掘鑿に際し坑内に進出することあり。 CH_4 は空氣との調合割合に依りては爆發性を有するが故にその現出は眞に恐るべし、Ricken T. に於ては工事中屢々同瓦斯に遭遇し、作業箇所にてける空氣中 2.5% に達するありしが、1907 年 3 月北口より 4,203 m の地點に於て 92% に達し終に爆破を惹起したり、其後南口より 4,198 m の地點（前記地點の南方 200 m）に於ても同様の厄に遇ひその都度工事を中止したり、又 Karawanken T. 及び Bosruck T. に於ても同瓦斯のために工事の進捗を妨げられたり。 H_2 も亦危險性を帶ぶ、1903 年 Cincinnati の水道用隧道に於て出會せし瓦斯中には 9.4—66.4% を含み爆發せり。 H_2S の湧出は臭氣のために坑内從業者を懊惱せしむる事大なり、Simplon I. T. にて 1902 年夏期遭遇せし地下水は其量 3,600 sl に達し、硫酸カルシューム及び硫黃を含有せしかば同瓦斯の放散多量なりき。 CO_2 は地山又は地下水より噴出すること多し。

第二節 石 粉

導坑及び切擴の工事中岩石破碎、並に礫積替作業の爲に生ずる細粉は空氣中に漂遊し、坑内空氣を物理的に惡化す、隧道の乾燥せるとき又は岩質の堅硬なるときは其程度殊に甚し、之が人體に及ぼす害毒は急劇ならざるも咽喉及び氣管に加答兒を起し、延ひて呼吸機關に大なる障害を來し其害毒恐るべしとす、Mt. Ceniz T. の Mondanes 口地質は乾燥せる砂岩及び石灰石なりしが之が進鑿に従事せし坑夫には胸部の疾病を患ふ者多かりき。

第三節 上記惡因を緩和する方法

空氣の汚濁は労働者の健康を害し、能率を低下せしむる主因の一なり、此惡因を積極的に除却するには清鮮なる大氣を坑外より隧道内に注入し、坑内空氣を淨化する方法を講ずべきなり、此施設以外に惡影響を幾分緩和する消極的方法としては吾人は甚だ平凡且不充分なるものを有するに過ぎずと雖も、之を採用せざ

るに優ること勿論なれば本節に於て是等方法を順次記述せんと欲す。

(I) 畜類の使役並に蒸氣機關車の運轉廢止

畜類及び蒸氣機關車は唯に坑内空氣を惡するのみならず四圍の溫度を昂上せしめ、労働者に不快の感を抱かしむるなり、故に坑内に於ける車輛牽引のためには他の動力に依る機關車を採用すべきなり、他の動力とは壓搾空氣又は電氣を云ふ、而して軌近竣成せし著名隧道にありては殆ど全部此 2 式を使用せり、即ち次表の如し。

坑内運搬用機關車の動力		隧道延長
壓搾空氣	電氣	
Lötschberg		14,535 m
	Mount Royal	3 miles $\frac{1}{2}$
Grenchenberg		8,565 m
Hauenstein-Basis		8,135 m
Rogers-Pass		5 miles
Simplon II		19,770 m

(II) 照燈の撰擇

坑内には全部電燈を専用するは理想なれども、爆破毎に電球の取外し勞多ければ之を坑口より壘築工完成箇所終點まで止め、切續及導坑部には他燈火を用ゆるを普通とす、携帶電燈及び之に亞ぎガソリン燈 (Ligroin) は坑内空氣を惡化せざるも、是等の廉價に供給せらる迄はアセチリン燈を以て満足せざるべからず。

(III) 坑内導坑用ダイナマイトの撰擇

爆發藥としては CO の發生最も少きものを撰擇すべきは勿論なり、我砲兵工廠の製品中にありては松印竹印及び櫻印を宜しとす、梅印は CO の發生量大なれば使用せざるを可とす、丹那隧道熱海口導坑 1,700 呎の地點に於て去る大正八年十月九日午後六時櫻印徑 $1\frac{1}{8}$ " のもの 4 本 (450 g) と梅印の同徑のもの 135 本 (15,188 kg) とを混用爆破し、鑿岩機用壓搾空氣 300 cu ft @ min of free air を吹込みたる儘午後七時二十分迄所謂煙休みをなしたる後坑夫 4 名礮刻夫 2 名、運搬夫 3 名入坑して作業に従ひしが午後八時に至り CO 中毒患者 9 名 (内重症 2 名) を出したり、幸に死者を出さざりしも是等患者は 3-12 日間就床靜養を必要とせり。

(IV) 坑内に便所設置

坑内に便所を設け特色ある電球を用ひてその位置を明示すべし、而して便器内には不淨物より分解發生する所の CO₂ 及び NH₃ 等惡瓦斯を吸收するため泥炭

又は木炭の細粉を入れ置き、残飯をもその中に捨棄するの習慣を養成すべし、便所設置は十二指腸蟲症蔓延の豫防上にも重大なる意義を有するものなり、十二指腸蟲は體內より營養分を吸収するが故に寄生者をして極度の貧血に陥らしむ、同虫の循環繁殖の徑路を述べんに、其卵は糞便と共に排出せられ、二週間を經過すれば孵化して幼蟲となりて濕氣に富む箇所に潜伏し 100 乃至 200 日間生存す、而して此間に吾人の裸體に觸るゝときは無傷の皮膚面を喰ひ破りて筋肉内に浸入し、猶自由に體內を移行し腸に達して發育す、隧道労働者が從來の通り隨所に脱糞するの惡習を全廢せざる限り此恐るべき寄生蟲の跋扈を防ぐこと難し、Gotthard T. 建設當時作業中同蟲症に冒さるのもの甚だ多かりしにも鑑み便器内にのみ排糞することを勵行すべきなり、若し此方法の行はれ難き惧あるときは作業者の跣足を禁止し護謨靴の類を穿たしむるを要す。

(V) 鑿岩機の選擇

穿孔作業中飛散する岩石の細粉を早く沈澱せしむるため鑿岩機の種類中錐先より水を迸出するものを採用すべきなり、上向き孔用 (stoper) 又は足尾式 #10 及 #11 型の如き小型にして出水装置を缺くものを用ゆるときは岩壁面に向ひて霧水を撒布すること (spray device) を忘るべからず。

(VI) 掘鑿方法の選擇

隧道を開掘するに當り底設導坑法を採用するを可とす、何となれば同法に依るときは切斷箇所に於ける礫の搬出簡易にして頂設導坑法に依るときに如く礫の積替を要せざるが故に石粉の飛散すること少し。

(VII) 坑口に据附くる空氣壓搾機に關する注意

Dr. Sedoux は 1903 年空氣壓搾機過熱のため注油の揮發して CO 及び CO₂ を發生し、之等惡瓦斯の空氣管を通じて坑内に進入することあるの故を以て注油として揮發點低き油類使用の危險を論じたり、又 Transval Miner's Phthisis Commission は 2 箇所の鑛山に就き空氣壓搾機より坑内に供給する空氣成分を分析して其結果を發表せしに、CO の含有量 1.0—1.3% なりき、かくて Commission は注油として揮發温度高き油類の使用並に空氣取入口を屋外に設置すべきことを警告したり。之を以て見るに鑿岩機其他空氣式機械より坑内に排出せらるゝ空氣中には不淨物を含む處あれば、空氣壓搾機の空氣取入口を屋外に設け且運轉上に使用する注油の購買に留意を要す。

第二章 惡瓦斯許容限度

第一節 酸素缺乏

空氣中に酸素は缺乏するとき身體に及ぼす影響は之が CO_2 に交換せしや否やに依りて異なる、 CO_2 分量の常態なるときは其症狀高山に登りて稀薄なる空氣を呼吸することに依りて起る所の高山病と全く同様なり、Dr. Haldane に據るに酸素含有量の人體に及ぼす影響は次の如し。

- 15% 燭火即滅するも身體には異常なし、然れども更に缺乏するときは睡氣を催し、勞働能率低下し過劇の勞作困難となる。
- 10% 以下氣息奄々たる状態に陥り脉搏數増加し顔色を損ず。
- 7% 喘氣著しく知覺遲鈍となる。
- 7% 以下となれば手足全く冷却し喪神す。

而して酸素缺乏に依る中毒を惹起さざる最大限度如何と云ふに、年齢體質等に依りて一樣ならざること勿論なるが諸大家の説亦一致せず 18% となすものもあり、丹那隧道熱海口 631 m の地點に於て大正九年一月八日突然瓦斯の噴出に會し、燈火を消滅したり、此際坑内數箇所にて採集したる瓦斯の分析表は次の如し

採取地點の熱海口 よりの距離	容量 100 分中瓦斯含有量			
	CO_2	O_2	CO	N_2
1,155		16.0		84.0
1,287		16.8		83.2
1,469	0.4	16.2		83.4
1,500	0.6	15.0		84.4
	0.4	17.4		82.2
1,575	0.1	15.5		84.4
1,720	0.4	16.6	0.1	82.9
2,065	0.4	18.0	0.1	81.2

當時作業者の何等苦痛を訴へざりしに鑑み著者は此限度を Dr. Haldane に従ひ 15% と見做すべし。

第二節 炭酸瓦斯

CO_2 は CO 又は H_2S の如く有毒ならず、唯呼吸に適せざるが故に生存上不必要物なりと言ふに過ぎず、之が多量の蓄積は同時に O_2 の缺乏を伴ふが故に兩者相俟つて人體に危険を招致す、従來 CO_2 の含有量 0.7—1% に達すれば其空氣は

既に汚濁せられたるものと見做せる所以は CO₂、それ自身の有毒なるを謂ふにあらずして、之を以て一般空氣汚濁の標準となすに過ぎず、Dr. Haldane に従へば之が含有量の人體に及ぼす影響は次の如し。

空氣の成分%			人體に及ぼす影響
CO ₂	O ₂	N ₂	
3	20.4	76.6	異常なし
5	20.0	75.0	呼吸深くなり脈膊數増加す
10	18.3	71.1	呼吸困難にして心悸充進し劇しき頭痛を覺ゆ

而して 10% を超過すれば麻痺を生じ、25% に達する空氣中に數時間連續して在る時は落命す、但し短少時間内ならば 50% 迄は致命的危険なしと云ふ。

空氣中に於ける含有量 5% のとき照燈の火色は著しく衰へ、10% に至れば即滅するが故に照燈の火焰に依り危険の切迫を豫知することを得。

笹子隧道工事中當時の醫科大學助教授今村保氏が坑內空氣狀態を調査せし報告書中より CO₂ 分量に關するものを一表に收むれば次の如し

坑口	坑門よりの距離 呎	溫度 °	氣壓 mm	CO ₂ 含有量 (‰)	
				每箇所	平均
黒野田	132	17.1	700	1.8	6.5
	4,500	19.2	699	9.6	
	6,250	20.8	698	7.8	
	6,500	20.3	698	6.8	
初鹿野 (鑿岩機運轉中)	132	15.0	702	1.4	11.6
	5,620 (穹拱工事中)	19.0	704	24.8	
	7,632	22.0	703	13.2	
	8,070 (鑿岩機運轉中)	23.0	703	7.0	

又新逢坂山隧道に於て 9 回、東山隧道に於て 6 回 CO₂ の定量検査をなしたるが最多量なりしものを抜記すれば次表の如し

隧道名	坑口	線別及び坑口より距離	CO ₂ 含有量	測定の日
新逢坂山	大津	下り線 2,280 呎	8.2 ‰	大正五年九月二十七日
	山科	上り線 4,200	9.8	六年十月六日
東山	花山	下り線 500	7.2	五年十月十九日
	京都	上り線 670	7.3	五年十月十八日

Gotthard T. に於ては工事中 10% に達したることあり、而して之が限度につき

て Pettenkofer は 7% とすも、Dr. Hill は 10% 以上に於ても人體に無害にして、軽度の運動時と同程度の呼吸數増加を來すのみと言へば、著者は後說に従ひ許容限度を 1% と見做すべし。

第三節 酸化炭素

CO は無色無味無臭にして其比重 0.967, 即ち空氣と畧同重なれば空氣中にて浮動し、燈火は赤色焰光を放ちて能く燃ゆるが故に此瓦斯の存在を勞働中知ること難し、CO の最も有害なる所以は血液中の Hämoglobin との親和力 O_2 のそれに比し遙に強大にして 210 倍以上に達し、Hämoglobin の酸化を阻止するにあり、而して CO 飽和の度 50% に達すれば人事不省に陥る、此場合迅速に假死體を清氣内に移し療養を加へざれば致命す、又飽和度 $\frac{2}{3}$ に及べば多くは死亡し、 80% に達すれば落命確實なりと云ふ、CO 中毒は中樞神経系侵害を特徴とするが故に蘇生後と雖も記憶力を喪失し白痴となることあり、猶此瓦斯の危険なるは中毒の兆候緩慢にして僅に呼吸の逼迫及脈搏數の増加を覺ゆるのみにして格別の不快を感じざる内に四肢の自由を失ひ終に大事に至ることあり、Dr. Haldane は CO の血液を 50% 飽和せしむるに足る分量と起居動作に依りて相異なる時間關係を次の如く示せり。

空氣中に於ける CO 含有量 $\%$	動 作			
	靜 止	歩 行	駢 走	走
1	2—15 ^分	1—0 ^分	20—30 ^分	30 ^分
2	1—10	30	10—15	5—7
3	30	10—15 ^分		

又同氏は體驗の結果 0.7% を含む空氣中にありて些少の運動を行ふも眩暈を惹起し、且事後 12 時間に亘る頭痛を覺へたり、而して 0.5% を含む空氣は既に有毒なること確實なりと云へり、之が限度に關して我陸軍省毒瓦斯研究所にありては 0.25% とせざるも Gruber 及び Hempel は 0.2% とせざるを以て著者は安全を期する爲め後說に従ひ 0.2% と見做すべし。

第四節 沼 氣

CH_4 は無色なり、純粹なるものは無臭なれども坑内にて出會するものは洋葱に類する刺激性臭氣を帶ぶ、時として比重の高き C_2H_6 と共に現出す、 CH_4 自身は爆發性を有せず且燃燒を保持するものにあらずと雖も空氣と或る調合を以て混

和するときは猛烈なる勢を以て爆破す、その割合は Wabner に據れば次の如し

空氣中に於ける CH_4 の 割合 (容量)	作 用
1/30 未滿	何等異狀なし
1/30—1/15	照燈火燭の周圍擴大す
1/4	燃燒を惹起す
1/3	爆破の頂點に達す
1/8—1/3	爆破の威力衰ゆ
1/3—1/2	單に燃燒す
1/2 以上	燃燒熄む

人體の健康上には左まで有害ならず、20% 以上を含む空氣中に於ては知覺力を亡失するも此分量以下にありては短時間所在するも大なる障害を來たさず。英吉利炭坑にありては CH_4 の含有量 5% 以上の坑道に於ては安全燈の使用を禁じ携帶電燈を専用せしめ、又その量 25% を超ゆるときは労働者の入坑を禁止すと云ふ、著者は限度を 5% と見做すべし。

第五節 水 素

H_2 はそれ自身有害ならずと雖も空氣中に 5—7.2% を含むときは爆發性を帶び危険なり、著者は限度を 4% と見做すべし。

第六節 硫化水素

H_2S は無色なり、CO 以上有毒なりとす、其含有量と有毒の程度とに關し Lehmann 其他の所説を綜合したる所を摘記すれば次の如し。

0.2 %	數分間にして眼球鼻腔及び咽喉を刺戟し 0.5 時間此空中に滞留し難し。
0.5 %	0.5 時にして心悸亢進し呼吸困難に陥り眩暈を催す。
0.7—0.8 %	十數分間呼吸するときは生命に危険あり。
1.0—1.5 %	瞬間にて死す。
2.5 %	馬の斃死量とす。

著者は無害限度を Lehmann に従ひ 0.1% と見做す。

此瓦斯は加里鹽坑に於て遭遇することあれども、普通隧道工にありては爆破後極少量發生し眼球を刺戟することあれども健康上に支障を及ぼす程現出することなし。

第七節 窒素 其他

N_2 は人畜に對し何等惡影響を及ぼすものにあらざれども之が出現は O_2 の缺乏を齎すべし。

SO_2 は水氣を含まざるときは無色にして之が認識困難なり、刺撃性臭氣を有し比重は 2.22 にして水に吸収せられて霧狀を呈す、可燃性を有せず爲めに火焰を燼滅す、含有量僅小の場合と雖も呼吸機關及び粘膜炎を毀損す、多量なるときは人畜の生命を絶つ、此瓦斯は硫化金屬の赤錆を呈するときに發生す、又 NH_3 は無色なれども劇烈なる刺戟性惡臭を有し、比重 0.59 なり、有機含窒物の腐敗より生ず、空氣中に 0.1—0.2% を含むときは有害にして 0.3% に達するときは粘膜炎を毀損す。

第三章 惡瓦斯緩和用空氣量

第一節 坑内機械より放出する空氣

坑内に於て使用する空氣式機械は鑿岩機、機關車、掘鑿土積込機及び扛重機なり、此等機械の坑内に於て運轉中に放出する空氣量は大約下表の如し。

鑿岩機	0.03—0.04 cbm/sek
機關車	0.35 (Lötschberg T. の實例に依る)
掘鑿土積込機	0.09—0.2
扛重機 (1,000 lbs 上げのもの)	0.09

而して既設隧道の工事中鑿岩用として坑内に送り込まれたる空氣量は次の如し

隧道名	機械より坑内に供給せられたる 空氣量 cbm/sek	
	鑿岩機	鑿岩機及び機關車合計量
Pfaffensprung	0.117—0.133	
Lötschberg	南口	0.917
	北口	0.484
笹子	0.130	
土讃線猪鼻延長 12,619 ft. (工事中)	0.360	

諸機械より坑内に排出せらるゝ空氣は坑内惡瓦斯の緩和に効果ありやと云ふに、空氣壓搾機經過中新鮮味を失ふの惧あれば著者は換氣用本空氣量中に之を加算せざることゝなしたり。

第二節 導坑に於て消費する爆藥量

隧道工に於て導坑を始め切擴箇所全般に亘り 1 日間に消費するダイナマイトの

量を既成隧道につき調査するに次の如し。

隧道名	ダイナマイト日間1消費最大數
	kg
Simplon I 北口	189.5
” 南口	151.0
Lötschberg 北口	227.0
” 南口	183.0
Rudersdorf	80.0

我邦隧道工によりて最大 180 kg 程度と考へ差支なしと雖も爆破瓦斯の緩和を論ずるに當り1日間の如き長き時期を採るは意義に乏しきものなり、何となれば導坑に於ては1回に多量の爆薬を使用するも切換箇所によりては比較的少量宛を各作業箇所に於て隨時消費するものなれば、爆破に起因する悪瓦斯を短時間内に緩和せんと欲する場合には導坑に於ける1回の爆發に要するダイナマイトの量を省察し、之に對する空氣量を決定して此量を終始坑外より導坑部に供給すれば切換箇所に於ける空氣汚濁は自然緩和せらるゝの理なり。

導坑に於て1爆破に使用するダイナマイトの量は導坑の大きさは元より岩質の硬軟等に依り相異なること勿論なれば、一定の標準を作ること難し、唯大體の概念を得るため泰西に於ける實例を調査するに次の如し

Simplon I. T.	25—28 kg 最大 40 kg
Lötschberg T.	26—31 ” 33
Heuenstein-basis T.	14—22

然るに我邦の隧道工にありては上表に比し少量なり

笹子	5—7 kg
東山, 新逢坂山	5
丹那	5—12 最大 20 kg

彼我相異點は導坑の大きさ及び岩質に關係するにあらずして我邦技術者の方經濟的爆破に留意せるがためなりと信ず。

抑も導坑の掘進に當り穿孔數の多きに失するときは徒に鑿岩時間を伸長するのみならず、却て不發孔並に孔尻殘尺を増加するの例甚だ多し、著者丹那隧道に従事中大正八年七月西口導坑 9ft×12ft に露出せる角礫岩に對し適當なる穿孔數を求めんと欲し、西口主任技師片桐嘉靖氏に囑し實驗したる結果は次の如し。

穿孔數	穿孔の總延長 ft	徑 1½" 標印 ダイナマイト 裝填數	不發孔の數	孔尻殘延長 ft	進行 ft
24	91.8	107	5	9.9	3.0
24	104.7	96		9.0	3.0
18	72.4	78		9.2	3.5
18	76.9	78		2.0	3.5
18	70.1	94		5.5	3.6
15	57.8	57			4.0
14	62.1	59			3.8
14	62.6	49			4.0
14	62.4	54			3.5

上表に示すが如く穿孔並に爆藥量 (5.5—6.6 kg) の最小なる場合に却て最大の進捗を見たり、當時東口安山岩に對しては穿孔數 18, 穿孔總延長約 80 ft, 爆藥量 100 本 (11.3 kg) を以て經濟的爆破なることを確めたり。

著者は技術者の導坑穿孔並に爆破に際し徒に泰西の例に追隨することなく、我邦從來の良慣習を踏襲せられんことを冀ふて止まず、而して經濟的爆破を條件として導坑の爆破に消費する爆藥量を次の如く假定せんと欲す、硬岩 15 kg 中硬岩 10, 軟岩 5。

第三節 爆破後休憩時間

爆破直後の導坑には悪瓦斯の跳梁するのみならず、爆烟のため朦朧として事物を識別し難し、故に導坑従業者は若干時間労働を休止す、之を俗に煙休と稱す、我邦の隧道にありては換氣の設備を缺くもの多きが故に此時間歐米に比して長し、彼地に於ける實例は次の如し

隧道名	爆破より復業までの時間 分
Simplon I 北口	10—15
Lötschberg 北口	20—30
Waldweise	20—30
Los Angeles Aqueduct に於ける 3 隧道	20—25

上表中 Simplon I. T. 及び Lötschberg T. に於ては換氣量多大なりしも他隧道は之に比して遙に少く、Los Angeles Aqueduct に於ける 3 隧道中の 2 隧道は其量僅に 2,500 cu ft/min に過ぎざりき。著者は煙休の時間標準を 30 分と見做して換氣量を計算せんと欲す。

第四節 坑内従業者員數

坑内に於て同時に労働する従業者の員數は隧道の延長及び工程等に依りて相異なるが著名隧道に於ける實例を調査するに次の如し。

隧道名	延長 m	坑内従業者員數(1 交替)		
		坑口	平均	最大
Simplon	19,770	北	500	530
		南	462	560
Lötschberg	14,535	北	330	752
		南	505	1000
Ricken	8,604	北	452	513
		南	387	431
Diestelrasen	3,560			280
Waldwiese	1,715			208

我邦に於て目下建設中の丹那 (7,805 m) 及び清水 (9,716 m) にありては片口に付勿論 500 人に達すべし。

第五節 空氣量計算

第一項 計算法

導坑及び切擴箇所に於ける空間、即ち空氣量にして明瞭なるときは惡瓦斯緩和のため必要なる空氣量は下記の通り算出することを得

今

R ; 坑内に於ける空間即ち空氣量

V ; 坑内に注入せらるべき空氣量

c ; 人畜、照燈、爆破及び其他に起因する當該瓦斯の總容量

a ; 當該瓦斯許容限度

b ; 大氣中自然に含有せらるゝ當該瓦斯割合

とするときは

$$a = \frac{bR + c + bV}{R + V}$$

故に

$$V = \frac{c}{a - b} - R$$

となる

Leuchli は

$$a = \frac{bR + c + bV}{R + c + V}$$

従て
$$V = \frac{c(1-a)}{a-b} - R \quad (\text{第一篇第三章参照})$$

となせしも坑内に於て形成せらるゝ CO_2 の如きは R の中より 0 を奪取するが故に著者は

$$a = \frac{bR + c + bV}{R + c + V}$$

の分母中より c を除外するを妥當なりと信す。上式中 R は隧道の開掘と共に刻々變化するのみならず、施工の方法其他の關係上其數量を豫定して常に之を保持すること困難なり、而して之を全然除外するときは V を多大ならしめ、人體保健上安全の程度を高むるが故に著者は空氣量の計算に當り

$$V = \frac{c}{a-b}$$

なる式を採用することゝなせり。

次に換氣設備の上に於て吹込及び吸出の兩法中(第一篇第二章参照)爆破直後吸出法を用ゆれば爆破瓦斯の大部分を坑外に排泄することを得んも、残留悪瓦斯の分量を正確に知ること困難なりとは安全を期すため著者は吹込法に依るものとして隧道の換氣量を計算することゝなせり。

第二項 炭酸瓦斯緩和

人畜及び照燈より發生する CO_2 の分量は本篇第一章第一節第一項及び第二項に依り次の如し

名稱	單位	數量	比率
從業者	1 時間内	0.080	1
畜類	に放散す	0.240	8
アセチリン燈	る容量 cbm	0.015	1/3

今 k ; 從業者の 1 時間内に放散する CO_2 容量

n ; 從業者の員數

n_1 ; 畜類の頭數

n_2 ; 照燈の個數

とし空氣量の計算に前項の公式を用ゆれば

$$V = \frac{k(n + 8n_1 + \frac{1}{3}n_2)}{a-b}$$

となる、然るに上式に

$$k=0.03 \text{ cbm (上表)}$$

$$a=10^0/100 \text{ (第二章第二節参照)}$$

$$b=0.3^0/100 \text{ (第一章第一節第一項参照)}$$

を挿入すれば次の如くなる

$$V=3.09 (n+8n_1+\frac{1}{2}n_2)$$

これより

A; 作業員 1 名に要する空氣量; 3.09 cbm/st

B; 照燈 1 個 „ ; 1.55

C; 1 燈を携ふる作業員 1 名 „ ; 4.64

D; 畜類 1 頭 „ ; 24.72

を求むることを得。

次にダイナマイト 1 kg の爆破に際し發生する CO_2 の容量は溫度 0°C 氣壓 760 mm の時に 280 Ltr なり (第二篇第一章第一節第三項参照), 今假りに坑内溫度を高く見積り 28°C とするとき瓦斯は膨脹して

$$0.280 \times (1+k_0 \times 28) \text{ cbm}$$

茲に

k ; 膨脹係數; 0.0037 Regnault に據る

即ち $0.280 \times 1.1036 = 0.309$ となる、之を緩和するために供給すべき空氣量は

$$\frac{0.309}{0.010 \times 0.0003} = 31.86 \text{ cbm}$$

なれば導坑爆破のため一時に消費するダイナマイトを N kg とするとき之が緩和に要する空氣量は $31.86 N$ cbm となる。茲に大隧道ありて其從業者は片口最大 500 人にして、各人照燈を携帯するものと假定するときは此人員並に照燈が坑内に放散する CO_2 緩和用の空氣量は

$$4.64 \times 500 = 2,320 \text{ cbm/st なり}$$

次に隧道の地質を硬岩と見做すときは爆破により發生する CO_2 を緩和するために必要なる空氣量は

$31.86 \times 15 \text{ kg} = 477.9 \text{ cbm}$ なり、爆破後に於ける導坑の休業時間を 30 分と規定する場合は

$$2 \times 477.9 = 955.8 \text{ cbm/st}$$

を坑内に供給せざるべからず、之に作業者及び照燈關係のものを併すときは總空氣量は $2,320 + 955.8 = 3,275.8 \text{ cbm/st}$ となるべし。

隧道に關する參考書は從來 CO_2 緩和を主として換氣量を定む、茲に諸家の説を蒐集し著者の計算せし數字とを對照するに次の如し、但し *A* 乃至 *D* は本項前記の通りにして *E* はダイナマイト 1 kg に付必要なる換氣量を表はすものとす

書名又は著者名	A		B		C		D		E	
	cbm/st	cuft/min	cbm/st	cuft/st	cbm/st	cuft/min	cbm/st	cuft/min	cbm/st	cuft/min
本 著 者	3.09	1.8	1.55	0.9	4.64	2.7	24.72	14.6	31.86	18.8
Handbuch der Ingenieur Wissenschaften					10.0	5.9	35.4	20.9	12.5	7.4
Röll, Enzyklopädie des Eisenbahnwerrens					同					上
Prelini & Hill					7.7	4.5	27.0	15.9	4.8	2.8
Richards for metal mining work	42.5	25.0	1.7	1.0			127.5	75.0		
Safety & Efficiency in mine Tunneling					127.4	75.	254.8—339.8	150—200		

第三項 酸素補給

人類は其呼吸に際し大氣中の O_2 を消費す其數量は普通

休憩中 20.8 Ltr/st

労働中 27.9 „

となす、坑内に於ける従業者は絶へず労働に服するものと考えるときは、坑内 1 人に對し補給すべき O_2 の量は 0.0279 cbm/st なり、而して空氣は成分上略ぼ窒素 4、酸素 1 の割合より成るものなれば O_2 の所要量を得るためには新鮮なる空氣 $0.0279 \times 5 = 0.1395 \text{ cbm/st}$ を必要とす、然るに呼吸により發生する CO_2 を緩和するため要する空氣量は前項依り 3.09 cbm/st にして O_2 補給量に比し遙に多大なり、猶翻て考ふるに呼氣は O_2 の 16% を含めり (本篇第一章第一節第一項参照) 然るに酸素缺乏の許容限度は 15% (本篇第二章第一節参照) なれば呼氣自身 O_2 關係に於ては無害なり、故に O_2 補給の問題は重大ならず。

第四項 酸化炭素緩和

ダイナマイト 1 kg の爆破に依り發生する CO の容量は温度 0°C, 氣壓 760 mm の状態下に於ては 70 Ltr なり (本篇第一章第一節第三項参照), 坑内温度を本節第二項同様 28°C と假定するとき N kg の爆破に依りて發生する CO の量は次の如し

$$C = 0.07 \times (1 + k_v' \times 28^\circ) N \text{ cbm}$$

茲に k_v' ; 膨脹係數; CO₂ に比し稍々小なれども奇零以下五位迄を考ふるときは CO₂ に同じ。

故に $C = 0.07 \times 1.1036 N = 0.077 N$ なり, 而して CO の許容限度は 0.2⁰/₁₀₀ (本篇第二章第三節参照) ならば之が緩和のため坑内に供給すべき空氣量は

$$\frac{0.077}{0.0002} N = 385 N \text{ cbm なり}$$

恰も CO₂ の緩和に必要な量 (31.86 N) の 12 倍強に相當す。

今隧道の地質を硬岩と見做し且煙休の時間を 30 分と規定するときは爆破に起因する CO の緩和に必要な空氣量は

$$385 \times 15 \text{ kg} \div 0.5 \text{ st} = 11,550 \text{ cbm/st}$$

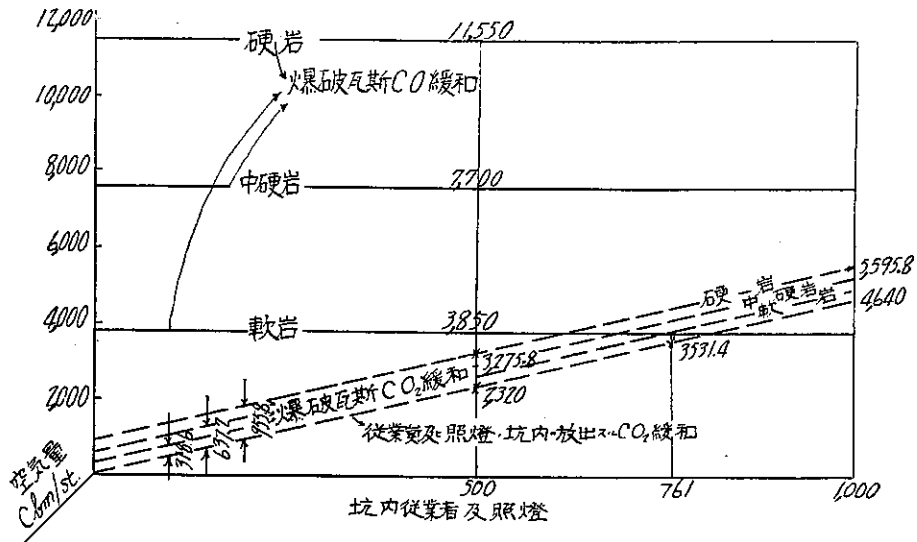
となる, 而して當該隧道には 1 交替に 500 人の入坑者ある場合 CO₂ の緩和量は 3,275.8 cbm/st (本章第二節参照) ならば上記數量の 28% に過ぎず, 是等の關係を圖解せば第一圖の如し。

隧道の地質軟岩にして 1 交替の入坑者 761 名を超過するときは圖上に現はるゝが如く CO₂ の緩和に必要な空氣量は却て CO に對する量を超過す, 然れども隧道の計畫に當り遭遇すべき岩質を軟岩のみと鑑定することは換氣量の決定上危険多ければ, 假定岩質の軟弱なることを豫想し得る時と雖も之を中硬岩と見做し, CO の緩和に必要な空氣量を採擇するを可とす, 斯く考ふるときは CO₂ は考慮の價値を失ふに至るべし。

今若し CO の許容限度を我陸軍省毒瓦斯研究所に倣ひ 0.25⁰/₁₀₀ (本篇第二章第三節参照) に高むるときは CO 緩和用空氣量は $\frac{0.077 N}{0.00025} = 308 N \text{ cbm}$ となり, 11,550

cbm/st の換氣量を備ふる隧道にありては導坑に於て 1 回に $N = \frac{11,550}{308 \times 2} =$

18.75 kg のダイナマイトを爆破するも差支なきこととなる。



第一圖 悪瓦斯緩和用空氣量

第五項 沼氣其他緩和

ダイナマイト 1 kg の爆破に際し發生する CH₄ 其他の容量を許容限度を以て除するときは緩和に必要な空氣量を求め得べし其結果は次の如し

瓦斯名	1 kg の爆破に依り 發生する容量 Ltr	許容限度 %	緩和用空氣量 obm
CH ₄	2	5	0.04
H ₂	4	4	0.10
H ₂ S	1	0.01	10.00
参照	本篇第一章第 一節第三項	本篇第二章 第四、第五及び第六節	

然るに CO 緩和に必要な空氣量は前節の通り 385 cbm ならば此數量を坑内に供給すれば爆破に起因する CO₂ を始め上記悪瓦斯の出現に對しては憂慮するに足らざるなり、上記以外の悪瓦斯の噴出に遭遇するときは臨機の處置を執りて含有量を許容限度以内に低下すべきは勿論のことなるが本論文の目的は常設施設の換氣量を決定するにあれば連續的に發生する毒瓦斯の緩和以外は省略することゝなせり。

第三篇 坑内爽凉用換氣量

第一章 鬱熱を惹起する原因

第一節 鬱熱

吾人生物は熱源として飲食物を攝取し、之が酸化作用に依りて熱量を産出すると同時に呼氣及び皮膚面に於て管まるゝ輻射傳導及び蒸發等に依りて絶へず熱量を體外に放出す、斯くの如く熱量代謝の圓滿に行はるゝ間は健康を保持するも、若し放熱の妨げられ發生熱との間に調和を失はんか不快疲労を覺へ到底活潑なる勞働に耐ゆべからず、此症狀を鬱熱(Wärmeschlag)と稱す。

Rubner は成年者の輕裝して溫度中和且靜穩なる空氣中にある場合放出する熱量の割合を次の如く推定したり

		W.E./24st
呼吸	Durch Atmung	35
動作	„ Arbeit	51
飲食物加温	Erwärmung der Kost	42
輻射	Strahlung	1,181
傳導	Leitung	833
蒸發作用	Wasser Verdunstung	558
合計		2,700

上表を見るに輻射傳導及び蒸發は放熱作用の大部分を占む、而して是等3作用に直接の影響を及ぼすものは吾人に接觸する雰囲気の溫度、濕度及び氣流なり、此三者にして放熱3作用に對し適宜の状態にあらば吾人の快感は自ら誘發せらるゝも、若し之に反するときは倦怠を覺へ、勞働能率を著しく低下するに至るべし、Rubners Lehrbuch には次表を示す。

體重 58 kg の男子の1時間に排泄する水氣重量表

溫度	乾燥せる空氣中		濕氣に富む空氣中	
	濕度	水分放出量	濕度	水分放出量
15°C	8 %	36.35	89 %	9.05
20°,	5 „	54.1	82 „	15.3
25°,	6 „	75.4	81 „	23.9
29°,	6 „	105.3	—	—

(備考 大略 1g H₂O=0.54 W.E.)

高温及び多濕が水分の放出、從て放熱を防ぐことは上表の通りにして之に無風の加はるときこの三者は鬱熱を惹起する原因なれば、著者は次章に於て隧道内空氣の溫度及び濕度を過大ならしむる諸原因を省察せんと欲す。

第二節 氣温及び濕度昇騰

第一項 人畜

人畜は氣温の其體温より低きときは呼氣輻射及び傳導に依り熱量を周圍空氣中に放散するものなり、人類の常温は 36.°5—37.°2C なれども其實は氣温に依り、相異なるものなり Th. Weyls Handbuch der Hygiene に據れば次の如し

	鑛山坑夫				隧道坑夫
空氣温度	°C 20.8	24—25	27—28	29.0	
皮下體温	°C 36.8	37.2	37.5	37.6	37.8 に達するものあり

氣流も亦體温に影響を及ぼし、風速の大なるときは人體と空氣との觸接面積の増加する結果體温は低下す、其關係を示すため一例を擧ぐれば次の如しと云ふ

風速	空氣温度	皮下體温
小	21.°6C	37.°37C
中	25.°0	37.°36
大	27.°4	37.°36

之を以て見るに人體より空氣中に放散する熱量は環境の氣温及び氣流に關聯すること明かなり、然れども勞働程度に依る相異は更に大なり即ち次の如し

勞働者休憩中	1 時間	96 W. E.
中位の勞作中	”	118
大に活動せる時	”	140
以上平均		118

英國に於ける “The Committee on The Control of Atmospheric Conditions in hot and deep Mines” の報告には「7 時間交替の勞働者の全力を擧げて勞作するとき毎時間 250 W.E. 又休憩時には 70 W.E. なりと」と記載す我邦隧道工に於ける勞働者中坑夫及び破碎石積込人夫等は劇務に従事するも、進鑿夫斧指の類は中位の勞作に服するが故に著者は各職別を平均し勞働休憩の兩時を通じて 1 時間 120 W.E. と見做すべし。畜類の放散する熱量は Terrey に據れば次の如し

名稱	状態	體重 1 kg に付		1 頭 1 時間に放出する熱量 W.E.
		1 時間の放散熱量 W.E.	體重の假定 kg	
牡牛	飢餓の時	1.63	500	815
	厩舎内休憩時	1.55		775
	中位の勞役中	2.32		1,160
	劇しき ”	2.86		1,430

馬	輕微なる勞役中	204	400	816
	中位の "	246		934
	劇しき "	3.10		1,240
	平均數		1,031	

著者は之を 1,000 W.E. 即ち作業員約 8 人分に相當する熱量と見做す、人畜は肺臟及び皮膚面より絶へず水分を空氣中に放散す、普通安靜時に於て 1 日に排泄する水分の量は呼吸に依るもの 400 g、皮膚面よりするもの 900 g なるも労働時にありては皮膚面より放出するものゝみにて 2,000—2,600 g に達すと云ふ、坑内労働者の 1 時間放熱する熱量を上記の通り 120 W.E. と見做し、氣温の高き場合を想像するに彼が其體温の昇騰を防ぎ平熱を維持するためには $120 \text{ W.E.} \div 0.58 = 207 \text{ g}$ の發汗をなし、而かも其全量の蒸發することを必要とす。之を要するに労働者は坑内の氣温及び氣濕を高上するものなり。

第二項 照 燈

照燈の 1 時間に放散する熱量につきては Wedding は次表に示せり

燈 油	燃 料	消費重量 (H.E. 時に付)	H.E. 時に放散する 熱 量
アセチリン	カーバイト	2.25	7.8 W.E.
蠟 燭			6.5—69.0
菜 油		9.5	90.0

又アセチリン燈 10 燭光のものが放散する熱量は 1 時間 55 W.E. なりとの説もあり、熱海線に於て使用する照燈のカーバイト消費量より推すにその放散する熱量は Wedding 以上なるも坑内に於て消燈せるランプ數も相當多きことなれば著者は 60 W.E. 即ち人類放熱量の $\frac{1}{2}$ と見做す。

坑内従業者は必ずアセチリン燈 1 個を携帯するものと見做すときは従業者 1 人の 1 時間に放出する熱量は $120 + 60 = 180 \text{ W.E.}$ なり、作業員及び照燈に起因する此熱量を著者は作業熱 (Arbeits-wärme) と命名し、180 W.E. を以て同熱の單位と見做すべし。

第三項 爆 破

爆破に依り發生する温度は Nitroglycerin にて $3,155^{\circ}\text{C}$ にして普通爆薬は $1,700$ — $2,200^{\circ}\text{C}$ なり、此温度は驚くべき程高きものなりと雖も爆破は坑内に劇甚なる氣流を惹起し、高温を有する爆破瓦斯は短小の時秒間に 100 倍にも達する坑内空氣

の大量と混和して坑内気温を緩和すべし。

今假りに

t_1 ; 爆破温度; 3,000°C

T_1 ; 同上絶體温度; 3,273°C

t_2 ; 坑内空気温度; 25°C

t_2 ; 同上絶體温度; 298°C

V_1 ; 爆破瓦斯量

V_2 ; t_2 なる温度を有する空気量

t ; 混和後に於ける中和温度

とすれば t の價は次の如くなる

$$\begin{aligned} t &= \frac{V_1 t_1 T_2 + V_2 t_2 T_1}{V_1 T_2 + V_2 T_1} \\ &= \frac{t_1 T_2 + \frac{V_2}{V_1} t_2 T_1}{T_2 + \frac{V_2}{V_1} T_1} \\ &= \frac{3,000 \times 298 + 100 \times 25 \times 3,273}{298 + 100 \times 3,275} \\ &= 27^\circ.7C = t_2 + 2^\circ.7C \end{aligned}$$

即ち在來温度を超ゆること $2^\circ.7C$ に過ぎず、之を以て見るに爆破に起因する熱度は著大のものなれども作業者の再び導坑に進入する迄には著しく低下するものなり、之に加ふるに爆破は1日間に數回發生する現象にして一時的のものなり、之を永續的なる作業熱に比すれば坑内温度に及ぼす影響は甚だ尠きものなり。爆破瓦斯中には水蒸氣を含む、其量は爆薬 1 kg に付普通 250 Lit なり。

第四項 地 熱

工事中遭遇すべき地熱の高低は労働能率上重大なる問題なり、地熱は地表面より深く進入するに従ひて昇騰す其割合は次式を以て表はさる。

$$t = t_0 + \frac{l}{h}$$

茲に t ; 地下任意の地點に於ける地熱温度(1 箇年を通じ同様なり)

t_0 ; 地表に於ける年平均温度

l ; 地表面より上記任意の地點に至る垂直高

h ; 地熱の 1°C 高まる垂直高

Mezger に依るに表面下 1.2 m 迄は寒暑の影響を受くるも此境界面以下は四季を通じ温度の差殆んど無し、故に h に年平均を用ゆることを得るなり、 h を地熱増加率 (Geothermische Tiefenstufe) と稱す、此率數は試錐孔又は深井に於て觀測せられ各地に於ける數字は次表の如し

位 置	試錐孔又は深井の深 m	地熱増加率 $\text{m}/1^{\circ}\text{C}$
Manegau, Indien	94.5	37.31
Blythwood, Gragrow	105.8	27.43
Kirkland Neuk, Gragrow	107.9	29.08
Gakutsk, Sibirien 氷結地	164.6	28.53
Mondorf, Luxemburg	—	30.90
Paris, 兵學校附近の掘抜井戸	173.1	30.74
„ St. Andre 同 上	253.0	30.72
„ Grenelle 同 上	399.9	31.26
Pittsburg	—	34.00
London, Kentishtown 掘抜井戸	335.3	30.17
Sudenburg, Magdeburg 附近	568.0	32.36
Scarle, Lincoln	1,609.6	37.86
Sperenberg, Berlin 附近	1,064.3	33.00
Sennowitz, Hulle 附近	1,084.0	36.66
Lieth, Holstein	1,259.0	35.07
Schladebach, Kreis Merseburg	1,716.0	36.87
横濱海岸	420.0	51.60
東京帝國大學構内	385.0	39.80
一般的平均數と稱せらるゝものに 2 種あり		30.00 及び 33.00

酸化し易き原料を埋藏する地區假令炭山、油田及び錫鑛の如き金屬を産する鑛山に於ける増加率は下表の如し

種 別	地 名	増加率 $\text{m}/1^{\circ}\text{C}$	記 事
炭 山	Ruhr	27.9	明治四十一年末より 約 3 箇年に亘り 57 箇所の試錐孔につき 観測せし結果の平均 數なり
	Saar brücken	27.4	
	New Castle	23.3	
油 田	越後の小千谷西山	22.8	
	新津及び頸城郡内		

炭山地帯内にして温泉を湧出する地方にありては増加率殊に大なり、其實例として磐城の湯本入山炭山を擧げんに同山には深さ 100 m を超ゆる炭坑 2 箇所あり、甲坑に於ける増加率 13.5 m にして、乙坑 19 m なり、又新火成岩より成る土

地に於ても増加率甚だ大なり、即ち次の如し

地名	増加率	記事
Sulz (獨)	$\frac{m}{1^{\circ}C}$ 24.1	第三紀玄武岩爆裂口あり
La Rochele (佛)	19.0	
Budapest (洪)	15.0	第三紀火山の名残たる温泉あり
Maoholle (佛)	14.6	炭酸噴氣孔あり
Monte Massi (伊)	13.5	硼酸噴氣孔あり
Neuffen (獨)	11.3	第三紀玄武岩爆裂口あり

近接地方に於て増加率の相異なる例多し其理由は (1) 地表面の凹凸に依る、假令聳立せる高嶺直下において増加率は小なるも、之に反し平坦地又は窪谷にありては大なり、(2) 成層勾配に基因す Alpentunnel に於ける観測によれば地心より地殻表面外に向ふ放熱は地層の勾配緩なる所に尠くして、成層の水平線と交はる角度の大なる箇所に於て多し、故に増加率は前者にありて大にして後者に於て小なり。Simplon T. 及び Gotthard T. に於ける観測より Prof. Herbst の推算に依るに成層勾配と地熱増加率との割合は次表の如し

成層と水平線との 間の交角	地熱増加の比率	
	Simplon T.	Gotthard T.
0	1557	× 1428
10	1530	1400
20	1460	1330
30	1350	1224
40	1250	1150
50	1170	1070
60	1110	1010
70	1070	0970
80	1040	0950
90	1022	× 0938

備 考
Gotthard T. に屬する數字は Herbst
の與へたる×印の數字より著者自ら
算出せり

隧道工の福音とも稱すべきは前記の如く高山の直下において平地又は窪谷下に比し増加著しく小なることなり、之の實例並に著名隧道の施工中遭遇せし地熱最高温度は次表の如し

隧道名	隧道より地表面	地熱の増加率	地熱の最高	
	迄の垂直高 (最大)			
	m	m/1°C	°C	
Simplon 山頂直下	2160	約 50.0	53.0	
” 溪谷下	—	” 20.0	—	
St. Gotthard 山頂直下	1706	50.0	32.9	
” 平坦地下	—	約 31.5	—	
” 溪谷下	—	” 22.5	—	
Lötschberg	1569	47.6	34.0	
Mt. Cenis	1054	43.3	36.0	
Arlberg	720	35.1	18.5	
Ricken	672	34.0	25.4	
Tauern	1567	38.3	23.3	
Albula	912	35.1	15.0	
征子	東口第一避穴	302	34.7	} (3箇所平均数 45.1)
	” 第二 ”	410	40.9	
	中央	479	54.9	
	西口第二避穴	320	39.5	
	” 第一 ”	137	25.9	

地熱増加率に大なる影響を及ぼすものは地下湧水なり、Wissenstein T. に於て 450 sl の冷水噴出せしに増加率は 127.6 m 迄低下したり。丹那隧道は前年高地熱のために其竣功不可能にあらずやと論議する學者もありし程高温度を豫想せられたり、當時鐵道省の發表せし温度表は次の如し

観測位置坑門 よりの距離	隧道基面より地 表面迄の垂直高 (H)	地熱温度の豫想		實測温度
		理學博士 横山又次郎氏	理學博士 鈴木敏氏	
東口 (熱海)	ft	°F	°F	°F
3,267	780.4	91.6	71.6	78.0
3,927	930.1	98.6	74.0	80.0
4,422	974.4	100.6	74.7	80.0
7,357 最高	1,768.2	137.3	87.5	未開掘 (x)
西口 (大竹)				
4,390	671.7	86.5	69.8	63.0
4,521	649.6	85.6	69.5	63.0
3,861	604.8	83.5	68.9	62.0
3,201	530.3	80.1	67.6	63.0

然るに其後大湧水に會したるため疑問なりし最高温度 x は 64°F なりき、これも亦湧水の増加率を低下する適例なり。

目下工事に係る清水隧道は上野及び越後の國境に位する茂倉岳(標高 1,977.9 m) を穿てり、而して隧道基面より同岳地表までの最大垂直高は 1,300 m なり、同岳山頂は頗る急峻にして笹子峠絶頂の勾配緩和なるに比すべくもあらざれども地熱増加率を假りに笹子中央部に倣ひて 55 m と見做す、又山頂に於ける平均温度に關して最も近き測候所々在地なる新潟市の平均温度と高度増加に基く温度低下を顧慮して 5°C なりと推定す、然るときは

$$t = 5 + \frac{1,300}{55} = 28.6^{\circ}\text{C}$$

此温度たるや Lötshberg の最高地熱に比すれば 5.4°C 低く、左まで高温なりと言ふに足らず、清水隧道にして然りとすれば現在建設中に係る他隧道並に將來起工せらるゝ隧道の大多數は其地熱 28.0°C 以下なりと考ふることを得べし。

第五項 坑内気温に及ぼす他原因

(I) 氣 壓

鑛山の堅坑にありては地表面より坑内に降下するに従ひ空氣壓縮の結果として温度の昇騰を見るべし、若し熱度の壁面蒸發等に依り失はるゝことなければ其割合深度 100 m に付 1°C なり、地表面下甚だ深き鑛坑に於ては坑内外氣壓差に基く此温度高上は重要視すべきも、我隧道工にありては水路用隧道の横孔を穿つものを別とし普通高山を貫くが故に地形の關係上堅坑を穿つこと稀なり、著名隧道にして堅坑を設けたるものを調査するに僅に下記數箇所過ぎず

隧道名	垂直又は勾配	地表面下深度	備考
Loges	垂 直	165 m	
Hauenstein I.	"	162	
Ronco	勾 配	230	垂直深度に換算すれば 88.6 m
Spitzberg	垂 直	128	
板 谷	垂 直	95	
冠 着	"	81	

丹那隧道にありては其地表上丹那盆地に堅坑開掘に對し適當の箇所あるも、其深度 156 m に達するが故に經費上之を設けざりき、我邦にありては堅坑の深さ普通 100 m を限度とするが故に氣壓差に基く温度の昇騰は僅に 1°C に過ぎず、從て氣壓差は問題となすに足らざるなり、延長の大なる隧道は排水を便にするため坑口

より坑内に向つて上り勾配を以て掘進するを以て坑内中央部は坑口よりも反て高きを普通とす、然れども此標高差は次表に示すが如く左まで大ならず

隧道名	低き坑口と坑内頂點との 高さの差 m
Simplon	71.3
Gotthard	46.0
Lötschberg	42.0
Arlberg	98.0
Tauern	52.9
Albula	31.8
Karawanken	23.7
清水	74.4
丹那	9.8

之を要するに氣壓差は鑛山工と異り重要視するの要なきなり。

(II) 坑外氣温

坑外温度は延長の短小なるか、又は地殻下淺き隧道にありてはその影響を坑内に及ぼすと雖も普通の隧道にありては坑道の深く進入するに従ひ坑外温度に感應せざるものなり、丹那隧道熱海口導坑を手掘を以て掘進せし頃の實驗に徴すれば坑口より 520 ft. 進入せし頃より坑外氣温の影響を蒙ること殆んど無かりき。

(III) 湧水の温度

Simplon I. T. 掘鑿中 50°C の温泉 50 sl の割合を以て湧出したり、之がために坑内氣温は最高度に達したり、又 Comstock 坑にありては 1880 及 1881 年内に地表下 900 m の地點に於て温度 75°C、水量 216 sl の熱泉の湧出に遇ひしが多量の空氣を坑外より當該箇所に入し坑内氣温を漸く 35—38°C 迄降下せりと云ふ、かくの如く熱湯の湧出に遇ひ而も其量の多きときは坑内氣温に及ぼす影響大なり。

(IV) 酸化作用

Dr. Haldane 及び Meachem が高温にして濕氣に富む坑内に於て支保木材腐化に伴ふ影響を觀測せし結果に依れば酸素缺乏の外、或箇所にありては坑内氣温は地熱以上實に 9°C に達したりと云ふ、猶炭山及び水氣に富む加里鹽坑にありては酸化に伴ふ温度の昇騰は輕視すべからず。

(V) 地壓

地盤の脆弱にして壓力を感ずる坑道にありては地壓も亦氣温を高むるものなり。

第三節 上記惡因を緩和する方法

(I) 飲料清水の供給

Dr. Hunt の印度に於て調査せし所に依れば日蔭の溫度 46°C (115°F) の時戶外にありて活躍する健康體の歐洲人は 1 日間に最小 90 kg (3 gal) の水を飲用す、而して此量の殆んど全部は發汗すと、全氏がまた Oxford に於て實驗せし所に依れば焦熱なる部室内にありて 1 時間に 6 kg 宛の割合を以て飲水するに此全量は汗水となりて體外に排泄せらると云ふ、かくの如く發汗作用の盛んに行はれ皮膚面より蒸發するときは労働者は爽涼の感を抱くのみならず、甚だ健康的なれば坑内に清水飲用場を設置すべし、若し事情の之を許さざるときは労働者の入坑に際し各自に小水槽を携帯せしむべし。

(II) 坑内に於て着衣労働及び裸體休憩の獎勵

Gottinard T. の報告に據れば「全隧道に於ては労働者が發汗のため濕潤せる衣服を纏ひ乍ら休憩せし爲め皮膚病を患ふる者甚だ多く、中には腫瘍を患へて外科的手術を受け十數日間に休業するものもありたり」と、然るに之に反し作業中濕潤せる衣服よりする蒸發は労働者をして爽味を覺えしむるものなれば着衣の儘労働し、休憩に際しては剝脱するを可とす。

(III) 労働者募集箇所の顧慮

坑内は一般に濕氣に富み且溫度高さものなり、故に労働者の募集は夏季蒸暑き地方に於て行ふべきなり、かゝる地方に成育し労働の習慣あるものは坑内に於て勞作の能率必ずや高し、我邦にありては裏日本即ち日本海に沿へる新潟縣以南の地方は募集の好適地なるべし。

(IV) 換氣機建家の位置及び空氣吸氣口の方位に關する注意

鑛山工にありては地形に起伏ある場合入氣坑口を北面の箇所に開堀すれば、同一標高南向の地點に比し入氣溫度を 2°C 低下し得と云ふ、隧道工に於ては入氣溫度の關係のみを以て坑門位置を決定すること能はざれども、換氣機据付建家又は換氣機及氣口を日蔭の地點に撰定することに依り幾分入氣溫度を低下することを得べし、故に氣温高さ土地に設けらるゝか、或は地熱高さことを豫期せらるゝ隧

道工にありては此點に關して注意することを要す。

第二章 勞働に支障なき零圍氣狀態

低溫、低濕並に微風は勞働能率上最も望ましきことなり、然れども坑内空氣は理想に反し勞働者より排泄する水分の外、照燈及び爆破作業に依りても濕度を増加するのみならず、一般に坑道は其量に於て多少の差こそあれ湧水に富むものなればその濕度甚だ高きを普通とす、Simplon I T. に於ては最高 95 % Lötschberg T. は換氣施設完備せしにも係らず Gotthard T. 同様 100 % に近かりき、丹那隧道西口(大竹口)は冷氣にして勞働能率高しと稱せらる、去る大正十一年三月二十四—二十六日鐵道省官房研究所技師吉田謹平氏が同坑口に就き調査せし結果は次表の如くにして濕度甚だ高し。

測定			位置大所坑口より	濕度	溫度	
日	時	大正十一年三月			華氏(測定)	攝氏(著者換算)
24	正午		4,180 (直設)	100 %	63.9	17.7
„	后	3	4,480呎	98.7	63.0	17.2
25	前	10	70 ch	93.7	63.0	17.2
„	正午		60 ch	92.0	64.2	17.9
26	前	8	30 ch	93.7	58.5	14.7
„	„	9	3,000 ^呎 (直設)	93.1	67.5	19.7
„	„	10	20 ch	97.6	57.0	13.9
„	„	11	10 ch	92.8	57.0	13.9
„	正午		坑門口	82.1	59.4	15.2
„	后	3	50 ch	93.7	65.7	18.7
„	„	4	40 ch	95.8	61.2	16.2
„	„	„	3,700 ^呎 (直設)	95.8	64.6	18.1

又同隧道熱海口の濕度は次表の如し

觀測の日	大正十四年三月六日晴	
觀測の位置	東坑口よりの距離	溫度%
底設導坑	8,450 ^呎	94
同	8,250	96
丸型切攢	7,200	97
壘築濟	6,750	97

観測の位置東坑口よりの距離	湿度%
壘築齋	97
坑門	64

我邦の空氣は湿度高ければ換氣用の大氣それ自體既に水氣に富む、故に隧道坑内空氣の湿度は100%に近き高度のものなりと見做すを妥當とす、故に寒暖計に乾球濕球の何れを用ゆるも度数の較差は大ならず。

Dr. Haldane は濕球寒暖計の度数を以て勞働能力を計る規矩となし次の如く論ぜり ≧ 濕球溫度 31.°C を超へ空氣の全く死止状態にあるときは薄き衣裳を纏ひ休憩するも體溫は連續的に昇騰す、而して溫度の高まる程昇熱の度急速なり、乾燥せる空氣 56.°C は水蒸氣を以て飽和せる 31.°C に比し活動上に影響尠し、何となれば前者にありては皮膚面に發汗作用起り體溫の高上を防ぐに足るも後者に於ては汗水の大部は地上に滴下し皮膚面上に蒸發作用起らず、從て清涼を感ずることなし、之を以て見るに靜止せる空氣中に於ける連續的勞働は濕球溫度 31.°C 以下にあらざれば困難にして猶濕球溫度 25.°C にありても劇甚なる勞作は不可能なり、但し坑内に於ては脱衣又は頗る輕快なる服裝をなし居るが故に活動に適す、此結果濕球溫度 26.°C (80°F) 又はそれ以上を越ゆるも勞働上大なる支障なし ≪ 皮膚面よりする放熱量は吾人を被包する雰圍氣の絶間なき更新に依りて増加し、吾人をして快感を抱かしむるものなれば風速を加味したる高温の限度を考慮するの要あり、Dr. Haldane は之を次の如く定めたり。

	氣流速度	濕球溫度
休憩者(輕衣)	170 ft/min (0.864m/sec)	93°F(34°C)
活動者	135 ft/min (0.686m/sec)	85°F(29.4°C)

又 Dr. L. Hill は作業者の健康を保持し、且勞働能率を増大せしむるためには雰圍氣状態が鬱熱を防ぐに足る丈の冷却力を具備せざるべからずとなし、之を測定する爲 Kata 寒暖計なるものを案出せり、同寒暖計は 100°F より 95°F まで溫度の降下する間に、對流及び輻射の作用により球部の放散する熱量を測定するものにして球部の面積每平方仙米の放熱量を Factor (F) と稱し寒暖計毎に之を刻記せり、而して 100°F より 95°F まで降下する時間を T 秒とれば $\frac{F}{T}$ を以て冷却力 (Milicarorie per sec per qcm) を表はすものとし、之を指數 (H) とす、低温、低濕並に空氣の動搖は H を増加し、之に反し高温、多濕及び無風は H を減小す、球部を被包せずして其儘使用するときを乾カタと稱するが之に對する公式は

次の如し

無風の時 $H=0.27(\phi-t)$

風速 1m 以下の場合 $H=(0.20+0.40\sqrt{V})(\phi-t)$

同上 1m 以上 ,, $H=(0.13+0.47\sqrt{V})(\phi-t)$

茲に V ; 風速 m/sec

ϕ ; 36.°5C

t ; 氣温(乾球)°C

なり、而して Dr. Hill は快感を覺ゆる指數を次の如く提議せり

静かなる坐業 $H=6$

中位の勞働 8

強度の勞働 10

然るに Vernon は坐業に對し $H=5$ を主張す。

又寒暖計の球部を濕潤したる木綿の類を以て被覆して使用し、前同様 H を求むる場合に之を濕カタと稱す、濕カタは對流及び輻射に依る放熱の外に蒸發に依る放熱を測定するものにして雰圍氣の濕度と密接の關聯を有し、之が乾カタに對する關係は恰濕球寒暖計の乾球に對すると同様なり、而して濕カタに對する公式は次の如し

風速 1m 以下の場合 $H'=(0.35+0.85\sqrt[3]{V})(\phi-t')$

風速 1m 以下 ,, $H'=(0.10+1.10\sqrt[3]{V})(\phi-t')$

茲に V 及び ϕ は乾カタの場合に同じく

H' ; 濕カタ指數

t' ; 氣温(濕球)°C なり

而して Dr. Hill は室内に於ける坐業者に對しては $H'=18$ (乾カタの $H=6$ に相對す)を限度となしたり。今 Dr. Haldane の定めたる風速を加味したる高温の限度を濕カタに關する Dr. Hill の風速 1m 以下の公式に當籤むるに次の結果を得

	Dr. Haldane の限度		濕カタ H'
	氣流速度	濕球温度	
休憩者(輕衣)	170 ft/min	93°F	2.9
活動者	135 ft/min	85°F	7.8

斯くの如く Dr. Hill の唱導する限度は Dr. Haldane の所説に比すれば雰圍氣狀

態の良好なるものなり。

著者が丹那隧道熱海口に於て乾カタを使用したる結果は次の如し

観測の日 大正十四年四月九日雨無風			
観測の位置	東坑口よりの距離	乾球寒暖計	乾カタ指数
坑口		10°	12.4
壘築齊	6,500 ft	18°	6.7
丸型切掛	7,100	17°	6.9
底設導坑	8,600	19°	5.3

上記観測位置の内坑口に於ては清涼の感を抱きたるも、底設導坑 8,600 ft にありては蒸暑を覺えたり、然れども 6,500 ft 及び 7,100 ft は從來我邦隧道工には有勝ちの空氣状態にして労働能率を損する程度のものとは認めざりき。

抑も高温多湿に對する抵抗力は人に依りて異なり、又習慣性にも依るものなり、同じ歐羅巴人種にても伊多利人は抵抗力強しと稱せらる、Gotthard T. 建設當時 Iirolo 側に於て氣温 31°C に達せしとき北方よりの出稼者は労働に堪へざりしも、伊多利人は何等躊躇する所なく劇勞に服したり、Brazil 炭山に勞作する同國人は 45°C 濕球温度 33.3°C の野外にありて格別苦痛を覺ゆることなく勞役に服し、炭坑にありても 37.7°C 及び濕球温度 23.9—29.4°C の氣温下にありて運搬車へ炭塊投込の如き相當劇しき労働に耐へ得、之に反し歐洲人の坑夫はかゝる高温下にて作業することを得ずと云ふ、我邦は其地勢狹長にして四圍繞海なれば空氣は大陸地方に比し濕氣に富む、殊に梅雨季より初秋に亘りて蒸暑き日甚だ多し、従て我邦人は天性並に習慣上蒸暑き氣候下の労働に慣れたれば隧道坑内の作業には Brazil 人同様又はそれ以上適應するものなりと著者は信ず。

又牛馬の類は濕氣を帶ぶる高温度に對する抵抗力微弱にして温度 32°C に上れば殆んど勞役に堪へず、是畜類は吾人に比し體軀の割合に小なる皮膚面を有し、従て發汗量の比較的僅小なるに因る、故に氣温高き坑内に於ては之を使用せざるを可とす。

著者は彼此省察の結果高温の限度を濕球 28°C とし、又 Dr. Hill の唱ふる冷却力に關しては乾カタ指数 $H=6$ を以て最低限度と定めんと欲す、然れども我邦に於て現在建設中又は將來起工せらるゝ隧道の最高地熱は 28°C 以下なるべければ(本篇第一章第二節第四項參照)坑内温度は入坑者なき場合は自然限度以下にありと考ふることを得。

第三章 入氣の坑内氣温に及ぼす影響

第一節 坑外大氣の温度及び湿度

我邦土は南は臺灣高雄州恒春郡恒春庄七星岩南端北緯 $21^{\circ} 45'$ より、北は千島國占守郡アライト島北端 $50^{\circ} 56'$ に至る迄南北方向に伸長するが故に氣温差著大なり、然れども隧道の送風用として本節の問題を考慮するに當りては季節並に地理的關係上幾多の制限を設けることを得べし。

冬季は坑外氣温低ければ入氣は唯に坑内を冷却するのみならず、入氣自身の湿度低き上に坑内に入れば暖化膨脹する結果坑内湿度を益々低下し作業員をして清涼の感を抱かしめ、其労働能率を高上すべし、春秋兩季にありては坑の内外に於ける氣温差は一般に些小なり、従て坑の内外に起るべき自然的通風は稀なれども此季節に於ける大氣の温度は元々中和にして普通 20°C 以下なれば鬱血を覺ゆるの虞なし、唯夏季殊に八月は大氣温度高きのみならず湿度も亦普通 80% を超ゆるが故に通風上最も重要視すべき時期なりとす、主要測候所觀測に係る大正十二年八月平均氣温 ($^{\circ}\text{C}$) は次の如し

鹿兒島	27.8	長崎	27.6	下關	28.0
廣島	28.4	多度津	28.5	大坂	29.0
高知	27.2	名古屋	27.8	沼津	27.4
東京	27.2	水戸	26.1	石巻	24.3
京都	27.7	高山	23.9	前橋	26.6
境	28.1	敦賀	27.8	金澤	27.3
新潟	27.2	秋田	24.2	青森	23.9
釜山	27.2	京城	26.5		

但し北海道は低温なるが故に省略せり。

1 日中に於ける氣温の變化は季節と晴雨の關係により一定せざるも大體に於て日出の頃最低にして午後 2 時頃最高を示すものなり、毎日の最高平均氣温は各地とも上表に比し $4-6^{\circ}\text{C}$ 高きも夜間冷氣を坑内に注入することに依り坑内壁面に冷温地帯 (Kälte-mantel) を形成し、晝間に於ける高温度の入氣を調節し得るが故に茲には平均氣温を引用したり。

上表測候所位置の海面上高さ關係を調査するに高山 561.4 m, 長崎 133.0 m, 前橋 112.9 m を除き他は何れも 50 m 以内なり、抑も地表上の氣温は海面上の高度増大するに従ひ遞減するものなれば隧道坑口の標高大なるとき (清水隧道越後

口は海面上 574 m にして上野口 635 m なり) 換氣用空氣の溫度は上表中最寄測候所の溫度に比して數度低かるべき筈なり、而して海面上高度と氣温との關係を見るに中央歐羅巴にありては

$$t = 1.08 \times 0.91^{n-1} \text{ を以て表はし得と云ふ}$$

茲に t ; 標高 100 m 毎に降る溫度 °C

n ; 100 m を單位としたる海面上の高さ

今此式を海面 200—1,200 m の地點に應用計算するに次表を得

海面上の高さ m	100 m 毎に低下する溫度	累 計
200	0.98 °C	0.98 °C
300	0.89	1.88
400	0.81	2.69
500	0.74	3.43
600	0.67	4.11
700	0.61	4.72
800	0.56	5.28
900	0.51	5.79
1,000	0.46	6.25
1,100	0.42	6.67
1,200	0.38	7.05

之を要するに我邦隧道工にありては換氣上最も不適なる盛夏季に於て入氣溫度を 25°C 程度と見做すことを得べし。

第二節 通風の坑内進入に伴ふ暖化

坑外大氣の換氣機作用に依りて通風管に送入せられ、其全長を經由して排氣口より導坑先端部に放出せらるゝに當り坑内溫度の大氣々温より高きときは管内に於て氣温の昇騰を見ること明かなり、Schmid は此關係につき次の公式を與ふ

$$t_z = t_0 + (t_g - t_0)[1 - (1 - \rho)^z] \dots \dots \dots (1)$$

$$\rho = 1 - \sqrt[z]{\frac{t_g - t_z}{t_g - t_0}} \dots \dots \dots (2)$$

茲に

t_g ; 地熱溫度

t_0 ; 入氣最初の溫度

t_z ; z 秒後に於ける通氣溫度

ρ ; 地熱と通氣との溫度差 1°C に付通氣速度 1 米突秒毎に通氣の獲得す

温度

Stadlmayr は地熱 24°C の坑道に於て通風気温 0—20°C につきて實驗し其結果を此公式に當筋め

$$\rho = 0.00117 C \doteq 0.001 C$$

と決めたり。

著者は今 Schmid の公式を用ひ Stadlmayr の與へたる ρ の値を探りて之を我隧道工に應用せんと欲す、之がため先づ通風管内に於ける空氣速度を調査せざるべからず、既成隧道工事中に於ける換氣機吐氣口の空氣量と通風管口徑より管内に於ける空氣速度を計算し一表に示せば次の如し

隧道名	換氣機に接続する通氣管, 即ち坑内大部分の管口徑	換氣量 cbm/sek	進風管内の速度 m/sek
Simplon 導坑	200 mm	最小 0.21	6.688
Wochein 及び Karawanken	500	5.0	30.565
Tauern	800	標準 7.0	13.924
Ricken	800	3.5	6.962
Lötschberg	1,200	最小 1.54	1.362
Hauenstein basis	1,000	標準 5.00	6.366

今通風速度を 6 m/sek と定め、猶 t_0 及び t_1 に對しては換氣上最も都合悪しき場合を想像し、各温度を 28°C 及び 25°C とするとき上式 (1) は次の如くなる

$$t_2 = 25 + 3 \times [1 - 0.999^{\frac{L}{100}}]$$

茲に

L ; 通風管延長 m

而して t_2 と L との関係は次表の如し

L	t_2 °C
500m	25.243
1,000	25.468
2,000	25.858
2,400	26.000
3,000	26.191
3,600 (丹那隧道)	26.365
4,000	26.473
4,800 (清水隧道)	26.665
5,000	26.710

上表よりして普通の隧道に於ては 25°C, 入氣の通氣管内に於ける暖化を 1°C と見做し、換氣上最も不適なる盛夏時導坑に於て放出せらるゝ空氣温度を 26°C と

考ふることを得べし、猶管内を通過中摩擦熱發生すべきも鐵管内面は滑らかなれば同熱を論外とするも可なり。

第三節 蒸發及び凝固

液體は氣化するに當り或熱量を吸收す、其量は溫度に依りて相異す、Griffiths に依るに重量 1 kg の水の蒸發に際して吸收する熱量は下記公式の通りなり。

$$L = 596.06 - 0.601t$$

茲に

L ; 必需熱量 W. E.

t ; 溫度 °C

今 t に隨意の溫度を與へ L を求め一表とすれば次の如し

t °C	L W. E.
0	596.6
20	584.6
22	583.4
25	581.6
28	579.3
30	578.6

次に Mezger に依るに、Pegram 坑に於て溫度 22°C のとき重量 1 g の水の 1 日間に蒸發する氣化高 (Verdunstungs-höhe) は 2 mm なり、上記より推算するに濕潤せる導坑の地面 1 qm より 1 日間に氣化する水量は 2,000 ccm にして之が吸收する熱量は $583.4 \times 2 = 1,167$ W. E. なり。

今假りに導坑の幅員を 2.5 m、延長を 100 m とすれば導坑底面の全面積は 250 qm なり、Pigram 坑の實例に倣ひ溫度を 22°C とし且全底面より 2 mm なる氣化高を以て蒸發するものと假定すれば、1 日間に氣化する水の容積は 0.5 cbm にして蒸發のために吸收せらるゝ熱量は 291,700 W. E. なり、即ち作業熱約 68 人燈 ($68 \times 180 \text{ W. E.} \times 24 \text{ st} = 293,760 \text{ W. E.}$) に相當す、換言すれば氣化の結果發生する坑内冷却は 1 日間に 68 人燈の作業の熱量を相殺するに足るべく此熱量たるや輕視すべからざるものなり。

次に溫濕なる入氣が寒冷なる坑内岩壁に觸るゝ場合には凝固作用起り、蒸發と反對に潛熱を放散す、然れども入氣は坑内空氣に比し其濕度低きを常とするが故に結局坑内の濕度を低下し、霧圍氣をして蒸發可能の状態たらしむることを得べく、猶氣流は蒸發を促進するものなり、Ernst が Ruhrbezirk にある 4 炭坑に就き

調査せし所に據れば、通氣量 1 cbm/sek に付年平均 9g の蒸發ありと云ふ。

重量 9g の水の氣化に際しては少くも 5 W. E. の熱量を吸収すべし、即ち 1 時間には 18,000 W. E. 即ち 100 人燈に相當する作業熱を奪取すべし、故に換氣量にして相當多大なるときは多量の熱量は氣化の結果吸収し去らるべし、今坑内最高温度を 28°C (本篇第一章第二節第四項参照) とし、盛夏期に於ける導坑の入氣温度を 26°C (前節参照) とするときには坑内温度の方 2°C 高く従て凝固作業は起らざるなり。凝固作用の發生するは坑内温度の外氣に比し低き場合なれば、之に基く温度高上のため労働者を苦惱せしむるが如きことこれあらざるなり。

第四節 壓搾空氣解放に基く温度低下

晩近の隧道工には空氣式鑿岩機を使用するもの多し、同機の壓力は普通 5—6 at. にして 1 機の排氣量は 2—2.5 cbm/min なり、故に導坑面に 2 機を使用するときは其の運轉中排出せらるゝ空氣量は約 250 cbm/st なり、而して此空氣は膨脹の結果低温度となる。

空氣の膨脹に基く温度低下は次式に依り計算することを得

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^K$$

茲に

T_1 ; 壓力 P_1 を有する空氣の絕對温度

T_2 ; 壓力 P_2 ”

K ; 定數 0.2908

今壓搾空氣の壓力を 5 at, 又其温度を 20°C とするときは上式は

$$T_2 = 273 \times \left(\frac{1}{5} \right)^{0.2908} = 183 \quad \text{即ち} \quad -90^\circ\text{C} \quad \text{となる}$$

而して此變化の間に 1 cbm の空氣が吸収する熱量は

$$\begin{aligned} & 110^\circ \times 0.242 \text{ [空氣の比熱]} \times 0.86 \text{ [1 kg に該當する空氣容量]} \\ & = 22.9 \text{ W. E.} \end{aligned}$$

なれば鑿岩機 2 個を運轉する導坑に於て其排泄氣は 1 時間に

$$280 \times 22.9 = 5,725 \text{ W. E.}$$

即ち約 32 人燈の作業熱 (180 W. E. \times 32 = 5,760 W. E.) を吸収することを得。之を以て見るに多數の鑿岩機及び他の空氣式機械を使用する隧道 (第二篇第三章第

一節参照) にありては壓搾空氣排出の坑内溫度低下を扶くこと明かなり。

抑も導坑に於ける溫度は爆破直後最も高く、穿孔時に於て最も低きものなり、その低溫の理由は上記に基くものにして現に Löttschberg T. 南口に於ては (1909 年秋季) 爆破後労働者の復業に際し平均溫度 29°C なりしも穿孔時には 26.8°C に降下せり。

空氣式機械は間斷なく使用するものにあらざれば著者は安全を見込みて此溫度低下を無視すべく、又場合に依りては前節に記載せん凝固に基く溫度の昇騰と相殺するものと見做すべし。

第四章 空 氣 量

第一節 作業熱吸収

作業者の體溫及び照燈の放散する熱量は坑内溫度を昇騰せしむ、著者は之を作業熱と名付け、之が 1 時間内に雰圍氣に放出する熱量を 180 W.E. としたり (第三篇第一章第二節第二項参照)、故に入坑者員數を n とするとき其總熱量は $180n$ なり、坑内溫度を労働者の作業中と入坑前とを同一ならしむるためには、作業熱を全部吸収し去るに充分なる冷氣を坑内に供給せざるべからず
茲に

W ; 吸収し盡くすべき熱量

t_1 ; 作業者入坑前に於ける坑内溫度 °C

t_2 ; 冷氣の溫度 °C

T_0 ; 絶體零度

T_2 ; t_2 の絶體溫度

とするに $(t_1 - t_2)$ なる溫度差を以て W を吸収する空氣量 V (cbm/st) は次の如し

$$V = \frac{W}{0.306 (t_1 - t_2)} \frac{T_2}{T_0}$$

茲に $t_1 = 28^\circ$, $t_2 = 26^\circ\text{C}$ (本篇第三章第二節参照) を挿入するときは次の如くなる

$$V = \frac{180n \times 299}{0.306 \times 2 \times 273} = 322n$$

導坑に従事する作業者は Löttschberg T. に於ては平均

北口 19 人
南口 21

なりしが我邦にありては普通 10—18 名程度なるが、之を 20 名とすると

$$V = 322 \times 20 = 6,440 \text{ cbm/st}$$

となる。爆破瓦斯緩和に必要な空氣量は地質の中硬岩なる隧道と雖も 7,700 cbm/st (第二篇第三章第四項参照) にして上記の V 以上なれば CO 緩和量を導坑に供給すれば盛夏時と雖も作業熱のために氣温の高上して許容限度 28°C (本篇第二章参照) を超過するが如きことなし。

第二節 限度 第一項 最小

隧道工に於て導坑は全般工事の先驅をなすものにして、其進捗の如何は續いて施工せらるべき切擴及び壘築工完成の時日を左右し、從て隧道竣功の期限に大なる關係を及ぼすものなり、故に工事の進行を促進するには先づ導坑に於ける作業者の労働能率を向上する方法を講ずべきなり、然るに導坑は他作業箇所比し氣温の高きを普通とするが故に特に此箇所作業者の爽快に對し考慮せざるべからず、Dr. Hill の唱ふる冷却力の最小限度を乾カタ $H=6$ (本篇第二章参照) とし同氏の公式を

$$V = 1 \text{ m/sec 以下のとき } t = 36.5 - \frac{6}{0.2 + 0.4\sqrt{V}}$$

$$\text{同 以上のとき } t = 36.5 - \frac{6}{0.13 + 0.47\sqrt{V}}$$

$$\text{及び } t = 26.5 \text{ 以下のとき } V = \left(\frac{\frac{6}{36.5 - t} - 0.2}{0.4} \right)^2$$

$$\text{同 以上のとき } V = \left(\frac{\frac{6}{36.5 - t} - 0.13}{0.47} \right)^2$$

と改めて氣温と風速との關係を計算するに次表を得たり

$t^{\circ}\text{C}$	$V \text{ m/sec}$	$V \text{ m/sec}$	$t^{\circ}\text{C}$
14.3	0	1.5	28.0
16	0.01	1.3	27.8

17	0.06	1.3	27.5
18	0.09	1.2	27.2
19	0.12	1.1	26.9
20	0.16	1.0	26.5
21	0.23	0.9	26.1
22	0.27	0.8	25.7
23	0.36	0.7	25.3
24	0.49	0.6	24.7
25	0.64	0.5	24.1
26	0.86	0.4	23.3
26.5	1.00	0.3	22.2
27	1.12	0.2	20.7
28	1.50	0.1	18.1

即ち温度の乾球 $t^{\circ}\text{C}$ なるときは V なる氣流を必要とし、又風速 V なるときは温度 $t^{\circ}\text{C}$ までを許容することを得べし、此關係より導坑の斷面積に相應の風速を乗ずれば或温度に對する所要空氣量を求むることを得べし、而して此數量は即ち換氣量の最小限度なり。導坑の斷面積を既成隧道に就き調査するに次表の如し

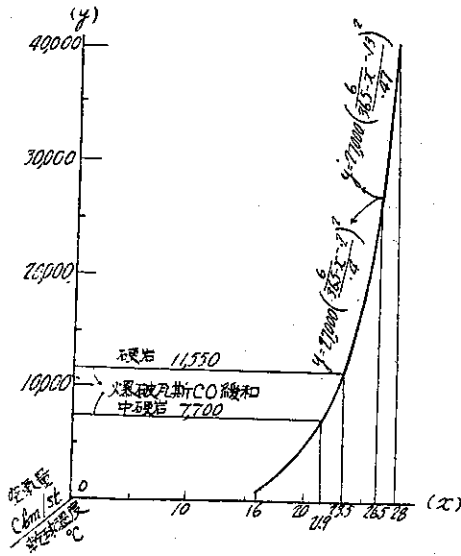
隧道名	導坑の斷面積
Bosruck	5.5 qm
Albula 北口	5.5
Hauensteinbasis	5.0—6.0
Simplon I	5.7—6.0
Lötschberg	6.2
Tauern 北口	6.5
Arlberg 西口	6.5—7.0
Wohein 北口	7.0
Karawanken 北口	6.5—7.5
我邦に於ける隧道	普通 4.6—7.5
丹那及び清水	10.0
猪 鼻	10.9

導坑斷面積を A とするに 1 時間に坑外より導坑に注入すべき空氣量の最小限は

$$3,600 \text{ sek} \times A \times V$$

より算出することを得、今 $A=7.5 \text{ qm}$ とするとき温度に依る最小空氣量は第二圖の如し

爆破瓦斯 CO 緩和用空氣量 (第二篇第三章第五節第四項參照) は第二圖に示すが如く 24°C 以上の導坑にては作業者冷却力の點に於て不足なり。 24°C 程度以

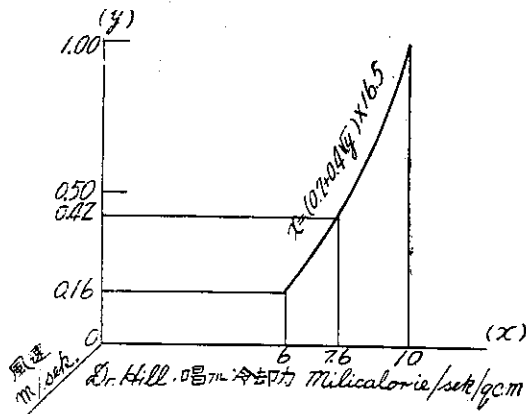


温度に依る空氣量表

温度 °C	空氣量 cbm/st
16	270
17	1,620
18	2,430
19	3,240
20	4,320
21	6,210
22	7,290
23	9,720
24	13,230
25	17,280
26	23,220
26.5	27,000
27	31,240
28	40,500

温度と空氣量との關係

第二圖



乾球 20°C の場合に於ける風速と冷却力との關係

第三圖

上の導坑に必要な空氣量は甚だ多大なり、然れども管子隧道は施工當時最高 23°C、又東山及新逢坂山隧道は 15.6—22.2°C なりしことなれば 24°C 以上の如きは我邦に於ては稀有の場合と考ふことを得。

隧道を一般に論ずるとき其導坑の温度 20°C (68°F) 以下のもの最も多數を占む、今 20°C の場合を想像し風速と冷却力との關係を探求するに第三圖の如し。

作業者に對し所定の冷却力を與ふるに必要な空氣量は 4,320 cbm/st (第二圖參照 0.16 m × 7.5 qm × 3,600 sek) に過ぎざれども、CO 緩和のため硬岩の場合には是非共 11,550 cbm/st を注入せざるべからず、此際導坑に於ける風速は $11,550 \text{ cbm/st} \div 7.5 \text{ qm} \div 3,600 \text{ sek} = 0.42 \text{ m/sek}$ に増大する結果 H=7.6 となる、而して

若し CO 緩和用以上の空氣量を注入するときは H の價は益々高上し雰圍氣状態は勞働上益々良好のものとなるべし。

第二項 最大

氣流は皮膚面よりの放熱作用を促進するが故に勞働者には必需のものなれども、隧道内勞働者は裸體の儘發汗せる皮膚面を以て或は濕潤せる衣服を纏ひ乍ら坑内に休憩するを常とするが故に速度大なる冷氣に其身を晒すときは感冒に罹り易し、之に加ふるに氣流溫度の常體溫以上なるときは作業者は却て苦痛を覺へ、風速の大なるほど體溫の昇騰を速かならしむるものなり、故に速力の過大は氣流溫度の冷峻共に勞働能率を低下す、故に風速に制限を附するの必要あり、坑内風速に關し Dortmund の鑛山監督署にては 6m/sek 以下たるべきことを規定し、Simplon I T. の建設の際にも同様 6m を限度となしたり、然れどもこれ等は過大の嫌より、何となれば吾人が夏期煽風器の前に身體を發露するとき假令發汗せざる時と雖も風速の 2m を超ゆるときは寧ろ不快を覺ゆればなり、前年英吉利に於て調査會を設け開通せる鐵道隧道内の從業者に對する適當なる通風速度を研究せし際、委員會は風速の最大限度を 1.5m/sek とすべきことを決議したり、又 Ricken T. にありては導坑部に於ける風速を 1m/sek に限定したり、著者は煽風器にて體驗の結果氣流の寒暖に依り差別を設くるを妥當と考ふるも、大體に於て 1.5m/sek を以て最大限度となさんと欲す、此限度は 28°C の場合に Dr. Hill の唱ふる冷却上必要なる風速と偶然一致せり。

隧道に於て斷面積の最も小なるは導坑なれば其面積 (A qm) より最大空氣量を決定することを得、即ち次の如し

$$1.5m \times 3,600 \text{ sek} \times A = 5,400 A$$

而して導坑斷面積に依り最大量は次の如く相異す

斷面積 qm	最大空氣量 cbm/sek
4.6(7 ft × 7 ft)	24,810
7.5(9 × 9)	40,500
10.0(12 × 9)	54,000

導坑溫度の 28°C の場合にありては上記數量はまた最小限度をも兼ねることゝなる、故に高温の隧道にありては導坑斷面積を擴大すべきなり。

隧道の全切換面積は其用途に依りて區々なりと雖も鐵道用のものにありては略

ば一定し單線型 25 qm, 複線型 44 qm なり, 故に全切換箇所にて於ける風速は導坑に於ける速度單線型は約 $\frac{1}{3}$, 複線型は約 $\frac{1}{5}$ に減退す。

結 論

(1) 隧道の換氣量を決定するには, 先づ爆破瓦斯中に含有する CO の分量を無害程度にまで緩和することを主眼とすべきなり, 此點に關しては岩質の硬軟のみが問題となり, 隧道延長は無關係なり。

(2) 隧道の貫く山岳の高峻なる箇所にては坑内地熱の 22°C 程度を超過すべし, かかる場合を豫知し得るときは作業員入坑に起因する温度の高上を防ぎ(作業熱吸収第三篇第四篇第一節參照) 猶作業員をして其労働能率を低下せしめざらんがために爽涼用空氣量を追加せざるからず。

(3) 坑内氣流の過大なるときは罹症者を生ずるが故に風速關係より自然換氣量の最大限度を生ず, 若し隧道の高温度を豫想するときには導坑の斷面積を擴大してその限度を高めざるべからず。

(4) 導坑に於ける 1 回の爆藥量

中硬岩 10 kg

硬岩 15 "

爆破後の休憩時間 30 min

導坑の斷面積 7.5 qm

なる隧道工普通の條件下に著者の推薦せんとするは第二圖に描きたる曲線を取扱の便宜上直線に改めたるものにして第四圖の如し

即ち

最小換氣量 11,550 cbm/st

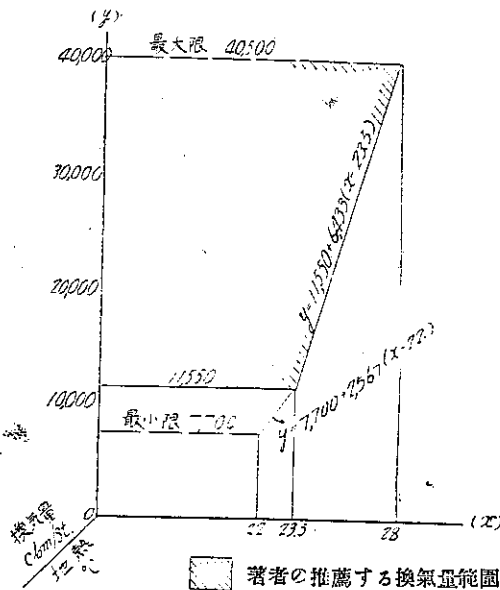
$$y = 11,550 + 6,433(x - 23.5)$$

茲に y ; 換氣量 cbm/st

x ; 坑内温度 °C

最大換氣量 40,500

にして x に 23.5—28°C なる數字を代入するときの換氣量は次表の如し



換 氣 量

第 四 圖

温度 °C	換 氣 量	
	cbm/st	cu ft/min
23.5 以下	11,550	6,830
24	14,767	8,698
25	21,200	12,487
26	27,633	16,276
27	34,066	20,065
28	40,500	23,855

而して條件の上記と相異なる場合には適宜之を改竄すべきなり

(5) 著者の定めたる換氣量を従來學說(第一篇第三章參照)に比較するときには著者の方多量なり, 換言すれば著者說に従ふときの雰圍氣状態は従來學說に依るものに比し作業者の健康上並に勞働能率上良好なるものなり。

(6) 著者の推薦する換氣量を既設隧道施設と比較せんと欲するも導坑の斷面積其他條件を異にするため直接對照し難きも大體につき論ずれば北米合衆國隧道の大部分は(第一篇第四章參照)著者說に比し少量なり, 又歐洲にありては Ricken T. (最點地熱 25.4°C 第三篇第一章第二節第四項參照)の最大量 10,600 cu ft/min なりしに對し著者說は

$$y = 11,550 + 6,433(25.4 - 23.5) \\ = 23,773 \text{ cbm/st, or } 14,002 \text{ cu ft/min}$$

となり又 Tauern T. (最高地熱 23.3°C) の 14,840 cu ft/min に對し著者說は

$$11,550 \text{ cbm, or } 6,830 \text{ cu ft/min}$$

となる, かくの如く相異を生ずる所以は従來一定の標準なかりしに起因す (完)