

関門国道トンネル換気装置自動制御の概要

Outline of the Automatic Control System for the Kanmon Vehicular Tunnel Exhausters

鈴木 公一*
Koichi Suzuki

内 容 梗 概

関門国道トンネルは、おもに自動車などの内燃車が通るので、排気中にふくまれる一酸化炭素を排除するため、総計 1,000 HP に近い送排風機が設備される。これらの換気機を経済的に、かつ衛生的に運転する目的で、トンネル内の微量一酸化炭素を連続検出して、一酸化炭素量の定値自動制御を行うこととなっている。今回、燃焼法によるガス分析の原理を応用した微量一酸化炭素連続検出装置とともに、トンネル内の換気装置に適した安定な自動制御方式を完成し、昭和 33 年 3 月より稼動することとなったので、その概要について紹介する。

1. 緒 言

北九州の工業地帯と本州を結ぶ関門国道トンネルが本年 3 月に開通した。これは自動車用海底トンネルであるため、排気中に含まれる一酸化炭素（以下 CO という）などによりトンネル内の空気が汚染される。CO が空気中にあると、その量がたとえ微量であつても人体に与える危害が大きいので、トンネル内の空気を清浄に保つため換気装置は最も重要な設備である。関門トンネル内の換気は 4 箇所（下関、椋野、門司、古城）の堅坑に設置した 40HP 籠形誘導電動機により運転される 24 台のファンで行う。常時、このファンを全部運転すれば、最も簡単であるが、後述のように内燃車の通過頻度は 0 から毎時約 2,000 台/時まで、まったくアトランダムに変化するので、総計 1,000 HP に近い電動機を昼夜の別なく全力運転することははなはだ不経済であるのみならず、換気装置の寿命の点よりみても好ましくないことは明らかである。

そこで、換気量を自動制御することによつて、トンネル内の CO 量を人体に危害を与えない程度に抑えけるとともに、最も経済的な運転を行うことが計画された。このためには、まず CO 検出装置が必要となるが、国内には、このような微量の CO を連続検出するものがないので、昭和 28 年以来その研究を開始するとともに、一方、自動制御系の立案に着手した。その後昭和 33 年 1 月末までに各種機器が続々と現地据付を完了し、3 月より稼動するはこびとなつたが、その間、数箇所の道路について内燃車の通過頻度を測定すると、モデルトンネルを作つて試験を行うなど計画の万全を期した。今回完成した CO 量を連続検出することにより行うトンネルの換気自動制御方式はわが国では初めてのものである。

2. 換気設備の概要

空気中に CO が存在すると、呼吸器を通じて人体の血

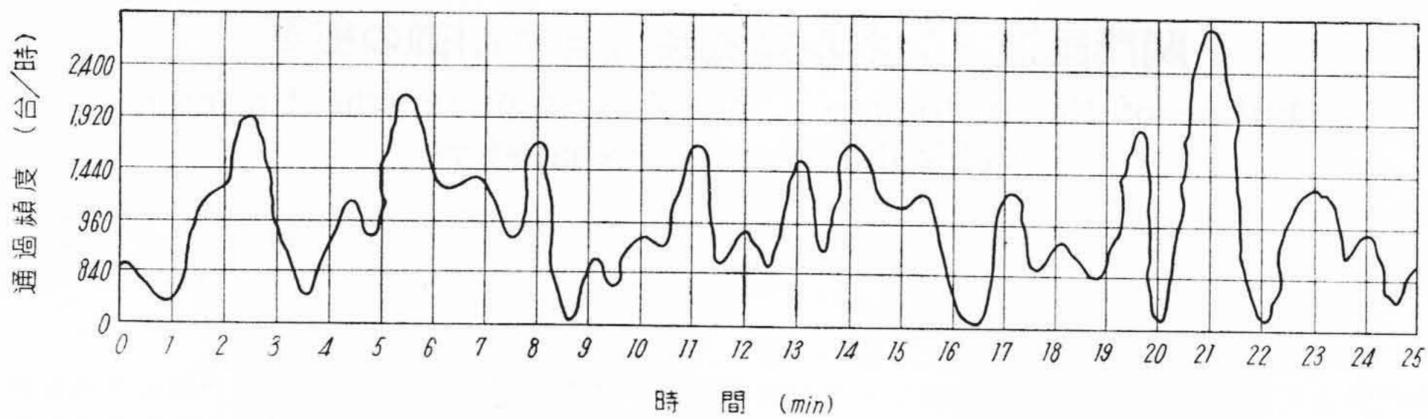
* 日立製作所亀戸工場

液と結合するが、一度 CO とむすびつくと、その血液は酸素を運ぶ能力を失つてしまうために、あたかも血液がなくなつたと同じ現象をおこし、遂には人間を死にいたらしめるものといわれる。しかも、この CO 量は微量でもきわめて有毒である。すなわち、空気中に 0.04~0.05%（1 万分の 4~5）くらい存在していると約 1 時間で頭痛を起し、0.08% をこえれば、生命に危険であるといわれる。

内燃車の排気中には多量の CO が含有されているので、多数の内燃車が通過する関門トンネルは、常に、この有毒な CO の危険にさらされているわけである。

関門トンネルでは CO で汚染された空気を換気するために、下関、椋野、門司、古城の 4 箇所（堅坑）に設けられた。各堅坑には 3 台の送風機と 3 台の排風機が設備され、送排風機は、いずれも 40/20HP 6/8 極の籠形誘導電動機により駆動され、送気、排気各 1 台で 1 組となりトンネル内の換気を行うようになっている。堅坑は、送気 2 組、排気 2 組のダクトを持つていて、換気機を 1 組あるいは 3 組運転するときは、両方のダクトへ平等に空気が流れるようにし、換気機 2 組のときは、各ダクト別々に送排気を行う。ダクトと換気機の組合せは、送気側 7 枚、排気側 7 枚 合計 14 枚のダンパによつて切り換えるようになっている。また、各換気機は速度のほか、プロペラピッチによつても風量を変更することができる。

関門トンネルは、上、下線あわせて約 2,000 台/時の内燃車を連続して通過せしめる能力をもっている。またこれらの換気機を全部最大風量で運転すれば、ちょうど 2,000 台/時の頻度で通過する内燃車の出す CO を除去して、常に空気中の CO 量を危険値以下におさえることができるよう設計されている。しかしながら、内燃車の通過頻度は 0~2,000 台/時までアトランダムに変化することは、明らかである。また、昼間と夜間、あるいは早朝な



第1図 内燃車通過頻度の一例

どにおける平均の通過頻度間には大差があるであろうことも予想できる。われわれは、二、三の道路について、夜間、昼間、早朝などの通過頻度を実測した。その一例を第1図に示す。これらの測定結果は、上述の予想を裏づけるものであつた。このような状態では、全部の換気機を昼夜の別なく最大風量で運転することははなはだ不経済である。その上、換気装置の寿命の点よりみても好ましくない。そこで、関門トンネルでは微量COを連続検出することにより、換気機の運転台数、電動機の極数すなわち速度およびプロペラピッチを自動的に変更して、CO量の定値制御を行うことが計画された。

3. 一酸化炭素 (CO) 検出装置

微量COの連続検出装置として実用されているものは、米国、フランスにはあるが、国内には全然ない。昼夜の別なく各種の内燃車が、まったくアトランダムに通過するトンネル内の微量COを検出して、換気量を自動制御しようとする目的から要求されるCO検出装置の具備すべき性能は次のようなものとなる。すなわち

- (1) 空気中のCO量が10万分の1程度でも連続検出できること。
- (2) 耐久性があり、しかも故障が少ないこと（毎日24時間連続検出するものである上、故障すると換気装置はメクラ運転となつて危険である）。
- (3) 普通の電気あるいは機械技術者でも運転ならびに保守ができること。
- (4) 検出の時間おくれが短いこと。

などである。これらの条件を考慮して、検討した結果、COの検出方式として、燃焼法によるガス分析の原理を応用することになつた。これはCOが触媒にふれて酸化し、CO₂に変化する際の発熱量が、空気中のCOの濃度に比例することを利用するものである。

検出装置の主要部である触媒は、いろいろ研究の末、二酸化マンガ、酸化銅、

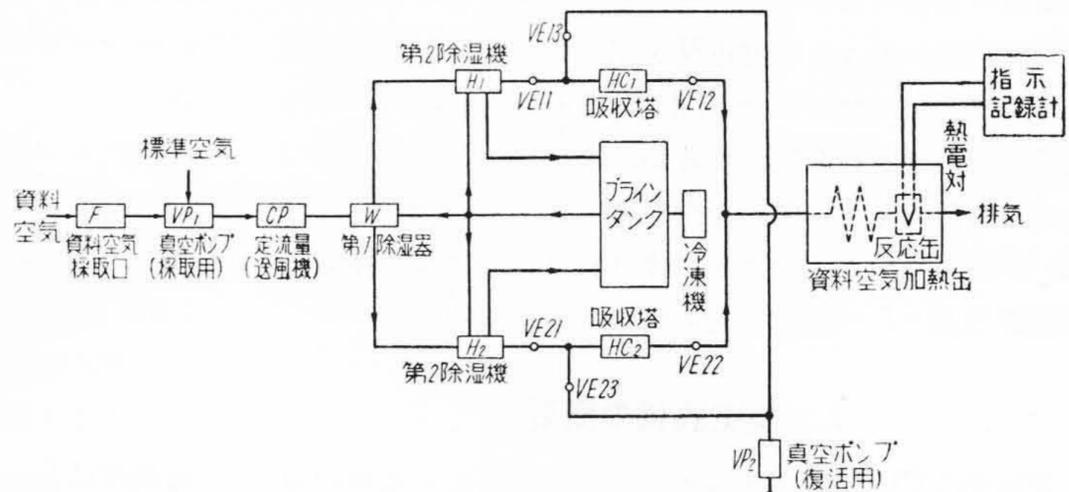
酸化銀、酸化コバルトなど、各種の金属酸化物を化学的に綿密な準備のもとに処理することによつて、優秀な性能のものを完成した。

触媒の研究と併行して検出装置のバラックセットを、二、三種類組立てて、検出の感度や精度の研究を進めると同時に、触媒の疲労の原因が探究された。数年にわたるぼう大な実験の結果、触媒に対して湿気が甚大な悪影響を及ぼすこと、内燃車の排気中にはCO以外の雑多なガスが含まれていて、これらの中には触媒にきわめて悪い作用を与えるものがあることなどが判明するとともに、CO以外の悪ガスと湿気の除去方式、触媒部の温度、触媒の量、資料空気の流量、流速などについてのデータが集められた。

この研究によつて完成したCO検出装置は、次のようなものである。

第2図に装置の系統図を示す。

トンネル内の資料空気は、採取用真空ポンプVP₁により、採取口Fを通して吸引される。採取口Fはトンネル内に設置されている。Fはトンネル内の塵埃を除去するフィルタになつていて同時にVP₁で吸引する空気量を調節する。VP₁以降の装置は堅坑上部に設置されているので、VP₁とFの間は数百米のパイプによつて連絡される。VP₁を出た空気は、次の定流量送風機CPに送られる。CPは、常に一定量の空気を、装置に送り込むものであつて、VP₁は必要空気量の2倍以上吸引してい



第2図 一酸化炭素検出装置系統図

るために、余分の空気は、ここから屋外に排出されるようになつてゐる。CP を出た一定量の空気は、第1除湿器Wと第2除湿器 H_1 H_2 に送り込まれるようになつてゐて、この段階で資料空気中に含まれている湿気が、取り除かれる。第1除湿器Wは常時 $1 \sim 3^\circ\text{C}$ に、また第2除湿器は、 -10°C 以下に冷却されているから、大部分の水分は、Wで水となつて排除され、残つた水分は H_1 か H_2 で氷として取り去られる。第2図でわかるように、第2除湿器は H_1 H_2 の2組よりなつてゐる。氷結した水分をそのままにしておくと、遂には空気通路が氷により閉鎖されるので、 H_1 と H_2 を交互に使用し、たとえば、 H_1 を使用中に H_2 をヒーターで温度をあげ、氷を水にして取り去り、次に空気を H_2 側に切りかえて H_1 の氷をとるという方式を採用している。Wおよび H_1 , H_2 を冷却するためにブラインランクと冷凍機がある。冷凍機によりブラインを冷却し、そのブラインをポンプによりWと H_1 , H_2 に送り込むものである。第2除湿器を出た空気は、次に吸収塔へ送られる。吸収塔は HC_1 , HC_2 で1組となつてゐて、内部に吸着剤が入つてゐる。ここで空気中に含まれている触媒に有害なガスを除去するのであるが、長時間にわたつて使用していると、だんだんに吸着剤の吸着能力がにぶつてくるので復活する必要がある。そのため HC_1 , HC_2 が1組となつて、交互に復活するようになつてゐる。吸収塔の復活は、塔の温度を 200°C 近くまで上昇せしめると同時に復活用真空ポンプ VP_2 を運転して塔内を減圧して行うようになつてゐる。第2除湿器と吸収塔の復活は、同一時間内に終了するように設計されているので、 $H_1 \rightarrow HC_1$ の系列と、 $H_2 \rightarrow HC_2$ の系列は、交互に測定動作と復活をくり返す。系列は、弁 VE_{11} , VE_{21} , VE_{12} , VE_{22} , VE_{13} , VE_{23} を操作することによつて、切り換えられる。この操作は、電動タイマーにより一定時間ごとに、まったく自動的に行うようになつてゐる。

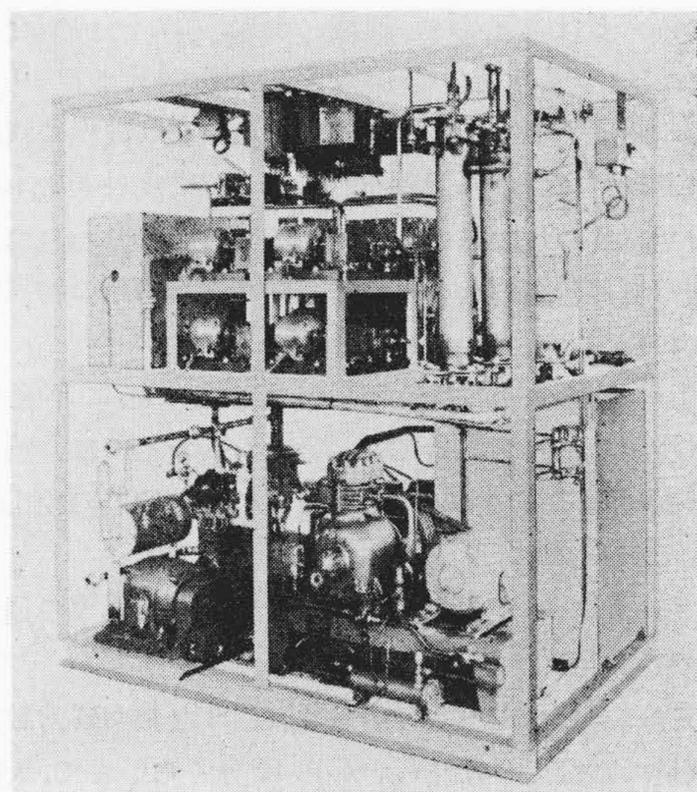
以上の段階を経て、湿気と有害ガスを除去された資料空気は、いよいよ触媒部に送られるのであるが、微量COの反応熱によつておこる温度差は非常に少ないので、資料空気および触媒部の周囲の温度は一定でなければならない。またこの部分の温度は触媒部の寿命、触媒能などにも重要な影響を与える。このため、資料空気加熱罐を設けて、この中の温度を一定に保つようになつてゐる。触媒は、温度差を測定する熱電対と一緒になつて反応罐を形成し、この加熱罐内部に収納されてゐて、加熱罐とまったく同一の温度に保たれてゐる。資料空気は加熱罐を通過するあいだに加熱罐と同一温度になつてから、触媒部を通過する。このときに、COが酸化して CO_2 となるので、その反応熱により触媒部の入口と出口で微弱な温度差が生じる。この温度差を熱電対によつて

検出するわけである。微弱な温度差によつて熱電対に起つた電位差は、自動平衡式指示記録計によつて指示記録される。自動平衡式計器は、CO濃度で 0.075% まで指示、記録できるようになつてゐて、換気自動制御装置に与える指令、すなわち、換気量の増減、換気機の起動、停止、および非常の場合の指令接点など、必要な個数の接点を内蔵している。これらの接点の設定値は容易に変えることができる。また、この指示値は、後述の中央制御室に送量して、模擬照光配電盤でも、指示記録を行うようになつてゐるので、このための送信器も持つてゐる。

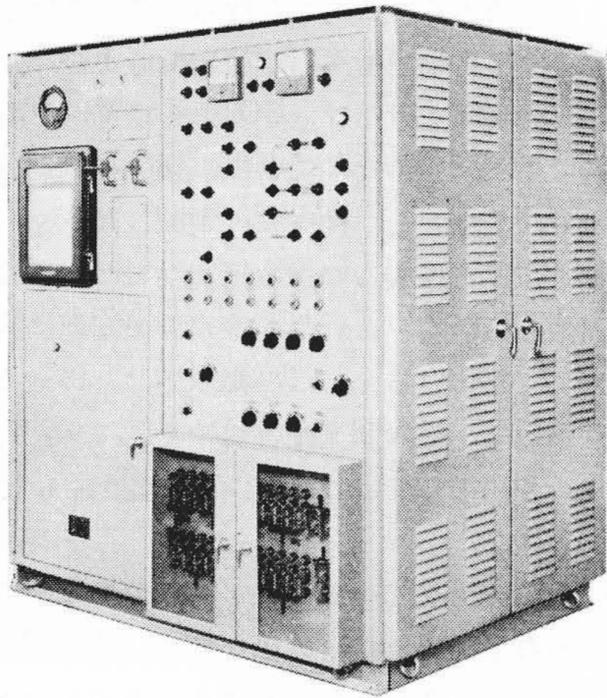
触媒は連続使用してゐるあいだに、若干ずつ触媒能がおちてゆくの、時々、計測値を校正する必要がある。計測値の校正は、あらかじめCO含有率のわかつてゐる標準空気をタンク内に圧縮貯蔵しておき、校正のときにとりだして、真空ポンプ VP_1 に入れてやつて行く。もちろん、この間はトンネル内のCO計測は中断されるわけであるが、この作業は、わずか数分間で終了するから、換気装置の制御にはほとんど影響がない。

このほか、全装置を休止状態から、自動運転に入れるための運転準備行程の自動化、各種警報装置、などが完備してゐるので、装置は最小の保守人員により昼夜連続して運転することができるようになつてゐる。

定流量送風機CP以降の諸機器は制御用電気器具を含めて高さ約2mの2台のキュービクル内に収納されている。第3図は、定流量送風機から吸収塔までを納めた第1キュービクル、第4図は資料空気加熱罐および制御用電気器具を納めた第2キュービクルである。



第3図 一酸化炭素検出装置第一キュービクル(内部)



第4図 一酸化炭素検出装置第二キュービクル

4. 自動制御方式

2章において略述したように、トンネル内の換気量は、電動機の変換、運転台数の変更および、プロペラピッチの変換を組合せることによつて、調節可能になつている。また、各堅坑は送、排気で1組のダクトを2組持つていて、換気機を1組、あるいは3組を運転するときは、両方のダクトへ等分に空気が流れ、換気機2組のときは各ダクトへ別々に送風される巧妙な設計になつていることも前に述べた。このような構成から、ただちに推察できるように、トンネル内は8区分され、各ダクトの受持ち区間がきまつていて1個のダクトは、自己の受持ち区間のみを換気するような設計となつている。

1ダクトの換気量は、速度、台数、ピッチの組合せにより、最少約 $20\text{m}^3/\text{s}$ より最大約 $110\text{m}^3/\text{s}$ まで10~12段階に変更できるようになつている。CO検出装置は、とりあえず1台のみ設置されるが、将来は各ダクトに1台ずつ、合計8台置かれる計画である。われわれはこの条件のもとに制御系を組むにあたり、制御系の特殊性、すなわち、

(1) 制御系の特殊性からいたるところに不動時間と、時間おくれがあること。そのおもなものは、換気機の起動時間、トンネル内の容積おくれ、COの検出時間などである。

(2) トンネル内のCO発生量、すなわち車の通過頻度が激しく変化すること。

(3) トンネル内の容積おくれ、すなわち時常数が、換気量によつて2分くらいから12分くらいまで、大幅に変化すること。

を考慮しつつ、いろいろな制御方式を検討した結果、採

用した方式を次に述べる。

換気量の制御、すなわち、電動機の変換、運転台数、プロペラピッチを種々組合せて、12段階の換気量を指令する電動制御器を各堅坑に置く。この電動制御器は12のノッチをもつていて、このノッチを変えることにより第1ノッチから順次に第12ノッチまで、換気量が段階的に変化するようになつている。

一方、CO検出装置からの指令として、 m_N, m_S, m_D, m_U, m_E %の信号を受け取る。これら5種の%の間には $m_N < m_S < m_D < m_U < m_E$ なる関係がある。

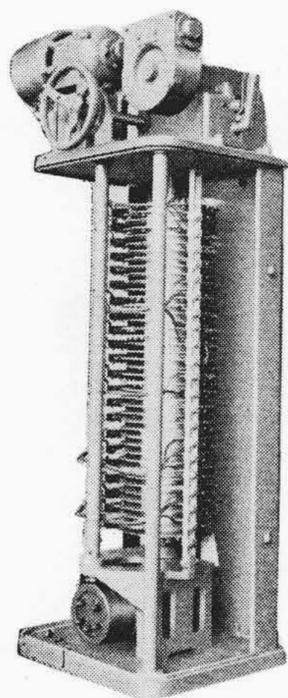
トンネル内のCO%が、 m_N 以下になると、いつでも換気機は停止する。また、 m_S に達すれば、最小風量すなわち電動制御器第1ノッチの状態ではいつでも起動する。この最小風量でも、平均して400台/時くらいの内燃車を通過せしめることが可能である。車の平均通過頻度が増えていくとCO%は m_D %をこえるが、電動制御器は第1ノッチのままである。CO%が m_U %以上になると、この信号により第2ノッチに自動的に移る。そして換気量を変えたために起る制御効果をタイマーによつて、一定時間待つている。一定時間後にCOメータの信号をチェックして、まだ m_U %以上ならば、第3ノッチに移つて一定時間待つ。このようにして、車の頻度によつては、ついに最大の風量まで達するに至る。すなわち、サンプリング動作を行つて換気量を変えていくわけである。

上述と逆に、 m_D %以下になれば、ノッチを1ノッチさげて、その効果を待つ。次のサンプリングのときに、まだ m_D %以下ならば、もう1ノッチさげて換気量を減じてやる。 m_D %と m_U %の間は、いわゆる動作すき間であつて、CO%がこの間にあるときは電動制御器は動かないので、換気量はそのときの状態を保持しつづける。車の通過量が少なく、最小換気量で運転してもCO%が m_N 以下になると、換気機は停止するにいたることは、前にも述べたとおりである。サンプリング動作時間は2分にセットしてあるが、調節できるようになつているので、今後、制御状況をよくしらべて、最適値に設定を変えることとなつている。

もし、車の通過頻度が急激に増加するとか、火災などの原因で、トンネル内のCO量が急増して、 m_E %をこえるときは、電動制御器に関係なく、ただちに換気量を、あらかじめ設定した点まで増加してやつて、トンネル内の空気を短時間で、清浄状態へ引もどすようにしている。

第5図に、電動制御器を示す。

換気機の運転台数と、速度は、上述のように電動制御器の指令によつて変更されるが、運転台数を変更すれば、それに伴つて、2章において述べたように、送気側と排気側にある14枚のダンパも切り換える必要がある。



第5図 電動制御器

この切換操作をも、電動制御器で直接行うことは、後述の事故機が生じた場合を考えると、あまりにも回路が複雑となるので、運転される換気機の組合せによつて、自動的にその組合せに相当したダンパの状態になるように制御回路が構成されている。

このような制御方式の特長として

(1) 制御動作が非常に少ない。すなわち、いたずらに制御をくり返して機器を損耗することがない。特に台数変更すなわちダンパの切換時や、極数変換

のところでハンチングが起ると、機器の寿命に致命的な悪影響を与えると推定されるのでこれをさけてある。

(2) 複雑微妙なメカニズムが、どこにもない。また、一般の現場技術者が使いなれた機器のみで全装置が構成できる。

したがつて、運転、保守が容易に行われる。

(3) 現地据付後、目標値の設定変更や、換気量の変更をしなければならないときは、容易に変えることができる。などがあげられる。

以上、述べた制御方式を基にして、将来各堅坑へ2台のCO検出装置が設備された場合には、制御は次のようになる。おのおののCO検出装置は一定のダクトが受けもつている換気区間のCO量を検出することとなるので、換気機が2組運転されているとき、すなわち各ダクトが独立に働いているときは、おのおののCO検出装置から出る指令によつて、そのダクトの換気を行つている送、排気機を独立に制御するようになつている。そのために電動制御器は各堅坑に2台設置されるが、換気機1組、あるいは3組の場合には、あらかじめきめられたどちらか一方の電動制御器のみによつて制御する。しかも、2台のCO検出装置の指令は同時に送られるので、電動制御器はどちらでもCO量の多い方によつて自動的に選択操作される。

かくすることにより、全トンネル内は経済的に、安全に、しかも衛生的に換気され、トンネル内の空気は常に清浄に保たれるのである。これらの電動制御器は、ノッチ位置、すなわち換気量を中央制御室に送量して指示、記録されるので、これに必要な送信器をそなえている。

換気装置は、前にも述べたように最も重要な設備であるが、長年月の間には、送風機の修理、手入れの必要が考

えられる。そのために、送気機、排気機各1台が予備機として準備されているので、休止機が出た場合には、予備機と交換される。しかしながら、その取り替えがすむ間といえども、換気を一刻も休止するわけにはいかない。そこで、事故機が出たときは、事故時切換器によつて、事故機を排除したまま、大風量は出せないまでも、小風量、標準風量での制御は、平常のとおり自動制御が行えるようになつている。CO検出装置の故障の場合、非常の場合は、手動操作によつて電動制御器を操作することにより、任意に適当な換気量を選択して、換気することができる。また各機器の調整などの場合には、換気機の運転、停止、速度切換、プロペラピッチの変更、ダンパの開閉など、まったく独立に、手動で行うことができることはもちろんである。

以上の操作を行うために、各堅坑には、前述のCO検出装置、電動制御器、事故時切換器などのほかに、次のものが設置される。

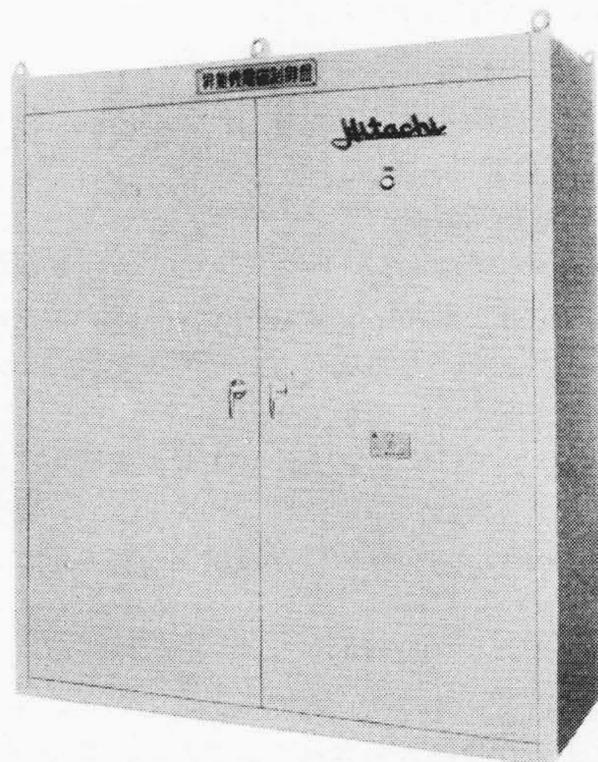
(1) 電磁制御盤

送風機、排気機、ダンパ制御用にわかれていた。第6図に排気機制御盤を示す。

(2) 照光自動制御盤

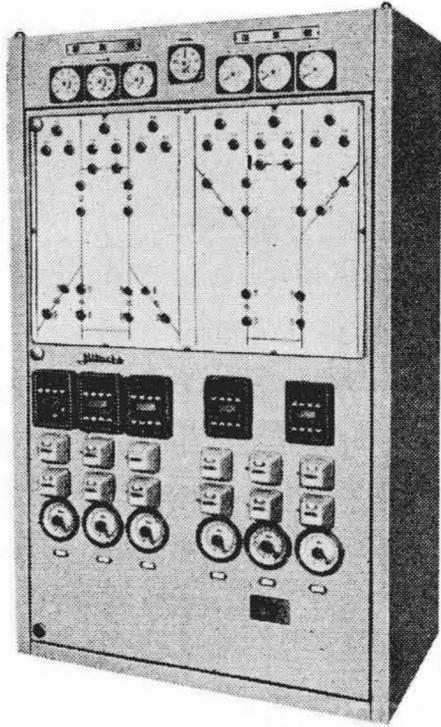
盤表面は受持堅坑内の状態が一目瞭然とわかるようダンパの象形を含む照光盤となつていて、換気機用回転計および運転表示灯、各種事故集合表示器、換気機運転時間積算計、電動制御器ノッチ指示計を取り付けている。事故表示は、換気機過負荷、軸受過熱、油面低下、CO検出装置事故の4種目について行うようになつている。

内部には、送風機、排気機、ダンパ間を連結して、自動制御を行うために必要ないつさいの電気品を納めている。



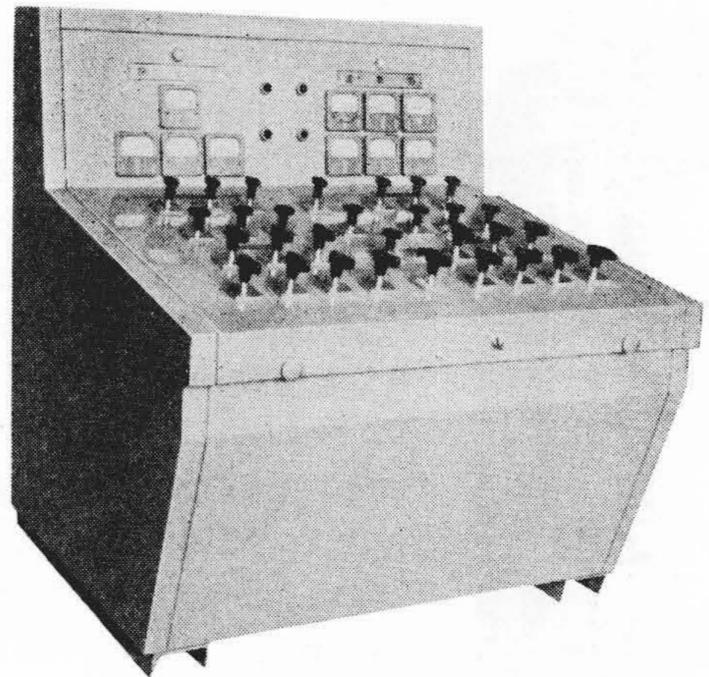
第6図 排気機制御盤

第7図に本制御盤を示す。



第7図 照光自動制御盤

(3) 机型操作盤
受持竖坑の手動単独運転を行うに必要ないつさいの開閉器, 表示灯のほか, 電圧計, 電流計などをそなえ, 事故時, あるいは機器の調整に際しては, 電動制御器, 換気機, ダンパ, プロペラピッチの制御を手動でここから行うことができる。第8図に本操作盤を示す。



第8図 机型操作盤

5. 遠隔中央監視制御との関連

下関竖坑内に中央制御室が設置され, 椋野, 門司, 古城の各竖坑および, 両入口, トンネル内の状態を一括監視し, 必要に応じて所要の制御および指令を行うことになっていて, 各竖坑は, この中央制御室の管理下に入っている。

下関から各竖坑までの距離は約1,000~1,800mあるので, この間の連絡は「日立パルスコード型遠方監視制御装置」によつて行われる。

各竖坑より遠隔送量されて, 中央制御室へ指示記録されるものは, 前述のように次の2種目である。

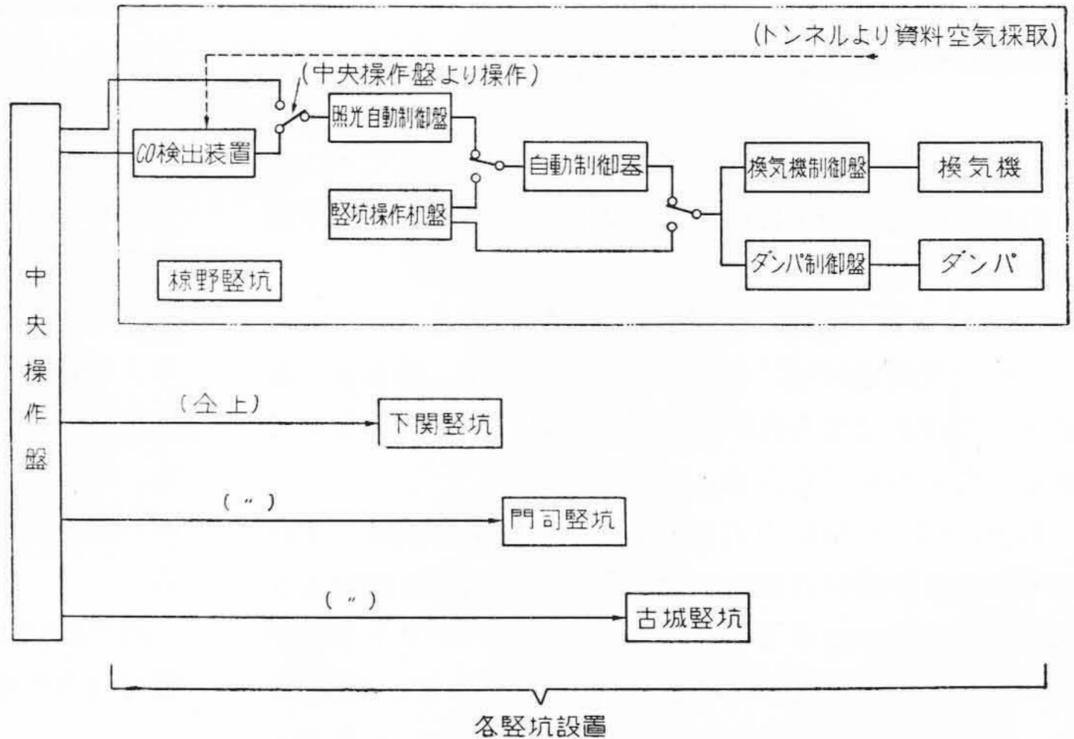
- (1) CO量
- (2) 電動制御器のノッチ位置

中央制御室では, CO検出装置による自動制御と, 中央よりの遠方手動運転を切り換えることができ, 遠方手動に切り換えて, 各竖坑の電動制御器を操作し, 換気量を自由に変更することができる。

そのほか, CO量の過大, CO検出装置および換気機の事故の場合には, 中央制御室へ表示され, 警報がでるようになっている。なお制御系統図を第9図に示す。

6. 結 言

関門国道トンネルは, 内燃車が通るので, 常に一酸化炭素による危険にさらされているため, 換気装置は最も重要な設備である。この換気装置を, 衛生的に, しかも



第9図 制御系統図

経済的に運転する自動制御装置を完成した。いずれ各担当者から詳細な報告をする予定であるが, トンネルの開通に際しその概要について紹介した。

トンネル内の一酸化炭素を検出して換気装置を自動制御することは国内では初めてであつて, この方式の完成には, トンネルの優秀な設計に加えて, 機械, 電気, 化学関係者の絶大な協力を必要とした。トンネル内の現象については, なお不明の点も多少残つているので, 今後運転実績をみていつそう完全なものとなしたい。

終りにのぞみ, 本装置の設計にあつて終始御指導をいただいた, 九州大学の葛西教授, 関門国道建設事務所, 中尾前所長, 上の土現所長, 伊吹山課長, ならびに日立製作所亀戸工場森泉工場長, 松井設計部長, および絶大な協力をいただいた日立製作所中央研究所, 井上実氏, そのほかの関係者に厚く謝意を表する次第である。