

酸素呼吸器 (10型) について

Study of Oxygen Breathing Apparatus, "Mark-10"

國 本 出 人*
高 橋 裕*

The "Mark-10" oxygen breathing apparatus is self-contained, constant-flow, closed circuit and compressed oxygen supply type, and light weight with 2 hours duration. The apparatus has automatic starting device for CO₂ absorption canister.

We searched the limit of the capacity of breathing apparatus to know the safety of it.

So it was enough to use in fire disaster. But it was necessary to devise the cool system of respiratory air.

1. はじめに

現在、特別救助隊を中心に昭和58年から配置された酸素呼吸器(10型)は、従来の空気呼吸器と比較すると、はるかに長時間の使用が可能でありかつ、軽量化されており、人命検索や救助活動に適した呼吸器として使用されている。この酸素呼吸器(10型)は、従来より各署に配置されている発生式酸素呼吸器と同様に長時間使用に耐えられる呼吸器であるが、発生式酸素呼吸器の欠点であった労働負荷に伴う急激な吸気の補給の不完全さを補う定量・肺力併用機構をそなえ、リアル・タイムに酸素の補給を行なえる。その反面、酸素供給方式が高圧ポンペによるために、改良による複雑な構造が、使用者に、取扱いの難しさを感じさせると言われている。一例として、昭和59年7月に、操作の初歩的な誤りから酸素欠乏により意識不明に陥った事故が、1件だけ報告されている。この他に、使用されている呼気中の二酸化炭素を除去する薬剤の性能や、この薬剤の反応に伴う発熱により吸気温が上昇するなどの問題があり、これらの問題について使用上の安全性について検討した。

2. 酸素呼吸器 (10型) の概要

酸素呼吸器(10型)は、東消5型空気呼吸器と異なり、吸気は呼気を再生して使用し、高圧酸素

ポンペより供給される酸素を有効かつ、呼吸に不自由を感じさせないための各機構が付いた長時間使用可能な呼吸器である。

表1に酸素呼吸器(10型)の一般的な諸元を示す。²⁾

酸素呼吸器(10型)は構造をあまり複雑にせず、使用時間を長くするために、酸素の供給方法として、定量・肺力併用循環式を採用している。肺力式とは着用者の作業状態によって変化する消費酸素量に応じた酸素量を供給する方式で、携行している酸素をむだなく有効に使用できるため定量供給式よりも使用時間が長くできるが、肺力併用の供給装置が複雑な構造となり保守点検も難しく、着用者の十分な訓練と整備が必要である。本呼吸器は、この肺力式に定量式の長所をとり入れ、取扱いや保守を容易にしている。閉鎖循環式とは、従来の東消5型空気呼吸器のように、呼気を放出することなく、呼吸に不必要な二酸化炭素を薬剤で除去し、不足となった酸素を補給し、吸気として循環再利用する方式のことである。これにより、空気呼吸器などのように直接関与していない窒素を携行する必要がなくなり、必要最少限の酸素の携行でよく、装置が複雑化しても、相対的に全装備重量は東消5型空気呼吸器の全装備重量(14kg)に比べ約3kg程軽くなっている。

閉鎖循環式については、図1に示す。

酸素ポンペは、最高充填圧力150kg/cm²の時に、225ℓの純粋酸素を携行することになり、本呼吸器では、ポンペのそく止弁を開けると定量補給

*第一研究室

表1 主要諸元

型式	圧縮酸素定量・肺力併用循環式：C-120
使用時間	公称 2時間 (JIS M7601による) 呼吸量 40ℓ/minのとき 約2時間
重量	約10.5kg (全備総重量) # 9.9kg (全体を除く)
寸法	約435mm(縦)×約350mm(横)×約140mm(厚)
酸素ポンペ	材量 CrMo鋼 内容量 1.5ℓ、最高充てん圧力 150kgf/cm ² 、耐圧試験圧力 250kgf/cm ²
酸素供給方式	定量補給 (1.5ℓ/min at 30kgf/cm ²)と肺力自動補給を併用
炭酸ガス吸収剤	カーライム、(専用) 約1.45kg
呼吸装内容積	約5ℓ
面体	全面1限式 (K3型、10CD型)

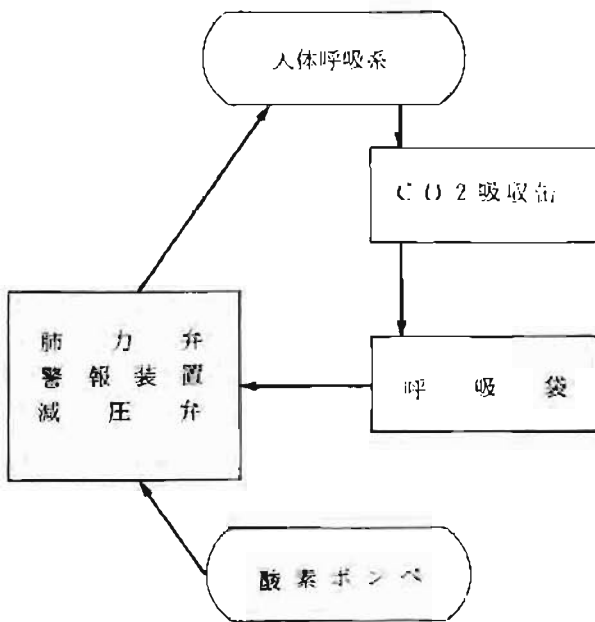


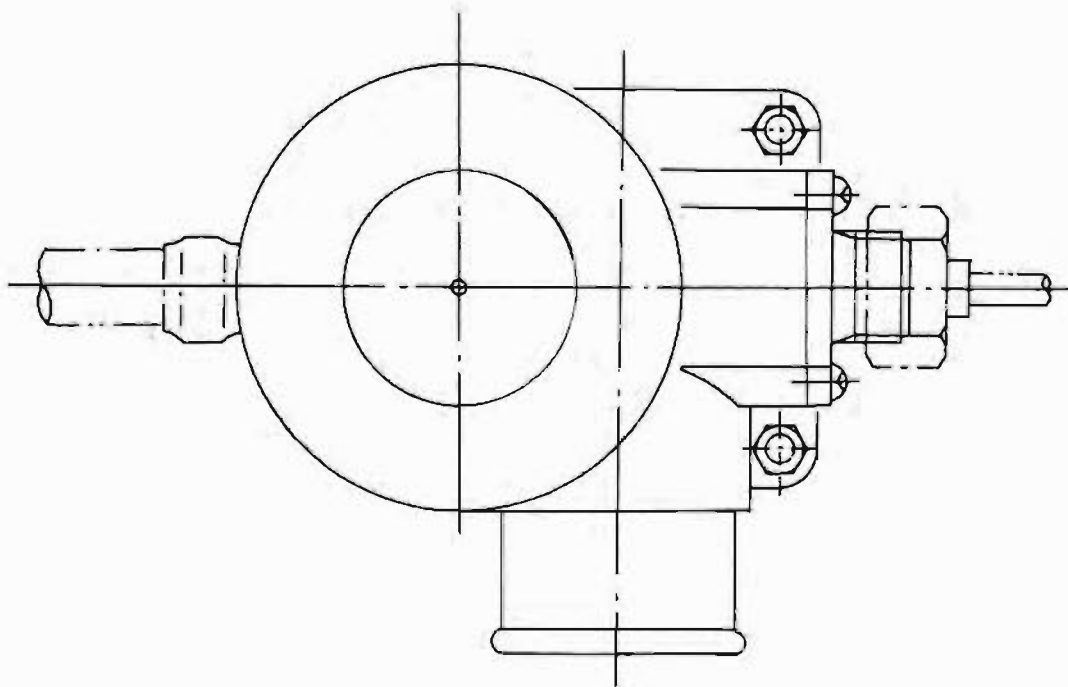
図1 呼吸系統図

ノズルから毎分1.5ℓの酸素が放出され、呼吸をしなくとも、単純計算で150分後には、ポンペは空になる。また激しい活動に伴い、大量の吸気を行なった場合で呼吸袋及び定量補給ノズルからの酸素供給でおぎなえない時には肺力弁室が大気圧より、-20~-50mm H₂O 以下になった場合にダイヤフラムが作動し、ティルト弁から吸気に応じて酸素が最大50ℓ/min供給される。図2に肺力弁(自動補給弁)の構造を示す。

自動補給弁より供給される酸素と呼吸袋に蓄えられていた再生吸気は混合され残存圧力警報装置を通過する。この装置は減圧弁から導びかれた高

圧酸素の圧力に応じて、クイックバルブとばねにより、バルブの位置が変化する。図3に示されるように、酸素ポンペの圧力が150~30kg/cm²の場合、④の位置にあり、30±5kg/cm²になった場合、⑤の位置にバルブは移動する。さらに解除装置の押しボタンを押し減圧するか、10kg/cm²以下の圧力になると、③の位置に移動する。バルブが3段階の位置にそれぞれ固定するように止め金がある。④または③の位置では抵抗なく吸気が流れるが、⑤の位置では、バルブとプレートが吸気の通路をふさぎ、強く吸いこむと、プレートの下に付いているハーモニカのリードを振動させ警報音を発生する。また、通気抵抗が大きいので、警報音に気づかなくても、呼吸が極端に吸いこみにくくなるので、圧力の低下がわかるしくみである。この状態は、解除装置の押しボタンにより解除されるが、着用者は、あわてることなく、すみやかに脱出の行動に移らなければならない。(③から④への移動は60±10kg/cm²以上必要)

警報装置を通過した吸気はゴムの蛇管を通り、マスク内部へ導びかれる。マスクは締付ボルトにより着脱が可能である。さらに吸気管と吸気管の取り付け部にはそれぞれ弁がついており、吸気が逆流するのを防いでいる。また、閉鎖循環回路内部の酸素圧力が高くなっても自動排気弁が作動しなかった場合の手動排気弁が設けられている。これらの構造は図4に示す。



残存圧が警報装置へ

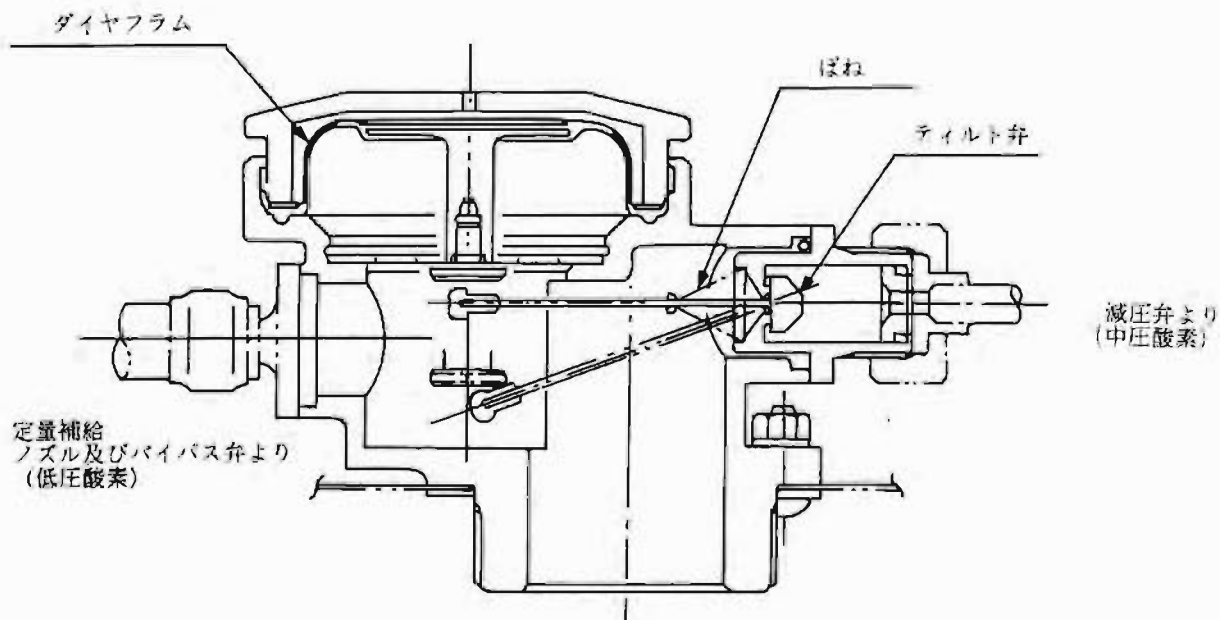


図2 肺力弁 (自動補給弁)

呼吸により酸素が消費され、二酸化炭素が増加した吸気は吸気管を通り、清浄缶に送られる。清浄缶には約1.45kgの炭素ガス吸収剤(水酸化カルシウム)が顆粒状で充てんされている。この薬剤は詰め替えが容易に出来るようになっており、締付けボルトとばねにより多孔板が薬剤を押さえている。このため使用中の振動により缶内部に短絡路を生ずることなく、効率よく二酸化炭素の除去が行なわれる。これらの構造は図5に示す。

清浄缶は着脱可能な清浄缶開封装置に清浄缶締

付ボルトで取り付けられている。清浄缶の入口と出口の面に接するようにシャッターがある。使用後は手動開放レバーを右に回しシャッターを閉じる。ポンペのそく止弁を開けると、減圧弁により3.5kg/cm²の圧力により起動シリンダーが働き手動開放レバーを押し、シャッターを開けるが、圧力が減少してもレバー及びシャッターは閉じない。使用しない場合の炭酸ガス吸収剤の性能劣化を防ぐ役目を果している。この構造は図6に示す。

吸気中の二酸化炭素を除去された再生吸気は、

呼吸に用いられる時より酸素が減少したものが呼吸袋にたくわえられ、図2の定量供給ノズルと自動補給弁から供給される酸素と混合され、再び吸気として用いられる。

この他にマスクが顔に密着せずに隙間が生じ、外の有毒ガスが呼吸回路に混入した場合に、マス

ク内部の空気をクリアする時や、緊急の酸素補給のためのバイパス弁が減圧弁に設けられている。

図7に圧力調整器を示す。

また、図8に酸素呼吸器(10型)の全体の構成を示す。

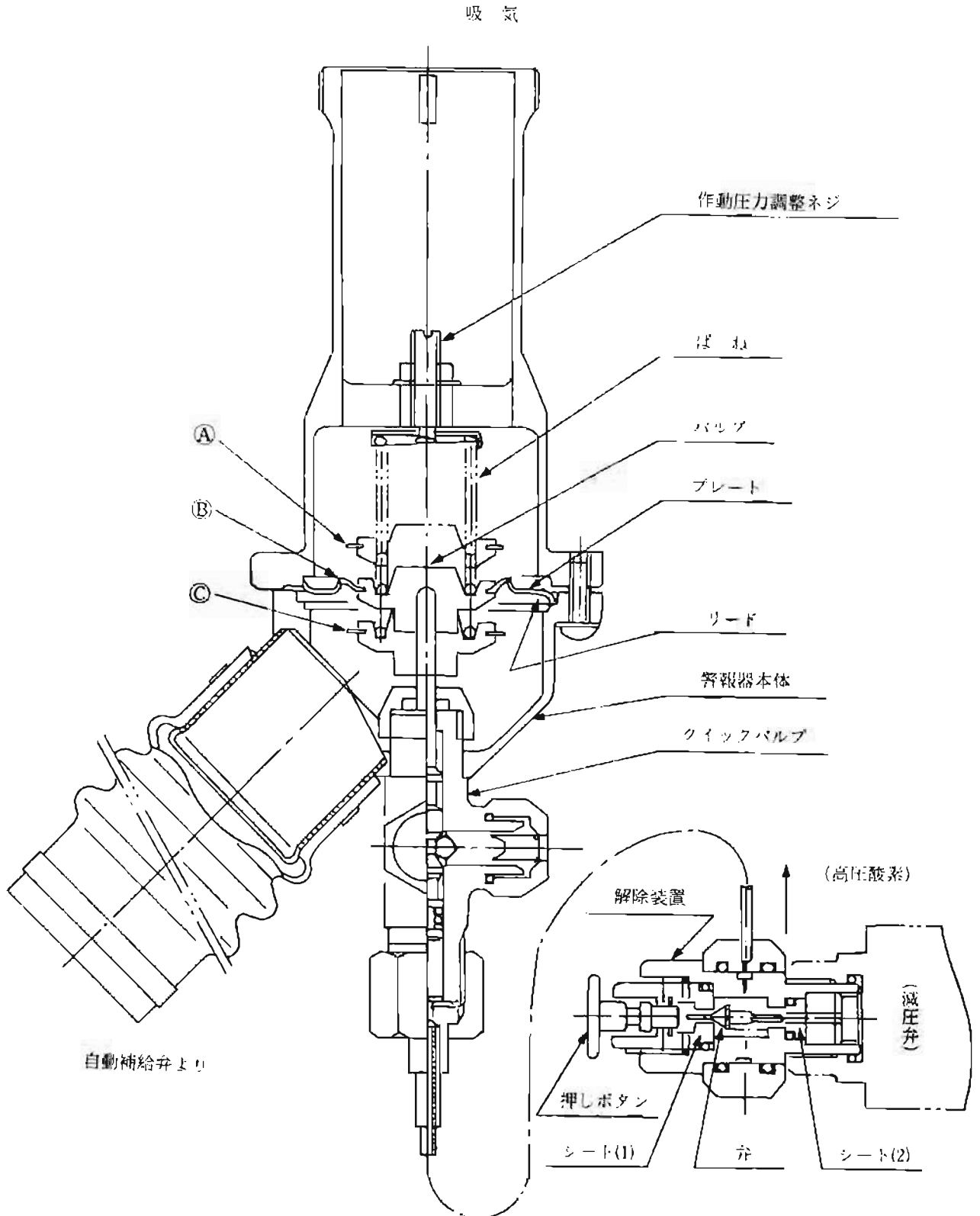


図3 残存圧力警報装置

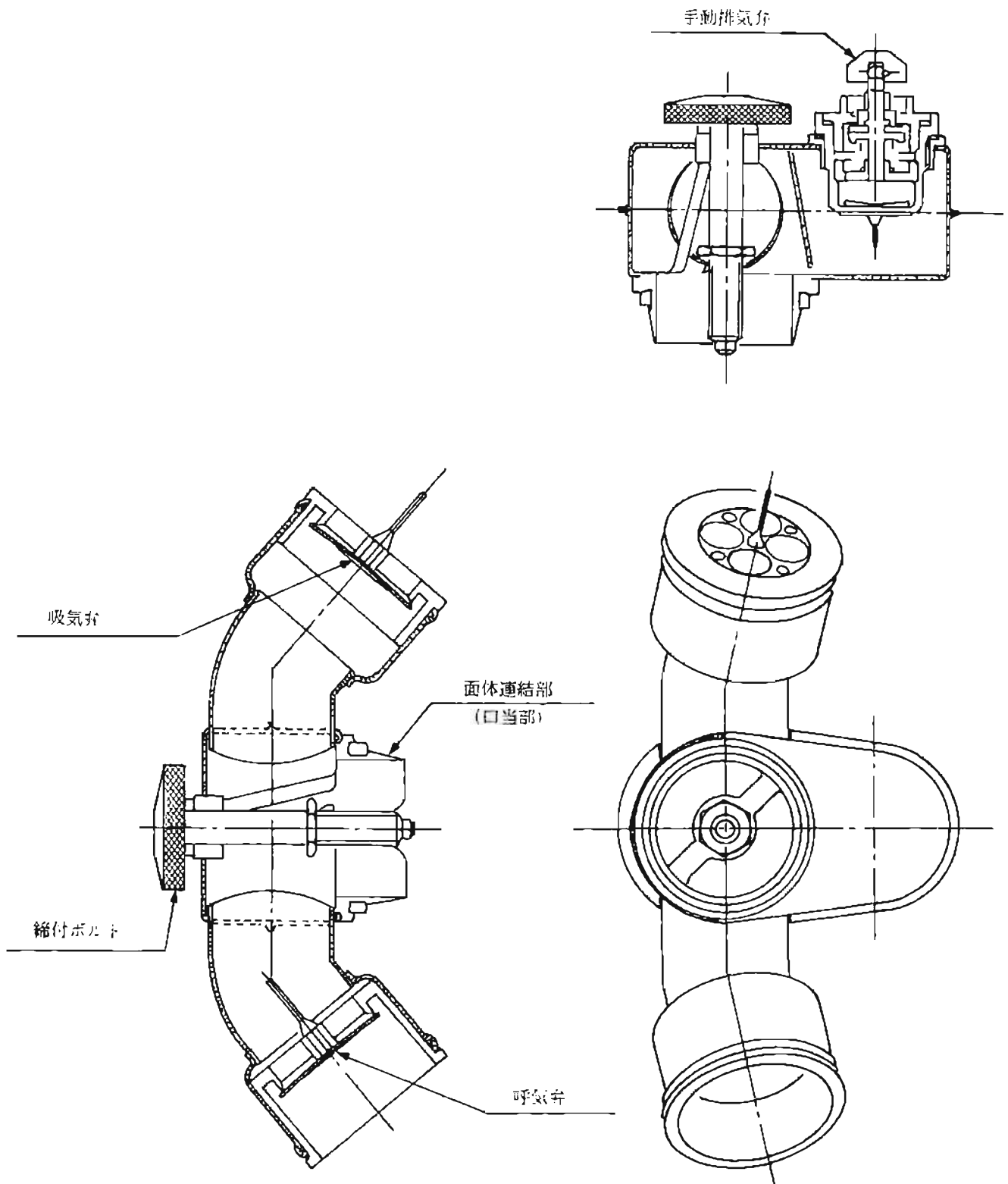


図4 マスク連結部及び呼吸弁室

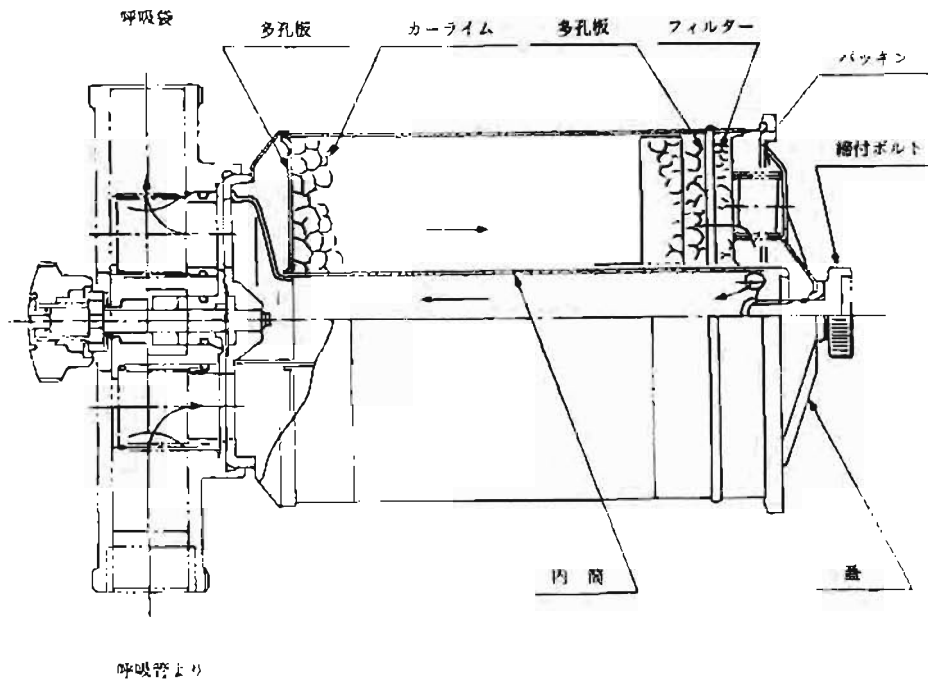


図5 清 浄 缶

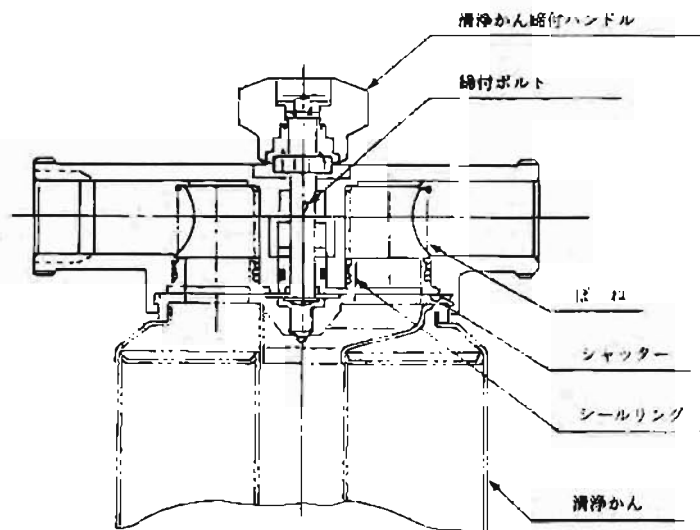
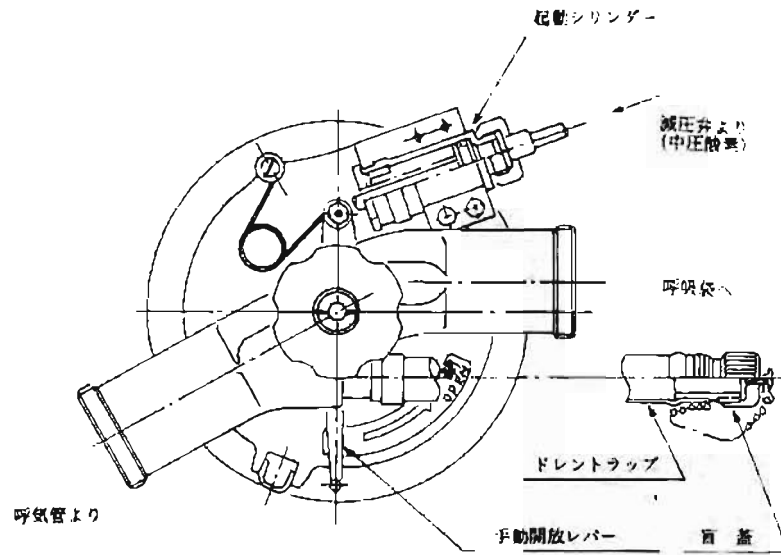


図6 清浄缶開封装置

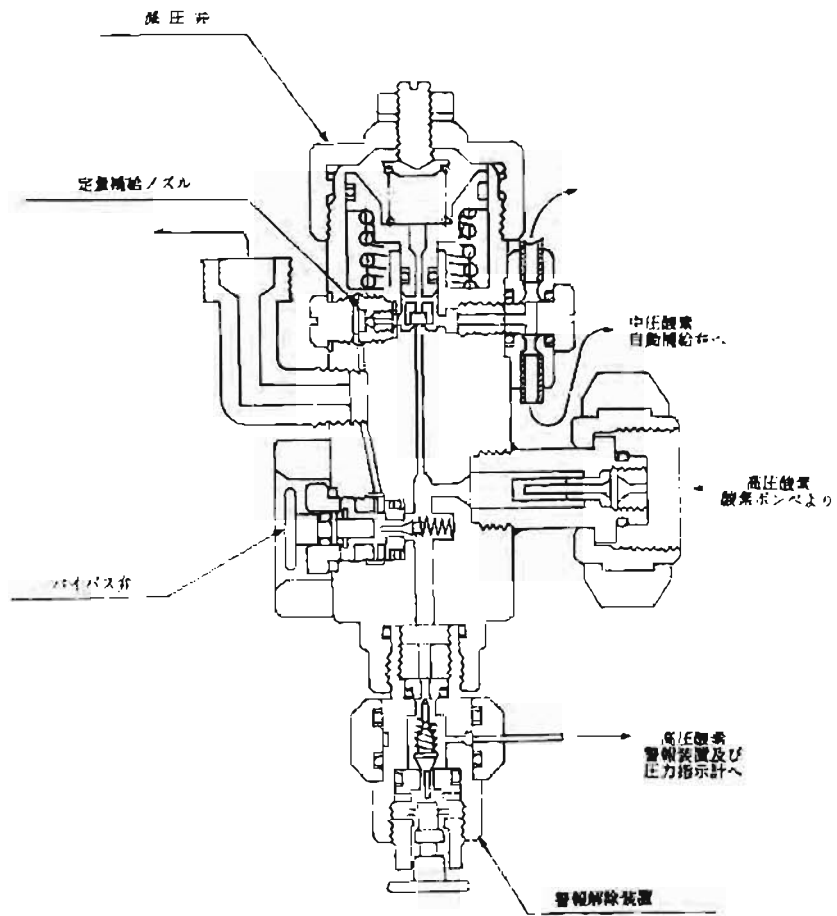


図7 圧力調整器

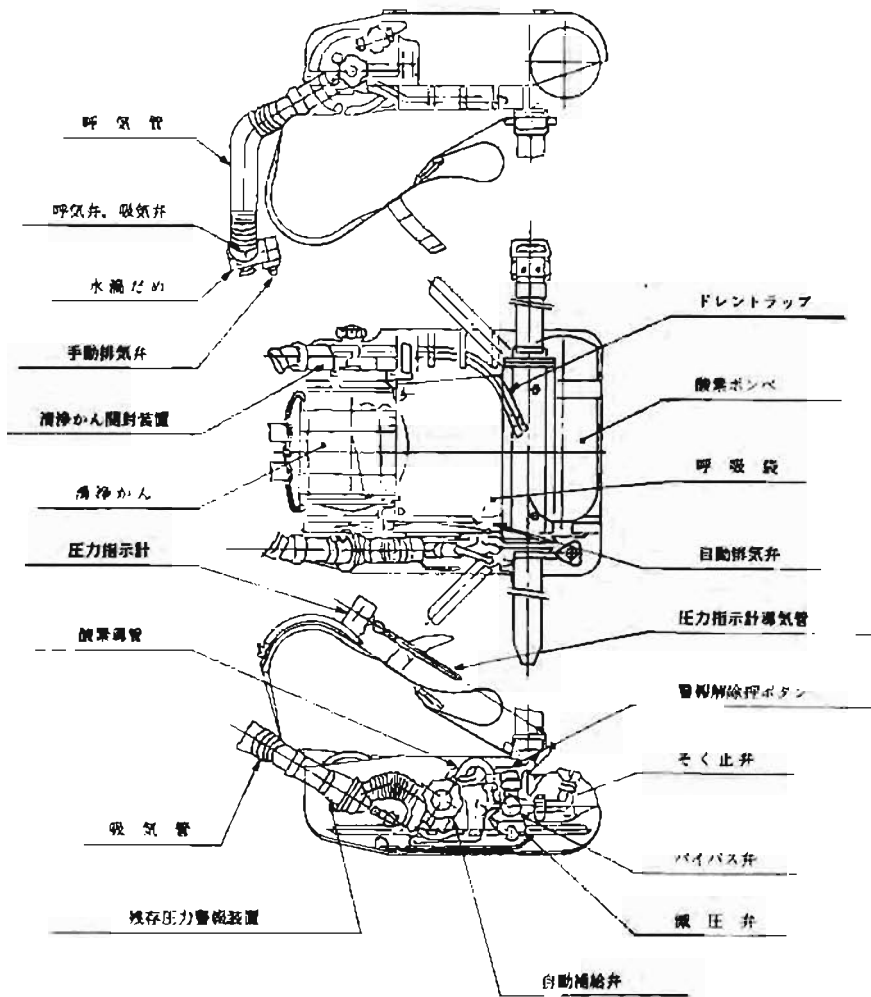


図8 酸素呼吸器10型の全体構成

3. 実験方法及び結果

(1) 通気抵抗試験

通気抵抗については各部分ごとの通気抵抗及び呼吸器全体の通気抵抗について流量を毎分30ℓから150ℓまで変えた場合の変化量を測定した。なお、圧力は傾斜マンノメーターにより得た。結果を図9及び10に示す。

呼吸器全体の通気抵抗では、東消5型空気呼

吸器の約2倍の値が得られており吸気及び呼気とも負担が大きい。また各部分単独では、マスク(面体)が一番抵抗が大きく、次に清浄缶、呼吸袋、吸・呼気管の順に小さくなっている。しかし、実際に着用し呼吸した場合は、これらの送風ポンプの定流速と異なり、平均流量の約3~4倍の瞬間流量に相応する通気抵抗が呼吸する際に負荷となっている。

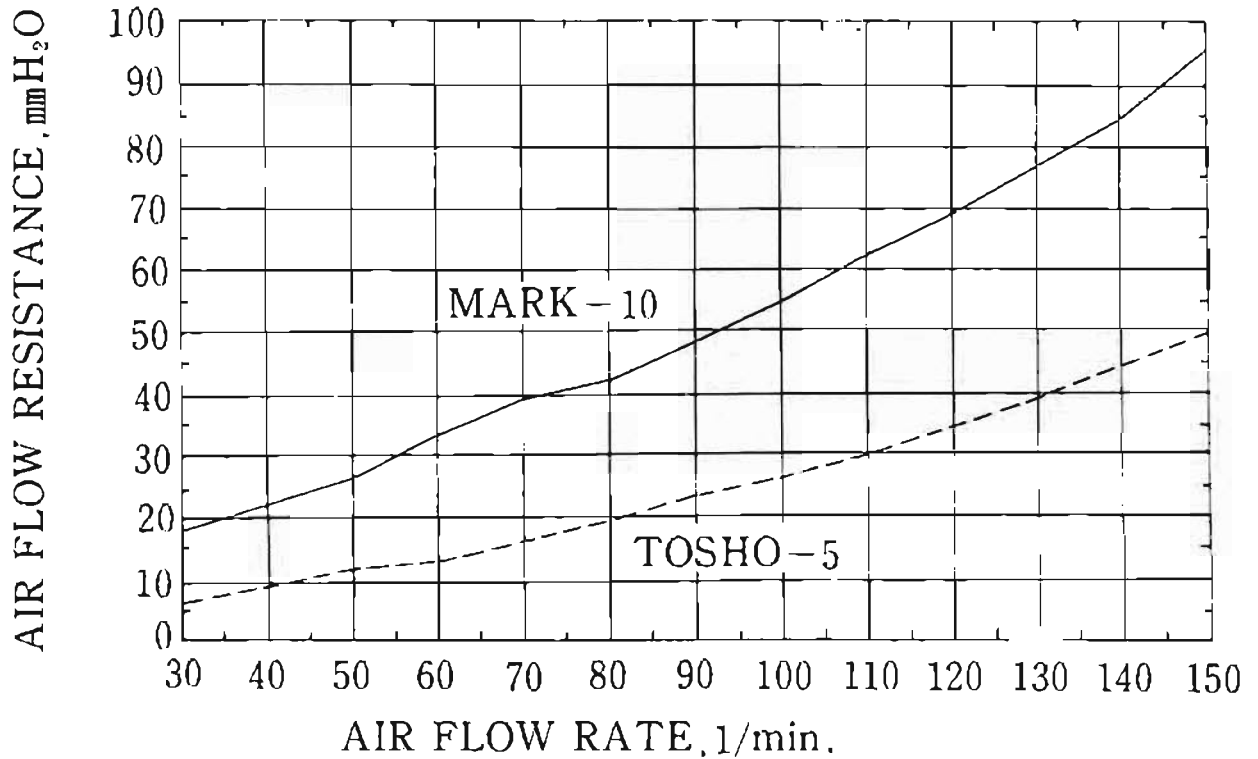


図9 呼吸器全体の通気抵抗

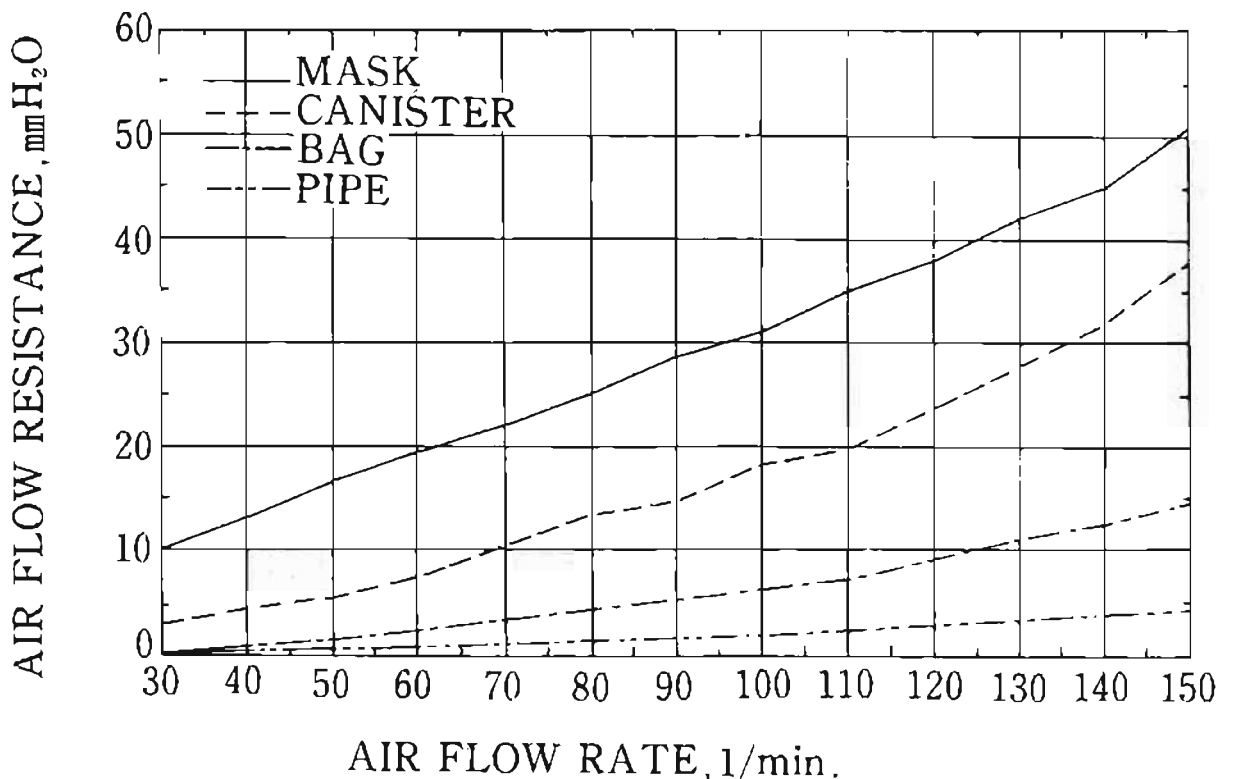


図10 酸素呼吸器各部分の通気抵抗

(2) 動的通気抵抗試験

定流量時の通気抵抗で得られない瞬間的通気抵抗について、マスク内部と大気圧の差について圧力変換器（共和電業製 PG-50GC）と動ひずみ増幅器（共和電業製 DPM-IN）により測定した。測定例を図11に示す。

これらの動的通気抵抗は安静状態で呼吸回数のみを変化させたために、負荷状態での大量な吸気がなされておらず、急激な吸い込みの現象が表われていない。

一般的に酸素呼吸器の呼吸パターンは吸気抵

抗が少なく、吸気抵抗が大きい。

東消5型空気呼吸器の場合は吸気側に抵抗が大きく、肺力弁が働き空気が供給されるため+側に急激な圧力が働くためピークが観察される。またFRPポンペを用いた陽圧式空気呼吸器の場合ではマスク内部の陽圧のため+側に約20mm H₂O程シフトが認められるが、空気呼吸器のパターンに類似しており、それに加え、吸気弁がバネにより押しえられているためピークが吸気側に現われている。

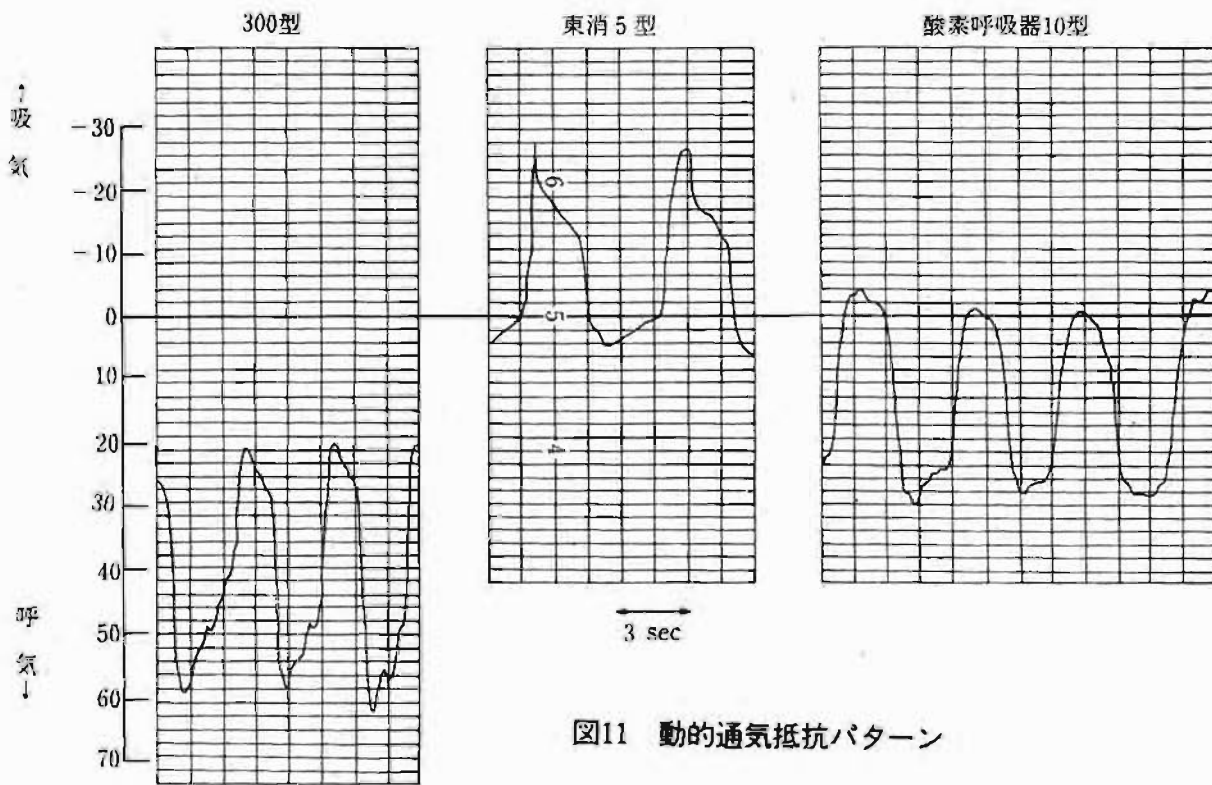


図11 動的通気抵抗パターン

（平均呼吸回数：毎分10.8回）
（労働負荷：安静，浅い呼吸）

(3) 炭酸ガス吸収剤の振動により目詰り

酸素呼吸器（10型）の炭酸ガス吸収剤は清浄缶中で、作業時に歩行等の振動を受けるが、この振動により薬剤の顆粒が互いによつかり合い微粉化し、目詰りを起こすことが予想され、微粉化と目詰りによる通気抵抗の増大について調べた。

まず、清浄缶が消防隊員の歩行によりどれだけの振動を受けるかを調べるため酸素呼吸器（10型）の清浄缶に縦振動についての加速度を測定するため加速度センサー（共和電業㈱製 AS-5GB）を用いた。次に、これと同等の連続振動を与える加振器により1時間加振し、48~200メッシュのふるいにより粒度分布を測定した。その結果を表2に示す。

表2 加振後の薬剤微粉化の粒度分布

薬剤総重量	1392.9g	1250.8g	1108.8g	819.3g
充填率	96.0%	86.3%	76.5%	56.5%
45メッシュ通過量	0.3g	0.4g	0.2g	11.1g
100メッシュ通過量	0.1g	0.3g	0.2g	0.1g
150メッシュ通過量	0.1g	0.1g	0.2g	0.1g
200メッシュ通過量	0.1g	0.2g	0.2g	0.1g

次に、清浄缶内の薬剤及びフィルターに、10、48、100メッシュに通過した薬剤微粉各1g、計

3gを入れ、目詰りの起こりやすいようにした後、清浄缶の通気抵抗の増加量を測定した。その結果、毎分50ℓの流量に対し2.5mm H₂Oの通気抵抗の増大が認められた。

(4) 酸素消費試験

酸素呼吸器10型は、定量補給ノズルから毎分1.5ℓの酸素が供給され、一般的に呼吸量の約4%にあたる酸素が呼吸により二酸化炭素に置換され吸気として排出されると言われており、1.5ℓをすべて消費する呼吸量は毎分37.5ℓということになる。労働負荷が少なく呼吸量及び酸素消費量が少ない場合、循環回路内の酸素濃度は上昇する。特に初動時には呼吸袋がふくらんでいないので、自動補給弁が働くために回路内は最初から高濃度酸素になる。この状態で、何らかの障害により酸素の供給が停止した場合のマスク内部の酸素濃度の測定を行なった。

酸素供給停止5分前に酸素ポンベのそく止弁を開け、安静状態で浅い呼吸を測定終了時まで続けた。酸素濃度計は新コスモス電機㈱製 XO-326を用いた。その結果を図12に示す。

正常な着用5分間でマスク内部の酸素濃度は61%に達し、酸素ポンベのそく止弁を閉じてから20分後に軽度な頭痛と視野狭さく状態が起こり、酸素濃度は13%を示した。

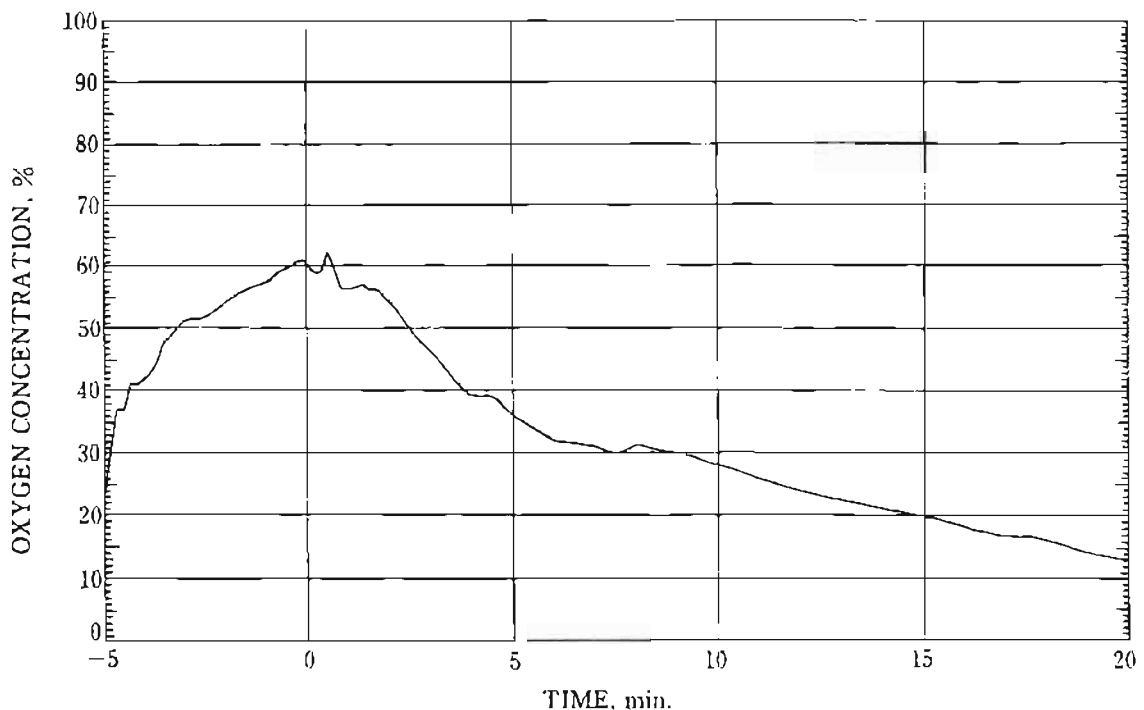


図12 マスク内部の酸素濃度変化

(5) 清浄缶の二酸化炭素の吸収性能

清浄缶に充てんされている二酸化炭素吸収性能について、JIS M7601循環式酸素呼吸器の試験方法4.4に定められた条件での吸収性能について調べた。あわせて、同じ装置により温度38°C、湿度100%で二酸化炭素4%を含んだ空気を毎分50ℓで連続通過させ、通過後の空気を循環させた場合と、二酸化炭素吸収剤の袋に2mmφの穴を3ヶ所あけ、2週間放置させ、性能劣化させたものについて清浄缶を通過した直後の二酸化炭素濃度を測定した。なお、濃度測定は

北川式ガス検知管により測定した。結果を図13に示す。

JIS M7601では公称使用時間でのCO₂の吸収率は通過させたCO₂の総量の65%以上で、公称時間経過時のCO₂吸収率は30%以上でなければならない。また循環通気させた場合、除去されない二酸化炭素が加わり、急激に除去能力が低下する。さらに大気中の炭酸ガスで性能劣化している薬剤では、劣化していないものに比べ、あきらかに除去能力が低下している。

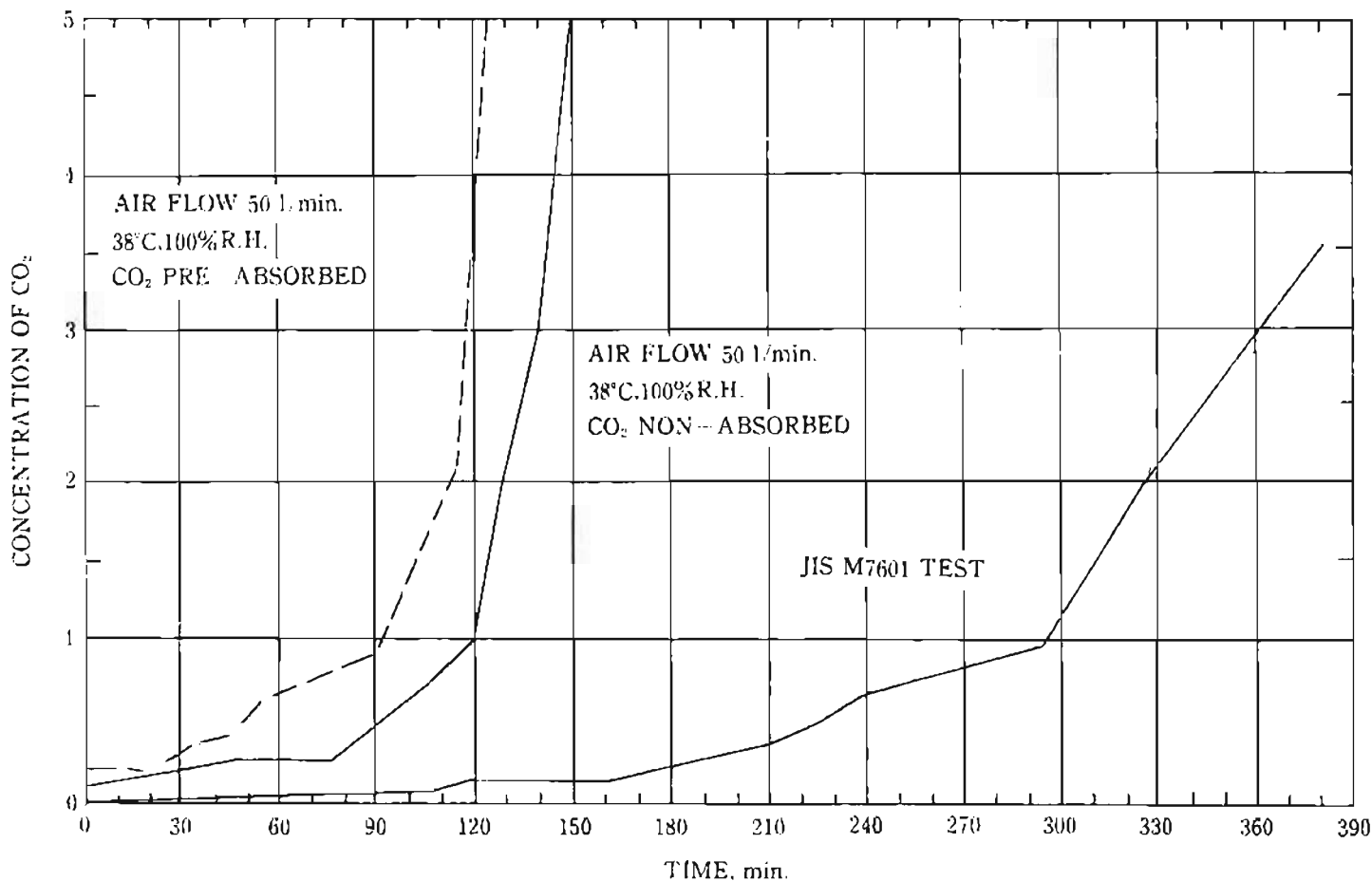


図13 清浄缶のCO₂吸収後のCO₂濃度

4. 考 察

酸素呼吸器(10型)は十分な検討と改良がなされ、肺力循環式という複雑な構造にもかかわらず、いくつかの機構により取扱いが容易に出来るように工夫されている呼吸器であるが、定められた点検及び操作を誤ると、生命にかかわる危険性ははらんでいる。前述のごとく、空気呼吸器と大きく異なる点を掲げてみると

- 酸素ポンプを使用している。
- 供給方式が肺力弁に加え、定量補給式である。

- 循環式により吸気は呼気を再生したものである。
- 呼気中の二酸化炭素を除去するために薬品を使用している。
- 吸気温が高くなる。

などの特徴があげられる。吸気の大部分が酸素である点で、酸素中毒の点がまず心配されるが、大気圧中で2時間の使用では、まったく問題がない。むしろ、呼吸により消費する酸素量に応じて変化する使用時間が問題であり、吸気中の二酸化炭素を除去する二酸化炭素吸収剤の吸収性能が薬品であるために、吸収限界が視認できないことと、

短い循環回路のため、肺で加温・加湿された呼気が冷却されずに清浄缶内で二酸化炭素の除去の反応熱で、さらに加温され、吸気温が体温より高いというアンバランスな状況にさらされる危険性である。これらは、この呼吸器に特有な問題であり、操作の誤りに起因する危険性のように、時間と訓練では解決できないものである。

(1) 酸素濃度と消費時間について

人体の肺呼吸では、呼吸量の約4%と言われている。図14は、このことを示している。³⁾

酸素消費の実験では、そく止弁を閉じてから使用不可能になるまでの時間が20分も要したが、先の結果は安静状態で、毎分の酸素消費量が非常に少ないものと考えられる。酸素供給が停止してから使用可能限界までの所要時間を算出する式は次に表わされる。

$$t = 0.01V(C_i - C_e) / V_o$$

C_i : 呼吸器内の初期酸素濃度 (%)

C_e : 呼吸後の酸素濃度 (%)

t : C_e に至るまでの所要時間 (分)

V_o : 1分間の酸素消費量 (ℓ/分)

V : 呼吸器内の初期気体容積 (ℓ)

V_o は着用者の1分間の呼吸量の約4%で与えられる。この式を用い、図12の結果をみると、 V は十分に酸素が満たされており、約7.5ℓである。また安静状態で酸素消費量は呼吸量の2%とし、 C_i は60%、 C_e は13%として計算すると呼吸量は9ℓ/minである。次に消防活動等の途中で酸素供給停止した場合、 C_i は85%、 C_e は16

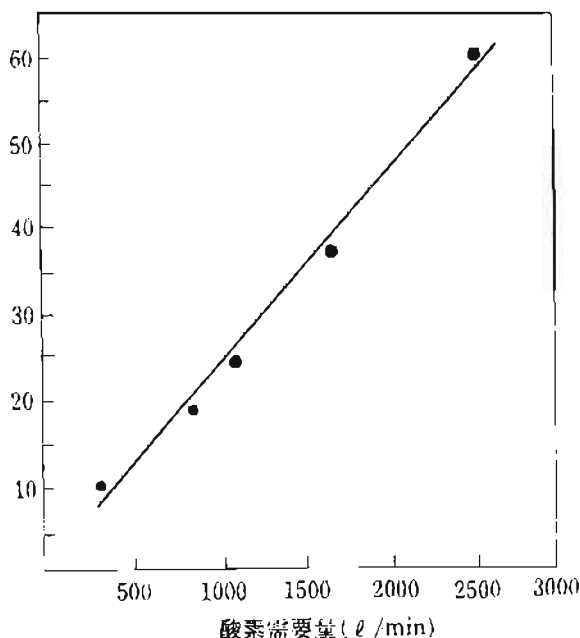
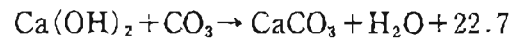


図14 肺換気量と酸素需要の関係

%, V_o は $80 \times 0.04 = 3.2$ ℓ/分、 V は7.5ℓとすると、呼吸器内の酸素濃度16% (酸素不足) まで1分37秒という計算値が得られる。これによれば、東消5型空気呼吸器のように空気供給が止まったと同時に呼吸が出来なくなるよりは良いが、酸素呼吸器(10型)の場合では酸素ポンベに酸素があっても減圧弁等での故障により酸素供給停止が起こった場合、残圧警報装置への高圧酸素の系統と定量補給ノズルの供給系統は異なっているため、警報は発せられない。ただし減圧弁での故障の事例は過去にない。多くは、酸素ポンベの残圧が少なくなり、警報が発せられ、酸素供給が止まった状態が大部分であるので、警報作動が働く時期を事前に圧力指示計で予想し、警報確認後は、充分脱出に要する余裕時間があることを理解し、おちついて、脱出行動に移ることである。

(2) 炭酸ガス吸収剤の能力について

清浄缶内に充てんされている二酸化炭素吸収剤は水酸化カルシウムであり、二酸化炭素を吸収し炭酸カルシウムとなるがこの反応を次に示す。



kca ℓ/mol

この反応式によれば、吸収可能な炭酸ガスは、438.4ℓである。呼気中に4%の炭酸ガスを含む呼気量に換算すると、10960ℓとなり、完全に反応すると仮定し、呼気量10960ℓが処理できる。毎分30ℓの呼気量(呼吸量)だとすると6時間5分まで二酸化炭素が除去できることになる。

(6時間5分=365分)これに対応する実験結果

表3 空気中のCO₂濃度と症状

空気中のCO ₂ 濃度(%)	症状
0.5	公衆衛生上の許容濃度。
2.5	数時間の吸入で症状に変化なし。
3.0	呼吸の深さが増す。
4.0	粘膜に刺激、頭部圧迫感、血圧上昇、耳鳴。
6.0	呼吸数が著名に増加。
8.0	呼吸困難が著名。
10.0	意識喪失、呼吸困難。
20.0	生命に重要な中枢の完全マヒ、死亡。

は図13の JIS M7601TEST の実線で示されているもので、二酸化炭素濃度は5時間後に1%を超える程度で、清浄缶での薬剤の補集効率は非常に高い。なお二酸化炭素濃度の人体の影響については表3に示す。

現実的な吸収については、50ℓ/minの流量で循環されたものが中央の線で示されている。労働負荷が激しい場合、呼吸商（酸素消費量に対する排出二酸化炭素量の比）は1より大きくなる。一例では消防活動の場合最大1.5近くなるが、傾向として酸素消費率は小さく、酸素消費率の高い隊員は呼吸商は1に近く、呼吸量は少ない。このため激しい運動の場合は呼吸量は増大しても酸素消費量は変化が小さいので、酸素消費率は低くなる。³⁾これにより、本実験の二酸化炭素の呼気中の濃度4%は妥当である。

また破線で示される最も短時間で二酸化炭素濃度の高くなった結果は、二酸化炭素吸収剤の保存が不完全な場合の一例として示している。二酸化炭素吸収剤の袋は丈夫なポリエチレンの厚めの二重袋となっているので、穴があく可能性は少ないが取扱説明書では、袋が不完全な時や使用せずに6ヶ月以上経過した清浄缶内の薬剤については交換するように記されている。²⁾

特に詰め替えた後の清浄缶の開封装置のシャッターは確実に閉じる必要がある。性能劣化については、それぞれの状態が異なるため、性能劣化の表示が現在のところないので、疑いものは交換すべきである。

(3) 吸気温の上昇などについて

吸気温の高さについては、昭和59年21号の消防科学研究所報の「発生式酸素呼吸器の安全性について」に報告してあるとおりで、二酸化炭素が吸収される反応により、同じ反応量の水蒸気が発生し、また、反応熱のため、呼吸により肺の中で体温であたためられた呼気は、清浄缶を通過時にさらに加温される。図13の実験での通過空気の最高温度は54°Cにまで上昇した。この高温多湿による熱疲労については、吸気温を冷却する装置を付加する事により、軽減されると考えられる。

5. おわりに

酸素呼吸器（10型）は、長時間を要する消防活動に適している呼吸器であるが、構造を十分に理解し操作を確実にを行うことにより、安全に使用できる呼吸器であるが、吸気温の冷却と水分の除去のための改良及び薬剤の劣化の度合いを示す表示について検討することにより、使用中の隊員に対し安全性が増すものと思われる。

6. 文 献

- 1) 警防資料No106, 東京消防庁警防部長通知 481号, 1984
- 2) 10号型酸素呼吸器教育訓練テキスト, 救命器技術研究会, 1979
- 3) スポーツ科学講座3 運動の生理, 猪飼道夫 著, 1971