

大循環式潜水呼吸装置について

岡本峰雄*¹ 福田俊一*¹ 小黒 至*¹
青木 昱*¹

潜水技術部では、水深 300 m の潜水技術の開発を目指すニューシートピア計画の一環として、呼吸器の研究開発を進めてきた。そして、「かいよう」に船上処理型の大循環式潜水呼吸装置—潜水呼吸ガス回収精製装置—を装備し、深度 60～300 m で性能試験を行った。

ロックアウト潜水は 60, 100, 200, 300 m で合計 27 回で、のべ呼吸時間は 46 時間 44 分 (300 m で 10 回, 20 時間 45 分) であった。装置は全期間良好に作動し、運用は容易であった。送気ガスの O₂ 濃度は高精度に制御でき、CO₂ はほぼ完全に除去された。安定した性能は大容量のガスを循環させ、重要機器を船上に配置したことで得られたものである。200, 300 m において呼吸時のガス消費量を正確に求めた。その結果から推定されたガス回収精製率は 84～91% であった。呼吸ガスの供給停止に備えたスクーバ型非常呼吸器の性能も良好で、水深 300 m においても 15 分間以上の呼吸が確保できると判断された。

キーワード：大循環式潜水呼吸装置，非常呼吸器，飽和潜水

Practical Evaluation of a Diver Gas Recovery System up to 300 msw

Mineo OKAMOTO*² Shun-ichi FUKUDA*²

Itaru OGURO*² Akira AOKI*²

As part of a manned 300 m offshore dive project—New Seatopia Project—using the multi purpose research vessel “KAIYO”, a diver gas recovery system (Gasmizer and SLSs) was evaluated practically at 60,100,200,300 msw.

The equipment onboard “KAIYO” consists of a control console, a gas reprocessing unit, two electric gas boosters, two two-men bell units, four diving helmets and two SLSs.

Totally 27 dives were conducted during the project and diver's breathing times were 46 hr 44 min (20 hr 45 min at 300 msw). The system worked well through the whole dives and was easy to operate.

Consumption rates of diver supply gasses were measured correctly at 200 and 300 msw dives. As the result, the gas recovery rates during practical diving operations were estimated 84～91%.

*¹ 潜水技術部

*² Diving Science and Technology Department

Two SLSs were evaluated by six times breathing endurance tests at 295 msw dry environment. Divers could breathe at least 30 minutes. The only problem was the uncertain CO₂ scrubber housing tightness.

Key word: Diver gas recovery system, Secondary life support system, Saturation diving

1. まえがき

飽和潜水では多種のガスを大量に使用する。そのうち最も多いのは、DDC(船上加減圧室)の圧力制御用のHeと、ダイバーが呼吸するHe-O₂混合ガスである。前者は船上で用いられており、回収精製して再利用することが比較的容易である。しかし潜水呼吸ガスについては、水中にさらされたダイバーヘルメットという小さな空間内の圧力とガス組成を厳密に制御する必要があり、技術上の諸問題から呼吸は海中に放出されていた(開放式)。

ダイバーは環境圧力に等しいガスを呼吸するが、その消費量は大深度潜水では膨大な量となり、経済性の面及び船舶に搭載するスペース、重量等の面で大きな問題となる。

潜水呼吸ガスの消費量を減らす装置として、スクーバの場合には半閉式潜水呼吸器や閉式潜水呼吸器が多種開発された。これらは、ダイバーの携帯するバックパック内で炭酸ガス吸収と酸素濃度制御を行うものであるが、両項目について技術上の問題点があり、潜水可能時間も短かく、ごく特殊な用途にしか用いられていない。

飽和潜水では1回の潜水時間が長く、商業潜水の場合約4時間に達する。従って、ガス消費量の節減をスクーバの延長技術で解決することは極めて困難である。そこで呼吸ガスをダイバーとSDC間、ダイバーと船舶間で循環させ、その途中で精製する大循環式潜水呼吸装置の開発が進められた。ダイバーとSDC間を循環するベル装備型にはAR-AWAK型¹⁾⁻³⁾、ダイバーと船上を循環する船上を循環する船上装置型にはCOMEX製⁴⁾、KRA-SBERG製⁵⁾⁶⁾等がある。両方式にはそれぞれ長所・短所がある⁷⁾が、現在は船上装備型が主流となっている。

海洋科学技術センターでは、水深300mの潜水技術の実用化を目指すニューシートピア計画の一環として、潜水呼吸器の研究開発を進めてきた。そして海中作業実験船「かいよう」搭載のSDCに船上型の大循環式潜水呼吸装置を装備し、60, 100, 200, 300 mの潜水実験を成功裏に行うことができた。本稿では、システムの全容とその性能について報告する。

本文に入るに先立ち、全体システムの開発に多大なる協力を頂いた川崎重工業株式会社環境技術部有馬宝主氏、三井造船株式会社榎原正実氏、装置の製作にあたった日本酸素株式会社の関係者各位に厚くお礼申し上げます。

2. 大循環式潜水呼吸装置

「かいよう」には2基のSDCが搭載されており、いずれを用いて潜水した場合でも潜水呼吸ガスを回収精製して再利用のできるシステムとした。

装置は、水深300mで潜水する2名のダイバーが最大で150 Al/minの潜水呼吸ガスを長時間呼吸できるものとし、ダイバーは非常時に備えて、15分間以上の呼吸ができるスクーバ式の深々度用非常呼吸装置を携帯するシステムとした。

2.1 システムの原理と構成

ガス処理の流れを図1、全体システムの構成を図2に示した。全体システムは船上装置、送気及び排気アンビリカルホース、SDC装備機器、ダイバー用送気及び排気アンビリカルホース、ダイバー装備品に大別される。2基のSDCと4名用のダイバー装備品に対して船上装置は一式であり、使用するSDCで大循環系が構成できるよう、船上のバルブスタンドで切換えて用いる。

船上装置は潜水呼吸ガスの送気、回収、精製、昇圧、O₂濃度調節を行う部分であり、主要部は船

船上装置

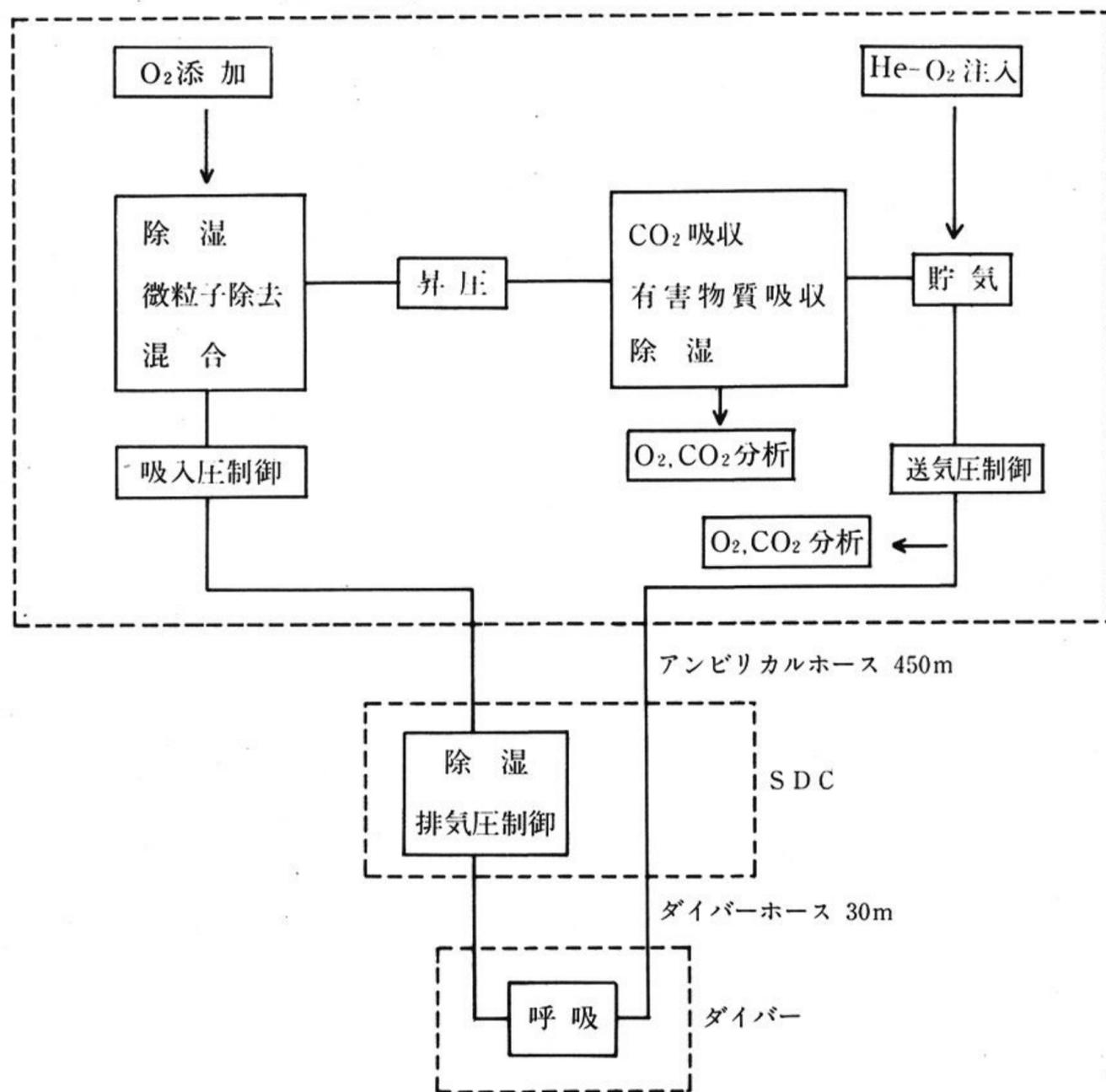


図1 大循環式潜水呼吸装置の基本概念

Fig.1 Outline of diver gas recovery system

船用 20 ft コンテナに収納されており、潜水実験時以外の期間は陸揚げされている。搭載時には電源 (440 V, 220 V), ガス (O₂, He-O₂), 冷却海水用のケーブル, ホース類を接続する。

潜水呼吸ガスの流れについて見ると、ボリュウムタンク (520 l) が送気源となる。ガスは潜水深度に応じた圧力で送気アンビリカルホース (長さ 450 m) を経て SDC に供給される。SDC ではダイバー 2 名, テンダー 1 名及びダイバー深度追跡系へとガスが分岐される。ダイバーには送気ホース (30 m) で供給され、ヘルメットのデマンドレギュレータにより、ダイバーの呼吸に応じたガスが流入する。呼気によってヘルメットの内圧が高まると (+5 cm・Aq・程度) 排気弁が作動し、ガスは排気ホースを経て SDC にもどる。そこで水分を除去し圧力を調節した後、排気アンビリカルホー

ス (450 m) で船上にもどる。ガスはブースターポンプで昇圧されボリュウムタンクに再充電されるが、その途中で有害物質の除去と O₂ 添加が行われる。ダイバーヘルメットのネックシール部からのガス洩れやダイバー深度追跡系からのガス放出等により、ボリュウムタンクの圧力は徐々に低下するが、所定の値以下になると船のガス源から自動的に充気される。

何らかの原因でダイバーへのガス供給が停止した場合、ダイバーは背中の深々度用非常呼吸装置に切換えて呼吸し、直ちに SDC にもどる。

前述のように船上装置は一式であるが、最も重要かつ故障時の修理に時間のかかるブースターポンプは予備機を準備し、切換使用できるようにした。

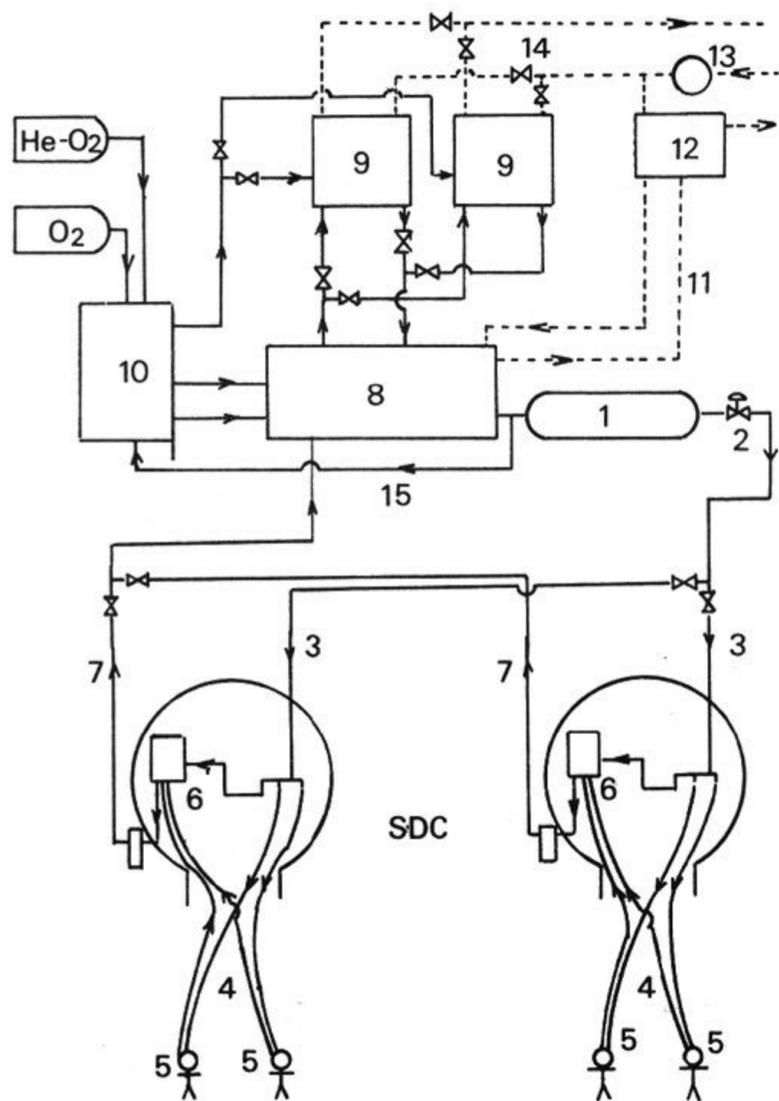


図2 大循環式潜水呼吸装置全体構成図

1. ボリュームタンク, 2. 送気減圧弁
3. 送気アンビリカル,
4. ダイバーアンビリカル, 5. ヘルメット
6. SDC 装備機器, 7. 排気アンビリカル
8. 回収精製ユニット, 9. ブースターユニット
10. 制御盤, 11. 清水冷却系
12. 海水-清水熱交換器, 13. 海水ポンプ
14. 海水冷却系 15. ガスサンプリング系

Fig. 2 Arrangement of diver gas recovery system onboard multi purpose research vessel "KAIYO."

2.2 主要構成機器

(1) ダイバー装備品とアンビリカルホース

ダイバーはSDCと長さ約30mのアンビリカルホースで結ばれる。アンビリカルは表1に示した4本のホースと交話用ケーブルで構成され、全体を編んで1本にして用いた。

ダイバーヘルメット(写真1)はSUPERLITE 17Bをベースに、大循環用及び非常呼吸装置用の装備を組み込んだ。主要目を表2に示した。送気ホースはヘルメットのサイドブロックに接続され、デマンドレギュレータと非常呼吸装置に導かれる。ダイバーは口鼻マスクの中で呼吸するが、吸気によりヘルメット内が負圧になると、デマンドレギュレータからガスが供給され、呼気で陽圧になると排気レギュレータから排気され、排気ホースを経てSDCにもどる。ヘルメット内の圧力は両レギュレータにより、深度圧±10 cmAq.以内に保たれる。通常は排気レギュレータを通る閉回路モードで用いるが、ダイバータ弁を押すと直ちに排気レギュレータが閉鎖され、排気はヘルメットの排気弁から海中に放出される開放モードとなる。非常対策として2種があり、ヘルメット内圧と周囲圧との差が大きくなると自動的に作動する。排気ホースの折れや多量の浸水で排気抵抗が16 cm Aq.以上になると、ヘルメットの排気バルブが作動し、継続して排気が可能となる。排気レギュレータの作動不良等により、ヘルメットの内圧が-30 cm Aq.以上になるとフラッドバルブから水が流入し、排気系を閉鎖する。なお、サイドブロックからデマンドレギュレータまでの部分はゴム製のホットウォーターシュラウドでおおい、その中に温水を通して呼吸ガスの加温を行う。

表1 ダイバーアンビリカルホース

Table 1 Diver umbilical hoses

名称	内径	外径	設計圧力	空中重量	水中重量
送気ホース	12.7 ^{m/m}	22.5 ^{m/m}	70 ^{kg/cm² G}	0.305 ^{kg/m}	-0.102 ^{kg/m}
排気ホース	16.0	32.0	70	0.622	-0.203
温水ホース	12.7	22.5	140	0.290	0.01
ニューモホース	4.5	9.5	70	0.068	-0.005

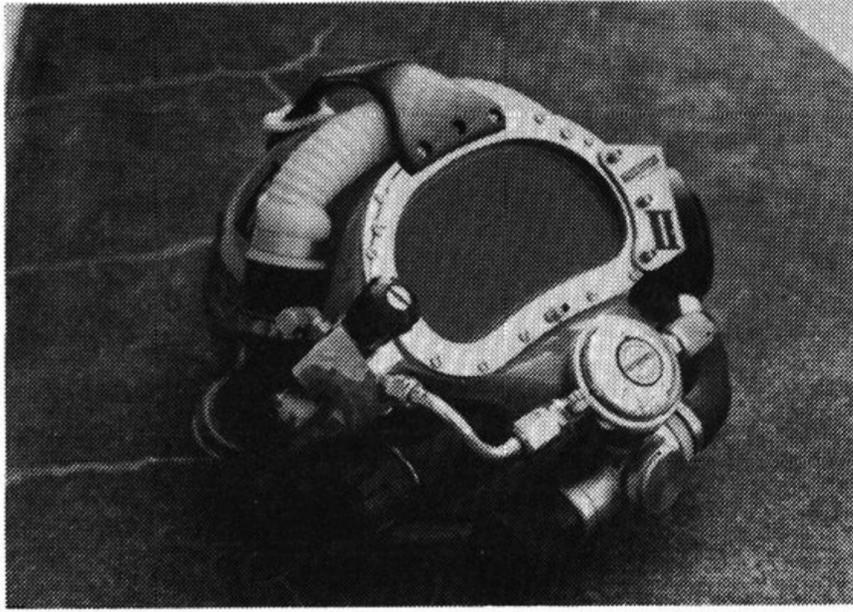


写真1 ダイバーヘルメット
Photo 1 Diving helmet

表2 ダイバーヘルメット主要目

Table 2 General description of diving helmet

型式	: スーパーライト 17B
デマンドレギュレータ	: ウルトラフロー 350
排気レギュレータ	: ヘリノートバルブ
オープン-クローズド切換	: ダイバータバルブ
通常の呼吸	: 口鼻マスク
非常時の呼吸	: マウスピース

非常呼吸装置を写真2, 3, 主要目を表3に示し, 構造とガスの流れを図3に示した。本装置は半閉鎖回路式のスクーバであり, 水深300mで15分以上の呼吸を行うための装置である。通常は待機状態であり, 使用時には, ハーネスの作動コードを引いてボトルの開放と呼吸バッグ収納カバー外しを行い, ヘルメットの作動バルブを回転して口鼻マスク内にマウスピースを突出させる。ダイバーがマウスピースをくわえて口で呼吸することで作動する。呼気はCO₂吸収剤ソーダソープと蓄熱器を通過し呼吸バッグに蓄えられる。吸気により, ガスは再度蓄熱器を通過してダイバーに吸われる。ソーダソープ下部の空間にはHe-O₂が定量注入され, ダイバーの消費するO₂を補う。待機状態においても, 潜水呼吸ガスがアンビリカルレギュレータを経て内部空間に導かれ, 常に深度圧よりも1.4m Aq. 陽圧に保たれる。また空間の周囲には



写真2 深々度用非常呼吸装置
Photo 2 Secondary life support system

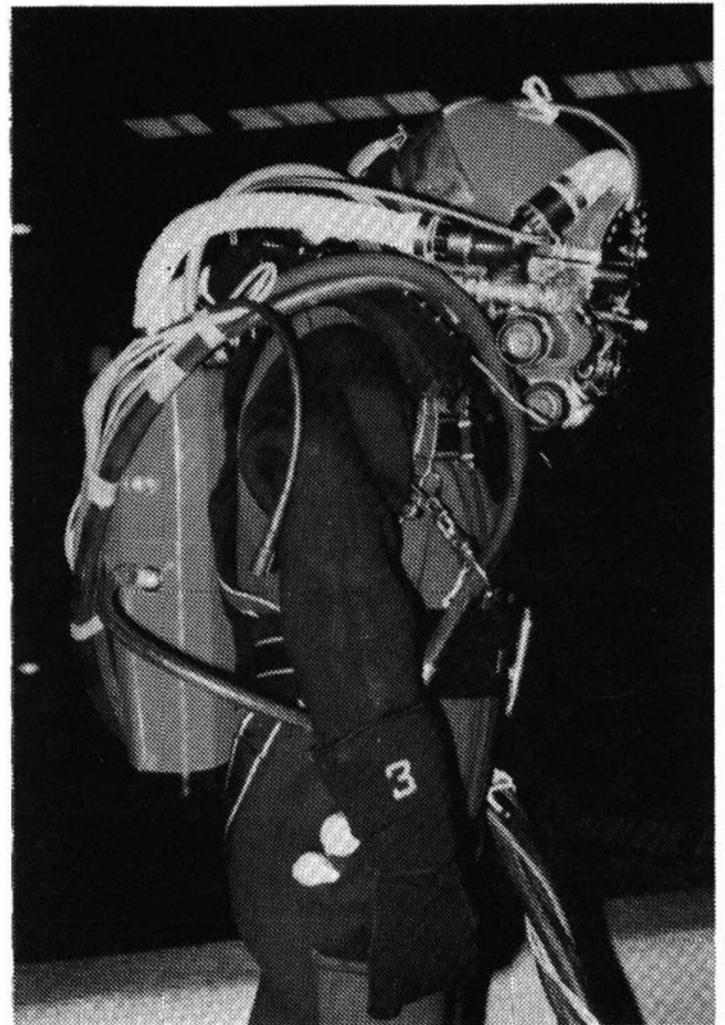


写真3 300m潜水用のダイバー装備
Photo 3 Diving equipment for 300m dive.

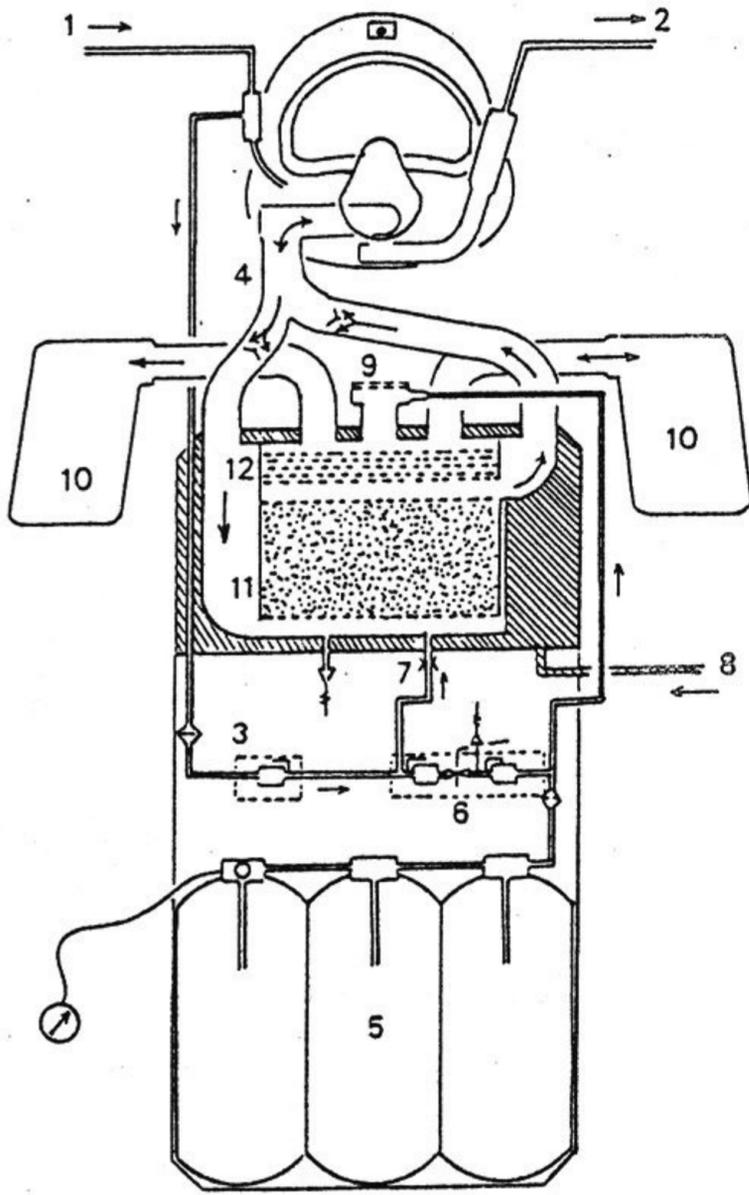


図3 深々度用非常呼吸装置の概念

1. 通常の送気ガス, 2. 通常の排気ガス
3. アンビリカルレギュレータ,
4. 非常呼吸系, 5. ガスボトル,
6. レギュレータ, 7. オリフィス
8. 温水 9. デマンドレギュレータ
10. 呼吸バッグ, 11. ソーダソーブキャニスター
12. 蓄熱器

Fig. 3 Outline of secondary life support system

温水服用の温水(約40℃)の一部を導いている。これによって非常時でも暖いガスを呼吸でき、ソーダソーブのCO₂吸収能力の低下を防ぐことができる。何らかの原因で内部空間が負圧となった場合、-25 cmAq. でデマンドレギュレータが作動し、ボトルのガスを供給する。

海洋科学技術センターで用いている潜水呼吸ガスと深々度用非常呼吸装置のガス組成を表4, 5に示したが、非常呼吸装置については半閉鎖式という性格上、PO₂の高いものを用いている。

(2) SDC 装備機器

ダイバー排気ホースの内圧を適切に保ち、また回収系内に流入した海水を除去するための装置である。写真4に内部機器、表6に主要目を示した。

SDCから排気アンビリカルホースに流れるガスは、差圧手動設定式の背圧調整弁によって一定圧力に保たれる。差圧は潜水深度に応じて表7に示したように設定する。この差圧はダイバー深度追跡用ニューモ系により、ダイバー深度を基準とするように制御され、SDC用アンビリカルとヘルメット間の差圧は常に同一に保たれる。水分離器はSDCの内外に各1個あり、内部ではテnderが適時水抜きを行い、外部についてはSDC回収後に水抜きを行う。

排気回収系の安全装置としては、送気ガスの圧力が低下すると排気系が閉鎖する機構となっている。

(3) 回収精製装置及びガスブースターユニット

船上に回収したダイバーの排出ガスからCO₂や有害物質を除去し、O₂を添加して再度潜水呼吸ガスとするための装置である。構成と主要目を図4

表3 深々度用非常呼吸装置主要目

Table 3 General description of secondary life support system

型式	: SLS 半閉鎖回路式潜水呼吸装置
寸法	: 310 ^W × 135 ^D × 520 mm ^H (ハーネス, ホース除く)
重量	: 約 25 kg (空中)
ガスボトル	: 1.34ℓ 300 kg/cm ² G 3本
CO ₂ 吸収	: ソーダソーブキャニスター
作動方式	: 作動コードを引き、マウスピースをくわえて呼吸

表4 潜水呼吸ガスの組成
Table 4 Gas-mix for saturation diver in JAMSTEC

深度	O ₂	He
60 m	10 %	90 %
100	5	95
200	3	97
300	2	98

表5 非常呼吸装置のガス組成
Table 5 Gas-mix for secondary life support system

深度	O ₂	He
60 m	18.0 %	82.0 %
100	18.0	82.0
200	9.5	90.5
300	6.8	93.2

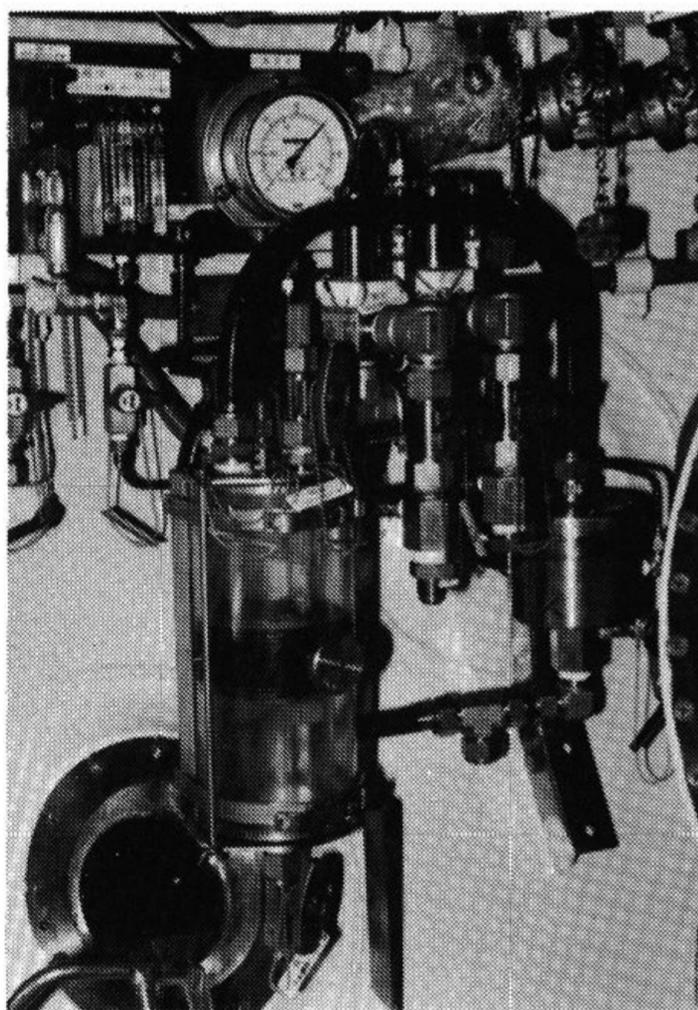


写真4 SDC内部機器
Photo 4 Bell equipment

表6 SDC 装備機器主要目
Table 6 General description of bell equipment

寸法	: 533 W × 150 D × 700 mm H
重量	: 15.5 kg
背圧調整弁	: -10 ~ -23.5m 手動設定
ダイバー深度追跡	: ニューモ方式
水分離	: アクリル製トラップ
非常装置	: 送気ガス停止時に排気系自動閉鎖

表7 レギュレータ類の設定値
Table 7 Regulator setting guidelines

水深	背圧設定弁	He-O ₂ 供給弁	SDC背圧調整弁
50 m	3.7 kg/cm ² G	18.4 kg/cm ² G	- 11.0 msw
100	8.2	27.0	- 13.5
150	12.6	35.6	- 16.0
200	17.1	44.2	- 18.5
250	21.5	52.8	- 21.0
300	25.9	61.4	- 23.5

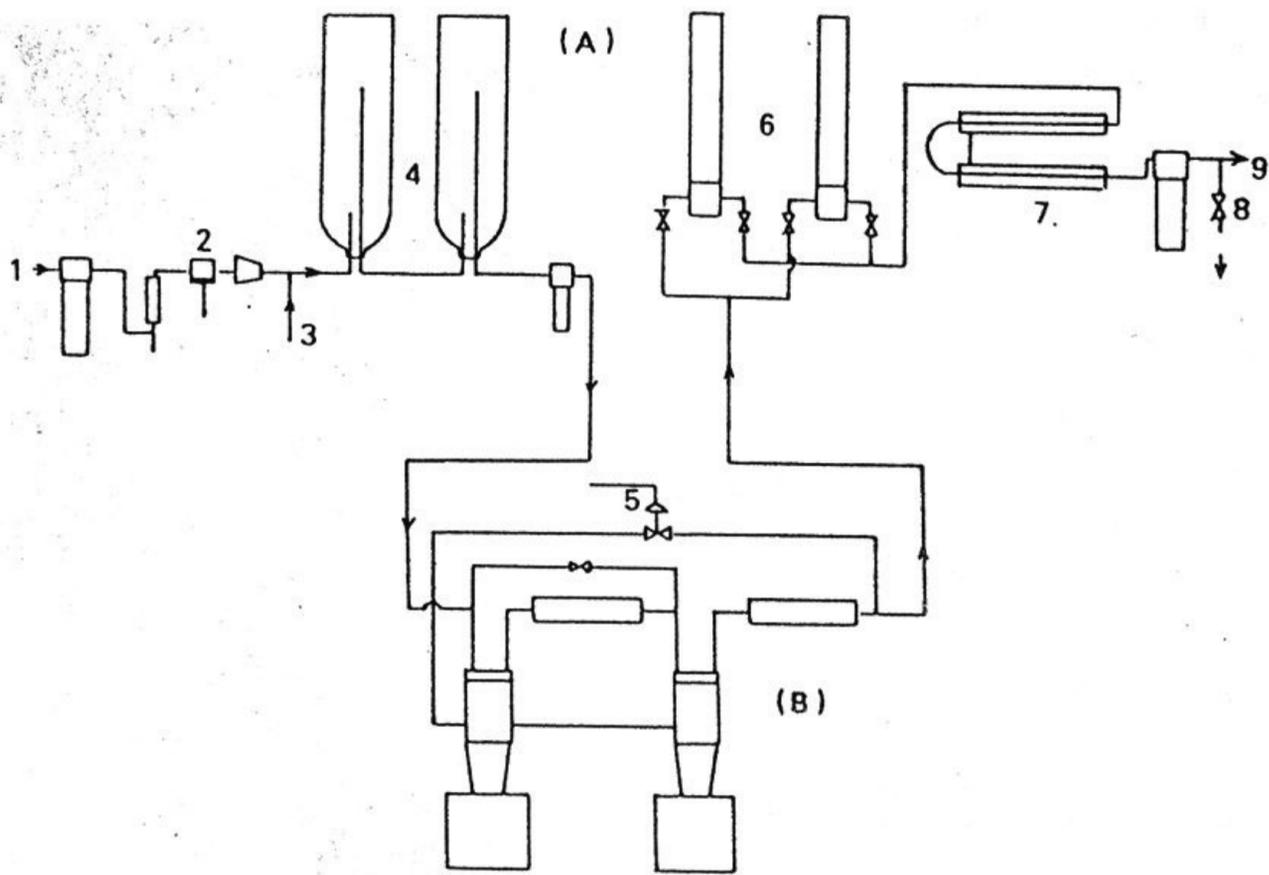


図4 回収精製ユニット(A)とブースターポンプ(B)

1. ガス入口, 2. 背圧調整弁, 3. O₂添加系, 4. レシーバータンク
 5. バイパスレギュレータ, 6. スクラバー, 7. 除湿器
 8. ガスサンプリング系, 9. ガス出口, ボリュームタンクへ

Fig 4 Processing unit and gas booster

表8 回収精製ユニット主要目
 Table 8 General description of reprocessing unit

寸法	: 660 W × 610 D × 1,680 mm H
重量	: 410 kg
フィルター	: 1 μ × 2, 0.01 μ × 1
背圧調整弁	: 3.7 ~ 25.9 kg/cm ² G 手動設定
スクラバー	: ソーダソープ, ピュラフル, 活性炭
水分離	: 冷却水式熱交換器
ガス混合	: 配管にO ₂ 注入し, レシーバータンクで混合

表8, 9に示した。

排気アンビリカルホースの内圧は船上においても背圧調整弁によって一定の圧力に保たれる。設定圧力を表7に示したが、この圧力を越えたガスが回収系へと流れ込む。次にO₂が添加され、2個のレシーバータンクを通る過程で混合される。また水分やゴミは除去される。

ブースターポンプは常に運転状態にしておくと、背圧調整弁と同一圧力に設定したバイパスレギュ

レータにより、入口側の圧力が一定圧以上になった時にだけ昇圧動作を行う。昇圧後のガスはスクラバー、水冷式除湿器、フィルターを経てボリュームタンクに充てんされる。スクラバーは2筒切替使用型で、ソーダソープ、ピュラフル、活性炭をサンドイッチ構造にしたカートリッジにより、CO₂、微量有害ガス成分及び有臭成分の除去を行う。

(4) 制御盤

表9 ブースターポンプ主要目
Table 9 General description of gas booster unit

型式	無給油, 水冷2段往復動圧縮機
吐出量	150 Al/min
吸入圧力	25 kg/cm ² G Max.
吐出圧力	65 kg/cm ² G Max.
冷却水	4.3 m ³ /hr, 2-3 kg/cm ² G
モーター	440 V 3φ 60 Hz
寸法	1,910 ^W × 1,090 ^D × 1,970 mm ^H
重量	1.450 kg

船上ユニット全体について監視制御を行う部分であり、ブースター操作監視部、O₂添加装置、O₂分析計、He-O₂供給装置、背圧設定弁その他からなる。装置の外観と主要目を写真5、表10に示した。

O₂濃度の制御は、ボリュームタンク入口部からガスをサンプリングして分析し、その値によりO₂添加系を手動操作する方式である。添加量はオリフィスにより2.4 l/minに保たれ（ダイバー1名の場合は1.2 l/min）、急激な濃度増加が起らないようにしている。

He-O₂供給系は初期のボリュームタンク加圧、送排気アンビリカルの加圧及び潜水中のボリュームタンク圧力低下の自動補充に用いられる。潜水時には深度に応じて表7の値に設定し、タンクの圧力がそれ以下にならないようにする。また背圧設定弁を表7の値に設定し、回収精製ユニットの背圧調整弁、ブースターユニットのバイパスレギュレータの作動圧を制御する。

(5) 冷却水系

ガスブースターユニットの冷却用として73 l/minの海水、回収精製ユニットの除湿器用に7℃の清水13 l/minを用いる。清水は循環させ、海水による熱交換器で冷却する。

(6) 電源

ブースターユニット用に440 V 3φ 35 kw、制御盤に220 V 3φ 1kwを使用。

(7) 圧力バランス

全体システムのうち最も厳密な圧力制御が必要なのはダイバーヘルメットであり、環境圧に対して約±10 cmAq以内に保つ必要がある。排気回収系に不具合が生じて必要以上に負圧になると、直

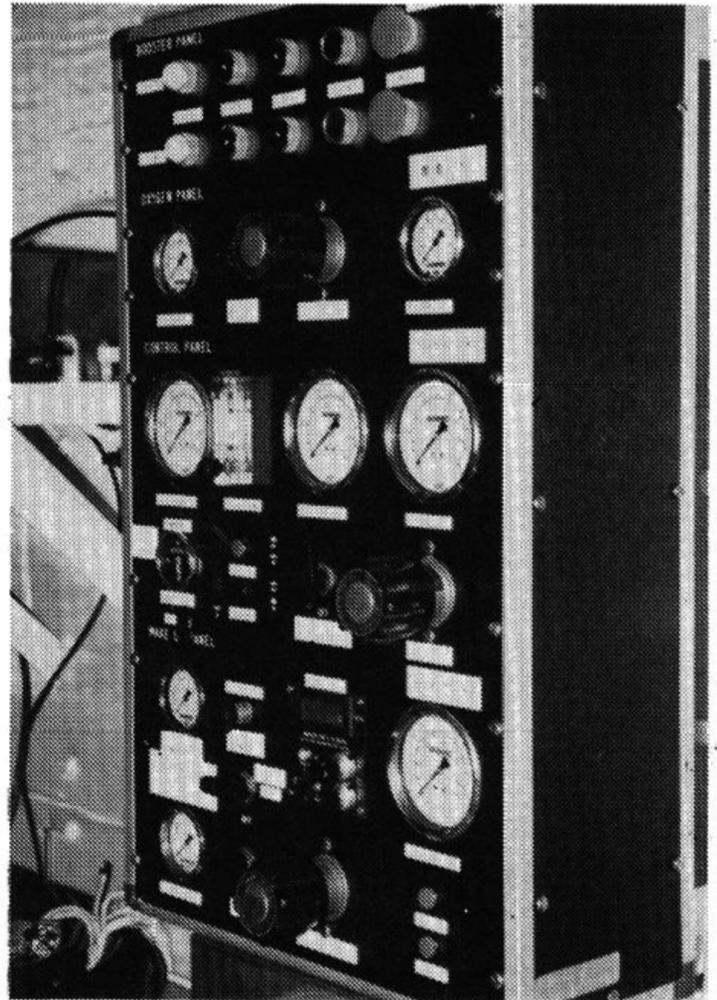


写真5 制御盤
Photo 5 Control console

表10 制御盤主要目
Table 10 General description of control console

寸法	520 ^W × 215 ^D × 810 mm ^H
重量	20 kg
O ₂ 添加	オリフィス, 2.4 Nl/min
背圧制御弁	回収精製ユニットとブースターポンプの背圧手動設定
He-O ₂ 注入弁	18.4 ~ 61.4 kg/cm ² G. 手動設定
O ₂ 注入弁	7.1 ~ 7.5 l/min. 特殊用途
O ₂ 分析	ガルバニ電池式簡易型酸素分析計

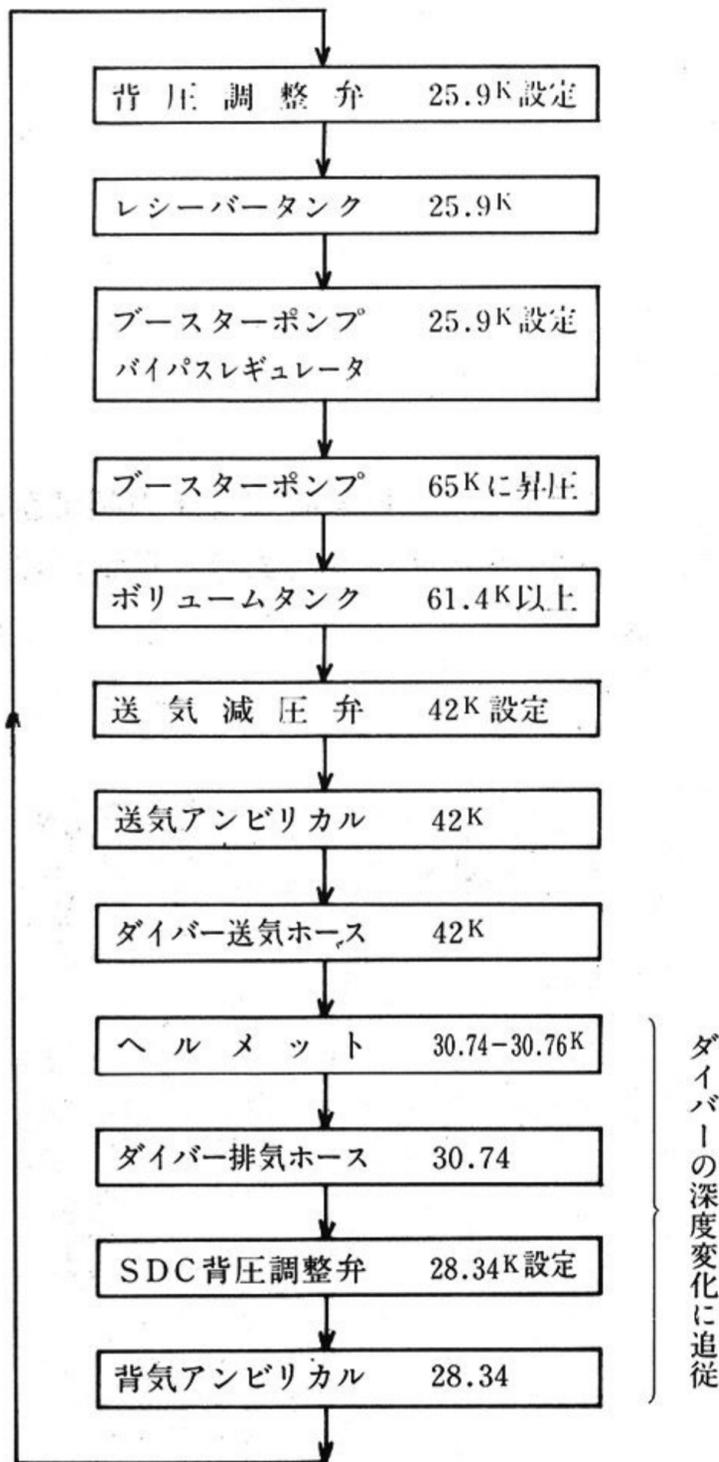


図5 水深300mにおける圧力バランス
 Fig. 5 Pressure distribution at 300 m dive

ちにダイバーの事故につながる。このためにヘルメット自体に各種の安全対策を行っているが、それ以上に、基本的に大きな圧力差が生じないように全体の圧力バランスを保っている。図5に、300m潜水の場合の圧力バランスを示した。また、その時の全体システムのガス量を表11に示した。内容積は832ℓであり、300m潜水では約44m³の潜水呼吸ガスが系内を循環する。以下海水比重は1.025とした。

3. 性能試験

大循環式潜水呼吸装置は各構成機器の陸上試験を行い、「かいよう」に艀装・搭載した。そして表12に示したように、60～300mの5回の飽和潜水実験により性能試験を行った。深々度用非常呼吸装置は第4回実験から用いられた。性能試験の項目は船上送気ガスのO₂、CO₂濃度分析、ダイバーが呼吸している間のヘルメット内のO₂、CO₂濃度分析、潜水呼吸ガス消費量、深々度用非常呼吸装置の使用可能時間計測、その他である。

3.1 ロックアウト潜水時の送気ガス組成

水深60, 100, 200, 300mの合計27回のロックアウト潜水において、SDCに送気するHe-O₂混合ガスのO₂、CO₂濃度を計測した。使用した分析計は、ジルコニア式O₂計(フルスケール0～2.5, 0～5, 0～25%の切換式)と赤外線式CO₂計(0～0.2, 0～1%切換式)である。この外システム

表11 大循環装置の内容積と300m潜水時のガス量
 Table 11 Total gas volume of diver gas recovery system for 300 m diving

部品名	容積	300m時の内圧	300m時の容積
CO ₂ スクラバー 他	5 ℓ	65 kg/cm ² G	330 Nℓ
ポリウレタンタンク	520	61.4	32,448
船上送気配管	18	42	774
送気アンビリカル	128	42	5,504
ダイバー送気ホース	4	42	172
ダイバー排気ホース	6	28.3	176
排気アンビリカル	128	28.3	3,750
船上配管	18	28.3	527
レシーバータンク	5	25.9	135
合計	832 ℓ	-	43,816 Nℓ

表 12 大循環装置を用いた潜水実験
Table 12 Diving experiment using diver gas recovery system

	加圧期間	保圧深度	潜水深度	ロックアウト潜水
1	1987年 3/23 - 4/8	55/97 msw	60/100 msw	5/6 回
2	7/3 - 19	200	200	0
3	9/9 - 27	200	200	6
4	1988 3/9 - 28	295	300	0
5	7/10 - 28	295	300	10

の制御用として、ボリュームタンク入口部からもガスをサンプリングし、 O_2 、 CO_2 濃度を計測した。結果を図6~9、表13に示した。 CO_2 濃度はいずれの場合もゼロであった。

60m潜水では O_2 濃度10%の潜水呼吸ガスを用いたが、 O_2 濃度は当初9%以下であった。これは、ロックアウト潜水の前段階に60m保圧下で無人試験を行った際、環境ガス(O_2 5%)を吸い込んだためである。Dive 1~3では O_2 添加を継続しており、徐々にその濃度が上昇した。Dive 4以降は所定の10%に達したため、必要に応じて添加を行う方式とした。 O_2 濃度の変化はゆるやかであり、一定の値を保つのは容易であった。100m潜水は60m潜水終了後、DDCを100mまで再加圧して行った。加圧終了後潜水呼吸ガスを5% O_2 に置換し、若干の無人試験を経て6回のロックアウト潜水を

行った。 O_2 添加系の操作は慣れのために多少ラフとなり、同一潜水内での変化はやや大きくなった。

200m潜水では O_2 添加を行った時期も示したが、 O_2 添加中はほぼ上昇、停止後約4分で下降を始めた。 O_2 を連続添加または停止している間の O_2 濃度の変動は、作業の軽重によって異なるものであるが、一回の潜水中ではほぼ一定の傾向が見られた。そこで増減量を求め、表14に示した。ダイバー2名の潜水では、 O_2 を連続添加しても3% O_2 が1時間後に最大で3.2%に増加するにすぎない。停止の時は、3% O_2 (0.65 atm)が酸欠にならない下限値0.79% (0.17 atm)に低下するまで5時間以上の余裕がある。Dive 12はダイバー2名の時の O_2 添加量2.4 l/minとしており、本来は1.2 l/minに設定を変更する必要があった。それでも濃度の上昇はさほど急激ではない。

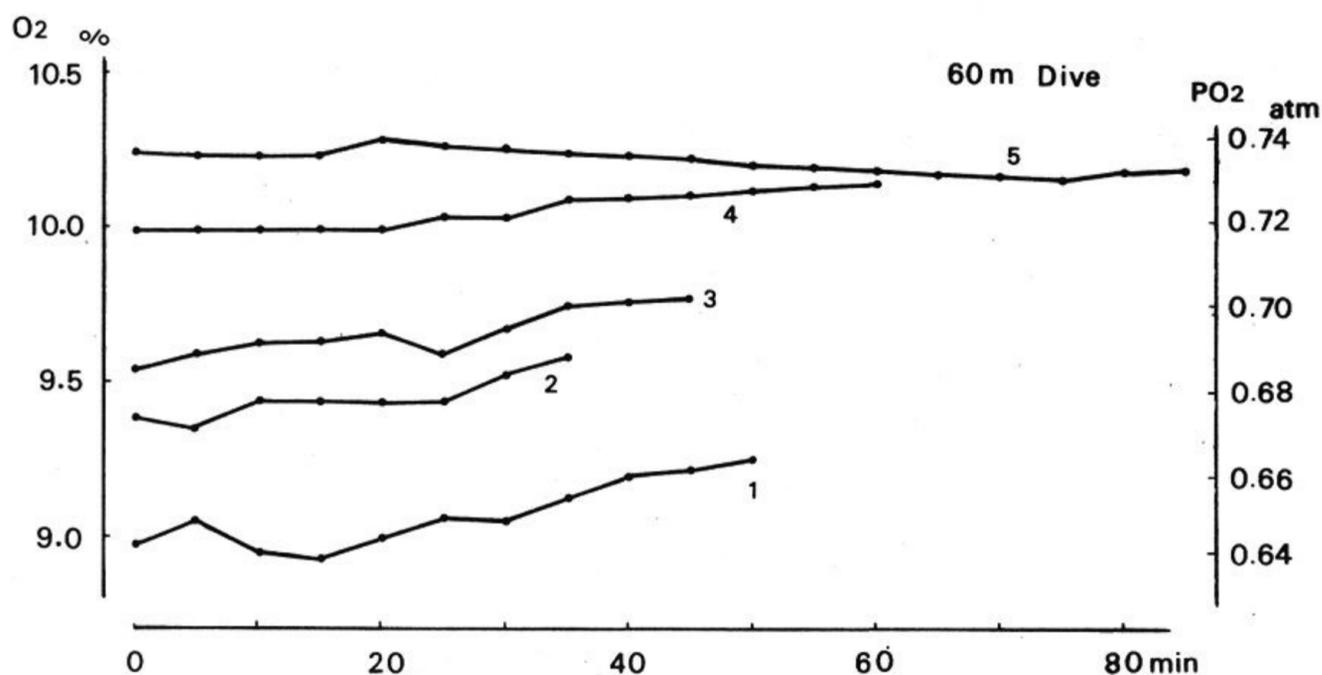


図6 60m潜水時の送気ガスの酸素濃度
Fig. 6 Oxygen concentration of diver supply gas at 60m dive

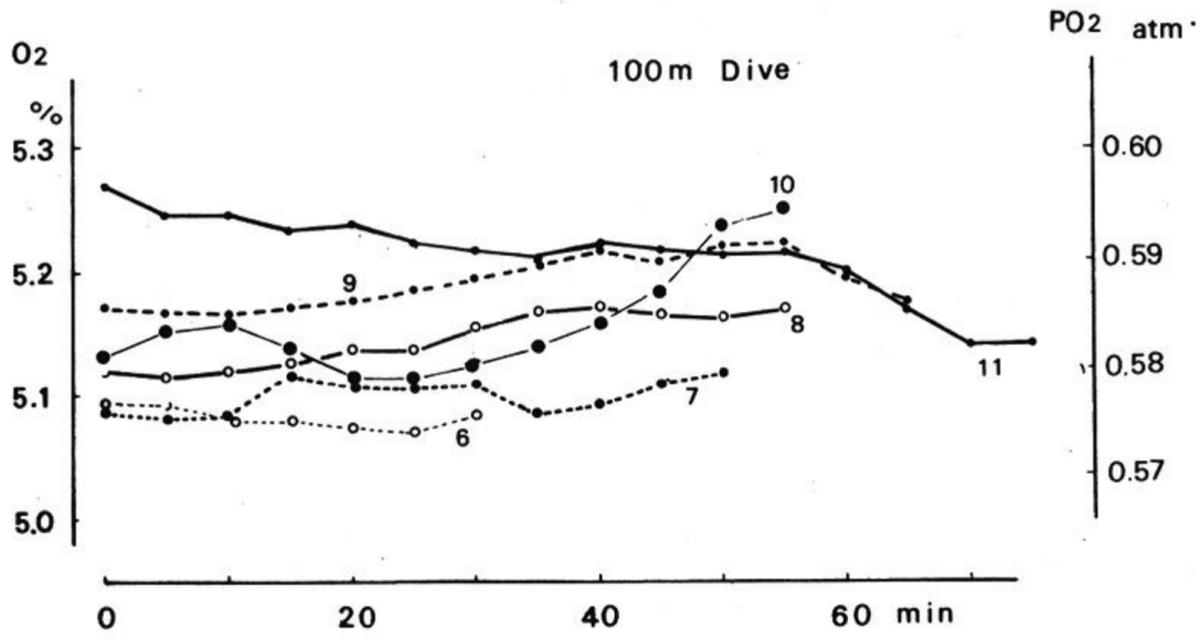


図7 100m潜水時の送気ガスの酸素濃度
 Fig.7 Oxygen concentration of diver supply gas at 100 m dive

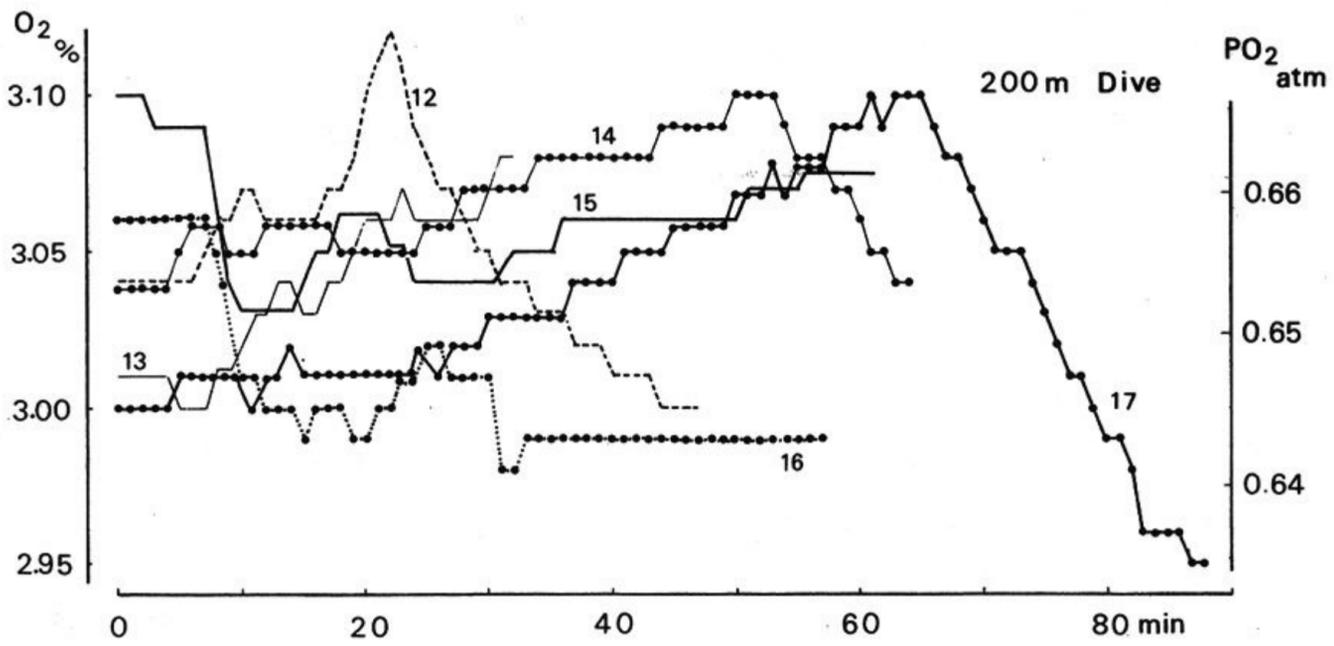


図8 200m潜水時の送気ガスの酸素濃度
 O₂添加時間
 No. 12 : 4-20分, 13 : 1-6, 7-12, 13-27, 14 : 0-50,
 15 : 9-60, 16 : 12-57, 17 : 0-61

Fig.8 Oxygen concentration of diver supply gas at 200m dive

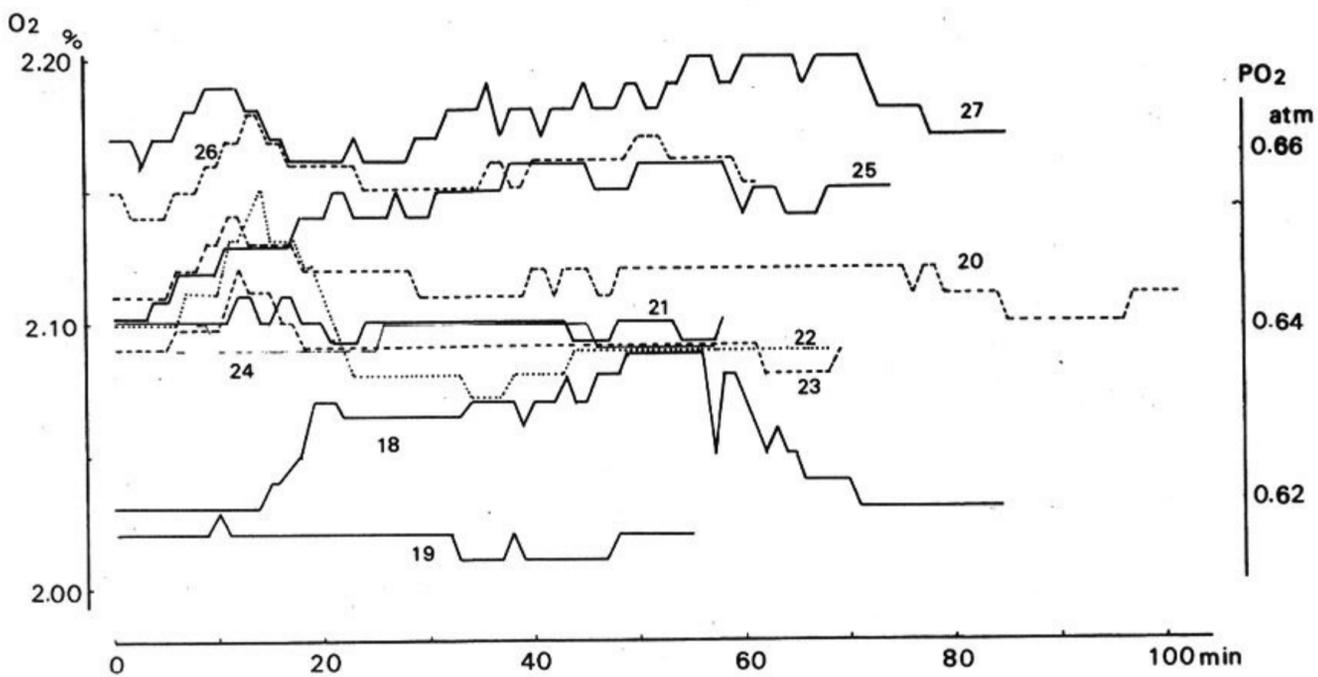


図9 300m潜水時の送気ガスの酸素濃度
 Fig.9 Oxygen concentration of diver supply gas at 300m dive

表 13 ロックアウト潜水での大循環装置使用結果
Table 13 Test result of diver gas recovery system

番号	深度	呼吸時間		送気ガス O ₂ 濃度	He・O ₂ 消費量			回収率
		ダイバー1	ダイバー2		合計	分・人	時・2人	
1	60 msw	38分	38分	8.93- 9.26%	- Nℓ	- Aℓ/min	- Nm ³ /hr	%
2	"	26	27	9.36 9.57	-	-	-	
3	"	41	40	9.53- 9.76	-	-	-	
4	"	59	56	9.98-10.12	-	-	-	
5	"	84	84	10.13-10.28	-	-	-	
6	100	19	0	5.07- 5.08	-	-	-	
7	"	40	35	5.08- 5.12	-	-	-	
8	"	50	42	5.12- 5.17	-	-	-	
9	"	64	56	5.17- 5.23	-	-	-	
10	"	53	54	5.11- 5.25	-	-	-	
11	"	70	68	5.14- 5.27	-	-	-	
12	200	37	25	3.00- 3.11	5,854	4.39	11.3	90
13	"	27	0	3.00- 3.08	2,318	3.99	10.3	92
14	"	60	35	3.05- 3.10	1,976	0.97	2.5	98
15	"	64	43	3.03- 3.10	1,872	0.82	2.1	98
16	"	57	37	2.98- 3.06	3,925	1.94	5.0	96
17	"	58	72	2.95- 3.10	18,774	6.72	14.1	89
18	300	62	57	2.03- 2.09	51,487	13.63	52.0	72
19	"	40	48	2.01- 2.03	16,353	5.85	22.3	88
20	"	96	92	2.10- 2.12	34,269	5.74	21.9	88
21	"	56	51	2.09- 2.10	26,459	7.79	29.7	84
22	"	61	58	2.07- 2.13	18,598	4.92	18.8	90
23	"	63	60	2.08- 2.12	18,331	4.69	17.9	91
24	"	50	51	2.08- 2.10	14,447	4.51	17.1	91
25	"	67	68	2.10- 2.16	33,256	7.76	29.6	84
26	"	53	51	2.14- 2.18	22,559	6.83	26.0	86
27	"	82	79	2.17- 2.20	38,271	7.46	28.5	85

表 14 200 m潜水時のO₂添加または停止による送気ガス中のO₂濃度変化, 基準ガス 3% O₂

Table 14 Changing rate of O₂ concentration in the diving gas in conjunction with O₂ addition or stop.

番号	ダイバーの数	1時間当りの増減濃度	
		添加	停止
12	1	0.65%	-0.21%
14	2	0.09	-
15	2	0.06	-
16	2	0	-
17	2	0.18	-0.42

潜水呼吸ガスの良好なO₂制御性能は、全容積 832 ℓ という大きさに負うところが大きく、これが船上装備型大循環式潜水呼吸装置の安全性を大きく高めている。300 m潜水においては、10回のロックアウトを安全に行うことができ、大循環装置による呼吸時間はのべ20時間45分に及んだ。

3.2 ドライ環境下のヘルメット内ガス組成

水深 200 m相当の環境圧下において、DDCの潜水準備室内でダイバー2名がヘルメットを装着し、有人の呼吸試験を行った。図10に試験中のガスサンプリング位置を示したが、送気ガス、2名のヘルメット内、DDC環境ガスからガスを常時放出さ

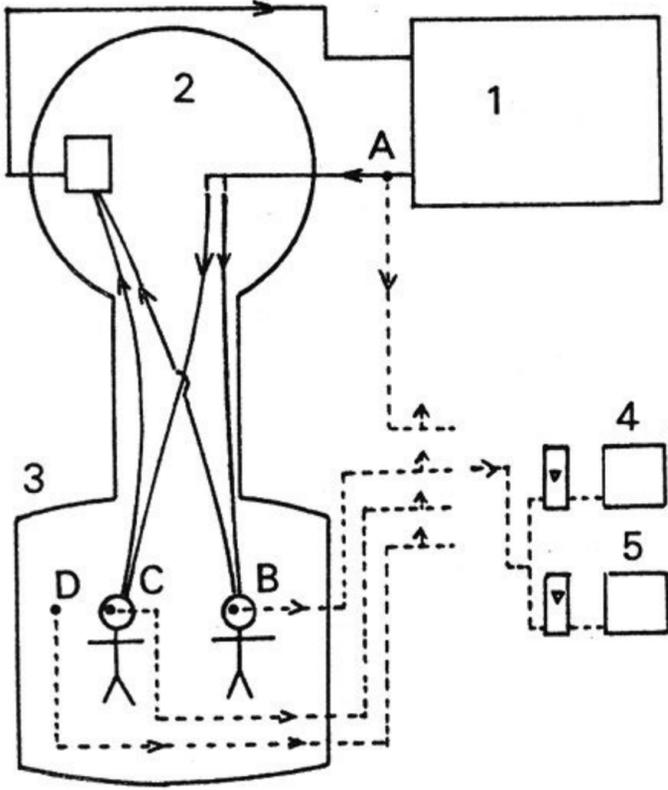


図10 200mドライ環境下総合試験の配置

A-D : ガスサンプリング場所
 1. 大循環装置, 2. SDC
 3. 潜水準備室, 4. O₂分析計
 5. CO₂分析計

Fig.10 Schematic of manned breathing test at 200m dry dive

せ、同一のO₂分析計, CO₂分析計で切換え分析した。呼吸時間は60分及び100分間であり, 結果を図11, 12に示した。送気ガス中のO₂濃度は, 添加時期に対して約5分遅れで追従していた。添加, 停止期間中のO₂濃度の変化はなだらかであり, ガスの混合は良好で, なおかつ操作も容易であった。添加中のO₂濃度の増加を200mロックアウト潜水時と同様(表14)に求めると, 1時間で0.37%及び0.28%の増加でかなり多かった。これは試験時のダイバーは着座して呼吸, つまり安静状態に近くてO₂消費量が少なかったことによる。送気ガスのCO₂濃度は分析限界以下(ゼロ)であった。ヘルメット内のガスは口鼻マスクの外側, 面ガラス部付近からサンプリングした。O₂濃度は送気ガスに比較して約0.04 atm低い値, CO₂濃度は0.01~0.03 atmの範囲で変化していた。この組成は呼気ガスの値に近く, 口鼻マスクから漏れた呼気ガスがヘルメット内に充満していたと判断された。ただし, 吸気はデマンドレギュレータからのガスを吸うので特に問題はない。CO₂濃度の変化を見ても, 再呼吸によるCO₂蓄積の傾向はなく, ヘルメ

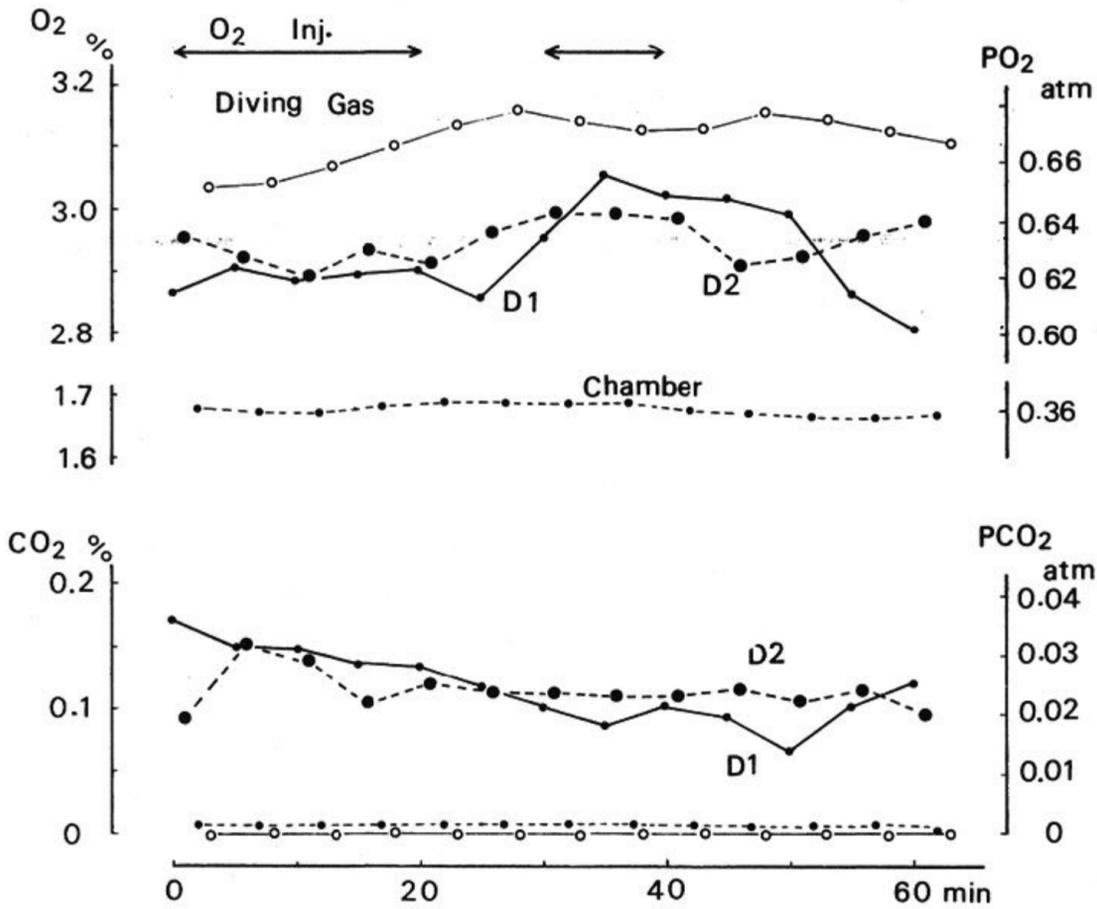


図11 200mドライ環境下総合性能試験
 D₁, D₂ : ヘルメット内ガス, チェンバー : 潜水準備室

Fig.11 Oxygen and carbon-dioxide concentration of circulation gasses at 200m dry dive

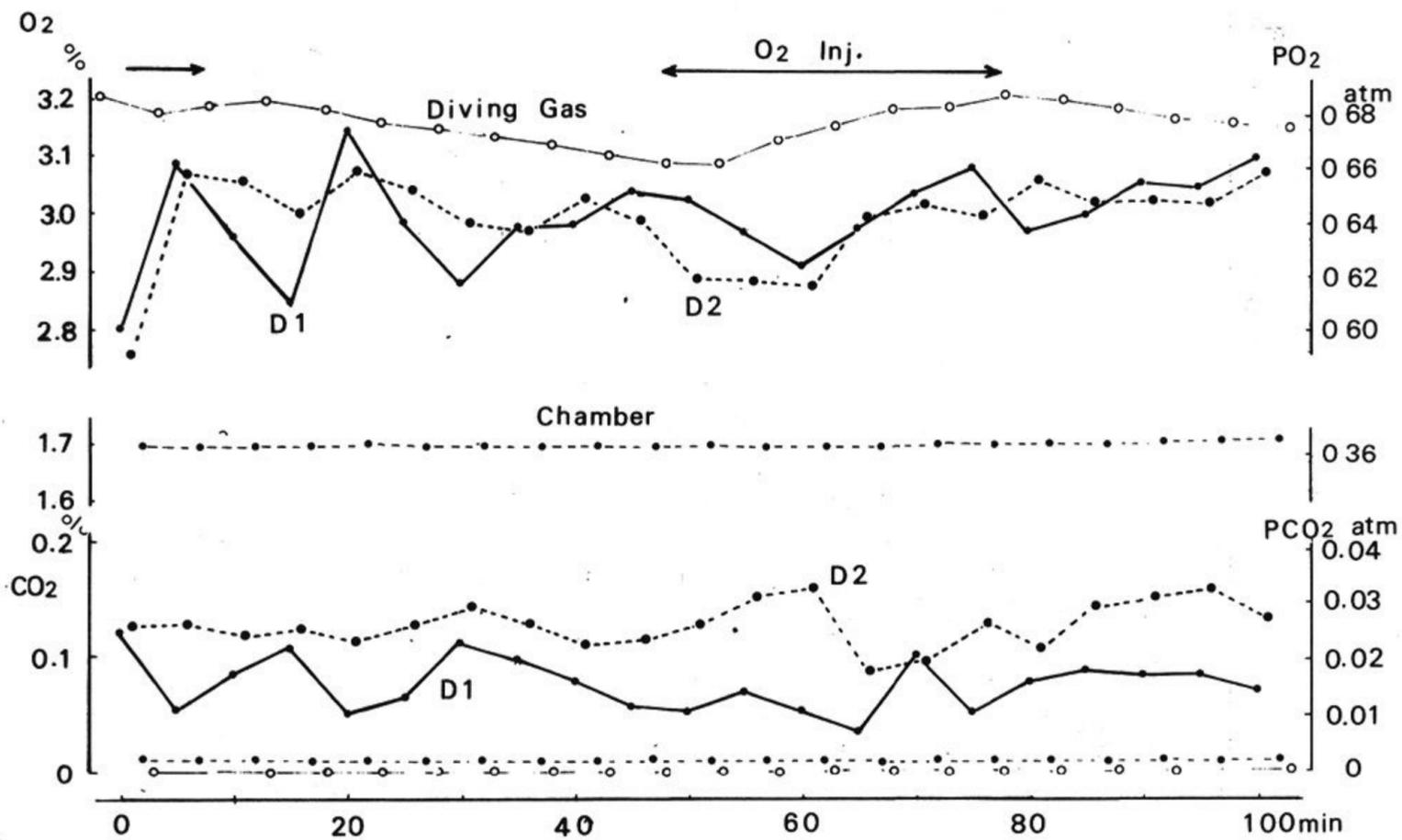


図 12 200 m ドライ環境下総合性能試験 D1, D2: ヘルメット内ガス, チェンバー: 潜水準備室

Fig.12 Oxygen and carbon-dioxide concentration of circulation gasses at 200 m dry dive

ット内の換気は良好であった。またチェンバー内の環境ガス組成は変化しておらず、ヘルメットからの呼吸ガスのリークはほとんどないことが示された。

3.3 潜水呼吸ガス消費量

大循環装置は、全体が完全な閉鎖系であればダイバーの消費した O_2 を系内に添加すれば良い。実際にはダイバー深度追跡用のニューモ系、送気ガス分析のためのガスサンプリング等により、少しずつ系内のガスは放出される。

そこで 200, 300 m の合計 16 回のロックアウト潜水時に、ダイバーが呼吸していた間の潜水呼吸ガスの消費量計測を行ってみた。計測は、容積 520 l のポリウムタンクの圧力低下を精密圧力計で 1 分ごとに読み取る方式とした。その間、タンクの圧力を一定値以上に保つための $He-O_2$ 供給弁は閉とした。タンクの圧力が低下して送気に影響を与えそうになった時には、 $He-O_2$ 供給弁を 1 分間開として圧力を上昇させた。その 1 分間の消費量については、弁を開ける前の値が継続したものとして処理した。潜水ごとの総消費量、時間当り消費量、ダイバーの分時消費量等を表 13 に

示した。なおガス量については、環境温度下での値 (約 $25^\circ C$ 一定) をそのまま用いた。消費量の累積曲線を図 13, 14 に示し、そのうち平均的なものと特異な潜水について、毎分のガス消費量を求め図 15, 16 に示した。呼吸をしているダイバーの数は図中に示していないが、最初の 5 分間がダイバー 1 のみ、続いてダイバー 2 が加わって 2 名呼吸、最終時間の約 5 分前はダイバー 2 だけが呼吸というのが平均的なパターンであった。

200 m 潜水では毎時 2 ~ 14 Nm^3 のガスを消費した。ダイバー 1 人あたりでは 0.82 ~ 6.72 Al/min の消費量であった。Dive 12 で当初消費量が多いのは、200 m で最初のロックアウトであり、ヘルメットを開放モードにする等の作動試験を行ったことによる。Dive 17 の場合、20 分後以降消費量が急増した。これは 1 名のダイバーが下向きの作業を続け、その間ヘルメットのネックシール部からガスが漏れ続けたためであった。

300 m 潜水では、200 m に比較してはるかに大量のガスを消費した。特異な一例を除くと毎時 17 ~ 30 Nm^3 の消費量で、ダイバー 1 人あたりでは 4.51 ~ 7.79 Al/min であった。Dive 18 の場合 1

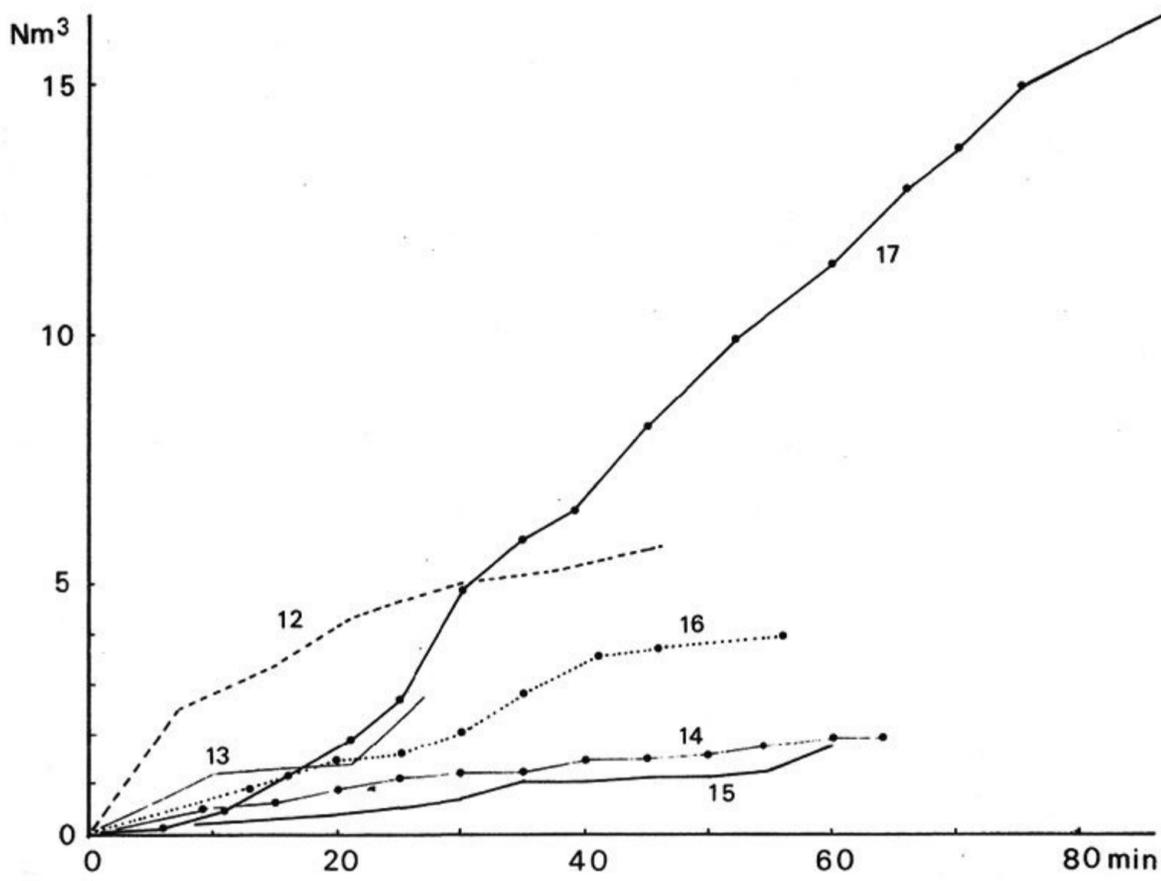


図 13 200 m 潜水時の潜水呼吸ガス消費量
 Fig.13 Accumulative consumption of diving gas at 200 m dive.

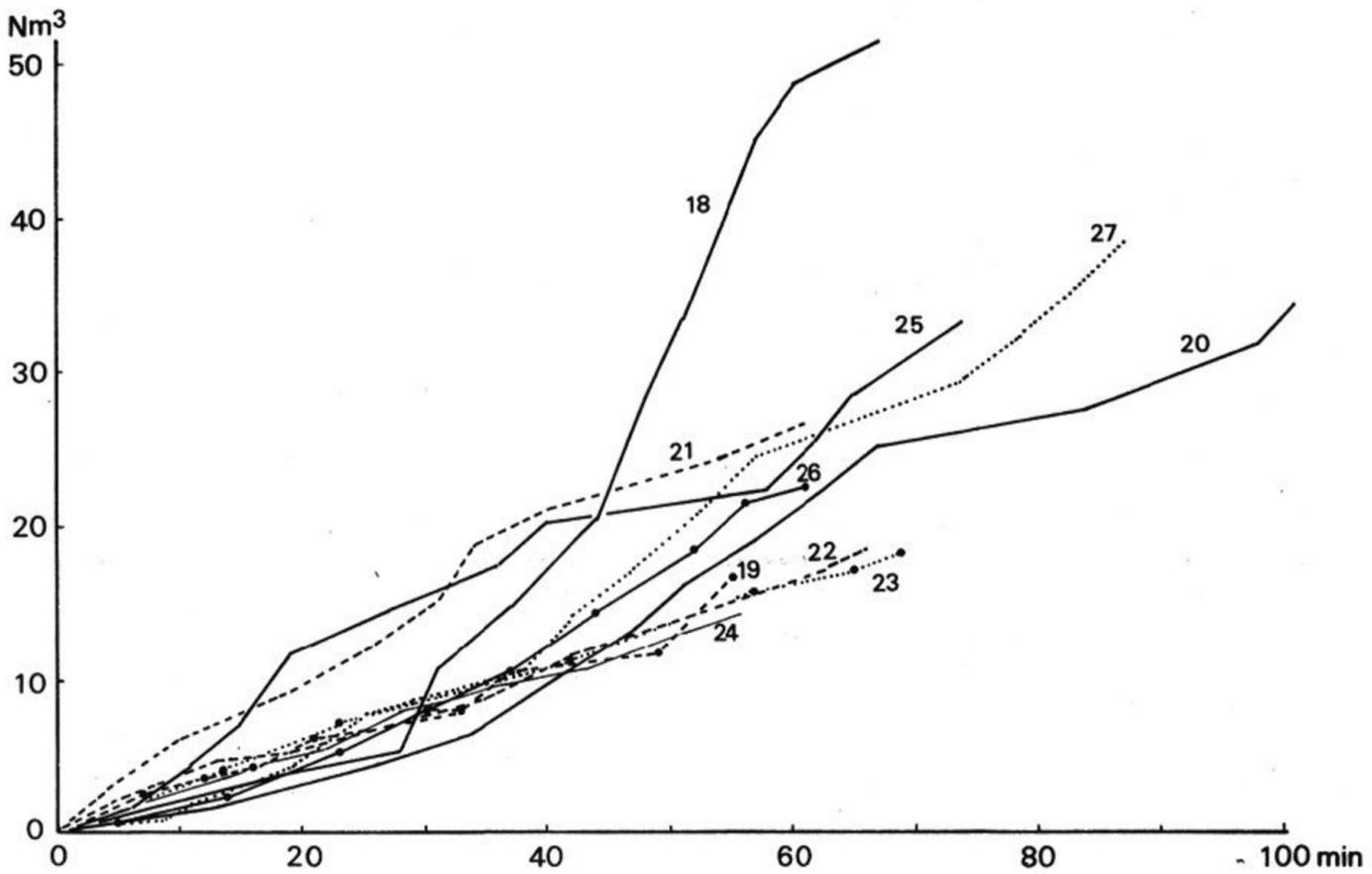


図 14 300 m 潜水時の潜水呼吸ガス消費量
 Fig.14 Accumulative consumption of diving gas at 300 m dive

時間で 52 m³を消費したが、これは300 mの第1回潜水のため、ダイバーが極度に緊張して操作ミスしたのが原因であった。図16に示したように、潜水の28分後に不注意（腕をあてた）でヘルメットを開放モードとした。直ちに船上で気づいてダイバーに閉鎖モードとするよう指示し、その結果元

に戻った。その後再び開放モードとしてしまい、船上で注意したがそれに従うゆとりがなく、ガスを放出し続けたことによる。従ってDive 18の消費量は特殊なものである。

潜水呼吸ガス消費の原因について考えてみると、常に系内から放出されるものとダイバーの姿勢に

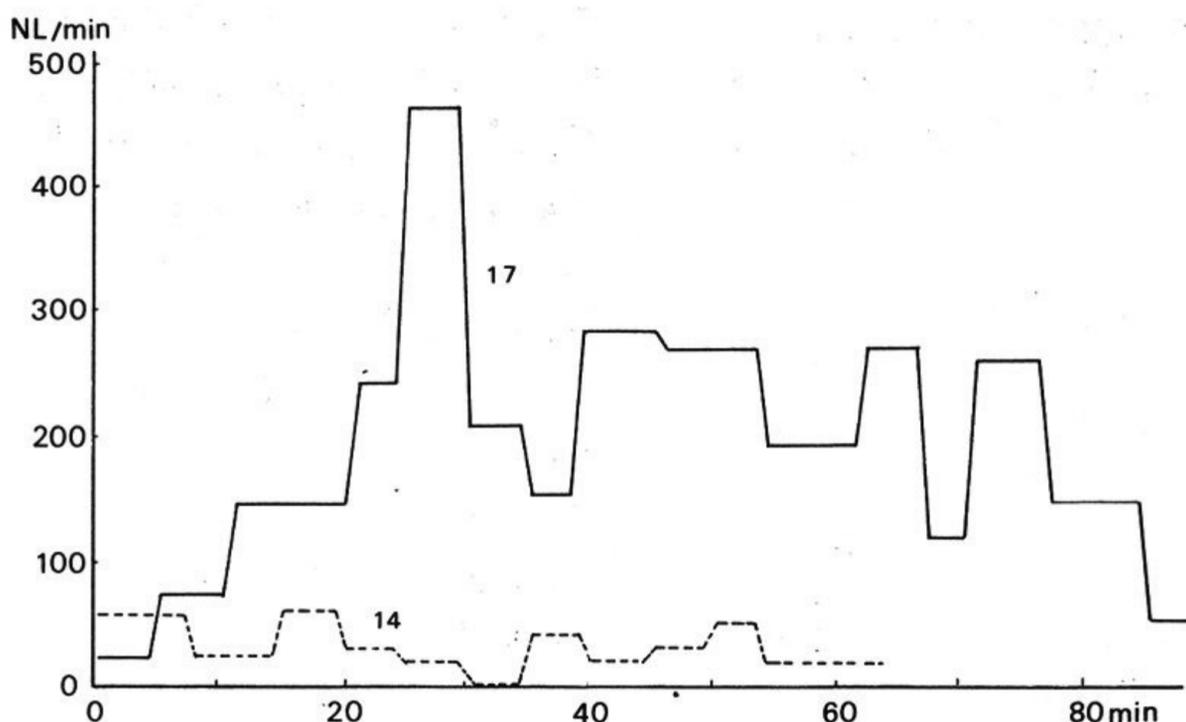


図 15 200 m潜水時の呼吸ガス分時消費量の典型例
 Fig.15 Examples of diving gas consumptive minute volume at 200 m dive

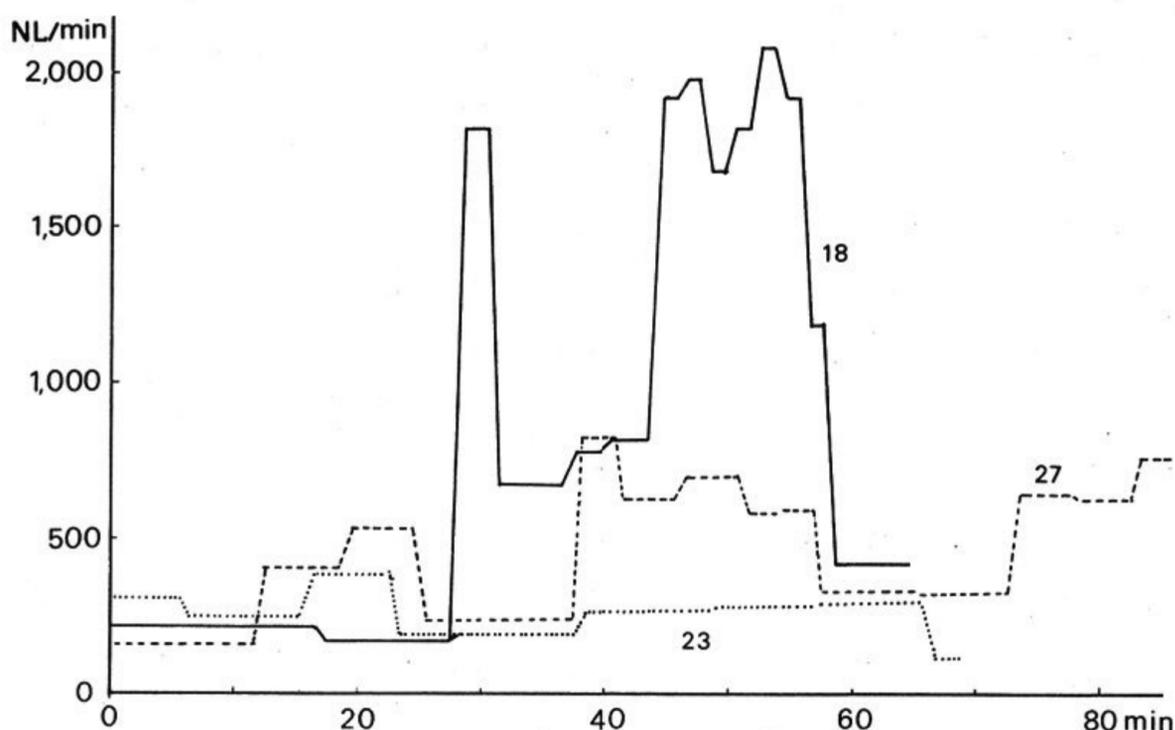


図 16 300 m潜水時の呼吸ガス分時消費量の典型例
 Fig.16 Examples of diving gas consumptive minute volume at 200 m dive

よるリークとがある。前者はダイバー深度追跡用のニューモ系 0.3 ~ 0.5 Al/min と分析用ガスサンプリング約 2.5 NL/min, 及び30分ごとのブースターポンプドレン抜きの種類である。これらを概算すると、水深 200, 300 mにおける時間あたり消費量はそれぞれ 1 Nm³, 1.5 Nm³となる。実際の消費量は、200 m潜水ではこれに近い時もあり、ヘルメットのシール部からのリークが多い時にはずっと大きな値となった。300 mの場合には最低で

も 200 mの時の最大量以上を消費しており、リーク量はかなり多かった。

Dive 18 はダイバー 2名のうち 1名が長時間開放モードで呼吸しており、その時のガス消費量が正確に求められている。そこで開放モードでのダイバーのガス消費量を求め、表13に示した He-O₂消費量の値と比較して、大循環装置による潜水呼吸ガスの回収率を推算してみる。図16から、2名とも閉鎖モードの時のガス分時消費量 V_1 を250

Nl/min, 2名中1名が開放モードの場合 V_2 を 1,900 Nl/min とした。開放モードとしていたダイバーのガス消費量 V_C (Nl/min) は次のように求められる。

$$V_C = (V_2 - V_R - \frac{V_1 - V_R}{2}) \div P_s$$

$$= (1,900 - 18 - \frac{250 - 18}{2}) \div 31.75$$

$$\approx 55.6$$

ここで, V_R (Nl/min) は大循環装置で定常的に消費するガス量で, サンプルング及びニューモ系の値である。 P_s (kg/cm²) は水深 300 m の絶対圧である。

毎分 55.6 Al のガス消費量は相当大きい, これはダイバーの分時換気量にリーク量を合わせた値であり, 実作業では適切な値と判断された。

大循環装置のガス回収率については, 開放モードでの消費量を Dive 18 より少し低めの 50 Al/min として求め, 表 13 に示した。200 m 潜水では 89~98%, 300 m では Dive 18 を除いて 84~91% であった。実際の運用に際しては, この外に装置全体の循環用及び潜水前点検用等のガスが必要である。

3.4 深々度用非常呼吸装置

非常呼吸装置については, プールでの作動試験と 295 m ドライ環境下での呼吸試験を行った。

プール試験はダイバー 8 名について行った。ダイバーには他給気で空気を送り, 合図なしで送気

を停止し, ダイバーはそれに気づいたら装置を作動させる方法とした。非常呼吸器には O_2 を充てんした。送気停止からダイバーがマウスピース呼吸を始めるまでの所要時間は 12~24 秒, 平均 15 秒であった。その後約 15 分間呼吸を続け, いずれの場合とも不具合点のないことを確認した。

295 m のドライ環境では, 図 15 と同様の配置とし, ダイバー 1 名ずつが非常呼吸装置により連続呼吸を行った。ガスのサンプルングは 1 点のみとし, 10 秒ごとに O_2 , CO_2 濃度を計測した。6 回の計測のうち 4 回は呼気ガス, 2 回は送気ガスをサンプルングした。潜水呼吸ガスは O_2 2%, 非常呼吸装置には O_2 6.8% を用いた。結果をまとめて表 15, 呼吸ガスの O_2 , CO_2 濃度変化を図 17, 18 に示した。

呼気ガスの分析結果は 4 例ともほぼ同様であり, No. 3 だけを示した。非常呼吸装置を使い始めると, 当初の O_2 2% が徐々に増加し, ガスボトルの圧力がゼロ (30.2 kg/cm²G) となる 22~23 分後にピークとなった。この時点でも 6.8% には到達せず, 5.5~6% であった。その後は装置内のガスを循環呼吸するが, O_2 濃度の低下はゆるやかであり, 10 分間ほどの呼吸は十分に可能と考えられた。 CO_2 濃度は 0.01~0.05 atm の間で変動しており, その状態が試験終了の 30 分後まで継続した。

吸気ガス分析は 2 回行った (No. 5, 6) が, いずれも試験開始時のガスボトル圧が 270~280 kg/cm²G と低かったため, O_2 濃度のピークには 17~20 分で到達した。ピークの値も呼気の 4 例よりも

表 15 深々度用非常呼吸装置ドライ試験結果

深度 295 m, 環境温度 31 °C

No. 1~4 : 呼気ガス測定, 開始時ボトル圧力 300 kg/cm²G

5, 6 : 吸気ガス測定, ボトル圧力 270~280 kg/cm²G

Table 15 Manned endurance test of SLS under 295 msw dry environment

番号	呼吸時間	最大 O_2 濃度	最大 O_2 到達時間	CO_2 濃度
1	30	1.87 atm	23 分 30 秒	0.0247 ~ 0.0353 atm
2	23	1.83	23 00	0.0219 ~ 0.0435
3	30	1.79	23 10	0.0218 ~ 0.0369
4	30	1.79	22 10	0.0095 ~ 0.0365
5	25	1.67	17 20	0.0106 ~ 0.0153
6	30	1.67	20 20	0.0003 ~ 0.0006

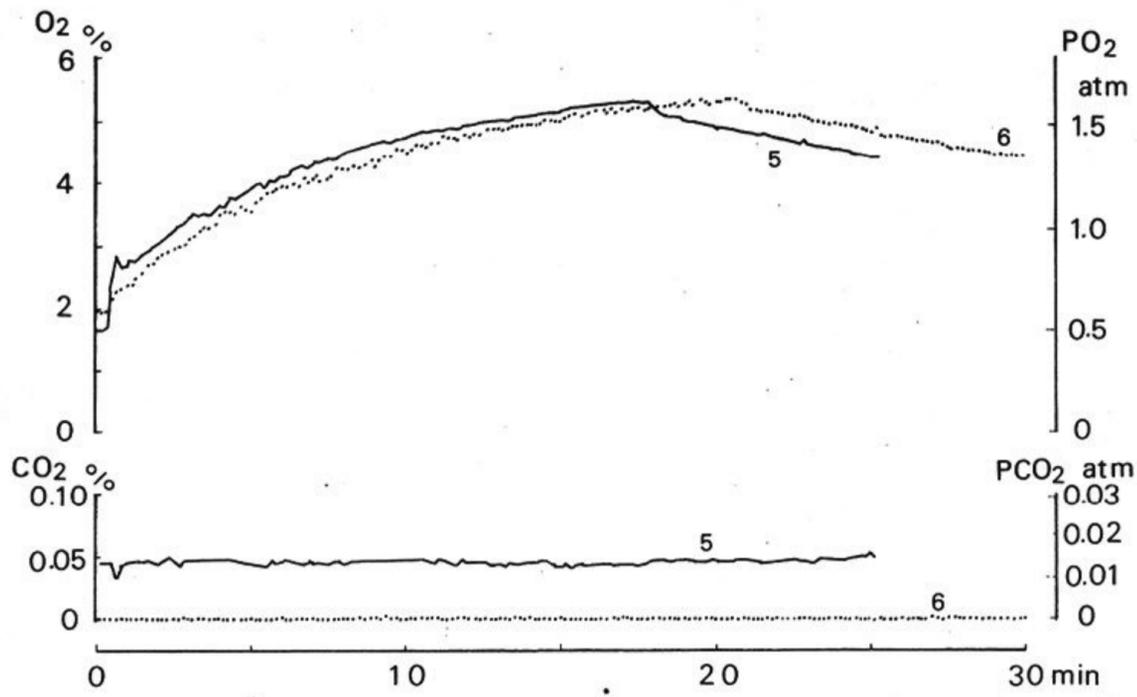


図 17 295 mドライ環境下の非常呼吸装置の吸気ガス分析結果

Fig.17 Oxygen and carbon-dioxide concentration of SLS inspired gas at 295 m dry dive.

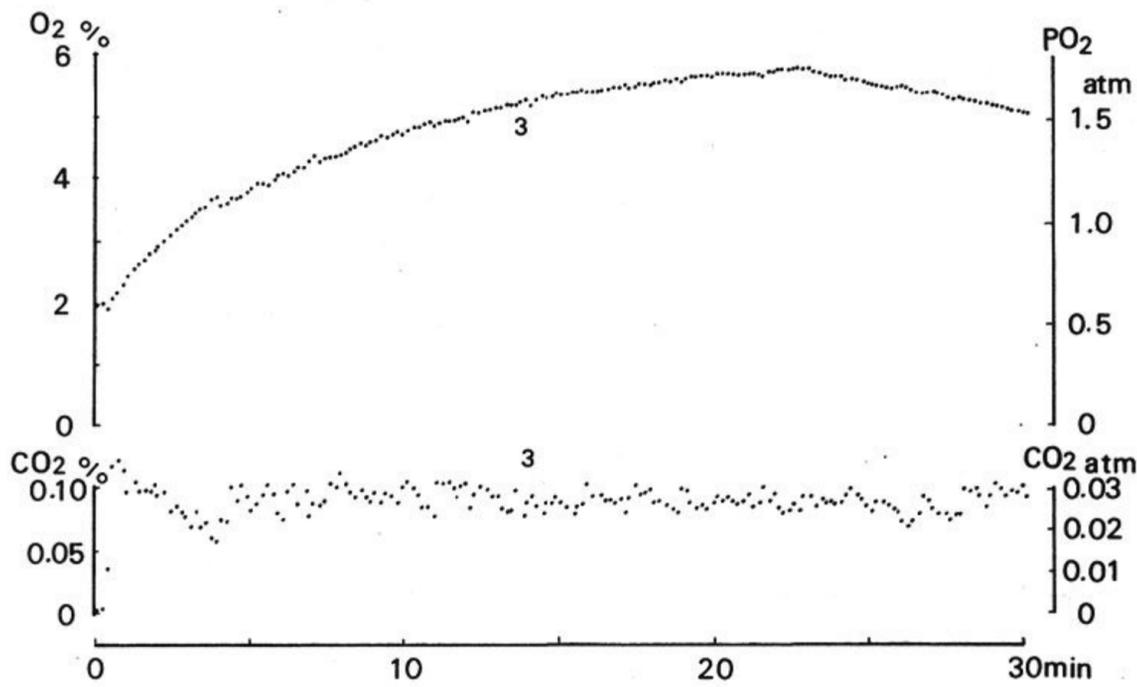


図 18 295 mドライ環境下の非常呼吸装置の呼気ガス分析結果

Fig.18 Oxygen and carbon-dioxide concentration of SLS expired gas at 295 m dry dive.

少し低かった。CO₂濃度は、No.6が小さいために計測不能、No.5が0.014 atmで安定していた。後者は吸気としては非常に高い値であり、試験後その原因を調査した。その結果、呼吸系内に装てんされたCO₂キャニスターのシール用ゴムパッキンの取付けが不完全で、呼気と吸気が混合していたと判断された。

以上の試験結果から、本装置はドライ環境下で30分間の使用が可能なが確認され、条件のきびしいロックアウト潜水の場合でも最低15分間の呼吸は確保できると判断された。ただし、CO₂キャニスターのシール状況には細心の注意を払うことが必要である。

4. 考 察

大循環式潜水呼吸装置は1987年2月に「かいよう」に搭載され、現在までに60, 100, 200, 300 mの各深度での潜水作業に用いられた。この一連の実験での試験結果と運用面での経験から、今後の深海潜水に用いられる潜水呼吸器の展望について考えてみる。

4.1 大循環装置の運用について

各構成機器について、運用面でのポイントと問題点をまとめてみる。

(1) 船上装置

装置1式は船舶用20 ftコンテナに収容されており、重量は約7.3トンである。この外に予備ブースターユニットの小型コンテナ約2.5トンもあり、大規模なものである。重量、スペース面で大きな制約を受けていないため、安定した性能を持つ諸機器をゆったりと配置することができ、信頼性は高い。運用中いくつかの小さな故障が発生したが、いずれも完成直後の初期故障であった。また予備部品との交換によりただちに対処でき、予定された潜水計画に支障を与えたことはない。操作中の点検項目としては、ブースターポンプと冷却水系について定時計測を行い、 O_2 、 CO_2 濃度は常時チェックする。 O_2 濃度の上昇・下降により O_2 添加及び添加停止とするが、その操作は数10分に1回またはそれ以下の頻度である。従って船上装置は、潜水装置の設計・製作と併行して行えるのであれば、各所に分散配置し、操作も従来の開放式潜水器を用いるのと同様の配員内で行うことができると考えられた。

(2) SDC 装備品

大循環装置関係のSDC装備品については、ベルランに合わせた船上での事前・事後チェック項目に含めて点検操作を行っている。60m潜水の初期段階の船上チェックで不具合が生じ、ベルランを中止したことがある。加圧状態で分解点検を行ったところ、配管工事用のシールテープ片が背圧調整弁のバルブシートにつまり、リークの原因となっていたことが判明した。この時の所要時間は約2時間で、その後は何ら異常は生じていない。

ダイバーのロックアウト中、SDC内のテンドー作業としては、排気系の水分離器にたまった海水を適時抜くだけであり、従来の開放式潜水器の時

より若干の操作増でしかない。ただしダイバー用ホースが従来に比較して硬く、かつ太くなっており、それによってテンドー作業の負担は大きくなっている。

(3) ダイバー装備

ヘルメットは初期にデマンドレギュレータ調整にとまどったが、200, 300 m潜水の時点ではダイバーが調整法に慣れ、加圧中のDDC内で微調整を行えるようになり問題はなくなった。排気レギュレータの作動も含んだ全体チェックは、事前の15 mドライ加圧で点検し、また飽和潜水の加圧終了後の総合運転試験によって最終点検を行っている。

非常呼吸装置は、従来用いていたスクーバボンベに比較してヘルメットとの接続部が多い。1988年3月の300 mドライ潜水において、海底に降したSDC内で装着試験を行ったところ、テンドーが手間どり、約30分を要した。そこで同年7月の300 m潜水の準備段階に、ロックアウト及びロックイン手順について再検討を行った。プールでの装着法検討により、ヘルメットと非常呼吸装置をあらかじめ接続しておき、ダイバーがそこに潜り込むような方法が最良であることがわかった。その後、陸揚げしたSDCを用い、ロックイン、ロックアウト訓練とダイバー補助用吊り具の検討を行った。その結果、300 m潜水においては潜水準備の所要時間は3～4分に短縮することができた。

ダイバーホースについては従来に比較して太く、かつ硬くなったため、当初は扱い難いとの意見があった。しかし潜水を続けるにつれ、キックの無いこと、破損の恐れが少ないこと、等により欠点と思われたものがむしろ安心感を与えることがわかった。海中での操作性は良好であった。

(4) 全体的な評価

約1年半の運用経験から、故障の起りやすい水中部分を極力少く、かつシンプルな構造とし、船上に重要機器を配置するという現方式の優秀性は更めて確認された。また、これだけの大型装置であっても、最終的な評価はダイバーヘルメットまわりの小さな装備でなされるものである。呼吸器はダイバーを潜水させるための支援装備であり、ダイバーがそれに細かな注意を払わなければならないようでは実際の潜水作業には対応できない。このために確実な機構にすることは当然であるが、

十分な教育と訓練によって操作法に慣熟しておくことが大切である。

潜水呼吸ガスの消費量は、200mに比較して300m潜水でかなり多かった。この原因を考えると、200mの時点ではダイバーが個人装備品の操作法に慣れていなかったため、慎重な潜水を行ったためと思われる。慣れてきたDive 17では下向き作業も含めて活発に動き、その結果、ネックシール部からのリーク等により消費量は増加した。300m潜水ではそれと同量以上のガスを消費したが、実験に先立って十分な操作訓練を実施したため、潜水器に慣熟してあまり注意を払わなくなっただけで海中作業に熱中したためと考えられる。逆に緊張のため潜水器に注意を払う余裕がなかったかもしれない。ダイバー作業のVTR映像を見てもリーク量は多かった。こうした状態からみて、300m潜水時に得られた呼吸ガス回収率84~91%という値は、作業潜水の場合の実際値に近いものと考えられた。

4.2 潜水呼吸器の将来展望

潜水呼吸器の開発は潜水作業方法の変化によって異なるものであり、現在も種々の方式の研究開発が進められている。大循環装置については、我々の用いている船上装備型が安全面で優れているといえる。しかし更に大深度の潜水、潜水艇からのロックアウト等では、船上装備と長いアンビリカルホースの組み合わせは好ましくない。将来技術として水素ガス潜水(H_2-He-O_2)を考えれば、ガスは回収再利用しないほうが技術的な問題が少なくなる。こうした点もふまえ、深海潜水用潜水呼吸器の今後の方向について考えてみる。

(1) ヘルメット本体

大深度潜水では頭部を低温の海水中にさらすことは危険であり、ヘルメット方式とならざるを得ない。ヘルメットの形状、寸法、重量等については、軽量小型でバランスが良く、⁸⁾炭酸ガス蓄積の恐れがないもの⁹⁾とする必要がある。その点では現在のスーパーライト 17Bが優れており、世界中でも広く用いられている。今後もこのタイプまたはその改良型がベースになると思われる。

(2) 呼吸方式

我々のシステムでは通常はデマンドレギュレータと口鼻マスク、非常用としてマウスピース型を用いている。前者は吸気抵抗が小さく長時間の実

作業に適しているが、後者は吸排気抵抗がやや大きい。ダイバーからの呼吸器に対する基本的な要求は、呼吸抵抗が小さく、なおかつ重作業時の大量の吸排気に対応できることであり、¹⁰⁾⁻¹³⁾潜水呼吸器無人試験装置により基本的な性能を評価することができる。¹⁴⁾⁻¹⁷⁾その結果から判断しても、呼吸はデマンドレギュレータと口鼻マスクの組み合わせで行う現方式が適切であり、今後もその改良が進められると思われる。

(3) バックパックによるガス消費量の節減

潜水呼吸器の理想像が閉式スクーバであることは明らかである。深海潜水用としても開発が継続されており、1986年にNUTEKで行われたOTS No.3, 360m潜水でも試験が行われた。しかし富安¹⁷⁾が指摘した問題点はその時点でも解決されておらず、良好な装置との評価は得られなかった。解決を要する課題として、 PO_2 制御機構の飛躍的な性能向上、 PCO_2 計測装置の組み込み、 CO_2 吸収剤の性能向上、浸水しても影響を受けない構造、といった重要かつ困難な問題が多く残されている。

半閉式スクーバは閉式よりもやや可能性がある。閉式の4項目の問題点のうち、 PO_2 制御機構を純機械的装置で行うことができ信頼性が高いためである。我々の用いている非常呼吸装置はこの方式で、300mにおいても15分間以上の呼吸を可能としている。このシステムに他給気装置を加え、 CO_2 吸収剤の収容量を増やすことで使用時間の延長を図れば良い。また呼吸方式がマウスピースで抵抗が大きいが、バランスウェイトと O_2 添加量制御機構をとり入れて呼吸抵抗低減と PO_2 制御精度の向上を図った装置も開発されつつあり、¹⁸⁾期待が持たれている。しかし本方式でも PCO_2 のモニターは未解決である。

我々の非常呼吸装置のドライ試験では、 CO_2 吸収剤キャニスターの装てん方法の若干の不具合が吸気と呼気の混合をもたらした。また第6回の呼吸試験を開始したところ、直ちに CO_2 濃度が異常に増加して試験を中断した。原因はキャニスターの入れ忘れであった。ドライ試験でガス分析を行っていたので気づいたが、実際の運用時であれば直ちに事故につながっていたところである。この二例は不注意が原因なのは明らかであるが、我々のチェック体制は相当に厳密であり、無視できな

い内容である。

閉式、半閉式ともに、ガス制御はバックパックとヘルメットという狭い容積内で処理せざるを得ない。そこでの計測、制御、監視機構について現在の技術水準は十分ではない。従って常用の潜水装置として、バックパックでガス処理を行うタイプは、より一層の技術開発を要すと考える。

(4) 大循環方式によるガス消費量の節減

ガスの循環ラインによってダイバーとSDC間のベル装備型、ダイバーと船上間の船上装備型の2種がある。前者にはダイバーと潜水艇間も含まれる。

回収精製過程で必要な技術のうち重要な項目として、(i)昇圧、(ii)ガス精製、(iii)ガス組成管理、の三つがある。

昇圧はダイバーヘルメットでの十分な呼吸量を確保するために重要であるが、潜水深度によって所要圧縮比は異なる。我々の装置を例にとると、50mで8.8、300mで2.6であり、一段圧縮では処理できないので二段式とし、150m以深では一段目をバイパスして用いる。ベル装備型でも同様の圧縮比が必要であるが、装置を小型軽量かつ信頼性の高いものとするのは相当困難である。ただし深海潜水に限定した装置とするならば圧縮比が小さくてすみ、ベル装備型でも実用化は可能であろう。

ガス精製に関しては、船上型、ベル型ともに技術的な問題はないと思われる。SDC内部でも、船上装備型の回収精製ユニットの場合と同様、テンドーが補助作業を行うことができるからである。ただしベル装備型では狭いSDC内に多くのスクラバーを配置し、また十分な量のキャニスター類を準備しなければならない。

ガス組成管理の面では、 O_2 と CO_2 の分析が重要なポイントである。船上型では系内の各所からガスをサンプリングし、通常的分析計を用いて高精度な計測を行うことができる。ベル型はSDC内の高圧下で分析を行わざるを得ず、 O_2 濃度はともかく、 CO_2 濃度は目安ほどの値でしか得られないのが現状である。

以上のように船上型の大循環装置はベル型に比較して有利な点が多く、欧米においても作業潜水では全て船上型が用いられている。今後とも前述

のポイントで飛躍的な技術開発が行われない限り、当分の間、船上型に頼らざるを得ないであろう。

5. 要約

船上型の大循環式潜水呼吸装置を「かいよう」に装備し、60、100、200、300mの各深度で性能試験を行った。その結果から潜水呼吸器の将来展望についても言及した。

① 60、100、200、300mにおけるロックアウト潜水の回数とのべ呼吸時間は、5回8時間13分、6回9時間11分、6回8時間35分、10回20時間45分であった。

② 海中でのダイバー作業としては300mの場合が最も活発であり、その時の呼吸ガス回収精製率は84~91であった。

③ 呼吸ガスの O_2 濃度は容易かつ高精度に制御でき、各深度における送気ガスの O_2 濃度は次のようであった。60m：8.93~10.28%，100m：5.07~5.27%，200m：2.95~3.11%，300m：2.01~2.20%

④ 呼吸ガスの CO_2 濃度は回収精製ユニットにより十分に除去され、いずれの場合とも、高精度の CO_2 分析計でも検出できなかった。

⑤ 呼吸ガスの送気停止に備えた半閉式非常呼吸装置は、操作性、呼吸可能時間ともに良好で、水深300mの海中において、少なくとも15分間の呼吸ができると判断された。

⑥ 我々の大循環装置では、ガスの回収精製と昇圧にかかわる重要機器を船上に配置しており、操作性、信頼性ともに高い評価が得られた。特に循環系全体で大きな圧力差のつかない構造のため、安全性は高かった。

⑦ ヘルメットの吸排気抵抗はベースとなったスーパーライト17Bよりも小さく、300mにおいても十分な呼吸量が得られた。

⑧ 潜水呼吸器はあくまでもダイバー作業を支援する補助具であり、その操作に注意を払わなければならないようでは実作業には適応できない。そのためには十分な訓練によって操作法に慣熟することが必要である。

⑨ 深海潜水用の呼吸器では、今後とも船上装備型の大循環方式が主体となると考えられた。そして機能向上の重要部分としては、ヘルメットの呼

吸抵抗の軽減と信頼性向上, バックパック式スクーバの性能向上, ダイバーアンビリカルホースの操作性向上があげられる。

⑩ 将来技術として, ベル装備型大循環装置と閉式スクーバの開発が切望される。技術上の最重要課題は O_2 , CO_2 計測制御技術の確立である。

参考文献

- 1) O'Neill W. J. : ARAWAK V an advanced push-pull Diving System, I. D. S.'79, ADC, pp. 41-53, (1979)
- 2) O'Neill W. J. : Unmanned test of the ARAWAK V Push-pull Systems, Underwater Systems Design, Fed/Mar., pp. 26-31, (1980)
- 3) Carnegie A. L. : The Development of a Push-pull Pump Gas Conservation System, DIVETEC '81, SUT, 7p., (1981)
- 4) Eaton J. : Comex Gas Reclaim System, DIVETEC '81, SUT, 14p., (1981)
- 5) Krasberg A. : Operational Experience with The Return-Line Diving System, DIVETEC '81, SUT, 7p., (1981)
- 6) Krasberg A. : A Diver Gas Recovery System for 450 msw Operations, SUBSEA '84, Hawkedon Partnership Ltd., 5p., (1984)
- 7) Sisman D. : 6.2, Diver gas recovery systems, The professional Diver's Handbook, SUBMEX, pp. 159-169., (1983)
- 8) 富安和徳・青柳重雄・村井 徹 : 閉鎖式潜水呼吸ヘルメットの試作, JAMSTECTR, 3, pp.134-141, (1979)
- 9) 富安和徳 : 潜水呼吸器の炭酸ガス蓄積と換気, JAMSTECTR, 9, pp.123-143, (1982)
- 10) Grodski J. J. : Experimental work of Breathing of Demand-Air Underwater Breathing Apparatus, OCEANS '78, MTS, pp.115-121, (1984)
- 11) Carnegie A. L. : An Engineering View of the Human Breathing Problem in Relation to Diving, DIVETEC '81, SUT, 13p., (1981)
- 12) Morrison J. B. : Unmanned Test Procedures and Physiological Acceptance Criteria, DIVETEC '81, SUT, 11p., (1981)
- 13) Segadal K., D. M. Furevik and E. Myrseth : Breathing Resistance - Keeping the Requirements Realistic, DIVETEC '84, SUT, 11p., (1984)
- 14) Furevik D. M., C. R. Olsen and A. Paasche : The NUTEC breathing simulator - design and test procedures, NUTEC, 23p., (1981)
- 15) Middleton J. R. : Evaluation of a Lightweight Diving Helmet, Underwater Systems Design, Feb./Mar., pp. 18-22, (1980)
- 16) Furevik D. M. : Deep Ex II Evaluation of breathing equipment and hot water diving suits for use at depths to 500 msw, NUTEC, 25p., (1982)
- 17) 富安和徳 : 閉式スクーバの安全性, JAMSTECTR, 4, pp.199-214, (1980)
- 18) Dahlback G. O. : Concept of Future Diving Breathing Equipment, Offshore Goteborg, 11p., (1985)
- 19) Dahlback G. O. : Physiological evaluation of a gas saving deep diving apparatus, Chalmers Tekniska Hogskola, 25p., (1982)

(原稿受理 : 1988年11月5日)