

窒素・酸素飽和潜水用環境制御装置の試作について

岡本 峰雄*¹ 山口 仁士*¹

窒素・酸素飽和潜水用のハビタットで用いる、内部循環方式の環境制御装置 HECS (Hyperbaric Environment Control System) の開発を、1994年から進めてきた。この装置は電力と冷却水を供給することで、炭酸ガス吸収剤の交換などの操作をすることなく、長期間にわたって自動運転が可能な性能を有することを目指している。ハビタットでの居住深度は30mまで、エクスカッションで50mまで使用することが目標である。

現在、基本的な構成部分の検討が終わり、プロトタイプ的设计・製作が完了し、各所の不具合点の改良と、総合評価試験を行っている段階である。本稿では、開発の過程で得られた、モレキュラシーブスを用いた再生型の炭酸ガス精製システムの開発、高圧下で発停できる100V仕様の電動モーター式ブロワーとそれを安全に使用ための回路設計に関して得られた知見について報告する。

キーワード：飽和潜水，環境制御，窒素・酸素潜水，ハビタット，炭酸ガス除去

Development of Prototype Hyperbaric Environmental Control System for Nitrox Saturation Diving

Mineo OKAMOTO*² Hitoshi YAMAGUCHI*²

Full automated hyperbaric environmental control system (HECS) for nitrox saturation diving HABITAT has been examined ever since 1994. HECS was planned to be located inside HABITAT and operated automatically by supplying electricity and cooling water. To realize this, regenerative type carbon dioxide removal method and AC 100V electric powered blower system was developed as key technology. By using molecular sieves as an adsorbent material for carbon dioxide, automated sequence for adsorbent and regeneration could be successfully realized. Also, by using solid-state conductor circuit, AC 100V type blower to use under hyperbaric condition could be employed. Prototype HECS was manufactured and settled in JAMSTEC diving simulator for further evaluation.

Key Words : Saturation diving, Environmental control, Nitrox diving, HABITAT, Carbon dioxide removal

* 1 海洋生態・環境研究部 第3研究グループ

* 2 Marine Ecosystems and Environment Research Department

1 はじめに

飽和潜水を安全に行ううえでは、ダイバーが海中作業を行っている場合はもちろん、それ以外の時の居住空間となる、高圧ドライ環境の制御が重要である。環境制御の項目は、環境ガス組成の均質化、温度・湿度制御、有害ガス類の除去等であり、そのために環境制御装置が利用される。

環境制御装置の基本構成は、熱交換機による温度制御部、冷却や吸湿剤による湿度制御部、吸収剤やフィルターを用いた有害ガス除去部、そしてそれらの部分に、吸入した環境ガスを通過させてチェンバー内に再度吐出させるためのブロワーからなる。このうち温度制御装置と湿度制御装置は、連続使用も可能な装置の開発も比較的容易である。ブロワーについては、日本の場合¹⁾、チェンバー内で使用が許されている電圧が30V以下であるため、さまざまな工夫がなされている。本質的には、高電圧のものを利用するための技術開発が必要である。

有害ガス除去装置では、人の呼出する炭酸ガスの除去が最大の問題であり、それ以外の有害ガス、有毒ガスは、発生量が少ないため、小型のフィルター類で比較的容易に除去できる。炭酸ガスの除去には、使い捨て型の吸収剤を用いる方法が一般的である。安全で装置の構造も簡単であるが、吸収剤の扱いが問題となる。潜水が長期に及ぶとそれに応じて大量に準備する必要があり、使用後は産業廃棄物として処理しなければならない。船上のDDCでは、吸収剤の保管スペースの制約と交換作業の手間などは問題にならない。しかし、海中に置かれた狭いハビタットの場合、保管場所の確保が深刻な問題となる。また吸収剤の交換作業を、居住しているダイバー自身が行う必要がある。

著者らは、窒素・酸素飽和潜水用のハビタットで用いる、内部循環方式の環境制御装置HECS (Hyperbaric Environment Control System) の開発を進めている^{2,3)}。この装置は電力と冷却水を供給することで、炭酸ガス吸収剤の交換などの操作をすることなく、長期間にわたって自動運転が可能な性能を有することを目指している。ハビタットでの居住深度は30mまで、エクスカッションで50mまで使用することが目標である。

現在、基本的な構成部分の検討が終わり、プロトタイプの設計・製作が完了し、各所の不具合点の改良と、総合評価試験を行っている段階である。本稿では、開発の過程で得られた、再生型の炭酸ガス精製システムの開発と、高圧下で発停できる電動モーター式ブロワーとそのための回路設計に関して得られた知見について報告する。

2 方法

飽和潜水装置の環境制御には、この約30年間の間に、さまざまな形式が開発利用されてきた。配置面から、循環ブロワーを含む全装置をチェンバーの内部に置く内部循環方法と、外部に置いてチェンバーとガス配管で結ぶ外部循環方法とに大別される。前者では、装置の管理を高圧下でダイバーが行い、後者では大気圧下で整備員が行うことになる。船上のDDCや陸上の潜水シミュレーターでは外部循環式が主流で、ダイビングベルやハビタットは前者となる。

内部循環方式では炭酸ガス除去が大きな問題となる。現在はソーダソーブやバラライムなどの使い捨て型の炭酸ガス吸収剤が用いられているが、使用する量と交換頻度が高いため、この供給・交換・廃棄が大きな問題となっている。

窒素・酸素飽和潜水用のハビタットの環境制御装置には、これら通常の潜水装置とは異なった観点での技術開発が必要である。まずハビタットは、海中の諸現象の研究を行うための研究室として利用される。従って、温度、湿度、ガスの混合、炭酸ガス濃度、騒音等の環境諸要因は陸上の実験室のように良好に制御される必要がある。また環境制御装置は、陸の家屋内の空調装置と同様に、スイッチをいれて適切な制御値に設定したのちは、何らの点検や整備も不要であることが望ましい。

環境制御の主要な制御項目の多くは技術的に解決されているが、未だ実用段階に達していないのは、再生利用型の炭酸ガス除去装置である。この問題が解決すれば、環境制御装置のノーメンテナンス化が可能となる。もう一つは、高圧下での電気の安全な利用技術である。海中研究室を実現するには、陸上の実験用機材に広く用いられている100-220Vの高圧電力を安全に利用できる技術の開発が必要不可欠である。

こうした観点から、水深30mまでの窒素・酸素飽和潜水用ハビタットの環境制御装置HECS (Hyperbaric Environmental Control System) 開発のため、再生型炭酸ガス吸収装置の検討を行った。基礎試験として、炭酸ガス除去剤を選択し、次に、候補となった除去剤を使用し、小型吸収筒による基本性能把握試験を行った。さらに、100V仕様の電動型循環ブロワーの安全な利用技術の開発を行った。最終的に、これらの検討で得られた結果から、プロトタイプの環境制御装置HECSの設計と試作を行った。

2.1 炭酸ガス除去剤の選択

文献により再生可能な炭酸ガス除去剤の特性を調べ、数種を候補として選択した。つぎに、実験室レベルでそれらの基本性能を計測した。

2.2 炭酸ガス吸着筒の基本性能把握試験

選択された炭酸ガス除去剤を用い、小型キャニスターを用いて炭酸ガス除去性能試験や除去再生の連続試験等を行った。

2.3 電動ブロワー及び電気回路の検討

HECSにおいて、循環ブロワーは、装置内にガスを取り込んで炭酸ガスの除去を行い、また再生後の冷却を行うための重要な構成要素である。我々の開発しているHECSは、電力と冷却水の供給により、ノーメンテナンスの運用を目指しているため、ブロワーについても検討を行った。即ち、安全性、強力、静穏かつ構造が簡単なものが必要と考えた。

そうした観点から、交流100Vを用いた、電動モーター直結型ブロワーの安全な利用方法について検討した⁴⁾

2.4 HECSの炭酸ガス除去装置の試作

以上の各種検討結果をもとに、プロトタイプの環境制御装置の試作を行った。所要性能として、4ATAの窒素・酸素飽和潜水装置に居住する2名が呼出する炭酸ガスを連続して除去できる性能とした。

3 結果及び考察

3.1 炭酸ガス除去剤の選択

有人閉鎖環境で現在用いられている炭酸ガス除去装置には、使い捨て型と再生型とがある。高圧環境下で現在用いられているのは、使い捨て型の水酸化リチウム、水酸化バリウム、ソーダソーブである。大気圧の潜水艦や宇宙船では、これら使い捨て型のほか、再生型のもの実用化または開発段階にある。

(1) 炭酸ガス吸着剤の概要

再生型の炭酸ガス吸着剤には、液体吸収式のMEA^{5,6)}、KOH^{6,7)}、固体の吸着剤には、MS^{5,8)}、SA⁹⁾、酸化銀¹⁰⁾、などがある。主要なものの概要を次に述べる。

(a) 液体アミン（エタノールアミン水溶液）は、強アルカリ水溶液であり、吸着した炭酸ガスは液の加熱により放出される。 $R-NH_2 + CO_2 \rightarrow R-NH_2-CO_2$

(b) 水酸化カリウム水溶液は炭酸ガスを化学結合で吸収

し、液の再生は電気化学反応にて行う。この際、水の電気分解によって水素と酸素が発生する。 $CO_2 + 2KOH \rightarrow K_2CO_3 + H_2O$, $K_2CO_3 + H_2O \rightarrow 2KOH + CO_2$, $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$

(c) モレキュラシーブスは炭酸ガスを物理吸着する。水分を吸着しやすいため、事前に水分除去が必要。加熱により炭酸ガスを脱着する。

(d) カーボンモレキュラシーブスは、モレキュラシーブスを脱酸素処理したものである。水分の影響による炭酸ガスの吸着能力の低下はないが、炭酸ガス吸着性能はモレキュラシーブスよりかなり劣る。

(e) 固体アミンは、物理吸着と親和力とにより炭酸ガスを吸着する。炭酸ガス吸着の過程で水分の影響を受けず、大気圧下での吸着性能はモレキュラシーブスより高い。再生は加熱による。 $SA + CO_2 \rightarrow SA \text{ and } CO_2$

(f) 酸化銀は炭酸ガスとは直接反応せず、水を媒介として結合する。吸着能力は非常に高いが、再生時には250℃程度の高温が必要。 $Ag_2O + CO_2 \rightarrow Ag_2CO_3$

(2) 炭酸ガス吸着剤の選択試験

HECS用の再生利用できる炭酸ガス吸着剤としては、取り扱いの容易さを考えると液体よりも固体が望ましい。さらに日本での入手の容易さも考慮し、モレキュラシーブスと固体アミンを候補とした。固体アミンは種類が少ないが、モレキュラシーブスには粒径の異なる各種がある。そこで第一段階では、モレキュラシーブスの選定を行い、次に、選定されたものと固体アミンとを比較することとした。

(a) MSの選定

モレキュラシーブスMSは、ゼオラムA-5（東ソー製、5A）、ゼオラムF-9（東ソー製、13X）、MS 13X-812B（水沢化学製）の三種を選び、全自動ガス吸着装置を用い、平衡吸着量を20、30、40℃の三段階の温度条件下で求めた。比較試験に用いたMSは、予め200℃で2時間の再生処理（加熱して真空で脱気）を行い、吸着量の計測は炭酸ガス分圧0-0.013atm（10mmHg）まで行った。図1にゼオラムF-9の結果を例として示した。図2に炭酸ガス濃度0.005atm（3.8mmHg）の時の平衡吸着量と温度の関係、また表1に、三種の0.005atm（3.8mmHg）と0.013atm（10mmHg）の平衡吸着量（ml/g）の値をまとめて示した。

吸着量は温度変化によって影響を受け、温度が高くなるに従って減少する。0.005atmの値で比較すると、A-5、

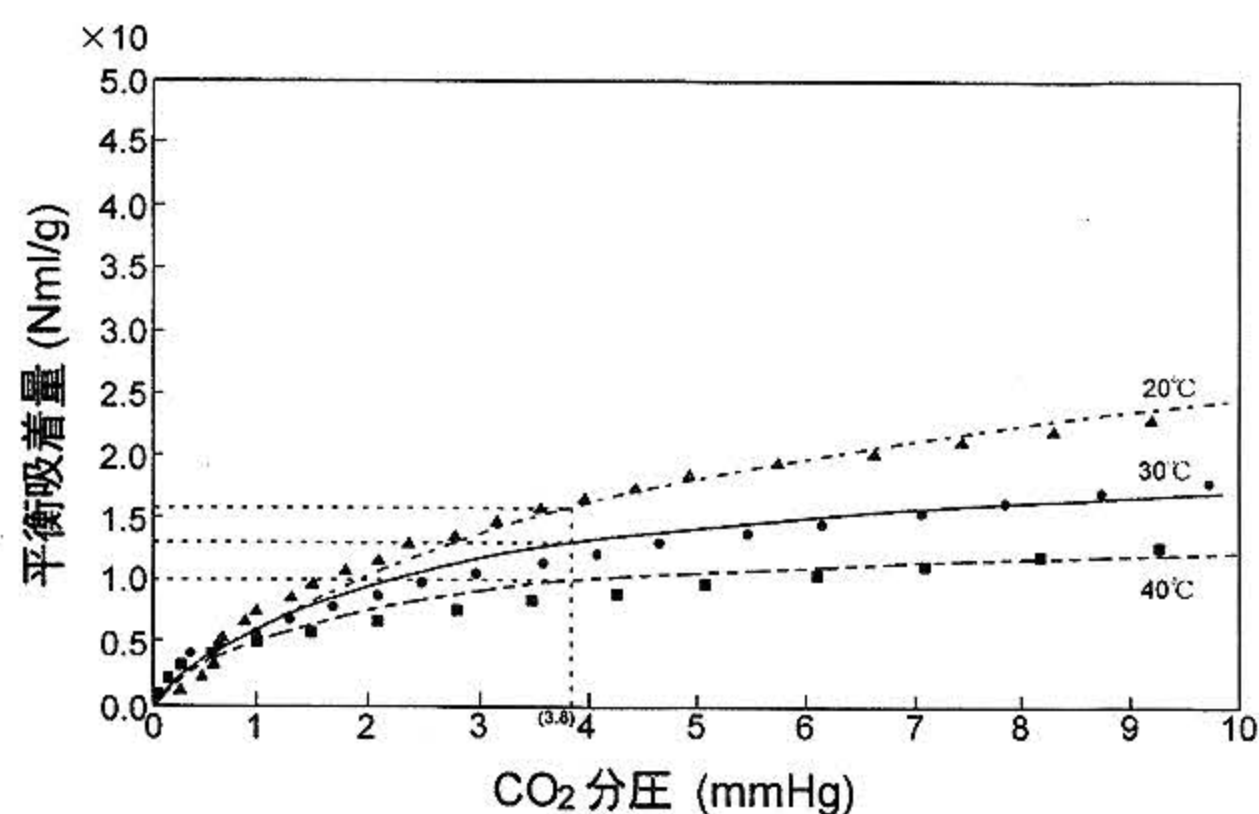


図1 ゼオラム F-9 の炭酸ガス平衡吸着曲線
Fig. 1 Carbon dioxide equilibrium adsorption curve of ZEORAM F-9

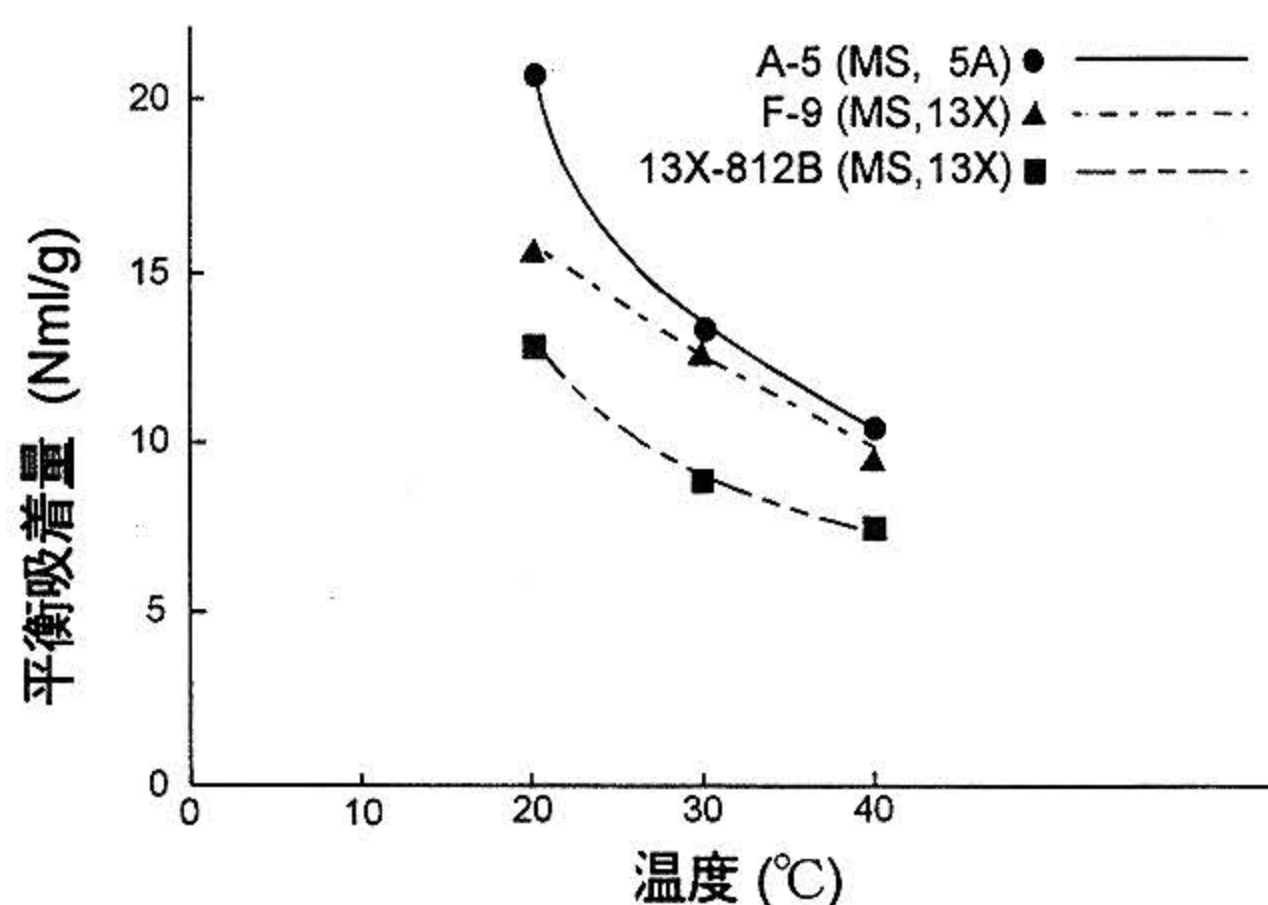


図2 モレキュラシーブス 3 種の炭酸ガス濃度0.005atm (3.8 mmHg) の時の平衡吸着量
Fig. 2 Carbon dioxide equilibrium adsorption amount of three molecular sieves at 0.005atm (3.8mmHg)

表1 モレキュラシーブス 3 種の炭酸ガス平衡吸着量
Table 1 The carbon dioxide equilibrium adsorbed amount of three molecular sieves

吸着剤	試験温度 (°C)	炭酸ガス平衡吸着量 (ml/g)	
		CO ₂ 3.8mmHg	CO ₂ 10mmHg
ゼオラム A-5	20	20.7	34.8
	30	13.4	24.9
	40	10.7	19.5
ゼオラム F-9	20	15.6	24.7
	30	13.0	17.5
	40	9.9	12.7
13X-812B	20	12.7	19.8
	30	8.9	14.4
	40	7.5	10.8

F-9, 13X-812Bの順に吸着量が低くなった。窒素・酸素飽和潜水環境での条件として、温度が25-26°Cの部分の値を概算すると、A-5, F-9, 13X-812Bでそれぞれ、16, 14, 11ml/gであり、まず13X-812Bが候補から外れた。

ところでゼオラムのA-5, F-9 については、カタログ値として、20°C, 760mmHgの窒素と酸素に対する吸着量が明らかになっている。窒素に対しては、A-5が10.9ml/g, F-9が6.7ml/gで、酸素に対してはそれぞれ、3.2ml/g, 2.1ml/gである。つまり、A-5はF-9に比較して、炭酸ガスのみでなく、窒素や酸素もより吸着しやすい性質である。本HECSが使用条件としている窒素・酸素飽和潜水の環境下では、窒素の分圧がさらに高い。それゆえにA-5はF-9に比較して、低分圧の炭酸ガスの吸着効率はかなり低下することが経験的に推察される。以上のことを総合的に判断し、HECS用のMSとしては、ゼオラムF-9を選定した。

(b) MSとSAの比較試験

次に、MSゼオラムF-9 (東ソー製, 13X) と固体アミンWA-21 (水沢化学製) の2種について、想定される環境ガス中の組成のガスを用いて、吸着性能を比較するための破過試験を行った。

試験には小型キャニスター (長さ10cm, 直径10mm) を用い、MS F-9 5.77 g 及びSA WA-21 5.03 g をそれぞれ充填した。MS, SAとも、試験前には十分に再生処理 (加熱して真空中で脱着) を行った。試験の圧力と温度はそれぞれ4 ATA, 30°Cと統一し、キャニスターに、窒素またはヘリウムに炭酸ガスを0.005atm (1,250ppm) 含んだガスを供給し、キャニスター通過後の炭酸ガス濃度を連続計測した。ガスの流速は適切な値を得るため、数段階に変化させた。

MSとSAの性能評価にあたっては、キャニスターを通過した後の炭酸ガス分圧が供給ガスの1/10 (0.0005atm, 125ppm) にまで上昇する時間を、10%破過時間と定義して用いた。一方、炭酸ガスがキャニスター入口から順次平衡吸着を達成しながら吸着されたとする、理論的吸着時間の10%を10%破過時間の目安として算出した。これら理論値と実際の破過時間とを比較し、理論値に対する実測値の割合を吸着効率と定義した。

MSについては、最初の試験として、炭酸ガス分圧0.005atmの窒素を、流速10cm/sec及び20cm/secで通過させた時と、同じく炭酸ガス分圧0.005atmのヘリウムを20cm/secで通過させた場合の試験を行い、結果を図3に示した。MSはヘリウムがベースで流速が20cm/sec

の場合、10%破過時間は理想値の57分に対し、45分（吸着効率79%）と良好であった。しかし窒素がベースになると、同じ20cm/secの条件で18分（32%）と低下した。また、窒素ベースの10cm/secの条件では、理想値の112分に対し48分（61%）となった。ヘリウムベースの10%破過時間が理論値に近いのは、ヘリウムがMSに吸着されない分、炭酸ガスの吸着が良好に行われることによる。それに対し、窒素の場合はMSに吸着されやすいため、結果的に炭酸ガスの吸着量が減少する。

SAについては、窒素ベースでの20cm/sec、ヘリウムベースでの、30cm/sec及び15cm/secの結果を図4に示した。窒素ベースで流速20cm/secの場合、10%破過時間は理論値の42分に対し、18分（43%）であり、ヘリウムベースでは、30cm/secの場合が32分に対して10分（31%）、15cm/secで64分に対して16分（25%）であった。SAは炭酸ガスを吸着するが、環境ガスが窒素、ヘリウムのいずれの場合とも、それらの影響はほとんど受けていないといえる。

以上の結果から、MS F-9は窒素・酸素飽和潜水の環境下では、窒素や酸素を吸着して炭酸ガスの吸着効率が落ちるものの、適切な流速を選ぶことでそれをSA以上に改善できることから、最終的に選定された。なお、今回開発するHECSは窒素・酸素潜水用であるが、これをヘリウム・酸素潜水用に再設計すれば、炭酸ガス吸着効率はさらに向上することになる。

3.2 炭酸ガス吸着筒の基本性能把握試験

ゼオラムMS F-9を用いた、再生型炭酸ガス除去装置の製作にあたり、その構成要素に関して単体試験を行った。MSの炭酸ガス吸着効率は、吸入ガス中に水分が含まれると著しく低下する。そのため、炭酸ガス吸着装置は、除湿筒と炭酸ガス吸着筒が直列に結ばれる構成とした。除湿剤としては一般に用いられている、MS、ゼオラムA-3（東ソー製、3A）を用いた。

試験は、除湿剤の破過試験と再生試験、2基の炭酸ガス吸着筒を連続切り替え使用しての吸着・再生連続試験の2種を行った。試験に用いた除湿筒は、内径67.9mm、長さ640mm、炭酸ガス吸着筒は、内径67.9mm、長さ950mmである。

(1) 除湿剤の特性把握試験

試験は、実験用除湿筒にMS 3Aを569g充填し、水分を含んだガスを通させての破過試験とヒーターで加熱しての再生試験を行った。

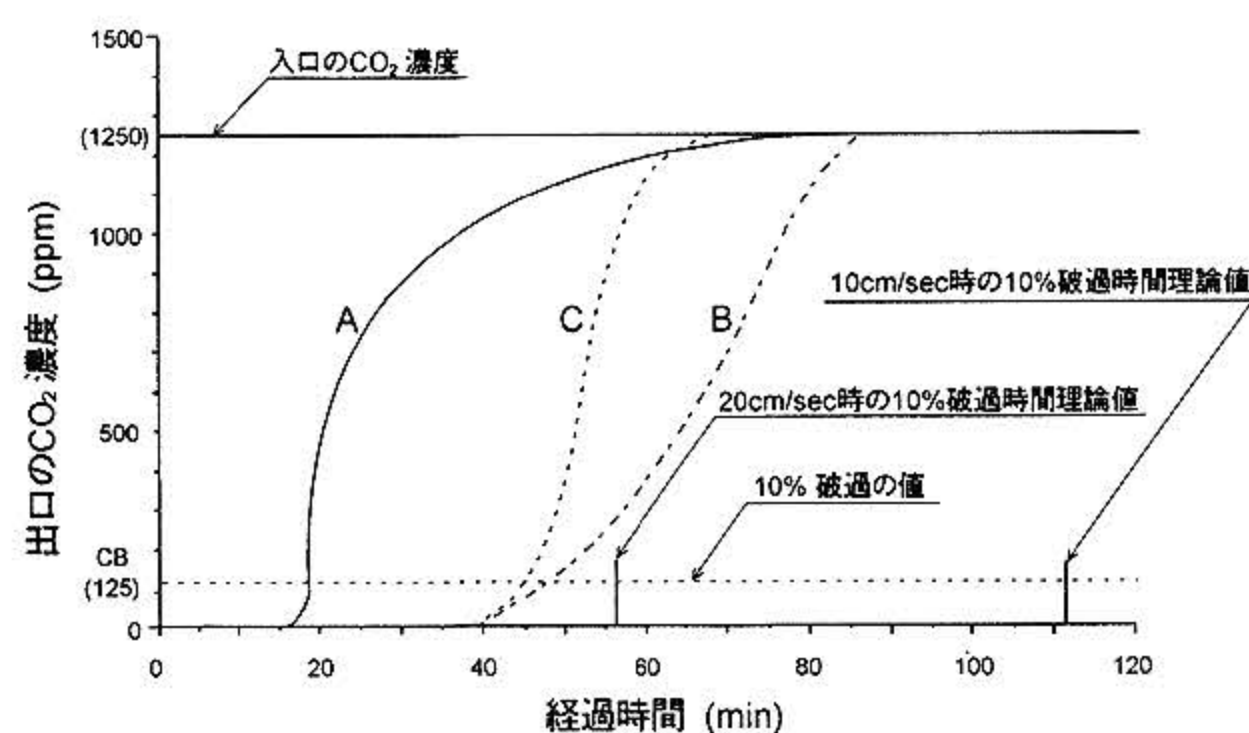


図3 モレキュラシープスF-9の炭酸ガス吸着破過試験結果
A: 窒素ベースで炭酸ガス0.005atm (1,250ppm) 混合、ガス流速20cm/min.
B: 窒素ベースで炭酸ガス0.005atm (1,250ppm) 混合、ガス流速10cm/min.
C: ヘリウムベースで炭酸ガス0.005atm (1,250ppm) 混合、ガス流速20cm/min.
試験条件: 4ATA30℃

Fig. 3 Carbon dioxide adsorption breakthrough test result of MS ZEORAM F-9 (13x).
A: Nitrogen with 0.005atm CO₂ (1,250ppm), Gas flow rate 20cm/sec.
B: Nitrogen with 0.005atm CO₂, 10cm/sec.
C: Helium with 0.005atm CO₂, 20cm/sec. Test condition: 4ATA, 30℃.

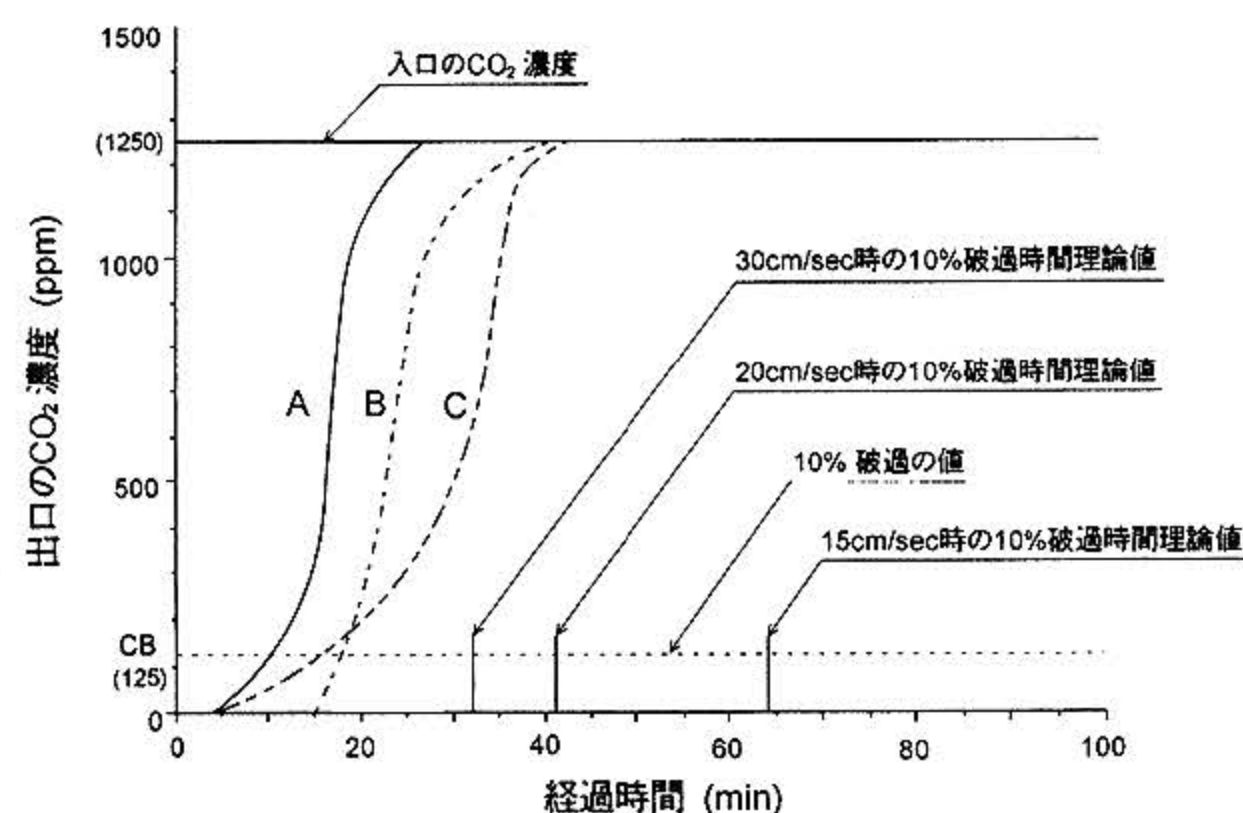


図4 固体アミンWA-21の炭酸ガス吸着破過試験結果
A: 窒素ベースで炭酸ガス0.005atm (1,250ppm) 混合、ガス流速30cm/min.
B: ヘリウムベースで炭酸ガス0.005atm (1,250ppm) 混合、ガス流速20cm/min.
C: 窒素ベースで炭酸ガス0.005atm (1,250ppm) 混合、ガス流速15cm/min.
試験条件: 4ATA30℃

Fig. 4 Carbon dioxide adsorption breakthrough test result of SA WA-21.
A: Nitrogen with 0.005atm CO₂ (1,250ppm), 30cm/sec.
B: Helium with 0.005atm CO₂, 20cm/sec.
C: Nitrogen with 0.005atm CO₂, 15cm/sec. Test condition: 4ATA, 30℃.

破過試験は、4ATAの窒素酸素飽和潜水環境を模擬し、窒素をベースに酸素0.33atm、炭酸ガス0.005atmを混ぜて相対湿度60%とし、これを流速4.6, 9.2, 13.8cm/sの三条件で除湿筒に通した。この条件下で、除湿筒の出口における露点温度を計測し、その上昇度合いと水分の累積吸着量との関係をもとめた。試験は、露点温度が0℃に上昇するまで継続し、途中の上昇カーブを求めた。またこれをもとに、露点温度と水分の積算吸着量との関係も求めた。試験開始時の露点温度は-35℃以下であったが、-30℃程度に上昇した後は吸湿量が小さくなる。露点温度の上昇がそれまでに較べて短時間に起こり、その間に通過するガスの絶対量が少ないためである。この結果から、ガスの流速に関わらず、除湿筒の使用可能な時間の目安として、精製ガスの露点温度が-30℃程度に上昇するまでの範囲が適切であることが示された。

(2) 除湿剤の再生試験

前述の吸湿試験によって精製ガスの露点温度が-5℃以上にまで上昇したモレキュラシーブMS 3Aを用いて、加熱状態で窒素ガスを10cm/secの速度で流し、再生試験を行った。再生は、4ATAで、100, 150℃の二段階の温度について、加熱時間を10分から600分まで変化させた。再生時間と再生率の関係を図5に示した。加熱200分間の時の再生率をみると、100℃では10%以下、150℃

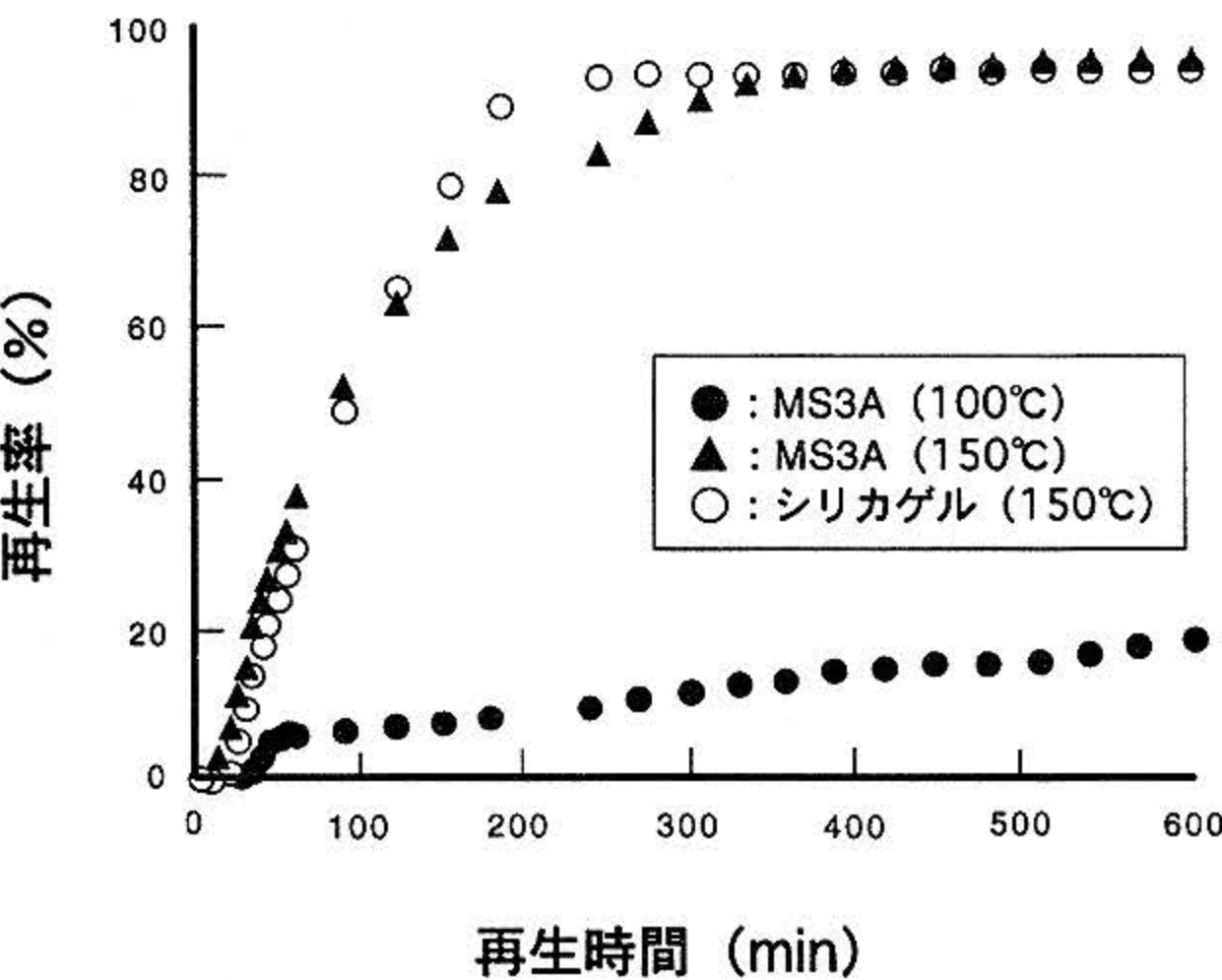


図5 除湿用のモレキュラシーブZEOAM 3A (3X) とシリカゲルの再生温度による再生率の相違
Fig. 5 The regeneration rate of dehumidifying materials MS ZEOAM 3A (3X) and Silica Gel at two regeneration temperature.

では80-90%となった。この試験結果から、除湿剤の量、再生温度、再生ガス流量などを求めるための基礎データが得られた。しかし、後述のリサイクルタイム3時間程度を実現するためには、150℃程度の単なる加熱再生では困難なことが伺え、より高温、低圧、パージガス流量の増加などの条件が必要とすることが推察された。

(3) 炭酸ガス吸着剤のドライガス吸着再生連続試験

二基の試験用炭酸ガス吸着筒を用い、一基で環境ガスを通して炭酸ガスの吸着を行う間に、使用済みのもう一基の再生操作を行い、一定時間ごとに二基の吸着と再生を繰り返す連続試験を行った。

試験用吸着筒はMS F-9 (13X) を2,565 g 充填できる構造である。4ATA, 28℃のもとで、窒素ベースの乾燥した混合ガス(酸素0.33atm, 炭酸ガス0.005atm)を、10cm/secの速度で供給した条件で事前試験を行った。その結果、10%破過時間は366分で、炭酸ガス吸着効率は82% (10%破過までの炭酸ガス吸着量/理論上の平衡吸着量)であった。

ドライ条件での吸着再生連続試験の条件については、試験時間を短縮するため、炭酸ガス吸着剤は筒容積の約1/3の855 gを充填して試験に供した。試験は、温度28℃, 圧力4ATA, 試験ガスは窒素ベースの乾燥混合ガス(酸素0.33atm, 炭酸ガス, 0.005atm), ガスの流量は10

表2 炭酸ガス吸着剤MS-9のドライガス吸着再生連続試験結果 F-9試験重量; 855 g. 供給ガス; 4ATA, 窒素ベースで酸素0.33atm, 炭酸ガス0.005atm (1,250ppm) 混合, 試験温度28℃, ガス流量20Nl/min.

Table 2 Result of adsorption and regeneration serial testing of carbon dioxide adsorbent canister using MS F-9.

試験サイクル (分)	193	213	243	303
再生条件				
200℃加熱時間 (分)	40	60	90	150
冷却時間 (分)	150	150	150	150
脱着試験結果				
初期破過時間 (分)	182	182	182	182
10%破過時間 (分)	-	-	230	230
吸着筒切替え直前の出口ガスの炭酸ガス濃度 (ppm)				
サイクル 1	0	50	150	480
2	10	100	170	-
3	10	40	170	460
4	10	40	170	460
5	10	40	-	460
切り替え時の吸着効率 (%)	43.7	47.9	54.0	63.6
10%破過時間の時の吸着効率 (%)	-	-	51.8	51.8

cm/secとした。

再生操作は、減圧・加熱・真空引き・冷却で構成され、以下の手順で行われる。

- (a) 炭酸ガス吸着筒の隔離
- (b) 大気圧までの減圧
- (c) 加熱ヒーター作動 加熱は200℃であるが、開始から200℃への昇温に約30分を要する。
- (d) 加熱の最終段階で真空ポンプによる減圧 真空度13 Torr
- (e) 4ATA への均圧
- (f) ブローによる冷却150分間

以上の条件で、リサイクルタイムを193, 213, 243, 303分と変え、5サイクルの試験を行い、結果を表2に示した。この時間は、冷却150分、切り替え3分を含んでおり、それぞれのヒーター加熱時間は40, 60, 90, 150分となる。ここで、初期破過時間の182分は、吸着筒から出た精製ガス中に、最初に炭酸ガスが検出され始めた時間である。

試験を開始した当初の1-2サイクル目の10%破過時間にはやや乱れがあったが、3サイクル目以降は安定した。サイクルタイムの長短にかかわらず、初期破過時間の182分は変化無く、10%破過点は230分であった。サイクルタイム193, 213分の条件では、精製ガス中の炭酸ガス濃度はそれぞれ10ppm, 40-50ppmと上昇はしているが、10%破過点には達しておらず、十分な余裕をもった状態で再生操作に入っている。この結果から、サイクルタイムの243分の条件が、おおむね10%破過点に達する時間まで使用した場合と等しいこと、303分では10%破過点を約70分超えているが、吸入ガス中の炭酸ガスが、1,250ppm (0.005atm) から460ppmまで吸着された状態であることが示された。ちなみに、炭酸ガスの10%破過点に達した時の吸着効率（実際の吸着量/平衡吸着量）は51.8%に達していた。

(4) 加湿ガスによる、除湿筒と炭酸ガス吸着筒組み合わせ試験

除湿筒で水分を除去された後のガスに対する炭酸ガス吸着筒の性能確認のため、除湿筒と炭酸ガス吸着筒を連結して、加湿ガスによる試験を行った。

除湿筒に 569 g のMSゼオラム F3 (3X) , 炭酸ガス吸着筒にはMSゼオラム F-9 (13X)を充填した。試験は、今までと同様に4ATAで、窒素ベースの混合ガス（酸素0.33atm, 炭酸ガス0.005atm）を湿度60%に調整したものをを用い、供給ガスの流速は約10cm/sec (20Nℓ/min)とした。

表3 除湿筒と炭酸ガス吸着筒組み合わせ試験結果

供給ガス ; 4ATA, 窒素ベースで酸素0.33atm, 炭酸ガス0.005atm (1,250ppm) 混合, 試験温度28℃, ガス流量20Nℓ/min.

Table 3 Combination test result of dehumidification canister and carbon dioxide adsorption canister.

試験要ガスの湿度条件	乾燥	湿度60%
除湿剤重量(g)	-	569
炭酸ガス吸着剤重量(g)	855	855
初期破過時間 (分)	318	316
10%破過時間 (分)	366	381
10%破過時の吸着効率 (%)	82.4	85.8

結果を、同じ炭酸ガス吸着筒で乾燥ガスを用いた時と合わせ、表3に示した。加湿ガスと乾燥ガスでの結果はほぼ等しく、除湿筒は十分に機能していることが示された。ただし、除湿筒を繰り返し再生した場合には、除湿効率が落ち、結果的に炭酸ガス吸着能力の低下をもたらす恐れがあるため、除湿筒の再生繰り返し試験も必要である。

3.3 電動ブロー及び電気回路の検討

現在の飽和潜水装置で用いられているブローの形式は次のようである。居住区画のDDCは、外部配管内に循環ブローを配置する外部循環式のものと、居住区画内に置く内部循環式とがある。前者では、電動モーターを高圧区画の外に置いたマグネットカップリング方式のファン、外部の電動モーターを高圧下のファンと直結した軸貫通方式、電動モーターとブローを配管の中に配置したもの等がある。不具合が生じた時には、配管をDDCと隔離して大気圧環境下で整備できるように、設計されている。内部循環方式では液体ブラインにより作動する液流ファンが主体である。容積が小さいSDCでは、主として、24V程度の直流モーターで作動する小型電動ファンが用いられる。

日本の法規では、高圧環境内には直接、100-220Vなどの高い電圧のものをを用いてはならず、用いる場合でも30V以下となるよう規制されている^{1,11)}。なお米国¹²⁾とノルウェーの潜水装置規則¹³⁾では、固定装備の動力や暖房用では250Vの交流・直流が認められているが、フレキシブルケーブル供給用、通信、計測用では48Vまたは30V DC以下となっている。また溶接ハビタットのように限られた条件下で用いられるものには高電圧仕様の電動

ブロワーが用いられることがある。

これらの背景と窒素・酸素飽和潜水用のハビタットの使用環境・内部空間・整備性などを総合的に考慮し、交流100Vを用いた、電動モーター直結型のブロワーを利用するのが適切と考えた。高圧環境下での100Vの利用には、火花発生による火災、感電などの原因になるとの反対意見がある。しかしこれらは、火災発生の原因とならないこと、電気回路を構成する機器が高圧下でも十分な強度を有し、安全に使用できることを技術的に明らかにすれば良いと考える。

火災発生を防止するには、3つのことを配慮する必要がある。まず電動モーターが原理的に火花を発生しないことである。これは、交流誘導モーターを用いることで解決できる。次に、配線の安全性の向上であるが、不燃性素材で被覆した電線を適切に加工することで解決可能と考える。最後の問題は、切り替えや発停に用いるスイッチ回路での火花の発生や、モーターの起動電力緩衝用コンデンサーの破損による障害である。

以上の点に注意し、高圧環境下で、電動モーター作動式ブロワーを安全に利用できる回路設計を行い、4ATAの空気環境下で試験を行った。試験は2種で、6時間の連続運転と、高圧環境下での発停作動試験である。

高圧下で火花を出さずに電動ブロワーを発停させるため、実際の電源の開閉はソリッドステートコンダクターで行い、その作動を近接スイッチで行う方式を採用した。試験に用いた电路系統図、電動ブロワー、近接スイッチ、ソリッドステートコンダクターの主要目を、図6、表4に示した。電動ブロワーは高圧チェンバーの外部から発停できるだけでなく、内部の切り替えスイッチでも操作することができる。

連続運転試験では、大気圧から空気で30mまで加圧し、6時間連続運転を行い、最後減圧するまでの間について、ブロワーの風量・差圧、所要電力・騒音、そして各部の温度変化を求めた。6時間の間に各部の温度が約1℃上昇し、またブロワーの風量と差圧が若干上昇しているが、とくに異常は認められなかった。なお各所の温度の上昇は試験用チェンバーの内部温度が、チェンバー外部の暖房によって上昇したことによる。

繰り返し発停試験では、5秒間On、5秒間Offの10秒サイクルの発停繰り返し試験480回（80分間）を行った。各所の温度については、加圧当初に乱れがあったが、約20分間を経過すると安定状態に移行し、その後は同一傾向で収束する傾向を見せた。図7に一回のOn-Offサイクル時の所要電力と差圧の変化を、大気圧と4ATAの

場合について示した。4ATAの場合、大気圧に比較して運転時の電力は僅かに増加しているにすぎないが、起動時のピーク電力は70%程度増加している。

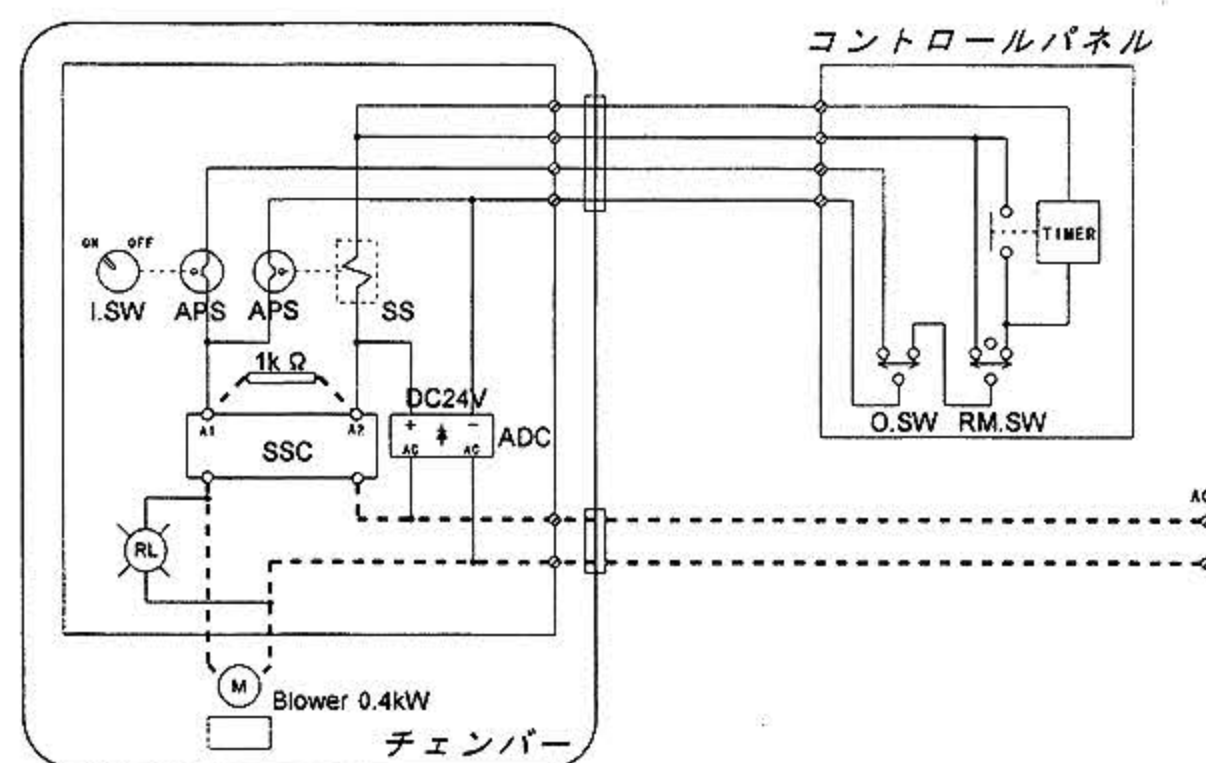


図6 4ATAでのブロワー発停試験に用いた电路系統図
I.S.W : 内部On-Offスイッチ. APS : アプローチスイッチ. ADC : AC-Cコンバーター. SS : 発停試験用ソレノイドスイッチ. O. SW : 外部On-Offスイッチ. RM. SW : On-Off繰り返し試験用遠隔スイッチ.

Fig. 6 System diagram of the electric powered blower and high voltage circuit at the experiment under 4ATA air environment. I. SW : Inside on-Off switch. APS : Approach switch. ADC : AC-DC converter. SS : Solenoid switch for on-Off test. O. SW : Outside on-Off switch. RM. SW : Remote switch for on-Off cycle test.

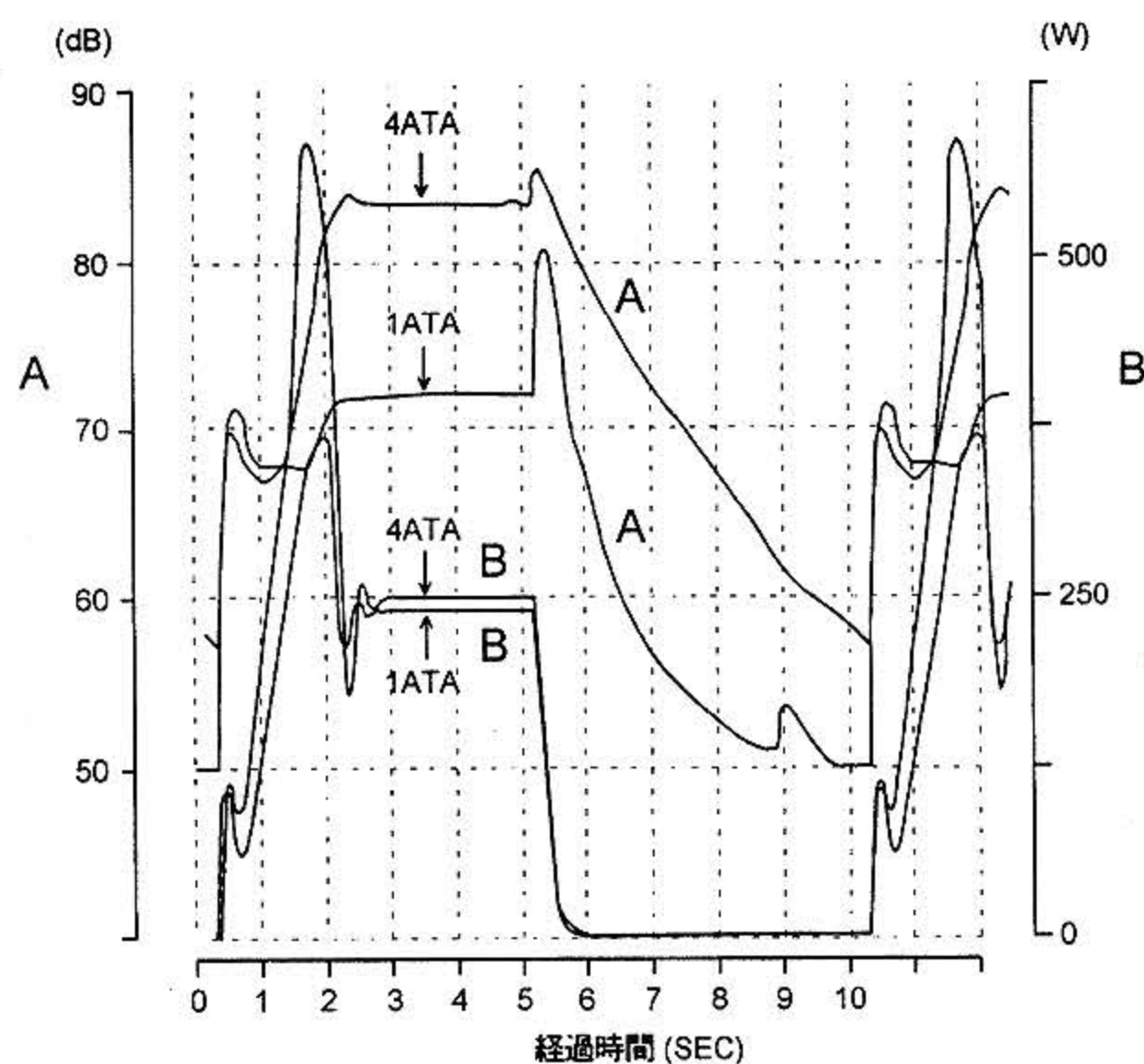


図7 一回のOn-Offサイクル時の所要電力と差圧の変化
A : 騒音レベル. B : 消費電力

Fig. 7 The result of consumed electric power and pressure difference at the outlet of blower in one on-off cycle. A : Noise level, B : Consumed electricity.

表4 電動ブロー、アプローチスイッチ、ソリッドステートコンダクターの主要目

Table 4 Principal particulars of electric driven blower, approach switch and solid state conductor.

項目	要目・仕様
ブロー	
型式	ターボブロー, HB 6A/1. (株) 武藤電機製
風量	60m ³ /hr
差圧	1,200mmAq
モーター	AC 100V, 50Hz, 0.4kW AC 誘導電動機
近接スイッチ	
型式	E2E-X2D, 富士電気(株)製
検出距離	2mm±10%
検出物体	磁性金属
電源電圧	DC 12-24V
制御出力	3-100mA
ソリッドステートコンダクター	
型式	SS101-3Z-D3, 富士電気(株)製
主回路容量	AC 100-140V, 10A
操作電圧	DC 5-24V
入力インピーダンス	2.4kΩ

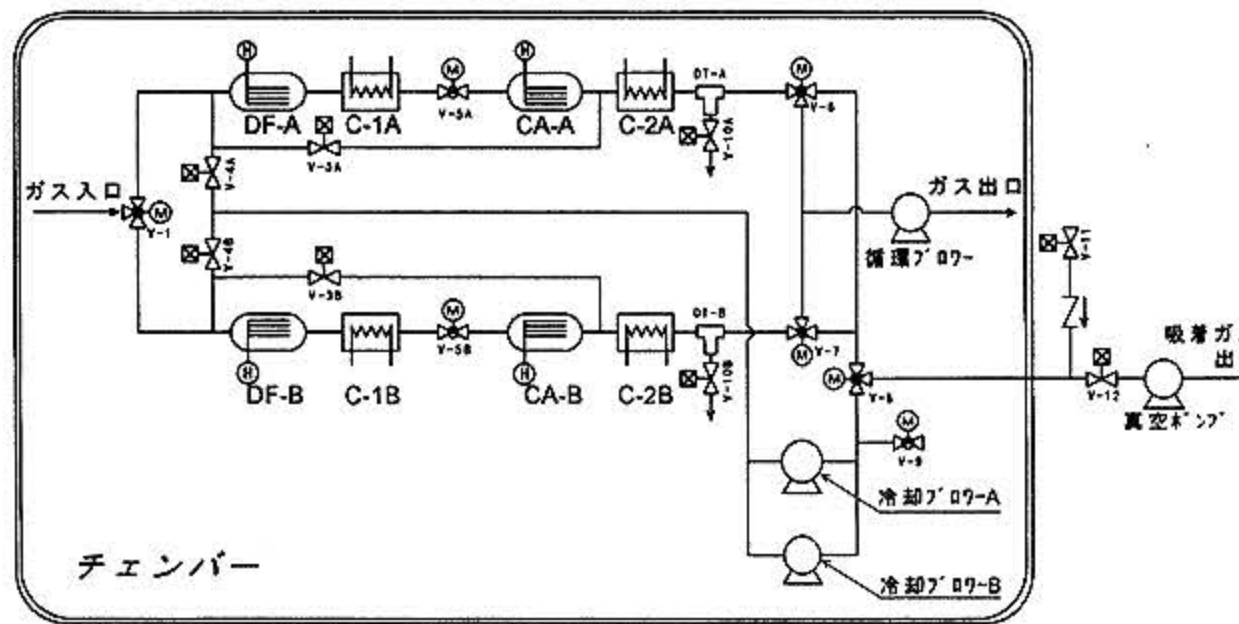


図8 HECS の炭酸ガス除去装置の構成
DF-A, B : 除湿筒. C-1A, 1B : クーラー. CA-A, B : 炭酸ガス吸着筒. C-2A, 2B : クーラー.

Fig. 8 Scheme diagram of the prototype HECS
DF-A, B : Dehumidification canister. C-1A, 1B : Cooler. CA-A, B : Carbon dioxide adsorption canister. C-2A, 2B : Cooler.

3.4 HECSの炭酸ガス除去装置の試作

以上の各種検討結果をもとに、MSゼオラム F-9 (13X) を吸着剤として用いる炭酸ガス除去装置を設計した。構成を図8、主要目を表5に示した。

装置の基本要求性能として、4 ATAの窒素・酸素飽和潜水装置に居住する2名が呼出する炭酸ガスを連続して除去できる性能とした。全体は除湿筒2基(A, B), 吸着筒2基(A, B), 循環ブロー1基, 冷却用ブロー2基, 真空ポンプ1基からなる。除湿筒Aと吸着筒Aが炭酸ガスの吸着を行っている間、他の除湿筒Bと吸着筒Bは再生操作を行う。両者を定期的に切り替えることで連続使用を行う。切り替えは3時間ごと程度を想定した。

表5 HECS用炭酸ガス除去装置の主要目
Table 5 Principal particulars of the HECS.

項目	主要目
型式	4ベッドモレキュラシーブ型圧カスイング・加熱式
目的	連続自動制御型炭酸ガス除去
切り替え時間	炭酸ガスの10%破過時間を目安とする
CO ₂ 除去性能	43.6 NI/hour (2人用)
使用環境条件	1 - 4 気圧. 空気または窒素酸素
CO ₂ 制御条件	上限 0.005atm
除湿筒	数量 : 2 寸法 : 外径300mm, 高さ680mm MSゼオラム A-3 : 18.6kg ヒーター : 4 kW
炭酸ガス吸着筒	数量 : 2 寸法 : 外径300mm, 高さ600mm MSゼオラム F-9 重量 : 21.4kg ヒーター : 3 kW
循環ブロー	0.4 kW x 1
冷却ブロー	0.4 kW x 2
冷却水量	6.8m ³ /hr

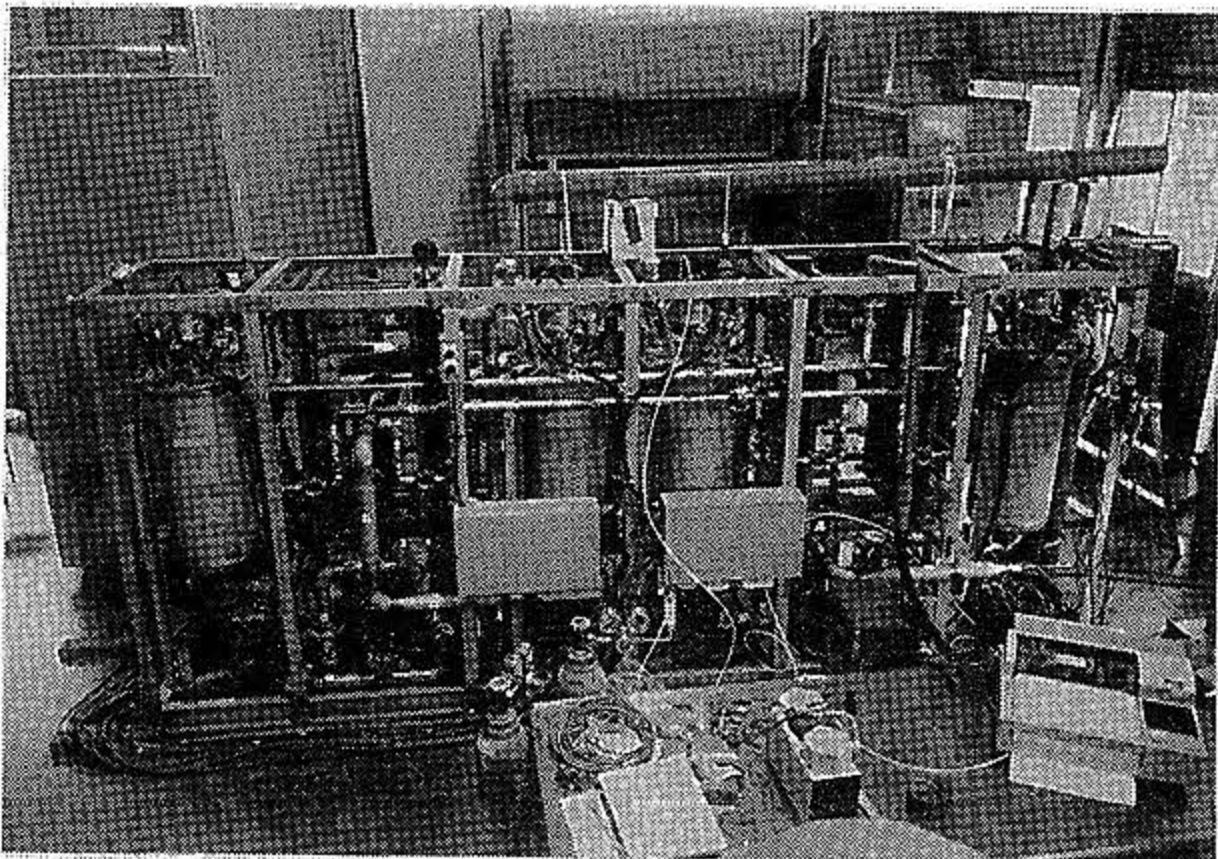


図9 HECS用炭酸ガス除去装置のプロトタイプ
Fig. 9 Prototype HECS

炭酸ガスの吸着状態では、チェンバーの環境ガスは除湿筒、吸着筒、ブローを通して再度チェンバーにもどる。再生時には、まず除湿筒と吸着筒を大気圧まで減圧する。次に電気ヒーターで除湿剤と炭酸ガス吸着剤を加熱する。加熱の後期には除湿筒と吸着筒を真空ポンプで減圧する。その後、冷却水と冷却用ブローによって除湿剤と炭酸ガス吸着剤を常温まで冷却して再生が完了する。

現在、図9に示したプロトタイプが完成し、海洋科学技術センターの潜水シミュレーターの内部に装備され、運転試験と改良試験とが予定されている。

4 まとめ

飽和潜水装置を運用するうえでは、加圧段階や減圧段階のように、微妙な圧力制御やガス組成の変化を伴う場合には、専門の技術者が最新の注意をもって対処するのは当然である。しかし温度・湿度・有害ガスの除去といった、一定の値の保持や許容値以下に制御するといった項目は、技術的に可能であれば、オペレーターの操作項目から外すことが必要である。

著者らは、水深30mまでの範囲で用いる、窒素・酸素飽和潜水用のハビタットを想定し、全自動型の環境制御装置の開発を進めてきた。この目的は、海中研究のための狭いハビタットのなかで、研究者たちが、その生命維持のために、必要以上の配慮をせずに生活できること、そして、内部の環境が静穏かつ清浄に保たれることである。

環境制御装置HECSでは、炭酸ガス吸収装置に再生利用型のモレキュラシーブスを用いることで、電力と冷却水さえ供給すれば、何らの操作もすることなく連続運転が可能なシステムの試作に成功した。

さらに、循環ブロワーに電動モーター作動型ブロワーを利用することで、静粛性を高めることができた。その開発の過程で、高圧下で100Vの電力を安全に用いる技術の開発が必要となった。そこで、100Vの電動モーター作動型ブロワーを高圧下のスイッチによりOn-Offさせる方式として、ソリッドステートコンダクタを近接スイッチで作動させる回路設計を行った。

今後、プロトタイプのHECSを用い、大気圧そして高圧環境で各種の評価試験と必要に応じた改造が行われる計画である。本研究によって、将来的には実機の製作、さらには、ヘリウム・酸素用装置の開発等により、飽和潜水の環境制御操作が急激に改善されることを期待したい。

本研究の実施にあたっては、川崎重工業株式会社の全面的な協力を賜った。関係各位の努力に敬意を表します。

参考文献

- 1) 日本海事協会：潜水装置規則。日本。(1994)
- 2) Okamoto, M.; Yamaguchi, H.; Noguchi, T. and Hama I.: Fundamental study on carbon dioxide absorber for nitrox saturation diving system. Proceedings of Int. Meeting on Hyperbaric and Underwater Medicine, 491-493. (1996)
- 3) Okamoto, M.; and Yamaguchi, H.: Development

of Prototype Hyperbaric Environmental Control System (HECS) for Nitrox Saturation Diving System. Diving and Hyperbaric Medicine. Proc. 23rd EUBS Congress, 242-250. (1997)

- 4) 山口仁士・升田幹也・小黑 至・岡本峰雄・毛利元彦：4気圧空気環境における交流電源の安全な仕様に関する試みについて，JAMSTECTR, 36, 63-70. (1997)
- 5) Dams, R. A. J. ; Leppard, C. J. and Martin T. W.: Air purification systems for submarines and their relevance to Spacecraft. Proceedings of the 4th European Symposium on Space Environmental and Control Systems, 493-497. (1991)
- 6) Shadle, T. and Daley : T. U. S. Navy Submarine Life Support Systems. 21st Int. Co. on Environmental Systems, pp10. (1991)
- 7) Carlson, H. A. and Sexauer, R. N. Submarine Advanced Life Support System. 21st Int. Co. on Environmental Systems, pp6. (1991)
- 8) Gentry, G. J. and Kay, R. : Space station freedom carbon dioxide removal flight design. 23rd Int. Co. on Environmental Systems, pp16. (1993)
- 9) Samsonov, N. M. et al.: A complex of systems for oxygen recovery aboard a manned space station. 23rd Int. Co. on Environmental Systems, pp6. (1993)
- 10) Hart, J. M. et al. : Comparison of Metal Oxide Adsorbents for Regenerable Carbon Dioxide and Water Vapor Removal for Advanced Portable Life Support System. 21st Int. Co. on Environmental Systems, pp10. (1991)
- 11) 日本高気圧環境医学会：高圧酸素治療の安全基準。日本。(1995)
- 12) ABS: Rules for building and classing underwater vehicles, systems, and hyperbaric facilities. American Bureau of Shipping, U. S. A., (1990)
- 13) DNV: Rules for certification of diving systems. Det Norske Veritas, Norway, (1988)

(原稿受理：1998年5月27日)