

超酸化カリウム (KO₂) を用いた潜水調査船用 生命維持装置の基礎研究 (その1)

松本文彬*¹ 竹内正敏*¹ 安藤久司*¹
藤森紘明*² 木村 朗*² 笠原幹夫*³

現在「しんかい 2000」のライフサポート時間は80時間であるが、米国のMTS (Marine Technology Society) 勧告では7日間となっている。このMTS勧告を満足するため、また、生命維持装置の小型軽量化を図るため、従来の酸素(O₂)ポンペによる酸素供給および水酸化リチウム(LiOH)による炭酸ガス(CO₂)除去の方式に代るものとして、炭酸ガスを吸収し、酸素を発生する超酸化カリウム(KO₂)に着目し、昭和57年度から5年計画で研究を行っている。本稿では3年間の研究成果として、超酸化カリウム(KO₂)の特性等について中間報告する。

Basic Study of the Life Support System Using Potassium Superoxide (KO₂) for Submersible (Part 1)

Fumiaki Matsumoto *⁴ Masatoshi Takeuchi *⁴ Hisashi Ando *⁴
Hiroaki Fujimori *⁵ Akira Kimura *⁵ Mikio Kasahara *⁶

The life-support time of the present "SHINKAI 2000" is 80 hours, however, MTS recommends that this be extended to 7 days.

In order to meet the MTS' s recommendation and to make the life-support system more compact, for 3 years we have studied, using a potassium superoxide (KO₂) life-support system in place of the O₂ supply system of O₂ bottles and of a CO₂ removal system using LiOH. (KO₂ has CO₂ removal and O₂ generating characteristics.)

This report represents the interim report of the results on the past 3-year study of the KO₂ characteristics.

*¹ 深海開発技術部

*² 川崎重工業(株)

*³ 川重防災工業(株)

*⁴ Deep Sea Technology Department

*⁵ Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

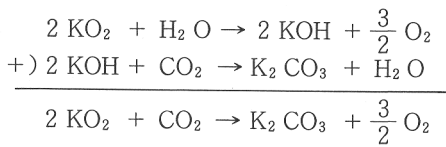
*⁶ Kawasaki Safety Service Industries, Ltd.

1. はじめに

潜水調査船「しんかい 2000」の乗員3名は潜航時間の8時間を耐圧殻内径2.2 m球の密閉区画内で活動している。このため、この密閉区画は、酸素ポンプ手動操作による酸素分圧制御、キャニスタに詰めた水酸化リチウム (LiOH) による炭酸ガス分圧制御および酸素 (O₂)、炭酸ガス (CO₂) の局部偏在防止のための1時間に約4回の大気循環ならびに脱臭剤、除湿剤で環境制御をしている。

従来から、潜水船内の環境制御はおおむね、この方式によっているが、近年米国で超酸化カリウム (KO₂) による方式について研究がなされているとの情報がある。

超酸化カリウムは一つの薬剤で O₂ を発生し、かつ、CO₂ を吸収するという極めて好ましい特性を有している。



しかしながら、KO₂ の反応が不安定で長時間の使用に適さない等の理由で、現在は消火作業用の個人装備呼吸保護具に使用されている程度である。これらの問題点を解決すれば、KO₂ を用いた装

置は「しんかい 2000」のライフサポート時間80時間をベースに試算すると表1のように重量上のメリットが大きい。

潜水船への搭載機器は小型軽量化に努める必要があることおよび米国MTS (Marine Technology Society) のライフサポート時間を潜航時間+7日間とする勧告も考え合せ、潜水船用のKO₂を用いた生命維持装置の研究開発を表2のように5年計画で行うこととした。

本稿では、昭和57年~59年にかけての成果を以下報告する。

2. KO₂ 剤の特性調査

昭和57年度には主として既存KO₂剤について通気風量、温度、湿度、CO₂濃度を変えてKO₂反応 (O₂発生、CO₂吸収) を試験調査し、KO₂ 剤の特性を把握した。

2.1 試験要領

供試KO₂剤は既存の純度約79%、約7 mm立方体の粗粒のA₁剤およびA₁剤を約3~4 mm立方体にした細粒のA₂剤約400 g / 1回をキャニスタに詰め、各2時間の通気試験を行った。A₁剤、A₂剤の性状を表3に示す。

試験は温湿度を試験時間内一定に保持するため、恒温恒湿室内で行い、図1に示す試験装置で通気

表1 KO₂方式による「しんかい 2000」生命維持装置の重量試算

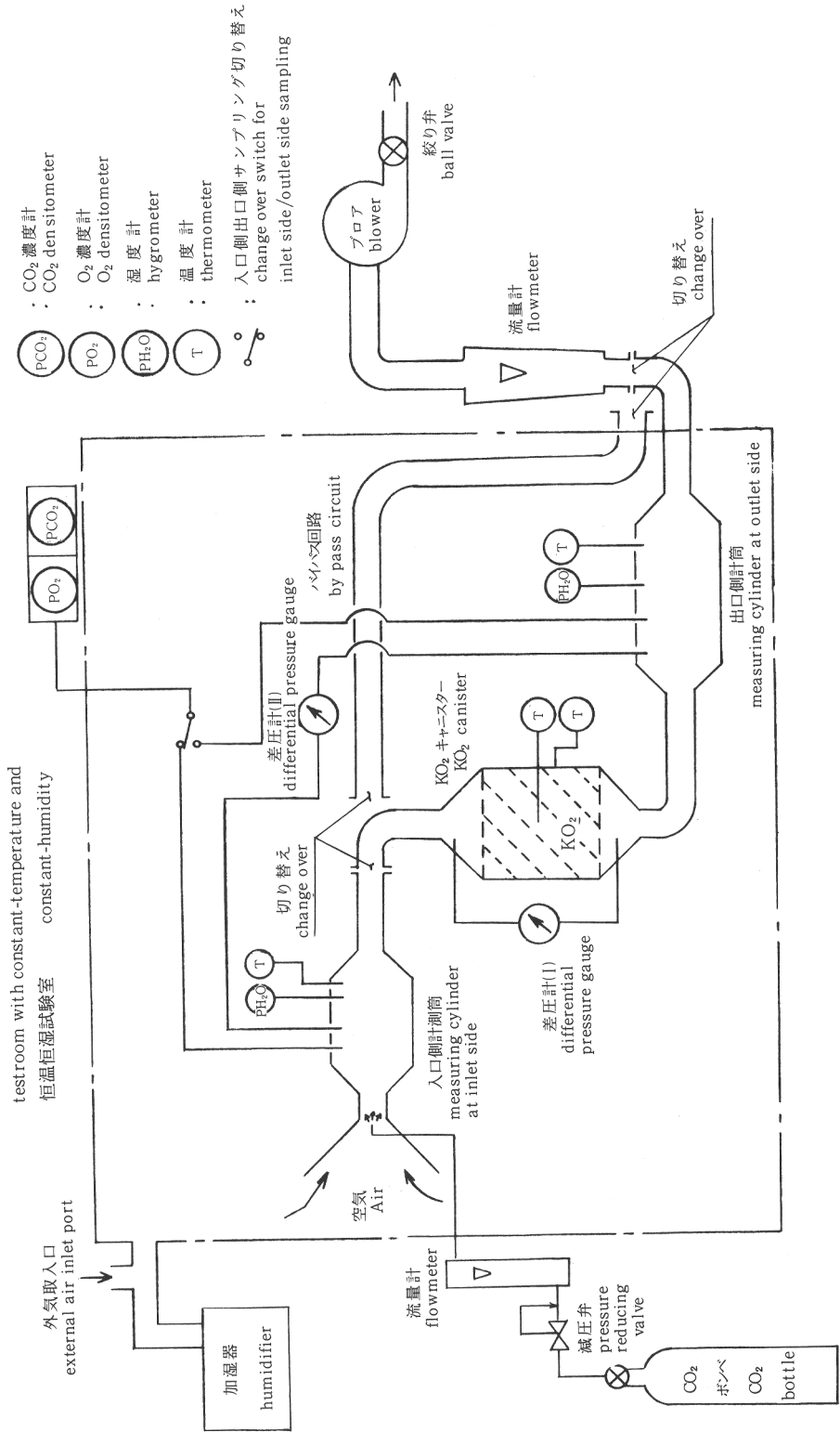
Estimated weight of the life support system using potassium superoxide (KO₂) for 「SHINKAI 2000」

「しんかい 2000」の現状	O ₂ ポンベ 100 kg	+	LiOHキャニスタ 32 kg	=	132 kg
KO ₂ 、LiOHによる本研究装置	KO ₂ キャニスタ 67 kg	+	LiOHキャニスタ 7 kg	=	74 kg

表2 KO₂ を用いた潜水船用生命維持装置の研究開発計画

Study schedule of the life support system using potassium superoxide. (KO₂) for submersible

年度	57	58	59	60	61
研究項目	KO ₂ の特性調査 及び選定		KO ₂ 、LiOH 制御法の検討	「しんかい2000」を模擬 した密閉区画中の性能試験	



- PCO₂ : CO₂ 濃度計
: CO₂ densitometer
- PO₂ : O₂ 濃度計
: O₂ densitometer
- PH₂O : 湿度計
: hygrometer
- T : 温度計
: thermometer

○ 切り替え : 入口側/出口側サンプリング切り替え
 inlet side/outlet side sampling

図 1 KO₂ 特性試験系統図
 System diagram for KO₂ characteristic test

表3 供試 KO_2 剤物性
Physical properties of KO_2 samples

項目 Item	57 年度 (1982)		58 年度 (1983)			
	A ₁	A ₂	A ₃	B	C	D
形状 Shape	顆粒状					板状
粒度(メッシュ) Grain size (Mesh)	粗 (2.5~4)	細 (3.5~8)	粗 (2.5~4)		細 (4~8)	$\frac{\text{mm}}{101} \times \frac{\text{mm}}{101}$ $\times 3.2$
KO_2 純度 (%) KO_2 purity (%)	78.6 ~ 78.8		81.9	83.2	83.4	83.4
かさ比重 Bulk density (Specific gravity)	0.543 ~ 0.548		0.608	0.512	0.516	1.02
成形圧力(拵) Moulding pressure	2 P			P		1.5 P
反応促進剤 Reaction accelerator	無			有		

(注) 成形圧力の記号Pは成形圧力の単位を示し、 KO_2 剤A₁~A₃を基準とし2Pとしている。

風量(50, 100, 25 ℓ /min), 温度(20, 10, 35 $^{\circ}$ C), 湿度(50, 30, 80%), CO_2 濃度(0.7, 0.4, 1.4%)を適宜組合せて行い、 KO_2 キャニスタの入口側, 出口側の通気の温湿度および O_2 , CO_2 濃度ならびに KO_2 キャニスタの通気抵抗, 温度を計測した。詳細は表4に示す。

2.2 試験結果および考察

試験結果から KO_2 剤の次の特性がわかった。

- (1) CO_2 吸収量と O_2 発生量の比は理論上は1:1.5であるが, 通気風量, 温湿度の条件で1:(1~2)とばらつく(図2参照)。
- (2) O_2 発生量, CO_2 吸収量は KO_2 キャニスタ入

口の温湿度, 通気風量, CO_2 濃度が高い方が高くなる(図3および図4参照)。

これは, CO_2 の通過風量および H_2O 等が増加し反応を促進するためと思われる。

- (3) CO_2 吸収率は温湿度が高い方が高くなる。

しかし, CO_2 濃度を一定とし通気風量を増した場合, CO_2 吸収率は低下する。また, 通気風量を一定として CO_2 濃度を増した場合も CO_2 吸収率は低下する。

これは CO_2 通過流量が多過ぎて, KO_2 と反応しないで通過してしまう CO_2 が増えるためと考えられる(図3および図4参照)。

表 4 KO₂ 特性試験の試験条件
Test conditions for KO₂ characteristic test

項目 Item	昭和 57 年 度 1982												昭和 58 年 度 1983																				
	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13	-14	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7												
試験 No. Test No	57												58																				
区分 Class	A ₁ (粗 粒)												A ₂ (細 粒)							A ₃ (粗 粒)													
KO ₂ 剤の種類 Kind of KO ₂ agent	A ₁ (粗 粒)												A ₂ (細 粒)							A ₃ (粗 粒)													
通気風量 (ℓ/min) Permeability	25	50	100	50									100							25							450						
キャニスタ入口空気CO ₂ 濃度 CO ₂ density at inlet side of canister	0.7			0.4	1.4	0.7									0.7							0.7											
キャニスタ入口空気湿度 Humidity at inlet (%) side of canister	50			30			80			50			30			80			50			50			80			50			50		
キャニスタ入口空気温度 Air temperature at (%) inlet side of canister	20			10			35			20							20			35			20			35			20				
キャニスタKO ₂ 充質量 (g) in canister	400												400							400							8000						
試験時間 (hr) Test time	2												2							10													
試験回数 Number of tests	2												1							2							1						

(4) KO_2 剤の粒度の違いによる反応の差は O_2 発生率および CO_2 吸収率とも、粒度の小さい方が高い。

これは粒度が小さい方が表面積が大きく、反応面積が広がるためと考えられる。しかし、 KO_2 を

細粒にすると、通気抵抗が時間の経過とともに大幅に増加し、特に湿度の高い場合顕著である。

これは反応に伴い生成した潮解物が固着して、粒子間の隙間を塞ぐためと考えられる。

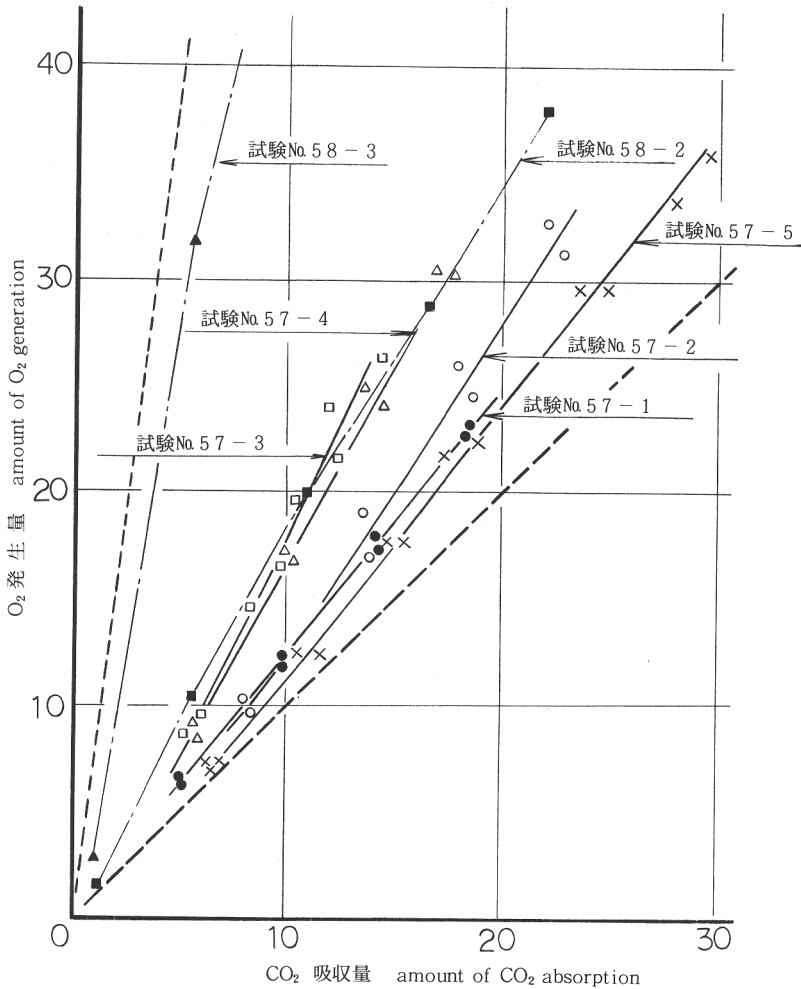


図2 CO_2 吸収量と O_2 発生量の関係
Relationship between CO_2 absorption and O_2 generation

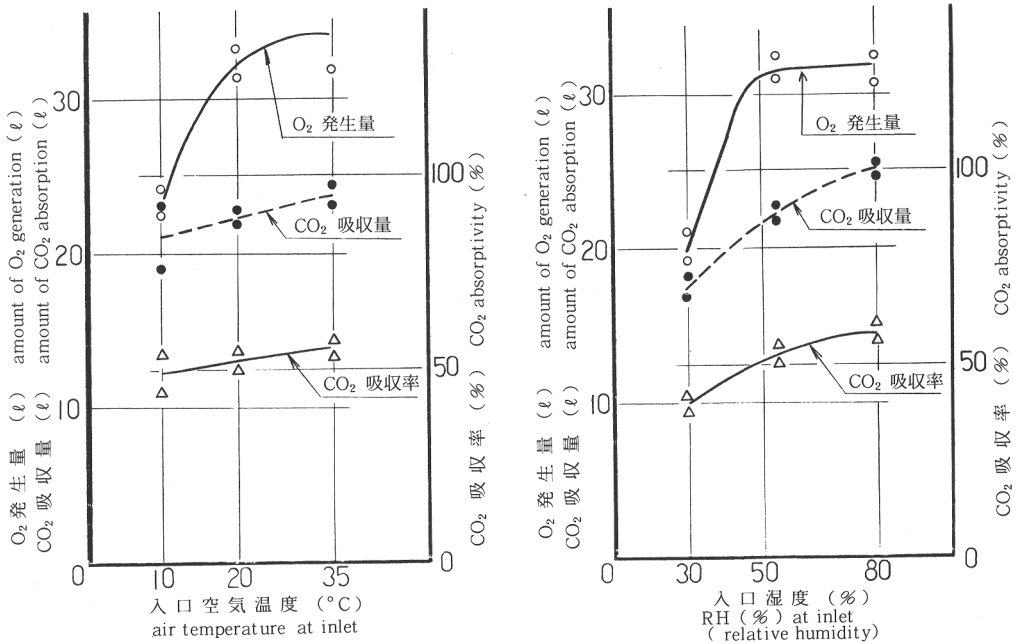


図3 入口空気温度および湿度のO₂発生量およびCO₂吸収量に対する影響
 (通気風量: 50 l/min, 入口CO₂濃度: 0.7%, KO₂粒度: 粗, 試験時間: 2hr)

Influence upon O₂ generation and CO₂ absorption through air temperature and humidity at inlet
 (Permeability: 50 l/min, CO₂ density at inlet: 0.7%, KO₂ grain size: rough, test time: 2hr)

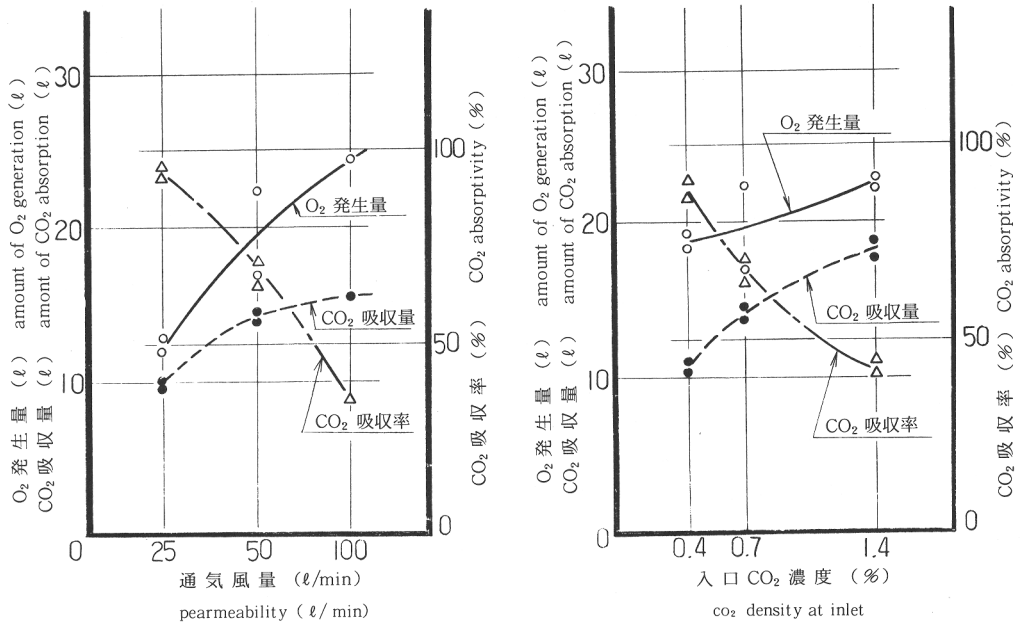


図4 通気風量および入口CO₂濃度のO₂発生量およびCO₂吸収量に対する影響
 (入口空気温度: 20°C, 入口湿度: 50%, KO₂粒度: 粗, 試験時間: 1hr)

Influence upon O₂ generation and CO₂ absorption through permeability and CO₂ density at inlet
 (Air temperature at inlet: 20°C, humidity at inlet: 50%, KO₂ grain size: rough, test time: 1hr)

3. 改良 KO₂ 剤の特性調査および選定

昭和57年度の試験結果に基づき、昭和58年度には、KO₂ の反応効率を向上させ、かつ、KO₂ キャニスタの通気抵抗を低減させるため、改良 KO₂ を製作し、その特性を試験調査した。また昭和57年および58年度の成果を踏まえ、潜水船の生命維持装置用の KO₂ を 1 種類選定し、10時間の試験を行って、その性能を確認した。

なお、10時間の試験の10時間というのは、「しんかい 2000」の潜航時間 8 時間の 1 潜航分を配慮したことおよび10時間用 KO₂ キャニスタを開発すれば、それより長時間用としてはこのキャニスタを複数個所要量持ち（たとえば80時間用としては8個）、カトリッジのように取り替え使用すればよく、潜水船用生命維持装置の開発そのものであることによる。

3.1 改良 KO₂ の特性試験要領

供試 KO₂ は、反応を促進するため触媒を添加し、かつ、薬剤の内部まで反応がスムーズに進展するように、成型圧力を従来の 1/2 とした約 7 mm の立方体の B 剤（粗粒）および 3～4 mm 立方体の C 剤（細粒）、ならびに反応表面積を広くし、かつ、内部まで反応させるため薄い板状とし触媒を添加した D 剤とした。また、昭和57年度のデータと比較するため、純度を若干アップした点を除けば A₁ 剤相当の A₃ 剤を用いた。これらの KO₂ 剤約 400 g/1 回をキャニスタに詰め、各 2 時間の試験を行った。

図 1 に示す試験装置で、通気風量 25 l/min、CO₂ 濃度 0.7 %、温度 20 および 35 °C、湿度 50 および 80 % の入口空気条件で各 1 回の試験を行い、昭和57年度と同項目の計測を行った（詳細は表 4 参照）。

3.2 改良 KO₂ の特性試験結果

および考察

試験結果から昭和57年度との比較で次のことが言える。

(1) 触媒有の粒状 KO₂ の B および C 剤について、CO₂ 吸収率は高くなる（図 5 参照）。

ただし、通気湿度の高い場合、通気抵抗が大幅に増加する。

これは触媒有 KO₂ の潮解が激しく、潮解物固着で粒子間が閉鎖するためと考えられる。

また、O₂ 発生流量も高くなる。しかし、通気湿度が高い場合、試験初期に急激に O₂ を発生する

（図 6 参照）。

この時の O₂ 発生流量 / CO₂ 吸収流量は約 5 となり、人間の O₂ 摂取流量 / CO₂ 排出流量に比べ、大幅に O₂ 過多となる。

(2) 触媒有板状 KO₂ の通気抵抗は小さくなり、CO₂ 吸収流量および O₂ 発生流量は図 5 および図 6 に示すよう、粗粒 A₃ とほとんど同じである。

ただし、通気湿度の高い場合、O₂ 発生流量は試験初期に急激に高くなり、時期の経過とともに低下する。試験後の外観では一部潮解している。

3.3 KO₂ 剤の選定

以上の試験結果を検討した結果、本装置用の KO₂ 剤としては、通気温湿度等に対し最も安定した反応をする粗粒 A₃ 剤を選定した。

(1) 粗粒 A₂ 剤や触媒添加の B および C 剤は湿度の影響を大きく受け、反応が急激に進行したり通気抵抗が大幅に増加するため、船内 O₂ および CO₂ 濃度の制御上好ましくなく、かつ、通気ファンの馬力が大きくなることが考えられ、採用し難い。
(2) 板状 D 剤は粗粒 A₃ 程度の性能を有するが、振動および衝撃に極めて弱く取り扱いに難点があることおよびキャニスタへの充填率が粗粒より悪く、キャニスタが大きくなるデメリットがある。
(3) 粗粒 A₃ は細粒または板状に比べると反応はゆっくりしているが、長時間使用の場合は安定した反応が得られ、十分能力を発揮すると考えられる。

3.4 選定 KO₂ 剤の性能試験

選定した KO₂ ・ A₃ 剤 8 kg をキャニスタに詰め、図 1 の装置で通気風量 450 l/min、温度 20 °C、湿度 50 %、CO₂ 濃度 0.7 % として 10 時間連続性能試験を行った。

ただし、6 時間経過時点で通気抵抗が試験開始時の値の約 6 倍以上（約 400 mm H₂O）となりブロワの能力を超えたため、通気風量を減らして試験を続行した。

試験結果を図 7 に示す。この結果次のことが言える。

(1) O₂ 発生流量 / CO₂ 吸収流量は約 1.2 で KO₂ の反応は比較的安定していた。

(2) O₂ 発生量、CO₂ 吸収量は試験開始後 6 時間で理論反応量に対する 75 %、81 % となり、KO₂ 剤の大部分が反応した。

(3) 試験後の KO₂ 剤の外観は空気入口側約 30 mm の厚さの層がモルタル状に潮解し固着していた。これが大幅に通気抵抗を増加させた原因と考えられる。

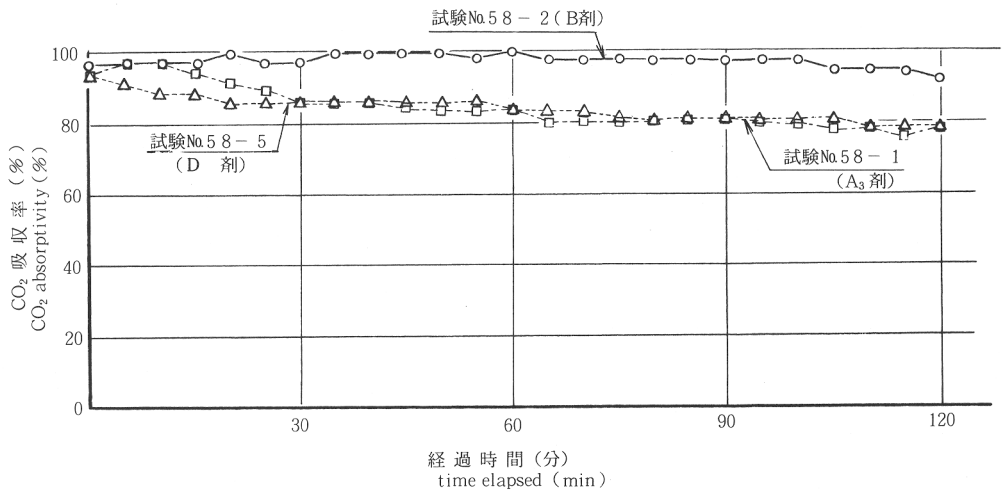


図5 CO₂ 吸収率に対する KO₂ 剤種類の影響
Influence upon kind of KO₂ agent with absorptivity

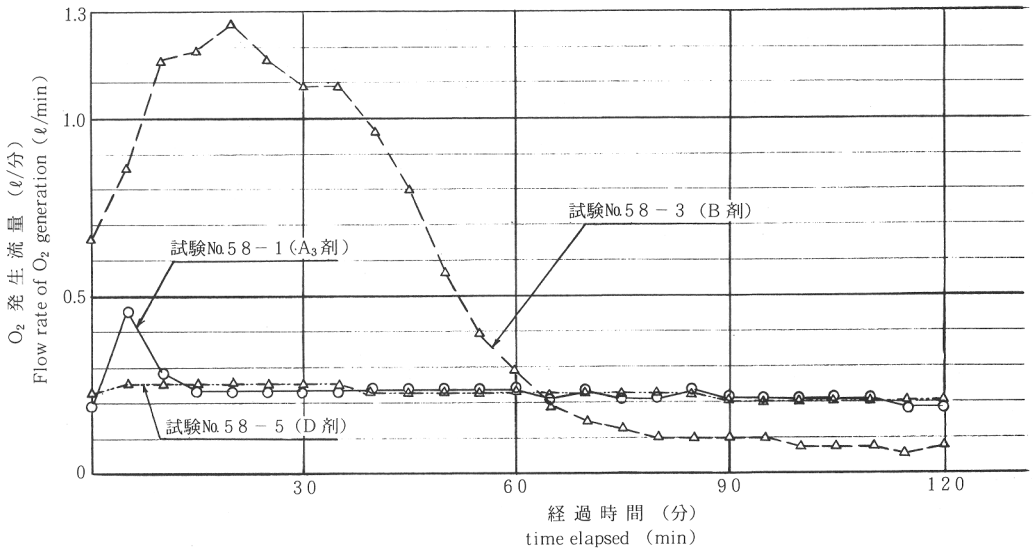


図6 O₂ 発生流量に対する反応促進剤の影響
Influence upon reaction accelerator against flow rate of O₂ generation

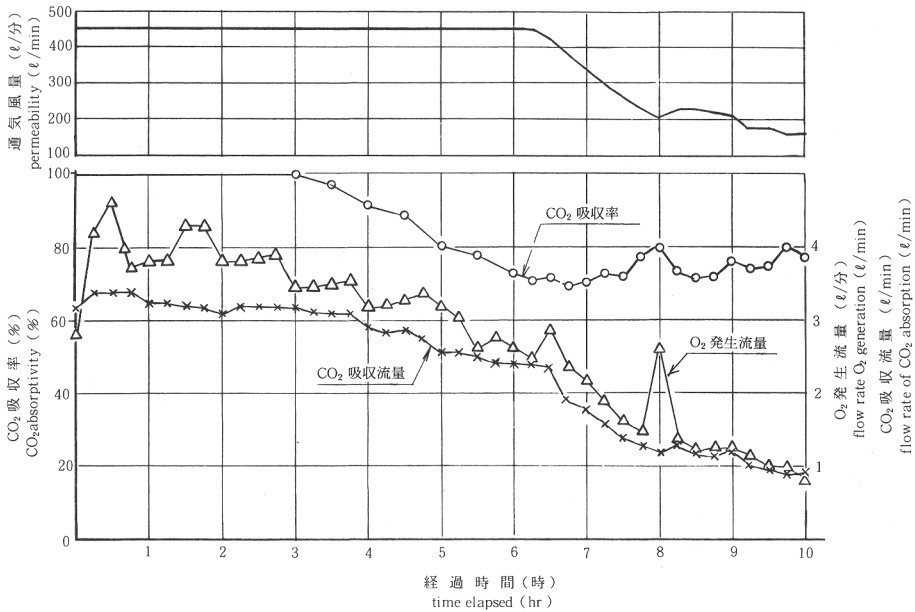


図7 KO₂性能試験結果
Test results of KO₂ performance

4. KO₂ 剤を用いた生命維持装置の 制御方法の研究

KO₂ の反応は人間の呼吸商から考えて酸素過多となるので、KO₂ 剤を用いた生命維持装置では、発生O₂ を正として考えれば、別途水酸化リチウム (LiOH) 等でCO₂ を除去し船内のO₂ およびCO₂ 分圧を正常に制御する必要がある。

昭和59年度にはKO₂ とLiOH兼用時のこれらの制御方法について検討した。

KO₂ キャニスタへ通気し、O₂ 濃度が設定値以上になれば、KO₂ キャニスタへの通気風量を減らし、LiOH キャニスタへ通気してCO₂ を除去することで船内O₂ およびCO₂ 濃度の制御をするための基礎データを試験結果として得ることができた。

また、KO₂ キャニスタの形状は通気抵抗を下げため通気面積を増やし、かつ、通過距離を短縮する構造のものとし、良好な試験結果を得ることができた。

4.1 試験要領

試験装置は図8に示すよう、従来装置のKO₂ キャニスタにLiOH キャニスタを分岐付加したものとし、通気温度20℃、湿度50%、入口CO₂ 濃度0.7%、通気風量350ℓ/minおよび80+270ℓ/min

で10時間連続試験を行った(詳細は表5参照)。

(1) 供試KO₂ 剤はA₃ とし、量は船内環境状態の中で反応が最も低下すると考えられる温度6℃、湿度100%の場合において、乗員3名のO₂ 摂取量26ℓ/hr・man およびCO₂ 発生量22ℓ/hr・manを処理できる約6kgとした。

(2) KO₂ キャニスタへの通気風量は58年度の10時間連続性能試験におけるキャニスタ内空気通過時間と同じになるよう、330ℓ/minとした。

4.2 試験結果および考察

(1) KO₂ キャニスタのみへ通気風量330ℓ/minを10時間連続流した場合の試験結果を図9に示す。

図9から、O₂ 発生流量およびCO₂ 吸収流量は乗員3名用としては十分であるが、O₂ は過多であることがわかる。

(2) KO₂ キャニスタのみへ330ℓ/min、2時間通気後、KO₂ キャニスタへ80ℓ/min、LiOH キャニスタへ250ℓ/min、6時間通気し、その後、KO₂ キャニスタのみへ330ℓ/min、2時間通気した試験結果を図10に示す。

この試験結果に基づき、船内O₂ およびCO₂ 濃度の推定をしたのが図11の予想曲線である。通気風量の変化に伴い、O₂ 濃度がオーバーシュート、

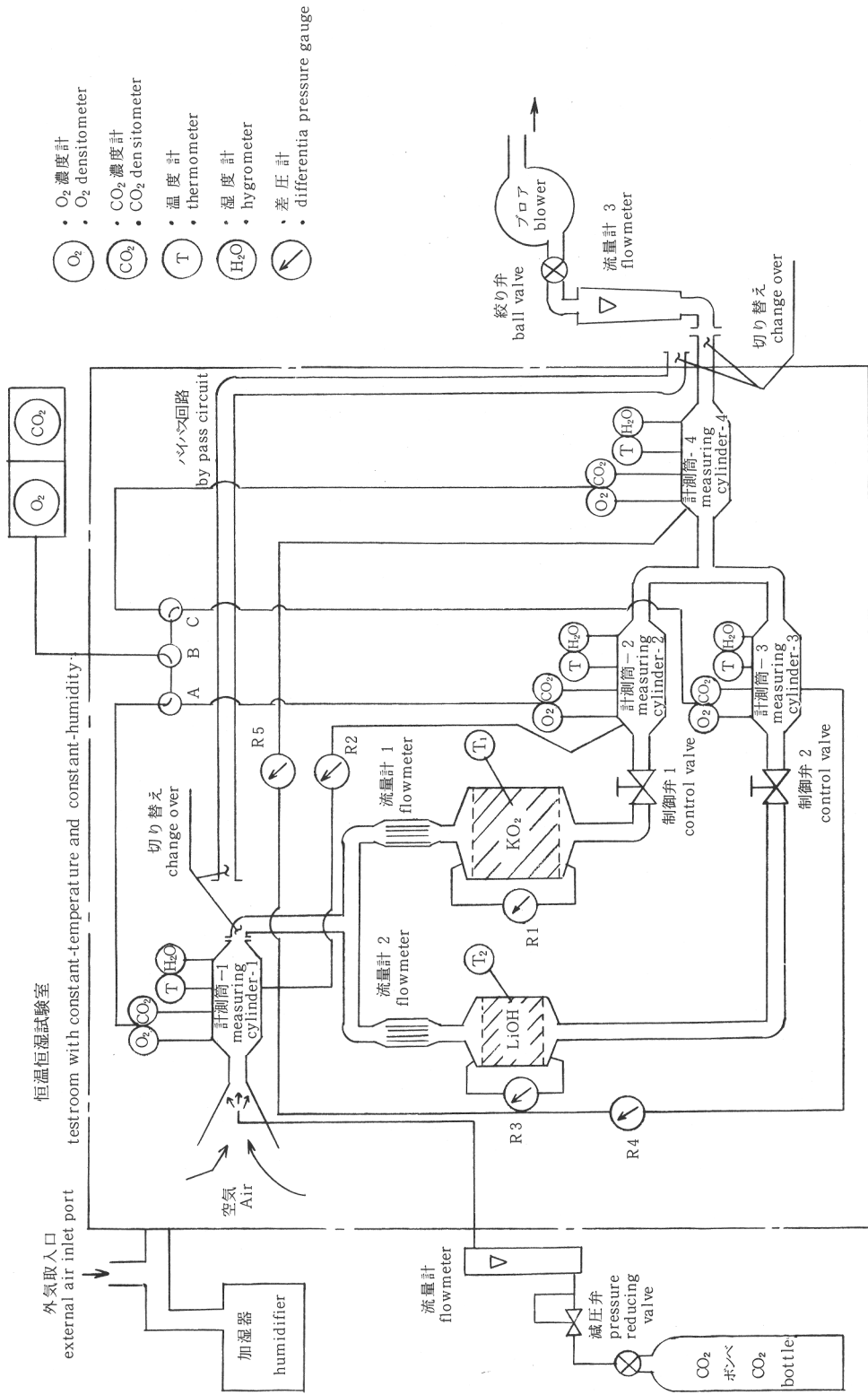


図 8 KO₂ 制御方法の研究試験系統図
 System diagram for controlled reaction test of KO₂

アンダーシュートすることなく推移することがわかる。

なお、 KO_2 キャニスタへの通気風量を絞り、 $LiOH$ キャニスタへ通気しない場合は CO_2 濃度が約3.5%まで上昇する。

(3) KO_2 キャニスタの通気抵抗はほとんど約20 mm H_2O 以下と非常に低い所で安定している。また試験後 KO_2 の外観も、潮解固着現象はほとんどなく、均一な良好な反応をしていた。

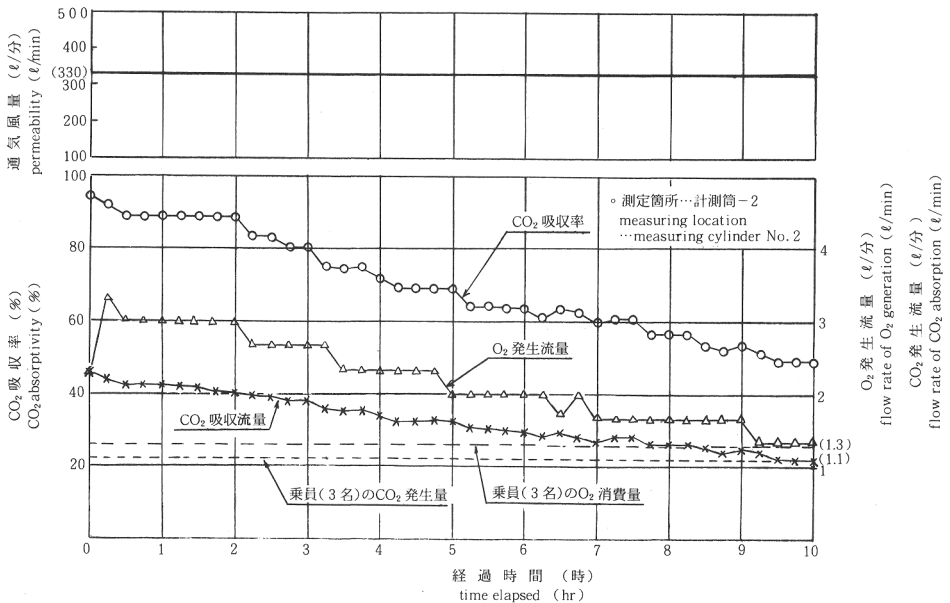


図9 KO_2 制御方法の研究試験結果 (試験No. 59-1)
Test results obtained from controlled reaction test of KO_2 (Test No. 59-1)

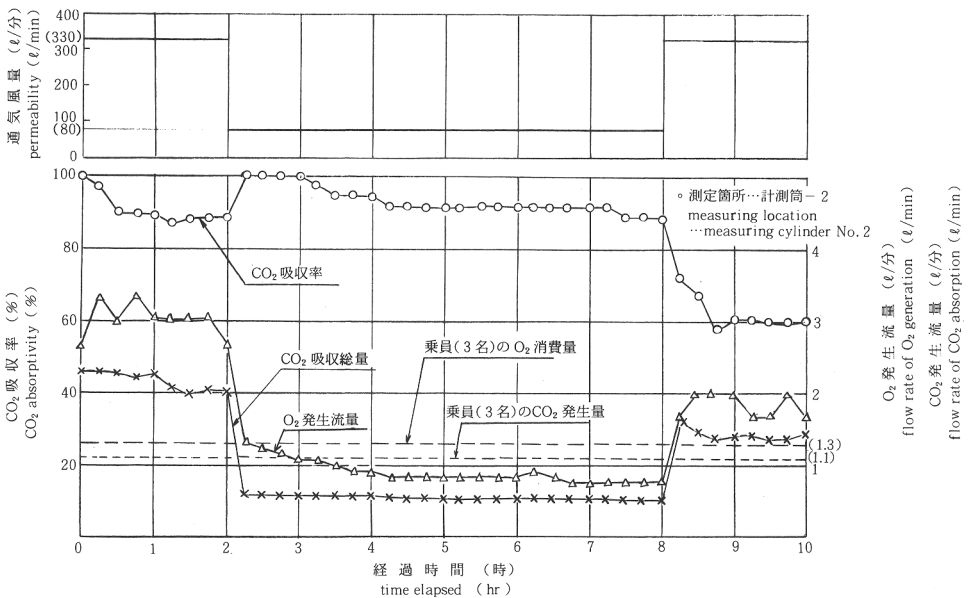


図10 KO_2 制御方法の研究試験結果 (試験No. 59-2)
Test results obtained from controlled reaction test of KO_2 (Test NO. 59-2)

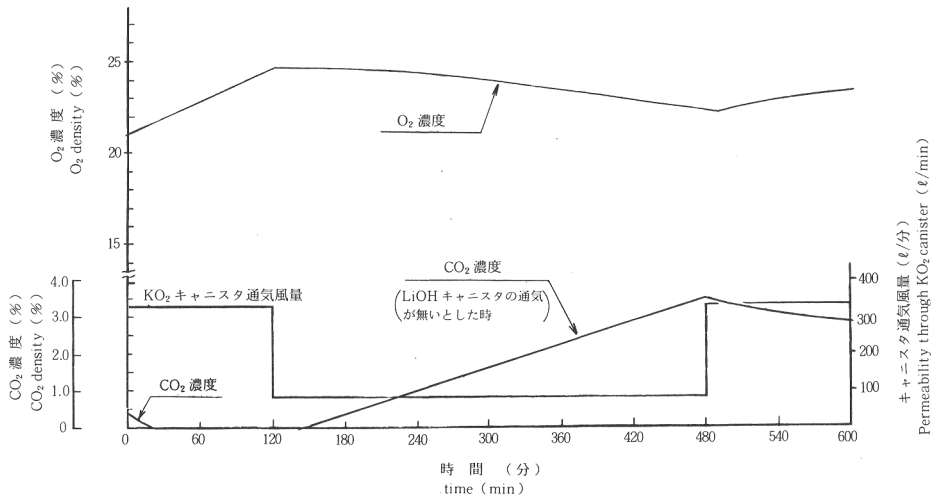


図 11 船内O₂およびCO₂濃度変化(予想)〔試験No. 59-2を基に算出〕

O₂ and CO₂ density variation in ship [Prediction calculated based on Test No.59-2]

表 5 KO₂ 制御方法の研究試験条件

Test conditions with controlled reaction test of KO₂

試験 No. Test No.	59-1	59-2
KO ₂ キャニスタ通気風量(ℓ/min) KO ₂ canister permeability	330	330→80→330
LiOHキャニスタ通気風量(ℓ/min) LiOH canister permeability	—	0→250→0
全体通気風量(ℓ/min) Over all permeability	330	
入口CO ₂ 濃度(%) CO ₂ density at inlet	0.7	
入口温度(°C) Temperature at inlet	20	
入口湿度(%) Humidity at inlet	50	
KO ₂ 量(kg) Amount of KO ₂	6	
LiOH量(kg) Amount of LiOH	—	0.6
試験時間(hr) Test time	10	
試験回数(回) Number of tests	1	1

表6 KO₂を用いた生命維持装置の仕様
Specification of life-support equipment using KO₂

No.	項目 Item		内容 Content	備考
1	循環システム circulation system	循環回路 circulation diagram		
2		循環風量 circulating flow rate	約450 l/min	
3		通気風量 permeability	330 l/min (O ₂ 濃度を上昇させる場合) 80 + 250 l/min (O ₂ 濃度を低下させる場合)	KO ₂ キャニスタのみに通気 KO ₂ キャニスタ: 80 l/min LiOHキャニスタ: 250 l/min
5	制御システム control system	O ₂ 濃度 O ₂ density	計測 measurement	O ₂ センサ 3 個の平均値による計測方式
6			制御 control	KO ₂ キャニスタの通気風量の増減による制御
7		CO ₂ 濃度 CO ₂ density	計測 measurement	CO ₂ センサによる連続自動計測および手動によるサンプリング計測の併設
8			制御 control	LiOHキャニスタへの通気による制御
9	KO ₂ キャニスタ KO ₂ canister	形状 shape	円筒充てん形	
10		KO ₂ 充てん量 amount of KO ₂	6 kg	
11		通気風量 permeability	330 l/min (O ₂ 濃度を上昇させる場合)	
12	80 l/min (O ₂ 濃度を低下させる場合)			
13	LiOHキャニスタ LiOH canister	形状 shape	円柱状充てん形	
14		LiOH充てん量 amount of LiOH	0.6 kg	
15		通気風量 permeability	250 l/min	
16	安全対策		KO ₂ キャニスタを利用した自力呼吸回路を設ける。	

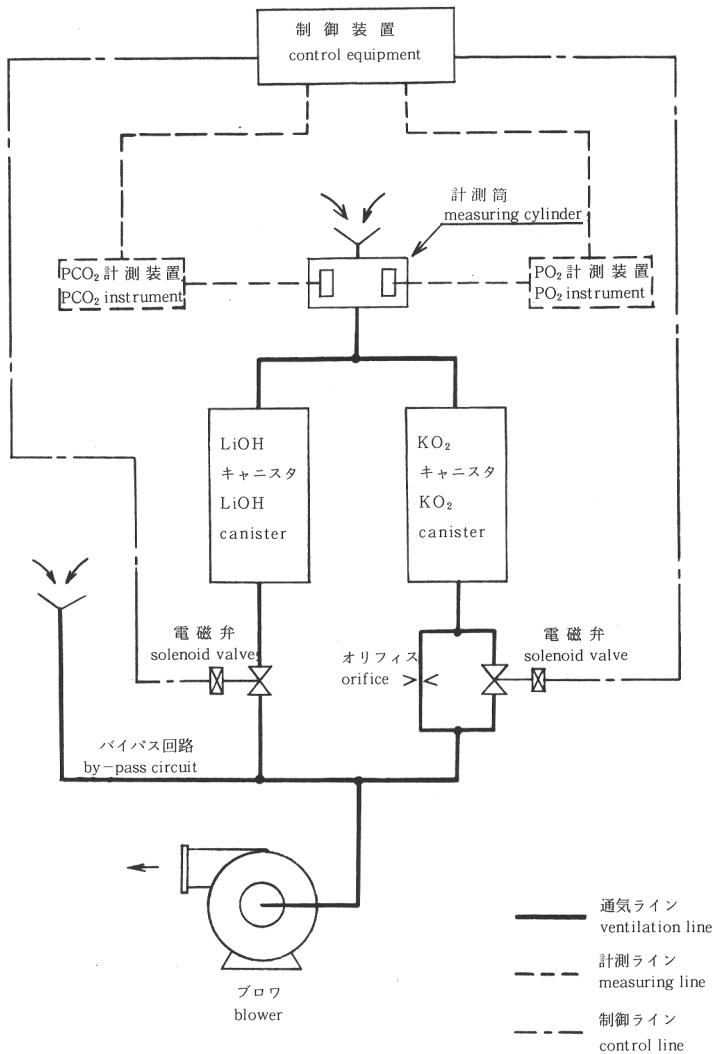


図 12 KO_2 を用いた生命維持装置概略系統図

Schematic diagram of life-support equipment using KO_2

5. 潜水船用生命維持装置全体システムの検討

昭和59年度の研究成果に基づき、 KO_2 を用いた「しんかい2000」用生命維持装置全体システムについて検討した。その結果は所要装置の系統を図12に、また、装置の仕様を表6に示す。

装置は59年度の試験装置（10時間を超す場合は、キャニスタをカートリッジ方式で換装）に、潜水船内換気所要風量の不足分を補うバイパス換気回路を付加したものとなる。

船内 O_2 濃度の制御は O_2 濃度が設定上限に達した所で KO_2 キャニスタ系電磁弁を閉じて80 l/min を KO_2 キャニスタに通気し、 O_2 濃度が設定下限に達すれば同電磁弁を開いて、330 l/min を KO_2 キャニスタに通気させる。また、船内 CO_2 濃度の制御は CO_2 濃度が設定上限になれば、LiOHキャニスタ系電磁弁を「開」としてLiOHキャニスタに通気し、設定下限になれば「鎖」として、LiOHキャニスタへの通気を零として行う。

6. あとがき

本試験研究により、 KO_2 剤の O_2 発生、 CO_2 吸収反応の特性および O_2 ならびに CO_2 濃度の制御法に関する基礎データを得ることができ、また、潜水船用生命維持装置の概要もつかむことができた。今後、詳細な検討を進めるとともに、潜水船相当の密閉区画内で、乗員3名の呼気条件をモデルファイした確認試験等を行い、 KO_2 剤を用いた生命維持装置の性能、信頼性および安全性を研究確認していく予定である。

文 献

- (1) 池田玉治ほか“通気式炭酸ガス吸収装置の開発”, 日本高気圧環境医学会雑誌 7, 1972
- (2) 池田玉治ほか“超酸化カリウム(KO_2)の特性試験について”, 日本高気圧環境医学会雑誌 19, 1984

(原稿受理: 1985年4月19日)