

【技術報告】

# 気体分離膜を利用した 作業潜水用窒素酸素混合ガス製造供給装置の開発

望月 徹<sup>1)2)</sup>, 池田知純<sup>2)3)</sup>, 小林 浩<sup>2)</sup>, 野寺 誠<sup>2)</sup>, 柳澤裕之<sup>2)</sup>

株式会社潜水技術センター<sup>1)</sup>  
埼玉医科大学医学部衛生学部門<sup>2)</sup>  
社団法人日本潜水協会<sup>3)</sup>

空気に比べ高酸素/低窒素濃度とした窒素酸素混合ガスを潜水に用いることは、減圧時間の短縮や在底時間の延長、および潜水者の減圧負荷低減に効果があることが知られている。これらの利点は、減圧潜水を前提とする作業潜水分野でより効果を発揮する。諸外国を中心に行われてきた混合ガス潜水は、呼吸源として多数の高圧ポンプを使用しているが、我が国の作業潜水においては、小型な潜水作業船が多く用いられているため、設備搭載スペースに制約があり、高圧ポンプ方式は適用できない。また、潜水作業効率と安全面から、十分なガス量の確保と作業水深に応じた酸素濃度設定能力が求められる。そこで、我々は、高分子気体分離膜を用いた窒素酸素混合ガス製造装置を開発した。気体分離膜の採用により、空気から酸素成分を抽出した高酸素濃度空気を連続して生成することが可能となり、また酸素濃度設定の高い自由度も実現した。実験室での動作試験で非常に良好な結果が得られたので、現在は実際に潜水作業船に搭載して潜水作業現場での運用試験を行っている。

キーワード 潜水作業, 送気式潜水, ナイトロックス, 減圧, 安全

## Development of an onboard system to produce and supply oxygen enriched air using permeable membrane gas separation method.

Mochizuki T<sup>1)2)</sup>, Ikeda T<sup>2)3)</sup>, Kobayashi K<sup>2)</sup>, Nodera M<sup>2)</sup>, and Yanagisawa H<sup>2)</sup>

DITEC Co., Ltd.<sup>1)</sup>

Department of Health Science & Preventive Medicine, Saitama Medical School<sup>2)</sup>

Japan Dive Association<sup>3)</sup>

With increase of working depth, enriched air nitrox gas (EANx) has become used in underwater construction diving in order to yield longer bottom time or reduce decompression load. Premixed gas mixture is the breathing media in most cases. However, because of limited space on a small diving boat and resultant limited kinds and volume of premixed gas, versatility of diving will be reduced. If breathing media can be manufactured on board and oxygen concentration of breathing gas is controllable at sea, it will certainly be improved. To describe more specifically, for instance, diving time will not be limited, at least, by the available volume of premixed bottom mixture. Also, controllable oxygen concentration will give us a smaller change of equivalent air diving depth even in case of increase of diving depth at site, avoiding unnecessary extension of decompression time.

We developed the oxygen concentration-controllable EANx gas generator on board for underwater construction diving. The reliability and practicability of the generator was evaluated through some bench tests and open sea diving operations.

keywords commercial diving, surface supplied diving, Nitrox, decompression and diving safety

## 1. 背景

我が国では、潜水作業が行われる水深は通常20m以浅を主体とするが、ときには、30m内外の作業を要請される場合がある。この程度の水深における潜水作業は空気潜水が一般的であるが、水深が20mを越える潜水作業では、総潜水時間における減圧時間の割合が急増し、潜水作業者の体力消耗を促進するとともに、作業効率の急落をもたらすことが知られている。また、水深30m付近になると窒素酔いの危険も増大するといわれている。

このような空気潜水の欠点を排除する方法として、混合ガスを用いた潜水技術が欧米諸国を中心に研究されている。潜水深度を30mから浅い範囲に限定すれば、ヘリウムのような高価なガスを使用しない窒素酸素混合ガスの利用が有効であることが各国研究機関(特に、アメリカ海洋大気局:通称NOAA)によって報告されており<sup>1)</sup>、わが国の潜水作業にも適したものであると考えられる。この潜水技術を実際に潜水作業の分野で実用化するためのポイントは、窒素酸素混合ガスの製造および供給方法を如何に行うかという点にある。従来の混合ガス潜水では、使用する混合ガスを多数の高圧容器に充填し、それを供給源としているが、小型な潜水作業船を用いるわが国の作業潜水形態では搭載スペースの問題から適応できない。また行われる潜水作業の性質上、作業水深が比較的短期間で変化していくが、混合ガス潜水の効果を最大限に発揮するためには、潜水深度の変化に応じて酸素濃度を変更していく必要がある。さらに現在の潜水チームが最低限の要員で構成されていることから、混合ガス製造装置の運転に煩雑な操作や時間のかかる調整作業が伴うようでは実用的ではない。そこで我々は、我が国の潜水作業分野で窒素酸素混合ガス潜水技術を実用化すべく、これらの諸条件に適合する潜水作業用混合ガス製造装置の開発研究に着手した。

## 2. 送気式潜水作業用窒素酸素混合ガス製造供給装置に求められる要件

窒素酸素混合ガス製造供給装置の開発に当たり、

Table 1 Required conditions for oxygen enriched air supply system

- |                                                   |
|---------------------------------------------------|
| ①21~40%酸素濃度の混合ガス製造および送気が可能であること。                  |
| ②最大送気量160 ℓ/minの混合ガスが供給できること(水深30mで40 ℓ/minの供給量)。 |
| ③製造されるガスの酸素濃度は、目標濃度に対し±1%の精度であること。                |
| ④酸素濃度および供給量は、長時間安定していること。                         |
| ⑤万一故障が発生した場合でも、何らかの手段で潜水士への送気が確保されること。            |
| ⑥可能な限り小型とすること(潜水士船への搭載を考慮する)。                     |
| ⑦調整および運転操作は、出来るだけ簡便なものとすること。                      |

装置に求められる作業潜水用呼吸ガス供給源としての求められる要件の検討を行った。検討の結果をTable 1に示す。

Table 1に示した項目のうち①項は、窒素濃度が低く、酸素濃度が高いほど、減圧時間短縮効果は大きくなるが酸素中毒に対する危険性は高くなるという窒素酸素混合ガス潜水の特性を十分に活用するために用いられるものである。酸素濃度が固定されたものではなく、任意の値に設定できることにより、潜水深度の変化に応じて常に最適な窒素酸素混合ガスを潜水者に供給することが可能となる。また②項は、通常の潜水作業が行われる最大潜水深度が30m程度であるため、その水深においてデマンド式潜水器による送気式潜水方式(以下、フーカー式潜水方式という)で作業を行う上で不足の無い送気量として設定したものである。③項以降は、港湾潜水作業で安全に窒素酸素混合ガス潜水を行うために最低必要な条件であるが、特に⑤項は、潜水作業者の生命維持装置ともなる本装置には不可欠の要素である。

## 3. 窒素酸素混合ガスの製造供給方法

窒素酸素混合ガス製造供給装置の開発に際しては、先ずどのような手段を用いて必要な窒素酸素混合ガスを得るかという点を検討しなければならない。窒素酸素混合ガスの製造方法には様々なものがあるが<sup>2)</sup>、潜水作業現場での使用を前提とした場合、その種類は限られたものとなる。以下に、フーカー式潜水方式に適し

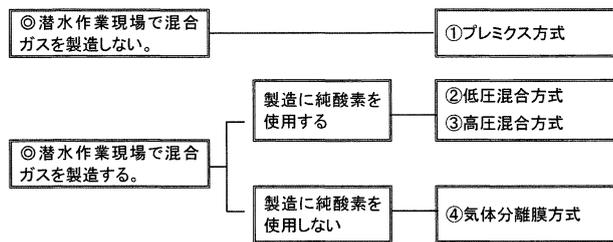


Fig. 1 Oxygen enriched air blending methodologies

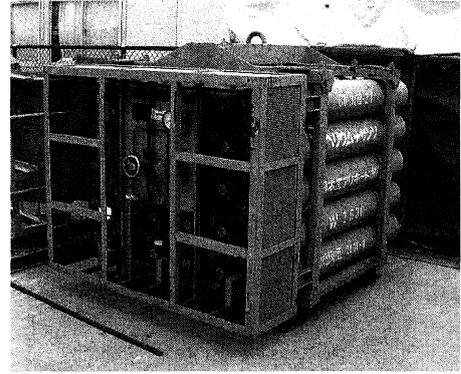


Fig. 2 Premixed gas bank

た窒素酸素混合ガス製造方法について示す。

### 1) 窒素酸素混合ガスの製造方法とその特徴

窒素酸素混合ガス製造方法の各方式をFig.1に示す。潜水に用いられる窒素酸素混合ガスには、窒素と酸素を混合したものと、空気をベースとし、それに酸素を加えたり、特殊な方法で窒素成分だけを減じたりして相対的に酸素濃度を上昇させたものがある。後者については「Oxygen enriched air (酸素富化空気)」または単に「Enriched air」と呼ばれ<sup>3)</sup>、前者のような二種類の成分ガスを混合したものと区別されることも多いが、本稿では後者も広義の混合ガスの一つと考え、窒素酸素混合ガスと称することとする。

Fig. 1に示した方法のうち、①プレミクス方式は、ガス製造工場にて予め指定した酸素／窒素濃度の窒素酸素混合ガスを製造し、高压容器に充填したものを潜水現場に搬入して潜水者に供給するというものである。この方式は、専門の製造工場で行われるので、その精度や品質は非常に良いが、ガスを大量に消費する現場では、Fig.2に示すような大型の高压容器（ガス・カードル）が必要となり、ハンドリングの点で大きな問題を生ずる。

次に②の低圧混合方式は、数MPa以下程度の比較的低圧力の空気と酸素を用意し、現場に設置した混合機で混合しそのまま供給するという方法である。この方式の長所は、空気と酸素の十分な混合が短時間で完了するため、呼吸ガスとして

すぐに使用できるという点にある。一方欠点としては、混合精度を保持することが困難なため、混合異常を生じやすいこと、また混合比を容易に変更することができないことがあげられる。③の高圧混合方式は、ダルトンの法則（分圧の法則）を利用した混合方式で、高压ガスタンクに予め空気を充填しておき、目標とする混合比（分圧）に相当する圧力で酸素を重ねて充填するというものである。産業用ガスの製造にはこの方式が広く用いられているが、正確な混合比を得るためには充填混合時のガスの温度や圧力などの詳細な管理が必要となる。また、充填した空気と酸素が完全に混ざり合うまでにはある程度の安定期間（拡散期間）が必要のため、すぐに使用することができない。尚、②および③の方式は共に酸素を必要とするので、得られる窒素酸素混合ガスの総量は添加する酸素の量により制限を受ける。また、酸素の保管および取り扱いにも十分な配慮がなされなければならない。

④の気体分離膜方式（Fig.3参照）とは、気体分離作用を持つ透過膜を用い、空気中の酸素成分を選択的に抽出し、窒素酸素混合ガス（酸素富化空気）を得ようというものである。気体の分離は、分離膜に対する気体成分の溶解、拡散という物理現象によって行われるため、単に分離膜の両面に圧力差をつけて空気を分離膜に通すことによって、成分ガスの分離が可能であり、深冷分離法、吸収法、PSA（圧力スイング法）などの他の分離方法に

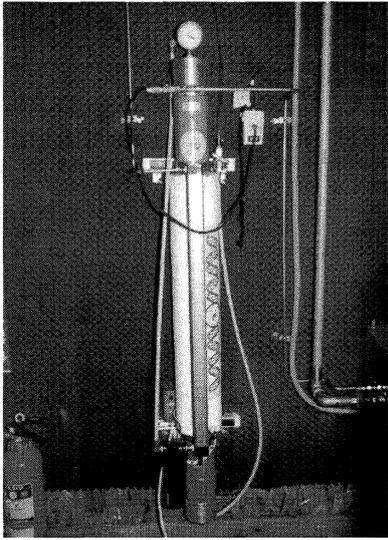


Fig.3 Permeable membrane gas separation unit

比べ、取り扱いが非常に容易でメンテナンスフリーな気体分離方式である。また、気体分離の過程で分離膜が消耗、消費されることは無いので、供給する空気を清浄に保ち、水分や油分、その他の不純物等によって分離膜が汚染されなければ、数年から十数年もの長期にわたる実用にも十分に耐えることができる。気体分離膜を窒素酸素混合ガスの製造に利用する最大の利点は、空気だけを原料として窒素酸素混合ガスを得ることができるという点にある。混合ガスの製造に酸素を必要としないため、量的な制限は無く、また混合のための安定時間も必要ない。さらに、混合比の変更も容易に行うことができるうえ、気体分離膜が長寿命であるため低ランニングコストである。欠点としては、気体分離膜が比較的高価（約50～100万円：メーカーおよび分離膜の種類、大きさによって異なる）なため、ある程度の初期投資が必要となるという点である<sup>4)</sup>。

## 2) 窒素酸素混合ガス製造方法の選定

現在、我が国における作業潜水は、数トン程度の小型な潜水作業船を用い、フーカー式潜水方式で行われる場合が多い。そのため潜水作業船上の限られたスペース内で窒素酸素混合ガスの製造および供給を行わなければならない、それらの設

備には小型であることが求められる。また、作業の性格上1日当たりのガス消費量を正確に予想することは非常に困難であるため、安全上の理由から不足が生じることのない多量の混合ガスを用意することも必要である。

これらの要件を考慮すれば、作業潜水用の窒素酸素混合ガス製造方式としては、気体分離膜を利用したものが適していると考えられる。この方式であれば、空気を原材料としてほぼ無尽蔵に窒素酸素混合ガスを製造することが出来るうえ、酸素ボンベ等の設備も必要ないので、装置の小型化を図ることができる。また、安全面からも気体分離膜方式は潜水用呼吸ガス製造法として適していると考えられる。支燃性の高い酸素はその取り扱いに多大な注意が必要となることは言うまでもないが、酸素を使用する方法では、潜水者に必要以上に高い酸素濃度ガスが供給される危険がある。すなわち、潜水者に供給されるガスは空気希釈された酸素であるため、混合異常が生じた場合には高濃度の酸素が供給されてしまう可能性がある。一方気体分離膜方式では、分離膜の特性上酸素濃度を50%以上とするのは困難であり（詳細は後述）、また気体分離作用に異常が生じて酸素濃度が21%を下回ることはない。したがって、高気圧下での気体毒性に注目した場合、安全性の高い呼吸ガス製造方法と言える。

このようなことから、欧米では既に自給気式潜水用のガス製造方法として利用が始まっているが、送気式潜水に用いた例はまだあまり無い。そこで、我々は、この気体分離膜方式を利用したフーカー式潜水用の窒素酸素混合ガス製造供給装置を開発することとした。

## 4. 気体分離膜による窒素酸素混合ガス製造の原理

気体分離膜を用いたガス分離方法とは、各ガス分子の膜素材に対する物理的性質の違いを利用して、それぞれのガスを分離しようとするものである。この特性を利用すれば、空気中から酸素成分だけを選択的に

抽出することができ、その抽出量に応じて相対的に酸素成分が増大した空気（酸素富化空気=窒素酸素混合ガス）を得ることが可能となる。

気体分離膜には多種多様なものがあるが、主に高分子材料からなる非多孔質膜と無機材料を素材とする多孔質膜の2種類に大別され、また気体分離機構の違いによって区別されている<sup>5)</sup> (Fig.4参照)。前述のように欧米ではこの気体分離膜による潜水用窒素酸素混合ガス製造が既に試みられており、それらの情報から、今回我々は、高分子非多孔質膜(ポリイミド膜)による気体分離膜を採用することとした。

### 1) 気体分離の原理

気体分離膜を用いて混合ガスを分離する原理は、分離膜に対する気体分子の透過速度の違いを利用して分離するというものである。分離膜における気体分子の透過の速さは、透過係数  $Q$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{m} / (\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kPa})$ ] または透過速度  $R$  [ $\text{m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kPa})$ ] で表される。これら2つの値は以下のように定義される<sup>6)</sup>。

$$F_t = A_t Q (P_H - P_L) / \delta \quad (1)$$

$$F_t = A_t R (P_H - P_L) \quad (2)$$

$$R = Q / \delta \quad (3)$$

ここで、 $F_t$ は単位時間当たりに分離膜を透過する気体成分の流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )、 $A_t$ は分離膜の面積 ( $\text{m}^2$ )、 $\delta$ は分離膜の厚さ(m)、 $P_H$ および $P_L$ はそれぞれ分離膜に対する高圧側(気体供給側)の気体圧力と低圧側(気体透過側)の気体圧力(kPa)を示している。式(1)および(2)からも明らかのように、分離膜の面積( $A_t$ )が大きく、膜厚( $\delta$ )が薄く、そして高圧側と低圧側の気体圧力の差(= $P_H - P_L$ )が大きいほど、透過する気体の量は多くなる。

いま、気体OとNの2成分からなる混合ガスを考える。気体成分OおよびNの透過係数をそれぞれ $Q_O$ 、 $Q_N$ 、また透過速度を $R_O$ 、 $R_N$ とすると、式(1)、(2)、(3)より、

$$\frac{R_O}{R_N} = \frac{Q_O / \delta}{Q_N / \delta} = \frac{Q_O}{Q_N} \quad (4)$$

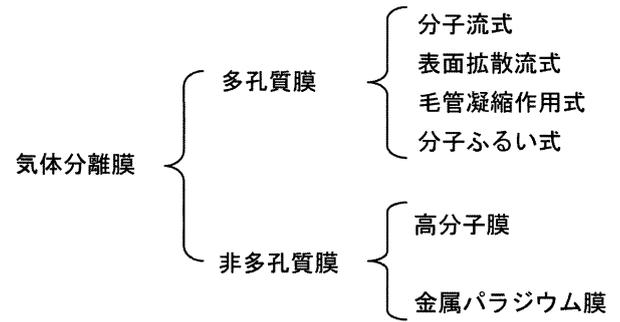


Fig.4 Classification of gas permeation membranes

となる。上式で求められた ( $Q_O/Q_N$ ) を気体成分Oの気体成分Nに対する分離係数という。

分離係数を  $a$ 、分離膜に対する気体の圧力比 ( $P_L/P_H$ ) を  $\gamma$  とし、混合気体中の気体成分Oの量 (mol%) を  $X$  とすると、分離膜透過気体中の気体成分Oの量  $Y$  は、次式のように示される。

$$Y = 50 \left[ C - \left\{ C^2 - \frac{4(X/100)a}{\gamma(a-1)} \right\}^{0.5} \right] \quad (5)$$

$$C = \frac{1 + \{(X/100) + \gamma\}(a-1)}{\gamma(a-1)} \quad (6)$$

式(5)および(6)より、混合ガス中より気体成分Oを効率よく分離するためには、各気体成分に対する分離膜の分離係数 ( $a$ ) が大きいことに加え、分離膜の運転条件として圧力比 ( $\gamma$ ) を小さくすることも効果的であることが分かる。

式(5)を空気の場合に当てはめてみる。空気の成分は窒素78%、酸素21%、その他のガス1%であるが、便宜上窒素79%、酸素21%の2成分からなる混合ガスと見なすこととする。この場合、式(5)に示す  $X$  は分離膜に供給される酸素のモル分率 (21%) であり、 $Y$  は分離膜透過後の酸素リッチな空気中の酸素モル分率となる。式(5)および(6)を利用して、分離膜における窒素に対する酸素の分離係数 ( $a$ ) と分離膜透過前後のガス圧力比 ( $\gamma$ ) との関係を図5に示す。

Fig.5からも明らかのように、分離膜を使用して空気から酸素リッチな空気(酸素富化空気)を生成する場合、得られる酸素富化空気中の酸素濃度

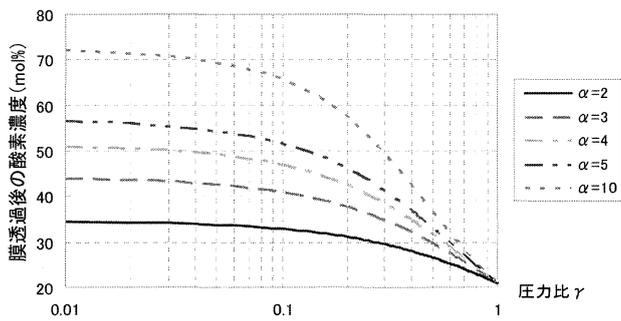


Fig.5 Relations between the separation factor ( $\alpha$ ) and pressure ratio ( $\gamma$ )

(mol%) は、使用する分離膜の分離係数が大きいほど高くなる。また、同じ分離膜を使用した場合でも、生成された酸素富化空気の圧力と供給空気圧力との圧力比が小さいほど高い酸素濃度のガスが得られることになる。現在市販されている高分子気体分離膜の分離係数は2～5程度であるため、酸素富化空気として利用する場合の酸素濃度の上限値は50%程度が目安となる。

## 2) 非多孔質高分子膜による気体分離

高分子材料からなる非多孔質膜における気体の透過は、Fig.6に示すように、気体分子の膜への溶解、膜中の拡散移動、膜外への脱溶解という過程で行われる。非多孔質膜には通常、気体分子が通過できるような『孔』は無いが、圧力を受けると高分子鎖が熱振動し気体分子が通過可能な『隙間』が形成される。空気中の酸素分子や窒素分子はこの隙間に取り込まれ、膜内を拡散し離脱(脱溶解)する。このとき酸素分子の分離膜透過速度は窒素分子のそれよりも約2.5倍速い(ポリイミド系高分子の場合)ため、分離膜透過後の空気は酸素成分の多いものとなる。分離膜による気体成分の分離過程から非多孔質膜における気体の透過係数(Q)は次式のように示すことができる。

$$Q = D \cdot S \quad (7)$$

ここで、Dは気体の分離膜中の拡散係数、Sは分離膜に対する溶解度係数

拡散係数(D)と溶解度係数(S)は共に温度に

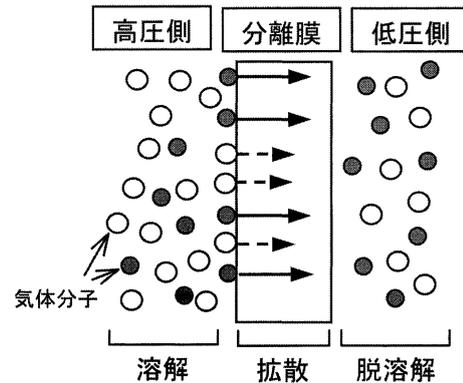


Fig.6 Gas separation mechanism of non-porous polymer membrane

よる影響を受けるが、Dが温度上昇に応じて大きくなるのに反し、Sは減少する。分離膜に対する気体の透過性を決定するものはQであり、式(7)に示したようにDとSの積で示されるQは温度変化による影響を受けることになる。

## 3) 非多孔質高分子膜式気体分離装置の構造

今回使用した気体分離膜は、宇部興産NM-C10A型で、気体分離膜本体は、微細な円筒形状のポリイミド製中空糸を無数に束ねた構造となっており、専用のハウジング内に収納されている。分離膜をストロー状の円筒形状とすることにより、薄い膜厚と実用的な耐力を実現している。

いま、圧縮空気をこの気体分離膜に流すと、Fig.7に示すように、窒素より透過速度の速い酸素は、気体分離膜の内側から外側へ出ていく。一方透過速度の遅い窒素は、分離膜にあまり溶解することなくそのまま通過していくことになる。そのため、分離膜を通過する空気は、出口では窒素成分が多く(窒素富化)、また周囲では酸素成分が多い(酸素富化)状態となる<sup>7)</sup>。この酸素成分の多い透過ガス(酸素富化空気)を潜水用の呼吸ガスとして利用し、窒素成分の多いガス(窒素富化空気)は廃棄する。

酸素富化空気の酸素濃度を変化させるためには、通過する空気(窒素富化空気)の流量をコントロールすれば良い。Fig.5にも示したように、分離膜によって抽出される酸素量は、分離膜内の気体

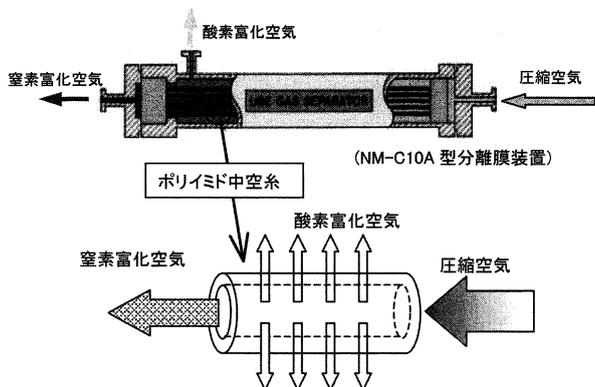


Fig.7 Gas separation mechanism of the polyimido hollow fiber



Fig.8 Overview of the oxygen enriched air generation system

圧力と分離膜透過後の気体圧力の比によって決定されるので、分離膜を通過する空気流量(窒素富化空気)を絞り、分離膜内の空気圧力を上げて圧力比(分離膜透過後の気体圧力/分離膜内の気体圧力)を小さくすれば酸素濃度は上昇することになる。逆に分離膜を開放状態とし、分離膜内の空気圧力を下げると圧力比は大きくなり、酸素濃度は低下することになる。このように、気体分離膜では分離膜を通過する空気流量(圧力)を調整するだけで酸素濃度を変化させることができるので、微細な流量変化が可能なバルブを設ければ、1%単位での酸素濃度調整が可能となる。

Table 2 Specification of the generator

項目	諸元
外観寸法	750(W)×1300(H)×475(D)mm
重量	約80kg
高分子透過膜	2基
混合ガス酸素濃度	21~50%(無段階調整)
混合ガス製造能力	(酸素40%で)160ℓ/min
内蔵調整タンク	混合ガス用1基
酸素濃度計	主・副計測器各1台
送気潜水者数	1名

### 5. 気体分離膜を利用した窒素酸素混合ガス製造装置と送気システム

気体分離膜を利用した窒素酸素混合ガス製造供給装置の外観をFig.8に、また主要諸元を、Table 2に示す。本装置は、1名の潜水者用に窒素酸素混合ガスを製造するもので、高分子気体分離膜方式の採用により、圧縮空気を供給するだけで21~50%の酸素濃度の窒素酸素混合ガスを、いつでも、必要なだけ製造することができる。

本装置は、小型の高分子気体分離膜を2基装備し、小型ながら大量の混合ガス製造を可能としている。また、製造した窒素酸素混合ガスの酸素濃度を計測するための酸素濃度計を2基装備しており、計測の信頼性を向上させている。

潜水作業に使用する場合には、本装置の他に、混合ガス製造の原料となる空気を送気する圧縮機(一次コンプレッサー)と製造された混合ガスを必要な圧力まで昇圧する圧縮機(二次コンプレッサー)が組み合わされる。尚二次コンプレッサーは高酸素濃度のガスを昇圧することになるので、火災発生予防のためにオイルフリー型の圧縮機を使用している。Fig.9に、本装置を使用する際の送気系統模式図を示す。

一次コンプレッサーからの圧縮空気は、空気貯気タンクに一旦貯えられた後、供給空気温度調整器を経由して2基の気体分離膜に供給される。供給空気温度調整器は、分離膜に流入する圧縮空気の温度をヒーターによって加温し、一定の温度となるようにするためのものであり、これによって、温度変化に伴う混合ガス

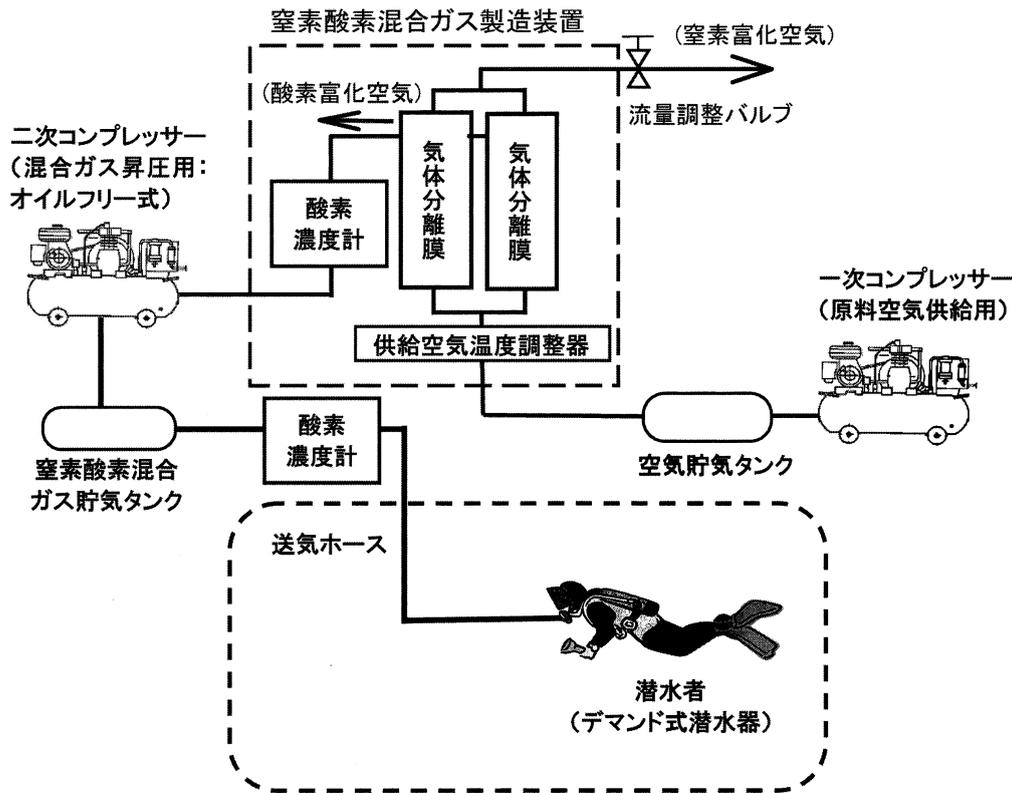


Fig.9 Schema of the gas generator system

製造精度（製造量および混合比）の変化を最小限に抑えることができる。

供給された空気は分離膜によって酸素富化空気と窒素富化空気に分けられる。このうち酸素富化空気が窒素酸素混合ガスとして潜水者に送られ、一方窒素富化空気は廃棄される。窒素酸素混合ガスは分離膜による酸素抽出過程でほぼ0.1MPa程度まで減圧されるため、酸素濃度計で所定の酸素濃度になっていることを確認した後、二次コンプレッサーによって送気圧力まで昇圧（0.7～1.0MPa）され、混合ガス貯気タンクを経て潜水者に送気される。

本装置には安全装備として、気体分離膜ハウジング部にリリースバルブが設けられている。潜水者には装置の分離膜によって生成された窒素酸素混合ガスだけが供給されるが、万一何らかのトラブルによって分離膜の窒素酸素混合ガス製造能力が低下した場合には、潜水者に十分な量の送気が不能となる。このような事態に陥った場合には、このリリースバルブが即座に作動し、外気（大気）を導入することによって送気量の不

足を補うことができる。外気の導入により、送気ガス中の酸素濃度の低下は避けられなくなるが、潜水者に呼吸ガスが送られないという最悪の事態に陥ることはない。さらに、送気や潜水士の呼吸の異常を監視するための「送気モニター」も装備されており、潜水作業中に、呼吸動作に何らかの異常が発生した場合には、直ちにパトライトとサイレン（ブザー音）によって警報を発信し、離れた位置にいる支援員にも異常の発生を知らせることができる。

## 6. 気体分離膜式窒素酸素混合ガス製造供給装置の性能確認

4-1) 項に示したように気体分離膜による作用は分離膜に対する気体の溶解、拡散という物理的性質によるものである。従って、分離膜に与える条件を一定に保てば理論的には安定した結果が継続して得られることになるが、実際の使用環境下で各種条件の変化を皆無にすることは不可能である。そこで、開発した気体分離膜式窒素酸素混合ガス製造供給

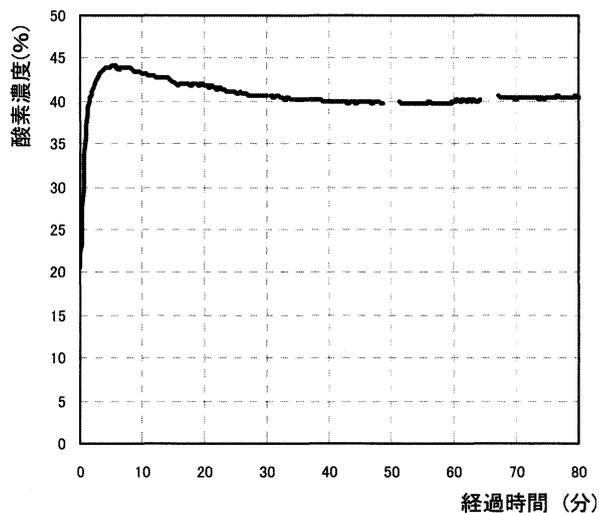


Fig.10 Change of O2 concentration set at 40%

装置の特性を確認するために、いくつかの項目について実験を行った。実験の結果を以下に示す。尚実験に際しては、酸素濃度の計測に東レエンジニアリング製ジルコニア式酸素濃度計LC-750H(D)型を、流量計測には山武製質量流量計CMS-200型を、また圧力計測には長野計器製GA型0.5級圧力計を使用した。

### 1) 酸素濃度の安定性

窒素酸素混合ガス製造装置では、空気より生成したガスをそのまま潜水者に供給するため、ガス中の酸素濃度が大きく変化するようでは実用にならない。そこで生成された窒素酸素混合ガス中の酸素濃度の安定性について実験を行った。実験結果をFig.10に示す。尚実験に際しては、供給空気圧力を0.8MPaとし、生成ガス中の酸素濃度を40%になるように予め調整を行った。Fig.10は、計25回実施した計測の平均値を示したものであるが、Fig.10からも明らかなように、酸素濃度は製造開始直後から急激に上昇していくが、数分後には減少傾向に転じ、起動開始30分後以降は、ほぼ安定した状態となる。ガス製造開始30分後以降の酸素濃度変化のバラツキは、0.76%（最高40.89%、最低40.13%、実験回数25）であった。

### 2) 供給空気圧力と混合ガス製造量

本装置による混合ガス製造量の変化をFig.11に

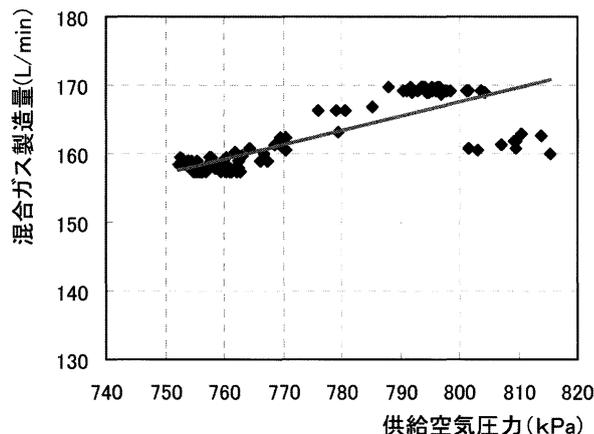


Fig.11 Relations between the air pressure and EANx gas volume

示す。気体分離膜に供給された空気は、膜透過時に減圧されるため、生成されたガスとの間には圧力差が生じる。混合ガス製造量は、この圧力差によって決定されるが、酸素濃度は圧力比によって影響を受ける。したがって、供給空気圧力を増加しただけでは、混合ガス流量は増大するがガス中の酸素濃度も変化してしまうことになる。そこで、実験に際しては、常に酸素濃度が $40 \pm 1\%$ となるように調整し、酸素濃度を固定した状態での混合ガス製造量（流量）変化を計測した。Fig.11からも明らかなように、酸素濃度を固定した状態でも、混合ガス製造量は供給圧力にほぼ比例した<sup>8)</sup>。

### 3) 供給空気温度の影響

混合ガス製造量に影響を及ぼすもう一つの要因は温度である。分離膜の温度上昇は気体成分の分離膜に対する拡散係数を増大させ、溶解度を減少させる。すなわち供給する空気温度が高くなれば、分離膜の温度も上昇することになるので、透過する気体の量は増えるが、溶解度が低下するため酸素濃度は低くなる。潜水用に使用する場合、混合ガス中の酸素濃度は一定であることが求められるので、実験に際しては酸素濃度を $40 \pm 1\%$ となるように調整し、その酸素濃度における混合ガス製造量を計測した。また、供給する空気

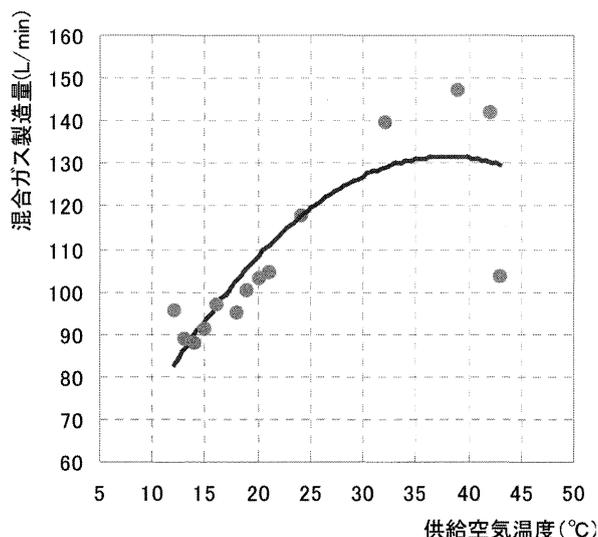


Fig.12 Relations between the air temperature and EANx gas volume

の圧力は一定とし (0.8MPa), 供給空気温度の調整は装置に設置したセラミックヒーター式の供給空気温度調整器によって行った。実験の結果を Fig.12に示す。図からも明らかなように、混合ガス製造量は供給空気温度の上昇にほぼ比例したが、温度が30°C 以上では製造量変化は鈍化し、40°C を超えると減少傾向に変化した<sup>9)</sup>。

## 7. 考察

実験によって知られた気体分離膜式窒素酸素混合ガス製造供給装置の特性は、ほぼ理論によって予想されたとおりの結果であり、このことから、気体分離膜を用いた混合ガス製造能力は十分に制御可能なもので、実用に供した場合でも相応の能力を発揮できるものと考えられる。

混合ガスの精度は、減圧時間の決定や急性酸素中毒対策のための非常に重要な項目であり、高精度でかつ安定していなければならない。今回の実験では、製造開始直後には酸素濃度は高い値を示したが、約30分経過した後は非常に安定した状態となった。これは、分離膜自体の温度変化に起因するもので、暖められた圧縮空気が流入した直後には、酸素濃度は不安定となるが、ある程度時間が経過し分離膜全体の温度が一

定となれば酸素濃度も安定したものとなる。今回の場合、安定するまでには約30分程度の時間が必要であったが、これは気体分離膜の容積によるものであり、容積の小さいものを使用すれば、酸素濃度が安定するまでの時間はより短くなることが予想される。

精度とともに、生成される混合ガス量も重要な要素である。今回の実験では、酸素濃度40%で最大172 l/minの混合ガス製造量を計測し、また、混合ガス製造量は供給空気圧力にほぼ比例することも確認された。供給空気圧力変化に対する混合ガス製造量の変化は、供給圧力500kPa (0.5MPa)あたり約10 l/minであった。潜水作業で使用されている空気コンプレッサーは、圧縮機の負荷軽減のために所定圧力に達すると空気吸入口を開放して圧縮の仕事させないようにするアンロード機構が装備されている。その機構のため圧縮空気の圧力は設定圧力を上限として1MPa程度低下するが、その際の混合ガス製造量の変化は20 l/min程度と予想される。また、この供給空気圧力の低下は酸素濃度に対しても影響を及ぼす。しかし、この程度であれば実用上はあまり問題とはならない。混合ガス供給設備には混合ガス貯気タンクが設けられており、これによって変化量が緩和されるからである。

混合ガス量は温度にも影響を受ける。酸素濃度を40%に固定した今回の実験では、気体分離膜の温度が35°C前後のときにもっとも効率よく混合ガスを製造することができ、40°Cを超えると効率が低下した。気体分離膜を透過する気体の量だけを見れば、高温状態のほうが量も多くなるが、その状態では酸素濃度が低下してしまうので、それを防ぐためには分離膜を通過する空気 (窒素富化空気) 量を制限、すなわち供給空気量を制限することになるため、当然製造できる混合ガス量は低下することになる。今回用いた気体分離膜では、混合ガス製造量の増加と酸素濃度低下の分岐点は約35°C ということになる。通常コンプレッサーによる圧縮空気は、断熱圧縮により圧縮直後は非常に高温となるが、貯気タンクおよび配管内で冷却されほぼ外気温と同程度となるので、通常は温度が問題となることはないが、夏季に行われる潜水作業では、地域によ

ては相当に高い気温となることが予想されるので、そのような場合には、送気配管へ日除けを設けたり、混合ガス製造装置の空気供給口にラジエター式の冷却装置を設置するなどのより積極的な温度調整／管理が必要となる。尚今回製作した窒素酸素混合ガス製造装置には、熱電対を用いた温度計が装備されており、常に供給空気温度をモニターすることができる。

## 8. 結語

今回我々が開発し、評価を行った気体分離膜式窒素酸素混合ガス製造供給装置は、酸素濃度および製造量ともに安定した混合ガスの製造が可能であり、フーカー式潜水作業用の混合ガス供給源として十分な性能を有していることが確認された。現在、本装置は実験の第二段階としてFig.13に示すように、実際の潜水作業現場に投入し、運用試験を鋭意実施している。現在までのところ、細かな不具合点はいくつかあるものの潜水作業に支障をきたすような大きなトラブルの発生は認められていない<sup>10)</sup>。今後は、実用機としての完成度を更に高めていくために、潜水作業現場での使用実績を積み重ねていく予定である。尚本稿に示した送気式潜水用窒素酸素混合ガス製造供給システムは、現在特許審査中であることを付け加えておく。

最後に、今回の研究に対して多大なる協力を賜った社団法人日本潜水協会ならびに関係各位に深謝いたします。

## 参考文献

- 1) James TJ ed: Nitrox Diving, In; NOAA DIVING MANUAL fourth edition. Flagstaff AZ; Best Publishing Co., pp153-157, 2001
- 2) Enriched air operations and resource guide; International PADI Inc., pp 4 -15, 1995
- 3) Ornhagen H, Hamilton RW: Oxygen enriched air nitrox in surface oriented diving; FOA report C 50068-5.1, Sweden: pp13-16, 1989
- 4) Mochizuki T, Nashimoto I, Ikeda T: Development of enriched air nitrox (EANx) supplying

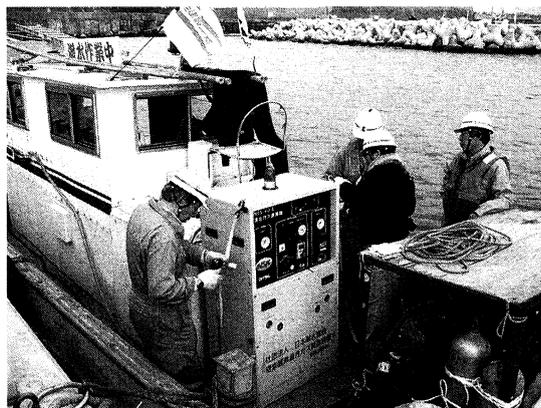


Fig.13 Generator on a diving boat

system onboard for deep harbor diving: Continuous gas supply using permeable membrane gas separation method, In; Proceedings of the 15th Meeting of the United States - Japan Cooperative Program in Natural Resources (UJNR) Panel on Diving Physiology, Tokyo; Japan Marine science and Technology Center, pp197-202, 1999

- 5) 中川 勤: 酸素／窒素分離膜, In; 分離機能膜の開発と応用, 東京; シーエムシー出版, pp92-96, 2001
- 6) 独立法人工業所有権総合情報館編: 平成13年度特許流通支援チャート一般 2 気体膜分離装置, 東京; 社団法人発明協会, pp 3 -5, 2002
- 7) 宇部興産株式会社分離膜営業部編: UBE N 2 セパレーター技術資料, 東京; 宇部興産株式会社, pp 1 -2, 1993
- 8) 平成12年度窒素酸素混合ガス潜水に関する調査研究結果報告書, 東京; 社団法人日本潜水協会, pp16-25, 2001
- 9) 平成13年度窒素酸素混合ガス潜水に関する調査研究結果報告書, 東京; 社団法人日本潜水協会, pp43-52, 2002
- 10) 望月 徹: 送気式ナイトロクス潜水技術の港湾潜水への利用, In; 安全潜水セミナー 21世紀の安全潜水技術を考える, 東京; 社団法人日本潜水協会, pp32-35, 2004