

14. 高圧チェンバーにおけるガス拡散実験^{※1}

岡 本 峰 雄、^{※2} 金 田 英 彦^{※3}

小容積の密閉容器である潜水用の高圧チェンバーにおいて、密度の小さなHeを主成分とした環境ガスと、人間の呼出するCO₂等の密度の大きな有害ガスが、換気不良によって良好に混合しない危険性がある。これらの有害ガスの部分的蓄積は精密な環境ガス制御を必要とする飽和潜水の場合大きな問題となる。

潜水シミュレータ（最大使用深度 500m）の居住室（D-1チェンバー、容積28m³、定員4人）を用いて、He加圧中のチェンバー内にCO₂を注入し、その拡散状況を経時的に追跡し、CO₂の挙動と換気量との関係を求めた。また内部各所の温度を連続測定することによって換気状況の把握を試みた。その結果、CO₂は速やかに環境ガスと混合し、部分的蓄積は認められなかった。

Research of Gas Diffusion in Hyperbaric Chamber

Mineo OKAMOTO^{※4}, Hidehiko KANATA^{※5}

In saturation diving, the ambient gas is helium enriched and light weight. On the other hand, carbon dioxide in the expired gas or some poisonous gases are heavier than the ambient gas. If these gases are not mixed well in the hyperbaric chamber as a result of imperfect ventilation, it will be dangerous for divers.

To investigate the ventilating capacity of the Undersea Simulator (maximum simulating depth : 500m), carbon dioxide was injected into Living Lock (volume; 28m³, capacity; 4men) which had been pressurized by helium, and the movement of carbon dioxide was persuited with time.

As the result, it was shown that carbon dioxide quickly mixed with ambient gas and that there was no partial accumulation in the Living Lock.

1. ま え が き

当センターの潜水シミュレータのうち、飽和潜水時にダイバー4名の居住室となるD-1チェンバー（内容積28m³）は円筒形の高圧容器であり、内部に寝台、机、流し台等多くの艤装品が装備されている。有人の潜水シミュレーション実験の場合には、このほか種々の医学計測機器が内部に設置され、足のふみ場もないくらい狭隘である。このような小容積で換気に対する障害物の多い閉鎖環境下では、人体から排出されるCO₂等の有害成分が換気不良場所に蓄

積される危険がある。

特にCO₂については、飽和潜水の場合Pco₂ 7.6mmHgを許容上限と定めているが、シートピア計画の海中居住実験に用いた「DDC」（内容積21m³）で、アクアノートが4名居住した場合、昼間、2、3時間毎にCO₂吸収剤（バラライム）を交換する作業が必要とされ、この時のPco₂は最低でも3mmHg前後の値を示した⁽¹⁾。このような高濃度のCO₂環境下では、換気不良によるCO₂の部分的蓄積が存在した場合、問題になると思われる。

またHe加圧時には、内部環境ガスに比較して比

※1 本研究は、科学技術庁研究調整局から委託を受けた「海中作業基地による海中実験研究（シートピア計画）」の一環として実施したものである。

※2 潜水技術部

※3 前潜水技術部（現川崎重工業㈱）

※4 Manned Undersea Technology & Engineering Department
former; Manned Undersea Technology & Engineering
Department

(present; Kawasaki Heavy Industries, LTD.)

重の軽い He がチェンバーの上部に蓄積されたり、飽和潜水の減圧時に大気圧近くになっても、チェンバー上部の環境ガスが最大深度時のガス組成を維持している等の現象が観察されている⁽²⁾

以上のことを明確に調査研究することと、潜水シミュレーターの性能調査も併せて、D-1 チェンバー内の換気状況を、CO₂ を指標としたガス拡散実験と加圧・保圧時の内部の温度分布調査によって明らかにしようと試みた。

2. 実験方法

無人状態のチェンバーに注入した CO₂ が時間とともにどのように拡散されてゆくのかを、深度 3・30・60・100m 相当圧トで内部7ヶ所の環境ガス中の CO₂ 濃度を連続分析によって追跡するとともに、内部12ヶ所の温度の連続測定を行なった。

2.1 CO₂ 注入方法

CO₂ 注入と分析用の環境ガス採取のため、D-1 チェンバー側壁の予備貫通用盲蓋2枚を利用して各々に4個の高圧バルブを取り付けた貫通金物を製作した。これを図1に示す。

CO₂ は1回に約 140Nℓを2～3分で注入した。注入場所は図2に示すように4ヶ所とした。各々の吹出し口の位置については、アクアノートが2名睡眠、1名洗顔、1名が机に向っているという条件を仮定して決定した。

一方ボンベ内のCO₂ は常温でも液化しており、ボンベから減圧弁を介して直接チェンバー内に注入しようとしても、流量が大きい場合には減圧弁が凍結して注入できなくなる。これを防ぐために、図3の方法で一担2次ボンベに低压充填して気化させた後チェンバーに注入した。

2.2 環境ガスの採取方法

環境ガス採取位置は、チェンバー内のなるべく濃度差の出そうな代表的な場所を選んで、図2のように決定した。

次に環境ガス採取方法を図4に示す。まずチェンバー内部7ヶ所の環境ガスをビニールホースで外部に導き、サンプルガスの流量を各々約 3 Nℓ/min となるように調整した。チェンバー外部のビニール管は三方に分岐しており、通常は (a) 側にほとんどのガスが流れ出る様にし、分析する場合は (b) から約 1 Nℓ/min のガスを吸引ポンプで取り出した。

2.3 CO₂ 濃度の分析

CO₂ 濃度の分析には西ドイツのゴダルト社製カプノグラフ C G58003 と、東亜電波株式会社製ポリ

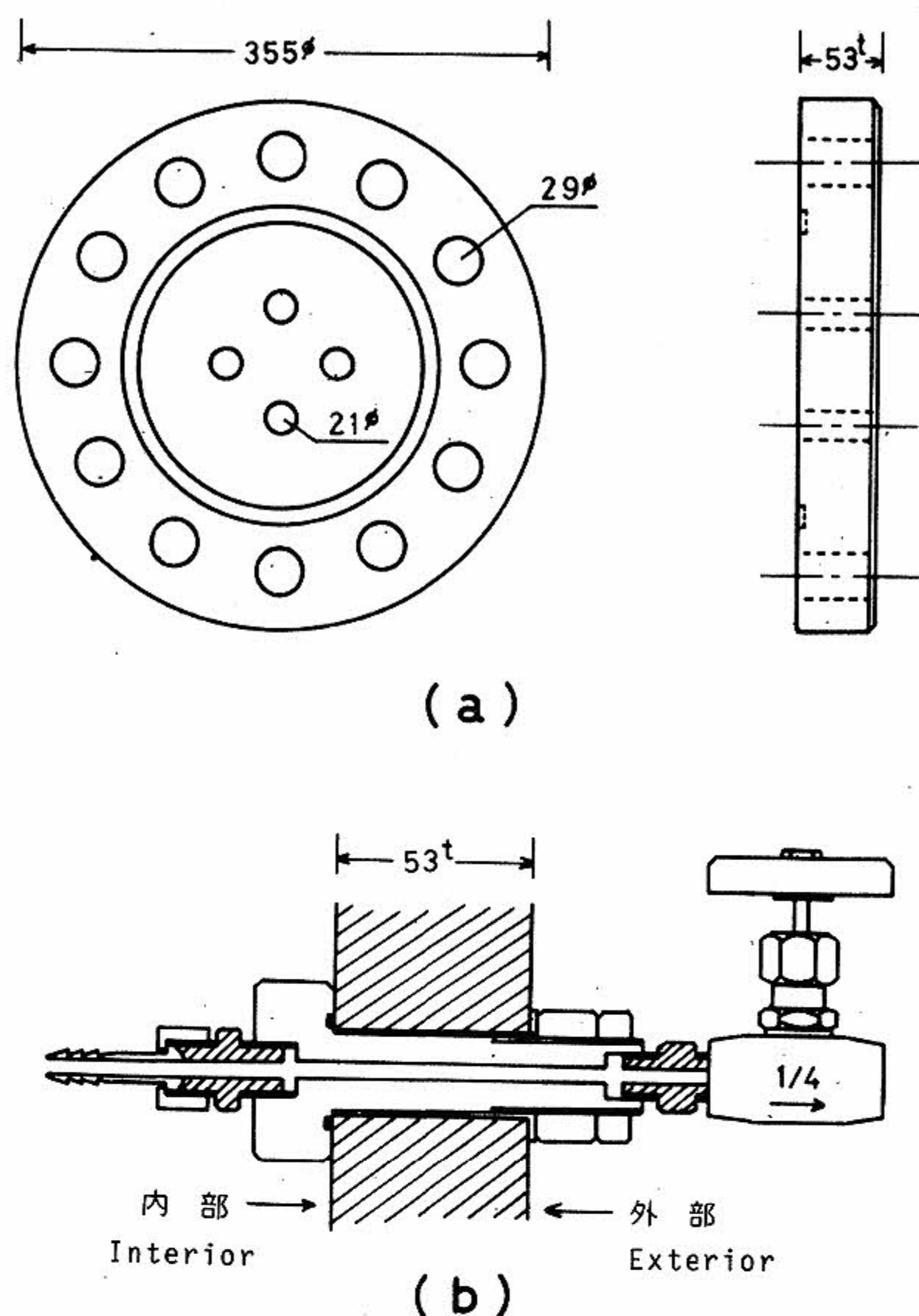


図1 ガスサンプリング用貫通金物
(a) 盲蓋と貫通孔 (中央4個)
(b) 貫通部断面

Penetration fitting for gas sampling
(a) Flange
(b) Penetrator cross section

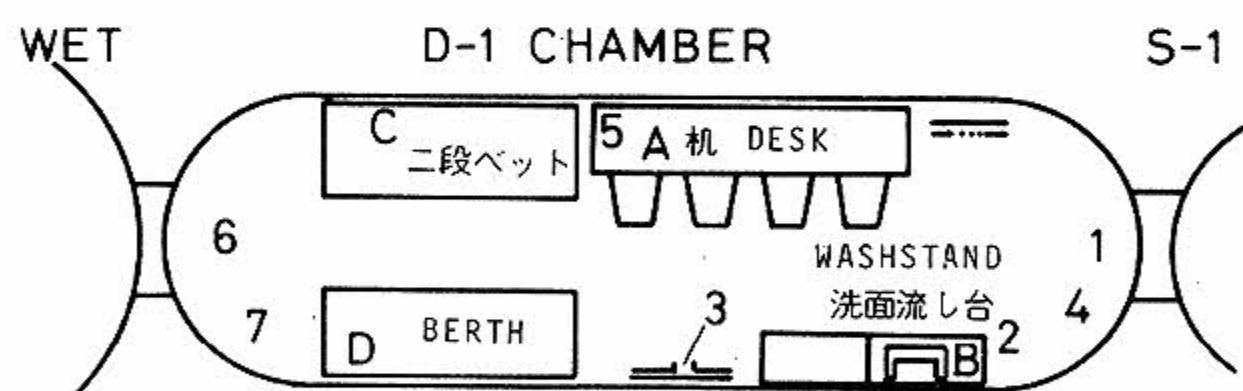


図2 CO₂ 注入位置及び環境ガス採取位置
CO₂ 注入位置 A: 机の上, B: 洗面所横, C: ベッド上段, D: ベッド下段
環境ガス採取位置 1: S-1側上部, 2: 洗面所横, 3: 循環系噴出口内, 4: S-1側下部, 5: 机の上, 6: ウェットチェンバー側上部, 7: ウェットチェンバー側下部

Location of the point where CO₂ was injected and the ambient gas was sampled

CO₂ injection point: A; On the desk
B; Side of the washstand
C; Upper bed
D; lower bed

Ambient gas sampling point:
1. Upper layer near the S-1, 2. Side of the washstand 3. In the ventilator outlet
4. Lower layer near the S-1. 5. On the desk
6. Upper layer near the Wet Chamber
7. Lower layer near the Wet Chamber

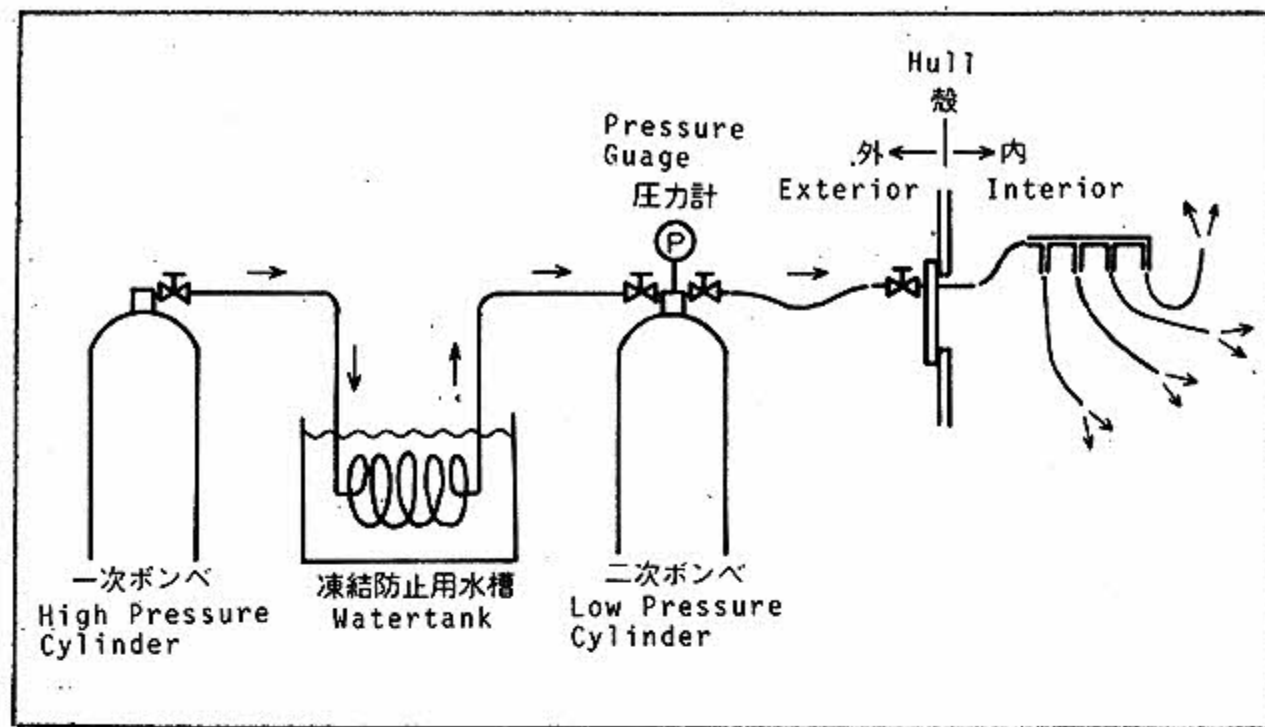


図3 CO₂ 注入方法概略図

The method of CO₂ injection into the D-1 chamber.

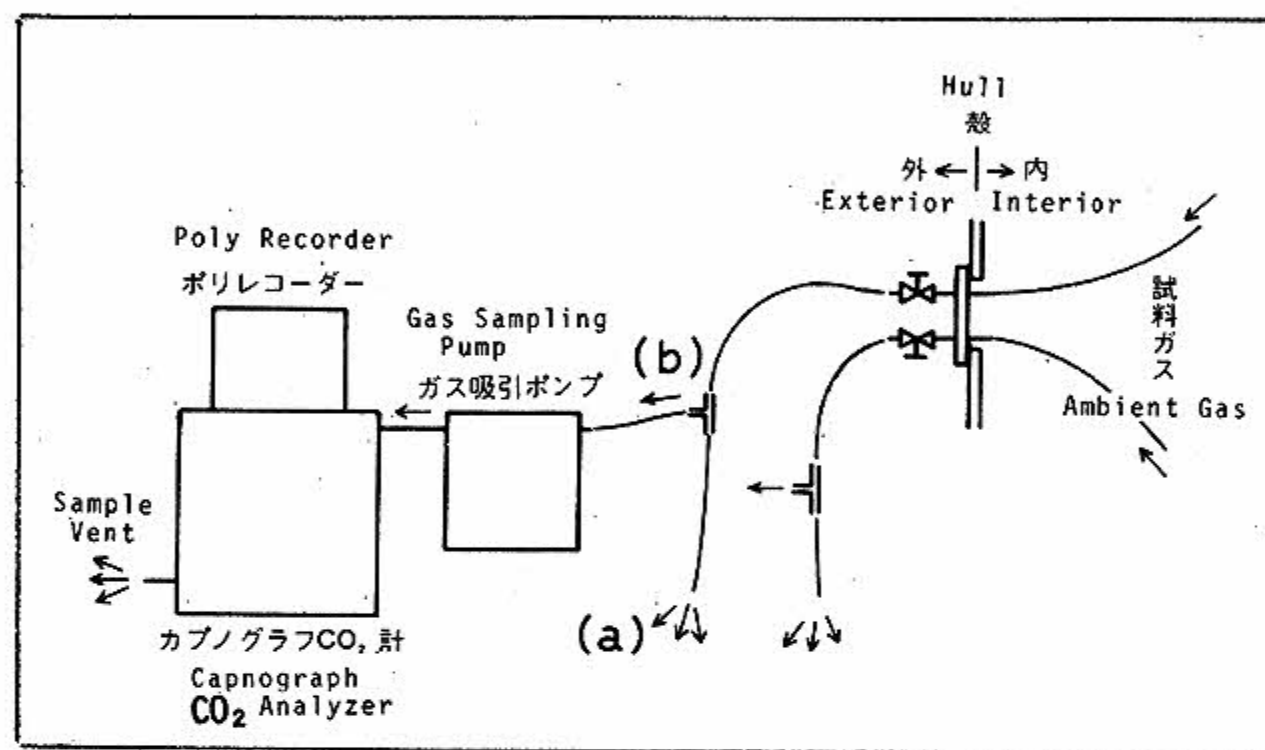


図4 環境ガス分析方法概略図

The method of ambient gas analyzing

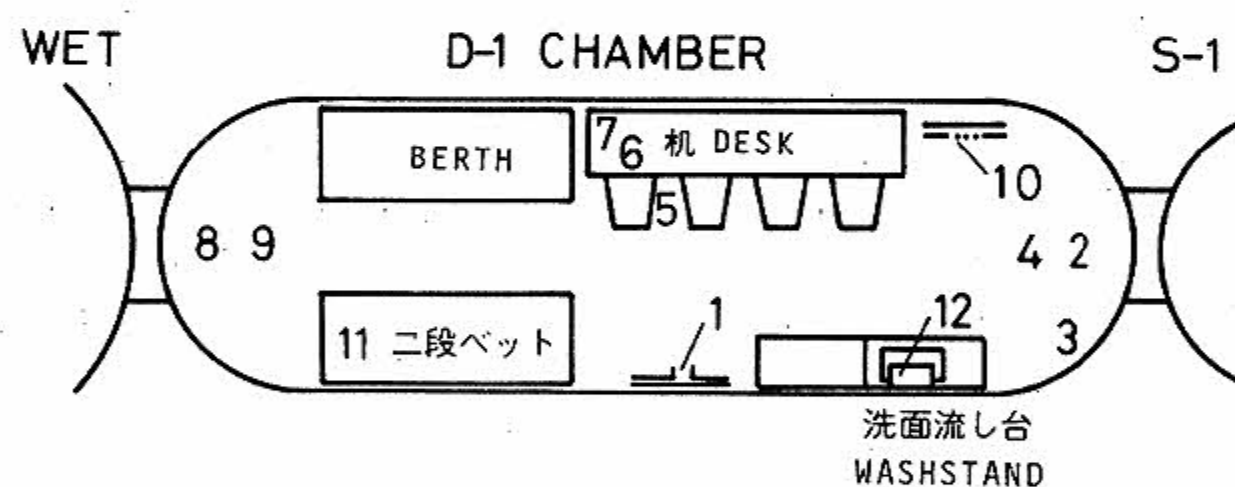


図5 温度計測位置

1. 循環系噴出口内, 2. S-1側上部, 3. S-1側中部, 4. S-1側下部, 5. 机の下, 6. 机の上, 7. D-1環境ガス採取部, 8. ウェットチェンバー側上部, 9. ウェットチェンバー側下部(床に接触), 10. 循環系吸込口, 11. ベッド下段, 12. 鏡の上

Location of the point where the temperature was measured

1. In the ventilator outlet 2. Upper layer near the S-1 3. Middle layer near the S-1 4. Lower layer near the S-1 5. Under the desk 6. On the desk 7. Ambient gas sampling point 8. Upper layer near the Wet Chamber 9. Lower layer near the Wet Chamber (Contact with the floor) 10. In the ventilator inlet 11. Lower Bed. 12. On the mirror

レコーダー EPR-3T型を使用した。

7ヶ所の環境ガスの同時分析はできないため、1ヶ所10秒毎の切り換えで連続分析を実施した。サンプルホースを切り換えた後、CO₂濃度の指示値が安定するのに要した時間は約2、3秒で、所定の10秒間で十分良好な値が得られた。

またサンプルガスの採取に三方分岐管を用いて1部吸引の方法をとったので、(1)ガス流量が多いことでビニールホース内のデッドスペースによる分析タイムラグの減少、(2)サンプルホース切り換え時に分析計の吸引ポンプにより引かれるガス流量の変動がほとんどない等の効果があった。

2.4 温度分布の測定

D-1チェンバー内の温度は、図5に示した代表的な12点について、内部に設置した抵抗式12点打点記録式温度計を用いて連続測定を行った。

3. 結果および考案

3.1 注入されたCO₂の移動

チェンバーに注入されたCO₂が分析計に検出され始めるまでに約60~70秒を要している。注入直後はチェンバー内の場所による濃度の差が大きく、時間が経過するとともに濃度差は小さくなり、ある時間後には均一化する。

実験結果の1部を図6に示す。図からチェンバー

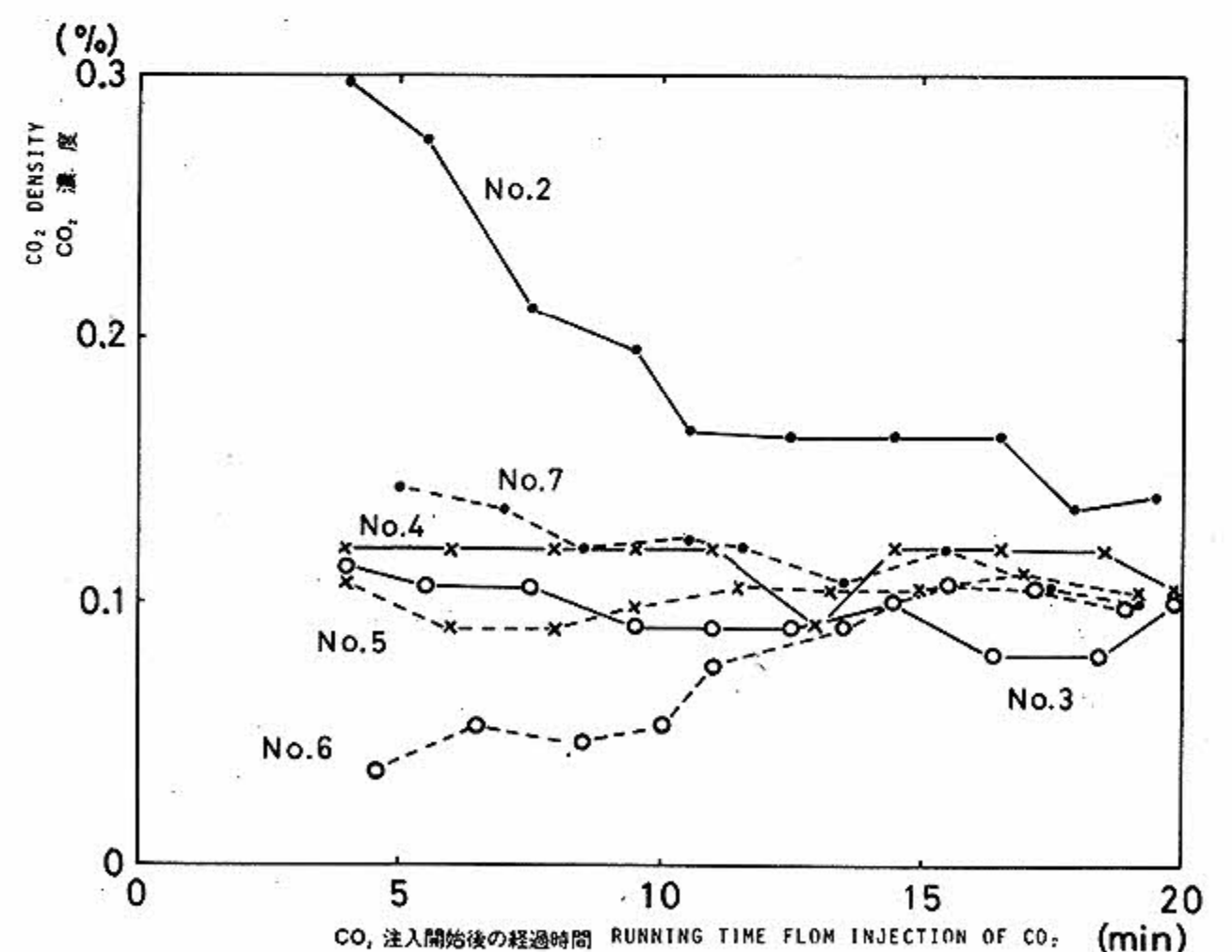


図6 D-1チェンバーにおけるCO₂拡散状況
(深度30m 循環ブロー回転数 1,000rpm,
He : N₂ : O₂ = 70 : 22 : 8)

CO₂ density distribution in the D-1 chamber after CO₂ was injected.

(Depth 30m, Operation of the Blower 1000 rpm
Ambient gas He : N₂ : O₂ = 70 : 22 : 8)

内の場所による濃度差について見ると、上部にあたる6番は最初濃度が小さく、その後徐々に増加している。それに対し下部にあたる4番・7番では最初濃度が急激に増大し、次第に小さくなってゆく。

中段にあたる5番は濃度変化が小さい。2番の濃度が特に高いのはCO₂注入位置に近いためであると思われる。

3・30・60・100m各深度におけるほとんどの計測結果でも場所によるCO₂濃度のばらつきには同様の傾向が認められた。

図6の条件(7ATA, He:N₂:O₂=70:22:8)で環境ガスとCO₂の密度(kg/m³)を比較すると、各々2.0、7.2であり、CO₂は環境ガスよりもかなり重い。

以上のことから、チェンバーに注入されたCO₂は密度が大きいために最初下部に沈み、その後換気によって徐々に上部に拡散されてゆくものと判断される。

3.2 CO₂濃度均一化に要した時間

チェンバー内のCO₂濃度の均一化に要した時間を図7に示す。均一化に要する時間は深度にはほとんど関係なく、循環ブロワーの回転数(即ち循環風量)に関係している。

循環系の配管内にオフィス風量計を取付けて測定した循環風量を図8に示す。循環風量は環境ガス組成や圧力にはほとんど影響されておらず、循環ブロワーの回転数とほぼ直線関係にある。

図7に示した計測結果から、循環ブロワーの回転数Q(rpm)とCO₂濃度の均一化に要した時間T(min)との関係を最小二乗法によって求めると次式で示される。

$$T = 47.9 e^{-1.04Q \times 10^{-3}}$$

今回の実験方法はチェンバー内の4カ所にCO₂約140Nℓを2、3分間で注入するというきびしい条件であったが、循環ブロワーの回転数が1,500rpm以上であれば10分以内にCO₂は拡散され、部分的蓄積はほとんど認められないことが確認された。

3.3 温度分布

保圧時のチェンバー内各所の温度は図9に示されるように約±0.5℃のばらつき範囲内におさまっている。(循環ブロワー回転数1,500rpm)

それに対し加圧時(He注入量933Nℓ/min)には、図10に示されるように約±1.5℃のばらつきが発生している。(循環ブロワー回転数1,500rpm)

図10に示した加圧時の、チェンバー内の温度設定値は28℃であり、加圧ガスを含んだ循環系噴出ガスの

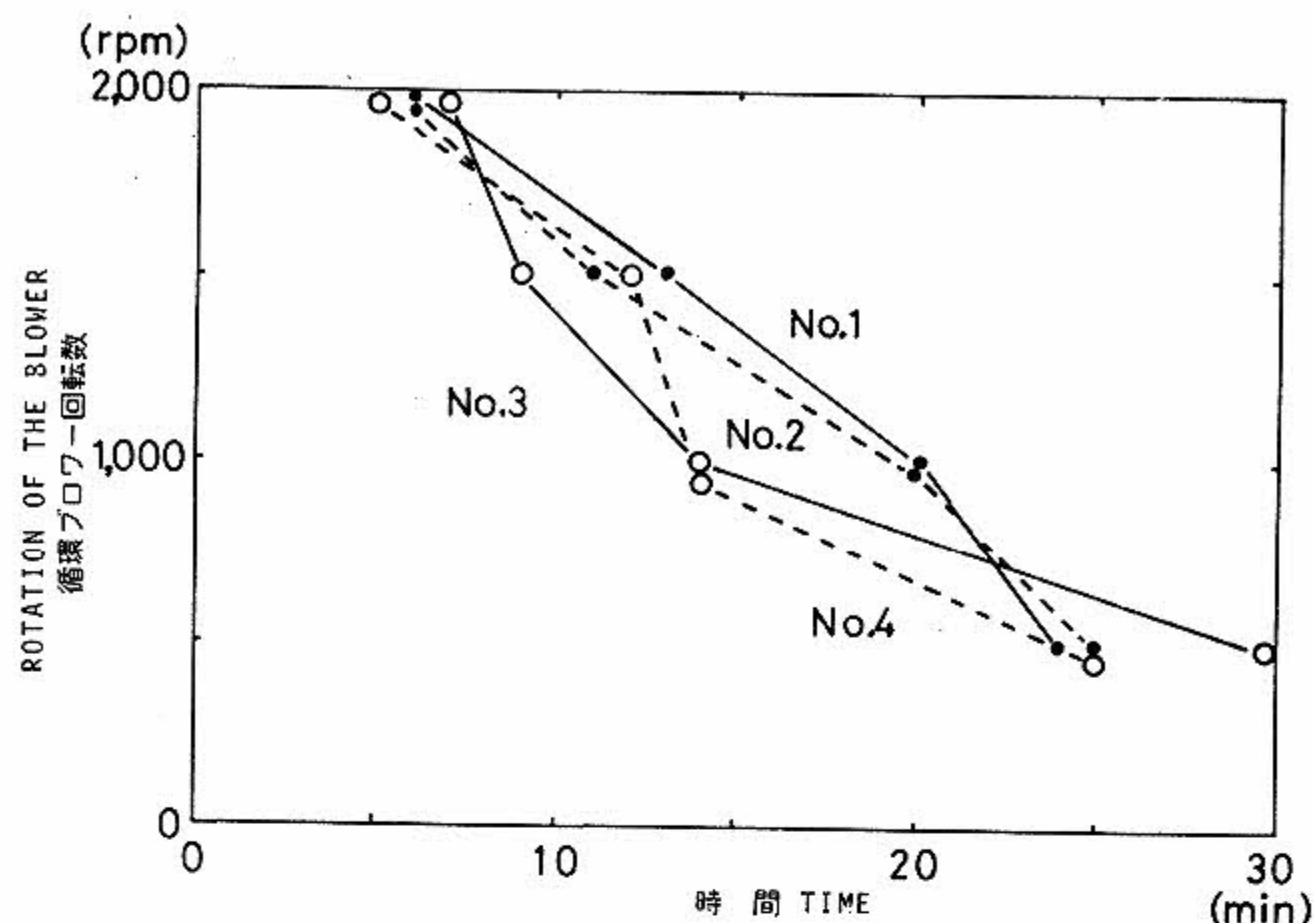


図7 CO₂濃度の均一化に要した時間

- { No.1, Depth 3m, Air
- { No.2, Depth 30m, He:N₂:O₂=70:22:8
- { No.3, Depth 60m, He:N₂:O₂=83:12.5:4.5
- { No.4, Depth 100m, He:N₂:O₂=90:7:3

The time required from CO₂ injection in the D-1 Chamber to uniform of its density

- No. 1, Depth 3m, Air
- No. 2, Depth 30m, He:N₂:O₂=70:22:8
- No. 3, Depth 60m, He:N₂:O₂=83:12.5:4.5
- No. 4, Depth 100m, He:N₂:O₂=90:7:3

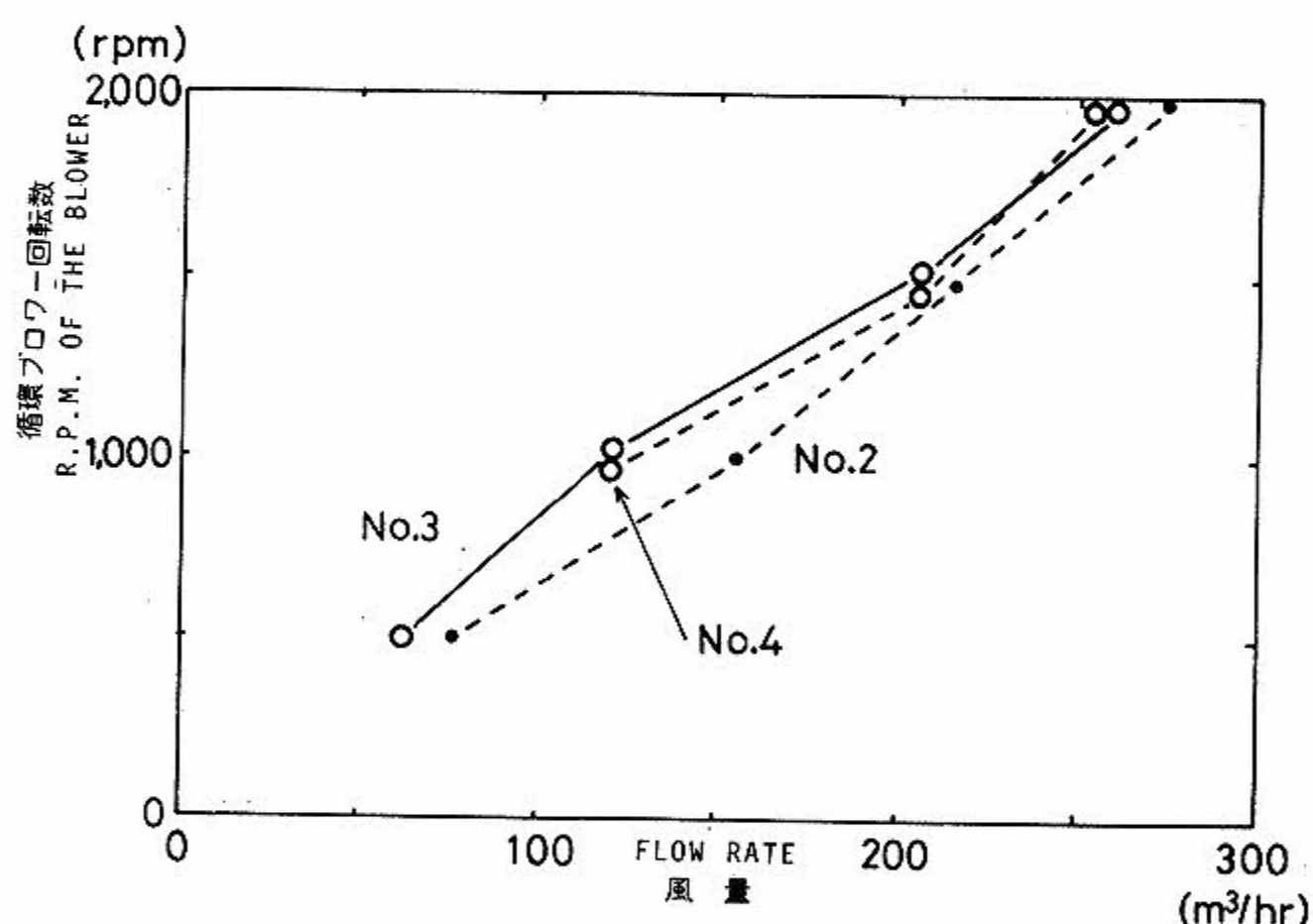


図8 循環ブロー性能曲線

- { No.2, Depth 30m, He:N₂:O₂=70:22:8
- { No.3, Depth 60m, He:N₂:O₂=83:12.5:4.5
- { No.4, Depth 100m, He:N₂:O₂=90:7:3

Flow Rate of The Blower

- No. 2, Depth 30m, He:N₂:O₂=70:22:8
- No. 3, Depth 60m, He:N₂:O₂=83:12.5:4.5
- No. 4, Depth 100m, He:N₂:O₂=90:7:3

温度は約31℃でやや高い。この高温ガスの流入によってチェンバー内各所の温度は上昇しているが、上昇の状況は場所によって異なっており、次の3つのグループに分けることができる(イ)4番・5番のように28.0~29.0℃の範囲でやや変動のある場所、(ロ)8番・10番のように、29.5℃でほぼ一定している場所、(ハ)その他のように30.0~30.5℃という比較的高温で安定している場所である。

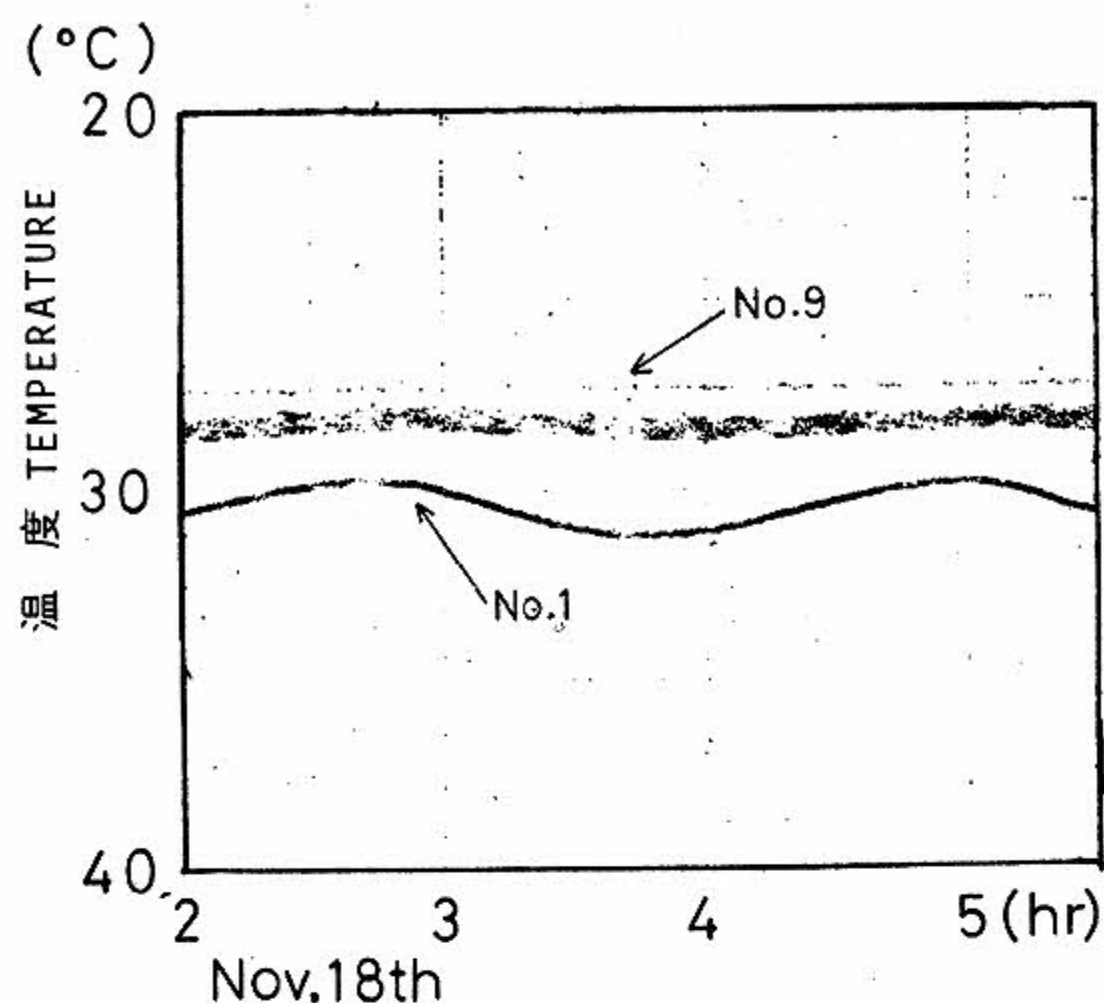


図9 保圧時の温度分布

Temperature distribution of the D-1 chamber in 100m.

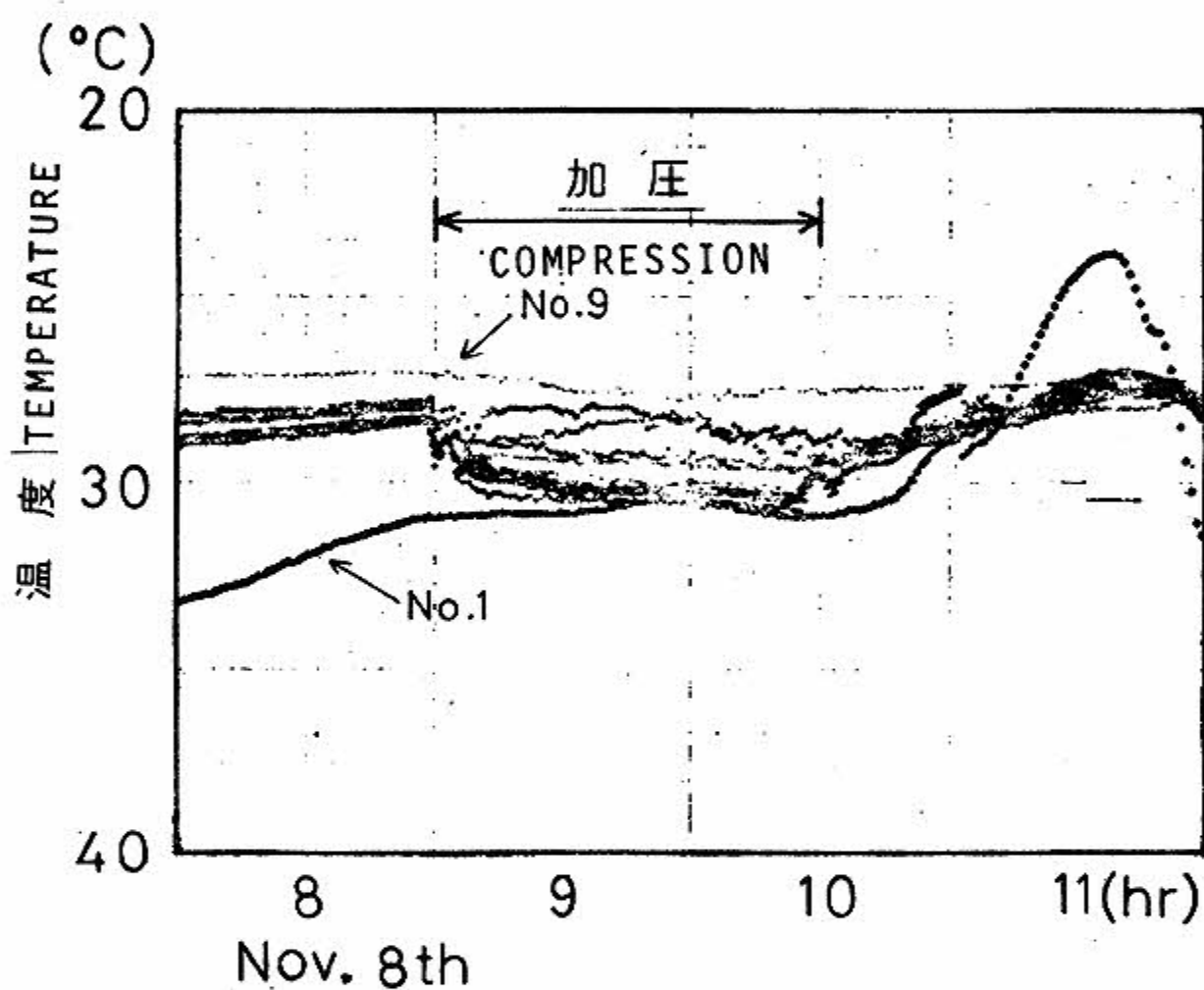


図10 加圧時の温度分布

(30m → 60m、加圧速度 20m/hr)

Temperature distribution of the D-1 chamber in pressurization

(Depth; 30m → 60m, compression speed; 20m/h)

(イ) はチェンバーの下段、(ロ) はチェンバーの中段または風通しの悪い上段、(ハ) は上段と風通しの良い中段に相当する。(イ) は加圧開始後60分頃から温度が上昇し始め、(ロ) の温度帯に近づいていることがわかる。加圧停止後5分間程度でこれ

らの温度差は急激に減少し、保圧時と同様に約± 0.5℃ のばらつきの範囲内におさまる。

加圧時のチェンバー上部と下部の2～3℃の温度差から、通風量不足のために循環系噴出口からの暖いガスが内部の環境ガスと完全に混合していないことがわかるが、これによって加圧用のHeがチェンバー上部に蓄積されているのかどうかは今回の実験結果からは判定することができなかった。

加圧時のチェンバー内部各所の温度差が約3℃あるというのは、He-N₂-O₂混合ガス環境においてはかなり大きいと思われるので、今後何かの改善策を要すると考えられる。

4. 結論

(1) チェンバー内に注入されたCO₂は環境ガスに比較して重いため、最初チェンバーの下部に蓄積され、その後徐々に上部に拡散される。

(2) チェンバー内に注入されたCO₂の濃度均一化に要する時間は、深度や環境ガス組成とは関係なく、循環ブローの回転数で決まる。

(3) 循環ブローの回転数が1.500rpm以上であれば注入されたCO₂は10分以内で拡散され、部分的蓄積は認められない。

(4) He加圧時にはチェンバー内各所の温度差は約3℃あり、He-N₂-O₂混合ガス条件下ではかなり大きいと考えられ、今後何らかの改善策を要するものと思われる。

参考文献

(1) “海中作業基地による海中実験研究” 昭和47年度科学技術庁海洋開発技術研究委託費による研究成果報告書、海洋科学技術センター、昭和49年12月、P. 95-96

(2) “海中作業基地による海中実験研究” 昭和50年度科学技術庁海洋開発技術研究委託費による研究成果報告書、海洋科学技術センター (未印刷)