

5-2-3 トラミックス呼吸 (ゲージ圧 0.545MPa) の高気圧作業

出典：大深度化に対応する地下空間建設技術と建設機械・2～9 ページ

(社)日本建設機械化協会・平成 16 年 9 月 17 日発行(転載許可申請未済)

1-1 大深度ニューマチックケーソンに利用した ヘリウム混合ガス呼吸の実際

1. はじめに

本報文では、最初に掘削機械の遠隔操作により掘削環境が無人化されている現在のニューマチックケーソン工法の概要と、圧縮空気を呼吸しながら行う機械のメンテナンス等(以降、高気圧作業と略称)における人体生理面での制約を最初に紹介し、次に、圧縮空気呼吸の代わりにヘリウム混合ガスを呼吸することで、その制約を解除して地下水面下 90m クラスの環境における機械メンテナンスを可能にした新しいニューマチックケーソン工法・ウルトラDケーソン工法を紹介する。この方法がニューマチックケーソンのさらなる大深度施工を可能にした。

最後に、実施例を紹介する。例は圧縮空気圧力 0.545MPa 環境で行った立坑(外径 17.5m、掘削深さ 63.5 m)建設(平成 12 年)である。

2. ニューマチックケーソン

ニューマチックケーソンの施工手順は構造物の種類(橋梁などの土木構造物基礎、立坑、ビル地下室、トンネルなど)に応じて変わることなく、ほぼ同じである。本章では図-1 を例にして解説する。図中の丸数字は以降の解説の丸数字に対応する。

- ① その施工は、地下構造物下端に設ける仮設の作業室を地上で構築することから始まる。地下構造物の底版は作業室の天井となり、作業室はそこから下方に向かって突出した刃口(天井周面に設けた先細り状の壁)で囲まれて土砂や地下水の流入を遮断する構造になっている。作業室内部は掘削作業に供されるので、その底面は掘削地盤面に開放されている。以降、作業室をもった地下構造物をケーソンと略称することにする。
- ② 次に、作業室内で掘削を開始する。掘削に伴い、ケーソンは自重で沈下し、掘削地盤面に地下水が出てきた段階で地下水圧と同じ圧力を持った圧縮空気を作業室に送り込む。圧縮空気圧と地下水圧の平衡は、作業室内に地下水を浸入させないので作業室内は地上と同じ視界良好な環境となり、掘削が続行できる。大気圧より高い圧力をもった圧縮空気環境での労働が高気圧作業で、作業室内圧力を作業気圧といっている。

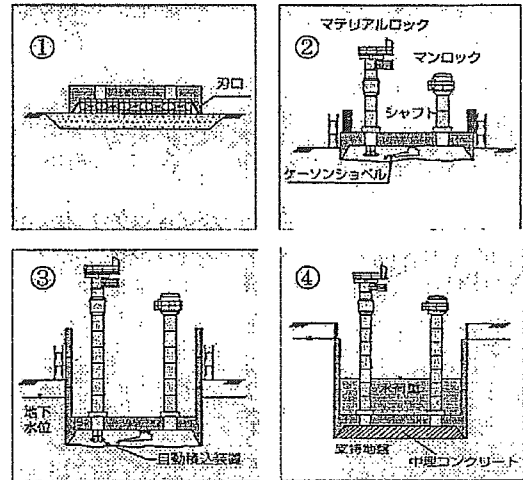


図-1 ニューマチックケーソンの施工要領

- ③ 最初に構築した部分が地表面近くまで沈下すると、その上方継ぎ足しを行い、掘削を再開する。この上方継ぎ足しは地下構造物の機能(基礎では鉛直荷重伝達の隔壁、地下室では梁・スラブ・壁・柱など)に応じて設計されたケーソン本体である。沈下が進むとケーソン外壁に作用する周面摩擦力が増大して沈下が困難になることがある。その場合はニューマチックケーソン内部に水を入れて重量を増大(荷重水)させたり周面摩擦力を人為的に軽減して沈下を促進させる。
- ④ これらの繰り返しにより所定の地下深部に到達させられたケーソンは、不等沈下を抑止するための中埋めコンクリートが作業室に充填される。この作業の時に作業室内の圧縮空気圧力は最高気圧となる。これで地下部分の掘削作業と地中構造物築造等が終わる。

ニューマチックケーソン工法による地下構造物の例を表-1 に紹介する。道路、鉄道や地下鉄等のトンネルに利用されたニューマチックケーソンは、沈設完了した隣り合うケーソンを接統一体化することでトンネル線形縦断方向延伸を可能にした。

表-1 の首都高速大宮線・JR 大宮駅付近・新幹線横断部においては合計 6 基のニューマチックケーソンを接統したトンネルで、総面積 3937m²、延長 200m 余となっている。この施工要領は、複数ニューマチックケーソン

ンを相互に連結して、より大面積の地下空間建設が可能なことを示唆している。

表-1 ニューマチックケーソンによる地下構造物例

地下構造物区分	掘削面積等	掘削深さ
上水道施設・柴島立坑 (大阪市)：4章で紹介	Φ17.5m 243m ²	63.519m
下水道施設 浅野第3ポンプ場(金沢市)	矩形 1651m ²	40.1m
地下駐車場 静岡駅前駐車場(静岡市)	矩形 2937m ²	21.9m
トンネル・首都高速大宮線・JR 大宮駅付近・新幹線横断部	1038 ～424m ² ×6基	37.5m
トンネル立坑2基 (東京港臨海道路 ・沈埋トンネル換気塔)	矩形・1基 の面積 2023m ²	20.9m
橋梁基礎・レインボー ブリッジ・アンカレイジ基礎 (東京)	矩形 3157m ²	海面下 46.5m
橋梁基礎・名港西大橋II期線 主塔下部工(最初のヘリウム 混合ガス呼吸実施例)	矩形 1006m ²	海面下 40.0m

3. 掘削設備と労働管理等

3.1 掘削設備等と掘削作業要領

図-1の②の掘削開始時はケーソンの沈下初期なので姿勢が安定し難いため掘削機械に作業員が搭乗して掘削するいわゆる有人掘削をする。姿勢が安定してきたら、地上から掘削機械を作業員が遠隔操作するので、作業室内は無入状態になる。機械等のメンテナンス等を作業員が行う場合に限り、作業室内は有人状態となる。作業室内で掘削した土砂はアースバケットに入れて、作業室天井を貫通するマテリアルシャフト(縦管)経由で、運河の水面調整用開門と同じ原理の2重扉構造をもったエアロックへ運ばれ大気と作業室間の圧力を調節して地上に搬出される。使用掘削機械の主流は天井走行式ショベルで、これは作業室の天井に設置した2条の走行レールを懸下走行する掘削機械で、掘削地盤面のトラフィカビリティに左右されずに360度旋回、掘削バケット及びブームの延伸起伏操作などを自在に行える機能を備えている。また、土砂搬出効率向上を目的とした自動積み込み装置なども導入されている。写真-1は天井走行式ショベルと自動積み込み装置の稼動状況を示している。これらは排気ガスを発生しない電力駆動方式である。機械のメンテナンス等で作業室内入退室を行う作業員は排土専用エアロックと分離設置した作業員専用エアロック(マンロック)を用いるのが一般的である。作業室内の高気圧環境から地上の大気圧環境に作業員が帰還する際の比較的長時間を要する圧力調整(減圧)をマンロック内で行う分離方式は排土作業に支障を与えないので、

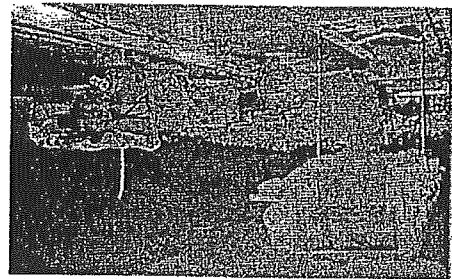


写真-1 ケーソンショベルと自動積み込み装置

効率的な方法である。

3.2 大深度施工における労働管理の課題とその対応

(1) 掘削作業の生産性向上対策

厚生労働省令・高気圧作業安全衛生規則(以降、「高圧則」と略称)の高気圧作業における1日当り労働時間は、以下の構成になっている。

- ① マンロックに入ってから加圧を開始し、作業室まで降りて所定の作業を行い、作業を終えて再びマンロックに戻り減圧を開始するまでの「高圧下の時間」。
- ② 作業気圧から大気圧までの減圧に要する減圧時間。
- ③ 大気圧帰還後の作業箇所周辺での一定時間待機。
- ④ 休憩時間等。

これらと1日の労働時間を基準にして設定した作業室内での標準的な純掘削可能時間は、作業気圧が高くなるほど短くなるとともに、減圧時間が長くなる。例えば、国土交通省の土木工事標準積算基準は作業員一人1日当り掘削実作業時間をゲージ圧0.1MPa以下の作業気圧で6.7時間、ゲージ圧0.3MPaクラスでは2.2時間程度、ゲージ圧0.392MPaで1.5時間を標準としている。なお、適用範囲はゲージ圧0.392MPa以下に設定(それ以上は別途考慮)している。掘削機械の地上遠隔操作方式(写真-2参照)の考案・実用化は、掘削時間を大気圧環境相当の時間にした。(注)ゲージ圧：圧力計表示圧力



写真-2 ケーソンショベルの遠隔操作状況

- (2) ウルトラDケーソン工法(徹底した無人施工推進)
(関白石が開発した地上遠隔操作方式のケーソン掘削シ

システムと別に考案された掘削沈設制御計測システムの組み合わせは「自動化ケーソン工法」として平成2年度の(社)日本建設機械化協会・会長賞や平成5年度の(社)土木学会・技術開発賞を受賞した。この方式においては機械のメンテナンス等が作業室内の高気圧環境で行うので、作業圧力が高くなった場合の種々の高気圧障害から作業員をバックアップするヘリウム混合ガス呼吸システム(次節で紹介)を梶白石は開発した。この呼吸方式と地上遠隔操作掘削方式とを備えた施工法「大深度ニューマチックケーソン工法」が地下水面下70mまでのケーソン施工を可能(平成7年・1995年)にした。その実績はそれ以降9現場11基に及んでいる(工事中共)。

梶白石は、これらの実績を踏まえて地下水面下90m(最高作業気圧0.88MPa)までのケーソン施工を可能にする「ウルトラDケーソン工法」を完成させた。

「ウルトラDケーソン工法」は図-2に示すように、従来の「無人掘削システム」に「自動メンテナンスシステム」及び「シヨベル回収システム」を加え、掘削作業の無人化を徹底するとともに、「超大深度マテリアルロック」により大深度への対応を可能にしている。図-3の「自動メンテナンスシステム」では、各設備のメンテナンス情報をパソコンにより集中管理し、これまで作業員が作業室内の高気圧環境で行っていた日常メンテナンス作業を自動もしくは地上遠隔操作により行う。「ケーソンシヨベル回収システム」は、作業室天井スラブに設置した回収ロックにケーソンシヨベルを稼動状態のまま移動・回収し、次に回収ロック内を大気圧環境にすることで修理や部品交換などの作業を地上と同じ大気圧環境で行う方式である。さらに同じ要領を用いてケーソンシヨベルはケーソン沈設完了後に作業室内で解体せずに直接地上に搬出できる。この「ウルトラDケーソン工法」では、メンテナンス作業員は高気圧作業から解放され、作業の安全性は大幅に向上しているが、非常時バックアップシステムとして、最高作業気圧0.88MPaまでの対応が可能で「超大深度ヘリウム混合ガス呼吸システム」も併せて開発し、安全性に万全を期す「無人化トータル支援システム」としている。「超大深度マテリアルロック」は、従来、シャフトの上端に設置していたマテリアルロックをシャフト下端、すなわちケーソン作業室天井スラブ直上に設置している。重量物であるロックを下端に設置することにより大深度に対応し、ロック装着作業の省力化と安全性向上をはかる事ができ、さらに、ロックへの送気・排気、ワイヤーボックスからの漏気音を低減させている。図-4は「ウルトラDケーソン工法」の適用範囲を示した図で、他工法の領域であった水面下70m以深においてもニューマチックケーソン工法が適用できるようになり、その用途のさらなる拡張が期待できる。徹底した無人化技術は作業の安全性に寄与するばかりでな

く、大型・大深度ケーソンにおけるコスト増大を押さえ工期短縮にも寄与しており、他工法に比較して十分な競争力を持ちうる状況となっている。

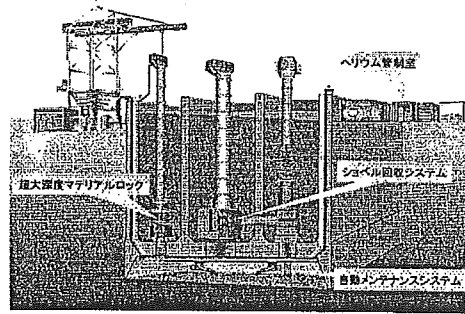


図-2 ウルトラDケーソン工法の概要図

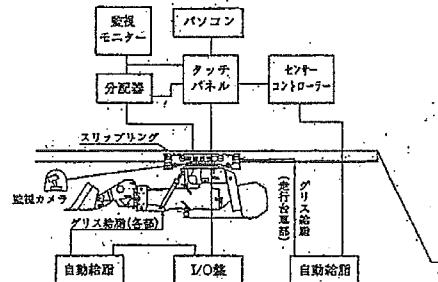


図-3 自動メンテナンスシステム

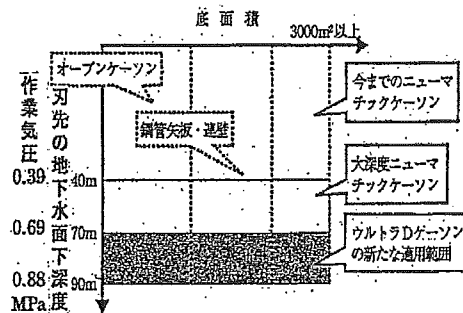


図-4 ウルトラDケーソン工法の適用範囲

(3) 通常減圧と酸素減圧の効果比較

大深度ケーソンの機械等メンテナンス作業は、通常の高圧空気呼吸に後続してヘリウム混合ガス呼吸の段階に至るので、最初に高圧空気呼吸における主な人体生理のモデル化の考え方と減圧の解説に進み、次に新しい減圧要領としての酸素減圧を解説することにする。これらの考え方はヘリウム混合ガス呼吸でも応用される。

1) 高圧空気環境における主な人体生理のモデル化

化学におけるヘンリーの法則は、「気体と液体が接している時、気体は飽和状態になるまで液体に溶解し、この時の濃度すなわち溶解度は、温度が一定ならば気体の分圧に比例する。」と要約説明される。高気圧環境滞在の

作業員（人体の体液は体重の約 60%）にはヘンリーの法則にしたがって高圧空気が体内に溶解していく。大気（空気）の成分を窒素約 79%、酸素約 21% であらわした場合、大気圧は 1atm（1 絶対気圧=1013hPa）なので、大気（空気）中の窒素は 0.79atm の圧力を持ち、酸素は 0.21atm の圧力をもつ。これらの圧力のことを窒素分圧や酸素分圧といっている。同様に、ゲージ圧 0.1MPa、絶対気圧換算で 2atm の高圧空気では窒素分圧が $2 \times 0.79 = 1.58\text{atm}$ となる。溶解過程を進ると、口や鼻から吸入された空気は肺に入り、肺胞内で血液に溶解し、血液は筋肉や脂肪の末梢組織に到達し、血液に溶解している空気成分が末梢組織に移る。空気成分のうち酸素は体内の代謝で消費されるが、窒素は不活性ガス（体内で化学変化しないので不活性と見なしている）なので消費されずに体液や体内組織に溶けこみ、かつ蓄積していく。数学的には、次のようなモデル化をした例（ホールデン理論：1907 年）があり、高圧則減圧表はこの理論を用いている。

血液内に溶解した窒素が速やかに人体組織に運ばれると仮定すると、微分方程式： $d P_{tis}/dt = k (P_a - P_{tis})$ が得られる。ここに、

P_{tis} ：人体組織内の窒素分圧

t ：経過時間 [分] P_a ：動脈内の窒素分圧（≒ 高圧空気の窒素分圧と仮定）

k ：人体組織の血流量と窒素溶解度（血液と組織それぞれへの）に関する係数は、 $P_{tis} = P_0 + (P_a - P_0) (1 - e^{-(0.693 \times t/T)})$ である。

P_0 ：圧力が変化する前の人体組織の窒素分圧

T ：人体組織に溶解する窒素の分圧が飽和に達する時間は長いので、50%飽和に要する時間（半飽和時間）で組織を代表させる。血液などが豊富な肝臓など含水率が高い組織には早く溶解していき飽和時間は短い、含水率の低い脂肪分などを含む臓器の組織にはゆっくりと溶解していくので飽和時間は長い。これらの現象は可逆的で、減圧時には脂肪からの溶解窒素排泄時間は長い。

P_{tis} の計算では具体的な臓器などの区分はせず、半飽和時間 120 分組織などと抽象的名称を用いている。高圧則の減圧表は人体組織を 6 区分し、半飽和時間、5、10、20、40、75、120 分を用いている。

ii) 高圧下滞在中の窒素分圧増大

高圧下滞在は、大気圧から加圧して作業気圧まで高めしていくので、窒素分圧が逐次増大する。

iii) 異常減圧等による減圧症の機序

高気圧作業を終えて大気圧に帰還するときは減圧を行うので、蓄積された体内溶解窒素の分圧と減圧環境（マンロック内の高圧空気環境）の窒素分圧との差（前者の方が高いので、過飽和という表現をする）により蓄積された体内溶解窒素が体外に排泄される。ある程度までの

分圧差は生体に何ら異常を来さないが、限界を超えて不適切な分圧差例えば誤って短時間にマンロック内圧力を低下させるなどを行うと種々の障害を惹き起こす。これらを総称して減圧症といっている。代表的な減圧症の症状は、腕、肩や膝の痛みや各種筋肉痛である。減圧症を惹き起こすような分圧差は体内組織内で溶解窒素の気化すなわち気泡発生を誘発し、それが神経圧迫などの痛みとなって減圧症の症状となる。不適切な分圧差を生じさせないような減圧制御要領を設定したのが標準的な減圧表である。高圧則の減圧表は次に示す段階減圧方式を採用している。

- ① ある程度まではマンロック内圧力を低下させ、
- ② 限界圧力にきた時点で圧力低下を中断・限界圧力を保持し、体内溶解窒素分圧低下を待つ（この時間を減圧停止時間という）、
- ③ マンロック内圧力を、さらに低下させてもよい体内溶解窒素分圧になったら、
- ④ 次の圧力段階までマンロック内圧力を低下させる。
- ⑤ この繰返しにより大気圧まで帰還する。

減圧症の治療は、発症時体験の作業圧力以上にまで再加圧して、再度減圧すれば大部分がなおる。ここまでは高圧則で現場における減圧操作が容認されている。

iv) 酸素減圧の効果

ゲージ圧 0.3MPa を超えるニューマチックケーソン工事は労働安全衛生法第 88 条に定める仕事に該当するので、建設工事計画届と計画書を厚生労働大臣に提出して大臣審査を受けることになっている。審査には有識者の意見を聞いて当該計画への指導が行われる。その場合、減圧症予防措置として酸素減圧（減圧時の酸素吸入）が勧告される傾向にある。

酸素減圧はマンロック内の高圧空気圧と同圧力の酸素を専用マスクで吸入しながら行う。この場合の窒素分圧変化を物理現象面から考えると、肺組織の体内溶解窒素分圧と酸素が多く窒素がゼロ近い肺内の窒素分圧との分圧差が大きくなり、通常減圧の場合よりも体内溶解窒素分圧低下が促進される。これらのことから、酸素減圧は減圧症発症要因を軽減し、安全性を向上させる方法であることが理解できる。酸素吸入は次の要領で実施していることが多い。

- ① 酸素吸入は酸素の毒性影響（後述）が少ない減圧停止圧（例えば 0.12MPa）から行う。
- ② 酸素吸入開始の減圧停止圧力で、最初に酸素を 25 分呼吸し、（次の減圧停止圧に移行する時も継続）
- ③ 次に酸素マスクを外して酸素毒性軽減のために純酸素より酸素分圧が低いマンロック内高圧空気を 5 分間呼吸する。この空気呼吸のことを「エアブレイク」といっている。
- ④ その繰返しにより、大気圧まで減圧する。

酸素吸入時の呼気はマンロック外に排出するので、マンロック内圧力は一定に保たれ、かつ酸素分圧増大も防止される。これによりマンロック内の火災発生要因が排除されている。写真-3は酸素減圧実施中の状況である。

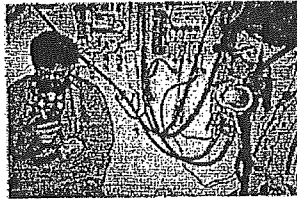


写真-3 酸素減圧実施状況

高酸素分圧の気体を呼吸すると、肺は通常と異なる気体に暴露されて肺活量が減少し、暴露の限界を超えると元に戻らない非可逆性を示す。非可逆性は将来の呼吸器疾患誘発につながる可能性があるといわれている。それで、可逆性を保持する範囲で酸素吸入を行うことになる。そのための管理指標として、肺酸素中毒単位 UPTD と UPTD の 1 週間累積値 (単純加算値) CPTD が提案されており、 $UPTD = (0.5 / (P - 0.5))^{-0.833} \times t$ で求められる。ここに、P は呼吸ガスの酸素分圧。P ≤ 0.5 では酸素毒性無しのため UPTD = 0 にしている。UPTD は 1 回の高気圧作業当りの酸素暴露時間に対応する計算値で 1 日当りの管理限界値 850UPTD が推奨され、CPTD の限界値として 2500UPTD が推奨されている。図-5 は酸素減圧の効果を体内溶存窒素分圧低下状況から見た例である。通常減圧と酸素減圧の総減圧時間を同じにしているが、後者の方が早く窒素分圧低下をみせている。なお、比較のために酸素減圧時のエアブレイクも減圧停止時間としている。

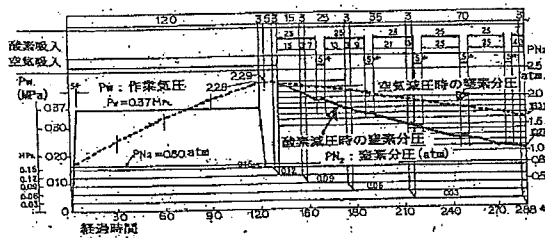


図-5 空気呼吸の通常減圧と酸素減圧の効果比較

(4) 窒素酔い

空気成分の窒素には麻酔作用があり、高圧空気を呼吸するとその作用が増大することがわかっており、これを「窒素酔い」と言っている。その初期状態は、敏感な人でゲージ圧 0.3MPa の高圧空気呼吸 [窒素分圧: $(1+3) \times 0.79 \div 3.2 \text{atm}$] で発現し、注意力散漫の状態になる。ゲージ圧 0.4MPa を超える高圧空気呼吸では、先の状態となる

人も増加し、一層の至福感 (飲酒時のほろ酔いに類似) の中で責任感喪失や安全性への無配慮の状態となる。ゲージ圧 0.6MPa を超えると、誰でもこの状態になり、意味もなくげらげら笑ったり、笑いが止まらず他人の指示を受け付けなくなると言われている。これらの状態は、圧力を低下させると比較的短時間で解消し、この程度の高気圧環境滞在では、後遺症がない。人体には圧力への順応性があり、それが作業員それぞれの感受性となり窒素酔い発現圧力が特定されない。しかしながら、複雑化した掘削機械のメンテナンスなどを飲酒状態相当の体調で作業するのは好ましくないため、窒素分圧 3.2 や 4.0atm を管理限界値としている。

3.3 ゲージ圧 0.3MPa を超える環境でのメンテナンス (1) ヘリウム混合ガス

窒素酔いの予防は、高分圧窒素を吸入しなければよく、窒素の代わりにヘリウムを添加したヘリウム混合ガスを用いる方式でも可能である。高圧環境でヘリウム混合ガスを呼吸すると、人体を構成する組織にヘリウムは窒素より早く溶解蓄積し、減圧環境では窒素より早く排出される。すなわち、窒素の飽和時間よりヘリウムの方が短い。また、このガスを呼吸すると、窒素の体内溶解程度が少ないので体内窒素分圧と減圧環境の圧力との差を発症要因とする減圧症の予防効果も期待できる。一方で特有の不便さを誘発する。一つはガス密度と音波の伝播速度との関係が会話をヒズませ、音声通信を損なわせる。二つ目は熱伝導性が大きいことで体熱を損失させる。これらに対応したヘリウム混合ガス呼吸が地下水面下 90m のニューマチックケーソン工法を可能にしている。

(2) ヘリウム混合ガス成分の管理値

ヘリウム混合ガスのガス成分構成はヘリウム・酸素 2 種混合 (ヘリオックス: heliox・英語のヘリウム helium と酸素 oxygen との合成用語) やヘリウム・窒素・酸素 3 種混合 (トライミックス: trimix) が一般的である。

建設業労働災害防止協会は平成 4~6 年度にかけて、旧・労働省の委託を受けて「混合ガス利用における圧気潜函工法の健康障害防止に関する調査研究」を進め、ヘリウム混合ガス成分管理値を表-2 のように設定した。

表-2 ヘリウム混合ガス成分管理値

管理項目	管理値
酸素毒性対策	酸素分圧 0.16atm 以上 1.6atm 以下
窒素酔い予防対策	窒素を含む混合ガスでは 窒素分圧 4atm 以下
呼吸ガス抵抗対策	相対ガス密度 (空気を基準) 5~6 以下

混合比率例を示すと、作業気圧約 0.7MPa の場合、ヘリウム 50%、窒素 30%、酸素 20% の使用が可能である。酸素分圧は $(1+7) \times 0.2 = 1.6 \text{atm}$ 、窒素分圧は $(1+7) \times 0.3 = 2.4 \text{atm}$ 、及び相対ガス密度 (空気を基準) は 4.64 とな

事（発進立坑築造工事）

表-3 柴島立坑の工法選定経過

工法の候補	検討項目等	評価
鋼管矢板工法	地下水位が高い 施工位置でのボー リングの検討	根入れ深度 100 m クラスで工期、 工事費増大し工 法候補から削除。
地下連続壁工法	同上	同上
オープン ケーソン工法	GL-32~39m のN値50以上 の洪積砂礫層及 びN値20以上 の洪積粘土層の 掘削可否	左記土質の掘削 が困難と予想し、 工期、工事費の 増大を招くと評 価し、候補から 削除。
ニューマチック ケーソン工法	掘削の可能性	経済性、施工性 における優位性 が最も高い。

(2) 発注者：大阪市水道局

(3) 施工者：白石・井上工業特定建設工事共同企業体

(4) 請負金額：約 151,800 万円（消費税抜き）

(5) 柴島立坑一般構造図と掘削箇所の土質

立坑の構築は躯体長 63.519m を 16 リフトに分割して施
工したが、図-7 は柴島立坑の一般構造図と掘削箇所の
土質である。

(6) 概略工事数量：表-4 は概略工事数量である。

(7) 工期及び工程進捗状況要約

工期：平成 11 年 1 月 20 日～平成 12 年 11 月 30 日
(678 日)

工事進捗状況要約：表-5 はニューマチックケーソン
掘削沈下を主体とした工事進捗状況の要約である。

表-4 概略工事数量

工種	仕様	単位	数量
ニューマチック ケーソン掘削	有人掘削	m ³	2,440
	無人掘削	m ³	12,450
コンクリート	21-12-20BB	m ³	774
	21-12-20 H	m ³	4,511
	NOMST 用	m ³	793
	中埋め	m ³	466
鉄筋	SD295A	トン	462.3
	NOMST 用 (CFRP)	m	1,138.3
型枠		m ²	6,300
刃口金物		トン	5.44
鋼矢板		トン	213.84

(8) 立坑周辺の地下埋設物防護等

立坑周辺には供用中の水道幹線（中部・西部および堀
江幹線φ1100mm、3系統）が最小離隔距離 3m で埋設さ
れており、さらに 77,000 ボルト特別高圧電力ケーブルが
離隔距離 5m で埋設されていたので、ケーソン周囲に防
護鋼矢板（Ⅲ型、L=22m、ケーソン外壁面よりの離隔距離
1.5m）を設置して対応した。

(9) 掘削作業

ケーソンの姿勢制御などのために有人掘削は作業気圧
0.098MPa までとした。その圧力より高い作業気圧では無

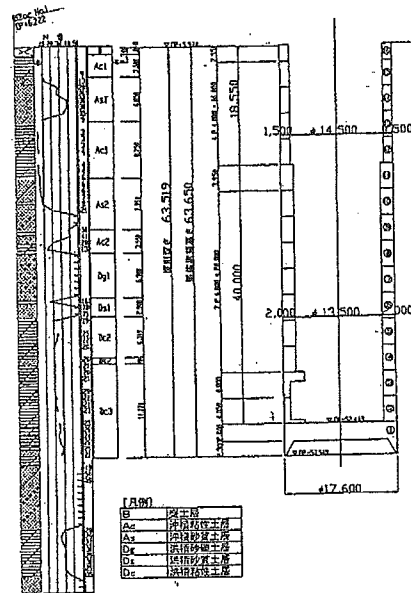


図-7 柴島立坑の一般構造図と掘削箇所の土質

表-5 工事進捗状況要約

月日	項目	備考
平成 11 年 1 月～5 月	準備：人員編成 施工計画他	立坑近接の埋設物 変状防止計画含む
5 月 14 日	労働安全衛生法 第 88 条に基づく 建設工事計画届	労働大臣審査開始
7 月 2 日	労働大臣審査終了	刃口据え付け用 地山掘削開始
8 月 25 日	土砂セントル掘削始	刃口高さ GL-2.76m
平成 12 年 4 月 17 日	ヘリウム混合ガス 呼吸開始	GL-39m (0.3MPa) 8～4 月の沈下進捗 0.17m/日（休共）
8 月 19 日	沈下終了	4～8 月の沈下進捗 0.19m/日（休共）
8 月 23 日	作業室内整地終了	荷重水 5267 トン
9 月 1 日	中埋めコンクリート	ショベル撤去と コンクリート準備

人掘削とした。帯水層の掘削作業における作業気圧は、
作業室内の地下水位が刃口底面より上方に位置するよう
に制御した。この制御により作業室内から掘削地盤面外
に向かって圧縮空気が排出（漏気という）されないので、
作業室内の掘削面の土質が仮に酸素欠乏地層であっても、
作業室内の高圧空気に触れない、すなわち酸素欠乏空気
を発生させない圧力管理方法となった。

(10) ヘリウム混合ガス呼吸設備を含めた仮設備

図-8 は柴島立坑工事の仮設備概要図である。排土設
備以外は 25×10m の仮設ヤード内に収めた。

(11) ヘリウム混合ガス呼吸

ヘリウム混合ガス呼吸は作業室内の圧縮空気圧力が

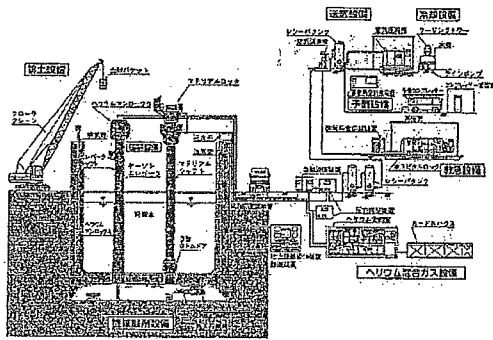


図-8 柴島立坑の仮設備

0.3MPaを超えてからケーソン工事完了まで行った。また、その開始に先だてて圧力管制員や作業室内のメンテナンス要員などを対象とした習熟訓練などを10日間実施した。写真-4は掘削機械や照明等メンテナンスのための作業をヘリウム混合ガス呼吸で行っている状況である。

(12)ヘリウム混合ガス呼吸の安全管理

減圧等の圧力管理は専用の圧力管制室に専従者を配置して行った。かれらは作業室内やマンロック内の各所に設置したテレビモニターで作業員の状況を逐次監視すると同時に圧力制御に従事した。管制装置は、一つが故障しても次善の策・フェールセーフの考え方で設計している。室外設置のガスポンペを束ねたガスカードルも同様である。写真-5は圧力管制状況を示している。

(13)施工実績

①沈設精度(立坑底板位置・エントランス中心軸とのずれ):80mmでシールドマシン設置が可能と判定。鉛直は設計より59mm下方で沈下終了。②鉛直方向傾斜(立坑底板と頂部とのずれ):1/850。③ヘリウム混合ガス呼吸:延べ人員657名が掘削機2台と他の機器メンテナンス等に従事し、異常訴えは皆無であった。UPTDやCPTDも推奨される管理値以内に収まった。④ヘリウム混合ガス呼吸実施の最高作業圧力は5.45MPaであった。⑤刃口据え付け準備から中埋めコンクリート終了まで459日(日曜・祭日とも)の工事日数であった。

(14)本実施例の結論

契約で要求された地表面下63.5mに立坑を設置するための施工法をニューマチックケーソン工法で行い、要求事項としての施工精度、品質性能を満足する製品を発注者へ納品した。厚生労働省の指導を得た最高作業圧力5.45MPaのヘリウム混合ガス呼吸作業併用の機械メンテナンス等は、窒素酔いや減圧症による異常のない実施となった。さらに以下で収めたことにより、将来の呼吸器疾患への懸念もないと判断した。

以上により地下水面下90m(ゲージ圧力0.88MPa)クラスのニューマチックケーソン工事への道が開かれた。

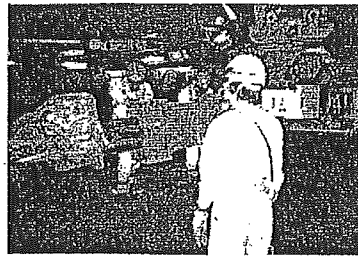


写真-4 ヘリウム混合ガス呼吸による作業状況

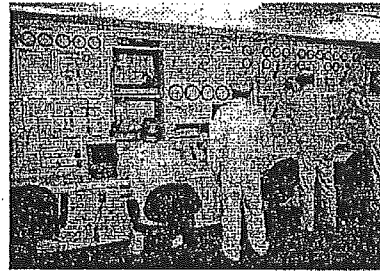


写真-5 管制室での圧力制御状況

5. あとがき

第42回技術委員会(平成12年5月30日)での技術発表時点で予告した工事実績に合わせてその後開発したウルトラDケーソンの概要も追加して本報文とした。担当技術者は酸素減圧や減圧症発症予防等の原理を理解して工事管理に従事していることを認識されたい。英国ではシールドトンネル工事におけるマシンのカッタフェイス整備を高気圧環境で行い、減圧に際して酸素減圧を採用している。この方法は法制度化(1996年)され、英国独自の実施要領を指導しているが、それに固執せず施工条件(JV編成や作業圧力など)に応じて他国の方式(英国基準を満足する範囲で若干修正)適用も可能なように運用面において柔軟性をもたせた法整備となっている。

最後に、一連の高気圧作業に係る医学面で、ご指導していただいた東京医科歯科大学・大学院教授・医学部附属病院高気圧治療部長 眞野喜洋 医学博士に御礼を申し上げます。

参考文献

- ①山寺徳明, 藤本明尚, ニューマチックケーソン技術の新たな展開, 基礎工, 総合土木研究所, pp.60-61, 2003.12
- ②眞野喜洋, 高圧環境と健康, (財)労働科学研究所出版部, 1994.9
- ③高城伸一, 大深度シールドによる既設配水幹線改良工事の設計, 市建, 大阪市建設技術協会, VOL.63, pp.55-61, 2003.6

執筆者及び連絡先

石井 通夫: 榎白石 技術本部 土木技術部
 〒101-8588 東京都千代田区神田岩本町1-14
 TEL 03-3253-9121、 FAX 03-3253-7427

5-3 オランダのトライミックス呼吸：シールドマシン修理に用いた潜水例

5-3-1 まえがき

この報文は、公開された 5 編の報文を基にして再構成した。そのうち 5-3-2 は *Tunnels & Tunneling International* 誌の 2000 年 9 月号と 2001 年 1 月号の要約（日本圧気技術協会「建設と圧気：2001 年 6 月 15 日」で紹介）で、シールドマシン修理を中心にした土木工事報告であったが、トライミックス使用や減圧要領などの記述は省略されていた。

5-3-3 はインターネット検索(Google：キーワード・Sterk, Trimix)で入手したが、これは Jean-Claude 氏から眞野 に寄せられた情報²⁾中の「トンネル工事の飽和方式」の報文である。この報文表題は「Saturation Diving for Tunneling Operations」で、トライミックス作業要領を紹介（減圧詳細は省略）していた。5-3-4 は同様にインターネット検索(Google：キーワード・Westerchelde, saturation diving)で入手した情報で装置や潜水要領などの追補である。5-3-5 は「まとめ」である。

注) 手紙：研究室蔵書にフランス労働省発行の高気圧規則（1992 改訂）があり、その付録にヘリオックス減圧表が添付されている。1992 年改訂の規則のため、2004 年時点の現状を眞野 経由でフランスの専門家・J. Claud 氏に問い合わせた。その回答が上記の「手紙」で、結論は「若干の変更はあるものの、ヘリオックス減圧表は改訂されていない。現在、この書籍は再版されていないので、フランスでも入手できない。」であった。再版なしとは、前条破棄や追補箇所の通達などで対応しているためと推測する。これらは、本報告書・第 3 章 1-2-5 に紹介した。

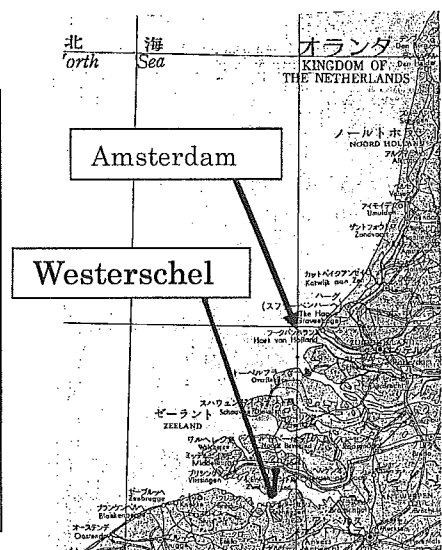
5-3-2 オランダ：シールドトンネルの切羽作業における混合ガス呼吸利用

オランダの Westschelde シールドトンネル工事（内径 10.1m の 2 車線、総延長 6,600m、双設掘進）の最深部到達地点（トンネル上面が海面下 50m）で、掘削地山が海緑石砂のためシールドマシン 2 基が同時期に締め付けられて鋼殻変形を誘発して掘進不能となり、掘進再開のために切羽前面のカッター交換等を行うことになった。それらの作業は、切羽前面の空洞（ベントナイト安定液の存在で地山が自立）内での潜水作業を伴い、ヘリウム・窒素・酸素混合ガス呼吸・飽和潜水方式で行われた。潜水システムは海面下 65m、作業気圧 8.5bar（安定液比重 85/65 \approx 1.30 クラス）に対応できるように設計された。北海油田作業に従事したダイバー（Nordsee Toaucher GmbH と Noordhoek Diving Co BV 共同企業体）は、切羽前面のベントナイト安定液圧[ゲージ圧 0.65MPa（絶対気圧表示約 7bar）]の視界不良環境で連続 2 週間滞在（作業、睡眠、食事、休憩などを含み 1 基当り 6 日、減圧を除く）して双設トンネルのマシン 2 基のカッター交換を行い、東側マシンは 2000 年 6 月中旬に刷新され、西側マシンは 8 月に刷新された。この工事は圧気土木の世界最高作業気圧を記録した。

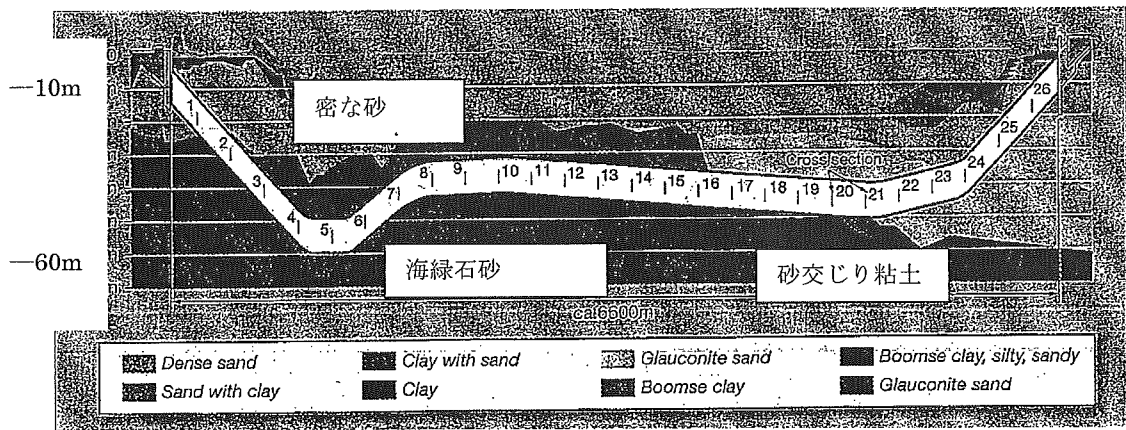
訳注) 飽和潜水：一定圧力の高圧環境に人間が長時間滞在すると、人体内に溶解する呼吸気体は飽和状態になり、さらに長時間その環境に滞在しても溶解量は増大しない。

したがって、減圧に要する時間は一定となる。労働時間や寝食等の時間も含めた生活を同圧環境で行う連続滞在により、短時間潜水よりも効率的な潜水ができる。これが飽和潜水である。潜水深度 100m クラス、滞在 10 日で、減圧所要 3～4 日と言われている。日本では潜水深度 500m クラスまでの実績がある。

ベントナイト安定液：ベントナイトは粘土系のモンモリロナイトを主成分とする粒径 0.2 μ 以下の鉱物で、水に溶かすと懸濁液（けんだくえき）となる。水より粘性が高いため、地下探査ボーリングの孔壁や地下掘削の溝壁などの安定（自立して崩壊しない状態）に利用される。



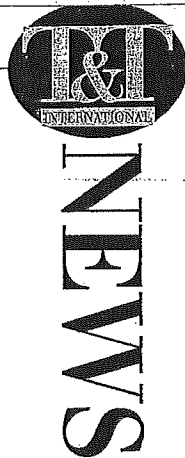
施工位置図



地質図 (出典: Tunnels & Tunneling International 誌 2001 年 1 月号 29 ページに土質邦訳を追加)

シールドトンネルの切羽作業における混合ガス呼吸利用の報道

出典: Tunnels & Tunneling International 誌 2000 年 9 月号 6 ページ



Record diving team takes pressure off Westerschelde

Divers working blind in seven bar pressure of bentonite slurry have allowed two stalled TBMs to restart on the Netherlands, Westerschelde crossing. Experienced North Sea oilfield divers carried out the "saturation" diving operations, which, at nearly

TBM necessitated the divers living for about two weeks under pressurised conditions. The main work of the divers was to replace peripheral cutters with 12 larger models on each TBM in an effort to maintain a larger annulus.

Both 11.34m-diameter Herrenknecht Mixshield TBMs had been halted by poor progress rates in apparently "squeezing" ground which had reportedly deformed the shield cans slightly, with consequent steering and lining erection problems.

The two were progressing from a reclaimed "polder" at Terneuzen on the south bank of the River Westerschelde to receiving caissons at Ellewoutsdijk on the north side. They

conditions. A further ground-control precaution are five hydraulically operated forepoling plates in the face crown.

The divers not only replaced cutters but also installed plastic lifter-bags around each distorted shield. These were inflated with water to push back the soft ground, and then deflated to leave an annulus, allowing the TBM to move more freely and restart forward progress.

Also under consideration was an untested segment reshaper. It was felt too expensive and risky to use on this occasion. The equipment would have to be operated for each ring, to give an expected forward progress of 6m/day under perfect operation.

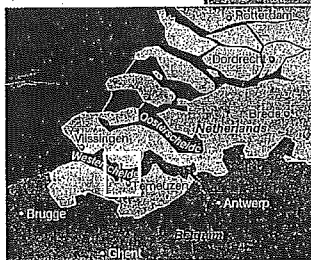
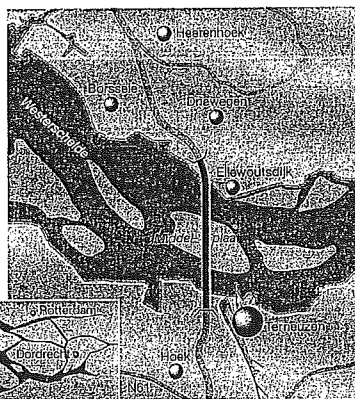
The work took six working days for each machine excluding decompression. The west machine was refurbished in mid-June and the other last month (August).

Seven-piece pre-cast concrete rings with interlocking segments and gaskets are being installed within each TBM shield.

TBM progress to date has been 600m for the east bore and 500m for the west side. The delays lasted nearly six months but now both TBMs are said to be advancing steadily at 6-8m/day. Hydraulic lifting bags no longer have to be used.

The joint venture, KMW, has a design-and-construct contract which includes a maintenance agreement for the first ten years of tunnel crossing operation. The crossing was originally scheduled for opening in March 2003, following the completion of tunnel boring in autumn 2001. Project cost was budgeted at \$725M.

Maurice Jones



7 bar, are claimed to be a world record. Divers were ferried in a special four-man capsule from a pressurised

surface residence station to the TBM's bentonite slurry cutterhead where they entered the pressure chamber through airlocks.

Decompression periods made it necessary to adopt "continuous" pressurised operations for which all equipment had been installed as a precaution. The operation for each

had reached the deepest point of the 6.6-km runs. The predicted ground for tunnelling is chiefly clayey sand in the centre, but with glauconitic sand towards the end of the drive, and also below the clayey sand at the deepest point.

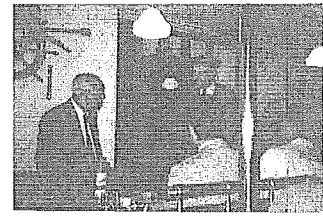
At the halt position a slurry pressure of around 6.5 bar was necessary in order to maintain face stability. The system is designed to work at up to 8.5bar to allow sufficient for work at up to 65m depth below the river estuary.

As with other Mixshields, a compressed air bubble in the pressure chamber provides a better response time to changing ground

5-3-3 トンネル工事の飽和潜水：Saturation diving for tunneling operations

Le Pe'chon Jean-Claude, JCLP 高気圧, パリ, フランス
Sterk Walter, ライデン大学, オランダ王国
Van Rees Vellinga T.P. アルボ・ハイパーコン, オランダ王国

訳注) Sterk : 大深度潜函混合ガス利用研究会の 0.5, 0.6 & 0.7MPa 滞在実験と(株)大本組の名港西大橋西工事のトライミックス呼吸を指導した. この実験では, 万一の減圧症対策としてフランス・コメックス社の酸素再圧治療表 CX-30 を用意したが, 使用することはなかった.



Sterk 教授と梨本教授：撮影・石井

摘要：ウエスターシエルド・トンネル掘進に際して，圧力 6.9bar(g) のベントナイト液中に作業員滞在の必要が生じた，最初の飽和技術と混合ガス呼吸がトンネル工事で使われた．必要圧力は，ハビタット 4b(g)・トライミックス呼吸，移動時圧力 4b(g)・空気呼吸，作業気圧 6.9b(g)・トライミックス呼吸 であった．ハビタット外への総潜水回数は各回とも 3 名のダイバーで 37 回である．総作業時間は 400 時間である．

(1) まえがき

全ての圧力値は bar(10^5 Pa) 表示で，bar(g) あるいは b(g) が付くとゲージ圧を示す．(g) が付かないときの bar あるいは b はガス分圧である．

呼吸ガスとして空気であろうと珍しい混合ガスで

訳注) $1.013\text{bar} = 1013\text{mbar} = 0.1013\text{MPa} = 1\text{atm}$

であろうと 1960 年代初期には深い潜水それぞれの後で，ダイバーは長い減圧時間に直面し，全ての時間を圧力下で過ごし，仕事が終わったときのみ 1 度の減圧を行うと考えられていた．この潜水方式は飽和潜水と呼ばれている．最初の試みは米国海軍指導 (Sealab 計画) やクスター (3 回の Conshelf 実験) の基に行われた (参考文献 4 & 8)．水中居住は技術面での解決策であった．海中工業はダイバーが数週間も圧力環境に滞在することを要求し，ハビタットが構台や台船の上につくられた．ハビタットから作業現場への輸送は加圧されたダイビングベル経由で実施された．今日では，石油や天然ガス工業でダイバーを制御しながら決められた全ての海中作業手順を行うために精巧な潜水支援船が使われる．実証された最大到達深度は 534m-53.4b(g) で，商用ベース運用の最大深度は 350m-35b(g) である．潜水深度 50m-5b(g) を超えると直ぐに呼吸ガス密度と窒素酔いの影響が呼吸媒体として空気を不適切とする．圧縮空気はヘリウムを含んだ呼吸混合物に変更されねばならない．その呼吸混合物は作業のタイプに依存する適当な組成をもつヘリオックス (ヘリウムと酸素) あるいはトライミックス (ヘリウム，窒素と酸素) のどちらでもよい (参考文献 1)．

トンネル工事の圧縮空気作業は 19 世紀半ば以来行われてきた (参考文献 5 & 9)．加圧されたトンネル内において飽和状態の基で作業を行うことを初めて提案したのは Behnke 氏であった (1960 年代：参考文献 2 による)．海峡横断トンネル建設準備の間に，トンネル掘進機 (TBM) 内で作業員が 10bar(g) 滞在の可能性を評価する研究が行われた．結論は，圧力が存在する位置において大気圧下で修理や探査を行うことが必要になるために，コストと安全性の課題が地盤凍結技術あるいは地盤への注入を用いて克服できることであった．

それ以来，どのトンネルも混合ガスが必要不可欠な圧力範囲に到達していない (Elbe トンネルはその範囲 5 - 4.2b(g) であったが混合ガスは使われていない)．しかしながら，日本におけるケーソン作業は呼吸ガスとしてトライミックス使用を成し遂げた (参考文献 5)．

(2) Westershelde トンネル

直径 11.3m，総延長 6.6km のウエスターシエルド・トンネルは西 Sheldt 川の下，予想水圧 6.5bar(g) を掘進しなければならず，それで，その圧力で作業員を支援するために人工呼吸ガスが使われねばならなかった．海面下 65m のプロジェクトの低い箇所において，TBM 2 基が部品交換を要求し，1 基は礫破碎装置の重大な修理を要求した．そのような作業は混合ガスと長い作業時間を要するのを知って，現場に完全飽和ハビタットが設置され，2 基の輸送用シャトルすなわち移動式高圧環境室がつけられた．

使われるべき潜水方式は実際の作業環境にしたがって決定されねばならなかった。

それらは、作業気圧：6.9bar(g)、交換部品：外周カッター

薄い土被り厚（トンネル直径の2倍以下）のために、カッターヘッド室からベントナイトを圧縮空気で空にすることは危険と予想された。したがって、作業員滞在はベントナイト液中潜水でダイバーにより実施（視界ゼロ、照明なし、潜水水深69m相当—6.9bar(g)—での作業に帰着した。）されねばならないことが決定された。

(3) 飽和技術

1) 呼吸ガス

呼吸ガスの取り扱いとは異なる条件で適切な呼吸媒体選択を要求した。

1) -1. ハビタット内

ハビタット内では、圧力は安定しており、できるだけ作業気圧に近似した圧力で、移動期間後の減圧症罹患リスクを減ずるように選択されるべきである。手順を簡略化し、マスク呼吸時間減少のために、その圧力は大気圧縮空気を呼吸する間にTBMエアロックへ移動できるようにすべきである。これら2点の制約をうまく処理するためにハビタット滞在と移動時気圧は4bar(g)に選択された。この圧力では空気は呼吸媒体として酸素毒性のために長い暴露に使われない。酸素含有量減少は対応して窒素分圧や窒素酔い/密度を受忍レベルまで増大させる。最終的な選択は酸素0.4bar、窒素3.6barと残りのヘリウム1barのトライミックス呼吸ガスとなった。ハビタット環境は1日24時間、ハビタット4区画それぞれに設けられた生命維持技術者と環境制御装置によって管制される。

1)-2. シャトル内

ハビタットからTBMへの出勤はハビタット内と殆ど同じ混合呼吸ガスで便利良く行われる。酸素分圧 PO_2 が0.05bar増大だけが行われる。シャトル環境はシャトル搭載の閉鎖循環環境制御装置により維持され、シャトル搬送台車に乗車した支援員に管制される。

1)-3. エアロック内

TBMエアロックに連結した後に、作業員はさらなる加圧に備えて4bar(g)で圧縮空気を呼吸できる。

1)-4. 加圧と気泡室への進入

外部供給から深度圧で送られる混合ガス呼吸マスクはエアロック内で着用される。6.9bar(g)への加圧手順はエアロック内で行われ、気泡室への連絡ドアが開かれる。深度圧の混合ガスはハビタット内と殆ど同じ窒素分圧であるがさらに多くのヘリウム分圧と酸素分圧を供給するトライミックスである($PN_2=3.8b$, $PO_2=0.95b$, $PHe=3.15b$)。

訳注) 気泡室：原文は air bubble(直訳：空気気泡)という設備である。作業員がエアロックから切羽に出る手順はダイビングベルでの水中進入退出と同じである。すなわち、2室構造(切羽側とトンネル坑内側)のエアロックを作業気圧(切羽の安定液圧力と同程度)まで加圧し、切羽側の部屋に進入し両室仕切り扉を閉鎖する。切羽の安定液を切羽側の部屋に満たすと切羽の安定液圧力と同じになるので切羽への出入り扉を開いて切羽に出る。切羽への安定液供給が同じに行われる。退室は切羽側の部屋に圧縮空気を送り込んで安定液を排出してトンネル坑内側の圧力と同じにして仕切り扉を開いてトンネル坑内側の部屋に移動する。エアロックの切羽側の部屋を気泡室と称していると推測する。

1)-5. 潜水

作業員のうち2名は潜水装置(ドライスーツとKBM17型潜水ヘルメット)を装着する。彼らは息こらえをしている間にマスクを交換し、カッターヘッド区域に通じるドアに到達するためにベントナイト安定液に入り、それから装置交換のためにシールドマシン外部の回転面板ま

で泳ぐ。作業時間すなわち最大4時間が終了した後で、彼らは気泡室へ帰り、ダイビングスーツやヘルメットを脱ぎ、エアロックに戻り、ドアを閉める。5bar(g)への減圧はエアロック操作員の制御により実施される。5bar(g)は最初の減圧停止圧で、それは次の減圧停止圧 4.5b(g)への減圧前の15分継続する。

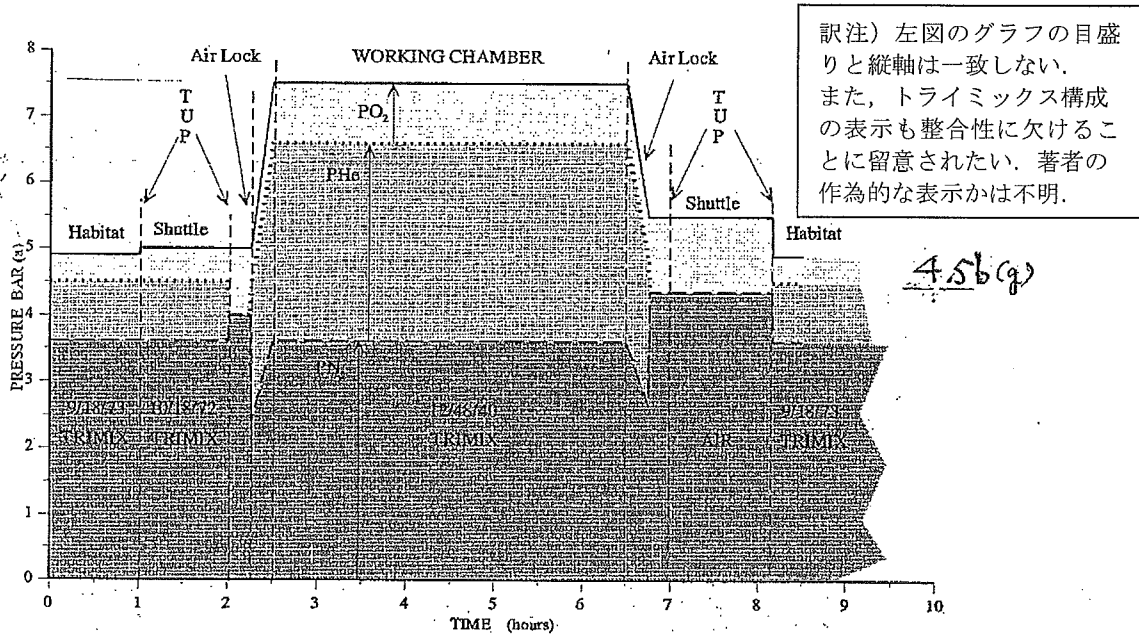
訳注) ドライスーツ：寒さを防ぐために足先から首下まで気密一体とした潜水服。スーツの断熱作用が大きいため体熱損失は少ない。対語のウェットスーツは水の浸入を許し、スーツと体の間に浸入した冷水が体温で暖められて体感温度を高める。それが冷水中での活動のある程度向上させる。

1)-6 ハビタットへの帰還

シャトルがエアロックにそのまま連結されていたので、シャトル内ドライミックスが4.5bar(g)の圧縮空気で洗い出される。移動がその圧力で行われ、それからシャトルがシャトル搬送台車に乗せられ、ハビタットへ戻る。その圧力はおよそ1時間継続する第2減圧停止圧に一致する。圧力が4bar(g)に減少させられるとき、ハビタットへの最終移動が行われる。同じ手順で新しいチームがハビタットからTBMに向かって次の作業に向かう。

1)-7. 最終減圧

最終減圧中の呼吸ガスは常に変化（酸素分圧は一定の0.5bに近い値に維持される）する。大気圧に近づくにしたがって比率を減少して長く連続的な排泄をするために、減圧比率もまた段階毎に変化する。減圧総時間は4.5日である。



図一1 呼吸ガスの分圧

訳注) 原文より 12/48/40 : O₂/N₂/He
 同上 9/18/73 : O₂/He/N₂

2) 装置

2)-1 ハビタット

ハビタットは Lubeck の前・潜水研究センター GKSS から転用された部品でつくられ、4つの複合室がある。9名まで収容できる2つの主室、2つのトイレ・シャワーロックで構成され、そのうち主室の間に設けられた1室はシャトルフランジに連結可能になっている。

訳注) トイレ・シャワーロック：原文は sanitary lock (直訳：衛生ロック) であるが寝食のための居住室に必要な設備として上記の訳を推測選択した。

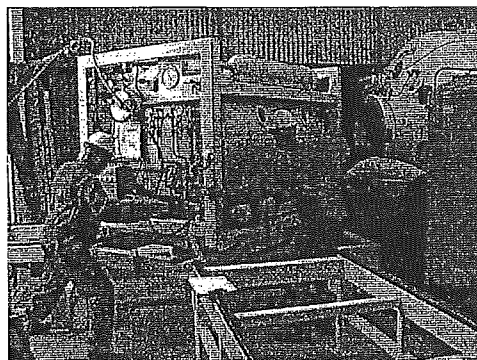


写真1 ハビタット(右側)とシャトルの連結作業

2)-2 シャトル

シャトルはダイビングベルと同じであるが、外部制御盤を介添え人が大気圧条件で監視できるので簡易になっている。シャトルはガスや電力通信供給のための接続管や線で連結される。また、混合ガス閉鎖回路方式あるいは空気換気方式の開放回路方式の両方で作動でき、この方式で3名がハビタットから TBM へ移動できる。

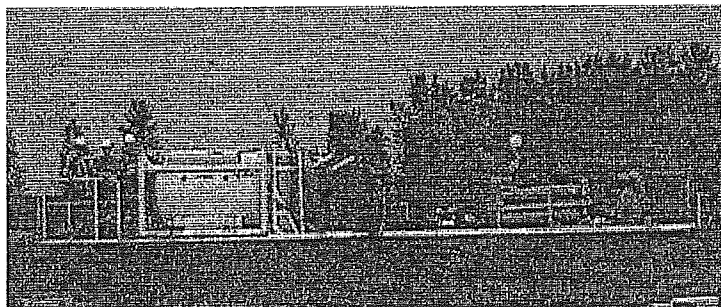


写真2 現場搬送中のシャトル

搬送台車が停止する TBM の裏面部分からエアロックへ種々のクレーンやキャスターがシャトルをエアロックに移動させ、そこで圧力下でエアロックへの作業員移動のために接続フランジが用いられる。このロックは空気のみで加圧されている。ロックテnderがエアロック環境を監視している。

TBM 背面に設置された潜水指揮者操作室に連結された特殊空気冷却ヘルメットを備えた呼吸システム (Built in Breathing Systems : BIBS) が、さらなる加圧を支援するために深度用呼吸混合ガスを供給する。

2)-3 潜水器具

作業用に選択された潜水器具は伝統的な KBM17 とドライスーツである。ダイバーとチームの非潜水要員の監視は潜水指揮者の責任範囲である。かれは、TBM 背面に設置された特殊潜水指揮者操作室に常駐し、ガス全ての管理、通信や潜水の時間調整を統率する。この部屋は、より低い圧力下のトライミックス呼吸のドライ環境で行われる短時間滞在^(訳注)でもまた用いられる。

訳注) ニューマチックケーソンにおけるトライミックス呼吸を意識した管制装置のこと。Sterk 博士は大深度潜函混合ガス利用研究会の 0.7MPa 滞在実験指導に際し、圧力管制装置組み立て指導も行い、かつ名港西大橋工事の(株)大本組の管制装置を視察している。

3) 作業従事者

3)-1 ダイバーと潜水指揮者

チームの全ての潜水メンバーはマルセーユの INPP(Institute National de Plongee Professionnelle : 国立職業潜水協会)で訓練を受けた混合ガス商用ダイバーである。加えて、トンネル作業特有の1週間の課程が組み込まれた。さらに、彼ら全てが、より低い圧力下でTBM修理のかなり多くの圧縮空気不飽和滞在と混合ガス呼吸を行い、その結果かれらは環境と作業に精通した。1bar(g)での模擬飽和試験は全体システムを管制するためとチーム全メンバーがシステムの実運用の熟練確実にするために行われた。

3)-2 医学的適性と生理学的制御

医学的適性判定は商用飽和ダイバー基準にしたがって実施された。追加の制限は減圧での種々の様相をみた後(潜水後や最終減圧中に存在可能性がある血液内の循環気泡監視)で実施された。管理方法は Kisman-Masurel 技術と段階にしたがっている[参考文献 6]。これは反射超音波ドプラー信号記録である。

訳注) 反射: 原文は non invasive (直訳は非侵入), メローニの図解医学辞典では「invasive: (侵入性の) 健全な組織に拡がるか, または侵入する傾向がある」となっている。それで, non invasive を「非侵入」すなわち「反射」と意訳する。
--

4) 結果

4)-1 作業の執行

TBM それぞれにおける装置の交換は2つの6日間飽和とハビタット外への25回の潜水を要した。礫破砕装置の修理は13日の1回飽和と12回の潜水で完了した。作業中に遭遇した重大な問題は何もなかった。

4)-2 統計

総移動回数は37回, 各回ともダイバー3名であった。一連の作業中で6名のダイバーが高圧下で費やした総時間は38日であった。事故は1件のみであった。熱湯が入ったティーポットがハビタット内ダイバーの一人にはねかって, 第2級やけどとなり, 高気圧下で治療した。ダイバーは潜水を中止し減圧した。代わりのダイバーが飽和チームに合流した。

4)-3 生理学

潜水(暴露は111名)後の減圧は多事なものではなく, ハビタット帰還後に探知された循環気泡もなかった。

最初の飽和の最終減圧は減圧症の症状を処理するために2度中断しなければならなかった。それは再圧と酸素吸入で成功裡に治療された。これらの症例分析は, 深い潜水の事後影響と複数室における環境要因制御の数種の困難さは症状発生の主要な要因となったことを示した。それで, 減圧表は僅かにゆっくりとし, 次の最終減圧過程の間に空気移行が導入された。これらの変更が問題を解決し, もはや第2, 第3の最終減圧の間に減圧症は指摘されなかった。

訳注) 誤訳防止の為に原文を以下に示す。各自、訳を試みて上記訳文を検証のこと。
別の情報は5件のDCS発症を報告している。どれが正しいかは不明。

Final decompression of the first saturation had to be stopped twice to cope with symptoms of decompression illness, which were successfully treated by recompression and oxygen breathing. The analysis of those cases showed that the after effects of the deep excursions and several difficulties in controlling the environmental parameters in the various chambers might have been the major factors in the genesis of the symptoms. Therefore the table was slowed down slightly and an air shift was introduced during the course of the next final decompressions. These changes have solved the problem, no more decompression illness symptoms were ever noticed during the second and third final decompressions.

(4) 結論

これは非常に高い気圧でのTBM修理を行った最初の機会であった。飽和技術がトンネル作業で初めて使われた。もし、技術的な方法が利用でき、訓練が適切であり、状況へ十分に適用した安全手段が講じられたならば、トンネル内の飽和技術は海洋工業よりもさらに容易に安全になる。トンネル内では、深い潜水に関連した全ての重要な安全問題、天候、船舶位置決め係留、ダイビングベル回収が存在しない。

将来のプロジェクトに対して、この作業は混合ガスの使用が可能で3.5bar(g)を超える圧力で必要となることを明らかに示した。重要な修理あるいは長期間の作業に対して、飽和技術実行の決定は同じ圧力範囲で評価されるべきである。しかしながら、ベントナイト安定液中での作業は、作業室で圧縮空気圧力が維持できない稀な機会にのみ必要となる。それで、これらの潜水における商用ダイバー雇用は例外にとどまる。

ドライ圧力下の飽和すなわち混合ガス呼吸は特別な訓練を必要とする。その訓練に対する法的基準を提供する国制定法律は極めて少ない。フランスではこのような訓練の必要性はケーソン作業員への法適用に含まれており、そしてそれはいかなる最高気圧のみならず適切な混合ガス使用の制限にも言及していない[参考文献7]。

圧力の種々の状況処理で使われることができる呼吸ガスに多くの組み合わせがある。潜水作業で計画されてきた手順は、トンネル作業で遭遇する殆どどの圧力にも転用され、ドライ環境でつかわれることができる。潜水ガスの規格はトンネル作業の参考事項として使われることができる。しかしながら、類似作業と減圧条件に関連する多くの生理学的要因が減圧安全性結果を変えるので、ダイビング減圧表はドライ作業への減圧表として使われるべきでないということは強く勧告できる。

参考文献

REFERENCES

1. BENNETT P. B. AND J. C. ROSTAIN, The High Pressure Nervous Syndrome, in *Physiology and Medicine of Diving*. P. B. Bennett and D. H. Elliott, Fourth edition, W. B. Saunders Company Ltd - London. pp 194-237.
2. BEHNKE A.R., 1974. New format for pressurised tunnel operations with application to surface-depth diving (300-500 feet). In *Proc. 1st Annual Meeting North Pacific Branch of the Undersea Medical Society, Avalon Calif. Univ. So. Calif. Santa Catalina Mar. Scien. Cent.* pp 35-36.
3. BERT P., 1878. *La Pression Barométrique*, Translated from French by Hitchcock M. A. and Hitchcock F. A - Columbus College Book Co - 1943, Republished by the Undersea Medical Society Md 1978
4. CHOUTEAU J., 1969. Saturation diving : The Conshelf Experiments. in *Physiology and Medicine of Diving and Compressed Air Work*. P. B. Bennett and D. H. Elliott, Baillière Tindal and Cassel - London. pp 505-523.
5. HIRATA T., TAKANO K., GOTOH Y., NASHIMOTO I. And STÉRK W., 1992. Remotely controlled caisson method and its maintenance. In *Engineering and Health in Compressed Air Work*, Jardine F. M. and McCallum ed. E & F Spon. London. pp 519-528.
6. KISMAN K. E., MASUREL G. and GUILERM R., 1978. Bubble evaluation code for Doppler ultrasonic decompression data. *Undersea Biomedical Research* 5 (1), p 33
7. LE PÉCHON J. C. and PASQUIER J. L., 1992. French Regulation 1992 for hyperbaric works. In *Engineering and Health in Compressed Air Work*, Jardine F. M. and McCallum ed. E & F Spon. London. pp 483-492.
8. MACINNIS J. B. AND G. F. BOND, 1969. Saturation diving : Man-in-sea and Sealab in *Physiology and Medicine of Diving and Compressed Air Work*. P. B. Bennett and D. H. Elliott, Baillière Tindal and Cassel - London. pp 505-523.
9. WALDER D. N., 1982. *The Compressed Air Environment in Physiology and Medicine of Diving*. Third edition, P. B. Bennett and D. H. Elliott, Baillière Tindal and Cassel - London. Pp 15-30.

5-3-4 インターネット検索で入手した当該工事の情報

(1) 推測したトンネル掘進機(TBM)のエアロック位置

図 D-1 は一般的なヨーロッパの TBM に設置されたエアロック位置である。

TBM (the tunnel boring machine トンネル掘進機) はトンネルを掘進するためにのみ使用する円筒状の機械で、その装置が設置されている。

セグメントは円形トンネルを円弧状に分割した部材 (トンネル掘進方向長は

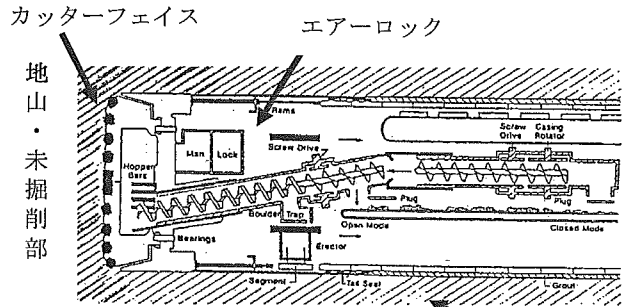


図 D-1 TBM に設置されたエアロック

1.0m 程度) で、逐次組み立ててトンネル本体の円形形状に構成される。TBM 前面にはカッターフェイスが装着されており、これがトンネル前進方向を軸として回転して地山を切削する。1 セグメント長だけ TBM 前面の地山が掘削されると TBM が前進して、TBM 後部にセグメント組み立ての空隙を確保する。この空隙は TBM で全周が覆われる。カッターフェイス前面と地山の間の空隙は地山が自立するようにベントナイトと水等を混合した粘性の高い液体 (比重 1.2 程度で安定液あるいは泥水 : bentonites slurry) で満たされる。地山切削の過程でカッターフェイスは磨耗したりし

てカッタービット交換が要求されたり、TBM 円筒が予想外の土圧を受けて、ねじれ変形したりすることがある。

図 D-2 はカッターフェイス正面図である。

カッタービット交換のためにカッターフェイスの一部が 0.5m 程度地山から後方に引っ込められ (幅 1.5m) て作業空間が確保される。残りのカッターフェイスは地山を支える。エアロックは 2 重構造になっており切羽側 (地山側) は安定液の充填排出ができる部屋になっており、他の部屋は圧縮空気環境である。ダイバーはこの部屋で呼吸マスクを装着して切羽側に進入あるいは帰還する。



図 D-2 カッターフェイス正面図
直径 11.34m (写真下方に人が立っている)

(2) 飽和潜水装置及び作業要領の概要 (一部に推測を含む)

1) ハビタット : habitat

図 D-3 は飽和潜水装置のうちハビタット概観とハビタット管制室である。ハビタット (habitat) は作業員が寝食するトライミックス圧力 [滞在圧力 4.0bar(g)] 環境居住室で、地上に設置される。

トライミックス構成：9%O₂/73%N₂/18%He

同上分圧：酸素分圧 PO₂=5.0×0.09=0.45≒0.4atm, 窒素分圧 PN₂=5.0×0.73=3.65≒3.6atm,
ヘリウム分圧 PHe=5.0-(0.4+3.6)=1.0atm

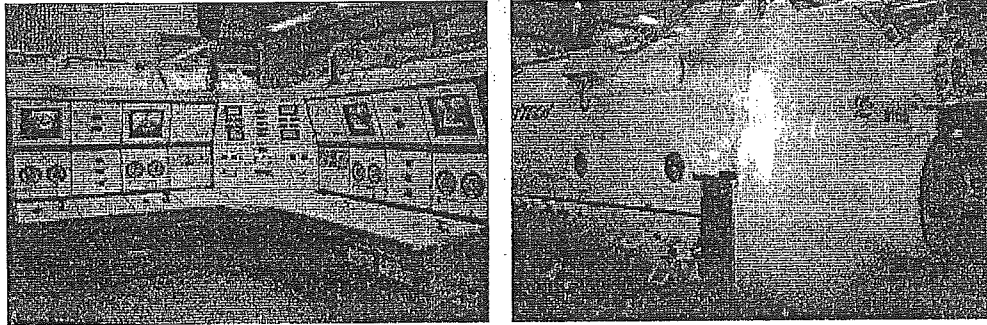


図 D-3 ハビタット管制室（左側）とハビタット外観（右側）

2) シャトル : shuttle

シャトルはハビタットと TBM 間の往復に用いる圧力環境の搬送装置で、搬送台車に搭載してセグメント搬送台車と同じレール上を走行移動して TBM エアロックに到達あるいは、そこから地上のハビタットへ帰還する。搬送台車には専用のトライミックス供給装置やシャトル内圧力の管制装置が付随装着されている。

図 D-4 はシャトル外観である。

TBM への往復路（ハビタットを出て作業に向かう時の往路と作業終了後の帰路）における呼吸ガス圧力及び呼吸ガス成分それぞれは異なる。

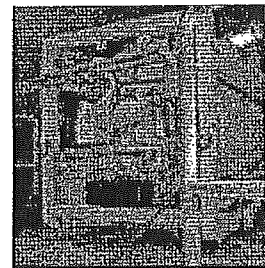


図 D-4 シャトル外観

3) エアロックと気泡室 : air lock & the air bubble

エアロックは 2 室構造・3 枚扉（2 室の仕切りと切羽及びシャトルへの出入り）で構成される。エアロックは予め 4.0bar(g)の圧縮空気で満たされている。トンネル坑内に搬送されたシャトルとエアロックを連結する。両者の仕切り扉開放により圧縮空気とトライミックス（10%O₂/72%N₂/18%He）が交じり合うので短時間（最長 2～3 分）だけこの混合ガスを呼吸することになる。シャトルとエアロック間の扉を閉めて作業員はエアロック内の圧縮空気（4.0bar(g)）を呼吸する。次に、トライミックス呼吸マスクを装着して作業気圧 7.0bar(g)までの加圧を開始する。エアロック内は圧縮空気による加圧で、トライミックス呼吸マスクも同時並行加圧となる。

作業気圧到達後のエアロックと切羽間の出入りの作業要領は C 章の 3.4 の訳注で解説した。

4) ヘルメット : helmet

ベントナイト安定液中で呼吸する為に呼吸抵抗の小さい工夫がなされたヘルメットが用いられた。工夫の一つはエアレギュレーターに常時水洗装置を装着したことであるが、水流常時噴射はまたヘルメット呼吸薄膜の心棒の邪魔になった。

訳注) 下線部の訳が難解である。潜水器具の特殊用語か？
The breathing membrane from stick

5-3-5 当該工事のまとめ：作業気圧と作業時間（一部推測を含む）

(1) 作業気圧

作業位置のトンネル底面深さは海面下 60m（B章の地質図参照）であるが、作業気圧は水深 70m クラス相当の 7.0bar(g)にしていることから、作業気圧設定は通常の水頭相当の圧力ではなく、ベントナイト安定液比重に配慮した圧力にしている。

(2) 1日のタイムスケジュール（作業気圧と作業時間）

C 及び D 章の報告内容にしたがって1日のタイムスケジュール、作業毎の作業気圧、呼吸ガス成分及び作業時間を整理すると表 E-1 が得られる。

訳注) 図-1 の呼吸ガス分圧図と報文内容の整合性がとれないので、報文内容（C章記載）を優先して整理し、さらに不明な部分は図-1 で補った。

表 E-1 1日のタイムスケジュール

行動と装置等操作内容	作業気圧 呼吸ガス成分	滞在時間 起床からの合計時間
起床から1時間：作業準備 起床を7時と想定	4.0bar(g), 9%O ₂ /73%N ₂ /18%He	60分 60分
ハビタットからシャトル移動 シャトルはTBMへ移動	4.0bar(g), 10%O ₂ /72%N ₂ /18%He	60分 120分
シャトルとエアロック連結 エアロック内へ入室	4.0bar(g), 空気 21%O ₂ /79%N ₂	15分 135分
トライミックス呼吸マスク装着 エアロック加圧	4.0~7.0bar(g) 12%O ₂ /48%N ₂ /40%He	15分 150分
作業気圧下滞在 気泡室への入室, 切羽への進入, 安定液中の作業, 気泡室への帰還と室内からの安定液排出及びトンネル坑内側エアロック入室,	7.0bar(g) 12%O ₂ /48%N ₂ /40%He	240分 390分
第1減圧停止圧まで減圧 第1減圧停止圧滞在	7.0~5.0bar(g) 5.0bar(g)	2分 15分 407分
第2減圧停止圧まで減圧 第2減圧停止圧滞在, トライミックス呼吸離脱, シャトルへ移動(シャトル内は既にトライミックスを排除し 高圧空気と置換済み)し, 滞在続行.	4.5bar(g), 空気(図-1) 21%O ₂ /79%N ₂	2分 75分 484分
ハビタット圧まで減圧 (1日の作業終了15時5分)	4.5~4.0bar(g) 9%O ₂ /73%N ₂ /18%He	1分 485分
ハビタットへ移動 第2班と交替 (第1班は翌朝まで滞在)	4.0bar(g)	955分 1440分=24時間

(3) ハビタット内滞在圧力について

作業気圧 7.0bar(g)より減圧停止圧 5.0 及び 4.5bar(g)を経て 15時 15分から翌朝 8時までハビタット内で 4.0bar(g)で滞在しても減圧症は発症しない。

(4) 最終減圧について

酸素分圧 0.5b を維持しながら総減圧時間 4.5 日を要した。

訳注) 最終減圧：詳細報告は記載されていない。

以上

第3章 標準減圧表（案）作成に係わる減圧理論等の解説

副題：欧米諸機関の減圧表と米国海軍の減圧理論等

詳細目次	ページ
1. フランス労働省	101
1-1 フランス労働省の減圧表の概要	101
1-2 標準空気減圧表（酸素吸入なし、最浅減圧停止 3m）の例	102
1-3 空気呼吸滞底減圧表（最浅減圧停止 6m で酸素吸入開始）の例	
1-4 空気呼吸滞底減圧表（減圧停止 12m で酸素吸入開始）の例	103
1-5 フランス高気圧規則におけるヘリオックス減圧表の現状	105
1-6 ヘリオックス減圧表（減圧時に空気呼吸と酸素吸入）の例	107
1-7 ヘリオックス減圧表（減圧時にヘリオックス成分変更と酸素吸入）の例	108
2. 英国労働省（空気：通称・ブラックプール減圧表・Blackpool tables）	109
2-1 英国労働省の減圧表の概要	109
2-2 英国・高気圧作業規則 1996 に対する施行前評価（1995 年）	110
2-3 ブラックプール減圧表の例（ゲージ圧 1.0～3.45bar：0.1～0.345MPa）	113
2-4 英国・高気圧作業規則の概要と運用状況（2001 年時点）	117
2-5 英国・高気圧作業規則の運用状況（2004 年時点）	123
3. 米国海軍（空気及びヘリオックス減圧表）：概要や話題等は第 2 章で紹介済み	126
3-1 無制限／減圧停止不要空気潜水用 限界と繰り返し指標表	126
3-1-1 繰り返し空気潜水用残留窒素時間表	
3-1-2 繰り返し潜水計算手順	
3-2 繰り返し空気潜水用・残留窒素時間表	128
3-2-1 1999・Table 4 の概要	
3-2-2 繰り返し空気潜水用残留窒素時間表	
3-3 標準空気減圧表の一部（滞底深度 12.1～21.3m 及び 85.3～91.4m）	130
3-4 酸素使用船上減圧表の一部（滞底深度 21.3～45.7m）	132
3-5 船上供給混合ガス潜水手順（邦訳未済）	135
3-6 船上供給ヘリオックス減圧表（滞底深度 18.2～115.7m）	138
4. NOAA の減圧停止不要空気潜水表	147
（National Oceanic and Atmospheric Administration：米国商務省・海洋大気局）	
5. 減圧表の考え方：酸素減圧の導入	148
5-1 酸素減圧の原理	
5-2 酸素減圧の効果の定量的評価（グラフ表示：高圧下滞在を空気呼吸で行った場合）	
5-3 空気呼吸で減圧した場合の窒素分圧計算例	
5-3-1 要約	
5-3-2 発症経過と加減圧プロフィール	
5-3-3 高圧下滞在中で増大した窒素分圧値：圧力 3.7kgf/cm ² ，滞在 120 分	
5-3-4 減圧時の窒素分圧低下状況	
5-4 酸素吸入で減圧（0.12MPa 以下）した場合の窒素分圧計算例	150