

施設紹介

海上自衛隊潜水医学実験隊

大岩 弘典

はじめに

海上自衛隊潜水医学実験隊 (MSDF Undersea Medical Center) は神奈川県横須賀市久里浜にある北米合衆国水師提督伯理上陸 (嘉永6年6月3日) 記念碑から開国橋を渡って浦賀に通ずるトンネルの手前にある。

昭和53年12月、海上自衛隊横須賀地区病院潜水医学実験部から独立したわが国唯一の潜水医学に関する専門研究機関である。

海上自衛隊の潜水艦はディーゼル・エレクトリック動力潜水艦であり、海面下で行動する潜水艦は、ときにディーゼル機関の駆動のため、空気取入口であるスノーケル頭弁閉鎖により、富士山に登ったときのような低圧負荷を乗組員に与え、かつ長期の閉鎖環境における艦内ガス組成の影響のほか、各種の精神・心理的な効果を生じ、一方潜水員は水深10米ごとに1気圧増す高圧、水、低温、暗視野に起因する要因のほか、高圧気体呼吸に基づく生理学的なさまざまな影響を被ることになる。

潜水医学実験隊は、科学技術の進歩にもなつて、人類が創造する新しい環境に、障害なく馴化 (acclimatize) し、適応していけるか研究し、より深い、より長時間にわたる内宇宙 (inner space) とも言える海中環境における安全な人間活動を支える役目を果たしていきつつある。

1. UMC における潜水医学研究

海上自衛隊における潜水艦および潜水のオペレーションを安全に遂行するためには潜水艦乗組員や潜水員の特殊環境への生理的、精神心理的な適応 (adaptation)、障害に対する予防と治療

(prevention and treatment) および潜水器等の個人装備品に対する人間工学 (man-machine) の研究態勢の確立が不可欠である。

第二次大戦以前は潜水艦乗員が被る特殊環境に対する適応研究が潜水艦医学 (Submarine Medicine) であったが、1960年代に入ると各国とも両者を包括して広義の潜水医学 (Undersea Medicine) と言うようになり、潜水医学、就中、高気圧環境の生理学や高圧酸素の治療応用が盛んになるにつれて、高気圧環境医学 (Hyperbaric Medicine)、あるいは、より基礎的な研究を進める高圧・潜水生理学 (Underwater Physiology) の名を冠した研究団体が生まれて来た。前者の国際的な組織活動は本年8月下旬に Long Beach で開かれる VII International Congress on Hyperbaric Medicine (会長 J. H. Jacobson) で、後者の国際的な活動は、昨年6月中旬 Quebec で開かれた 8th Symposium on Underwater Physiology (会長 J. M. Hallenbeck) で共に4年に1回開かれている。わが国の活動は両者を包括して、日本高気圧環境医学会 (理事長 名大・榊原欣作教授) を有し、会誌の発行、学会活動を精力的に行っている。

潜水医学実験隊の研究活動もまた、前述した歴史的な背景と対象となる部隊の必要性から実験2部において主として潜水艦医学を、実験3部において主として潜水医学を研究し、それぞれ必要な施設を有している。なお、実験1部は両者に共通する基礎的な研究や、医師と他の衛生職種 of 隊員に対する広義の潜水医学教育が含まれる。

2. 施設と研究

実験2部：潜水艦医学研究を主とするこの部の

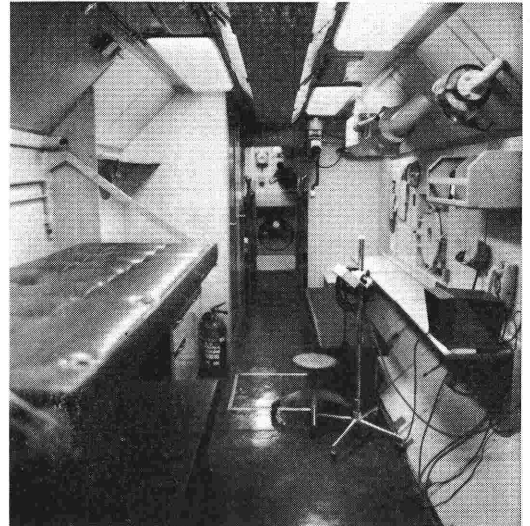
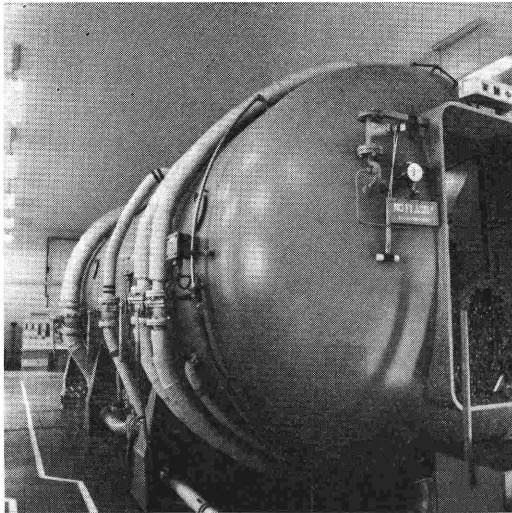


図 1. ストレステストチャンパー

施設は潜水艦環境再現装置とも言うべきストレステストチャンパーである。図 4 に示すような形態を有し、潜水艦特有な間欠的な低圧負荷・低酸素・高炭酸ガス環境の再現に加えて温湿度の調整、更に地表の光や音の伝わらない世界での人の視・聴機能を測定できる装置を備えている。

潜水艦は、水中運動性能を高めるために涙滴型 (tear drop) の形状をなし、ディーゼル機関の空気取入口型であるスノーケル (Snorkel) 頭弁が波浪により自動的に閉鎖された場合、環境内空気はディーゼル駆動のため急激に消費され、地表の 760 mmHg からおよそ 600 mmHg に下降しスノーケル頭弁の開放と共に大気圧に戻る。周期的な低圧環境負荷が潜水艦の運動と共に数分おきに繰り返されることになる。

かような低圧負荷は耳管通気良否によって乗組員に影響を与え、鼓室や蝸牛に与える不規則的な圧変動が可逆的な低聴障害として聴力低下をひき起こす。このため低圧負荷速度を毎秒 30m 高度上昇以下に抑えることにより、安全を図っている。低圧負荷と共におとずれる低酸素負荷は高所順化の研究対象と良く似ており、高度約 2000 m ($pO_2 \approx 120$ mmHg) 以下に下らないよう調整されている。(この項については航空医学の領域が大きいので省く。)

潜水艦は潜航中電池推進されるため、余分な電力の消費を極力抑えなければならず、環境制御装

置、照明等も最少限のものを除いて出来る限り使わないこととなる。このため艦内炭酸ガス濃度が次第に上昇し危険な状態になるのを防ぐ必要から水酸化リチウムやソーダライムによる CO_2 吸収装置のほか、液体モノエタノールアミン (liquid monoethanolamin) による CO_2 吸着-再生装置を有する。

このように潜水艦乗員が被るさまざまなストレスすなわち間欠的な低圧負荷、低酸素、高炭酸ガス、暗順応等の影響から障害を被らずに最大能力を発揮させるための研究を行うことになる。

最近の潜水艦の進歩は上に述べた各種の影響は環境制御機器の進歩により低減しつつあり、むしろ他の問題に対象がうつりつつある。

すなわち航空機の進歩が、加速と共に距離と時間を短縮し、地球の緯度および経度の実質的な変化をもたらし、時間-物理的環境因子の急激な変化をもたらしたごとく、潜水艦内長期滞在が効率的な作業形態の開発とともに通常の 24 時間サイクルの生活リズムと異なった作業・休息 (work-rest) サイクルを生み出し潜水艦の進歩に伴う省力化に役立つことになった。

このような例は昼夜の別なく飛行する航空機のパイロットや整備員にも共通する場合もあり、限られた時間・人間により、最大作業能を要求される近代的なオートメーション工場にも共通する問題となるかも知れない。

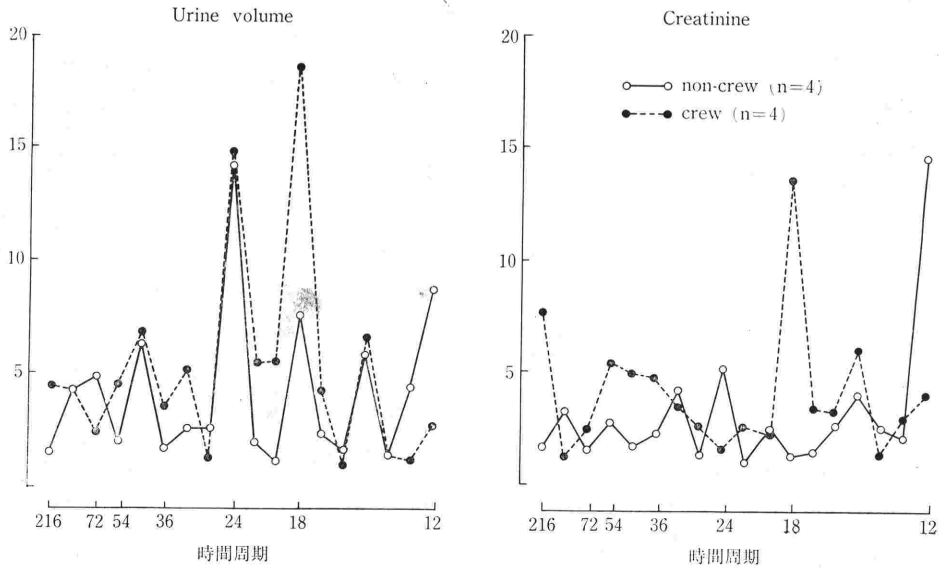


図 2. 18時間交代制勤務における circadian rhythm (尿量)

たとえば、1日24時間を18時間に短縮して生活させてみた場合を考えてみよう。人間が必要とする休息・睡眠時間は、航空機による時差とは異なった昼夜の別がなくおとずれることとなる。この場合、人の体温、脈拍、血圧、尿量などの circadian rhythm は、急激な経度の変化に伴う時差に比べて違った対応を強いられることとなる。

人の circadian rhythm は人類2万年の歴史と共に常に地球自転に同期した日内変動 (diurnal rhythm) を示している。この周期は呼吸・循環・消化管等の活動を24時間リズムに調整する体内生物時計 (biological clock) に同期したものとなっている。潜水艦交代制勤務の場合、1日を18時間とする work-rest cycle を採用するとき、circadian rhythm は身体の内側に組み込まれた生物時計と同期せず変調したまま持続し、身体的・精神的疲労として作業能力の低下として現われるかも知れない。

過去行ったわれわれの研究も米海軍における同種の研究と同じような結果をもたらしたが、ここでは、K. E. Schaefer の研究を紹介する。

18時間 (6 hr, on~12 hr, off) 交代制勤務をつづける潜水艦乗組員の最高・最低血圧、脈拍、呼吸数、および体温の circadian rhythm を調和分析 (cosinor analysis) した結果、対象の24時間

を基本とするそれは100%24時間周期を示すのに反し、最初の15日間は、18時間周期分が19%、41~52日経過後でも38%に過ぎず、一定の周期を示すに至らず、24時間周期を示すのも、それぞれ46%および31%であった。この結果は12、36、および48時間周期など24時間周期の亜流を含めて依然残る diurnal rhythm の影響が新しい work-rest cycle に適応し難いことを示している。図2は当隊の中林が行った調和分析による18時間交代制勤務における尿量の周期分布を示す。

18時間交代制勤務における睡眠の変化もまた興味ある結果を示す。当隊の小沢らによる研究では睡眠効率の低下が著明で、特に昼間の睡眠では60%に低下している。睡眠の変化では REM 睡眠の出現率が昼間帯で増加し、潜時は短縮した。図3は24時間 (上・下段) および18時間作業サイクル (中4段) の睡眠段階の変化を示したものである。

18時間交代制勤務の精神心理的な影響は情緒変化、疲労として現われることになる。当隊の高柳などの研究では、シフトの中間期に不安感の上昇、活動性の低下、あるいは自覚症状調べで疲労度高値を示し、以後漸次減少して安定して来ている。

以上の研究は環境条件が理想的な温湿度および物理的空気環境下で行われた場合であり、これらの条件がくずれた場合には新たなストレスとなり

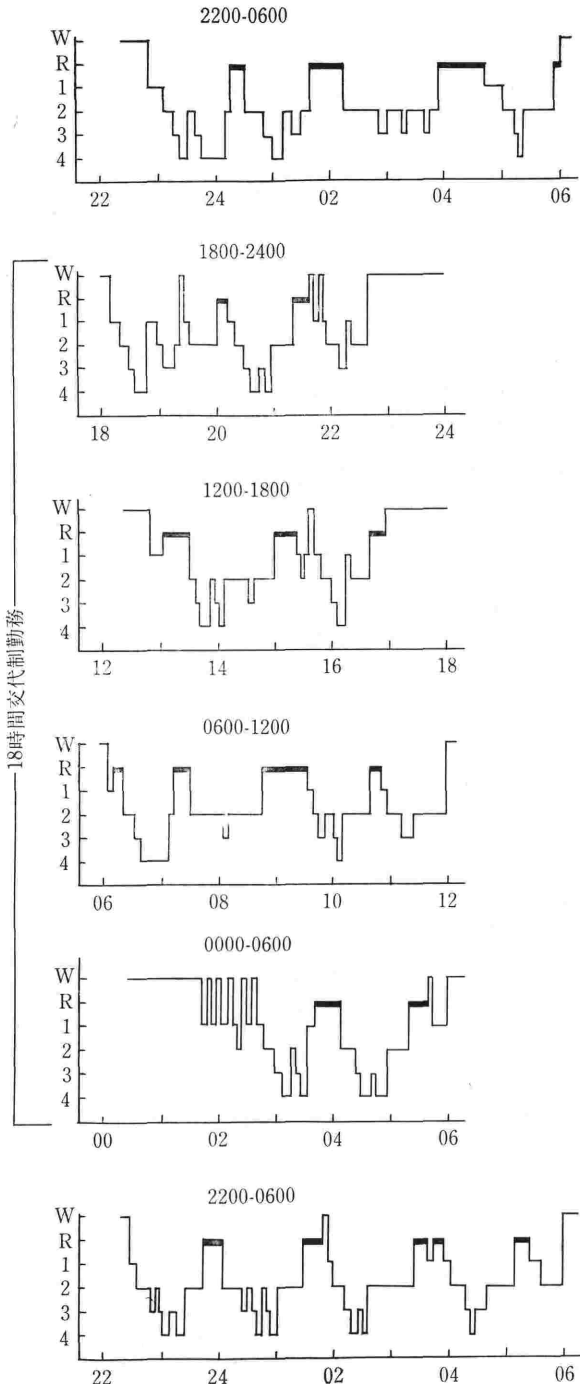


図 3. 交代制勤務における睡眠段階 (縦軸) と睡眠時間帯 (横軸)

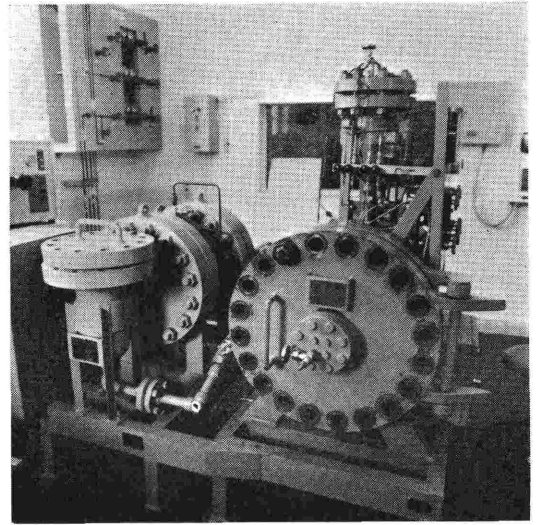


図 4. 動物用チャンバー

実験 3 部：狭義の潜水医学研究を主とするこの部の施設は高圧実験タンク群と、高圧治療施設である。前者は深度 250m までの高圧環境を再現できる dry chamber と wet chamber の組み合わせからなる有人用と、深度 500m までの動物用 chamber (図 4) であり、いずれも環境ガス制御系として、空気、窒素、酸素、およびヘリウム加圧系と外部循環制御方式による酸素、炭酸ガス、温・湿度調節装置を備えている。

後者の高圧治療装置は、大学・病院等に設置されている高圧酸素治療装置と同等のものであり、主として減圧症、空気塞栓の治療を目的としている。

科学の進歩は外宇宙に対し、月への到達はすでになし遂げ、地表あるいは海面から数十軒の衛星軌道も人類の自由に活動し得る生活の場となりつつある。

反面、海中に関しては実海面でいまだ 450m と 言うほんの目の前を歩いたに過ぎない。

自然界で、もっとも高い圧はフィリピンに近いマリアナ海溝にあり、その深度は 1 万 9 百 m で 1091 気圧に相当する。この圧力下では、ほとんどの生物は生存し得ないが、ある種の細菌やほんの少しの生物は生きることができるとされている。

かような高圧は人体を形づくる細胞、電解質その表面張力、水素イオン濃度、タンパク分解過程に直接影響を及ぼすに違いない。深度 10m ごとに 1 気圧の環境圧が増加するので、人の体表面積を

違った効果を生みだすに違いない。

科学の進歩が生みだす人間の新たな生活の場は、新しい適応研究を生みだしつつある。

1.5 m^2 とすると、およそ15屯の圧力が水深10mごとに身体にかかることになる。

人間は魚とちがいで、海のなかでは呼吸ガスを携行しなければならない。このガスは環境圧の増加に比例して成分気体の分圧が増加してゆく。呼吸ガス中の酸素分圧の増加圧は Paul Bert 効果(1887)および Lorrain-Smith 効果(1919)で知られる酸素中毒(oxygen toxicity)を起こすので、その発症を予防できる分圧まで濃度を低下させる必要がある。その値は0.4気圧以下であり、300m潜水では1%, 450m潜水では0.7%である。また呼吸ガス中の窒素は固有の水・脂肪溶解度が大きいことにより、分圧の増加が特異な麻酔効果、窒素酔い(nitrogen narcosis)を起こすので、空気潜水はただかか60mくらいしか使えない。他のアルゴン、ネオンなども物理的性状から似たような結果をもたらし、ヘリウムだけが安全な深海潜水を遂行できると考えられている。

呼吸ガス中の大部分を占める不活性ガスの密度の大きさもまた潜水深度を決める要素となる。空気は密度が大きな窒素により50mの作業が限界であり、窒素に比べて7分の1の密度であるヘリウムは、呼吸抵抗の増加による不全換気を防ぐ効果がある。換気予備量の指標として使われる努力性換気量(MVV)は環境ガス密度の平方根に逆比例するので、空気呼吸では30mで1/2になるのに対し、95%ヘリウムの混合気体を呼吸する場合は

300mである。

閉塞性換気障害パターンと共に重要な問題は呼吸ガス密度の増加と共に肺胞拡散障害が300mを越す潜水では起こる可能性がある。これは、電解液を高圧酸素加し、水呼吸(liquid breathing)させたKlystraの犬の実験報告からdiffusion dead-spaceをひき起こす可能性である。

現在100mを越す深海潜水に対しては、ヘリウムがもっとも適し、利点も多いが、加圧中特に180mを越す深度では、手の震え、反射の低下などの神経症状を示すことが注目されている。この症候は、高圧神経症候群(high pressure nervous syndrom)と呼ばれ、ときに眩暈や嘔吐、筋肉の不随意運動、平衡感覚の障害、失語症を伴うことがあり、脳波の低周波サイクル(θ 波)が特徴的である。この症候は加圧を停止してしばらくたつと、次第に回復して来ることも分かった。

これは従来の不活性気体の麻酔効果と本質的に異なる現象で高圧ヘリウムの細胞透過性の亢進がシナプスに直接影響しているのかも知れない。いずれにしろ200mを越す潜水は人間が高圧に馴れるため、ゆっくり時間をかけて行わなければならない。過去フランス・米国で成功した最高潜水記録およそ700mは実海面でなく、高圧実験タンクによる成績であるが、ヘリウム潜水で可能な最高深度に近いものであろう。

海上自衛隊の深海潜水作業能力は過去120m-20

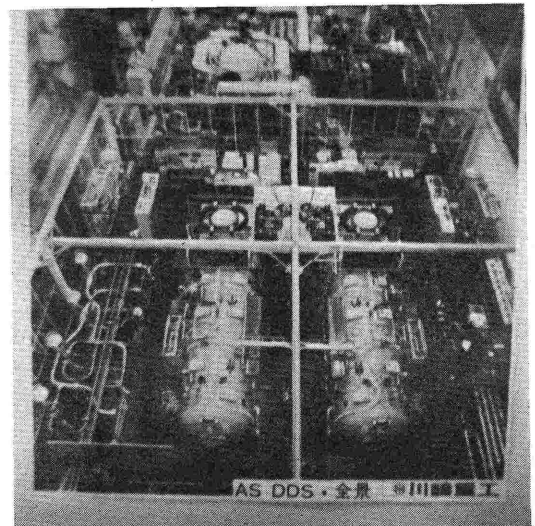
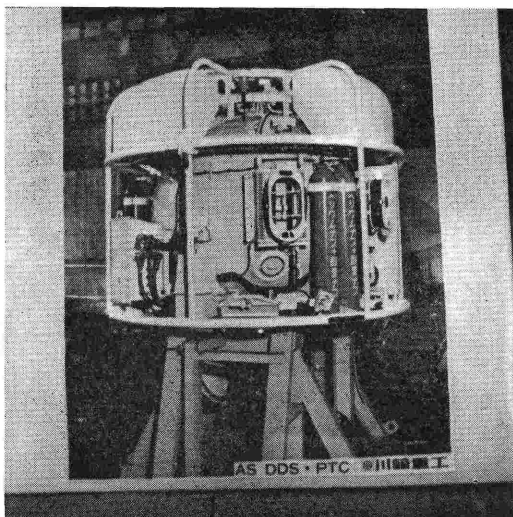


図5. 「ちよだ」に搭載した深海潜水装置(DDS) 右: DDC群とMCC, 左: PTC

分余のものであった。この能力を根本的に改善するため昨年12月に進水した新しい潜水艦救難艦「ちよだ」は、飽和潜水 (Saturation Diving) を採用した深海潜水装置 (Deep Diving System) を搭載している。この DDS は船の両舷に設置した船上減圧室 (Deck Decompression Chamber) と DDC から海底に作業するダイバーを移乗させる水中エレベーター (Personal Transfer Capsul), DDC および PTC の環境ガスを制御する MCC (Main Control Console) および生命維持監視装置 (Life Support System) ならびに PTC からロックアウトするダイバーが装着する閉鎖循環式 Push-Pull 潜水器から成る (図 4)。この装置を運用するための飽和潜水員は1チーム6名からなり、DDC 内で加圧され、PTC で海中作業に向かい、休息中は DDC 内で生活することになる。

潜水中に体内に溶け込んでいく不活性ガス (深海潜水ではヘリウム) が浮上により血液や組織中で気泡化しないようにする減圧時間は潜水深度が増えると飛躍的に増大する。従来100m潜水では数十分の潜水に対し5~6時間も要し、潜水効率にはなほ低い。飽和潜水では体組織に飽和した不活性気体の洗い出しが一定であることを利用して、所定の潜水作業が終了するまで、長時間、通常数日以上高圧下に滞在させ、唯一回、飽和ガス排泄のための減圧を行う方式である。このため潜水効率は飛躍的に改善され、かつ毎回の減圧に伴う潜水病の危険からも解放されることになり、ダイバーの安全性は高まった。

実験3部は明年3月末に就役する「ちよだ」乗組み飽和潜水員のため、医学的安全性評価のための飽和潜水実験を高圧実験タンクを用いて精力的に行って来た。

また、「ちよだ」搭載の DDS の完全な戦力化を図るためには、300 m以上のシミュレーターが必要となり、明年3月末完成予定の新しい深海潜水シミュレーターを現在建設中である。この装置は図6に示すような組立てで、深度700 mの飽和潜水を可能とする設計である。

実験3部における飽和潜水実験研究のうち生理的な研究項目のおもなものは次のごとくである。

i) 飽和潜水減圧法：潜水中に身体のなかの血液、組織には呼吸ガス中の不活性ガス、深海潜水

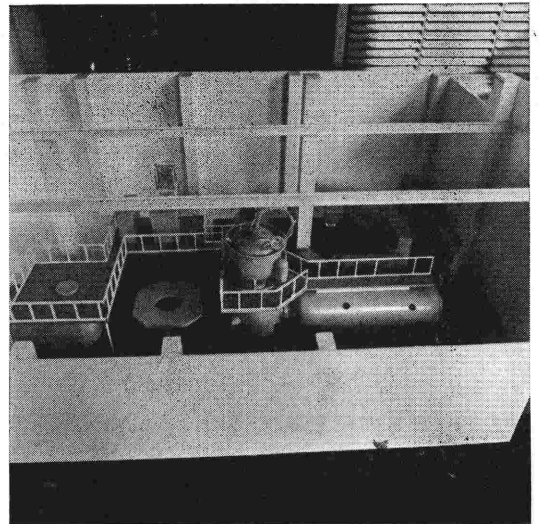


図 6. 深度700 m飽和潜水装置(60年3月完成予定)

ではヘリウム、がその気体の分圧に応じて溶け込んでゆく (Henry's law). 各組織に溶け込んでゆく不活性ガスの拡散速度はガスの分子量の平方根の逆数に比例する (Graham's law). したがって、ヘリウムのそれは窒素の2.6倍になり、ヘリウムを呼吸媒体として用いる潜水では、過去 radioisotope を用いた諸外国の実験成績からおおよそ240分半飽和組織、言い替えると24時間で各組織が飽和に達すると考えられている。高圧にさらされた身体各組織が大気圧に戻るさいに、溶存ヘリウムが過飽和となり気泡化しないためには、外環境圧と身体各組織のヘリウム圧との差が相当程度小さくしなければならず、現在安全と考えられている許容圧較差は6 mである。昨年7月に行った60m-7日の飽和潜水の場合、当隊の奥村・大橋の計算した減圧時間はおおよそ72時間であり、平均速度は毎時0.8 mで3人の被験者はドブラー気泡検知器による検討を含めて異常を認めなかった。

かような、非常に低速度の減圧を正確に行うには減圧系の構造、圧検知器の精度、温湿度特性、およびチャンパー内ガス濃度検出装置など高度の技術を要する。この場合すべての装置に対し manual 操作が良いか、autocontrol が良いか、いまだ議論が分かれるところである。新しいシミュレーターでは両方を採用し、両者に人間工学的な工夫をこらしている。

ii) ヘリウム酸素潜水における体表面および呼

吸性熱損失:「水中に浸った状態では、同じ温度の空气中よりも人体は速やかに冷却される」と言う事実は空気に比べて水の比熱が1,000倍、熱伝導率が25倍も大きいことによる。人をヘリウムを多く含んだ高気圧環境に置くと、空気の1気圧と異なった快感温度を呈する。この事実は昨年行った60m-7日の飽和潜水で快感温度はおよそ30℃であった。このときのチャンパー内の雰囲気体のガス組織はヘリウム76.3%、窒素18%、および酸素5.7%であった。すなわち高圧ヘリウム環境では、体熱損失が大きく、安静時代謝が20~40%減となる就寝時では体熱平衡の失調を招き易く、環境温度が30℃でも寒さを感じるようになる。この状態は高圧ヘリウム環境は水に浸った状態の快感温度33℃ないし34℃に近づくことを示す。

このような高圧ヘリウム環境の熱損失は体表からの体熱損失と呼吸性の熱損失の両者の増大に基づく。

前者の体熱損失の増大は対流熱損失増大を意味し、これは対流熱伝導度に皮膚温と環境温との差の積で表わされる。この対流熱伝導度は、気体の密度、比熱、熱伝導度、粘性、そして気流に関するものである。当隊の小比木が60m-25℃の高圧ヘリウム環境で測定した値は2名の被験者共およそ11.3 watts/m²℃であった。ちなみに潜水前、大気圧空气中で測った値は5 watts/m²℃以下である。かような対流熱伝導の増大は輻射、蒸泄熱損失との和で示す代謝の増加となって現われ、飽

和潜水員の体熱平衡維持のための対策が必要となる。図7は小比木が測定した飽和潜水中の代謝量を現わしたもので、同じ高圧ヘリウム環境下でも、環境温度の低下は代謝量の増大(20~40%増)を示すとともに、対流熱損失の占める比重も大きくなる。

後者の呼吸性熱損失は、冷水下で潜水中の場合特に大きな問題となる。高圧ヘリウム呼吸でもチャンパー内ではせいぜい大気圧空気の2倍(20 Kcal/hr)の呼吸性熱損失ですむが、4℃の冷水下で同じ圧のヘリウムを呼吸すると安静時代謝に匹敵するほどの熱損失を招来し危険となる。このため潜水器に呼吸ガス加温装置を取りつけたものが必須となる。呼吸性熱損失の測定は呼吸ガスの温度・密度・比熱、および換気量が関係するが測定が難しく、理論的な推定はともかく、実測は当隊の今後の大きな課題である。このために水中でも測定できる新しい方式の換気流量測定および応答性の秀れた測温・測湿センサーの開発を急いでいる。

現在の高圧実験タンクは換気・熱容量が小さいためチャンパー内の温湿度制御にむらが生じ易く実験に困難を来している。このため新しいシミュレーターでは5群のチャンパーにそれぞれ独立した外部循環制御による温湿度調整が出来るようにし、あわせて併用によるバックアップ態勢ももたらして早い応答性が得られるようにしてある。

iii) 深海潜水における換気動態:先に述べたごとく、たとえ呼吸気体にヘリウムを使用しても閉塞性換気障害パターンを招来し、作業能の低下を余儀なくされる。更に潜水呼吸器は大方通気抵抗の増加を伴い、低温潜水における熱損失と併せて、安全潜水の遂行に困難が伴う。

海上自衛隊の新しい深海潜水ではこの問題を解決するため新しい潜水システムを導入した。この方式は深海潜水におけるダイバーの換気動態の低下を防ぐため潜水中のダイバーの呼気相に合わせて呼吸ガスがPTC(水中エレベーター)からヘルメット内に供給され、呼気相に合わせて、ヘルメット外に排気されPTCに戻る大循環方式を採用したPush-Pull潜水器である。この方式はPTC内に設置したポンプシステム、圧制御システム、酸素制御装置、炭酸ガス吸収装置から成るライフサポ

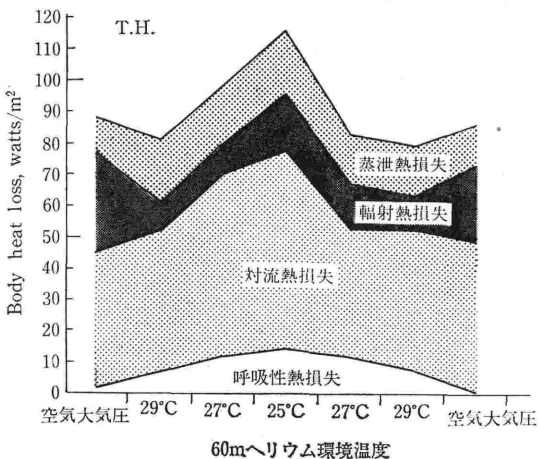


図7. 高圧ヘリウム環境の体熱損失(縦軸)と環境温度(横軸)

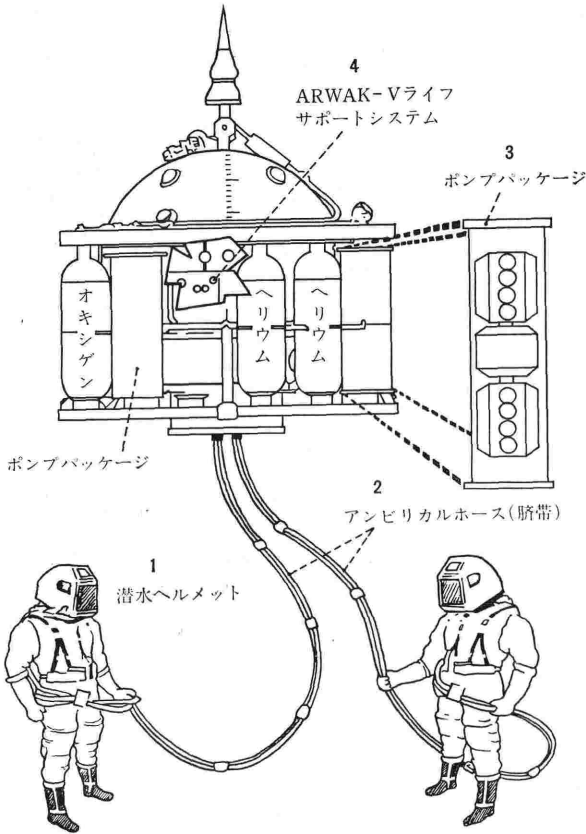


図 8. 深海潜水用 Push-Pull 閉鎖循環式潜水器

ートシステムとダイバーのヘルメットを循環ホース (umbilical hose) で結び、PTC 内の呼吸ガスを循環させる方式である。別にダイバーには船上からホースで給湯する hot water suit suystem を装着し、身体と呼吸ガスの加温を行うものである。

図 8 は Push-Pull 潜水システムである ARWAK-V (米国 DIVEX 社) と PTC の関係を示したもので、当隊の大橋らによって潜水中の換気動態評価の方法について検討を始めている。その内容は、
 1. 潜水中の装置の圧・流量/温度特性。 2. ヘルメット内換気特性。 3. 潜水中のダイバーの換気仕事量。 4. ポンプ等の機械特性、等であるが、最終的な評価が高圧・水中と言う環境で行うため、測定の方法にはいろいろ問題があり研究中である。

ま と め

海上自衛隊潜水医学実験隊の施設と研究内容のおもなものについて紹介した。海上自衛隊の潜水艦および潜水のオペレーションは昼夜を分かたず毎日活動し、その間には人および装備品等について、主としてソフトウェアの問題を常に検討しなければならない。オペレーションの安全性に寄与できれば、民需にも応用出来、やりがいのある研究である。外部の多くの方々のご協力をお願いしたい。

* * * * *