

高気圧作業安全衛生規則 改正検討会報告書

(案)

平成 25 年 6 月 19 日

厚生労働省労働基準局

第1 検討会開催の趣旨等

1 趣旨及び目的

労働安全衛生法施行令（昭和47年政令第318号。以下「安衛令」という。）第6条第1号で定める高圧室内作業及び安衛令第20条第9号で定める業務（以下「高気圧作業」という。）については、高気圧作業安全衛生規則（昭和47年労働省令第40号。以下「高圧則」という。）で、減圧症、酸素中毒及び窒素酔い等（以下「高気圧障害」という。）の防止のための対策が規定されているが、その後の技術の進展等により、その取り巻く状況は変化している。

特に、新たな知見による減圧表の考え方、酸素窒素混合ガスやヘリウムを含む混合ガス等（以下「混合ガス」という。）の使用、酸素減圧の実施、閉鎖循環呼吸回路方式（呼吸を外に排出せず、二酸化炭素を取り除いて再利用する方式）の潜水器等新技術を用いた機器等（以下「新技術を用いた機器」という。）を使用することによる急性または慢性の高気圧障害の防止技術等が既に実用化されている等の状況にある。

これらを踏まえ、高圧則の改正について検討するため、厚生労働省労働基準局長が集めた高気圧作業等の専門的知識を有する者によって構成される高気圧作業安全衛生規則改正検討会（以下「検討会」という。）を開催する。

2 検討事項

- ・ 高気圧作業安全衛生規則別表第1から別表第3までに掲げる高圧下の時間及び減圧の速度等に係る規定の在り方
- ・ 高気圧作業における混合ガス及び酸素減圧の取扱いに係る規定の在り方
- ・ 高気圧作業における新技術を用いた機器の取扱いに係る規定の在り方
- ・ その他高気圧障害防止のための規定の在り方

3 構成

- (1) 本検討会は、高気圧作業等の専門的知識を有する者を参集者とする。
- (2) 本検討会には座長を置き、座長は、本検討会を統括する。
- (3) 本検討会の参集者は、必要に応じ追加することができる。
- (4) 本検討会は、参集者以外の者に出席を求めることができる。

4 その他

- (1) 本検討会は、原則として公開する。ただし、個人情報、企業秘密等を取り扱うなどの場合においては、非公開にすることができる。
- (2) 本検討会の事務は、厚生労働省労働基準局安全衛生部労働衛生課において行う。

5 参集者（五十音順）

畔田 忠彦	大豊建設株式会社 安全環境部長
川崎 恭史	オリエンタル白石株式会社 施工・技術本部 執行役員
芝山 正治	駒沢女子大学 人間健康学部健康栄養学科 教授
鉄 芳松	社団法人日本潜水協会 会長
○眞野 喜洋	国立大学法人東京医科歯科大学 名誉教授
村山 盤	社団法人日本埋立浚渫協会 安全環境対策本部委員
毛利 元彦	日本海洋事業株式会社 顧問・産業医
柳下 和慶	国立大学法人東京医科歯科大学医学部附属病院 高気圧治療部長

（○は座長）

オブザーバー

吉澤 文悠子	人事院職員福祉局職員福祉課	第1～5回
武藤 康代	健康安全対策推進室課長補佐	第6回
土田 容子	人事院職員福祉局職員福祉課	第1～4回
大村 啓太	健康安全対策推進室安全班主査	第6回
岩男 勝実	海上保安庁警備救難部	第1～5回
武田 治	救難課専門官	第6回
佐々木 千寿	海上保安庁警備救難部救難課業務係長	第1～6回
鈴木 信哉	自衛隊中央病院臨床医学研究部長	第1～6回
芳倉 勝治	国土交通省港湾局	第1～5回
野沢 良一	技術企画課課長補佐	第6回
後藤 嘉雄	国土交通省港湾局	第1～5回
三浦 健	技術企画課直轄事業係長	第6回
中川 英毅	社団法人日本潜水協会	第1～5回
浦辺 信一	事務局長	第6回
高橋 元	建設業労働災害防止協会 技術管理部長	第1～6回
齊藤 泰彦	社団法人日本埋立浚渫協会 安全環境対策部会長	第1～6回

6 検討の経緯

第1回検討会	平成24年	5月30日
第2回検討会	平成24年	6月25日
第3回検討会	平成24年	7月10日
第4回検討会	平成24年	7月30日
第5回検討会	平成24年	12月6日
第6回検討会	平成25年	6月19日

単位換算は、 $1\text{atm} = 10.0\text{msw} = 10.0\text{mAq} = 100\text{kPa} = 0.10\text{MPa}$ （原則として絶対圧力。）とする。

本報告書に示すゲージ圧力及び絶対圧力の単位はSI単位系とし、換算により全てPa（パスカル）にSI接頭辞を用いて表記する。

第2 高気圧作業の安全衛生基準の課題と改正の方向

1 現行高気圧作業の安全衛生基準の課題と検討

(1) 潜水業務・高圧室内業務共通の課題と検討

ア 高気圧作業安全衛生規則（以下「高圧則」という。）は昭和47年に制定されているが、別表の減圧表はそれ以前の高気圧障害防止規則（以下「旧高圧則」という。）が制定された昭和36年に施行されており、それ以降は、単位換算による改正はあったが、抜本的改正はされていない。

イ 現行減圧表は、減圧症のうちベンズ（関節症）等の作業が終わってから少なくとも2～3時間以内に発生する急性減圧症に対する対応が中心で考えられている。その後の研究により、急性減圧症を発症した後に治療せずに放置することにより無菌性骨壊死という慢性減圧症が発生する可能性が高くなるという報告があるが、これについては、更なる知見の集積に努めるとともに、前提となる急性減圧症を予防することが重要であり、酸素減圧等より体内の不活性ガスの排出が促進される方法についても対応できる減圧基準が求められている。

ウ 今日では、高気圧作業の呼吸ガスに、窒素混合ガス（ナイトロックス、窒素と酸素の混合ガス）、ヘリウム混合ガス（ヘリオックス、ヘリウムと酸素の混合ガス）、三種混合ガス（トライミックス、窒素とヘリウムと酸素の混合ガス）といった酸素と呼気用不活性ガス（窒素及びヘリウム）を混合した混合ガスを利用することが技術的に

可能であり、これを用いれば健康障害を起こすことなく減圧時間の短縮が可能だが、現行の高圧則で規定する別表第1及び別表第2の減圧表が空気呼吸のみを想定して作成されているという制約を受けるため、これらの技術を利用するための適切な減圧表がない。

エ 1日に高気圧作業を複数回行う場合は、ノモグラム（計算尺）である別表第3を用いて減圧表を修正して作業を行うが、非常に分かりにくく、作図精度でずれが出る等の問題もあるため、これにより、体内に溶け込んだ窒素が十分排出されずに次の作業を行う危険性がある。

オ 酸素減圧を行う場合等で、酸素を一定以上吸入した場合には、蓄積による酸素毒性を及ぼすことが知られており、この慢性肺酸素中毒予防のために、規制値を設けるべきである。また、慢性酸素中毒は、肺機能の低下が認められるため、現在の高圧則の健康診断により、肺活量の検査を6か月以内に1回確実に行うことが重要である。また、可能な範囲で高気圧作業実施期間の前後に肺活量を測定することが望ましい。

カ 急性減圧症発症時に現場で救急再圧を行う場合は、空気による再圧は禁止し、医師の常駐を外した上で医師が行う酸素再圧による治療とするのがよいという意見があったが、一方で、機器故障等の緊急浮上時の業務再圧でも利用されることを考慮すれば、高圧則で空気減圧を認めており、この場合は空気再圧を禁止することは適当でないと考えられる。また、治療再圧については、医療の問題であるため、労働衛生上の問題として本検討会で検討を行うことは困難であるとされた。

キ 酸素再圧の場合、酸素吸入装置の備えられた第1種装置（1人用）を禁止し、処置する者と治療者の最低2人以上の定員である第2種装置（複数人用）を原則とし、但し、第1種装置でも酸素吸入が出来る場合はこの限りではないとすべき、という意見があった。しかし、高圧則第42条第1項において、救急処置を行うため必要な再圧室を設置し、又は利用できるような措置を講じなければならないとされているため、再圧室を設置せず、救急体制を整備することでも足り、また、設備投資の問題や船上における狭隘等の事情によって2種設置が困難な場合もあり、2種設置を一律に求めることは困難な面があるため、必要性や実態を十分に調査する必要がある。加えて、本意見についても、第1種装置を禁止する理由が既に治療の領域なので、本検討会で検討は困難とされた。

ク 高気圧作業員について、高気圧作業記録等を記載する手帳などにより、作業従事歴等を記録することが必要ではないかという意見があったが、長期間において蓄積された有害性と作業従事歴の評価については知見が不十分であるため、過去の作業歴についてまとめておくという意味でそれを推奨することはできても、これを事業者の義務

とするには困難な面がある。

(2) 潜水業務の課題と検討

ア 潜水業務で主に利用する減圧表である別表第2は、水深90mまで潜水業務を許容しているが、空気を呼吸用ガスとして行う潜水業務では、現在、この水深まで安全性を十分確保することが難しいとされている。

イ 事例的には10m以浅においても減圧症の発症が一部報告されている旨の意見があったが、減圧管理を必要とする深度を10mより浅く設定するには、知見が不十分であり、当面は現行の水深10mからの減圧管理が適当である。

(3) 高圧室内業務の課題と検討

作業終了後、タラップ（一時的に架設される階段等）を上がるときに膝・腰にかかる負担が大きいため、減圧症が発症する原因とも考えられ、代わりにエレベータを利用させ、作業終了後の負担軽減を図ることによって、通常の高圧室内業務と比較し、減圧症の発症率が4分の1程度にまで減少させることができたという報告もあることから、ゲージ圧力が0.4MPa以上の潜函作業では、なるべく浅い深度からエレベータを用意するのが望ましいとの意見があった。一方、業者の設備投資があまりに過大になることから、一律に義務化するのは難しい面があり、発注者・業界団体の自主的取組みによるのがよいとの意見があった。

2 高気圧作業の安全衛生基準をめぐる国内実用面及び海外の動向

ア 昭和36年以降、別表第1の減圧表に従っていたが、ゲージ圧力が0.2MPaを超えると減圧症発症率は2%以上であった。昭和45年以降はゲージ圧力が0.25MPaを超えると別表第1を安全側に修正して実施する傾向となった。

イ フランスの減圧表は水深60m、45分間の条件を超える不飽和潜水は避けるべきとの考え方にたっている。

ウ イギリスでは、深水7mから、アメリカでは、深水9mから減圧停止時間を設けている。

エ シンガポール等東南アジアを中心にイギリスに倣う国では、飽和潜水システムが可

能な設備を持っていないと入札に参加できない。

3 高気圧作業の安全衛生基準の見直しの方向

混合ガスの使用など、高気圧障害の防止に有効な方法を活用するため、高気圧作業の安全衛生基準について次の方向とするのがよいと考えられる。

(1) 潜水業務・高圧室内業務共通の方向

ア 空気を呼吸ガスとする高気圧作業は水深 40m またはゲージ圧力が 0.4MPa までとすること。

イ 使用する減圧表は、適切な理論に基づいた半飽和組織ごとの体内不活性ガス分圧及び M 値（次の減圧停止圧に移行できる最大不活性ガス分圧値：Maximum value）の基準となる計算方法を示し、体内不活性ガス分圧が M 値以下となるまで待機する時間（以下、「減圧時間」という。）を設定すること。繰り返し作業も大気圧下に戻った後も引き続き同様に計算を行い、適切な減圧時間を設定することとする。

繰り返し作業とは、次の高気圧作業との間が、14 時間未満の高気圧作業とする。つまり、次の高気圧作業との間が、14 時間以上空けば、別の高気圧作業とする。

なお、参考として、空気呼吸・空気減圧・一回のみの作業の場合について、当該計算方法により求めた減圧表（水深 40m まで）を別添 1 として添付する。

ウ 水深 40m またはゲージ圧力が 0.4MPa を超える高気圧作業は、窒素ガス分圧が空気の分圧よりも小さくなる混合ガスを呼吸用に使用しなければならないこととし、混合ガス呼吸または酸素減圧若しくはその両方を利用した場合も、基準となる計算方法により浮上または減圧時間を求め、これ以上の減圧停止時間を設けることにより作成するものとする。また、水深 40m 又はゲージ圧力が 0.4MPa を超えない高気圧作業においても、当該計算方法により混合ガス呼吸、酸素減圧を利用できることとする。

エ 高気圧作業終了後の大気圧下になった後でも、一定時間純酸素で呼吸した方が減圧症の予防のためによりよいという意見もある。

オ 累積酸素ばく露による慢性中毒は、医学的知見に基づき、0.05MPa を超える場合について計算式により評価する必要がある。また、累積酸素ばく露の基準は、1 日当たりは、600 肺酸素毒性量単位 (UPTD) 以下、1 週間当たりは、2,500 累積肺酸素毒性量単位 (CPTD) 以下とすること。また、連日作業する場合は、1 日当たりの酸素ばく露量を平均的にする（例えば、6 日間連続で作業する場合は、各日の酸素ばく露量を 400 肺酸素毒性量単位 (UPTD) 以下とする）ことが望ましい。

カ 事業者は、労働者に高気圧作業を行わせるときは、上述の計算を全て満足する作業計画を策定し、関係労働者に周知しなければならない。また、高気圧作業を行った記録は、高気圧作業者ごとに5年間保存することが望ましい。

キ 規則で定める内容は、罰則をもって強制する最低水準であり、高気圧作業時の身体強度、個人の性質・体調、環境等により、減圧症の罹患状況も変化するものであるから、規則の定めを最低基準としつつも更に高い安全率を採用する、なるべく身体に窒素を溶け込ませない、窒素をなるべく早く排出する等身体に負担の少ない方法を採用するよう努めるべきである。

ク 高圧則第35条の純酸素の使用制限は、酸素分圧による規制に置き換えることが適当である。

(2) 潜水業務の方向

ア 潜水業務での純酸素の使用は、急性酸素中毒による溺水のおそれがあるため、慎重に考える必要があるが、潜鐘（ダイビングベル）を用いた潜水等溺水のおそれのない場合に限り使用可能とした方が利点ある。

イ 減圧管理を必要とする作業は、現行の水深10mでなく水深8mとすることが望ましいという意見があったが、知見が十分ではないため、当面規則として定める減圧管理義務は現行どおりとするが、水深10mより浅い深度で自主的に減圧管理を行うことは差し支えない。

(3) 高圧室内業務の方向

ア ゲージ圧力が0.3MPa以上では、ヘリウム混合ガスを呼吸ガスとすることが望ましい。

イ 無症候性気泡というマイクロバブルを体内に残さないようにするため、減圧を要する作業では酸素減圧を採用することが望ましい。

ウ 減圧管理がコンピューターでやり易い高圧室内作業については、減圧速度を0.015MPa/min以下とすることが望ましいが、規則として定める最低基準は現行どおりとする。

エ ゲージ圧力が0.4MPa以上の潜函作業では、出来るだけ浅い深度からエレベータを用意するのが望ましい。

(4) 今後の課題

・今後、高気圧作業に関する新たな知見の集積や技術の進展についての情報収集につとめ、それらにより、高圧則等の見直しなどが必要と認められる場合には、高気圧作業の安全衛生の在り方を再度検討する必要がある。

・労働安全衛生法（昭和 47 年法律第 57 号）第 3 条第 3 項の理念に基づき、高気圧作業の作業計画を検討するときは、事業者、発注者及び業界団体が連携し、労働者の安全と健康を一層確保できる方法を検討することが望ましい。

第 3 高気圧作業の減圧表の見直し

1 基本方針

・減圧時間の規制基準として、現行の高圧則では、減圧表を別表第 1 及び別表第 2 に規定し、これを基準としてきたが、酸素減圧、混合ガス使用等作業の形態が多様化することに対応し、新たな規制基準としては、第 2 の 3 の（1）イで示した計算方法により求めた減圧時間を基準とすることとする。

・空気呼吸・空気減圧による業務は、ゲージ圧力が 0.40MPa(水深 40m)までに制限する。

・ゲージ圧力が 0.40MPa(水深 40m)までの作業であっても、作業上の制約がなければ、混合ガス呼吸や酸素減圧を用いることができる。なお、この場合も基準式により求めた時間を基準とする。

また、参考として典型的な作業を想定し作成した減圧表例を、別添 2～4 に示す。

※ 海外で利用されている減圧表については、高圧則で定められた式による規制に合うものは利用可能であるが、減圧時間が不足する様な場合は、減圧待機時間の延長等減圧表の修正を行わなければならないことに留意すること。

・現行の高圧則に存在している業務間ガス圧減少時間については、今後は、基準となる計算方法に基づき、業務間においても体内不活性ガス分圧を計算し続けることで代替される。したがって、業務間に体内不活性ガス圧を減少させるための時間を適切に設けなければ、次の作業における深度や時間を十分確保できなくなることとなる。

・現行の高圧則の作業時間の上限については、旧高圧則を制定した昭和 36 年当時、人体が長時間高圧環境下に置かれた場合の健康影響についての十分な知見がなく、健康影響を及ぼす可能性が否定できない状況であったことから、減圧時間に加えて、作業時間についても一定の基準を設けたものと推測される。しかしながら、その後の海上自衛隊や

海外における知見の集積により、人体への健康影響は、高圧環境下に置かれる時間そのものではなく、圧力の変化とそれに応じた減圧時間によるものであることが明らかになっていることから、作業時間の規制は不要と考えられる。

2 体内不活性ガス分圧、M 値及び累積酸素ばく露量の計算方法等

(1) 呼吸に用いる気体について、医学的知見に基づき、どのような圧力下においても次の分圧範囲とすることが必要である。下記表示は分圧値であり、濃度 (%) 表示ではないため注意すること。なお、窒素、酸素及び二酸化炭素以外のガスとしては、ヘリウムを使用すること。

- ・窒素分圧は、400kPa (4.0ATA、40msw) 以下
- ・酸素分圧は、18 以上 220kPa 以下 (0.18 以上 2.2ATA 以下、1.8 以上 22.0msw 以下)
- ・二酸化炭素分圧は、5kPa (0.005ATA、0.05msw) 以下

(2) 作成する減圧表については、窒素及びヘリウムを不活性ガスとして取扱い、待機深度毎に体内の不活性ガス分圧と M 値の計算結果を比較することにより減圧表を作成する。

定常状態の空気は、1 気圧で窒素 79%、酸素 21%とする。すなわち、窒素分圧は、79kPa(7.9msw)、酸素分圧は、21kPa(2.1msw)であるが、体内に取り込む空気の初期窒素分圧は、飽和水蒸気圧を鑑み、

$$P_{1,N_2,0} = 79 \times (1 - 0.0567) = 74.5207$$

$P_{1,N_2,0}$: 初期窒素分圧 (大気圧) [kPa]

となる。

待機減圧深度区間は 0.03MPa(3msw)以内で設定し、減圧停止圧毎における減圧待機時間は、16 半飽和時間組織で計算した M 値と不活性ガス分圧 (窒素及びヘリウムについて、(3)に基づき計算を行う。)を比較し、不活性ガス分圧が 16 半飽和時間組織の M 値を全て下回った場合、次の減圧停止圧まで移動ができる。これを深度 0 まで繰り返す。

また、M 値については、

$$\text{換算M値} = \frac{\text{M値}}{\alpha}$$

$\alpha \geq 1.0$ (安全率)

とした 1.0 以上の安全率が見込まれる減圧表を採用すること。

酸素減圧は溺水のおそれがない場合に限り使用可能で、25 分の酸素減圧には、酸素中毒防止のため、5 分のエアブレイク (空気呼吸) を挿入する (計 30 分)。

(酸素毒性計算では、 $O_2=100\%$ で計算するが、減圧計算では $N_2:O_2=20:80$ で計算する。)

(3) 体内の不活性ガス分圧は、半飽和組織毎 (1=1, 2, 3...14, 15, 16) に、下式により下付添字が N₂ の場合は N₂ (窒素)、He の場合は He (ヘリウム) として各々計算する。

また、作業様態の変更がある各工程 (n=1, 2, 3, 4...) において、次の①及び②により、各々分圧を計算する。

① 圧力が可変時の工程、即ち、加圧 (潜行) または減圧 (浮上) 時に使用する式は、法定の加減圧速度に留意し、

$$P_{l,m,n} = (P_a + P_b) \cdot N_m + R \cdot N_m \cdot \left(t - \frac{1}{k_1} \right) - \left\{ (P_a + P_b) \cdot N_m - P_{l,m,n-1} - \frac{R \cdot N_m}{k_1} \right\} \cdot e^{-k_1 t}$$

$P_{l,m,n}$: 体内の不活性ガス分圧 (1=1~16 m=N₂, He n=1, 2, 3, 4...) [kPa]

$P_{l,m,n-1}$: 直前の不活性ガス分圧 (1=1~16 m=N₂, He n=1, 2, 3, 4...) [kPa]

P_a : 大気圧 [kPa] (ここでは絶対圧を求め、基本 100kPa を採用)

P_b : 到達圧力 (ゲージ) [kPa]

N_m : 不活性ガス濃度 (m=N, H) [%]

R : 加減圧速度 [m/min] (減圧速度は符号を反転)

t : 当該工程経過時間 [min]

S_1 : 不活性ガスの半飽和時間 (1=1~16) [min]

$$k_1 = \frac{\log_e 2}{S_1}$$

② 圧力が不変時の工程、即ち、作業時・減圧待機時に使用する式は、 $R=0$ となり①に示す式が以下のとおりとなる。

$$P_{l,m,n} = P_{l,m,n-1} + \left\{ (P_a + P_c) \cdot N_m - P_{l,m,n-1} \right\} \cdot (1 - e^{-k_1 t})$$

P_c : 作業、減圧 (浮上) 時に停止する圧力 [kPa]

作業に応じて①または②を使った計算をし、その結果を元に、次の作業の体内不活性ガス分圧を①または②で求める。また、作業気圧 (水深) までの移行において、加圧 (潜降) 計算を省略 {始めから作業気圧 (水深) に滞在すると仮定} した計算を行っても良い。

16 半飽和組織毎に計算した、各分圧は、次の(4)で計算する 16 半飽和組織の M 値を下回ると、次の停止圧力へ移行できる。

(4) M 値の計算は、

$$A_{l,n} = \frac{a_{l,N2,n} \cdot P_{l,N2,n} + a_{l,He,n} \cdot P_{l,He,n}}{P_{l,N2,n} + P_{l,He,n}}$$

$$B_{l,n} = \frac{b_{l,N2,n} \cdot P_{l,N2,n} + b_{l,He,n} \cdot P_{l,He,n}}{P_{l,N2,n} + P_{l,He,n}}$$

を計算後、以下の式で算出する。

$$M_{l,n} = \frac{P_a' + P_c}{B_{l,n}} + A_{l,n}$$

$A_{l,n}$: a 値の合成値 (l=1~16, n=1, 2, …)

$B_{l,n}$: b 値の合成値 (l=1~16, n=1, 2, …)

$M_{l,n}$: M 値の合成値 (l=1~16, n=1, 2, …)

P_a' : ここでは水蒸気圧を考慮し、 $100 - 5.67 = 94.33$ [kPa]を採用

なお、ヘリウムを利用せず窒素のみの場合は、

$$M_{l,n} = \frac{P_a' + P_c}{b_{l,N2,n}} + a_{l,N2,n}$$

で簡易に計算が可能となる。

以上により、各減圧待機深度における待機時間は、不活性ガスの合成分圧が、1 から 16 までの半飽和組織の全ての M 値未滿となる t を計算する。すなわち、

$$P_{l,N2,n} + P_{l,He,n} \leq M_{l,n} \quad (l=1 \sim 16 \quad n=1, 2, \dots)$$

を満足する t が減圧停止時間となる。

表 1 窒素

組織数	No1	No2	No3	No4	No5	No6	No7	No8
半飽和時間	5	8	12.5	18.5	27	38.3	54.3	77

a 値	126.885	109.185	94.381	82.446	73.918	63.153	56.483	51.133
b 値	0.5578	0.6514	0.7222	0.7825	0.8126	0.8434	0.8693	0.891
組織数	No9	No10	No11	No12	No13	No14	No15	No16
半飽和時間	109	146	187	239	305	390	498	635
a 値	48.246	43.709	40.774	38.680	34.463	33.161	30.765	29.284
b 値	0.9092	0.9222	0.9319	0.9403	0.9477	0.9544	0.9602	0.9653

ヘリウムについては、窒素の半飽和時間の 1/2.65 で計算する。a 値及び b 値は次のとおり。

表2 ヘリウム

組織数	No1	No2	No3	No4	No5	No6	No7	No8
半飽和時間	1.887	3.019	4.717	6.981	10.189	14.453	20.491	29.057
a 値	174.247	147.866	127.477	112.400	99.588	89.446	80.059	71.709
b 値	0.477	0.5747	0.6527	0.7223	0.7582	0.7957	0.8279	0.8553
組織数	No9	No10	No11	No12	No13	No14	No15	No16
半飽和時間	41.132	55.094	70.566	90.189	115.094	147.17	187.925	239.623
a 値	66.285	62.049	59.152	58.029	57.586	58.143	57.652	57.208
b 値	0.8757	0.8903	0.8997	0.9073	0.9122	0.9171	0.9217	0.9267

(5) 酸素減圧を利用する時は、酸素における身体影響を鑑み、酸素分圧が 0.5ATA 以上の場合は、以下による制約を受ける。

$$UPTD = t \cdot \left(\frac{PO_2 - 50}{50} \right)^{0.83}$$

t : 酸素暴露時間 [min]

PO₂ : 酸素分圧 [kPa]

とし、UPTD (肺酸素毒性量単位) 及び CPTD (累積肺酸素毒性量単位) を

1 日当りの最大酸素暴露量 600UPTD 以下

1 週間当りの最大酸素暴露量 2,500CPTD 以下

となる様に作業計画を作成しなければならない。

(具体的事例)

1. 空気呼吸・空気減圧

空気呼吸・空気減圧により、0.08[MPa/min]で加圧、到達圧力 0.15[MPa]で合計 150[min]作業後、0.08[MPa/min]で減圧し、更に 60 分の休憩後、空気呼吸・空気減圧により、0.08[MPa/min]で加圧、到達圧力 0.15[MPa]で合計 170[min]作業後、0.08[MPa/min]で減圧した場合の減圧スケジュール。

作業前の初期窒素分圧は、

$$P_{1,N2,0}=74.5207 \text{ [kPa]}$$

減圧表の計算において、加圧（潜降）速度を考慮せず、始めから到達圧力 150[kPa]に滞在する計算を行っても良いため、150[min]作業として、②式を用い、

$$P_{1,N2,1}=74.5207+\{(100+150) \cdot 0.79- 74.5207\} \cdot \{1-\exp(-150 \cdot \ln(2)/S_1)\}$$

となる。

l=1~16 の半飽和時間の値を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 1	P2, N2, 1	P3, N2, 1	P4, N2, 1	P5, N2, 1	P6, N2, 1	P7, N2, 1	P8, N2, 1
窒素分圧[kPa]	197.50	197.50	197.47	197.50	194.89	189.36	179.38	165.63
半飽和組織	P9, N2, 1	P10, N2, 1	P11, N2, 1	P12, N2, 1	P13, N2, 1	P14, N2, 1	P15, N2, 1	P16, N2, 1
窒素分圧[kPa]	150.12	137.17	126.97	117.90	110.04	103.30	97.69	93.09

となる。これは 150[min]後の窒素体内ガス分圧である。

また、加圧（潜降）速度を考慮する場合は、①式を用い、

$$P_{1,N2,1}=(100+0) \cdot 0.79+80 \cdot 0.79 \{(150/80)-S_1/\ln(2)\}-\{(100+0) \cdot 0.79-74.5207-80 \cdot 0.79 \cdot (S_1/\ln(2))\} \cdot \exp\{-\ln(2)/S_1 \cdot (150/80)\}$$

となる。

l=1~16 の半飽和時間を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 1	P2, N2, 1	P3, N2, 1	P4, N2, 1	P5, N2, 1	P6, N2, 1	P7, N2, 1	P8, N2, 1
窒素分圧[kPa]	89.69	84.32	80.91	78.89	77.54	76.66	76.03	75.59
半飽和組織	P9, N2, 1	P10, N2, 1	P11, N2, 1	P12, N2, 1	P13, N2, 1	P14, N2, 1	P15, N2, 1	P16, N2, 1
窒素分圧[kPa]	75.28	75.09	74.96	74.87	74.79	74.73	74.69	74.65

となる。

次工程で、到達圧力 150[kPa]のまま、加圧（潜降）時間を除いた 148.1[min]作業を行う工程では、②式を用い、

$$P_{1,N2,2}=P_{1,N2,1}+\{(100+150) \cdot 0.79- P_{1,N2,1}\} \cdot \{1-\exp(-148.1 \cdot \ln(2)/S_1)\}$$

となる。

l=1~16 の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,1}$ の値を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 2	P2, N2, 2	P3, N2, 2	P4, N2, 2	P5, N2, 2	P6, N2, 2	P7, N2, 2	P8, N2, 2
窒素分圧[kPa]	197.50	197.50	197.47	197.04	194.82	189.22	179.16	165.37
半飽和組織	P9, N2, 2	P10, N2, 2	P11, N2, 2	P12, N2, 2	P13, N2, 2	P14, N2, 2	P15, N2, 2	P16, N2, 2
窒素分圧[kPa]	149.85	136.91	126.73	117.70	109.86	103.15	97.57	92.99

となる。以降の計算はこちらの値を使用する。

次工程で、減圧を開始するが、停止減圧を 30[kPa] 毎にとると、120[kPa]、90[kPa]、60[kPa]、30[kPa] で計算する。

次工程である 12[kPa] まで減圧した場合、①式を用い、

$$P_{1,N2,3} = (100+150) \cdot 0.79 - 80 \cdot 0.79 \left\{ (30/80) - S_1/\ln(2) \right\} - \left\{ (100+150) \cdot 0.79 - P_{1,N2,2} + 80 \cdot 0.79 \cdot (S_1/\ln(2)) \right\} \cdot \exp \left\{ -(\ln(2)/S_1) \cdot (30/80) \right\}$$

となる。

l=1~16 の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,2}$ を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 3	P2, N2, 3	P3, N2, 3	P4, N2, 3	P5, N2, 3	P6, N2, 3	P7, N2, 3	P8, N2, 3
窒素分圧[kPa]	196.89	197.12	197.23	196.88	194.73	189.20	179.19	165.44
半飽和組織	P9, N2, 3	P10, N2, 3	P11, N2, 3	P12, N2, 3	P13, N2, 3	P14, N2, 3	P15, N2, 3	P16, N2, 3
窒素分圧[kPa]	149.94	137.00	126.81	117.77	109.92	103.20	97.62	93.03

となる。

このときの M 値は、

$$M_{1,3} = (94.33+120) / b_{1,N2} + a_{1,N2}$$

となる。このときの M 値は、a 値及び b 値を代入し、

M1, 3	M2, 3	M3, 3	M4, 3	M5, 3	M6, 3	M7, 3	M8, 3
511.13	438.21	391.15	356.35	337.68	317.28	303.04	291.68
M9, 3	M10, 3	M11, 3	M12, 3	M13, 3	M14, 3	M15, 3	M16, 3
283.98	276.12	270.77	266.62	260.62	257.73	253.98	251.32

となる。全ての半飽和組織 (l=1~16) で、

$$P_{1,N2,3} \leq M_{1,3}$$

となるので、停止時間は必要無い。

次工程である 90[kPa] まで減圧した場合、①式を用い、

$$P_{1,N2,4} = (100+120) \cdot 0.79 - 80 \cdot 0.79 \left\{ (30/80) - S_1/\ln(2) \right\} - \left\{ (100+120) \cdot 0.79 - P_{1,N2,3} + 80 \cdot 0.79 \cdot (S_1/\ln(2)) \right\} \cdot \exp \left\{ -(\ln(2)/S_1) \cdot (30/80) \right\}$$

となる。

l=1~16 の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,3}$ を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 4	P2, N2, 4	P3, N2, 4	P4, N2, 4	P5, N2, 4	P6, N2, 4	P7, N2, 4	P8, N2, 4
窒素分圧[kPa]	195.11	195.99	196.50	196.39	194.42	189.02	179.11	165.43
半飽和組織	P9, N2, 4	P10, N2, 4	P11, N2, 4	P12, N2, 4	P13, N2, 4	P14, N2, 4	P15, N2, 4	P16, N2, 4
窒素分圧[kPa]	149.97	137.04	126.86	117.82	109.96	103.24	97.65	93.06

となる。

このときの M 値は、

$$M_{1,4} = (94.33+90) / b_{1,N2} + a_{1,N2}$$

となる。このときの M 値は、a 値及び b 値を代入し、

M1, 4	M2, 4	M3, 4	M4, 4	M5, 4	M6, 4	M7, 4	M8, 4
457.34	392.16	349.62	318.01	300.76	281.71	268.53	258.01
M9, 4	M10, 4	M11, 4	M12, 4	M13, 4	M14, 4	M15, 4	M16, 4
250.98	243.59	238.57	234.71	228.97	226.30	222.74	220.24

となる。全ての半飽和組織 (l=1~16) で、

$$P_{1,N2,4} \leq M_{1,4}$$

となるので、停止時間は必要無い。

次工程である 60[kPa] まで減圧した場合、①式を用い、

$$P_{1,N2,5} = (100+90) \cdot 0.79 - 80 \cdot 0.79 \left\{ (30/80) - S_1 / \ln(2) \right\} - \left\{ (100+90) \cdot 0.79 - P_{1,N2,4} + 80 \cdot 0.79 \cdot (S_1 / \ln(2)) \right\} \cdot \exp \left\{ -(\ln(2) / S_1) \cdot (30/80) \right\}$$

となる。

l=1~16 の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,4}$ を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 5	P2, N2, 5	P3, N2, 5	P4, N2, 5	P5, N2, 5	P6, N2, 5	P7, N2, 5	P8, N2, 5
窒素分圧 [kPa]	192.22	194.14	195.30	195.58	193.88	188.68	178.91	165.34
半飽和組織	P9, N2, 5	P10, N2, 5	P11, N2, 5	P12, N2, 5	P13, N2, 5	P14, N2, 5	P15, N2, 5	P16, N2, 5
窒素分圧 [kPa]	149.94	137.04	126.88	117.84	109.98	103.26	97.67	93.08

となる。

このときの M 値は、

$$M_{1,5} = (100+60) / b_{1,N2} + a_{1,N2}$$

となる。このときの M 値は、a 値及び b 値を代入し、

M1, 5	M2, 5	M3, 5	M4, 5	M5, 5	M6, 5	M7, 5	M8, 5
403.56	346.11	308.08	279.67	263.84	246.14	234.02	224.34
M9, 5	M10, 5	M11, 5	M12, 5	M13, 5	M14, 5	M15, 5	M16, 5
217.99	211.06	206.38	202.81	197.31	194.86	191.49	189.16

となる。全ての半飽和組織 (l=1~16) で、

$$P_{1,N2,5} \leq M_{1,5}$$

となるので、停止時間は必要無い。

次工程である 30[kPa] まで減圧した場合、①式を用い、

$$P_{1,N2,6} = (100+60) \cdot 0.79 - 80 \cdot 0.79 \left\{ (30/80) - S_1 / \ln(2) \right\} - \left\{ (100+60) \cdot 0.79 - P_{1,N2,5} + 80 \cdot 0.79 \cdot (S_1 / \ln(2)) \right\} \cdot \exp \left\{ -(\ln(2) / S_1) \cdot (30/80) \right\}$$

となる。

l=1~16 の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,5}$ を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 6	P2, N2, 6	P3, N2, 6	P4, N2, 6	P5, N2, 6	P6, N2, 6	P7, N2, 6	P8, N2, 6
窒素分圧 [kPa]	188.28	191.59	193.64	194.45	193.12	188.18	178.60	165.17
半飽和組織	P9, N2, 6	P10, N2, 6	P11, N2, 6	P12, N2, 6	P13, N2, 6	P14, N2, 6	P15, N2, 6	P16, N2, 6
窒素分圧 [kPa]	149.86	137.00	126.86	117.84	109.98	103.27	97.68	93.09

となる。

このときの M 値は、

$$M_{1,6} = (94.33 + 30) / b_{1,N2} + a_{1,N2}$$

となる。このときの M 値は、a 値及び b 値を代入し、

M1, 6	M2, 6	M3, 6	M4, 6	M5, 6	M6, 6	M7, 6	M8, 6
349.78	300.05	266.54	241.33	226.92	210.57	199.51	190.67
M9, 6	M10, 6	M11, 6	M12, 6	M13, 6	M14, 6	M15, 6	M16, 6
184.99	178.53	174.19	170.90	165.65	163.43	160.25	158.08

となる。全ての半飽和組織 (l=1~16) で、

$$P_{1,N2,6} \leq M_{1,6}$$

となるので、停止時間は必要無い。

次工程である 0[kPa] まで減圧した場合、①式を用いて計算すると、

$$P_{1,N2} \geq M_1$$

となるので、停止時間を設ける。②式を用い、30[kPa] の深度で 16 分の停止をした場合、

$$P_{1,N2,7} = P_{1,N2,6} + \{(100+30) \cdot 0.79 - P_{1,N2,6}\} \cdot \{1 - \exp(-20 \cdot \ln(2) / S_1)\}$$

となる。停止時間は基本的に整数を採用する。

l=1~16 の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,6}$ の値を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 7	P2, N2, 7	P3, N2, 7	P4, N2, 7	P5, N2, 7	P6, N2, 7	P7, N2, 7	P8, N2, 7
窒素分圧 [kPa]	113.40	126.93	142.28	155.00	164.22	167.86	165.37	157.28
半飽和組織	P9, N2, 7	P10, N2, 7	P11, N2, 7	P12, N2, 7	P13, N2, 7	P14, N2, 7	P15, N2, 7	P16, N2, 7
窒素分圧 [kPa]	145.57	134.64	125.55	117.20	109.74	103.26	97.78	93.25

となる。

そして、次工程である 0[kPa] まで減圧した場合、①式を用い、

$$P_{1,N2,8} = (100+30) \cdot 0.79 - 80 \cdot 0.79 \{ (30/80) - S_1 / \ln(2) \} - \{ (100+30) \cdot 0.79 - P_{1,N2,7} + 80 \cdot 0.79 \cdot (S_1 / \ln(2)) \} \cdot \exp \{ -(\ln(2) / S_1) \cdot (30/80) \}$$

となる。

l=1~16 の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,7}$ 代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 8	P2, N2, 8	P3, N2, 8	P4, N2, 8	P5, N2, 8	P6, N2, 8	P7, N2, 8	P8, N2, 8
窒素分圧 [kPa]	110.93	123.83	139.13	152.21	161.97	166.18	164.23	156.57
半飽和組織	P9, N2, 8	P10, N2, 8	P11, N2, 8	P12, N2, 8	P13, N2, 8	P14, N2, 8	P15, N2, 8	P16, N2, 8
窒素分圧 [kPa]	145.17	134.41	125.42	117.12	109.70	103.24	97.79	93.26

となる。

このときの M 値は、

$$M_{1,8} = (94.33 + 0) / b_{1,N2} + a_{1,N2}$$

となる。このときの M 値は、a 値及び b 値を代入し、

M1, 8	M2, 8	M3, 8	M4, 8	M5, 8	M6, 8	M7, 8	M8, 8
296.00	254.00	225.00	203.00	190.00	175.00	165.00	157.00
M9, 8	M10, 8	M11, 8	M12, 8	M13, 8	M14, 8	M15, 8	M16, 8
152.00	146.00	142.00	139.00	134.00	132.00	129.00	127.00

となる。全ての半飽和組織 (l=1~16) で、

$$P_{1,N2,8} \leq M_{1,8}$$

となるので、1回目の作業が完了する。

次工程である0[kPa]での60分の休憩時間は、②式を用いて計算すると、

$$P_{1,N2,9} = P_{1,N2,8} + \{(100+0) \cdot 0.79 - P_{1,N2,8}\} \cdot \{1 - \exp(-20 \cdot \ln(2)/S_1)\}$$

となる。

l=1~16の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,8}$ の値を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 9	P2, N2, 9	P3, N2, 9	P4, N2, 9	P5, N2, 9	P6, N2, 9	P7, N2, 9	P8, N2, 9
窒素分圧[kPa]	79.01	79.25	81.16	86.73	96.78	108.43	118.62	124.20
半飽和組織	P9, N2, 9	P10, N2, 9	P11, N2, 9	P12, N2, 9	P13, N2, 9	P14, N2, 9	P15, N2, 9	P16, N2, 9
窒素分圧[kPa]	124.18	120.68	116.16	111.03	105.79	100.79	96.28	92.36

となる。

2回目の作業は、到達圧力150[kPa]で合計170[min]作業を行うとすると、加圧（潜降）速度を考慮する場合は、①式を用い、

$$P_{1,N2,10} = (100+0) \cdot 0.79 + 80 \cdot 0.79 \left\{ \left(\frac{150}{80} - S_1 / \ln(2) \right) - \left\{ (100+0) \cdot 0.79 - P_{1,N2,9} - 80 \cdot 0.79 \cdot \left(S_1 / \ln(2) \right) \right\} \cdot \exp \left\{ -(\ln(2) / S_1) \cdot (150/80) \right\} \right\}$$

となる。

l=1~16の半飽和時間を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 10	P2, N2, 10	P3, N2, 10	P4, N2, 10	P5, N2, 10	P6, N2, 10	P7, N2, 10	P8, N2, 10
窒素分圧[kPa]	93.16	88.34	86.90	90.27	98.75	109.44	119.09	124.44
半飽和組織	P9, N2, 10	P10, N2, 10	P11, N2, 10	P12, N2, 10	P13, N2, 10	P14, N2, 10	P15, N2, 10	P16, N2, 10
窒素分圧[kPa]	124.35	120.84	116.31	111.18	105.93	100.91	96.39	92.45

となる。

次工程で、到達圧力150[kPa]のまま、加圧（潜降）時間を除いた168.1[min]作業を行う工程では、②式を用い、

$$P_{1,N2,11} = P_{1,N2,10} + \{(100+150) \cdot 0.79 - P_{1,N2,10}\} \cdot \{1 - \exp(-168.1 \cdot \ln(2)/S_1)\}$$

となる。

l=1~16の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,10}$ の値を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 11	P2, N2, 11	P3, N2, 11	P4, N2, 11	P5, N2, 11	P6, N2, 11	P7, N2, 11	P8, N2, 11
窒素分圧[kPa]	197.50	197.50	197.49	197.30	196.18	193.30	188.33	181.42
半飽和組織	P9, N2, 11	P10, N2, 11	P11, N2, 11	P12, N2, 11	P13, N2, 11	P14, N2, 11	P15, N2, 11	P16, N2, 11
窒素分圧[kPa]	172.39	162.99	153.96	144.49	135.01	125.86	117.49	110.06

となる。

以降は、前述と同様に大気圧まで計算を繰返し行う。

次工程である120[kPa]まで減圧した場合、①式を用い、

$$P_{1,N2,12} = (100+150) \cdot 0.79 - 80 \cdot 0.79 \left\{ \left(\frac{30}{80} - S_1 / \ln(2) \right) - \left\{ (100+150) \cdot 0.79 - P_{1,N2,11} + 80 \cdot 0.79 \cdot \left(S_1 / \ln(2) \right) \right\} \cdot \exp \left\{ -(\ln(2) / S_1) \cdot (30/80) \right\} \right\}$$

となる。

l=1~16 の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,11}$ を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 12	P2, N2, 12	P3, N2, 12	P4, N2, 12	P5, N2, 12	P6, N2, 12	P7, N2, 12	P8, N2, 12
窒素分圧[kPa]	196.89	197.12	197.25	197.14	196.08	193.25	188.32	181.43
半飽和組織	P9, N2, 12	P10, N2, 12	P11, N2, 12	P12, N2, 12	P13, N2, 12	P14, N2, 12	P15, N2, 12	P16, N2, 12
窒素分圧[kPa]	172.42	163.03	154.00	144.53	135.05	125.90	117.53	110.09

となる。

このときの M 値は、

$$M_{1,12} = (94.33 + 120) / b_{1,N2} + a_{1,N2}$$

となる。このときの M 値は、a 値及び b 値を代入し、

M1, 12	M2, 12	M3, 12	M4, 12	M5, 12	M6, 12	M7, 12	M8, 12
511.13	438.21	391.15	356.35	337.68	317.28	303.04	291.68
M9, 12	M10, 12	M11, 12	M12, 12	M13, 12	M14, 12	M15, 12	M16, 12
283.98	276.12	270.77	266.62	260.62	257.73	253.98	251.32

となる。全ての半飽和組織 (l=1~16) で、

$$P_{1,N2,12} \leq M_{1,12}$$

となるので、停止時間は必要無い。

次工程である 90[kPa] まで減圧した場合、①式を用い、

$$P_{1,N2,13} = (100 + 120) \cdot 0.79 - 80 \cdot 0.79 \left\{ (30/80) - S_1 / \ln(2) \right\} - \left\{ (100 + 120) \cdot 0.79 - P_{1,N2,12} + 80 \cdot 0.79 \cdot (S_1 / \ln(2)) \right\} \cdot \exp \left\{ -(\ln(2) / S_1) \cdot (30/80) \right\}$$

となる。

l=1~16 の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,12}$ を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 13	P2, N2, 13	P3, N2, 13	P4, N2, 13	P5, N2, 13	P6, N2, 13	P7, N2, 13	P8, N2, 13
窒素分圧[kPa]	195.11	195.99	196.52	196.65	195.75	193.04	188.19	181.36
半飽和組織	P9, N2, 13	P10, N2, 13	P11, N2, 13	P12, N2, 13	P13, N2, 13	P14, N2, 13	P15, N2, 13	P16, N2, 13
窒素分圧[kPa]	172.40	163.03	154.01	144.55	135.07	125.92	117.55	110.11

となる。

このときの M 値は、

$$M_{1,13} = (94.33 + 90) / b_{1,N2} + a_{1,N2}$$

となる。このときの M 値は、a 値及び b 値を代入し、

M1, 13	M2, 13	M3, 13	M4, 13	M5, 13	M6, 13	M7, 13	M8, 13
457.34	392.16	349.62	318.01	300.76	281.71	268.53	258.01
M9, 13	M10, 13	M11, 13	M12, 13	M13, 13	M14, 13	M15, 13	M16, 13
250.98	243.59	238.57	234.71	228.97	226.30	222.74	220.24

となる。全ての半飽和組織 (l=1~16) で、

$$P_{1,N2,13} \leq M_{1,13}$$

となるので、停止時間は必要無い。

次工程である 60[kPa] まで減圧した場合、①式を用い、

$$P_{1,N2,14} = (100 + 90) \cdot 0.79 - 80 \cdot 0.79 \left\{ (30/80) - S_1 / \ln(2) \right\} - \left\{ (100 + 90) \cdot 0.79 - P_{1,N2,13} + 80 \cdot 0.79 \cdot \right.$$

$$(S_1/\ln(2)) \cdot \exp\{-(\ln(2)/S_1) \cdot (30/80)\}$$

となる。

l=1~16 の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,13}$ を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 14	P2, N2, 14	P3, N2, 14	P4, N2, 14	P5, N2, 14	P6, N2, 14	P7, N2, 14	P8, N2, 14
窒素分圧[kPa]	192.22	194.14	195.32	195.83	195.20	192.67	187.95	181.21
半飽和組織	P9, N2, 14	P10, N2, 14	P11, N2, 14	P12, N2, 14	P13, N2, 14	P14, N2, 14	P15, N2, 14	P16, N2, 14
窒素分圧[kPa]	172.32	162.99	153.99	144.54	135.07	125.93	117.56	110.12

となる。

このときの M 値は、

$$M_{1,14} = (100+60)/b_{1,N2} + a_{1,N2}$$

となる。このときの M 値は、a 値及び b 値を代入し、

M1, 14	M2, 14	M3, 14	M4, 14	M5, 14	M6, 14	M7, 14	M8, 14
403.56	346.11	308.08	279.67	263.84	246.14	234.02	224.34
M9, 14	M10, 14	M11, 14	M12, 14	M13, 14	M14, 14	M15, 14	M16, 14
217.99	211.06	206.38	202.81	197.31	194.86	191.49	189.16

となる。全ての半飽和組織 (l=1~16) で、

$$P_{1,N2,14} \leq M_{1,14}$$

となるので、停止時間は必要無い。

次工程である 30[kPa] まで減圧した場合、①式を用い、

$$P_{1,N2,15} = (100+60) \cdot 0.79 - 80 \cdot 0.79 \{ (30/80) - S_1/\ln(2) \} - \{ (100+60) \cdot 0.79 - P_{1,N2,14} + 80 \cdot 0.79 \cdot (S_1/\ln(2)) \} \cdot \exp\{-(\ln(2)/S_1) \cdot (30/80)\}$$

となる。

l=1~16 の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,14}$ を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 15	P2, N2, 15	P3, N2, 15	P4, N2, 15	P5, N2, 15	P6, N2, 15	P7, N2, 15	P8, N2, 15
窒素分圧[kPa]	188.28	191.59	193.66	194.70	194.43	192.14	187.60	180.99
半飽和組織	P9, N2, 15	P10, N2, 15	P11, N2, 15	P12, N2, 15	P13, N2, 15	P14, N2, 15	P15, N2, 15	P16, N2, 15
窒素分圧[kPa]	172.18	162.90	153.94	144.51	135.05	125.92	117.56	110.12

となる。

このときの M 値は、

$$M_{1,15} = (94.33+30)/b_{1,N2} + a_{1,N2}$$

となる。このときの M 値は、a 値及び b 値を代入し、

M1, 15	M2, 15	M3, 15	M4, 15	M5, 15	M6, 15	M7, 15	M8, 15
349.78	300.05	266.54	241.33	226.92	210.57	199.51	190.67
M9, 15	M10, 15	M11, 15	M12, 15	M13, 15	M14, 15	M15, 15	M16, 15
184.99	178.53	174.19	170.90	165.65	163.43	160.25	158.08

となる。全ての半飽和組織 (l=1~16) で、

$$P_{1,N2,15} \leq M_{1,15}$$

となるので、停止時間は必要無い。

次工程である 0[kPa]まで減圧した場合、①式を用いて計算すると、

$$P_{1,N2} \geq M_1$$

となるので、停止時間を設ける。②式を用い、30[kPa]の深度で72分の停止をした場合、

$$P_{1,N2,16} = P_{1,N2,15} + \{(100+30) \cdot 0.79 - P_{1,N2,15}\} \cdot \{1 - \exp(-72 \cdot \ln(2)/S_1)\}$$

となる。

l=1~16の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,15}$ の値を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 16	P2, N2, 16	P3, N2, 16	P4, N2, 16	P5, N2, 16	P6, N2, 16	P7, N2, 16	P8, N2, 16
窒素分圧[kPa]	102.70	102.87	104.38	108.90	117.15	127.00	136.57	143.65
半飽和組織	P9, N2, 16	P10, N2, 16	P11, N2, 16	P12, N2, 16	P13, N2, 16	P14, N2, 16	P15, N2, 16	P16, N2, 16
窒素分圧[kPa]	146.66	145.47	141.94	136.63	130.17	123.13	116.14	109.56

となる。

そして、次工程である 0[kPa]まで減圧した場合、①式を用い、

$$P_{1,N2,17} = (100+30) \cdot 0.79 - 80 \cdot 0.79 \{(30/80) - S_1/\ln(2)\} - \{(100+30) \cdot 0.79 - P_{1,N2,16} + 80 \cdot 0.79 \cdot (S_1/\ln(2))\} \cdot \exp\{-(\ln(2)/S_1) \cdot (30/80)\}$$

となる。

l=1~16の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,16}$ 代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 17	P2, N2, 17	P3, N2, 17	P4, N2, 17	P5, N2, 17	P6, N2, 17	P7, N2, 17	P8, N2, 17
窒素分圧[kPa]	102.09	102.48	104.10	108.65	116.90	126.76	136.35	143.47
半飽和組織	P9, N2, 17	P10, N2, 17	P11, N2, 17	P12, N2, 17	P13, N2, 17	P14, N2, 17	P15, N2, 17	P16, N2, 17
窒素分圧[kPa]	146.53	145.37	141.87	136.58	130.14	123.11	116.13	109.55

となる。

このときの M 値は、

$$M_{1,17} = (94.33+0)/b_{1,N2} + a_{1,N2}$$

となる。このときの M 値は、a 値及び b 値を代入し、

M1, 17	M2, 17	M3, 17	M4, 17	M5, 17	M6, 17	M7, 17	M8, 17
296.00	254.00	225.00	203.00	190.00	175.00	165.00	157.00
M9, 17	M10, 17	M11, 17	M12, 17	M13, 17	M14, 17	M15, 17	M16, 17
152.00	146.00	142.00	139.00	134.00	132.00	129.00	127.00

となる。全ての半飽和組織 (l=1~16) で、

$$P_{1,N2,17} \leq M_{1,17}$$

となり、2回目の作業が完了する。

2. 空気呼吸・酸素減圧

前述、2回目の作業で、30[kPa]の深度から酸素減圧を行った場合について計算する。酸素減圧は 25[min]酸素呼吸、5[min]空気呼吸を繰り返すため、25[min]間は窒素ガス濃度を 20[%]、5[min]間は 79[%]として計算する。

②式を用い、酸素呼吸を行いながら 30[kPa]の深度で **25**分の停止をすると、

$$P_{1,N2,18} = P_{1,N2,15} + \{(100+30) \cdot \underline{0.20} - P_{1,N2,15}\} \cdot \{1 - \exp(-\underline{25} \cdot \ln(2)/S_1)\}$$

となる。

l=1~16 の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,15}$ の値を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 18	P2, N2, 18	P3, N2, 18	P4, N2, 18	P5, N2, 18	P6, N2, 18	P7, N2, 18	P8, N2, 18
窒素分圧[kPa]	31.07	44.98	67.92	92.12	114.65	131.68	143.45	149.76
半飽和組織	P9, N2, 18	P10, N2, 18	P11, N2, 18	P12, N2, 18	P13, N2, 18	P14, N2, 18	P15, N2, 18	P16, N2, 18
窒素分圧[kPa]	150.69	147.58	142.62	136.22	129.03	121.58	114.43	107.86

となる。全ての半飽和組織 (l=1~16) で、

$$P_{1,N2,18} \leq M_{1,17}$$

を満たさないため、②式を用い、更に空気呼吸を行いながら 30[kPa] の深度で 5 分の停止を
すると、

$$P_{1,N2,19} = P_{1,N2,18} + \{(100+30) \cdot \underline{0.79} - P_{1,N2,18}\} \cdot \{1 - \exp(-\underline{5} \cdot \ln(2)/S_1)\}$$

となる。

l=1~16 の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,18}$ の値を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 19	P2, N2, 19	P3, N2, 19	P4, N2, 19	P5, N2, 19	P6, N2, 19	P7, N2, 19	P8, N2, 19
窒素分圧[kPa]	66.89	65.27	76.34	93.93	113.21	129.17	140.93	147.69
半飽和組織	P9, N2, 19	P10, N2, 19	P11, N2, 19	P12, N2, 19	P13, N2, 19	P14, N2, 19	P15, N2, 19	P16, N2, 19
窒素分圧[kPa]	149.19	146.53	141.89	135.74	128.73	121.41	114.35	107.83

となる。全ての半飽和組織 (l=1~16) で、

$$P_{1,N2,19} \leq M_{1,17}$$

を満たさないため、②式を用い、更に酸素呼吸を行いながら 30[kPa] の深度で 1 分の停止を
すると、

$$P_{1,N2,20} = P_{1,N2,19} + \{(100+30) \cdot \underline{0.20} - P_{1,N2,19}\} \cdot \{1 - \exp(-\underline{1} \cdot \ln(2)/S_1)\}$$

となる。

l=1~16 の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,19}$ の値を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 20	P2, N2, 20	P3, N2, 20	P4, N2, 20	P5, N2, 20	P6, N2, 20	P7, N2, 20	P8, N2, 20
窒素分圧[kPa]	61.60	62.01	73.62	91.43	111.00	127.32	139.47	146.60
半飽和組織	P9, N2, 20	P10, N2, 20	P11, N2, 20	P12, N2, 20	P13, N2, 20	P14, N2, 20	P15, N2, 20	P16, N2, 20
窒素分圧[kPa]	148.41	145.96	141.46	135.42	128.50	121.24	114.23	107.74

となる。

そして、次工程である酸素呼吸を行いながら 0[kPa] まで減圧した場合、①式を用い、

$$P_{1,N2,21} = (100+30) \cdot 0.20 - 80 \cdot 0.20 \{ (30/80) - S_1/\ln(2) \} - \{ (100+30) \cdot 0.20 - P_{1,N2,20} + 80 \cdot 0.20 \cdot (S_1/\ln(2)) \} \cdot \exp\{ -(\ln(2)/S_1) \cdot (30/80) \}$$

となる。

l=1~16 の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,20}$ 代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 21	P2, N2, 21	P3, N2, 21	P4, N2, 21	P5, N2, 21	P6, N2, 21	P7, N2, 21	P8, N2, 21
窒素分圧[kPa]	59.64	60.76	72.58	90.48	110.16	126.61	138.91	146.18
半飽和組織	P9, N2, 21	P10, N2, 21	P11, N2, 21	P12, N2, 21	P13, N2, 21	P14, N2, 21	P15, N2, 21	P16, N2, 21
窒素分圧[kPa]	148.11	145.74	141.30	135.30	128.41	121.17	114.18	107.71

となる。

このときの M 値は、前述と同様に

$$M_{1,17} = (94.33+0) / b_{1,N2} + a_{1,N2}$$

となる。このときの M 値は、a 値及び b 値を代入し、

M1, 17	M2, 17	M3, 17	M4, 17	M5, 17	M6, 17	M7, 17	M8, 17
296.00	254.00	225.00	203.00	190.00	175.00	165.00	157.00
M9, 17	M10, 17	M11, 17	M12, 17	M13, 17	M14, 17	M15, 17	M16, 17
152.00	146.00	142.00	139.00	134.00	132.00	129.00	127.00

となる。全ての半飽和組織 (l=1~16) で、

$$P_{1,N2,21} \leq M_{1,15}$$

となり、2 回目の作業が完了する。

3. 混合ガス呼吸・酸素減圧

混合ガス呼吸・酸素減圧により、400[kPa]の到達圧力で60[min]作業後、80[kPa/min]で減圧した場合の減圧計算（途中まで）を以下に示す。

「混合ガスとして呼吸する酸素分圧は、18以上160kPa以下」と定義されているため、酸素中毒を考慮した安全側に配慮し、最大酸素分圧を140[kPa]とすると、

$$\text{酸素濃度} = (140 / (400 + 100)) \times 100 = 28[\%]$$

残りをヘリウムガスで考えると、72[%]となる。

混合ガス分圧は、窒素ガス分圧とヘリウムガス分圧を各々計算し加算する。

$$\text{作業前の初期窒素分圧は、} P_{1,N2,0} = 74.5207 \text{ [kPa]}$$

(加圧(潜降)速度を考慮しない) 始めから到達圧力400[kPa]に滞在する計算を行うと、60[min]作業として、②式を用い、

$$P_{1,N2,1} = 74.5207 + \{ (100+400) \cdot 0 - 74.5207 \} \cdot \{ 1 - \exp(-60 \cdot \ln(2) / S_1) \}$$

となる。

l=1~16 の半飽和時間の値を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 1	P2, N2, 1	P3, N2, 1	P4, N2, 1	P5, N2, 1	P6, N2, 1	P7, N2, 1	P8, N2, 1
窒素分圧[kPa]	0.02	0.41	2.68	7.87	15.97	25.16	34.65	43.42
半飽和組織	P9, N2, 1	P10, N2, 1	P11, N2, 1	P12, N2, 1	P13, N2, 1	P14, N2, 1	P15, N2, 1	P16, N2, 1
窒素分圧[kPa]	50.88	56.05	59.66	62.62	65.02	66.98	68.55	69.80

となる。

作業前の初期ヘリウム分圧は、 $P_{1,He,0}=0$ [kPa]

同様に②式を用い、

$$P_{1,He,1}=0+\{(100+400) \cdot 0.72- 0\} \cdot \{1-\exp(-60 \cdot \ln(2)/S_1)\}$$

となる。

$l=1\sim 16$ の半飽和時間の値を代入すると、半飽和組織毎のヘリウム分圧は、

半飽和組織	P1, He, 1	P2, He, 1	P3, He, 1	P4, He, 1	P5, He, 1	P6, He, 1	P7, He, 1	P8, He, 1
ヘリウム分圧[kPa]	360.00	360.00	359.95	359.07	353.92	339.74	312.70	273.96
半飽和組織	P9, He, 1	P10, He, 1	P11, He, 1	P12, He, 1	P13, He, 1	P14, He, 1	P15, He, 1	P16, He, 1
ヘリウム分圧[kPa]	229.03	190.77	160.31	132.99	109.17	88.62	71.47	57.36

となる。

$P_{1,N2,1} + P_{1,He,1} = P_{1,mix,1}$ を計算し、 $l=1\sim 16$ の半飽和時間の値を代入すると、半飽和組織毎の混合ガス分圧は、

半飽和組織	P1, mix, 1	P2, mix, 1	P3, mix, 1	P4, mix, 1	P5, mix, 1	P6, mix, 1	P7, mix, 1	P8, mix, 1
混合ガス分圧[kPa]	360.02	360.41	362.63	366.94	369.89	364.90	347.35	317.38
半飽和組織	P9, mix, 1	P10, mix, 1	P11, mix, 1	P12, mix, 1	P13, mix, 1	P14, mix, 1	P15, mix, 1	P16, mix, 1
混合ガス分圧[kPa]	279.91	246.82	219.97	195.61	174.19	155.60	140.02	127.16

となる。

次工程で、減圧を開始するが、停止減圧を 30[kPa]毎にとると、390、360、330・・・0[kPa]まで計算する。

次工程である 390[kPa]まで減圧した場合、まず窒素分圧を①式を用い、

$$P_{1,N2,2}=(100+400) \cdot 0-80 \cdot 0 \cdot \{(30/80)-S_1/\ln(2)\}-\{(100+400) \cdot 0-P_{1,N2,1}+80 \cdot 0 \cdot (S_1/\ln(2))\} \cdot \exp\{-(\ln(2)/S_1) \cdot (30/80)\}$$

となる。

$l=1\sim 16$ の半飽和時間及び前工程 $P_{1,N2,1}$ を代入すると、半飽和組織毎の窒素分圧は、

半飽和組織	P1, N2, 2	P2, N2, 2	P3, N2, 2	P4, N2, 2	P5, N2, 2	P6, N2, 2	P7, N2, 2	P8, N2, 2
窒素分圧[kPa]	0.02	0.41	2.66	7.83	15.92	25.10	34.59	43.37
半飽和組織	P9, N2, 2	P10, N2, 2	P11, N2, 2	P12, N2, 2	P13, N2, 2	P14, N2, 2	P15, N2, 2	P16, N2, 2
窒素分圧[kPa]	50.84	56.02	59.63	62.60	65.00	66.97	68.54	69.79

となる。

次にヘリウム分圧を①式を用い、

$$P_{1,He,2} = (100+400) \cdot 0.72 - 80 \cdot 0.72 \cdot \left\{ (30/80) - S_1/\ln(2) \right\} - \left\{ (100+400) \cdot 0.72 - P_{1,He,1} + 80 \cdot 0.72 \cdot (S_1/\ln(2)) \right\} \cdot \exp \left\{ -(\ln(2)/S_1) \cdot (30/80) \right\}$$

となる。

l=1~16の半飽和時間及び前工程 $P_{1,He,1}$ を代入すると、半飽和組織毎のヘリウム分圧は、

半飽和組織	P1, He, 2	P2, He, 2	P3, He, 2	P4, He, 2	P5, He, 2	P6, He, 2	P7, He, 2	P8, He, 2
ヘリウム分圧[kPa]	359.84	359.90	359.89	359.04	353.94	339.84	312.88	274.21
半飽和組織	P9, He, 2	P10, He, 2	P11, He, 2	P12, He, 2	P13, He, 2	P14, He, 2	P15, He, 2	P16, He, 2
ヘリウム分圧[kPa]	229.30	191.03	160.55	133.20	109.36	88.78	71.60	57.47

となる

$P_{1,N2,2} + P_{1,He,2} = P_{1,mix,2}$ を計算し、l=1~16の半飽和時間の値を代入すると、半飽和組織毎の混合ガス分圧は、

半飽和組織	P1, mix, 2	P2, mix, 2	P3, mix, 2	P4, mix, 2	P5, mix, 2	P6, mix, 2	P7, mix, 2	P8, mix, 2
混合ガス分圧[kPa]	359.86	360.31	362.55	366.87	369.86	364.94	347.47	317.58
半飽和組織	P9, mix, 2	P10, mix, 2	P11, mix, 2	P12, mix, 2	P13, mix, 2	P14, mix, 2	P15, mix, 2	P16, mix, 2
混合ガス分圧[kPa]	280.14	247.05	220.18	195.80	174.36	155.75	140.14	127.26

となる。

このときのM値は、まずa値とb値の合成値を求め、

$$A_{1,2} = (a_{1,N2} \cdot P_{1,N2,2} + a_{1,He} \cdot P_{1,He,2}) / (P_{1,N2,2} + P_{1,He,2})$$

$$B_{1,2} = (b_{1,N2} \cdot P_{1,N2,2} + b_{1,He} \cdot P_{1,He,2}) / (P_{1,N2,2} + P_{1,He,2})$$

$$M_{1,2} = (94.33 + 390) / B_{1,2} + A_{1,2}$$

となる。このときの $M_{1,2}$ 値は、

M1, 2	M2, 2	M3, 2	M4, 2	M5, 2	M6, 2	M7, 2	M8, 2
1189.60	990.45	868.70	781.11	735.31	693.82	659.82	631.96
M9, 2	M10, 2	M11, 2	M12, 2	M13, 2	M14, 2	M15, 2	M16, 2
612.28	597.51	587.33	579.52	572.32	566.43	559.46	552.86

となる。全ての半飽和組織(l=1~16)で、

$$P_{1,mix,2} \leq M_{1,2}$$

となるので、停止時間は必要無い。

以上の行程を繰返し、0[kPa]まで実施する。

混合ガス呼吸を空気に変えた場合は、ガス濃度を変更し、合成計算を継続する。

酸素減圧を実施する場合は、2に準じて計算を行い、合成計算を継続する。

第4 別添資料

1 空気呼吸・空気減圧表

[α : 1.0、加圧（潜降）は考慮せず、減圧速度は0.08MPa/minとした]

2 空気呼吸・空気減圧表（奨励）

[α : 1.1(0.21~0.06MPa)、1.0(それ以外)、加圧（潜降）は考慮せず、減圧は0.08MPa/minとした]

3 空気呼吸・酸素減圧表（奨励）

[α : 1.1(0.21~0.15MPa、0.06MPa)、1.3(0.12~0.09MPa)、1.0(それ以外)、加圧（潜降）は考慮せず、減圧は0.08MPa/minとした]

[酸素減圧は停止圧0.12MPa以下とした]

4 混合ガス・酸素減圧表（奨励）

[α : 1.05(0.21~0.18MPa、0.06MPa)、1.1(0.15MPa)、1.25(0.12MPa)、1.3(0.09MPa)、1.0(それ以外)、加圧（潜降）は考慮せず、減圧は0.08MPa/minとした]

[混合ガスはヘリウムと酸素の2種とし、0.05MPa毎にガス比率を変更した]

[混合ガス呼吸は気圧0.3MPa以上とし、酸素減圧は停止圧0.12MPa以下とした]

5 ブラックプール表（参考）

6 別表1（現行高圧則）（参考）

[加圧・減圧は約0.08MPa/min以下]

7 別表2（現行高圧則）（参考）

[加圧は規定なし、緊急浮上後の再圧時は0.08MPa/min以下、減圧は0.1MPa/min]