

●原 著

HBO装置内環境気の二酸化炭素分圧及び酸素濃度について — 現行「高気圧酸素治療の安全基準」の検証と考察 —

森 幸夫* 中島正勝*

日本高気圧環境医学会による「高気圧酸素治療の安全基準」では、HBO装置内環境気の二酸化炭素分圧許容値を0.01kgf/cm² (0.98kPa)、多人数用装置の酸素濃度上限値を23%に規定している。装置の使用時には、この基準値に抑制するため、環境気の置換すなわち換気が行われている。今回、この基準値に対する検証と考察を行い、併せて換気量低減の可能性を検討する。

キーワード：高気圧酸素治療 (HBO) , 安全基準, 装置内環境気, 二酸化炭素分圧, 酸素濃度

Partial Pressure of Carbon Dioxide and Oxygen Concentration in HBO Chamber Atmosphere.

Yukio Mori*, Masakatu Nakasima*

* Medical Division, AIR WATER INC.

Summary

The Japanese Society for Hyperbaric Medicine (JSHM)'s "Safety Guidelines for Hyperbaric Oxygenation(HBO)" specifies the allowable level of 0.01 kgf/cm² (0.98 kPa) for partial pressure of carbon dioxide in chamber atmosphere, and an upper limit of 23 percent on volumetric concentration of oxygen for multiplace chamber. When chamber are in use, where environmental gases are substituted with new ones or the chamber is ventilated in order to control gas concentration levels. This report outlines and verifies these standard values and reviews possible reductions in the volume of gasses to be ventilated.

The author has reviewed documents on the influence of low levels carbon dioxide on the human body and compared this with the current legally allowable limits of this gas. Current safety guidelines allow a treatment pressure of 2.5 kgf/cm² and volumetric concentration of oxygen on 23 percent for HBO of applicable to multiplace chamber. However, due to its highly combustible properties, an upper limit for its concentration is being reviewed with an aim to setting a new ceiling on concentration levels. A review of possible ventilation

reduction requirements has been conducted, based on current concentration limits, while ignoring internal volume effects of the chamber and assuming instantaneous uniform diffusion.

Keywords:

Hyperbaric Oxygenation(HBO)
Guidelines for HBO Safety
Chamber Atmosphere
Partial Pressure of Carbon Dioxide
Volumetric Concentration of Oxygen

目 的

高気圧酸素治療(以下、HBOと略記)では、通常、入室者の呼気を装置内に排出するため、呼気中の二酸化炭素が装置内に蓄積する。また、第2種装置では、一般にフリーフロー式の酸素マスクが用いられ、その余剰酸素(呼気中及びマスク溢流酸素)が装置内に放出され同様に蓄積する。従って、二酸化炭素の抑制は、第1種装置と第2種装置に共通する問題であるが、酸素濃度の抑制は第2種装置固有の問題である。

現行の「高気圧酸素治療の安全基準(以下、現行安全基準と略記)」では、表1に示すとおり、装置内環境気(以下、環境気と略記)中の二酸化炭素分圧上限値を0.01kgf/cm² (0.98kPa)、第2種装置の酸素濃度上限値を23%に規定している。治療

* エア・ウォーター(株)医療事業部

表 1 現行基準値と上昇要因・抑制手段

項目	上限基準値	上昇要因	抑制手段
二酸化炭素分圧 〔第24条 1.2〕	$\leq 0.01 \text{ kgf/cm}^2$	呼気中の 二酸化炭素蓄積	圧縮空気 又は 合成空気で置換
酸素濃度 〔第84条 1.8〕	$\leq 23 \%$	酸素吸入の 余剰酸素蓄積	

表 2 法令・基準による二酸化炭素基準値

区分	名称	上限値	備考
一般環境	建築基準法、ビル管理法	1,000 ppm	中央管理空調の供給空気
労働環境	事務所衛生基準規則 (労働安全衛生法)	1,000 ppm	中央管理空調の吹出口
		1,500 ppm	空調設備なし
	日本産業衛生学会基準	5,000 ppm	
高気圧環境	高気圧作業安全衛生規則	0.5 kPa	5,000 ppm (at 1 ATA)
	UHMSガイドライン	海面で0.5% 相当の分圧	0.5 kPa
	高気圧酸素治療の 安全基準	0.01 kgf/cm ² (0.98 kPa)	9,678 ppm (at 1 ATA)

中には、この基準値に抑制するため、圧縮空気又は合成空気による環境気の置換いわゆる換気が行われている。

今回、この基準値に対する検証と考察を行い、改正安全基準の参考に供すると共に、換気量低減に伴う省エネルギーとコストダウンの面より、時代の要求に沿った基準値を模索する。

方 法

二酸化炭素濃度の人体影響に関する文献の検索を行うと共に、法令等による二酸化炭素の上限値と現行安全基準値の比較検討を行った。第2種装置の酸素濃度については、NFPA (米国防火協会)の資料を引用し、現行安全基準がHBOに許容する環境の燃焼速度を限度に、その上限値を検討した。また、検討結果に基づく上限値に抑制するために必要な換気量の低減について「瞬時一様拡散の仮定」により検討した。

結 果

1. 二酸化炭素分圧について

低濃度二酸化炭素の人体影響には、Eliseeva説

(大気圧下0.1%で呼吸器、循環器、大脳に影響が見られる)があり、日本建築学会により空気環境と人体に関し引用されている¹⁾。

表2は、法令・基準等による二酸化炭素濃度の上限値を示す。一般環境では「建築基準法施行令」及び「建築物における衛生的環境の確保に関する法律施行令(通称、ビル管理法)」により、中央管理方式空調設備の供給空気を1,000ppmに規定している。労働環境では「事務所衛生基準規則」により、中央管理方式空調設備の吹出口で1,000ppm、空調設備なしで1,500ppmに規定している。また、日本産業衛生学会では5,000ppmすなわち0.5%を許容濃度としている。

一方、高気圧環境では「高気圧作業安全衛生規則」で0.5kPaすなわち標準大気圧下で0.5%、UHMS (米国海中及び高気圧医学協会)のガイドラインで「海面で0.5%に相当する分圧」に規定されている²⁾。他方、これらと比較して現行安全基準は0.01kgf/cm²と高値になっている。

2. 酸素濃度と酸素分圧について

第2種装置における酸素濃度上限の規制目的は、火災リスクの低減である。HBOの基本要素で

表 3 現行基準等の酸素濃度基準値

基準名	条項	基準値
高気圧酸素治療の 安全基準	第84条 1.8)	酸素濃度 $\leq 23\%$
	同上 3)	(最高治療圧力 $\leq 2.5\text{kgf/cm}^2$)
NFPA 99 Health Care Facilities Chapter 19	19-2.8.5.2	酸素濃度 $\leq 23.5\%$

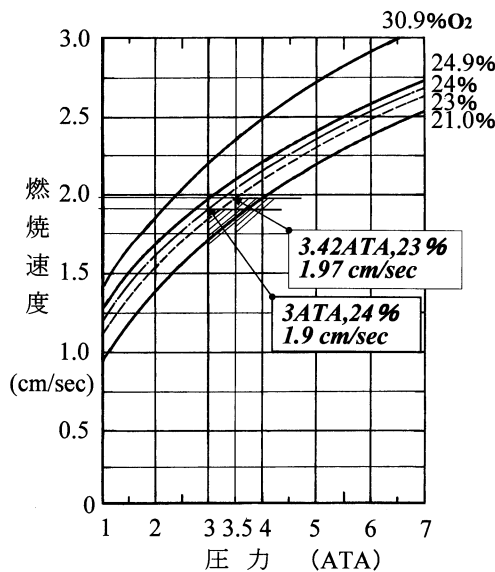


図 1 高気圧酸素環境下の燃焼速度

ある酸素は、支燃性ガスであるため、その濃度と環境圧力及び希釈ガスの種類が物質の燃焼速度に関与する。従って、HBOには火災リスクが随伴し、そのリスクを受容可能なレベルに限定する必要がある。

第2種装置では、介護・処置のため医療従事者すなわち健常者が入室する場合があります、その際に酸素分圧が上昇した環境気を吸入する。昨年11月開催の第35回日本高気圧環境医学会総会では、安全対策委員会による「高気圧酸素治療の安全基準」改定作業の中間報告が行われ、第2種装置の酸素濃度上限値を現行の23%から24%へ改定する案が示された。この報告に対し「入室する医療従事者の健康保持に逆行する」との意見が寄せられた。人体に対する呼吸ガスの影響度には、吸入気の組

成のほかその分圧が関与する。従って、この問題提起すなわち医療従事者の健康保持を配慮するには、酸素濃度上限値のほか環境圧力の上限值又は酸素分圧による上限値の設定が必要となる。

表3は、現行安全基準等による環境気の酸素濃度基準値を示す。現行安全基準は、平成7年の改正時に、第2種装置の酸素濃度を23%、HBOの最高治療圧力を 2.5kgf/cm^2 (0.245MPa)とし、それぞれを超えないよう新たに規定された。一方、NFPA 99 Chapter 19 Hyperbaric Facilitiesの19-2.8.5.2では、23.5Vol%を超えた場合に、視覚・聴覚的警報を発するよう規定している³⁾。

NFPA 99 Appendix A-2.2では、高圧・過剰酸素雰囲気中の火災危険性を、45°方向に置いた「ろ紙」の燃焼速度で評価するとし、同項の図A-2.2に環境圧

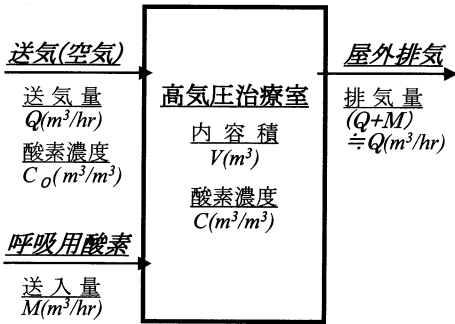


図2 定常状態の換気モデル

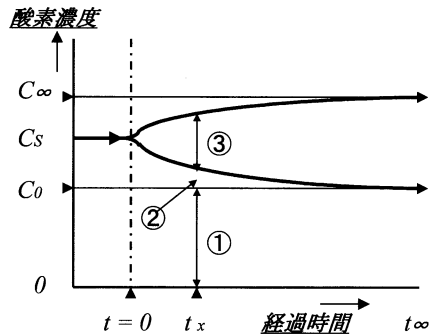


図3 時間・濃度分布

力と酸素濃度をパラメータとした燃焼速度が示されている⁴⁾。図1は、筆者が同図を部分的に拡大し簡素化すると共に、酸素濃度23%及び24%の補助線を追記したものである。この図から燃焼速度を読み取ると、現行安全基準が許容する治療環境(最高治療圧力2.5kgf/cm²=3.42ATA, 酸素濃度上限23%)において1.97cm/secである。一方、NFPAの基準値(23.5%)を現行安全基準値の有効桁数に丸め24%とした場合は、3ATA(0.2MPa)で1.9cm/secとなり、前述の現行安全基準が許容する環境における値を下回り、すなわち火災危険性が低いことになる。

過剰酸素を吸入する健常者の健康保持に関しては、第2種装置によるHBO環境(2~3ATA, 23% O₂)レベルでの具体的な報告が見当たらない。他方、前述の現行安全基準が許容する治療環境の酸素分圧は

$$PO_2 = \frac{(23\%/100\%) \times (2.5 + 1.0332) \text{ kgf/cm}^2}{\text{酸素の体積割合}} \div \frac{\text{環境気の絶対圧力}}{\text{環境気の絶対圧力}}$$

$$= 0.8127 \text{ kgf/cm}^2 \approx 80 \text{ kPa}$$

であり、この値が現行安全基準による酸素分圧の許容値であると換言できる。

3. 換気について

空気汚染質発生量の測定法には、直接測定法の他に一樣拡散法がある。一樣拡散法では、瞬時一樣拡散の仮定(室内に一定速度で汚染質が発生する場合、汚染質が発生した瞬間に発生した汚染質は室内全域に一樣に広がり、室内空気と完全に混ざり合うこと)の下に、汚染質が吸着、沈積や化学変化を起こさず、さらに流出する空気が温度

変化しないことが成り立つものとして、定常状態の室内濃度と外気濃度から空気汚染質の発生量を算出している⁹⁾。

そこで、汚染質を酸素に置き換え、室内で発生せず外部より送入され、かつ計算を簡略化するため装置内で酸素消費がないものとし、この手法を準用して所要換気量の概算式を誘導した。図2に示す如く、内容積V(m³)の装置内に、呼吸用酸素をM(m³/hr)で送入しているとき、装置内及び送気中の酸素濃度C, C₀(m³/m³)、換気量をQ(m³/hr)として、酸素の流出入バランスすなわち連続の定理より

$$C_0 \cdot Q \cdot dt - C \cdot (Q+M) \cdot dt + M \cdot dt = V \cdot dC \dots\dots\dots (1)$$

となり、さらに換気量Qに対し酸素送入量Mが十分に小さく(Q+M) ≒ Qとすれば

$$C_0 \cdot Q \cdot dt - C \cdot Q \cdot dt + M \cdot dt = V \cdot dC \dots\dots\dots (1)'$$

となる。(1)'式より微分方程式

$$(V/Q) \cdot (dC/dt) = C_0 - C + M/Q \dots\dots\dots (2)$$

が得られる。換気量、酸素送入量および送気温度は一定で、t=0のときC=C₀として、これを解くと

$$C = \frac{C_0}{\text{①送気}} + \frac{(C_s - C_0)e^{-(Q/V)t}}{\text{②初期濃度減衰}} + \frac{(M/Q) \cdot (1 - e^{-(Q/V)t})}{\text{③送入による増加}}$$

$$\dots\dots\dots (3)$$

を得る。図3は(3)式による時間・濃度分布を図示したものである。

十分に時間が経過し換気量、酸素送入量、装置内濃度及び送気中濃度がバランスし、いわゆる定

表 4 濃度上限値と換気量の低減比

酸素濃度	圧縮空気(外気)	合成空気(21.5%O ₂)
A: 23%	$100M / (23 - 21)$ =50M	$100M / (23 - 21.5)$ =100M/1.5
B: 24%	$100M / (24 - 21)$ =100M/3	$100M / (24 - 21.5)$ =40M
対比 (B/A)	2/3	3/5

常状態に達すると

$$C_{\infty} = C_0 + M/Q \text{ (m}^3/\text{m}^3) \dots\dots\dots(4)$$

となり、濃度 C_{∞} 及び C_0 をVol%とすれば

$$C_{\infty} = C_0 + (M/Q) \times 100 \text{ (Vol}\%) \dots\dots(5)$$

となり、定常状態における所要換気量(送気量ベース)は

$$Q = 100 \cdot M / (C_{\infty} - C_0) \text{ (m}^3/\text{hr}) \dots\dots\dots(6)$$

となる。なお、(1)~(4)式は引用文献⁹⁾によるが、(1)、(5)及び(6)式は、筆者が前述の仮定の下に誘導した概算式である。

表4は、(6)式の C_{∞} を酸素濃度上限値(23%)と仮定値24%に置き換え、圧縮空気(外気)置換及び合成空気(21.5%O₂)置換による所要換気量低減比の算出結果を示す。

考 察

1. 二酸化炭素分圧について

現行安全基準の二酸化炭素分圧上限値0.01kgf/cm²(0.98MPa)は、1969年の同基準制定時に、適用される法令などとされた「高気圧障害防止規則」(1962年施行)に準拠したものである。この規則は、その後1977年に「高気圧作業安全衛生規則」と改称し、同時に二酸化炭素分圧上限値が0.005kgf/cm²に改正された。なお、その改正理由は「0.005kgf/cm²は、大気圧下の濃度に換算すると0.5%に相当し、日本産業衛生学会の許容勧告濃度等に配慮したもの」とされている⁹⁾。また、この基準値は、1999年のS I移行により0.5kPaに改正されている。一方、現行安全基準の上限値は制定当時のままで、他の法令やUHMS基準値と比較して略2倍以上であり、0.5kPa以下へ改正の必然性を否定できない。

2. 酸素濃度と酸素分圧について

NFPAの資料によれば、酸素濃度を24%とした場合の燃焼速度すなわち火災危険性は、環境圧力が0.2MPa以下で、前述の現行安全基準が許容する環境における値を下回る。このことは、環境圧力

を0.2MPa以下に限定すれば、現行安全基準の火災安全性を維持しつつ、酸素濃度上限値を24%に設定できることになる。一方、酸素濃度を24%とした場合に、現行安全基準が許容する環境気の酸素分圧が80kPaに達する時の環境圧力は、0.233MPa(約3.3ATA)であり、前述の0.2MPaを若干上回るが受容可能な範囲と思われる。

第2種装置において、繰り返し入室する医療従事者の健康保持を配慮するには、環境気の酸素分圧上限値の設定を要することを既に述べたが、現行安全基準による永年のHBO施行実績をふまえ、その許容値と換言する80kPaの遵守が妥当と思われる。なお、米海軍再圧治療表6A等による治療では、環境気の酸素分圧が120kPa以上に達するが、高分圧窒素の生理的影響等と共に通常のHBOと区別し、別途考慮する必要がある。

火災危険性に関与する環境条件には、環境気の酸素濃度と圧力のほか、温度及び相対湿度がある。特に、相対湿度の低下は、吸湿性材料の燃焼速度を増加させ、空気が乾燥する冬季に火災が多いのはこのためである。また、木綿等の吸湿性材料は、相対湿度の低下に伴い電気抵抗が増大し、静電気の帯電性が上昇することと併せ留意を要する点である⁷⁾。

3. 換気量について

環境気酸素濃度の経時的変化は、酸素送入力と内容積の相関による抑制すなわち内容積効果があり、それに重畳した換気量との相関により変化する。また、定圧保持中に一定量の換気を行う場合には、時間の経過により一定濃度で平衡し定常状態となる。この定常状態時の酸素濃度は、酸素送入力と換気量の相関に依存した値となる。

前述のとおり、現行安全基準の酸素濃度上限値23%を24%に変更した場合には、その上限値に抑制するための換気量を圧縮空気による置換で約2/3、合成空気(21.5%O₂)による置換で約3/5に低減できる。この換気量低減は、空気供給源設備の

小型化による初期費用の減額、空気使用量の節減による省エネルギーと維持費用の減額に効果する。なお、所要換気量は、概算式により算出したものであり、その実用化には実測による確認が必要であると共に、換気量低減に伴ない環境気の濃度差が生じる場合があるので注意を要する。

ま と め

現行安全基準によるHBO装置内環境気の基準値に関し、1) 二酸化炭素分圧及び酸素濃度上限値の検証と考察を行った。2) 二酸化炭素分圧上限値の 0.01kgf/cm^2 は、 0.5kPa に改正する必然性を否定できない。3) NFPAの資料と現行安全基準等に基づき、第2種装置の酸素濃度24%、かつ、酸素分圧 80kPa を限度とする考え方を示した。4) 酸素濃度上限値の24%設定は、換気量を $3/5$ ないし $2/3$ に低減し、省エネルギーとコストダウンに効果する。なお、実用上は、環境気の濃度差発生等を考慮すると共に、実測結果に基づいた換気量設定が必要である。

[引 用 文 献]

- 1) 日本建築学会編：建築設計資料集成，東京，日本建築学会，1978，140
- 2) Safety Committee of Undersea and Hyperbaric Medical Society：GUIDELINE FOR CLINICAL MULTIPLACE HYPERBARIC CHAMBER，19，1994
- 3) National Fire Protection Association：NFPA 99 Health Care Facilities 1999 Edition，131，1999
- 4) National Fire Protection Association：NFPA 99 Health Care Facilities 1999 Edition，140，1999
- 5) 日本建築学会編：建築分野での実用的室内空気質測定法，東京，日本建築学会，1996，10
- 6) 労働省産業安全衛生部編：高気圧作業安全衛生規則の解説，東京，建設業労働災害防止協会，1977，41-42
- 7) 静電気学会編：静電気ハンドブック，東京，静電気学会，1981，819