

【原著】

大気圧下の高濃度酸素曝露による「使いすてかいろ」の温度上昇について

灘吉進也^{1,3)}, 右田平八^{2,3)}社会医療法人共愛会 戸畑共立病院 臨床工学科¹⁾九州医療科学大学 生命医科学部²⁾日本高気圧潜水医学会 安全対策委員会³⁾

【要約】

高気圧酸素治療 (hyperbaric oxygen therapy : HBO) は、治療圧力を 2.0 絶対気圧以上の下で 100% 酸素を吸入する治療である。これは低酸素症改善をはじめとした病態に対して効果が認められている。しかし一方で、HBO 装置内へ火種が持込まれて爆発的な火災事故を 5 回経験した。そして、被災した全ての患者の命を失った。火災爆発の原因は、「火のついた練炭かいろ」と「火のついた白金かいろ」、および酸化鉄 (FeO₂) の化学反応熱応用の「使いすてかいろ」である。これらが HBO 装置内へ持込まれて HBO 開始後に火災爆発事故が発生した。火の着いたカイロの最初の事故から 57 年、「使いすてかいろ」の事故から 28 年経過し、その後大きな事故報告はない。しかし、ニアミスの事例は単発で起きていると推測される。これは、長い無事故の経過から医療スタッフに「使いすてかいろ」の危険認識が薄れ、治療前のボディチェックが疎かとなる危険を孕んでいる。また、実際に「使いすてかいろ」に高濃度酸素を曝露した場合のデータが示されていないことも危険が連想されないことに起因される。

今回、九州医療科学大学 (臨床工学) と共同し大気圧下で「使いすてかいろ」に高濃度酸素を曝露する実験を行った。

結果は「使いすてかいろ」に酸素曝露すると数分で 100℃ 以上の危険な高温になり、HBO 装置内では更に燃焼スピードが早まり燃焼温度が高まると推測された。

キーワード

高気圧酸素治療, 保温カイロ, 火災爆発事故, 空気燃焼, 酸素燃焼

【Original】

Temperature rise of disposable body warmers due to exposure to high oxygen concentrations under atmospheric pressure

Shinya Nadayoshi^{1,3)}, Heihachi Migita^{2,3)}

1) Department of Clinical Engineering, Kyoaikai Tobata Kyoritsu Hospital

2) Kyusyu University of Medical Science, Graduate School of Medical Life Science, Department of Medical Life Sciences

3) Japan Undersea and Hyperbaric Medical Society, Safety Committee

【abstract】

Hyperbaric oxygen therapy (HBO) is a treatment in which 100% oxygen is inhaled under a treatment pressure of 2.0ATA more. This has been recognized to be effective for improving hypoxia and infections. However, a fire source was introduced into the HBO chamber, causing

five explosions and killing all the patients.

The cause of the fire and explosion was a burning charcoal body warmer not needed for treatment, a burning platinum body warmer, and a disposable body warmer made from the heat of a chemical reaction of iron oxide (FeO_2) that had been brought into the HBO chamber and occurred after the HBO had started.

57 years have passed since the first fire body warmer accident and 27 years since the “disposable body warmer” accident, and no major accidents have been reported since then. However, it is assumed that near-misses have occurred on an isolated basis. This is because the long history of no accidents has led to a lack of awareness of the dangers of the “disposable body warmer” and there is a risk that body checks before treatment may be neglected in the HBO room. Also, the fact that no data has been shown on the actual exposure of the “disposable body warmer” to high concentrations of oxygen is also a factor in the lack of awareness of the danger.

This experiment was conducted in collaboration with Kyushu University of Medical Science (Clinical Engineering) in which disposable body warmers were exposed to high concentrations of oxygen under atmospheric pressure and the temperature rise was measured. The results showed that when exposed to oxygen, disposable body warmers reached dangerously high temperatures of over 100°C within minutes, and it was estimated that the burning rate and temperature would increase further inside the HBO chambers.

Keywords

hyperbaric oxygen therapy, disposable hand warmers, fire explosion accident, air combustion, oxygen combustion

【はじめに】

高気圧酸素治療 (hyperbaric oxygen therapy : HBO) は、治療圧力を 2.0 絶対気圧以上、95% 以上の高濃度酸素の環境下で行い、著しく高い環境圧 (1,520mmHg 以上) でほぼ 100% 酸素を吸入することで低酸素症改善をはじめとした病態に対して効果が認められている¹⁾。しかし一方で、HBO

装置内へ火種が持込まれて爆発的な火災事故を 5 回経験し、装置内で被災した全ての患者の命を失った²⁾ (表 1)。火災爆発の原因は、火種そのものの「火のついた練炭かいろ」と「火のついた白金かいろ」、および酸化鉄 (FeO_2) の化学反応熱応用の「使いすてかいろ」であり、これらが HBO 装置内へ持込まれて HBO 開始後に発生した。本

表 1. 日本における HBO 装置の事故事例

発生年<ago>	場所	装置別	原因	転帰
1967(S42)年<57>	岐阜市	第1種 (酸素加圧)	桐灰カイロ(火)	患者1名死亡
1969(S44)年<55>	東京都	第2種 (酸素加圧)	電気ショート(火花)	患者2名 医師2名死亡
1989(H01)年<35>	福島市	第1種 (酸素加圧)	白金カイロ(火)	患者1名死亡
1992(H04)年<32>	茨城県	第1種 (酸素加圧)	白金カイロ(火)	患者1名死亡
1996(H08)年<28>	山梨県	第1種 (酸素加圧)	使い捨てカイロ(火)	患者1名, 他2名死亡

1967 年から 1996 年の 57 年間に 5 回の火災事故が発生し、火災の大半が保温カイロが原因であり装置内で負傷した患者と医師の全員が死亡した。

稿では、各種の保温カイロの名称を日本産業規格 (JIS)³⁾ に定義された「使いすてかいろ」と記載する。火のついたカイロの最初の事故から57年、「使いすてかいろ」の事故から27年経過し、その後大きな事故報告はない。しかし、ニアミスの事例⁴⁾ は単発で起きていると推測される。これは、長い無事故の経過から医療スタッフに「使いすてかいろ」の危険認識が薄れ、HBO環境では治療前のボディチェックが疎かとなる危険を孕んでいる。また、実際に「使いすてかいろ」に高濃度酸素を曝露した場合のデータが示されていないことも危険が連想されないことに起因される。

今回、九州医療科学大学（臨床工学）と共同し1気圧下で「使いすてかいろ」に高濃度酸素を曝露するFeO₂実験を行ったので温度上昇の計測結果を報告する。尚、本研究において著者らに申告すべきCOIはない。

【対象および方法】

「使いすてかいろ」は市販されている貼らない

タイプ；24時間持続と貼るタイプ；14時間持続）4種を用いた。温度測定はK型熱電対式簡易デジタル温度計（DIGITAL THERMOMETER TM-902C）を用いた。密閉容器は赤外線透過可能な14オンスの紙コップ（405mL）に開封した「使いすてかいろ」内袋1個をK型温度センサー部を包むように丸めて紙コップ内に置いた。高濃度酸素の曝露は、酸素流量計（セフティフローMSピン仕様：小池メディカル社製）を用いて純酸素を10L/minで紙コップ内へ流入した（理論値：95% O₂以上）。温度変化は1分間隔で経時的に測定した（図1）。24時間後の冷めた「使いすてかいろ」にも同様に酸素曝露を行った。

【結果1】

使いすてかいろは本邦で一般的に使用されているI社製、K社製、E社製、KW社製を用いたが、酸素曝露開始時の平均温度は25.2℃であった（n=4）。最高温度は個体1：111.4℃、個体2：107.6℃、個体3：106.3℃、個体4：106.3℃で平均

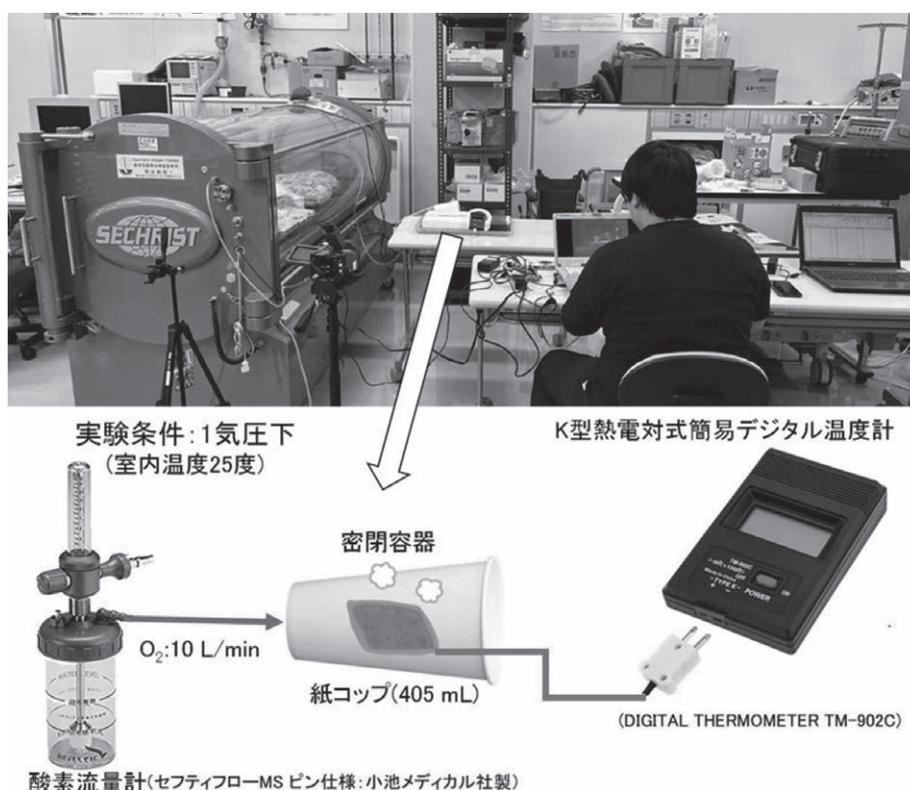


図1：実験の様子と酸素曝露のフロー図を示す。

表2. 「使いすてかいろ」への酸素曝露後の温度上昇の結果

経過時間(min)	0	10	15	60	120	180	240	280
平均温度(°C)	25.2	92.7	98.4	100.5	102.6	88.3	40	33.4

酸素曝露開始から急激に温度が上昇し、15分後にはほぼ100°Cに達し、3時間ほど高温を維持した。

Temperature of disposable body warmers due to exposure to oxygen

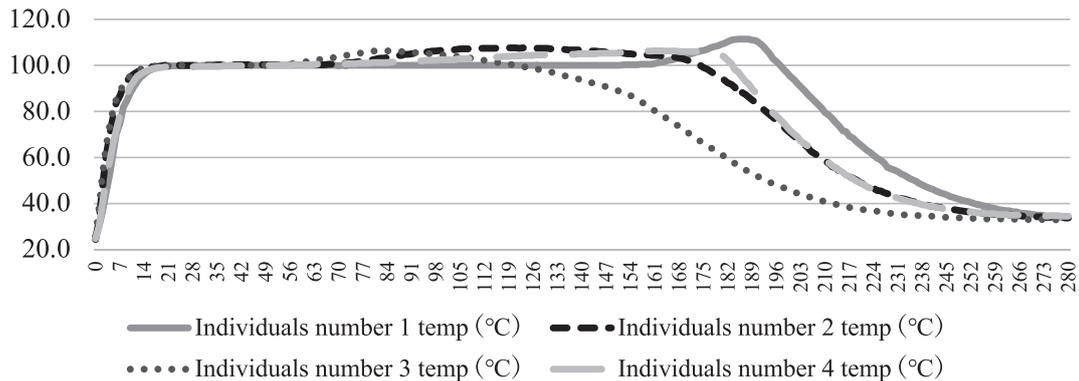


図2: 「使いすてかいろ」の酸素曝露による温度上昇と継続時間

107.9°Cであった。平均温度と経過時間を表2に示し、経過グラフを図2に示す。

【結果2】

開封して24時間後の酸化鉄反応済みの冷めた「使いすてかいろ」(n=3)に対して同様に酸素曝露すると、冷めたはずの「使いすてかいろ」が再び熱を帯びて最高温度57.7°C、平均温度48.5°Cとなり、再燃傾向にあった。平均温度と経過時間を表3に示し、経過グラフを図3に示す。

【考察】

1996年2月21日に発生した事故の「山梨厚生病院高気圧酸素治療装置爆発事故原因調査報告書⁵⁾」によれば、事故に関連した「使いすてかいろ」は4種で大気圧下での燃焼温度と最高温度は60°Cから68°Cで平均温度50°Cから58°Cの製品であった。この温度で物を燃焼させるエネルギーは存在しないことから、事故当時の条件を再現させて行ったところ、「使いすてかいろ」は治療圧の2.7ATAで酸素曝露すると27分後に発火し、発火30秒後

に220°C、5分後には420°C以上の急激な温度上昇を来すことが確認されている。また、この環境下でプラスチック類が発火すると5秒以内に燃焼ガス化して最大圧力(13ATA)に達することも証明されている。HBO装置内の火災は爆発事故となる所以である。しかし、一般的な治療圧が2.0~2.4ATA程度であることから再現には各圧力による温度上昇のデータが今となっては必要であった。本実験に際しては、安全性を考慮して宮崎県延岡市内のA化成グループの衝撃実験が行える施設に打診したが、2022年3月に起きたT工場の大爆発事故で犠牲者を伴っていることから部外者への使用が許可されなかった。加圧下の実験設備が確保できなくなったので、大気圧下でパイロット試験的に行った。こちらは大気圧(1.0ATA)下で「使いすてかいろ」に高濃度酸素を曝露した場合のデータはないので、若林らの「鉄の酸化反応を探る」からFeO₂材料を不織布から取り出して1.0ATA下21% O₂に曝すと最高温度は20分ほどで70°C程度まで上昇し、60分ほど持続して加熱が終了した報告⁶⁾を参考に実施した。ところ

表 3. 酸化鉄反応すみ「使いすてかいろ」への酸素曝露の平均温度と経過時間

経過時間(min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
平均温度(°C)	30.6	37.6	42.0	45.0	47.0	47.7	48.3	47.5	46.5	45.5	44.4	43.0	41.5

冷めた「使いすてかいろ」に酸素曝露すると放置温度から徐々に上昇し、30分後に平均48.3°Cに達した。

Re-reaction of disposable body warmers due to exposure to oxygen

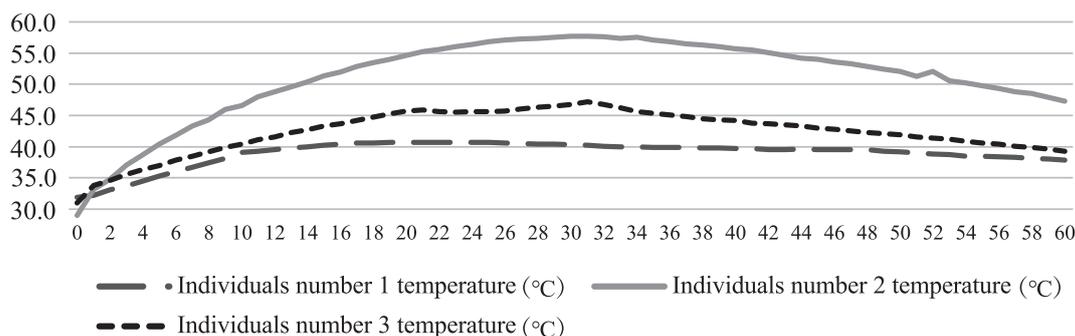


図 3: 冷めた「使いすてかいろ」に酸素曝露すると放置温度から徐々に上昇して再燃傾向が確認された。

が、本実験の結果は、95%O₂曝露で開始直後から急激に温度が上昇し、15分後に100°C程度となって3時間ほど高温を維持することが分かった。これは、1.0ATA下で「使いすてかいろ」に高濃度酸素曝露を行うと温度上限が100°C程度であるが、物を燃やすエネルギーはないと考えられた。しかし、山梨HBO装置爆発事故報告書の通り、圧力が加わると状況が一変する。紙の燃焼温度が300°C以上であることから、HBO装置での燃焼条件は酸素濃度だけではなく、ある一定以上の酸素分圧(2.7ATA; PO₂: 2,052mmHg)が300°Cを超える燃焼温度(燃焼エネルギー)に関与していると推察された。HBO装置内の「使いすてかいろ」に対して、高濃度酸素(%O₂)もしくは%O₂が持つ酸素分圧(partial pressure O₂)がFeO₂反応を急速に早めて高温にする作用がある。これは、空気燃焼と酸素燃焼の特徴⁷⁾の相違によると考えられ、酸素燃焼は空気燃焼と比較して温度が高くFeO₂の反応効率も高いので90°Cを超える高温が長く維持され、結果2で示した開封から24時間以降の冷めた「使いすてかいろ」であっても残存

したFe成分が高濃度酸素、あるいは一定の酸素分圧以上に曝されるとFeO₂再燃にも関連すると推測された。

一般に低温火傷は、カイロや湯たんぽ等、体温より少し高めの温度に長時間触れ続けることにより起き、II度の熱傷(水泡・びらん・潰瘍)の形成は44°Cでは3~4時間、46°Cでは30分から1時間、50°Cでは2分から3分で起きる⁸⁾とされている。また、1946年にF.C.Henriquesらが提唱した組織損傷の度合いを表す損傷関数による障害の有無の判定⁹⁾では、70°C以上では僅か1秒で火傷を来すことが示されている。今回の実験結果からは、酸素曝露開始5分後に平均73°Cとなることから、HBO装置内では更に加速され短時間で危険な温度の上昇が続くと予想される。これは火傷レベルではなく、不可逆的障害の重傷熱傷レベルの受傷を意味しており、表面的にはII度の熱傷であっても深部に障害がおよぶIII度の熱傷¹⁰⁾を来す恐れがある。万が一、HBO装置内に「使いすてかいろ」が持込まれて酸素加圧された場合、5分以内に大気開放して「使いすてかいろ」を排除しないと患

者に熱傷を強いることとなるので、HBO装置オペレータは装置のマスターバルブをONにした瞬間から加圧開始10分間は一時も目を離さず、患者と装置内の変化に注視しなければならない¹¹⁾ことが理解される。

「使いすてかいろ」の酸素燃焼は曝露される酸素濃度(%O₂)とその酸素分圧(partial pressure O₂)によって著しくFeO₂反応を亢進させて100℃以上の危険温度となるが、HBO装置内では更に温度制御不能となり、「使いすてかいろ」を貼付した患者は短時間で局所の深層熱傷を来すことが考えられた。

【結語】

大気圧下で「使いすてかいろ」に酸素曝露すると数分で100℃以上の危険な高温になり、HBO装置内に持ち込まれるとHBO装置内では更に燃焼スピードと燃焼温度上昇が著しく早まり燃焼温度が高まる。

参考文献

1) 日本高気圧環境・潜水医学会：高気圧酸素治療法入門（第

6版）。2017；pp. 3-5, 109-116.

- 2) 榊原欣作：高気圧酸素治療の基礎と臨床。東京；医学書院。2009；pp. 593-613.
- 3) 使いすてかいろ。Disposable body warmers. JIS. S 4100. 1996.
- 4) 柳下和慶，灘吉進也：【重要】高気圧酸素治療中のカイロ持ち込みに関する嚴重な注意喚起。2024。
<https://www.jshm.net/file/archive/hboreport20240222.pdf> accessed May 15, 2024.
- 5) 山梨厚生病院高気圧酸素治療装置爆発事故原因調査報告書：日本高気圧環境医学会雑誌 2000；34：149-160.
- 6) 若林誠也：鉄の酸化反応を探る。科学カイロの分析を通して。新潟県立教育センター研究報告 1983；64：17-24.
- 7) 萩原義之：酸素燃焼を利用した酸化物粒子球状化技術の開発。日本燃焼学会誌 2021；63：225-232.
- 8) 山田幸生：低温やけどについて。製品安全協会 1999；72：2-8.
- 9) Moritz AR, Henriques FC: Studies of thermal injury: studies of thermal injury: II. the relative importance of time and surface temperature in the causation of cutaneous burns. Am J Pathol 1947；23：695-720.
- 10) 窪田達也，勝屋弘忠，丸川征四郎，他。：クリティカルケア・マニュアル。重傷熱傷。東京；秀潤社。1995；pp. 259-261.
- 11) 日本高気圧環境・潜水医学会：高気圧酸素治療の安全基準（2019.11.3改訂）；第29条。第35条3.