

●原 著

酸素雰囲気下における点火芯付懐炉発火試験

亀井隆雄* 佐野 力*

高圧酸素環境下で低酸素症患者の治療を行う小型高気圧酸素治療装置に、もし点火源として保温用点火芯付懐炉を不用意に持ち込んだとき、それがどのような燃焼挙動を示すかを実験によって確かめた。2絶対気圧以下では、爆発的燃焼発生の有無は燃料量、保温効果によって左右される。爆発的燃焼を起こす場合でも、それは加圧開始後40～50分以上の時間を必要とするが、あらゆる可燃物の発火は瞬時であり、かつ全体的である。治療時間内に自然消火したり、通常の治療時間を越えて発火する例では、如何なる異常も外部で検知することはできない。

キーワード：高気圧酸素治療装置，酸素，爆発，点火芯付懐炉

Ignition experiment of portable metal warmer under hyperbaric and hyperoxic atmosphere

Takao Kamei* and Tsutomu Sano*

*Kawasaki Engineering, Co., Ltd.

This study was performed to testify the igniting effect of portable body warmer (KAIRO) which might be accidentally brought into monoplace chamber by patient. According to the results, up to 2ATA, it completely depended upon fuel (benzine) storage and heat-keeping effect of lapping material whether explosive combustion occurred or not. It required forty to fifty minutes after the start of HBO to get fire and it always instantaneous and not localized. Sometimes, ignited fire was extinguished spontaneously during HBO or combustion occurred exceeding usual HBO program. In those cases, it was impossible to detect any abnormal sign in the chamber from the outside.

Keywords : _____

hyperbaric facility
oxygen
combustion
portable metal warmer

ま え が き

医療行為にかかわる装置およびその操作には特に安全性が要求される。中でも低酸素症患者の症状改善に顕著な効果を発揮する高気圧酸素治療装置は比較的高い圧力の酸素を扱うため、日本高気圧環境医学会では「高気圧酸素治療の安全基準」を制定し、これに準拠した治療操作が行われることを関係者に強く要請している。そこでは安全操業上の最重要要件として火気の持ち込み禁止を採り上げている。支燃剤である酸素を高圧の状態扱う本装置に“誤って”火気が持ち込まれたならば、可燃物の爆発的な燃焼が高気圧治療装置の狭い空間内で患者に与える影響は致命的なものとなろう。しかし、火気の持ち込みさえなければ安全な同装置への、単なる漠然とした不安感あるいは誤解に基づく拒否反応に対しては、それを払拭し、正しい取扱による有効な医療技術としてより一層の進展を図ることこそ、関係者等の義務と思われる^{1)~5)}。

火気源として点火芯付懐炉（商品名ハクキンカイロ、以下カイロと略記）を想定した今回の実験では、酸素圧力、燃料量、保温状態の組み合わせによって、通常想定される治療時間内に爆発的燃焼を起こす場合と、全く異常現象なしに自然消火する場合、および発火するにしても通常の治療時

*川崎エンジニアリング株式会社

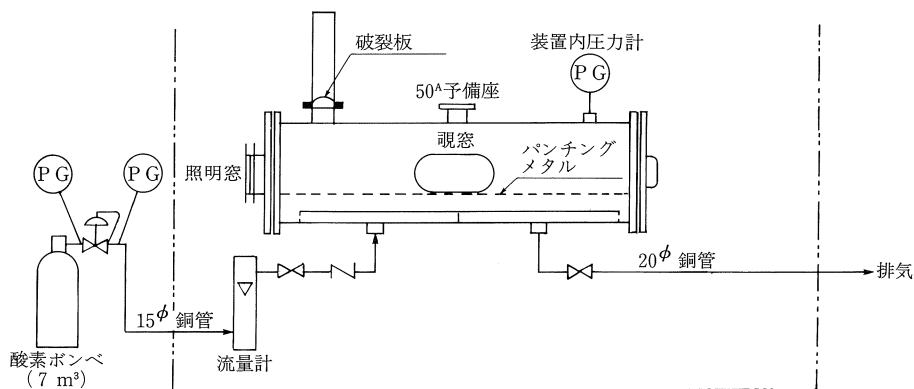


図1 試験装置とフロー

間を越える場合のあることが分かった。即ち、禁止されている火気を持ち込みながら何ら異常なく治療を終了する場合があります、それが安全チェックを更にルーズにしている可能性がある、という重大な推論が成り立つのである。

実験目的

高気圧酸素治療装置（以下、装置と略記）には酸素のみで装置を加圧する純酸素加圧方式と、空気加圧された装置に呼吸用酸素を併せ供給して治療する空気加圧方式とがある。当然、純酸素加圧方式においては、高濃度の酸素が燃焼現象を促進し、患者の衣類など近接する可燃物を爆発的に燃焼させる危険性が、空気加圧方式よりはるかに高まることが予想される。

従って、純酸素加圧方式の装置に持ち込まれる可能性が最も高い火気源としてベンジン（燃料）を使うカイロを用い、燃料充填量、保温状態や可燃物としての衣類相当品との相対的位置関係などがどのような条件にあるとき、いつ、どの程度の爆発的燃焼が生じるかを調査し、同時に瞬時に起こる爆発的燃焼の激しさを十分に理解しておくことが治療の安全に対して重要な意義を持つものと考ええる。

実験装置と実験方法

1. 実験装置

図1に示す装置において、酸素は酸素ボンベから流量計を経て装置に入り、装置内ではプラグフ

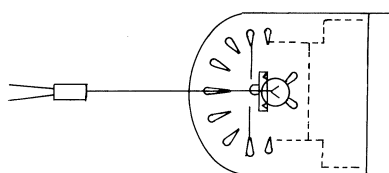


図2 カイロ表面温度測定位置

ローを形成して装置内空気を置換し、装置を所定の圧力まで昇圧して大気中に流出する。

装置には安全装置としての2.8ATA（絶対気圧）で破裂する破裂板、内部観察および写真撮影用覗き窓、圧力計、温度計および酸素濃度測定器が取り付けられている。

装置本体	SGP400A×1,000 l
最高使用圧力	3ATA
装置容積	122 l（実機の1/6モデル）
酸素濃度計	東レエンジニアリング(株)製 LC700L型
送気方法	昇圧速度 0.2kg/cm ² /min 換気量 3Nm ³ /h

2. 温度計測

カイロ表面温度が発火条件を探るための唯一のデータであった。

カイロ表面温度はカイロの芯に対応する表面位置で計測し、1φシース熱電対を図2の如く取りつけた。実際にはカイロ表面の他、装置内空間、保

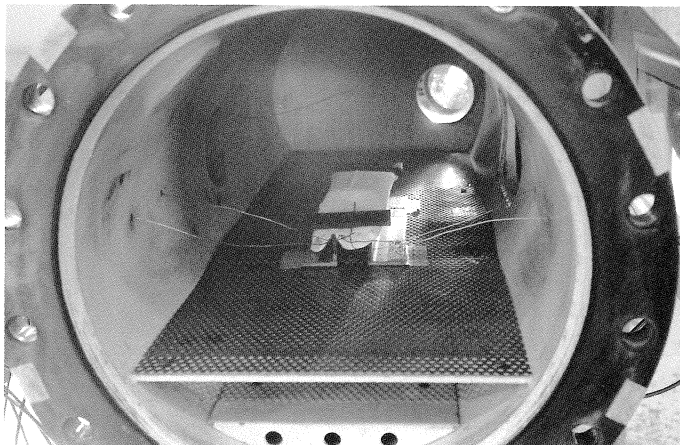


図3 カイロのセット状態

温材等の温度も計測したがカイロ表面温度以外は殆ど変化を示さないか、あるいは爆発的燃焼の予告には殆ど役立たなかった。またカイロ芯温度は温度計の固定が計測毎に一定せずデータとしての信頼性に欠けた。

3. カイロの装置内セット方法

供試カイロへの酸素の供給を促進させるため、装置底部に敷かれた多孔パンチングメタル上に形鋼で枠を作り、その上にカイロをセットした(図3)。

4. テストパラメータ

カイロの発火条件を探るためのパラメータを下記の如く設定した。

(1)初期ベンジン充填量(6条件)

実際には装置内へ搬入したときの燃料量が重要である。従って所定量の燃料を充填後、規定の時間内にカイロを装置内へ持ち込むことを前提とし、目安として付属カップ(10gr入り)に1/4, 1/2, 3/4, 1, 1 1/2, 2カップのベンジンを取り、これを上皿天秤で精密計量して充填量とした。

(参考:ベンジン沸点≒130℃)

(2)カイロ保温条件

①裸カイロ

カイロを付属ベルベット製袋に入れただけのもの。

②サラシ包装カイロ(3条件)

裸カイロを更に幅330mm,長さ500mm(20gr),

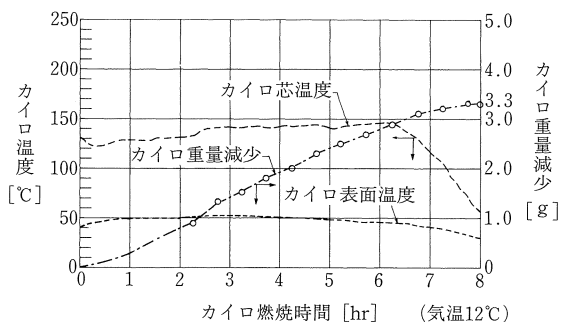


図4 裸カイロの大気中燃焼実験

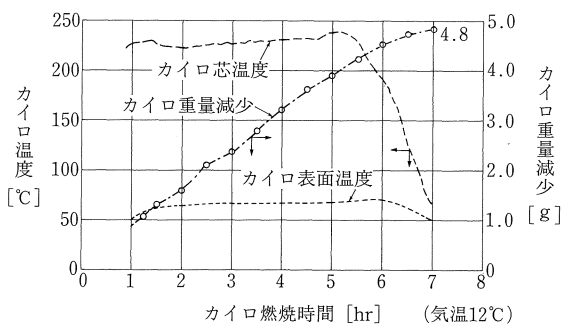


図5 サラシ巻きカイロの大気中燃焼実験

750mm (30gr) および 1,000mm (40gr) のサラシで巻いたもの。

(3)装置加圧酸素圧力(6条件)

0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1ATGとした。(ATG=ゲージ圧力=ATA-大気圧)

(4)カイロ搬入初期条件

①カイロ温度安定化

各ベンジン充填量に対しカイロ点火15分後を安定期として装置内に搬入した。

②加圧開始時刻

装置内へのカイロ装填作業時間を見込み、装置加圧開始をカイロ点火30分後に設定した。

③カイロセット姿勢

静止横置き。発火条件はカイロの設置姿勢により変化するため、通常想定される横位置姿勢とした。

(5)酸素濃度の一定化

加圧開始後12分以内に装置内酸素濃度が90%に到達するよう流量を設定した。(=3Nm³/h)

実験結果

実験は前記パラメータの各組み合わせに対し圧力、温度測定のほか、発火燃焼状態を特殊カメラで撮影した。

1. 大気中での燃焼実験

大気中で裸およびサラシ巻きカイロの燃焼速度と温度変化を比較し、カイロの保温状態がカイロ表面温度に与える影響を調べた(図4, 図5)。

サラシ等の保温材は空気中の水分を含んでいるため、重量減少速度と燃焼速度とは一致しない。カイロ表面最高温度は230℃と150℃とでサラシ巻きカイロの方が約80℃高く、燃焼終了時間も40分程度早いことから、保温条件が燃焼に強い影響を与えていることが分かる。

2. 酸素雰囲気下での燃焼比較

まず加圧酸素雰囲気下でありながら爆発的燃焼に至らない場合を示す(図6, 図7)。

両図とも装置加圧開始から終了までの間に表面温度が急上昇して100℃近辺まで到達するものの、加圧から均圧過程に移行した後一旦温度が下降する。続いて、均圧過程で温度は徐々に上昇しそれぞれ120℃或いは170℃のピークに達して消火している。加圧時の温度急上昇は加圧により酸素の供給が増えるためであり、均圧過程(圧力一定、換気)の一時的温度下降は、酸素の供給が単に拡散に支配されるため燃焼率が低下し温度が一旦低下すると考えられる。均圧過程で燃焼が持続してい

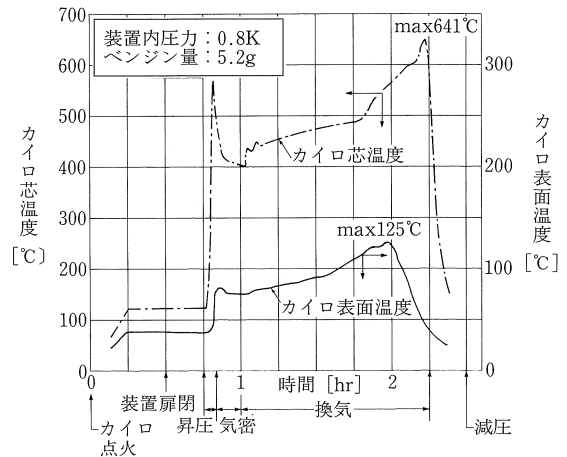


図6 裸カイロの酸素雰囲気下燃焼実験

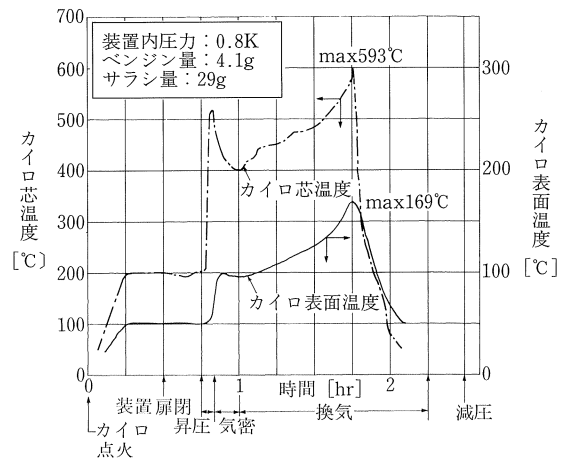


図7 サラシ巻きカイロの酸素雰囲気下燃焼実験

る間は保温効果により緩やかな温度上昇を伴うが、燃料が尽きた時点で温度が急降下する。

即ち、裸/サラシ巻きいずれの場合も、酸素の供給増加に伴う燃焼促進効果が顕著に見られるが、燃焼が終了するまで白金による触媒燃焼のみに依存したため、爆発的燃焼には至らなかったものと見られる。

酸素圧力0.8ATG、ベンジン充填量4~5grの場合は、酸素供給開始後1時間以上経過しても、

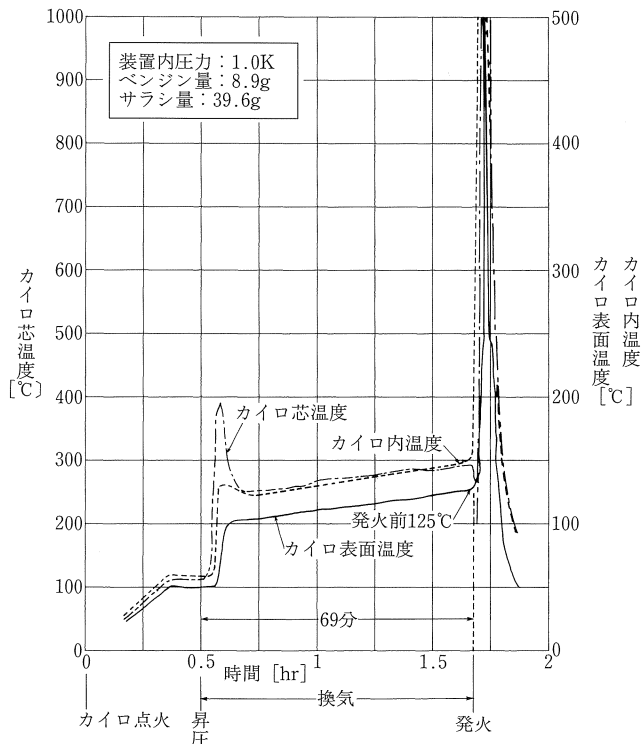


図8 爆発的燃焼に移行する温度変化図

ベンジン量が少ないためカイロ表面温度が130°Cを過ぎて10分以内に燃料が尽き、爆発的燃焼には到達しない。

3. 爆発的燃焼の場合

図8に爆発的燃焼への移行例を示す。

加圧、均圧時におけるカイロ表面温度の時間的推移は前述の爆発的燃焼に至らない場合と類似している。

両者の条件的な違いは酸素加圧圧力とベンジン量にあり、それぞれ前例より高くなっている。紙面の都合上1例しか示し得ないが、爆発的燃焼に至る全例を通しての特徴は、加圧開始後カイロ表面温度が100°C以上に急上昇し、均圧過程に入ってもそれが100°C以下には下がらないこと、前例に比較して高いレベルで、かつ一定の上昇率を保ちながら温度が上昇し、カイロ表面温度がベンジンの沸点130°Cを越えるや否やそれまで緩やかな触媒燃焼をしていたベンジンが蒸発/ガス化して火炎燃焼に移行すること、カイロ孔から噴出した火炎

が周辺の可燃物を発火させること、などである。即ち、酸素圧力(濃度)の増大によって燃焼が促進され、当初からのカイロ本体の高温化がカイロ燃料タンク内残留ベンジンを加熱して蒸発し易い状態に近づいていたことが重要な差異と見られる。

この結果をまとめると、加圧圧力 1ATG、ベンジン量 8.9gr の条件下にサラシで保温したカイロは、加圧開始1時間強経過後、カイロ表面温度がベンジンの沸点130°Cを越えた時点で爆発的燃焼に至る。

裸カイロでは決して発火には至らなかったが、このことは周辺に可燃物がないことも原因する。

4. 爆発的燃焼限界

カイロ表面温度がベンジンの沸点を過ぎても爆発的燃焼をする場合としない場合があったが、その限界条件を図9に示す。

横軸にベンジン量、縦軸に発火するまでの時間を取り、発火する場合としない場合を実験パラメ

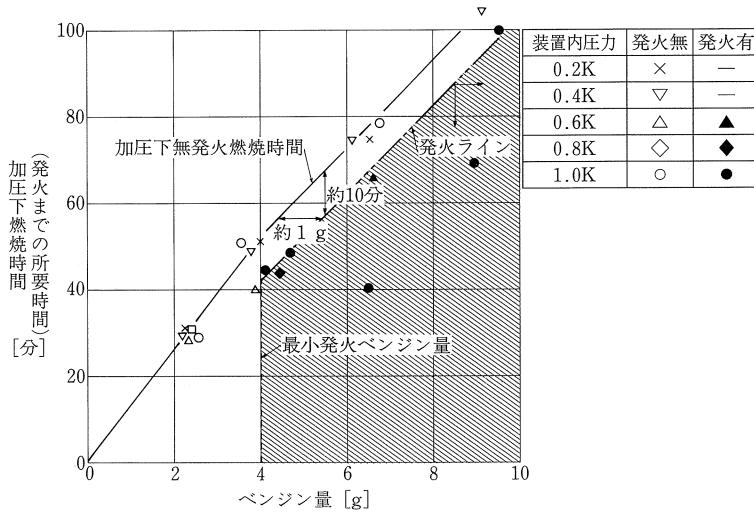


図9 ベンジン量と発火（燃焼持続）時間

ータに無関係にプロットした。陰影を施したゾーンは発火領域であり、右上がりの直線は発火しない場合の消火までの燃焼持続時間を示す。例えば初期ベンジン量が約5.45grの場合、最も長時間かかって発火したのは57分後（ほぼ10分に1grの燃焼率）であり、それ以上かかる場合は自然消火することを示している。その時の燃料残量の差はほぼ1grであり、すべてのベンジン量に対して発火到達最長時間との関係は一定であった。

また、同じ燃料量であっても圧力、保温状態からもっと早く発火する場合も多く、これは斜線の下方ゾーンに入っている。

このことをまとめると、燃料タンク表面温度が130度を越えてなお1 gr以上の燃料量が在る時には発火するが、当初のベンジン量が少なればカイロ表面温度を高めることなしに自然消火する。

また燃料量の多い場合は発火までの時間が長くなるということも図から明らかである。

図10には横軸にベンジン量、縦軸に装置内圧力を取り発火限界を求めた。

ベンジン量が多くなるに従って発火する限界圧力は低くなる。これは一般に言われるように燃焼の激しさが酸素濃度に比例するという定理に合致するものであり、たまたま当実験が2ATA以下という低圧下のものであるためベンジン量への依存

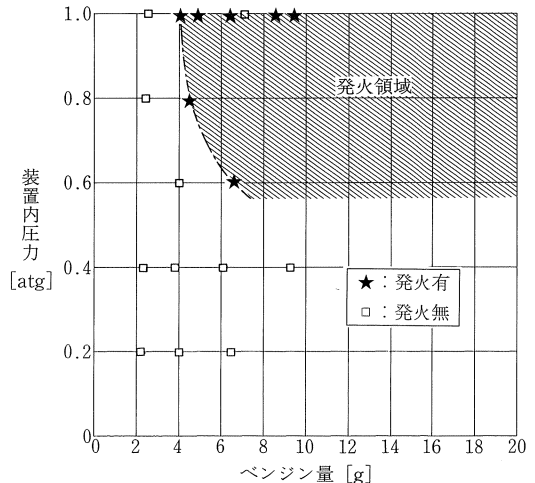


図10 装置内圧力と発火限界

度が強く出ているが、更に高压になれば少ないベンジン量でも瞬時に発火爆発することを示唆している。

以上の爆発的燃焼発生の機構プロセスをまとめると次のように結論できる。

(1)カイロは触媒燃焼による非常に弱い燃焼の長時間持続を目標に設計されている。従ってカイロ

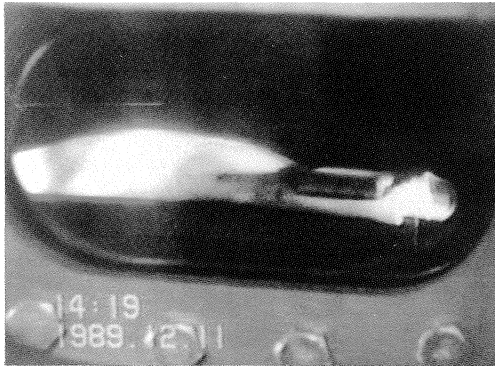


図11 発火

サラシ包装内部が全面的に発光する。火炎は未だ外部に出ていない。

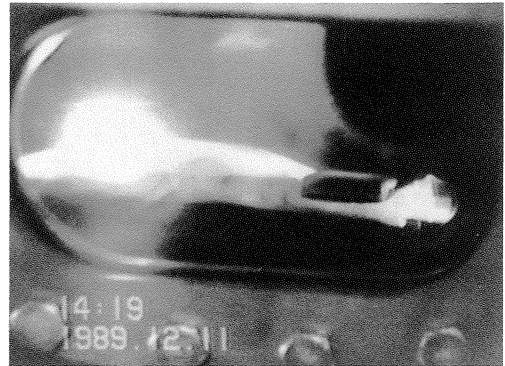


図12 発火後2/60秒

カイロ部に相当する位置にガス火炎の吹き抜けによる火玉が発生。

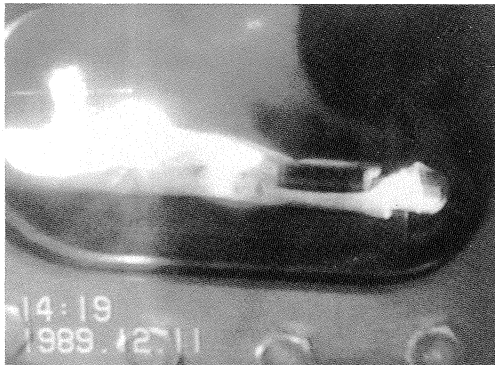


図13 発火後4/60秒

吹き抜け火炎による布表面のケバ立ちに着火、火炎が表面をなめて走る。

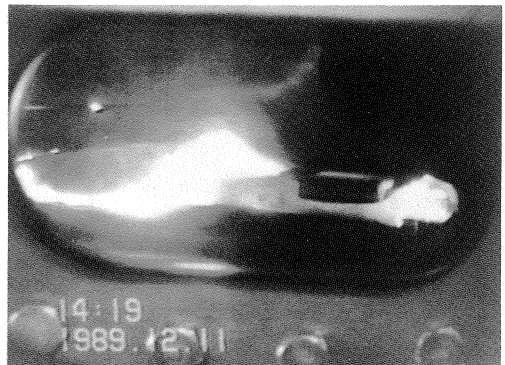


図14 発火後8/60秒

同左。布の右端暗部は押え金物である。

表面温度を高めベンジンを蒸発させ強い火炎を吹き出すようになるまでには非常に長い時間を必要とし、実験では40～100分を要した。

(2)図10から、圧力が高ければ高い程、少ない燃料量で発火する。即ち、酸素濃度の高まりによる燃焼の促進がカイロ表面温度を急速に高め、触媒燃焼から気化ガス化燃焼への移行を容易にしている。他方、2 ATA 以下では、燃料量 4 gr までは発火しなかった。

(3)初期の燃料量が少なければカイロの表面温度を高めることなしに自然消火する場合や、また燃料量が多いときには、燃料タンク内ベンジン温度を高めるにはより長時間を要するので、治療

時間の制限内では発火しない場合もある。即ち 2 ATA 以下では適当な量の燃料量と保温および酸素の供給が保たれて始めて発火し得る。

写真による燃焼挙動

ビデオと特殊カメラによる燃焼挙動を以下に参考として示す。

図11～20は、圧力 2ATA、ベンジン 4.1gr、サラシ 40gr、発火迄の所要時間は44分の例である。燃焼挙動を要約すれば、カイロからベンジンの蒸発による火炎が吹き出し付近の布に着火する。布を吹き抜けた火炎は布内外のケバへの着火を起こし布全表面に一時に広がる。しかし火種は内部に



図15 発火後16/60秒

表面の火炎は右に走るも、初期の火玉部は消え布外部には着火していない。

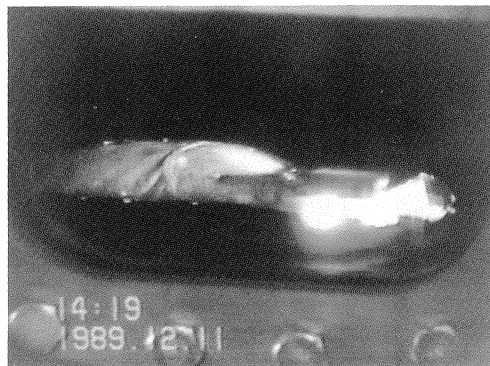


図16 発火後20/60秒

一旦消えたあと、布内部の各所から小さな火種が発生する。



図17 発火後24/60秒

火種の成長と同時に布内部全体の燃焼が光って見える。



図18 発火後36/60秒

布内部の本格的燃焼。

在ってこれが最終的に布を爆発的に燃焼させる。この間僅か1秒以内という瞬時であり、かつ全体的であり破裂板は吹き飛ぶ。布の量が多ければ燃焼は更に激しく装置内は高温、高压になる。

結 論

1. 本実験の結果は、①治療途中でカイロが自然消火し外部からは何ら異常が認められずに治療が終了する場合、②治療時間内に爆発的燃焼を生じる場合、および③一般に爆発的燃焼への到達条件が整うまでにかなり長い時間を必要とすることから、それが偶然にも治療時間をオーバーし結果として爆発的燃焼を回避する場合、とに分類できる。

2. 2 ATA 以下の低い酸素圧力下で、かつ触媒燃焼方式により時間当たりの燃焼率を低く抑えたカイロの燃焼では、ある適量の燃料量、保温効果とカイロの火炎が届く範囲内に可燃物が存在すること、などの条件が整うとき始めて通常の治療時間内での爆発的燃焼を発生する。

3. 発火限界図に見るように、酸素分圧が高くなれば僅かなベンジン量で発火する。即ち高压になる程危険性は増大する。

4. 2 ATA という低い酸素圧力下ではカイロの発火までに40~100分という長い時間を要す。

5. 爆発は瞬時かつ全体的であり、破裂板が吹き飛び装置内圧力、温度は計測不能値まで突変す

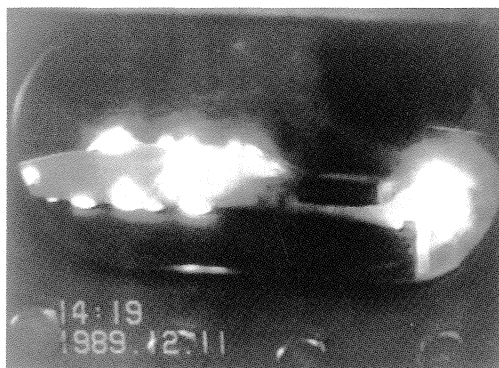


図19 発火後48/60秒
全体が発火。

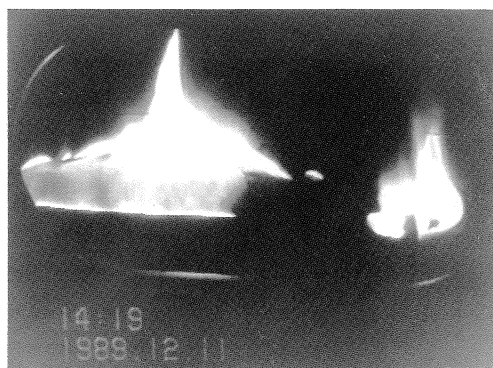


図20 発火後2秒
最終燃焼状態。

る。

以上、実験の一部を紹介したが爆発は瞬時、全体的であり、もはや他の手段で患者を無事救出することは不可能と考えられる。

更に重大な推論として「例え爆発という大事が表面化しなかったとしても、事故寸前の状態にあってそれに気付くことなしに治療操作が繰り返されているかも知れない」ということが想像できる。

これは本実験の重要な結論の一つであり、かかる危険を回避して安全な治療を続ける為には「高気圧酸素治療の安全基準」に沿った事故防止手段を徹底し、患者をして火気を絶対に持ち込ませないことが益々重要な治療上の要件として理解できるであろう。

また、かかる安全対策さえ厳守すれば高気圧酸素治療装置は安心して治療に供することのできる治療用機器であることも証明したといえる。

最後に、本論文を発表する機会を与えて下さった名古屋大学高橋英世教授、各種の指導を賜った川崎エン

ジニアリング榎浜部一三相談役および実験を手伝っていただいた方々に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) Shilling CW: E.Fire Safety. VIII Operational Safety Considerations. In: The Underwater Handbook. Shilling CW, Werts MF, Schandelmeier NR(eds.). Plenum Press, New York, pp.646-664, 1976
- 2) Reimers SD: Operational safety in clinical hyperbaric chambers. HBO Review 4:113-126, 1983
- 3) NFPA 99-1987 Edition. Chapter 19. Hyperbaric Facilities. National Fire Protection Association(NFPA). Boston, 1987
- 4) NFPA 53M Manual on Fire Hazards in Oxygen Enriched Atmosphere 1990 Edition. Ditto. 1990
- 5) 榎原欣作: 高気圧酸素治療中の火災事故について, 日高圧医誌 24: 185-199, 1989
- 6) 日本高気圧環境医学会: 高気圧酸素治療の安全基準(平成3年11月15日最終改正). 日高圧医誌 26: 85-99, 1991