

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### 酸素の使用に伴う事故の事例について

Case Examples of Accidents/Incidents Associated with Use of Oxygen

小野 文衛

Fumiei ONO

2018年10月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

## 目 次

1. はじめに	2
2. 背景	3
2.1. 酸素の発見とその利用の増大	3
2.2. ロケット推進剤としての酸素	4
2.3. 米国における初期の有人宇宙計画	4
2.4. 酸素の取扱いに関連する事故 / 事件	4
3. NASA における酸素関連事故（1964 - 1971）	5
3.1. まえがき	5
3.2. NASA の安全目標	6
3.3. 安全に関する推奨事項	9
3.4. 選定した事故についての考察	10
1) 酸素圧力調整器の損傷	10
2) 射場における車両火災	11
3) アポロ 13 号の飛行事故	13
3.5. おわりに	16
3.6. 参考文献（3 章分）	16
付録 3-A LOX 極低温システム 液体酸素による事故 / 事件	17
付録 3-A（続き） GOX システム ガス酸素による事故 / 事件	25
付録 3-A（続き） NASA 以外の事故 / 事件	32
付録 3-B 事故の定義 - NASA 安全マニュアルより	33
4. アポロ 1 号宇宙船（AS-204）の火災事故	34
4.1. 事故の概要	34
4.2. 事故の原因	35
5. 主に米国の一般産業界における酸素関連事故	36
表 5 米国エアプロダクツ社が調査した酸素関連の事故事例	37
6. 米国における酸素の安全研究の進展	49
6.1. ASRDI のその後	49
6.2. ASTM について	49
6.3. NFPA について	49
6.4. 新材料の使用に伴う事故について	50
表 6-3 NFPA53 の付録 D に記載されている事故事例	51
7. 欧州における酸素関連の事故等について	64
表 7 欧州産業ガス協会発行 IGC Doc 04/09/E の付録 C に記載されている事故事例	65
8. 国内における酸素関連の事故等について	70
8.1. 国内における事故事例と安全研究	70
8.2. KHK 高圧ガス事故事例データベース	71
表 8-2 高圧ガス製造事業所における酸素事故事例（1965 年～ 2017 年）	72

<b>9. 高圧酸素システムの安全原則</b>	<b>91</b>
9.1. 序	91
9.2. 酸化性ガス	91
9.3. 発火源	92
9.4. 酸素システムにおける火災危険性の管理	92
9.5. 停止時および修理時における留意事項	94
<b>10. 終わりに</b>	<b>94</b>
<b>参考文献</b>	<b>95</b>

# 酸素の使用に伴う事故の事例について \*

小 野 文 衛 <sup>\*1</sup>

## Case Examples of Accidents/Incidents Associated with Use of Oxygen

Fumiei ONO <sup>\*1</sup>

### ABSTRACT

In the oxygen system, it is difficult to remove any of the three elements of fire—fuel, oxidizer, and ignition source. For this reason, an oxygen system must be designed and operated by considering ways to reduce or eliminate the risk of ignition as much as possible. To date, there have been numerous oxygen-related fires and explosions in the aerospace, diving, medical, industrial and other fields. This paper presents the results of surveys on these accident/incident cases that occurred in the past, to the extent possible. Based on the experience gained through these accidents/incidents, improvements in related laws and regulations, technical investigation and research, etc. have been promoted, with the safety of oxygen systems being consequently improved. For everyone who deals with oxygen, it is most important not to deviate from each instruction sheet and work procedure manual, but understanding the essence of why such procedure manuals are like that is also important for safety. Even if a situation arises that is not covered by the instruction sheet or procedure manual, being able to understand the nature of the event and deal with it will likely result in avoiding the worst situation. This paper mainly focuses on the cases of oxygen-related accidents/incidents that occurred in the aerospace field and general industrial field in the United States, but also cites cases in Europe and Japan. The causes of about 540 accidents/incidents reported herein are classified as a lack of basic knowledge (educational failure), procedural violation/defect, design/manufacturing defect, material incompatibility, cleaning/confirmation failure, contamination, maintenance/inspection failure, management/supervision failure, and other failure. A considerable number of these cases is caused by a lack of basic knowledge and instruction/procedural violations. Moreover, most accidents/incidents involve several causes rather than a single cause. This paper also describes the minimum matters necessary for the safe handling of oxygen, with related literature being listed at the end.

**Keywords:** Oxygen, Liquid oxygen, Gaseous oxygen, Oxygen accident/incident, Oxygen fire, Explosion, Oxygen safety, Material compatibility, Oxygen enriched atmosphere, Combustion supporting gas

### 概 要

酸素システムにおいては、火災の三要素、すなわち、燃料、酸化剤および発火源、のいずれも取り除くことが困難である。このため、発火の危険性を可能な限り低減または排除するように配慮して酸素システムを設計、運用する以外に方法が無い。これまでに、航空宇宙、潜水、医療、産業などの分野において、酸素が関係する火災や爆発事故が多数発生している。本資料では、過去に起きたこれらの事故事例の調査

を行った結果について可能な限り紹介した。これらの事故の経験を基にして関係諸法の整備および技術的な調査・研究などが進められ、酸素システムの安全性の向上が図られてきた経緯がある。酸素を扱う全ての者は、酸素の基本的特性に関して教育を受け、各指示書や作業手順書を逸脱しないことが大切であるが、それらの指示や手順が何故そのようになっているのか、その本質を理解することも安全上重要である。もしも指示書や手順書に規定されていない事態が発生した場合でも、その事象の本質を理解して対処することができれば、最悪の事態を免れる可能性が高いためである。本資料では、米国における航空宇宙分野および一般産業分野で発生した酸素関連の事故事例を中心に紹介し、併せて欧州と我が国における事例についても示した。本資料には約 540 件の事故事例を示したが、その原因は基本的知識の欠如（教育不良）、手順違反/不良、設計/製造不良、材料不適合、洗浄/確認不良、汚染、保守/点検不良、管理/監督不良などに分類される。これらの事例の中には、基本的知識の欠如や手順違反/不良によるものが相当数見られた。さらに、大部分の事故は単独の原因ではなく、複数の原因が重なって発生している。また、酸素を安全に取扱うために必要な最低限の事項についても述べ、関係する文献類については本資料の末尾に示した。

## 1. はじめに

酸素ガスは大気中に容積割合で約21%含まれており、人間をはじめとする動物の生命維持に必須の元素である。また、酸素は各種熱機関、化学工業、助燃剤、吸入用あるいは医療用等、人類の活動にとっては不可欠なものとなっている。航空宇宙分野において、酸素は液体ロケットエンジン用酸化剤、燃料電池あるいは高高度や宇宙空間における生命維持用として不可欠である。

酸素ガス自体は無味、無臭、無色で化学的に安定であり、衝撃に敏感では無く、容易に分解せず、可燃性でも無い。しかし、強力な支燃性を有するために、特に純酸素あるいは高酸素濃度雰囲気下では、大部分の金属、樹脂およびゴム類が可燃性物質と化してしまう。このため、酸素で使用するシステムやコンポーネントは、常に発火の危険性を抱えており、酸素システムを安全に使用するためには、発火の危険性を低減または排除するように留意して設計し、運用する以外に方法が無い。これまでに、航空宇宙、一般産業、医療、潜水および溶接等の多くの分野において、酸素の使用に伴う多数の深刻な火災や爆発等の事故が発生している。航空宇宙分野では、1967年1月に発生したアポロ1号宇宙船（AS-204）の地上訓練中の火災事故<sup>1,2)</sup>、および1970年4月に発生した飛行中のアポロ13号の機械船の液体酸素タンクの破裂事故<sup>3)</sup>等を挙げることができる。また医療分野では、高圧酸素治療カプセル内における火災による死亡事故が多数発生している<sup>4)</sup>。これらの事故は、酸素を安全に使用するためには特別な注意が

必要であることを示している。

本資料は全部で10章から構成されており、「第1章. はじめに」と「第10章. 終わりに」を除いた内容は以下の通りである。

第2章では、酸素の発見、酸素製造方法の進展、利用分野の増大、および酸素関連事故の発生等の背景について簡単に紹介する。航空宇宙分野においては、酸素の利用が増大するのに伴って、火災や爆発事故による深刻な事態も発生している。

第3章では、米国が有人月面着陸を目指していた初期の有人宇宙開発計画期間中（1964～1971年）に発生した酸素関連の117件の事故/事件をNASAがまとめた資料<sup>5)</sup>の紹介を行う。これらの事故/事件をきっかけとして、高酸素濃度雰囲気下における発火や燃焼、材料適合性などに関する調査や研究の必要性がより強く認識され、現在ある酸素関連の多くの基準、規定、指針等の整備に繋がった。

第4章では、アポロ1号宇宙船の発射台上での火災事故<sup>1,2)</sup>について少し詳しく紹介する。この事故は、第3章で紹介した資料の付録3-Aの中で簡単に触れてあるが、純酸素あるいは高酸素濃度雰囲気下の閉鎖空間における火災がいかに危険なものであるかを良く示している事例であるので、章を改めて紹介する。これは、宇宙船内を約16.7 psiの純酸素雰囲気（標準大気圧は14.7psi）で満たして地上訓練を実施している最中に火災が発生し、火災は極めて短時間に船内中に広がり、船内にいた3人の宇宙飛行士が脱出する間もなく死亡したものである。

第5章では、主に米国における一般産業界における酸素関連の207件の事故事例について紹

介する。これはNASAのASRDIがエアプロダクツ社に委託した調査の報告書<sup>6)</sup>に含まれているものである。

第6章では、初期の有人宇宙計画が終了した後の米国における酸素関連の安全研究の体制および関連する参考文献等について紹介する。全米防火協会（NFPA）の刊行物NFPA 53<sup>7)</sup>の付録として、酸素が関係する56件の事故事例が掲載されているので、これについて紹介する。また、比較的新しい材料である炭素繊維複合材を使用したロケット用圧力容器と酸素が関係するロケットの爆発事故についても述べる。

第7章では、欧州の高圧ガスに関する法的な枠組みについて簡単に述べ、欧州産業ガス協会（EIGA）の刊行物EIGA IGC Doc 04/09/E<sup>8)</sup>の付録に掲載されている54件の酸素が関連する事故事例について紹介する。

第8章では、我が国の酸素関連の事故や酸素安全研究の状況について紹介する。我が国における酸素関連の事故については、一般産業分野、医療分野、および潜水分野において多数の事例が報告されている。また、高圧ガス保安協会（KHK）では高圧ガス事故事例データベースを公開しており、これから抽出した高圧ガス製造事業所における酸素関連の事故事例100件について紹介する。

第9章では、酸素システムを構築して安全に運用するために必要な最低限の項目について述べる。これは、欧州産業ガス協会が作成したEIGA Safety Info 15/08/E「高圧酸素システムの安全原則」<sup>9)</sup>のあらましについて紹介する。

現在整備されている酸素を安全に取り扱うための各種の法令、規格、標準、基準、指針等は、多くの先達の尊い犠牲や甚大な損失を引き起こした過去の事故/事件を教訓として構築されてきたものである。現在、改めてこれらの過去の事故/事件を振り返って見ることは、現在酸素の取扱いに従事している我々の安全意識を覚醒することに役立つのではないかと考える。

## 2. 背景

### 2.1. 酸素の発見とその利用の増大

一般的に、酸素の発見者は、発見の発表（1774年に発見、1775年に発表）を最初に行った、英国人のジョゼフ・プリーストリー（Joseph Priestley, 1733-1804）とされている<sup>10)</sup>。彼はガラ

ス管に入れた赤色酸化水銀(HgO)に日光を照射して得たガスに「脱フロギストン空気」と命名した。このガスの中ではロウソクがより明るく燃え、ネズミが活発かつ長寿になることを確かめた。さらには自分でこのガスを吸い、「吸い込んだ時には普通の空気と大差ないと思ったが、少し後になると呼吸が軽く楽になった」と書き残した。

航空分野においては、酸素の発見から100年後の1874年に、気球による高高度飛行に挑んだ際に、高空における低酸素症に対処するために、風船に詰めた酸素を補助的に吸入する試みが行われている<sup>11)</sup>。

その後、1877年にスイスのラウル・ピクテ（Raoul Pictet, 1846-1929）とフランスのルイ・ポール・カイユテ（Louis Paul Cailletet, 1832-1913）がそれぞれ相次いで酸素の液化に成功した<sup>12)</sup>。1883年に、ポーランドのヤギェウォ大学のジグムント・ヴルブレフスキ（Zygmunt Florenty Wróblewski, 1845-1888）とカロール・オルシェフスキ（Karol Stanisław Olszewski, 1846-1915）が、初めて安定した状態の液体酸素を得ることに成功した。

1891年になると、イギリスのジェイムズ・デュワー（Sir James Dewar, 1842-1923）が研究用として十分な量の液体酸素を得るための製法を見だし、1895年には、ドイツのカール・フォン・リンデ（Carl Paul Gottfried von Linde, 1842-1934）とイギリスのウィリアム・ハンプソン（William Hampson, 1854-1926）がそれぞれ液化分留による商業ベースに乗る量産方法確立した<sup>12)</sup>。

工業的に酸素の大量生産を可能にしたこの空気液化分離技術が確立されたことによって、酸素が様々な分野において利用されることになる。例えば、1903年にフランスのフーシェ（Edmond Fouche）とピカール（Charles Picard）によって酸素-アセチレン炎による鋼材の溶接法が開発された<sup>13)</sup>。第一次世界大戦を通して航空機技術が急速に発展した1910年代には、高高度における低酸素症による搭乗者の様々な生理的な症状を緩和するために、酸素供給の必要性が強く認識され、航空機における酸素の使用が始められた<sup>14)</sup>。少し後の1920年代になると、密度が大きく、機体の軽量化に有利な液体酸素が液体ロケットの打ち上げに初めて用いられた。また、航空機の搭乗員用酸素吸入システム

に関連する発火や火災事故が頻発したことによるためと思われるが、第二次世界大戦後から英国軍需省や米国空軍によって高圧酸素中における材料の発火や燃焼特性に関する試験が行われ、データが取得されている<sup>15, 16)</sup>。

なお、酸素の各種物性については参考文献<sup>17)</sup>に記載がある。また、ロケットエンジンの研究開発等で必要となる、特に高圧領域における酸素の熱物性については、参考文献<sup>18)</sup>に詳細な記述がある。

## 2.2. ロケット推進剤としての酸素

液体酸素が世界で初めてロケットの打ち上げに使用されたのは1926年3月16日のことである。この日、アメリカのロバート・ハッチングス・ゴダード (Robert Hutchings Goddard, 1882-1945) が、液体酸素とガソリンを推進剤とした長さ10フィートの液体ロケットを打ち上げた。ロケットは約2秒間飛行し、高度約12mに達し、56m離れた場所に着地したとされている<sup>19)</sup>。

その約5年後の1931年の2月21日には、ドイツのロケットマニアの団体「宇宙旅行協会」の会長であったヨハネス・ヴィンクラー (Johannes Winkler, 1897-1947) のチームが液体酸素-液体メタンを推進剤としたロケット<sup>20)</sup>を、また同年の5月10日には、同じ「宇宙旅行協会」のメンバーであるクラウス・リーデル (Klaus Erhard Riedel, 1907-1944) のチームが液体酸素-ガソリンを推進剤とするロケット<sup>21)</sup>をそれぞれ打ち上げたとされている。

また、1930年代に入ると、ドイツ陸軍がロケットの兵器としての可能性に着目し、その後に大規模な開発を行って1942年3月に弾道ミサイルV2 (正式名称A4) の最初の試射が行われた。V2ミサイルは、液体酸素-75%エチルアルコール+25%水を推進剤とする液体ロケットであり、初めて高度100km以上の宇宙空間に到達したロケットでもある。開発を担ったのは、ヴァルター・R・ドルンベルガー (Walter Robert Dornberger, 1895-1980) が率いたドイツ陸軍兵器局のチームであった。戦後に米国のロケット開発で主要な役割を果たした、ヴェルナー・フォン・ブラウン (Wernher Magnus Maximilian Freiherr von Braun, 1912-1977) もこのチームで開発に従事し、主要な役割を担った。V2ミサイルは、1945年のドイツの敗戦までに3,000発以上が発射された

<sup>22, 23)</sup>とされている。V2ミサイルによって液体ロケットの技術レベルは急速に進展し、ドイツの敗戦後にこの技術は米国、ソ連等の戦勝国に流出して現在の宇宙開発ロケットの礎となっているのは周知の事実である。

このように多数のロケットの打ち上げが可能になったのは、推進剤として使用される大量の液体酸素の生産、貯蔵、輸送等の手段が確立したためである。

## 2.3. 米国における初期の有人宇宙計画

第二次世界大戦後の米国とソ連において、ドイツから入手したロケット技術を基にして弾道ミサイルの開発が行われた。両国はこのミサイル用ロケットを転用して人工衛星や宇宙船を地球周回軌道に打ち上げ、互いに国威の発揚を図った。これらを通して有人宇宙技術、船外活動技術、およびランデブー・ドッキング技術等が確立されていった。しかし、この段階において、米国はソ連に後れを取っていた。

米国はこの後れを取り戻し、国威発揚と技術力の優位を確保するために、1961年5月に、当時の米国大統領ジョン・F・ケネディ (John Fitzgerald Kennedy, 1917-1963) が米国連邦議会特別両院合同会議において演説を行い、「1960年代の終わりまでに、月面に人間を着陸させ、安全に地球に戻すこと」を国家最優先計画にすることを決定した<sup>24)</sup>。

これによって、米国は実質的に資金の制限が無いような巨大な宇宙開発プロジェクトに向かって突き進むことになる。しかも、短期間の期限付き (大統領の演説から約8年半) である。当初、米国とソ連の両国とも、有人による月面探査を計画していたが、探査機を打ち上げるためには超大型ロケットが必要になる。このような超大型ロケットとして、米国はサターンVロケット (3段式、1段目の総推力は約3,400トン) の開発に成功したが、一方のソ連はN-1ロケット (5段式、1段目の総推力は約5,130トン) の開発に失敗し、その後有人月着陸計画は放棄された。国家の威信をかけた米ソ両国の熾烈な宇宙開発競争は、米国が有人月面着陸を成功させて幕を降ろした。

## 2.4. 酸素の取扱いに関連する事故/事件

有人月面探査のような巨大な宇宙開発プロジェクトにおいて使用された液体酸素やガス

酸素の量は膨大なものであり、プロジェクト期間中には多くの酸素に関係する事故/事件が発生した。NASAは1964年から1971年にかけて発生した、各種の事故/事件に関する膨大な量の報告書や記録の中から731件の事故/事件を選択し、その概要、原因、対策を要約した資料<sup>25, 26)</sup>を残している。また、これらのNASAの記録と、一部、空軍の記録から得られた航空宇宙分野における酸素関連の事故/事件だけを選択して分析した資料<sup>5)</sup>もNASAによって作成されている。

1960年代当時、一般の産業分野と比較して、特に高圧、大流量で酸素を使用する宇宙開発分野においては、まだ知識や経験の蓄積が不足しており、技術的にも未熟であった。すなわち、材料の不適合、設計不良、機器類の洗浄不良、検査や作業手順上の不備、誤接続、および管理/監督不十分等に起因する事故/事件が多発した<sup>5)</sup>。運用圧力が高くなるほど酸素システムに使用される材料は発火し易くなるため、優れた酸素適合性を持つ材料を注意深く選択する必要があるが、選択基準を定めるための課題が山積していた<sup>27)</sup>。

これらの事故/事件を受けて、その後、当時のNASAレイス研究センター（現在はジョン・グレン研究センターに改称）をベースに設立されたNASAの横断的組織ASRDI（Aerospace Safety Research and Data Institute, 航空宇宙安全研究およびデータ研究所）が中心になって、NASAで発生した全ての安全問題に関する情報を一つのデータベースに収集し、限られた件数の安全研究の支援も行った<sup>28)</sup>。このような活動の一環として、国立研究機関、請負業者、関連業界、関連学協会等が参加して酸素に関する広範な調査や試験が実施され、その結果が膨大な量のNASA特別出版物として刊行された<sup>6, 18, 29 - 36)</sup>。

エアプロダクツ社がASRDI（NASA）から請け負った調査研究の報告書<sup>6)</sup>には、液体およびガス酸素に関する材料の適合性、運用上の危険性、メンテナンス計画、システム緊急事態、ガス製造業界等における207件の酸素事故/事件の調査と報告、および一連の参考文献等が含まれている。特に、酸素システムで研究開発が必要な分野を特定している点が興味深い。

米国の初期の有人宇宙計画で発生した酸素関連の事故/事件は、現在となっては遠い過去の出来事であるが、現在用いられている酸素を安全に使用するための本格的な基準、指針、ハン

ドブック等が確立されるきっかけとなったものである。

米国に比べて、我が国の航空宇宙活動の規模は遥かに小さく、ロケットや航空機等の開発経験も限られているため、このような航空宇宙分野における酸素関連の事故/事件の情報は貴重である。先人達が、当時どのような知識あるいは経験の不足によって失敗するに至ったのかを具体的に示してくれる。

次章では、米国の航空宇宙分野において、1964～1971年にかけて発生した酸素関連の事故/事件だけを選択して分析した資料<sup>5)</sup>の内容について紹介する。

### 3. NASA における酸素関連事故（1964-1971）

本章では、前に述べた酸素関連の事故/事件だけを選択して分析した資料、NASA TM X-67953<sup>5)</sup>について紹介する。本論文は、1971年11月9-11日にジョージア州アトランタ市において開催された圧縮ガス協会（CGA）主催の「酸素圧縮機と酸素ポンプのシンポジウム」で発表するために提出された技術論文である。以下は、その内容である。

#### 3.1. まえがき

航空宇宙用途における酸素システムの設計と運用の成功は、酸素の生産と使用に関係する産業団体、および主としてその使用に関わる政府機関によって開発された技術に基づいている。NASAは1回の活動で850万ポンド（約3,856トン）以上の酸素を使用しており、貯蔵、供給、および流体システムは安全性を重視して設計されている。

航空宇宙活動においては、酸素が関係する事故/事件が発生すると人命や機材の面で非常に高くつくものもある。酸素の取扱いの安全性を高めるために、NASAレイス研究センターの航空宇宙安全研究およびデータ研究所（ASRDI）は、酸素システムの安全対策の見直しを含む多くの安全関連研究プロジェクトを実施している。

酸素安全プログラムには、危険性（hazards）、酸素の使用におけるコンポーネントとシステムの不具合に関する利用可能なデータ、およびNASAとその請負業者が従うべき酸素取り扱い手順の見直しが含まれる。これらの研究は酸素システムの信頼性を高め、将来の事故発生の可

能性を最小限に抑えるための設計基準と運用基準の開発に資する情報を提供することが期待されている。また、事故が影響を及ぼす範囲と規模に関する研究は、代替コンポーネントあるいはシステムの選択に関して必要な情報も提供する。

地球軌道上の有人ミッションで使用するために現在開発中の推進システム、電力および生命維持システムは大量の酸素を使用している。システムの仕様には、酸素システムの安全性に対して継続的な努力がなされない限り、事故件数の増加をもたらす恐れがある長寿命と再使用機能の要件が含まれている。

### 3.2. NASA の安全目標

宇宙ステーション・フェーズBの研究契約者には、基礎的な基本原則として、NASAによって単一の安全目標が課されている。すなわち、「目標は、要員に重大な傷害を負わせ、乗組員に宇宙ステーションを放棄させるような単一の不具合または起こり得る不具合の組合せあるいは事故が無いこと」である。酸素による信じ難い事故は、過去の経験から証明するのが最も良い。事故を定義し、その原因を特定し、そして改善を推奨するための事故/事件情報の調査は、火災、爆発、漏れおよび与圧の喪失などの酸素の危険性をより深く理解するのに役立つ。

この論文は、主にNASAとその請負業者の記録から得られたかなりの数の酸素事故の情報を示している。航空機の運用に伴う酸素事故に関しては、空軍の記録による幾つかの情報も含まれている。地上試験施設と宇宙飛行体システムにおける液体酸素（LOX）およびガス酸素（GOX）の両方に関する事故とその原因の説明を付録3-Aに示した。これらの事故は、事故/事件の一般的な見出しの下に記載しているが、NASAの基準に基づく事故の種類による識別はしていない。NASA安全マニュアル（参考文献3-1）は、重症度に応じて様々な事故を定義している。すなわち、タイプA事故、タイプB事故、事件（incident）、任務上の緊急事態および航空機事故である（付録3-B参照）。

また、この論文は事故の発生率を減らすことを目的とした多くの安全規制を含んでいる。材料適合性と材料試験に関する問題が議論され、酸素中の材料の発火に影響を及ぼす限られた

情報を示した。さらに、不具合を引き起こす条件の組合せを明らかにするために、付録3-Aに列挙した事故/事件の中から選んだ幾つかの事例についての詳細を説明した。さらなる研究の必要性も示した。

酸素事故情報の主要な情報源は、NASAによる数年間にわたる有人宇宙飛行活動における事故の要約（参考文献 3-2）である。

約1万件の文書から約500件の事故/事件が選択され、参考文献に掲載されている。選択の基準は、重要な教訓を与える事故、宇宙計画を直接的に支援する機器と設備の損傷事故、および人的被害あるいは傷害の原因となった事故としている。記述には、事故の説明、考えられる原因、推奨される是正措置が含まれている。参考文献には、推進剤システムの事故に加えて、宇宙システムおよび地上システムの構造物で発生した事故/事件も含まれている。すなわち、電気システム、地上支援設備、兵器とその関連業務である。酸素に関連する事故は、参考文献から選択されて本論文に含まれている。さらに、具体的な有人宇宙計画では無い計画で発生した酸素事故も含まれている。

事故報告の多くは、原因と是正措置の技術的記述に関して完全に満足できる情報を含んでいなかったが、利用可能な情報を使用して事故の原因となった事象の分類を行った。事故報告書から更なる教訓を得るために原因を分類した。分類には以下のものがある。

#### A. 材料不適合

この基本的な酸素事故の原因には、設計、製造および運用手順の誤りによって使用された適合性の無い材料が含まれている。

#### B. 材料の破壊

設計上の制限内の応力で発生した材料あるいはコンポーネントの破壊を含む。これらには、設計仕様の範囲内で運転中あるいは開発中のパイプ配管、チューブ配管、弁類、ポンプなどが含まれる。

#### C. 設計不良

事故の発生に寄与したコンポーネントあるいはシステムの設計仕様が不十分であったことを含む。

#### D. 洗浄不良

この要因は、事故に寄与あるいは責任がある別個の原因として識別されている。

#### E. 手順不良

この要因には不適切な作業手順、計画、教育、品質管理、および管理監督が含まれる。

これらの基本的な欠陥による事故/事件の分布を、LOXについては図3-1に、GOXについては図3-2に示した。

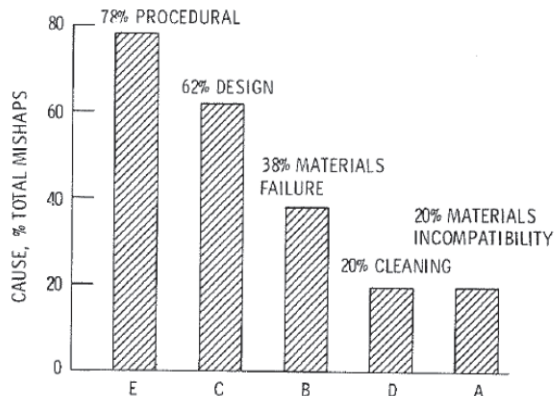


図3-1 液体酸素による事故の原因の分布（多くの事故には複数の原因が関与している） ©NASA

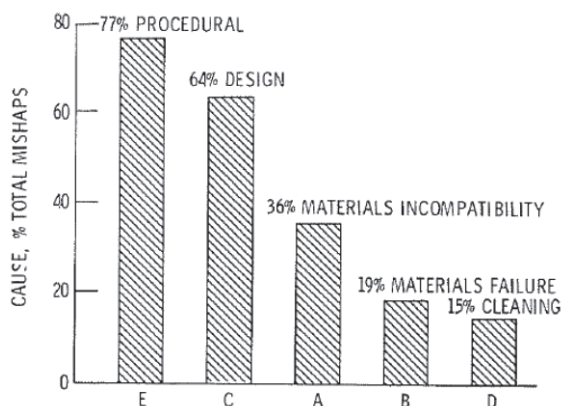


図3-2 ガス酸素による事故の原因の分布（多くの事故には複数の原因が関与している） ©NASA

付録3-Aには液体酸素について計55件の事故、ガス酸素について計47件の事故が記載されており、上図で示した分布の作成に使用した。ほとんどの場合、複数の要因が事故の原因であると考えられた。液体とガスの両方について、手順不良によって最も多くの事故が発生し、その次に設計不良が続いた。

図3-3は、液体酸素とガス酸素の事故原因の数の比較を示す。材料の不適合によるガス酸素事故の大幅な増加は注目し得る。材料と酸素との間で起こり得る反応については、一般に材料の発火には小容積のガスが必要であるため、ガス酸素による事故の数が増えるものと予想さ

れる。発火の熱的なメカニズムでは、その場にガス相が存在しなければホット・スポットが発生しないと仮定している。LOXの接触によって大きな熱吸収が起こるため、熱源が強力で、LOXと加熱された材料との間で起こる化学反応に助けられない限り、LOXに浸漬された材料にホット・スポットは発生しない。従って、液体はガス状態を形成するのに十分な熱が伝達されるまで、材料と酸素との如何なる反応も開始させる効果が低下するであろう。材料を発火させる高温を発生させるための手段である断熱圧縮も、極低温においては効率的では無くなる。断熱圧縮による理論的な温度は、最終圧力と初期圧力の値および比熱比（酸素については1.4）から計算することが出来る。3倍の温度比を生み出すことが可能な約47の圧力比によって、最初300 Kの酸素は900 Kまで加熱され、一方で90.1 Kの酸素の気泡は270 Kまで加熱される。冷たい気泡でも900 Kを得ることは可能であるが、初期圧力が1気圧の場合、必要な圧力は約3,100気圧にもなる。

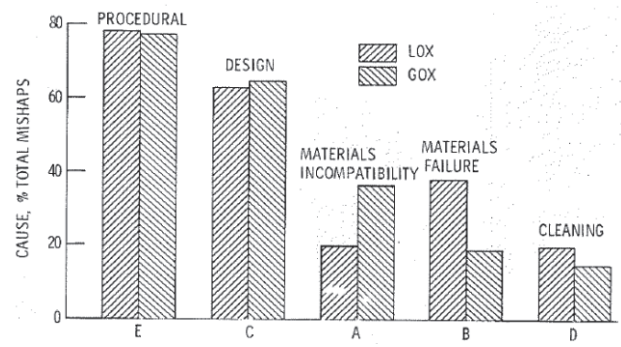


図3-3 液体酸素とガス酸素の原因の比較 ©NASA

材料の損傷は、ガス酸素よりも液体酸素においてより多くの割合を占め、恐らくは低温で使用する材料の機械的性質の変化によるものと思われる。低温における延性材料と脆性材料の両方の靱性の変化は、通常は機器の設計において考慮されるが、恐らくこの情報は低温の機械的特性の中では最も理解されていないものであろう。靱性の測定手法には衝撃試験、切り欠き引っ張り試験および引っ張り伸び試験が含まれるが、低温における応力下、特に欠陥の存在下での材料の挙動は事故を避けるためには十分に理解されていない。

列举した原因による事故の分布は、安全手順を守ることに失敗した多くの明白な事例や改善すべき分野を示している。酸素取扱いの詳細

な手順を作成してそれを実施することにより、事故の数を減らすことができるであろう。これらの手順には、酸素システムの安全運用の詳細だけでなく、推奨手順を実施するための計画、教育、品質管理、管理監督方法の提案が含まれていなければならない。また、コンポーネント設計とシステム設計の両方における改善も、事故の数を減らすのに大きな影響を与える。

機器の主要な損害と死亡者の大半は、火災と爆発によって引き起こされている。材料はガス酸素と反応するが、火災や爆発事故の原因となる発火源と分離するのは困難である。

この事故/事件の調査によって、衝撃、摩擦、化学反応、静電気、電気火花、およびガスの圧縮による熱の全てが、酸素中における幾つかの材料の発火原因であることが示されている。

手順不良および設計不良によって引き起こされる事故を減らすために、多くの実際的な安全規制を導入することが可能であるが、材料の適合性と発火の問題を解決するのはより困難である。ガス酸素または液体酸素、高圧または低圧などの特定の状況下で、積極的な安全のためにどのような材料を使用すべきかについては答えることができない。酸素で使用するために材料を評価して格付けする方法が開発されており（参考文献 3-3, 3-4, 3-5）、これらの研究が継続されている。これらの評価試験には、材料の引火点と発火点および衝撃感度の決定が含まれている。電気的な放電に曝された場合に、材料の相対的な反応性を決定するために、引火点および発火点の試験法が開発された。引火点は、試験雰囲気と火花エネルギーが共存した場合に、物質が非持続性の発火または火炎を生じる可燃性蒸気を放出する最低温度である。発火点は、物質が発火後も燃焼を継続する可燃性蒸気を放出することを除けば、同様である。不適合材料の使用が原因の多くの事故が示されているが、評価試験に基づいた適合性のある材料が使用された条件下でも事故が発生している。酸素中で材料が発火する、あるいは発火しない条件を規定するのは困難である。発火の容易さは、材料の細分化状態、異物の存在、そして他の多くの状況に依存する。一般に、構造用金属は比較的高温に加熱された後にのみ、酸素中で燃焼する。しかし、十分に細かく分割されていれば、鉄、鉛、ニッケルおよび多くの他の金属類が空気中で自発的に発火する。酸素システム

中の異物は、しばしば酸化反応速度に影響をおよぼすため、高度な洗浄が容易になるように設計する必要がある。酸素システムにおいては、コンポーネントに衝突する粒子の速度、質量および形状の影響は十分に明らかにされていない。配管類、ポンプ類、および弁類の材料の発火は、粒子の衝突によるものである。多くの事故を引き起こした原因と推定される摩滅あるいは摩擦による発火を防止する方法は適切に定めることが出来ない。

ポリマー材料は、酸素感受性試験に基づいて酸素システムで使用することが推奨されているが、依然として航空宇宙用途においては安全上の危険をもたらす可能性がある。使用される多くの金属と同様に、ポリテトラフルオロエチレン絶縁材は潜在的な燃料であり、発火に必要なのは十分なエネルギーを持った着火源である。フッ素化合物の分解生成物は、これらの金属から保護酸化物を除去する傾向があるため、テフロン (Teflon) および他のポリマー材料は、アルミニウムおよび他の金属にとって特に効果的な着火源となり得る。さらに、推奨されるポリマー材料は、酸素富化環境で試験した場合に発火しなかったり、自己消火したり、あるいは燃焼速度が遅くなるかもしれないが、分解生成物は有毒であり、人員に危険をもたらす可能性がある。発生する有毒ガスおよび蒸気には、フッ化カルボニル ( $\text{COF}_2$ )、一酸化炭素 ( $\text{CO}$ )、ホルムアルデヒド ( $\text{H}_2\text{CO}$ )、フオスゲン ( $\text{F}_2\text{CO}$ )、フッ化水素 ( $\text{HF}$ )、クロロフォルム ( $\text{HCCl}_3$ )、シアン化水素 ( $\text{HCH}$ )、および塩化カルボニル ( $\text{Cl}_2\text{CO}$ ) が含まれる。多くのポリマー材料について、エアロスペース社によって編集された、温度の関数として熱分解毒性を評価した結果を図3-4（参考文献 3-6）に示す。

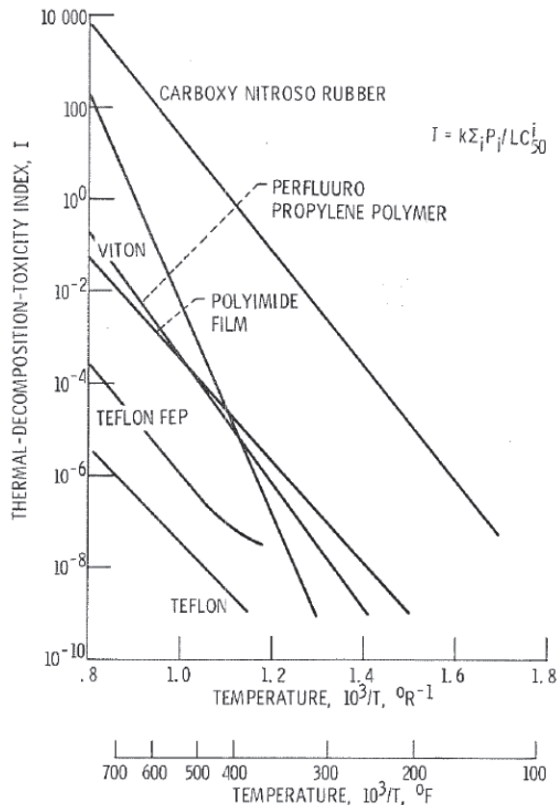


図3-4 温度に対する熱分解毒性指数 ©NASA

熱分解毒性指数 $I$ は、毒性生成物の発生による危険性の直接的な尺度であり、次のように定義される。

$$I = k \sum P_i / LC_{50}^i$$

ここで、 $k$ は重合体の分解速度定数 ( $\text{hr}^{-1}$ ) であり、分解温度 $T$ の関数である。 $P_i$ は生成ガス中の分解生成物 $i$ のモル%であり、 $LC_{50}^i$ はppmで表した生成物 $i$ の毒性である。

500°Fから700°F (約260°Cから371°C) まで加熱した場合のポリマー材料の相対的な毒性の順序は、テフロンTFEが最も毒性が低いことを示しており、続いてテフロンFEP、ポリイミド・フィルム、バイトン、パーフルオロプロピレン・ポリマー、およびカルボキシニトロソ・ゴムである。低温においては優劣の順序が僅かに変わり、また、高温においては分解生成物の再編成が起こるため、毒性指数が実質的に変化することがある。全ての材料が加熱によって有毒な分解生成物を生成するという事実は、材料の燃焼を制限してNASAの有人ミッションの安全を図るためには事故と火災の防止が必要であることを指摘している。

### 3.3. 安全に関する推奨事項

酸素事故を引き起こした多くの問題に対する解決策は、更なる研究開発の努力無しには具体的に規定することが出来ないが、運用上の安全性を高めるために幾つかの実用的な安全規制が推奨されている。付録3-A中の特定の事故に基づいたこれらの推奨には以下の事項が含まれる。

- 設計によって燃料、酸素およびパージ配管の誤接続を防止し、メンテナンス作業によるその後の変更を無制限に許さない。
- 全てのフレキシブル配管を一定の間隔で適切に拘束する。
- 火災を起こして促進する可能性のある電気システムやその他の着火源の近くにおいて、酸素の放出や廃棄を行わない。
- ガスの圧縮による熱発生を制限するために、酸素の弁類の動作速度を制御できるようにする。
- 圧力配管には運用圧力、耐圧、設計破壊圧力を表示したラベルを貼る。
- 点検、運用、あるいはメンテナンスを行う前に、液体およびガス圧力システムについて作業前の危険分析を実施する。
- 液体およびガス配管を切り離す前に、確実に脱圧されていることを確認する。
- タンク類、配管類および関連機器類について全ての変更記録を保管する。実施した作業については、機器の継続的な使用を評価するために利用可能でなければならない。
- 使用する流体は識別される必要があり、環境室の作業で使用するガス混合物の組成の検証が含まれる。
- 液体酸素の充填速度は、ダクトおよび機器の疲労能力に見合うように設定する必要がある。材料の損傷は、過度の充填速度によって発生する低応力、高周波振動によって誘発される。発生した振動を測定して監視するために、計測器を設置する必要がある。
- 電気システムを酸素システムに接続するための基準を確立する必要がある。室内灯と照明設備の電気アーク放電の問題を解決する必要がある。
- 酸素と材料の適合性に関する試験およ

び現場経験の結果について、最新情報を確実に入手する。

### 3.4. 選定した事故についての考察

報告書の調査によって、事故が相互に作用する多くの要因によって発生することが示された。この論文では、原因を幾つかの不良の一つとして特定するための努力を行った。各事故の原因となる不良の相互作用を説明するために、酸素圧力調整器の損傷、発射台における車両火災事故、アポロ13号の飛行事故について、付録3-Aに示したものよりも詳細な説明を行った。

#### 1) 酸素圧力調整器の損傷

100%酸素吸入器の点検中に、酸素吸入器の高圧側でフラッシュ火災が発生した。この装置には2,200 psig (約15.2 MPaG) の酸素が充填され、射場作業の緊急時用機器として配備されていた。火災の発生源は、圧力調整器の1次側にあるナイロン製弁シートであった。発火は、システム内で見つかった小さな金属粒子によって助長された可能性が最も高い。酸素吸入器の調整器の模式図を図3-5に、破裂した安全弁の写真を図3-6に示す。図3-7に、調整器本体の燃焼部分の写真を示す。

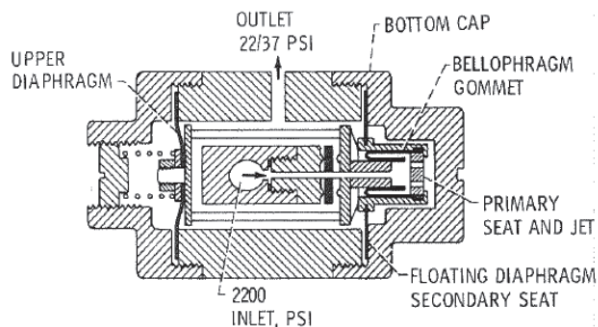


図3-5 様々な構成部品の機能を説明した酸素吸入器用圧力調整器の断面図 ©NASA

事故は、十分な品質管理を提供しなかった手順不良によって発生した。すなわち、不適合材料を使用し、ステンレス鋼製の入口弁カムシャフトとアルミニウム製ハウジングとの間でかじりが発生するようなシステム設計不良によるものである。システム内で発見された金属粒子の原因は、金属のかじりによるものである可能性が最も高い。入口弁カムシャフト・アセンブリの再設計、および調整器にフィルター網を装着することが最低限必要な変更である。調整

器で使用される様々なゴムとプラスチック製のソフトグッズを表3-1に列挙した。調整器入口の弁シートに使用されているテフロンを除いて、全ての材料が高圧酸素システムには適合性が無いと見なされる。

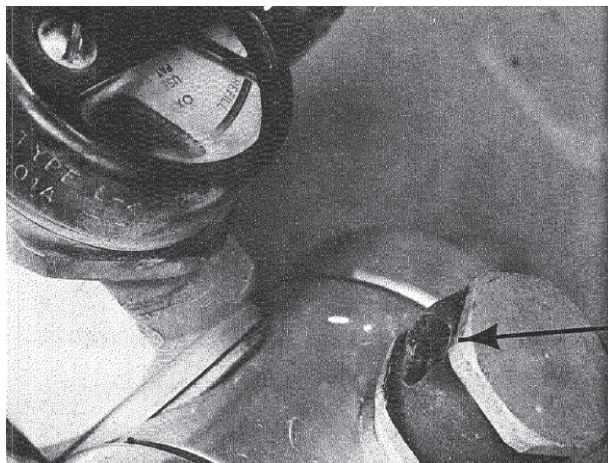


図3-6 破裂した安全弁と圧力計のフラッシュ発火損傷を示した酸素吸入器の調整器 ©NASA

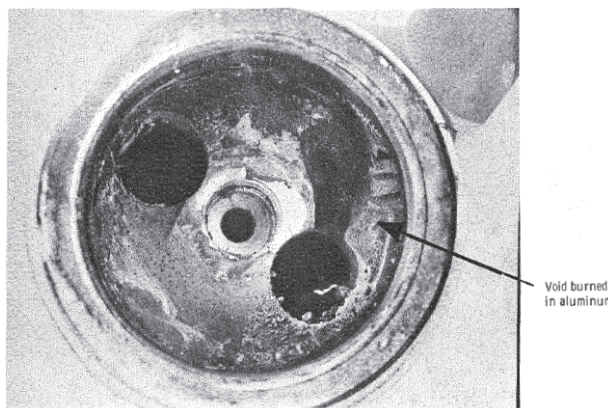


図3-7 アルミニウム製調整器本体の内面の様子 ©NASA

この事故は特定の会社が製造した酸素吸入器で発生したが、他社製の酸素吸入器と純粋な人工呼吸器の検査も実施した。5社が製造した人工呼吸器が検査され、主にNASAの刊行物、ガス酸素システムの材料適合性(参考文献 3-7)、に含まれるデータに基づいて判定された各項目の可否によれば、各人工呼吸器で分析された材料の50～90%が許容できなかった。許容可能な代替品の使用が推奨される。

表3-1 酸素吸入器で使用するゴム、樹脂類

サンプルの説明	組成
一次側シート	6/6 ナイロン
ジェット基部の O リングシール	ブタジエンアクリロニトリルゴム
浮動部材ダイアフラム	クロロプレン(ネオプレン)ゴム
浮動ダイアフラム繊維強化材	木綿
入口弁カム軸端 O リング	ブタジエンアクリロニトリルゴム
ベロフラム	ポリブタジエンゴム
二次側シート	クロロプレン(ネオプレン)ゴム
入口弁シート	テトラフルオロエチレン樹脂 (TFE テフロン)
調整器コア O リング	ブタジエンアクリロニトリルゴム
上部ダイアフラム	ブタジエンアクリロニトリルゴム
上部ダイアフラム強化繊維	ナイロン
安全弁ゴム	天然ゴム

## 2) 射場における車両火災

発射台の清掃作業中に、3台の警備車両が酸素富化区域に乗り入れ、警備員達が駐車してエンジンを止め、区域を警戒するために外に出た。通常作業の一環として放出中であったLOXが気化して車道に漂い、3台の車両に重大な火災被害をもたらす酸素雲を作り出した。アポロ・サターン飛翔体に充填するためのLOXポンプの運転前と運転中には、通常、貯蔵区域の配管の予冷に使用されたLOXが周囲のフェンスを越えた場所にある溝に放出される。図3-8に、LOX貯蔵タンク、3台の駐車車両、および放出用溝の位置関係を模式的に示した。幅約40フィート（約12.2 m）、深さ5フィート（約1.52 m）の排出溝は、液体酸素貯蔵タンクから約227フィート（約69.2 m）の位置にある。

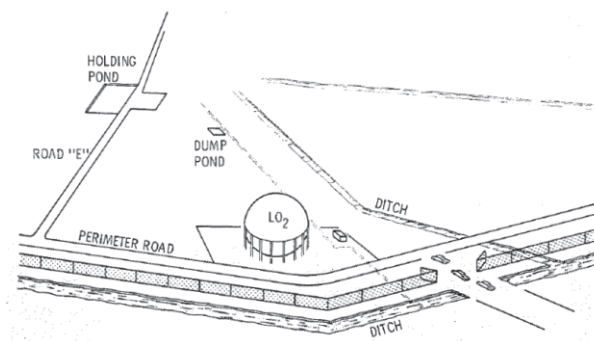


図3-8 LOX貯蔵所と排水溝の区域 ©NASA

図3-9に、溝に予冷用LOXを放出するための放出口を記した模式図を示す。1,000 gpm（約3,785 L/min）ポンプの予冷に使用された放出口No.1を40分間開け、8,000ガロン（約30,282 L）

を溝に排出した。

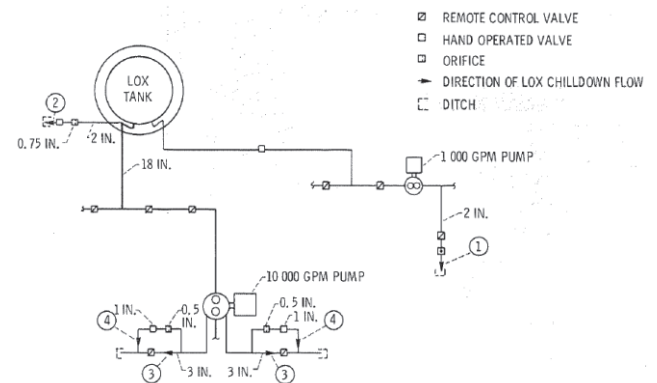


図3-9 LOX予冷放出口から排水溝までを示したLOXシステムの概略図 ©NASA

放出口No.2は、10,000 gpm（約37,850 L/min）の吸い込み口の18インチ径T継手の予冷に使用され、全部で2,250ガロン（約8,517 L）が排出された。放出口No.3は10,000 gpmの予冷に使用され、放出口No.3から3分間放出した後に放出口No.4が開けられ、全部で860ガロン（約3,255 L）を溝に排出した。溝に放出されたLOXの総量は約11,000ガロン（約41,635 L）であり、ガス状酸素の容積は、5エーカー（約20,235 m<sup>2</sup>）、10エーカー（約40,470 m<sup>2</sup>）、および20エーカー（約80,940 m<sup>2</sup>）の広さを、それぞれ濃度100%、60%、40%の濃度で4フィート（約1.22 m）の高さに覆うのに十分であろう。

調査の結果、3台の車両の内の2台が、エンジンの熱、可燃性物質、および富化酸素雰囲気による自発火によってエンジンルーム内で火災を起こしたことが明らかにされた。残りの車両は、明らかに運転者がエンジンを掛けようとしたときに発火した。この車両もまた酸素富化雰囲気の中にあった。



図3-10 焼けた車両と酸素タンクおよびフェンスとの関係 ©NASA

図3-10に、フェンスと酸素タンクに対する炎上車両の位置関係を示す。各車両の調査結果に関する事故の公式報告書(参考文献 3-8)には、以下のような詳細なコメントが含まれていた。

#### 車両No. 1 (図3-11に拡大写真を示す)



図3-11 被災車両 No. 1 ©NASA

- (a) 作業者によれば、火災は最初エンジンルーム内、ここは調査時に最も強い熱の痕跡があった、で見られた。発火場所はエンジンルーム内であったと考えられる。
- (b) 運転者は、車両は通常の動作温度になるのに十分な時間運転され、火災に最初に気付いたとき、車両のイグニッション・スイッチは約 5 分間切られていたと述べている。
- (c) 通常、上記の条件におけるエンジン部の金属の温度は、約 600°F (約 316°C) かそれ以上に達する。冷却システム全体の停止によって、エンジン停止後のフード下の温度は上昇する。高くなったあるいは高い温度は、気化器のフロート面からエンジンルーム内にガソリンを気化させ、酸素飽和雰囲気によって可燃性物質の発火性が増したと考えられる。バッテリーから排出される水素ガスが、フード下の可燃性雰囲気の原因である可能性もある。

#### 車両No. 2 (図3-12に拡大写真を示す)



図3-12 被災車両 No. 2 ©NASA

- (a) 調査の結果、最も強い熱がエンジンルーム内に存在したことが明らかになった。運転者は、イグニッション・スイッチを始動位置に回した時に、エンジンルームでパンという音がした後に火災に初めて気付いたと述べている。イグニッション・スイッチが入れられたとき、フード下の何らかの可燃性物質が酸素飽和雰囲気中で発火したと考えられる。可燃性雰囲気を発火させることが可能なスパークは、点火シーケンスに関係する電気部品のどれかで発生した可能性がある。エンジンのクランクケース内で火災が発生したという証拠は無い。
- (b) 運転者は、車両はたった数分の短距離しか使用しなかったと述べた。これに基づけば、エンジンは通常の動作温度に達していないであろう。しかし、フード下の雰囲気は、電気火花で発火する十分な可燃性蒸気を含んでいたものと考えられた。

#### 車両No. 3 (図3-13に拡大写真を示す)



図3-13 被災車両 No. 3 ©NASA

- (a) 調査の結果、エンジンルーム内で最も強い熱が発生したことが明らかになった。得られた証拠は、火災が最初にエンジンルーム内で発生したことを示している。発火場所は、エンジンルーム内であったと考えられている。
- (b) 運転者は、火災が最初に認められたときに車両は動作していなかったが、通常の運転温度に到達するのに十分な時間運転されていたと述べている。
- (c) フード下の雰囲気は車両 No. 1 のものと同様と考えられる。すなわち、高温と気化器から出た比較的濃度の高いガソリン蒸気が、酸素飽和雰囲気によって強められた、自発火あるいは電気火花によって

発火し得る環境を作り出した。

酸素雲や酸素富化雰囲気の中で動作している車両は、発火の可能性が高くなるために危険である。これらの雰囲気においては、発火に必要な最小エネルギー、引火点温度、および自発火温度の全てが低下する。事故の原因には、システム設計不良、手順不良および教育不良の組合せが含まれていた。全ての充填および放出システムには、酸素雲を確認して追跡し、管理する方法が含まれていなければならない。緊急車両のための代替ルートと酸素雲に突入する作業者の防火対策の手順が記述されている必要がある。

安全教育の教程には、LOX蒸気災害に関する認識と安全な作業を確実にするための更なる情報が含まれていなければならない。LOX蒸気の発生が疑われる区域およびその周辺における安全作業については、安全教育の過程でその概要が説明される必要がある。

現在の作業慣行には比較的大量の酸素と窒素の放出が含まれており、蒸気雲の形成を招く。これらの蒸気雲は、大気条件に応じてかなりの時間滞留が続く可能性があり、それらに接する作業員や機器を重大な危険にさらす。このような酸素蒸気雲の発生とその性質、それらに関する危険性、および予防方法あるいはそのような蒸気雲の中における安全な作業方法の評価を可能にするために、更なる研究が行われる必要がある。

### 3) アポロ13号の飛行事故

アポロ13号の事故は、主として燃料電池と司令船に酸素を供給する酸素タンクの破裂によって始まった。酸素を失ったことによって、燃料電池による電力の喪失が生じた。しかし、宇宙船が事前に想定していた不測の事態は、月着陸ミッションの乗組員達が緊急事態を克服し、利用可能な生命維持装置を使用して安全な状態に戻すことを十分に可能にした。詳細な調査は、事故の原因と最終的な電力喪失に至る事象の相互作用の詳細について合理的な説明を提供した。設計上の弱点、材料不適合、品質管理（検査を含む）不良、および手順不良の全てが事故に寄与した。

図3-14に、アポロ/サターンV打ち上げ機の様々な主要システムの概略を示す。

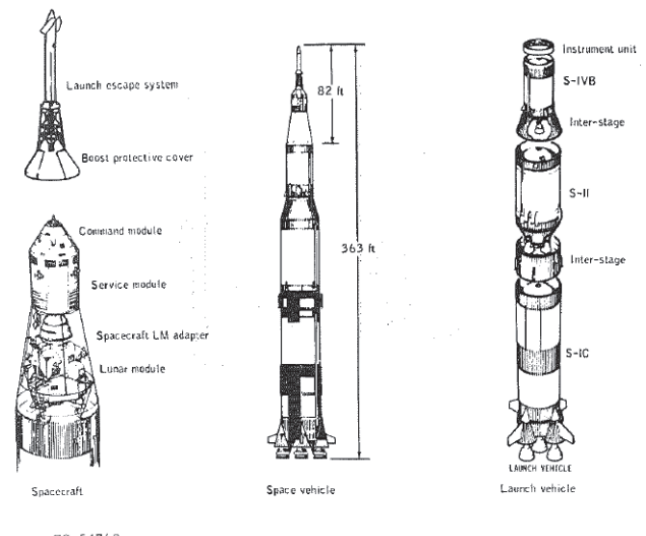
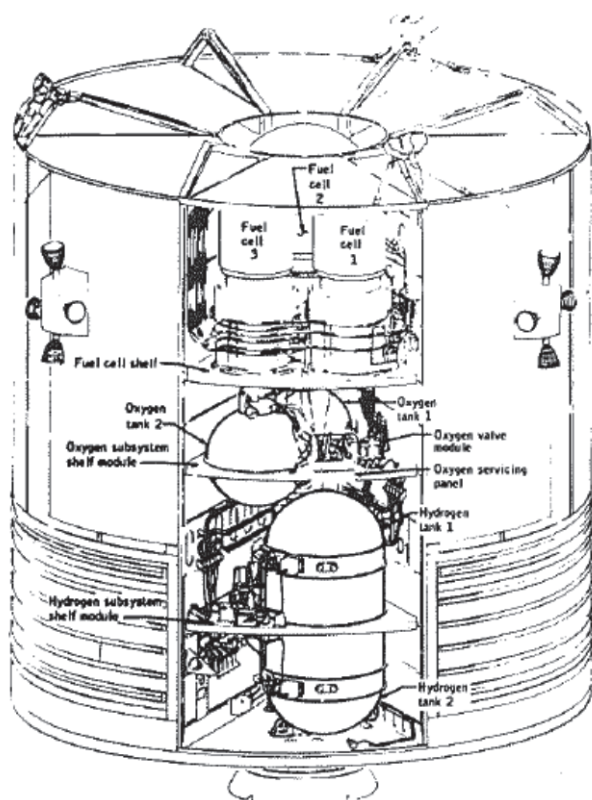


図3-14 アポロ/サターンV宇宙飛翔体 ©NASA

酸素タンク、水素タンクおよび燃料電池は、宇宙船の機械船内に配置されている。図3-15に、機器の配置を示す。図3-16に、酸素タンク内部の構成要素を示す。各タンクの2つのヒーターは、酸素タンクを設計圧力に保つために必要な熱を供給する。ファンは、超臨界酸素中に存在する如何なる層状化も軽減させるために、加熱エレメント上で酸素を循環させる。

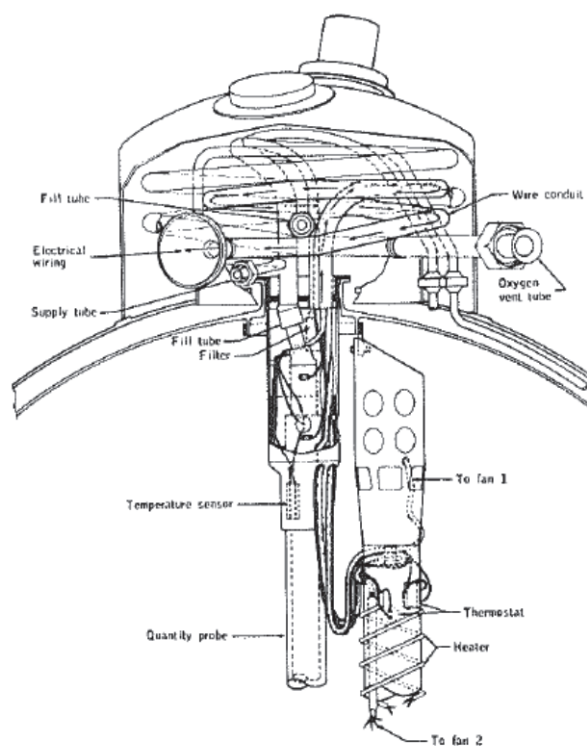
飛行中に得られたデータは、電気ファンの回路が作動した時に酸素タンク（No. 2）の内部で問題が発生したことを示していた。絶縁されたタンクのファン回路に、いくつかの短絡が検出された。短絡によって160Jもの多量のエネルギーが発生し、これは酸素中に浸されたファン回路配線のポリテトラフルオロエチレン（テフロン）絶縁材を発火させるのに十分なエネルギーであることが試験によって示されている。

ファンモーターとヒーターのための電力リード線と計器用リード線を収納した電線管は、ハーメチックシール内で真空シールを介して取り付けられ、その後約1/2-インチ直径のチューブ配管を通して酸素容器に通される。図3-17および図3-18に、酸素タンクの配線と配管を示す。配線を収納した1/2-インチ配管は、約3回巻きの直径10-インチのコイル状に成形されている。電線管の内部は、ハーメチックシールの部分まで加圧された酸素と接している。



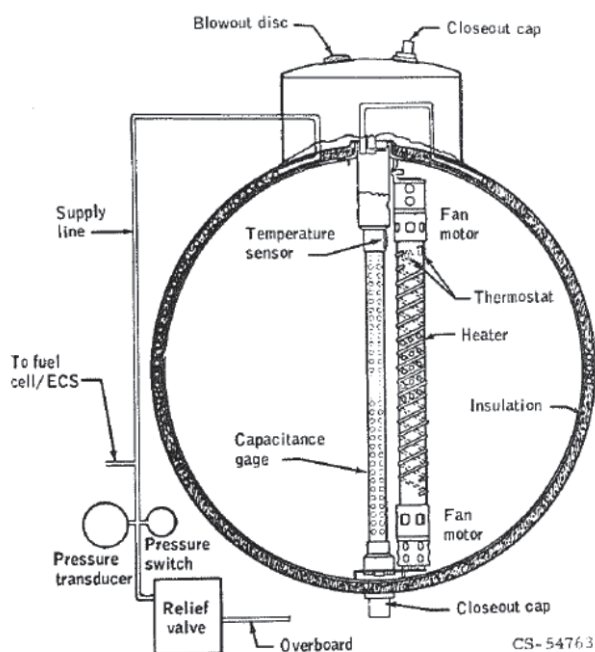
CS-54766

図3-15 格納部4における燃料電池と極低温システムの配置 ©NASA



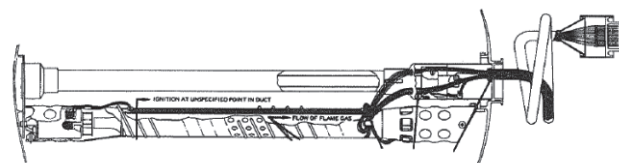
CS-54764

図3-17 酸素タンクの配線と配管 ©NASA



CS-54763

図3-16 酸素タンクNo.2の内装部品 ©NASA



CS-14899

図3-18 酸素タンク内の配線 ©NASA

電力線の絶縁材は、電線管の振動と電線が互いに擦れることによって摩耗した可能性がある。電線管にリード線を組み込む方法は、配線に歪みを起こして絶縁材の摩耗を増加させる可能性がある。これらの状況は、電力用リード線の短絡によって発生する十分なエネルギーが周囲のテフロンを発火に至らしめる可能性がある。おそらく、テフロン絶縁材の火災がタンクの上部にある電線管内に伝播し、タンクのサービス区画方向に穴を開けた。電線管が焼け抜けたために、区画内の圧力が上昇し、区画を囲んでいたパネルが外れた。おそらく、パネルが区画から分離したことによって、酸素供給弁が閉じるのに十分な衝撃が発生した。おそらく、酸素システム（タンク1内の）は、パネルの分離あるいはタンク2の電線管の損傷に関係する衝撃によって漏れが発生した。図3-19に、機械船の区画にある酸素タンクの写真を示す。

酸素タンクで行われた作業および試験手順の調査によって、カウントダウン実証試験中にこの異常に関係する酸素タンク抜き取り（detanking）手順上で問題が発生したことが判明した。充填実証後に酸素タンクを空にするための通常の手順が実行できず、代わりにタンクヒーターとファンを用いて流体を沸騰させる方法が使われた。内部のサーマルスイッチによる保護があるため、タンクまたはそのコンポーネントに損傷が発生しないと考えられた。

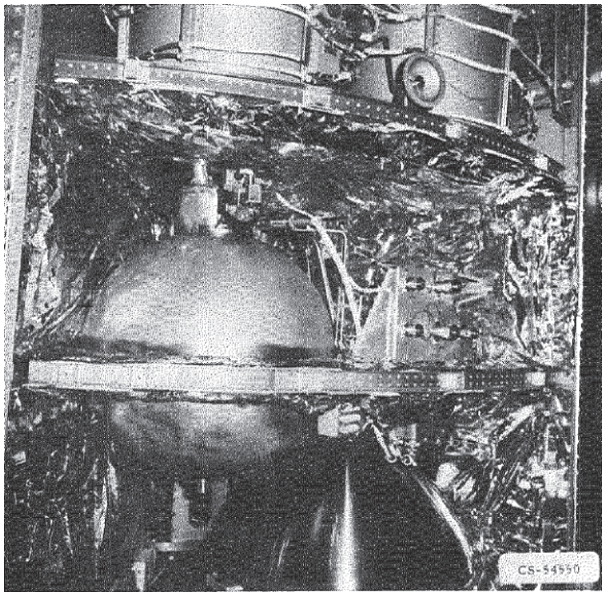


図3-19 機械船格納部内の酸素タンク ©NASA

過熱を避けるために、温度に敏感なインターロック装置が各加熱要素に直列に接続された。内部ヒーター管の壁の温度が90°F（約32℃）に達すると、ヒーター回路は自動的に切れ、70°F（約21℃）で入れられる。タンクを空にするのを助けるのにヒーターを使用するためには、手動モードで操作する必要がある、これは各ヒーターの通常の動作条件の2倍の負荷でスイッチを切る結果になる。試験では、これらの条件下でスイッチを切ると、電源が遮断された瞬間に、接点が溶けて閉じることが示された。試験では、発射前作業の間、ヒーターを入れておくと、ファンモーター配線の絶縁が著しく劣化することが確認されている。図3-20に、シミュレートされたヒーター試験によって損傷したファンモーター配線の写真を示す。図3-21に、シミュレートされた試験で得られた溶解したサーマルスイッチ制御器の写真を示す。



図3-20 損傷したテフロン絶縁材 ©NASA

このような事故の研究（そして特に実際の発生のシミュレーションを用いた研究）は、類似の飛行体システムにおけるこのような事故の可能性を減らす積極的な是正措置を提供するだけでなく、同じ推進剤を使用するシステムの改善された安全設計と運用の範囲を示している。更なる調査、研究および開発が必要な問題もまた認識されている。

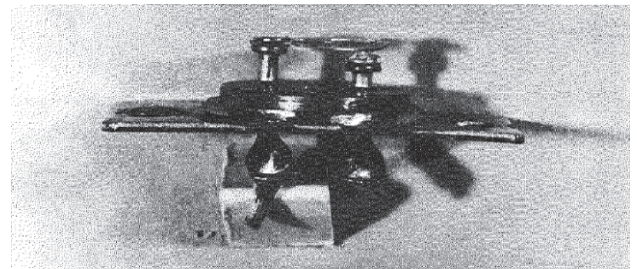


図3-21 溶けた温度スイッチ制御器 ©NASA

この事故に起因するNASAの取り組みの例には、アポロ宇宙船の全ての酸素システムの見直しと解析が含まれるだけでなく、酸素システムにおいて金属と材料類が熱/発火源と共存した場合の重大性が新たに認識された。多数の具体的な設計変更や緊急措置には以下のものが含まれる（参考文献 3-9, 3-10）。

- (a) 機械船（service module）内の O<sub>2</sub> タンク類と供給システムの再設計と交換
- (b) 司令船、機械船のバックアップ操作のために追加のバッテリー電源を装備
- (c) 緊急時運用と緊急時計画のためのアポロシステムの見直しと改善
- (d) アポロおよび他のシステムにおける全ての酸素システムの見直しと解析
- (e) LOX および他の酸化剤を使用した地上システムと飛行システムの危険および認識されていない欠陥について、全ての NASA 機関による見直しと解析の実施
- (f) 酸素システムにおいて、金属と材料類が熱/着火源と共存した場合の重大性を新たに認識
- (g) 異常が発生した場合の報告書の強化

- (h) 納入業者、下請け業者、および供給業者との密接な品質管理交流の維持

### 3.5. おわりに

NASAは、用意された報告書の中には事故の技術的な記述が不十分、あるいは事故の原因となったハードウェアおよび/あるいは運用手順が特定されていない、ものがあることを認識している。このような情報を含めるために、報告手順を変更する方法を調査するための努力が現在行われている。報告の要件には、システムを継続使用するために推奨される是正措置のより詳細な記述も含まれる。事故の詳細な損害見積額を含めることは、リスク管理予防プログラムを確立するために必要な情報を経営陣に提供する上で相応な助けになるであろう。

付録3-Aに示した酸素事故事例の作成と調査、いくつかの事故の原因となる相互作用効果の簡単な説明は、解決すべき問題のいくつかを強調し、適切な飛行安全システムを確立するための基本的な情報を提供する。このような研究は、酸素に関する潜在的な危険性を判断し、そのような危険性の影響を評価するのに役立ち、最終的には予防対策および改善対策を確立するのに役立つ。

### 3.6. 参考文献(3章分)

- 3-1. NASA Safety Manual, Basic Safety Requirements, NHB 1700.1 (Volume I). NASA, Washington, D.C.
- 3-2. NASA Manned Space Programs, Accident/Incident Summaries, March 1970.

- NASA, Washington, D.C.
- 3-3. Pippen, D.L. and Stradling, J.S.: Techniques for Determination of Flash and Fire Points and Impact Sensitivity of Materials in a Gaseous Environment. Materials Research and Standards, Volume II, No. 6, June 1971.
  - 3-4. Blackstone, W.R. and Ku, P.M.: An Assessment of Impact Test Techniques for Determining the Fire and Explosion Hazards of Materials Exposed to liquid Oxygen. Materials Research and Standards, Volume II, No. 6, June 1971.
  - 3-5. George C. Marshall Space Flight Center, Testing Compatibility of Materials for Liquid Oxygen Systems, MSFC-SPEC-1068, NASA, September 16, 1966.
  - 3-6. Epstein, G. and Hecklen, J.: Relative Toxicity of Selected Polymeric Materials Due to Thermal Degradation. Materials Science Laboratory, Aerospace Corporation, Aerospace Report No. TR-0066(5250-20)-3, December 15, 1969.
  - 3-7. NASA, John F. Kennedy Space Center, Analytical Laboratories Division, Materials Compatibility for Gaseous Oxygen Systems. November 5, 1969, MAB 3268-69.
  - 3-8. NASA, John F. Kennedy Space Center, Investigation of Circumstances Surrounding Incident Resulting in Destruction by Fire of Three Motor Vehicles in Vicinity of Perimeter Fence on Pad A of LC-39 on March 25, 1970.
  - 3-9. NASA, 1970 Accident and Injury Data, NASA Safety Office, Washington, D.C., 1971.
  - 3-10. NASA, Report of Apollo 13 Review Board, With Appendices, December 1970.

## 付録3-A LOX極低温システム 液体酸素による事故/事件

\* 原因欄の最後にある括弧書きは筆者による原因の分類である。

No.	事故/事件の概要	原因
1	計装配線による発火によって液体酸素用ピッグテイル（筆者注：pigtail、弁や計器を保護するための、豚の尻尾のように丸まった配管のこと）放出弁で火災が発生した。システムに大規模な被害が発生した。	LOX 弁に漏れを発生させた弁設計上の不備および計装回路の不適切な設置。 （設計不良）
2	LOX 継手に不適切な潤滑剤が使用されたために、弁を開けたときに液体酸素容器が爆発した。	材料不適合および LOX 継手に認められていない潤滑剤の使用を防止するのに不適切な手順と教育。 （手順不良、教育不良）
3	ブースターエンジンの燃料噴射器システムの認定試験中に、試験設備で大きな爆発と火災が発生した。試験供試体と設備に大きな被害が発生した。	LOX 分流板が疲労によって損傷し、LOX を試験エリアに放出させた材料の不具合。被害に寄与した原因としては、試験エリアの清潔さと掃除の不十分がある。 （設計不良、材料不適合、清掃不良）
4	ブースターエンジン用ターボポンプの認定試験中に、ポンプが 33 回目のスタートで爆発した。	LOX シールとスリンガーの間、およびインペラーとバックプレートの上に過大な擦れが生じる不適切な隙間があるというポンプ設計上の不備。 （設計不良）
5	ステージの LOX 充填作業中に、低応力/高周波数の振動が、GSE（筆者注：Ground Support Equipment、地上支援装置）充填ダクトの漏れと作業の停止を引き起こした。	過大な充填速度によって引き起こされた材料の損傷。10,000 gpm（約 37.9 m <sup>3</sup> /min）の高速充填が終わり、低速充填が終わりに近づいていた。技術的な検討において、最適な充填速度を決定するための疲労解析が行われていなかった。 （設計不良、手順不良）
6	テストスタンドにおいて、LOX 移送作業が完了した後、LOX 移送弁が不注意で開けられたままとなり、6,3000 ガロン（約 238.5 m <sup>3</sup> ）の LOX が流出した。	移送手順は“弁閉”で終了していたが、実際には開いていた。ブリード弁は残液を排出するために正しく開けられており、タンク内の LOX が移送弁を通して排出された。 （手順違反、ヒューマンエラー）
7	始動タンクをチェックするエンジンシーケンス中に、エンジン弁が開けられたときに LOX 流量計の回転が発生した。回転は 700 RPM で 106 秒間続いた。被害は無かった。	タンク放出弁が 110 分間閉じられていた間に、LOX システムの圧力が上昇して圧力差が生じた。タンク放出弁閉鎖の時間制限に関する評価が行われなかったため、不備には設計と手順の両方が含まれていた。 （設計不良、手順不良）
8	弁を開けたときに LOX 容器の爆発が発生した。	適合性の無い潤滑剤が使用され、LOX 装置の検査を行う作業管理手順が不適切であった。（材料不適合、手順不良）
9	圧力調整器に不適切なブリード・プラグが取り付けられたために、不用意に過加圧されたときに、LOX システムで爆発が発生した。	作業管理手順の不備とブリード・プラグの不適切な識別。原因は試験装置の不適切な検査である。 （手順不良、検査不良）
10	LOX をタンカーからタンカーに移送中に、主弁が故障してランプに 3,200 ガロン（約 12.1 m <sup>3</sup> ）の LOX が放出された。	加圧コイル用の液体制御弁の設計に不備があった。明らかにタンク内のバップルの 1 つから由来したと分かるアルミニウムの破片が詰まっていた。事故は、タンクとシステムの設計上の不備によるものであった。 （設計不良）
11	試験後の推進剤抜き取り作業時に、LOX の放出中に電氣的なショートによって発火し、放出口で火災が発生した。	LOX ベント装置の設計上の不備によって、電気配線が設置されている部分に LOX 蒸気が放出されるように配置されていたことが原因である。 （設計不良、施工不良）
12	試験後の安全化作業の間に、テストスタン	後にターボポンプの試験が予定されていたので、システ

	ドで大量の LOX 流出 (26,000 ガロン = 約 98.5 m <sup>3</sup> ) が発生した。配管システムの排出弁が開にされた後に昼食時となり、その間タンクの弁が開けたままにされた。	ムは試験後に運転モードのままにされた。その後、安全であることの決定がなされた。技術者は、タンク弁を閉じた状態で行うべき通常の排液操作を行い、タンク弁を閉めなかった。弁に対する有効な確認手順が無かった。 (手順不良)
13	ステージ燃料システムのヒューマンファクター解析において、燃料試験配管のフレキホースと LOX 感知フレキホースが誤接続される可能性が発見された。是正措置によってそのような出来事を防止したが、大きな爆発の可能性があった。	燃料配管と LOX 配管の両方とも、配管は同じ長さでサイズのフレキホースで設計されていた。配管は色分けされておらず、同じ長さであり、誤接続が可能であった。 (設計不良、手順不良)
14	アポロ AS204 号 (筆者注: 原文では SC204 となっているが、誤りと思われる) の火災。射点におけるアポロ司令船の火災は、死者と深刻な被害をもたらした。雰囲気は約 16 psia の圧力の 100 % O <sub>2</sub> であった。火災は、空気に比べて 100 % O <sub>2</sub> 中では非常に燃え易い材料によって宇宙船全体に伝播した。	可能性のある発火源は、宇宙船の配線に関係していた。調査の結果、事故の原因となった不備には、不適切な作業手順、適合性の無い材料の使用、不適切なシステム設計が含まれていると結論付けられた。これらの条件には、(a)密閉されたキャビン内での加圧酸素雰囲気、(b)キャビン内の大量の可燃物、(c)危険な場所に配置された配線と配管、(d)搭乗員のための不十分な避難救助規定、が含まれる。 (設計不良、材料不適合、手順不良)
15	ステージの動作試験中、ガスジェネレータ LOX 噴射器パージ用フレキ配管が、エンジンの推力室噴射器パージ用フレキ配管と誤って接続されていた。この結果、フレキ配管と LOX ドームが汚染された。人員に傷害は無かった。	隣接するフレキ配管が適切に符号付けされておらず、同様なサイズと設計であった設計上の不備。これがそのフレキ配管を誤接続したメンテナンス担当者の間違いの原因となった。寄与した原因としては、作業者が配管を接続する時に苦しい姿勢であったこと、照明が適切で無かったこと、および工具を使用するスペースが狭かったこと、がある。 (設計不良、手順不良)
16	高度シミュレーション設備の最初の起動試験中に、通常のパージ操作を行った後、LOX を投入した時に LOX 火災が発生し、設備ポンプと配管が損傷した。LOX 圧力は 500~600 psi であり、250 HP のモーターによるポンプ駆動である。	発火は明らかに配管内の汚染と LOX の衝撃によって発生した。ハウジングと羽根車との間に羽根車の破片があった。衝突の衝撃が羽根車を損傷した。ポンプ内の推力ベアリングが破損し、発火に十分なエネルギーを発生した可能性がある。ポンプの設計は損傷を防止するのに十分でなく、設置とメンテナンスの手順は汚染を防止するのに十分ではなかった。また、パージと検査手順が満足のいくものでは無かった。 (設計不良、汚染物質、手順不良、検査不良)
17	ブースターエンジンの高度シミュレーション試験中に、ブナゴムの破片が LOX 供給弁を破損し、それがポンプの羽根車に当たった時に衝撃による発火が起こり、ポンプを破壊した。LOX の圧力は 980 psig であり、250 HP のモーターによって駆動された。	LOX システムで適合性の無い材料 (ブナゴム) を使用した設計上の不備。寄与した原因としては、LOX 放出網内でブナゴムの破片が見つかった以前の事件の情報が伝達されていなかったことがある。弁の材料が LOX と適合していなかった。 (設計不良、材料不適合、管理/監督不良)
18	発泡断熱材の特定の機能を実証するため、9 か所の圧力と温度の読み上げを含む実証試験中に、LOX タンクのドーム部が破裂して試験区域中に飛散した。予定された 79 psig の試験で、圧力が 77 psig に達した時の 7 回目の読み上げの時に発生した。人員の負傷は無かった。	溶接補修後のタンクの耐圧試験の失敗。原因は、不十分な溶接技量と溶接部の不適切な検査である。補修または変更の完全な履歴は入手できなかった。 (保守不良、検査不良、記録不備)
19	空圧制御サブシステムの点検中に、2 本の隣接する配管が誤って接続されたために、	誤接続が可能のように、同一の配管と継手が一緒に配置されたことによる接続の間違い。予冷用ポンプへのパー

	LOX 予冷ポンプのハウジングが誤って過加圧され、交換しなければならなかった。	ジ配管を遮断弁の配管に接続した。この事故の原因としては、誤接続が不可能な配管の配置、あるいは誤接続を防止するサイズにする、あるいは識別するようにしなかった設計上の不備がある。 (設計不良)
20	鉄道車両から球形タンクに LOX を荷下ろし中、充填用ホースを切り離した時に LOX が流出した。2 人の男達が LOX に曝された。	充填配管を切り離す前に、十分な蒸発時間を考慮に入れることに失敗。寄与した原因としては、異なる種類の車両の蒸発時間に関して具体的な指示が不足していたことがある。 (手順不良)
21	静止燃焼試験の秒読み中に、12 階の LOX 充填および排出配管で漏れが発生した。判断のために充填作業 (topping operation) は中止されたが、この緊急時に過剰な数の人々がこのエリアにいることを許可され、危険な状態になった。	LOX ホースの材料の不具合によってクラックが発生した。潜在的に危険な状態になった原因は、緊急時にそのエリアに入場する人員の管理が不適切であったことである。 (設計不良、材料不適合、管理/監督不良)
22	LOX システムが、洗浄液による腐食によって、静止燃焼試験中に爆発した。	適合性の無い洗浄液を使用し、定期的な腐食検査が行われていなかった。(洗浄/確認不良、保守不良)
23	接続部に炭化水素系潤滑剤を使用したために、LOX システムが火災を起こして爆発した。	酸素システムに使用する適切な潤滑剤を指定することに失敗した。 (教育不良、手順不良、材料不適合)
24	LOX システムで使用されていたチタニウム製の球形容器が爆発して燃焼し、甚大な被害を引き起こした。	LOX システムでチタニウム製球形容器を使用した設計上の不備。チタニウムは LOX に適合しない。 (設計不良、材料不適合)
25	コンポーネントの製造中に内部スタンプに使用された不適合なインクによって汚染され、LOX システムの完全な分析とコンポーネントの洗浄の実施が必要になった。	製造における洗浄手順の不備。インクの使用を指定する前に、それと LOX の適合性を判断する措置が取られていなかった。 (手順不良、材料不適合)
26	酸素のピッグテイル放出口の近くの電気配線が短絡して酸素に着火したために、試験装置の電気配線と配管が損傷した。	試験装置の設計上の不備。ピッグテイル放出口が、隣接する配線の束に直接放出するように配置されていた。原因は、漏れがある LOX 弁を用いて試験を継続した手順上の誤りであり、酸素の放出と火災を引き起こした。 (設計不良、手順不良)
27	推進剤の充填作業中に不具合が発生した。酸素警報 (25 % 以上) が鳴り、中断シーケンスが開始された。緊急時チェックリストでは蒸発用弁 (boil-off valve) を開にすることになっていたが、高い酸素濃度が示されていたために意図的に省略した。弁が開いたときには、圧力が上昇して 29.5 psi に達していた。その閉鎖区画から出てくる酸素が観察された。タンクの圧力が約 7 psi となった約 30 分後に、2 回の爆発が発生した。	圧力が上昇して突然解放された後、極端な酸素の蒸発損失があった。そのように長い間蒸発弁を閉じたままにしてはならない。発火は、閉鎖区画の外側の領域にあるいくつかの電気システムに起因する可能性がある。満足できる放出システムを提供せず、最大弁閉鎖時間を制限しなかったシステム設計上の不備である。 (設計不良、手順不良)
28	推進剤の充填試験の後、閉鎖区画にあった飛翔体から液体酸素が抜き取られていた。大きな火災と爆発が発生して、飛翔体と閉鎖区画の両方が破壊された。火災は、フィルター・ハウジング内にある 40-ミクロンのステンレス鋼製フィルターで始まった。	一次火災の発火は、フィルター・ケース内の有機汚染物によるものであった。最も可能性の高い有機汚染物の発生源は、(a)フランジからガスケットへの炭化水素汚染物質の吸収、(b)フィルター放出用プラグの汚染と供給 LOX および補充 LOX 中に含まれる物質の蓄積、である。 (保守/点検不良、汚染物質)
29	LOX を地上供給配管のフィルターを通して流しているときに爆発が発生した。この施設は、ステンレス鋼製のフィルター・カ	恐らく、爆発はフィルター上に存在する小さな硬質粒子によるアルミニウムの摩耗によって始まった。アルミニウム板に対する鋼製カートリッジのチャタリングが認め

	ートリッジがアルミニウム製の支持板に保持されていた。	られた。材料の不適合、設計上の不備および不十分な清浄度の全てが事故の原因である。 (設計不良、材料不適合、洗浄/確認不良)
30	LOX システムの加圧時に、フレキホース・アセンブリが破損した。内管は 321 ステンレス鋼製のシームレスのベロー管であり、ワイヤ網組の外側覆いを持っている。配管は最小 2,500 psig の定格を持っていた。この破損の調査によって、ワイヤ網組の腐食、および第 1 と第 2 の螺旋に穴開きが見つかった。	恐らく、フレキホースの破損は、ワイヤ網組の動きがステンレス鋼の保護相あるいは不動態化層を破壊することによって引き起こされた。水が浸入して腐食を引き起こした。環境に対するシステムの保護を確実にするための設計上の不備と限られた検査が事故の原因となっていた。 (設計不良、保守/点検不良)
31	LOX の手動充填試験中に、手動および遠隔操作のポンプ吸い込み弁の間にあるコルゲート・フレキホース・アセンブリが、弁を開けた直後に破裂した。ワイヤメッシュ網組が破損し、配管内の圧力によってフレキホースが伸びてコルゲート管端部の溶接部が破損した。配管と弁に加えられた捩じりモーメントによって、システムの分離と移動が起こり、配管サポートが引っ張られて緩くなった。800,000 ガロン (約 3,032 m <sup>3</sup> ) の LOX が流出し、これによって生じた負圧によってタンクが部分的に圧潰した。内球殻安全弁の隔離具を外殻に接続する封止ベローが潰れた。炭素鋼製のポンプ基台が割れていた。	主ポンプ吸い込み弁と吸い込み配管の設計上の不備によって、弁が開いたときに配管にトラップされた空気が逃げることを可能にし、液体流れの急激な加速を引き起こした。弁が全開位置に達する前に、液体が弁に到達した。液体ハンマー作用が弁を閉位置にしてホースに過大な引張りを引き起こした。弁の上流におけるフレキホースの使用は、許容できない設計を示している。液体の流れを止めることが出来なかったことで生じた負圧のために、内球殻が圧潰した。弁の相対的な位置は、流れを止めることが可能なようには設計されていなかった。設計の変更には、遠隔操作弁の両側の支持架と弁の上流側の配管に LOX を供給する遠隔操作システムが含まれている必要がある。また、システム設計には、内球殻の空隙部圧力 (ullage pressure) が大気圧を下回らないようにする、真空安全装置を備えていなかった欠陥もあった。 (設計不良)
32	LOX - RP-4 (筆者注: RP-4 は Jet-B やロシアの T-2 に似たワイド・カット燃料である) を使用する試験飛翔体が火災と爆発によって破壊された。最初の試験では、LOX 供給システムに若干の問題があることが示され、そして LOX ポンプの入口フランジと入口アセンブリに浸食と金属の堆積物が見つかった。	酸素とポンプ部品の発火は、恐らく、羽根車と摩耗リング偏向リップ (wear ring diverter lip) の間の擦れで発生した摩擦熱によって引き起こされた。渦室内面の過度な孔食 (pitting) が証拠である。ピットは砂やクロム酸のような異物を含んでいた。アルミニウム合金の粒が摩耗リング上で見つかった。設計上の不備および配管とポンプ部品の汚染が事故の原因になった。 (設計不良、洗浄/確認不良、汚染物質)
33	ステージエンジンの LOX ドームのフラッシュ手順の準備中に、高圧 GN <sub>2</sub> 設備弁を開けて 500 psig の調圧された圧力でタンクを加圧し、同時に、調圧された 500 psig の GN <sub>2</sub> はタンクのパネ式安全弁の背圧として導入された。圧力調整器が供給する背圧が、500 psig ではなく、2,100 psig で安定した時、安全弁が吹き飛んだ。人的な被害はなかったが、安全弁が破壊された。	システムの保護能力の必要性を指摘したであろう、施設の設置とフラッシュ手順におけるシステム設計審査とハザード解析が実施されていなかった。建設/設置図面に明記されていた保護能力が欠如していることを見つける設備検査の失敗が原因であった。 (設計/設置不良、検査不良)
34	LOX 低圧ダクトの設置が可能となるように、ブースター製造塔の圧力確認および較正パネルから取り出したフレキホースがステージ LOX プリバルブ (pre-valve) を閉鎖位置に動かすために使用された。フレキホースの設置に気付いていない第 2 当直の製造担当者が、別の飛翔体のエンジンパージ作業のためにパネルを 100 psi まで加圧し	正式な文書化や手続き上の承認が無いままにフレキホースを設置し、パネル構成に関する情報が、ある当直から別の当直に引き継がれなかったのが事故の原因である。 (手順違反/不良、管理/監督不良)

	た結果、プリバルブ（pre-valve）のアクチュエータにその作動圧力の約 2 倍の圧力が掛かった。	
35	LOX 弁の漏れ確認試験中に、メンテナンスと洗浄の後に、保証されていないフレキホースを通して約 2,000 psi の検査圧力が掛けられ、フレキホースが千切れてテーブルに固定されていないパイプの中の弁を強制的に動作させた。人的な被害は無かった。	過大な長さのフレキホースが使用され、そして拘束されていなかった。試験項目が試験前に適切に準備されておらず、試験手順が適切では無く、試験装置の検査確認が実施されていなかった。 （手順違反/不良、検査不良）
36	トリクロロエチレンを使用して 5,000 ガロンの酸素タンクを洗浄中に、プラスチック片がタンク内のヒーターエレメント棒の上に落下した時、タンクの中でフラッシュ火災が発生した。1 人の男が軽傷を負った。	危険な洗浄作業中に、汚染を防止するために区画の適切な管理を行わなかった手順上の不備。“清掃”は重要視されず、その区画の検査は厳しくなかった。 （手順不良、検査不良、管理/監督不良）
37	飛翔体の燃料電池の加圧中に、新しい 3 本の K-ポンプ圧力源が追加された時に、設計破裂圧の 25 % 上まで過加圧された。損傷は発生しなかったが、システムがダメージを被った可能性があった。	圧力調整器を閉鎖しなかった。供給が尽きた時に K-ポンプ圧力源の調整弁は開いていた。新しい K-ポンプを追加した時に調整器を閉鎖していなかったために、350 psig のシステムに最大 2,200 psig の圧力が掛かった。 （教育不良、基本的知識の欠如、手順違反/不良）
38	ブースターエンジンの 3 回目の受入れ試験中に、ポンプのギヤーボックスに酸素が漏れたためにターボポンプの火災が発生した。エンジンには甚大な被害があり、設備には軽微な被害があった。	メイトリング・リング（mating ring）のシール性に影響を与え、ギヤーボックスに LOX の漏れを引き起こすような、軸 - シール間の移動があったという設計上の不備。 （設計不良）
39	ブースターエンジンのエンジン停止用プリバルブ（pre-valve）の認定試験中に、試験開始 10 秒後に試験システムが爆発して弁を破壊し、試験設備と試験用エンジンに被害を与えた。	LOX プリバルブの閉鎖後に、ポンプで不規則な二相流とキャビテーションが発生したという設計上の不備。この流動状態が、羽根車に不規則な負荷をかけ、最終的な不具合を引き起こした。 （設計不良）
40	静止燃焼試験中に燃料漏れが発生し、計測用配線を焼損して試験の停止を引き起こした。LOX システムの構成によって、停止後に LOX 相互接続配管が破裂し、ステージの推力構造体とエンジンの上に約 5,000 ガロン（約 11 m <sup>3</sup> ）の LOX が放出された。火災は、エンジン・ハーネスとハードウェアに被害を与えた。	ポリエチレン製の出荷用板が燃料接続から取り外されておらず、燃料漏れを引き起こした。寄与した原因には、適切に色分けされていない、あるいは出荷用板と認識されず、運用システムに不用意に装着されることを防止するようなサイズや形状になっていない出荷用板の設計上の欠陥、がある。試験の停止によって、酸素プリバルブが閉じられた。プリバルブが閉じると、LOX 相互接続弁が自動的に開き、“温かい LOX（hot LOX）”が吸い込み配管に逃がされた。これによって、LOX 供給システム内でガイサリング（筆者注：geysering、垂直配管内で気泡が集積して、それが配管内の液体をタンク内に押し戻し、その後に再び配管内に液体が流入して水撃が発生する現象）が発生した。 （設計不良、手順不良）
41	LOX タンクの修理中に、タンクの内部に熱を与えるために、LOX フィルター・ユニットに電気毛布を掛けた。毛布がオーバー・ヒートを起こしてステージ LOX タンクが火災を起こし、大きな被害を与えた。	ハザード解析と安全性の承認が無く、正式な工事作業命令も無いままに、ヒーター毛布を掛ける変更が行われた。220V-AC 用の毛布が 440V-AC ラインに接続された。電気毛布には温度制御装置が設けられていなかった。 （手順違反/不良、管理/監督不良）
42	LOX ドームパージを“ON”にしないまま、不用意に推力室パージがステージに適用された。これが LOX システムの汚染とエンジン出口カバーの吹き飛びを引き起こし	RP-1 燃料シミュレーターが装着されているというオペレーターの間違った認識である。寄与した原因には、シミュレーターの装着が必要であるという技術的要求の変更を準備していなかった技術的な不備がある。

	た。	(手順違反/不良、ヒューマンエラー)
43	静的な燃焼試験の最終秒読み中にメイン・ステージが爆発してステージを破壊し、施設に大きな被害を与えた。爆発は、ステージ LOX タンクの破裂によって引き起こされた。	2 台の冗長化された LOX 放出弁が、固体酸素が生成したために放出不能となった。液体水素燃料タンク内にあるヘリウムタンクから取り出された冷たい加圧用ヘリウムガスによって固体酸素が生成した。通常、ヘリウムガスは LOX タンクに入る前にヒーターを通る。事故に寄与した原因としては、承認された手順に従わなかったこと、およびヘリウム遮断弁が寒冷条件に対して不十分であったこと、がある。試験前検査で多数の弁類の見落としがあり、また正しい位置に無かったなど、試験準備が不十分であった。 (手順違反/不良、設計不良、検査/確認不良)
44	ステージ LOX タンクの検査中に、プラスチック製の容器と洗浄用パッドがタンクの底で見つかった。	洗浄と点検作業が不十分であった。据え付け中の作業管理手順が不十分であった。 (洗浄/確認不良、手順不良、管理/監督不良)
45	宇宙船から酸素の棚を取り外す際に、取り付け用アダプタの溶接の失敗によって棚が損傷した。	事故の原因は、手続き上と設計上の不備の両方によるものであった。正式な手順に従わないで保証荷重要件が承認された。さらに、取り扱い装置は、実際の棚の重量よりも少ない、約 90 ポンドの棚重量用として設計された。 (手順違反/不良、設計不良)
46	LH <sub>2</sub> -LO <sub>2</sub> ステージの開発試験中に、爆発によって推進剤を搭載した下側のブースター段が破壊された。爆発は、静的燃焼試験の直前に起こった。	LH <sub>2</sub> タンクの放出ラインに過剰なレベルの酸素が存在し、タンク放出ラインの末端にある燃焼スタックからの逆火によって爆発が発生した。LH <sub>2</sub> タンクを不活性化する手順が不十分であり、危険な酸素濃度の存在を許した。システムの設計が、酸素濃度の測定を実施しないという点で不十分であった。 (手順不良、設計不良)
47	LOX-RP 燃料ステージのエンジン開発試験中に、試験施設の屋外で爆発が発生した。爆発は、試験スタンドに甚大な被害をもたらした。	不適切な設計の酸素ガス点火器が取り付けられ、起動シーケンスの間に、窒素パージシステムが酸素の流れを妨げて燃焼室内で燃料に着火させることを妨げた。大量の燃料が燃焼室から流出し、燃焼室の外側で着火した。配管の設置が適切に設計されていなかった、もしくはシステムの動作をチェックするための手順が設定されていなかった。 (設計不良、手順不良)
48	LOX-LH <sub>2</sub> エンジンの試験中に、酸素システムの漏れと火災によって、試験スタンド、液体酸素システム、推力室の推進剤弁、および他の飛行用ハードウェアに大きな被害を与えた。事故は、システムの最初の試験中に発生した。	着火時に、燃焼室圧の増加によってシステムに背圧が発生し、それが酸化剤マニホールドに伝播した。第 2 の圧力サージがこれに続いた。振動モードと高“g”荷重が、アクチュエータのリップシールを損傷した。急速な弁閉鎖中の激しい振動が、アルミニウムとインコネル-X の金属間接触と擦れを引き起こした。摩擦による熱が発火を引き起こしたと考えられている。弁の締め金具室 (turnbuckle cavities) 内で見つかった炭化水素汚染物も発火源であった可能性がある。満足できる清浄度が維持されていなかった。システム内で、酸化鉄、酸化アルミニウム、リン酸塩潤滑剤、フルオロループ潤滑剤、脂肪族炭化水素、およびパラフィン系炭化水素が見つかった。品質管理の監視の強化が必要とされた。弁の設計変更が提案された。 (設計不良、洗浄/確認不良、管理/監督不良)
49	液体窒素の供給源が酸素で汚染され、負傷や重大な事故は発生しなかったが、その可	業者の業務要件は十分に詳しくはなかった。パージ要件の仕様が正しく守られていなかった。タンクの内容物は、

	能性は大きかった。液体窒素は、液体酸素と液体窒素のどちらも輸送するトラックを使う業者によって供給された。明らかに、トラックは容器に残っていた酸素で満たされていたらしい。この間違いは、液体が青味を帯びているのに技術者が気付いて明らかになった。	内容物の移送および比重の測定が行われる前に分析される必要がある。更なる手続き上の措置には、1台のLN <sub>2</sub> 専用トラックを配備し、業者のローカル貯槽からではなく、プラントの貯槽からトラックの容器に直接充填することを検討する必要がある。 (手順違反/不良、検査/確認不良)
50	静的な試験の準備中に、LOXが隣り合う2隻のバージからポンプで圧送されていた。1隻のバージで爆発と火災が発生し、2隻目のバージでも火災が発生した。バージポンプのスラスト軸受けあるいはLOXメカニカル・シールが破損した。シールが漏れてラジアル軸受けの温度が低下した。低温になったスラスト軸受けは、羽根車とアルミニウム製のポンプ・ケーシングの擦れを許容した。	羽根車とアルミニウム製ハウジングが擦れてポンプの内部で発火した。ポンプの壊滅的な損傷は、過大な圧力によって引き起こされた。2隻目のバージの漏れは、LOXポンプの過度の振動によってポンプ吐出口フランジ上の何本かのスタッドボルトが損傷したために発生した。ポンプが損傷する前に、LOXポンプのラジアル軸受けの限界温度を報告する推奨された手順が行われていなかった。発端となった問題を完全に検出するための観察と計装が不十分であったという設計上の不備があった。ポンプの設計は適切であると考えられたが、LOXの蒸発によって起こり得る50 psigの仕様を超える圧力で生じるメカニカル・シールの変形を制限できなかった。 (設計不良、手順違反/不良)
51	LOXおよびLH <sub>2</sub> 推進剤を使用してステージの静的な燃焼試験中に、かなりの装置を破壊する爆発が発生した。ステージは予定された点火の前に爆発した。約800フィート(約244 m)離れた建造物に被害が発生した。また、約1,600フィート(約488 m)離れた施設作業室の金属製のドアにも損傷を与えた。恐らく、重い雲に覆われていた(音波の反射と収束)ために、12マイル(約19.3 km)離れた場所での被害報告を聞いた。	この爆発は、高圧チタニウム製球殻の致命的な損傷によるものであった。タンクには、推進剤加圧用のヘリウムガスが入っていた。事故は、Ti-6Al-4V製の球殻の溶接に工業用純チタニウム製溶加ワイヤを使用するという人為的なミスによって引き起こされた。球殻と同じ組成の溶加ワイヤの代わりに純チタニウム製の溶加ワイヤを使用すると、強度が30%~40%低下した。最初に壊れたタンクは支持構造に保持されており、損傷時はLOX隔壁に押し付けられた。H <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> の爆発エネルギーは、1%のTNT爆薬相当と推定された。製造のチェックや業者の管理に注意を払わなかった。溶接の管理と手順が不十分であった。 (手順違反/不良、管理/監督不良)
52	発射台の清掃作業中に、酸素富化区域に乗り入れた3台の車両が発火した。LOXが排出溝に放出され、車両は酸素雲の中に乗り入れた。3台全てがエンジンを切って駐車していた。中央の車両がエンジン・キーをONにしたときにエンジンフードの下で火災が始まった。残りの2台は直ぐに発火した。3台全ての車両が破壊された。	大量のLOXの放出とその結果生じる蒸気雲は、それに触れる人員や装置に重大な危険をもたらす。車両は蒸気雲に乗り入れて駐車した。3台の車両がエンジンを切って駐車している間に、フードの下には酸素と炭化水素の可燃性混合物が蓄積した。2番目の車両の混合気は、恐らく、イグニッション・キーを回したことによる電気火花で発火したのであろう。他の2台の車両では、可燃性の混合気が排気マニホールドの高温面に触れた時に発火したものと考えられる。排出溝に放出されたLOXの量は、40 vol.%のGOX濃度で、高さ4フィートで約20エーカーの広さを覆うと推定された。システム上の欠陥と手順上の不備が事故の原因となった。 (設計不良、手順不良、管理/監督不良)
53	エンジン試験のための機器を設置中に、燃料と酸素システムへのバージ配管が誤接続(cross-connected)され、燃料と酸素システムが共通の配管に接続された。酸素配管が炭化水素で汚染された。	配管を接続する手順が守られず、更にこの作業は承認無しに実施された。設計上の不備がこのような配管の誤接続を可能にした。 (設計不良、手順違反、管理/監督不良)
54	推進剤充填アセンブリのバージ中に、LOX	事故は、設計上と手順上の不備の両方によって引き起こ

	配管にリデューサー継手を取り付けて、フレキホースに接続した。継手の下流の弁を開いたときに、作業員が液体酸素の流れに曝された。	された。漏洩を起こした LOX 弁が、配管の中に LOX がトラップされることを可能にした。接続が不十分であっただけでなく、従うべき作業を詳しく記述していない手順書も不十分であった。接続部の品質管理検査も不十分であった。 (設計不良、手順不良、検査/確認不良)
55	アポロ 13 号ミッションの事故は、司令船と機械船の液体酸素供給源の損傷、ひいては $H_2-O_2$ 燃料電池の動作の喪失を招いた。十分な緊急事態措置が取られて、月探査クルーは安全に帰還を果たした。液体酸素供給タンク (タンク No. 2) が、タンク上部にある電線管の所で破損した。機械船の棚-4 の中にある酸素が放出されたことによって、棚-4 区画を覆うパネルが分離した。パネルの分離によって酸素供給弁が閉鎖され、最終的に 2 番目の酸素タンク (タンク No. 1) の圧力が失われた。	この事故は、設計上の制約、材料適合性の制約、および検査、品質管理、手順上の不備の相互作用の影響によって引き起こされた。実施された調査研究による証拠は、ファン配線のポリテトラフルオロエチレン (PTFE) 絶縁材が短絡によって発火したことを示していた。酸素タンク内のファンは、超臨界酸素中のどのような層状化も軽減するために作動させる。絶縁材の燃焼によってタンクの圧力が上昇して安全弁が開いたが、燃焼が進行して酸素タンクへの全ての電気回路を短絡させた。明らかに火災はタンク上部の電線管の中に伝播し、酸素を機械船内に放出した。機械船のパネルの 1 つが分離して酸素弁を閉鎖し、隣接する酸素タンクの圧力が失われる結果を招いた。運用上と製造上の手順は、異常が発生した場合の十分な見直しを提供しなかった。酸素システム中で、金属材料と非金属材料が熱源および着火源と組み合わせられた場合の重大性について十分な認識が無かった。 (設計不良、材料不適合、手順不良、検査/確認不良、管理/監督不良)

## 付録3-A (続き) GOXシステム ガス酸素による事故/事件

\* 原因欄の最下部にある括弧書きは筆者による原因の分類である。

No.	事故/事件の概要	原因
1	2 インチのステンレス鋼製の酸素配管で爆発と火災が発生した。配管は 2,200 psi の酸素を通すもので、ステンレス鋼製のボール弁が取り付けられていた。ステンレス鋼のボールと配管が発火し、配管は数ヶ所で破裂した。	酸素を通す配管路はハロゲン化炭化水素で汚染されていたと考えられた。発火は、ボール弁が開けられた時、絞られた (restricted) 開口部における摩擦によって発生した (摩擦は弁部品の動作によって発生した)。 (設計不良、洗浄/確認不良、汚染物質)
2	2 人乗りの宇宙環境シミュレータで火災が発生した。火災時の環境は 380 mmHg の 100 % O <sub>2</sub> であった。チャンバーは再加圧され、火災発生後 30 秒以内に開放された。この事故によって死者が出た。	床面にあるコンセントの電源プラグを偶然に蹴ったことによって発生した短絡が原因となった。チャンバー内には 2 つの小型の携帯型 CO <sub>2</sub> 消火器があったが、1 つは過熱によって圧力安全弁が開いて排出された。システム設計上および手順上の不備が事故に結びついた。 (設計不良、手順不良)
3	酸素の高圧ガスシステムが、弁作動時に損傷した。GOX 圧力は、最高 2,250 psi であった。この事故によって 2 度および 3 度の火傷を負った。	事故は、弁シートへの汚染物の蓄積、あるいはボールと弁のシートの間に突然汚染物が巻き込まれたかのどちらかに起因するものである。 (保守/点検不良、汚染物)
4	航空機の GOX 容器が壊れて火災と爆発が発生した。容器の圧力は 1,800 psi であった。この事故によって負傷者が出た	材料の不適合および手順上の不備が事故を引き起こした。1,800 psi 以下で移動する緩いナイロン製ポペット、あるいは圧縮によって発生する熱が弁内のポペットを発火させ、火災と爆発を引き起こした。 (設計不良、材料不適合、手順不良)
5	航空機の酸素吸入装置が壊れて爆発と火災が発生した。機器や負傷者に対して甚大な被害が出た。酸素の圧力は 1,800 psi であった。	事故は、酸素容器内にあったリサージ・グリセリン・セメント (筆者注: letharge-glycerol cement, 一酸化鉛とグリセリンを混合したセメント) が、容器弁を開けた時に発生する圧縮熱によって発火した。 (洗浄/確認不良、汚染物質)
6	100 %の酸素を用いた宇宙船キャビンの実験において、TV 船内モニタの電源ラインの基台から、熱可塑性樹脂が下を通っている冷却剤配管上に滴下した。冷却剤配管上のルベロイド (筆者注: Ruberoid®, フェルトにアスファルトやタールを含浸させた断熱材) 製断熱材は燃えなかったが、熱可塑性樹脂から出た煙霧が乗組員に警告した。	TV 船内モニタの電源ラインが損傷し、樹脂製基台の発火と熱可塑性樹脂の溶融を引き起こした。溶融した樹脂とルベロイド断熱材は炎上しなかった。事故の原因は、手順上および設計上の不備であった。また、材料の不良も事故を引き起こす原因になった。 (設計不良、材料不適合、手順不良)
7	フェベトロン・パルス電子ビーム X 線装置の試験中、キャパシタが放電したときに爆発が発生した。ガスは 99 %の酸素であり、2,015 psi 用に設計されたフラスコ容器に入っており、動作圧力は 240 psi であった。	この爆発は、“圧縮空気、79 %窒素、21 %酸素” と間違っ て表示された純酸素中におけるキャパシタの放電によって発生した。 (手順違反/不良、管理/監督不良)
8	高圧酸素ポンプ装置のフィルターで爆発と火災が発生した。この装置は、自給式呼吸装置用酸素容器の充填に使用されていた。	この爆発は、フィルターの底にあった可燃性物質の燃焼によって発生したと考えられた。この物質は、ポンプの潤滑に使用されたグリセリンであると考えられた。 (設計不良、汚染物質)
9	生命維持システムの試験中に、酸素の元弁で火災と溶融が発生した。酸素供給源は、2,200 psi で共通のマニホールドに接	火災は明らかに、試験されていない酸素適合性が認められていないポリエーテル材料製の弁シートから始まった。また、酸素システム用コンポーネントの洗浄と検査の手順が

	続された 2 系統の 6 本組 K-容器アセンブリで構成されていた。マニホールドの圧力を保つために弁を開けたときに火災が発生した。人員が負傷し、システムに損傷を与えた。	適切では無かった。このシステムは、アルミニウム片、錆および有機物から成る多数の汚染物を含んでいた。さらに、元弁と入口弁の間にフィルターが装着されておらず、配管はテフロン製部品を使用したステンレス鋼製であった。 (設計不良、材料不適合、洗浄/確認不良、汚染物質)
10	ステージ上で空気圧試験を実施中に、8 インチ径のフレキ配管が 2,000 psi で破壊し、続いて隣接の GN <sub>2</sub> の固定配管を叩いて損傷させ、破片を 75 フィート飛散させた。	フレキホースの材質不良であった。フレキホースが拘束されていなかったことも大きな被害に寄与した。 (設計/製造不良、手順不良)
11	飛翔体の O <sub>2</sub> サブシステムの確認試験の準備中に、フレキ配管を O <sub>2</sub> 配管ではなく水配管に間違えて接続したために、H <sub>2</sub> O システムに 250 psig の GN <sub>2</sub> が掛けられ、ポータブル型水タンクが破裂して排水タンクと水用操作盤に損傷を与えた。人的な被害は無かった。	飛翔体システムのフレキ配管に間違ったタグが取り付けられており、GN <sub>2</sub> の圧力を掛ける前に、手順上の指示や確認方法が使用されていなかった。 (手順違反/不良、管理/監督不良)
12	宇宙船の緊急 O <sub>2</sub> 圧力システムの打ち上げ前のシステム確認試験中に、GSE の漏れ検査を行っているときに間違ったフレキ配管が取り外されてキャップが取り付けられ、O <sub>2</sub> 圧力システムが不容易に設計破裂圧力の 50 % 以上まで加圧されることを許した。被害は無かったが、事故の恐れがあった。	GSE の漏れ確認中は、O <sub>2</sub> 緊急システムを GSE から隔離することを要求した試験手順に従わなかったことが原因である。重要な打ち上げ前点検において、品質管理/監督および監視が不適切であったことが原因である。 (手順違反、管理/不良)
13	ステージ O <sub>2</sub> システムの加圧中に、指定された圧力が 350 psig であるのに対して、570 psig の不適切な過圧が発生した。被害は発生しなかったが、システムに潜在的なダメージを与えた恐れがある。	時間を節約するために、通常の手順からの逸脱があった。GSE の圧力調整器を 750 psig まで上昇させて時間を節約し、圧力が 350 psig に達した時に調整器がリセットされず、圧力が 570 psig まで達した。 (手順違反、管理/監督不良)
14	大気圧条件下の飛翔体で、O <sub>2</sub> 調整用キャニスターの取り扱い中に電気火花（静電気放電）が観察された。静電気が除去されずに電気火花が発生し、100 % O <sub>2</sub> 雰囲気中で発火源となった。人員の負傷は無かった。	キャニスター収納ボックス内の絶縁材料の選択に関する設計上の不備。収納ボックスの設置が不適切であったために、この材料がステンレス鋼製のキャニスターが取り外された時に静電気を発生した。 (設計不良、材料不適合)
15	高圧試験設備において燃料と推進剤システムを点検中、燃料および酸化剤オリフィスが仕様通りに流れなかった。このシステムを完全に調査した結果、オリフィス下流酸素配管内で樹脂製カバーが見つかり、装着されていた燃料オリフィスと酸化剤オリフィスが入れ違っており、配管、ストレーナーおよびオリフィスが損傷していることが明らかになった。	組立て、包装、設置および洗浄中の不適切な作業管理手順が原因である。樹脂製カバーは、洗浄または包装中に配管端部を封止するのに使用されるものであることが判明した。組立て中に酸化剤オリフィスは燃料配管に取り付けられ、燃料オリフィスは酸素配管に取り付けられており、さらにストレーナー、配管、およびオリフィスは取り付け中に軽い損傷を受けていた。この出来事の原因は、重要な作業の検査が不適切であり、重要な飛行システムの組立てと包装で使用される資材について特別な管理が出来ていなかったことにある。 (手順不良、検査/確認不良、管理/監督不良)
16	宇宙船緊急酸素システムの圧力容器 (13,250 psig) の静水圧試験中、溶接不良のために、容器の溶接部が 9,000 psig で破損した。圧力容器は破壊したが、人員の	不適切な製造管理と検査手順が原因である。明らかに、継ぎ目における高強度溶け込み溶接の不適切な心出し、または間違った角度に向いていることによって、容器半分の溶け込みが不完全となり、溶接継ぎ目が破壊した。溶接継ぎ

	負傷は無かった。	目の X 線検査によって、この不具合は明らかにされなかった。 (手順違反/不良、検査/確認不良、管理/監督不良)
17	K 型容器から小型のホーク型容器 (hoke-type cylinder) に CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> 混合ガスの移送を完了した後、小型容器のニードル弁を閉鎖しようとしたところ、弁が破損し、1,350 psig の圧力で弁のステムが吹き飛んだ。人的な負傷は無かったが、潜在的に危険な状態があった。	弁システムの材料不良、および容器に検査または試験記録の刻印が無いことから明らかなように、定期的な静水圧試験またはその他の管理されたメンテナンスに対して、明らかに確立された手順が欠如していた。 (設計不良、材料不適合、手順違反/不良、管理/監督不良)
18	高圧酸素供給システムの運用中に火災が発生した。ボール弁のナイロン製シートが試験され、高圧の条件下で分解して燃焼することが判明した。	ボール弁にナイロン製シートを指定した設計上の不備。試験結果は、ナイロンが高圧下で圧縮熱によって分解して燃焼することを示した。(使用された試験圧力は、1,800～4,000 psig であった。) (設計不良、材料不適合)
19	酸素富化燃焼用空気をメタンと燃焼させる高マッハ数風洞の確認試験中に、流量を測定するために使用されたオリフィスの下流側で火災と爆発が発生した。酸素の流量調整弁制御用の空気圧信号を操作するスイッチが入れられた時に火災が発生した。システムに高圧が導入されて圧力変換器と伝送器の破裂を引き起こし、減衰用流体が主酸素配管内に放出された。その油 (減衰用流体) が酸素と反応し、ステンレス鋼製の配管と弁の燃焼を促進した。	システム設計上および運用性能上の不備によって、空気信号制御システムを作動させることなく、流量調整弁を作動させるための制御システムに通じる配管内に前ランにおける十分な圧力が溜まることを可能にした。流量調整弁を急速に開くと、恐らく、1,900～2,200 °R の温度を伴う急激な圧縮が発生する。高温と高圧が計測装置のベローを破裂させ、減衰用流体を霧化させ、下流の接続部で火災と爆発を引き起こした。適合性の無い材料を排除するための材料と R&QA (筆者注: Reliability & Quality Assurance, 信頼性および品質保証) の要件が十分に詳細では無かった。 (設計不良、材料不適合、仕様不良)
20	環境制御システム上の宇宙船 O <sub>2</sub> 制御モジュールの耐圧試験中に、O <sub>2</sub> リングシールが破損したために、1,400 psig の圧力サージが発生してキャップ・ボス (筆者注: cap boss, ブラインド・キャップを取り付けるための継手のようなものか?) を吹き飛ばし、火災が発生した。	O <sub>2</sub> リングシールは、新しいシールを取り付ける代わりに、その後の試験で再使用されていた。また、酸素に適合しないネジ潤滑剤を使用しており、このために圧力サージが発生した時に発火した。 (手順違反/不良、材料不適合)
21	試験タンク内 (雰囲気圧力 7 psi、95±0.5 % O <sub>2</sub> 、湿度 90°F で 95±5 %) で宇宙船コンポーネントの酸化/湿度認定試験中に、水皿の下で使用されたポリウレタンフォームが膨潤した時にタンク内で爆発が発生し、吊り下げられた浸漬式電気ヒーターがタンクの底に接触した。O <sub>2</sub> で飽和したフォームを発火させるのに十分な局部加熱を引き起こした。人的な被害は無かったが、実験室の装置は損傷を受け、試験用ユニットの交換が必要になった。	高 O <sub>2</sub> 濃度の高湿度雰囲気下で試験を実施するための試験装置の設計上の不備が原因である。高度に酸素で飽和したポリウレタンフォームがヒーターと近接していたこと、およびヒーターで発生した熱による発火の容易さが試験環境と適合しなかった。また、試験前の十分な安全性解析と QC (品質管理) の検証が欠けていた。 (設計不良、材料不適合、管理/監督不良)
22	試験設備の GN <sub>2</sub> および GO <sub>2</sub> 設備配管が漏れ修理のために取り外されたときに、屋上の接続ヘッダーで誤って交差接続された。試験装置が汚染され、システム/配管のパージが必要になった。	詳しいメンテナンス/修理手順とチェックリストが無いので、手順が必要である。また、配管の識別が不十分、すなわち、色分けや継手の大きさの違いが無い、および十分な作業点検の欠如による設置設計上の不備があった。 (設計/設置不良、手順不良、確認不良)
23	100 %酸素雰囲気下のスペース・チャンバーで、定期的なメンテナンス中に電気火	100 %酸素雰囲気に対する不適切なメンテナンス手順。可燃性物質の使用を確実にしなかったこと、および酸素雰囲気

	花によるフラッシュ火災が発生し、1 人が焼死し、1 人が重傷を負った。チャンバーは破壊された。	気で使用するために装置を具体的に評価しなかったことが原因である。 (手順不良、材料不適合、管理/監督不良)
24	100 %酸素雰囲気中のチャンバー内において、宇宙船の無人の 500 時間寿命試験中に、電気ヒーター・テープ（筆者注：electrical tape, 通常は絶縁テープの意味であるが、この場合はヒーター・テープの意味か？）から出た火花によって 480 時間経過時に火災が発生した。チャンバーと宇宙船に大きな被害をもたらした。	試験装置の設計上の不備。加温用テープ（heat tape）が試験装置の一部として取り付けられており、100 %の酸素雰囲気に対して特に評価されていなかった。テープ内の配線が短絡し、雰囲気中の可燃性物質が発火した。 (設計不良、材料不適合、管理/監督不良)
25	100 %酸素雰囲気中のスペース・チャンバー内で、14 日間の宇宙ミッションをシミュレートしていた 13 日目に、電気火花による火災が発生し、2 人の飛行搭乗員が重傷を負った。	計装パネルの下にある回路が過負荷で過熱して発火を引き起こしたという装置設計上の不備。原因は、100 %酸素雰囲気中で使用される装置に対して、十分な計画と仕様が欠如していたことである。 (設計不良、仕様不良)
26	生物衛星の酸素システム容器を、充填配管と抜き取り配管を使用して、3,500 psig まで加圧してから 500 psig まで抜き取る（bleed down）圧力試験中に、抜き取りを開始した時に火災が発生した。事故によってシステムが損傷し、人員が負傷した。	主な原因は、O <sub>2</sub> コンポーネントの洗浄手順と仕様が不適切であったことである。被験物は製造業者において標準洗浄だけを受けており、O <sub>2</sub> システムにおける使用が認定されていたが、アルミニウム片と錆がシステム内で見つかった。調整器のダイヤフラムにはネオプレン・ゴムが使用されていたが、これは O <sub>2</sub> システムにおいては安全ではなく、しかも調整器の入り口側にはフィルターが無かった。明らかに、発火は配管の壁に対して汚染物が衝突したことによって発生した。 (設計不良、材料不適合、洗浄/確認不良、汚染物質)
27	ブースター段の GOX ダクト・アセンブリに対する信頼性試験の準備中に、6 インチ径の“ホット”配管が圧力 3,200 psig（約 22.06 MPa）、温度 610°F（約 321°C）で破裂し、隣接する配管に損傷を与えた。パイプの加熱が不均一であったため、局部的に過大な応力が発生した。システムはガス窒素で加圧中であった。	試験装置の設計上の不備が原因である。配管上の発熱体が不均一な加熱を可能にし、配管を弱くするホット・スポットが発生した。計測機器は平均の熱電対読み取り値を示して、ホット・スポットの局部温度を示さなかった。承認されていない置き換えが行われ、熱電対は異なるサイズのものであった。原因は、不適切な部品購入管理手順と不適切な作業管理手順であった。 (設計不良、手順不良、管理/監督不良)
28	緊急時用酸素機器の領収試験中に、O リングが損傷したことによって、仕様外の圧力条件が発生した。その O リングは、組立て中に損傷した。機器に被害は無かったが、試験を再実施する必要があった。	この事件は不適切な装着手順によって発生した。バックアップリングが破損し、損傷したバックアップリングの中に O リングを押し出した。この破損は検査では発見されなかった。 (手順違反/不良、検査不良)
29	地上支援用酸素吸入器の点検中、高圧側で火災が発生し、圧力調整器が焼損した。2,200 psi の酸素が充填されたユニットは、高空実験室用の緊急装備として準備されていた。考えられる火災の発生源は、圧力調整器の一次側弁シートであった。	事故の主な原因は、不適合材料の使用にあった。弁シートはナイロン製であり、材料が 100 %の酸素での使用に対して不適切な材料であった。調査によって、最初の機械加工で発生した小粒子が糸くずが残っており、それがナイロン製弁シートを発火させたと結論した。また、酸素に対して不十分な材料を許した検査と手順上の不備も事故に寄与した。 (設計不良、材料不適合、洗浄/確認不良)
30	酸素を制御する圧力調整器と呼吸用空気システムが閉止できなくなり、ガスを放出させて火災を引き起こした。調査によって、ポート部分の開口部を通した熱と火炎による損傷、および調整器の弁シ	材料の不適合と設計上の不備が事故の原因であった。圧力調整器の入口ポートから金属製の部品が無くなっていた。恐らく、調整器の上流側にあった金属製のボールとその衝撃がナイロン製弁シートを発火させる原因となった。 (設計不良、材料不適合)

	トの炭化が明らかになった。弁は溶けて変形していた。	
31	宇宙船のパージと漏れ検査のために低圧室をポンプで吸い出す (pumpdown) 準備中に、65 % O <sub>2</sub> と 35 % N <sub>2</sub> の代わりに 100 % O <sub>2</sub> が使用された。被害は発生しなかったが、雰囲気には潜在的な火災の危険性が存在した。	圧力逃しと操作盤の構成が試験点検手順書で定められていたので、この事故の原因は人為的な間違いであった。混合ガスを宇宙船に入れる前に、ガス試料を分析することを要求する手順上および設計上の変更を加える必要がある。QC 検証の欠如および弁設定確認の欠如が事故の原因であった。 (手順違反/不良、設計不良、管理/監督不良)
32	宇宙船酸素システムの燃料電池加圧中に、タンクが設計破裂値よりも約 25 % 以上過圧状態にされた。被害は無かったが、深刻な危険があった。	加圧プロセス中に、ガス源の K 型ボンベが交換されたが、圧力調整器がより高いボンベ圧力に対して調整されていなかった。手順上および設計上の不備が事故の原因であった。 (手順違反/不良、設計不良)
33	宇宙船の緊急酸素システムの漏れ点検を実施中に、間違ったフレキ配管が切り離されて塞止栓が取り付けられ、設計破裂レベルよりも 50 % 高い、900 psig まで過加圧された。	試験/点検手順書が使用されたが、人的間違いが事故の原因になった。QC 監視が間違いを発見するのには不十分であった。間違った接続を可能にするという点で、システム設計が不十分であった。 (手順違反/不良、ヒューマンエラー、設計不良、管理/監督不良)
34	リフティング・ボディ研究用航空機が飛行から帰還した後に、ロケットエンジンの部品に火災による損傷が認められた。また、火災による損傷は、エンジンに隣接する機体の操縦舵面にも認められた。当初、火災の強度は低かったが、アルミニウム製 GOX 配管の一部を溶かすのには十分であった。配管の 1 つが軟化し、内圧によって膨らみ、最終的に破裂したように見える。GOX 配管の破裂によって火勢が強められ、更なる損傷を引き起こした。	火災は恐らく、推進剤の投棄を開始した直後に始まったと考えられる。発火源はエンジンノズルの伸展部であった可能性がある。システム設計上の不備、材料の制約、および手順上の不備が事故の原因である。材料の仕様において、火災被害に対して脆弱性が少ないフレキシブル油圧配管、計装用配線および投棄用装置の使用を検討しなかった。操作手順には、推進剤のシャットダウンと投棄との間に安全な最小時間遅れを設けなかったという不備があった。火災に曝された場合に、材料の破損およびそれらとエンジン損傷との関係が評価されなかった。 (設計不良、材料不適合、手順不良)
35	迅速開放マンホールカバーの試験に使用されるタンクの圧力試験中に、タンクが破裂して大きな被害が発生した。タンクは 60~67 psig の圧力で破裂する。以前の試験において、タンクは 60 psig の圧力に耐えていた。	タンク試験のために設計情報を提供するための試験責任者間でのコミュニケーション不足が事故の原因であった。設計者と作業者の間でタンク設計圧力に関する誤解があった。実際には 50.7 psig の制限であるのに、詳細計画の記述によれば、タンクは 150 psig として設計されていた。 (設計不良、情報共有不良)
36	点検の試験中、試験装置が不適切に取り付けられたために、Y 型 GOX 捕集器の渦巻き状のフレキダクトが損傷した。人的な傷害は無かった。	主な原因は、作業者が利用可能なクランプでフレキダクトを拘束するのを怠ったという手順上のものである。ベローズは 350 psi で破裂し、品質管理指示書にはベローズ保持クランプを確実に使用するための注意書きが記載されていなかった。 (手順違反/不良)
37	酸素検査済みのタグが付いた容器から供給された空気マスクを装着した時、マスク装着者が倒れたが蘇生した。	容器内の空気の酸素含有量は 1 % 未満であった。通常、供給業者は容器内で N <sub>2</sub> と O <sub>2</sub> を混合するが、このケースでは酸素を添加できなかった。手続き上および設計上の欠陥が事故の原因である。 (手順不良、設計不良)
38	接続されたフレキホースが間違っ使用されたため、LOX プリバルブの作動制御用弁が過大な圧力まで加圧された。この	主な原因は、フレキホースが記録の作成無しに、あるいは手続き無しに接続された手順上のものであった。第二当直者は、システムをその作動圧力よりも 500 psi 高い 1,000 psi

	ホースは第一当直者によって較正用パネルから引き出され、第二当直者によって間違って使用された。主な被害は、過加圧によるものであった。	まで加圧した。 (手順違反/不良、情報共有不良)
39	LOX 弁の漏れ点検作業中、保証されていないフレキ配管を通して掛けられた約 2,000 psi の圧力でフレキ管が暴れ、フレキ管と弁が破損した。人的な被害は無かった。	試験設定および作業指示書の欠如という手順上の不備が事故の原因であった。耐圧試験手順書が無かった。 (手順不良)
40	ステージの LOX ドーム試験を支援するためのステージ試験用地上タンクを加圧中に、LOX タンクの 500 psig バネ式安全弁が破損した。圧力調整器は、500 psig では無く、2,100 psig を示していた。	システムが圧力調整器に対応できる十分な放出能力を持っていなかったことは設計上の不備を示している。また、調整器放出能力の必要性を明らかにした筈の設備のハザード解析が実施されなかったという手続き上の不備も明らかであった。 (設計不良、手順不良)
41	試験用チャンバーの逆止弁の耐圧試験中に、入り口ポートを通して 4,800 psi の GN <sub>2</sub> を流入させ、出口ポートをキャップで塞いだ。弁をチャンバーから取り外した後に弁が破裂した。人的な被害は無かった。	事故の主な原因は、設計上の不備であった。逆止弁内に捕捉された GN <sub>2</sub> は試験用チャンバー内では約 -285 °F (約 -176 °C) であったが、室温でガスが膨張したことによって弁の破裂を引き起こした。この設計では、試験対象物がチャンバー内にあるときに圧力を解放するように指示していなかった。 (設計不良、手順不良)
42	圧力容器の試験中に、ヘッドに溶接されたフランジが破裂し、近くいた人員が負傷した。	圧力調整器の作動不良によって、圧力が運用限界を超えた。LOX センサーが、圧力計に誤った測定値を与えた。手順上および設計上の制約が事故の原因となった。付近に人がいる状態では、絶対に最初の加圧を行わないとする手順が十分に詳しくなかった。 (設計不良、手順違反/不良)
43	供給圧力が 1,750 psig の GN <sub>2</sub> を用いた計装用コンテナの打ち上げ前漏れ点検中に、圧力調整器が不具合を起こした。流れをバイパスしてコンテナを過剰に加圧し、隔壁とタンクに損傷を与えた。	原因は設計上の不備に関連した手続き上のものであった。計装コンテナの圧力センサー用のクイック着脱継手内に残されていたプラスチック製ダスト・キャップが、誤った圧力測定値を与えた。更に、低圧システムでは、圧力調整器をバイパスして 900 psi の圧力源が使用された。コンテナには安全弁が設けられていなかった。 (手順違反/不良、設計不良)
44	酸素パネルの耐圧試験中に、共通の T 接続部で高圧側が遮断されなかったために、これに気付かず、低圧側 (210 psig) に高圧側 (1,500 psig) の圧力が掛かった。	T 接続部の高圧側を遮断できない場合の手順上の誤りが原因である。試験に先立つ試験装置の適切な検証が不十分であり、試験手順に適切な警告メモを含めることが出来なかった。 (手順不良)
45	宇宙シミュレーションの試験中に、試験チャンバー内の酸素システムで爆発が発生し、システムが損傷した。	ボール弁に使用された適合性の無いシールが酸素による衝撃発火を起こしたという設計上の不備が原因である。 (設計不良、材料不適合)
46	試験室 (test cell) 内の極低温下で逆止弁の点検中に、1 人を負傷させ、機器に軽微な損傷を与える爆発が発生した。システムは 3,000 psi まで加圧中であり、爆発は 2,900 psi で発生した。	前回のラン後に試験手順で必要とされていた、オペレーターが電源を切って電磁弁を閉める手順を実施しなかった。原因は、手動弁の漏れ、試験装置の圧力解放装置の欠如、オペレーターに試験手順書の最新改訂版が提供されなかったこと、であった。 (手順違反/不良、設計不良、管理/監督不良)
47	宇宙船の環境制御システムの酸素供給システムが、電磁弁を交換する際に水銀によって汚染された。水銀は、その後の漏	製造施設および試験施設における、水銀を含んだ計器の適切な管理手順の欠如が原因である。明らかに、水銀はシステム内の交換された電磁式バイパス弁を介して持ち込ま

	れ点検中に、漏れ検知器のコールド・トラップ内で発見された。システム全体の完全な調査と洗浄が必要な出来事である。	れた。 (手順不良、管理/監督不良)
48	宇宙船の燃料電池電力システムの認定試験中に、システム内に残っていた残留洗浄液に由来する炭素堆積物によって発生した電氣的な不具合によって試験が早期に終了した。	使用された洗浄手順が、全ての残留洗浄液を完全に除去するためには不十分であった。原因は、洗浄剤と炭素堆積物および酸素システム電極との適合性について、分析と試験による確立に失敗したことである。 (洗浄/確認不良、材料不適合)
49	真空チャンバー内で有人ミッションのクルーが訓練中に、室内の頭上にある蛍光灯でアーク放電が発生した。チャンバー圧力は、高度 200,000 フィート (約 61 km) 相当であった。人的な負傷やハードウェアの損傷は発生しなかった。	主な原因は、チャンバー設計上の不備であった。蛍光灯の不具合はよく見られることが明らかになったが、チャンバーの設計では考慮されなかった。電気器具の一部と配線を溶かすのに十分な熱が発生し、蛍光管の金属端部そして最終的には陽極付近のガラスが損傷する。ガラスに含まれるナトリウムが長期の使用後に陰極として働き、陽極とガラスとの間でアーク放電の発生を可能にする。 (設計不良)
50	減圧チャンバー (altitude chamber) 内で環境制御システムの認定試験中に、商用グレードの裸ヒーター・テープが配線の短絡と可燃性物質の発火を引き起こした。減圧チャンバー内は、圧力 5 psi の 100 % 酸素であった。制御システムと試験機器が破壊された。	事故の原因は、システム設計と手順上の欠陥であった。試験の設定はスケッチと口頭によるコミュニケーションによって作られた。承認された試験用ハードウェア用材料が使用されなかった。適切な安全および緊急時手順が確立されていなかった。 (設計不良、手順違反/不良、材料不適合)

## 付録3-A (続き) NASA以外の事故/事件

\* 原因欄の最下部にある括弧書きは筆者による原因の分類である。

No.	事故/事件の概要	原因
1	操縦席の計器で 350 psi、カートの計器で 400 psi の動作圧力で T-33 航空機の整備中に、こもった爆発音が聞こえた。先端の車輪格納室から炎が出ているのが見えた。爆発と火災で航空機の表皮に穴が開いた。チューブ配管と継手システム内で火災が始まった。アルミニウム製チューブ配管は酸素の流れる方向に(部分的に)焼失していた。	炭化水素による内部汚染あるいは接続部の過大トルクの可能性によって、チューブ配管と継手システム内で火災が始まった。システム内で過大な熱を発生させる不適切な整備手順が事故の原因となった。 (保守/点検不良、手順違反/不良、汚染物質)
2	T-33 航空機の酸素システムの整備中に、ガス酸素の供給に使用していた酸素カートで爆発と火災が発生した。酸素カートの所にいた作業員が圧力調整器を操作していた。調整器の圧力が増加し、航空機の圧力計がゆっくりと増加するのが観察されていた。作業員はカートの火災によって致命傷を負った。	火災は、精製容器のグリースまたは油による汚染が原因であると考えられた。 (保守/点検不良、汚染物質)
3	航空機の着陸後に操縦室内で爆発が発生した。パイロットは、操縦室内で幾らかの煙が発生した後にフラッシュ火災が発生したと述べた。	低圧酸素逆止弁が損傷した。継手に、恐らくは過大トルクによって生じた、小さなクラックが認められた。大量の油を含んだ部分で酸素が漏れたことによって火災と爆発が発生した。 (保守/点検不良、手順違反/不良)
4	飛行前点検整備中 (T-28 航空機) に、航空機の操縦室にある緊急用酸素ボンベが爆発した。座席の底面部分で激しい火災が発生した。(4 ヶ月後に、同様な事故が発生した。)	損傷の原因は、酸素システムの汚染によるものと考えられた。急速な充填によって、弁円錐部 (valve cone) のゴム製プランジャー・ワッシャーが酸化して過大な温度と圧力が発生した。 (手順違反/不良、保守/点検不良、汚染物質)
5	航空機の酸素システムの立上げを含んだ飛行前点検中に火災が始まった。酸素によって火災が加速され、消火に失敗した。	酸素弁が疲労によって破損し、漏れ出した酸素が断熱材と周囲の材料に悪影響を与えた。酸素の供給を遮断することを妨げたシステム設計上の不備が原因である。 (設計不良)
6	酸素を使用して航空機燃料配管の不活性化作業を行っていた時に、火災と爆発が発生して航空機を破壊し、多数の死者を出した。	不活性化のために使用されたのは、窒素ではなく酸素であった。容器には酸素と印刷されていた。高圧の酸素が、配管内に残っていた燃料と反応した。システム設計上および手順上の不備が事故の原因であった。 (基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良)
7	後部コクピット (T-28 航空機) の高圧ガス酸素ボンベの整備中に、爆発と火災が発生した。整備カートから酸素配管が接続され、緊急脱出用ボンベを加圧する前に火災が発生した。	火災の原因として、サービス用接続部の炭化水素による汚染が考えられた。この汚染は、作業者が安全上の注意を守らないことによるものであった。汚染物質がホース継手に接触した。配管とホースは、パージもされなかったし、適切に保管もされなかった。フィルター弁には、硬い地面 (コンクリート) の上を引きずったことによる損傷が認められた。 (手順違反/不良、基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督不良)
8	航空機の中のパイロットが試験飛行の準備をしていた時、彼の脚の間から炎が噴き出した。炎は座席の底面部分から出ており、トーチ・ランプに似ていた。パ	事故の原因は、緊急用酸素ボンベの不適合なナイロン製弁シートの不具合によるものと考えられた。シート・パッドと他の物質が火災の燃料になった。 (設計不良、材料不適合)

	パイロットは脚のストラップを外して操縦室から転がり出たが、両手と両脚に火傷を負った。	
9	航空機の操縦室内で火災が発生した。パイロットが一般的な不具合を経験したのに続いて、コクピット内で煙が発生し、数秒以内に酸素が失われて炎が上がった。パイロットは火傷を負い、脱出してヘリコプターによって救出された。航空機は水面に衝突する前に爆発した。	原因は不明であるが、酸素システムの材料の不具合によるものと考えられた。 (設計不良、材料不適合)
10	航空機は酸素補給の準備が整っていた。酸素カートが航空機の近くに配置されていた。ホースが 425 psi に加圧され、航空機の受け口に接続している時に爆発と火災が発生した。	爆発する前に、精製器の近くで小さな漏れ音が聞こえた。精製器とフィルターエレメントが焼けた。適合性の無い材料の使用と手順上の不備が事故の原因であった。 (設計不良、材料不適合、手順違反/不良)
11	格納庫にあった航空機のキャビンで火災が始まった。火災は酸素を制御するアルミニウム製継手を溶かすのに十分な熱を与えた。火災は、他の 5 機の航空機に燃え広がった。	バッテリーの短絡によって、ヒーターに供給する配管から漏れた燃料が発火した。O <sub>2</sub> 制御器の上に溶け落ちたアルミニウム製継手が、火災に O <sub>2</sub> の供給を許した。システム設計上および作業手順上の不備と組み合わせた材料の不良が事故の原因であった。 (設計不良、材料不適合、手順違反/不良)
12	作業員達がアセトンを用いてリノリウム材を取り除き、別の高可燃性溶剤で座席を清掃していた時、航空機の客室で火災が発生した。火災は急速に広がり、機上に搭載された 4 本のボンベの安全弁を作動させた。格納庫の散水システム (deluge system) が火災を封じ込めた。	火災は、静電気放電あるいは延長コードの放電によって始まったと考えられた。高温になったために、酸素の安全弁が開いて O <sub>2</sub> を放出し、火勢を強めた。使用されたシステム設計と作業手順が事故の原因であった。 (設計不良、手順不良)

### 付録 3-B 事故の定義 - NASA安全マニュアルより

No.	事故の種類	説明
1	タイプ A (事故 : accident)	全ての死亡事故、5 人以上の重傷者、NASA と NASA 請負業者の機器または資産、あるいは航空機の破壊に対する 10 万ドル (あるいはそれ以上) の損害
2	タイプ B (事故 : accident)	4 人までの重傷者、NASA と NASA 請負業者の機器または資産に対する 1 万ドル以上、10 万ドル以下の損害
3	事件 (incident)	人や資産に対する 250 ドル以上、1 万ドル以下の損害、あるいは重傷者がいない
4	ミッション時の緊急状態	ミッションを危うくする全ての出来事、主な任務目標の妨げ、あるいは任務の未達成終了
5	航空飛行事故	飛行任務中および飛行するためにエンジンが始動された後に発生する、NASA が所有または運用中の航空機、あるいは NASA の飛行搭乗員、同乗者、あるいは試験要員を含む NASA の事故 (タイプ A またはタイプ B)

#### 4. アポロ1号宇宙船（AS-204）の火災事故

3章で紹介したNASA TM X-67953<sup>5)</sup>において、このアポロ1号の火災事故は詳しい説明をした事例に選択されていないが、閉鎖空間における酸素火災の危険性を最も良く表していると思われるので、ここで少し詳しく紹介することにする。ベースにしたのは、アポロ204号（後に、アポロ1号と呼ばれるようになる）事故調査委員会報告書<sup>1)</sup>および米国上院の航空宇宙科学委員会の報告書<sup>2)</sup>である。

##### 4.1. 事故の概要

この事故は、1967年1月27日にケネディ宇宙センターの34番発射台上におけるアポロ宇宙船の試験中に発生した。翌月に打ち上げを控えて、発射台に据えられたサターンIB型ロケット上で実際の飛行形態に近い形で全ての宇宙船システムと運用手順を実証し、打ち上げをシミュレートしてシステムの能力を検証することが目的であった。図4-1に試験時の発射台の構成を、図4-2に火災事故が発生した宇宙船周辺の拡大を示す。

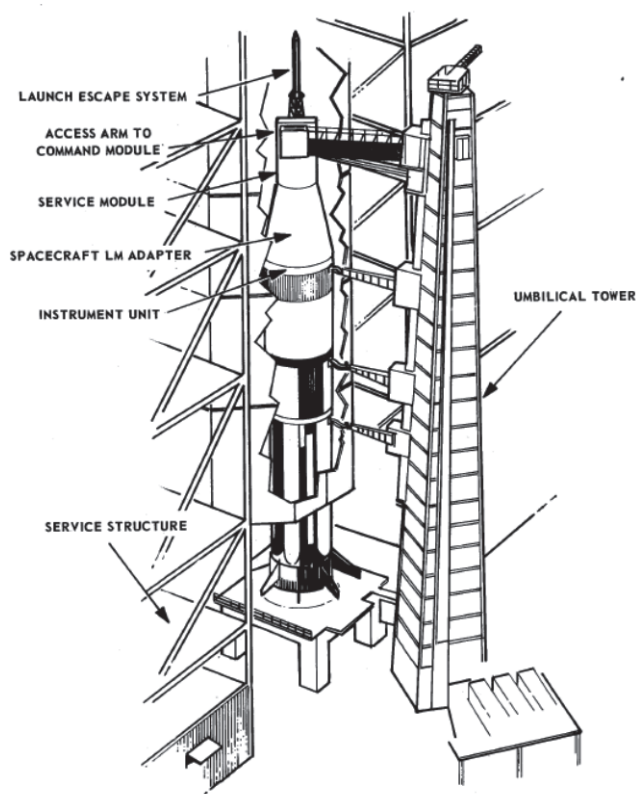


図4-1 試験時の発射台の構成 ©NASA

試験は1967年1月27日12:55 GMTに開始され、最初のシステム試験が完了した後、18:00 GMTに搭乗員達は宇宙船に入った。宇宙服の呼吸用酸素システムに臭気の問題があり、調査のためカウントダウンが18:20 GMTに中断された。ハッチが装着されて19:42 GMTにカウントダウンが再開され、19:45 GMTに船内を酸素で置換する作業が始まった。船内の圧力は、周囲よりも少し高い16.7 psi（約115 kPa）に設定された。23:20 GMTに、通信のトラブルが解決するまで、カウントダウンがT-10分の状態で中断された。

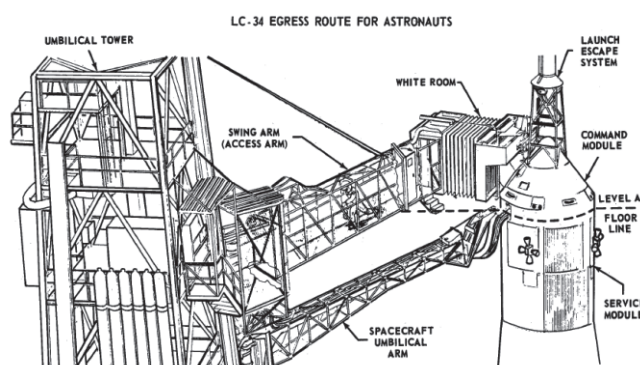


図4-2 宇宙船周辺の拡大 ©NASA

23:31:04.7 GMTに、宇宙船から火災を知らせる音声の送信が始まった。火災報告の約10秒前の23:30:54.8 GMTに、ACバスラインNo.2の電圧にサージが記録され、計測されていた幾つかの他のパラメータも異常な挙動を示していた。図4-3に、火災報告前後における計測諸量のタイムチャートを示す。その後、火災報告から約15秒後の23:31:19 GMTに宇宙船の圧力殻が破裂し、破裂から約3秒後の23:31:22.4 GMTに、宇宙船からの音声とデータの全ての送信が途絶えた。図4-4に、船内圧力上昇の経過を示す。ハッチ窓を映すテレビを監視していた要員は、炎が司令船の左側から右側に広がり、すぐに可視領域全体を覆ったと証言した。破裂した個所から火炎とガスが急激に吹き出し、周囲のサービス用建屋のフロアに火災を発生させた。また、火災の熱によって、宇宙船の上部に取り付けられている非常脱出システムの固体ロケットが着火する恐れがあった。

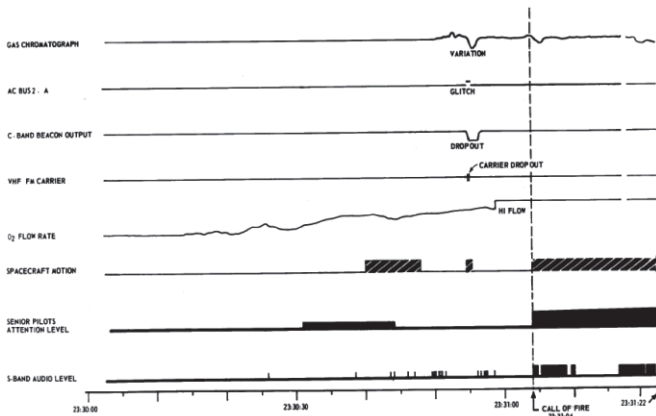


図 4-3 火災発生前後のタイムチャート ©NASA

有毒ガスと煙が充満して視界がほとんど遮られている困難な状況下で懸命な救助活動が行われた結果、宇宙船の3重になっている全てのハッチが開放されたのは、火災の報告から約5分後、あるいはおよそ23:36 GMTであるとされた。

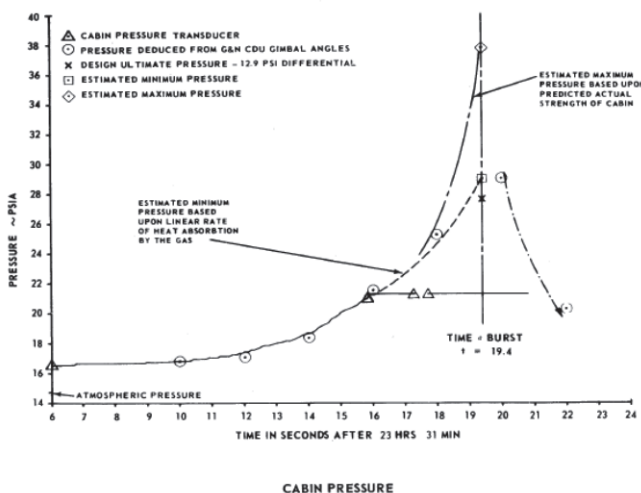


図 4-4 宇宙船内の圧力上昇の経過 ©NASA

剖検報告に基づく医学的見解によれば、意識が失われた時（最初に宇宙服が損傷してから約15～30秒後）には蘇生の可能性が急速に低下し、23:36 GMTには蘇生が不可能であったと結論付けられた。

船内の写真が多数撮影され、搭乗員達の遺体の搬出が完了したのは、事故発生から約7時間30分後であった。図4-5に、事故後の宇宙船内の様子をハッチから見た写真を示す。

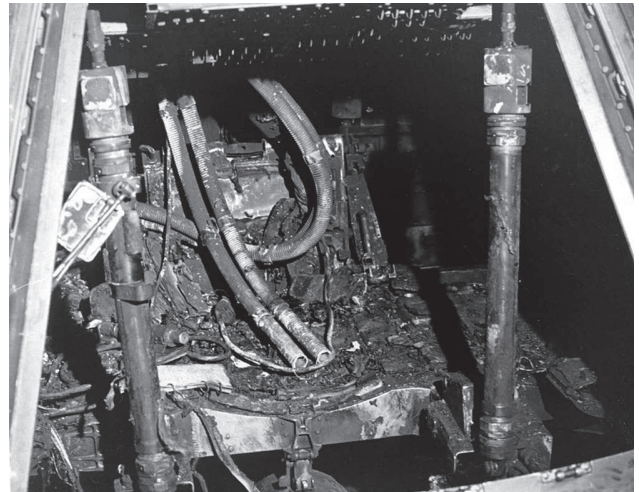


図 4-5 事故後の宇宙船内の様子 ©NASA

以上に述べたように、閉鎖空間の酸素雰囲気中で発生した火災は、火災に気付いてから僅か30秒程度で致命的となる極めて危険なものであることが良く理解できる。

#### 4.2. 事故の原因

事故調査委員会は、最終的にアポロ204号の火災の直接の火元を明らかにすることが出来なかったが、災害につながった条件を特定した。これらの条件は以下の通りである。

1. 酸素で加圧された密閉型キャビン
2. キャビン内に可燃性物質が広範囲に存在
3. 宇宙船の電力を搬送する脆弱な配線
4. 可燃性で腐食性の冷却剤を通す脆弱な配管
5. 搭乗員脱出のための不十分な規定
6. 救助および医療支援のための不十分な規定

これらの条件を特定した上で、これらの条件がなぜ存在するようになったのかという疑問に取り組んだ。委員会が慎重に検討した結果、アポロ・チームが搭乗員の安全に関して十分な注意を払わなかった、という結論に至った。委員会の調査によって、設計と技術、製造、品質管理において多くの不備が明らかになった。

調査の結果、設計、材料、および手順の大幅な見直しが行われた。1つ目の大きな変更点は、2ピースの内開き式の搭乗員ハッチがアルミニウムとファイバー・ガラスで作られた単一のクイック操作の外開き式のハッチに置き換えられた。新しいハッチは、内部からは7秒で、射点の安全係員によって10秒で開けることが出来た。

2つ目の大きな変更点は、如何なる支燃性も軽

減するために、発射前の射点における宇宙船のキャビン雰囲気、100%酸素から60%酸素 - 40%窒素の混合ガスに変更したことであった。宇宙服の呼吸系は依然として100%酸素を使用したままであった。打ち上げ後、60/40混合ガスは、キャビンの雰囲気が5 psi (約34.5 kPa) に達するまで、徐々に純粋な酸素で置き換えられ、宇宙空間では100%の酸素雰囲気に保たれる。この「濃縮空気」混合ガスは、圧力を変えた様々な割合の酸素で大規模な燃焼性試験を行った後で選択されたものである。

その他の変更点は次の通りである。高圧酸素配管のアルミニウムをステンレス鋼に置き換える。水 - グリコール冷却液配管のはんだ付け部に保護板を設ける。電気配線の束に保護カバーを設ける。収納箱をアルミニウム製とする。可燃性を最小限に抑えるために材料を置き換える。可燃物を入れるための耐火性収納容器を設置する。固定用のマジックテープを機械的な留め具に置き換える。配線接続部に防炎コーティングを施す。プラスチック製スイッチを金属製のものと置き換える。搭乗員を有毒ガスから保護するための緊急用酸素システムを設置する。携帯用消火器と防火パネルをキャビンに組み込む。

ケネディ宇宙センターの34番発射台においても、安全性を高める変更が行われた。これらには以下が含まれる。すなわち、新しいクイック開放宇宙船ハッチ用にホワイト・ルームの構造を変更、改良された消防設備、緊急用脱出ルート、宇宙船への緊急アクセス、ホワイト・ルームの全ての電気機器を窒素ガスでパージ、ホワイト・ルームに煙と有害ガスを外に排出する携帯型の水ホースと大型の排気ファンの設置、耐火性塗料の使用、宇宙船により容易にアクセスしてより速い脱出を可能にするために特定の構造部材を移設、打ち上げ時緊急脱出用システムを冷却するための水噴霧装置の追加（固体推進剤は極端な熱によって着火する恐れがあるため）、そして宇宙船から地上までの脱出ルートに沿った追加の水噴霧装置の設置、などである。

当時でも酸素の支燃性による危険性は広く知られており、アポロ宇宙船の計画当初においては、船内の雰囲気に酸素と窒素の混合ガスを使用する予定であった。しかし、計画が進むに従って、混合ガスシステムの採用による複雑さと重量増の問題、打ち上げ時の減圧に伴う潜水病発症の恐れ、期限と重量上の制約、およびこれ

までNASAが運用してきた純酸素雰囲気を採用したマーキュリー宇宙船とジェミニ宇宙船において問題が発生していない実績による自信、などによって純酸素雰囲気使用に変更された経緯がある。

また、事故当日の訓練では、宇宙空間における船内圧5 psiを模擬するために、地上で同じ差圧条件を得るために、不用意に船内を16.7 psiまで加圧したことが状況を一層悪くした。従って、事故調査委員会が指摘した多くの要因が重なり、起こるべくして起こった火災事故と見るができる。

## 5. 主に米国の一般産業界における酸素関連事故

本章では、第2章で触れたNASAのASRDIがエアプロダクツ社（Air Products and Chemicals, Inc.）に委託した酸素関連の調査業務の最終報告書全4巻<sup>6)</sup>の内の第1巻pp.295-325に記載されている事故例について紹介する。これらの事故は1950年代初頭から1971年にかけて発生したものである。

調査は、エアプロダクツ社の設備や製品およびその顧客の事業所において発生した事故を中心に行われているが、他社や他国における事故も含まれている。これらの事故は、以下に示す8項目に分類されている。なお、8.高速道路および鉄道用タンクローリーについては、交通事故や鉄道事故によってタンクが損傷を受けた例はあるが、タンク自体の不具合に起因する事故ではないとされて事故例への記載は無い。

1. 空気分離装置
  - a) 一般
  - b) 再沸器（リボイラー）
2. 酸素圧縮機
3. 液体酸素ポンプ
4. 酸素圧力調整器および関連機器
5. 配管およびパイプライン
6. 貯蔵システム
7. 計器および計装
8. 高速道路および鉄道用タンクローリー

表5にこれらの事故事例を示す。約50年以上も前の事例であるが、現在でも類似の事故を度々見聞きするので、参考になるものと考え。

表5. 米国エアプロダクツ社が調査した酸素関連の事故事例<sup>6)</sup>

\* 事故の概要欄の最後にある括弧書きは筆者による分類である。

No.	分類		事故の概要
1	空気液化 分離装置	一般	誤操作と安全対策違反----安全放出弁の詰まり、による過加圧によって精留塔が破裂した。高圧精留塔が広範囲に損傷し、コールドボックスと低圧精留塔が軽微な損傷を被った。負傷者無し。 (保守/点検不良、管理/監督不良、教育不良)
2			蒸発器コイルにおいて、凝縮器からのパージ流中で発火が起きた。制限された流れのコイル中で汚染物が濃縮されたと考えられた。着火源と汚染物質は特定されていない。負傷者は報告されていない。 (保守/点検不良、汚染物質)
3			酸素富化再活性化窒素の空気乾燥機および高温乾燥器における火災。冷温停止からの立上げ後に火災が発生した。被害は全焼を免れた乾燥機に限定された。負傷者無し。 (不明)
4			酸素富化された再活性化窒素および高温乾燥器のNo.2油分離器における火災。火災は冷温停止からの立上げ後に発生した。被害は全焼を免れた乾燥機に限定された。負傷者無し。操作手順の変更によって、この潜在的な危険性が排除された。 (手順違反/不良)
5			精留塔が過加圧によって破裂した。高圧精留塔からの配管が部分的に絞られていたものと考えられる。高圧精留塔の損傷は広範囲に渡った。1人が軽傷を負った。 (設計不良)
6			ドレン管から漏れたLOXが炭素鋼製の空気配管に衝突し、この配管が若干の油を含んだ溝の中で破裂した。設備の制御室がある圧縮機棟が広範囲に損傷を被った。3人が死亡した。 (設計/施工不良)
7			プロセス用空気を高温分離器（400 deg.F以上）に導入した時に、No.2油分離器で火災が発生した。分離機内部が軽度の損傷を受けた。負傷者無し。 (不明)
8			プロセス機器の外部にある空気分離設備のコールドボックスの爆発によって、大規模な設備の損傷と3人の死者が発生した。発火はLOXと油を吸い込んだロックウールとの間で発生したものと結論された。 (設計不良、保守/点検不良)
9			コールドボックス・プレートの下で燻ぶっていた木の床に漏れたLOXが浸透した。設備全体にわたる大規模な被害と15人の死者が発生した。 (設計不良)
10			低圧精留塔の上部6段で爆発が発生した。詳細な情報が欠けているが、発火では無く過加圧が関係していると考えられた。コールドボックスに軽度の損傷を受けた。負傷者の報告無し。 (不明)
11			顧客が酸素乾燥機と窒素配管を横つなぎしたことによる乾燥機における火災。承認されていない現場での変更である。損傷は乾燥機の配管に限定された。負傷者無し。 (手順違反/不良)
12			ドレン弁と純酸素フィルターの除霜ヘッダーにおける爆発と火災。機器の損傷は軽微であった。死者1名。 (不明)
13			誤操作による過加圧によって精留塔が破裂した。低圧精留塔の過剰な液位をもたらした液面計の不良が疑われた。

			(手順違反/不良、教育不良、保守/点検不良)
14			LOX廃棄用蒸発器内で油と酸素が発火した。死者1名、負傷者2名。 (保守/点検不良、汚染物質)
15			再活性化サイクルの開始時に、往復動式エキスパンダー油分離器において火災が発生。機器の被害および負傷者無し。 (不明)
16			高圧乾燥機弁の漏れによる過大圧力によって、空気乾燥器の加熱箱が破裂した。乾燥機の付属品に軽微な損傷発生。負傷者無し。 (保守/点検不良)
17			高温乾燥器の容器を冷却するために空気を使用した時、乾燥器のダストフィルターに火災が発生した。損傷は乾燥器フィルターと配管に限定された。負傷者無し。 (不明)
18			膨張エンジンの油除去容器で-265 deg.F (約-165 deg.C) の空気と油が発火した。分離器と関連する配管が中程度の損傷を受けた。 (不明)
19			Deoxoユニット (筆者注: 窒素中の酸素を取り除く装置) で水素が酸素と反応した。誤操作が原因。貯槽支柱脚とコンクリート基礎に被害を与えた。負傷者無し。 (手順違反/不良)
20		一般	エンジン弁バネの機械的な損傷と通常よりも高い酸素濃度のプロセスガスによって放出管内に蓄積した油が発火した。配管と弁システムが大きく損傷した。建物や他の機器に小規模な損傷を与えた。負傷者無し。 (保守/点検不良、汚染物質)
21			配管システムに設置された膨張エンジン油吸収フィルターにおける発火。損傷は配管システムとフィルター材に限定された。負傷者無し。 (不明)
22	空気液化 分離装置		安全弁が作動した後に、無人の自動プラントの安全弁ヘッダーの貫通穴からLOX が溢れ出した。設計上の誤り。 (設計不良)
23			蒸発器が使用に供された時、洗浄後に蒸発器内に残っていた溶剤と酸素が反応した。蒸発器は広範囲に損傷を被った。死者2名を出した。 (手順違反/不良、洗浄不良、管理/監督不良)
24			補助精留塔における発火。詳細不明。 (不明)
25			油分離器フィルターにおける発火。損傷は分離器容器内のフィルターエレメントに限定された。負傷者無し。 (不明)
26			炭化水素吸着器部分での発火。以前の洗浄で使用されたトリクレン溶剤の残留物と酸素が反応。 (手順違反/不良、洗浄不良、管理/監督不良)
27			高圧空気配管が熱交換器部で破裂した。空気配管内の水蒸気による配管の浸食が原因。配管は17年間使用されていた。 (保守/点検不良)
28			燃料蓄積の可能性があるヘッダー配管の行き止まりにあるコイル状チューブ熱交換器の酸素流路で発火が起きた。損傷はヘッダー配管の一端に限定されていた。負傷者無し。 (設計不良、保守/点検不良、汚染物質)
29		再沸器 (リボイ ラー)	亜酸化窒素 - アセチレン結晶による再沸器の発火。 (保守/点検不良、汚染物質)
30			エチレンと炭化水素が再沸器内で濃縮されて反応し、空気分離装置のコール

	空気液化 分離装置	再沸器 (リボイ ラー)	ドボックス、窒素洗浄棟のコールドボックス、隣接する付属装置に大きな損傷を与えた。人的な被害が発生した。 (保守/点検不良、汚染物質)
31			空気圧縮機に由来する炭化水素による再沸器の発火が発生。 (保守/点検不良、汚染物質)
32			再沸器の発火。アセチレンが関与していると考えられた。チューブ内における酸素の減少。1本の再沸器のチューブが関与していた。 (保守/点検不良、汚染物質)
33			精留塔の発火。アセチレンプラントの立地場所によると考えられる精留塔液溜内のアセチレンの存在が原因。 (保守/点検不良、汚染物質)
34			精留塔の発火。詳細は不明。 (不明)
35			不十分な圧縮機運用と設備の洗浄を実施しなかったために、炭化水素が蓄積して再沸器で僅かな反応が起きた。反応の唯一の兆候は純度の低下であった。底部チューブシートの再沸器容器が僅かに膨らんでいた。負傷者無し。 (手順違反/不良、洗浄/点検不良、汚染物質)
36			高压精留塔と低压精留塔の間にある継手が破裂した。発火の原因を特定するための詳細が不十分である。 (不明)
37			再沸器の発火。アセチレンの関与が考えられた。チューブ内における酸素の減少。コールドボックスが広範な損傷を被った。負傷者無し。 (保守/点検不良、汚染物質)
38			再沸器の発火。詳細は不明。 (不明)
39			再沸器の発火。酸素流路の乾燥沸騰 (dry boiling) 。 (手順違反/不良、汚染物質)
40			下部液面配管を抜くのに高压の酸素を使用したために汚染物が発火して再沸器が爆発した。 (手順違反/不良、汚染物質)
41			再沸器の発火。原因不明。 (不明)
42			再沸器の発火。酸素流路の乾燥沸騰。 (汚染物濃縮)
43			再沸器の発火。酸素流路の乾燥沸騰。 (汚染物質)
44			爆発によって低压精留塔の液溜めとトレイが損傷した。詳細は不明。 (不明)
45			再沸器の発火。酸素流路の乾燥沸騰。 (汚染物質)
46			再沸器の発火。酸素流路の乾燥沸騰。 (手順違反/不良、汚染物質)
47			再沸器の発火。乾燥沸騰が発生した時に炭化水素が1本のチューブ内に濃縮された。不安定なプラントの稼働が、唯一の発火の兆候であった。 (手順違反/不良、汚染物質)
48			再沸器の発火。原因不明。 (不明)
49			再沸器の発火。原因不明。 (不明)
50			再沸器の発火。乾燥沸騰が発生したときに、1本のチューブ内で特定されていない汚染物質が濃縮された。純度の低下と高压精留塔圧力の低下、低压精

	空気液化 分離装置	再沸器 (リボイ ラー)	留塔圧力の増加だけが発火の兆候であった。 (手順違反/不良、汚染物質)
51			凝縮器の発火によって設備が破壊された。詳細は不明。 (不明)
52			液面レベルにある液中配管の1本のチューブにおける再沸器の発火。原因は不明。純度の低下だけが発火の兆候であった。 (不明)
53			再沸器のチューブが押しつぶされ、再沸器が膨らみ、液面およびドレン配管が破裂した。原因は不明。 (不明)
54			酸素の過冷却器で爆発が発生した。詳細は不明。 (不明)
55			サイドアーム精留塔で爆発が発生した。詳細は不明。 (不明)
56			再沸器の発火。乾燥沸騰が発生した時に、チューブ内で汚染物質が濃縮された。 (手順違反/不良、汚染物質)
57			再沸器の発火。乾燥沸騰が発生した時に、チューブ内で汚染物質が濃縮された。 (手順違反/不良、汚染物質)
58			再沸器の発火。乾燥沸騰が発生した時に、チューブ内で汚染物質が濃縮された。 (手順違反/不良、汚染物質の濃縮)
59			再沸器の発火。乾燥沸騰が発生した時に、チューブ内で汚染物質が濃縮された。 (手順違反/不良、汚染物質)
60			設備の爆発。詳細は不明。 (不明)
61			再沸器内にあったアセチレンが原因と考えられる再沸器の爆発。 (汚染物質)
62			再沸器の発火。実際は85%の液位であったが、代わりに100%を示した液面計の不良が原因。凝縮器内における乾燥沸騰によって生じた。 (保守/点検不良、汚染物質)
63	酸素圧縮機 (往復動式、遠心式)		遠心式。通常のメンテナンス中に内部発火の痕跡が見つかった。 (不明)
64			遠心式。ベアリングに給油しないで逆回転させた酸素圧縮機。過熱によって高温のオイル蒸気が発火した。 (手順違反/不良、保守/点検不良)
65			往復動式。第4段ピストンの薄肉頂部を起点とする火災を伴う4つの反応。 (設計不良、材料不適合)
66			遠心式。詳細不明。 (不明)
67			遠心式。第2危険速度に近過ぎる動作によって生じた不安定。 (設計不良、手順違反/不良)
68			往復動式。詳細不明。 (不明)
69			遠心式。最終段インペラーとバランスピストンとの間にある高圧ケースにおける発火。負傷者の報告無し。原因不明。 (不明)
70			往復動式。オーバーホール後に弁バネに残ったグリースが、圧縮機の立ち上げ時に酸素と反応した。

		(手順違反/不良、基本的知識の欠如、教育不良)
71	酸素圧縮機 (往復動式、遠心式)	遠心式。水漏れによって発生した腐食生成物（錆）が、バランスピストン部分で摩擦による加熱と発火を引き起こした。 (設計不良、材料不適合)
72		遠心式。詳細不明。 (不明)
73		往復動式。酸素圧縮機の第3段目の火災がシリンダーを破壊し、弁カバーを吹き飛ばした。負傷者無し。 (不明)
74		遠心式。第2危険速度に近過ぎる動作によって発生した不安定。 (設計不良、手順違反/不良)
75		往復動式。冷却器部分で外れたボルトがピストン-シリンダー部に流入し、火災を発生させた。 (設計不良、保守/点検不良)
76		往復動式。詳細不明。新聞によれば、3名の死者が発生したと伝えている。 (不明)
77		遠心式。他のプロセスから逆流した可燃性流体によると考えられる発火。 (手順違反/不良)
78		往復動式。破損したピストンロッドによる発火。 (設計不良、保守/点検不良)
79		往復動式。破損したピストンによる発火。 (設計不良、保守/点検不良)
80		遠心式。詳細不明。 (不明)
81		遠心式。始動直後に発火した。長期保存後の不適切な洗浄が原因と考えられた。 (手順違反/不良、洗浄不良)
82		遠心式。ベアリングに油潤滑をしないで逆回転させた酸素圧縮機。過熱によって高温のオイル蒸気が発火した。 (手順違反/不良、保守/点検不良)
83		往復動式。アフタークーラーの漏れによる水と腐食物質が発火の原因の一部と考えられた。作業者が重傷を負った。 (設計不良、保守/点検不良)
84		遠心式。圧縮機の吸気に粒子が混入したように見え、インペラーの接触を引き起こした。負傷者無し。 (設計不良、異物侵入)
85		遠心式。高圧ケースの発火は、同時に発生した重大な電氣的故障に関係している可能性があった。 (不明)
86		遠心式。詳細不明。 (不明)
87		遠心式。1968年6月に、再生された酸素圧縮機の初回始動時に事故が発生して死亡者が出た。 (不明)
88		遠心式。定期的な内部検査によって、以前の始動時に圧縮機が関与しない発火が起きたことが明らかになった。ラビリンスシールが反対に装着されていた。 (保守/点検不良)
89		遠心式。吐き出し渦室の不適切な洗浄が、圧縮機の吐き出し側の火災の原因と考えられた。 (手順違反/不良、洗浄不良)

90	酸素圧縮機 (往復動式、遠心式)	遠心式。低圧ケースの焼損。スラストベアリング部の機械的な故障が軸の移動を引き起こした。火災は第4段で始まり、第2段まで焼損した。 (保守/点検不良)
91		遠心式。圧縮機の始動時に発火が起きた。 (不明)
92		遠心式。発火源は第7段目の高圧部のケースであるように見える。負傷者無し。原因に関する詳細は不明。 (不明)
93		遠心式。汚れた中間冷却器が原因と考えられた。 (保守/点検不良、汚染物質)
94		遠心式。圧縮機の高圧部と中圧部のケースが焼損し、1人が死亡し、他の8人が負傷した。 (不明)
95		遠心式。詳細不明。 (不明)
96	液体酸素ポンプ (往復動式、遠心式)	遠心式。ポンプが焼き付いて火災が発生した。 (保守/点検不良)
97		タイプ不明。LOXの移送中にポンプが爆発した。詳細不明。 (不明)
98		往復動式。ポンプの試験中に火災が発生した。プランジャーロッドの材質の適合性が疑われた。1人が死亡、2人が負傷。 (設計不良、材料不適合)
99		往復動式。ポンプバレルの機械的な破損のみであった。燃焼反応は起こらなかった。 (不明)
100		往復動式。ポンプロッドのクロムメッキが剥がれて発火し、ポンプの爆発が起きた。 (設計/製造不良)
101		遠心式。タンクローリーの火災と爆発は、LOXを設備の貯槽に移送中に発生したと考えられている。 (不明)
102		遠心式。多段ポンプにおける炭化水素の蓄積。発火について議論された。 (保守/点検不良、汚染物質)
103		往復動式。油で汚染された配管が相互に接続された。また、配管も圧力が過小評価されていた。発火で3人が負傷。 (保守/点検不良、設計不良)
104		遠心式。温かいポンプを始動したとき、油で汚染されたLOX配管とポンプが発火した。1人が死亡、3人が負傷。設備の機器は、空気中における燃焼によって重大な損傷を被った。 (保守/点検不良、汚染物質)
105		往復動式。ポンプのロッド材料を取り換えてロッドにクロムメッキを施したところ、メッキ材料が剥離して酸素と反応し、火災が発生した。 (設計/製造不良)
106		往復動式。ポンプのロッド材料を取り換えてロッドにクロムメッキを施したところ、メッキ材料が剥離して酸素と反応し、火災が発生した。 (設計/製造不良)
107		往復動式。ポンプのパッキンを過大に締め付けたことによって、コネクティングロッドに機械的な破損が生じた。 (保守/点検不良、手順違反/不良)
108		遠心式。ベアリングの損傷によってポンプインペラーとケースが接触して発火した。1人が軽傷を負った。

		(保守/点検不良)
109	液体酸素ポンプ (往復動式、遠心式)	遠心式。潤滑剤中の水分が原因のベアリングの損傷によってLOXポンプで火災が発生した。1人が負傷した。 (保守/点検不良、材料不適合)
110		遠心式。異物がポンプに入って発火を起こしたと考えられている。ポンプは1966年5月21日に発生した事故で交換されていた。負傷者無し。 (設計不良、異物侵入)
111		遠心式。液中に設置されたLOXポンプが壊れた時に、タンクローリーが爆発した。2人が死亡し、17人が負傷した。 (設計不良)
112		遠心式。製品を貯槽に移送している時に、LOXポンプに火災が発生した。 (不明)
113		タイプ不明。トレーラーから貯槽にLOXを移送している時に火災が始まった。 (不明)
114		遠心式。異物がポンプに侵入して発火が起きたと考えられている。 (設計不良、異物侵入)
115		往復動式。断熱シールとシールナット部分に由来する火災の原因は、きつく締め付けられたポンプパッキンであると考えられた。 (保守/点検不良、手順違反/不良)
116		遠心式。ポンプのパッキンから漏れた酸素が下側のモーターベアリングに流入して発火し、モーターに被害を与えた。 (設計不良)
117		遠心式。ベアリングの摩耗によって、ポンプのインペラーとケースが接触した。 (保守/点検不良)
118		遠心式。異物がポンプに流入してインペラーに衝突した。 (設計不良、異物侵入)
119		遠心式。ベアリングに損傷が生じた。ポンプの内部に損傷を与える前にポンプが停止された。火災は発生しなかった。 (保守/点検不良)
120		タイプ不明。試験中のタンクローリーにおいて、制御が終了した時に火災が発生した。他の詳細は不明。 (不明)
121		遠心式。潤滑不良によってベアリングが摩耗し、最終的にポンプインペラーとケースの接触が発生し、火災を引き起こした。負傷者無し。 (保守/点検不良)
122		遠心式。ベアリングケースに限定されたポンプ火災。ベアリングとシールが損傷。負傷者無し。 (保守/点検不良)
123		遠心式。ベアリングケースに限定されたポンプ火災。ベアリングとシールが損傷。負傷者無し。 (保守/点検不良)
124		遠心式。ベアリングの摩耗によってポンプインペラーとケースの接触が発生した。 (保守/点検不良)
125		遠心式。ベアリングの摩耗によってポンプインペラーとケースの接触が発生した。 (保守/点検不良)
126		遠心式。ベアリングの摩耗によってポンプインペラーとケースの接触が発生した。火災によって2人が負傷した。

		(保守/点検不良)
127	液体酸素ポンプ (往復動式、遠心式)	遠心式。ベアリングの摩耗によってポンプインペラーとケースが接触し、続いて発火を引き起こした。負傷者無し。 (保守/点検不良)
128		遠心式。ポンプの入り口フィルターの部品がポンプに流入してインペラーとケースの接触を発生させ、続いて発火を引き起こした。 (設計不良、異物侵入)
129		遠心式。ポンプ部品を接触させ、続いて発火を引き起こす、ベアリングの損傷が原因と見られる。負傷者無し。 (保守/点検不良)
130		遠心式。一連の潤滑不良、ベアリング損傷、摩擦接触、および発火に起因するポンプ不具合。負傷者の報告無し。 (保守/点検不良)
131		遠心式。試験中のポンプの汚染が発火の原因であると考えられた。1人が死亡、2人が負傷。 (手順違反/不良、洗浄不良、汚染物質)
132		往復動式。ポンプ内部部品の機械的な損傷が、ポンプ構成材料を発火させる原因になった。 (設計不良、保守/点検不良)
133	酸素圧力調整器 および 関連機器	詳細不明。 (不明)
134		詳細不明。 (不明)
135		詳細不明。 (不明)
136		他社による修理。 (不明)
137		詳細不明。 (不明)
138		高圧側の発火。他社による修理。 (不明)
139		高圧側の発火。原因は特定されていない。圧力調整器は長尺トレーラー容器に接続されていた。顧客の設備に中程度の被害を与えた。 (不明)
140		高圧側の発火。原因は不明。 (不明)
141		低圧側の発火。原因は不明。 (不明)
142		火災に関与しているが、発火の原因ではない。不適切な操作手順。 (手順違反/不良)
143		高圧側の発火。携帯型アセチレン発生器による燃料源が寄与していると考えられた。 (汚染物質)
144		詳細不明。酸素 - アセチレン用の服装一式が燃えた。 (不明)
145		高圧側の発火。操作手順が原因であると考えられた。 (手順違反/不良)
146		低圧側の発火。操作手順が原因であると考えられた。 (手順違反/不良)
147		高圧側の発火。システムの洗浄されていない部品の汚れが原因。 (洗浄/確認不良)

148	酸素圧力調整器 および 関連機器	酸素システム中の水素が発火した。システムの設計が原因。 (設計不良)
149		低圧側の発火。操作手順が原因。 (手順違反/不良)
150		不適切な機器メンテナンスが原因。 (保守/点検不良)
151		低圧側の発火。操作手順が原因。 (手順違反/不良)
152		低圧側の発火。不完全に修理された機器が原因。 (保守/点検不良)
153		3 台の圧力調整器が関係した。酸素システム中の水素が原因。システムの設計が原因。 (設計不良)
154		不具合のある圧力調整器が、修理が必要かどうかを決定するために酸素で試験された。作業者の手順が適切でなかった。 (手順違反/不良)
155		詳細不明。 (不明)
156		詳細不明。 (不明)
157		低圧側の発火。操作手順が原因。 (手順違反/不良)
158		低圧側の発火。操作手順が原因。 (手順違反/不良)
159		低圧側の発火。操作手順が原因と考えられた。 (手順違反/不良)
160		高圧側の発火。修理中に圧力調整器が汚染されたのが原因。 (保守/点検不良、汚染物質)
161		高圧側の発火。修理中に圧力調整器が汚染されたのが原因。 (保守/点検不良、汚染物質)
162		低圧側の発火。操作手順が原因。 (手順違反/不良)
163		高圧側の発火。不適切な修理が原因と考えられた。 (保守/点検不良)
164		高圧側のブルドン管圧力計で発火が始まったように見える。原因は特定されていない。 (不明)
165		低圧側の発火。詳細不明。 (不明)
166		低圧側の発火。詳細不明。1969 年 4 月製造の圧力調整器。 (不明)
167		高圧側の発火。圧力調整器以外のボンベの弁あるいは弁通路に発火の原因があり、圧力調整器も巻き込まれた。 (不明)
168		寒冷気候下における運用に対して不適切な燃料システムの設計によって発生した一連の低圧側の発火。 (設計不良)
169		寒冷気候下における運用に対して不適切な燃料システムの設計によって発生した一連の低圧側の発火。 (設計不良)
170		高圧側の発火。現場修理による汚染物の導入が原因。

		(保守/点検不良、汚染物質)
171	酸素圧力調整器 および 関連機器	高圧側の発火。酸素ポンベの弁シートが原因。 (設計不良、材料不適合)
172		高圧側の発火。原因不明。 (不明)
173		間違った先端チップと損傷した座面によって発生した酸素 - 燃料混合気の 逆火によって、酸素溶断機 (jetcut machine) が大きく損傷した。 (手順違反/不良、保守/点検不良)
174		高圧側の発火。酸素ポンベの弁シートが原因と考えられた。 (設計不良、材料不適合)
175		高圧側の発火。詳細が不十分であるが、作業対象物は油とグリースでひどく 汚染されていた。 (汚染物質)
176		完全な分解および溶剤洗浄を行わずに、ある製品用から酸素用に圧力調整器 の用途を変更したお粗末な方法が原因。 (手順違反/不良、洗浄不良、汚染物質)
177		高圧側の発火。発火の原因は圧力調整器の外部にあった。 (不明)
178		電気システムに起因する酸素溶断機の火災。また、1つのトーチにも欠陥が あった。 (設計不良)
179	配管および パイプライン	タンクローリーと貯槽との間の移送ホース接続部の漏れによってLOXがア スファルト舗装に浸透した。運転手がタンクローリーから舗装に飛び降りた 際に爆発が発生し、運転手と助手が重傷を負った。 (手順違反/不良、基本的知識の欠如、教育不良)
180		6本の高圧チューブ配管に接続された弁と配管システムに火災が発生し、そ の内の4本が残留圧力の吹き出しによって飛び出した。閉じた弁を開けた時 の摩擦、速度、および断熱圧縮による発火源を備えたシステムにおいて、不 適合材料の証拠が見つかった。負傷者は無かったが、設備に重大な損害が発 生した。 (設計不良、材料不適合、手順違反/不良)
181		長尺容器トレーラーから貯蔵システムに酸素を移送中に、ゴム製の高圧ホー スが破裂して発火した。材料が酸素用に適合していなかった。運転手が重傷 を負った。 (設計不良、材料不適合)
182		高圧ステンレス配管が発火して燃焼した。システム内で油と炭素鋼の棒が発 見された。サボタージュが疑われた。負傷者無し。 (手順違反/不良)
183		システムの遮断弁内で発火が生じ、製鋼所の炉に酸素を供給する圧力調整器 ステーションと関連配管が重大な被害を被った。1台の弁の材料適合性が疑 われた。過剰流弁 (筆者注: 過大な流量が流れた場合に、流れを遮断する弁) が火災への酸素の供給を遮断し、火災が影響する領域を制限した。 (設計不良、材料不適合)
184		貯蔵所から過剰なLOXが排出された後に、地下ドレインシステムが爆発し た。ドレイン管内の汚れとドレイン配管の脆化が原因。 (設計不良、材料不適合、保守/点検不良、汚染物質)
185		少量の燃料が発火し、配管材料の間違った圧力定格が原因で高圧酸素配管が 破裂した。 (設計不良)
186		高圧酸素フレキシ移送管が継手部分で破損した。現場における修理が間違っ ていた。 (保守/点検不良)

187	配管および パイプライン	<p>高圧酸素用の配管とマニホールドシステムが破損した。システムは低圧用のパイプと不適合材料で製作され、さらに弁システムが炭化水素油で潤滑されていた。1人が重傷を負った。</p> <p>(設計/製造不良、材料不適合、汚染物質、基本的知識の欠如、教育不良)</p>
188		<p>新しい炭素鋼製の工場配管が溶剤で洗浄され、油を含んでいる工場の空気を使って乾燥された。配管を初めて使用した後、酸素の流れを止めた際に発火が起きた。</p> <p>(手順違反/不良、基本的知識の欠如、教育不良)</p>
189		<p>吸入遮断弁のチェーン操作者が弁を部分的に開いたままロックすることに失敗した時、酸素圧縮機の吸入配管で火災が発生した。弁を通るガス速度の変化が弁材料の発火源として疑われた。1人の男が致命傷を負った。</p> <p>(手順違反/不良、設計不良、材料不適合)</p>
190		<p>液体水素配管システムの断熱材が損傷して割れたために、空気が冷たい配管表面に接して液化した。多少の蒸留によって、断熱材内に蓄積した液体空気の酸素富化が発生した。配管システムから漏れたいくらかの水素が酸素富化空気と反応し、断熱材や配管に損傷を与えたと考えられた。発火源は不明である。負傷者の報告無し。</p> <p>(設計不良)</p>
191		<p>貯槽と蒸発器システムから過剰に流入させたため、400番台の炭素鋼製配管が脆性破壊を起こした。蒸発器の出口側にある温度制御弁が迅速に応答しなかったのが原因。</p> <p>(設計不良、材料不適合)</p>
192		<p>酸素を使用して新しい配管のブロー (blowout) 作業を行っていた時に、ボール弁のブナN製シートが発火した。酸素用としては間違った材料である。</p> <p>(設計不良、材料不適合)</p>
193		<p>高圧酸素マニホールドと配管システムの発火の原因は、処理中のボンベの1本に入っていた残留燃料ガスによる可能性がある。</p> <p>(汚染物質)</p>
194		<p>高圧酸素マニホールドと配管システムの発火の原因は、処理中のボンベの1本に入っていた残留燃料ガスによる可能性がある。</p> <p>(汚染物質)</p>
195	貯蔵システム	<p>LOX貯蔵タンクの配管に設置された逆止弁が、不適切な組立あるいは流れの条件によって緩んだために、その弁ボンネットが脱落した。対策が取られる前に、34,000ガロン (約132.5 m<sup>3</sup>) のLOXが流出した。発火を起こさないでLOXを蒸発させるために、水が効果的に使用された。</p> <p>(設計/製造不良、保守/点検不良)</p>
196		<p>ポンプ吸い込み配管部のフレキ管が破損し、80万ガロン (約3,028 m<sup>3</sup>) のLOXが流出した。マカダム舗装道路 (筆者注：碎石を敷いてタールまたはアスファルトで固めた道路) を含む広大な領域に流出した。水を用いて、事故無く効果的にLOXを蒸発させることができた。</p> <p>(設計不良)</p>
197		<p>新しい19万ガロン (約719 m<sup>3</sup>) のLOXタンクにおいて、初めての充填作業中に内部タンクに漏れが発生した。漏れは、タンクに約1/3の量が溜まった時に発生した。製品はタンクローリーに移されて他の貯蔵場所に移動された。事故も無く、また膨大な量のLOXを失う事態も無かった。</p> <p>(設計/製造不良、管理/監督不良)</p>
198		<p>大型貯蔵タンクのLOX充填 - 排出配管の溶接継手部が破損した。その場所は内部容器と外殻の間の空間にあり、炭素鋼製の外殻が冷たい製品 (LOX) に曝された。外殻が破損して約21.5万ガロン (約814 m<sup>3</sup>) のLOXがその区域に流出した。水を用いて、事故も無く流出した製品を蒸発させることができた。</p> <p>(設計不良)</p>
199		<p>コンクリート製の基礎が破損し、LOXを充填中の6,000ガロンのタンクが倒</p>

	貯蔵システム	れた。表面の水が基礎にできた小さな亀裂から浸透し、基礎の下の地面を浸食したのが原因である。タンクが転倒した後に停車した車両のように、タンクは軽度の損傷を被った。火災も起きず、負傷者も無かった。 (保守/点検不良)
200	計器および計装	LOX タンクローリーの製品が貯槽に移送されていた。流れ始めの時に、この配管に接続された計器が適切に冷却されなかった。その結果、LOX の気化が生じて、温度および材料の発火を増大させる計器の過回転を引き起こした。続いて、トレーラーから LOX を供給された火災によって、2 台のタンクローリー、3 万ガロン (約 114 m <sup>3</sup> ) の LOX タンク、その他の車両、および支援装置が被害を被った。 (手順違反/不良)
201		貯蔵タンクが過充填された時に、貯蔵タンクからの蒸発を測定するために使用されるガス酸素流量計が液体酸素温度に曝された。計器は金属の脆化と LOX の蒸発による過加圧によって破裂した。負傷者無し。隣接する区域で破片による損傷が見つかった。 (手順違反/不良)
202		ボンベの試験作業中に酸素用試験圧力計が爆発した。いくつかの用途に同じ圧力計を使用すると、それが汚染される可能性がある。作業者が軽傷を負った。安全眼鏡によって作業者の眼は保護された。 (手順違反/不良、汚染物質、基本的知識の欠如、教育不良)
203		ボンベの試験作業中に酸素用試験圧力計が爆発した。いくつかの用途に同じ圧力計を使用すると、それが汚染される可能性がある。作業者が軽傷を負った。安全眼鏡によって作業者の眼は保護された。 (手順違反/不良、汚染物質、基本的知識の欠如、教育不良)
204		酸素マニホールドの圧力計が発火して爆発が起きた。重錘式試験器で使用された炭化水素油が、事故の前 6 ヶ月間にわたって日常的に使用されていた圧力計を汚染した。圧力計の位置が視線の上に位置していたために、負傷を免れた。 (手順違反/不良、汚染物質、基本的知識の欠如、教育不良)
205		異なる製品用途での使用あるいはボンベの弁シート損傷による汚染が原因の酸素用試験圧力計の破損。1 人の男が失明した。 (手順違反/不良、汚染物質、基本的知識の欠如、教育不良、材料不適合)
206		圧力計が炭化水素油を使用した重錘試験を受けたために“酸素用として使用禁止”と記載された計器面に貼られたラベルを作業者が見落とした。圧力確認のために酸素ボンベに装着したときに、圧力計が爆発した。安全眼鏡によって作業者の眼は保護された。 (手順違反/不良、教育不良)
207		異なる製品用途で使用したために生じた汚染が原因の試験用計器の破損。また、ゴム製のピッグテイルホース (筆者注: 豚の尻尾のように丸まった形状の管で、圧力計などを保護する目的で使用される。) も発火に寄与した汚染源の可能性がある。 (手順違反/不良、汚染物質、基本的知識の欠如、教育不良、材料不適合)

## 6. 米国における酸素の安全研究の進展

米国の初期の有人宇宙計画が終了した後も、酸素関連の安全研究は継続されて来たが、スペースシャトル主エンジンの初期の開発段階において、4回の高圧酸素ターボポンプ爆発事故<sup>37-38)</sup>、スペースシャトルで使用する船外活動用宇宙服の試験におけるフラッシュ火災事故<sup>39)</sup>、搭乗員用酸素システムが火元となった航空機の火災事故等<sup>40)</sup>、航空宇宙分野における事故/事件が多数発生している。

酸素システムにおいては、容器、配管、弁等のシステムを構成する金属や樹脂、ゴム類等のほとんどの材料が燃料供給源になり得るという根本的な問題が存在するために、危険性を完全に除去することは不可能である。

このため、広範な酸素濃度と圧力条件における各種材料の発火性や燃焼性の試験データの蓄積、および設計、製造、洗浄、検査、運用手順、管理監督方法等における経験の蓄積を行い、優れた方法を取り入れて注意深く安全性を高めて行くこと以外に、酸素を安全に取り扱う方法は無いものと考えられる。

なお、米国における酸素の取扱いに関する法的な枠組みは連邦法および州法によって定められており、技術的な詳細は各学協会等が発行する規格、指針、ハンドブック等に委ねられている。文献<sup>17)</sup>に、これらの連邦法や学協会等について記載があるので必要な向きは参照されたい。

### 6.1. ASRDI のその後

1967年にアポロ1号宇宙船の火災事故の後に設立されたASRDIは、1976年まで存続した。1976年に、NASA予算の削減等によって、最終的にASRDIのデータバンクは科学情報オフィスが所管するNASA中央データベースに統合されることになった<sup>28)</sup>。その後も酸素関連の安全研究はNASAによって継続され、主にNASAジョンソン宇宙センター付属のホワイトサンズ試験施設において現在まで精力的に取り組まれて来ており、有人宇宙船で使用する各種材料の可燃性等の試験方法を定めたNASAの基準<sup>41)</sup>やNASA酸素安全マニュアル<sup>42)</sup>等の実現に寄与した。その後、NASAはこれらの過程で得られた知見を広く一般産業界の酸素安全にも役立てることにし、酸素関連の規格や基準等の作成にあたっては次に述べるASTM等の外部組織とも密接に協力して

現在に至っている。

### 6.2. ASTM について

1975年に、ASTM (American Society for Testing and Materialsの略称であり、日本では米国試験材料協会などと呼ばれる)<sup>脚注)</sup>の中に、「酸素富化雰囲気における材料の適合性と感受性に関する委員会 G04」が設けられた。通常、この委員会は毎年4月と9月に技術的な会合を持ち、酸素関連の適切な話題について発表を行っている。また、委員会G04は、1983年から2～3年毎に、酸素安全関連の研究に特化したシンポジウムを開催しており、このシンポジウムで発表された論文の中から選別したものを毎回論文集として発行している。その内容のほとんどが、酸素富化雰囲気における材料の適合性、発火性や燃焼性、および感度などを扱った試験や研究に関するものである。現在までに14冊の論文集が発行されている<sup>43-56)</sup>。

ASTMからは酸素に関する多くの規格や基準、標準試験方法、指針、ハンドブック等<sup>17, 57-80)</sup>が刊行されているが、上記シンポジウム等の成果が逐次反映されて改善が図られている。これらの規格類は、酸素システムの設計、審査、製造、設置、運用などの方法、危険性の解析、試験方法等、多岐に渡っている。このようにして、酸素に関する研究、調査、経験等の地道な蓄積によって、酸素の使用に伴う危険性が少しずつ軽減されて来た。

### 6.3. NFPA について

NFPA (National Fire Protection Associationの略称であり、日本では全米防火協会などと呼ばれる)は民間の非営利団体であり、法令等とは別に、独自の防火安全規格等を制定している。NFPAが制定した防火安全規格は全米で広く認知されており、建築基準法 (Building Code) の中で準拠・参照規格として採用される場合が多い。

酸素に関連する規格としては、消費者サイトにおけるバルク酸素システム基準 - NFPA 50、酸

脚注) ASTM (現在は ASTM International と呼ばれている) は世界最大規模の標準化団体であり、試験方法と材料に関する各種規格等を策定して発行している。2017年現在、全部で約 12,000 種類以上の規格が発行されており、その策定には世界各国から 30,000 人以上の会員が参加している。ASTM 規格は任意規格ではあるが、世界各国で法規制等の基準として採用されるなど、国際的に広く通用している。

素富化雰囲気中で使用される材料、装置およびシステムに関する推奨方法 - NFPA 53、圧縮ガスおよび極低温流体基準 - NFPA 55、酸素治療室等を含む医療施設のための基準 - NFPA 99、などがある<sup>7, 81-83)</sup>。なお、NFPA 53は、2004年1月に米国国家規格として承認されている。

NFPA 53の付録Dには、56件の酸素が関係する事故事例が示されているので、以下の表6-3に紹介する。これらの事例は比較的詳細な説明がなされており、酸素の製造、運送および移送分野、医療分野、切断および溶接分野、生産加工分野、研究施設分野、宇宙分野、航空機用酸素システム分野、深海分野、その他の分野等に分類されている。一部の事例については、3章で紹介した事例と重複しているものも見られる。

#### 6.4. 新材料の使用に伴う事故について

各種材料の酸素適合性試験データの蓄積等によって、酸素システムや酸素取扱いの安全性が高められてきたが、近年になって新しい形態の材料を使用することに伴う事故が発生している。ここでは、2016年9月1日に発生した米国スペースX社のファルコン9ロケットの爆発事故<sup>84)</sup>について紹介する。これは、打ち上げの2日前に、発射台上で実施を予定していた短秒時燃焼試験の準備を行っている最中に、ロケットの2段目で爆発が起きてロケットと衛星の全てを失った事故である。

4ヶ月に及ぶ事故調査の結果、ヘリウムを蓄える3基の圧力容器の内の1基に異常が発生して事故を引き起こしたことが確認された。この圧力容器は、COPV (Composit Overwrapped Pressure Vessel) と呼ばれるアルミニウム製のライナーに炭素繊維を巻き付けたもので、全金属製の容器と比べて軽量で高強度を達成することが可能である。さらに、ヘリウムの充填質量を少しでも多くするために、この容器はLOXタンク内に設置され、極低温まで冷やしたヘリウムが充填される。

事故の原因はCOPVの外側の炭素複合材と内

側のアルミニウム製ライナーの間にある隙間、あるいはアルミニウム製ライナーの歪みによって生じた隙間にタンク内のLOX（あるいは固化酸素）が蓄積し、炭素繊維の破損あるいは摩擦によって発火し、爆発に至ったものと推定された。通常、炭素繊維複合材は極低温に弱く、内側の金属製ライナーとの熱膨張率の違いによって、割れたり破損する可能性があり、また製造時の品質ムラも発生し易い。高圧の圧力容器を極低温の推進剤タンク内に設置すること自体は特に目新しいことでは無いが、通常は全金属製の圧力容器が使用されてきた。可燃性の炭素繊維複合材をLOXタンク内で使用する場合には、常に発火の危険性が伴う。

炭素繊維複合材を使用した圧力容器をLOXタンク内に設置したのは、このファルコン9ロケットが最初である（このロケットの推進剤は、燃料に常温のケロシンを、酸化剤にLOXを使用しているため、極低温源としてはLOXを用いる以外に方法が無い）。スペースX社では、この方法によるヘリウム充填実績が700回以上あり、飛行実証も行われていた。しかし、事故を起こしたバージョンでは、LOXの搭載量を増すために通常よりも過冷却したLOXを搭載しており、さらに高圧容器に充填されるヘリウムもこれまで以上に冷却されて（事故のケースでは、ヘリウムの温度が酸素の固化温度を下回っていたことが明らかになっている。）、より急速に充填する方法に変更されていた。このように、事前に十分な実証試験が行われたように見えていても、本質的な危険性が除去されない場合には、少しでも条件が変わると思わぬ事故が発生することがあるという事例である。

その後、ファルコン9ロケットは2017年1月に打ち上げを再開したが、短期的な対策として、十分に実績がある以前のヘリウム運用手順に戻す対策が取られた。長期的な対策としては、COPVのアルミ製ライナーの歪みを防止するための設計変更を行うとしている。

表6-3 NFPA53の付録Dに記載されている事故事例<sup>7)</sup>

\* 事故の概要欄の最下部にある括弧書きは筆者による原因の分類である。

No.	分野	事故の概要
1	酸素製造・運送・移送	6,895 kPa (ゲージ圧 1,000 psi) で作動する往復動型酸素移送ポンプは、クランク室あるいはクロスヘッド部分からの潤滑油による酸素の汚染を防ぐために、クロスヘッド部に窒素シールを備えていた。このシールが破損してポンプ内で爆発が発生し、91 m (300 フィート) 離れたところまで部品が飛散した。損害の見積額は2万ドルであった。 (設計不良、保守/点検不良、汚染物質)
2		高圧酸素ポンプ装置のフィルターで爆発と火災が発生した。この装置は、吸入用および自給式呼吸器用酸素ボンベの充填に使用された。爆発の原因は、フィルターの底部に酸化し易い物質が存在し、それが燃焼したためであると結論付けられた。易酸化性物質は、ポンプの潤滑に使用されたグリセリンの可能性がある。 (設計不良、保守/点検不良、汚染物質)
3		酸素精留塔の再沸器 (reboiler) 内への炭化水素蓄積が原因と考えられる爆発によって精留塔が破壊された。高さ30 m (99 ft) で直径が6.7 mから11 m (22~36 ft) まで変化する精留塔は、微細な粒状の不燃性材料で断熱されていた。隣接の断熱された貯蔵庫 (silo) もまた破壊された。損害の見積額は83万ドルであった。 (保守/点検不良、汚染物質)
4		恐らく、圧縮機のピストンロッドに装着されているTeflon <sup>®</sup> 製のライダーリングが過度に摩耗したことによって潤滑油が酸素シリンダーに漏れ、そこで発火が生じた。火災によって鋼製や真鍮製の部品が焼失または損傷を受ける一方で、吸入マニホールドから建物内に高圧の酸素が急激に放出され、鋼製の壁が座屈したり、吹き飛んだりした。散水設備 (deluge system) によって375 kWの同期電動機が保護された。損害の見積額は12.5万ドルであった。 (保守/点検不良、汚染物質)
5		真空保持に使用される酸化パラジウム・ゲッターの小塊 (packets) が発火源となった真空断熱液体酸素 (LOX) タンクと配管に関する幾つかの出来事があった。真空保持に使用される酸化パラジウムの機能は、脱ガスされた水素と反応して水を生成することである。ある期間にわたって、酸化パラジウムは微細なパラジウム金属または水素化パラジウムに還元される。構造接合部の破損によって液体酸素が突然真空部分に侵入した場合、酸化パラジウムの還元によって発熱する恐れがあり、スーパーインシュレーション (superinsulation) 層が発火する可能性がある。推奨される解決策は、パラジウム酸化物をヒートシンク内に適切に封入し、液体酸素が不用意に真空層内に侵入した場合に、確実に発熱が促進されないようにすることである。 (設計不良)
6		地震実験のために船上に搭載された7570.8 L (2,000 gal) の液体酸素タンクを含む事故によって地震探査船が破壊されて3人が死亡した。事故調査によって、弁システムに加えられた過大な力によってステムカラーが破断したものと結論付けられた。内部タンクの圧力は約413.7 kPa (ゲージ圧力60 psi) であった。酸素蒸気雲が船上に広がった。可燃物に不足は無かった。鋼鉄製の甲板は脆く、ひび割れが発生した。爆発に先立って、幾つかの閃光が走った。正確な発火源は不明である。事故後の調査によって、システムメンテナンス、酸素の危険性に対する人の意識、フェイルセーフのバックアップ用遮断弁の欠如、について問題が提起された。損失の見積額は、125万ドルであった。 (設計不良、保守/点検不良、教育不良)
7		容量4,921 L (1,300 gal) のアルミニウム製LOXタンクトラックが、顧客のタンクに配達した直後に爆発した。2人の人間が死亡した。この爆発は、1人によって液中ポンプが適切に作動しないと報告された直後に発生した。ポンプ不具合の原因として、不適切なメンテナンスによる不適切な軸受け潤滑とポンプの逆回転が考えられた。ポンプから約3.6 kg (8 lb) のアルミニウムが焼失した。全ての液中ポンプが取り外され、外部ポンプに交換された。 (設計不良、保守/点検不良、教育不良)

8	酸素製造・運送・移送	病院に配送を行った後、LOXタンクトラックが爆発した。2人が死亡した。約73.5 kg (162 lb) のアルミニウムが焼失し、爆発の威力に寄与した。事故の決定的な原因はしっかりと特定できなかった。様々な要因が汚染物の蓄積に寄与したと考えられている。この蓄積は燃焼連鎖を引き起こし、これによってアルミニウムが燃焼して更なる被害をもたらした。（保守/点検不良、汚染物質）
9	医 療	酸素を使用した装置の不適切なメンテナンスがこの火災をもたらした。酸素テントを備えた2歳児用ベビーベッドと一緒に加湿器が使用された。加湿器内の低水量、熱的安全機能の故障、送風機に起因する火災、蓄積したほこりと糸くずの供給の兆候が見られた。炎は酸素テント内に吹き出し、少女が焼死した。（保守/点検不良、教育不良）
10		準個室にいる患者が目を覚まし、他のベッドの酸素テントが燃えているのを発見した。彼は警報を発したが、テントの中の患者を死ぬ前に助けることができなかった。大規模な調査によっても発火源が明らかにならなかったが、ベッドのテーブルでタバコの吸い殻が、また被害者のベッドの中ではぎ取り式紙マッチのケース（book of matches）の残りが見つかった。（基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督不良）
11		しばらくの間使用されていた圧力調整器がボンベから取り外され、乳児保育器の酸素テントに酸素を供給するために別のボンベに接続された。ボンベの弁を開けたときに、調整器の部品が発火して急速に溶け落ちた。このフラッシュ火災によって乳児が死亡し、5人が負傷した。この致命的な火災の推定原因は、調整器内部における断熱圧縮発火である。詳しく報告されている他のケースは、高圧酸素弁の急開によって生じる衝撃、摩擦、あるいは圧縮による加熱によって、外部からの汚染物が存在しなくても弁や調整器の部品を発火させることが可能であることを示唆していることに留意すべきである。酸素ボンベの弁を開くときには、調整器は常に閉位置（完全に後ろに戻す）に保つ必要がある。（基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良）
12		複数の医学的な問題を抱えた33歳の人工呼吸器依存の女性に対して、気管切開手術が行われていた。彼女は静脈内薬剤で麻酔をかけられ、口を通して入れたポリ塩化ビニル（PVC）製の気管内チューブを介して100%の酸素を呼吸していた。前頸部を切開してから15分後、電気焼灼器を使用中にボンという大きな音が聞こえ、続いて手術野で火災が発生した。濡れタオルを用いて火を消し、発火して炭化した気管内チューブを気管切開チューブと交換した。調査によって気管が焼けていることが明らかになった。患者は手術の残りの部分によく耐えたが、根底にある複数の医学的な問題によって1ヶ月後に死亡した。（教育不良、手順違反/不良）
13		約50%酸素、50%亜酸化窒素、および1%ハロタンによる全身麻酔下にある4歳の少年の口から炎が噴き出した。火災は散水と食塩水の組み合わせによって消し止められ、炭化したPVC製気管内チューブの閉塞によってOEA（oxygen enriched atomosphere）の流れが止まったので、チューブは直ちに交換された。患者の舌、咽頭、および気管の火傷は集中治療室で管理され、5日後に退院した。PVC製チューブの発火は、酸素および亜酸化窒素濃縮麻酔雰囲気中にある管に隣接した出血した血管の電気焼灼中に発生した。（教育不良、手順違反/不良）
14		声帯ポリープを有する56歳の男性を、CO <sub>2</sub> レーザーを用いてポリープを外科的に切除するために、66%亜酸化窒素、33%酸素、および最高で1.5%のイソフルランで麻酔を行った。麻酔ガスは、特にCO <sub>2</sub> レーザー手術用に製造された、金属粒子を含有するシリコーンゴムで外側を被覆されたシリコーンゴム製軸筒から構成される気管内チューブを介して投与された。ポリープを切除した後、レーザーを使用して声帯の出血を管理している最中に、口から煙が出て気管内チューブから炎が現れ、麻酔呼吸回路のチューブ内に火災が認められた。火災は食塩水で消火され、焼けた気管内チューブは交換された。患者は気管と気管支に広範囲の火傷を負ったが、最終的には回復した。焼けた気管内チューブの調査によって、カフ（筆者注：カフ-cuff-とは、気管チューブや気管切開チューブの先端に付いている風船状のものをいう。その役割は、人工呼吸中のガス漏れの防止

		と誤嚥の防止である。)の燃焼と末端軸管 (distal shaft) の燃焼が明らかにされた。カフは生理食塩水で満たされ、呼吸回路と肺内の麻酔ガスを隔離する。CO <sub>2</sub> レーザーがカフを穿孔した可能性が最も高く、それから酸素と亜酸化窒素濃縮雰囲気中にあるシリコーンゴムを発火させた。 (教育不良、手順違反/不良)
15		酸素富化雰囲気における乾燥ガーゼパッドの使用によって、切開部位で火災が発生した。肺を切除する間、切開部位にガーゼパッドを置いた。乾燥パッドは、組織から血液を吸い取るために使用された。火災が発生した時には、電気手術器具 (ESU) を使用してガーゼのすぐ隣の出血中の血管を焼灼していた。肺葉は既に切除されており、その部分から酸素が流出して手術部位が酸素富化状態にあった。酸素富化状態になったガーゼは、ESUによって容易に発火した。燃えるガーゼパッドは床に投げられ、患者が少しも負傷すること無く消し止められた。 (教育不良、手順違反/不良)
16	医 療	この火災は、開放された酸素源によって生じたOEAと手術部位からの火花によって発生した。患者は、右の乳房から幾つかの皮膚病変を取り除いていた。彼女は精神安定剤を投与され、顔マスクを使って約4 L/min (1.06 gal/min) の流量の酸素を与えられていた。外科医は当初、無事に首から病変を取り除いた。手術用覆い布の窓が彼女の右の乳房に向かって下に移された。この領域はヨウ素溶液による通常の方法で前処理され、切開部位は局所麻酔薬で麻酔された。外科医は、ESUを使用している時に、手術部位から外科用覆い布の縁の部分に向かって火花が飛んだと述べた。この場合の火災伝播の道筋は完全に明らかである訳では無いが、表面繊維火災伝播が関与していた。次の2つの可能性が考えられる。 (1) 再使用可能な覆い布上のけば立った繊維 (nap fibers) が燃えた。 (2) 患者の細かい体毛が燃え、覆い布の表面の下で患者の顔に向かって火が急速に広がった。 その後、火は酸素マスクを発火させて患者の顔や首に多少の火傷を負わせた。 (教育不良、手順違反/不良)
17		酸素と亜酸化窒素によって生じたOEAは、顔にある毛髪を容易に発火させる。鼻マスクを介して、25%酸素、75%亜酸化窒素、および少量のハロゲン化麻酔薬を使用して全身麻酔をかけられた患者が口腔外科手術を受けていた。患者は口ひげを持っていた。外科医がタングステンカーバイド製の回転切削器具で充填物を削っていた時に、白熱した火花が回転器具から飛び、患者の口から出て彼の上唇を飛び越して口ひげに落ちた。酸素と亜酸化窒素が豊富な雰囲気のため、口ひげは直ぐに燃え上がり、鼻マスクを発火させた。その後、火はガス供給ホースに沿って麻酔機に向かってフラッシュバックして行った。火が認められると直ぐに、鼻マスクは患者の顔から取り除かれたが、彼の鼻と上唇で激しい燃焼が起こる前であった。 (教育不良、手順違反/不良)
18		酸素濃縮装置の不適切な使用によって、以下の火災が発生した。酸素療法が必要な患者が、鼻カニューレを備えた酸素濃縮器を使用していた。彼が自分の店で金属を削っている時に、研削火花によって鼻カニューレが発火した。彼は顔からチューブを引き出したが、この出来事によって僅かに火傷を負った。 (基本的知識の欠如、教育不良)
19	切断・溶接	スポーツ用品店の修理工 (gunsmith) が、油で汚れた手とレンチで使用済みの酸素ボンベ (溶接装置の一部) の接続を緩めていた。機械的な火花が、OEA中にあったグリースを発火させ、修理工の手と腕に火傷を負わせ、店内で火災が始まった。損害の見積額は10万ドルであった。(基本的知識の欠如、教育不良)
20		以前は油圧システムの圧力を試験するために使用されていた圧力計が、酸素システムに取り付けられ、システムを作動させた時に爆発した。この爆発によってチーフメカニックが顔面に切り傷を負った。 (基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督不良)
21		溶接の火花が衣服と酸素が供給されたサンドブラスト用フードを発火させ、建設配管工/溶接工が顔面および頸部に2度と3度の重度の火傷を負った。この作業員は空気の循環

		<p>がほとんど無い小さなトンネルで作業を行っていた。彼は自発的に重いプラスチック製のサンドブラスト用のフードを手に入れ、その空気系統を直接酸素タンクに接続した。火花が彼の衣服を発火させた時、従業員は屈みこんだ姿勢で作業を行っており、酸素の流れに続いてフード内で炎が燃え上がり、フードと彼の衣服を発火させた。恐らく、フードが取り外されるまで息を止めるという彼の冷静沈着さが彼の命を救い、間違い無く、彼の眼は装着していたゴーグルによって救われた。</p> <p>(基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督不良)</p>
22	切断・溶接	<p>作業員は開放溝 (open ditch) で溶接を行っていたが、そこでは作業の性質上、航空機用の呼吸器を着用する必要があった。呼吸可能な圧縮空気が容易に入手できなかったのも、圧力調整弁を備えた酸素タンクに彼の空気供給ホースの入り口端を取り付けた。溶接による火花がマスクに接触した。もちろん、そこは呼気弁から出た酸素富化空気で囲まれていた。マスクがほぼ顔面上で爆発し、作業員は即死した。</p> <p>(基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督不良)</p>
23		<p>溶接工とその補助者が、水平に3 m (10 ft)、曲がってから下方に6.1 m (20 ft)、また水平に3 m (10 ft) 行った所の閉じた隔壁で終わるような、直径0.91 m (36 in.) の管路に入った。最後の3 m (10 ft) の部分から地表面まで延びた送気管を使用して、換気用の圧縮空気を導入した。溶接工は知らなかったが、圧縮空気源が消費され尽くすと、酸素ポンペが送気管に接続され、管路が純酸素で換気された。溶接工の衣服が発火し、激しく燃え始めた。補助者は何とかうまく逃げ出した。溶接工は保護服の中で焼死体で見られた。</p> <p>(基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督不十分)</p>
24		<p>作業員が酸素-アセチレン・トーチを使用して下水管の中で切断作業を行っていたが、地表におかれた圧縮空気供給ボンベとホースで接続されたデマンド型の呼吸装置を着用していた。彼はトーチを使用していたが、マスク (フルフェイス型の) の上端が燃え始めた。彼は直ぐにマスクを外したが、マスクがかなり激しく燃えていたので腕に火傷を負った。供給用ボンベは灰色に塗られており、呼吸用空気と表示されていたが、調査の結果、ボンベは空気ではなく酸素で満たされていることが判明した。明らかに、マスクの周りには酸素が漏れ出ている、火花がマスクの上端を発火させ、酸素が抜け出る影響を受けたマスクは激しく燃え始めた。マスクが取り外された時、高流量の酸素 (作業者が調整器のバイパス弁を開けてマスクに一定流量を供給していた) がマスク全体を強烈に炎上させた。</p> <p>(手順違反/不良、管理/監督不良)</p>
25	生産加工	<p>エチレン - 酸素反応器の供給流れにおいて、酸素濃度の変動が認められた。酸素プラントの運転に明らかな異常が無いと判断した後、プラント運転者達によって2つの連続した調整が行われた。直ぐに、酸素ガスホルダー、第二段酸素圧縮機、酸素 - エチレン混合ノズル、および接続配管で同時に爆発または爆轟が発生した。放出されたエチレン中の火災は、プラント要員がホースで注水することによって抑えられた。自動散水スプリンクラーによる防護は、直接の火災領域ではない場所の装置の損傷を抑えるのに有効であった。5週間の生産中段による費用が30万ドル、被害の見積額は35万ドルと推定された。</p> <p>(不明)</p>
26		<p>アンモニアプラントに入る窒素流に酸素を導入することを可能にする酸素プラントの減圧弁が、電氣的な故障によって開いた。その弁を修理している間、圧縮機をアイドリングさせ、汚染された窒素流中にある閉じた弁に対して圧力を維持した。3時間半後、酸素が高温の潤滑油と反応した時に配管が破裂した。この爆発によって凝縮器、冷却器、および配管が損傷し、同時に、火災による被害は冷凍装置、窒素洗浄装置、配管架台、およびその他の装置と広範囲に渡った。損害の見積額は48.5万ドルであった。</p> <p>(設計不良、手順違反/不良)</p>
27		<p>127mm (5in.) のポリウレタンフォームで断熱された152mm (6in.) の液体窒素充填配管とバイパス配管で小規模な爆発と火災が発生した。反応はエルボ部で始まり、いずれかの側の配管に沿って断熱材内を長手方向に走った。火災は自然に消えた。この配管の特定の部分は、加温に続いて予冷状態にあった。その後の調査によって、防湿用カバー</p>

	生産加工	<p>が壊れて空気が断熱材内に浸透し、極低温によって空気中の酸素が内部で液化したためと結論付けられた。この液体酸素が蒸発して断熱材内部に局所的なOEAが生成した。実際の発火原因は特定するには至らなかった。</p> <p>(保守/点検不良、設計不良)</p>
28	研究施設	<p>高圧酸素弁が破裂して酸素ガスと金属破片が300V-DCの電力線上に飛散した。破片が絶縁材を破壊してアーク放電が発生した。続いて絶縁材がOEA中で発火した。別の報告では、ケーブルが酸素パイプと短絡して配管に穴を開けたと述べている。どちらの場合も、木製の屋根が発火し、消防署を呼ぶ必要があった。また、ケーブル内の鋼鉄類と銅も焼け、研究室は甚大な被害を被った。損害額は16万ドルと推定された。</p> <p>(設計/施工不良)</p>
29		<p>ロケットエンジン試験施設内にある熱交換器の定期試験中に、液体酸素配管の破損が発生した。酸素が、以前に床排水に捨てられた燃料と混合した。生成した混合物は高温の表面によって発火し、装置と金属製の仕切りが損傷した。損害額は6.5万ドルと推定された。</p> <p>(設計不良、手順違反/不良)</p>
30		<p>低圧のLOXを高圧の常温ガス酸素に変換する、液-ガス変換充てん装置で火災が発生した。装置の稼働中に、充てん装置内にあるステンレス鋼製の破裂版が破裂して酸素火災が発生し、装置の大部分が破壊された。火災の調査によって、恐らく破裂板が機械的な疲労によって、設計破裂圧力よりも低い約21 MPa (3000 psia) で破裂したことが明らかになった。火災は、破裂板下流における粒子衝突、あるいは破裂板の破片がハウジングの出口側継手を通して押し出されたために発生した摩擦熱によって引き起こされたと想定される。</p> <p>(設計不良、保守/点検不良)</p>
31		<p>フッ素ゴム製のダイアフラムを備えたステンレス鋼製の圧力調整器で火災が発生した。調整器のドームとボディ内の28 MPa (4,000 psia) の酸素は、発火時には流れていなかった。ダイアフラムとボディとの間のシールを通した漏れによって発火が生じたと推定された。火災はダイアフラムからボディに伝播し、調整器やシステムの他の部分を破壊した。</p> <p>(設計不良、保守/点検不良)</p>
32		<p>酸素用に洗浄され、新たに設置された機械的衝撃試験装置の最初の使用時に火災が発生した。試験用試料を試験チャンバーにセットした後、0.3 MPa (50 psia) 以下の酸素でパージした。遠隔操作によって、試験チャンバー加圧弁を開け、41 MPa (6,000 psia) の酸素をチャンバーに導入し始めた。直ぐに、技術者から「小さな爆発があり、火花が試験室内中を飛んでいる」と報告があり、そして試験室から出る「大きな茶色の雲」が観察された。調査によって、高圧酸素加圧弁と試験チャンバーとの間に設置された手動式調量弁が発火して燃焼したことが明らかになった。調量弁は内部が大きく浸食され、試験チャンバーに最も近い弁ポートが焼失していた。調量弁から試験チャンバーまでの流体配管が燃えた。火災は調量弁の弁シート部分で始まったように見えた。潤滑剤または粒子が調量弁を通過中に発火したものと推測された。この火災の結果、酸素でシステムを加圧する前に、強力な不活性ガスパージを実施して試験装置から発生した汚染物質を除去することにした。</p> <p>(手順違反/不良、洗浄不良、汚染物質)</p>
33	宇宙	<p>LOXラインで漏れが検出された時、タイタンミサイルは燃料抜き取り中であつた。LOXはユーティリティ・トンネルを通して隣接する機器用サイロに侵入した。一部の機器から出た火花によってOEAにある可燃物が発火し、機器サイロ内に火災を引き起こし、続いてミサイルサイロ内の燃料を爆発させたと考えられている。幸いにも、爆発の前に全ての作業員が安全に避難したが、一部の人が煙を吸って負傷した。損失の見積額は718.6万ドルであつた。</p> <p>(設計不良、手順違反/不良)</p>
34		<p>1967年1月31日に、テキサス州のブルックス空軍基地において、2人用宇宙環境シミュレーターで火災が発生した。試験室内で進められていた動物実験には、100 %酸素に暴露させる造血効果の研究が含まれていた。火災時の試験室内の環境条件はほぼ100 %酸素</p>

		<p>で、圧力は380 mmHg [50.7 kPa (7.35 psia)] であった。このシミュレーターは燃焼性の低い材料を用いて作られていたが、動物実験で使用するために大量の紙、無機性のごみ、および他の燃焼性の高い材料を試験室内に持ち込んだ。試験室内の搭乗者は可燃性の衣服を着ていた。通常の2線式コードを持つ携帯用電灯をチャンバー内に持ち込んだ。このコードがチャンバーの金属製の床と短絡したことが着火源であると考えられている。動物の毛に火が付き、彼らが動き回ることによって火災が広がるのを助長した。試験室が空気によって再加圧され、火災発生の約30秒後には開放されたにも関わらず、試験室内にいた2人の飛行士は焼死した。火災時に試験室内に2台の小型の携帯用手动式炭酸ガス消火器があり、どちらも使用されなかったが、1台は過熱のために安全弁から放出されていた。(基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督不良)</p>
35	宇 宙	<p>1967年1月27日に、フロリダ州ケネディ宇宙センターの発射台上に据え付けられたアポロ宇宙船の指令モジュール内で火災が発生し、3人の宇宙飛行士が死亡した。宇宙船内の雰囲気は、圧力が約110 kPa (16 psia) の100%酸素であった。非常に徹底的な調査が行われたにもかかわらず、火元あるいは発火源を明確に特定できなかった。最も可能性のある発火源は、宇宙船の配線に関連する異常であると考えられた。宇宙船の損傷程度が最終的な判断を妨げた。通常の大気中では可燃性が非常に高いとは考えられなかったが、100%酸素で圧力が110 kPa (16 psia) の雰囲気中では極めて可燃性が高くなる材料によって、火災が船内に広がった。火災の伝播速度は、その初期段階においても非常に高いとは言え、宇宙船内の圧力が高くなって隔壁を破裂させた後は更に高くなった。大量の濃い煙が重大な障害となって、救助の試みが遅くなった。しかし、死亡は火災の最初の30秒間に発生したものと考えられた。事故調査委員会は、事故に至った条件には以下のものが含まれていると結論付けた。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 酸素雰囲気で加圧された密閉キャビン</li> <li>(2) キャビン内に可燃物が広範囲に分布</li> <li>(3) 宇宙船の電力を搬送する脆弱な配線</li> <li>(4) 可燃性で腐食性の冷却材を流す脆弱な配管</li> <li>(5) 乗組員が脱出するための不十分な規定</li> <li>(6) 救助や医療支援のための不十分な規定</li> </ul> <p>(設計不良、材料不適合、基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督不良)</p>
36		<p>96 %の酸素を用いて高度10,058 m (33,000 ft) [26.2 kPa (3.8 psia)] 相当で宇宙船キャビンの実験を実施中に、キャビンのTVモニタの電力増幅管が過熱した。真空管の樹脂製ベースが発火し、高温のプラスチックがシャーシから滴下して下を通る冷却剤配管の上に落ちた。これらの冷却剤配管は断熱材で覆われていた。断熱材の組成はまだ特定されていない。この配管は発火しなかった。高温の樹脂から出た煙がキャビンの搭乗員に影響を与えた。キャビンや搭乗者に更なるダメージを与える事なく、ミッションは打ち切られた。火災の危険性に注意を向ける代わりに、事故は間違った安心感を与えた。溶融した樹脂やルベロイド® 断熱材が100 %酸素中で激しく燃焼しなかったという事実は、この潜在的に危険な環境に対して、事故の前よりも調査者達の信頼感を高めた。</p> <p>(設計不良、材料不適合、基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督不良)</p>
37		<p>上記No.36で記載したのと同じ雰囲気条件の同じ試験室が、与圧服とキャビン内の温度制御因子を調べるために使用された。2人の被験者が与圧服を着用して、ヘルメットのバイザーを閉じた。1人の被験者は、彼の与圧服の入口と出口の両方を熱交換器に接続していた。残りの被験者は、与圧服の入口側だけを熱交換器に接続しており、火災が発生した時には本当に眠っていた。火災は目視や煙の臭いでは検知されなかった。搭乗員は、計器パネルの後ろ側が赤く輝いているのを見た。数秒の内に、パネルの後ろが燃え上がった。火災警報が鳴り出した時に、眠っていた搭乗員が目覚まし、何らかの理由でヘルメットのバイザーを開いた。彼は燃えているパネルから出てくる煙を吸い込んだ。バイザーを閉じ、入口側と出口側の空気ホースを熱交換器に接続していた他の搭乗員は、直接キャビン内の空気を吸い込むことはなかった。どちらの被験者も意識を失ったと報告されている。開いたバイザーを着用していた搭乗員は、恐らく煙を直接吸ったことによって気道損傷を負った。彼の肺機能は後で正常に戻った。閉じたバイザーを着用していた搭乗員は、開いたバイザーを着用していた搭乗員よりも長く(赤い輝きに気</p>

		<p>付いてから2～3分後) 室内に留まったが、呼吸器の損傷は見られなかった。どちらの被験者も、衣服や体に火傷を負わなかった。火災は、炭酸ガス消火器によって辛うじて消し止められた。火災の正確な原因は特定されなかった。赤い輝きが現れた計器パネルの後ろでは、アクセス用パネルの後ろに配線が通っていた。そのパネルはヒンジ式ではなく(最初に噂で報告されたように)、Dzus<sup>®</sup> ファスナー(筆者注: ねじ式のクイックアクセスファスナーの一種)によって開けられた。以前に報告されたように、パネルのヒンジ端部における配線の屈曲は、明らかに火災の原因では無かった。配線は24V～26Vの回路のものであった。火災後に確認したところ、回路のブレーカーまたはヒューズシステムが作動していた。明白な不良回路の箇所は無かった。しかし、火災による損傷によって、恐らく原因の可能性がある微妙な欠陥が不明瞭になった。配線の絶縁材はポリビニル樹脂製であり、恐らく主要な燃料供給源となった。また、冷却剤配管を覆っていたルベロイド<sup>®</sup> 断熱材も燃えた。計器パネルの後ろにある電氣的な絶縁材は全て燃えていた。試験の間、キャビン内の蒸気は極低温トラップで採取されていた。火災時に発生した蒸気と煙は、ガスクロマトグラフ分析法と赤外分光分析法の両方を使って調べられた。次に記述した化合物は、新しいものか、またはキャビン内に通常存在するレベルを上回っていたものである。ベンゼン、ジアゾメタン、エチルエーテル、ホルムアルデヒド、無機イソシアネート、アセチレン、塩化メチル、および塩化エチル。イソシアネートは、冷却剤配管の断熱材であるルベロイド<sup>®</sup> 由来のものであると考えられた。ルベロイド<sup>®</sup> 断熱材はこのプラスチックを成分として含んでいるが、ポリウレタン・ジイソシアネート発泡材が燃えたという報告は無い。ポリ塩化ビニルの熱分解によってこれらの物質が生成されることが示されているので、塩化水素あるいはフオスゲンの燃焼が報告されていないことは興味深い。もちろん、スクリーニング試験でこれらの物質を検出できなかった可能性はある。キャビン内で使用された材料について、火災安全解析がどの程度洗練されていたものかは分からない。</p> <p>(設計不良、材料不適合、基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督不良)</p>
38	宇 宙	<p>アポロ宇宙船の打ち上げ準備中に、LOXがポンプシステムの一部に導かれ、幅約12 m (40 ft)、深さ1.5 m (5 ft) の溝に放出されていた。この作業の目的は、ロケットへのLOX充填に備えて、ポンプとLOX貯蔵エリアの配管を予冷することであった。予冷が完了した直後に、2台の警備車両がその区域に到着し、運転者はその区域の最終的な安全確認を完了した。最初の車両の運転手はゲートから約3 m (10 ft) 中まで乗り入れ、エンジンを切って外に出て、ゲートの中央まで進んで来た2台目の車両の横まで戻った。2番目の車両の運転手は、車両を停止した時にエンジンが止まったので、イグニッションキーを戻して車内に留まったと述べている。3番目の警備車両の運転手が約6分後に到着し、2番目の車両の後ろ約3 m (10 ft) の位置に駐車した。車両が停止すると、彼のエンジンもまた同様に止まった。彼は車両に留まった。その時、2番目の車両の運転手がイグニッションキーをONに回した。明瞭なボンという音がして、エンジンフードの下から煙が立ち始め、その後すぐに炎が上がった。最初の車両の運転手は、自分の車両を火災から遠ざけるために走った。しかし、そこに着くと、車両の前部の下側がはっきりと赤く輝いているのを認め、すでに火災が発生していると結論付けた(それは、全くその時の昼光ではなかった)。同時に、3番目の車両が燃え上がった。運転手達の証言によれば、彼らが最初にゲートに着いた時、目に見える霧はほとんど無かった。しかし、火災が始まった頃には、霧が深さ0.9 m～1.2 m (3 ft～4 ft) の濃い層に増えていた。火災から30分から1時間後に、保安要員が携帯型酸素分析計を使用して、区域内の酸素濃度を数回測定した。その結果によると、雲(酸素蒸気雲)のすぐ内側では75 %から100 %の濃度を示していた。しかし、目に見える雲の縁のすぐ外側では、濃度は正常値(21 %O<sub>2</sub>)まで低下した。霧は2時間以上持続した。天候条件は、地表における風速が0～0.1 km/秒(0～4 mph)の穏やかなものであった。顕著な温度の反転が記録され、いくらかの自然な地表霧が記録されていた。火災が起きた理由は恐らく複雑であり、少なくとも2つの異なったメカニズムが関与していると考えられる。自動車技術者との検討によって、キャブレターと燃料ポンプから出る少量のガソリン蒸気が、ほとんどの自動車でエンジンフードの下側に排出されることが示された。他の可燃物には、エンジン外面の油やグリス、およびバッテリーから出る少量の水素が含まれる。車両が移動してフ</p>

		<p>アンが作動している間は、その蒸気類はエンジンルームから連続的に掃き出されるため、恐らく危険な濃度には達しない。しかし、エンジン停止後は蒸気が蓄積する傾向がある。エンジンルーム全体に可燃性混合気を供給するのに必要なガソリンの量は約0.1 L (4 oz) である。しかし、蒸気は恐らく1か所か2か所（キャブレター、燃料ポンプ、あるいはその両方）で大量に発生し、それらの場所からあらゆる方向に広がるために、排気マニホールド付近に可燃性混合気を形成するのに必要なガソリンの量はほんの数グラムである。幾つかの情報源によれば、一般に、排気マニホールドの外面温度は、作動中に315°C (600°F) に達する。リレーとブラシが発する火花は、始動時と作動中は正常なものである。これらの考察は、通常環境においてさえも、発火が起こる確かな可能性があることを示唆している。（実際、そのような例は稀では無い。約45,000の都市において、1ヶ月に7台の車両火災が報告されている。）この環境におけるいかなる酸素濃度の増加も、発火の可能性を増大させる。従って、着火、引火点、および自発火温度に必要なエネルギーが実質的に低減される。燃焼上限界（UFL）に対応する燃料濃度が増加する。しかし、この濃度は重要ではないかもしれない。燃焼下限界（LFL）はそれほど影響されないが、火炎伝播速度は増加する。この事故では、3台の車両のエンジンフードの下側に酸素と炭化水素の可燃性混合気が蓄積したと思われるが、それらはエンジンを止めて駐車していた。2番目の車両の場合は、恐らく、イグニッションキーを回したことで発生した火花によってこの混合気が発火した。他の2台の車両の場合は、排気マニホールドの高温の表面と接している酸素/炭化水素混合気の濃度がある臨界値に達した時に、自発的に発火が起きたものと考えられる。3台の車両の全てが同様な事象を経験したという事実は、このような条件下においては、これ以外の形態の事故（freak accident）の可能性が無いことを意味する。</p> <p>（基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良、管理/監督不良）</p>
39	宇宙	<p>ジョンソン宇宙センターの搭乗員システム研究室において、スペースシャトル用の船外活動ユニット（宇宙服と生命維持装置バックパック）がフラッシュ火災で破壊された（下の写真参照）。この事故によって、宇宙服の横に立っていた技術者が上半身に2度の火傷を負った。41 MPa (6,000 psi) の酸素が弁を通して圧力調整器に供給された時に、本体がアルミニウム製の調整器/弁アセンブリで火災が始まったことが判明した。火災は以下の原因によるものと推定された。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) アルミニウム製本体の薄い内部セクションの破裂</li> <li>(2) 酸素の圧縮加熱によるシリコーンゴム製Oリングの発火</li> <li>(3) 粒子の衝突</li> </ol> <p>火災後の調査の結果、調整器/弁アセンブリが再設計され、このアセンブリのアルミニウムがモネルに置き換えられた。この変更および他の幾つかの変更が、今日使用されている宇宙服の幾つかのバージョンに実装された。</p> <p>（設計不良、材料不適合）</p> <div data-bbox="625 1498 1203 1930" data-label="Image"> </div> <p>フラッシュ火災で破壊された宇宙服（火災時に宇宙服は無人であった）（©NASA）</p>

40		これは、格納庫内にあったビーチ45型機のバッテリーのショートによって、機体の先端にあるヒーターに供給する配管から漏れた燃料が発火したと考えられている。アルミニウム製の継手が酸素調整パネルを溶融させ、火炎中に酸素を供給することを可能にした。その後、ガソリタンクの上部を含めて、アルミニウムが燃えた。飛行機を区分けするためのナイロン製の引き幕が損傷した後、火災は他の5機の小型機にも燃え広がった。消防署は消火栓の不足が障害となった。損失の見積額は17.7万ドルであった。 (設計不良、保守/点検不良)
41		空港の整備ドックに駐機したジェット輸送機のコクピットで、検査官が酸素弁を開いた時に、弁で原因不明の火災が発生した。弁下流における断熱圧縮が弁構成部品の発火の原因になった可能性があり、あるいはシステム内の不純物によって火災が発生した可能性がある。酸素の放出と燃焼した粒子が、弁のすぐ上部にある航空機キャビンの防音断熱材と機体の表皮を焼き尽くす切断トーチのような働きをし、周囲にある乗務員室の機器を損傷した。格納庫ドックの散水スプリンクラーが作動し、2.54 cm (1 in.) 径のホースによるドライケミカルに続いて、手持ちの炭酸ガス消火器によって内部の火災が消し止められた。 (手順違反/不良、保守/点検不良)
42		1984年1月に、オーストラリア空軍は一機600万ドルのP3Bオライオン航空機を失う地上火災を経験した。この事故は、飛行士に酸素を供給するための、3本ある機内搭載酸素ボンベの内の1本を取り外している最中に発生した。航空機の酸素システムを調査したところ、火災は酸素マニホールド逆止弁で始まったことが明らかになった。事故の主要な原因はポペット弁の漏れであり、それは12 MPa (1,800 psia) で貯蔵されていた酸素を大気中に逃がすことを可能にした。シリコンゴム製シールの劣化とガルバニック腐食が弁の不具合の原因と考えられている。火災に寄与した原因としては、ボンベの切り離し前のシステムの汚染と酸素システムの放出の失敗がある。最も可能性がありそうな発火の原因としては、アルミニウム製の逆止弁本体、金属粒子、および金属酸化物を含むテルミット反応である。調査官の所見は、酸素システムではシリコンゴム系以外の材料の使用を検討する必要性を示唆していた。また、高圧酸素雰囲気中に金属酸化物が存在する条件においては、アルミニウムおよび他の材料について金属粒子の衝突による発火の更なる研究が必要であることも判明した。 (設計不良、材料不適合、汚染物質)
43	航空機用酸素システム	航空機が乗客搭乗ゲートに駐機していた時に火災が発生した。フライトエンジニアによる飛行前点検が行われていた。彼が航空機の酸素システムをオンにした直後に、クロークの後ろ側で火災が始まった。この区画にある酸素弁が疲労破壊を起こしたらしく、放出された酸素がガラスウール断熱材に直接衝突し、断熱材の樹脂を発火させた。酸素の供給を遮断することが出来なかったため、火災区域にガス酸素が供給されて火災を加速した。何人かの従業員が、携帯用消火器を使用して航空機の内部から消火しようと試みたが失敗に終わった。空港の消防隊員が泡ノズルと 6.35cm (2.5in.) 径のホースによる霧状放水を使用して火災に対処して消し止めたが、大きな被害が発生し、航空機は全損として償却された。 (設計不良、保守/点検不良)
44		B66 機の搭乗員は、搭載燃料を消費するために 2 時間以上旋回した。搭乗員の 1 人がマスクを外してタバコに火をつけた。ライターを胸ポケットに戻した直後に、マスクとヘルメットが発火した。マスクとヘルメットを外してデッキに投げ、手持ち消火器を使用して消火した。パイロットは顔と手に 2 度および 3 度の火傷を負った。証拠は、タバコからの火花あるいはライターの炎との瞬間的な接触によってヘルメットとマスクが発火したことを示唆しており、ヘルメットとマスクにはまだ高濃度の酸素が含まれていた。 (基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督不良)
45		地上における飛行前点検で、搭乗員用の酸素システムを点検していた時に火災が発生し、ボーイング 707 機の胴体が全焼した。火災は広がり、客室の供給用配管から放出される酸素によって勢いを増した。消防隊は、火災によって屋根やキャビンの窓に開いた穴を通して良い効果を得るために泡消火剤を使用した。火災が発生してから 1 時間半後に火が消し止められた。

		(不明)
46	航空機用酸素システム	<p>飛行士が、日常点検を行うために、F2H4 機のコクピットから酸素調整器を取り外した。ボンベを取り外す代わりに、彼は調整器から来ている酸素供給配管を取り外して、それを逆止弁とキャップで塞いだ。同時に、電気技師がコクピットで電圧調整器の故障の修理をしていたが、バッテリーは切り離されていなかった。コクピットの作業スペースが狭いために、飛行士はかさばるジャケットを脱ぎ、温かく保つためにキャノピーを閉じた。酸素供給配管を取り外して塞いでいる間に、ある量の酸素が密閉されたコクピット内に漏れ出したと思われる。飛行士がコンソールから圧力調整器を取り外した時に、それが端子に接触した。発生したアーク火花によってコクピット内の可燃物が発火し、高濃度の酸素によってフラッシュ火災が生じた。飛行士はキャノピーを開けて飛び出し、地面を転げまわって服や髪の毛についた火を消した。彼は上半身に 1 度と 2 度の火傷を負った。航空機は広範囲に損傷を被った。</p> <p>(手順違反/不良、基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督不良)</p>
47		<p>軍事基地において、燃料マニホールド配管を窒素で不活性化する指令が出された。何度も同じ作業をしていた経験豊富な技術者がその仕事に割り当てられた。彼は助けが必要だったので、助手を選んで窒素カート注文した。カートからの配管が航空機に接続された時、昼食のために最初の技術者と交代する他の技術者が到着した。数分後に、大爆発が航空機を揺るがした。その作業に取り掛かっていた 4 人の男達のうち、ただ 1 人生き残ったのは、爆発によってコクピットから投げ出された男であった。カートのボンベには、明白に酸素と刷り込まれていた。この印は、ボンベの色（灰色ではなく緑色）と同様に気付かれなかった。その結果、直前に可燃性の燃料が排出された配管に高圧の酸素が注入された。</p> <p>(基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良、管理/監督不良)</p>
48		<p>乗客用酸素システムの整備中に、民間航空機の火災が発生した。火災発生時には、3 人の乗務員、4 人の客室乗務員および 12 人の乗客が機内に搭乗していた。全ての乗客と乗務員は安全に避難した。事前（優先）搭乗が始まった直後に、前方のギャレー近くの部分で籠ったバーンあるいはドーンというような音が発生した。数秒で熱い黒煙がキャビンを満たし始め、胴体の前方右側を通して炎が上がり始めた。目撃者は、航空機の前右側の胴体から横に延びる 3 フィートから 4 フィートの長さの炎を見たと言っている。右側前方ギャレーのサービスドアのすぐ後ろ側の胴体に、直径数フィートの穴が貫通していた。乗客用酸素システムは、航空機の前右側に位置している。このシステムは、最初に 12.8 MPa (1,850 psia) まで充填された 2 本の酸素ボンベから構成されている。ボンベは鋼製の配管を通して流量制御ユニットに酸素を供給し、そこで酸素の圧力を低下させて乗客用マスクへの流れを制御する。航空機の飛行前点検で、技術者がボンベ内の酸素量が許容レベル以下であることを発見したので、ボンベを交換した。彼は、その場所を離れようとしていた時に、酸素システムの流量制御ユニットを包み込んだ白い光の閃光を見た、と報告している。国家交通安全委員会 (NTSB) の調査チームは、乗客用酸素システムの流量制御ユニットから火災が発生したと結論付けた。</p> <p>(不明)</p>
49	深 海	<p>事故は 34 kPa (5 psia) の 100%酸素の内部雰囲気をもつ試験室内で発生した。4 人の男達が試験室内で実験に参加していた。天井器具の電球が燃え尽きた。1 人の男が電球を交換するために登った。電球が交換された後に、彼は短絡によるアーク放電のような音を聞いた。器具内の被覆配線から小さな炎 [約 12 mm (1/2 in.)] が見えた。この被覆材の組成はまだ不明である。電球を交換した男は水を求めたが、タオルで火を消すように言われた。タオルに火がついて非常に激しく燃え、男の衣服にも着火した。アスベスト製の防火毛布を使用して衣服の火を吹き飛ばしたが、それも同様に燃え上がった。アスベストの毛布には、アスベストの剥がれを防止するための有機充填剤あるいはコーティングが施されていると伝えられている。毛布を使用していた他の男達の衣服にも同様に火がついた。4 人の男達は 2 度の火傷を負った。チャンバーから人員を退去させた後、炭酸ガスを使用して火災を消し止めた。毛布とタオルは 17 日間酸素で飽和しており、海面状態で考えるよりも遥かに活発に燃焼したと考えられた。注目すべきは、酸素中での長期貯蔵は繊維材料の燃焼性を有意に向上させないということである。この場合</p>

		<p>の興味深い点は、燃えている絶縁材が照明器具から寝棚の上に落ちるという事実である。1人のクルーが火を消そうとしたが、彼の皮膚に火がついた。彼の手火傷はひどく、病院で11日か12日の治療を必要とした。キャビンは連続的に換気されていたが、事故当時の気体（vapors）の分析は実施されていなかった。研究室における実験では、低圧の酸素中で人間の皮膚を発火させるのは困難であることを示唆していることは注目すべきである。しかし、グリスや溶融プラスチックなどの他のより容易に発火する可燃物の存在下においては、それが局所発火源として作用することがあり、容易に燃焼する。</p> <p>（設計不良、材料不適合、手順違反/不良）</p>
50	深 海	<p>内面が海軍エナメルで塗られた、重い鋼製の減圧室の閉鎖環境で火災が発生した。電気設備は通常のものであった。基本的な減圧室の配線は電線管（conduit）の中に収納されていた。固定の電気設備は、照明、2台のエアコン、2台のファン、およびインターホンである。極めて丈夫なゴムコードによって電源に接続された、通常のコンセントを備えた携帯型のコンセント箱が提供された。携帯型の電動式炭酸ガス除去装置の電源コードがこれらのコンセントの1つに接続されていた。この除去装置の入り口には、空気から埃粒子を取り除くために灯油に浸した紙製エレメントを備えたフィルターが装着されていた。ゴム製絶縁材と塗料に加えて、他の可燃物としてプラスチックカバーを持った綿製のマットレス、少なくとも2つの枕、読み物、炭酸ガス除去装置内のフィルター紙（恐らくは灯油でコーティングされたもの）が含まれていた。減圧室内の2人の男達は、綿のパンツとタオル地のローブを着ていた。火災発生時の内部の閉鎖雰囲気は、ゲージ圧力 276 kPa（ゲージ圧力 40 psi）、温度 26.7°C（80°F）において、容積比で酸素 28%、ヘリウム 35%、窒素 37%で構成されていた。減圧室内に消火器あるいは他の消火用機器は備えられていなかった。2人の潜水士が、シミュレートされた深度 76 m（282 ft）で2時間の試験潜水を終了し、酸素 15%、ヘリウム 85%の混合ガスを吸入した。この期間中、減圧室は圧力 296 kPa（ゲージ圧力で 43 psi）の酸素 30%、ヘリウム 35%、および窒素 35%に調整された。潜水士達を8時間42分の間減圧し、最後の1時間はほぼ常圧の酸素 100%で実施する予定であった。男達がトンネルから閉鎖環境に移送されている間に、閉鎖環境の酸素濃度が低下した。ドアが閉じられた後、酸素濃度は27%であった。2スラグ（筆者注：スラグは 1lbf の力によって 1ft/s<sup>2</sup> の加速度が生じる質量のこと）の追加の酸素が2分間ないし3分間にわたって加えられた。減圧室に入ってから約3分後に、インターホンを通して火災が発生したという叫び声が聞こえた。直径が約 102 mm（4 in.）で高さが 0.3 m から 0.6 m（1 ft から 2 ft）の黄橙色の火柱が炭酸ガス除去装置から出ているのが見えた（覗き窓を通して）。間もなく、その減圧室は閃光に飲み込まれ、煙によってそれ以上の観察が妨げられた。内部閉鎖雰囲気の圧力は 758 kPa（ゲージ圧で 110 psi）以上に跳ね上がり、これは雰囲気温度が約 427°C（800°F）になったことを示している。イグルー（筆者注：igloo、エスキモーの氷の家）に入って閉鎖環境と同じ圧力にまで上昇させることによって救助が試みられた。熱損失および火災による大量の酸素消費によって火災が燦ぷり段階になったために、閉鎖環境の圧力は減少していた。2つの圧力は約 400 kPa（ゲージ圧で 58 psi）で均圧となった。2人の救助隊員達が内部閉鎖環境に通じるドアを開けた時、彼らは熱、煙、およびガスの爆風に見舞われた。ドアを少し開けたことによって内部に酸素が入り込み、更に燃え上がった。午前 10 時 6 分に、消防隊は火事が発生し、火事が再燃したので救援が必要であるとの報告を受けた。消防隊は減圧室に到着した後、高圧ホースと約 76 L（20 gal）の水で完全に火災を消し止めた。炭酸ガス除去装置の単相モーターの電源コードの絶縁材が過熱して発火し、炎がフィルターに燃え広がった。既存の大気雰囲気の条件下では、発火温度がどのようなものであったのかは分かっていない。2人の潜水士が死亡し、2人の救助隊員が負傷した。減圧室と機器の物理的な損害は推定で2万ドルに達した。</p> <p>（設計不良、材料不適合、手順違反/不良）</p>
51		<p>潜水士の死を招いた減圧室における火災は、恐らく光量を減らすために電球の周りに掛けられた綿のシャツの発火によって発生した。チャンバー圧力は深さ 9 m（30 ft）相当であり、20～28%酸素と残りが窒素の雰囲気であった。減圧期間中は、開ループマスクシステムを用いて酸素が使用されていた。チャンバーは酸素の使用中に換気されていた</p>

		<p>が、酸素富化の正確な値は分かっていない。チャンバー内の可燃物にはセルロース、ゴム、衣類、寝棚、およびスニーカーが含まれていた。発火から数秒後には、全ての可燃物が燃えていた。</p> <p>(基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良、管理/監督不良)</p>
52	深 海	<p>スキューバ用ポンペを充填するダイブショップには、共通のマニホールドに接続された一連の 14 MPa (2,000 psia) の酸素ボンベがあった。マニホールドには各酸素ボンベから導かれる急開ボール弁が装着されていた。システムを大気圧まで放出した後、新しいボンベがシステムに追加され、マニホールドの急開ボール弁が開けられた。ボンベの高圧が配管の最初の T 継手部で圧縮発火を引き起こした。火災の結果、ダイブショップの機器に多大な損害を与え、従業員を負傷させた。</p> <p>(設計不良、教育不良)</p>
53		<p>ディーゼルエンジンを搭載した小型漁船には圧縮空気始動装置が装備されていた。漏れによって圧縮空気が失われてしまった。船長がエンジンを始動するための空気ポンペを持って来るように船員に依頼した。船員は溶接店に行って空気ポンペと圧力調整器を入手した。それから 68 kg (150 lb) のこの空気をリザーバタンクに入れてから弁を開いた。エンジンが回転し、桹の無垢材でできた竜骨を貫く爆発が起こった。船長は操舵室から 13 m (42 ft) 上方に放り上げられて焼死した。空気を送り込んだ甲板員は負傷しなかった。ボンベには実際は酸素が入っていた。</p> <p>(不明)</p>
54		<p>作業員が、彼の空気供給服から空気供給ホースと排気ホースを取り外した後、管理された雰囲気の一部を離れてヘルメットを脱ぎ、タバコに火をつけた。彼はそれから他の部屋から来ている空気供給ホースと思ったものを、服を洗い流して冷やすために彼の服に接続した。彼の下着が発火し、綿の下着の燃焼によって胸、肩、首、胃、および脚の部分に重度の火傷を負った。調査によって、空気酸素混合ガス調整弁の故障によって、第 2 の部屋への呼吸用空気源（作業員が服を洗い流して冷やすために接続したホース）には、実際には 68%~78%の酸素が含まれていたことが明らかになった。</p> <p>(保守/点検不良、手順違反/不良、管理/監督不良)</p>
55		<p>船内で火災が発生し、作業をしていた 5 人の作業員達が窒息した。発火源は不明であるが、船内に誤って酸素を導入したことが火災の強さに寄与したことは明らかである。男達が船の吸入配管をブローするために使用していた空気ホースは、空気コンプレッサーではなく、酸素マニホールドに接続されていた。</p> <p>(手順違反/不良、基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督不良)</p>
56	その他	<p>海軍の低圧試験室装置 (hypobaric chamber complexes) と関連する配管システムで発生した以下の文書化された火災は、酸素システムにおける清浄性、材料適合性、および火災に対する認識の必要性を示している。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 1974年2月26日： 酸素マニホールドの火災、ノースカロライナ州チェリーポイント海兵隊航空基地</li> <li>(2) 1975年7月2日： 酸素マニホールドの火災、装置9A9、フロリダ州ペンサコーラ海軍航空基地</li> <li>(3) 1978年4月11日： 遮断弁と逆止弁における火災、装置9A1B、シリアル#6、ワシントン州ホイッドビー島海軍航空基地</li> <li>(4) 1980年4月16日： 酸素マニホールドの爆発と火災、装置9A9、フロリダ州ペンサコーラ海軍航空基地</li> </ol> <p>海軍の低圧試験室の酸素マニホールドにおける文書化された火災では、恐らくメンテナンス作業中にシステムに持ち込まれた汚染が追跡されている。高圧酸素システムにおける火災と爆発の可能性は、汚染物質の存在によって高まる。海軍の低圧試験室の酸素システムに関するより最近の評価 (1986年、1987年、および1993年) では、水銀、鉛、および炭化水素類などの許容できないレベルの汚染物質が発見されている。火災事故および更なる汚染物質の発見は、酸素純度の継続的な監視ならびにこれらの装置を操作・維持するために割り当てられた要員の継続的な研修の必要性を強調している。</p> <p>(保守/点検不良、汚染物質、手順違反/不良、基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督)</p>

		<p>不良)</p> <p>1974年2月26日に、チェリーポイント海兵隊航空基地（MCAS）の低圧試験室で酸素を吸入していた3人の男達が重体になった。調査の結果、承認されていない潤滑剤を使用したことが原因でフラッシュ火災が発生して2つの弁が損傷をしているのが判明した。また、システムはフレオン113で高度に汚染されていた。2つの損傷した弁の火災は、酸素で使用することが承認されていない潤滑剤に起因していた。その後の実験によって、フラッシュ火災によって、高温の金属の存在下でテフロンとフロン113の部分的な分解が発生したと結論付けられた。これはフォスゲンのような汚染物質を発生する可能性がある。</p> <p>（保守/点検不良、手順違反/不良、材料不適合、基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督不良）</p> <p>1975年7月2日に、フロリダ州ペンサコーラ海軍航空基地の装置9A9の酸素マニホールド火災は、調査の結果、ボール弁のメンテナンス中に導入された汚染によるものであることが判明した。汚染物質が下流の逆止弁に流入して爆発と火災を引き起こした。調査によれば、メンテナンス作業には酸素用に洗浄されたものではない予備部品の設置が含まれていた。この事故の最終的な原因は以下のように記載されていた。酸素供給源の維持と操作に割り当てられた要員が、見落とし、教育や経験の欠如、これらの装置の使用に十分な知識が無い/慎重では無かったこと、および 従って、要員は単純に高圧のガス酸素の危険性およびそのための取扱い/保守に関する適切な教育を十分に受けていなかったと見なさなければならない。</p> <p>（保守/点検不良、汚染物質、手順違反/不良、基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督不良）</p> <p>1978年4月11日に、ホイドビー島海軍航空基地（NAS）の装置9AB1の酸素マニホールドから酸素と刺激臭ガスが放出された事故は、システムに装着された不良品が原因であった。他の海軍低圧試験室の酸素マニホールドにおける火災と同様に、疑いのある主な原因として酸素の汚染が挙げられた。事故時に使用していたボンベの酸素に汚染は見られなかった。従って、可能性のある唯一の汚染源は酸素マニホールド自体のコンポーネントであった。</p> <p>（保守/点検、汚染物質、教育不良、管理/監督不良）</p> <p>1980年4月16日に、ペンサコーラ海軍航空基地（NAS）の9A9低圧試験室の酸素マニホールド火災は、メンテナンス中に導入された汚染によって発生した。マニホールドには、酸素用に洗浄されたものではないボール弁が装着されていた。恐らく断熱圧縮によって汚染物が発火し、高圧酸素の漏れと火災を引き起こした。火災の結果、1人の男が負傷した。火災後にインタビューを受けたオペレーターとメンテナンス要員は、高圧酸素システムの使用とメンテナンスに関して適切な教育を受けておらず、消火任務（fire billets）も割り当てられておらず、この事故の5年前に同じ装置上の1つの酸素マニホールドで発生した以前の火災に気付いていなかった。</p> <p>（保守/点検不良、汚染物質、手順違反/不良、基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督不良）</p>
--	--	---

その他

## 7. 欧州における酸素関連の事故等について

1993年に欧州連合（EU）が誕生してから25年近くが経過した。欧州域内で直接、間接的に企業や個人を規制する法令には、規則（Regulation）、指令（Directive）、決定（Decision）、勧告（Recommendation）、意見（Opinion）の5種類がある。高圧ガスに関する法的な枠組みについては、欧州委員会（EC）が出した指令、例えば圧力機器指令（PED 2014/68/EU）<sup>85)</sup>、移動式圧力機器指令（TPED 2010/35/EU）<sup>86)</sup>、簡易圧力容器指令（SPVD 2014/29/EU）<sup>87)</sup>などによって形成されている。これらの指令に適合するために、欧州標準化機構（CEN）によって出された統一規格のEN 13445（Part 1 ～ Part 10で構成されている）<sup>88-97)</sup>やEN 13480（Part 1 ～ Part 9で構成されている）<sup>98-106)</sup>などがある。もちろん、欧州各国には独自の国内規則や規格が存在するが、これら是对応する指令と整合性を取ることが義務付けられている。

このように欧州では連合域内において、あらゆる分野の統一化が進められているが、ガス関連業界についてもEU全域を対象とした欧州産業ガス協会（EIGA: European Industrial Gas Association）が設立されている。この協会では、高圧ガス設備、機器および取扱いなどに関する多数の指針類を発行しており、酸素についても幾つかの設計指針や取扱いに関する安全指針がある<sup>8, 107-109)</sup>。ここでは、欧州産業ガス協会が発行したIGC Doc 04/09/E<sup>8)</sup>の付録Cに、酸素ガスが関係する54件の事故事例が収録されているので、以下の表7で紹介する。なお、これらの事例は、事故の原因別に酸素富化による事例、酸素の不適切な使用による事例、酸素システムの不適切な設計による事例、酸素機器の不適切な運用とメンテナンスによる事例、および酸素用として不適切な材料の使用による事例、の5つに分類されている。

表7 欧州産業ガス協会発行 IGC Doc 04/09/Eの付録Cに記載されている事故事例<sup>8)</sup>

\* 原因欄の最下部にある括弧書きは筆者による原因の分類である。

No.	原因の分類	事 故 の 概 要
1	酸素富化によるもの	工場で、作業場に通じている酸素供給ラインの弁が開けたままにされた。作業員の着衣が電気溶接の火花に触れた時に発火した。彼は外に走り出て芝生の上を転げまわったが、ひどい火傷を負った。助けに入った何人かが軽いやけどを負った。 (手順違反/不良、管理/監督不良)
2		作業者がホースを挟んで吹管を交換しようとした。漏れ出た酸素によって火災が発生し、作業者が重度の火傷を負った。 (基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良、管理/監督不良)
3		作業員達が、酸素工場の作動中の主酸素放出管の近くの屋根で作業をしていた。1人の男が煙を上げ始め、着衣が発火して焼死した。 (手順違反/不良、管理/監督不良、情報共有不良)
4		請負業者の作業員が、空気分離塔のプラットフォーム上で手摺りを撤去する必要があった。作業許可証が発行され、作業前の打ち合わせが行われた。周囲の温度は低く、彼は同僚を待っている間に、弁から漏れ出ている比較的暖かい酸素で自分自身を温めるために身を乗り出して部分的に酸素放出管の上に座った。彼が研削作業を始めた瞬間に、火花が酸素で飽和した衣服の上に落ちて発火し、全身に2度と3度の火傷を負って何ヶ月もの間病院で治療を受けた。 (基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督不良)
5		製鋼所で酸素ランスを使用していた時、作業者はホースとランスの間の結合部に漏れがあることを認識していたが、漏れが彼の胃の部分のいくらか冷やしてくれたので気に留めなかった。熱い金属の火花が作業者に向かって飛び、彼の胃の部分の酸素で飽和した衣服が発火し、重度の火傷を負った。 (基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良、保守/点検不良)
6		顧客のPVSA (筆者注: Pressure Vacuum Swing Absorption, ブロアによって僅かに加圧した空気をゼオライトに導入して窒素、炭酸ガス、水分を吸着させ、酸素濃度90%程度までの酸素富化空気を発生させる方法。使用後のゼオライトは真空引きした低下下で再生する。) プラントから酸素が放出され、放出管出口の場所に酸素富化領域が形成された。メンテナンス請負者の作業服が研削作業時に発火して火傷を負った。 (手順違反/不良、管理/監督不良、情報共有不良)
7		ガス会社の深冷空気分離プラントの製造エリアで、蒸気配管がピット内で溶接されていた。ピットは酸素が濃厚であったために、組立工の衣服が燃え上がり、その後彼は死亡した。溶接工は火を消そうとした。リスクは認識されておらず、作業許可証が用意されたが、それに従わなかった。 (基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良)
8		酸素ボンベの内部を検査していた時、使用していた照明がボンベ内の可燃性ガスあるいは可燃性物質を発火させた。作業者が火傷を負った。 (手順違反/不良、教育不良)
9		患者が、自宅で鼻カニューレと酸素濃縮器で発生した酸素を使って酸素療法を行っている時にタバコを吸っていた。タバコは鼻カニューレを発火させ、続くプラスチックの燃焼によって上気道に小規模な火傷を負った。患者は開業医によって診察され、その後すぐに帰宅した。患者と連絡を取ったところ、彼は警告の指示と教育に従わず、タバコを吸っていたことを認めた。 (基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良)
10		患者が自宅で酸素濃縮装置を使用していた。患者の娘が電話をして、母親がタバコに火をつけたらカニューレと管が発火し、鼻に火傷を負ったと知らせた。患者は救急車で病院に搬送された。 (基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良)
11		充填所のメンテナンス工場の作業者が、グラインダ作業をしていた時に衣服が着火して

		<p>重度の火傷を負った。作業者は、検知液で漏れが確認できるようにするために、工場内に酸素ボンベの束を持ち込んでいた。外は寒い天候であった。漏れ検査の後、彼は指示書に反して工場内でその酸素ボンベの束を逃氣した。</p> <p>(基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良、管理/監督不良)</p>
12		<p>地元の消防士が、EIGA加盟会社から供給を受けていた患者が自宅で火災によって死亡した、と連絡した。調査の結果は、彼が酸素を吸いながら喫煙していたことを示唆していた。</p> <p>(基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良)</p>
13		<p>自宅療養患者(酸素濃縮器を使用)がタバコを吸いながら眠りに就き、寝具が発火した。</p> <p>(基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良)</p>
14	酸素富化によるもの	<p>運転手は自宅療養用の液体酸素とガス酸素を配送するバンを運転していた。彼はタバコに火をつけようとしたが、それは瞬時に燃え尽きた。白熱した灰によって運転席に火が移った。運転手は車を停止し、急速に車両全体に広がった火を消そうと空しい試みをした。数分後に小さなアルミ製のボンベが爆発し、ピンインデックス2の他のボンベの元弁からは吹き出しが始まった。</p> <p>(基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良)</p>
15		<p>適切な衣服を着用した人が、酸素富化雰囲気中で作業を行っていた。彼は喫煙所に行って直ぐにタバコに火をつけたところ、直ちに彼の衣服が発火した。</p> <p>(基本的知識の欠如、教育不良)</p>
16		<p>酸素濃度が高い条件下の高圧室において、喫煙あるいは静電気が原因の死亡例がいくつか報告されている。あるケースでは、携帯型のハンドウォーマーを使用したために火災が発生して10人が死亡した。</p> <p>(基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良、管理/監督不良)</p>
17		<p>空気式回転ドリルを、アダプタを用いて酸素配管に接続した。数時間後、作業室の空気は非常に酸素濃度が高くなり、作業員の1人がタバコに火をつけた時にそれが燃え上がって衣服を発火させ、4人の死者と他に5人の負傷者を出した。</p> <p>(基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良、管理/監督不良)</p>
18	酸素の不適切な使用	<p>溶接工がタンク車の内部で作業を行っていた。暫くして、彼は酸素を導入してタンク内の空気を入れ替えるために作業を中断した。彼が溶接を再開した時、火花によって彼の服が発火した。作業者は致命的な火傷を負って死亡した。</p> <p>(基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良、管理/監督不良)</p>
19		<p>製鋼所の作業員が、燃料系統が詰まった自分の車を修理しようとした。彼は詰まりを取り除くために酸素を使用したために、タンクが爆発して1人が死亡した。</p> <p>(基本的知識の欠如、教育不良)</p>
20		<p>標準的な手順に反する、間に合わせのボール弁を備えた充填パネルが酸素混合ガスの充填に使用された。断熱圧縮によってボール弁が発火し、作業者が負傷した。</p> <p>(手順違反/不良、管理/監督不良)</p>
21		<p>酸素圧力調整器が焼損した。金属製メンブレンとEN961規格に準拠した形式承認を受けた圧力調整器を使用すること。</p> <p>(基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督不良)</p>
22	酸素システムの不適切な設計	<p>病院で、LOXタンクの残量が少なくなったので、酸素ボンベを用いたバックアップシステムに切り替えたところ、PCTFE製弁シートが発火して患者が燃焼ガスに曝された。弁は酸素用の正しいシートを装着していなかった。</p> <p>(設計不良、材料不適合)</p>
23		<p>酸素ボンベ用弁の下部スピンドルが強度不足の設計であったために、ボンベが200 bar (約20 MPa) まで充填された後に発火した。</p> <p>(設計不良)</p>
24		<p>顧客設備設置チームと一部の顧客従業員が、酸素供給設備の試運転中に深刻な火傷を負った。この酸素供給設備は、顧客が所有して運用する酸素PSA装置のメンテナンス停止時に、バックアップ用の酸素を供給するために設置されたものである。この酸素供給システムは、適切な技術設計審査を実施しないで、地元の会社の顧客設備設置チームによって設計、製作および据え付けが行われた。試運転プロセス中に顧客の教育を実施する</p>

		ことが意図されていたために、試運転時に4人の従業員と6人の顧客の従業員が酸素供給システムの周りに立っていた。発火エネルギーの放出は、配管の中を高速で通り抜け、Y型ストレーナーのステンレス鋼製網に衝突する粒子によって引き起こされた。発生した火災は、ストレーナー下流の配管と制御弁を通して燃焼し、8人が重傷を負った。 (設計不良、洗浄不良、材料不適合、管理/監督不良)
25	酸素システムの不適切な設計	欠陥のある溶接によってLOXポンプに疲労クラックが生じてLOXが漏れ出し、ポンプの発火を引き起こした。その後、ポンプの製造業者はこのタイプのポンプの顧客全てに通知して改善することを勧めた。 (製造/施工不良)
26		運転手が液体酸素の供給中に、液体ポンプ駆動部分の囲いの中に、駆動軸の芯ずれによるゴムシールの摩耗と損傷によって発生した赤熱を認めた。これは、軸心を合わせるのを助けるのに必要なインロー継手の位置の設計の失敗であった。 (設計不良)
27		50 m <sup>3</sup> のLOXタンクを空にすることになっていたが、エゼクターとの接続がうまくいかなかった。代わりに、石のピットを使用してゆっくりとタンクを空にする間違った決定がなされた。5トンが空になった後、爆発音が聞こえ、ピットの近くに火が見えた。新規および稼働中の石ピットの設計の再調査が必要であるとされた。 (設計不良、手順違反/不良、管理/監督不良)
28		分析のために、酸素中に1%の窒素が混合された150 barのボンベをステンレス鋼製のニードル弁に接続した時に酸素火災が発生した。弁シート材料に関する研究所の見解は、酸素中における長期の使用には不適であり、交換する必要があるというものである。 (設計不良、材料不適合)
29	酸素システムの不適切な運用とメンテナンス	作業員が酸素配管の外側で溶接を行っていた。作業を開始する前に、溶接工は弁を閉鎖して配管を隔離し、配管をパージして雰囲気を確認した。突然溶接工は炎に包まれ、その後火傷によって死亡した。後に、弁の漏れによって隔離した配管内に酸素が漏れ出したことが明らかになった。 (手順違反/不良、保守/点検不良)
30		ターボ式酸素圧縮機の機械的な故障によって摩擦と高い局所温度が発生し、酸素圧縮機の全焼を引き起こした。損傷を受けた圧縮機は囲いの中に設置されており、囲いの外側の損傷や負傷の発生を防いだ。 (設計不良、保守/点検不良)
31		顧客の現場で、作業員が280 barの酸素が充填された300 bar容器の束 (bundle) の弁を開けた時に圧力調整器が焼損した。弁を開ける前に調整器を閉鎖しなかったという誤った手順のために、急激な酸素ガスの流れが圧力調整器と低圧側のホースの焼損を引き起こした。1人の従業員が手と顔に軽い火傷を負った。 (教育不良、手順違反/不良)
32		酸素ボンベの充填を開始した時に、充填管路の切換え盤でフラッシュ火災が発生した。 (不明)
33		充填所において、均圧作業中に酸素ボンベの弁が焼損した。弁とボンベの内部にあった鉄粉が発火したのが原因である。弁と充填用接続金具が焼損した。作業員は手と体の前面に火傷を負った。 (保守/点検不良、洗浄不良、汚染物質、手順違反/不良)
34		酸素火災によって1人が重度の火傷を負った。この火災は、顧客が圧力調整器の改造を行ったことが原因で発生した。 (基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良)
35		高圧酸素配管の逆止弁の継手で火災が発生した。放射状の溝に入っているバイトン製Oリングが漏れていた。 (保守/点検不良)
36		O <sub>2</sub> 圧縮機の潤滑システムで火災が発生した。 (不明)
37		酸素ボンベの充填が完了した後、作業員がボンベの弁が閉じてベント弁を開けた。そのベント弁が発火したが、恐らく最近行われたメンテナンス後に残った粒子が原因であ

		る。 (保守/点検不良、汚染物質)
38	酸素システムの不適切な運用とメンテナンス	酸素ボンベの充填が完了した後、作業者が1つを除いて全てのRPVボンベ弁（筆者注：RPV, Residual Pressure Valve - 残圧抜き弁）を閉めた。ベント弁を開けた時に、開いているボンベの弁に接続されているアダプタが発火した。 (手順違反/不良)
39		1976年に製造された酸素ピストン圧縮機の3段目が発火した。圧縮機のカバーと緊急停止機能によって、周囲が効果的に保護された。 (不明)
40		作業者が200 bar-5 Lボンベの充填の終わりに異音を聞いた。彼がボンベに近づいた時に、突然1本のボンベの上部でフラッシュ火災が発生した。恐らく、損傷したOリングが原因である。 (保守/点検不良)
41		セミトレーラ型LOXタンクローリーが転覆した。タンクは空であった。それがトラックに接続された時に爆発が発生して3人が死亡した。いくつかのディーゼル油が路上に漏れており、下方に向いた安全弁からGOXが放出されていた。ワイヤーがトレーラーの下に投げられた時に、油/酸素の混合物が爆発した。 (基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良)
42		液体酸素の高圧ポンプが、恐らくは冷たい液体がクランク室に漏れたために、火災を起こした。クランクケースが破裂し、金属片が作業者の指にあたった。 (設計不良、保守/点検不良)
43		LOXポンプがLOXの送液中に発火した。許容された6,800 rpmではなく、7,200 rpmの過回転であったことが原因である。ポンプと移送ラインの損傷のみで済んだ。 (設計不良、手順違反/不良)
44		酸素流量計のセンサーで発火が起きた。考えられる原因は、試運転時の酸素用としては不十分な洗浄、あるいは長期にわたる濃縮（dry-boiling）によって炭化水素が蓄積されたことであった。 (洗浄不良、汚染物質、保守/点検不良)
45		ボンベ充填所のLOXタンクが、メンテナンスのために通常のボンベ充填手順を適用して空にされる予定であった。ポンプが空転したために突然発火した。空転防止システムが正しく設計されていなかった。 (設計不良)
46		通常の運転中にLOXポンプが発火した。安全装置で検出されることなく、ポンプはしばらくの間空転していた。 (設計不良)
47		顧客の敷地で液体酸素を供給している時、運転手がポンプキャビネット内の煙に気付いた。ポンプの電源プラグ内部で発生したアーク放電が電線の絶縁材を焼失させた。このようなケースで使用するべき追加の絶縁材がこのポンプには提供されていなかった。 (管理/監督不良)
48		病院の施設でLOXトレーラーが荷下ろしをしていた時、LOXの漏れに加えてトレーラーが火災を起こし、患者が避難した。 (不明)
49	酸素用に不適切な材料の使用	ガス酸素供給ライン上にある安全弁が修理の時にグリースを塗られた。後に安全弁を酸素の圧力を使用して点検した時、グリースが発火して作業者が重度の火傷を負った。 (基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良、管理/不良)
50		作業員が酸素ボンベの圧力を確認しようとしていた。彼は酸素用としては適していない、グリセリン入りの圧力計を使用した。弁を開いた時に圧力計が爆発し、作業員はほぼ失明状態となった。 (基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良、管理/監督不良)
51		修理工が彼の酸素調整器のテフロン製ガスケットを紛失した。彼は修理場所に到着すると、車のタイヤのチューブでゴム製のガスケットを作り、調整器を酸素ボンベ元弁の出口側に接続した。彼がボンベ弁を開いた時、酸素に適合しないガスケットを使用したた

		めに、フラッシュ火災が発生して彼の上腕と肩を焼いた。 (基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良、管理/監督不良)
52	酸素用に不適切な材料の使用	酸素ボンベの圧力調整器の火災によって、救急車が完全に破壊された。考えられる原因は、調整器に適合性の無いシール（ゴム）が使用されたことである。 (基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良、管理/監督不良)
53		束ねた酸素ボンベの弁を開いた時、接続されたゴムあるいはプラスチック製の高压フレキホースが発火して焼けた。 (基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良、管理/監督不良)
54		充填ポンプのスイッチを入れた時、酸素充填所にある安全弁が焼損した。原因は作動不良であり、ことによると安全弁が酸素に不適合であった。装着形態と安全弁のタイプが変更されることになっている。 (設計不良、材料不適合、保守/点検不良、管理/監督不良)

## 8. 国内における酸素関連の事故等について

国内においては、酸素システムの設置や運用は経済産業省が所管する高圧ガス保安法<sup>110)</sup>とその関連告示、通達等によって規制されている。また、業界団体である一般社団法人 日本産業・医療ガス協会（JIMGA）が発行した酸素に関するいくつかの指針や基準類がある<sup>111) - 122)</sup>。これらの指針や基準の大部分は、欧州産業ガス協会（EIGA）やアジア産業ガス協会（AIGA）等と国際的に整合化を図ったものとなっている。また、国内で唯一の大型の水素-酸素液体ロケット用射場を有している宇宙航空研究開発機構（JAXA）では、社内基準として液化酸素取扱い基準<sup>123)</sup>を設けている。

国内における事故として、一般産業分野においては、高濃度酸素雰囲気下における作業者の衣服の炎上、酸素用機器以外の気密試験等で不用意に酸素ガスを加圧源として使用、あるいは油脂や可燃物で汚染された酸素用機器の使用による爆発や火災、弁の急開等の不適切な操作による酸素用機器の発火等が多数発生している。医療分野においては、病院等における酸素吸入や高圧酸素室の使用を伴う治療において、および近年では在宅酸素療法における酸素火災事故が発生している。また、潜水分野では、チタニウム製の部品を使用したダイビング用酸素レギュレータの発火事故が発生している。

高圧ガス保安協会（KHK）では、1965年以降に国内で発生した高圧ガス事故をデータベース化して公開している<sup>124)</sup>。2018年現在において、2017年までに発生した事故が収録されている。多数の検索条件を指定できるため、絞り込み検索が容易である。興味のある向きは一度閲覧することを勧める。このデータベースに掲載されている酸素事故の事例については後で紹介する。

### 8.1. 国内における事故事例と安全研究

1907年に大阪の大阪鉄工所（現日立造船）内において、フランスのエア・リキード社がクロード・ハイランド型空気液化機を使用して日本で初めて空気液化分離法による酸素の製造を行ったとされている<sup>12, 125)</sup>。その後まもない1911年には、東京で日本理化工業（現太陽日酸）が輸入したリンデ・ハンブトン型空気液化装置を用いて酸素の製造を開始している<sup>12, 125) - 127)</sup>。

日本で最初の酸素ガス事故は、1918年に兵庫

駅構内で発生したガス爆発事故である。これは駅構内で貨車に積み込み作業中であった酸素ボンベが破裂したことが原因である。これをきっかけとして隣接の貨車に積まれていたアセチレンボンベが次々に誘爆を起こして周辺を猛火で包み込み、十数名の死傷者を出し、貨車数十台分の積荷を焼失する大惨事となったものである<sup>128)</sup>。この酸素ボンベは旧日本陸軍が製造したもので、期間短縮のために圧力試験を実施せずに酸素を充填したとされている。このような公共の安全を脅かす高圧ガス事故の発生をきっかけとして、1923年に現在の高圧ガス保安法の前身である「圧縮ガス及び液化ガス取締法」が施行されるに至った<sup>129)</sup>。

高濃度の酸素雰囲気における発火危険性は以前から知られており、国内においてもその研究が行われてきた。1961年に発行された資料<sup>130)</sup>には、昭和20年代から30年代半ばにかけて発生した酸素が関連する事故事例が掲載されている。この時期は日本の造船業が急激に発展した時期と重なる。この資料によれば、酸素用ではない機器類の気密試験に酸素ガスを安易に使用し、あるいは油やアルコールが付着した機器類を不用意に酸素ガスで加圧したことによる事故が多数発生したことが記されている。これらの事故は、酸素の危険性に対する認識が全く無いか、あるいは不十分であることによって発生したものである。また、同資料中に外国のパンフレット等の安全対策を紹介した記述があるが、その中に興味深いものがあった。これは米国における安全対策を紹介したもので、「狭い室内に酸素を放出してはならない。酸素のために多くの金属や布などが活発に燃えて災害が発生する。このため漏れた酸素は非常に危険である。」というものである。このパンフレットが発行されてから恐らく10年ほど後に、前に述べたアポロ1号宇宙船の悲惨な火災事故が発生したのは皮肉なことである。

その後、技術、教育、メンテナンス等の進歩および改善によって事故が少しずつ減少して行ったが、数十年後の1990年代に入っても事故は無くなっていない<sup>131)</sup>。

後年、同一著者によって過剰酸素中における生理的な有害性、火災や爆発の危険性、事故例および安全対策等について、それまでに発表された文献をもとにして詳しい解説がなされている<sup>132)</sup>。これは酸素による危険性から事故予防対

策まで、全般に渡ってかなり詳細に述べてあり、この種のものとしては国内で最初のものではないかと思われる。種類は少ないが、金属および非金属材料に関する燃焼性のデータも紹介していることは特筆すべきである。

国内においても、このように酸素の危険性を啓蒙するための努力が行われてきたが、平成4年には空気液化分離プラントの装置内部でメンテナンス作業を行っていた作業員3人が、着衣の炎上によって焼死する事故が発生している<sup>133)</sup>。作業にあたって、弁や配管の閉鎖を怠ったために、他所から作業空間に酸素が流れ込み、作業用のグラインダの火花によって着火したものである。閉鎖空間において作業等を行う場合には、酸欠による窒息の危険性だけではなく、火災の危険性を低減するためにも酸素濃度のモニタリングが極めて重要になる。

医療分野においては、昭和40年代前半における全国の高圧酸素治療室の実態について安全上の見地から調査した報告、および在宅酸素療法における火災による死亡事故の調査報告等がある<sup>134-136)</sup>。これらの療法を受ける患者は、酸素の取扱いや危険性について特別な教育や資格が必要な訳ではなく、不用意に高酸素濃度雰囲気下においてカイロの使用や喫煙を行ったために、着衣や寝具が炎上して焼死した例が多数見られる。また、医療従事者によって高圧酸素治療室に研究用の機材や可燃物が持ち込まれ、火災・爆発に至ったと見られる例もある。特に、高圧酸素治療室において発生する火災は、先に述べたアポロ1号宇宙船の事故と同様に、極めて短時間に重大な結果を引き起こすことに留意する必要がある。

2004年に国内において発生したチタニウム製部品を使用した潜水用酸素圧力調整器の発火事故<sup>137)</sup>については、関連業界やユーザの情報収集が不十分であるために発生したものと考えられる。この事故報告からは、それまで国内において酸素中でチタニウム材料を使用することに対して、それほど懸念は無かったように見える。しかし、1981年には国内の研究者によって、酸素中でチタニウムを使用することの危険性が外国の事故例として紹介されており<sup>138)</sup>、それによれば1959年に米国で発生したチタニウム製LOXタンクと配管の爆発によってその発火危険性が認識されるに至ったようである。1974年に発行された米国の酸素に関する大規模な調査報告<sup>34)</sup>

においても、チタニウムおよびチタニウム合金は酸素システムにおいて激しい燃焼を引き起こす恐れがあるため、その使用を勧めない旨が記されている。

また近年、チタニウムやチタニウム合金が眼鏡フレーム、腕時計、および装飾品などに幅広く採用されており、これらが不用意に高圧酸素治療室に持ち込まれた場合には火災の危険性を高めるために、外国においては注意が喚起されている<sup>139)</sup>。

チタニウムは活性が高く、アルミニウム等と同様にその表面に強力な酸化保護膜を形成することによって高い耐酸化性を発現する。しかし、何らかの原因で保護膜が失われた場合には、チタニウムは酸素中で急激に酸化されて高い燃焼熱を発生する<sup>63)</sup>。しかも、アルミニウムとは異なり、チタニウムは熱伝導率が低いために材料が高温になる傾向があり、周囲からの燃焼連鎖を受け易い。ASTMのハンドブック<sup>17)</sup>では、チタニウムは酸素システムでの使用が制限された材料とされており、非常に望ましくない燃焼特性と発火特性を示すために通常は使用しないとされている。従って、国内における前記の酸素圧力調整器のチタニウム製部品の発火事故は、材料に関する情報の入手努力を怠ったことによって発生したものと言える。

## 8.2. KHK 高圧ガス事故事例データベース

高圧ガス保安協会（KHK）が公開している高圧ガス事故事例データベース<sup>124)</sup>によれば、収録されている酸素事故は全部で1703件であり、事業所別の内訳は次の通りである（1965年～2017年のデータ）。コンビナート製造事業所42件、一般高圧ガス製造事業所270件、移動98件、消費1204件、その他89件となっている。消費先における事例が圧倒的に多く、次に一般高圧ガス製造事業所の事例が多い。容器の盗難・紛失、漏洩などが高い割合を占めている。

高圧ガス製造事業所（コンビナート等保安規則および一般高圧ガス保安規則の適用を受ける事業所）で発生した事故の内、盗難・紛失、軽微な漏洩のみ、および酸素が主な原因で無い事故などを除いた100件の事故事例を表8-2に示す。本表によれば、異物や有機汚染物の存在下において、弁の急開等による断熱圧縮あるいはポンプや圧縮機等の可動部分の接触によって発火に至った事例が多い傾向にある。

表 8-2 高圧ガス製造事業所における酸素事事故事例（1965 年～2017 年）<sup>124)</sup>

\* 事故概要欄の最下部にある括弧書きは筆者による原因の分類である。

No.	事 故 名 称	業 種	事 故 概 要
1	酸素ガス充てん中のバルブ溶融・火災	一般化学	容器 20 本に酸素を充てん中、規定圧力 150 kg/cm <sup>2</sup> になったので作業員がマニホールドに取り付いている切替え元バルブを閉めている途中、バルブのスピンドル部より、大きな音と共に火焰が噴出し作業衣に着火した。異常な音を聞いた他の作業員はすぐ酸素圧縮機を停止したので火災は消えた。調査の結果、バルブのスピンドル SUS27 は約 60% 焼失し、またボンネットも約 1/3 焼損していた。ボンネットとスピンドル間に油分が付着しており温度上昇によって発火したものとみられる。死者 1 名。 (保守/点検不良)
2	タンクローリに液化酸素を充てん中のフレキシブルチューブの破損	一般化学	液化酸素のタンクローリへの充てん作業を開始したが、昼食のため一旦作業を中断した。作業を再開しようとしたところ、液酸チャージ管（フレキシブルチューブ）の一部が破損しているのを発見したので、作業長を呼んで調査をした。作業長は、開放すべき放出弁が閉じられているのを発見し開けようとしたとき、液酸の圧力上昇のため、液酸チャージ管が破裂し、負傷した。重傷者 1 名。 (手順違反/不良、基本的知識の欠如、教育不良)
3	触媒再生器の酸素吹込み配管の溶融・火災	石油化学	アセトアルデヒド製造設備の触媒再生塔に吹き込む酸素配管に附属するバルブを作業員が開いた瞬間、バルブと配管が破裂し、火災が発生したが、約 30 秒後に消火した。(原因) 触媒再生塔への酸素吹込みラインに逆上弁を通して再生触媒液が逆流した結果、バルブに有機物質が付着し、これに高圧酸素が反応し、不安定な過酸化物が生成、摩擦により着火破裂したものの。軽傷者 1 名。 (保守/点検不良、管理/監督不良)
4	充てん中の酸素ガス容器破裂	充填所	圧縮機を運転して充てん台に取付けられた 32 本の酸素ガス容器に充てんしていたところ、突然容器 1 本が破裂し、21 個の破片となって飛散した。当該容器は大正 15 年の米国製で 1964 年 8 月に再検査を受けている。調査の結果、破裂の起点箇所は鍛造工程で発生したと思われる傷と疲労亀裂（長さ 30 mm×深さ 6 mm）が存在し、外気温が低かったため脆性破壊を起こしたものと推定されている。破壊時の圧力は 56 kg/cm <sup>2</sup> である。死傷者無し。 (製造不良、検査不良、材料不適合)
5	液化酸素タンクローリのポンプからの火災	そ の 他 ( 造 船 所)	液化酸素貯槽（コールド・エバポレータ（CE））に充てんするためタンクローリを規定位置に停車させ、すべての接続を完了し、ポンプ予冷を終えポンプを起動するため、スイッチを入れたところ、30 秒程して爆発音とともにポンプ附近から発火、ポンプを破損しスイッチ、ボックス、後車輪を焼損した。軽傷者 1 名。 (原因不明)
6	酸素ターボ圧縮機のケーシングからの火災	一般化学	製鉄所に酸素を供給している酸素製造工場で高圧酸素ターボ圧縮機の運転をしていたところ、突然大音響と共に圧縮機の高圧ケーシング（3 段目）付近より発火し猛烈な勢いで火炎が噴き出した。火炎の噴き出しと同時に圧縮機の部品が飛散した。軸受の損傷により給油が外に出たため油に引火し建物の屋根部が燃えた。その後の調査で配管中の異物が 3 段目ケーシングに飛び込み、摩擦熱によって発火に至ったものと推定されている。死傷者無し。 (設計不良、異物混入)
7	酸素圧縮機のピストンシリンダーからの火災	一般化学	運転中の立型 3 段式酸素圧縮機の 3 段目安全弁の作動と同時に 3 段シリンダー（最終段）から発火し、同部が溶融した。さらに下部の潤滑油に引火したが、火は冷却水槽の水によって 10 分後に消火した。調査の結果、ピストンロッドには油止め傘が取付けられていたが、クランク室の潤滑油が

			<p>ピストンロッドをはい上がり、シリンダーに付着しているのが過去に何度か認められており、ピストンの摩擦熱で発火したと考えられる。重傷者1名。</p> <p>(設計不良、保守/点検不良)</p>
8	酸素圧縮機の試運転中の爆発	一般化学	<p>酸素製造工場で約2ヶ月前の運転中に発生した高圧酸素ターボ圧縮機の焼損事故により、同圧縮機をメーカーに持ち込み修理した後、現地組立を完了した。その後、試運転にあたって窒素ガスを使用した予備運転を行い、さらに高圧吐出配管系統の漏れ試験等を実施し酸素ガスによる運転を開始した。昇圧中に圧力25 kg/cm<sup>2</sup>に達したとき、突然圧縮機の3段目軸受部から火が噴き出し、鈍い爆発音と共に赤茶色の煙を上げた。調査の結果、圧縮機高圧部の軸受過熱損傷により回転軸の振動を生じ、回転体とケーシング間の摩擦により発火したか、高圧部のケーシング中に鉄粉等の異物が混入し、これが高速回転による摩擦のため発火し燃焼したものと推定されている。重傷者6名、軽傷者3名。</p> <p>(設計不良、保守/点検不良、異物混入)</p>
9	重油ガス化プラントの酸素圧縮機の火災	石油化学	<p>重油ガス化プラントの反応器に酸素を供給するためにNo.1、No.2、No.4酸素圧縮機を運転していたがNo.2圧縮機の真空ポンプ部で異常音を聴き、緊急停止をした。No.2圧縮機をNo.3圧縮機に切替え運転を再開したところ、No.3圧縮機に異常音を聴き、機械を停止した直後、2段圧縮機カーボンラビリンスから出火した。潤滑油に不純物が混入しており、圧縮機シリンダーの案内メタルを損傷し、潤滑油が流れ込み、発火したと思われる。死傷者無し。</p> <p>(設計不良、保守/点検不良)</p>
10	酢酸ビニルモノマープラントの酸素圧縮機からの火災	石油化学	<p>酢酸ビニルモノマーの原料に酸素を供給するための圧縮機吸入側の伸縮継手に亀裂が入り酸素ガスが噴出し発火した。死傷者無し。</p> <p>(保守/点検不良)</p>
11	空気液化分離装置の爆発	石油化学	<p>空気液化分離装置の液体酸素フィルターの定期切り替えを終了し、フィルターを再生するためフィルターの液体酸素を除々に気化用ポットへ抜き出していたところ、突然破裂音とともにフィルターにつながる液抜き配管の一部が破損し、液体酸素が噴出した。液体酸素フィルターの再生時に脱着された不純物が、配管中に残っていた液体酸素中に溶解し、液体酸素は除々に蒸発するが、不純物が蒸発しないことから、濃縮された炭化水素が混合物をつくり爆発したと思われる。死傷者無し。</p> <p>(設計不良、保守/点検不良、手順違反/不良)</p>
12	エチレンオキサイド製造施設におけるストレーナの焼損	石油化学	<p>11月21日、エチレンオキサイド製造施設では定修後のスタートアップ準備を終え、エチレンオキサイドの生産を開始するため酸素フィードを開始した。その後、酸素フィードの流量を増やしていったが、約8時間後の18時頃に酸素コンプレッサー出口側ガストレーナが焼損しているのを発見したため、プラントを停止させた。原因は上流側熱交換器のノズル部取り替え工事の際に金属粉が系内に混入し、系内の金属粉が酸素とともに配管内を流動する際、配管壁面と摩擦・衝突を繰り返したため熱が蓄積されて赤熱粒子となり、ガストレーナに捕集された。その後、赤熱粒子が引き金となって金属粉の燃焼が始まり、金属粉の燃焼熱によりガストレーナの金網、ガストレーナ本体が焼損したものとみられる。今後は開放点検後の設備復旧時に金属粉等の混入がないことを確認すること。ガストレーナに表面温度計を設置して、ストレーナの表面温度を監視することとした。死傷者無し。</p> <p>(保守/点検不良、手順違反/不良)</p>
13	空気液化分離装置の附属設備のアセチレ	一般化学	<p>アセチレン除去器の配管が低温脆性による破壊を生じ、管内の液体酸素が側溝(油、ボロ等のある溝)に流出。低温脆性により破壊したすき間より流出した液体酸素と側溝内に蓄積されていた油、ボロ等の接触により燃</p>

	ン除去器配管の破裂、爆発		焼、続いて配管内のアセチレンガス体に引火爆発したものと考えられる。軽傷者 1 名。 (設計不良、材料不適合)
14	液化酸素タンクローリのポンプからの火災	運送	タンクローリから液化酸素をコールド・エバポレータ (CE) に充てん中、ローリの液量が少なくなったため、ポンプを止めようとしたところポンプから発火した。死傷者無し。 (原因不明)
15	液化酸素タンクローリのポンプからの火災	製鉄所	7.6 トン液化酸素タンクローリから液化酸素貯槽 (コールド・エバポレータ (CE)) に充てん中、ポンプ内部から発火し作業員 1 名が火傷により死亡した。事故は充てん取付け作業が終わり予冷を約 8 分間行ったのち、ポンプを始動し 15 分経ったときに発生した。発火位置は充てんポンプの内部で事故の原因として①ポンプ内部に油脂、異物等が混入していた。②ポンプ予冷不足によりポンプ内で液化酸素が気化した状態でポンプを始動したためにメカニカルシールの摩擦熱によって発火した。③ポンプ運転中にキャビテーションが発生し、ポンプの振動により内部でインペラーとケーシングが接触し発火した等が考えられる。調査の結果、③によって着火した可能性が高いと推定されている。死者 1 名。 (保守/点検不良、手順違反/不良)
16	液化酸素タンクローリのポンプからの火災	充填所	6 トン液化酸素タンクローリから液化酸素貯槽 (コールド・エバポレータ (CE)) に充てん中、ポンプの運転開始後 15 分経ったときにポンプ内部から発火した。調査の結果、ポンプの軸受部がさびの発生によって急速に寿命を短くし、ポンプ内部で軸振れを起こし、又は内部で発生したキャビテーションが加速し、インペラーとケーシングの金属摩擦により局部的な発熱を起こしたものと推定される。死傷者無し。 (設計不良、保守/点検不良)
17	液化酸素タンクローリのポンプからの火災	充填所	液化酸素タンクローリのポンプを分解点検した後、試運転を行うため予冷、手廻し、振れの異常がないことを確認した後、ポンプを起動させたところ約 30 秒後に異常音と共にポンプが破損、飛散した。この事故により従業員 3 名が火傷を負った。ポンプを分解点検中に油脂類が付着したものである。軽傷者 3 名。 (保守/点検不良、手順違反/不良、管理/監督不良)
18	酸素ガス充てん設備切替え中のバルブ溶融・火災	充填所	酸素圧縮機を運転し、A 系列 16 本、B 系列 17 本の酸素ガス容器の充てんを開始した。A 系列及び B 系列の手元にある切替えバルブのスピンドル部よりガス漏れがあるため、圧縮機の運転を停止し、切替えバルブの分解点検を始めた。バルブシート部をペーパーで磨き、グランドパッキンをテフロン製の新品に取り替え、トリクレン洗浄した後、石鹼水で漏れのないことを確認した。A 系列の容器を約 1 時間かけて所定の圧力 (140 kg/cm <sup>2</sup> ) に充てんし、A 系列の切替えバルブを閉じ、また B 系列の容器を約 1 時間かけて充てんした。再び前と同様に A 系列の充てん容器を空容器と取り替え、B 系列の切替えバルブを閉じ、A 系列の切替えバルブを開とした。作業員は B 系列の充てん完了容器のバルブを閉めつつあり、2~3 分後、すなわち 2 本目の容器バルブを閉めたとき A 系列の切替えバルブから火が噴き出し、作業員が全身に火傷を負った。切替えバルブを分解点検した際、導管中のスケールが剥離し、摩擦熱によって発火したものとみられる。死者 1 名。 (保守/点検不良)
19	漏えい酸素による火災	機械	工場内に設けてある配管のヘッダーにゴムホースを接続して建造船の清水タンク内でガス切断器を使用していた。昼食休憩後再び作業員 2 名が同タンク内に入り電気溶接器を使用しようとアークを発したところ、充満していた酸素ガスが衣服に浸透していたために引火、急激に燃焼した。作業員のガス切断器の酸素コックの締め方が不完全だったため酸素ガスが漏れていたこと、および電気溶接器の溶接火花がかかったことが原因とみら

			れる。死者 1 名、重症者 1 名。 (手順違反/不良、管理/監督不良)
20	ドック内の酸素火災	その他 (造船所)	ドック内で修理中の貨物船内に火災が発生した。船内船橋甲板居住区、配膳室、流し台下の S 型排水管を溶断し、仕上げをしていた作業員 2 名が火災時の熱風を吸引し、後日病院で死亡。また、船内サロンで打合せをしていた 2 名のうち 1 名は煙により窒息死し、1 名は熱傷を負った。確定はできないが、発火位置は 1 階(上甲板)階段付近と思われ、発火の原因は(溶断用に使用された)酸素ホース内の自然発火ではないかとも考えられる。死者 3 名、重傷者 1 名。 (不明)
21	酸素圧縮機の爆発	一般化学	酸素圧縮機が爆発、燃焼し、圧縮機中段、および高圧段が溶けた。ただちに消火器にて消火し、計器類には異常がなかった。詳細について調査中。死傷者無し。 (不明)
22	酸素圧縮機の配管爆発	一般化学	コンビナート地区における一般化学事業所において、事故前日に酸素圧縮機の吐出弁の点検作業、及び試運転を行った。事故当日、本運転のために圧縮機を起動し、昇圧、圧送を開始した。圧送開始後まもなく 2 回爆発音がして、計器室で圧縮機の異常を示すアラームが鳴った。圧縮機は自動停止、酸素供給弁は自動閉止した。直ちに酸素の供給停止、電源切り離し等を行って現地を確認したところ、3 段吸入スナッパー及び配管が溶損していた。これは事故の前日に行った 3 段吐出弁交換時に、弁抑え用中心ボルトの W ナットの締め付けが悪かったためナットが緩み、弁抑え等が遊動して弁抑えが破断、そして中心ボルトの折損により弁部品が飛散した。そのため弁機能が無くなり、3 段シリンダー内の圧力上昇と飛散部品の衝突により発火。吸入側に伝播して、吸入配管やスナッパーを溶損させたものとみられる。過去の慣習による安易な弁取替えや弁の組込み等が行われていたことが根底にあると考えられるため、今後は適正な設備管理基準や作業基準の見直し整備を行うとともに、設備保全要員の確保や技術力の向上等の保全体制の充実強化に努める必要があると考えられる。死傷者無し。 (保守/点検不良、手順違反/不良、教育不良、管理/監督不良)
23	酸素圧縮機作動中の異常による溶損	一般化学	酸素圧縮機(ターボ式、6 段)において、2 段目から振動発報があり、圧縮機が非常停止した。直後に吐出温度の高温発報があり、工場建屋の煙感知器が作動して Ar 消火ガスの自動吹き込みが開始された。駆けつけた作業員が当設備上部からの発煙を確認し、直ちに窒素バージ及び散水による冷却措置がなされた。事故後の調査の結果、圧縮機の軸シール部、付近の配管等が溶損していた。原因は、軸シール部にあるフィンが軸シール部内で接触・欠損し、その破片が異常発熱したためと推定される。また、軸シール部内でフィンが接触した原因は、装置起動時の寸動を実施しなかったため、装置構成部品に熱歪みが生じたことと考えられる。今後は、起動時に寸動を常時実施するよう、シーケンスを改良することとした。また、振動レベルに対して変化があった場合に、アラームを発する傾向監視を実施し、軸シールが接触する振動を検知した場合は警告を発報することとした。死傷者無し。 (手順違反/不良、設計不良)
24	誤認識によって使用した酸素による火災	機械	同製造所の電気炉(5 t)の炉体の傾転と電極作業用に使用されている鉄製水圧タンク内で下請企業の工務店の再下請である会社の従業員 2 名が錯落し作業中のところ、タンク内の温度が上昇した為空気を入れて温度を下げようとして酸素パイプと空気パイプと間違え、酸素パイプのバルブからゴムホースをタンク内に入れ作業を続行していたところ突然内部で火災が発生、1 分程で消えたが 2 人は火傷し病院に運ばれたが死亡した。燃焼物質並びに着火原因については現在のところ不明。死者 2 名。 (教育不良、手順違反/不良)

25	容器取り付けミス	-	窒素ガス容器から減圧してバーナーのオイルパージラインに吹込んでいたが、容器弁を操作したところ突然爆発した。下請業者が酸素ガス容器を窒素ガス容器と誤って取りつけた。重傷者1名。 (教育不良、手順違反/不良、管理/監督不良)
26	酸素ガス配管の爆発	製鉄所	50 トン電気炉の火入れ式を行う前に試運転を実施した。スクラップを3回投入(計50トン)し、その後脱炭のため酸素ガスを通したところ酸素配管が爆発した。当該配管は、トリクレンによる洗浄後、約15日が経過していた。原因は、配管内部に残存していたトリクレンがバルブ付近に滞留し、通ガスの際に異物等が配管内を飛散して摩擦により発火し、トリクレン又は油脂類に引火し急激に燃焼したものとみられる。死者1名、重傷者1名、軽傷者10名。 (手順違反/不良、洗浄不良、汚染物質、管理/監督不良)
27	ガス切断作業中爆発漏えい	-	船倉内でガス切断作業中に爆発が起きた。作業中断中にもれた酸素ガスによって酸素ガスリッチ雰囲気ガスとなり、油分があったため爆発した。死者1名、軽傷者1名。 (手順違反/不良、保守/点検不良、管理/監督不良)
28	酸素圧縮機の火災	一般化学	酸素圧縮機の運転を行って昇圧したとき、圧縮機の2段階側グランドパッキン部から発火し、発火と同時に圧縮機は停止したが燃焼は10分くらい続き、グランドパッキン、ピストンロッド等が焼損した。クランクケースオイルシール部から漏れた油にシリンダーのグランドパッキン部から漏れた酸素が吹きつけ発火したか、又はグランドパッキン部の冷却水不十分のため過熱し、シリンダー内の高圧酸素により着火したものとみられる。死傷者無し。 (保守/点検不良)
29	酸素容器破裂	一般化学	3段階積みの充てん済酸素容器(35.7L)を床面に降ろそうと固定キャップを持って傾めに振り、容器上を滑らして容器底部を床面に落とした瞬間破裂した。原因は落下による衝撃である。軽傷者1名。 (教育不良、手順違反/不良)
30	充てん中の酸素ガス容器破裂	充填所	充てん所で酸素容器(容量47L)にガスを充てんしていたところ突然破裂し、15個の破片となって付近に飛散した。その内の1個は母屋の軽量鉄骨に当たりスレート屋根を突き破って約112m離れた民家の庭に落ちて植木鉢を破損した。事故容器は消費先から工場に返却されたとき作業主任者が容器外面にひっかき傷があるのを発見し容器再検査場に運ばせたが、再検査場の作業員が外傷のあることを見落としこの容器がまだ有効期間内であったので充てん場に持ち込んだもの。当該容器は製造後13年経っており、直近の再検査を約2.5年前に受け合格している。事故時の充てん圧力は145 kg/cm <sup>2</sup> (at 15°C)であった。調査の結果、亀裂発生点の外表面に深さ0.7~0.8 mm、長さ20~65 mmのノッチ状の当て傷が集中しており、破面にシェブロン模様(脆性破壊)が確認される。ショベルカー等の当て傷によって加工硬化、塑性変形の外傷ができ、これがノッチ効果となって脆性破裂したものの。死傷者無し。 (手順違反/不良、情報共有不良、管理監督不良)
31	洗浄塔爆発	一般化学	低圧保安器が作動したため、洗浄塔の前及びホルダー入口の各切替バルブを閉止し、O <sub>2</sub> ガスを放出した。その後N <sub>2</sub> ガスを送入して置換し、O <sub>2</sub> ガスを洗浄塔へ送り込んだところ保安器が作動して洗浄塔の上ブタが吹きとんだ。不完全な置換が原因。死傷者無し。 (手順違反/不良、確認不良)
32	酸素ガス容器に充てん中の火災	充填所	酸素容器の充てん作業を開始し、しばらくしてからドレーン抜き作業を開始した途端にドレンセパレーター下部より火が噴き出し、バルブが吹きとんだ。作業員の誤操作によりドレンセパレーターに70 kg/cm <sup>2</sup> の圧力がかかった。軽傷者1名。 (手順違反/不良、教育不良)

33	反応器火災	製鉄所	反応器に 25 atg で酸素を供給する精練用釜の攪拌機が故障したため開放し、修理中、中に入っていた作業員 2 人が火災のため火傷を負った。反応釜に入る手前のバルブ不良か閉止不完全のためガスが漏れていた。死者 2 名。 (手順違反/不良、管理/監督不良)
34	液酸精留塔爆発	一般化学	液化酸素分離塔の副精留が突然爆発を起こし全壊した。当該分離工程は自動コントロールで運転しており、事故発生時には計器類には異常がなく、正常状態であった。(原因) 副精留塔の液化酸素中にアセチレン等有害物質が蓄積したものと推定される。死傷者無し。 (保守/点検不良、汚染物質、管理/監督不良)
35	コールドエバポレーターから充てん中の球形ホルダー破損	運送	酢酸ビニール製造装置に酸素ガスを供給するためタンクローリーからコールド・エバポレーター (CE) (容量 9000 L、温度-185 °C) に液体酸素の充てんを終え、蒸発器でガス化し酸素ガス球形ホルダーに酸素ガスを供給していたところ、突然球形ホルダー下部のガス供給口付近が破裂・開口し、またガス供給配管もばらばらに破断してガスが噴出した。噴出したガスによって球形ホルダー下部の地盤面 (ジャリ石) が直径約 1500 mm のすり鉢状にえぐりとられた。調査の結果、球形ホルダー及び供給配管の破断面は 100 %脆性破面を呈しており、また低温脆性破壊が進行したシェブロン模様がみられる。破裂した箇所がガス供給口付近に限られその他の箇所には異常が認められない。蒸発器の圧力調整弁が正常に作動せず低温の液が球形ホルダーに流れ込み、その為液に直接触れた部分と触れない部分との間に急激な熱応力が発生し低温脆性破壊を引き起こしたものの。運転チャートによるとガス供給時の圧力は 13.5 kg/cm <sup>2</sup> であり、破壊時の圧力は 16.3 kg/cm <sup>2</sup> となっていることからホルダーに流出した液量は約 700 L で破裂・開口した範囲と一致する。軽傷者 1 名。 (保守/点検不良、設計不良、管理/監督不良)
36	液化酸素貯槽出口弁の漏洩	-	酸素貯槽から酸素を容器に充てん中貯槽の出口弁から酸素が漏れて修理しようとしたが漏れが大きくなり、600 L が漏れた。軽傷者 1 名。 (保守/点検不良、手順違反/不良、管理/監督不良)
37	液化酸素送液ポンプの火災	充填所	液化酸素送液ポンプが稼働中、突然火を噴き、ケーシングの一部が焼損し飛散した。ポンプ型式は自吸式 2 段渦巻ポンプである。死傷者無し。 (原因不明)
38	ポンプのベアリング装着不備による液化酸素の漏えい	充填所	15 時 55 分頃、液化酸素ローリーが液化酸素充てん所に入庫し、16 時 00 分より予冷を開始して 16 時 10 分から充てん作業を開始した。運転手が書類の整理のため運転席に戻っていたが、16 時 35 分にミラー越しに煙が見えたため現場を確認し発煙、小火を発見した。原因は、ポンプの分解点検を実施したところ、ベアリング保持器が前回の点検作業後に誤った形で装着されており、その影響で、別ベアリング保持器が破損したものと推定される。破損によりポンプの振動及び吸い込み不良が起こったため、シール部の不良が起こり微量の液化酸素が漏えいした。同時に破損による発熱でグリスが熔融飛散し、熱と酸素により着火し断熱材の発泡ウレタンに延焼したものと考えられる。また、充てん中に運転手がポンプ設備から離れていたため、ポンプの振動等異常に気づかず、火災の発生を予防することができなかった。今後は、ポンプ組み立てマニュアルの改正、及び充てん手順の改正を実施することとする。死傷者無し。 (保守/点検不良、手順違反/不良)
39	酸素漏えいによる火災	製鉄所	酸素工場で、空気液化分離設備の定期検査工事中に、起動弁の取り外し作業のためサンダーで外槽鋼板を切断していたところ、作業員 2 名の作業着が燃え上がり、火傷を負った。また、作業員 2 名の作業着の火を手で消そうとした作業員 1 名が手の甲に火傷を負い、消火器で消火作業を行った作業員 1 名が消火器の粉末を吸い込み、体調不良となった。原因は、計装空気配管の漏れ補修工事のため元弁を閉めたことにより、空気源が遮断され

			た酸素放出弁が閉止したため、酸素母管から酸素遮断弁及び酸素流量調節弁を介して酸素ガスが事故発生場所まで到達し、作業場所の雰囲気酸素濃度が上昇した。そこに作業で使用していたサンダーの火の粉が着火源となり、作業者の衣服が燃え上がったと推定される。今後は、酸素放出弁について、現場で手動にて計装空気が遮断されても全開にならないように機械ロックを施し、手動解除できないようにする。また、酸素遮断弁および酸素流量調節弁を全開、酸素放出弁を開としたうえで、酸素流量調節弁の直近下流にあるブロー弁で酸素濃度を測定して逆流が無いことを確認する。さらに、酸素工場において計装空気の停止を伴う工事は単独工事とし、他の工事と同時に実施しないこととする。重傷者1名、軽傷者3名。 (手順違反/不良、情報共有不良、管理/監督不良)
40	配管爆発	一般化学	定期自主検査中に窒素ガスがなくなったので溶断用の酸素ポンプを使用して配管を昇圧し、逆止弁のテストを実施した後そのままの状態では緊急遮断弁の作動テスト実施中に爆発した。酸素ガスを使用したため爆発限界内のガスが発生した。死傷者無し。 (基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良)
41	空気槽火災	その他 (造船所)	修繕船内機械室の発電機を起動するため、同船の補助空気槽に空気を充てんすべきところ、間違えて酸素ポンプを使用したため、起動した瞬間シリンダー内の燃焼火気が空気槽内に逆火し空気槽上部蓋を吹き上げ破損、火災により1名火傷した。軽傷者1名。 (基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良)
42	CEの配管の破損	-	液化酸素のコールド・エバポレータ(CE)の消費配管(100A×45m)の接合溶接部(4箇所)が爆発音を伴い切断・破損した。死傷者無し。 (不明)
43	酸素容器の耐圧試験中の破裂	容器検査所	容器検査所において、耐圧試験時に圧力130 kg/cm <sup>2</sup> で容器の底部が破裂した。内部腐食によるものと考えられる。死傷者無し。 (保守/点検不良、腐食劣化)
44	容器に充てん中の酸素ガス爆発	充填所	圧縮酸素充てん所において、終業後、作業員が点検を行い控え室に戻った直後に大音響を発して、充てん所内が爆発した。充てん容器の証明書を確認したところ、10本中の1本がアセチレン容器であったことが判明、及びこの容器の中の残ガスに酸素が反応したためとみられる。死傷者無し。 (手順違反/不良、確認不良)
45	-	その他 (造船所)	ガス切断中、ガスの出が悪いので酸素集合装置の元弁を開いたところ、鋼管とゴムホースが爆発した。死傷者無し。 (手順違反/不良、誤操作)
46	酸素ガス充てん中の充てん枝管溶融・火災	一般化学	酸素カードル容器(30本組)の充てん後、充てん枝管の袋ナットを取り外したところ充てん枝管から酸素ガスが噴出し同時に発火した。この発火により作業員1名が火傷(全治2週間)を負い、また枝管の一部が溶融した。充てん枝管取付口にポリエチレン製のパッキンが使われており、油が付着していたため着火したもの。軽傷者1名。 (手順違反/不良、材料不適合、汚染物質)
47	充てん中の酸素ガス容器破裂	充填所	10L鋼製シームレス容器に酸素ガスを充てんしていたところ、突然容器が破裂しその破片が従業員の足に当たり骨折した。外面腐食により肉厚が1mm以下になっていたにもかかわらず、腐食の再検査せずに充てんしたため内圧に耐えられず破裂したもの。重傷者1名。 (保守/点検不良、腐食劣化、手順違反/不良)
48	酸素導管の減圧弁からの火災	一般化学	空気液化分離装置で製造した酸素ガスを他社に供給している導管の途中に取り付いている減圧弁から発火したので、直ちに供給を停止し元バルブを閉め鎮火させた。死傷者無し。 (保守/点検不良、錆の付着)
49	酸素ガス充てん中のバルブ	充填所	酸素ガス充てん工場において、A、B、Cの3系列ある充てん台のうち、B系列(医療用酸素ガス容器28本)及びC系列(酸素ガス容器30本)の酸

	溶融・火災		素ガス容器の充てんが終わったので、B、C 系列の手元にある切替えバルブを閉止し、各容器のバルブ閉止作業に入った。その際、B 系列の医療用容器 2 本がバルブ閉の状態で作業を行ったことに気づき、充てん済の容器からの移充てんを思いつき、B 及び C 系列の切替えバルブを開いたところ、B 系列の切替えバルブが溶融し火災となった。切替えバルブの O リングの材質が不適であった。死者 1 名。 (手順違反/不良、設計不良、材料不適合)
50	酸素ガス充てん設備切替え中のバルブ溶融・火災	充填所	酸素ガス充てん所において、1 系列の充てん台から 2 系列の充てん台へ切替えるため手元にある切替えバルブを開いた瞬間、バルブが溶融し火災となった。死傷者無し。 (保守/点検不良、異物混入)
51	酸素ガス充てん中の圧力計取付口溶融・火災	一般化学	酸素ガス容器に充てん中、充てん圧力をみるために、圧力計のバルブを開いたところ、圧力計取付口が溶融し、火が噴き出し、立合者 2 名が火傷を負った。圧力計に付着していた油で燃焼した。軽傷者 2 名。 (保守/点検不良、手順違反/不良、教育不良、汚染物質)
52	酸素ガス充てん設備切替え中のバルブ溶融・火災	一般化学	酸素ガス容器の充てんが終わったので、手元の切替えバルブを閉めたところ、バルブが溶融し、火が噴き出した。バルブのパッキンにはポリエチレン系樹脂が使われていた。死傷者無し。 (設計不良、材料不適合)
53	酸素ガス容器のバルブ溶融による火災	充填所	酸素ガス容器の充てん終了後、容器バルブから漏れがあったので、増し締めしたところスピンドルが折れてしまった。このため止め栓をして、スピンドルを取り替えた後、止め栓を取り外そうとしたところ、ガスが噴出し、止め栓及び容器の一部を溶かした。軽傷者 1 名。 (手順違反/不良、誤操作)
54	ウラン濃縮装置の酸化塔酸素放出弁からの火災	一般化学	大型モデルプラントのウラン濃縮装置に酸化剤(天然ウラン水溶液を核燃料用ウランに濃縮させる)を活性化させるため、酸化塔に失活酸化剤を注入し、酸素を吹き込んで約 5 分経過したところ内圧が上昇したので職長が減圧するよう指示した。作業員が酸素放出弁をわずかに開いたところ発火し、放出弁及び配管を焼損した。総安研で調査したところ、放出弁を開いたとき弁棒の先端にあるディスクが弁座と弁棒の間で激しく衝突、振動を繰り返し発火に至ったと結論されている。重傷者 1 名。 (設計不良)
55	充てん中の酸素圧縮機からの火災	充填所	酸素ガス容器に充てん中、圧縮機 3 台のうち 1 台から異音が出ているのに従業員が気づき、停止操作をするため圧縮機に近づいたところ漏えいしていた酸素ガスが発火し、火傷を受けた。圧縮機の第 3 段目シリンダーパッキンの摩耗により酸素ガスが漏えいしたものと推定されている。重傷者 1 名。 (保守/点検不良)
56	充てん中の酸素ガス容器の溶融火災	充填所	医療用酸素容器 48 L×5 本、9.4 L×3 本を充てん終了後容器弁を閉じ、配管の残ガスを同系統にある別の回収容器(48 L×3 本)に回収し、同容器のバルブを閉じた。回収容器の圧力は 60 kg/cm <sup>2</sup> であった。充てん後、2～3 分してから従業員が充てん記録を取り始めたとき回収容器のバルブと充てん枝管部から大きな音とともに発火した。他の従業員がかけつけたところ、被害者の顔は真っ黒であった。調査の結果、容器の内部に鉄及び黄銅などの金属粉がたまっていた。酸素系内配管、バルブ、充てん枝管の油分測定結果は問題無かったが、容器バルブから漏れたガスが容器内の金属粉を同伴して、充てん枝管ポリカーボネイト樹脂に衝突、又は金属粉どうしが衝突して高温となり、この樹脂が発火した。また、バルブシートのベークライトは完全に消失していた。軽傷者 1 名。 (保守/点検不良、異物混入、設計不良、材料不適合)
57	酸素ガス配管のチタン弁の	製鉄所	銅の製錬所で銅と鉄を分離する処理設備において、下流工程のフラッシュタンクの U 字管より液漏れが発生したため、装置を停止し U 字管の交換

	発火		<p>を行い、スタートアップの準備作業に入った。上流工程では堅型オートクレーブがあり、その入口側配管にチタン製のバルブが使用されていた。この弁を微開したときに火が噴き出し、作業員が火傷した。配管内のサビが摩擦熱によって発火したものと思われる。重傷者1名。</p> <p>(設計不良、材料不適合、保守/点検不良)</p>
58	宇宙航空用エンジン燃焼試験装置の爆発	その他(研究所)	<p>「ラムジェット燃焼試験装置」の気密試験を実施するために圧力計を取付け、水素供給配管フランジ部のボルトを外し閉止板を挿入した。その後、閉止板を取り外し復旧したが、フランジ部の溝からOリングがはみ出した状態でボルトの締付けを行った上に、圧力計元バルブの閉止が不十分であったことから水素ガスが漏えいしていた。事故当日、燃焼試験のリハーサルを行うために点火玉に通電したところ爆発した。</p> <p>(手順違反/不良、教育不良、管理/監督不良)</p>
59	充てん中の酸素ガス容器の溶融・破裂	充填所	<p>ガス充てん工場で医療用酸素ガスをアルミニウム製容器6本と鋼製容器20本に充てんしていた。容器への充てんを終え、容器バルブ及び架台バルブの閉操作を行なっていたところ、突然アルミニウム製容器1本のバルブ取付部から肩部にかけて溶融し火が噴き出した。この事故により従業員1名が死亡し、他の1名は火傷による重傷を負った。調査の結果、最初に着火した位置は容器バルブの内部で、充てん枝管が差し込まれた先端部から発火し、この位置のバルブ本体を溶融し、更にアルミ製容器の外面を直撃し溶融・開口させている。あたかも電子ビームを照射して本体を溶融させた様相を呈している。一方、着火した炎はバルブシート面を溶かし、容器バルブの出入口通路内を伝播しながらアルミ容器の内部に達している。油分、鉄粉等の有無を確認するため事故容器の両隣の容器を切断しブラックライトを照射したところ、星空模様の発光が認められ容器内面にも油分が混入していることが確認された。当充てん所では容器再検査も行っており耐圧試験用水の表面に浮いている事実から容器再検査時に混入した油がバルブ内面、容器内面に付着してガス充てん時の温度上昇(半流動系状態)によって着火したものと考えられている。死者1名、重傷者1名。</p> <p>(保守/点検不良、手順違反/不良、汚染物質)</p>
60	下水汚泥処理装置の反応予熱器破損	一般化学	<p>下水汚泥処理開発プラントで清水と灯油をポンプで反応予熱器に供給し、更に酸素による酸化反応を行っていたところ、反応予熱器の配管のUベント部3箇所が突然破裂した。電磁流量計の誤作動により灯油のみが供給され、予熱器内で酸化反応による異常圧力上昇を起こしたものの。死傷者無し。</p> <p>(設計不良、保守/点検不良)</p>
61	酸素ガス充てん設備の安全弁溶融による火災	充填所	<p>充てん工場で酸素ガス充てん設備の定期検査を外部業者に依頼し実施した。充てん設備系内の安全弁及び圧力計を取外し安全弁の作動検査、圧力計の較正等を行った。検査終了後、安全弁等を取付け直し酸素ガスを系内に流した。蒸発器の出口側配管に取付けた安全弁の元バルブを開けバルブの封印を行った後、脚立から下る途中に突然安全弁から火が噴出し作業員が熱傷を負った。油分付着の有無を確認するためブラックライト照射による調査及び赤外分光光度計による油分量を測定した。溶融した安全弁を除く11個の安全弁のうち2個及び水圧ポンプの圧力計に発光が認められた。軽傷者1名。</p> <p>(保守/点検不良、手順違反/不良、汚染物質)</p>
62	油混入による酸素気蓄器の飛翔	その他(研究所)	<p>水熱分解試験装置でサンプル油の分解試験を行っていたところ、高圧酸素供給設備の気蓄器の口金部が突然溶融し、実験棟内の倉庫に飛翔した。事故発生時、付近で12名の従業員が作業をしていたが幸いけが人は無かった。調査の結果、酸素ブースタの駆動用空気コンプレッサの潤滑油がシリンダー内に混入し、さらに酸素ガス側のシリンダー内にリークした。その結果、酸素ブースタの高圧側で発火しブースタ側の逆止弁は焼損し、気蓄器の口金部を溶融させたため爆発的に燃焼し気蓄器が飛翔した。死傷者無し。</p>

			(設計不良、保守/点検不良)
63	消費中の酸素ガス火災	機械	<p>車輛製造工場で台車の溶接作業を行っていた。蒸し暑かったので作業員は冷房目的で作業服の中にエアースーツを入れて溶接作業を開始した。約20分間程たった頃、突然作業員の上着が燃え出したため、近くの作業員に助けを求めながら服を脱ぎ捨てたが上半身にやけどを負った。作業員はエアースーツと勘違いしてスーツを酸素の取出し口に接続したため、作業服の中に酸素ガスが充満し溶接の火花によって引火したもの。重傷者1名。</p> <p>(基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良)</p>
64	活魚運搬車の液化酸素火災	充填所	<p>充てん所で活魚運搬車の荷台に固定された超低温容器に液化酸素を充てんしていた。従業員は充てん中に現場を離れたため、容器放出弁から放出した酸素ガスが運搬車の荷台に設置された発電機の火花によって着火し車輛火災となった。直ちに、従業員が粉末消火器で消火活動を行うと共に、事務所からの通報によって駆けつけた消防車が放水して鎮火した。死傷者無し。</p> <p>(手順違反/不良、教育不良)</p>
65	酸素用圧力調整器の破裂	機械	<p>金属製品加工工場で酸素ガスを消費するために酸素カードル容器(47L×6本)の出口側に圧力調整器を取り付けガスを流したところ、突然圧力調整器のカバーが破裂し、その破片が作業員の顔面に当たり負傷した。近くにいた作業員がカードル容器の元バルブを閉め漏れを止めた。いつも使っている圧力調整器が使用中であったので、別の場所から持ってきて装着した。この圧力調整器は単段低圧用のもので2段高圧用のものが必要との認識に欠けていた上、注意書きの表示が消えかかっていたもの。軽傷者1名。</p> <p>(基本的知識の欠如、教育不良、管理/監督不良)</p>
66	C E 配管からの酸素ガス漏えい	電気	<p>液化酸素貯槽へ酸素を受入れ約1時間後に係員が巡回していたところ、コールド・エバポレータ(CE)貯槽の検液管内部管と外部管の継手部付近から酸素が漏れいしているのを発見した。直ちに関係機関に連絡すると共に貯槽周辺への立入禁止措置を行い、貯槽の残液をタンクローリに移液した。調査の結果、検液管内部管と外部管はそれぞれ真鍮製ソケットに銀ろう付けされているが、この銀ろう部に長さ7mmのクラックがあり、また外管部に打撃が加えられた変形跡が認められた。過去の使用中に液取出管に付着した氷を取り除く為にハンマーを用いて打撃を与えたことから、銀ろう付け部にクラックが発生したものとみられている。死傷者無し。</p> <p>(手順違反/不良、教育不良)</p>
67	カードル容器の管継手破損による酸素ガス噴出	充填所	<p>充てん所で酸素ガスカードル容器(10本組)を保管していたところ、突然取出口の管継手からガスが噴出しているのを通行人が発見し通報した。消防車が出動し破裂部に木栓を打ち込み漏えいを止めた。管継手の袋ナット寸法が大きめに製作されていたため、導管が斜めの状態に取り付けられ長期間の使用中に亀裂が進展したものとみられている。死傷者無し。</p> <p>(設計/製造不良)</p>
68	金属材料発火試験装置の覗き窓ガラス破裂	その他(研究所)	<p>研究センターで酸素雰囲気下での金属材料の発火試験を行っていた。金属材料発火試験装置の中に入れた試料を常温から電氣的に加熱し、温度が1200℃付近、圧力40MPaになった時、爆発音と共に試験装置に取り付けられたのぞき窓ガラス4箇所の内、1個のガラスに亀裂が入り黒煙と共に火炎が噴出した。この熱風によって実験者は左足踝下部にやけどを負った。直ちに付近に置いていた消火器で消火にあたり約1分後に鎮火した。事故後の調査で、事故前日に行った実験でものぞき窓ガラスに亀裂が入る等の不具合が生じたにもかかわらず原因調査等を怠り、覗き窓ガラスのみ取替え、組立てる時にグリースを使用したため、摩擦熱により酸素が発火し爆発に至ったものとみられている。軽傷者1名。</p> <p>(設計不良、手順違反/不良、材料不適合)</p>
69	酸素容器への	充填所	酸素充てん場で圧縮酸素ガス容器の充てんが終了し漏えいの有無を確認

	充てん作業中の火災		したところ、容器バルブからの漏えいを確認した。そのため圧力開放後、弁システムを交換し再度充てんを開始したが、破裂音と共に火花が飛び散り、容器バルブと充てん金具の一部が高熱で溶解した。原因としては、酸素と付着油分の接触による発火、バルブ部品シート材の充てん時の断熱圧縮による発火、付着金属粉の摩擦熱による発火等が考えられるが特定はできなかった。死傷者無し。 (手順違反/不良、汚染物質)
70	金属材料発火試験装置の覗き窓ガラスから酸素漏えい	その他 (研究所)	研究センターで酸素雰囲気下での金属材料の発火試験のために昇圧していたところ、6~7 MPa になった時にガスが漏えいしたと思われる音がした。設備を確認したところ、のぞき窓ガラス部分に亀裂が入っており、この部分からガスが漏えいしていた。ガラス窓を交換し、再び昇圧し、圧力計にて大幅な圧力低下がみられなかったことから、実験を再開した。当該事故の翌日にも同様の実験を行ったところ、前日とは異なる覗き窓ガラスから酸素ガスが漏えいし、爆発事故が発生した。詳細は上記の No.68 を参照。死傷者無し。 (設計不良)
71	溶接作業場における酸素ガス漏えいによる火災	鉄工所	酸素、LP ガス等による溶接作業場で、溶接作業の一時停止中、ゴム管から漏えいしていた酸素によって当該ゴム管が燃えたが、作業員により約5分後に消火が完了した。付近に火の気がないこと及び酸素のゴム管のみ燃焼していることから、別の電気溶接による迷走電流が火災場所付近に置いてあった鉄板の端部でスパークし、その火花が劣化した酸素のゴム管から漏えいしていた酸素により、可燃物であるゴム管を燃やしたものと推定される。これにより事業所では、火気使用時の保安教育、遵守事項の再徹底を行い、類似設備の点検及びホース交換を行った。死傷者無し。 (保守/点検不良、手順違反/不良)
72	個人用冷却装置の酸素ホース取り付けミスによる火災	その他 (造船所)	造船所において、溶断を行う社員の防熱対策のため、圧縮空気を衣服の中に送って涼をとるクールスーツを用いていた。しかし事故当日は作業員が誤ってクールスーツに圧縮空気ホースではなく酸素ホースを取り付けてガス溶断作業を行ったため、溶断中に左胸部から火の粉が入った瞬間、クールスーツ内に送り込まれていた酸素によりスーツが瞬間的に激しく燃え、作業員が火傷を負った。通常は空気、酸素、ガスホースについては、それぞれテープで色分けされていたが、ホース口径も似かよっており、色も黒色であるとともに空気ホースの継手と酸素ホース用の継手は同じになっていたため、誤って接続してしまったとみられる。重傷者1名 (設計不良、手順違反/不良、誤接続、教育不良)
73	配管接続部における酸素の破裂・火災	充填所	酸素の充てん設備において、作業員は酸素充てん制御盤の前で5系統あるラインの充てん状況を監視していた。その後、カードルラインが設定圧力に達したことを確認したので、別室のカードル充てん室に行き、カードル元弁の閉止作業を行っていた。その作業中にドンという音がしたので制御盤を見たところ、制御盤からオレンジ色の炎が出ているのを確認した。直ちに消防への通報と消火作業を行い、約3分後に鎮火、酸素の漏えいは約15分後に止まった。破損箇所は酸素自動切り替えユニット内の配管であり、5系統ある充てんラインの第4系統で事故が発生した。第4系統の元弁(自動弁)とブロー弁間のエルボー配管接続部2カ所が破損しており、エルボー部分が離脱するとともに、同ユニット内の被服電気配線の一部が燃えていた。原因はボール弁のボールと弁シート部の接触や弁シート部への異物の接触、弁シートの変形による摩擦熱での発火が考えられる。再発防止として、酸素充てん切り替えユニットの再設計、消耗部品の交換を含めた管理基準の見直し、配管の定期的なパージを行うこととした。死傷者無し。 (設計不良、保守/点検不良、管理/監督不良)
74	酸素 C E 保安	充填所	酸素 CE の保安検査の前検査を実施中、安全弁を取り付けて気密試験圧力

	検査実施中における安全弁の破裂・火災		まで昇圧させて閉止していた。安全弁元弁を開けてから 2～3 分後に安全弁付近から発火。安全弁、及び放出管を焼損した。火災は発災した一瞬であり、すぐに自然鎮火した。事故の原因は安全弁元バルブの急激な開放によるものとみられる。死傷者無し。 (手順違反/不良、教育不良)
75	酸素充てん設備における弁、配管の破裂	充填所	酸素充てん所において医療用酸素充てんラインの容器 30 本が充てんを終了したため、自動切り替え装置により工業用容器の充てんラインへ切り替わった直後、酸素充てん操作盤の切り替えバルブと配管が長さ 5 cm にわたって破裂、飛散した。配管には発火の形跡もみられる。近くにいた作業員 3 人には被害はなかった。充てんは、充てん開始ボタンを押した順番でなされる自動運転であり、手動による操作はなかった。原因は不明である。死傷者無し。 (原因不明)
76	タンクローリからの液化酸素漏えい	販売店	空気液化分離装置で製造した液化酸素を、ローリーの前部液出入り口より受け入れ作業中、タンクローリーの作業者が誤って後部充てん口のキャップを専用工具を使用して開けたので、液化酸素が漏えいした。その際、手でキャップを閉めようとしたため、革手袋をしていた両手に凍傷を負ったもの。作業者が、ローリーの後部充てん口は液出入り口と直結しており、受け入れ作業中に開放すると液が流出する構造であることを忘れていたことと、液受け入れ作業中にもかかわらず、当該作業に関係のない作業を行い、監視義務を怠っていたことが原因とみられる。そのため、作業員に対して運転操作に関する年 2 回の教育を徹底するとともに、作業手順遵守の徹底を行うこととした。軽傷者 1 名。 (手順違反/不良、教育不良)
77	空気液化分離装置の配管から液化酸素漏えい	製鉄所	事業所に設置されている、空気液化分離装置の定期点検完了後の健全性確認テスト時に、封気塔（プラントの外槽）内の圧力上昇を確認したため、直ちにテストを中断した。内部を開放し調査を実施していたところ、熱交換器から液化酸素ガスを抽出する配管部分に破損を確認した。原因は、プラント加温時の熱伸縮による応力が、ノズル部の降伏応力を超過したためと推定される。プラント加温後の気密テストで問題が見られなかったことより、点検後の健全性確認テストまでは貫通き裂ではなく、非貫通き裂の状態であったが、プラント立ち上げ時に主コンデンサーへ液化酸素ガスを注入しガス量が増加したタイミングでき裂が進展、破断に至ったものと考えられる。これまでのプラント加温でも温度差が 100℃程度になることはあったものの、設計許容値と降伏応力では約 3.3 倍の差があることから、許容値は超過したものの、降伏応力までは至らなかったと推定される。今後は、配管固定点の変更を行い、熱伸縮の影響を軽減する。また、スタートアップ時の運転方法を見直し、大きな温度差が発生しないようにする。死傷者無し。 (設計不良、保守/点検不良、手順違反/不良)
78	空気液化分離装置からの液化ガス漏えい	製鉄所	酸素工場 No.8 空気液化分離設備スタートアップ中に保冷槽南面上部の鉄板（9.2m×6.6m）が破損し、開口した部分から断熱材（パーライト）が周囲に飛散した。パーライトを浴びた作業員 3 名が目に違和感を感じ、病院に搬送された。空気液化分離装置は、常温から極低温の広い範囲の温度で使用されるため、温度差に起因する配管収縮等により大きな応力が発生することがあり、これらを考慮に入れた適切な設計が必要であるが、今回事故を起こした No.8 号酸素プラントは、設計が不十分であったと考えられる。原因は、建設以来、約 200 回程度繰り返された起動停止に伴う応力変動による疲労で配管溶接部が割れ、そこから漏えいした液体ガスが断熱材（パーライト）と接触して急激に気化膨張し、その結果、保冷槽内の圧力が上昇し、外壁鉄板の一部が脱落したと推定される。また、これに伴う設備の揺動により、配管数か所で割れが発生した。今後は、保冷槽安全弁を

			追加設置し、保冷槽内の区画毎に内圧常時監視、記録、警報発信を行うこととする。また、常時窒素シールによる断熱材吸湿防止及び吸湿量の定期分析（3 年毎）、地区内及び事業者他地区の空気液化分離施設へ水平展開を行う。さらに、通報訓練を強化継続し、通報遅れの防止に努める。軽傷者 3 名。 （設計不良）
79	オゾン混合ガス液化装置の破裂	その他（研究所）	真空断熱の冷却液化装置における、オゾンと酸素の混合ガスを液化し測定槽に移送する設備において、液化ガスをヘッド圧で移送する作業に入った際、液化装置の液量が減らないため、液化装置の昇温による圧力差で液化ガスの移送を試みた。液化装置内圧が、常用圧力に達しても液量が減じないため、液化装置の排気を開始したとき、1 回目の金属破裂音が発生し、内圧が低下した。直後に、バルブの動作確認を行ったところ、2 回目の金属破裂音が発生し、真空断熱外筒の下部が破裂した（常用圧力：0.15 MPa、設計圧力：11.6 MPa）。安全装置の破裂板（作動圧：0.15 MPa）は作動していなかった。実験は、遠隔操作で行っていたため、人的被害は無かった。ガス設備の欠陥箇所は 2 箇所あり、真空断熱の外筒で 1 箇所が破裂した模様であるが、事故の原因は不明である。なお、破裂板が常用圧の 0.15 MPa のところ 0.3 MPa のものが設置されていたが、事故後、これら安全装置の作動性能を確認し、問題はなかった。設備の設計は、11.5 MPa であり、耐圧試験は 14.5 MPa でなされていた。なお、事故関連研究及び開発プロジェクトは中止となり、また再現実験も危険を伴うことから、原因究明も中止となった。死傷者無し。 （原因不明）
80	作業服冷却装置における火災	鉄工所	作業服の冷却用装置に取り付けるホースにおいて、エアーホースと酸素ホースとを間違えて接続したため、溶接の火花が作業服に引火し、作業員が負傷した。原因は、作業効率と行動性からジョイント部（カプラ）をエアージョイントから酸素ガス用ジョイントに改造していたこと、作業場所近傍に使用済み酸素ガス及び LP ガスホースを片付けずに置いていたこと、及び酸素ガス及び LP ガスホースは本来 2 本セットとしていたが、これも作業効率から、ホースを分離させていたことにより、酸素ガスジョイントとエアーホースを誤って接続したためとみられる。対策として、改造ジョイントを廃棄し、エアー専用のジョイントに取り換えた。また、酸素ガスホース及び LP ガスホースの結束、古いホースの点検実施と旧仕様の酸素用黒色ホースの破棄、安全対策の徹底と安全教育を実施することとした。重傷者 1 名。 （手順違反/不良、設計不良、誤接続）
81	液化酸素 CE 充てん中における配管の破裂	製鉄所	製鋼所内の液化酸素 CE に充てんを行う際に、作業者は事業所の立会いが無い状態で作業を開始した。最初に、CE 内槽圧 No.1 (0.9 MPa)及び No.2 (0.93 MPa)における、充てん前予冷作業完了後、2 基併設 CE に同時充てんするためローリー出口弁を閉とした。CE ドレン弁閉の後、CE 頂部及び底部充てん弁を 2 基共に微開(約一回転弱)しポンプ起動後、バイパス弁閉、ポンプ出口弁を開とした。その時点でのポンプ吐出圧力は 1.4 MPa であり、内槽圧力は 0.17 MPa であった。電流計 40 A を確認後、相手側 CE 圧力調整をするため CE 側へ 5～6 歩進んだ時、充てん口から各 CE へ立ち上がっている配管(銅管)チーズ部分が突然破裂し液が流出した。運転手は、直ちにポンプを停止しローリー側各バルブの確認と CE 頂部、及び底部充てん弁を閉とし、気相締め切り弁を開にした。作業者によれば、納入作業手順に基づき、いつも通り準備を開始したとのことであった。原因は、当該作業における当現場作業はまだ 2 回目であったこともあり、本来作業手順書では頂部及び底部充てん弁を全開にすべきところ、前回充てん時、圧力変動が大きかったので今回全開にせず微開として充てんしたためである。その結果、CE 頂部、底部充てん弁、ドレン弁及び逆止弁間で液

			<p>封状態となり、配管安全弁がついていたものの、ポンプが稼動していたこと、及び液封となった配管の長さが約 15 m と長かったため、圧力に耐えきれず破裂したものと推測される。今後は、充てんには受入保安責任者と充てん作業員(運転者)との相互確認の上、バルブ操作を行い、充てん作業員に指差呼称を徹底させ不安全作業を防止することとした。また、充てん作業手順書を現場に掲示し、作業手順を確認できるようにし、納入業者では、作業手順書に基づく作業遵守の再徹底、再教育を実施することとした。死傷者無し。</p> <p>(手順違反/不良、基本的知識の欠如、教育不良)</p>
82	酸素容器からの残ガス回収中の着火	充填所	<p>酸素 7 m<sup>3</sup> 容器 20 本を充てんするため、充てんラインに並べて残ガス検査及び臭気検査を実施し、異常のないことを確認した。容器に充てん接続用のフレキシブルチューブを取付け、充てん配管内のガス洗浄を行った後、各容器弁を開けて充てんを開始した。充てん圧力 10 MPa にて、石鹼水による漏えい検査及び触手検査を実施し、異常が無いことを確認した。その後、充てん圧力 14.7 MPa にて充てんを完了した。充てん完了後、漏えい検査を行ったところ、1 本の容器において容器弁シート部からの微量な漏れを発見した。その他正常に充てんされた容器は取り外され、新たに空容器 (19 本) 及び当容器を充てんラインに取付け、充てん配管内の洗浄を実施した。その後、当容器のガス回収の為、当容器の容器弁を徐開した直後、フレキシブルチューブ接続金具かしめ部より着火したが、すぐに鎮火した。直ちに当該容器弁及び充てん配管元弁は閉止した。本事故により、フレキシブルチューブ 1 本が損傷し、容器弁のシートパッキンが焼失したが、人的被害は無かった。事故後の調査の結果、当該容器の肩部に、火災による熱影響部が認められた。また、フレキシブルチューブ及び容器弁の分解点検の結果、容器弁のシートパッキンの焼失、フレキシブルチューブの先端 P キャップの焼失、取付け金具の熔融、接続金具かしめ部の熔融破断を確認した。発災容器の内部検査及び容器弁の分解点検の結果、油分及び異物等の痕跡は無く、充てん配管の元弁は開の状態であった。以上の結果から、本事故は、容器弁シートパッキン部からフレキシブルチューブ先端 P キャップ取付け金具部までの間で、流路閉塞による断熱圧縮もしくは他の要因にて何らかの異物が着火し、フレキシブルチューブ接続金具かしめ部の熔融破断等が発生したと推定される。再発防止対策として、充てんラインでの不良容器 (シート漏れ) のガス回収を禁止することとした。また、充てん作業員に対し、酸素ガス取扱いについての保安教育を実施した。死傷者無し。</p> <p>(設計不良、手順違反/不良)</p>
83	建造中の船舶の燃料タンク内における酸素漏えいによる火災	その他 (造船所)	<p>建造中の船舶の燃料タンク内において、作業員 2 名 (内 1 名は研修生) が作業開始前に喫煙 (船内すべて禁煙) したところ、研修生のタバコが異常燃焼した。タバコを足下に捨て、踏み消そうとしたところ、安全靴・脚絆に燃え移り火傷を負った。更に、もう一人の作業員も、研修生を助けるため火を消そうとして、火傷を負った。事故の原因は、ほぼ閉鎖空間である船舶の燃料タンク内において酸素が漏えい・滞留し、酸素濃度が高い状況で、喫煙したためと考えられる。酸素が漏えい・滞留した原因は、バーナーの酸素コックの閉め忘れ、または何かが接触してコックが開いた可能性がある。また、事故発生場所に設置されていた溶断バーナーは、船舶の外に設置してある CE から配管及びガスホースを経由して、エチレン及び酸素ガスが供給されていた。作業基準によれば、作業終了後はガスヘッダーからガスホースを外し、さらに溶断用バーナーをガスホースから外すこととなっており、どちらか一方を実施すれば、自動的にガスが遮断される構造となっている。事故前日、発災場所で溶断用バーナーを使用した。作業終了の際に誤って別のホースを取り外していた。また、バーナーをガスホースから取り外すことも忘れていたため、事故当日は、バーナーまで酸</p>

			<p>素ガス供給圧力がかかっていたものと推定される。事故後の調査より、バーナーとガスホースに問題がなかったため、今後は、船上への持込検査、ガスホースの誤操作防止、ガス供給バルブの作業後の閉止確認等を実施することとした。重傷者2名。</p> <p>(手順違反/不良、教育不良、管理/監督不良)</p>
84	配管内の残ガス処理中の爆発	充填所	<p>酸素ガス製造施設内で、酸素ガスを容器に充てん後、配管内の残ガス処理のため、酸素容器カードルと充てん用フレキシブルチューブを接続してバルブを開けた。この時、バルブと充てん用フレキシブルホチューブが爆発し、2名が負傷した。119番通報により、救急車が出動したが、爆発による火災の延焼拡大はなく、消防活動は実施しなかった。原因は、残ガス処理を行う際、バルブ操作手順を間違え、充てん圧力以上の酸素ガスが流れ込み、断熱圧縮が起こったためと推定される。今後は、バルブの開閉状態を確認するための札の装着、バルブ操作手順の徹底、充てん作業基準の見直しを実施することとする。軽傷者2名。</p> <p>(手順違反/不良、教育不良)</p>
85	酸素小型充てん装置のポンプユニット内からの漏えい火災	充填所	<p>事業所内に設置してある、医療用酸素の小型充てんポンプユニットの防音箱から、焦げた臭いと煙が出ていると通報があった。直ちに、防音箱の扉を開けたところ、黒煙が充満し火も見えたため、粉末消火器で消火したが、ポンプを駆動するVベルト2本が焼失した。原因は、ポンプのドライブシャフトが低温でロックされた状態で、Vベルトの張りが緩めであったことから、モータープーリーが空回りし、Vベルトが摩擦で高温となったこと、及び可燃性である酸素ガスが漏えいして滞留していたためである。発災日の第一ロット充てん中に、ポンプ及び逆止弁上流側のガス漏れが確認されていたが、運転を優先させ停止措置を実施せず、漏えいしたガスは、防音箱内で滞留した。さらに、Vベルトが高温となったことから、着火したものと推定される。死傷者無し。</p> <p>(手順違反/不良、保守/点検不良、教育不良)</p>
86	混合ガス充てん場での配管内パージ作業中の爆発	販売店	<p>混合ガス充てん場で、混合ガス(水素ガス、アルゴンガス)の製造準備作業中、配管内に残っていた残ガス(酸素ガス)を放出するため、配管内を水素でパージした。その後、放出弁を開放したところ、爆発し圧力計が破損、同部から噴出した火炎により作業員1名が火傷した。原因は、午前中、作業者が本来接続できない原料ガスラインに、左ねじ変換アダプターを用いて酸素ガス容器を接続し、充てん作業を行ったため、原料ガスラインに酸素ガスが満たされた状態となった。午後から、原料ガスラインに水素ガスをパージしようとした際、標準パージ圧力の0.5 MPaを大きく超えた2.0 MPaまで原料ガスラインの圧力を上昇させたため、断熱圧縮による発熱で原料ガスライン内のガスの温度が急激に上昇した。ただし、この時点では爆発していないため、爆発限界の上限値は超えていたと考える。また、同ライン内は酸素ガス(大気圧)で満たされた状態であったため、水素ガスと酸素ガスの混合ガス(2.0 MPa)が製造された。その後、放出弁を開放した際に、流体摩擦による発熱が加わり、放出口付近で爆発限界内の混合ガスに着火し、爆発したものと推定される。今後は、作業手順の再確認と遵守、及び混合ガス充てん作業標準改訂を行う。重傷者1名。</p> <p>(手順違反/不良、教育不良、管理/監督不良)</p>
87	CEの破裂板破損による酸素漏えい	鉄工所	<p>事業所内で、CE貯槽の安全装置である破裂板の劣化により、バネ式安全弁の設定圧力(1.16 MPa)以下で作動し酸素が漏えいした。原因は、破裂板の経年劣化により、設定圧力以下で破壊したためと推定される。死傷者無し。</p> <p>(保守/点検不良、経年劣化、管理/監督不良)</p>
88	酸素充てん設備での弁操作中の配管破損	充填所	<p>充てん所内で、9時過ぎの充てん作業直後に、酸素ガス充てん設備の第2架台の減圧調整弁からガスの微小漏えいが発見されたため、充てん作業休止時に減圧調整弁の取り外し作業を実施することとした。13時15分ごろ、</p>

			<p>取り外し作業を開始するために、充てん操作盤の緊急遮断弁を作動させてガスの供給を止めた。その後、配管内のガスを放出しようとしてガス供給弁を急激に開けたところ、ガス供給弁以降の配管が加熱、溶融して配管が破損し、火災が発生した。なお、作業員が火炎により手の甲に火傷を負った。原因は、SUS 配管破損は圧縮酸素の断熱圧縮によるものと推定される。また、減圧調整弁からの漏えいの原因は、バルブ分解整備の結果 O リングの劣化によるものであることが判明した。さらに、ガス供給弁の分解点検を行ったところ異物の混入については不明であったが、バルブの出口部が溶損していたことから、このガス供給弁から断熱圧縮が始まったと考えられる。軽傷者 1 名。</p> <p>(手順違反/不良、保守/点検不良)</p>
89	予混合タンクの爆発	その他 (学校)	<p>定容燃焼装置を用いた燃焼実験を行う準備として、予混合タンクでエチレン、水素、酸素、窒素の混合気体を作成していた最中に、突然何らかの理由により内圧が上昇し、予混合タンク蓋を固定しているボルトが破断し、蓋が作業していた学生の右の腰から脇腹にあたった。この際、実験装置に付随するビニールホースの先端が燃えた。直後に駆けつけた数名により、ガス元栓閉鎖、消火を行い、同時に警察ならびに救急のため消防へ連絡した。当該容器に気体を封入中に何らかの原因により、混合気が着火燃焼したものと推定される。なお、容器そのものには着火源となるものは無いために、静電気による着火が原因と考えられる。重傷者 1 名。</p> <p>(不明)</p>
90	バルブシートからの酸素漏えいによる圧力計破裂	その他 (ガス事業)	<p>工場長が施設内を点検中に、酸素製造設備の稼動していない減圧ラインで、圧力計が負圧になっているのを発見した。圧力計を 0 Pa にするため大気圧に接続したバルブを開いたところ、圧力計が破裂した。工場長はガラス片により喉を切る軽傷を負った。原因は、バルブのシート漏れにより、高圧ガスが真空引きラインに流入したためと推定される。今後は、①真空測定用圧力計ラインにブロー弁を設置し、真空測定ラインが正圧にならないよう運用する。②圧力計を負圧表示のみから正圧及び負圧の両方を表示したものに取り替えることとした。③水平展開し、同様の構造であった窒素製造設備についても真空測定ラインにブロー弁を設置することとした。④作業手順書を作成し、操作場所に備え付けることとした。軽傷者 1 名。</p> <p>(設計不良、手順違反/不良)</p>
91	酸素バーナーの燃焼試験における流量計爆発	機械	<p>燃焼実験のため、圧縮酸素 (7 m<sup>3</sup>×20 本のカードル) を減圧弁により 1 MPa まで減圧し、酸素バーナー (LP ガスおよび空気が別ラインで供給されており、パイロットバーナーが点火済) に供給しようと調整弁 (この調整弁によりさらに減圧して 0.8 MPa 以下で供給) を開けた瞬間に、調整弁から流量計までの 1 MPa ライン (ゴム管のフレキシブルホースおよび、金属製の流量計およびフランジ) が爆発し、作業員 1 名が負傷した。また、爆発により負傷した作業員が履いていた作業靴が燃えた。爆発箇所の一部である流量計は、以前に他のテストで可燃性ガスの流量測定に使用した後、流量計前後のバルブを閉鎖したままであった。原因は、酸素配管を流量計と接続したことにより酸素と可燃性ガスの混合気になったためと推定される。また、事故後、流量計一次側の配管の内部を確認したところ、微量の錆が付着しており、酸素通しのためにバーナー前の酸素調整バルブを操作して酸素と可燃性ガスの混合気が流動した際に、配管中の錆が飛散して配管内壁に衝突し、衝突の際に発生した火花が火種となり、異常燃焼が生じて破裂に至ったと考えられる。今後は、事故原因報告書および再発防止対策書による安全管理を徹底する。重傷者 1 名。</p> <p>(手順違反/不良、教育不良、管理/監督不良)</p>
92	シャフト冷却のための液化酸素使用中の	その他 (整備業)	<p>エレベータ設置工事において、シャフトをプーリーから抜こうとしてシャフトを冷却するために、液化酸素を使用した (液化窒素がなかったため、液化酸素を使用した)。当初、在宅医療用液化酸素容器を 10 psi に圧力降</p>

	破損		<p>下させた状態でフレキシホースを使用して部品に吹きかけたが抜けなかった。そこで、液化酸素を発泡スチロール容器に溜め、シャフト、プーリーを浸して冷却し、金属ハンマーで叩いて、シャフトからプーリーを抜こうとした。その際、金属ハンマーでシャフトを叩いたところ、プーリーを支えるフレーム板が破裂した。その破片により周囲3名がけがを負った。原因は、台座、プーリー、シャフトが組み立てられた金属パーツを液化酸素に浸漬して取り出した後、シャフトを金属ハンマーで叩いた際、火花が発生し、残留していた液化酸素とプーリー内部に組み付けられていたベアリングのグリース等に着火し、破裂に至ったものと推定される。なお、プーリー内に組み付けられていたベアリングは事故発生前に目視で確認することは出来ず、本作業を提案した事業所責任者はベアリングの存在を承知していなかった。軽傷者3名。</p> <p>(基本的知識の欠如、教育不良、手順違反/不良)</p>
93	酸素のフレキシブルホースの破裂	その他(研究所)	<p>ハイブリッドロケット燃焼試験の開始前に、屋外の酸素供給装置から燃焼設備への送気試験をするため、圧縮酸素容器の容器弁類や減圧装置の調整弁を操作したところ、途中のフレキシブル管が発光しながら破裂し、酸素ガスが漏えいした。作業者は退避し、容器内残存ガスは大気に放出された。事故後、施設内の試験は全面停止とした。原因は、作業者が酸素容器の容器弁を急開きしたことにより、下流側の容器集合装置元弁（フレキシブル管のすぐ）との間に断熱圧縮が生じ、集合装置元弁のところで潤滑油やコンタミ（PTFE シールテープ、金属カス等）が内部発火した。作業者はそれに気づかず続けて集合装置元弁、調整弁を順次開けたので、発火物や酸素がフレキシブル管に供給され、管内部から素材が燃焼し、破断した。また、一部に耐圧性能に劣った器具を使用していたこと、集合装置元弁にシリコン製潤滑油が使用されていたこと、その他コンタミネーション管理が不十分だったことなどの設備的不備も事故の要因と考えられる。今後は、施設内の試験を全面停止した。機構内に横断的な調査委員会を設置し、原因究明と改善策を検討する。無届設備の使用を停止し、撤去する(届出不備について顛末書提出)。保安責任者を選任し、配置する。試験前の安全審査を見直すなど、安全管理体制を徹底する。死傷者無し。</p> <p>(手順違反/不良、教育不良、汚染物質、管理/監督不良)</p>
94	酸素サブタンク内の混合ガスの爆発	鉄工所	<p>LP ガスと酸素による溶断を行っている事業所において、酸素供給栓および LP ガス容器の調整器から各サブタンク（酸素 φ500×800、LP ガス 240×500）への配管（ゴム製 2 MPa 対応）を更新した際に、配管を逆のサブタンクに接続した。LP ガスと酸素が混合された状態になったと推測される。十分にガスの置換ができていないまま、配管を直し、使用を開始したため、溶断設備の火が酸素タンク内に入って爆発し、タンクのふたの部分等が飛散したと考えられる。直近で作業していた従業者2名が軽傷を負った。付近の建物に部品等が飛散し、損傷した。消費ガスの分岐と圧力の減圧防止のために設置したサブタンクへ酸素と LP ガスを間違えて配管し、確認を怠った。一度使用状態としたため、サブタンク内でガスが混合した状態となったと推察される。その後、正しく配管して使用する際に、完全に不活性ガス等で置換せず、混合状態のまま使用したために、溶断器からの火によって爆発を起こし、酸素のサブタンクが破損し部品が飛散したと考えられる。・酸素サブタンク・LP サブタンクがそもそも必要なのか。・必要であったとしても酸素サブタンクの大きさは適当なのか、大きすぎではないのか。・サブタンクまでのゴム配管の交換方法・手順が不適切である。・ガスが混合した場合のガス置換等の措置を確実にしていなかった。今後は、当分の間、サブタンクを使用せずに運用する。サブタンクの必要性を検討する。ガス取り出しに逆火防止装置をつける。社員保安教育を実施する（2月29日に実施済み）。複数による確認を実施する。軽傷者2名。</p>

			(手順違反/不良、誤接続、教育不良、管理/監督不良)
95	液化酸素充てん設備からの漏えい、火災	一般化学	<p>3月30日(水)5時41分、ローリーへ液体酸素を充てんするためにローリーの運転員がポンプを起動したところ、直後にポンプの保冷箱より出火しているのが確認された。すぐにポンプを停止し、運転員から連絡を受けた事業所の従業員2名が現場へ急行した。近くの温水を使って消火を行い、5時50分頃に被覆等をはがし、完全に消化していることを確認した。充てんポンプ起動直後に出火していることから、ポンプ保冷箱内はメカニカルシール部から漏れた酸素ガスが充満した状態になっており、ポンプ起動により何らかの原因で回転部より火花、または静電気を着火源として保冷箱内の保冷材(グラスウール、発泡ウレタン)に引火したと思われる。今後は、全社員へ事故発生時の迅速な通報と対応についての周知教育を実施する。設備構造(保冷箱構造・環境等)を見直す。監視体制を強化する。日常点検を見直す。保守管理要領を見直す。他のポンプへ水平展開を行う。死傷者無し。死傷者無し。</p> <p>(設計不良、保守/点検不良、管理/監督不良)</p>
96	圧縮酸素充てん設備のフレキシブルホース焼損	充填所	<p>圧縮酸素充てん作業において、充てん前の残ガス放出工程中にフレキシブルホースから発火し、破損した。原因は、充てんコネクタのシート取り付け部に欠陥(クラック等)が生じ、取り付け部とシートすき間を流れるガスが高速流となって、その摩擦熱が着火エネルギーとなり、ホース部分で発火、破損したものと推定される。今後は、充てん作業前の点検項目の追加、改善を行う。残ガス処理方法の変更やシート材の変更を検討する。死傷者無し。</p> <p>(保守/点検不良、手順違反/不良、設計不良、材料不適合)</p>
97	医療用酸素容器ユニットを充填中の酸素漏えい火災	一般化学	<p>医療用酸素充てん 7m<sup>3</sup> 容器 No.6 ユニット(16 本組)を充てん中、12.7MPa まで充てんしたところで、酸素ガス容器 1 本の容器附属弁の口金損傷防止のために取り付けられている接続金具と充てん金具の間から酸素ガスが漏えいし、瞬間的に発火(瞬時に失火)した。今回の漏えいおよび火災は、接続金具とワンタッチ充てん金具のシール面(不燃性 O リング)の機能低下を起こした部位からの極少量の酸素ガス漏えいを発端とするものであった(平成 21 年にワンタッチ方式充てん金具に変更後、約 6 年間使用)。当該施設では、酸素ガスをシールする充てん金具先端の O リングと接続金具の O リングのシール面がしっかり接触している必要があるが、他の接続金具を調査したところ、O リング溝の面および充てん金具先端の O リング自体にキズがあることが判明した。また、充てん金具の分解整備を怠っていたことから、長年の繰り返し(約 4 回/日×稼働日数)使用により、摺動性が悪化し、接続金具と充てん金具のシール機能が低下していた可能性もある。原因は、【1 次事象:漏えい】極少量の酸素ガスがシール機能低下を起こした O リングのすき間を高速(12.7MPa→大気圧)で漏えいしたことにより、摩擦熱が生じ、高温が発生した。充てん金具(材質:SUS)が溶融(SUS 溶融温度:約 1400℃)したことで締め付け力が弱くなり、接続金具から外れて酸素ガスが一気に漏えいと推定される。【2 次事象:火災】直後に発生した火災は、溶融した高温の SUS もしくは静電気等が着火源となり、充てん金具から漏えいした酸素ガスが高濃度酸素雰囲気を形成したことで着火し、可燃物となり得る接続金具(材質:真鍮等)の金属粉もしくは容器添付文書(可燃物)が瞬時に燃焼したと推定される。今後は、①現在運用中の全ての充てん金具を分解整備する。②始業前点検を強化する。(充てん金具の作動確認および O リング、シール面の目視検査をする。始業前点検で不具合が認められた場合は使用停止する。)③充てん金具の定期分解整備を行う。④充てん金具のガスシール用 O リングを定期交換する。⑤今回の事故原因・対策を織り込んだ作業手順書を改訂する。⑥充てん作業員への作業手順書等の教育を徹底する。他のガスについても上記対策を展開していく。死傷者無し。</p>

			(手順違反/不良、保守/点検不良、教育不良、管理/監督不良)
98	液化酸素容器の破裂	一般化学	<p>9月8日(木)午後、製造事業所が液化酸素容器に充てんし、配送会社が消費先に配送した。ところが、消費先の誤発注であったため、配送会社が事業所に持ち帰り、そこで、容器の外観検査を実施し、外観および安全弁に異常がないことを確認した。9月10日(土)2時30分～40分、配送会社の配送員2名が、当該容器の内槽安全弁が作動し、容器上部に霜がついていることを確認した。9時00分頃から、事業所の保安係員代理者が当該容器から空容器に移充てんしていたところ、9時50分頃に当該容器が爆発した。9時53分に事業所が消防に通報するとともに、現場にかけつけた従業員は、移充てん先の容器から酸素が漏れ出ていたため、バルブを閉止した。保安係員代理者は病院に搬送されたが、死亡が確認された。爆発した容器の外槽は、3つに分かれて破裂し、上部が作業場所から約1.5m、胴がほぼその場所、底部が約10mの距離に飛散していた。内槽は、約10mの距離に飛散し、数箇所の亀裂が生じていた。内槽と外槽の間の断熱材が燃えており、燃えかすが外槽の内側および内槽の外側に付着していた。原因は、調査中である(事業者が詳細な原因調査を行う)。9月10日、消防へ通報した。所内の製造施設の稼働を停止した。9月11日、所内の製造施設を検査した(異常ないことを確認)。酸素のLGC充てんラインは当面使用を禁止した。損傷を受けた容器(計17本)は全数廃棄した(ガスを抜く他、容器も廃棄)。今後、不具合容器があった場合、容器への移充てんは禁止し、既存の充てんラインの放出管を使って廃棄する。死者1名。</p> <p>(保守/点検不良、手順違反/不良、管理/監督不良、)</p>
99	液化酸素製造設備の配管損傷に伴う漏えい、火災	その他 (ガス事業)	<p>5月22日、酸素充てん作業が終了後、配管内の残ガス(14.7MPa)を降圧するために容器を接続し、元バルブを開にした。直後に2次側にある逆止弁および配管が焼損した。配管は直径約1cmが焼損したが、周囲への被害や人的被害もなかった。直ちに元バルブおよび容器バルブを閉鎖し、ブロー弁を全開にして、配管内の圧力を開放した。酸素ガスの漏えいは配管内にあった残ガスのみで、量は不明である。事故後、元バルブを開放して点検したところ、パッキンに損耗が見られた。周囲8箇所のバルブのパッキンも同様に損耗していた。以上のことから、原因は、元バルブを開にしたことによる断熱圧縮または摩擦熱によりパッキンの破片が溶融し、逆止弁が焼損し、銅製配管が破裂したと推定される。死傷者無し。</p> <p>(手順違反/不良、保守/点検不良)</p>
100	酸素充てん設備の充てんホース破裂	充填所	<p>医療用酸素ガス充てん所において、19.6MPaラインの充てんホースに用いられている金属製フレキシブルチューブが充てん終了間際に破裂した。当該フレキシブルチューブは2004年製である(長期13年間使用)。長年使用により、内層チューブPTFEに劣化が起き、割れ・ピンホールが発生した。原因は、割れ部から高圧酸素ガスが噴出したことにより、微小異物の赤熱化が生じて発火源となって発火し、内層チューブ外面のブレードが燃焼したことにより強度が低下したため、フレキシブルチューブが破裂したものと推定される。暫定対策として、当該品を使用中の充てん設備を休止した。恒久対策として、①破裂する予兆を識別、②点検方法・頻度、③交換頻度の目安、④台帳管理を徹底することとした。軽傷者1名。</p> <p>(保守/点検不良、手順違反/不良、管理/監督不良)</p>

## 9. 高圧酸素システムの安全原則

以上に示したように、酸素が関係する多くの火災事故や爆発事故が発生している。火災を防止するためには、よく知られた火災の三角形(燃料、酸化剤および発火源の三辺から成る。)の一边を取り除けば良い。しかしながら、酸素システムにおける火災では酸素が必ず存在し、システムを構成しているほとんどの材料自体が酸素中では燃料となり、さらには圧力エネルギー、ガスの流れによる断熱圧縮、流れによる摩擦熱、異物粒子の衝突、静電気等による火花、および機器類の作動に伴って発生する摩擦熱等が発火源となるために、火災の三角形のいずれの辺も取り去ることが不可能である。

従って、試験によって立証された難燃性材料の使用、高度な清浄性の維持(汚染の防止)、発火源の管理(高温発生の防止)、および経験的に優れた方法を採用することによって火災を防止するより他に方法が無い。安全な酸素システムを構築するために必要な設計、試験、洗浄、評価等の各方法については、文献<sup>7, 17, 57-83)</sup>に詳細に記載されている。文献<sup>17)</sup>は酸素と酸素システムを安全に使用するためにASTMが発行したハンドブックであり、広範な情報をこれ一冊から得ることが可能である。なお、本ハンドブックについては、JAXA角田宇宙センター内での利用に限定されるが、出版元の許諾を得て筆者が和訳した文書を内部サーバー上で開示しているので、興味のある向きは参照されたい。範囲を絞ったより専門的な詳細情報については、文献<sup>7, 57-83)</sup>を参照することによって得られる。

このように、安全な酸素システムの構築と安全な運用に関しては、広範にわたる膨大な量の情報が存在するため、その全てを短期間で習得するのはかなり困難であると思われる。そこで、酸素の安全な取扱いに必要な最低限の情報を簡潔にまとめたものとして、欧州産業ガス協会(EIGA)の安全諮問グループが作成した「高圧酸素システムの安全原則」と題する安全情報<sup>9)</sup>があるので、そのあらましを以下で紹介する。

本資料で紹介する内容は、序、酸化性ガス、発火源、酸素システムにおける火災危険性の管理、停止時および修理時における留意事項から構成される。

### 9.1. 序

酸素システムの設計は、設計原理と材料に関する専門的な経験と知識を有する技術者によってのみ行われるべきである。また、多くの国においては十分に確立された基準と規制があり、必要に応じてそれらに従わなければならない。

以下に示す国際的に認められた組織は、酸素システムを設計する際に参照すべき酸素安全情報を発行している。

- ASTM - 米国試験材料協会
- CEN - 欧州標準化機構
- ISO - 国際標準化機構
- NASA - 米国航空宇宙局
- CGA - 圧縮ガス協会(米国)
- EIGA - 欧州工業ガス協会

酸素システムを計画する度に上記の情報源を詳細に参照するのではなく、通常は使用するコンポーネントおよび材料を選択するための適切な社内基準を利用すべきである。従って、ここでは酸素システムの基本的な推奨事項の要点についてだけ述べる。

確立された社内基準が遵守されていない場合、または存在しない場合には、事故を避けるために追加の調査を実施する必要がある。安全面に適切に配慮することは、会社とシステム設計技術者の責任である。

### 適用範囲

この安全情報、「高圧酸素システムの安全原則」には、混合ガスが容積比で23.5%以上の酸素を含み、かつ30 bar (3 MPa)以上の圧力のガス酸素および酸素と不活性ガスの混合ガスをシステムで使用するためのコンポーネントと材料の選択に関する一般的な推奨事項が含まれている。これは酸素システムにおける火災の主な原因を説明し、社内基準の作成に携わる技術者が参照することが望ましい酸素に関する重要な刊行物にも触れている。

なお、この文書では、コンポーネントと供給配管の火災に伴う毒性汚染のリスクについては考慮していない。

### 9.2. 酸化性ガス

最も一般的な酸化性ガスは酸素である(オゾン、フッ素および亜酸化窒素の酸化特性も参照すること)。酸素自体は不燃性であるが、燃焼を助ける。それは極めて酸化性であり、可燃性物

質と激しく反応し、短時間に大量のエネルギーを発生する火災や爆発を促進する。

### 酸素

発火の危険性と燃焼速度の両方とも、酸化性ガスの濃度が高いほど増加する。通常、より高い圧力は発火温度をより低くし、燃焼速度を増加させる。さらに、高い圧力は断熱圧縮の際により高い温度を発生させる。温度の増加によって、火災を起こすために必要な追加のエネルギー量が少なく済むために、発火の危険性が高くなる。高分子材料の発火温度は金属の発火温度よりも低く、圧力が上昇すると著しく低下する。

十分な圧力と発火エネルギーによって、通常は可燃性に見なされない物質、例えば金属類を含むほとんど全ての物質を純酸素中で燃焼させることが可能である（酸素-アセチレン炎を用いたガス切断と同様）。通常、酸素中で金属が予期せずに発火するためには、不純物あるいは弁のソフトシート、Oリング、他などの非金属材料の発火に伴う燃焼連鎖が必要になる。例えば、油およびグリースなどの有機質物質は非常に容易に発火し、他のより発火が困難な材料の発火源として機能する。

### 酸素を含んだ混合ガス

21-23.5 % (Vol.) の酸素を含んだ混合ガスについては、潤滑剤、シール材料および洗浄の要件は酸化特性を考慮する必要がある。酸素濃度が23.5 %を超える場合には、酸素と同じ規則が適用される場合がある。

### 9.3. 発火源

- 単一または繰返される激しい圧力衝撃（断熱圧縮によって生じる熱）
- 配管あるいはコンポーネント内における過大なガス速度
- 粒子の衝突
- 可動部品と固定部品との間の機械的摩擦（例えば、きつい弁、乱暴な弁操作、かじりや摩擦エネルギー）
- 共鳴（産業用では珍しい）
- 電氣的なアーク放電（静電気や雷を含む）
- 発火とグリースまたは油などによる汚染の組み合わせ（燃焼連鎖）

酸素システムの発火エネルギーは、往々にし

て断熱圧縮に由来する。例えば、ボンベに接続された圧力調整器、閉じられたマニホールドおよびホースには、熱吸収性の良好な特別な末端継手（いわゆる、ディスタンスピース）を装着して弁開時の圧縮熱を吸収する必要がある。また、空のボンベを最高圧力で充填用マニホールドに接続したり、あるいは間違った順序で弁を操作する可能性があるために、充填所でも断熱圧縮が問題になる場合がある。ホースの両端には、マニホールドの圧抜きホースと一緒に使用されるディスタンスピースと同じ原理の圧縮熱を吸収するための接続部が取り付けられており、これは有効に作用する。急速に開く弁を使用しないことで、例えば、常に手動弁または自動弁を緩やかに開くことによって圧力衝撃を防止することができる。

### 9.4. 酸素システムにおける火災危険性の管理

#### 酸素システム設計の安全哲学：

- 適切な材料と安全な部品を使用しない限り、安全なシステムは実現できない。すなわち、これまでに酸素用として問題が無い履歴を持つか、あるいは適切に試験され、認定された試験機関によって承認されている材料とコンポーネントを使用する。
- 酸素用として安全な運用を保証する方法に従って設計、製造および試験されていない限り、そのコンポーネントは安全でない。
- 酸素適合性、システム設計および試験方法の知識が無い限り、設計方法と材料の選択をすることはできない。
- 可燃性あるいは酸素に適合しない物質による汚染が無いことを確実にするために、材料は洗浄して清浄に保つ必要がある。

酸素システムの火災の危険性を低減するためには、発火メカニズムと火災の伝播を管理する必要がある。例えば、反応帯から熱を取り除くことが重要である。非金属材料の質量はできるだけ小さく抑え、熱伝導を良くするために周囲の金属に十分に埋め込む必要がある。システムまたはコンポーネントは酸素用洗浄を行う必要があり、炭化水素等で汚染されていないこと。試験を受けた潤滑剤と認可された潤滑剤だけを使用し、使用量は最小限にとどめる必要がある。システムは、例えば、弁や他のコンポーネントの周囲に遮蔽板を設置するか、あるいは安全な距離から遠隔操作弁を操作することによって、

火災が発生した場合に操作者を保護するように設計する必要がある。

### 材料の選択に関する技術的な指針：

#### 金属材料

通常、アルミニウム青銅を含むアルミニウムとアルミニウム合金は、発火の前歴がある配管あるいは他のコンポーネント、例えば圧力調整器、弁等を使用してはならない。アルミニウム製のシールは十分に埋め込まれている必要がある。しかしながら、アルミニウムはガスボンベ、蒸発器等には適した材料であると考えられている。

#### 配管およびコンポーネント

配管システム用合金の選択は、圧力、速度および配管の形状（衝突流あるいは非衝突流）によって異なる。材料選択の手引きは各国当局およびIGC Doc 13/xxによって提供されている。

発火が起こり易い弁では、高圧の酸素システム、すなわち30 bar以上の圧力においては、銅、銅合金（例えば、真鍮、錫青銅、モネル）、ニッケル等が適した材料である。2.5%以上のアルミニウムを含有するアルミニウム青銅は、専門家による特別な検討をせずに使用してはならない。弁材料の選択に関する具体的な手引きについては、IGC Doc 13/xxに記載されている。

清浄性は必須条件である。粒子衝突、圧力衝撃、あるいは過大な流速が想定される場所には、銅合金あるいは同様の材料で作成したパーツを挿入する必要がある。

特に、断熱圧縮が発生する場合や非金属または容易に発火する材料が存在する場合には、ステンレス鋼製の薄肉部を持った内部部品の使用を避ける。

#### 非金属材料

発火温度が高く、燃焼熱が低い材料が望ましい。良好な設計によって火災発生確率を効果的に低減することができる。

シール材料を選択する場合には、1番目の選択肢として、酸素雰囲気において可燃性で無い金属または無機材料を使用する。有機質材料は、使用する前に実際の運用条件において試験し、認可を受けなければならない。

### 酸素システムを設計して構築する際の優れた方法：

高圧酸素システムを計画または使用する場合には、酸素と不適合材料あるいは汚染物質との間には、常に火災発生のおおきな危険性があることを認識する必要がある。火災は往々にして大きな被害を引き起こすため、次の5つの設計ルールを満たす安全な運用手順を定める必要がある。

1. 酸素に適合した材料と認可された製品だけを使用する。材料と寸法の選択にあたっては、圧力、流速、および配管形状を与える必要がある。
2. コンポーネントは、それが試験されて認可された条件（圧力、流れの方向）でのみ使用すること。
3. 酸素用に使用される配管とコンポーネントは、適切な溶剤を使用して洗浄と脱脂を行う必要がある。油分が入っていないサンドブラストは、炭素鋼配管の内部洗浄に使用することができる。酸素を導入する前に、溶剤の危険な痕跡を全て除去する必要がある。酸素システムの組み立て前に洗浄を行い、組立作業中に不純物が侵入するのを防ぐのが良い方法である。酸素機器は使用する前に清浄度を検査する必要がある。
4. 鋼材の黒皮、錆、埃、PTFEテープの切れ端、切粉および溶接時の小溶滴などの異物は、システムを立ち上げる前に注意深く取り除く必要がある。粒子は可能な限りフィルターで捕捉し、システムのある部分から他の部分に移動することを避けなければならない。このようなフィルターは、ページ後およびシステムに酸素を導入する前に洗浄しなければならない。フィルターの材料は、露出面が非常に大きいので、細心の注意を払って選択する必要がある。焼結青銅は、やや高めの圧力で運用されるシステム、例えば、ボンベの充填あるいはマニホールドの脱圧、に対しては恐らく良い選択であろう。通常の厚さでは酸素中で燃焼しない幾つかの材料も、フィルター網のような非常に薄い厚さの場合には可燃性になるので、材料の厚さに関しては注意を払う必要がある。
5. 非液化（永久）ガスは静電気の帯電を起こさないが、充填用マニホールド、ガスボンベの弁に接続するホースや継手は、内部の静電気帯電やスパークを防止するために設備の接地線（アース）に接続する必要がある。

ある。この理由は、特に同じ装置をボンベの脱圧に使用する場合には、異物粒子を避けることが非常に困難であるためである。ガス流れ中の異物粒子は、例えば、鋼線製網組を持ったフレキシブルホースの樹脂製内管の静電気帯電の危険性を増加させる。

### 9.5. 停止時および修理時における留意事項

酸素システムの修理中は、酸素富化の危険性と火災による傷害を考慮する必要がある。閉鎖空間における全ての作業については、パージ後に高過ぎる酸素濃度あるいは酸素欠乏が無いことを確実にするために、しっかりと計画を立てて監督する必要がある。酸素配管システムで溶接あるいは切断を行う前に、酸素の供給を遮断し、出来れば、その配管部分をフランジで閉鎖して圧力を開放する必要がある。単一の遮断弁を信頼することはできない。遮断弁を二重にして遮断弁間の圧力を抜くための弁を設ける方法（double block and bleed valves）を検討する必要がある。配管部分は、酸素濃度が21%に低下するまで不活性ガスあるいは空気のパージしなければならない。極度に錆びた配管システムでは、不活性ガスでパージした後においても切断作業中に燃え出すことがあるので注意が必要である。無給油工具などを使用して酸素システムの清浄性を保つ必要がある。

メンテナンス作業中およびパージ作業中の酸素富化あるいは酸素欠乏の危険性については、次の文書に記載がある。

- EIGA IGC Doc 004/xx 酸素および酸素富化雰囲気火災の危険性
- EIGA IGC Doc 044/xx 不活性ガスおよび酸素欠乏の危険性
- EIGA IGC Doc 040/xx 労働許可証システム
- EIGA IGC Doc 033/xx 酸素用機器の洗浄

## 10. おわりに

米国における初期の航空宇宙分野と一般産業分野、およびその後の酸素関連の事故事例を中心に紹介し、併せて欧州と我が国における酸素事故の事例も紹介した。紹介した約540件の事故事例の中には、詳細が不明なために事故の原因が明らかでないものも見られた。これらの事故事例を通して判明したことは、同様な原因による酸素事故が繰り返し発生していることである。

例えば、アポロ1号の火災に代表される酸素富化雰囲気火災の閉鎖空間における火災事故は、航空関係の高圧環境を模擬するための低圧チャンバー、潜水関係の減圧チャンバー、および医療関係の高圧酸素治療室等で多数発生している。事故例で紹介したように、米軍の低圧チャンバーにおいては、5年の間に同じ装置で同様な事故が繰り返されている。このケースでは、後の事故時の運用担当者が以前の事故の存在を全く知らなかったと証言している。また、酸素で飽和した衣服が喫煙や溶接の火花などによって容易に発火し、焼死するケースは何度も繰り返されている。これらの事例は、事故の教訓を共有し、あるいは伝承することの難しさを示している。これまでに蓄積されてきた多くの貴重な教訓を役立てるための効果的な方法が求められる。

紹介した酸素事故の原因には、設計不良、材料不適合、洗浄不良、検査等の各種手順の違反/不良、管理/監督不良等が含まれるが、手順違反/不良（自己判断や無視）や基本的知識の欠如（教育不良）に起因するものも多数見られた。また、事故原因も単一の原因よりも複数の原因によるものが多い。基本的知識の欠如は、個人事業者や小規模事業所の従業員、医療関係の患者など、酸素の危険性に関する教育を十分に受けていないと思われる消費先の人達に多いように見受けられる。これらの人々は、酸素の危険性について十分な教育を受けていないために、慣れ等によって不用意に危険な行為を行ってしまう場合もあるものと思われる。

酸素システムに絶対的な安全を求めることは不可能であり、隙を見せると不意を突いた事故や災害に見舞われることになる。すなわち、これまで安全に運用してきた酸素システムでも、長年の運用による異物や汚染物の蓄積、メンテナンス時の汚染、急激な弁操作等の手順違反/不良などが重なると、何時でも火災や爆発が発生する可能性がある。従って、酸素システムには常に火災や爆発の危険が付きまといっていることを強く意識しておく必要がある。今自分が行おうとしている操作や作業が危険に結びつく可能性があるかどうかを常に考えながら機器類の操作等にあたる習慣を身に付けて欲しいと願う。

最後に、本資料で紹介した事故事例や文献以外にも、多くの教訓となる事例や有益な参考文献が存在するものと思われる。さらには、日々新たな知見や事故事例も蓄積されて行くので、

当事者自身が常に酸素を安全に取り扱うために必要な情報を得る努力をして欲しいと願う。本資料が酸素関連の事故防止に少しでも役に立てば幸いである。

### 参考文献

- 1) Floyd L. Thompson (Chairman), "Report of the Apollo 204 Review Board," NASA TM-84105, April 5, 1967.
- 2) "Apollo 204 Accident," Report of the Committee on Aeronautical and Space Sciences United States Senate with Additional Views, January 30, 1968.
- 3) Edgar M. Cortright (Chairman), "Report of Apollo 13 Review Board," NASA TM X-65270, June 15, 1970.
- 4) Sheffield, P.J. and Desautels, D.A., "Hyperbaric and Hypobaric Chamber Fires: a 73-year Analysis," Undersea and Hyperbaric Medicine Journal, 24(3), pp.153-164, September 1997.
- 5) Paul M. Ordin, "Mishaps with Oxygen in NASA Operations," NASA TM X-67953, 1971.
- 6) Lapin, A., "Liquid and Gaseous Oxygen Safety Review, Final Report," NASA CR-120922 Vol.1 to Vol.4, June 1972.
- 7) "Recommended Practice on Materials, Equipment, and Systems Used in Oxygen-Enriched Atmospheres," NFPA 53, National Fire Protection Association, 2016.
- 8) "Fire Hazards of Oxygen and Oxygen Enriched Atmospheres," EIGA IGC Doc 04/09/E, 2009.
- 9) "Safety Principles of High Pressure Oxygen Systems," EIGA Safety Info 15/08/E, 2008.
- 10) プリーストリー 著, 原光雄 訳, "酸素の発見", 大日本出版, 昭和 21 年.
- 11) 立花正一, 藤田真敬, "総説 航空の歴史と航空医学の発展," 宇宙航空環境医学, Vol. 49, No. 1, pp. 1-15, 2012.
- 12) 新井和孝, "日本の酸素工業の発祥と発展を示す資料," 日本化学会誌「化学と工業」, Vol.70, No.7, pp.587-589, July 2017.
- 13) Carlisle, R., "Scientific American, Inventions and Discoveries," Jhon Wiley & Sons, Inc., p.322, 2004.
- 14) Carey, C.T., "Brief History of US Military Aviation Oxygen Breathing Systems," [http://webs.lanset.com/aeolusaero/Articles/A Brief History of US Military Aviation Oxygen Breathing Systems.pdf](http://webs.lanset.com/aeolusaero/Articles/A%20Brief%20History%20of%20US%20Military%20Aviation%20Oxygen%20Breathing%20Systems.pdf)
- 15) Guter, M., "Ignition in High Pressure Oxygen," Report of Work Carried Out by The British Oxygen Co. Ltd. Under Ministry of Supply Contract, S&T Memo. 13/50, 1950.
- 16) Nihart, G.J. and Smith, C.P., "Compatibility of Materials with 7,500 psi Oxygen," AMRL-TDR-64-76, October 1964.
- 17) "Safe Use of Oxygen and Oxygen Systems: Handbook for Design, Operation, and Maintenance: 2nd Edition," ASTM MNL36-2nd, 2007.
- 18) "ASRDI Oxygen Technology Survey, Volume 1: Thermophysical Properties," NASA SP-3071, 1972.
- 19) Marconi, E.M., "Robert Goddard: Man and His Rocket," <https://www.nasa.gov/missions/research/fgoddard.html>.
- 20) Wade, M., "Winkler, Johannes," <http://www.astronautix.com/w/winkler.html>.
- 21) Wade, M., "Riedel, Klaus, Erhardt," <http://www.astronautix.com/r/riedelklaus.html>.
- 22) 野木恵一, "報復兵器 V2 - 世界初の弾道ミサイル開発物語", 光人社 NF 文庫, 1999 年 12 月.
- 23) Walter Dornberger, "V-2; The Inside Story of Hitler's Secret Weapon," Ballantine Books, May 23, 1954.
- 24) 青砥吉隆, "信念とヴィジョンの証 - ケネディ大統領による二つの「月」演説の分析", 国際基督教大学比較文化研究会誌「ICU 比較文化」No.46, pp.47-63, 2014.
- 25) "Manned Space Programs Accident/Incident Summaries (1963-1969)," NASA CR-120998, March 1970.
- 26) "Manned Space Programs Accident/Incident Summaries (1970-1971)," NASA CR-120999, April 1972.
- 27) Belles F.E., "High Pressure Oxygen Utilization by NASA," NASA TM X-68203, 1973.
- 28) Arrighi, R.S., "Bringing the Future Within Reach - Celebrating 75 Years NASA John H. Glenn Research Center (1941-2016)," NASA-SP-2016-627, pp.180-182, 2016.
- 29) "ASRDI Oxygen Technology Survey, Volume 2: Cleaning Requirements, Procedures, and Verification Techniques," NASA SP-3072, 1972.
- 30) "ASRDI Oxygen Technology Survey, Volume 3: Heat Transfer and Fluid Dynamics - Abstracts of Selected Technical Reports and Publications," NASA SP-3076, 1972.
- 31) "ASRDI Oxygen Technology Survey, Volume 4: Low Temperature Measurement," NASA SP-3073, 1974.
- 32) "ASRDI Oxygen Technology Survey, Volume 5: Density and Liquid Level Measurement Instrumentation for the Cryogenic Fluids - Oxygen, Hydrogen, and Nitrogen," NASA

- SP-3083, 1974.
- 33) "ASRDI Oxygen Technology Survey, Volume 6: Flow Measurement Instrumentation," NASA SP-3084, 1974.
  - 34) "ASRDI Oxygen Technology Survey, Volume 7: Characteristics of Metals That Influence System Safety," NASA SP-3077, 1974.
  - 35) "ASRDI Oxygen Technology Survey, Volume 8: Pressure Measurement," NASA SP-3092, 1975.
  - 36) "ASRDI Oxygen Technology Survey, Volume 9 : Oxygen Systems Engineering Review," NASA SP-3090, 1975.
  - 37) Cataldo, C.E., "LOX/GOX Related Failures During Space Shuttle Main Engine Development," NASA TM-82424, May 1981.
  - 38) Biggs, R.E., "Space Shuttle Main Engine, The First Ten Years," American Astronautical Society History Series, Vol. 13, pp. 69-122, 1992.
  - 39) Metts, J. and Hill, T., "Lessons Learned from The EMU Fire and How It Impacts CxP Suit Element Development and Testing," NASA JSC-CN-18755, Sept 15, 2008.
  - 40) Stoltzfus, J., "Fire in P-3 Aircraft Oxygen Systems," Journal of Testing and Evaluation, Journal of ASTM International, Vol.3, No. 6, 2006, pp.1-13.
  - 41) "Flammability, Offgassing, and Compatibility Requirements and Test Procedures," NASA Technical Standard NASA-STD-6001B, August 26, 2011.
  - 42) "Safety Standard for Oxygen and Oxygen Systems, Guidelines for Oxygen System Design, Materials Selection, Operations, Storage, and Transportation," NASA NSS1740-15, January 30, 1996.
  - 43) Werley, B.L. (Editor), "Symposium on Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres," ASTM STP812, 1983.
  - 44) Benning, M.A. (Editor), "Symposium on Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Second Volume," ASTM STP910, 1986.
  - 45) Schroll DW (Editor), "Symposium on Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Third Volume," ASTM STP910, 1988.
  - 46) Stoltzfus, J.M., Benz F.J. and Stradling J.S., (Editors), "Symposium on Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Fourth Volume," ASTM STP1040, 1989.
  - 47) Stoltzfus, J.M., McIlroy K. (Editors), "Symposium on Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Fifth Volume," ASTM STP1111, 1991.
  - 48) Stoltzfus, J.M. and Janoff, D.D. (Editors), "Symposium on Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Sixth Volume," ASTM STP1197, 1993.
  - 49) Janoff, D.D., Royals, W.T. and Gunaji, M.V (Editors), "Symposium on Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Seventh Volume," ASTM STP1267, 1995.
  - 50) Chou, T.C., Royals, W.T. and Steinberg, T.A (Editors), "Symposium on Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Eighth Volume," ASTM STP1319, 1997.
  - 51) Steinberg, T.A., Newton, B.E. and Beeson, H.D. (Editors), "Symposium on Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Ninth Volume," ASTM STP1395, 2000.
  - 52) Steinberg, T.A., Newton, B.E. and Beeson, H.D. (Editors), "Symposium on Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Tenth Volume," ASTM STP1454, 2003.
  - 53) Hirsch, D.B., Zawierucha, R., Steinberg, T.A. and Barthelemy, H. (Editors), "Symposium on Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Eleventh Volume," ASTM STP1479, 2006.
  - 54) Barthelemy, H., Steinberg, T.A., Binder, C. and Smith, R. (JAI Guest Editors), "Symposium on Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: 12th Volume," ASTM STP1522, 2010.
  - 55) Davis, S.E. and Steinberg, T.A., (Editors), "Symposium on Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: 13th Volume," ASTM STP1561, 2012.
  - 56) Davis, S.E. and Steinberg, T.A., (Editors), "Symposium on Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: 14th Volume," ASTM STP1596, 2016.
  - 57) "Standard Guide for Evaluating Nonmetallic Materials for Oxygen Service," ASTM G63-15, 2015.
  - 58) "Standard Test Method for Autogenous Ignition Temperature of Liquids and Solids in a High-Pressure Oxygen-Enriched Environment," ASTM G72/G72M-15, 2015.
  - 59) "Standard Test Method for Ignition Sensitivity of Nonmetallic Materials and Components by

- Gaseous Fluid Impact,” ASTM G74-13, 2013.
- 60) “Standard Test Method for Determining Ignition Sensitivity of Materials to Mechanical Impact in Ambient Liquid Oxygen and Pressurized Liquid and Gaseous Oxygen Environments,” ASTM G86-17, 2017.
  - 61) “Standard Guide for Designing Systems for Oxygen Service,” ASTM G88-13, 2013.
  - 62) “Standard Practice for Cleaning Methods and Cleanliness Levels for Material and Equipment Used in Oxygen-Enriched Environments,” ASTM G93-03(2011), 2011.
  - 63) “Standard Guide for Evaluating Metals for Oxygen Service,” ASTM G94-05(2014), 2014.
  - 64) “Standard Practices for Evaluating the Age Resistance of Polymeric Materials Used in Oxygen Service,” ASTM G114-14, 2014.
  - 65) “Standard Practice for Determination of Soluble Residual Contamination by Soxhlet Extraction,” ASTM G120-15, 2015.
  - 66) “Standard Practice for Preparation of Contaminated Test Coupons for the Evaluation of Cleaning Agents,” ASTM G121-98(2015) e1, 2004.
  - 67) “Standard Test Method for Evaluating the Effectiveness of Cleaning Agents,” ASTM G122-96(2015) e1, 2008.
  - 68) “Standard Test Method for Determining the Combustion Behavior of Metallic Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres,” ASTM G124-10, 2010.
  - 69) “Standard Test Method for Measuring Liquid and Solid Material Fire Limits in Gaseous Oxidants,” ASTM G125-00(2015), 2015.
  - 70) “Standard Terminology Relating to the Compatibility and Sensitivity of Materials in Oxygen Enriched Atmospheres,” ASTM G126-16, 2016.
  - 71) “Standard Guide for the Selection of Cleaning Agents for Oxygen-Enriched Systems,” ASTM G127-15, 2015.
  - 72) “Standard Guide for Control of Hazards and Risks in Oxygen Enriched Systems,” ASTM G128/G128M-2015, 2015.
  - 73) “Standard Practice for Cleaning of Materials and Components by Ultrasonic Techniques,” ASTM G131-96 (2016) e1, 2016.
  - 74) “Standard Practice for Determination of Soluble Residual Contaminants in Materials by Ultrasonic Extraction,” ASTM G136-03 (2016) e1, 2016.
  - 75) “Standard Test Method for Determination of Residual Contamination of Materials and Components by Total Carbon Analysis Using a High Temperature Combustion Analyzer,” ASTM G144-01(2014), 2014.
  - 76) “Standard Guide for Studying Fire Incidents in Oxygen Systems,” ASTM G145-08 (2016), 2016.
  - 77) “Standard Test Method for Evaluating the Ignition Sensitivity and Fault Tolerance of Oxygen Pressure Regulators Used for Medical and Emergency Applications,” ASTM G175-13, 2013.
  - 78) “Standard Test Method for Compatibility of Materials with Liquid Oxygen (Impact Sensitivity Threshold and Pass-Fail Techniques),” ASTM D2512-17, 2017.
  - 79) “Standard Test Method for Measuring the Minimum Oxygen Concentration to Support Candle-Like Combustion of Plastics (Oxygen Index),” ASTM D2863-17a, 2017.
  - 80) “Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter (Precision Method),” ASTM D4809-13, 2013.
  - 81) Standard for Bulk Oxygen Systems at Consumer Site, NFPA 50, National Fire Protection Association, 2001.
  - 82) “Compressed Gases and Cryogenic Code,” NFPA 55, National Fire Protection Association, 2016.
  - 83) “Standard for Health Care Facilities,” NFPA 99, National Fire Protection Association, 2015.
  - 84) “September 01, 2016, Anomaly Updates,” <http://www.spacex.com/news/2016/09/01/anomaly-updates>, January 2, 2017, 9:00 EST.
  - 85) “Pressure Equipment Directive 2014/68/EU (PED),” European Commission, 2014.
  - 86) “Transportable Pressure Equipment Directive 2010/35/EC (TPED),” European Commission, 2010.
  - 87) “Simple Pressure Vessels Directive 2014/29/EU (SPVD),” European Commission, 2014.
  - 88) “Unfired Pressure Vessels – Part 1: General,” EN 13445-1, European Committee for Standardization, 2014.
  - 89) “Unfired Pressure Vessels – Part 2: Materials,” EN 13445-2, European Committee for Standardization, 2014.
  - 90) “Unfired Pressure Vessels – Part 3: Design,” EN 13445-3, European Committee for Standardization, 2014.
  - 91) “Unfired Pressure Vessels – Part 4: Fabrication,” EN 13445-4, European Committee for Standardization, 2014.
  - 92) “Unfired Pressure Vessels – Part 5: Inspection and testing,” EN 13445-5, European Committee for Standardization, 2014.
  - 93) “Unfired Pressure Vessels – Part 6:

- Requirements for the design and fabrication of pressure vessels and pressure parts constructed from spheroidal graphite cast iron,” EN 13445-6, European Committee for Standardization, 2014.
- 94) “Unfired Pressure Vessels – Part 7: Guidance on the use of the conformity procedures,” CR 13445-7, European Committee for Standardization, 2002.
- 95) “Unfired Pressure Vessels – Part 8: Additional requirements for pressure vessels of aluminum and aluminum alloys,” EN 13445-8, European Committee for Standardization, 2014.
- 96) “Unfired Pressure Vessels – Part 9: Conformance of the EN 13445 series to ISO 16528,” CEN/TR 13445-9, European Committee for Standardization, 2011.
- 97) “Unfired Pressure Vessels – Part 10: Additional requirements for pressure vessels of nickel and nickel alloys,” EN 13445-10, European Committee for Standardization, 2015.
- 98) “Metallic industrial piping – Part 1: General,” EN 13480-1, European Committee for Standardization, 2017.
- 99) “Metallic industrial piping – Part 2: Materials,” EN 13480-2, European Committee for Standardization, 2017.
- 100) “Metallic industrial piping – Part 3: Design and calculation,” EN 13480-3, European Committee for Standardization, 2017.
- 101) “Metallic industrial piping – Part 4: Fabrication and installation,” EN 13480-4, European Committee for Standardization, 2017.
- 102) “Metallic industrial piping – Part 5: Inspection and testing,” EN 13480-5, European Committee for Standardization, 2017.
- 103) “Metallic industrial piping – Part 6: Additional requirements for buried piping,” EN 13480-6, European Committee for Standardization, 2017.
- 104) “Metallic industrial piping – Part 7: Guidance on the use of conformity assessment procedure,” CEN/TR 13480-7, European Committee for Standardization, 2017.
- 105) “Metallic industrial piping – Part 8: Additional requirements for aluminum and aluminum alloy piping,” EN 13480-8, European Committee for Standardization, 2017.
- 106) “Metallic industrial piping – Part 9: Additional requirements for piping of nickel and nickel alloys,” prEN 13480-9, European Committee for Standardization, as of 2018, under approval.
- 107) “Oxygen Pipeline and Piping System,” EIGA Doc 13/12/E, 2012.
- 108) “Design, Manufacture, Installation, Operation, and Maintenance of Valves Used in Liquid Oxygen and Cold Gaseous Oxygen Systems,” EIGA IGC Doc 200/17, 2017.
- 109) “Safe Location of Oxygen and Inert Gas Vents,” EIGA IGC Doc 154/16, 2016.
- 110) 昭和二十六年法律第二百四号 高压ガス保安法, 平成二十七年九月十一日公布 (平成二十七年法律第六十六号)
- 111) 日本産業ガス協会, “酸素パイプラインシステム (国際整合化指針),” JIGA-T-S/18/05, 平成 17 年 12 月.
- 112) 日本産業ガス協会, “往復動酸素圧縮機安全指針 (国際整合化指針),” JIGA-T-S/20/06, 平成 18 年 12 月.
- 113) 日本産業ガス協会, “酸素ガス充てん所作業基準,” JIGA-T-S/40/07, 平成 19 年 6 月.
- 114) 日本産業・医療ガス協会, “遠心式液化酸素ポンプ据付指針 (国際整合化指針),” JIMGA-T-S/30/07, 平成 19 年 12 月.
- 115) 日本産業・医療ガス協会, “加圧酸素製造用ろう付アルミニウム製熱交換器の安全な使用 (国際整合化指針),” JIMGA-T-S/31/08, 平成 20 年 5 月.
- 116) 日本産業・医療ガス協会, “充てん中の超低温容器の過剰圧力の防止 (国際整合化指針),” JIMGA-T-S/69/12, 平成 23 年 6 月.
- 117) 日本産業・医療ガス協会, “酸素と不活性ガスの安全な放出 (国際整合化指針),” JIMGA-T-S/80/12, 平成 24 年 5 月.
- 118) 日本産業・医療ガス協会, “往復動超低温ポンプ据付指針 (国際整合化指針),” JIMGA-T-S/84/12, 平成 24 年 12 月.
- 119) 日本産業・医療ガス協会, “遠心式酸素圧縮機安全指針 (国際整合化指針),” JIMGA-T-S/87/13, 平成 25 年 6 月.
- 120) 日本産業・医療ガス協会, “酸素・酸素富化雰囲気における火災の危険性 (国際整合化指針),” JIMGA-T-S/90/14, 平成 26 年 5 月.
- 121) 日本産業・医療ガス協会, “酸素ガス充てん所作業基準 (追補),” JIMGA-T-S/104/16, 平成 28 年 12 月.
- 122) 日本産業・医療ガス協会, “空気液化分離装置の安全運転指針,” JIMGA-T-S/107/17, 平成 29 年 12 月.
- 123) 宇宙航空研究開発機構, “液化酸素取扱基準,” JERG-0-011, 2016 年 4 月.
- 124) 高压ガス保安協会事故例データベース, [https://www.khk.or.jp/public\\_information/information/incident\\_investigation/hpg\\_incident/incident](https://www.khk.or.jp/public_information/information/incident_investigation/hpg_incident/incident)

\_db.html

- 125) “日本エア・リキード社の沿革,”  
<https://industry.airliquide.jp/history>.
- 126) “日本酸素記念館,” <https://www.chem-station.com/chemglobe/2017/03/kosokinenkan.html>
- 127) 沢井 実, “1910・20年の日本酸素工業,” 大阪大学経済学, Vol.64 No.1, June 2014.
- 128) 大岡久晃, “ガス業界の歴史 24 高圧ガス事故,” <https://blogs.yahoo.co.jp/yozaisho/32984117.html>, 2010 年 8 月 22 日.
- 129) 大岡久晃, “ガス業界の歴史 25 圧縮ガス及び液化ガス取締法施行,” <https://blogs.yahoo.co.jp/yozaisho/33030303.html>, 2010 年 8 月 28 日.
- 130) 駒宮功額, “酸素の危険性と災害防止対策,” 労働省産業安全研究所 所報 SH-1961-2-3, pp.15- 23, 1961.
- 131) 駒宮功額, “過剰酸素中の火災・爆発,” 安全工学, Vol.37, No.2, pp.122-127, 1998.
- 132) 駒宮功額, “過剰酸素中の燃焼危険性と安全対策,” 労働省産業安全研究所 安全資料 RIIS-SD-72-1, 1973.
- 133) “液化酸素製造工程における火災災害の防止のための対策について,” 労働省労働基準局, 基発第 41 号, 基発台 41 号の 2, 平成 5 年 1 月 21 日.
- 134) 駒宮功額, 田中隆二, “高気圧治療設備実態調査報告書,” 労働省産業安全研究所 安全資料 RIIS-TN-70-1, 1970.
- 135) 厚生労働省医薬食品局, “在宅酸素療法実施中の火災による死亡事故について,” 医薬品・医療機器等安全性情報 No.287, pp.10-12, 2012 年 1 月.
- 136) 武島玲子, “病院内の医療ガス事故,” 茨木県立医療大学紀要, 第 5 巻, pp.13-19, 2000 年 3 月.
- 137) 日本チタン協会技術委員会, “ダイビング用酸素減圧弁の発火\_チタンが純酸素雰囲気,” 2006 年 8 月 1 日.
- 138) 駒宮功額, “チタンの発火事故と原因,” 安全工学, Vol.20, No.3, pp.160-163, 1981.
- 139) Hink, J. and Jansen, E., “Titanium in a Hyperbaric Oxygen Environment May Pose a Fire Risk,” Aviation, Space, and Environmental Medicine, Vol. 74, No. 12, pp. 1301-1302, 2003.

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-18-002  
JAXA Research and Development Memorandum

酸素の使用に伴う事故の事例について  
Case Examples of Accidents/Incidents Associated with Use of Oxygen

---

発	行	国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1 URL: <a href="http://www.jaxa.jp/">http://www.jaxa.jp/</a>				
発	行	日	平成30年10月11日			
電	子	出	版	制	作	松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等加工することを禁じます。  
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

---

