真空技術における潜在的な危険と安全対策

後 藤 康 仁^{*1}

Potential Dangers and Safety Measures of Vacuum Technologies

Yasuhito GOTOH^{*1}^{*1}Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University,
Kyotodaigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto 615-8510, Japan

(Received March 11, 2016, Accepted May 8, 2016)

In this article, potential dangers of vacuum technologies are revealed, and safety measures for these dangers have been suggested. These dangers include considerable difference between the vessels' inner and outer pressures, condensation of flammable gases to the pump, electric shock due to a high voltage or electric leakage, involution to mechanical motion, touching of a high temperature during baking. Furthermore, many dangers exist when the system is under repair or maintenance. In addition to the vacuum system itself, the materials used for its operation such as liquid cryogen and organic solvents are more hazardous. Finally, some of the safety measures are proposed for the aforementioned dangers.

1. はじめに

自動車を運転するためには運転免許証を取得する必要があるが、真空装置を操作するためには特に免許を得る必要はない。これはとりもなおさず真空装置の操作には危険を伴わないという考え方に基づくものと考えられる。また、労働安全衛生法¹⁾、労働安全衛生法施行令²⁾や関連する労働安全衛生規則³⁾をはじめとする諸規則を見ても真空装置の操作に関わる事項は特に定められていないように見受けられる。実際、真空装置を一見して危ない装置だと感じる人はおそらくほとんどいないだろう。しかしながら、真空装置においては通常の動作時でも危険は存在するし、操作を誤ればさらに危険な状態になるであろう。また、真空装置の操作においては、気体を導入する、寒剤（主に液体窒素）を使用する、部品や真空槽の洗浄を行うといった作業を伴う。これらの取り扱いは高圧ガス保安法⁴⁾、有機溶剤中毒予防規則⁵⁾などでその取り扱いが規定されていることを考えると、ある種の危険を伴うものと考えることができる。さらには、労働安全衛生規則等には規定はないが、ポンプや真空計、一部の構成要素で高電圧を使用している場合があり、感電等の危険もある。最近では市販の真空装置は自動化や安全対策の向上が図られており、危険に直面することは少なくなっているものと考えられる。しかしながら逆にそのことが真空装置操作上の危険を隠し、作業者が装置に内在する危険に気づきにくい状況を作り出しているということもできる。以上のことから、本稿では危険という言葉の前に「潜在的な」という言葉を用いた。本稿の題目が「真空装置」ではなく「真空技術」となっているのも危険の多くは装置そのものもさることながら、真空装置に付随するさまざまな要素によるためである。筆者も30年にわたる真空技術従事の間に何度かヒヤリ・ハットを経験した。本稿ではそれらの経験を元に、また、衛生管理者として3年程度職場の安全衛生巡視を行った経験も交えて真空技術

に潜む危険とその安全対策について考えたい。

2. 真空技術における潜在的な危険

ここでは典型的な真空装置を取り上げ、その装置に潜む危険について考えることにする。図1に真空装置とそれに付随して用いられる機器・材料等の例を示す。真空装置一般で使用されるものを例示的に示しているのも、実際に図1の装置で使用しているものではないことをご理解頂きたい。多くの真空装置では大気開放の際、乾燥窒素を真空槽に導入する。その際、乾燥窒素は高圧ボンベから供給される。また、真空槽内での試料の冷却では液体窒素などの寒剤が用いられる。油拡散ポンプにより真空排気を行っている装置では、作動油の真空槽への逆流を防止するために液体窒素トラップなどを使用する。高真空装置では、圧力計測にはガラス管封入形の電離真空計がよく用いられる。超高真空装置や高真空装置では、真空槽内面に吸着した水分子を脱離させる目的で加

図1 真空蒸着装置とそれに付随する装置の例。

^{*1} 京都大学大学院工学研究科（〒615-8510 京都府京都市西京区 京都大学桂）

熱脱ガス処理が行われるが、その際、フレキシブルヒータと呼ばれる带状のヒータがしばしば使用される。このほか、装置によっては高圧電源や特殊材料ガスを利用する場合もある。図1には明示していないが、真空槽内面や部品の洗浄のために有機溶剤も使用される。本稿では、まず、このような真空装置及び周辺の機器・材料等に内在する危険について述べ、その後それらに対する対策について考えたい。個々の危険とその対策について述べる形式にしなかったのは、指摘した危険を基に、まずは読者がいったん自分でその安全対策を考えてみてほしいためである。後述するとおり、真空技術における安全対策の多くは一般の労働安全衛生におけるものと基本的には変わらない。本稿では、真空技術に特有な危険箇所の指摘を主な目的とし、その対策については簡単に述べた。具体的な対策の詳細などについては労働安全衛生に関連する図書⁶⁻⁸⁾を参照することを勧めたい。

2.1 真空装置に内在する危険

2.1.1 大気圧による装置の破壊やフランジ等の脱落

真空装置の真空槽の中は当然であるが大気圧よりも低い圧力になっている。多くの装置では内部の圧力は大気圧に対して十分低い圧力となっているので真空槽の壁には片側からのみ大気圧が加わっていると考えてよい。大気圧は1平方センチメートルあたり10 N、すなわち約1 kg 重であり、真空槽を構成する材料がこの圧力に耐えないと真空槽の破壊に至る。最近ではあまり耳にしないが、以前は真空蒸着装置のガラス製のベルジャー（真空容器）が破損する事故があることを耳にした。この場合、真空容器は単に潰れるだけでなく、背面にあった部分が前面に向かって飛び出すことになり、爆発するのと変わらない。

これとは逆に、普段大気圧に押されることで真空槽に固定されているフランジや扉が、大気開放時に固定する力、すなわち大気圧と真空の圧力差を失って落下することがある。通常、フランジはボルトで固定されているため、このような問題は生じない。しかしながら、後述するように保守や何らかの事情でフランジに代わる仮の材料で真空封止する場合にこのようなことが生じることがある。また蒸着装置の基板入れ替えのための扉などは、他の部分と比較して固定が甘い場合もあるので注意すべきである。さほどの重さが無いフランジでも足の上に落下すれば怪我に至る。また、大型の装置であればフランジ単体の重さが人の体重ほどになる場合もあろう。このようなものが脱落すれば大きな事故につながることは間違いない。表1には規格のフランジのおおよその重さについて掲載した。この程度の重さのものでも、1 m 程度の高

さから足の上に落下すれば怪我に至ることは容易に想像できる。

2.1.2 気体の吸蔵・放出に伴う危険

ため込み式ポンプ、特にクライオポンプの場合、吸蔵させる気体が可燃性ないしは助燃性であると再生作業の際にまとまった量の可燃性ないしは助燃性の気体を発生する。この時に、電離真空計のフィラメントの点灯などを行うと爆発を起こす危険がある。また、そうでなくても、静電気などが元で燃焼あるいは爆発を起こす可能性がある。クライオポンプを用いた成膜装置などではこの点に注意する必要がある。この点は、ポンプの製造メーカーにおいても使用者に注意を促す努力がなされている⁹⁾。再生作業以外でも、停電等でクライオパネルの冷却機能が失われると、再生作業と同じ状況になるので注意が必要である。チタンサブリメーションポンプやスパッタイオンポンプでは、停電が発生しても通常の使用条件下では吸蔵した気体が大量に放出されることはないので、事故に至るほどの気体放出はないと考えてよい。

2.1.3 高電圧・漏電による感電

電気を利用する機器全般で感電の危険は存在するが、真空装置の場合、通常の100 V、200 V 以外に高電圧を使用している場合がある。このような例としては電離真空計やスパッタイオンポンプなどがある。古い電離真空計ではむき出しの端子にミノムシクリップで電圧導入するものもあり注意を要するが、最近では高電圧部分には直接触れることができないようソケット式のものが一般的である。古い装置であれば、圧力監視器具としてガイスラ管を使用しているものがあるかもしれない。ガイスラ管は、商用電源を誘導コイルで昇圧して放電を生じるもので、放電の様子からおおよその圧力を知ることができる¹⁰⁾。端子間には数 kV の高電圧が発生しているが露出していることが多い。これに触れば感電するし、圧力の低い場合にはわずかながらエックス線も発生している。最近ではあまり使用されなくなっていることから、経験のない作業者がよく理解せずに使用すると危険である。

成膜装置などで電子ビーム蒸発源を利用しているものがあるれば、4 kV 程度以上の高電圧を使用している。筆者らも、真空蒸着装置において、ベルジャーの下に設置されたフィードスルーカラーから小型の電子ビーム蒸着源の水冷の導入とフィラメント加熱電流、高電圧を導入していたことがある。この場合、高電圧部分が、作業者が触れうるところに露出する可能性があるので注意せねばならない。

感電というところのように高い電圧のことが気になるが、実際に人体に影響するのは電圧というよりは体内を流れる電流である。一般に10 mA を越える電流が体内を流れると危険といわれている。表2に人体に流れる電流（左手から両足にむけて電流が流れるとき）とそのときの人体反応¹¹⁾をまとめた。人体反応は電流のみではなく、電流の流れる時間にも依存する。表2に示した人体反応は通電時間1秒程度の場合のものである。通電時間が長くなると低い電流でも重篤な症状となることがある。人間の身体の主な成分はイオンを含んだ水であるので身体自身の抵抗はあまり高くなく、感電した際の電流は皮膚などの抵抗で決まる。汗をかくなどして皮膚がぬれていると抵抗が小さくなり、流れる電流も大きくな

表1 コンフラット規格のブラインドフランジの質量.

フランジの種類	質量 (kg)
ICF152	2.9
ICF203	5.5
ICF253	9.7
ICF306	16
ICF356	22

表2 15～100 Hz の正弦波交流が左手から両足に流れる場合に人体に及ぼす影響¹¹⁾。ただし、通電時間1秒程度の場合であり、通電時間により症状に違いがあることに注意。

電流	人体反応
0.5 mA 以下	無反応
おおむね10 mA 以下	有害な生理的影響なし
おおむね50 mA 未満	けいれん性の筋収縮や呼吸困難の可能性はあるが心室細動の危険なし
おおむね50 mA 以上	心室細動の危険あり。電流量により心室細動の可能性は高まる

る。このように感電の際に流れる電流を見積もることはかなり難しいので表2の数字と扱っている電圧から何か計算することにはあまり意味がない。100 V 未満の電圧であっても、体の状況によっては危険な状態となるので注意が必要である。日本電気協会の規格によれば、金属製の電気機械装置や構造物に人体の一部が常時触れている場合には、許容接触電圧は25 V 以下とされている¹²⁾。

感電して10 mA を超える電流が流れると、筋肉が収縮して自分では握ったものを離せなくなる。この状態では電流が流れ続けるので極めて危険である。電源には低電圧のものから高電圧のものまであり、一見すると高電圧のものが危険と考えられるが、実際にはそうとは限らない。低電圧のものは比較的電流容量が大きい、高電圧のものは電流容量があまり大きくない場合もある。電流容量の小さい電源の場合、電源自身が人体に影響のある電流を流せず遮断されることもある。また、直接触れる前に放電を生じることもある。高電圧のほうが安全ということではないが、むしろ人体に影響する電流を流す容量を持つ1 kV 未満の電圧に注意を払う必要がある。

また、容量の大きなコンデンサを有する直流電源では電源を遮断してもコンデンサに電荷が蓄積されていることがあるので、電圧の高低によらず注意が必要である。

真空装置に限らず、労働災害では漏電による感電もしばしば見られる。漏電による感電で危険なのは、漏電して電圧が発生している部分と接地されている部分、例えば部屋の扉などを同時に触ることである。電圧の発生している部分に触れれば感電はするが、通常の作業の状態（ゴム底の靴を履いているであるとか、ビニル床の実験室における作業など）では電流の流れる先がない。片手で漏電している装置を、もう片方の手でドアの扉に触れば体を通して電流が流れる。このとき両腕を通るということは、心臓付近に電流が流れることになり極めて危険である。

2.1.4 可動機構への巻き込み

最近では少なくなったがベルトドライブ方式の油回転ポンプではロータの回転は誘導電動機からベルトを介して行われる。着衣等がベルトに巻き込まれると事故に至る。通常はベルトカバーが取り付けられているので巻き込まれることはないが、古い装置ではカバー取り付けネジが緩みがちになったりしていることがあるので注意を要する。

2.1.5 装置の加熱に伴う危険

ベーキングと呼ばれる加熱脱ガス操作時には真空槽は150

℃以上になっているため、直接触るとやけどの危険がある。また加熱脱ガス操作にはしばしば帯状のフレキシブルヒータが用いられる。ヒータを重ねて巻くと温度が上がりすぎて発火する可能性がある。また、長年使用しているとヒータは、被覆のグラスウールが劣化して真空槽に接触し、漏電や火災の原因になる場合もある。フレキシブルヒータはコンセントに挿して簡単に使えるため、たこ足配線をしてしまう可能性が高い。よく使われる器具用ビニルコード（テーブルタップなど）の定格電流はおおむね12 A 程度（公称断面積1.25 mm² の場合）である¹³⁾。フレキシブルヒータを多数接続してこの電流を超えると、ビニルコードが発火することがあるので注意を要する。

真空蒸着装置では一般に蒸発源は明るく輝き、直視すると視力を失うなどの可能性もある。蒸発源の観測を行う必要がある場合には遮光メガネを使用する。

2.1.6 保守不足や使用環境条件から生じる危険

真空ポンプなどは、定期的に保守を行わないと性能が維持できなくなるだけではなく事故に至る場合もある。油回転ポンプではしばしば油漏れを起こすことがあるが、油漏れの量が多くなると電動機に対する負荷が高くなり、電動機の巻線が焼損する可能性がある。ベアリングの軸受けを使用しているターボ分子ポンプでは、ベアリングを定期的に交換しないと動翼が滑り落ちてポンプの破壊に至ることもある。また冬場、室内の気温が低下した状態から油回転ポンプなどを起動する場合、作動油の粘性が高まっていることから電動機に対する負荷が高くなって電動機の巻線が焼損することがある。

2.1.7 保守作業時における危険

保守作業時には、装置は通常と異なる状態に置かれることになるため、通常と比較して事故が起きる確率は高くなると考えられる。日本真空工業会の真空ウォーキングコースのメンテナンスに関する教育資料でも、メンテナンス時の安全確保について詳しく述べられている¹⁴⁾。考えられる危険の一つとして、通電したまま電気配線の変更を行おうとして感電することが挙げられる。また電気配線を変更するつもりがなくとも、電圧の印加された端子等に無意識のうちに接触するということも考えられる。しばしば見られる例は、作業者が電源を遮断した後、別の作業者が電源を再投入したことに気づかず感電するというケースである。

保守に伴い、油回転ポンプなどの電気配線を外す場合などは、再び接続するときに配線に誤りのないように接続することが重要である。三相交流を使用している場合、配線を誤ると逆回転が起こる。通常3本の線は赤、白、黒に色分けされている。三相の電圧は、それぞれが120°ずつ位相の異なる正弦波になっており、R、S、T と表示される。三相ケーブルの被覆は一般に赤、白、黒（一部青）となっており、国内ではどの電力会社もおおむね同じ基準で色分けしているが、一部の電力会社の管内では異なる色分けとなっているので注意を要する。相の順序をR、T、S のように誤ると電動機の回転方向が逆向きになるため、油回転ポンプの本来吸気を行う口から油が噴出すといったことが発生する。

保守作業の際には、普段は取り外さないフランジや架台のボルトを外すといった作業も考えられる。銅ガasket、O

リングシールにかかわらず、大気圧にした場合にはボルト類はきつく締められた状態になっている。力を入れすぎるとレンチがボルトから外れて思わぬところに手が当たることがある。真空槽に手が当たって手を傷めるのも問題であるが、このとき、ガラス管封入形の電離真空計などがあればガラスを割り、破片でさらに深い怪我を負う可能性がある。

通常使用しているフランジを取り外し、別のフランジを用いて真空封止をする必要が生じたときに、規格のフランジではなく金属板やガラス板などで仮のフランジとして真空封止をすることがある。Oリングで封止している箇所ではこれで真空封止することも可能である。この場合、大気の力のところで述べたように強度が足らないと用いた板が破損、装置に大気が突入して大変危険である。

保守の上では装置の一部を取り外すことも考えられる。このような場合、取り外す部品がどの程度の重量になるかを予め予測し、必要であれば複数の作業員で支えるか、部品の重さを支えることのできるジャッキのようなものを利用する。イオンポンプのような重い部品を持ち上げるときは、支える重量が一人当たりおおむね20 kgを超えないよう配慮する。持ち上げる作業で中腰になりがちであるが、このような体勢になると腰を痛めることになるので注意することが必要である。

また、装置背面からパネルの内側にアクセスして行う作業などでは、立ち上がる際に装置の枠に頭をぶつけるといった事故がしばしば起きる。これらは、労働安全衛生一般でしばしば言及されることである。真空技術においてももちろん、一般的な注意事項は遵守すべきであろう。

2.2 真空装置に付随する機器に伴う危険

2.2.1 高圧ガス利用に伴う危険

真空槽を大気開放する際にしばしば乾燥窒素あるいはアルゴン等が用いられる。集中配管のない実験室では、乾燥窒素の高圧ポンペを装置の近くに設置することになる。このようなポンペでは容器内の圧力は窒素が充填された状態では150気圧程度である。レギュレータを用いれば二次圧力は大気圧付近にすることができるので、高圧ガス保安法¹⁵⁾に触れるのは1 MPaを超える圧力となるポンペからレギュレータにいたる経路までである。真空装置に乾燥窒素を導入して放置すると、真空槽内の圧力は最大でレギュレータの二次圧力程度になりうる。従って真空槽内の圧力が大気圧付近になれば、乾燥窒素の導入を停止せねばならない。

筆者の過去の経験であるが、大気開放の際に行う上記の内圧上昇防止の手順をうっかり忘れたために真空装置の内圧が大気圧よりも高くなったことがあった。この時は、(ガラス管封入形測定子がゲージポートから抜けて高速で射出された。幸い、測定子の射出された方向に誰もいなかったので怪我などは免れたが、人がいれば怪我をした可能性は高い。

このほか真空槽内にわずかな量の気体を導入するような実験をしている場合、気体導入バルブを閉めずに真空排気装置を停止すると当然真空槽内の圧力が上がることになる。

また、窒素などで大気開放した真空容器の中は、酸素濃度が低下している可能性があるため不用意に覗き込んではいけない。このような状態の真空槽は、酸素欠乏症等予防規

則¹⁶⁾における「窒素等不活性気体を入れてあり、または入れたことのある施設内部」に該当する。また特に窒素を用いた大気開放とは関係なく、人が入れるような大きな真空容器などでは内部の酸素濃度が低下する可能性が高いので注意を要する。通常の大気では酸素濃度は21%であるが、この濃度が低下した場合に人体に及ぼす影響について表3にまとめた¹⁷⁾。

このほか、有毒ガスや可燃性ガス、助燃性ガスを利用する際にもこれらの気体の漏洩に注意が必要である。

2.2.2 寒剤使用に伴う危険

寒剤を使用するときに考えられる危険は、凍傷のような事故よりも、むしろ窒息にある。油拡散ポンプにおける油蒸気の真空槽内への拡散防止や、真空槽内で試料を冷却するなどの目的で液体窒素を利用することがある。液体窒素は高圧ガス保安法上の高圧ガスであることを十分認識する必要がある。

真空装置で液体窒素を使う場合は、液体窒素溜めに液体窒素を注ぐことが多く、蒸発する窒素は装置の背面から実験室内に排出される場合が多い。室内が適切に換気されていれば問題ないが、窒素が滞留するような装置の構造になっているか、装置に問題はなくとも作業員が、窒素が滞留するような状況を作り出すと、局所的に酸素濃度が低下して酸欠状態になる可能性がある。

2.2.3 有機溶剤使用に伴う危険

新たに装置を製作して内部を洗浄する場合や、長期間の使用により付着した汚れなどを取り除く目的で真空槽内を洗浄する場合には、しばしば有機溶剤が用いられる。従前はトリクロロエチレン(トリクレン)が脱脂の目的でしばしば用いられたが、現在では発がん性など健康障害を引き起こすおそれのある特定化学物質の第二類物質特別有機溶剤等に指定されており^{2,18)}、使用されることは稀である。これに対して最近ではアルコールの使用が多くなってきている。アルコールにも種類があり、メチルアルコール(メタノール)、エチルアルコール(エタノール)、イソプロピルアルコール(プロパノール)などがある。この中でメタノールとイソプロピルアルコールは第二種有機溶剤に指定されている^{2,5)}。このほかアセチルケトン(アセトン)もよく用いられたが、これも第二種有機溶剤に指定されている^{2,5)}ため、最近では実験室からは徐々に排除されつつある。第二種有機溶剤を用いて洗浄などを行う作業場は作業環境測定を行う必要がある^{1,2,19-21)}。

有機溶剤は容易に気化するので、管理を正しく行わないと中毒症状を示すことがある。有機溶剤はしばしば洗浄瓶と呼

表3 酸素濃度と人体に表れる症状¹⁶⁾。

酸素濃度	症 状
18%	安全限界、換気が必要
16%	呼吸・脈拍の増加、頭痛、吐き気
12%	めまい、吐き気、筋力低下、体重支持不能で転落
10%	顔面蒼白、意識不明、嘔吐、嘔吐物による窒息
8%	失神、昏睡、7～8分以内に死亡
6%	瞬時に昏睡、呼吸停止、6分以内に死亡

ばれるプラスチック容器に入れて実験室内に置かれていることが多い。洗浄瓶に有機溶剤を入れた場合、温度が上昇すると洗浄瓶内の圧力が上昇し、洗浄口から有機溶剤が噴出することがある。実験室内に洗浄瓶を放置する場合によっては管理濃度を超える空气中濃度になる可能性もある。

このほか、有機溶剤は一般に引火性液体である。消防法²²⁾では危険物第四類に分類されるものが多い。火の気のないところで保管すると共に、多くの有機溶剤を一箇所に集めないことが重要である。詳しくは消防法及び危険物取り扱いに関する資料を参照されたい。

3. 潜在的な危険に対する安全対策

以上、これまでに真空技術にかかわる危険について述べてきたが、以下では上に挙げたこれらの危険に対する安全対策について述べる。

3.1 真空装置に内在する危険への対応

3.1.1 大気力による破壊防止

当然のことであるが、真空封止に使用するフランジ類は、規格のものを使用する。通常時であれば、規格のものを使用しているはずであり、この点の心配はあまりないと考えられる。コンフラットフランジでは規格フランジ以外で真空封止することは難しいが、Oリングシールのフランジでは十分滑らかな表面を持つ材料（ガラス板や金属板）で真空封止することも可能である。やむを得ずこのような規格外のものを使用する場合には、十分な強度があるかどうかを確認しておく。このような材料を用いて封止する場合は往々にしてボルトでとめられないことが多いので、大気開放時に落下しないよう固定することが必要となる。

真空蒸着装置のガラスベルジャーには図2に示すように金属製の枠をかぶせ、万一ガラスベルジャーが損壊しても飛散しないようにすることが望ましい。

3.1.2 気体の吸蔵・放出に伴う危険防止

使用する真空装置がどのようなポンプで真空排気をしているかよく理解するとともに、導入しても良いガス、導入してはいけないガスなどについて理解を深めておく必要がある。先にあげたクライオポンプの例では、メーカーは粗引き配管や排気ダクトを塩化ビニルなどのプラスチックにせず、金属製のものとした上で接地することを勧めている⁹⁾。有毒ガ

スなど危険性の高いガスはいくつも種類があるが、ここでは詳述を避ける。使用に当たっては、適切な除害装置を設置し、配管からの漏れなどがないように気を配る必要がある。ガス供給会社や真空装置メーカーとよく相談しておくことが重要である。

3.1.3 高電圧・漏電による感電防止

真空計の測定子などは可能であれば端子がむき出しのものではなく、ソケット式のケーブルが使用できるものに置き換えるのがよい。高電圧を印加するフィードスルーが露出する場合には、図3に示すようなアクリルないしは金属製のフィードスルーカバーを取り付けるのがよい。

高電圧端子に触れる必要がある場合は、電源を切った後、十分に電荷を逃がしてから触れる。電源の電圧表示が0になっても電圧が0になっているとは限らないので、アース棒と呼ばれる、高圧部分から高抵抗を介してアースに電荷を逃がす器具を用い、電荷を十分逃がしてから触れるようにする。

漏電対策として装置の最上流の遮断器は漏電検出機能付きのものを使用するのが望ましい²³⁾。感電防止用としては、検知電流15 mA、30 mAのものがある。また装置のアースを取るよう心がけることも重要である。

3.1.4 可動機構への巻き込み防止

ベルトドライブの油回転ポンプなどではベルトが露出しないう、ベルトカバーを取り付けること、また細かな部品類が落下した場合でもベルト付近には至らないような工夫が必要である。真空装置を操作する作業従事者は袖口などが締まった作業衣を着用することも重要である。ネクタイなどの着用は避けるべきである。

3.1.5 加熱に伴う危険防止

ヒータ設置に当たっては、まずヒータの容量から必要な電流を計算し、その電流を流すことのできるケーブルを利用することが必要である。グラスウール損耗による漏電対策として、漏電ブレーカを介して電力供給する。フレキシブルヒータは、時々点検し、グラスウールの損耗などがいないか確認する。特にフランジ付近ではフランジ開閉に伴うボルトやナットの回転がフレキシブルヒータに接触するとヒータのグラスウールが損耗しやすい。

加熱脱ガス操作を行う場合には、加熱開始に先立って絶縁

図2 真空蒸着装置のガラスベルジャー飛散防止用金属網の例。

図3 高電圧が露出している部分に取り付けたアクリル製フィードスルーカバーの例。

抵抗計を用いて絶縁を確認することが重要である。加熱を開始したら、装置が高温になっていることを明示し、不用意に触らないような注意喚起の表示を掲示するべきである。

加熱の間はヒータ電流をクランプメータなどで監視するとともに、発煙や異臭などがないか確認することも重要である。新品のフレキシブルヒータは最初の使用時には若干の発煙と異臭があるので、異常によるものかどうかは電流などで確認すると良い。

また、いくつかの箇所の温度を監視し、必要に応じて電力を遮断できるようにできれば、過熱による事故を防ぐこともできるうえ、温度が十分上がっていない箇所があれば加熱脱ガス操作の効果をより向上させることができる。

3.1.6 保守不足や使用環境条件から生じる危険の防止

装置は必ず必要な保守を行うようにすることが重要である。ターボ分子ポンプの制御器には積算時間計がついており、保守が必要な時期になると警告を発するものもある。このような警告が出た場合には、メーカーと相談の上、保守することが望ましい。従って、ポンプと制御器は常に同じ組合わせで使用する。

油回転ポンプの油漏れを見つけた場合には修理し、適量まで作動油を加えることが必要である。また、冬場の油回転ポンプの起動など、使用環境条件により危険が予測されるような場合には、装置取扱者に事前にその危険と適切な操作方法を周知しておくことが重要である。低温において油回転ポンプを起動するときはモータに負荷がかからないよう、リークバルブを開けたままごく短い時間油回転ポンプに電源を投入してすぐに遮断する、という作業を繰り返してポンプがあったまってきたら通常通り起動するようにする。

保守の記録などが残るように、装置の稼動日誌をつけるのが望ましい。日々の圧力や気がついたことなどを記載しておくことと装置の維持管理の上で役立つことが多い。

3.1.7 保守作業時における危険防止

作業者は自ら電源が遮断されていることを確認するとともに、他の作業者が誤って電源を投入しないよう、分電盤に張り紙や札などを用いて作業中であることを示すことが必要である。複数の作業で作業を分担する際には、電源の投入・遮断の際に必ず声を出して作業を確認する。このほか、装置周りの整理整頓はいうまでもない。

3.2 真空装置に付随する機器等による危険への対応

3.2.1 高圧ガス使用に伴う危険の予防

乾燥窒素を用いた大気開放においては、真空槽内の圧力が大気圧より高くなならないよう、真空槽内において大気圧付近の圧力の確認ができる機構を導入するとよい。大気圧に近い圧力で回路が閉じる真空スイッチなどを用いたインターロックの形成は対応策の一つである。しかしながら、このようなインターロックに頼るのは何らかの事情でインターロックが機能しなくなったときにやはり事故につながる可能性があることを忘れてはならない。最近では大気圧から高真空までの圧力計測を行うことのできるオールレンジの真空計が出てきているので、このような真空計を取り付けておいても内部の圧力監視はできるであろう。気をつけるべきことは、窒素以外の気体を導入して大気開放する場合には、大気圧付近の監

視に使用している真空計が気体の種類に寄らず正しい圧力を指示するものであることを確認しておくことである。

Oリングシールの装置であれば、真空槽にあるポートのフランジを止めているボルトナットの一部を緩めておくといよい。内圧が高くなったときに当該箇所から窒素が噴出することで大気圧より高くなることを避けることができる。銅ガasketなどを用いている装置では、ボルトナットの一部を緩めるとその部分から大気が装置内に流入するので適切な方法とはいえない。この場合は気体を導入する配管に内部の圧力がわかるような仕組み（風船のようなものでもよい）を取り付けておくことと装置内部の圧力を監視できる。

大気開放用の気体を、高圧ガスボンベから供給する際には、高圧ボンベは床に固定したボンベスタンドに置き、上下2箇所を金属製の鎖などでしっかりと固定することも必要である。

有毒なガスや可燃性、助燃性のガスは、使用にあたってシリンドラキャビネットの中に格納する。個々のガスの取り扱いについては、本稿の範囲を超えると考えられるのでこれ以上は記載しない。新たにガスを使用する際には、取り扱いについて納入業者とよく相談しておくことが必要である。

3.2.2 寒剤使用による窒息防止

窒息の対策として実験室における換気に気を配る、また、酸素濃度の低下を検出する酸素濃度計を設置するなども考えられる。しかしながら、これらは装置の局所的な部分での酸素濃度低下の対策として機能しない可能性もあるので酸素濃度計を設置したからといって安心してはならない。窒素の噴出口の位置を良く認識することが必要である。最近では携帯用の酸素濃度計なども販売されているので、このようなものを活用すると作業者の位置での酸素濃度を監視することができると考えられる。

大きな真空槽などを取り扱う場合には、真空槽内部を攪拌するようなファンを用いて気体の流れを作り、酸素濃度が低下するような領域を作らないことが重要である。

3.2.3 有機溶剤使用による中毒予防

まず、使用する有機溶剤については安全データシート(Safety Data Sheet)などでその危険性について十分理解しておくことが必要である。SDSは、少し以前まではMSDSと呼ばれていたもので、化学品の分類及び表示に関する世界調和システム(GHS)に基づいて化学品に関する情報が記載されたものである²⁴⁾。表4にSDSに記載されている内容を挙げた。同じ化学品でも、メーカーごとにSDSを作成しているため、記載内容に若干の違いがあることもある。プロパノール、アセトンなど有機溶剤、あるいはエタノールであっても、基本的に有害であるものという考えで日ごろから洗浄操作の手順を定めておくべきである。本稿を読まれた読者は、すぐにでも自分の使う有機溶剤に関してインターネットなどでSDSを調べてみるとよい。

第一種及び第二種有機溶剤の使用に当たっては、原則として洗浄操作を密閉容器内で行うか、そうでない場合には局所排気装置ないしはプッシュプル型換気装置の設置が義務付けられている(発散防止措置をとった場合で、作業環境測定により第一管理区分と評価された場合などを除く)⁵⁾。従っ

表4 SDSに記載されている内容。

番 号	項 目 名
1	化学品及び会社情報
2	危険有害性の要約
3	組成及び成分情報
4	応急措置
5	火災時の措置
6	漏出時の措置
7	取扱い及び保管上の注意
8	ばく露防止及び保護措置
9	物理的及び化学的性質
10	安全性及び反応性
11	有害性情報
12	環境影響情報
13	廃棄上の注意
14	輸送上の注意
15	適用法令
16	その他の情報

て、部品類の洗浄に有機溶剤を使用する場合には、原則としてドラフトチャンバのような局所排気装置の中で行う必要がある。洗浄瓶に有機溶剤を入れる場合は、使用後はドラフトチャンバ内に保管して有機溶剤の大気中への拡散を防ぐか、洗浄瓶用のキャップを用いて洗浄口を完全に密閉する。作業環境測定について詳しく述べることは本稿の範囲を逸脱すると考えられるので、詳しくは関連の図書など²⁵⁾を参照されたい。

真空槽内の洗浄に有機溶剤を使うときには溶剤の蒸気が真空槽内で滞留しないような工夫が必要である。大型の装置で、作業者が内部に入るような場合、有機溶剤などを使用しない場合でも酸欠になる可能性があるので、空気を攪拌するファンなどの設置も必要となる。

3.3 そのほかの注意事項

3.3.1 二次災害の防止

また、労働安全衛生全般に言えることであるが、二次災害を防ぐことも重要である。酸欠や感電などの事故が生じると、助けようとした人が同じ事故にあう可能性が高い。このため、酸欠事故が想定される実験装置を有する部屋では酸素濃度計を設置するとともに携帯型の空気呼吸器を準備しておくこと、また常日頃から空気呼吸器の装着訓練を実施することが必要である。酸素濃度計が酸素濃度低下を検知したときには、あわてて室内に入ることはしてはならない。

感電時には、まず感電の元となっている電源の遮断を行い、その後、助けることが必要である。そのためにも、各装置に緊急停止マニュアルを備え付けるのがよい。

3.3.2 危険の予知・感知

装置が危険な状態になっていることに気がつくことも重要である。先に述べた大気開放時の内圧上昇の際には、普段より大気開放に要する時間が長いと感じ、何かおかしいと思ったが、装置の一部である溶接ベローズが延びているのを見て、とっさに弁を閉じるように指示をだした。実際にはわずかに間に合わなかったが、射出の勢いもそのまま放置したときよりは弱まっていたかもしれない。もう少し早く気がつい

ていれば測定子の射出も避けられたことになる。このとき自分でも何が起きているかを正確に判断したのかどうか記憶がない。おそらく現在行っている操作によると考えられる異常を感じ取り操作を中止する指示を出したのだと思う。真空装置のみならず、装置を使用する際には五感を働かせて、異常に気づくことが重要である。

3.3.3 装置の動作原理の理解

新規に装置を使用するときには、単に操作方法のみを覚えるのではなく、個々の操作が何を行っているかを十分理解しておく必要がある。また、停電時に装置がどのような状態になりうるかについて予めシミュレーションをしておくといよい。

3.3.4 非常停止手順の揭示

真空装置は終夜運転することもある。このようなときに作業者が常時装置の前で監視することは難しい。同じ部屋の作業者が装置の異常に気がついたときなどに緊急停止するための手順を書いたものを装置の近くに掲示しておくといよい。

3.3.5 装置の固定と避難経路の確保

装置の設置に当たっては、火災や地震の際の避難のために通路を確保しておくことが重要である。通常安全な通路の幅として80 cmを確保することが求められている³⁾。装置の設置に当たってはこの点にも注意する。前述したメンテナンス時の事故を防ぐためにも、装置設置場所には空間的な余裕を確保することが望ましい。また、装置周辺を整理整頓しておくことは言うまでもない。

地震対策も重要である。小型の真空装置では、移動させやすいようにキャスターのついたものがあり、そのまま設置されている場合もあるが、高さ調整機能つきの足が付いている場合にはこれを使って固定する。その上で、ベルトなどを用いて壁に固定できればなお良い。真空装置で使用する部品類を格納している保管庫や棚の固定もさることながら、収納している部品類が地震の際に飛び出さないようにする工夫が必要である。一般的な対策として棚の前面に紐などで棚の中身が飛び出さないようにするという方法があるが、真空部品などは重量のあるものが多いので、棚の前面に板などを取り付けてもよいだろう。また、重量のある真空部品は高い場所には置かないようにする。ただし、低い位置には埃もたまりやすいので、容器の中に入れるなどすると良い。

普段から避難訓練に積極的に参加する姿勢も必要である。

4. まとめ

以上、筆者の経験などを元に、真空技術に潜在的に潜む危険を取り上げ、その安全対策について述べた。潜在的な危険と対策を分けて論じたので、ここで表5に危険とその対策をまとめておく。実際に市販されている装置の安全対策が向上するにつれ、真空装置に潜む危険については認識が甘くなりがちである。通常であれば危険のない装置であっても、何らかの事情で本来の安全装置が働かないときのために、どのような危険が潜んでいるかについては理解を深めておくべきであろう。

真空装置のみならず、機械を操作する上ではなによりも安全を優先するべきである。また操作する人の健康管理が結果的に安全の確保につながる。結局のところ、通常の労働安全

表5 真空技術に潜む潜在的な危険とその対策

真空装置に内在する危険	事故の種類	対 策
圧力差	装置破壊	規格品による真空封止
圧力差	フランジ脱落	フランジ固定
可燃性気体の吸蔵・放出	火災	真空槽内への導入ガスの選定・火気厳禁
高電圧	感電	露出している帯電部分の遮蔽
漏電	感電	漏電遮断器設置・接地
回転機構	巻き込み	ベルトカバー装着・襟元の締まった衣類着用
加熱脱ガス処理（高温）	火傷	加熱周知・温度監視
加熱脱ガス処理（ヒータ過熱）	火災	温度の監視
加熱脱ガス処理（漏電）	漏電	漏電遮断器設置
保守不足（油回転ポンプ、作動油不足）	電動機焼損	定期的な保守
保守不足（ターボ分子ポンプ、軸受け不動）	動翼破損	定期的な保守
運転環境（油回転ポンプ、低温時）	電動機焼損	起動方法の周知
保守作業（電源）	感電	元電源の遮断
保守作業（電源）	電動機逆回転	電気配線の色配置確認
保守作業（フランジ取り外し）	打撲・切創	ガラス管封入形真空計などの作業前取り外し
真空装置に付随する機器・材料に伴う危険	事故の種類	対 策
高圧ガス（大気開放）	暴発	圧力監視器具の設置・安全弁設置
高圧ガス（大気開放）	酸欠	真空槽内を覗き込まない・換気
寒剤使用	酸欠	換気・窒素滞留防止
有機溶剤使用	中毒	ドラフトチャンパ内での利用
有機溶剤使用（真空槽内）	中毒	換気
有機溶剤使用（保管場所）	火災	火気厳禁

衛生となんら変わるところはない。大学においても安全に関する考え方はこのところずいぶん改善されている。これまでには労働安全衛生という言葉には無縁だった方も、一度関係する図書を読んで頂くことをお勧めする。また、衛生管理者の資格取得を目指していただくのも安全確保の上では重要と考える。

真空装置はあらゆる分野で利用されているので、筆者の限られた知識では真空技術に潜む潜在的な危険を全て挙げたとは言い難いと思う。また、真空装置は設置する場所などによって個々に特有の問題を有する可能性もあるため、一般論が通用しない場合もあるだろう。しかしながら、本稿が読者の身近にある真空装置における潜在的な危険について考えるきっかけになれば幸いである。

謝辞

京都大学大学院工学研究科附属環境安全衛生センターの皆様

様には、筆者が職場の衛生管理者を務めていた期間に安全衛生に関して多くの事柄をご教授頂きました。特に中川俊幸氏には本稿を執筆するにあたり貴重な資料をご紹介頂きました。この場をお借りしてお礼を申し上げます。

〔文 献〕

- 1) 労働安全衛生法（昭和四十七年六月八日法律第五十七号，最終改正：平成二七年五月七日法律第一七号）
- 2) 労働安全衛生法施行令（昭和四十七年八月十九日政令第三百十八号，最終改正：平成二三年一月一四日政令第四号）
- 3) 労働安全衛生規則（昭和四十七年九月三十日労働省令第三十二号，最終改正：平成二八年二月二四日厚生労働省令第二四号）
- 4) 高圧ガス保安法（昭和二十六年六月七日法律第二百四号，最終改正：平成二七年九月一日法律第六六号）
- 5) 有機溶剤中毒予防規則（昭和四十七年九月三十日労働省令第三十六号，最終改正：平成二六年十一月二八日厚生労働省令第一三一号）
- 6) 危険な箇所について考えるためには，中央労働災害防止協会編：「あなたの職場の安全点検」（中央労働災害防止協会，東京，2014）
- 7) 各年度の労働災害関連の情報を記載した図書として，中央労働災害防止協会編：「労働安全のしおり平成27年度版」（中央労働災害防止協会，東京，2015）
- 8) 職場や学校で安全衛生を推進する立場にある方には，中央労働災害防止協会編：「安全衛生推進者必携」（中央労働災害防止協会，東京，2016）
- 9) 例えば，アルバッククライオ株式会社のホームページ http://www.ulvac-cryo.com/products/cryo-pump/about_cp/cp-basic_03/（Last accessed: 2016-03-10）
- 10) 鳳誠三郎，関口忠，河野照哉：電離気体論（電気学会，東京，1969）第4章定常気体放電，p. 180.
- 11) 国際電気標準会議規格：IEC479-1: 1994
- 12) 日本電気協会：低圧電路地絡保護指針 JEAG8101-1971.
- 13) 飯田修一，大野和郎，神前熙，熊谷寛夫，沢田正三共編：新版物理定数表（朝倉書店，東京，1978）4.5.3.4 種々の電線の許容電流，p. 81.
- 14) 日本真空工業会：第20回真空技術基礎講習会真空ウォーキングコース受講者資料「メンテナンスについて」 p. 67.
- 15) 高圧ガス保安法（昭和二十六年六月七日法律第二百四号，最終改正：平成二七年九月一日法律第六六号）
- 16) 酸素欠乏症等防止規則（昭和四十七年九月三十日労働省令第四十二号，最終改正：平成一五年一月二九日厚生労働省令第一七五号）
- 17) 日本産業衛生学会近畿地方会編集：産業医学実線講座（南江堂，東京，2002）第30章救急処置の実際 p. 379.
- 18) 特定化学物質障害予防規則（昭和四十七年九月三十日労働省令第三十九号，最終改正：平成二七年九月一七日厚生労働省令第一四一号）
- 19) 作業環境測定法（昭和五十年五月一日法律第二十八号，最終改正：平成二六年六月二五法律第八二号）
- 20) 作業環境測定法施行令（昭和五十年八月一日政令第二百四十四号，最終改正：平成二六年一〇月一日政令第三二七号）
- 21) 作業環境測定法施行規則（昭和五十年八月一日労働省令第二十号，最終改正：平成二七年二月二八日厚生労働省令第一七五号）
- 22) 消防法（昭和二十三年七月二十四日法律第八十六号，最終改正：平成二七年九月一日法律第六六号）
- 23) 電気設備に関する技術基準を定める省令（平成九年三月二十七日通商産業省令第五十二号，最終改正：平成二四年九月一四日経済産業省令第六八号）
- 24) 日本工業規格 GHSに基づく化学品の危険有害性情報の伝達方法—ラベル，作業場内の表示及び安全データシート（SDS），JIS Z7253:2012
- 25) 社団法人日本作業環境測定協会編：作業環境測定ガイドブック [0] 総論編（社団法人作業環境測定協会，東京，2005）