

第4章

真空材料と加工技術

第3章の内容から、真空システムにおいて高速に良い真空に到達するための現実解は、油分子と水分子がシステム内に入らないようにし、同時に、真空ポンプの排気速度に頼りすぎず、むしろ理想に近い真空表面を作成してそこからの気体放出速度を小さくする方が極意であると理解してもらえたと思う。本章では、気体放出速度を小さくするための実際の材料選び、材料加工法、そして、表面処理法について具体的なポイントを述べる。

4-1 真空材料の特性と選択

真空中で使用する材料はシステムの目的が多様であるため意外と幅が広い（生産に使う気体やフィルムなどの原材料も含めるとさらに広がるが、ここでは含めない）。真空装置や作業内容によってその種類も量も変わるが、その特性をよく把握しておかないと大きなトラブルや事故の元になる。列挙すると、機械的特性、気体放出特性、蒸気圧、気体透過特性、耐熱特性、電磁気学的特性、高エネルギー粒子衝撃特性、化学的特性、耐放射線特性、耐環境特性、耐食特性、耐摩耗性、対人安全性など多々ある。これらの内のいくつかに説明を加えよう。

機械的特性には引張強度、せん断強度、展延性、加工硬化など多くの考慮すべき特性があり、特に2-5節で述べたように真空容器の場合は、圧力差はたかが100 kPaという数字ではあるものの、死者が出るほどの外力がかかっている。例えば、同じアルミ材でも極めて多種の型番があり、機械的特性がまったく異なるので、容器圧壊や、そこまで至らないにしてもひずみの発生というような事例も多く、トラブルに十分に気を付ける必要があ

る。

気体放出特性に関しては第3章で十分述べたが、金属・合金の蒸気圧もしっかり把握しておく必要がある。真鍮は加工が容易でコストも低いが、亜鉛を含むため100℃程度で 10^{-5} Pa、200℃では 10^{-2} Paを超える蒸気圧を持つ。よって万一、真鍮を加熱基板ホルダに使ったりすると亜鉛が選択的に蒸発し、結果、装置内が亜鉛蒸着され、たいていの場合、水分などと反応して灰白色になってしまう（この事例は多い）。それゆえ、昇温する真空装置内に真鍮を使うことは避けるべきである。マグネシウムの蒸気圧は亜鉛より2桁程度小さいものの、マグネシウムを含んだアルミ合金などでも同様の現象が起きる。3-2節で説明したように気体透過特性はエラストマーやプラストマーを大気-真空間に多く使っていると問題になる。また、冷却液配管と真空の間のような加圧液-真空間の場合、より透過量が増える可能性がある所以要注意だ。

電磁気学的特性とは、直流・交流抵抗、高周波特性、電気絶縁特性、誘電特性、透磁率、保持力、残留磁束密度、キューリー点などであり、ここではまとめて称している。例えば、電子分光器では装置内部に磁気が残留すると計測に影響するのでこの特性を気にする必要がある。また、良かれと思ひ、内部の磁性材キューリー点を越えた高温のベーキングを実施してしまい、失敗に至った事例もある。

高エネルギー粒子衝撃特性とは、高速の荷電粒子が真空表面に当たったときに起きるさまざまな現象にまつわる特性である。3-10節では気体の脱離のみに言及したが、レーザー・電子・イオンビ

ームやプラズマを真空中で扱う装置の場合、光の吸収・反射、2次電子放出、スパッタリング、荷電交換、X線発生などの現象も起き、さらにそれぞれの現象には材種ごとにエネルギー、入射角、表面粗度などの依存性があるので、設計・運用・保守上のトラブルを避けるためそれらに対する熟慮を要する。

耐放射線特性に関しては今や原子力施設や高エネルギー加速器だけの話ではなくなってきた。上記で述べたように、電子・イオンビームやプラズマ粒子が真空表面に衝突するとX線の発生がある。需要と技術の進展により粒子エネルギーやその強度もかなり増えているので、装置内の真空シール、電気絶縁、冷却液配管に使われているエラストマーやプラスチックがX線損傷を受けることがある。すなわち、身近な装置におけるX線損傷の進行を想定していない中で、いきなり真空漏れ、絶縁破壊による短絡、真空中での漏水が発生する場合がある。

耐環境性では、装置が設置される場所において、仮に温度・湿度・粉塵・振動・気中塩分濃度などに問題があっても装置の構成材料が長年耐えられ、問題が生じない配慮が必要である。

材料の対人安全性とは、装置の製造・運用・保守をする人にとって安全な材料を使用することである。例えば、ベリリウム銅合金は高硬度、低い比抵抗、高い熱伝導性、高耐食性を持つため、真空装置内でもよく使われる。製品のままであればまったく問題のない材料であるが、加工されたときの粉塵吸入は深刻な健康被害をもたらす。製造にかかわる人はよく知っているであろうが、特に運用・保守にかかわる人がちょっとした改造ということで、自分で加工するのは非常に危険である。

ここまで材料の特性をよく鑑みて選択すべしと述べたが、現実には装置設計するうえではもう2点、大事なことがある。それは、材料調達の容易性と材料がもたらす初期および運用コストへの配慮である。例えば、装置の消耗部品材料の調達期間と初期コストが見合っても、消耗品の交換頻度が激しく5年間運用時の総コストが大きすぎる場合は次善の材料を検討しなければいけない。よってど

んなに優れた材料が見つかったとしても、第2、第3の候補も併せて調査しておき設計のスケジュールに支障がないようにしておく必要がある。

4-2 真空材料の具体例

表4-1に、代表的な真空材料を2つの真空領域に分けて示す¹⁾。表の詳細には入らないが、4-1節で述べた各特性への考慮が反映された結果となっている。以下にいくつかの材料についてその特徴を述べる。

4-2-1 ステンレス鋼

ステンレス鋼は代表的な真空材料であり、前節のさまざまな特性から眺めても非常にオールマイティな材料であることがわかる。表4-2は304と316系列の一部に関する化学成分表である²⁾。これらはどれもクロムを含有しているため耐食性が高く、特に、表面には適切な処理によってより耐食性のある酸化クロム主体の不動態膜が形成される（このことがステンレス鋼からの低気体放出速度に大きな寄与をしている。詳細は後述）。

両系列の大きな違いは316におけるモリブデン添加である。そして、その耐食性は「Cr量+3×Mo量」に比例すると一般的にいわれている³⁾。しかし、モリブデン添加をした316の方がより顕著に小さな気体放出速度を示す、というような有効性が知る限り証明されているわけではない。よって、真空のコミュニティでは、価格の安い304がデフォルト的に使用されているのが現状だ。しかし、304は溶接や塑性加工により加工誘起マルテンサイトが発現し、磁性体となってしまうので、磁化を嫌う装置では316を使用する必要がある。なお、この表ではLやNという記号が見られるが、L付きは単なる316より炭素量が数分の1の低炭素型で、N付きは窒素添加型である。窒素添加に注目した真空特性の報告はないが、低炭素型に関しては、予想に違わず、放出気体中のCOやCO₂が明確に減る効果が報告されている⁴⁾。また、316L材中の非金属介在物（この欠陥周辺に水素がトラップされる）を市販材より2桁近く減らしたクリーンZと称される316Lは、著しく少ない脱離水素量を示し、パーティクルの発生も抑制できてい