

# 加速器の真空系を設計するにあたって

齊藤芳男 1997 (改訂2001)

## 1. 真空大綱

### (一) ラティスの設計と真空系の設計は同時進行すること。

リングの圧力分布は、ガス放出と有効排気速度との分布で決まる。したがって、真空系の設計は予めこれを予測して最適化しなければならず、ラティスと真空系の設計は同時に行うことが重要となる。あとからのポンプの追加は、多くの場合、ほとんど効果がない。

また、機械的設計についても同様なことが言える。つまり、ビームダクトは電磁石のアライメントにより自動的に調芯されるべきであり、このため電磁石とダクトフランジは共通の衝を持つことが必要である。これが、組み立てや、保守の時間短縮にとって本質的であり、フランジの遠隔締結機械などの工夫は二次的なものにすぎない。

### (二) ガス放出速度の極めて低い材料しか用いてはならない。

大規模真空系の総合性能は、到達圧力だけでなく運転の安定性と保守の容易さで決まる。特に、高放射線場の加速器の真空機器において保守を容易にする本質的な手段は、系を超高真空にすることである。それは、真空計やポンプなどの真空機器の多くは表面現象を利用したものであり、したがって圧力が低いほど安定に機能し寿命が長いからである。そして超高真空を得るためには、ダクト及び内部機器に用いる材料のガス放出量を下げる努力が最も肝要である。ポンプの排気速度は、一般に、超高真空になるほど期待できないからである。

これらのことから、用いる材料については、 $10^{-9}$  [Pa m<sup>3</sup> / m<sup>2</sup> s] ( $10^{-12}$  [Torr l / cm<sup>2</sup> s]) 以下のガス放出速度を有することを目標とする。

### (三) 機械的及び電氣的構造は単純を旨とする。

壊れない、故障の無い機器を設計することが保守作業を極力少なくする上で最も重要である。このため、きわどい発明、あるいは猿知恵はこれを排除し、なるべくオーソドックスな部品で全系を構成し、複雑さゆえの故障をなくす。また、システムのフルプルーフ化は、部品の点数を極力少なくして行なう。

力学機械の構造は、一見してその動作機構が分かる単純なものが、最も合理的な設計と言える。真空内での駆動にはすべり摩擦は勿論転がり摩擦もなるべく避けるよう留意すること。電気回路もなるべく真空内で閉じるよう設計すること。

### (四) 材料とくに実用材料の物性の基礎研究を怠らないこと。

低ガス放出性かつ耐放射線性の材料を選択・開発するためには材料の物性に関する幅広い知見を得なければならない。例えば、

- 水分子や水素原子の材料表面における吸着脱離過程 (ガス放出速度を支配)

- 照射損傷による材料劣化および腐食性ガスの発生（放電，真空リーク）
  - 冷陰極真空計やゲッターポンプの電極表面状態（真空部品の寿命）
  - ダスト（微粒子）の吸着や帯電（ビームの不安定性）
  - ねじの摩擦と磨耗（かじり，焼き付き）
- など，実用材料におけるこれらの現象は解明されていないものも多い。

## 2. 真空心得

### 2-1. 材料選択（使用を避けるべき材料）

- ・平衡蒸気圧が高いもの：

油脂，エラストマー（バイトンなどのゴム系），プラストマー（ポリエチレンなどのプラスチック系）等の有機物，Cd，Zn，Mg，およびその合金。

- ・吸湿性，加水分解性があるもの：

エラストマー，プラストマー（アクリル，エポキシレジン，ポリイミドを含む）等の有機物，脱水処理を施していないガラス。

- ・気孔を有する材料：

加圧焼成を施していないセラミック（フェライトなど）。 casting 工程で水素が溶解しやすい金属（鋳鉄，りん脱酸銅など。ただし真空 casting 無酸素銅は可）。

- ・酸化物，水酸化物をつくりやすいもの：

Al，Fe，Agなど。また，純度が低い，あるいは非金属介在物が多い金属。

- ・湿式腐食を起こしやすいもの（真空外部）：

Mo化合物，真鍮など。ステンレス鋼も条件によっては腐食する。

### 2-2. 表面処理（加工変質層の除去と機能表面の形成）

- ・切削：

化学的に活性な表面をつくる原因となる表面残留応力（結晶格子の歪みや欠陥また転位による）を極力小さくすることが，切削時に注意しなければならない。ダイヤモンドバイトによる切削は精密加工が可能で平滑面を創成できるだけでなく，残留応力を小さくできる点が優れている。ヘラ絞り加工は結晶組織の変態等をとまなうので避けること(止むを得ない場合は真空焼鈍による結晶組織の健全化を図る)。

## ・研削・研磨：

圧延・引抜素材の外皮，また成形加工後の加工変質層を研磨により除去し，ガス放出の原因となる吸着サイトを低減することを目的とする．旋盤などによる機械研削は残留応力を導入し易い．機械研磨も砥粒の埋め込みの危険が大きいだけでなく残留応力が発生し易い．研磨は電解，あるいは化学研磨が望ましいが，両者とも選択性エッチング（特定の元素，あるいは特定の結晶面や粒界が溶出）の起きることが多い．金属における電解研磨や化学研磨では，多くの場合不動態層（主として酸化膜）とその上の可溶性層の形成が液中で起きており，最終的な表面は自然酸化膜と性質（膜厚など）が異なることがある．絶縁材料のアルミナセラミックでは，特に研磨による残留応力やマイクロクラックの導入は帯電や放電の原因となる．焼結温度よりやや低い温度での加熱処理は，絶縁性能を回復するのに有効ではあるが，完全には結晶の歪みや欠陥を取り除くことはできない．

## ・成膜：

不純物が少なく滑らかな表面を形成し易い成膜方法としては，ドライプロセスである反応性スパッタリング法やイオンビーム蒸着法などが望ましい．ただし，生成された薄膜の化学組成・結晶構造をバルク結晶と比較検討する必要がある．湿式の電解メッキは，多くの場合不純物が含まれる．表面を滑らかにするため成長する結晶を微細化する電解メッキは，特に不純物が多い．また，湿式陽極酸化法は表面粗さが増す傾向がある．

過剰な膜厚は避ける．例えば，二次電子放出抑制に必要な膜厚はその皮膜材料内での電子の平均自由行程程度である．厚い皮膜は界面との間の応力歪みが原因となり剥がれやすい（TiNの場合，1  $\mu\text{m}$ 程度の厚さが限界である）．

## 2-3. 構造部品，機械・電気部品

・接合と締結：ネジは表面積を増大させるので極力少なくし，溶接・ロウ付けを用いる．半田・フラックス溶接．低温ロウ付けは避ける．また，容器等の溶接は内側溶接とする．真空中でのT形状の溶接では，肉落としを行い隙間の発生を避ける．溶接による金属組織の変化（例えばステンレス鋼におけるマルテンサイト発生や $\sigma$ 層形成）を極力抑止すること（熱処理だけでは不十分なこともある）．また，溶接により発生する歪みは焼鈍処理しておく必要がある．熱伝導の低いチタンは溶接の熱効率が高いので歪みが比較的小さい．

脱着回数の多いネジは機械強度の高いSUS316を使い，焼付き防止用TiN皮膜を施す（MoS<sub>2</sub>，グラファイト等は発塵性）．面積の大きい平面と平面の重ね合せ（層状・多層構造）を避ける．リード角の大きいネジは焼き付き易いので使用を避ける．繰り返し荷重の加わるネジは，疲労強度を考慮して材料を選ぶこと．

セラミックと金属の接合は，通常はMo-Mn化合物をセラミック上に焼成し（メタライズ），Niメッキを施した後に，中間金属であるコバルト（鉄合金，磁性材料）をロウ付け（銀-銅）する．耐腐食性を要求されたり，非磁性部品を製作する場合は，TiまたはW系メタライズを行い金属としてはTiを使用する（熱膨張係数がセラミックに非常に近い）．

## ・駆動機構：

ウィルソンシール・磁性流体は避け、ベローズによる運動導入を用いる。ただし、導入機に使用されているベローズの耐久性（疲労強度）を考慮し、さらに微粒子の挟み込みによる損傷が起こらない構造であるかどうか注意する。回転導入は精密級でないと内部機構にカジリが起き易い。ステンレス鋼溶接ベローズでは、SUS316系の素材を用いること。ベローズを介さない磁気結合型運動導入は真空内部に位置モニターが必要。

直進・回転とも、真空内部でのガイドにはすべり機構を用いずに、総玉軸受ベアリングによる転がり機構を採用すること。ベアリングは無潤滑かつセラミックボールを用いる。クロスローラガイド、ボールスプライン、リニアストロークベアリングは、使用している材料を吟味する。なお、潤滑用の油はもちろんのこと固体潤滑剤は一般に発塵性が高いので用いることはできない。無接触の磁気軸受が理想的。真空内部での駆動伝達に歯車やネジの使用はなるべく避ける。とくにウォームギア、トラベリングナットは不可。

#### ・電気部品：

電流・電圧導入の絶縁材料はアルミナセラミックを用い、導体との接続は、電界が複雑な隙間ができ易いので機械的支持を避け、ロウ付け（高電圧では金ロウ）すること。但し、ロウ付け部の電界緩和のために、金属材料を用いた電界シールド構造を付加すること。ケーブルは同軸MIケーブル（両端はロウ付けによるセラミック真空シール）。真空内モータもMIケーブル製で、大電流用には無酸素銅線（棒）を用いアルミナセラミック（ステアタイトは気孔が多く不適）数珠玉碍子で絶縁すること。絶縁構造の設計の際は、なるべく「沿面」より「間隙」を採用すること（およその目安：沿面1 kV/mm，間隙10 kV/mm）。

電極間隙の放電は、電極表面の粗さだけでなく、電極材料内部の吸蔵ガス（主として水素）、表面吸着分子（炭化水素、酸素）、表面残留応力に強く支配される。沿面の放電は、三重点での電界の様子や絶縁材料表面の汚れだけで無く、絶縁材料表面の欠陥（アルミナの場合は酸素欠陥）、格子歪みなどが帯電を誘起し放電に至ることが多い。

## 2-4. 真空ポンプ，真空計

#### ・フォアラインポンプ：

排気空間に油を極力含まないドライポンプ（ルーツポンプ，ピストンポンプ，スクロールポンプなどの機械式ポンプ）が、全体の真空系の汚染を避ける上では有効。ドライポンプでは、1) ローターやピストンなどの運動部品とシリンダーやベッセルなどの静止部品とのギャップがどの程度精密（機械的精度）に保たれているか、2) 摺動部を有する場合は、そこに耐放射線性でかつ発塵しない材料が用いられているか、3) 駆動部に使用する潤滑油の排気空間への侵入はどのように阻止しているか、に留意すること。なお、比較的耐放射線性の油としてはアルキルジフェニルエーテルがある。また、油蒸気逆流防止が必要な場合は、ゼオライトまたはセラミックシーブスをフォアライントラップに用いる。

#### ・ターボ分子ポンプ：

原理的には、潤滑油を用いない磁気軸受型が適しているが、制御系の信頼性も含めて吟味すべきである。磁気軸受型においては、焼き付きのないセラミック製のタッチダウンベアリング、

耐放射線性の非半導体磁気センサが使用されていることが望ましい。内蔵されるモーターの巻線被覆材や内部に使用されているガスケット材が耐放射線性に優れたものに置き換えられるかどうかを吟味すること。下段にドラッグ機構を有するターボは臨界背圧が高いので、フォアラインポンプの排気速度を小さくできる利点がある。ポンプの冷却は空冷で。

#### ・イオンポンプ，ゲッターポンプ：

高圧コネクタはコロナ放電の起りにくい構造であること。絶縁体はセラミック製。塩素を含む絶縁テープなどは不可。本来は、ケーブル側に市販の高圧コネクタ（LEMO, FISCHERなど）を用いてポンプに直接接続できるよう、ポンプ側のコネクタが対応するべきである。また、形状が軸対象となっているものが、安定な支持が可能で設置の際の取り付けが容易であることが多い。

排気速度については、非飽和および飽和での値の差が十分に少ないものを選ぶ。長期間の使用に際して到達圧力が上昇していかないよう、イオンポンプへの大気暴露をなるべく避けるか（ヘッドバルブ設置等）、あるいは活性化が容易な構造とすること。

#### ・クライオポンプ：

通常、ガス放出速度が非常に大きい場所に用いるポンプである。加速器においては、これを定期的に用い無ければならないような真空システムの設計は避けるべきである。使用した場合は、故障時のセーフティや保守について十分検討をしておかなければならない。

#### ・制御電源，高圧ケーブル：

各種ポンプ電源は副制御室に置くので、長尺ケーブルでの性能を確認のこと。また、電源は耐湿(80%)・耐熱(40°C)の電気部品で構成されていること。ケーブルの絶縁材としては、ポリエチレンおよび架橋ポリエチレン（ $\sim 10^5$  Gy），また、ポリアミドイミド，ポリイミド，ポリエーテルエーテルケトン（ $\sim 10^7$  Gy）などが比較的耐放射線性の高い材料であるが、電気絶縁性能は放射線損傷だけでなく材料中の欠陥や導体との微小間隙などにも強く支配される。閉鎖微小空間でのコロナ開始電界強度や開放大気中でのコロナ開始電界強度に関する実験式、および材料の絶縁破壊電界強度も考慮して、高電圧コネクタおよび高圧ケーブルを選択すること。

#### ・真空計：

冷陰極放電型のものは、フィラメントを用いないのでその加熱によるガス放出もなくまたその交換作業が不要であることから、加速器に用いられることが多い。ただし、一般に放電型の真空計は圧力に対して線形性が乏しい。また、放電による陰極のスパッタが内部を汚染していき放電電流が圧力を反映しなくなることや、非常に圧力が低い場合には放電が開始しなかったり安定しないなどの欠点があり、電極の交換やベーキングが必要になることも多い。使用する圧力範囲を限定してフィラメントの損耗を抑制したり、系のガス放出を低減して超高真空に早期に到達させられれば、熱陰極型の電離真空計の方が圧力測定においては信頼性が高い。

## 2-5. 配管部品（フランジ，ガスケットなど）

### ・フランジ：

ビームダクトを電磁石からの機械的な衝を用いて取り付け、フランジの絶対位置を得ること。フランジ規格は原則としてPNEUROPとし、その中のTable 2 (ISO-K)を優先する(1998年以降は、JISもISOに準拠した: JIS B 2290)。締結はクイックチェーン（またはリング）クランプを用いる（ある程度の径については核融合実験用として開発されている）。

### ・ガスケット：

ポンプよりも高真空側は金属ガスケットを用い、フランジ締結に必要な線応力が 200 kgf/cmを超えないものを使用すること (Conflat 500, Helicoflex 250, Helicoflex Delta 150-180 kgf/cm)。ただしInの使用は極力避ける(融着や酸化が起こりやすい)。また、ガスケットにはフランジガイド用カラー（立襟）がついていること。なお、ポンプ以降のフォアライン（低真空）側も原則的にはできるだけ金属ガスケットを用いるようにし、止むを得ない場合のみ耐放射線エラストマを用いる（ただし、ガスや液体の放出が多く、また、放射線に晒されなくとも有機エラストマ材料は経時弾性劣化する）。

### ・バルブ：

原則としてオールメタルバルブを用い、フォアライン側については上記ガスケットに準ずる。大口径バルブの圧空による駆動は、そこに用いられるエアシリンダのエラストマガスケットの放射線によるあるいは経時的な弾性劣化が必ず生ずることを認識していなければならない。耐放射線性材料を用いた電動機による駆動が望ましい。口径の小さいものは電磁ソレノイドで駆動することも可能であるが、やはり絶縁材料やガイド用シーリング材を検討しておくこと。圧空配管は全金属とし、制御弁は退避壕などに配置する。停電に対しては、ターボ分子ポンプのフォアラインバルブが確実に閉まるよう設計すること。

### ・ベローズ

なるべく溶接ベローズは用いないですむよう、とくにビームラインには使わないよう設計する。溶接ベローズは伸縮量が大きくバネ定数も小さいことが特徴であるが、溶接部では金属組織が変態して腐食を誘起し易く、また塑性変型も起きるので疲労強度が低い。さらに、微粒子の挟み込みはリーク発生の大きい要因となる。成形ベローズは溶接ベローズに比べ伸縮量が自然長に対して少ないが、ステンレス鋼よりもヤング率が小さく弾性範囲が広いチタン素材を用いることにより、バネ定数が小さくまた寿命が長いものが製作できる。

## 2-6. 制御系

### ・ポンプ・バルブ制御：

操作は副制御室でのローカルコントロールのみとし、主制御室でのリモートコントロールは行わない。ただしビームラインのゲートバルブはこの限りでは無い。排気立ち上げの自動操作シーケンスは原則として用いず、またインターロックは、ポンプ操作の進行禁止にのみ使用する。

る。停電後の復電に対しては、機器の自動復帰はないようにする。

・モニタ：

副制御室・主制御室で真空系に関するすべてのステータスと圧力がモニタでき、真空立ち上げからデータが蓄積できること。