

1. 真空の概念

ある空間内の気体分子、つまり残留ガス分子の密度が極めて小さい状態を真空と呼ぶ。空間から周囲の壁面への吸着と壁面から空間への脱離とを頻りにくり返すことによって、空間と壁面との双方に存在する分子の数は熱力学的に平衡な状態に落ち着いている。この様子は、表面の吸着分子密度を σ [個 m^{-2}]、その滞在時間（吸着エネルギーに依存する）を τ [s]、空間の分子密度を n [m^{-3}]、その分子の熱運動平均速度を \bar{v} [m s^{-1}] として、

$$\frac{\sigma}{\tau} = \frac{1}{4} n \bar{v} \quad (1)$$

により表される。左辺は単位時間、単位面積当りに表面から脱離する分子の数、右辺は表面に入射して吸着する分子の数である。ここで、 s は入射の際の付着係数で、表面固体原子の作るポテンシャルの井戸の中にトラップされる確率を表している。なお、圧力と空間の分子密度との間にはボルツマン定数を用いて、

$$p = nkT \quad (2)$$

の関係が成り立つ（空間で熱平衡が成り立っている時）。

したがって、空間の分子密度、つまり圧力は、真空ポンプの能力ばかりでなく、壁の表面状態に強く支配されている。あるいは、言葉を代えて、「真空」は「空間」と「表面」との相互作用で決まると言ってもよい。 τ や s は空間からやってくる分子の種類、および、固体表面原子の種類や結晶状態、また酸化やよごれ、さらに σ に依存する。真空の分野での重要な仕事のひとつが、実際の材料においてこれらの間の関係を実測し、それを微視的な表面状態の分析結果と対応させて吸着と脱離のメカニズム（ポテンシャルの形）を調べることである。それにより真空システムの設計や特性の予測が可能となる。なお、 σ 、 T 、 n （あるいは p ）の関数である τ と s を求めるには、分子線を用いた動的な手段や、 σ 、 T 、 n をある条件下での平衡状態を測定して解析する方法などがあるが、どれもそれほど容易では無い。後者では、測定したものはその条件によりそれぞれ吸着等温線（ T 一定での σ と p の関係、isotherm）、吸着等圧線（ p 一定での σ と T の関係、isobar）、吸着等量線（ σ 一定での p と T の関係、isoster）と呼ぶ。

真空装置の特徴は、その使用目的に応じて3つに大別できる。「clean vacuum（清浄な真空）」は最近の半導体技術には欠かせないもので、飛来した分子の付着係数と吸着エネルギーとを小さくして、表面に滞在する不要な分子の個数や時間を極力抑えてデバイスへの不純物混入を避けることが目標となる。「hot vacuum（ホットな真空）」は、上に述べたような熱力学的平衡状態がなかなか達しにくいような系で、例えば、プラズマや高エネル

ギー粒子、光子など空間から飛来する粒子のエネルギーが、固体表面の吸着分子の吸着エネルギー（せいぜい数 eV）より遥かに大きい場合である。この時は、二次粒子の放出に伴う放電現象や、突発的なガス放出などが起き易い。もう一つが、空間の分子数のゆらぎに関わる「quiet vacuum（静かな真空）」であり、極高真空（圧力が $< 10^{-12}$ Pa）の計測や、レーザー干渉計を用いた重力波観測にとって重要な意味をもつものである¹⁾。

2. 加速器に要求される真空

2.1 残留ガス分子による散乱

陽子シンクロトロン加速器において、ビームのうちのいくつかの陽子が水素、水などの残留ガス分子の原子と衝突してエネルギーを損失したり進行方向が曲げられたりして周回軌道からわずかにはずれると、これらはやがて管壁に衝突し寿命となる。一般に、高エネルギーの陽子が媒質内を進む時、媒質の原子を取り巻く電子を励起したりそれを原子から離脱させイオン化することによるエネルギー損失（電子的損失、電離損失）が起きるだけでなく、さらにこれら電子の遮蔽を突き抜け原子の内部に侵入すれば、原子核の正電荷との間での Coulomb 斥力による散乱（系全体としては弾性散乱であるが原子核へのエネルギー遷移があるので陽子はエネルギー損失する）や、衝突径数が小さい場合には核力による核散乱も起きる^{2, 3)}。こうした過程のうち、数百 MeV から GeV 以上の陽子シンクロトロンにおいて残留ガス分子がビームに与える影響でもっとも支配的と考えられているのは、Coulomb 斥力による多重小角散乱がもたらす軌道からのずれである。

分子一つあたりの散乱角をラザフォードの式から計算し（散乱角は小さい）、ある距離 L を進んだ時の多重散乱による合計の散乱角の平均を、これが0度を中心としたガウス分布に従うと近似して求める方法がある³⁾。また、実験から得られている放射長（媒質中でエネルギーが $1/e$ に減衰する長さ、窒素では $L_{rad} = 380 \text{ kg m}^{-2}$ ）を利用して、

$$\sqrt{\theta^2} = \frac{15}{pv} \sqrt{\frac{L}{L_{rad}}} (1 + \epsilon) \quad (3)$$

からも多重散乱角の平均を求めることができる⁴⁾（放射長は、電子の場合はそのエネルギー損失の主要因は制動輻射であるが、陽子の場合は coulomb 散乱が主となる。いずれにしても、エネルギー損失と進行方向に直角な運動量の変化分とを結び付ける式となっている）。ここで、15 (MeV) は陽子の特性エネルギー、 $pv = \gamma \beta^2 \times 938 \text{ MeV}$ 、 L は陽子が飛行する媒質の長さを単位面積当りの質量に換算したもので、残留ガス分子種と圧力と飛行時間とで決まる。また、 $\epsilon = 1 + 0.038 \ln(L/L_{rad})$ で⁵⁾、ほぼ1とみなしてよい。

こうして求めた散乱角が、位相空間内で陽子が散乱されながら拡散していく際の拡散係数に対応すると考えると陽子ビームの平均寿命 τ が計算される⁴⁾。

窒素分子に対して半径 a [mm] の円形ダクトを考えた場合、ベータトロン振動の波長を λ [mm]、圧力を p [Pa] とすると、

$$\tau = 113 \frac{(A/\pi)\beta^3\gamma^2}{p(\lambda/2\pi)} = 113 \frac{a^2\beta^3\gamma^2}{p(\lambda/2\pi)^2} \quad [\text{sec}] \quad (4)$$

が、拡散問題の解として得られる寿命である。Aはこの円形ダクトのアクセプタンスで $\pi a^2/(\lambda/2\pi)$ 。これを用いると、例えば、 10^4 Paの圧力でも、0.2 GeVで数秒、3 GeVで数百秒の寿命 ($\lambda/2\pi$ を10 mとした場合)が確保できることになる。したがって、入射から取り出しまでの間の時間間隔が数秒程度以下の時は、その間のビーム寿命を確保するだけならば、必要とされる圧力の上限はそれほど低いものではないことがわかる。

なお、長さ L [m] の電子リニアックにおいては、最終加速エネルギー V [MeV] の場合、端部でのビームの広がり、やはり多重散乱を考慮して、直接、

$$\sqrt{\theta^2} = \frac{21}{V} \sqrt{\frac{L}{2L_{rad}}} \quad (5)$$

で見積られる⁶⁾ (21 は電子の特性エネルギー[MeV])。 $L=400$ m, $V=2.5$ GeVの電子リニアックで、端部でのビームの広がりを1 mm以下抑えるのには、 10^2 Pa以下の圧力にすれば良いことが分かる。この場合も、必要とされる圧力の上限はそれほど低いものではない。

2. 2 部品の寿命と高放射線場での保守

ガスケット、イオンポンプ、真空計、さらにはボルト・ナットを含め、加速器などの大型真空装置の部品数は極めて多いので、それらの故障率および寿命を予め考慮した設計が必要である。

例えば、イオンポンプではごく大雑把には 10^{-3} Paで使用した場合 5×10^3 時間が寿命と言われている。これは、カソードのチタン板が損耗するまでの時間で見積ったものなので、実際には、それ以前にホイスカーの成長やその放電により排気速度が不安定になったり、また、一旦大気暴露した際の吸着ガス(水分など)が多くなり、それらの脱離によるガス放出がイオンポンプの排気速度を低下させたりする。したがって、安定な動作が保証される寿命はこれより1桁ほど短くなると考えなければならない(大気暴露後のベーキング処理は排気速度の低下を抑制する効果はある)。そうすると、 10^{-5} Paで運転した場合、このイオンポンプは 5×10^4 時間(およそ6年)の寿命となる。これを例えば60台のイオンポンプを使用する加速器にあてはめると、平均交換頻度が年間10台とな

り、短いシャットダウン期間中にこれだけの個数のイオンポンプを被爆しながら交換することは望ましくない。実際、運転直後に機器の表面線量が場所に依りて $0.1 \sim 100$ mSv/hの桁となるKEKPSリング($\sim 10^{-6}$ Pa)では、シャットダウン中のイオンポンプの着脱は被爆の主たる原因ともなっている(過剰な被爆を避けるためには、通常、機器表面線量率が1 mSv/h以下になってからの作業が望ましい)。なお、ここで見積った寿命は、年間2回程程度の大気暴露が行われる場合には、その後の立ち上げ時における圧力の高い状態でのイオンポンプの運転時間も影響するのでさらに短いと考えるのが妥当である。このように、高放射線場での作業およびシステム全体で使用される個数を考慮すると、系の圧力は $10^{-6} \sim 10^{-8}$ Paの超高真空に保たなければならない。つまり、電子や陽電子のストレージリングと、その要求される圧力においてはそれほど違いがないことになる。

イオンポンプだけでなく、真空計など真空部品の多くはその表面状態に敏感な機器が多い。熱陰極真空計では空間の残留水分子はフィラメント表面で化学反応を生じ、タングステンなどの熱陰極材料の損耗を促進する(10^{-4} Paの圧力においては、空間分子の表面入射頻度は1秒でおおよそ1原子層である)。陰極陽極間の放電を利用した冷陰極真空計(放電電流が圧力にほぼ比例)では、放電によりスパッタされた陰極物質の周囲への付着が、放電条件を変化させ測定に誤差を生じさせるだけでなく、放電を停止させてしまうこともある。これらの現象も、超高真空を実現することによりその進行を極めて遅らせることが可能となる。

2. 3 排気の迅速化と超高真空

一般に、真空装置が大型であるほどその立ち上げに要する時間をどこまで短くできるかは、装置の機能を十分に発揮させる上で重要である。これは、故障修理後すぐに運転が再開できるかどうかという問題だけで無く、装置の改良や新機能付与を試みる場合の精神的苦痛を減少させるからである。立ち上げ作業が煩雑で時間がかかる装置に対しては、積極的に改良やスタディをしてみる気にはならない。排気の迅速化のための手段として大きい排気速度を持つポンプを設置する方法があるが、これは、小さい真空装置では相応の効果はあるものの、大型装置においては多くの場合その費用や労力に比べ効率が悪い。とくに排気のための開口面積が限られている加速器においては、排気速度を大きくしても開口で制限されるコンダクタンスのために実効排気速度は増やせない。最も有効な手段はガス放出速度を低減することである。

実用材料からのガス放出速度は時間とともに減少するが、経験的にはほぼ反比例することが分かっている。したがって、材料の選択、表面処理の最適化などによりガス放出速度を減少させることが排気に要する時間を直接短縮する方法であり、同時に超高真空の実現に繋がるこ

となる。例えば、KEKPS では 10^{-6} Pa に到達するのにおよそ2週を要するが、もしダクト内面や内部部品のガス放出速度が十分の一に低減できるのであれば、これを2日程度に短縮できることになる。実際、 10^{-8} Pa 以下の超高真空中で運転を行うストレージングでは、立ち上げは一日程度で行える装置が多い。

材料表面を制御してガス放出を低減させることが、結局、超高真空を実現し、部品寿命を長くして保守の容易性を確保し、排気の迅速化に繋がると言える。この表面の制御は、後に述べるように材料表面の不動態化を意味し、加速器にとって重要な機能である高電界の安定な発生、つまり放電を抑止する方法でもある（真空中においては、とくに Paschen minimum 以下の圧力では⁷⁾、放電現象は空間のガス分子密度ではなく固体材料の表面状態に強く依存する）。

大型真空装置である加速器、とくにその環境が高放射線場となることが予想される場合は、以上のように、機器の保守、排気の迅速化、放電の抑止の面から系の真空を考えなければならぬことが分かる。

3 ガス放出と排気

3.1 吸着と脱離

(1) 吸着

空間から入射した分子が表面で散乱（馴染んだ後再び脱離）するまで、あるいはそのまま表面の分子と結合して一部となっていることを吸着状態と呼ぶが、さらには、はじめから表面の一部として存在していたものが脱離するまでを吸着していた（付着していた）と呼んだりする。いずれにしても、固体表面原子との相互作用によるポテンシャルエネルギーが吸着状態の性質を決めている（図1）。この相互作用エネルギー、つまり分子間力の種類としては、

- 短距離；電子雲どうして生ずる斥力（パウリの排他律）
- 中距離；電子の交換、共有、移動による引力（共有、イオン、金属結合力）
- 遠達的；分子の分極に起因する引力（静電力、誘起力、分散力）

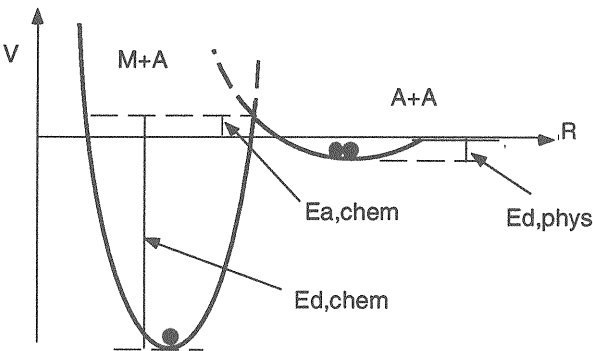


図1. 吸着のポテンシャルエネルギー。

が挙げられるが、これらにより、物理吸着と化学吸着とに分類できる。

・物理吸着

主として遠達的引力によるもので、気体の液化の際に分子間に働く力と同種類の引力（多層吸着が可能）と考えてよい。したがって、液化熱とほぼ等しい吸着エネルギーを持つ。ただし、固体表面に直接吸着する分子についてはやや高い吸着エネルギーになる⁸⁾。吸着エネルギーは表面原子の種類にあまり依存しないのが特徴である。

・化学吸着

主として電子の交換、共有による引力で起き、解離して吸着する事が多い。吸着エネルギーが被覆率に影響を受け、特に、1, 2層までで吸着が完結し飽和吸着量が存在することが多い。また、吸着に活性化エネルギーを要することや、吸着エネルギーが表面の種類や構造に強く影響を受けることが特徴である。

真空装置では、実用上特に水分子の吸着状態を知ることが必要であるが、固体表面の状態に応じてその吸着エネルギーが大きく変化することが知られている⁹⁾（表1）。

(2) 平均滞在時間 τ

吸着・脱離の過程は、

- 1) 気体分子が表面に飛来（入射）
- 2) 運動エネルギーを失う（熱的適応）
- 3) ポテンシャルに束縛される／エネルギーの再配分（安定な吸着）
- 4) 吸着（脱離）エネルギーより大きいエネルギーを受け取る（脱離）

の順で起きると考えてよい。

1) から3) の状態に至る確率を吸着（付着）確率と呼ぶ；物理吸着確率を c 、化学吸着確率を s で表す。 c は 0.5 - 1.0 の値で吸着量にあまり依存しない。 s は表面原子種、吸着量、結晶状態に敏感で、表面が金属の場合、吸着量が ~ 0 の初期状態では $0.5 < s < 1$ 、また吸着飽和で $s \rightarrow 0$ となる。

表1. 水の吸着状態

(cf. 水の液化熱 40.66 kJ/mol (420 meV))

解離吸着（活性化吸着）； dissociative	120 - 150 kJ/mol (1.2 - 1.5 eV)
配位結合吸着（分子状化学吸着）； coordinative	70 - 120 kJ/mol (700 meV - 1.2 eV), $\tau = 3 \text{ E-}1^{-2}$
水素結合吸着（水酸基上）； hydrogen-bonded	50 - 70 kJ/mol (500 - 700 meV), $\tau = 9 \text{ E-}5 \sim 3 \text{ E}$
物理吸着（水素結合も関与）； physisorption	44 - 50 kJ/mol (440 - 500 meV), $\tau = 7 \text{ E-}6 \sim 9 \text{ E-}5 \text{ s}$
単独分子の物理吸着（まれ）； isolated	$< 44 \text{ kJ/mol } (< 440 \text{ meV}), \tau < 7 \text{ E-}6 \text{ s}$

表面が半導体では、吸着量が ~ 0 の初期状態でも $s \sim 10^{-2} \sim 10^{-4}$ (酸素) 程度である。

1) から 2) の状態に至る確率は熱的適応係数 (α) と呼ぶが、これは、表面と入射分子の熱エネルギーの交換の割合でもあり、鏡面反射の場合は α がゼロとなる。 α はポテンシャル曲線の形に依存する。

1) から 4) までの過程で分子は脱離していくが、その脱離速度は一般に表面吸着密度 (σ [個 m^{-2}]) に比例する。その比例係数の逆数 (時定数) を平均滞在時間 τ と呼ぶ。さらに、脱離は脱離エネルギー E_d (図 1 参照) で表わされる活性化過程であるので、

$$-\frac{d\sigma}{dt} = \frac{1}{\tau} \sigma, \quad (6)$$

$$\text{ここで } \tau = \tau_0 \left(\frac{E_d}{kT} \right)$$

$$\text{一般には、 } \tau = \tau(\sigma), \quad E_d = E_d(\sigma)$$

が成り立つ。多少詳しく述べれば、吸着状態と気相との自由エネルギーの差を用いて脱離速度は、

$$\begin{aligned} -\frac{d\sigma}{dt} &= \exp\left(-\frac{\Delta H_{gas-ads} - T\Delta S_{gas-ads}}{kT}\right) \sigma \\ &= \exp\left(\frac{\Delta S_{gas-ads}}{k}\right) \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \sigma \end{aligned}$$

と表され、 τ に相当する項のうち、気相と吸着相でのエントロピー (自由さの程度) の差の影響を示す部分が τ_0

(気相と吸着相との分配関数との比で決まる定数) となる。通常 τ_0 は、固体表面上での吸着分子の垂直振動周期程度となり $10^{-12} \sim 10^{-13} s$ である。

$$\tau_0 = \frac{Z_{ads}}{Z_{gas}} = \frac{\exp(S_{ads}/k)}{\exp(S_{gas}/k)} = \exp\left(-\frac{\Delta S_{gas-ads}}{k}\right),$$

($S = k \log W$)

脱離のエネルギーから平均滞在時間を見積ることができ、その時間と分子が空間に滞在する時間とを比較すれば、その分子が排気し易いか否かを推察できる。気体分子の平均速度 (熱運動での) は室温でおよそ数百 m/s なので、例えば大きさ 1 m 程度の真空容器では壁から壁への 1 回の飛行に ms 程度の時間を要する。したがって、これより長い時間表面に滞在 (吸着) するような分子 ($E_d \sim 52.3 \text{ kJ mol}^{-1}$ 以上) は、なかなか気相に出てこないで排気する確率が低い。つまり、空間の分子密度を脱離速度が支配することになるので排気しにくい。水分子などはこれに相当する。逆にさらに E_d が大きく $> 120 \text{ kJ mol}^{-1}$ となるような強い化学結合が起きていれば脱離の影響が無視できることになり、圧力 (空間分子密度)

への寄与が極めて少なくなる (排気しなくても良いことになる) ; 但し、ホットバキュームように高いエネルギーの粒子が入射するとこのような結合が切れ、ガス放出が急激に起きる。

問; $E_d = 52.3 \text{ kJ mol}^{-1}$, $\tau_0 = 10^{-13} s$ とし、室温, および $200^\circ C$ での τ を計算せよ。

問; E_d , τ_0 がどのような組み合わせについて多く測定されてきたか調べよ。

$$1 \text{ kJ/mol} = 1.036 \text{ E-2 eV/molecule}$$

3. 2 ガス放出機構

上で見たように、結局、固体表面の吸着分子が脱離することにより空間へのガス放出が起きていることが分かる。ここでは、それ以外の過程も含めてガス放出の機構をまとめてみる。

(1) 吸着分子の脱離 (熱的)

材料表面の吸着分子の脱離で、実際上最も支配的な現象である。今、仮に (6) 式において τ が一定であるとすると、つまり、表面と気相分子との相互作用が単一のポテンシャルでしか起きていないとすると、ガス放出速度 q [$\text{Pa m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$] は、

$$q = \frac{\sigma kT}{\tau} = \frac{\sigma_0 kT}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (7)$$

と表されることになるが、このような時間依存性は実際の真空装置で殆ど観測されることはない。つまり、材料の表面は吸着量に応じてポテンシャルが変化したり、さらに吸着エネルギーに分布を持っていることが分かる。

(2) 吸蔵分子の脱離 (熱的)

材料内部に溶解、あるいは吸蔵されている気体分子 (原子) の表面への拡散も、ガス放出の一因である。特に、水素は金属中に原子状に溶解しており、これが表面まで拡散してきて結合して分子となり脱離していくことが分かっている。今、ある固体内部に溶解している原子の濃度を C [$\text{Pa m}^3 \text{ m}^{-3}$]、その原子の拡散係数を D [$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$] とすると、単位面積当りの流量 q [$\text{Pa m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$] は、

$$\begin{aligned} q &= -D \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (\text{Fick の法則}) \text{ と} \\ \frac{\partial C}{\partial t} &= D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (\text{拡散の方程式}) \text{ から、} \\ q &= C_0 \sqrt{\frac{D}{\pi t}} \propto t^{-\frac{1}{2}} \quad (8) \end{aligned}$$

$$(\text{拡散方程式の解は、 } C(x, t) = C_0 \text{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}})$$

となる。このような時間依存性も、実はなかなか観測されたことはなく、十分に水分を吸蔵したエラストマ (ゴ

ムなど) やプラストマ (エポキシなど) で見られる程度である¹⁰⁾。金属では、吸蔵された水素が放出されていることは事実であるが、(8)式のような挙動を示さない理由として、僅かな吸着量でも表面吸着分子の方が吸蔵原子よりも多いこと、また、拡散して来た水素原子が表面で結合反応して脱離するという過程の方が拡散よりも律速であることなどが挙げられている。

(3) 非熱的励起脱離

いわゆるホットバキュームでのガス放出の要因となるものである。電子や光子が吸着・吸蔵分子を励起して脱離を促す現象で、それぞれ電子刺激脱離 (Electron Stimulated Desorption), 光刺激脱離 (Photon Stimulated Desorption) と呼ぶ。吸着分子 (原子) の電子状態が励起されることにより吸着ポテンシャル曲線が変化し、斥力が生じて脱離する過程である。ただし、その機構は入射電子や光子による直接励起だけでなく、電子、光子照射により固体内で生成された二次電子が吸着分子を励起する過程も含む。したがって、電子や光子の固体内部への侵入深さや熱的励起の程度に応じ、表面最上層に吸着している分子 (原子) だけでなく表層に分布する分子の脱離も起きることが特徴である。

表面、および表面層内部に存在してこれらの刺激による脱離の対象となる分子密度を N [個 m^{-2}] とすると、電子刺激脱離速度は、入射電子強度 F_e [個 $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$]、電子刺激脱離断面積を σ_{ESD} [m^2] として、

$$N_{ESD} F_e \sigma_{ESD}$$

また、光刺激脱離速度は、入射光子強度 F_p [個 $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$]、光子による二次電子放出係数を η_e として、

$$N_{PSD} F_p \eta_e \sigma_{ESD}$$

と表される。これらの脱離速度は、熱脱離速度より大きい。また、一旦脱離するとそれまでの吸着状態と同じ結合では再吸着しにくいので、再吸着したものは N には含まれない¹¹⁾。熱過程と光刺激脱離過程とを含む系においてはガス放出速度 q [$\text{Pa m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$] は、

$$q = kT \left(\frac{\sigma}{\tau} + \kappa F_p \sigma + N_{PSD} F_p \eta_e \sigma_{ESD} \right) \approx kT N_{PSD} F_p \eta_e \sigma_{ESD} \quad (9)$$

と近似される。 κ は再吸着した表面分子の光刺激脱離係数。脱離の対象となる分子密度 N は累積照射粒子数に依存して減少するので、ガス放出速度 (脱離速度) は (9) 式から分かるように時間には依存しない。経験的には、

$$q \propto q_0 \left\{ \int F_e dt \right\}^{-n}, \quad n = 0.5 - 1 \quad (10)$$

と表される。

3.3 ガス放出速度測定

真空系を設計する際には予め使用する材料のガス放出速度を調べる必要がある。ここでは、一般的な測定法を紹介するが、先にも述べたように、通常の熱的脱離過程以外の過程も実際の装置であるかどうかとも吟味し、それに適した条件で測定しなければならない。超高真空領域でのガス放出を測定する場合、測定したものが被測定物からのものであるか、つまりバックグラウンドと識別することがもっとも重要である (被測定物が容器そのもの場合も、ブランク試験が必要なことが多い)。真空計もガス放出源であり、また、排気作用を持つことも忘れてはならない。さらに、排気装置側からのガスの流れ (ポンプの放出ガス) の除去も問題となる。測定すべきガス放出速度を Q [$\text{Pa m}^3 \text{s}^{-1}$]、真空計で読み取る圧力を p [Pa]、使用するポンプの排気速度を S [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] として、下記の方法がよく用いられる。

a) $Q \approx pS$:

ポンプの排気速度 S [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] を用いての最も簡便な測定法であるが、排気速度 (通常圧力依存性を持つ) の正確な値を予め測定しておく必要がある。

b) $Q = pC$ ($\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S} \approx \frac{1}{C}$, 但し $C \ll S$) :

ポンプ吸気口に孔を設け、そのコンダクタンスの値 C [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] を利用する。排気速度 S [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] が変化しても実効排気速度 S_{eff} が一定 (C) とみなせる。

c) $Q = \frac{dp}{dt} V$ (built-up 法, V は真空容器体積) :

ポンプ吸気口を閉じて圧力上昇 dp/dt の様子を測定。放出された分子の容器表面への再吸着 (Q) する影響を考慮しなければならない。

$$Q = \frac{dp}{dt} V + Q' \quad \text{但し, } Q' = \frac{d}{dt} (\sigma kTA) = \frac{1}{4} \bar{v} s \tau A \frac{dp}{dt}$$

$$\left(\frac{\sigma}{\tau} = \frac{1}{4} n \bar{v} s \text{ は再吸着速度} \right)$$

d) $Q = C(p_1 - p_2)$ (throughput 法) :

孔 C で仕切られた 2 つの容器 (測定, 排気) の圧力測定から流量を測定する方法で、使用する 2 個の真空計を予め精度良く校正する。

e) $Q = \frac{C_1 C_2}{C_2 - C_1} (p_1 - p_2)$ (conductance-modulation 法) :

2 つの容器を仕切る孔のコンダクタンスを変化させ (C_1, C_2)、その時の被測定物側の圧力の変化を測定 (p_1, p_2)。1 個の真空計で測定できる長所があり、ガス放出速度が小さく圧力が低い測定条件で有効である。

$$Q = p_1 S_1 = p_2 S_2$$

(ただし, $\frac{1}{S_1} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{S_0}$, および $\frac{1}{S_2} = \frac{1}{C_2} + \frac{1}{S_0}$)

問; throughput, conductance-modulation 法において, C の大きさの影響はあるか.

3. 4 排気特性と吸着状態

今までにガス放出と吸着・脱離現象との対応を見てきたが, これが実際の排気過程 (排気特性) にどう影響するかを考えてみる.

(1) 排気の方程式と吸着状態

系 (体積 V [m³]) の圧力 p [Pa] は, ガス放出速度 Q [Pa m³ s⁻¹] とポンプの排気速度 S [m³ s⁻¹] とを用いて次の排気の方程式で結び付けられる.

$$V \frac{dp}{dt} = Q - pS \quad (11)$$

排気のごく初期の過程のように, 空間中の気体だけを排気する場合は $Q = 0$ と考えて良く,

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{S}{V}t\right) \quad (12)$$

で圧力が減少する. ここで, V/S を排気の時定数と言う. やがて内壁表面の吸着分子の脱離速度が支配的になり ($Q \neq 0$), 排気過程が進むと系はほぼ定常状態とみなせるので,

$$Q \approx pS \quad (13)$$

つまり, ガス放出速度の変化の様子が, 直接排気過程を決めていることになる. したがって, 固体表面からの脱離速度 [個 m² s⁻¹] をガス放出速度 [Pa m³ s⁻¹] で表せば, 吸着状態と排気過程とが結びつくことになる. 個数を気体体積に換算するために kT と表面積 A とを乗じて,

$$Q = -\frac{d}{dt}(\sigma kTA) \quad (14)$$

また, 準定常状態では,

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{1}{4}n\bar{v}s - \frac{\sigma}{\tau} \rightarrow \frac{\sigma}{\tau} \approx \frac{1}{4}n\bar{v}s \quad (15)$$

であるので, これらから p と σ の関係が得られ, さらに, s , τ の性質が分かれば具体的に排気過程を予測できることになる. 以下に, s , τ , σ , T , $p(n)$ の関係を様々に仮定した吸着モデルの例を挙げ, その時の排気特性について簡単に述べる.

a) ヘンリー一則 (Henry): s , τ が σ に依存せず一定で, 吸着量が圧力に比例すると考える.

$$Q = -\frac{d}{dt}(\sigma kTA) = -\frac{1}{4}\bar{v}s\tau A \frac{dp}{dt} \quad \text{より}$$

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{S}{V + \bar{v}s\tau A/4}t\right)$$

となり (実効的に容積が増す), 圧力は時間に対して指数関数的に減衰する (図2). 考えている温度における飽和蒸気圧 p_0 程度までなら, 均一表面への物理吸着に適用可能な場合もある. 実際には, 吸着量が少ない範囲での物理吸着に適用される.

b) ラングミュア式 (Langmuir): 吸着は表面の未吸着部分で起き, 単分子層までしか吸着しないとモデルで, その時の吸着エネルギーはどの場所でも同一と考える. つまり, 付着系数を,

$$s = s_0(1 - \theta), \quad 0 \leq \theta \leq 1$$

($\theta = \sigma / \sigma_m$ は被覆率, σ_m は単分子層吸着密度)

とし, τ を一定とする. この時,

$$\sigma = \sigma_m \theta = \frac{1}{4}n\bar{v}s_0\tau(1 - \theta) \quad \text{より}$$

$$Q = -\frac{d}{dt}(\sigma kTA) = -\frac{d}{dt}\left(\frac{abp}{1 + bp}\right) = -\frac{ab}{(1 + bp)^2} \frac{dp}{dt}$$

よって

$$V \log p + ab \log\left(\frac{p}{1 + bp}\right) + \frac{ab}{1 + bp} = -St.$$

(但し $b = \frac{1}{4} \frac{\bar{v}s_0\tau}{\sigma_m kT}$, $a = \sigma_m kTA$)

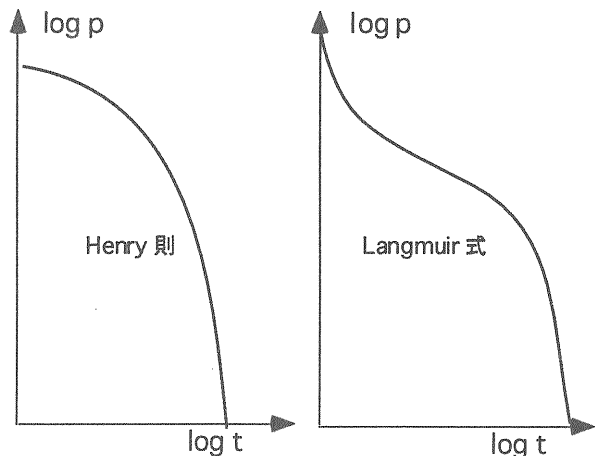


図2. 吸着モデルを想定した時の排気過程.

p は、排気の初期においては時定数 S/V の指数関数的減少を示し、途中 t^{-1} を経て $t^{-1/2}$ の時間的変化で排気が進み、吸着量が 0 に近づいていくと時定数 S/ab で指数関数的に減少する (図 2)。内壁が均一で清浄な真空容器で見られることがあるが、最後の急激な減少は観測されにくい。

○ フロイントリッヒヘテムキン式 (Freundlich-Temkin) : 吸着量が増えるに従い、吸着エネルギーも変化すると考え、表面に吸着できる「空き」(吸着席、吸着サイト)が多い時の E_d を大とする。空きが埋まるに従い吸着分子どうしの相互作用が強くなり E_d が減少すると考える。つまり、 E_d に分布があり、選択的に深いポテンシャルエネルギーから埋まって行くモデルである。排気過程で考えると、排気が進むにつれ E_d の大きい吸着分子が残っていくことになる。 s は特に変化しないものと仮定し、 $E_d = -c \log(\sigma / \sigma_s)$ の吸着量依存性を持つと考えると (c は定数、 $c > 0$ 、 σ_s は最初に吸着していた量、あるいは飽和吸着量) 、

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_d}{kT}\right) = \tau_0 \exp\left(-\frac{c \log(\sigma / \sigma_s)}{kT}\right) \quad \text{より}$$

$$\frac{\sigma}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} \frac{\sigma_s^{1+c/kT}}{\sigma_s^{c/kT}}$$

よって、

$$Q = -\frac{d}{dt}(\sigma kTA) = -A \frac{d}{dt}(a p^{1/n})$$

$$(n, a \text{ 定数}, n = 1 + \frac{c}{kT}, a = \frac{1}{4} \bar{v}_s \tau_0 \sigma_s^{c/kT})$$

から、 t が十分大きければ、

$$\frac{Aa}{1-n} p^{(1/n)-1} \approx St, \quad \text{つまり}, \quad p \propto t^{-\frac{n}{n-1}} \quad (n > 1)$$

となる。これは実際の真空容器のガス放出特性 (ほぼ t^{-1}) に近いモデルと考えられているが、このモデルでは t のべき数の絶対値が 1 より小さくならない。なお、これ以外にも、BET 式 (Brunauer-Emmett-Teller)、デュビニンラデュシュケビッチ式 (Dubinin-Radushkevich) などのモデルが提唱されているが、圧力や吸着密度の広い範囲に亘って成り立つものはない。

問；体積 1 m^3 の真空容器を大気圧から排気する。排気速度 300 l/分 のポンプを用いた場合の排気の時定数を計算せよ。容器内壁に吸着ガスが無いとすれば、排気開始からどれほどで 1 Pa に達するか。

問；ヘンリー則の吸着モデルでの実効容積を、 τ を 10^2 s として見積もってよ。

問；フロイントリッヒヘテムキン式で、 $p = \exp\{Z(t)\}$ と置いて、排気の方方程式を実際に解いてみよ。

3. 5 排気の遅延時間と圧力分布

実際の真空装置においては、その排気過程は、材料固体表面での吸着状態だけでなく、装置全体の幾何学的形状の影響を受け、排気に遅延時間を生じたり、また、圧力に分布が出来たりする。

(1) 実効平均自由行程

排気過程においては、装置や配管内での気体の流れが発生している。排気の初期を除いてはこの流れは分子流である。分子流の性質を決めているのは、分子と固体表面との衝突過程であり、なかでも、その散乱分子の方向分布が最も大きい影響を与える。熱運動程度のエネルギーを持つ気体分子が固体表面に入射した後の散乱方向分布 (確率) は、以下のような余弦則に概ね従うことが経験的に知られている。

- ・散乱角 θ の余弦 ($\cos \theta$) に比例する。
- ・方位角 ϕ については全くランダムである。
- ・入射方向と散乱方向との間には相関はない。

したがって、分子流領域においては、流れ (気体分子の移動) は拡散 (壁との衝突による) とみなして良く、容器や配管の形状が決まれば流れは圧力差 (空間密度の差) だけで支配されることになる。

一方、気体分子の拡散現象は、分子どうしの衝突頻度で決まる平均自由行程 (λ) により特徴付けられる。古典的気体分子運動論を用いて拡散系数 D は、

$$D = \frac{\lambda \bar{v}}{3} \quad (16)$$

と表される (これは Maxwell により示され、実際の気体について良い近似となっている。 \bar{v} は分子の平均速度)。したがって、この λ を、容器や配管の壁との衝突で決まる実効的な平均自由行程 (λ^*) に置き換えることにより、分子流領域での流れを記述することが可能になる。

断面形状が一様 (周囲長 H 、面積 S) な、長さ L の配管内における平均自由行程 λ^* は、この流路内の全気体分子の 1 秒間における飛行行程の総和を考慮すれば、

$$(1 \text{ 秒間での内壁との総衝突回数}) \times \lambda^* \\ = (\text{流路内の気体分子総数}) \times \bar{v}$$

なので、

$$\frac{1}{4} n \bar{v} \times HL \times \lambda^* = SLn \times \bar{v}$$

より、

$$\lambda^* = \frac{4S}{H} \quad (17)$$

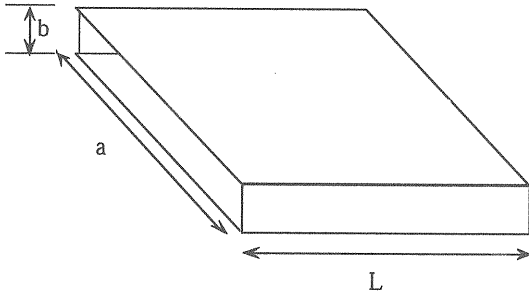
と近似的に求められる。例を以下に挙げる。

・円形導管 (半径 r)

$$\lambda^* = \frac{4\pi r^2}{2\pi r} = 2r \quad (18)$$

・扁平矩形導管 (長辺 a , 短辺 b , $a \gg b$, 微小ギャップ流路の場合)

$$\lambda^* = \frac{4ab}{2(a+b)} \approx 2b \quad (19)$$



問; (18) 式を用いて, 半径 r , 長さ L の円形パイプでは, 流量 Q が,

$$Q = -\pi r^2 \frac{\lambda^* \bar{v}}{3} \frac{dp}{dx}$$

と書け, そのコンダクタンスが,

$$C = \frac{2\pi r^3 \bar{v}}{3L} = \pi r^2 \left(\frac{8r}{3L} \right)$$

となることを確かめよ。

問; (19) 式の成り立つことを示せ。

(2) 排気の遅延時間

上の λ^* を用いて, 長い配管や狭いギャップを通して排気を行う際の遅延時間¹²⁾ (排気が定常状態に至るまでに要する時間) を見積ることができる。今, 流路 (導管) 内部での気体分子の平均自由行程を λ^* とすれば, 気体分子の一行程に要する時間は λ^* / \bar{v} であるから, この流路の分子流における拡散係数 D [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] は,

$$D = \frac{\lambda^* \bar{v}}{3} = \frac{\lambda^*}{3} \frac{\lambda^*}{(\lambda^* / \bar{v})}$$

となる。壁への衝突のたびに τ の滞在時間を要する場合は, 実質的拡散係数 D' は,

$$D' = \frac{\lambda^*}{3} \times \frac{\lambda^*}{(\lambda^* / \bar{v}) + \beta s \tau}$$

と書け (β は粗さ係数, s は付着確率), この D' から, 長さ L の流路での排気の遅延時間は, 近似的に,

$$t \approx \frac{L^2}{6D} = \frac{L^2 \left\{ (\lambda^* / \bar{v}) + \beta s \tau \right\}}{2\lambda^{*2}} \quad (20)$$

で表される。油分子や水分子等では, 長い流路, あるいは微小ギャップを持つ積層構造¹³⁾ の場合, 遅延時間が長くなり排気特性に影響を及ぼす。

問: 間隔 $2 \mu\text{m}$ の平行平板で構成される扁平矩形導管 (長さ 5cm) において, 排気の遅延時間は如何程になるか。内壁での滞在時間 τ が 10^{-4}s の水分子として見積もってみよ。 β を 10 , s を 1 とせよ。

(3) 圧力分布

排気中 (気体の流れがある場合) の真空容器内には圧力分布が必ず生ずる。例えば, 1ヶ所の微小な孔から容器にガス導入した場合, 容器内壁からのガス放出が導入するガス流量に比べて無視できる時でも, その容器の形状に応じて, また, ポンプの位置に応じて圧力に分布を生ずる。これは例えば, ポンプの排気速度を測定するテストドームの形状や真空計の位置を決める際に問題となる。ガスを導入しない系では, 圧力分布は, 壁からのガス放出速度の分布と, 系の形状とポンプ配置との両者の影響を受ける。大型装置においては, 圧力の違いが場所により数倍から1桁以上異なることがある。そのような場所では表面の吸着分子の状態も異なるので, 排気の過程が見積りからはずれることがあり注意を要する。

圧力分布は基本的には, 各場所 (微小部分) でのガス放出量と外部へ出ていく流量とのつり合いから求められるが, ここでは, 最も簡単な長いパイプを例に挙げる。図3のように圧力 p [Pa], 流量 J [$\text{Pa m}^3 \text{s}^{-1}$], ガス放出量 (単位長さ当り) q [$\text{Pa m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$] を考えると,

$$\frac{dJ(x)}{dx} = q(x), \quad c \frac{dp(x)}{dx} = -J(x) \quad (21)$$

が成り立つ。 c [$\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}$] は単位長さあたりのコンダクタンス。これから, ガス放出が一様な場合は,

$$p(x) = -\left(\frac{Q}{2C} \right) \left(\frac{x}{L} \right)^2 + \left\{ \frac{Q}{2C} - (P_1 - P_2) \right\} \left(\frac{x}{L} \right) + P_1 \quad (22)$$

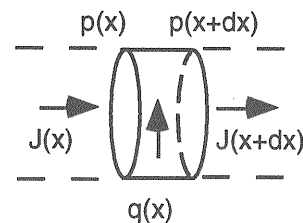


図3. 円形パイプの微小部分におけるガス放出と流れ。

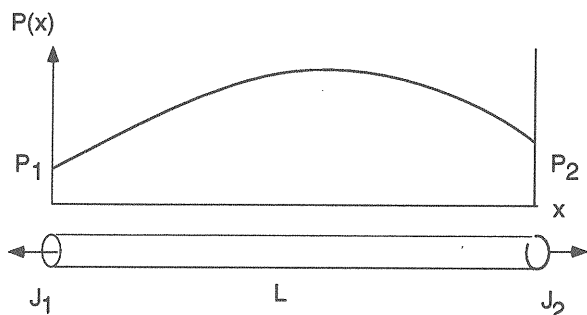


図4. 円形パイプに一樣な q がある場合の圧力分布.

の圧力分布が得られる。また、両端での流量は、

$$J_1 = \frac{Q}{2} - C(P_1 - P_2), \quad J_2 = \frac{Q}{2} + C(P_1 - P_2) \quad (23)$$

となり (Q ; 全ガス放出量), ここにポンプがあれば $J_1 = P_1 S_1$, $J_2 = P_2 S_2$ が成り立つ。図4に圧力分布の様子を示す。

電子リニアックの導波管のように網目状の系では、導管 b 本 (枝) が n 箇所 (節) で接続されている。それぞれの導管内ではガス放出が一樣だとすると、(23)式から i - j 間をつなぐパイプについては、

$$J_{ij}^i = \frac{Q_{ij}}{2} - C_{ij}(P_i - P_j)$$

$$J_{ij}^j = \frac{Q_{ij}}{2} + C_{ij}(P_i - P_j)$$

の関係式 (2b個) が得られる。これらを、各節での連続の方程式 (n 個),

$$\sum_h J_{kh}^k = 0$$

(節 k で接続される導管すべての和)

に代入して、 P_i (各節での圧力) についての n 個の連立方程式が得られる¹⁴⁾。これは行列を用いて、

$$\begin{bmatrix} S_{11} & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & S_{ij} & & & \\ & & & \ddots & & \\ S_{n1} & & & & S_{nn} & \\ & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_i \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1^* \\ \vdots \\ Q_j^* \\ \vdots \\ Q_n^* \end{bmatrix}$$

但し $Q_j^* = \sum_h Q_{jh} / 2$

と表現でき、 $Q=SP$ の形になっている。

問: 直径 40 cm, 長さ 100 m のパイプの両端に $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ のポンプをつけた時の、最大圧力と最低圧力との比はどれくらいか。

4. 材料と超高真空

4. 1 実用材料のガス放出

加速器に使用する材料を選ぶ際には、多くの条件を考慮しなければならないが、さらにそれらがが超高真空に適しているかどうかは、材質だけでなく、その加工法や表面処理の方法を吟味しなければならない。材料の選択については、まず、

- 機械的強度・疲労強度
- 使用可能温度範囲
- 化学反応性・腐食性の有無
- 荷電粒子との相互作用 (帯電, 二次粒子生成)
- 電場・磁場内での特性 (誘電損失, 透磁率, 等)
- 耐放射線性

が使用環境に適しているかどうかを確認することが基本的に必要であるが、さらに、ガス放出特性については、以下の項目を、材料製造工程、機械加工、熱処理、表面処理、洗浄法の観点から検討しなければならない。

- 蒸気圧 (平衡蒸気圧と融点)
- 気体の透過特性 (ヘリウム・水素の溶解・拡散)
- 吸蔵ガス (溶解度と拡散係数)
- 表面付着物 (組成, 蒸気圧, 発塵性)
- 不純物 (組成, 蒸気圧, 結合状態)
- 表面粗さ (真の表面積)
- 酸化皮膜 (組成, 結晶構造, 厚さ)
- 水酸化物・酸化物・炭化物 (蒸気圧, 反応性)
- 表面加工層 (格子欠陥, 不純物, 残留応力, 偏析)

ここで挙げたものの多くは、平衡蒸気圧が高くなる可能性のあるものや、また、水や水素などに対して吸着エネルギーを高くする可能性のあるもの (表面吸着サイト, あるいはバルク内での吸蔵ガスのトラップサイトなどと呼ばれる) で、超高真空までの排気の妨げとなる。そして、材料表面のこれら微視的結晶構造は、ガス放出だけでなく機械強度、腐食性、二次粒子発生などにも強く影響を与えるものでもある。

4. 2 金属材料

(1) オーステナイト (austenite) ステンレス鋼

Ni を添加した Fe-Cr-Ni 系合金で、austenite 安定相 (γ 面心立方) が常温で得られる。溶接性が良好で、低水素透過率 (α 純鉄は大) を持つので、真空用材料として多く用いられる。非磁性。なお、Fe-Cr 系ステンレス鋼は Cr と C の量に応じて ferrite ($C < 0.15\%$, α 体心立方。焼入硬化性は無い。) になったり、martensite ($C > 0.15\%$, α' 炭素過飽和体心立方。焼き入れ硬化性を持つ。磁性。) になったり、

になる(図5)。一般に、 γ は α よりCを多量に固溶できるが、austeniteではNiがCの拡散を抑制している。

低Ni austeniteは、固溶化熱処理(高温溶体化処理1050-1100°C)後の徐冷により martensite 変態が起きる。急冷する場合でもC, Ni, 不純物に応じて変態する。また、冷間加工時の応力/歪みによっても、結晶性、歪み方向に依存して変態が誘起される。絞り加工、加熱脱ガス処理などを施す場合に注意しなければならない。極低温では通常の austenite では変態するので特殊な合金組成のものを使用する。

<900°Cでの加熱時に、過飽和炭素がCr炭化物となって粒界に析出し σ 相を形成する(Ni量、時間に依存)。これは、粒界周囲にCr欠乏領域を生成し、粒界腐食感受性や水素透過率を増加させる原因となる(図6)。CrよりCとの結合性の大きいTi, Nbは炭化物として転位や積層欠陥へ析出し易く、これを利用して粒界腐食防止添加剤として用いられることがある。Ti, Nb, Taはフェライト安定化剤と呼ばれる。

ステンレス鋼表面に形成される不動態皮膜(図7)が、特に溶液中での腐食反応に対する抵抗となっていると言われるが、その微視的構造についてはまだ不明の点もあり、ガス放出(吸着状態)との関連性もまだ明確になっていない。溶液中での研究からは不動態皮膜については、以下の点が分かっている¹⁵⁾。

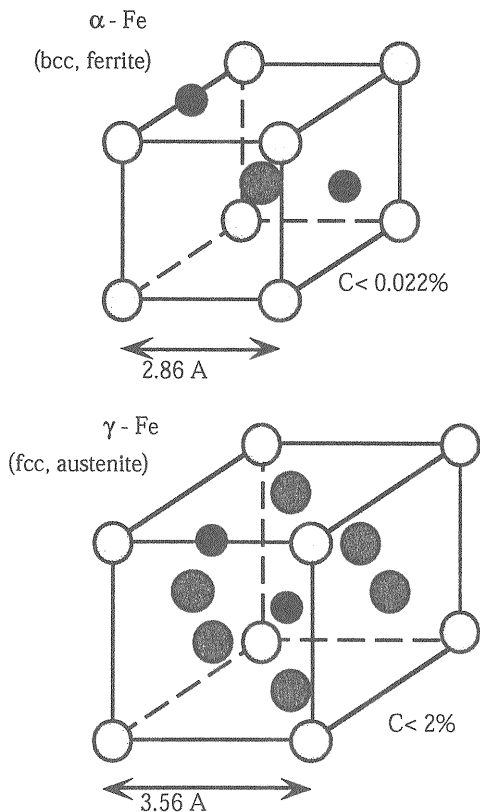


図5. 鉄における bcc と fcc 結晶構造。黒丸は炭素。

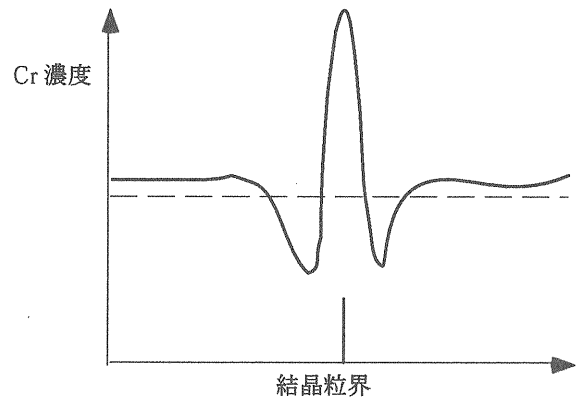


図6. 粒界 σ 相近傍に生ずるCr欠乏領域の模式図。

- 「酸素の吸着」よりは「酸化皮膜」であろう。
- 不動態としての皮膜厚さは10-30Åで、過不動態(Cr溶出)では厚い。
- 皮膜は電気伝導性を持つ。
- 皮膜中に、Cr, Mo, Si等の合金成分の濃縮が認められる。
- 組成は、酸化物、あるいは水酸化物で結合水を含むとみなされる。
- 皮膜は、酸素との結合/脱離が絶えず繰り返されてできている。
- 電子回折像では、皮膜は非晶質を示す、下地との密着性は良い。
- 塩素イオンと反応し易い(弱い)。

(2) 無酸素銅

電気伝導度が良い、入手し易い、アルミニウムに比べ表面が腐食されにくいなどの理由から、ガスケット、電極や導線、導入端子(フィードスルー)、真空遮断器電極など広く真空部品材料として用いられている。無酸素銅の酸素含有量は10ppm以下(タフピッチ銅の百分の1)であり、ロウ付けなどの熱処理における水素脆化が少なく、真空リークの危険性が低い。

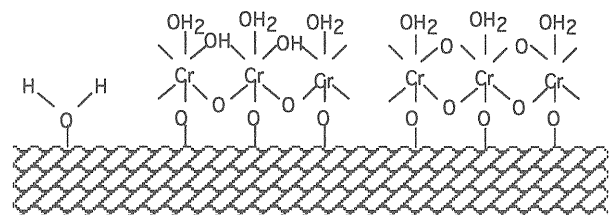


図7. ステンレス鋼における不動態皮膜構造のモデル。溶液中では3種類が共存しており、右側の安定な水和オキシ水酸化クロムに変わっていくと考えられている。

超高真空で主たる残留ガスとなる水素に関しては、工業規格などには水素含有量の規定がない。しかし、結晶組織と含有量との間には相関があると言われており、微視的構造を観察することにより材料の評価がある程度可能である。ASTM (American Society for Testing & Materials) による規定では、電子管用無酸素銅 C10100-OFE ; 99.99%以上 (最高純度) を、結晶組織内の微細気孔の多少に応じてさらに5クラスに分類しているが、Class-1 (気孔が極めて少量、真空鑄造で得られる。) においては水素と酸素の含有率 (重量比) がそれぞれ0.3, および3 ppm 以下となる。この素材が、実際にガス放出が低いことも確かめられている¹⁶⁾。

(3) その他の金属

アルミニウム : 軟化温度が低い、表面に多孔質酸化膜が形成され易い、溶接が難しいなどの理由から真空機器にはあまり用いられなかったが、高エネルギー粒子による放射化が他の金属に比べて少ない利点を活かすため、特殊な型押し成形法、液動を制御した電界研磨法などが開発され、表面の酸化膜を薄くし、あるいは緻密化することにより加速器にも用いられた。加工性や機械強度、耐熱性を高めるためSi, Mg, Cr, Znなどを添加し合金とすることが多い。

チタン : 化学的耐食性や耐熱性に優れ、機械的強度もステンレス鋼程度に高い。非磁性。また、軽量でもある。熱伝導率とヤング率が低いので切削などの加工が難しいが、バネ定数の低い柔らかいベローズが製作可能である。化合物薄膜 (多機能性セラミック薄膜) 生成用の反応性スパッタリングターゲットにも用いられる。真空用材料としては、水素のゲッター作用を利用したスパタイオンポンプや非蒸発ゲッターポンプの材料としてよく利用される。最近では、Ar+O₂ガス雰囲気中で加熱して酸化皮膜を形成することにより表面を不動態化し、真空容器としても利用されつつある^{17), 18)}。通常行われる化学研磨に比べてガス放出が少なく、特に高真空領域でのガス放出低減に効果があると考えられている。

4. 3 セラミック材料

セラミックは、高温での熱処理工程を経て合成される非金属無機材料として広義に定義され、化学的結合の種類により酸化物 (イオン結合) と非酸化物 (共有結合) とに分類される。一般には、熱処理を経ているのでガス放出は少なく化学的にも安定で真空内での使用に適しているが、気孔含有率や、表面研磨がガス放出に大きい影響を与える。セラミックは、焼結工程に用いる焼結助材や添加物の種類や量により、結晶粒の成長の様子や結晶粒界の微視的構造が決まり、これが焼結後の機械的強度、電気的な特性を支配する。例えばアルミナセラミックも、決してその純度だけでは電気的、機械的特徴を表現できない。また、非酸化物系などは、微量な粒界添加物で体

積抵抗が数桁以上変わることもある。

(1) アルミナセラミック (酸化物セラミック)

α -アルミナ (コランダム, 六方格子) 結晶を80%以上の純度で含むものの名称。ガス放出が少なく、耐熱性、メタライズやロウ付けが容易で比較的安価なので真空用絶縁材料として最も多く使用される。結晶粒界には、焼結助材としてのSiO₂, CaO, MgOなどが非晶質で存在しているが、結晶内、あるいは粒界に気孔が出来易くこれらが電気的・機械的性能を劣化させる。静水圧加圧成形法などにより気孔の除去が行われる。結晶粒径が小さく (1~2 μ m) 緻密で、助剤が少ないものは機械強度が大きい。逆に、メタライズが難しい。

結晶には酸素の欠陥と微量なCr不純物が含まれるが、電子線照射によるルミネッセンス発光スペクトルを観測することによりこれらの電子構造を知ることができる。酸素欠陥の電子状態が、高電界下での絶縁性能に影響することが確かめられており、結晶化した助剤 (少量) を有し、酸素欠陥の電子状態が安定なものは耐絶縁性が良い¹⁹⁾。アルミナセラミックは二次電子放出係数が5程度以上と高いので、帯電・放電が起き易いこと、さらに絶縁材料の中でも誘電率が高い (比誘電率~10) ので電界分布に与える形状効果が大きいことなどに注意して使用しなければならない。

(2) フェライト (酸化物セラミック)

磁鉄鉱 (FeO · Fe₂O₃) の二価のFe²⁺を二価の金属イオンM²⁺で置換した複合金属酸化物で、Mとしては、Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Mg, Cdがある。したがって、MO · Fe₂O₃の組成を持ち、スピネル構造となる (O=32, M=8(A)+16(B))²⁰⁾ ; 鉄イオン複合酸化物すべてをフェライトと呼ぶこともあるが、MO · 6Fe₂O₃ や M₃ · Fe₅O₁₂ はスピネルとは異なる構造を持つ。保磁力が小さく透磁率が大きいので軟磁性材料に適する。電気抵抗は大きい。FeO · Fe₂O₃ は電気伝導度が大きい。原料酸化物の混合→焼成 (フェライト化) →粉砕→粘結剤混和→圧縮・成形→焼結の工程で製造されるが、通常、気孔を多く有するのでガス放出が多く大気暴露後には必ずベキングを施すことが必要である。

(3) 非酸化物セラミック

窒化珪素 Si₃N₄ ; 高温機械強度、破壊靱性 (kc ~ 6 MPam^{1/2} ; アルミナは~4), 抗折強度 (σ ~ 600 MPa ; アルミナは~350) が高いことが特徴で、耐磨耗性が高く、セラミックベアリングなどに利用される。また、アルミナセラミックと同程度の電気抵抗を持つが、焼結助剤の種類により誘電特性が変化する。

炭化珪素 SiC ; 通常半導体の特性を示すが、製造法や添加物により、絶縁体にもなる。電磁波吸収体に利用される。

窒化アルミ AlN ; 電気絶縁性が高く、かつ、熱伝導性の良いものがある。しかし、誘電損失率はアルミナセラミックよりやや高い。

表2. 表面除去による仕上げ加工

	ダイヤモンド切削	超精密切削等
力学的	固定砥粒	ホーニング, 研磨紙仕上げ等
	遊離砥粒	ラッピング, プラスト仕上げ, パフ仕上げ等
化学的		化学研磨, メカノケミカルポリシング等
光学的		レーザーポリシング
電氣的	化学	電解研磨, 電解パフ等
	熱	プラズマポリシング, イオンポリシング等

4. 4 表面処理

一般に, 材料表面には図8のような加工変質層が母材の上に存在しているおり, その最上層のBeilby層と酸化層, さらにその上に水酸基や水などがいわゆる汚れとともに付着している. ガス放出低減のための表面処理(表面近傍層, バルク内部も)は, 4. 1で述べたことから分かるように, この表面近くに分布する活性な吸着サイトやトラッピングサイトを除去することである. 要約すれば,

- 汚れ, 付着物の除去(脱脂, 除塵)
- 真の表面積を減ずる(平滑化)
- 不活性な電子状態(加工変質層除去, 不動態化)
- 場合によっては機能を持たせる

が, 表面処理の目的と言えよう.

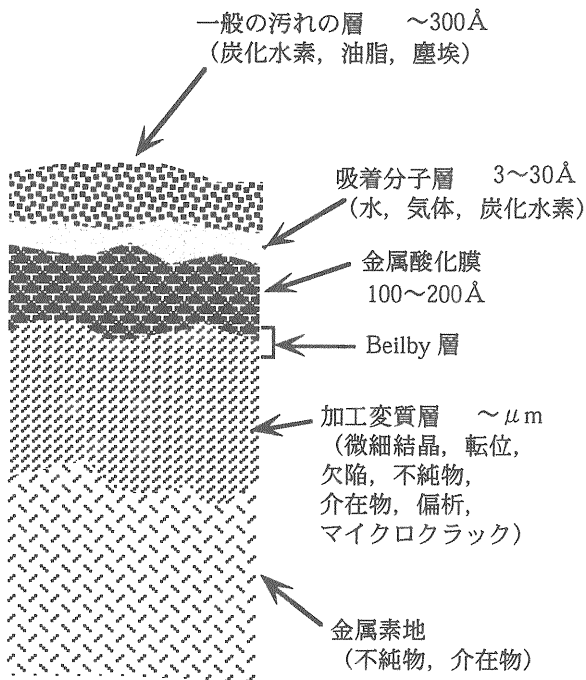


図8. 実際の金属表面の様子.

素材の製造や初期加工工程の段階から, このことを留意して製作工程を進めていかなければならない. 表面を除去するには, 表2に示す方法があるが, この時, この除去工程において導入されてしまう加工変質層を最小限にし, 残留応力や歪み(欠陥, 転位)を新たに発生させること無く平滑な面が得られるかどうか重要となる.

以下に, 2, 3の金属材料について実際に行われている表面処理法の例を紹介する.

(1) ステンレス鋼の表面処理^{2,1)}

- 洗浄; パークロールエチレン蒸気脱脂→アルカリ洗剤(pH 11) 中超音波洗浄→純水すすぎ→150°C 熱風乾燥(CERNの例). これにより, 炭素, Si, Cl, Naが除去され, 表面にCr, Niが現れる.
- 化学研磨; 硝酸フッ酸, 腐食抑制剤入硝酸により, 自然酸化膜除去とともに緻密質酸化膜を形成する. ただし, 粒界腐食に注意が必要である.
- 電解研磨; 燐酸・無水クロム酸中での電解による変質層溶出を目的とするもので, 最近では, 電解複合研磨(砥粒による機械研磨と併用)法より, $R_{max} < 0.1 \mu m$ の平滑面も得られている.
- 放電洗浄; Ar+O₂, H₂ガス中でグロー, ECR放電等を発生させ, 物理的スパッタ, 化学反応により主として炭素, 酸素を除去する. ガス原子の埋め込み効果, スパッタ物の堆積, 表面荒れに注意を要する.
- 反応性ガス洗浄; ~500°Cで酸化性ガス(空気, 酸素, オゾン, 一酸化窒素など)または還元性ガス(水素, アンモニアなど)を導入し, 炭素を除去して, 緻密質酸化膜(水素拡散抑制)を形成する.
- TiN薄膜; ホローカソード放電による薄膜形成(~1 μm)法で, ステンレス鋼バルク内部からの水素拡散透過抑制(3桁以上)の効果がある. 平滑化(< 0.05 μm)効果による水の吸着量の低減も期待できる.
- BN偏析; マグネトロンスパッタによりBN蒸着膜を形成し, その後焼鈍してBN膜を析出(~10 nm)させる. これにより, 水分子の吸着を抑制し, 水素透過率を低減(1桁)する.

- ・真空加熱；550～950℃（圧力は $10^5 \sim 10^3$ Pa）での加熱脱ガス処理で、現実的には最も効率が良い。吸蔵水素の低減、表面清浄化、Cr-rich 表面の形成が可能であるが、構造鋭敏化（Cr 欠乏層）、martensite 変態、結晶粒成長（薄板）などに注意が必要。ステンレス鋼そのものの材質を低炭素鋼、窒素添加低炭素鋼としたり、また、Ti、Nb を添加した安定化鋼を使用することがある。

- ・高純度ステンレス鋼；吸着サイト低減のために非金属介在物を減らした鋼（20→0.3 個 cm^2 ）である。

(2) アルミニウムの表面処理

本来アルミニウムは水素の溶解度が低く拡散係数は大きいので、吸蔵水素ガスが少なく、加熱脱ガスの必要はあまりない。しかし、表面処理は必ず必要である。

- ・アルカリ洗浄；NaOH、KOH 等を用いて、自然酸化層（多孔質、水和化物、～10 nm、特に Al-Mg-Si 系材では MgO-Al₂O₃ 表面層）を除去する方法である。
- ・特殊加工；大気を遮断して水分除去し、緻密質の非水和性酸化膜（～3 nm）を形成する目的で、Ar+O₂ ガス雰囲気中での押し出しや切削（EX 加工）を行う。エタノールを切削液として用いる（EL 加工）。
- ・電解研磨；磷酸・硫酸・クロム酸電解液中で強制攪拌を行いながら電解研磨する方法で、発生する水素気泡を排除することにより鏡面（Ra < 0.03 μm ）が得られる。真の表面積が幾何学面積に近く（陽極酸化表面では 200 倍）、また、緻密質の酸化膜（200 nm）が形成される²²⁾。

(3) 無酸素銅の表面処理

水素透過率はアルミニウムより高いがステンレス鋼より低い

- ・精密研削；ダイヤモンドバイトを用いた精密旋盤加工で、鏡面仕上げ（Rmax ～ 0.06 μm ）が可能である。加工変質層を殆ど作らないので表面残留応力を除去できる²³⁾。
- ・オゾン水洗浄；数 ppm のオゾン溶解させた超純水（> 17.5 M Ωcm ）で洗浄し、炭化物の除去、CuO（不動態）の形成（自然表面は Cu₂O）を目的とする。大気暴露後も安定な表面が維持されており、真空中の放電特性に優れる²⁴⁾。
- ・電鍍銅層；硫酸銅浴内での無添加電解鍍造により形成される²⁵⁾。微細結晶構造、高電気伝導度を有するのが特徴で、切削、溶接も可能である。

5. 様々な表面現象

5. 1 摩擦と磨耗

大気中での摩擦現象は、アモンソン・クーロン（Amontons 1663-1705, Coulomb 1736-1806）の法則として、

- ・摩擦力は摩擦面に働く垂直力に比例し見かけの接触面積には関係しない

- ・摩擦力（動摩擦の場合）は滑り速度の大小には関係しない
 - ・静摩擦力は動摩擦力よりも大きい
- とまとめられている。当時、実験から得られた式は、

$$\text{静摩擦力 } F = A + \mu_1 N \quad (24)$$

(A 定数/粘着力, N 垂直抗力, μ_1 摩擦係数)

$$\text{動摩擦力 } F = \kappa \frac{N}{r} \quad (25)$$

(κ 比例定数, r 円筒半径, κ/r 転がりの摩擦係数)

であり、この現象を説明するために、凹凸説（Leonard da Vinci 1452-1519, Amontons）が提唱された。これは、摩擦力を凹凸を乗り越えるのに必要な力と考えるもので、表面の凹凸を図 9 の θ の角度で表現すれば $\mu = \tan \theta$ となり、通常の機械仕上げ（ $\theta \approx 6 - 26^\circ$ ）では $\mu = 0.1 - 0.5$ という経験上妥当な値が得られる。

しかしながら、真に接触している部分では固体表面どうしの凝着が起きているはずだ（図 10）と言う凝着説（Desaguliers 1683-1744, Ewing 1855-1935, Hardy 1864-1934）も後に出された。凝着した部分を剪断により切り離していくのに必要な力を摩擦力と考えると、この場合は、

$$F = \tau S = \frac{\tau}{p} N = \mu N \quad [N], \text{ ただし } p = \frac{N}{S} \quad (26)$$

と表される。ここで、 τ 剪断力、S 真の接触面積、N 垂直抗力、p は材料の塑性流動が起きるときの応力で材料の流動圧力と呼ぶことがある。p は押し込み硬さとみなされ、通常、引張り強度の約三倍（ $p \approx 3 \times \sigma_{\text{tensile}}$ ）であると考えて良い。これを用いると摩擦係数は $\mu \approx 0.3$ と見積られ、やはり経験的に妥当な値となる。

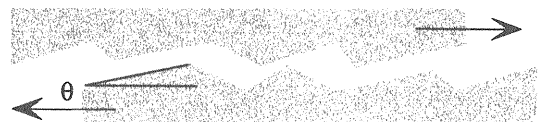


図 9. 摩擦の凹凸説。

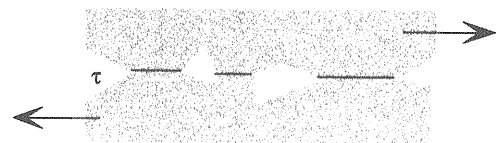


図 10. 摩擦の凝着説。

現在では、ほぼ現象を説明できるものとして凝着説が受け入れられている²⁶⁾。真空中では、清浄表面になるほど凝着が起き易く、焼き付き状態になることがある。真空中では、摩擦力が垂直抗力に依存しなくなることが多いが、(24)式において表面状態で決まるAが支配的になるからである。

5.2 接合

・ロウ付け

「母材の融点より低い温度で溶ける溶加材(ロウ、はんだ)を接合部に熔融添加して母材にぬれさせ、接合する方法」で、母材は熔融しないが表面はわずかに溶ける(1~10 μm)。付着強度は次式で与えられるぬれ性(濡れ角θ, 図11)に大きく影響される。 γ_S , γ_L はそれぞれ母材とロウ材の表面エネルギー、 γ_{SL} は界面エネルギーである。

$$\cos\theta = \frac{\gamma_S - \gamma_{SL}}{\gamma_L} \quad (\text{Youngの式}) \quad (27)$$

これを用いると、接合面を剥がすのに要する仕事(エネルギー) W [J m^{-2}] は、

$$W = \gamma_S + \gamma_L - \gamma_{SL} = \gamma_L(1 + \cos\theta) \quad (\text{Young-Dupreの式}) \quad (28)$$

となる。これから、 θ を測定して接合強度を評価することができる(θ 大→ W 小)。

付着強度を支配する界面エネルギー γ_{SL} は、2つの材料間の反応性で決まる。金属と酸化物との組み合わせでは、中間化合物を作ったり原子の拡散が起きたりする高い反応性を持つものと、そうでないものとに分類されるが²⁷⁾、それはまた温度にも依存する。反応性は、酸化皮膜や汚れ、雰囲気ガス(水素等)、微量添加物、さらにセラミックの場合は粒径の影響も受けると考えられる。

・メタライズ

アルミナセラミックではロウ付け前の表面処理としてMo-Mnメタライズが広く用いられてきている。表面に塗布したMnは、酸化された後内部に拡散し、 Al_2O_3 や助剤のMgOと反応してMn-Mg-Al化合物を作る。また、逆に助剤の SiO_2 やCaOはメタライズMo層の空隙部に拡散する。

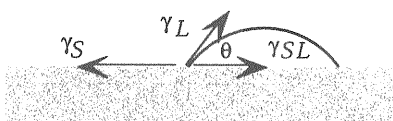
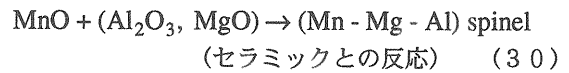
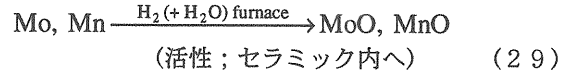


図11. 濡れ角と表面・界面エネルギー。

こうして分散組織の形成によりメタライズ層が作られる²⁸⁾。一般に、結晶粒径が小さく緻密で、助剤が少ないものはメタライズが難しい。また、Moは酸化しやすく水にも溶解し易いので、雰囲気(オゾン等)によっては腐食する。

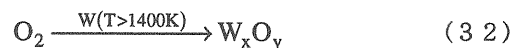


・拡散接合

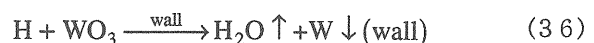
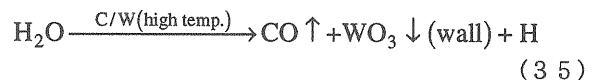
JIS Z3001では、「母材を密着させ、母材の融点以下の温度で、塑性変形をできるだけ生じさせない程度に加圧して、接合面間に生ずる原子の拡散を利用」と規定されている。清浄表面における凝着力を利用するもので、高い圧力を加えることにより真の接触表面積の増大化が図られる。初期に材料表面に存在する酸化皮膜の挙動が接合強度に影響を与えるが、材料により消失(Ti)、凝集・介在物形成(Cu, Fe)、残留(Al)のそれぞれの違いがある²⁹⁾。

5.3 触媒反応

反応性の高い金属表面では、残留ガス分子と化学的に反応して表面上に化合物を生成するだけでなく、気体分子を発生して気相の成分が変化することがある。熱陰極真空計のフィラメントであるタングステン表面では³⁰⁾、

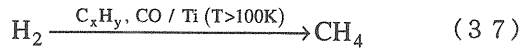


が起き、水素や酸素に対する排気作用を呈する。また、water cycle (Langmuir) と呼ばれる、



の反応はタングステンの損耗を促進する。

イオンポンプ使用時の残留ガスであるメタンは、次のように、活性なチタン蒸着面が触媒となって生成される。これは、冷却によって抑制される反応である。



5.4 電気的接触抵抗

金属平面どうしの接触抵抗を見積りたい場合、あるいは電気抵抗を測定して接触の様子を知りたい時には以下のモデルが有用である³¹⁾。半径 a の円の面の部分 (n 箇所) で接触している場合 (図12)、1箇所あたりの幾何学的形状による電気抵抗は、

$$R_i = \frac{\rho}{2a} \quad (38)$$

(Maxwell の式と呼ばれる ρ は金属の抵抗率)

$$R_i = \frac{\rho}{2a} + \frac{2\rho_{\text{layer}}}{\pi a^2} \quad (39)$$

(酸化膜で覆われている時)

となり、これから全接触抵抗 R を測定して接触の状態 (a , n) を見積もることができる。

$$a = \frac{2NR}{\pi p}, \quad n = \frac{\rho^2 p}{4R^2 N} \quad (40)$$

ここで p は材料の流動圧力、 N は垂直抗力で、 S を真の接触面積として $S = n \times \pi a^2$, $p = N / S$ 。

5.5 二次電子放出

電子が固体に入射した時 (表面から内部へ z 軸) に放出される二次電子数は、内部での生成数 $n(z)$ と脱出確率 $g(z)$ との積を用いて、

$$\delta = \int_0^{\infty} n(z)g(z)dz \quad (41)$$

$$n(z) = -\frac{1}{\beta} \frac{dE(z)}{dz}$$

$$g(z) = B \exp\left(-\frac{z}{\lambda}\right)$$

β ; 二次電子1個生成するのに必要なエネルギー $E(z)$; 入射した電子の固体内でのエネルギー

B ; 二次電子の表面からの脱出確率

λ ; 二次電子の固体内平均自由行程

と書ける³²⁾。

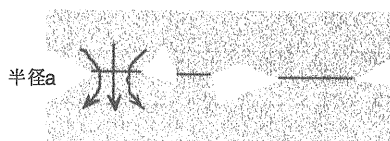


図12. 電気的接触抵抗のモデル。

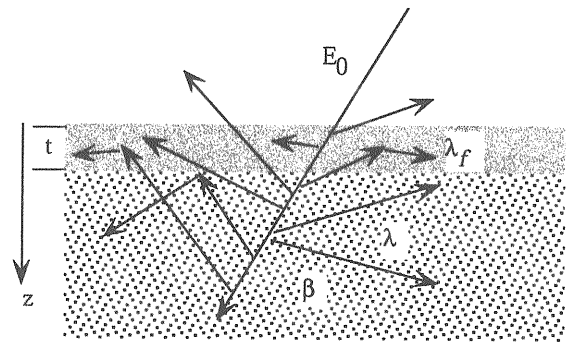


図13. 表面に薄膜がある場合の二次電子放出。

したがって、入射した電子の固体内でのエネルギー散逸過程 (dE/dz) と、生成された二次電子の固体内での散乱過程 (λ) とが現象を支配する。散逸過程については飛程 R (range) の経験式から、また、散乱過程についてはプラズモンやフォノンとの相互作用を考慮して δ を計算する試みがなされているが、アルミナセラミックなど多結晶材料については精度良い結果は得られていない。

一般に絶縁物は λ が大きく (50 - 100 nm) 二次電子放出係数が高いが、表面に金属薄膜 (λ_f は 0.4 - 1 nm 程度) を形成することにより δ を低減し放電などを抑止することがある。膜厚 t の場合 (図13) 、

$$\delta = B \exp\left(-\frac{t}{\lambda_f}\right) \times \int_{\text{solid}} \left[-\frac{1}{\beta} \frac{dE(z)}{dz} \exp\left(-\frac{z}{\lambda}\right)\right] dz \quad (42)$$

により δ を評価できる³³⁾。

5.6 放電・帯電^{34, 35)}

・金属ギャップ間絶縁破壊

真空は基本的には絶縁媒体であるが絶縁破壊強度は電極材料や表面状態に強く支配され、実用的には $10 \sim 20 \text{ kV mm}^{-1}$ 程度の値が得られる (大気中よりおよそ1桁高い)。ギャップ間においては、絶縁破壊の開始からアーク放電プラズマ (図14) による短絡までは、

- 1) 陰極電子放出 → ジュール発熱 (陰極) / 電子衝撃発熱 (陽極) → 電極材料の蒸発・ガス放出、
- 2) 微小粒子の放出と対向電極への衝突 → 加熱・分解・ガス放出

の過程を経ることが多い。

破壊の前駆である電子放出機構は、電界放出 (トンネル現象) が主であるが表面の微小突起・誘電体層 (不純物、酸化膜) が電界を増倍する効果を持つ。また、不純物や格子欠陥のトラップ準位からの放出も寄与している (図15)。

絶縁破壊強度は、材質 (合金比、気孔)、不純物、汚れ、塵埃、吸蔵・吸着ガス、結晶構造 (粒径、残留応力)

など、多くの要因に支配される。したがって、材料の鋳造法から機械加工法、さらに研磨・洗浄・加熱・コンディショニング処理に至るまでの管理が必要である。

・沿面放電／帯電

真空中で絶縁物を介した電極構造を設計する場合、通常、表面の電界強度が 1 kV mm^{-1} 程度以下となるよう構造を決めることが多いが、やはり表面の処理法や誘電体材料そのものの性能が破壊電圧に強く影響する。放電の開始機構は、誘電体／金属／真空の境界 (triple junction) からの電子放出と (口ウ材からは放出され易い。また、電界が一様でないことも電子放出し易い原因となっている)、その誘電体表面への入射および二次電子放出と考えられている (図16)。

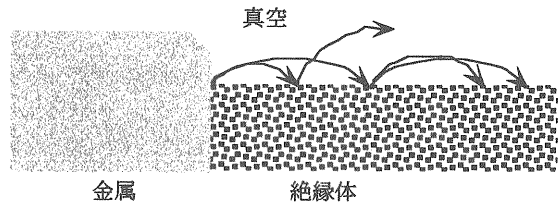


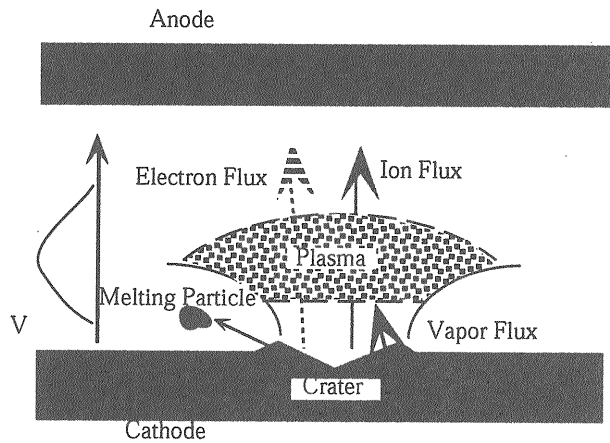
図16. 沿面放電の開始機構。

そこから絶縁破壊へと進展する過程は、

- 1) 二次電子雪崩；
二次電子放出による正の帯電→電界強度増倍→電子放出促進→電子衝撃による吸着ガスの脱離→電子によるイオン化→絶縁破壊
- 2) 分極エネルギー開放；
局所分極 (格子欠陥, 不純物) での電子の捕捉→静電エネルギーと格子歪みエネルギーの蓄積→エネルギー開放 (電界印加, 温度, 機械的応力, 電子照射等のトリガー) →誘電体破壊 (電子放出等)
- 3) 伝導電子による発熱；
格子欠陥, 不純物に捕捉された電子→電子準位間遷移→伝導電子 (図17)

があり、これらのうちの単独の過程で絶縁破壊に至ることは少ないと考えられている。1) はルミネッセンス発光とガス放出を伴うことが特徴的であり、コンディショニングの初期に多く見られる。2) では突然の結晶破壊や蒸発が起きる³⁶⁾。3) は例えばアルミナの表面溶融が結果として発生し、ルミネッセンス発光スペクトルを観察すると酸素欠陥の電子状態が変化していることが分かる³⁷⁾。

入射電子、および二次電子がどのような散乱過程を経てどのような場所 (エネルギー準位) に捕捉されて帯電するのかが、最近では主に酸化シリコンや単結晶アルミナ (サファイア) について調べられるようになってきたが³⁸⁾、多結晶構造を持ち粒界に非晶質の焼結助剤を有するアルミナセラミックではまだ十分ではない。



$$\begin{aligned}
 J(\text{ion}, \rightarrow \text{anode}) &= 0.07 \sim 0.1 \times J(\text{total arc current}) \\
 J(\text{ion}, \rightarrow \text{cathode}) &= 0.1 \sim 0.2 \times J(\text{total arc current}) \\
 J(\text{elec}, \rightarrow \text{anode}) &= 1.07 \sim 1.1 \times J(\text{total arc current}) \\
 v(\text{ion}, \text{drift}) &= 1 \sim 2 \times 10^4 \text{ m/s} \\
 v(\text{ion}, \text{therm}) &\sim 2 \times 10^3 \text{ m/s} \\
 v(\text{elec}, \text{drift}) &= 1 \sim 3 \times 10^5 \text{ m/s} \\
 v(\text{elec}, \text{therm}) &\sim 10^6 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

図14. アーク放電時のカソードスポット。

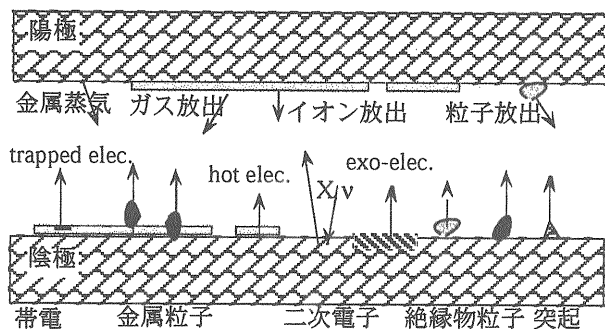


図15. 放電開始機構。

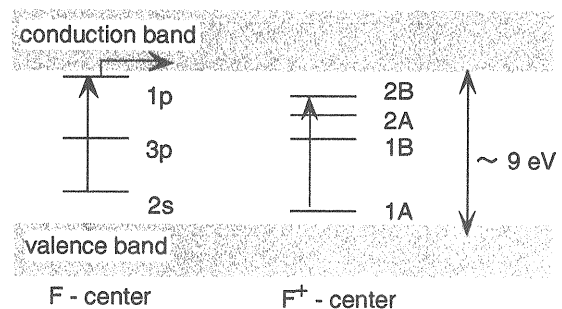


図17. アルミナの酸素欠陥における電子状態。

6. おわりに

高エネルギー加速器だけでなく、プラズマ核融合装置、衛星模試装置、重力波観測装置など大型真空装置では、長期に亘る連続運転が安定して行えることがまず要求され、保守の極小化と立ち上げの迅速化とが重要となる。特に高放射線場が予想される加速器における真空系を設計する場合はこのことを念頭に置かなければならないが、それを実現する最も確実な方法は超高真空に対応した部品・材料・処理の選択を行うことである。

超高真空を得るための手段としては装置全体のベーキングが一般的であり、迅速で効率の良い方法として古くから行われてきている（もちろんベーキングだけで超高真空は得られずそれに対応した材料の表面処理も必要ではあるが）。大型装置でもベーキングが可能であるのならば、それを施した方が超高真空を得る確実性は高く、実際、CERNを始めとしてかなりの数の加速器でベーキングが行われたり、あるいは次善の策として設置前のユニットの状態でのベーキング（pre-baking）が実行されている。しかしながら、機械的な精度が要求されたり、また安全上の制約があったりしてベーキング実施が困難な大型装置も数多い。高放射線場の加速器もその一つと考えられるが、近年様々な材料表面処理法が研究されつつあり、必ずしもベーキングを施さなくともある程度迅速に超高真空を実現することは必ずしも不可能ではないと言われてきている。

ここでは、真空特性を支配する脱離と吸着の基本概念について述べ、排気特性に影響を与える因子を2, 3紹介した。また、実際の材料の特徴や表面現象について例を挙げて簡単に説明したが、ガス放出過程を含む多くの表面現象は、それが実用材料に限って言えばまだ明らかになっていないことが多い。これは加速器に限らず真空技術を応用する分野に共通しており、現在の課題となっている。

- 1 2) 熊谷他, "真空の物理と応用", 裳華房, 1970.
- 1 3) 佐藤他, 真空, 43 (2000) 962.
- 1 4) Y.Saito et.al., JVST A 12 (1994) 1648.
- 1 5) 長谷川監修, "ステンレス鋼便覧", 日刊工業新聞, 1973.
- 1 6) Y.Nagai et.al., Vacuum, 41 (1990) 2100.
- 1 7) 湊他, 真空, 41 (1998) 335.
- 1 8) Y.Saito et.al., Vacuum, 53 (1999) 353.
- 1 9) Y.Saito, IEEE Trans. DEI, 2 (1995) 243.
- 2 0) 水田他, "セラミックス材料科学", 東大出版, 1996.
- 2 1) "38回真空夏季大学テキスト" 日本真空協会 1998, p164.
- 2 2) K.Tajiri et.al., JVST A 16 (1998) 1196.
- 2 3) S.Kobayashi, IEEE Trans. DEI, 4 (1997) 841.
- 2 4) S.Kobayashi et.al., Proc. XIXth ISDEIV, Xi'an, 2000, p47.
- 2 5) K.Tajiri et.al., Plating & Surface Finishing, 88 (2001) 60.
- 2 6) 曾田範宗, "摩擦の話", 岩波新書, 1971.
- 2 7) C.Noguera, "Physics and chemistry at oxide surfaces", Cambridge, 1996.
- 2 8) 服部他, 真空, 39 (1996) 269.
- 2 9) 溶接学会編, "溶接・接合便覧", 丸善, 1990.
- 3 0) 辻泰, 真空, 15 (1972) 7.
- 3 1) バウデン・テイバー, "固体の摩擦と潤滑", 丸善, 1994.
- 3 2) レッドヘッド他, "超高真空の物理", 岩波, 1977.
- 3 3) 松田他, 真空, 33 (1990) 255.
- 3 4) "電気学会技術報告 第586号", 電気学会, 1996.
- 3 5) "電気学会技術報告 第757号", 電気学会, 1996.
- 3 6) Le Gressus et.al., IEEE Trans. EI, 24 (1989) 969.
- 3 7) S.Michizono et.al., IEEE Trans. EI, 28 (1993) 692.
- 3 8) Proc. 4th Int. Conf. on Electric Charges in Non-conductive Materials CSC'4, Tours, France, 2001.

<参考文献>

- 1) 齊藤芳男, 電気学会誌, 121 (2001) 367.
- 2) フェルドマン他, "表面と薄膜分析技術の基礎", 海山堂, 1989.
- 3) 山本祐靖, "高エネルギー物理学", 培風館.
- 4) W.Hardt, CERN ISR-300/GS/68-11.
- 5) Euro. Phys. Journal C, 13 (1998) Chap.23.
- 6) M.Chodorov et.al., RSI, 26 (1955) 134.
- 7) 齊藤芳男, OHO'90, 1990.
- 8) 齊藤他, 真空, 43 (2000) 499.
- 9) 辻他, 真空, 40 (1997) 377.
- 1 0) 久保他, 真空, 41 (1998) 217.
- 1 1) R.Calder et.al., JVST A 14 (1996) 2618.