

超 高 真 空 の 科 学

Science of Ultra high Vacuum

辻 泰*
Yutaka TUZI

超高真空では気体分子の平均自由行程が1 km以上に達するようになり、気体分子は真空容器の内壁表面とのみ衝突を繰り返す。そのため、真空内現象には気体分子の表面への吸着確率、吸着分子の平均滞留時間などが大きく反映され、表面汚染の観点から圧力と共に真空の質が問題となる。また、真空の応用範囲の拡大に伴って、イオン、電子、励起中性粒子、輻射などの存在する場合が多くなり、非熱的現象の重要性が増加する。このような真空は熱い真空といわれる。

1. 真空の領域

真空技術は科学と工業を支える重要な基礎技術の一つであり、原子物理学の実験と電子管工業に関連して発達してきた。実際、原子物理学上の大きな実験的発見は、真空技術の進歩に伴って起こっているといわれている¹⁾。1950年代に行われた超高真空の測定技術の確立と、それに伴う超高真空の生成技術の進歩は、表面物理学という大きな一分野の成長を物理学にもたらした。さらに、分子線エビタキシー技術による蒸着技術の精密化と共に、電子工学と電子工業の分野でも超高真空技術は不可欠になってきている。その他、大型加速器、核融合研究装置にも超高真空技術の寄与は大きく、低真空～高真空技術の冶金工業、食品工業などへの寄与と共に、応用範囲を拡大しつつある。

このような真空技術で取り扱う「真空」は、その空間に全く物質が存在しないという観念的なものでは無く、通常の大気圧よりも低い圧力の気体でみたまされた空間の状態を意味している。真空の領域は習慣的に低真空 ($1.01 \times 10^5 \sim 10^2 \text{ Pa}$)、中真空 ($10^2 \sim 10^{-1} \text{ Pa}$)、高真空 ($10^{-1} \sim 10^{-6} \text{ Pa}$)、超高真空 (10^{-6} Pa 以下) に区分される²⁾。 10^{-9} Pa 以下の領域は極高真空とも呼ばれる。

圧力の単位 Pa は国際単位系によるもので N/m^2 であり、長年なじんできた水銀柱ミリメートル (mmHg) とは、 $1 \text{ Pa} = 7.5006 \times 10^{-3} \text{ mmHg}$ の関係を持っている。また、水銀柱ミリメートルは、17世紀に初めて実験的に真空の存在を示したトリチェリー (Torricelli) を記念して Torr と言われる。この解説では、圧力単位として直観的につかみやすい Torr を使うことにする。

2. 真空を使う理由

真空は、(i) 圧力差を機械的な力として利用する、(ii) 空間の邪魔な気体分子を除去する、(iii) 表面への気体分子の入射頻度を減少させる、という目的を中心として使用される。

圧力差を機械的な力として利用する例は、吸盤、真空チャックなどである。科学史上で名高いゲーリケ (Guericke) の「マグデブルグの半球」の実験も、大気圧と真空との圧力差を力として示したものである。この目的のための真空には主として低真空が使われる。低真空では気体は連続体として取り扱われる。

気体分子が一度衝突してから次に衝突するまでに飛行する自由行程は、圧力の低下と共に長くなる。平均自由行程 λ は、気体の分子密度を n 、気体分子の半径を r とすれば、気体分子運動論によって $\lambda = 1 / (4\sqrt{2}n\pi r^2)$ で与えられる³⁾。圧力 p と n の関係は、ボルツマン定数を k 、絶対温度を T とすれば、 $p = nkT$ であるから、室温での圧力と気体分子の平均自由行程との関係は図1に示すようになる。窒素を例にとれば、 $p = 1 \times 10^{-6} \text{ Torr}$ で $\lambda = 5 \times 10^3 \text{ cm}$ である。そのため、空間の邪魔な気体分子を除去する目的には、普通の大気圧の真空装置なら高真空で十分な場合が多い。特別な場合として、ストレージ・リングのように粒子の走行距離の長い加速器では、超高真空を必要とする。高真空では気体は連続体としてよりも、ばらばらの分子の集合体としての性格が強くなり、気体内の現象に、気体分子間の相互作用が大きく反映するようになる。さらに圧力が低下して、気体分子の平均自由行程が、真空容器や真空配管の代表的寸法 (ベルジャー、配管の直径など) よりも十分に長くなると、気体分子同志の衝突頻度は極めて小さくなり、気体分子は真空容器の内壁とのみ衝突を繰り返すようになる。このような状

*東京大学生産技術研究所 第1部

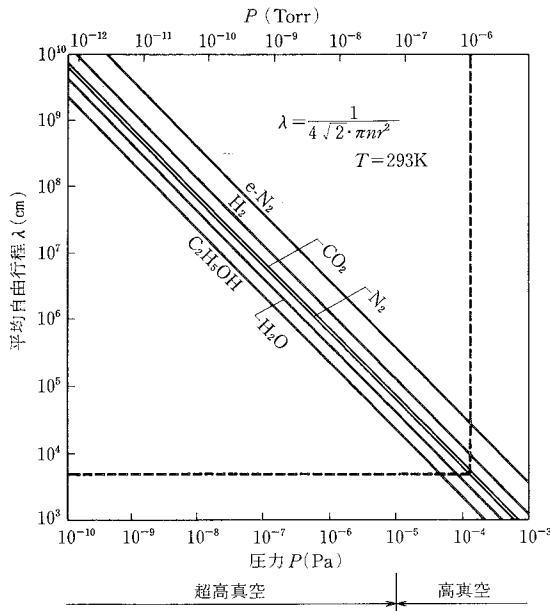


図1 気体分子の平均自由行程

表1 単分子層吸着量 σ_m と気体分子の平均速度 \bar{v} ⁹⁾

気体	σ_m	\bar{v} (20°C)
H ₂	6.95×10^{14} molecules cm ⁻²	1754 m s ⁻¹
N ₂	$6.14 \times "$	470
H ₂ O	$9.5 \times "$	585
CO ₂	$5.88 \times "$	375

態を、自由分子流条件または分子条件が成立しているという。

真空中に置かれた固体表面への気体分子の入射頻度 Γ は、気体分子の平均速度を \bar{v} とすれば $\Gamma = n\bar{v}/4$ で与えられる。 Γ と p の関係は図2に示すようになる。表面に入射した分子が必ず吸着するものと仮定すれば(吸着確率=1)、清浄な表面が単分子吸着層(吸着分子の単一層)で覆われるまでの時間 t_m は図2に示すような値をとる。単分子層吸着量 σ_m と気体分子の平均速度 \bar{v} の値の例を表1に示す。窒素では $p=1 \times 10^{-6}$ Torr で $t_m=1.6$ s であり、 $p=1 \times 10^{-10}$ Torr で $t_m=1.6 \times 10^4$ s となる。表面への気体分子の入射頻度を減らすのは、原子的清浄表面を作成したり維持したりするためであることが多いが、この目的には超高真空(または極高真空)が必要ながわかる。そのため、超高真空の生成と測定の方法の確立が、表面物理学の急速な進歩をもたらした。また、超高真空では分子条件が十分に成立しているので、真空内の諸現象に、気体分子と表面との相互作用が大きく反映される。

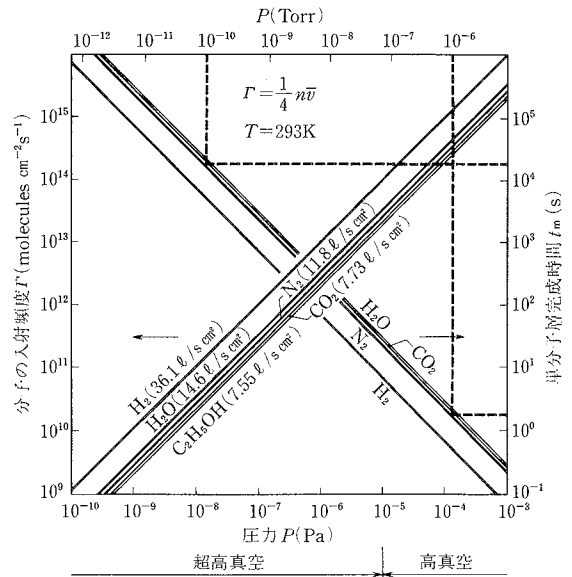


図2 表面への気体分子の入射頻度と単分子層完成時間

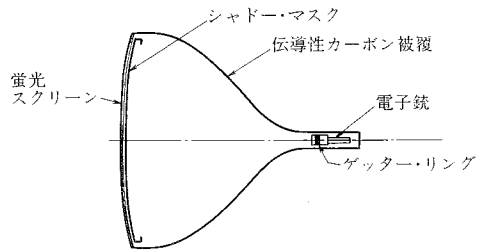


図3 ブラウン管の模式図

テレビのブラウン管(図3)では、電子銃から出た電子が、気体分子と衝突しないで蛍光スクリーンに達するように、高真空を使うという見方があるが、電子放射源の酸化物陰極の活性を維持するため、陰極表面への気体分子の入射頻度を制限することを目的とする真空には、理想的には超高真空を必要とするので、条件としては後者のほうが厳しい。分子線エピタキシー装置でも事情は似ており、図4に示すように、蒸発源から出た原子と気体分子との衝突を減らすために必要な真空は、理論的には高真空でよいが、基板とその上に成長した薄膜の清浄度を維持するためには超高真空を必要とし、後者によって使用すべき圧力領域が決められる。

3. 吸着と滞留時間

固体表面に入射した分子は、図5に示すように吸着確率 s で吸着し、残りは反射する。吸着分子は表面に暫く滞留したのち脱離する。単位時間に単位表面から脱離す

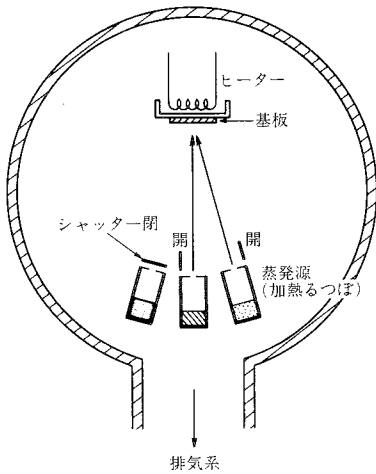
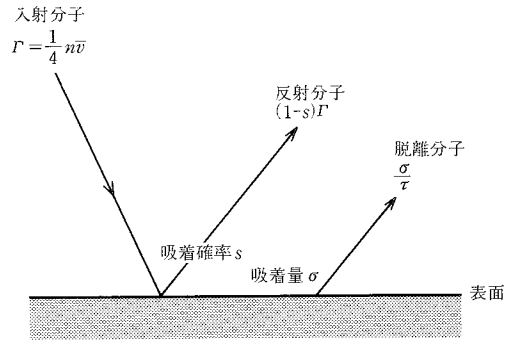


図 4 分子線エピタキシー装置の原理図

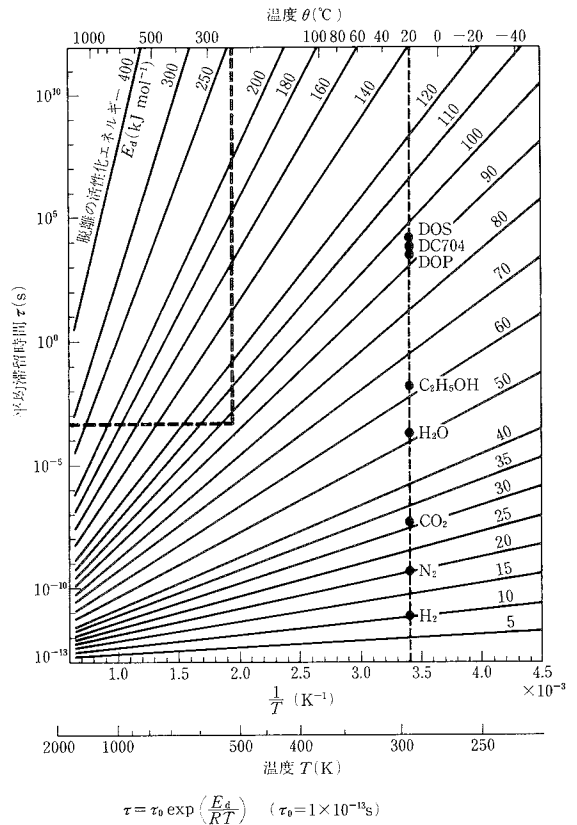
る分子の量すなわち脱離速度は、吸着量を σ とすれば $-d\sigma/dt$ であり、吸着分子の平均滞留時間を τ とすれば $-d\sigma/dt = \sigma/\tau$ となる。 τ は吸着分子の脱離の活性化エネルギーを E_a 、気体定数を R とすれば、 $\tau = \tau_0 \exp(E_a/RT)$ と表される。 τ_0 は、統計力学的には気相と吸着相の分配関数の比で決まる定数であるが、直観的には吸着分子の表面に垂直方向の振動周期とも表現され、その値は多くの場合 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ s である⁶⁾。 $\tau_0 = 1 \times 10^{-13}$ s として、 τ と T の関係を示したのが図 6 である。図には種々の気体や蒸気の 20°C での τ を示してあるが、水素、窒素、一酸化炭素の τ は極めて短かく、吸着の影響は小さい。水とエチルアルコールでは τ は $10^{-4} \sim 10^{-2}$ s であり、これらの分子の室温での平均速度が 500~300 m/s であることを考慮すると、代表的寸法 50 cm の真空容器を例にとれば、空間を飛行する時間と表面に滞留する時間と同程度となり、したがって、吸着を無視しては容器内での諸現象を理解しえないこととなる。DOS (di-2 ethyl hexyle sebacate)、DC 704 (Dow Corning 社、poly methyl phenyl siloxane)、DOP (di-2 ethyl hexyle phthalate) のように、分子量が大きく蒸気圧の低い真空ポンプ油では、 τ の値は極めて長く、分子は表面に長時間滞留して空間には僅かの時間しか留まらない。

平均滞留時間が長いことは、真空内の過渡現象に時間がかかることを意味している。たとえば、図 7 のように二つの容器 A、B を直径 $2r$ 、長さ L の導管でつなぎ、A の中に平均滞留時間 τ の分子から成る気体をためておく、時間 $t = 0$ のときに A と導管の間の弁を開くと、A から導管に入った分子の大部分は導管の内壁に入射し吸着する。分子は、 τ の滞留時間ののち脱離するが、そのときは余弦法則に従って脱離するので、A 側に向う確率と



Γ : 気体分子の入射頻度
 τ : 吸着分子の平均滞留時間
 $-\frac{d\sigma}{dt} = \frac{\sigma}{\tau}$: 吸着分子の脱離速度

図 5 表面への気体分子の入射、吸着、脱離過程



$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\tau_0 = 1 \times 10^{-13} \text{s})$$

図 6 吸着分子の平均滞留時間

B 側に向う確率とは同じである。分子は、このような過程を繰り返して徐々に B に到達し、その中に溜って行くが、系全体で分子条件が成立しており、A 内の圧力に対

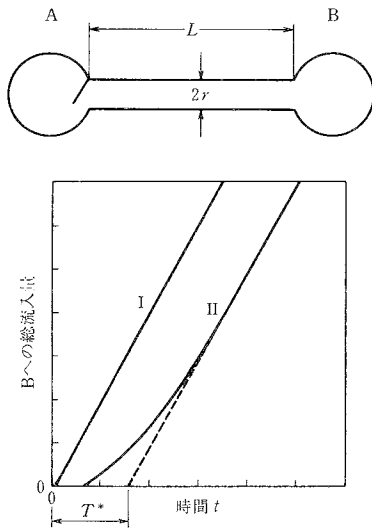


図 7 分子流の過渡現象

してB内の圧力が無視できるという条件が成立している場合には、Bの中への気体の総流入量は、図7の曲線IIに模式的に示すようになって、時間tの経過と共に漸近線に近づく。漸近線の延長が時間軸を切る点までの時間 T^* を、流れの遅延時間という。図7の曲線Iは、平均滞留時間が0sの分子の場合を示したもので、僅かの時間遅れは、分子が空間を飛ぶ場合でも少しは時間がかかることを示している。 T^* は、管の内壁の粗さ係数(真表面積/幾何学的表面積)を β とすれば、

$$T^* = \frac{1}{8} \left(\frac{L}{r} \right)^2 \left(\frac{2r}{\bar{v}} + \beta s \tau \right) \approx \frac{1}{8} \left(\frac{L}{r} \right)^2 \beta s \tau$$

となる⁷⁾。ここで、 $2r/\bar{v}$ は管の直径を分子が通過するのに要する平均の時間で、 $\beta s \tau$ より遙かに小さいから無視することができる。

この現象は、1953年にアルパート (Alpert) が超高真空の生成を示した実験に、重要な役割を果たしていた⁸⁾。アルパートは超高真空測定用電離真空計(ベアード・アルパート真空計)と全金属製超高真空バルブを作り、ガラス製装置を400~500℃の高温で十分に加熱排気することにより、超高真空を生成し、測定しようことを示したが、真空ポンプには分溜型油拡散ポンプ(ヒックマン・ポンプ)を使用し、冷却トラップは使用しなかった。装置の模式図を図8に示す。アルパートはオープン内の部分を十分に加熱排気し、真空計の脱ガスも十分に行った後、金属製バルブを閉じてベアード・アルパート真空計IとIIの示す圧力変化を比較した。当時は、油拡散ポンプの作動液もDOS, DOP,あるいは石油から蒸留した低蒸気圧の油などを使っていたので、ポンプの吸気口付近は $10^{-7} \sim 10^{-6}$ Torrの油蒸気で満ちていたものと思われ

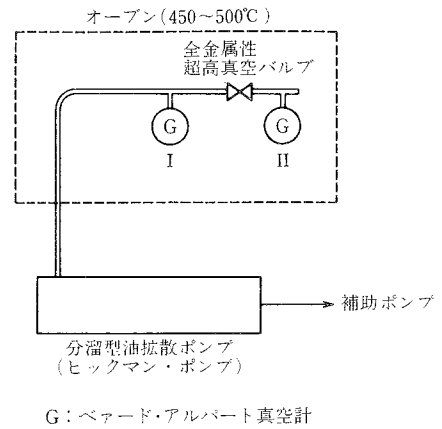


図 8 アルパートの超高真空生成の実験装置、原理図

る。それにもかかわらず、真空計Iのところでも 10^{-9} Torrの超高真空を得ることができ、その圧力を10時間にわたって維持できたことは、油蒸気とその分解生成物のポンプから真空計への流れに、遅延時間が有効に作用していたことを示している。

4. 真 空 の 質

図6から明らかのように、平均滞留時間は温度を低くするか、脱離の活性化エネルギーを大にすれば長くなる。平均滞留時間が 10^{10} s近くにもなれば、吸着分子は、事実上脱離することは無いと考えてもよいので、このような表面を作れば、それは非常に良いポンプとなる。温度を低くして平均滞留時間を長くするポンプは、クライオポンプ、クライオソープション・ポンプとして実用化されており⁹⁾、脱離の活性化エネルギーを大にするものはゲッター・ポンプである¹⁰⁾。

図9には、液体ヘリウムで冷却した4.2k, またはそれ以下の温度の低温面を持つクライオポンプの一例を示す。低温面の理論的排気速度は、吸着確率を1とすれば、気体分子の入射頻度で決まるので極めて大きく、室温の窒素で 11.8 l/s cm^2 になる。実際のポンプでは、図に示すように、低温面を室温の輻射から保護するためのバツフルが設けてあるので、排気速度はバツフルのコンダクタンスで制限される。液体ヘリウムを使用する代りに、冷凍機を使用して表面を10~20kに冷却し、低温化の不足な分は、活性炭などを用いて表面積を増やすことによって補うのが、図10に示すクライオソープション・ポンプである。クライオソープション・ポンプでも、排気速度は輻射遮蔽用のバツフルで制限を受けることが多い。冷凍機を使用するクライオソープション・ポンプは、液体ヘリウムを使用するポンプより操作性が良いので、蒸着装置をはじめ多くの真空装置に使用されている。

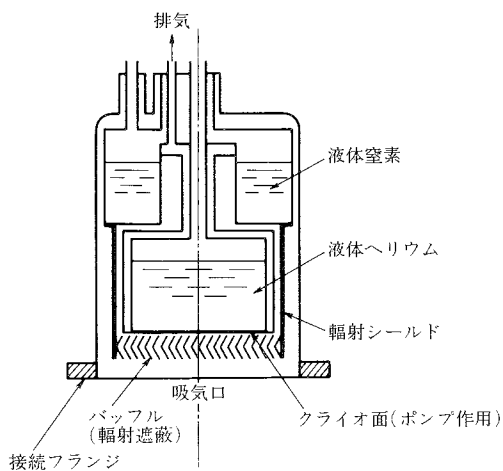


図9 クライオポンプの例. 模式図

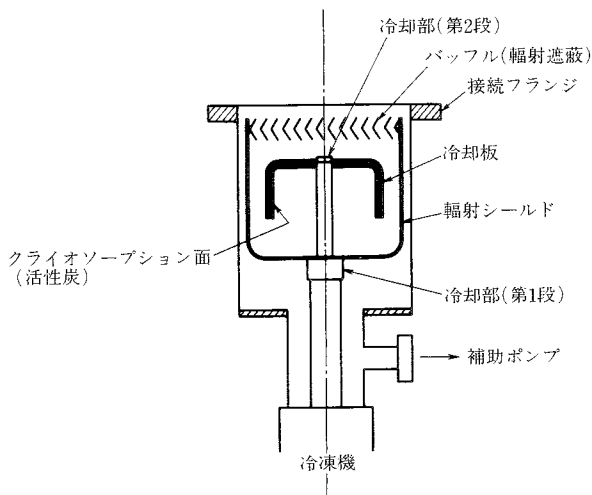


図10 機械式クライオソープション・ポンプの例. 模式図

Getter・ポンプは、主としてチタンの蒸着膜を真空容器の内壁に作り、気体分子のチタン表面での化学吸着を利用するポンプである。チタンは、チタン-モリブデン合金から直接通電によって蒸発させる図11のような方式のものが多い。チタンのほかにタンタルも使用される。ブラウン管では、排気終了後にバリウムの蒸着膜を管球内壁の小部分に作り、Getterとして作用させる(図3参照)。この点からは、ブラウン管は小さなポンプを内蔵して働かせていることになり、蛍光スクリーンの電子衝撃による放出気体や、電子銃電極からの放出気体を排気して、長寿命化をはかっているといえよう。Getterとなるような材料の表面での化学吸着の脱離の活性化エネルギーは、100~400 KJ/mol に達することが多いので、平均滞留時間も極めて長くなる。

平均滞留時間は、脱離の活性化エネルギーが小さいか温度が高いと短くなる。拡散ポンプ油の分子でも、ステンレス鋼製真空装置の普通の加熱排気温度である250℃になれば、平均滞留時間は、室温での水分子と同程度の 10^{-4} s位になることが図6よりわかる。この程度になれば、前節で述べた、流れが定常化するまでの遅延時間も短くなり、排気しやすくなる。真空装置の加熱排気には、内壁の表面層や内部に含まれている気体分子の除去という目的と共に、表面に吸着している脱離の活性化エネルギーの大きい分子の平均滞留時間を短くし、排気しやすくするという意義を持っている。

大気中に放置しておいた真空装置を組立てた直後には、内壁表面には相当量の有機分子が吸着しているものと思われる。それらは加熱排気によって取り除くことができるが、250℃加熱では、かなり長い排気時間を必要とする。図12は、超高真空中でのレーザー光照射による気体

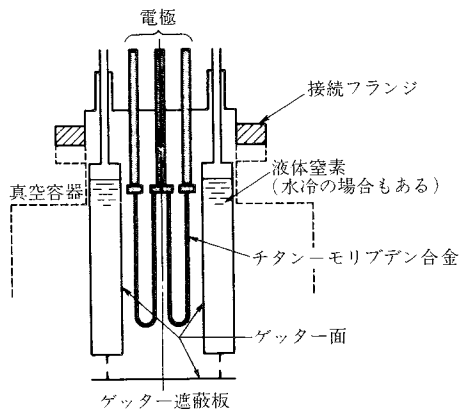


図11 チタン・Getter・ポンプの例. 模式図

放出現象を研究する装置で、ステンレス鋼製の真空容器(直径450 mm、高さ500 mm)をオリフィス(直径130 mm)を通じてスパッター・イオン・ポンプ($S_{N_2}=450$ l/s)とチタン・Getter・ポンプ($S_{N_2}=3500$ l/s)で排気している¹⁾。容器に対する排気速度は室温の窒素で1110 l/s、加熱排気(250℃、8 h)後の到達圧力は 5×10^{-11} Torrである。鏡面のシリコン(111)面を、アセトンを用いた超音波洗浄のみを行った後、この真空容器内のマニピュレーターに装着して排気し、Qスイッチ・ルビー・レーザーの光(波長694.3 nm、パルス幅25 ns、ビーム径2.8 mm、強度 3.75 J/cm²)で照射し、脱離した分子を4極子型質量分析計で測定する。ターゲットからの反射光は容器の外に逃がすようになっている。図13はレーザー側から見た装置の全容である。質量分析計の走査を高速(1.14 ms/mass)で繰り返しながら、ターゲットをレー

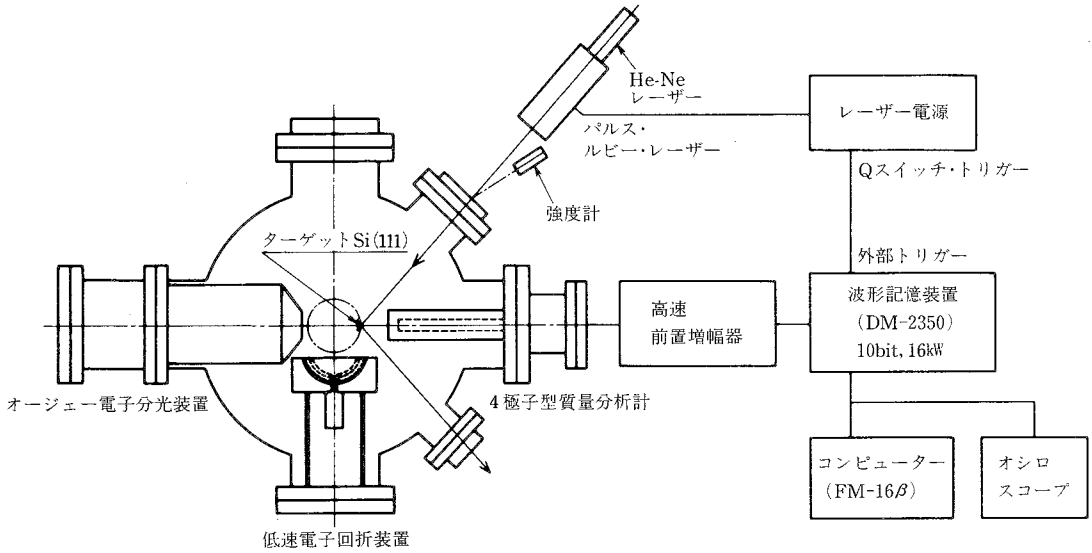


図 12 レーザー光照射による気体放出現象研究装置

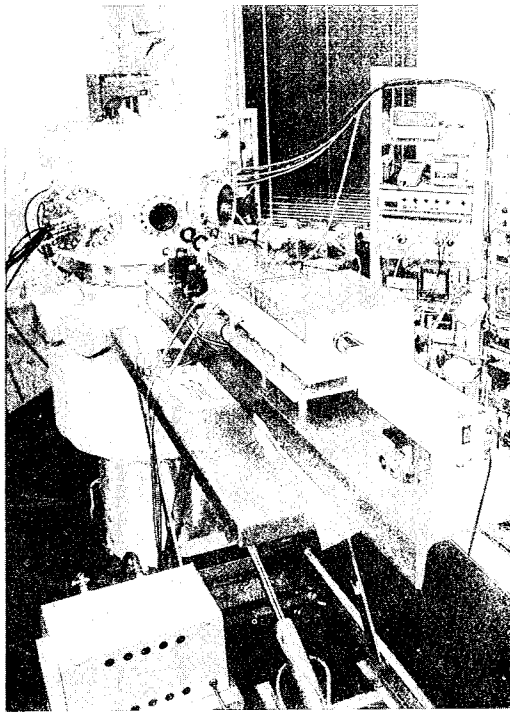


図 13 レーザー光照射による気体放出現象研究装置

レーザー光で照射すると、圧力が 5×10^{-11} Torr に達しているにもかかわらず、図 14 (a) に示すように多種類の分子が脱離する。同図の横軸は時間であり、上部にイオンの

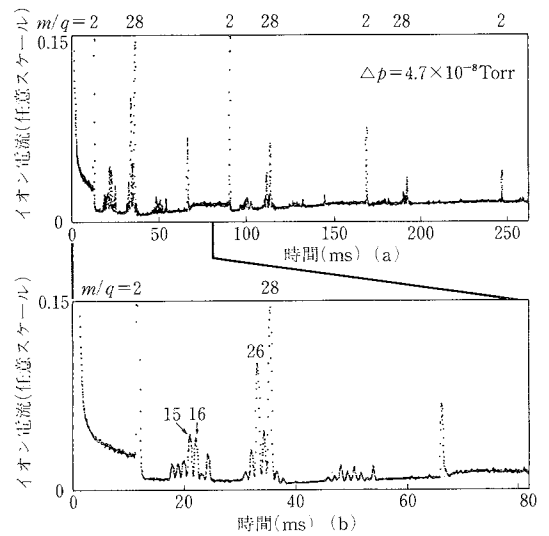


図 14 レーザー光照射による脱離気体の質量スペクトル

質量 (原子質量単位) と電荷 (単位は素電荷) の比 m/q が示してある。縦軸は各成分のイオン電流で、照射による全圧の上昇は窒素換算値で 4.7×10^{-8} Torr である。レーザー光は時間 0 のところで照射されており、時間の経過と共に同じ m/q のピークの高さが低下するのは、各成分が排気されて行く過程を示している。図 14 (b) は時間軸を拡大してスペクトルの分離を良くしたもので、 $m/q = 2, 15, 16, 26, 28$ などの量が多いことがわかる¹²⁾。

レーザー光の波長から考えて、この脱離現象は熱的なものであり、シリコン (111) 面の反射係数、シリコンの熱伝導率、比熱などから推定した表面温度は数千 K に達するから、脱離分子は、表面に存在した有機分子の分解生成物であると考えられることができる。すなわち、加熱排気をして超高真空になった真空容器の中の表面にも、なお、脱離の活性化エネルギーが大きく、平均滞留時間の長い有機分子が残存していることを示している。これらは、加熱排気を繰り返すうちに徐々に排気されて行くものと考えられ、いわゆる、真空装置が枯れるという現象の一部をなしているものと思われる。

以上に示したような諸現象をもとにして考えると、「真空の質」という表現が圧力と共に必要であることがわかる。質の良い真空とは、平均滞留時間の短い分子、不活性な分子から成る真空であり、このような状態は、きれいな真空 (clean vacuum)、ドライな真空 (dry vacuum) などと呼ばれる。質の良い真空では、表面の吸着層は成長しにくく、したがって清浄表面は汚れにくく、排気も楽である。これに対して質の悪い真空とは、平均滞留時間の長い分子、活性な分子を多量に含む真空で、ウェットな真空 (wet vacuum) と呼ばれることもある。質の悪い真空では、表面は汚れやすく、排気には加熱を必要とするなど多大の労力を要する。

真空装置の排気系では、油拡散ポンプのように、それ自身が、脱離の活性化エネルギーが大きく平均滞留時間の長い物質を保持しているものが多い。油回転ポンプの作動油の分子も、真空容器に流入すると、真空の質と到達圧力に大きな影響を及ぼす。シリコン表面のレーザー光照射の実験結果からもわかるように、真空容器の内壁表面を汚染する有機物は、高温で長時間排気しないかぎり、大抵の真空ポンプ内壁表面にも真空容器内壁表面にも存在するから、質の良い真空を生成するためには、液体窒素冷却のトラップを使用するなどして、排気系からの汚染物の真空容器への流入を阻止することが必要である。これらに比べ、クライオポンプ、クライオソープション・ポンプ、チタン・ゲッターポンプなどは、ポンプ自身の中には有機物を含んでいないので、質の良い真空を生成するためには具合が良い。この事情も、最近、クライオポンプ系統のポンプが広く使われだした理由の一つである。

5. 熱い真空

以上述べてきた真空は、室温付近の熱エネルギーを持つ分子のみを含んでいる場合であった。真空の応用範囲が広がると共に、イオンや電子などの荷電粒子や、励起中性粒子、輻射などの存在する真空が多くなってきた。スパッタリング装置、加速器、核融合研究装置などでは、すべてこのような真空であり、熱い真空 (hot vacuum)

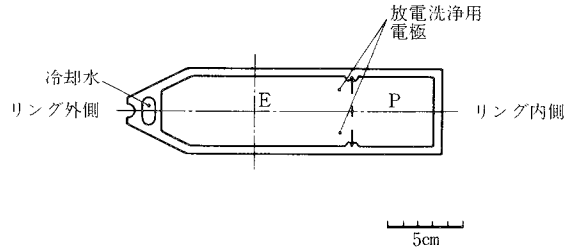


図 15 電子ストレージ・リングのアルミニウム製ダクトの断面、模式図

と呼ばれる。

高エネルギー物理学研究所放射光施設の電子ストレージ・リングを例にとると、この加速器は、図 15 のような断面を持つアルミニウム製ダクトが、直線部分と曲線部分の組み合わせで、長径 68 m、短径 50 m の楕円状につながれ、真空容器を作っている。図 16 で、E の部分を電子が通り、P の部分には偏向電磁石の周辺磁場を利用するスパッター・イオン・ポンプが組み込まれている。この加速器は、放射光の光源として使用することを目的として作られたもので、電子ビームが偏向電磁石により曲げられる部分で、ビームの切線方向に放射光を放出する。この光がダクトの内壁表面に入射すると光電子が放出され、光電子は磁場の影響を受けて内壁表面に戻って衝撃し、電子衝撃脱離により気体を放出する¹³⁾。

このように、熱い真空では、脱離の活性化エネルギーが大きくて、加熱排気の温度では平均滞留時間が短くならないような分子でも、電子やイオンの衝撃によって脱離することがある。そのため、内壁表面の加熱を十分に行うのはもとより、電子やイオンの衝撃などの非熱的手法によって、表面を清浄化することが必要である。加速器の内壁表面の清浄化には、アルゴンまたはアルゴンと酸素 (10%) の混合気体を用いたグロー放電によりイオンで衝撃する方法が、欧州原子核研究機構 (CERN) によって提案され好結果を得ている¹⁴⁾。

最も大形な熱い真空の装置は核融合研究で使われている。そのため、核融合研究ではプラズマ・壁相作用の解明が大きな課題であり、トカマク型装置では、真空容器内壁に、スパッターされてプラズマに入っても、プラズマの温度低下に及ぼす影響の小さい低原子量の材料 (炭素、チタン・カーバイド等) が使用される。内壁表面の清浄化にも、水素を使ったグロー放電、電子サイクロロン共鳴放電、低エネルギーの放電などが使われている¹⁵⁾。トカマク型装置では、プラズマを生成するために導入する水素の圧力は 10^{-4} Torr であって、この点からは超高真空装置では無いのかも知れないが、真空容器の構成と排気には、超高真空装置の手法が全面的に使われて

いる。これは、もっぱら装置の内壁表面の清浄化のためであって、それに加えて非熱的清浄化法も使われる。

今後は、このように、使用時には超高真空でなく気体を導入するが、内壁表面の清浄化のために超高真空の手法を装置の構成と排気に使用し、非熱的清浄化法も使用する装置が増加するものと思われる。非熱的清浄化法の改良と開発と共に、非熱的過程の科学的解明が、超高真空の科学に課せられた大きな課題の一つになるであろう。

以上、昭和 61 年度の本所の公開の際に行った講演を中心に、超高真空において気体分子と表面との相互作用の果たす役割について概説した。講演の準備に関してご協力いただいた、高エネルギー物理学研究所小林正典助教授、本所岡野達雄助教授、寺田啓子技官に厚く感謝の意を表する。

(1986 年 9 月 2 日受理)

参 考 文 献

- 1) E.G.Segre : From X-rays to Quarks (W.H.Freeman, 1980) (久保亮五, 矢崎裕二 訳: X線からクォークまで(みすず書房, 1982)).
- 2) 日本工業規格, 真空用語(基礎) JIS Z 8126.
- 3) 熊谷寛夫, 富永五郎編著: 真空の物理と応用(裳華房, 1970) 第2章.

- 4) P.A.Redhead, J.P.Hobson, and E.V.Kornelsen : The Physical Basis of Ultrahigh Vacuum (Chapman & Hall,1968) Chap.2 (富永五郎, 辻 泰 訳: 超高真空の物理(岩波書店, 1978)).
- 5) M.Wutz, H.Adam, and W.Walcher : Theorie und Praxis der Vakuumtechnik (Friedr.Vieweg & Sohn, 1982) Tab. 16.5.
- 6) 辻 泰 : 真空技術 林主税 編(共立出版, 1985) 第2章
- 7) G.Tominaga : Jpn. J.,Appl. Phys. 4 (1965) 129.
- 8) D.Alpert : J. Appl. Phys.24 (1953) 860.
- 9) G.F.Weston : Ultrahigh Vacuum Practice (Butterworths,1985) Chap.3. M.Wutz, H.Adam, and W. Walcher : op.cit.Kap. 8 ~10.
- 10) D.J.Harra : Vacuum Physics and Technology, eds. G.L.Weissler and R.W.Carlson (Academic Press, 1979) Chap.5. F.G.Weston : loc.cit.
- 11) 寺田啓子, 辻 泰, 岡野達雄, : 真空 29 (1986) 271.
- 12) K.Terada, Y.Tuzi, T.Okano : Proc. 10 th Intern. Vac. Congress, 6 th Intern. Conf. on Solid Surfaces, and 33 rd Natl. Symp. of Amer. Vac. Soc. (投稿中).
- 13) 小林正典 : フィジクス 7 (1986) 517.
- 14) A.G.Mathewson : Vacuum 24 (1974) 505.
- 15) 坂本雄一 : 核融合研究 55 (1986) 257.

