スループット法によるガス放出率測定技術 の検討

大田 暢彦*・斉藤 昌司**・石丸 肇***

(受付1989年12月5日, 掲載決定1990年3月3日)

Studying of Technology for Outgassing Rate Measurement by the Throughput Method

Nobuhiko OTA, Masashi SAITO and Hajime ISHIMARU

*(Yaskawa Electric Mfg. Co., Ltd., Kitakyushu-shi, Fukuoka)

** (Tokyo Electron Ltd., Nirasaki-shi, Yamanashi)

*** (National Laboratory for High Energy Physics, Tsukuba-shi, Ibaraki)

(Received December 5, 1989, Accepted March 3, 1990)

For the research of materials for use in a vacuum environment, the technology of outgassing measurement must be developed in order to obtain lower outgassing rates from the materials. We measured the outgassing rate of sample chambers and sample pieces using the throughput method. Then we studied the lowest limit on and problems involved in the measurement, and improved the measurement apparatus. The following results were obtained in this work: (1) The main factor leading to misunderstanding and determining the lowest limit was the outgassing from the Bayard-Alpert gauge. (2) In the outgassing rate measurement of the 11500 cm² sample chamber, the order of 10⁻¹⁴ Torr·l/s·cm² (at 20°C for nitrogen equivalent) was obtained using extractor gauges. (3) In the outgassing rate measurement of the 50 cm² sample piece, the order of 10⁻¹² Torr·l/s·cm² (at 20°C for hydrogen equivalent) was obtained using a new quadrupole mass spectrometer for use in extremely-high vacuum. (4) It was possible to determine the outgassing rate of each gas component by measuring partial pressure.

1. はじめに

真空システムを作製しようとするとき, その設計段階において重要なデータの一つは材料からのガス放出率であり, そのシステムを使う立場のものはあらかじめその材料の処理条件, 排気時間に応じたガス放出率を出来るだけ正確に把握している必要がある。また, 真空用材料の開発において, 材料からのガス放出率の低減化を進める基盤技術としてガス放出率測定技術の開発は必要不可欠のものと言える。

我々はスループット法により, (1)チェンバー形状の試料, (2)小切片(ピース)の試料のガス放出率をそれぞれ測定し, 測定限界および測定上の問題点などについて検討し改良を行った。

一般にスループット法を用いた測定における装置の測定限界は, スループット法の式により次のように決まる。

- (1) 試料がチェンバーの場合
ゲージの動作範囲と下流側チェンバーのガス放出率。
- (2) 試料がピースの場合
(1)に加えて上流側チェンバーのガス放出率。

したがって, 測定限界をできるだけ低くするため, 装置を構成する真空チェンバーは出来るかぎりガス放出率の低い材料で作製することが望ましい。

* 安川電機製作所 (〒806 福岡県北九州市八幡西区藤田2346)

(高エネルギー物理学研究所受託研究員)

** 東京エレクトロン(株) (〒407-01 山梨県韮崎市穂坂町三ツ沢650)

(高エネルギー物理学研究所受託研究員)

*** 高エネルギー物理学研究所 (〒305 茨城県つくば市大穂1-1)

次に一般にいられている測定上の問題点、注意点について述べる。まず、ガス放出率測定に限らず真空を作る上においても重要なことは、真空計測すなわちゲージの信頼性である。ガス放出率測定に誤差を与える要因の一つに、このゲージ自身からのガス放出と排気作用さらにガス反応があげられている¹⁾。実際に、各種表面処理を施したアルミニウム合金チェンバーにおいて、ベーキング後におけるガス放出率は、ほとんどが 10^{-13} Torr・l/s・cm²のオーダーの値を示したが²⁾、これは後で述べるようにゲージのガス放出率が測定限界を決定しているためであった。また、本来ならばそれぞれの残留ガス成分に対して分圧を測定し、ガス放出率を求めることが望ましい。このとき、使用する分圧計は四重極質量分析計(QMS)が最も優れているとされているが、特にベーキング後ではQMS自身からのガス放出が多く試料からの放出ガスと分離できず、何を測っているのか分からないという問題があった³⁾。また、サンプルピースの測定においてはサンプルを含む試料室の壁の影響が誤差を導くと言われている¹⁾。

我々は、本研究において、測定データの信頼性について検討し、さらに測定限界を下げるため最も大きい問題点を明らかにし、それを解決するべく測定技術の開発を主たる目的とした。

2. 実験装置

2.1 サンプルチェンバー

Fig. 1に測定系の概略図を示す。装置は、EX押し出し⁴⁾によるアルミニウム合金で作製された上流側試料取り付けチェンバー(表面積: 800 cm², 体積: 1 l)と下流側チェンバーからなる。排気系はステンレス製の200 l/sと50 l/sの二段のターボ分子ポンプ、およびロータリポンプからなる。それぞれスピニングロータゲージで較正された真空計がオリフィスの上流および下流側に設けられている。ガス放出率は6 mmφのオリフィスによりスループット法で決められる。装置全体は、20°C±

Fig. 1 Schematic diagram of apparatus for sample chamber.

0.5°Cの恒温槽に入れられている。サンプルチェンバーは一樣に円筒型であり、いずれも長さ200 cm, 内径18 cm, 表面積11500 cm²である。ICF-253コンフラットフランジが試料の片端に溶接されており、EX加工⁵⁾されたA1050円形板が別の端に溶接されている。

2.2 サンプルピース

試料を含む装置のチェンバーのガス放出率をできるだけ小さくするために、測定装置はステンレスよりガス放出率が一桁以上小さいと報告されている⁶⁾ EX加工を施したアルミニウム合金で作製された。

装置の概略図をFig. 2に示す。装置は二つのチェンバーから構成されている。サンプルピースは上流側チェンバー(表面積: 2600 cm², 体積: 5.9 l)に配置される。ガス放出率は6 mmφのオリフィスを用いてスループット法によって決められる。全圧はスピニングロータゲージで較正されたB-Aゲージを用いて測定される。このときゲージの放射による試料の温度上昇を防ぐため、上流側のゲージは試料から見えない位置に取り付けた。分圧は 10^{-13} Torr 台の極高真空で使用するのに開発されたイオン源分離型QMS^{5,7)}を上流側チェンバーに取り付けて測定する。試料の温度は0.5 mmφのステンレスシース熱電対で測定される。主排気は背圧側に50 l/sのターボ分子ポンプを持つ磁気ベアリングタイプの300 l/sのターボ分子ポンプを使用した。

3. 実験

試料のガス放出率は次に示すスループット法の公式にしたがって決められる。

- (1) サンプルチェンバーの場合

$$Q_s = C(P_u - P_d) \quad (1)$$

$$= q_s \cdot A_s \quad (2)$$

- (2) サンプルピースの場合

$$Q = C(P_u - P_d) \quad (3)$$

$$= Q_s + Q_b \quad (4)$$

ここで、

Fig. 2 Schematic diagram of apparatus for sample piece.

Q_s , Q , そして Q_b はそれぞれ試料のガス放出率, オリフィスを通る総ガス放出率, そしてサンプルピースを入れないときのいわゆるバックグラウンドのガス放出率 ($\text{Torr}\cdot\text{l/s}$),

q_s は試料の単位表面積当たりのガス放出率 ($\text{Torr}\cdot\text{l/s}\cdot\text{cm}^2$),

A_s は試料の表面積 (cm^2),

C はオリフィスのコンダクタンス (3.3 l/s , 20°C 窒素換算),

P_u と P_d はそれぞれ上流側および下流側の圧力 (Torr),

である。

各々の測定において, これらのシステムは 20°C で 10 時間の初期排気後, 140°C あるいは 150°C で 20 時間のベーキングが行われる。ベーキング後さらに 20°C で排気が続けられる。

4. 結 果

4.1 ゲージおよび QMS からのガス放出率

ベーキング後のサンプルチャンバーのガス放出率は前にも述べたように, サンプルチャンバーのガス放出に依存するのではなく, ゲージ自身からのガス放出に依存しているのではないかと考えた。ゲージからのガス放出率の測定は, Fig. 1 の測定装置において試料チャンバは取付けずに, 盲フランジを組込んで行った。オリフィス上流側には B-A ゲージとエクストラクタゲージが 1 台ずつ, オリフィスの下流側にはエクストラクタゲージが 1 台取付けられている。B-A ゲージとエクストラクタゲージのフィラメントの材質は, それぞれタングステンおよびトリアコートされたイリジウムである。さらにエミッション電流はそれぞれ, $0.4\sim 4\text{ mA}$ および 1.6 mA である。オリフィス上流側の 2 台のゲージは互いの相互作用を減らすために, 各々のフィラメントやグリッドが互いには直接見えない位置になるように取付けた。この 2 台のゲージが共に ON の状態にあるとき, 圧力の指示値はほとんど等しい。オリフィスの上流側での全ガス放出率を Q とすると,

$$Q = Q_C + Q_B + Q_E = C(P_{Eu} - P_{Ed}) \quad (5)$$

ここで Q_C , Q_B および Q_E はそれぞれ取付チャンバー, B-A ゲージおよびエクストラクタゲージからのガス放出率である。 P_{Eu} と P_{Ed} は上流および下流側のエクストラクタゲージの圧力であり, C はオリフィスのコンダクタンスである。次に B-A ゲージを OFF した場合に, 上流および下流側のエクストラクタゲージが P'_{Eu} および P'_{Ed} の圧力をそれぞれ示したとする。このとき取付チャンバーおよびエクストラクタゲージからのガス放出率

は,

$$Q_C + Q_E = C(P'_{Eu} - P'_{Ed}) \quad (6)$$

このとき B-A ゲージからのガス放出率 Q_B は, (5), (6) 式より

$$Q_B = C((P_{Eu} - P_{Ed}) - (P'_{Eu} - P'_{Ed})) \quad (7)$$

また B-A ゲージを ON の状態に戻し, 上流側のエクストラクタゲージを OFF した場合に, 上流, 下流側のゲージの圧力がそれぞれ P''_{Bu} および P''_{Ed} を示したとする。このときの上流側のエクストラクタゲージからのガス放出率は,

$$Q_E = C((P_{Eu} - P_{Ed}) - (P''_{Bu} - P''_{Ed})) \quad (8)$$

さらに取り付けチャンバーからのガス放出率は(5)式および(7), (8)式で求めた Q_B , Q_E を用いて,

$$Q_C = Q - Q_B - Q_E \quad (9)$$

として求められる。

このようにして求められた B-A ゲージ (Q_B) およびエクストラクタゲージ (Q_E) からのガス放出率と, オリフィス上流側の全ガス放出率 Q を Fig. 3 に示す。ベーキング前およびベーキング中においては, Q は, $6\sim 7\times 10^{-7}\text{ Torr}\cdot\text{l/s}$, Q_B および Q_E は, $1\sim 2\times 10^{-7}\text{ Torr}\cdot\text{l/s}$, さらに取付チャンバーからのガス放出率 Q_C は $3\times 10^{-7}\text{ Torr}\cdot\text{l/s}$ である。ベーキング後 40 時間排気後において, Q は, $1.7\times 10^{-9}\text{ Torr}\cdot\text{l/s}$, Q_B は $1.4\times 10^{-9}\text{ Torr}\cdot\text{l/s}$, Q_E は $6.3\times 10^{-10}\text{ Torr}\cdot\text{l/s}$ を示した。ただし, $Q_B + Q_E > Q$ となっており, 取付チャンバーからのガス放出率 Q_C が負の値を示す。これについては考察の項で述べる。ベーキング後, エクストラクタゲージのガス放出率は, B-A ゲージのガス放出率の 30~50% 低い値を示しており, エクストラクタゲージは B-A ゲージよりガス放出率が低い領域での測定に適している事が明らかになった。

Fig. 4 にエクストラクタゲージ, 極高真空用開発されたイオン源分離型 QMS およびサンプルチャンバーからのガス放出率を示す。このときのサンプルチャンバーは EX 鏡面加工された A6063 材であり, Fig. 1 の装置の上流側に QMS を取り付け, 全圧ゲージにはエクストラクタゲージを用いた。ベーキング直前において, オリフィス上流側の全ガス放出率 Q , エクストラクタゲージのガス放出率 Q_E , QMS のガス放出率 Q_Q およびサンプルチャンバーのガス放出率 Q_s はそれぞれ, $3.4\times 10^{-6}\text{ Torr}\cdot\text{l/s}$, $1.1\times 10^{-6}\text{ Torr}\cdot\text{l/s}$, $4.8\times 10^{-7}\text{ Torr}\cdot\text{l/s}$ および $1.7\times 10^{-6}\text{ Torr}\cdot\text{l/s}$ である。ベーキング後 50 時間では, Q は $4.8\times 10^{-10}\text{ Torr}\cdot\text{l/s}$, Q_E は $8.6\times 10^{-11}\text{ Torr}\cdot\text{l/s}$, Q_Q は $5.6\times 10^{-11}\text{ Torr}\cdot\text{l/s}$, Q_s は $3.3\times 10^{-10}\text{ Torr}\cdot\text{l/s}$ である。この Q_E の値は, B-A ゲージと共に測定したときに示した値の約 1/7 である。ここでは, QMS からのガス放出

Fig. 3 Outgassing rate of Bayard-Alpert gauge and extractor gauge.

Fig. 4 Outgassing rate of extractor gauge and quadrupole mass spectrometer.

率がエクストラクタゲージからのものよりもさらに低い値を示している。

4.2 エクストラクタゲージによるサンプルチャンバーのガス放出率

Fig. 1 に示す装置を用いて測定されたシリカコート材と EX 押し出された99.99%の高純度アルミ材の単位表面積あたりのガス放出率在 Fig. 5 に示す。ベーキング前においては、シリカコート材は 10^{-8} Torr $\cdot$ l/s $\cdot$ cm 2 台にある。また EX 押し出された99.99%の高純度アルミ材は 10^{-11} Torr $\cdot$ l/s $\cdot$ cm 2 台にある。一方、ベーキング後のガス放出率は、シリカコート材は 10^{-13} Torr $\cdot$ l/s $\cdot$ cm 2 台を、高純度アルミ材は 10^{-14} Torr $\cdot$ l/s $\cdot$ cm 2 台を示している。ここに、エクストラクタゲージによる測定では B-A ゲージによる測定よりも、1 桁低い試料のガス放出率が得られることが分かった。

4.3 サンプルピースのガス放出率測定

サンプルピースはアルミニウム合金 (A6063) EX 押し出しパイプ (内径92 mm, 肉厚4 mm) にタフラム処理[®]を施したものを Fig. 6 のように a の長さを変えて (処理表面積56.5 cm 2 , 113 cm 2 , 452 cm 2 , 678 cm 2) 切り出して供試した。尚、切り出し面は装置チャンバーと同じ EX 加工を施してある。比較のため同様にタフラム処理された二つのチャンバー (処理表面積2225 cm 2 , 11500 cm 2) も用意した。これらのサンプルチャンバーのガス放出率は、Fig. 1 に示した装置を用いて測定し

Fig. 5 Outgassing rate of sample chambers measured with Bayard-Alpert gauge (BAG) and extractor gauge (EG).

Fig. 6 Shape of a sample piece: 56.5 cm 2 ($a=2.5$ cm), 113 cm 2 ($a=5$ cm), 452 cm 2 ($a=10$ cm, two pieces), 678 cm 2 ($a=15$ cm, two pieces).

た。

4.3.1 全圧測定

排気のある時点での試料のガス放出率 Q_s が Fig. 7 に示される。ベーキング前9時間排気した時点、ベーキング中18時間排気した時点、ベーキング後は30時間排気した時点でのそれぞれのガス放出率を、試料の表面積に対してプロットしたものである。図中の直線は、 $4Q_s/4A_s = 1$ を表している。ベーキング前、ベーキング中は、 Q_s は A_s に比例している。ベーキング後は、サンプルチャンバーとサンプルピースのうち表面積の大きい試料については表面積に比例しているが、表面積の小さい試料についてはその Q_s は A_s に比例していないようである。このことは、ゲージからのガス放出による。ゲージからのガス放出の寄与については次の分圧測定で議論される。

4.3.2 分圧測定

QMS による分圧測定は B-A ゲージからの放出ガス成分を明らかにした。Fig. 8 はバックグラウンドのベーキング後の残留ガスマススペクトルである。ゲージ OFF 後の上流側の H_2 のピークは2/3に、CO および

Fig. 7 Outgassing rate of samples (Q_s) vs surface area (A_s). The straight line is $\Delta Q_s / \Delta A_s = 1$.

CO₂のピークは1/7に減少している。

ゲージをON またはOFF したときの試料からのベーキング後の主なガス成分 i のガス放出率 Q_i を Fig. 9 に示す。ここに示す Q_i は試料無しときの Q_i を試料を入れているときの Q_i から差し引いている。この図から分かるように、ベーキング後30時間排気した時点で、ゲージON のときの主放出ガス成分は H₂ と CO である。しかし、ゲージをOFF した後は、H₂ は1/3に、COは1/10以下までに減少し、さらに主放出ガス成分は H₂ のみになる。ここで注目されるのはこのベーキング後の H₂ が試料の表面積に比例したガス放出率になっていることである。(試料表面積56.5 cm² の M/e=28 のガス放出率が異常に大きいのはリークのためである。)

5. 考 察

5.1 2 台のゲージの相互作用

B-A ゲージとエクストラクタゲージのガス放出率の測定の際に、取付チェンバからのガス放出率が負の値を示したことは、2つのゲージの電極が直接見えない位置にあったにもかかわらず、それらの間で相互作用があったためだと考えられる。ここで、オリフィス上流側のゲージが2台ともにON の状態にあるとする。このときのB-A ゲージからのガス放出率を $Q_B(2)$ 、エクストラクタゲージからのガス放出率を $Q_E(2)$ とする。またオリフィス上流側でゲージが1台だけON の状態でのガス放出率を $Q_B(1)$ 、 $Q_E(1)$ とする。ゲージ間での相互作用がそれぞれのゲージからのガス放出率の増大をもたらすとする、次の関係が成り立つ。

$$Q_B(2) > Q_B(1), Q_E(2) > Q_E(1). \quad (10)$$

取付チェンバからのガス放出率 Q_C はゲージがON あ

Fig. 8 Residual gas mass spectra of background (the upstream chamber without sample pieces).

Fig. 9 Outgassing rate of main gas component after baking during gauge on and off. The numbers in the figure are M/e.

るいはOFF の状態でも変化せず一定であるとする。オリフィス上流側で2台のゲージが共にON の状態のときオリフィス上流側の全ガス放出率は、次式で与えられる。

$$Q = Q_C + Q_B(2) + Q_E(2) \quad (11)$$

次にB-A ゲージをOFF した場合に、オリフィス上流側の全ガス放出率 Q' は、

$$Q' = Q_C + Q_E(1) \quad (12)$$

(10)式の関係から、(11)式-(12)式はB-A ゲージからのガス放出率よりも大きい。すなわち、

$$Q_B(2) + Q_E(2) - Q_E(1) > Q_B(2) > Q_B(1). \quad (13)$$

よって前に示した(7)式は $Q_B(1)$ あるいは $Q_B(2)$ ではなく、 $Q_B(2) + Q_E(2) - Q_E(1)$ の値を与えていたことになる。同様の考え方を、エクストラクタゲージに適用すると、(8)式が与えるのは $Q_E(1)$ あるいは $Q_E(2)$ ではなく

$$Q_E(2) + Q_B(2) - Q_B(1) > Q_E(2) > Q_E(1). \quad (14)$$

さらに前記(9)式は取付チェンバのみからのガス放出率

Q_C を与えていたのではなく、(11)式-(13)式-(14)式の関係を与えていた。すなわち、

$$Q_C = (Q_E(2) - Q_E(1)) - (Q_B(2) - Q_B(1)) < Q_C. \quad (15)$$

取付チェンバのガス放出率がゲージの相互作用の寄与分より小さいとすると次式が成立し、

$$Q_C < (Q_E(2) - Q_E(1)) + (Q_B(2) - Q_B(1)). \quad (16)$$

したがって観測される取付チェンバからのガス放出率 Q_C は負となる。

5.2 測定に与えるゲージのガス放出の影響

Fig. 2 に示す装置においても QMS によって B-A ゲージからのガス放出率 Q_B が求められた。求められたゲージからの H_2 と CO のガス放出率は、それぞれ H_2 と CO の分圧と正の相関を示している (Fig. 10)。すなわちゲージからのガス放出率は圧力によって変化していることが分かる。この Q_B を試料 56.5 cm^2 のガス放出率曲線にプロットしたものが Fig. 11 である。この図からベーキング前 9 時間の時点では、 Q_B は Q_s よりも一桁以上小さいが、ベーキング後は逆に Q_B は Q_s よりも大きくなっている。このことは、ベーキング前ではゲージのガス放出の影響は無視できるが、ベーキング後は無視できないことを示している。この結果は他のテストピースの測定でも同様であった。さらに、前にも示したように Q_B はそれぞれの測定において変化している。したがって、単純にバックグラウンドのガス放出率を差し引くというやり方では正しいガス放出率は得られないということを意味している。

5.3 残留ガスの種類とガス放出率

従来の QMS によれば、QMS 自身からのガス放出が多く、試料からの放出ガス成分に対するガス放出率を決定することは困難であった。したがって、これまでは N_2 換算された全圧によって試料のガス放出率を表してきた。今回、極高真空中に開発されたイオン源分離型 QMS を用いることにより、試料からの放出ガス成分に

対するガス放出率を測定することが可能となった。したがって、今後は各放出ガス成分に対して、感度校正された分圧を測定し、さらに各放出ガス成分に対するオリフィスのコンダクタンスを用いてガス放出率を求めることが望ましい。

例えば、本報告で示した試料ではベーキング前後の主な放出ガスはそれぞれ H_2O , H_2 であるから、コンダクタンスは 20°C 換算でそれぞれ 4.2 l/s , 12.4 l/s を用いる必要がある。さらに、 H_2O , H_2 に対するゲージおよび QMS の感度校正を行ってガス放出率を求める必要がある。 H_2 の N_2 に対する電離真空計の相対感度は約 0.49 と言われているので⁹⁾、ベーキング後のガス放出率を H_2 換算に直せば N_2 換算に対するガス放出率の約 8 倍となるわけである。

6. ま と め

スルーブット法によりサンプルチェンバーおよびサンプルピースのガス放出率を測定した結果、以下のことが明らかになった。

① データの誤差を導き、さらに測定限界を決定する最も大きい原因は、ゲージからのガス放出であることが確認された。

② サンプルチェンバーのガス放出率測定において、エクストラクタゲージを用いて、 $10^{-14} \text{ Torr} \cdot \text{l/s} \cdot \text{cm}^2$ (20°C , N_2 換算, 試料表面積 11500 cm^2) のオーダの測定が可能となった。

③ サンプルピースのガス放出率測定において、極高真空中に開発されたガス放出率の低い QMS を用いて、 $10^{-12} \text{ Torr} \cdot \text{l/s} \cdot \text{cm}^2$ (20°C , H_2 換算, 試料表面積 50 cm^2) のオーダの測定が可能となった。

Fig. 10 Outgassing rate of Bayard-Alpert gauge.

Fig. 11 Outgassing rate curve of the test piece with the surface area of 56.5 cm^2 . The asterisks in the figure represent the outgassing rate of Bayard-Alpert gauge.

④ 分圧測定によって各ガスの成分についてガス放出率を明らかにすることが可能となった。

しかし、サンプルチェンバー測定において、酸化被膜厚さや表面の形態などの表面特性とガス放出率との相関関係が十分に解明されていない。今後は、この装置を駆使してこの関係を明らかにしてゆきたい。また、サンプルピースの測定において、今回の試料については同一材料（タフラム処理）のサンプルピースとサンプルチェンバーのガス放出率がほぼ表面積に比例することが考えられることから（Fig. 7 と Fig. 9 参照）。試料室の壁の影響なく測定がなされたと考えられ、この方法で有益なデータが得られることが分かった。しかし、例えば吸着性の大きい放出ガスを持つ試料などについては、壁への吸着が測定の誤差を生むことは十分考えられるため、今後さらに他の試料についても検討してゆくつもりである。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導ご協力を頂いた、(財)

真空科学研究所渡辺文夫氏、高エネルギー物理学研究所百瀬丘助教授、金澤健一助手に深く感謝します。

〔文 献〕

- 1) 谷田和雄：「真空システム工学—基礎と応力—」，養賢堂（1977）。
- 2) 斎藤昌司，百瀬丘，石丸肇，KEK Report 89-2（1989）159。
- 3) 水野元，表面処理研究，第1巻，第6号（1983）8。
- 4) H. Ishimaru, J. Vac. Sci. Technol. **A2** 8(1984) 1170。
- 5) H. Ishimaru, J. Vac. Sci. Technol. **A7** (1989) 2349。
- 6) J. R. Chen, C. H. Lee, J. C. Chen, H. L. Hsieh, and Y. C. Liu, J. Vac. Sci. Technol. **A5** (1984) 3422。
- 7) F. Watanabe and H. Ishimaru, J. Vac. Sci. Technol. 投稿中。
- 8) タフラム処理とは、アルミニウムまたはその合金に硬質陽極酸化被膜を施し、その多孔性被膜にテフロンを含浸およびコーティングし、テフロンを融着させる加工法。
- 9) 真空ハンドブック改定版：日本真空技術株式会社編集。