極高真空の発生技術について

松 井 豊, 山 川 洋 幸

日本真空技術協会 茅ヶ崎市萩園 2500

(1991 年 7 月 11 日 受理)

Generation Techniques of Extremely High Vacuum

Yutaka MATSUI and Hiroyuki YAMAKAWA

ULVAC JAPAN, Ltd., 2500 Hagisono, Chigasaki, Kanagawa 253

(Received July 11, 1991)

Synopsis:

It passed more than 30 years since the ultra-high vacuum technique was developed. The ultimate pressure available in an ultra-high vacuum system gradually decreased with the advent of sputter ion pumps (SIP), turbomolecular pumps (TMP) and cryopumps (CP), but still remains in the range of 10^{-9} Pa now. Recently there are increasing number of reports for the generation of extremely high vacuum (XHV), which corresponds to the pressure less than 1×10^{-10} Pa. The vacuum pumps used for the generation of XHV are liquid-nitrogen cooled sublimation pumps, liquid-helium and liquid-nitrogen cooled cryopumps, and helium-refrigerator cooled cryopumps. They are closely related with cryogenic engineering. We summarize recent successful works for the generation of XHV. The production technique of XHV is advancing steadily, but total and partial pressure gauges which can measure such low pressure without disturbing vacuum condition have not been developed yet, and they are strongly demanded.

1. はじめに

最近、極高真空という言葉が、真空技術の中で良く使われるようになってきている。極高真空をキーワードにして文献を検索すると 1985 年までは年に 2~3 件程度であったものが、1986 年を境にして急激に増加し、最近では年に 10 件以上の文献が現れるようになってきた。これは、極高真空に対する意識の向上と極高真空が手の届く範囲に入ってきたことによるものであろう。特に、1988 年よりは、科学技術庁の科学技術振興調整費による「極高真空の発生、計測、利用に関する研究」がスタートしたことも、極高真空に対する関心を呼び起こす一因となっている。極高真空は、日本では 1×10^{-9} Pa 以下の圧力とされることが多いが、アメリカ真空学会 (AVS) では、Extreme Ultra-high Vacuum は、 1×10^{-10} Pa 以下の圧力と定義されている。しかしながら、実際に 1×10^{-10} Pa 以下の圧力を

信頼性よく測定できる真空計は市販されておらず、現在最も低い圧力まで測定できるといわれている真空計はエクストラクター真空計であり、測定限界は 1×10^{-10} Pa とされている。

一方、超高真空 ($10^{-6} \sim 10^{-9}$ Pa) の技術は、1950 年代における Bayard と Alpert による X 線効果を小さくして、より低い圧力の測定を可能にした電離真空計 (B-A 真空計) の発明と真空焼きだし (ベークアウト) の導入により現実的なものとなった。以後、スパッターイオンポンプ (SIP)、クライオポンプ (CP)、ターボ分子ポンプ (TMP) の発明と改良により、実際に使用可能な真空の圧力は次第に下がってきたが、到達圧力は 10^{-9} Pa 台に留まっているのが現状である。

極高真空の発生には、極高真空まで排気能力を維持できるポンプと放出ガスの少ない真空材料の開発が必要である。また、極高真空の発生を確認するために、 1×10^{-10} Pa 以下の低い圧力 (気体分子密度) を測定

できる真空計が必要となる。以下では、真空技術の観点からの極高真空の発生と、低温技術に関連した最近の極高真空の発生事例についてのべる。

2. 極高真空での真空ポンプの排気能力

真空容器に真空ポンプを取り付けて、容器に対する排気速度が S の場合、到達圧力 P_u は、一般に、

$$P_u = (Q_w + Q_i) / S \quad (1)$$

で与えられるとしている。ここで、 Q_w は、真空容器（チェンバー）内壁からの気体放出速度、 Q_i は、外部からの気体の侵入や導入である。しかしながら、ポンプ自身からの気体放出量（逆流量）が無視できない極高真空領域では、ポンプの吸入口での到達圧力 P_o は、

$$S_p P_o = Q_p + Q_H + Q_c \quad (2)$$

となる。ここで、 S_p はポンプの固有排気速度、 Q_p はポンプ本体からの気体放出速度、 Q_H はポンプが収納されているケースからの気体放出速度、 Q_c はポンプの吸入口から流れ込んでくる気体の量である。(2) 式を書き変えると、

$$P_o = (Q_c / S_p) \times \{1 + (Q_p + Q_H) / Q_c\} \quad (3)$$

となり、ポンプは真空容器に対して実効排気速度

$$S'_p = S_p / \{1 + (Q_p + Q_H) / Q_c\} \quad (4)$$

を持つことになる。このことにより、より低い圧力を得るためには、大きな排気速度のポンプを使用し、真空容器からの放出ガスを低減するだけでなく、ポンプ本体およびポンプケースからの放出ガス量をできるだけ小さくする必要がある。

現在の技術では真空容器の加工と表面処理に充分注意を払い、真空焼き出しを長時間行った後に得られる単位面積当りの気体放出速度は $1 \times 10^{-10} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 程度である。外部からの気体の侵入や導入が容器内壁からの放出ガスに比べて小さい場合を考えてみよう。極高真空領域まで $0.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の固有排気速度を維持できるポンプで 0.3 m^2 の表面積（体積 $\sim 15 \text{ l}$ ）の容器を排気して $1 \times 10^{-10} \text{ Pa}$ 以下の到達圧力を得るには、ポンプ自身とポンプケースを加えた気体放出は、 $3 \times 10^{-11} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$ 以下である必要がある。この値は、上記の小さな気体放出速度の内表面を持つ開口径 20 cm 、高さ 30 cm のポンプケースからの気体放出 ($2.2 \times 10^{-11} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$) とほとんど同じ値となり、ポンプ自身からの気体放出は、非常に小さなものでなければならない。

超高真空から極高真空領域の圧力での信頼性のある排気速度と気体放出速度の測定法として、コンダクタ

ンス変調法が提案され、チタンサブリメーションポンプの実効排気速度の測定が行われた^{1,2)}。その結果、チタンサブリメーションポンプとスパッタイオンポンプの複合排気系では、 10^{-9} Pa 台の圧力のときの実効排気速度が、 10^{-8} Pa 以上の圧力のときの $1/3$ 程度にまで減少することが見出された。この実験により、極高真空に近い圧力領域では、ポンプ自身、およびポンプケースからの放出ガスが、ポンプの排気能力と到達圧力に大きな影響を及ぼしていることが確認された。

ターボ分子ポンプでは、翼とステーターとの隙間を通しての排気口側から吸気口側に向かう気体の逆拡散と、翼とステーターからの気体放出により到達圧力は $1 \times 10^{-9} \text{ Pa}$ 程度に止まっている。また、スパッタイオンポンプ (SIP) では、 10^{-9} Pa 台で放電電流が急激に減少し、 10^{-10} Pa 台の圧力では放電の維持が非常に困難になる。油拡散ポンプ (DP) は、蒸気圧の低い拡散オイルと液体窒素トラップの使用により $3 \times 10^{-9} \text{ Pa}$ 程度の到達圧力が得られている。ここで、液体窒素トラップは、拡散オイル蒸気の逆流の阻止とともに、ポンプ吸気口部の冷却（水冷）されている部分、すなわち焼き出しを充分行えない部分やポンプ側から放出された水や二酸化炭素等の気体が真空容器へ侵入するのを防ぐ働きをしている³⁾。

現在までの時点で、主排気ポンプとして単独で用いて $1 \times 10^{-10} \text{ Pa}$ 以下の到達圧力が得られたのは、液体窒素冷却のチタンサブリメーションポンプとクライオポンプだけである。クライオポンプや液体窒素冷却のサブリメーションポンプは、低温の表面を利用することにより気体の放出が少なく、極高真空の低い圧力まで排気能力を維持できるから、ポンプケースからの放出ガスを低減できれば極高真空用ポンプとして有望である。

3. 極高真空の圧力（気体分子密度）の計測

10^{-2} Pa 台以下の真空の圧力の測定には、一般に気体分子を電離してイオンの量を電流の形で計測する方法が用いられている。気体の電離現象を利用した真空計は、熱陰極型電離真空計と冷陰極型電離真空計に分けられる。熱陰極型真空計は、熱電子陰極（フィラメント）、陽極（グリッド）、集イオン電極（イオンコレクター）からなり、加熱されたフィラメントから放出された熱電子が、グリッドに向かって飛行する間に気体をイオン化し、イオンコレクターで捕集されたイオンの量により空間の気体分子密度が測定される。この

Fig. 1 Sectional view of an extractor gauge mounted on a flange.⁴⁾

形式の真空計では、電子がグリッドに入射するときに発生する軟X線がイオンコレクターで引き起こす光電効果の量により低圧側の測定限界が決まってくる（X線限界）。このX線限界を下げるために様々な工夫がなされた。例えば、細線のイオンコレクターをグリッド部の中心に置いた B-A 真空計、さらにグリッド籠内に変調電極を設け電力を変化させてイオン電流とX線効果による電流を識別するもの（変調型 B-A 真空

計）、また、イオンコレクターをグリッド部の外において、イオンをオリフィスを通して引き出すことによりイオンコレクターがグリッドを見込む立体角を小さくするエクストラクター真空計（Fig. 1）、そして、グリッド部で作られたイオンを偏向電極で引き出してグリッドからは見えない位置に置かれたイオンコレクターで捕集するヘルマー型真空計が考案された。また、極高真空の圧力計測を目指して小さな点状のイオンコレクターを球形のグリッドの中央部に置いたポイントコレクター真空計も考案されている。現在、市販されている真空計の中で 10^{-10} Pa（または、 10^4 分子 cm^{-3} ）台の圧力の測定が可能とされているのは、エクストラクター真空計と変調型 B-A 真空計のみである。

冷陰極型電離真空計で極高真空の低い圧力の測定に可能性のあるものとしてマグネトロン型真空計があげられる。これは、電場と磁場が直交するような電極構造を持ち、電界放射や2次電子放出で作られた電子を電極間で螺旋運動させてマグネトロン放電を起こさせ、分子の電離効率を向上させたものである。圧力とイオン電流は、一般には正比例の関係ではなく、イオン電流は圧力の1.3乗に比例する。この真空計の難点は、圧力が低くなると放電が始まるまでの時間が長くなること、また放電自体も安定しにくくなること、さ

Fig. 2 Diagram of the molecular beam calibration system device.⁶⁾

らには真空計自体がポンプ作用を持っていることである。Grishin らは、液体ヘリウムを使った極低温クライオスタットの温度によって決定される水素の蒸気圧を使って、マグネトロン型真空計で 10^{-13} Pa 台までの圧力測定を報告している⁵⁾。ただし、圧力標準としての水素蒸気圧の温度に対する依存性は、3 K、 10^{-7} Pa 以上のデータから外挿して求めている。

ドイツ連邦科学技術研究所 (PTB) では、分子線法と低温技術を用いた真空計校正装置を製作し、エクストラクター真空計とヘルマー型真空計を 10^{-9} Pa 以下の圧力まで校正を行った⁶⁾。校正装置の概略図を Fig. 2 に示す。参照真空計を取り付けたクヌーセンセルと校正チェンバーは、対向する位置に小さなオリフィスが開けられている。また、この二つのオリフィス間は、液体ヘリウム冷却の 4.3 K の温度のクライオパネルが置かれていてコリメーターとしての働きをしている。参照真空計の取り付けられたクヌーセンセルに Ar ガス等のキャリブレーションガスを導入するとオリフィスからでたガスは、理想に近い分子線として校正チェンバーのオリフィスに入射する。校正チェンバーが平衡状態になったときの圧力は、オリフィスの開口とオリフィス間の距離、クヌーセンセル内 (参照真空計) の圧力で決まる。ここで、クヌーセンセルと校正チェンバーの間の空間は、校正しようとする圧力より遙かに低い圧力でなければならないため、排気系は粗排気に TMP、主排気には、イオンポンプと液体窒素冷却のチタンサブリメーションポンプが用いられた。

4. 低温技術に関連した極高真空発生的事例

これまでに極高真空領域の圧力が得られた例では、

- (1) 真空容器を液体ヘリウムで極低温にまで冷却する、
- (2) イオンポンプ、ターボ分子ポンプ、拡散ポンプなどで超高真空領域まで排気した後に、液体窒素冷却のサブリメーションポンプで排気する、
- (3) クライオポンプで排気する、

の三つの方法が取られている。これらは、低温の技術と何らかの形で係わっている。以下に、実際に真空容器を排気して極高真空を発生させた事例について紹介する。

4.1 液体ヘリウムを利用した極高真空の発生

前に述べたように、容器内の圧力を下げるためには、排気速度のより大きなポンプを使用することに加

Fig.3 Total and partial pressure data for chamber as a function of inverse temperature.⁷⁾

えて容器からの気体放出をできる限り低減する必要がある。容器からの気体の放出は、温度に関する増加関数であるから温度をできるだけ下げることにより到達圧力の低減が図れる。

表面観察のための機構を内蔵した真空容器全体を、液体ヘリウムの中に浸漬することにより極高真空を発生した例が報告されている⁷⁾。この例では、液体ヘリウムで冷却された容器の内壁自身が真空ポンプとしての働きもしている。ステンレス鋼製の約 22 l の容器を、室温状態で 0.1 Pa 程度にまで粗引き排気した後、液体ヘリウムでの冷却を行うことにより 10^{-12} Pa 以下の圧力が得られたとされている。容器が室温から冷却されるにつれて始めに主成分である水の分圧が減少し、次に一酸化炭素が減少し、30 K 以下になると水素、ヘリウムに対しても分圧が残留ガス分析計の測定限界 ($\sim 10^{-12}$ Pa) 以下になった。容器の冷却に伴う残留ガス分圧の変化を Fig. 3 に示す。

液体ヘリウムを用いたクライオポンプは、高エネルギー物理学用の加速器、核融合炉、スペースチェンバーの排気などに用いられている。液体ヘリウム冷却面に、活性炭やモレキュラーシーブなどの吸着剤を用いることにより、ヘリウムに対しても排気能力を持たせることができる。Benvenuti は、欧州連合原子核研究機構 (CERN) の交差型蓄積リング (ISR) の排気のために液体窒素と液体ヘリウムとで冷却するクライオポンプを開発した⁸⁾ (Fig. 4)。液体窒素冷却面は、液体ヘリウム面を室温容器から熱シールドする働きをする。また、液体ヘリウム温度のクライオパネルは銀が

Fig. 4 The cryopump model developed at CERN, shown here with one and a half chevron baffles.⁸⁾

被覆されて用いられた。評価試験として、ステンレス鋼製のドーム（ ~ 70 l）を排気して、 2.5×10^{-12} Pa の圧力が得られたと報告している。この場合の圧力測定にはトリア（ ThO_2 ）で被覆されたフィラメントを使った改良型のヘルマー型真空計が用いられた。

4.2 液体窒素冷却のサブリーメーションポンプによる極高真空の発生

ガス導入のない静的な系での極高真空の発生には、比較的安価なサブリーメーションポンプ、特にチタンやタンタルの蒸着を利用するものが用いられている。石丸は、加速器の真空容器の材料として低放射化材料であるアルミニウム合金を提唱し、気体放出の少ない加工法を開発した。その評価に伴い極高真空の発生を報告している⁹⁾。アルミニウム合金表面からの気体放出速度を低減させるために、アルゴンと酸素混合雰囲気中での切削加工を用いて超高真空計の校正用真空容器（Fig. 5）を製作した。ターボ分子ポンプとイオンポンプの排気に続いて、液体窒素冷却のチタンサブリーメーションポンプで 5×10^{-10} Pa まで排気した後、チェンバー内のシュラウドに液体窒素を導入して 4×10^{-11} Pa の圧力を得たと報告している。この場合の圧力測

Fig. 5 An aluminum alloy extremely high vacuum system: (1) main chamber, (2) liquid-nitrogen shroud, (3) liquid-nitrogen inlet and outlet, (4) 300 l/s SIP, (5) TSP with liquid-nitrogen shroud, (6) TMP and (7) gauge ports.⁹⁾

定には、ポイントコレクター真空計がエクストラクター真空計と比較しながら用いられた。

ステンレス鋼を用いた実用的な装置を排気して極高真空まで排気した例としては、大島らの電界電子放射測定装置がある¹⁰⁾。この装置では、 10^{-9} Pa 台まで拡散ポンプで粗引き排気を行って、最終的には、液体窒素冷却チタンサブリーメーションポンプで 4.7×10^{-10} Pa の到達圧力を得た。彼らは、超高真空領域での電離真空計の指示値と電界電子放射電流の減衰時間に相関関係を見出し、最終的には電離真空計のフィラメントを消灯すると電界電子放射の減衰時間がさらに長くなることにより最終到達圧力を測定した（Fig. 6）。こ

Fig. 6 The relationship between the damping time of the field emission current and the pressure. The damping time is defined to be the time when the current decreased to 0.8 of the initial value.¹⁰⁾

Fig. 7 Schematic diagram of the vacuum-pumping system attached to the test chamber. RP: rotary pump; TMP: turbomolecular pump; TSP: titanium sublimation pump; PG: Pirani gauge; BG: Boudon gauge; RGA: residual gas analyzer; IG: ionization gauge (extractor gauge); PV: pneumatic valve; and LV: leak valve.¹¹⁾

の装置の経験から、 10^{-10} Pa の圧力を得るためには、焼き出し（ベークアウト）の温度の均一性と真空計のフィラメントからの放出ガスの低減が重要であることを指摘している。

一般に超高真空や極高真空領域の到達圧力を得るためには真空容器システムの焼き出しが必要とされているが、加藤らは、ステンレス鋼の試験容器で焼き出しをせずに、極高真空が得られたと報告している¹¹⁾。使用した排気系は、2 台直列に接続したターボ分子ポンプを補助ポンプとした液体窒素冷却のチタンサブリーションポンプである。真空容器からの放出ガスの低減のために、容器の内面は電解複合研磨で表面粗さ $0.1 \mu\text{m R}_{\text{max}}$ の鏡面仕上げが施された。実験装置の概略図を Fig. 7 に示す。室温 ($22 \pm 1^\circ\text{C}$) 状態の試験容器を排気して、5 度目の大気開放後 15 日間の排気で 8×10^{-10} Pa の圧力まで排気された。

4.3 小型冷凍機付きクライオポンプによる極高真空の発生

小型冷凍機付きクライオポンプは、通常 80 K 程度の温度の熱シールドパネルの中に、15 K 程度の温度のクライオパネルを内蔵し、その内側に活性炭が貼り付けられている。このクライオポンプで、充分に小さな気体放出速度 ($< 10^{-9} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$) の内壁を持つ真空容器を排気する場合には、理論的には 10^{-10} Pa 以下の到達圧力が期待される。

実際に、市販型のクライオポンプを低放出ガス化処理を施したアルミニウム合金製のポンプケースに収納し、同じ処理を施したテストドーム（真空容器）を排気して、 1×10^{-10} Pa 以下と見られる到達圧力が得ら

Fig. 8 Residual gas pressure as a function of inverse of cryopanel temperature.¹²⁾

れたことが報告された¹²⁾。この実験では、クライオ吸着パネルの温度を、10～40 K の間で変化させて、残留ガスの分圧を調べた。15 K 以下の温度では、ヘリウムの分圧は温度とともに減少したが、水素の分圧の変化は見られなかった (Fig. 8)。これは、水素の吸着平衡圧が、15 K 以下ではほとんど一定となるのか、使用した分圧計の放出ガスの影響によるものかは議論の残るところである。

ステンレス鋼製の容器では、脱ガスに有効な焼き出しの温度が $200 \sim 250^\circ\text{C}$ と比較的高いために市販のクライオポンプと組み合わせたステンレス鋼製システムの到達圧力は、 1×10^{-8} Pa 程度に留まっていた。降矢らは、冷凍能力を向上させた冷凍機を用いた市販型のクライオポンプで、冷凍機の運転を続けながら 200°C の焼き出しを断続的に 100 時間行い、最終的に 5×10^{-10} Pa の到達圧力を得ている¹³⁾。

従来の小型冷凍機付きのクライオポンプは、冷凍機のヘッドが直接クライオパネルと接続されて真空部に入っている構造である。これは、到達圧力の低減の観点からは、冷凍機ヘッドからの放出ガスの問題と、焼きだし温度が冷凍機ヘッドの耐熱温度により制限されて充分な脱ガスが行えないという問題があった。筆者

Fig. 9 Schematic diagram of the new bakeable-type cryopump and test dome system.¹⁴⁾

らは、これらの問題を解決するために、冷凍機をクライオパネルから分離し、冷凍機システムで冷却されたヘリウムをクライオポンプ部へ循環してパネルを冷却する機構を持つクライオポンプを試作した。これにより、アルミニウム合金、およびステンレス鋼製の容器を排気して 1×10^{-10} Pa 以下の到達圧力を得た。冷凍機は、クライオポンプ部からは、隔離された断熱容器に納められているため、冷凍機の運転を止めた再生時にクライオポンプ部を $200 \sim 250$ °C に加熱しても冷凍機部の温度は、耐熱温度の 70 °C を越えない。Fig. 9 に、パネル冷却システムの概略図を示す¹⁴⁾。パネル冷却システムは、2 台の G-M 冷凍機からなり、1 台は冷媒ヘリウムの冷却と輸送、他の 1 台はパネルに循環するヘリウムの冷却を行う。このシステムにアルミニウム合金製のポンプケースとテストドームを接続して排気試験を行った。クライオポンプの再生時（冷凍システムの運転を停止時）に 150 °C で 20 時間程度の真空焼きだし（ベークアウト）を行った後、エクストラクター真空計の測定限界 1×10^{-10} Pa 以下の到達圧力を達成した。その後、大気開放を行い、大気圧状態より排気を開始して 55 時間で 1×10^{-10} Pa 以下の極高真空領域の圧力まで排気できた。このシステムのアルミニウム合金製容器の内壁面は、TiN のコーティングがされている。また、極高真空達成後に 25 日間排

Fig. 10 Schematic diagram of the another bakeable-type cryopump and test dome system.¹⁵⁾

気を継続しても真空計の 1×10^{-10} Pa 以下の指示に変化が見られず、クライオポンプの排気能力に十分余力のあることが示された。

また、同じようにして 1 台の G-M 冷凍機と蓄冷器を用いた循環ヘリウム冷却システムを組み合わせたクライオポンプ¹⁵⁾ (Fig. 10) も試作した。この冷凍機分離型クライオポンプで、ステンレス鋼製テストドームを排気して 1×10^{-10} Pa 以下のエクストラクター真空計の指示値を得た。このシステムの 10^{-10} Pa 台での排

Fig. 11 Pump-down curve of the test dome with the cryopump in the range of 10^{-10} Pa.

Fig. 12 Residual gas spectrum at the pressure below 1×10^{-10} Pa.

気曲線を Fig. 11 に示す。真空計の指示圧が 1×10^{-10} Pa の桁になると、イオン電流の減少に伴い、計測系のノイズが無視できなくなり、指示値が大きく揺らいでいる。このため、各時間の圧力としては、数分間の平均値を使うのが適当であろう。Fig. 11 では、記録開始から 2 時間を過ぎると数分間の平均値が 1×10^{-10} Pa 以下になったと見なすことができる。エクストラクター真空計が、 1×10^{-10} Pa 以下を示しているときの、イオン源分離四重極型質量分析計¹⁶⁾の残留ガススペクトルを、Fig. 12 に示す。水素以外の気体はほとんどないクリーンな真空が得られたことがわかる。

5. おわりに

以上低温技術に関連した極高真空の発生について述べたが、実際に極高真空が利用・応用されることは、やっと途についたばかりであろう。極高真空が要求されて実用化している分野としては、高エネルギー物理学の加速器が挙げられる。特に、電子や陽子とその反粒子のストレージングでは、真空度によって運転や実験の効率が左右される。また、反陽子をイオントラップに閉じ込めてその物理定数の測定ができるようになった¹⁷⁾が、もし将来反物質の貯蔵が行われる場合には極高真空技術が必要となるであろう。基礎物理学の分野では、無分子空間の創生とその物理定数の測定は、自然界の理解を深める一助となろう。

最近の走査型トンネル顕微鏡 (STM) の発達は、単原子の移動操作が可能になり、原子を 1 個ずつ操作す

る超微細加工 (アトムクラフト) が夢ではなくなりつつある。この技術で実用的な素子を作る場合には、極高真空の雰囲気が必要されてくるであろう。

極高真空の雰囲気ではしか作れない極端に他分子の混入を嫌う薄膜材料や素子で、非常に有用な性質を有する物が存在する可能性が大いにあり、極高真空を利用した新しい積層材料等の研究が、逆に極高真空技術を発展させる原動力となるかもしれない。

現状では、極高真空の確認と計測のために、 10^4 個 cm^{-3} 以下の分子密度しかない希薄な雰囲気を、真空系を乱さずに信頼度良く測定できる全圧、および分圧真空計の開発が切に望まれている。

参考文献

- 1) 寺田啓子, 岡野達雄, 辻 泰: 真空 31 (1988) 259
- 2) K. Terada, T. Okano and Y. Tuzi: J. Vac. Sci. Technol. **A** 7 (1989) 2397
- 3) 極高真空の発生・計測・利用技術に関する調査報告書 (筑波研究コンソーシアム) (1988) 23
- 4) M. Wutz, H. Adam and W. Walcher: Theory and Practice of Vacuum Technology, (Vieweg; Braunschweig) (1989) 432
- 5) S.F. Grishin and E. Ya. Grishina: Sov. Phys. Tech. Phys. 16 (1972) 1199
- 6) Von G. Grosse and G. Messer: Vak. Tech. 8 (1981) 226
- 7) W. Thompson and S. Hanrahan: J. Vac. Sci. Technol. 14 (1977) 643
- 8) C. Benvenuti: J. Vac. Sci. Technol. 11 (1974) 591
- 9) H. Ishimaru: J. Vac. Sci. Technol. **A** 7 (1989) 2439
- 10) 大島 忠平, 左右田 龍太郎, 青野 正和, 石沢 芳夫: 真空 26 (1983) 726
- 11) S. Kato, M. Aono, K. Sato and Y. Baba: J. Vac. Sci. Technol. **A** 8 (1990) 2860
- 12) T. Kikuchi, N. Ohsako and Y. Hayashi: Vacuum 41 (1990) 1941
- 13) 降矢新治, 森本秀敏: 真空 34 (1991) 41
- 14) Y. Matsui, K. Yui and H. Yamakawa: J. Vac. Sci. Technol. **A** 9 (1991) 2010
- 15) H. Yamakawa, Y. Matsui, K. Yui and H. Yanagida: Vacuum 41 (1990) 1837
- 16) F. Watanabe: J. Vac. Sci. Technol. **A** 8 (1990) 3890
- 17) G. Gabrielse, et al.: Phys. Rev. Lett. 65 (1990) 1317