

低速準安定状態ヘリウムを用いた真空度の測定

電気通信大学 量子・物質工学科 清水和子研究室 青木 光弥

1. 研究背景、目的

近年の真空装置の進歩により、 10^{-11}Pa (10^{-13}torr) 以上の極高真空の真空状態を達成したが、現在使われている真空計である電離真空計では 10^{-10}Pa (10^{-12}torr) 以上の領域で軟 X 線効果などの影響により、信頼性の高い測定ができない。そのため、新しい真空度の測定方法が模索されている。我々の研究は電離真空計で用いられている電子の代わりにレーザー冷却により低速にした準安定状態ヘリウム原子 (He^*) を用い、電離真空計の測定限界である 10^{-11}Pa 以上の真空度を定量的に測定することを目的としている。

2. 原理

2-1. He^* を用いた真空度測定

我々の目指している真空度測定法は基底状態のヘリウム原子を放電により準安定状態に励起させ、このヘリウム原子をゼーマン同調法により減速し、原子の共鳴周波数のレーザー光を照射し磁気光学トラップする。この He^* と高真空チャンバー内にある残留ガスとの衝突による He^* の損失率から真空度を見積もることが出来る。

2-2. He^* を用いる利点

He^* を電子の代わりに用いる主な利点として、 He^* の内部エネルギーは 19.8eV であり、チャンバー内にあるほとんどの分子をイオン化すること、準安定状態の寿命が約 8000 秒であること、電離真空計で発生する多量の加速電子によるエネルギーによる軟 X 線の効果はないこと、希ガスなので真空チャンバーに付着しないことなどが挙げられる。

表 1: 主な分子の第一イオン化エネルギー

分子	第一イオン化エネルギー (eV)
H_2	15.43
He	24.587
H_2O	12.61
O_2	12.07
N_2	15.58
Ar	15.76

2-3. He^* を用いる真空度測定の測定限界

He^* イオンゲージの検出限界は電離真空計とは異なった理由で決まる。ヘリウム原子を真空系に注入しているから、ポンプで引かなければ真空度はどんどん悪くなる。つまり測定限界はポンプの排気速度 (He) とイオン検出器の限界で決まる。

例えば毎秒 N 個の He^* を真空タンクに注入したとする。

極高真空に He^* がトラップされている場合、極限では He^* の減衰は準安定状態の自然寿命でできまり、生成されるイオンの総数 N_i は

$$N_i = \frac{\sigma_{ion} n_0 v}{\gamma} N$$

となる。ここで σ_{ion} はイオン化断面積、 n_0 は粒子密度、 v は衝突速度、また、 γ は He^* の減衰定数である。

ポンプ速度を U とすると、真空タンク中の平衡ヘリウム密度 n は

$$n = \frac{N}{U}$$

である。これが元々の真空中の粒子密度 n_0 に等しくなる値が最大流量 N_{\max} とすると

$$N_{\max} = n_0 U$$

となる。これを N_i の式の N に代入すると次式となる。

$$N_{ion,\max} = \frac{\sigma_{ion} n_0^2 v}{\gamma} U$$

これが 1 秒あたりのイオンカウント数になる。

ここで、イオン検出器の限界が毎秒 1 個 ($N_{ion,\max} = 1$)、ポンプ速度が 10 l/s、 $\sigma = 10^{-20} \text{m}^2$ 、 $v=300 \text{m/s}$ とすると、 $n_0 = 6 \times 10^7 \text{m}^{-3}$ 、すなわち 10^{-13}Pa (10^{-15}torr) 程度まで測定可能である。

3. 実験

今回の実験では次の二つを行った。

1. He*と真空チャンバー内に個別に注入したガス (H_2 , He, H_2O , N_2 , O_2 , Ar) との衝突で生成されたイオンを He*とともに同時計測することによる He*に対する相対イオン化効率の測定
2. 相対イオン化効率測定で用いた Q-Mass の分圧表示が注入するガスの種類によってどの程度変化するかを測定し、それをもとにした相対イオン化効率の校正

3-1. 相対イオン化効率測定

(1) 実験操作

1. He*を磁気光学トラップ (MOT) する。
2. He*をプッシュ光にて Detection Chamber に落とす。
3. Variable Leak Valve を用い、ガス (O_2 , H_2 , N_2 , Ar, H_2O) を Detection Chamber に流す。
4. Q-Mass で各ガスの分圧を MCP で He*のカウントと He*によってイオン化されたガスのカウントを測定する。
5. 得られた測定結果から He*による相対イオン化効率を求める

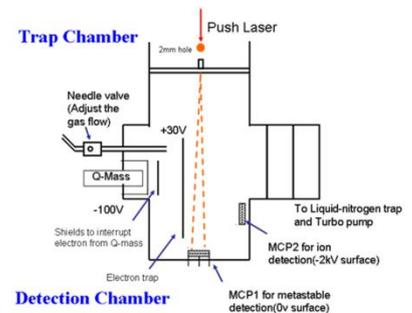


図 1:測定チャンバー概略図

(2) 相対イオン化効率計算方法

He*のカウント N_{He^*} の単位圧力あたりの変化量は次式となる。

$$\frac{dN_{\text{He}^*}(p)}{dp} = -\frac{1}{p_0} N_{\text{He}^*}(p) \quad \dots \textcircled{1}$$

これを解き、単位圧力当たりの He*のカウント N_{He^*} は次式となる。

$$N_{\text{He}^*}(p) = A_{\text{He}^*} \exp\left(-\frac{p}{p_0}\right)$$

同様に圧力 0 近辺でのイオンカウント N_{ion} は

$$N_{ion}(p) = A_{ion} \{1 - \exp\left(-\frac{p}{p_0}\right)\} \quad \dots \textcircled{2}$$

N_{He^*}	He*のカウント数
N_{ion}	ガスイオンのカウント数
p	圧力
$A_{ion} = N_{ion}(\infty)$	
$A_{\text{He}^*} = N_{\text{He}^*}(0)$	
p_0	落下してきたHe*が1/eになる圧力

となる。この N_{ion} の圧力 0 付近での勾配

$$\frac{A_{ion}}{p_0} \quad \dots \textcircled{3}$$

を個々のガスで求め、相対イオン化効率として示した。

(3) 結果

図 2、図 3 に O_2 をチャンバーに注入した時の測定データを示す。図 2 は O_2 の分圧に対する He^* のカウンターのデータである。図 1 は式①に対応しているこのデータをグラフフィッティングし、 p_0 の値を求めた。また、図 3 は O_2 の分圧に対する O_2 のイオンカウントであり、式②に対応しているので得られた p_0 を入れたグラフフィッティングにより、 A_{ion} を求め、勾配③を得た。これをもとに各ガスの He^* に対する相対イオン化効率を求めた。その結果が表 2 である。表 2 では勾配が一番大きかった H_2O の相対イオン化効率を 1 としている。

表 2:相対イオン化効率 (校正前)

分子	勾配 (μTorr^{-1})	相対イオン化効率
H_2	4.81	0.0071
N_2	4.10	0.0061
O_2	28.9	0.043
Ar	3.00	0.0045
H_2O	679	1

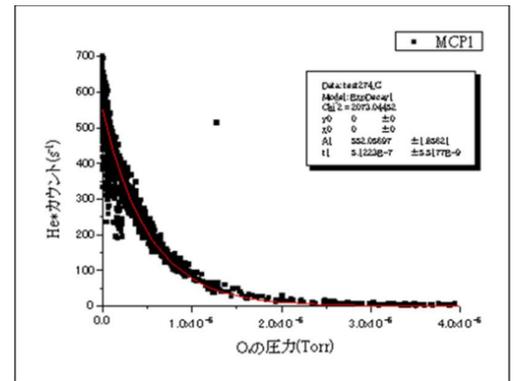


図 2: O_2 注入時の O_2 の分圧に対する He^* カウント

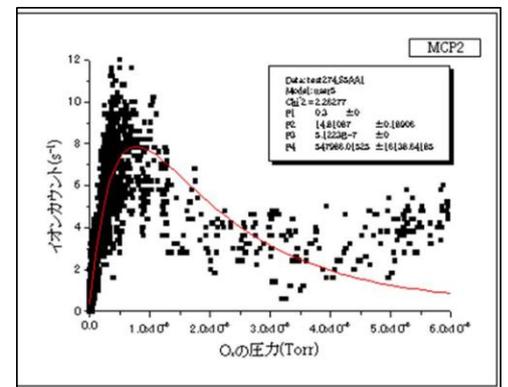


図 3: O_2 注入時の O_2 の分圧に対するイオンカウント

3-2. Q-Mass キャリブレーション

(1) 実験操作

実験装置の概略図は図 4 に示す。

1. 各種ガスをバルブ 1, 2 間の空間 (A) に 1 気圧注入する。
2. バルブ 1 を開け、予め真空にしていた球形チャンバーへ A のガスを開放する。
3. 拡散させた後、バルブ 1 を閉め 6" バルブを開き、再び A を真空にする。
4. 2-3 の過程をもう一度行った後に、6" バルブを閉めた状態でバルブ 1 を解放し Q-Mass で A の圧力を測定する

また、この時球形チャンバーと A の体積比は 14340:1 であり、計算より求めた圧力は 3.71

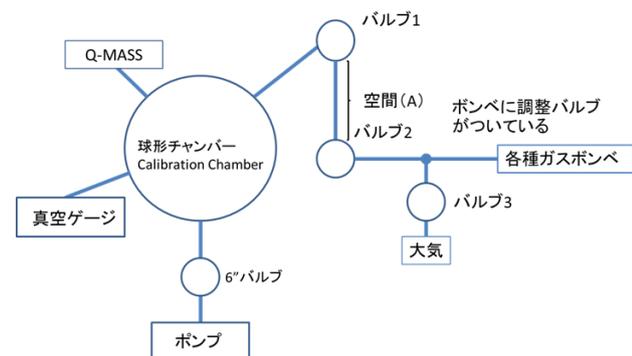


図 4: キャリブレーション測定概略図

μ torr となった。

(2) 結果

図5に O_2 を注入したときの Q-Mass の分圧表示の変化の様子を示す。

図5の O_2 の分圧の差を Q-Mass が計測した分圧表示とすると各ガスの分圧表示は表3のように表示される。表3で H_2 がないのは、何度か測定してみたが一定の値にならず、分圧表示を出すことが出来なかったためである。これはチャンバー内部に水が吸着してしまったためと考えられる。

表3で示した分圧表示比を用いて相対イオン化効率を校正すると表4のようになる。

表4では、 N_2 の分圧表示を1とした。

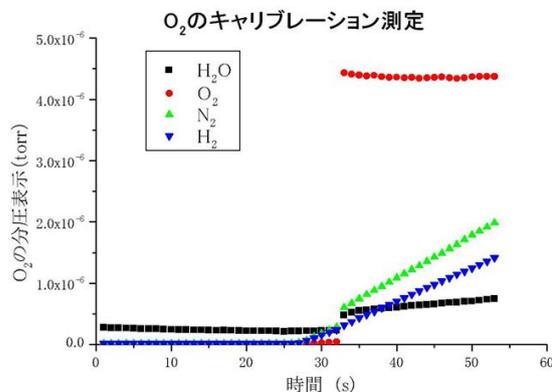


図5: O_2 の分圧表示

表3: 各ガスの分圧表示

分子	Q-Massの分圧表示 (μ torr)
H_2	13.1
N_2	4.2
O_2	4.4
Ar	6.3

表4: 校正後の相対イオン化効率

分子	相対イオン化効率 (校正後)
H_2	0.022
N_2	0.0061
O_2	0.045
Ar	0.0068

4. 現状と今後の課題

実際 He^* ゲージを用いて、残留ガスとの衝突を見る際、 He^* を増やさずに測定することが重要であり、そのためには Detection Chamber に He^* を長時間存在させ、より多くの残留ガスとの反応を見なければならない。

今回の実験では上からの Push レーザーにより加速させた He^* と残留ガスとの反応を見ていたが、現在は自由落下させ、反応を見たいと考えている。しかし、自由落下させ Detection Chamber で観測しようとする、横方向に広がってしまい観測できない。そのため、上から波長 $1.5 \mu m$ のレーザーを用い、 He^* を中央にガイドし Detection Chamber に落とし、観測できるように試みている。また、この実験の後には Detection Chamber 内で再びトラップし、さらに低速な状態での反応をみることを目指している。