四重極質量分析計及び電離真空計における 水素同位体の相対感度*

三宅 均**・松山 政夫**・渡辺 国昭**

(昭和62年1月9日 受理)

Determination of the Relative Sensitivities of a Quadrupole Mass
Spectrometer and Ionization Gauge for Hydrogen Isotopes

Hitoshi MIYAKE**, Masao MATSUYAMA** and Kuniaki WATANABE**

(Tritium Research Center, Toyama University, 3190 Gofuku, Toyama 930, Japan)

(Received January 9, 1987)

1. はじめに

近年トリチウム取扱い技術の進歩に伴ない、従来の放射能カウンティング法では計測できないような多量のトリチウムが使用されるようになってきている。このため従来のカウンティング法に代るトリチウム計測法の確立が望まれている。また、重水素とトリチウムを用いる核融合反応実験装置においては、通常の真空計測とともにトリチウムの圧力あるいは流量を正確に測定する必要がある。

高真空圧領域でのトリチウムの計測には様々な真空計及び分圧計が用いられるが、電離真空計及び四重極質量分析計の利用が一般的である^{1,2)}。但し、これらの全圧計及び分圧計は気体の種類によって感度が異なるので事前に何らかの方法でトリチウムに対する感度を求めておく必要がある。電離真空計及び質量分析計の絶対感度はそれらの幾何学的構造のみならず操作条件により著しく異なるが、相対感度は、例えば電離真空計においては、それらの影響をあまり受けないことが知られている³⁻⁶⁾。同様な現象は質量分析計においても期待できる。従って、ある種の適当な気体、例えば窒素、に対する感度と対象とする気体の相対感度がわかれば、その気体の圧力を測定することができる。

核融合反応実験で用いる重水素とトリチウムに関しては、重水素に対する電離真空計の相対感度³⁾、数種の水素同位体に対する磁場偏向型質量分析計の相対感度⁷⁾は報告されているが、トリチウムに対する電離真空計の相対感度は知られていない。四重極質量分析に関しては、Ellefson らの報告があるがその精度に問題がある²⁾。このような観点から、筆者らは6種の水素同位体 (H_2 , HD, D_2 , HT, DT, T_2) に対するB-A型電離真空計及び四重極質量分析計の相対感度を測定した。

2. 実 験

2.1 装 置

用いた装置の概略をFig. 1に示した。この装置の排気系はスパッタイオンポンプ及び水銀拡散ポンプよりなり、到達真空度は 2×10^{-6} Pa以下である。

B-A型電離真空計(以下B-Aと略記)としてはアネルバ社製UGS-1A及びUGD-1S(以下各々B-A1及びB-A2と略記)の2種類の測定球を用いた。これらのB-Aの作動条件はグリッド電位+180 V、フィラメント電位+45 V、コレクター電位0 Vで、エミッション電流はB-A1では0.94 mA、B-A2では1 mAである。この2つの測定球の主な相違はガス出し法にある。即ちB-A1は電子衝撃型、B-A2はグリッド通電型である。

四重極質量分析計(以下QMSと略記)としては日本真空技術社製MSQ-150 Aを用いた。このQMSのイオン源はNier型である。なお作動条件がエミッション電

* 昭和61年11月12日 第27回真空に関する連合講演会において講演
(I2Ap-11)

** 富山大学トリチウム科学センター(富山市五福3190)

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus: QMS: Quadrupole mass spectrometer, B-A: Bayard-Alpert gauge, DG: Diaphragm gauge, IP: Sputter ion pump, DP: Mercury diffusion pump, RP: Oil-sealed rotary pump.

流0.5 mA, 電離電圧70 V, イオン加速電圧8 Vの時の分解能は10% ピーク高さにおいて, $M/e=2$ で $\Delta M=0.60$, $M/e=3\sim 6$ で $\Delta M=0.61$ であった. また検出器にはトリチウムの汚染の影響がきわめて大きい二次電子増倍管 (Cu-Be) は使用せず⁸⁾, 比較的影響の小さいファラディカップを用いた.

比較校正用に用いた隔膜真空計はMKS社製315型でその測定可能圧力範囲は $1.33\sim 1.33\times 10^{-3}$ Paである.

2.2 試料気体

H_2 , D_2 は日本酸素社製で, 各々の純度は99.999%及び99%以上とされている. これらの気体は使用する際に液体窒素トラップを用いて凝縮性不純物を除去した. 又使用した T_2 はNew England Nuclear社製の5 Ciのガラスアンプル入りのものである. この T_2 気体のQMSによる分析結果をFig. 2(A)に示した. 図からわかるように, 市販の T_2 気体中には 3He , トリチウム化メタン (CT_4 , etc) 及びトリチウム水蒸気 (HTO , etc) 等の不純物が多量に含まれている. そこでZr-V-Feゲッターに, この気体を一旦回収し残留ガスを排気して精製を行った⁹⁾. Fig. 2(B)はその後Zr-V-Feゲッターを加熱して再放出させた気体の質量スペクトルである. 図からわかるように 3He 及び CT_4 などの不純物を完全に除去することができた.

2.3 測定方法

2.3.1 QMSの校正

(1) 高純度気体 (H_2 , D_2)

H_2 及び D_2 の場合には容易に高純度気体を得ることができる. 従ってQMSの感度は次式より求められる.

Fig. 2 Mass spectra of as-received tritium gas in a glass ampule (A) and tritium gas purified with use of Zr-V-Fe getter, (B).

$$S_M^X = (I_M^X / I_M^e) / P^X \quad (1)$$

ここで S_M^X は成分 X に対する QMS の感度, I_M^X 及び I_M^e はそれぞれ成分 X のイオン電流及びエミッション電流である. また P^X は成分 X の圧力であり, この場合には隔膜真空計で測定した.

(2) 混合気体

(i) HD

HD は平衡化反応により生成されるため, 通常は純粋気体の状態では得られないが, H_2 と D_2 を適当に混合した気体を用いることにより HD に対する感度を求めることができる. 即ち, この混合気体中の HD の分圧を P^{HD} , 隔膜真空計で測定した全圧を P_{total} とすれば, P^{HD} は次式で示される.

$$P^{HD} = P_{total} - (P^{H_2} + P^{D_2}) \\ = P_{total} - [(I_{H_2}^2 / S_M^{H_2}) + (I_{D_2}^2 / S_M^{D_2})] / I_M^e \quad (2)$$

$S_M^{H_2}$ 及び $S_M^{D_2}$ は各々既に求められているので, 上式より P^{HD} が得られ (1) 式より S_M^{HD} が求められる.

(ii) HT, DT 及び T_2

Fig. 2(B) に示したように本研究においては高純度の T_2 を得ることが出来なかったが, この場合にも H_2 と T_2 及び D_2 と T_2 を適当に混合した気体を用いることにより HT, DT 及び T_2 に対する感度を求めることができる. 但し, T_2 の感度が単独に求められないこと及びこれらの混合気体中には無視できない量の目的成分以外の水素同位体成分が微量ではあるが含まれることから以下のような繰り返し計算法を用いた.

まず T_2 と H_2 の混合により Fig. 3(A) に示したような $P_{H_2} > P_{HT} > P_{T_2}$ の成分比の混合気体を調整した. この場合には HT の分圧 P^{HT} は次式で示される.

$$P^{HT} = P_{total} - (P^{H_2} + P^{HD} + P^{DT} + P^{T_2}) \quad (3)$$

第1近似として微量成分 P^{DT} 及び P^{T_2} を無視すると第1近似としての HT の分圧 $P^{HT(1)}$ は次式で示される.

$$P^{HT(1)} = P_{total} - (P^{H_2} + P^{HD}) \\ = P_{total} - [(I_{H_2}^2 / S_M^{H_2}) + (I_M^{HD} / S_M^{HD})] / I_M^e \quad (4)$$

Fig. 3 Example of the mass spectra of gas mixtures used for calibration: (A) and (B) H_2 - T_2 mixtures, (C) D_2 - T_2 mixture.

$S_M^{H_2}$ 及び S_M^{HD} は既に求められているので $P^{HT(1)}$ が求められる, これを(1)式に代入して第1近似の HT の感度 $S_M^{HT(1)}$ が得られる.

次に Fig. 3(B) に示すような(A)とは異なる成分比の H_2 と T_2 の混合気体の全圧と質量スペクトルを測定する. この場合には, T_2 の分圧 P^{T_2} は次式で示される.

$$P^{T_2} = P_{total} - (P^{H_2} + P^{HD} + P^{HT} + P^{DT}) \quad (5)$$

HT の場合と同様に微量成分を無視すると, 第1近似としての T_2 の分圧 $P^{T_2(1)}$ は次式で示される.

$$\begin{aligned} P^{T_2(1)} &= P_{total} - (P^{H_2} + P^{HD} + P^{HT}) \\ &= P_{total} - [(I_M^{H_2}/S_M^{H_2}) + (I_M^{HD}/S_M^{HD}) \\ &\quad + (I_M^{HT}/S_M^{HT})]/I_M^e \end{aligned} \quad (6)$$

$S_M^{H_2}$ 及び S_M^{HD} は既に求められており, 先に得た $S_M^{HT(1)}$ を用いれば $P^{T_2(1)}$ が求められ(1)式により第1近似の T_2 の感度 $S_M^{T_2(1)}$ が得られる.

さらに Fig. 3(C) に示すような D_2 と T_2 の混合気体の場合には DT の分圧 P^{DT} は次式で示される.

$$\begin{aligned} P^{DT} &= P_{total} - (P^{H_2} + P^{HD} + P^{D_2} + P^{T_2}) \\ &= P_{total} - [(I_M^{H_2}/S_M^{H_2}) + (I_M^{HD}/S_M^{HD}) \\ &\quad + (I_M^{D_2}/S_M^{D_2}) + (I_M^{T_2}/S_M^{T_2})]/I_M^e \end{aligned} \quad (7)$$

ここで先に求めた $S_M^{T_2(1)}$ を用いると, 第1近似の $P^{DT(1)}$, 及び感度 $S_M^{DT(1)}$ が得られる.

次いで, 上で得られた第1近似の感度を用いて(4)式及び(6)式で無視した微量成分を考慮し, 再度(A), (B) 及び(C)の質量スペクトルを解析する. 即ち, $S_M^{HT(1)}$, $S_M^{T_2(1)}$ 及び $S_M^{DT(1)}$ を(3)式に代入すると以下第2近似の HT の圧力 $P^{HT(2)}$ が求められ,

$$\begin{aligned} P^{HT(2)} &= P_{total} - [(I_M^{H_2}/S_M^{H_2}) + (I_M^{HD}/S_M^{HD}) \\ &\quad + (I_M^{DT}/S_M^{DT(1)}) + (I_M^{T_2}/S_M^{T_2(1)})]/I_M^e \end{aligned} \quad (8)$$

第2近似の HT の感度 $S_M^{HT(2)}$ が得られる. また, $S_M^{HT(2)}$ 及び $S_M^{DT(1)}$ を(5)式に代入すれば, 以下のように第2近似の T_2 の圧力 $P^{T_2(2)}$ が求められ,

$$\begin{aligned} P^{T_2(2)} &= P_{total} - [(I_M^{H_2}/S_M^{H_2}) + (I_M^{HD}/S_M^{HD}) \\ &\quad + (I_M^{HT}/S_M^{HT(2)}) + (I_M^{DT}/S_M^{DT(1)})]/I_M^e \end{aligned} \quad (9)$$

これより第2近似の T_2 の感度 $S_M^{T_2(2)}$ が得られる. 同様に $S_M^{HT(2)}$ 及び $S_M^{T_2(2)}$ を(7)式に用いることにより第2近似の DT の感度 $S_M^{DT(2)}$ が求められる. 以上の近似計算を繰り返し行うことにより, より正確な HT, T_2 及び DT の感度が得られる.

2.3.2 B-A の校正

(1) 高純度気体 (H_2 , D_2)

高純度気体の B-A における感度はそれぞれ圧力を隔膜真空計で測定することにより次式から求められる.

$$S_B^X = (I_B^X/I_B^e)/P^X \quad (10)$$

ここで, S_B^X 及び I_B^X は成分 X の B-A における感度及びイオン電流, I_B^e はエミッション電流である.

(2) 混合気体

B-A のイオン電流が混合気体の各成分のイオン電流の和であると仮定し, 各成分の分圧を感度校正した QMS で求めると以下の方法により HD, HT, DT 及び T_2 の B-A における感度が得られる.

(i) HD

H_2 と D_2 の混合気体中の HD のイオン電流は次式で表わされる.

$$\begin{aligned} I_B^{HD} &= I_B - (I_B^{H_2} + I_B^{D_2}) \\ &= I_B - I_B^e (S_B^{H_2} P^{H_2} + S_B^{D_2} P^{D_2}) \end{aligned} \quad (11)$$

ここで H_2 及び D_2 の分圧は QMS より得られる. また, H_2 及び D_2 の感度は既に得られているので上式より I_B^{HD} を求めることができ, この値を(10)式に代入し, S_B^{HD} が得られる. この際 P^{HD} は QMS より求める.

(ii) HT, DT 及び T_2

B-A における HT, DT 及び T_2 のイオン電流は H_2 と T_2 及び D_2 と T_2 の混合気体に対して各々次式で示される.

$$\begin{aligned} I_B^{HT} &= I_B - I_B^e (S_B^{H_2} P^{H_2} + S_B^{HD} P^{HD} \\ &\quad + S_B^{DT} P^{DT} + S_B^{T_2} P^{T_2}) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} I_B^{T_2} &= I_B - I_B^e (S_B^{H_2} P^{H_2} + S_B^{HD} P^{HD} + S_B^{HT} P^{HT} \\ &\quad + S_B^{DT} P^{DT}) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} I_B^{DT} &= I_B - I_B^e (S_B^{H_2} P^{H_2} + S_B^{HD} P^{HD} \\ &\quad + S_B^{D_2} P^{D_2} + S_B^{T_2} P^{T_2}) \end{aligned} \quad (14)$$

これらの式は QMS の感度校正における式(3), (5) 及び(7)の関係と同じである. 従って, QMS の場合と同様の繰り返し計算法により HT, DT 及び T_2 に対する B-A の感度が得られる.

なお本実験での操作条件下では, 質量スペクトルにお

Fig. 4 Calibration curves of the mass spectrometer and B-A gauges for HT: (a) B-A 1 results for the gas mixture shown in Fig. 3(A), B-A 2 and QMS results for the gas mixture shown in Fig. 3(B): (b) Summary of the calibration results.

ける三原子イオン (例えば, H_3^+ , D_3^+ , T_3^+) のピークは二原子イオン (H_2^+ , D_2^+ , T_2^+) のピーク強度の1/1000以下で, 無視できる. 他方, D_2 測定時の単原子イオン (D^+) のピークは D_2^+ のピーク強度の7/1000以下であった. Shaeffer らによれば H^+/H_2^+ は D^+/D_2^+ よりも幾分大きく, T^+/T_2^+ は幾分小さい¹⁰⁾. 従って, 質量スペクトルへの単原子イオンの寄与は, 三原子イオンの場合と同様に無視できる. 即ち, 質量スペクトルの解析の際には上記のように二原子イオンのみを考慮すればよい. B-A の測定においても同様であると考えられる.

上記の測定において, B-A の H_2 及び D_2 に対する排気速度はともに約1.0 l/s であった. B-A 球の枝管のコンダクタンスを考慮すると, B-A 球内の圧力は系の圧力よりも約4%ほど低い. ここでは他の水素同位体分子に対しても同じ排気速度であるとして, 一律に排気作用の補正を行った. 他方, QMS に関してはその排気作用は小さく, かつコンダクタンスは大きいので, その影響は無視した. 更に, 隔膜真空計は46°Cで操作したので, これに対しては熱遷移の補正を行った ($P_1/P_2 = \sqrt{T_1/T_2}$).

3. 結果と考察

Fig. 4(a)に一例として H_2 - T_2 混合気体の測定で得られた I_B^{HT} と I_B^{HT} を HT の分圧に対してプロットしたものを示す. ここで B-A1 の結果は Fig. 3(A) の組成の混合気体, B-A2 及び QMS の結果は Fig. 3(B) の組成の混合気体で得られたものである. なおこれらの値は横軸の P^{HT} も含めて, 全ての同位体分子に対して最終的に得られた感度を用いて求めたものである. 横軸の圧力範囲が

Table 1 Relative sensitivities of the mass spectrometer for hydrogen isotopes ($R_M^X = S_M^X/S_M^{H_2}$).

Gas	This work	Dibeler et al.
H_2	1.00	1.00
HD	1.09 ± 0.06	1.06
D_2	0.99 ± 0.03	0.98
HT	1.06 ± 0.06	1.04
DT	0.96 ± 0.04	—
T_2	0.88 ± 0.03	0.89
N_2	0.67 ± 0.02	—

狭いのは, 隔膜真空計での測定下限が $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ であること, B-A 及び QMS 出力の直線性が全圧約 $3 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 以上で失われること並びに混合気体中の一成分を測っていること等によるものである. 種々の組成の H_2 - T_2 混合気体で得られた B-A 及び QMS の HT に対する感度をまとめると Fig. 4(b) のようになる. 図のように B-A1 及び 2 並びに QMS の HT に対する感度は $1 \sim 5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ の範囲内で一定で, それぞれ $S_B^{HT}(\text{B-A1}) = (2.23 \pm 0.08) \times 10^{-2} / \text{Pa}$, $S_B^{HT}(\text{B-A2}) = (2.78 \pm 0.08) \times 10^{-2} / \text{Pa}$, $S_B^{HT} = (8.55 \pm 0.45) \times 10^{-5} / \text{Pa}$ と求められた.

Table 1 に 6 種の水素同位体に対する QMS の感度をまとめた. なおここでは H_2 の感度を 1 とした相対感度 ($R_M^X = S_M^X/S_M^{H_2}$) を示した. いずれの水素同位体の場合も統計誤差は 6% 以内である. 比較のために Dibeler らの磁場偏向型質量分析計の結果を示した⁷⁾. 測定原理及び幾何学的構造が異なるにもかかわらず, 両者は極めて

Table 2 Relative sensitivities of the B-A gauges for hydrogen isotopes ($R_M^X = S_M^X/S_M^{H_2}$).

Gas	B-A 1	B-A 2	Average	R_M/R_B
H ₂	1.00	1.00	1.00	1.00
HD	1.06±0.08	1.10±0.06	1.08±0.05	1.01±0.01
D ₂	0.99±0.01	0.98±0.02	0.99±0.01	1.00±0.02
HT	1.04±0.04	1.02±0.06	1.03±0.04	1.03±0.02
DT	0.97±0.04	0.97±0.04	0.97±0.03	0.99±0.01
T ₂	0.95±0.02	0.95±0.03	0.95±0.02	0.92±0.01
N ₂	2.50±0.02	2.13±0.014	(2.3±0.2)	(0.29±0.05)

良く一致することが知られた。

2種類のB-Aの校正結果をTable 2に示した。この表もH₂の感度を1とした相対感度($R_B^X = S_B^X/S_B^{H_2}$)で示してある。窒素に対する感度はB-A1と2では若干異なるが、水素同位体に対しては両者の相対感度は極めて良く一致した。これらのQMS及びB-Aの相対感度は、それぞれの出力の直線性の成立する範囲(本実験では全圧 3×10^{-2} Pa以下)で有効であると考えられる。なお水素同位体と比較して、窒素に対する相対感度がB-A1と2で異なる理由は明らかではないが、両者の電極構造の相違が窒素イオンの収集効率に影響しているためと考えられる¹¹⁾。

以上の結果からB-AについてはH₂の感度を得ることにより単一成分であれば他の全ての水素同位体の圧力を測定できる。しかし、QMSでは分解能などの動作条件や装置の設計条件により相対感度が異なる可能性がある。Fig. 5は分解能を変えてH₂及びHDの感度を測定した結果である。図のようにHD、H₂及びN₂に対する相対感度は測定誤差範囲内で一定であることが知られた。即ち、相対感度への分解能の影響はなく、同種の装置であれば本実験で得られた結果が有効であると結論される。なお、D₂での結果はH₂の結果と実験誤差の範囲内で一致するので本図からは割愛した。

Table 2に示したように、H₂、D₂、HT及びDTに対するB-Aの相対感度は誤差範囲内で一致し、Nakaoの報告にあるようなH₂とD₂の間の大きな相対感度の相違($S_B^{D_2}/S_B^{H_2} = 0.83 \sim 0.91$)は認められなかった³⁾。他方、HTとT₂に関しては一明らかに S_B^{HT} は $S_B^{H_2}$ よりも大きく、他方 $S_B^{T_2}$ は小さい。この結果は、従来知られている感度とイオン化断面積との密接な関係を考慮すると、イオン化断面積の差によるものと考えられる。この説明はQMSの結果からも支持される。即ち、Table 1に見られるように、QMSにおいても S_M^{HD} は $S_M^{H_2}$ よりも大きく、 $S_M^{T_2}$ は小さい点でB-Aで得られた結果と一致している。

Fig. 5 Changes in the sensitivities of the QMS with resolution.

従って、B-A球内における複雑なイオン化過程及びイオン収集過程にもかかわらず、 S_B^{HD} 及び $S_B^{T_2}$ と $S_B^{H_2}$ との相違はイオン化断面積の相違を反映しているものと結論できる。

ここで、水素同位体に対するB-AとQMSとの相対感度を比較すると(R_M^X/R_B^X)、H₂~DTまでは実験誤差内で1に等しく、他方T₂の場合には明らかに1よりも小さい。この結果、即ちT₂に対するQMSの低い相対感度はイオン化過程以外の影響が現われたためであると解釈できる。Dibelerらは、トリチウムに対する低い感度は主として質量差別によるものとしたが⁷⁾、本研究で $R_M^{T_2}/R_B^{T_2} < 1$ となった理由も、質量差別即ちT₂⁺イオンの透過率の低下によるものと考えられる。窒素についての結果($R_M^{N_2}/R_B^{N_2} \approx 0.3$)は上記の説明を裏付けている。従って、T₂に対するQMSの低い相対感度($R_M^{T_2} = 0.88$)に関しては、その一部はイオン化断面積の相違に、また一部は質量差別に帰せられる。なお、上記のQMSでの結果はイオン検出器にファラディカップを用いていることに注意する必要がある。二次電子増倍管を用いた場合には、より著しい質量差別効果があり、更にその操作条件により複雑な影響が現われてくる。

4. ま と め

6種の水素同位体に対する四重極質量分析計及びB-A型電離真空計の感度を測定した。その結果以下の知見が得られた。

- (1) B-Aの感度はH₂、D₂、HT及びDTでは実験誤差範囲内で一致するが、HDに対する感度はH₂の

それよりも約10%大きく、 T_2 に対する感度は約5%ほど小さい。この相違はイオン化断面積によるものである。

- (2) 同様な傾向はQMSについても認められた。即ち、HDに対する感度は H_2 よりも約10%大きく、 T_2 に対する感度は約10%小さい。後者の低い相対感度は一部はイオン化断面積の相違によるものであり、また一部は質量差別に基づくものである。
- (3) QMSでの相対感度は分解能が数倍変わっても影響を受けない。

〔文 献〕

- 1) H. F. Dylla: J. Vac. Sci. Technol., **20** (1982) 119.
- 2) R. E. Ellefson, E. Moddeman and H. F. Dylla: J. Vac. Sci. Technol., **18** (1981) 1062.
- 3) F. Nakao: Vacuum, **25** (1975) 201, 431.
- 4) K. Nakayama and H. Hojyo: Jpn. J. Appl. Phys. Suppl. 2, Pt. 1, (1974) 113.
- 5) R. Holando: J. Vac. Sci. Technol., **10** (1973) 113.
- 6) T. A. Flaim and P. D. Ownby: J. Vac. Sci. Technol., **8** (1971) 661.
- 7) V. H. Dibeler, F. L. Mohler, E. J. Wells, Jr. and R. M. Reese: J. Res. Natl. Bur. Standards, **45** (1950) 288; Phys. Rev., **79** (1950) 223.
- 8) K. Ichimura, N. Inoue, K. Ashida, M. Matsuyama, H. Miyake and K. Watanabe: Radioisotopes, **34** (1985) 83.
- 9) K. Ichimura, N. Inoue, K. Watanabe and T. Takeuchi: J. Vac. Sci. Technol., **A2** (1984) 1341, **A3** (1985) 346; Ann. Rept. Tritium Res. Center Toyama Univ., **2** (1982) 69, **3** (1983) 33, **4** (1984) 37.
- 10) O. A. Schaeffer and J. M. Hastings: J. Chem. Phys., **18** (1950) 1048.
- 11) P. A. Redhead, J. P. Hobson and E. V. Konerssen 著, 富永五郎, 辻 泰訳: 超高真空の物理 (岩波書店, 1977) p. 276.