

真空科学ハンドブック

日本真空学会 編

コロナ社

刊行のことば

『真空科学ハンドブック』をお届けします。ハンドブックというには大部に過ぎないかといわれると、まさにそのとおりです。むしろ教科書と考えていただいた方がよいでしょう。それも、現在入手可能な真空科学・技術に関する類書の中では、おそらく最も詳しく、かつ最も高度な内容であると思います。かなり充実したものであると自負しております。このような本ができた背景には、永年にわたって Journal of the Vacuum Society of Japan (『真空』誌) に、論文、解説記事を書かれた方々、また、毎年日本真空学会が開講している真空夏季大学の講師として活躍された方々が多数いらっしゃるがあります。

真空夏季大学は 2017 年で 57 回目を迎えました。毎年、テキストを更新し、講師が交替するときには、さらに内容を付け加えるなどして、すでにかんりの厚さとなり、これ自体が真空科学・技術の教科書に成長しています。夏季大学の限られた時間内には教えきれないという矛盾も抱えています。夏季大学のテキストを出版物として残そうという話はずいぶん昔からありました。それが実現しなかったのは、夏季大学のテキストは毎年、講師が更新すべきで固定したものとするのは良くない、すなわち講師もテキスト作りで勉強すべきであるという積極的な理由もありました。一方、これほどページ数の多い本は昨今の出版事情では発行が難しいという背景もありました。

コロナ社から、社の創立 90 周年記念出版として真空学会編集の本を出したいという相談をいただいたのは 2013 年のことでした。かねてより真空科学のテキストをまとめたいという希望がありましたので、これは願ってもないことでした。夏季大学のテキストとしてかなりの内容のものが形を成していましたし、しかも、ページ数の制限はないとのことなので、ほとんどの部分はそのまま原稿とすることができる、とかなり楽観的な予想の下、編纂が始まりました。素材がほぼそろっているという点では、その予想は当たっていました。しかし、一つひとつ独立した、しかもそれぞれ講師の色が強く出ている夏季大学のテキストを集めただけでは 1 冊の本にはなりません。統一感と一貫性を確かなものにするために編集委員は工夫し、執筆者の皆様にはさまざまなお願いをいたしました。また、時間の制限のために夏季大学では扱っていない項目を加えて、網羅的なものにまとめることにも努力いたしました。

用語と記号の統一も課題でした。「真空」は相当に広い分野に広がっており、用語・記号にも分野ごとのバラエティがあります。それらを無理矢理に画一的にそろえることは、

記述のスマートさを損なうことになるので、適当と思われるところで止めてあります。

本書には真空科学・技術の過去・現在・未来が詰まっています。「過去」は先人達が築いてきたこの分野の基礎であり、「現在」は、文字どおりこの分野の活動の現状といえるでしょう。「未来」は見えません。予想でしかありません。しかし、本書に書かれていることが、まだ見えぬ未来の科学と技術の礎になることは間違いのないと思います。本書がそのように活用されれば編集委員・執筆者一同の喜びであります。

最後になりましたが、編集委員の一人、橋内浩之さんが本書の完成をご覧になることなく急逝されましたことはたいへん悲しく残念なことでした。本企画が始まって以来の多大のご尽力に感謝申し上げます、ご冥福をお祈りいたします。

2018年2月

真空科学ハンドブック編集委員会委員長
日本真空学会会長
荒川一郎

編集委員会

委員長

荒川一郎 (学習院大学)

委員

秋道 齊 (産業技術総合研究所)	土佐正弘 (物質・材料研究機構)
稲吉 さかえ (株式会社アルバック)	中野武雄 (成蹊大学)
橋内 浩之 (元株式会社日立ハイテク ノロジーズ, 2017年2月逝去)	福田常男 (大阪市立大学)
末次 祐介 (高エネルギー加速器研究機構)	福谷克之 (東京大学)
鈴木 基史 (京都大学)	松田七美男 (東京電機大学)
高橋 主人 (元大島商船高等専門学校)	松本 益明 (東京学芸大学)

(五十音順)

執筆者一覧

荒川一郎 (学習院大学) 0章, 1.4.6~1.4.8, 4.4	濱口宗久 (株式会社大阪真空機器製作所)
齊藤芳男 (東京大学) 0章, 5.2.5	3.2.2, 3.2.3, 3.2.6
松田七美男 (東京電機大学) 1.1, 1.3.1~1.3.3, 1.6.1, 1.6.3	白井克明 (株式会社荏原製作所) 3.2.4
福田常男 (大阪市立大学) 1.2	降矢新治 (アルバック・クライオ株式会社) 3.2.7
末次祐介 (高エネルギー加速器研究機構) 1.3.4~1.3.9, 3.4, 5.2.1	堀洋一郎 (高エネルギー加速器研究機構) 3.3
福谷克之 (東京大学) 1.4.1~1.4.5, 1.6.2, 1.6.4	井川秋夫 (島津エミット株式会社) 3.5
石川雄一 (元横浜国立大学) 1.5	菊地俊雄 (VISTA株式会社, 元キャノン アネルバ株式会社) 4.1.1~4.1.6
土佐正弘 (物質・材料研究機構) 2.1, 2.2, 2.5	高橋直樹 (アトナーブ株式会社) 4.1.7, 4.2
板倉明子 (物質・材料研究機構) 2.3	吉田肇 (産業技術総合研究所) 4.3, 4.5, 4.6
為則雄祐 (高輝度光科学研究センター) 2.4, 2.6	間瀬一彦 (高エネルギー加速器研究機構) 5.1
山本将博 (高エネルギー加速器研究機構) 2.7.1~2.7.3	金正倫計 (日本原子力研究開発機構) 5.2.2
道園真一郎 (高エネルギー加速器研究機構) 2.7.4	松田武志 (宇宙航空研究開発機構) 5.2.3
稲吉 さかえ (株式会社アルバック) 2.8, 2.9	森研人 (宇宙航空研究開発機構) 5.2.3
高橋 主人 (元大島商船高等専門学校) 3.1	小森彰夫 (自然科学研究機構) 5.2.4
川崎 洋補 (キャノンアネルバ株式会社) 3.2.1, 3.2.5, 3.2.8~3.2.10	木ノ切恭治 (真空テクノサポート) 5.3
	中野武雄 (成蹊大学) 6.1
	鈴木基史 (京都大学) 6.1
	江利口浩二 (京都大学) 6.2
	吉原一紘 (シエンタオミクロン株式会社) 6.3

(執筆順)

(2018年3月現在)

凡 例

1. 構成および章・節・項の区分

- (a) 章・節・項はポイントシステムを採用した。
- (b) 図・表・式は、節ごとの一連番号とした。

2. 用 語

- (a) 主要な用語は、その初出時に対応英語を併記した。
- (b) 外国人名は、定理や方法などに冠する際には片仮名書きとし、その他の場合は原語とした。
- (c) 外来語の表記については、そのまま日本語の用語として使用されているものは片仮名書きとし、日本語の用語が統一されていないものは原語で表記した。なお、片仮名表記法は、原則として JIS Z 8301 に準拠した。
- (d) 外国語の略語には、原則として原語（フルスペル）を併記した。
- (e) 真空関連用語の表記は、原則として JIS Z 8126 に準拠した。

3. 単位、定数

単位は、原則として国際単位系 (SI) を用いることとした。ただし、文献を引用した場合や広く慣用的に用

いられている場合は、SI 以外の単位表記を認めている。諸定数は 2014 CODATA を基にした。ただし、質量標準の見直しに伴って抜本的な改定が行われ、2018 年に 2018 CODATA が発表される予定である。

4. 数学記号、量記号、単位記号および図記号

一般の数学記号、量記号、単位記号および図記号は、原則として JIS に準拠した。

5. 文 献

- (a) 文献は章末または節末に一括して掲載した。
- (b) 文献番号は章または節ごとの一連番号とした。
- (c) 文献は、本文中のその事項の右肩に片括弧付きの番号を付けて表記した。
- (d) 文献の記載の仕方は、つぎのとおりとした。
[雑誌] 著者名：誌名，巻（発行年）ページ。
[書籍] 著者名：書名，（編者名）（出版社，出版地，発行年）版，巻，章，ページ。

6. 索 引

巻末に五十音順，アルファベット順で掲載した。

基礎定数表 (2014 年調整値)

名 称	記 号	数 値	単 位	相対標準 不確かさ
真空中の光速	c, c_0	299 792 458	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	定義値
真空の透磁率	μ_0	$4\pi \times 10^{-7} = 12.566 370 614 \dots \times 10^{-7}$	$\text{N} \cdot \text{A}^{-2}$	定義値
真空の誘電率 $1/\mu_0 c^2$	ϵ_0	$8.854 187 817 \dots \times 10^{-12}$	$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$	定義値
万有引力定数 (ニュートン定数)	G	$6.674 08(31) \times 10^{-11}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$	4.7×10^{-5}
プランク定数	h	$6.626 070 040(81) \times 10^{-34}$	$\text{J} \cdot \text{s}$	1.2×10^{-8}
$h/2\pi$	\hbar	$1.054 571 800(13) \times 10^{-34}$	$\text{J} \cdot \text{s}$	1.2×10^{-8}
素電荷	e	$1.602 176 620 8(98) \times 10^{-19}$	C	6.1×10^{-9}
磁束量子 $h/2e$	Φ_0	$2.067 833 831(13) \times 10^{-15}$	Wb	6.1×10^{-9}
コンダクタンス量子 $2e^2/h$	G_0	$7.748 091 731 0(18) \times 10^{-15}$	S	2.3×10^{-10}
電子の質量	m_e	$9.109 383 56(11) \times 10^{-31}$	kg	1.2×10^{-8}
陽子の質量	m_p	$1.672 621 898(21) \times 10^{-27}$	kg	1.2×10^{-8}
電子・陽子の質量比	m_p/m_e	1 836.152 673 89(17)		9.5×10^{-11}
微細構造定数 $e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$	α	$7.297 352 566 4(17) \times 10^{-3}$		2.3×10^{-10}
微細構造定数の逆数	α^{-1}	137.035 999 139(31)		2.3×10^{-10}
リユードベリ定数 $\alpha^2 m_e c/2\hbar$	R_∞	10 973 731.568 508(65)	m^{-1}	5.9×10^{-12}
アボガドロ定数	N_A, L	$6.022 140 857(74) \times 10^{23}$	mol^{-1}	1.2×10^{-8}
ファラデー定数 $N_A e$	F	96 485.332 89(59)	$\text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$	6.2×10^{-9}
1 モルの気体定数	R	8.314 459 8(48)	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	5.7×10^{-7}
ボルツマン定数 R/N_A	k	$1.380 648 52(79) \times 10^{-23}$	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$	5.7×10^{-7}
シュテファン・ボルツマン定数 ($\pi^2/60$) $k^4/\hbar^3 c^2$	σ	$5.670 367(13) \times 10^{-8}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$	2.3×10^{-6}
		SI と併用してよい非 SI 単位		
電子ボルト (e/C) J	eV	$1.602 176 620 8(98) \times 10^{-19}$	J	6.1×10^{-9}
(統一) 原子質量単位 $\frac{1}{12}m(^{12}\text{C})$	u	$1.660 539 040(20) \times 10^{-27}$	kg	1.2×10^{-8}

目 次

0. 真空科学・技術の歴史

0.1 真空と気体の科学	1	Langmuir) —	4
0.1.1 真空と大気圧	1	0.2.3 イオンポンプとゲッターポンプ	5
0.1.2 気体の状態方程式と分子の運動	2	0.2.4 クライオポンプ	5
0.1.3 導管内の分子の運動とコンダクタンス (M. Knudsen と M. von Smoluchowski)	3	0.3 圧力の測定	5
0.2 真空ポンプ	3	0.3.1 力学的測定	5
0.2.1 液柱ポンプの発明	3	0.3.2 気体の諸性質を利用する圧力測定	6
0.2.2 気体輸送式ポンプ——現代につながる真空技術の進歩 (W. Gaede と I.		0.3.3 電離真空計	6
		0.3.4 質量分析計	6
		0.4 真空科学・技術の現在と将来	7

1. 真空の基礎科学

1.1 希薄気体の分子運動	8	1.3.5 コンダクタンスの合成	45
1.1.1 気体の圧力	8	1.3.6 粘性流領域でのコンダクタンス	47
1.1.2 空 気	8	1.3.7 分子流領域でのコンダクタンス (1) ——円形断面の導管の場合——	53
1.1.3 気体の法則	10	1.3.8 分子流領域でのコンダクタンス (2) ——任意の断面形状を持つ導管 の場合——	57
1.1.4 気体の状態方程式	10	1.3.9 中間流領域でのコンダクタンス	66
1.1.5 物質の三態	11	1.4 気体と固体表面	70
1.1.6 気体の熱力学	12	1.4.1 真空科学の中の表面科学	70
1.1.7 気体分子の速度分布	13	1.4.2 気体分子と表面の相互作用：吸着・散 乱・拡散・脱離	70
1.1.8 真空科学で用いられる種々の物理量の 統計平均	15	1.4.3 気体の吸着	71
1.1.9 平均自由行程	17	1.4.4 気体分子の散乱	85
1.1.10 入射頻度	20	1.4.5 気体の拡散	89
1.2 希薄気体の輸送現象	22	1.4.6 気体の熱脱離	91
1.2.1 粘性流と分子流	22	1.4.7 電子遷移誘起脱離	93
1.2.2 圧力が高い領域での輸送現象	23	1.4.8 気体の吸着と脱離	100
1.2.3 圧力が低い領域での輸送現象 (分子条 件下での輸送過程)	33	1.5 固体表面・内部からの気体放出	112
1.2.4 輸送現象における壁面の効果	35	1.5.1 気体の固体内部への溶解	112
1.3 希薄気体の流体力学	41	1.5.2 気体の固体内部での拡散と透過	113
1.3.1 希薄気体の特徴付ける量	41	1.6 関連資料	117
1.3.2 壁面における分子散乱	43	1.6.1 マクスウェル速度分布に関する計算	117
1.3.3 流 量	43		
1.3.4 コンダクタンス	44		

0

1

2

3

4

5

6

索

1.6.2 拡散方程式	118	1.6.4 熱的適応係数の測定値	120
1.6.3 おもな気体の基本的な性質一覧	119		

2. 真空用材料と構成部品

2.1 真空容器材料	124	2.5.4 ガス放出	165
2.1.1 ステンレス鋼	124	2.6 運動操作導入	166
2.1.2 アルミニウム合金	125	2.6.1 真空中への運動の伝達	166
2.1.3 チタンおよびチタン合金	126	2.6.2 直線導入	168
2.1.4 銅	126	2.6.3 回転導入	169
2.2 真空用部品材料と表面処理	127	2.6.4 モーター駆動	172
2.2.1 耐熱材料（ニッケル基合金）	127	2.7 電気信号導入	174
2.2.2 高温および低温用材料	127	2.7.1 電流導入	175
2.2.3 ガラス，セラミックス， グラファイト	127	2.7.2 熱電対，光ファイバー導入	176
2.2.4 プラスチック，エラストマー	128	2.7.3 高電圧導入	178
2.2.5 表面処理技術	129	2.7.4 高周波導入	178
2.3 接合技術・材料	130	2.8 洗 浄	181
2.3.1 金属と金属の接合	131	2.8.1 汚れの種類と洗浄法	181
2.3.2 金属とガラスの接合	133	2.8.2 機械的な除去	182
2.3.3 金属とセラミックスの接合	134	2.8.3 湿式洗浄	183
2.3.4 接 着 剤	136	2.8.4 乾式洗浄	186
2.4 真 空 封 止	140	2.8.5 洗浄の評価方法	187
2.4.1 エラストマーシールフランジ	141	2.8.6 洗浄後の保管	188
2.4.2 メタルシールフランジ	150	2.8.7 総合的な洗浄方法の検討例	189
2.4.3 メタル O リング	155	2.8.8 関 連 資 料	191
2.4.4 バ ル ブ	158	2.9 ガス放出データ	195
2.4.5 真空バルブの構造	158	2.9.1 熱脱離によるガス放出	195
2.4.6 各種真空バルブ	159	2.9.2 ガス放出速度データの参考文献	217
2.5 真空用潤滑材料	163	2.9.3 透過と拡散	217
2.5.1 真空中での摩擦	163	2.9.4 蒸 気 圧	220
2.5.2 液体潤滑剤	164	2.9.5 ポンプからのガス放出	223
2.5.3 固体潤滑剤	165	2.9.6 熱脱離以外のガス放出	225

3. 真空の作成

3.1 真空の作成手順	232	3.2 真 空 ポ ン プ	261
3.1.1 到達圧力と常用圧力	232	3.2.1 真空ポンプの使用圧力範囲	261
3.1.2 真空装置の構成	235	3.2.2 油回転ポンプ	265
3.1.3 真空ポンプの選択	238	3.2.3 ルーツポンプ	270
3.1.4 真空容器の設計	242	3.2.4 ドライポンプ	274
3.1.5 真空排気システム	248	3.2.5 拡散ポンプ	279
3.1.6 リーク検査	256	3.2.6 ターボ分子ポンプ	284

目	次	vii	
3.2.7 クライオポンプ	292	3.4.3 分子流領域のコンダクタンス	340
3.2.8 ゲッターポンプ	300	3.4.4 中間流領域のコンダクタンス	353
3.2.9 スパッタイオンポンプ	308	3.5 リーク検査	356
3.2.10 ソープションポンプ	314	3.5.1 リークのメカニズム	358
3.3 排気プロセス	318	3.5.2 リーク量の単位	361
3.3.1 排気の数式	318	3.5.3 許容リーク量	362
3.3.2 粘性流領域の排気	324	3.5.4 ヘリウムリークディテクターの原理と 校正	363
3.3.3 分子流領域の排気	325	3.5.5 各種リーク検出方法	367
3.4 排気速度とコンダクタンス	334	3.5.6 リーク検出の実際	369
3.4.1 実効排気速度とコンダクタンス	334		
3.4.2 粘性流領域のコンダクタンス	335		

4. 真空計測

4.1 全圧真空計	373	4.3.6 面積流量計（フロート流量計）	415
4.1.1 U字管真空計	373	4.4 真空計測の誤差の要因と対策	416
4.1.2 マクラウド真空計	373	4.4.1 気体の種類による感度の違い	417
4.1.3 ブルドン管真空計	374	4.4.2 真空系に起因する誤差	417
4.1.4 隔膜真空計	374	4.4.3 真空計に起因する誤差	418
4.1.5 熱伝導真空計	377	4.5 真空計を用いた気体流量の計測 システム	420
4.1.6 粘性真空計	380	4.5.1 はじめに	420
4.1.7 電離真空計	384	4.5.2 基礎	420
4.2 質量分析計，分圧真空計	397	4.5.3 真空試験のための計測システム	420
4.2.1 四極子形質量分析計	398	4.5.4 昇温脱離分析法	423
4.2.2 RGA の実際と問題点	401	4.5.5 ガス透過測定	425
4.2.3 磁場偏向型質量分析計	405	4.6 校正と標準	428
4.2.4 飛行時間型質量分析計	406	4.6.1 はじめに	428
4.2.5 その他の質量分析計	407	4.6.2 圧力真空標準	428
4.3 流量計，圧力制御	410	4.6.3 国際単位系 (SI)	431
4.3.1 はじめに	410	4.6.4 比較校正法	432
4.3.2 マスフローコントローラー	410	4.6.5 真空計測における不確かさとトレーサ ビリティについて	433
4.3.3 形状の決まった孔を用いる方法	412		
4.3.4 透過リーク	414		
4.3.5 膜式流量計（せっけん膜流量計）	415		

5. 真空システム

5.1 実験研究用超高真空装置	436	5.1.5 超高真空実験の安全対策	451
5.1.1 超高真空の基礎	436	5.2 大型真空装置	453
5.1.2 超高真空用材料と超高真空装置構成部 品	439	5.2.1 はじめに	453
5.1.3 実験用超高真空装置の製作	444	5.2.2 粒子加速器	454
5.1.4 試料作製機構の具体例	450	5.2.3 スペースチャンバー	466
		5.2.4 核融合装置	475

0

1

2

3

4

5

6

索

viii	目	次
5.2.5	重力波検出器	487
5.3	産業用各種生産装置	496
5.3.1	概 要	496
5.3.2	真空の五つの性質	497
5.3.3	差圧を利用する	497
5.3.4	断熱を利用する	503
5.3.5	蒸発を利用する	506
5.3.6	無酸素環境を利用する	509
5.3.7	放電を利用する	511
5.3.8	応 用 最 前 線	518

6. 真 空 の 応 用

6.1	薄 膜 作 製	525	6.2.3	微細加工プラズマプロセスの今後の展 望	548
6.1.1	は じ め に	525	6.3	表 面 分 析	552
6.1.2	薄膜作製法の概要	525	6.3.1	真空中の試料表面	552
6.1.3	成膜の素過程	527	6.3.2	真空中の電子の飛行距離	553
6.1.4	実際の成膜例	533	6.3.3	電子と固体の相互作用を利用した表面 分析	553
6.1.5	ま と め	538	6.3.4	X線と固体の相互作用を利用した表面 分析	560
6.2	プラズマプロセス	539	6.3.5	イオンと固体の相互作用を利用した表 面分析	566
6.2.1	低中真空領域でのプラズマ プロセス	539			
6.2.2	低中真空領域プラズマを用いた超微細 加工～プラズマエッチング	541			

索 引		571
-----	--	-----

膜の温度変動を抑えるため、ポンプ容器外側に水冷パイプまたは液体窒素ジャケットを設置している。またポンプ容器吸気口には、チタン蒸発物質が真空容器側に飛散することを防ぐ目的で、バッフルが設置される。

チタン蒸発源は、現在、いくつかの方式が市販されており、大きくは(1)通電加熱型蒸発源と(2)放射加熱型蒸発源に分けられる。

(a) **通電加熱型蒸発源** 通電加熱型蒸発源は、線状のゲッター材に直接電流を流すことで発生するジュール熱によって、ゲッター材を加熱蒸発(昇華)させる方式である。通常、線状の蒸発源を複数本装着している。1本が消耗した際には真空を保持したまま残りの線状ゲッター材への切換えが可能となっている。

図3.2.67(a)に、チタンサブリーションポンプ通電加熱型の市販製品の外観を示す。本ポンプは、チタンを蒸発(昇華)させるために10 A から50 A 前後の電流を流すため、電流量の大きな電流端子に組み込まれている。

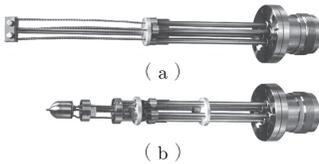


図3.2.67 チタンサブリーションポンプ外観
(キヤノンアネルパ株式会社：真空ポンプ技術資料より)

なお、通電加熱型蒸発源で最も安価で入手しやすいのは、巻線型蒸発源である。蒸発源の構造は図3.2.68⁶⁰⁾に示すとおり、タングステンの芯線の周りにチタン線とモリブデン線を巻き付けた構造となっている。

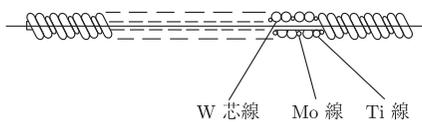


図3.2.68 巻線型蒸発源構造図⁶⁰⁾

一般的にチタン蒸発源は、チタンの変態点(882.5℃: 六方最密構造から体心立方構造に変わる)を境にして電源のオン・オフサイクルにより加熱・冷却を繰り返すことで表面が変質し、寿命が短くなる。これはチタンの結晶構造の転移によるもの、あるいはチタン中への水素の拡散と放出の繰返しで組織の破壊が進行するためと考えられている⁶⁰⁾。現在、この現象を抑制するために、チタンが昇華しない程度の温度でチタン蒸発源をつねに変態点温度以上に保つ加熱制御方式をとる場合も多い⁶⁰⁾。

上に述べた通電加熱の制御方式以外に、チタン表面の変質や寿命改善を狙った蒸発源として、Ti-Mo 合金蒸発源がある。これは85% Tiと15% Moの合金で作られた線状蒸発源で、巻線型蒸発源のように電源オフ時の予熱が不要であることや、蒸発速度が比較的均一で再現性があること、機械的強度に優れる等の利点がある。一方、コスト的には巻線型蒸発源に劣る。

通電加熱型蒸発源は、チタンの消耗に伴う線形の変化や、Ti-Mo 合金の場合には組成比の変化によって抵抗値の変化を生じ、チタンの蒸発速度や投入電力の変動が著しいといった欠点を有する。

(b) **放射加熱型蒸発源** 放射加熱型蒸発源は、中空ボール状に加工したチタンの内部にタングステン製フィラメントを配置し、これに電流を流すことで放射加熱を行う。

図3.2.67(b)に、放射加熱型蒸発源の市販製品の外観を示す。ここに示す放射加熱型は、投入電力はほぼ通電加熱型蒸発源と同等の380 W程度で、通電加熱型蒸発源の約4倍の蒸発速度($\sim 0.35 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$)と約15倍の有効チタン量($\sim 15 \text{ g}$)を有する⁶⁰⁾。

図3.2.69に、チタンサブリーションポンプの排気原理を示す。チタンの蒸発(昇華)によって形成されたチタン蒸着膜に気体分子が入射すると、気体分子はチタン蒸着膜と化学的に結合し(化学結合)、化合物として固定される。

形成されたチタン蒸着膜は、一度、気体分子との結

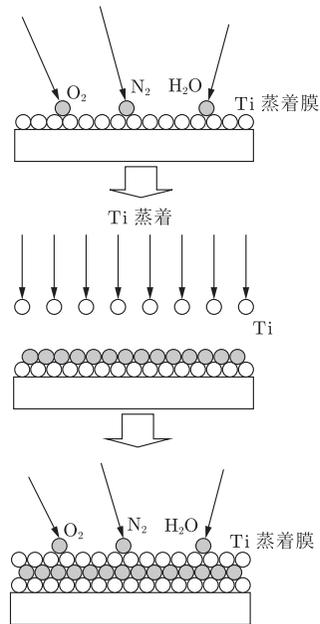


図3.2.69 チタンサブリーションポンプの排気原理

合で飽和すると排気能力が失われる。したがって、継続的に排気を行うためには、その表面に新たなチタン蒸着膜を形成し、ゲッター作用を回復する必要がある。

チタン蒸着面に衝突する気体分子の数は圧力に比例する。付着確率を1とした場合、 10^{-4} Paで4秒、 10^{-5} Paで40秒、 10^{-8} Paでは40000秒(約11時間)で単分子層が形成される。なお、チタン蒸着膜に対する気体分子の付着確率は、D. J. Harraによるレビュー⁶¹⁾や荒井らによる報告⁶²⁾がある。液体窒素冷却温度77 Kのチタン蒸着膜への水素の付着確率は、D. J. Harraは0.4、荒井らは0.16~0.22としている。300 Kでは、それぞれ0.06と0.06~0.11である。一酸化炭素COに対しては、単分子層の吸着に至るまで付着確率が1という結果^{61), 63)}も報告されている。いずれにしても、チタン蒸着膜が吸着気体で覆われてしまえば、気体分子の付着確率は低下するので、再度チタンを蒸発させなければならない。

したがって、効率良くチタンを蒸発させるためには、排気中の圧力によってチタンを蒸発させるタイミング(蒸発間隔)を考える必要がある。チタンサブレーションポンプの制御電源には、チタンの蒸発間隔を制御する機能が内蔵されているのが一般的である。

排気のみメカニズムは気体の種類によって異なる。したがって、排気速度は気体の種類に依存する。これは気体の種類によって、チタンとの相互作用が異なるためである。例えば酸素の場合、チタンとの化学結合で酸化物を形成し、固定化するのに対し、水素ではチタン蒸着膜内部への拡散による吸収がおもな排気作用である。またメタンなどの飽和炭化水素に対しては、弱い相互作用でチタン蒸着表面に吸着しているにすぎず、ヘリウム、アルゴン等の貴ガスに至っては、排気能力はほとんどない⁶¹⁾。

〔3〕 サブレーションポンプの排気基本特性

一般的に、チタンサブレーションポンプは 10^{-1} Pa以下の圧力でポンプ作用を示し、排気速度は図3.2.70に示すように、コンダクタンス制限領域と圧力依存性持つチタン昇華速度(蒸発速度)制限領域に分けることができる。

チタンサブレーションポンプのコンダクタンス制限領域における排気速度は以下の3項によって決定される。

- 1) ゲッター面積(チタン蒸着膜の付着面積)
- 2) ゲッター面に衝突した気体分子が、ゲッター面に取り込まれる確率(付着確率)
- 3) ポンプ容器吸気口から、ポンプ作用を示すゲッター面までのコンダクタンス
コンダクタンス制限領域では、ガス放出による気体

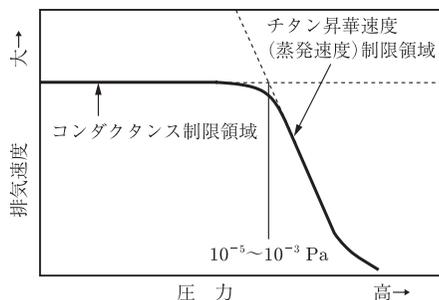


図 3.2.70 チタンサブレーションポンプの排気特性
(キャノンアネルパ株式会社：真空ポンプ技術資料より)

分子の量より蒸発源の昇華により供給されるチタン蒸着分子の量が多い状態であれば、排気速度は圧力やチタン昇華速度によらず、ポンプ容器吸気口からゲッター面までのコンダクタンスによって決まる。コンダクタンス制限領域での排気速度は、下記に示す方法で見積ることができる。

チタン蒸着面(ゲッター面)での排気速度 S_0 は、式(3.2.40)で与えられる。

$$S_0 = A \times s \quad (3.2.40)$$

ここでAはチタン蒸着膜が付着しているゲッター面の面積、sは付着確率より算出されるゲッター面の単位面積当りの排気速度を表す。各種気体に対するsの値は、表3.2.6⁶⁰⁾を参照のこと。

表 3.2.6 新鮮なチタンゲッター面の各種気体に対する付着確率と排気速度⁶⁰⁾

ガス	ゲッター面温度：300 K		ゲッター面温度：78 K	
	付着確率	排気速度 [L/s·cm ²]	付着確率	排気速度 [L/s·cm ²]
N ₂	0.3	3.5	0.7	8.3
H ₂	0.06	2.6	0.4	17.6
D ₂	0.1	3.1	0.2	6.2
CO	0.7	8.3	0.95	11.2
CO ₂	0.5	4.7	—	—
H ₂ O	0.5	7.3	—	—
O ₂	0.8	8.8	1.0	11.0

最後に式(3.2.41)より、ポンプ容器吸気口からポンプ作用を示すゲッター面までのコンダクタンスCで S_0 を補正し、実効排気速度 S_C を算出する。

$$\frac{1}{S_C} = \frac{1}{S_0} + \frac{1}{C} \quad (3.2.41)$$

一方、チタンサブレーションポンプのチタン昇華速度(蒸発速度)制限領域における排気速度は、以下の2項によって決定される。

索引

【あ】

アイソレイトバルブ	160
アイソレーションバルブ	444
アクリロニトリルブタジエンゴム	144
圧縮仕事	268
圧力	16
圧力真空標準	428
圧力天びん	429
圧力-流量線図	251
油回転ポンプ	4, 262, 265
——の排気性能	267
油拡散ポンプ	264, 279
——の排気速度	281
油拡散ポンプ作動油	283
アボガドロ定数	10
アボガドロの法則	10
アモントン・クーロン則	163
粗引きバルブ	160
アルカリ洗浄	184
アルゴンアーク溶接	131
アルフォイルフランジ	155
アルミエッジシール	146
アルミニウム合金	125, 441
——のガス放出速度	201, 441
アングルバルブ	158, 159

【い】

イオン化スパッタリング	536
イオン化断面積	385
イオン化ポテンシャル	78
イオン源	456
イオン検出器	400
チャンネルترون型	401
二次電子増倍管	401
ファラデーカップ型	400
マイクロチャンネルプレート	401
CEM	400
MCP	401
SEM	400
イオンコレクター	384
イオン対反発機構	97
イオントラッピング	460
イオン不安定性	460
イオンフラックス	543
イオン分光型真空計	391

イオンポンプ	5
イオン密度	544
異方性エッチング	547
医療用粒子加速器	517
インレットバルブ	161

【う】

ウォーターサイクル現象	4
運動量適応係数	36, 37
運動量流束	24

【え】

永久圧縮ひずみ	141
液化ガスタンク	504
エキシトン	96
エキストラクター真空計	390
液体潤滑剤	164
液体窒素トラップ	282
液柱ポンプ	3
液封ポンプ	262
エジェクターポンプ	276
エージング加熱	304
エッジ	567
エッチング	184, 185
——で利用されるガス	547
エネルギー損失関数	564
エネルギー適応係数	85
エネルギー流束	26
エバルト球	555
エラストマー	141
——の気体透過率	217
——の気体透過量	142
——の気体放出速度	143
——の耐熱温度	144
エラストマーシールフランジ	141
沿面放電	178, 180, 462

【お】

オイルバック	282
オイルミスト	269
オイルミストトラップ	445
オイルレス化	4
大型真空装置	453
大型ヘリカル装置	475
オージェ電子分光法	558
オーステナイト系ステンレス鋼	125
オゾン水	183

オービトロンゲージ	391
オメガトロン	407
オリフィス	412
——のコンダクタンス	60
オリフィス法	429
オールメタルバルブ	160
温度飛躍	68
温度飛躍距離	36

【か】

加圧積分法	369
ガイスラー管	511
回転直線導入機	169
回転導入機	170
回転翼型	265
解離吸着	75
改良ソルバーサイクル	293
化学吸着	71
化学研磨	184
化学的気相堆積法	525
拡散過程	53
拡散距離	119
拡散係数	90, 426
拡散長	119
拡散的な輸送	530
拡散反射	43
拡散放出	112
拡散方程式	118
拡散ポンプ	4, 250, 279
拡散流束	28, 118
核生成成長	531
拡張不確かさ	433
角度分解法	564
隔膜真空計	374
核融合装置	475
加工形状異常	549
ガス透過度	426
ガスバラスト方式	268
ガス放出曲線	328
ガス放出速度	112, 195
ガス放出データ	195
ガスリークバルブ	161
活性化エネルギーの分布	327
活性化障壁	76
活性金属法	135
価電子単位	562
加熱洗浄	186

加熱脱ガス	114	許容リーク量	362	研磨材	182
カーボンペースト	138	金線ガスケット	154		
ガラスおよび金属の熱膨張率	133			【こ】	
ガラスのヘリウム透過率	217			高エネルギーイオン散乱分光法	566
乾式洗浄	181, 186	【く】		高輝度放電ランプ	512
乾式ブラスト	182	食込み式継手	157	公共座標系	492
管内平均自由行程	53	空間通過時定数	323	交差圧力	296
		空気の成分	9	高周波導入	178
【き】		空気力学動力	498	高周波窓	179
機械式小型冷凍機	293	クヌーセン数	23, 41, 543	校正リーク	361
機械的な(汚れの)除去	181	クヌーセンセル	526, 528	剛体球モデル	17
気化熱	319	クヌーセン層	23, 35	高電圧導入	178
キスリユックモデル	77	クライオトラップ	299	光波干渉式標準圧力(気圧)計	
気体		クライオポンプ	5, 250, 264, 292		373, 428
—の状態方程式	10	—の再生	298	後方散乱因子	567
—の透過	112	—の最大流量	296	高融点金属粉法	135
気体分子によるレーザー光の散乱	488	—の到達圧力	297	小型 RGA	404
		—の排気速度	295	国際単位系	8
気体輸送式ポンプ	4	—の排気容量	296	国際地球基準座標系	493
気体流量の計測	420	クラウジニング係数	62, 348	誤差	433
キニー型	266	エルボー	351	固体潤滑剤	165
ギフォード・マクマホーンサイクル	293	矩形導管	349	固体内部からの拡散	332
		邪魔板	353	黒化处理	494
逆格子ロッド	555	スリット	349	コーナースील	154
逆マグネトロン型真空計	394	正三角形導管	351	コパール封着	133
キャピラリー	412	楕円形導管	350	コールドトラップ	282
キャプチャリングシール機構	153	凸凹のある導管	353	コールドリーク	479
吸引搬送	498	同心円筒	350	コンダクタンス	3, 44
吸引電流	557	長い円形導管	348	—の合成	45
吸着	71, 75	バッフル	352	コンダクタンス(中間流領域)	353
—酸化炭素の—	82	半月形邪魔板	353	開口	355
—貴ガスの—	79	縁付円筒導管	352	長い様な導管	353
—酸素の—	80	短い円形導管	348	短い導管	355
—水素の—	79	短い楕円形導管	350	コンダクタンス(粘性流領域)	335
—窒素の—	82	短い同心円筒	351	厚みのない開口	339
—水の—	83	ガラスビーズプラスチック処理	182	長い円形導管	336
吸着エネルギー	74	クラッキングパターン	402	長い矩形導管	337
吸着確率	76	クランプ型継手	145	長い楕円形導管	339
吸着子	71	クランプ締めフランジ	147	長い同心円導管	338
吸着質	71	グレアムの法則	10	粘性係数	336
吸着等圧線	102	クロー型ドライポンプ	275	摩擦係数	336
吸着等温線	102	クローポンプ	264	短い円形導管	339
—活性炭の—	293	クロロプレングム	144	コンダクタンス(分子流領域)	340
—モレキュラーシープの—	293			円形断面レデューサー	347
吸着等量線	102	【け】		開口	343
吸着熱測定	74	蛍光灯	512	矩形断面レデューサー	347
吸着媒	71	ゲイ=リュサックの法則	10	ゲートバルブ	346
吸着パッド	499	ゲージ圧	497	同心円筒トラップ	346
吸着平衡	74	結合解離エネルギー	78	長い円形導管	340
吸着ポテンシャル	74	結合性軌道	72	長い矩形導管	341
凝縮	71	ゲッターポンプ	5, 300	長い正三角断面の導管	342
共振インピーダンス	382	ゲージ型	265	長い楕円形導管	343
鏡面反射	43	ゲートバルブ	160	長い同心円筒	342
極高真空	436	減圧蒸留	508	短い円形導管	344
凝縮性気体の排気	268	限界座屈圧力	243	短い矩形導管	344
許容排気口圧力	289	嫌気性培養器	511	短い同軸円筒管	345

L アングル導管 345
 S 型バルブ 345
 コンダクタンス変調法 393, 421
 コンダクタンスリーク 412
 コンフラットフランジ 152
 コンプレッションシール 134

【さ】

最確速度 15
 最高被占軌道 73
 最小可検りーク量 364
 最大許容交差圧力 296
 最低空軌道 73
 サイドチャンネル型ドライポンプ 276
 サイドチャンネルポンプ 264
 サイフォン問題 1
 座 屈 242
 サザーランド定数 31
 サザーランドの式 31
 サテライトピーク 562
 差動排気型回転導入機 169
 差動排気型クライオポンプ 298
 サーマルバキュームチャンバー 466
 サーマスター真空計 380
 サーマカップル真空計 379
 三極形スパッタイオンポンプ 311
 三極管形電離真空計 388
 三極管真空計 6
 算術平均速度 15
 参照標準真空計 382
 酸洗浄 184
 酸素濃縮機 499
 三方ボールバルブ 161
 残留ガス分析計 397

【し】

シェークアップ 562
 シェークオフ 562
 磁気共鳴画像診断装置 505
 磁気結合 171
 磁気結合方式 168
 磁気軸受型ターボ分子ポンプ 289
 仕切り弁 160
 軸シール 158
 軸対称透過型電離真空計 392
 試験到達圧力 288
 自己拡散 28
 自己拡散係数 28
 シース 545
 磁性流体シール 172
 実効排気速度 334
 実効容積 320
 湿式洗浄 181, 183
 湿式ブラスト 182
 実表面積 107
 質量分解能 398, 400

質量分析計 6, 397
 質量流量 44
 磁場印加型プラズマ 542
 磁場偏向型質量分析計 405
 磁場偏向型分析管 364
 シーベルトの法則 113
 締付けトルク 246
 シャーリー法 563
 射影効果 533
 シャルルの法則 10
 集電子電極 384
 自由度 27
 自由分子熱伝導率 35, 378
 自由分子粘性係数 33
 重力波検出器 487
 受動型磁気軸受 291
 シュミット数 28
 純水洗浄 183
 昇温脱離スペクトル 92
 昇温脱離 (分析) 法 92, 423
 抄紙機 502
 状態図 11
 状態方程式 2
 衝突カスケード 532
 衝突径数 17
 蒸発源 526
 蒸発速度 528
 常用圧力 234
 初期吸着エネルギー 77, 79
 初期吸着確率 (係数) 76
 助走距離 51
 シリコーンゴム 144
 シール 140
 シール過程 256, 258
 シール線荷重 244
 真空外覆 (フード) 法 368
 真空管 4
 真空含浸 500
 真空乾燥 507
 真空グリースの蒸気圧 223
 真空減圧包装 520
 真空コンクリート 501
 真空シール技術 130
 真空射出成型 501
 真空蒸着 509
 真空食品冷却機 507
 真空成形 501
 真空掃除機 498
 真空装置の構成 235
 真空装置用フランジ 147
 真空脱ガス 509
 真空断熱 503
 真空断熱パネル 506
 真空注型 502
 真空凍結乾燥 507
 真空の作成 232

真空排気システム 248
 真空封止 140
 真空吹付け (スプレー) 法 368
 真空粉末断熱 504
 真空包装 509
 真空ポンプ 3, 261
 —の使用圧力範囲 261
 —の選択 238
 真空ポンプ油 267
 —の逆拡散 269
 真空容器の設計 242
 真空容器 (ベルジャー) 法 368
 真空予冷 506
 真空ろう付け 131, 510
 真空ロボット 237
 浸せき (ボンピング) 法 369
 振動エネルギー 遷移機構 97

【す】

水銀回転ポンプ 4
 水銀柱気圧計 2
 吸込み仕事率 499
 吸込み (スニッファー) 法 368
 水蒸気透過度 426
 水晶摩擦真空計 382
 水素結合 72
 水素透過 115
 水素透過率 114, 220
 水素の拡散放出 115
 水素溶解度 113
 水分吸収率 113
 スクリュー型ドライポンプ 275
 スクリューポンプ 264
 スクロールポンプ 263, 276, 461
 スタティック SIMS 569
 ステッピングモーター 173
 ステンレス鋼 124
 —のガス放出率 196
 ストライバック曲線 163
 スパッタイオンポンプ 249, 264, 308, 461
 —の排気速度 311
 スパッタ原子のエネルギー 528
 スパッタ粒子の放出角度分布 529
 スパッタリング 513
 スパッタリング法 526
 スピニングローター真空計 380
 スプレングルポンプ 3
 スペースシミュレーター 466
 スペースチャンバー 466
 滑り速度 35
 滑り流 23
 滑り流領域 68
 スループット法 420, 426
 スローリーク 481



【せ】

成形ベローズ	167
整合相	106
静電容量式隔膜真空計	375
成膜速度	534
積分型透過曲線	427
絶縁破壊	462
絶縁ワニス	138
せっけん膜流量計	415
接線運動量適応係数	85
絶対圧	497
絶対脱離収率	98
セラミックス封着	135
全圧真空計	373
遷移流	23
洗浄用薬剤	189
洗浄水温度	185
選択吸着	76
選択比	547
全脱離断面積	99
全反射蛍光 X 線分析法	565

【そ】

双極子モーメント	78
相互拡散	28
相互拡散係数	28
走査電子顕微鏡	516, 556
相対感度係数	560
層流	42
——のコンダクタンス	51
層流管	413
測地座標系	492
測定子	
——からの気体放出	419
——の排気速度	418
速度滑り	68
速度定数	91
阻止能	567
その他の材料のガス放出速度	212
粗排気過程	232
粗排気の時間	238
ソーブションポンプ	265, 314
ソーラーシミュレーター	472
ゾーンモデル	532

【た】

大気圧	9
大気圧ベントシステム	444
大気中気体の透過率	114
体積入射頻度	20
体積流量	44
帯電	462
大電力パルススパッタリング	536
ダイナミック SIMS	569
ダイバーター	484

耐薬品性	143
ダイヤフラム型ポンプ	274
ダイヤフラムバルブ	161
ダイヤフラムポンプ	4, 263
ダイヤモンドライクカーボン	
	165, 519
耐油性	143
太陽電池用ラミネーター	510
高石・泉水による経験式 (Takaishi-Sensui の式)	376, 418
多孔質体	413
多層吸着	106
多層断熱	505
多段ルーツポンプ	264
タッチダウンベアリング	290
脱調	173
脱離断面積	98
脱離の活性化エネルギー	424, 437
脱離頻度	91
脱離方向分布	99
タービン翼部	285
ターボ型ドライポンプ	276
ターボ真空ポンプ	264
ターボ分子ポンプ	4, 248, 264, 284, 461
——の圧縮比	288
——の安全性	291
——の排気速度	288
——の流量特性	288
——の臨界背圧	288
玉軸受型ターボ分子ポンプ	290
ダルシー・ワイスバッハ方程式	49
ダルトンの法則	10
単純クエット流	25
単純せん断流	25, 35
弾道的な輸送	530
断熱真空ガラス	504
断熱流れ	49
単分子層	71
単分子層形成時間	22, 436

【ち】

置換吸着	304
蓄積法	422, 426
地図座標系	492
チタンゲッター面の付着確率	303
チタン合金	126
チタンサブイメーションポンプ	
	264, 301
——の排気速度	303
——のメモリ効果	304
チタンのガス放出速度	207
窒素換算値	387, 417
中間流	23, 42
中間流領域でのコンダクタンス	66
中空メタル O リング	156
超高真空	8, 436

超高真空内用金属材料	442
超高真空内用非金属材料	442
超高真空容器用ステンレス鋼	439
超高真空用材料	439
超高真空領域用真空計	447
超高真空領域用真空ポンプ	445
超微細加工	539
跳躍拡散	89
超臨界二酸化炭素	184
チョーク流れ	49
直線導入機	168

【つ】

通過確率	62
通電加熱型蒸発源	302
ツガード法	564

【て】

定圧比熱	12
定圧流量計	430
低合金チタン	441
定積比熱	12
低速電子線回折法	554
定容流量計	430
適応係数	85
デバイ長	543
テーパーシール型ガスケット	154
テムキン(吸着)式	104, 326
テレフケン法	135
電解研磨	184
電解複合研磨	184, 490
電気双極子	71
電氣的ダメージ	550
電気四極子	72
電子雲不安定性	461
電子温度	540
電子サイクロトロン共鳴型	542
電子銃	456
電子衝撃脱離	93, 330
電子親和力	78
電子遷移誘起脱離	93
電子ビーム蒸発源	526
電子ビーム真空溶解炉	516
電子ビーム部分改質加工	157
電子ビーム溶接	132
電子プローブマイクロアナリシス	
	557
電子密度	540
電子誘起脱離	93
電子・陽子不安定性	460
電子励起脱離	93, 225, 391, 403, 419
電離真空計	6, 384
——の感度係数	385
——の比感度	385
電流導入端子	175

【と】

透過型ヘリウム標準リーク	415
透過係数	426
透過電子顕微鏡	516
透過リーク	414
透過流束	426
導管の直接接続	63
同軸円筒内の気体の熱伝導	39
到達圧力	232, 288
動粘性係数	42
銅のガス放出速度	210
導波管	178
トカマク方式	476
特殊なガスを用いたリーク検査	259
特性 X 線	557
ドータイト	138
止め弁	160
ドライエッチング	515
ドライベーンポンプ	275
ドライポンプ	263, 274
トリチェリの真空	1
トルシール	136
トレーサビリティ	434
トロコイド (サイクロイド) 形 質量分析計	407
トンプソンの式	528

【な】

内殻準位	561
ナイフエッジ型メタルシール フランジ	153
斜め蒸着膜	533
ナビエ・ストークス方程式	48
軟 X 線効果	389, 419

【に】

二極形スパッタイオンポンプ	308
二次イオン質量分析法	568
二次元凝縮	105
二次元分子系	105
二次電子	556
ニッケル基合金	127
入射頻度	16, 20
ニュートンの粘性法則	25
ニュートン流体	25
ニューマチックアンローダー	498
入力カプラー	180
二流路法	422

【ぬ】

濡れ	106
----	-----

【ね】

ネオンサイン	512
ねじ溝部	287

ねじれ吸収ベローズ	171
熱陰極	384
熱陰極型イオン源	398
熱陰極電離真空計	384
熱化	530
熱化距離	531
熱拡散	30
熱拡散係数	30
熱拡散定数	30
熱真空環境	466
熱遷移	21, 376, 418
熱脱離	91
——によるガス放出	195
熱脱離分光	74
熱脱離法	92
熱的適応係数	38, 85, 120
熱電対	176
熱電対導入端子	176
熱伝導真空計	377
熱伝導率の温度依存性	32
熱平均速度	15
熱流	26
粘性	24
——に基づく分子直径	26
——の衝突断面積	26
粘性係数	25, 360
——の温度依存性	31
粘性真空計	380
粘性率	25
粘性流	23, 42
粘性流領域でのコンダクタンス	47
粘度	25

【は】

排気	
——の時定数	238
——の方程式	238, 318
排気曲線	232, 240, 328, 436
排気速度	45
排気抵抗	44
排気プロセス	318
排気量	43
ハイブリッド型ターボ分子ポンプ	291
背面散乱係数	560
ハウスキーパーシール	134
ハーゲン・ポアズイユ流れ	47
バタフライバルブ	161
バックン	166
バックグラウンド	563
バックシール	137
発光ダイオード	520
バッフル	282
ばね入りメタル C リング	155
パーフルオロエラストマー	144
バリアブルリークバルブ	161
パルスモーター	173

反結合性軌道	72
反射高速電子線回折法	555
反射電子	556
反射膜コーティング	519
搬送ロボット	500
反跳打込み	532
反応性イオンエッチング	546

【ひ】

ピエゾ抵抗式半導体圧力センサー	374
比較校正	432
光刺激脱離	459
光刺激脱離係数	459
光衝撃脱離	330
光照射ダメージ	551
光脱離	93
光ファイバー導入端子	177
光励起脱離	93, 228
比感度係数	417
飛行時間型質量分析計	406
非蒸発 (型) ゲッターポンプ	265, 301, 305, 446
ピストン (型真空) ポンプ	263, 274
非弾性平均自由行程	559
被覆率	71
微分型透過曲線	427
ビームの寿命	457
ビーム不安定性	460
標準器	432
標準コンダクタンスエレメント	413
標準状態	12
標準リーク	361
表面粗さ	163
表面拡散	89
表面積測定	107
表面波励起型プラズマ	542
秤量法	423
ピラニ真空計	378
ビルドアップ法	259
ビルトインイオンポンプ	314

【ふ】

ファンデルワールス (状態) 方程式	20, 105
ファンデルワールス相互作用	17
ファンデルワールス力	72
フィック	
——の第一法則	23, 113
——の第二法則	113
フォアライントラップ	269, 444
不均質表面	103
複合型ターボ分子ポンプ	285
副標準真空計	388
副標準電離真空計	374
不整合相	106
不確かさ	433

四極子形質量分析計	7, 398
四極子形マスフィルター	399
四極子モーメント	78
【ら】	
ラザフォード後方散乱分光法	566
ラジカルフラックス	543
ラファティゲージ	391
ラングミュア吸着式	102, 326
乱流	42
——のコンダクタンス	48
【り】	
リーク検査 (テスト)	256, 356, 448, 481
リークバルブ	161
リーク標準	430
リーク量	
——の換算	359

——の単位	362
リーク路	256
理想排気速度	21
リフレクトロン	407
粒子加速器	454
粒子状コンタミネーション	474
流束	24, 28, 118
流束密度	24
流量	43
流路切替え法	422
臨界圧力比	50
臨界温度	105
臨界点	11
臨界ノズル	414
臨界背圧曲線	251
臨界流量	51

【る】	
ルーツ型ドライポンプ	275, 276
ルーツポンプ	263, 270, 461
——の排気性能	271
【れ】	
冷陰極電離真空計	394
励起子	96
励磁最大静止トルク	173
レイノルズ数	42
レジソ含浸	500
レナード・ジョーンズポテンシャル	17, 75
【ろ】	
ローター温度	289
ロシユミット数	13

【A】	
AC	74
AES	558
Antoniewicz 機構	95
APS	189
AT ゲージ	393
【B】	
BET 式	103, 104
BET 法	107
Blyholder モデル	83
BN コーティング	129
B-A 型電離真空計	6
B-A 真空計	388
【C】	
CCG	394
CCP	541
CE 機構	96
CF フランジ	152
CMM	393
CP	250
CVD	525
【D】	
DDC	404
delayed-DC ramp	404
DH 法	509
DIET	93
DIP	314
DLC	165, 519
DP	250, 279
DPRF	169
DR 式	103, 104

DR プロット	105
DR 法	107
【E】	
EAI	74
EBPM	157
ECR	542
ED 機構	96
EID	93
EPMA	557
e-p 不安定性	460
ESCA	561
ESD	93, 391, 403, 419
ESD イオン	403
ESD 断面積	98
Eucken formula	28
【F】	
FSW	132
【G】	
GTR	426
G-M サイクル	293
【H】	
HEIS	566
HID	512
HOMO	73
HPPMS	536
【I】	
ICAO 標準大気	9
ICF フランジ	152, 440
ICP	542
IMFP	559

IP	249
IPD ガスケット	154
IPVD	536
ISO フランジ	147
【J】	
JIS フランジ	149
【K】	
KAGRA	487
KF 機構	95
Kisliuk モデル	77
Knudsen Minimum	67
【L】	
L 字型バルブ	159
LUMO	73
【M】	
MBE	253
MGR 機構	94
MIG 溶接	131
ML	71
MOCVD	520
MRI	505
MS	397
M-Solvay サイクル	293
【N】	
NEG	301, 305, 446
NEG 材内部の水素濃度	306
NEG ポンプ	265, 461
——の活性化	306
——の排気速度	307
Nier 型イオン源	398

	【O】		【S】		UHV	8, 436
O リング	141	sccm	44	UV / オゾン洗浄	187	
O リングシール	166	SCE	413	【V】		
	【P】	Schulz-Phelps ゲージ	394	VaRTM	500	
<i>pd</i> 積	531	SEM	516	VIP	506	
PET	518	SI	8	【W】		
PET フィルムからの気体放出	494	SIMS	568	wetting 転移	107	
PPA	397	SIP	308	WVTR	426	
<i>p-Q</i> 線図	251	STP	114	【X】		
PSA	499	SUS304L のガス放出速度	439	X 線回折法	566	
PSD	93, 459	SWP	542	X 線光電子分光法	561	
PSD 断面積	98	【T】		X 線励起オージェ電子	562	
PSD yield	459	Takaishi-Sensui の式	418	XHV	436	
<i>pV</i> 値	43, 92	TDS	74, 423	XPS	561	
PVD	514, 525	TEM	516	XRD	566	
PVSA	499	TIG 溶接	131	【Y】		
	【Q】	TiN コーティング	129	Y 型バルブ	160	
QMS	398	TMP	248	【数字・記号】		
	【R】	TOF	406	2 乗平均 (根) 速度	16	
RBS	566	TOF-SIMS	569	15 K クライオパネル	293	
RGA	397	TPD	74, 423	80 K シールド	293	
RH 法	509	TPD	74, 423	80 K バッフル	293	
RIE	546	TSP	301			
R/L 導入機	169	TXRF	565			
		【U】				
		U 字管真空計	373			

真空科学ハンドブック
Handbook of Vacuum Science

© 一般社団法人 日本真空学会 2018

2018年3月30日 初版第1刷発行

検印省略

編者 一般社団法人 日本真空学会
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 三美印刷株式会社
製本所 牧製本印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10
発行所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00908-8 C3042 Printed in Japan

(横尾)



 <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつと事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-3513-6969, FAX 03-3513-6979, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。