

---

---

# 最新 実用真空技術総覧

---

---

New Practical Vacuum Technology

最新 実用真空技術総覧 編集委員会 編



# 序

「実用真空技術総覧」が出版されて早30年が経過しました。年月を経て「真空技術」も大きな発展を遂げ、初版の内容では現代の進歩した技術内容に対応できなくなってきました。ナノサイエンス・ナノテクノロジー、スピントロニクス等真空技術を駆使した新しい分野の研究・開発が進展している現状を踏まえて、時代に合わせた「改訂新版」を出版することになりました。

編集を開始してから紆余曲折があり、すでに4年が経過しましたが、この「総覧」は「実用」的に役に立つことを目標に、第一線の150名を超える大変多くの研究者・技術者の方々に執筆をお願いすることができました。具体的な編集をお願いした「編集幹事」ならびに「編集委員」の方々には膨大な数の原稿の依頼や編集に大変なご苦勞をおかけすることになりました。項目数の増加に至った事は内容が充実したことを意味し大変光榮に思っています。執筆者の熱のこもった原稿が積み重なった結果を読み取りいただければ幸いです。

「真空技術」は多くの産業の裏方を担う技術であり、決して華やかな研究・開発分野ではありません。しかしこの技術がなければ多くの産業が成り立たなくなっています。半導体、ナノサイエンス・ナノテクノロジー、スピントロニクスの一見華やかな分野はもとより、材料、評価、食品、医療等の分野においても広く使用されている技術です。表立って「真空技術」が問題にされることはありませんが、研究や開発の現場では「真空技術」の重要性は大いに認識されています。まさに「縁の下の力持ち」的な大変大きな存在です。表面科学の発展はまさに「真空技術」の発展に支えられて「研究」の領域に達したと言っても過言ではありません。近年は分子や原子レベルの研究も大いに盛んになってきました。40年前には「原子」を観て、操ることは夢でありましたが、現在では現実になっています。原子を観て操る技術や分子モーターの研究がノーベル賞を獲得する時代であり、まさに隔世の感があります。これからどのように発展していくか大いに楽しみです。このような分野でも「真空」が果たす役割が大変大きくなっています。「真空」にも段階があり、「極高真空 ( $10^{-10}$  Paオーダー)」といわれる領域から「低真空 ( $10^2$  Pa -大気圧)」といわれる領域まで幅が広く、最先端の研究に使われる「極高真空」や「超高真空」のような先端の技術だけでなく、産業的に

は食品や医療分野に使われる「低中真空」が果たす役割も大変大きいのが現状です。一面、最近では環境問題が大きく注目されています。一部の国のように環境をおろそかにする発言も聞かれますが、地球の未来を考えるなら今まで地球の汚染を行ってきた人類が今後の環境を考えるのは、大きな義務であると考えする必要があります。そのような意味で本「総覧」には真空技術に関する「環境」や「省エネルギー」にも紙面を費やし、時代の要求を踏まえた構成にしました。一面、進歩が著しくない真空ポンプの原理、一般的な真空計の原理、一部の配管の規格のような分野では一部旧版を使用することも行っています。さらに、現在では、量子力学に基づく信頼性の高い計算手法の開発と計算機性能の飛躍的向上が相まって、計算物理、計算化学が重要な貢献をしつつあります。測定結果、実験結果の解釈には、計算物理、計算化学が一役買う場面が多くなっており、このような新しい分野も本文中に取り込みました。

各種の学界や産業界で真空技術を応用する研究・開発に携わる大学、高専、公的研究機関の図書館や研究室、企業における研究・開発部署に置いていただき研究者・技術者にお役に立てていただければ幸いです。

本「総覧」の出版に当たっては、多くの執筆者の方にはお忙しいところ原稿を上程していただきお礼を申し上げます。また副編集委員長、編集幹事・編集委員には多大の貢献をしていただきました。これらの貢献がなければ本「総覧」は日の目を見ることができませんでした。感謝いたします。

また、株式会社NTSの吉田社長には出版不況といわれる中、本「総覧」の重要性を認識いただき、出版をお引き受けいただきました。旧版の出版を行った旧「株式会社 産業技術サービスセンター」平野氏には、今回具体的な編集の実務で大変お世話になりました。両氏にあらためて感謝の意を表します。

2019年2月

編集委員長 笠井 秀明

明石工業高等専門学校長、大阪大学名誉教授

# 「最新 実用真空技術総覧」 総目次

## 第 1 部 真空工学の基礎

### 第 1 編 希薄気体の性質

<b>第 1 章 概 説</b> .....37	1.3 マッハ数：Ma.....54
第 1 節 真空技術の歴史.....37	第 2 節 気体の流量.....54
第 2 節 圧力の単位.....38	第 3 節 コンダクタンス.....55
第 3 節 圧力領域による真空の分類.....38	第 4 節 粘性流領域でのコンダクタンス.....55
第 4 節 理想気体の性質.....38	4.1 長い円形導管のコンダクタンス.....55
(1) ボイルーシャルルの法則.....38	4.2 円形でない導管のコンダクタンス.....56
(2) アボガドロの法則.....38	4.3 オリフィスのコンダクタンス.....57
(3) 分圧の法則.....39	第 5 節 分子流領域でのコンダクタンス.....57
(4) 気体の状態方程式.....39	5.1 長い円形導管のコンダクタンス.....58
<b>第 2 章 気体分子運動論</b> .....40	5.2 オリフィスのコンダクタンス.....58
第 1 節 気体分子の運動.....40	5.3 導管中のオリフィスのコンダクタンス.....58
第 2 節 気体分子の平均速さ.....40	5.4 短い円形導管のコンダクタンス.....58
第 3 節 気体分子運動論による気体の圧力.....42	5.5 円形でない導管のコンダクタンス.....59
第 4 節 平均自由行程.....43	第 6 節 中間流領域でのコンダクタンス.....59
4.1 気体分子の平均自由行程.....43	<b>第 4 章 気体の吸着と脱離</b> .....61
4.2 混合気体の平均自由行程.....44	第 1 節 気体の吸着.....61
第 5 節 入射頻度.....45	1.1 吸着の種類と吸着ポテンシャル.....61
第 6 節 輸送現象.....46	1.2 清浄表面の吸着速度と吸着確率.....65
6.1 輸送現象における平均自由行程理論.....46	第 2 節 気体の脱離.....66
6.2 粘 性.....47	2.1 熱 脱 離.....66
6.3 熱 伝 導.....47	2.2 昇温脱離法.....67
6.4 拡 散.....48	2.3 電子遷移誘起脱離.....69
第 7 節 分子流領域での輸送現象.....49	2.4 イオン衝撃脱離.....71
7.1 適応係数.....49	第 3 節 吸着平衡.....72
7.2 分子流領域での気体の粘性.....50	3.1 ラングミュア吸着.....73
7.3 分子流領域での気体の熱伝導.....50	3.2 BET式.....74
<b>第 3 章 希薄気体の流れ</b> .....53	第 4 節 気体の溶解、拡散、透過.....76
第 1 節 流れの分類.....53	<b>第 5 章 低圧放電とプラズマ</b> .....81
1.1 クヌーセン数：Kn.....53	第 1 節 プラズマの概要.....81
1.2 レイノルズ数：Re.....53	1.1 プラズマ.....81
	1.2 プラズマの温度.....81
	1.3 デバイ長.....82
	1.4 シ ー ス.....82

第2節 プラズマの運動と輸送……………82

2.1 ドリフト……………83

2.2 サイクロトロン運動と $E \times B$ ドリフト……………83

2.3 磁場中の輸送……………84

2.4 両極性拡散……………84

2.5 プラズマ振動とプラズマ周波数……………85

第3節 プラズマの生成機構……………85

3.1 タウンゼントの放電理論……………85

3.2 電離係数……………86

3.3 二次電子放出係数……………86

3.4 パッシュェンの法則……………87

第4節 直流放電のモード……………87

第5節 直流グロー放電プラズマの構造……………88

第6節 RF容量結合型プラズマ……………89

6.1 周波数の選定……………89

6.2 RF CCPの電位分布……………90

6.3 カップリングコンデンサと自己バイアス……………91

6.4 自己バイアス発生のメカニズム……………91

6.5 自己バイアスの電極面積比依存性……………91

第7節 RF誘導結合型プラズマ……………92

7.1 ICPの特徴 (1)……………92

7.2 ICPの特徴 (2)……………93

7.3 表皮効果……………93

7.4 CCPとICPの特性比較……………94

7.5 ICPの難点……………94

**第6章 排気系の基礎……………96**

第1節 排気過程……………96

1.1 真空システムの排気系……………96

1.2 排気の式……………96

1.3 真空容器内への気体の出入り……………96

1.4 排気系の実効排気速度……………97

1.4.1 実効排気速度……………97

1.4.2 配管の形状とコンダクタンス……………98

(1) 長方形断面スリット……………98

(2) 直角に曲がった配管……………98

(3) 二重管液体窒素トラップ……………99

(4) ルーバー、シェブロン……………99

1.5 導管内の圧力差……………100

1.6 差動排気法……………100

第2節 真空ポンプの選定……………101

2.1 真空ポンプの分類と特徴……………101

2.2 真空排気系の構成……………102

2.3 真空ポンプの排気速度と到達圧力……………103

2.4 ポンプの大きさの選び方……………103

(1) 予め排気時間を設定するとき……………103

(2) 超高真空を作製するとき……………104

(3) 一定流量のガスを流すとき……………104

**第2編 真空ポンプ**

**第1章 真空ポンプ 序論……………109**

第1節 はじめに……………109

第2節 到達圧力……………109

第3節 排気速度……………110

第4節 他の用語……………111

**第2章 低真空ポンプ……………112**

第1節 油回転ポンプ……………112

1.1 ポンプの構造と排気原理……………112

1.2 油の役割……………113

1.3 ガスバラスト……………113

1.4 トラップやフィルタなどの付属品……………113

1.5 最近の技術傾向……………114

第2節 ルーツポンプ……………115

2.1 ポンプの構造と排気原理……………115

2.2 大気圧駆動形ルーツポンプ……………115

2.3 最近の技術傾向……………116

第3節 ドライポンプ……………117

3.1 ドライポンプとは……………117

3.2 ドライポンプの作動原理……………117

3.3 ドライポンプのメリット……………118

3.4 ドライポンプの使用……………118

3.5 多段ルーツ式ポンプ……………119

3.6 ポンプの排気性能……………120

3.7 ドライポンプの省エネ化技術……………121

3.8 半導体プロセス対応技術……………122

3.9 空冷式ドライポンプ……………124

3.10 スクロール式ポンプ……………125

3.11 ドライポンプの今後の課題……………126

第4節 スクリュー式ドライ真空ポンプ……………126

4.1 技術的課題……………126

4.2 排気原理……………126

4.3 構造および仕様……………127

4.4 特 長……………127

4.5 省エネ技術……………129

総目次

4.6 現状と今後の課題	129	2.2.5 流量性能	149
第5節 NEGポンプ	131	2.3 TMPの構造	149
5.1 非蒸発型ゲッターポンプ	131	2.3.1 軸受構造	149
5.2 非蒸発型ゲッターポンプの排気原理	131	2.3.2 ロータ構造	151
5.3 非蒸発型ゲッターポンプの排気基本特性	133	2.3.3 冷却方法	151
5.4 非蒸発型ゲッターポンプの特徴と利点	133	2.3.4 吸気口フランジ	151
5.4.1 軽量性とコンパクト性	133	2.4 排気性能と制御技術	151
5.4.2 制振性と省電力性	133	2.4.1 排気性能と回転体設計	151
5.4.3 水素に対する高排気速度	134	2.4.2 TMP用コントローラ	152
5.4.4 磁性中での使用	134	2.5 TMP使用上の注意事項	154
5.5 非蒸発型ゲッターポンプが使用有効な用途	134	2.5.1 排気系構成・TMP取り付け時の注意	154
5.6 非蒸発方ゲッター(NEG)ポンプの利用	134	2.5.2 TMP運転時の注意事項	154
5.6.1 使用システムおよび設置に際して	134	2.5.3 TMP故障防止のための注意事項	155
5.6.2 ベーキング時および活性化時の注意	134	2.6 TMPのメンテナンス	157
5.6.3 活性化後の飽和までの期間	135	2.7 用途別対応事例	157
5.7 非蒸発型ゲッターポンプの最新動向	135	2.7.1 分析用途	157
第3章 高真空ポンプ	137	2.7.2 成膜用途 (蒸着装置、スパッタリング装置)	159
第1節 拡散ポンプ	137	2.7.3 半導体用途 (エッチング装置)	160
1.1 拡散ポンプの歴史	137	2.7.4 加速器用途	160
1.2 拡散ポンプの原理	137	第3節 クライオポンプ	162
1.3 拡散ポンプの種類	137	3.1 2種類のクライオポンプ	162
1.3.1 油拡散ポンプ	137	3.2 クライオポンプの構造、排気の原理	162
1.3.2 水銀拡散ポンプ	138	3.3 クライオポンプの性能	163
1.3.3 油エゼクタ	138	第4節 スパッターイオンポンプ	168
1.4 拡散ポンプの性能	138	4.1 スパッターイオンポンプの排気原理	168
1.5 拡散ポンプの動作油	138	4.2 圧力領域によるスパッターイオンポンプの放電様式	169
1.6 拡散ポンプのヒーター	139	4.3 スパッターイオンポンプのアルゴン不安定性	169
1.7 拡散ポンプ作動油の逆流	140	4.4 3極形スパッターイオンポンプ	170
1.8 拡散ポンプの使用法	141	4.5 スパッターイオンポンプの排気特性	171
第2節 ターボ分子ポンプ	142	4.6 スパッターイオンポンプの製品例と用途	171
2.1 排気原理	142	4.7 スパッターイオンポンプの取り扱い	172
2.1.1 ターボ翼部の分子流域における排気原理	142	4.8 スパッターイオンポンプの最近の進展	173
2.1.2 ターボ翼部の粘性流域から中間流域での性能予測	144	第5節 チタンサブレーションポンプ	175
2.1.3 ねじ溝部の排気原理	144	5.1 チタンサブレーションポンプの排気原理	175
2.1.4 TMPの翼表面放出ガスの影響	145	5.2 チタンサブレーションポンプの構造	176
2.1.5 排気原理のポンプ設計への反映	147	5.3 チタンサブレーションポンプの使用法と注意点	177
2.2 排気性能	147	5.4 チタンサブレーションポンプの極高真空領域への適用	178
2.2.1 性能試験方法	147		
2.2.2 到達圧力	147		
2.2.3 圧縮比	148		
2.2.4 排気速度	148		

**第3編 真空計測器**

**第1章 全圧計**……………181

**第1節 絶対圧計測計**……………181

1.1 静水圧のバランスを利用する全圧計……………181

1.1.1 U字管マンメータ……………181

1.1.2 マクラウド真空計……………181

1.2 弾性変形を利用する全圧計……………183

1.2.1 ブルドン管真空計……………183

1.2.2 隔膜真空計……………183

1.2.3 キャパシタンス・マンメータ……………183

**第2節 分子密度計測計**……………184

2.1 気体の輸送現象を利用する全圧計……………184

2.1.1 熱伝導真空計……………184

(1) ピラニ真空計……………185

(2) 熱電対真空計……………186

(3) その他真空計……………186

2.1.2 粘性真空計……………187

(1) スピニングロータ真空計……………187

(2) 水晶摩擦真空計……………188

2.2 気体の電離現象を利用する全圧計……………190

2.2.1 熱陰極電離真空計……………192

(1) 三極管型電離真空計……………193

(2) BA型電離真空計……………193

(3) エキストラクタ型電離真空計……………194

(4) シュルツ型電離真空計……………194

(5) モジュレータ真空計……………194

(6) サプレッサ真空計……………194

(7) イオン分光型真空計……………195

(8) 熱陰極マグネトロン真空計……………195

(9) オービトロン真空計……………195

2.2.2 冷陰極電離真空計……………195

(1) マグネトロン真空計……………196

(2) 逆マグネトロン真空計……………196

(3) ベニング真空計……………196

**第3節 最近の進歩**……………197

3.1 CDG(キャパシタンスダイアフラムゲージ)……………197

3.2 マイクロ薄膜(真空環境内における圧力分布とその実測例)……………199

3.2.1 薄膜を用いたセンサによるチャンバ内の圧力分布計測……………199

3.2.2 マイクロハクマク<sup>®</sup>センサによる真空

環境内計測の実例……………200

(1) 評価用真空チャンバの説明……………200

(2) マイクロハクマク圧力センサの設置及び校正……………200

(3) 真空チャンバ内圧力計測……………201

3.2.3 まとめと今後の展望……………201

**第4節 真空計の校正方法**……………202

4.1 真空計の校正の必要性……………202

4.2 真空計の校正の分類……………202

4.3 真空計の比較校正……………203

4.4 JIS Z 8750概説……………203

4.4.1 要求事項……………203

4.4.2 校正……………204

4.4.3 校正の不確かさ……………205

4.4.4 校正結果の報告(校正証明書)……………205

4.4.5 校正上の注意点……………205

4.5 校正結果の使い方……………206

4.6 校正の第三者認証……………206

4.6.1 計量法による校正事業者登録制度……………206

4.6.2 各国の状況と国際相互認証……………207

**第5節 真空計の校正の不確かさ**……………208

5.1 不確かさとは……………208

5.2 不確かさの求め方……………209

5.2.1 概説……………209

5.2.2 入力量と測定量との関係式……………209

5.2.3 不確かさ成分の抽出・評価……………209

5.2.4 合成標準不確かさの計算……………210

5.2.5 拡張不確かさの計算……………210

5.2.6 不確かさ評価の文書化……………210

5.3 代表的な計算例……………211

5.3.1 測定量が入力量の和で表される場合……………211

5.3.2 測定量が入力量の積で表される場合……………211

**第2章 分圧計**……………212

**第1節 装置の原理**……………212

(1) 単取束型質量分析計……………212

(2) 飛行時間差型質量分析計……………212

(3) 四重極型質量分析計……………213

**第2節 質量スペクトルの解釈**……………214

**第3節 分圧の求め方**……………214

(1) 比感度のみを使う方法……………214

(2) パターン係数を使用する方法……………215

**第4節 分圧計の選択**……………216

(1) 測定質量数……………216



総目次

(2) 最小検知分圧 ..... 216

(3) イオン源とフィラメント ..... 216

(4) 検出器 ..... 216

第5節 分圧計の応用 ..... 216

(1) 残留ガスの簡便な分圧計算 ..... 216

(2) 分圧計と電離真空計を組み合わせて測定精度を向上させる ..... 217

(3) プロセス中の不純物ガス測定 ..... 217

1.3 クイックカップリング方式 ..... 234

1.4 フランジの材質 ..... 235

1.5 ガasketの材質と特性 ..... 235

第2節 超高真空フランジ ..... 238

2.1 コンフラット(Con Flat)フランジと銅ガスケット ..... 238

2.2 大型フランジとメタルリングガスケット ..... 239

2.3 ヘリコフレックス ..... 240

2.4 メタル中空Oリング ..... 240

2.5 その他のメタルシール ..... 241

第4編 真空部品

第1章 バルブ ..... 221

第1節 真空バルブ ..... 221

1.1 低真空バルブ ..... 221

1.2 高真空バルブ ..... 222

1.3 超高真空バルブ ..... 222

1.4 バルブの種類 ..... 222

1.4.1 S形バルブ ..... 222

1.4.2 アングルバルブ ..... 223

1.4.3 バタフライバルブ ..... 223

1.4.4 ゲートバルブ ..... 223

第2節 高速遮断バルブ ..... 223

2.1 動作システム ..... 223

2.2 バルブ構造と動作 ..... 223

2.2.1 バルブの構造 ..... 223

2.2.2 バルブの全閉 ..... 224

2.2.3 バルブの全開 ..... 224

第3節 可変リークバルブ ..... 225

第4節 大口径ゲートバルブ ..... 226

4.1 角型ゲートバルブ ..... 226

4.2 大口径ゲートバルブ ..... 227

4.2.1 弁体シール必要力量 ..... 227

4.2.2 大口径ゲートバルブの実施例 ..... 228

4.3 注意事項 ..... 229

4.3.1 弁板部の連続使用温度 ..... 229

4.3.2 特殊材Oリングの使用 ..... 229

4.3.3 ゲートバルブ設置面の剛性 ..... 229

第2章 配管接続部品 ..... 230

第1節 フランジ ..... 230

1.1 フランジ規格 ..... 230

1.2 Oリング規格 ..... 232

第3節 非フランジ継手とバルブ ..... 242

3.1 高純度ガス管接続部品及びバルブ ..... 243

3.1.1 配管用継手 ..... 243

3.1.2 バルブ ..... 243

3.2 ウルトラクリーン仕様品とその性能、品質 ..... 243

3.2.1 経緯 ..... 243

3.2.2 仕様と性能、品質について ..... 243

第4節 接続用成形配管 ..... 245

4.1 エルボ ..... 245

4.2 ティー ..... 248

4.3 クロス ..... 248

第5節 金属ベローズ ..... 249

5.1 金属ベローズ ..... 249

5.1.1 ベローズの種類 ..... 249

(1) 溶接ベローズ ..... 249

(2) 成形ベローズ ..... 249

5.1.2 ベローズの仕様 ..... 250

5.1.3 ベローズの使用例 ..... 251

5.2 フレキシブルチューブ ..... 252

第3章 バッフル、トラップ ..... 254

第1節 バッフル ..... 254

1.1 水冷型バッフル ..... 254

1.2 コンダクタンス可変型バッフル ..... 254

第2節 トラップ ..... 255

2.1 液体窒素トラップ ..... 255

2.2 吸着トラップ ..... 255

2.3 冷凍機搭載低温トラップ ..... 255

2.4 クライオトラップ ..... 256

第4章 導入部品 ..... 258

第1節 電流導入端子 ..... 258

1.1 電流導入端子の種類 ..... 258

(1) 単極型 ..... 258

(2) 多極型 ..... 260

(3) 熱電対導入型……………260

1.2 封止方法……………261

(1) 金属-ガラスの封着……………261

(2) 金属-セラミックの封着……………262

1.3 使用上の注意……………264

(1) 真空漏れ……………264

(2) 絶縁不良……………264

第2節 ガス、液体導入端子……………265

2.1 高真空用……………265

2.2 超高真空用……………265

第3節 運動導入部品……………266

3.1 高真空用……………266

3.1.1 直線導入端子……………266

3.1.2 回転転導入端子……………267

(1) Oリングシールタイプ……………267

(2) ウィルソンシールタイプ……………267

(3) 磁性流体シールタイプ……………267

3.2 超高真空用……………268

3.2.1 直線導入……………268

(1) ベローズ式……………268

(2) マグネットカップリング式(磁気結合式)……………269

3.2.2 回転導入……………269

(1) コンダクタンスを利用した方式……………269

(2) ベローズ式……………269

(3) マグネットカップリング式(磁気結合式)……………270

(4) ハーモニックドライブ式……………271

(5) 超高真空用モータ……………271

第4節 ビーム導入……………273

4.1 赤外、紫外光透過……………273

4.1.1 光学窓材の種類……………273

4.1.2 真空装置への実装方法……………273

4.1.3 使用上の注意……………274

4.2 ベリリウム窓……………276

4.2.1 ベリリウム(Be)の性質……………276

4.2.2 Beの用途……………276

4.2.3 BeのグレードとX線透過特性……………276

4.2.4 Be窓の板厚の選定のための計算式……………277

4.2.5 Beの用途……………277

4.2.6 Be窓の製作例……………278

4.2.7 Be窓の気密試験……………278

4.2.8 Beのその他応用例……………278

4.2.9 Beの表面被膜処理……………278

4.2.10 Beの有害性と取扱い……………279

第5章 真空中加熱冷却部品……………280

第1節 加熱源……………280

1.1 シースヒーター……………280

1.1.1 原理と基本構造……………280

1.1.2 用途上における注意点……………280

1.2 ハロゲンヒータ……………282

1.2.1 ハロゲンヒータとは……………282

1.2.2 ハロゲンサイクルの動作原理……………282

1.2.3 ハロゲンヒータの特徴……………282

1.2.4 使用上の注意……………283

1.2.5 真空中での使用に際して……………284

1.2.6 ハロゲンヒータの応用……………284

1.3 高融点金属材料、高融点非金属材料……………286

1.3.1 モリブデン……………286

1.3.2 タンタル……………287

1.3.3 タングステン……………288

第2節 試料冷却部品……………289

2.1 水冷板……………289

2.2 静電吸着板……………289

2.2.1 真空処理装置における静電吸着板の用途……………289

2.2.2 構造例……………290

2.2.3 真空処理装置における静電吸着の歴史……………290

2.2.4 静電吸着の原理と採用上の注意点……………290

2.2.5 課題とその対応策……………291

2.3 He、N<sub>2</sub>クライオスタット……………292

2.3.1 寒材型クライオスタット……………292

2.3.2 機械的冷凍機を使用するクライオスタット……………293

2.4 真空中のダストモニタ……………295

2.4.1 測定原理……………295

2.4.2 センサの構造……………295

第5編 真空材料

第1章 構造材料……………301

第1節 鉄 鋼……………301

1.1 真空材料の選択基準……………301

1.2 鉄鋼材料の分類……………301

1.3 鋼の組織と性質……………301

1.4 軟 鋼……………302

総目次

1.5 ステンレス鋼	302	第3節 シーリンググリース・真空ポンプ油	331
1.5.1 ステンレス鋼の特長	302	3.1 シーリンググリース	331
1.5.2 ステンレス鋼の分類	303	3.2 真空ポンプ油	332
1.5.3 ステンレス鋼の物理的性質	304	3.2.1 有機材料の種類と特長	332
1.5.4 ステンレス鋼の特性改善図	305	3.2.2 真空ポンプ油の選定	332
1.5.5 ステンレス鋼の機械的性質	305	(1) 油回転ポンプ油	332
(1) 常温における機械的性質	306	(2) 拡散ポンプ油	332
(2) 高温における機械的性質	306	第4節 真空用潤滑剤	335
(3) 低温における機械的性質	307	4.1 潤滑油・グリース	335
第2節 アルミニウム合金	309	4.2 固体潤滑剤	336
2.1 アルミニウム合金の特徴	309	4.3 潤滑油・グリースの使用法	337
2.2 アルミニウム合金の特長	309	4.4 固体潤滑剤の使用法	337
2.3 アルミニウム合金の分類	309		
2.4 調    質	310		
2.5 アルミニウム合金の成分	311		
2.6 アルミニウム合金の物理的性質	314		
2.7 アルミニウム合金の機械的性質	314		
(1) 常温における機械的性質	314		
(2) 高温における機械的性質	315		
(3) 低温における機械的性質	316		
(4) 疲労特性	316		
第3節 その他材料	317		
3.1 極高真空材料	317		
3.1.1 チタン材料	317		
3.1.2 銅合金材料	318		
3.2 ガ    ラ    ス	319		
第2章 部品材料と機能材料	321		
第1節 金属材料	322		
1.1 金属・合金一般	322		
1.1.1 ステンレス鋼	323		
1.1.2 アルミニウム及びアルミニウム合金	323		
1.1.3 銅及び銅合金	323		
1.1.4 チタン及びチタン合金	323		
1.2 高融点金属	323		
1.3 貴    金    属	323		
1.4 磁性材料	324		
1.5 そ    の    他	324		
第2節 セラミックス	325		
2.1 酸化物セラミックス	325		
2.2 非酸化物セラミックス	325		
2.3 マシナブルセラミックス	325		
2.4 セラミックス材料の実用上の注意点	327		
2.5 光学材料	329		
		第6編 真空装置の取扱い	
		第1章 真空装置の管理	343
		第1節 真空装置の到達圧力を決める要因	343
		第2節 真空排気特性管理の方法	344
		2.1 運転記録	344
		2.2 排気に要する時間の記録	344
		2.3 装置操作手順の標準化	345
		(1) 乾燥窒素などを用いた真空槽の大気開放	345
		(2) 塵埃の装置内への混入の低減	345
		(3) 真空槽内面の洗浄	345
		(4) 真空封止面の保護	345
		(5) 真空槽内への油脂導入防止	345
		2.4 真空ポンプの保守	345
		第3節 真空の質の管理方法	345
		第2章 材料の洗浄・表面処理 (清浄化)	346
		第1節 真空部品の洗浄	346
		第2節 真空用表面処理	346
		2.1 電解研磨(Electro Polishing_EP)	346
		2.2 化学研磨(Chemical Polishing_CP)	347
		2.3 電解研磨、化学研磨前後の表面状態	348
		第3節 真空用表面処理と洗浄工程の詳細	349
		第4節 その他の真空用表面処理	349
		第5節 表面処理・洗浄後のガス放出速度	349
		第3章 脱ガス処理	350
		第1節 真空排気過程	350
		第2節 吸着ガス及び溶解ガスの放出	351
		2.1 吸着ガスのガス放出 —平均滞在時間—	351

2.2 溶解ガスからのガス放出 ..... 352

第3節 ベーキング処理 ..... 353

3.1 ベーキングの効果 ..... 353

3.2 実際のベーキング処理 ..... 353

第4節 その他脱ガス処理 ..... 355

(1) 真空中加熱脱ガス処理 ..... 355

(2) 酸化処理 ..... 355

(3) 放電洗浄処理 ..... 355

第4章 漏れ試験と漏れ対策 ..... 357

第1節 漏れ量の単位と取扱い ..... 357

第2節 ヘリウムリークディテクタ(HLD)を使用しない漏れ試験 ..... 358

2.1 真空装置における大きな漏れの見討 ..... 358

2.2 圧力変化減圧法 ..... 358

第3節 ヘリウム漏れ試験 ..... 359

3.1 ヘリウム漏れ試験の種類 ..... 359

3.2 HLDの構成 ..... 359

3.3 HLDの起動 ..... 360

3.4 漏れ試験時におけるHLDの動作 ..... 360

3.5 真空吹付け法の概要 ..... 360

3.6 真空装置の漏れ試験 ..... 361

3.7 真空吹付け法における注意点 ..... 361

3.8 スニッファー法 ..... 362

3.9 サーチガス ..... 362

3.10 測定の時定数 ..... 362

第4節 組立・設計時における配慮 ..... 363

4.1 真空部品の許容漏れ量 ..... 363

4.2 金属ガスケットシール ..... 363

4.3 エラストマーガスケットシール ..... 364

第5章 真空中の放電防止 ..... 365

第1節 真空中の絶縁破壊現象 ..... 365

1.1 絶縁破壊の発生する部位と素過程 ..... 365

1.2 電極間の絶縁破壊 (ギャップ放電) ..... 365

1.3 絶縁体表面の絶縁破壊 (沿面放電) ..... 366

1.4 X線の影響 ..... 366

1.5 印加電圧波形の影響 ..... 366

第2節 放電防止 ..... 366

2.1 基本的考え方 ..... 366

2.2 ギャップ放電 ..... 366

2.3 沿面放電 ..... 368

第7編 環境・安全・衛生対策と保守

第1章 環境と衛生 ..... 373

第1節 環境面と衛生面の現状と課題 ..... 373

1.1 環境面 ..... 373

1.1.1 2015年パリ協定 ..... 373

1.1.2 各国の削減目標 ..... 373

1.1.3 日本の削減目標 ..... 374

1.1.4 今後の日本及び真空業界の施策 ..... 377

1.2 衛生面 ..... 377

1.2.1 第12次労働災害防止計画 (平成25~29年度) ..... 377

(1) 計画の目標 ..... 377

(2) 重篤度の高い労働災害を減少させるための重点業種対策 ..... 377

(3) 重点とする健康確保・職業性疾病対策 ..... 378

(4) 業種横断的な取り組み ..... 379

1.2.2 真空業界として取り組むべき重点項目 ..... 379

第2節 真空技術を巡る危険有害性と環境阻害事例 ..... 380

2.1 排出ガスの危険性 ..... 380

2.1.1 半導体・液晶製造装置 ..... 380

2.1.2 LED・太陽電池製造装置 ..... 380

2.1.3 地球温暖化ガス ..... 380

2.2 反応生成物の性状と取り扱い ..... 381

2.2.1 半導体・液晶製造装置 ..... 381

(1) CVD系反応生成物 ..... 381

(2) エッチング系反応生成物 ..... 382

2.2.2 LED・太陽電池製造装置 ..... 382

(1) LED系反応生成物 ..... 382

(2) 太陽電池系反応生成物 ..... 382

2.3 反応生成物の取り扱い時の注意事項 ..... 382

第3節 ガス・化学物質管理 ..... 383

3.1 はじめに ..... 383

3.2 ガス・化学物質の危険有害性 ..... 383

3.3 ガス・化学物質の管理と安全対策 ..... 384

3.4 ガス・化学物質の安全対策に関する法規 ..... 385

第4節 製品含有化学物質管理(RoHS) ..... 386

4.1 基本的要求事項 ..... 386

(1) 対象製品 ..... 386

(2) 特定有害物質 ..... 386

(3) 用途の除外 ..... 387

総目次

4.2 順法宣言（整合規格EN50581が求める非含有確証の考え方）	387	3.3.1 バッチ式装置とロードロック式装置	422
(1) 確証データ	387	3.3.2 バッチ式装置の留意点	424
(2) 調達する材料、部品や組立品などの特定		3.3.3 ロードロック式インライン装置の留意点	425
化学物質の含有の可能性評価	388	3.3.4 ロードロック式枚葉装置の留意点	425
(3) マネジメントシステムの統合	389	3.4 長期使用への対応	425
第5節 PCB廃棄物の適正管理	389	3.4.1 長期間の機器使用によるリスク	425
5.1 PCB問題の経緯	389	3.4.2 保守情報について	426
5.2 PCB含有の判別方法	390	3.4.3 法令等の改訂	426
5.3 PCB廃棄物の保管と処分	390	3.5 廃棄	426
第6節 エネルギー消費管理と環境低負荷	392	第4節 真空ポンプの保守	427
6.1 中重負荷向けドライ真空ポンプの省エネルギー化	392	4.1 油回転ポンプ	427
6.2 ロードロック室排気の省電力化	394	4.1.1 油回転ポンプの動作原理	427
<b>第2章 リスクと機械安全</b>	396	4.1.2 油回転ポンプの油の役割	427
第1節 安全について	396	4.1.3 油回転ポンプ取扱い上の注意	428
第2節 安全規制の背景	399	4.1.4 油回転ポンプのトラブルと対策	428
第3節 日本における機械安全	400	4.1.5 油回転真空ポンプの保守、解体、再組み立時の注意	429
第4節 欧州CEマーキング	402	4.1.6 ポンプ油交換時期	431
第5節 機械指令	404	4.2 ドライポンプ	431
第6節 真空関連機器についての欧州規格	406	4.3 ルーツポンプ	433
第7節 適合性評価	408	4.4 油拡散ポンプ	434
<b>第3章 真空装置の保守と安全</b>	410	4.5 ターボ分子ポンプ	438
第1節 真空装置の管理	410	4.5.1 構造と原理	438
1.1 設備保全活動	410	4.5.2 ターボ分子ポンプの特徴	440
1.2 保全の分類	410	4.5.3 ターボ型および複合型分子ポンプ使用上のトラブルと対策	442
1.2.1 予防保全	410	4.5.4 取扱い注意事項	442
1.2.2 事後保全	410	4.5.5 分子ポンプの保全	442
1.2.3 改良保全	411	4.6 クライオポンプ	443
第2節 保守面の課題	412	4.6.1 クライオポンプの構造概略	443
第3節 保守計画	413	4.6.2 クライオポンプシステム	443
3.1 保守計画	413	4.6.3 クライオポンプのトラブル対策	443
3.1.1 保守計画の項目例	414	4.6.4 クライオポンプの保全事項	444
3.1.2 設備保全の用語と意味	415	4.6.5 クライオポンプの安全に関する注意事項	447
3.2 プロセス別／用途別留意点	415	4.7 排ガス処理設備	447
3.2.1 プロセス共通の留意点	416	4.7.1 主な排ガス処理設備の種類	447
3.2.2 成膜プロセス	418	4.7.2 点検	448
3.2.3 ドーピングプロセス	419	4.7.3 保守準備	449
3.2.4 薄膜除去プロセス	420	4.7.4 保守作業	449
3.2.5 真空熱処理炉での留意点	421	第5節 真空計の保守	449
3.2.6 巻取式真空蒸着装置での留意点	422	5.1 真空計の種類による留意点	449
3.2.7 労働災害の発生事例	422		
3.3 生産量の違いによる留意点	422		

5.1.1 ピラニ真空計	449	5.1.4 キャパシタンスマノメータ	452
5.1.2 電離真空計	450	5.2 真空計の校正について	452
5.1.3 ペニング真空計	451		

## 第2部 真空応用システム

### 第1編 低・中真空の利用

**第1章 真空利用の目的** ..... 457

第1節 真空の利用 ..... 457

第2節 真空利用の目的 ..... 457

2.1 差圧利用の目的 ..... 457

2.2 断熱利用の目的 ..... 457

2.3 蒸発利用の目的 ..... 457

2.4 無酸素環境利用の目的 ..... 458

2.5 放電利用の目的 ..... 458

第3節 〈差圧の利用〉事例 ..... 458

3.1 圧縮「布団圧縮袋」 ..... 458

3.2 成形「弁当や惣菜用の使い捨て容器」 ..... 458

3.3 吸引「真空採血管」 ..... 458

3.4 吸引搬送「ニューマチックアンローダー」 ..... 458

3.5 脱水「真空コンクリート」 ..... 459

3.6 ろ過「吸引ろ過」 ..... 459

第4節 〈断熱の利用〉事例 ..... 459

4.1 真空断熱「魔法瓶」 ..... 459

4.2 真空粉末断熱「真空断熱材」 ..... 460

4.3 真空多層断熱「医療用MRI装置」 ..... 460

第5節 〈蒸発の利用〉事例 ..... 460

5.1 冷却「蒸発を冷却に使う」 ..... 460

5.2 乾燥「真空凍結乾燥装置」 ..... 461

5.3 蒸留「焼酎の減圧蒸留」 ..... 461

5.4 蒸留「石油の常圧・減圧蒸留」 ..... 461

5.5 脱ガス「鉄鋼の脱ガス」 ..... 461

5.6 蒸着「真空蒸着」 ..... 462

第6節 〈無酸素環境の利用〉事例 ..... 462

6.1 酸化防止「真空パック」 ..... 462

6.2 燃焼防止「電球」 ..... 463

6.3 嫌気性環境「嫌気性培養器」 ..... 463

第7節 〈放電の利用〉事例 ..... 463

7.1 照明「高輝度放電ランプ(HID)」 ..... 463

7.2 プラズマの利用「スパッタリング」 ..... 463

7.3 ビームの利用「電子ビーム溶解装置」 ..... 464

**第2章 低真空・中真空応用の基礎** ..... 466

第1節 状態図 ..... 467

第2節 蒸気圧と蒸発速度 ..... 467

第3節 蒸発・凝縮速度 ..... 468

第4節 真空（凍結）乾燥と毛管モデル ..... 469

第5節 毛管現象 ..... 471

第6節 真空蒸留 ..... 471

**第3章 真空凍結乾燥** ..... 474

第1節 真空凍結乾燥の基礎 ..... 474

1.1 凍結乾燥  
(Freeze-drying = Lyophilization) ..... 474

1.2 真空凍結乾燥装置 ..... 475

1.3 真空凍結乾燥の数学的モデル ..... 476

1.4 乾燥装置の運転とコラプス ..... 478

第2節 凍結乾燥の応用 ..... 481

2.1 凍結乾燥装置の概要 ..... 481

(1) 乾燥庫・棚板 ..... 481

(2) コールドトラップ (アイスコンデンサ) ..... 482

(3) 真空排気装置 ..... 482

(4) 熱媒体冷却、加熱装置 ..... 482

(5) 冷熱供給装置 ..... 483

(6) 機器制御装置 ..... 483

2.2 食品工学への応用 ..... 483

2.3 化学工学への応用 ..... 483

2.4 医薬工学への応用 ..... 484

2.5 その他の分野 ..... 485

**第2編 金属材料の加工**

<b>第1章 電子ビーム溶接</b> .....	489	5.6 前処理 (ワークの洗浄).....	502
第1節 概 要.....	489	5.7 溶接品質検査.....	502
第2節 電子ビーム溶接の原理.....	489	5.8 電子ビーム溶接機の保守.....	502
2.1 基本構成.....	489	<b>第2章 低真空レーザ溶接</b> .....	504
2.2 電子ビームの発生の原理.....	489	第1節 真空雰囲気下でのレーザ溶接.....	504
2.3 電子ビームの収束と偏向.....	490	第2節 低真空レーザ溶接 (ディスクレーザ16 kW).....	505
2.4 電子ビームの性質.....	490	2.1 構 成.....	505
第3節 電子ビーム溶接の特長.....	491	2.2 溶 接 性.....	505
3.1 概 要.....	491	第3節 低真空レーザ溶接 (ファイバーレーザ	
3.2 溶込み深さ.....	491	100 kW).....	506
3.3 難加工材料の溶接.....	492	3.1 構 成.....	506
3.4 異種金属溶接.....	492	3.2 溶 接 性.....	506
3.4.1 銅-銅合金の接合事例.....	492	第4節 低真空レーザ溶接部の評価試験.....	507
3.4.2 銅-黄銅の接合事例.....	492	4.1 評価方法と評価結果.....	507
3.4.3 銅-アルミの接合事例.....	493	4.2 表面PT.....	508
3.4.4 アルミ合金の溶接事例.....	493	4.3 引張試験.....	508
3.5 溶接欠陥防止.....	493	4.4 曲げ試験.....	509
3.5.1 ブローホール.....	493	4.5 断面マクロ・マイクロ観察.....	509
3.5.2 割 れ.....	493	4.6 ビッカース硬さ試験.....	509
3.6 高速多点スポット溶接.....	494	<b>第3章 減圧プラズマ溶射</b> .....	511
3.7 電子ビームろう付け.....	494	第1節 減圧プラズマ溶射装置.....	511
3.8 レーザ溶接との違い.....	494	第2節 減圧プラズマ溶射法(LPS)と大気圧プラズマ	
第4節 電子ビーム溶接の適用分野.....	496	溶射法(APS)の特徴.....	511
4.1 自動車分野.....	496	第3節 LPSの施工手順.....	512
4.2 航空・宇宙分野.....	496	第4節 プラズマ溶射の原理・特徴.....	512
4.3 発電・重工業分野.....	497	第5節 LPSとAPSのプラズマジェットの特性.....	513
4.4 電子デバイス分野.....	497	第6節 LPS溶射皮膜特性.....	513
4.4.1 水晶振動子.....	497	6.1 高温下での耐粒子エロージョン皮膜.....	513
4.4.2 ニッケル水素電池.....	497	6.2 耐キャビテーションエロージョン皮膜.....	514
4.4.3 リチウムイオン二次電池.....	497	<b>第4章 真空加熱炉</b> .....	516
4.4.4 シャント抵抗.....	497	第1節 真空加熱による効果.....	516
4.4.5 パワーモジュール.....	797	第2節 真空加熱炉の加熱方式.....	516
第5節 電子ビーム溶接機.....	498	2.1 外熱式真空加熱炉.....	516
5.1 電子ビーム溶接機の構成.....	498	2.2 内熱式真空加熱炉.....	517
5.2 システムの主仕様.....	498	2.3 外熱式と内熱式の比較.....	517
5.3 ユーティリティ仕様.....	499	第3節 真空加熱炉の構成材料.....	517
5.4 溶接機システム.....	499	3.1 真空容器の材質.....	517
5.4.1 バッチ式.....	499	3.2 発 熱 体.....	517
5.4.2 連続排気式.....	500	3.3 断 熱 材.....	518
5.5 安 全 性.....	502	第4節 真空加熱炉のバリエーション.....	519
		4.1 バッチ形真空加熱炉 (バッチ炉).....	519
		4.2 連続形真空加熱炉 (連続炉).....	520
		(1) 回転式連続炉 (ロータリーファーンレス).....	520

(2) ライン式連続炉……………520  
 (3) FMS式連続炉……………520  
**第5章 イオンビーム加工**……………522  
 5.1 FIBの構成……………522  
 5.2 サンプリング方法……………522  
 5.3 加工の具体例……………523

**第3編 薄 膜**

**第1章 薄膜形成の基礎**……………527  
 第1節 薄膜とは……………527  
 第2節 薄膜の特徴……………527  
 第3節 薄膜の物性と機能……………528  
 第4節 薄膜形成法……………529  
 4.1 薄膜形成法の大分類……………529  
 4.2 薄膜形成法の中分類……………529  
 4.3 薄膜成長の理論……………531  
 4.4 薄膜の微視的形態と基板の関係……………531  
 4.5 薄膜成長のモード……………532  
 4.6 薄膜形成技術……………532  
 4.6.1 形成法の選択……………532  
 4.6.2 基板と前処理……………533  
 4.6.3 原 料……………534  
 4.6.4 基板搬送……………534  
 4.6.5 基板温度……………534  
 4.6.6 界面の形態……………534  
 4.6.7 膜厚と組成……………535  
 4.6.8 その場観察技術……………535  
 4.6.9 平坦化技術……………535  
 第5節 新しい薄膜形成技術……………535  
 5.1 分離・接合法……………535  
 5.2 ハイブリッド型の薄膜形成法……………535  
 5.3 非真空・減圧型の薄膜形成法……………536  
 第6節 薄膜形成におけるパラダイムシフト……………537  
 6.1 原子層物質……………537  
 6.2 薄膜欠陥エンジニアリング……………537  
 6.3 新物質固有のレシピ……………537  
 6.4 インプリンティング・ナノインデント……………537  
**第2章 蒸 着**……………539  
 第1節 真空蒸着……………539  
 1.1 真空蒸着の概要……………539

1.2 真空蒸着の素過程……………540  
 1.2.1 蒸発過程……………540  
 (1) 蒸 発 源……………540  
 (2) 成膜速度のモニタと制御……………541  
 1.2.2 輸送過程……………541  
 1.2.3 堆積過程……………541  
**第2節 分子線エピタキシー(MBE)**……………543  
 2.1 原理と特徴……………543  
 2.2 装置の構成……………543  
 2.2.1 MBE装置全体の構成……………543  
 2.2.2 MBE装置用各種コンポーネンツ……………544  
 a. クスツセンセル……………544  
 s. クラッキングセル……………544  
 C. バルブドクラッキングセル……………544  
 D. プラズマセル……………544  
 e. マニピュレーター……………545  
 f. ビームフラックスモニター……………545  
 g. 基板ホルダー……………545  
 h. 排 気 系……………545  
 2.2.3 MBE成長過程のその場観察・計測……………546  
 2.3 分子線供給方法によるMBE法の種類と特徴……………546  
 2.4 応 用 例……………547  
 2.4.1 量子構造デバイスへの応用……………548  
 2.4.2 希薄磁性半導体……………548  
**第3章 スパッタ成膜**……………551  
 第1節 スパッタリング法による工業的薄膜堆積……………551  
 第2節 スパッタリング法による薄膜堆積に関わる真空およびプラズマの基礎……………552  
 2.1 スパッタリング法に関わる真空の基礎……………552  
 2.1.1 気体分子の数密度、速さと平均自由行程……………552  
 2.1.2 入射分子束の大きさ……………552  
 2.2 スパッタリング法に関わるプラズマの基礎……………552  
 2.2.1 スパッタリングプラズマ……………552  
 2.2.2 イオンと電子の動き……………553  
 2.2.3 イオン束と電子束……………554  
 2.2.4 デバイ遮蔽……………554  
 2.2.5 浮遊電位……………554  
 2.2.6 プラズマシース……………555  
 2.2.7 高周波放電……………556  
 第3節 スパッタリング法による薄膜堆積技術……………558  
 3.1 スパッタリング……………558  
 3.1.1 スパッタリング現象……………558



総目次

3.1.2	スパッタリング率	558	7.2.3	記録用デバイス	574
3.1.3	スパッタリングされた粒子のエネルギー	559	7.2.4	光学デバイスおよび大面積エネルギー制御薄膜	574
3.1.4	粒子輸送過程におけるスパッタリング粒子と放電ガス分子との衝突	559	7.2.5	潤滑性およびハードコーティング	575
3.1.5	粒子により基板に持ち込まれるエネルギー	559	<b>第4章</b>	<b>イオンビームを用いた薄膜形成技術</b>	578
<b>第4節</b>	<b>スパッタリング装置</b>	560	<b>第1節</b>	<b>イオンを用いた薄膜形成技術の基礎</b>	578
4.1	装置の概要	560	1.1	イオンビームを用いた薄膜形成技術	578
4.2	スパッタリングカソード	560	1.2	イオンを用いた薄膜形成技術の例	578
<b>第5節</b>	<b>種々のスパッタリング法</b>	561	1.3	イオンを用いて形成した薄膜の特徴	579
5.1	直流2極スパッタリング法	561	1.4	低エネルギーイオンと固体の相互作用	579
5.2	直流マグネトロンスパッタリング法	561	1.5	イオンと固体相互作用解明の試み	580
5.3	高周波マグネトロンスパッタリング法	562	<b>第2節</b>	<b>イオンプレーティング</b>	582
5.4	パルススパッタリング法	562	2.1	イオンプレーティングの特徴	582
5.5	高出力インパルスマグネトロンスパッタリング(HiPIMS)法	563	2.2	代表的なイオンプレーティング方法	582
5.6	イオン化スパッタリング法	564	2.2.1	高周波イオンプレーティング	582
5.7	イオンビームスパッタリング法	564	2.2.2	ホローカソードイオンプレーティング	583
5.8	反応性スパッタリング法と反応室分離型反応性スパッタリング法	564	2.2.3	アーク放電型高真空イオンプレーティング	583
5.8.1	反応性スパッタリング法	564	2.2.4	アークイオンプレーティング	583
5.8.2	反応室分離型反応性スパッタリング法	564	2.3	イオンプレーティングで成膜される膜種および用途	584
<b>第6節</b>	<b>スパッタリング薄膜の構造と物性</b>	565	2.3.1	硬質膜	584
6.1	スパッタリング薄膜の構造	565	2.3.2	装飾膜	584
6.1.1	スパッタリング法より堆積された薄膜の構造の特徴	565	2.3.3	光学膜	584
6.1.2	スパッタリング薄膜の構造モデル	565	<b>第3節</b>	<b>アークイオンプレーティング</b>	585
6.2	スパッタリング薄膜における応力と付着力	567	3.1	真空アーク蒸着法	585
6.2.1	スパッタリング薄膜における応力	567	3.2	ドロップレット対策	586
6.2.2	付着力	567	<b>第4節</b>	<b>イオンビームアシスト蒸着</b>	588
6.3	スパッタリング薄膜の構造と物性の実際	569	4.1	イオンビームアシスト蒸着の基本技術	588
6.3.1	TiおよびZr薄膜	569	4.2	イオンビームアシスト蒸着の原理	588
6.3.2	TiO <sub>2</sub> 薄膜	570	4.3	イオンビームアシスト蒸着による成膜	589
6.3.3	CeO <sub>2</sub> 薄膜	572	4.3.1	付着性の改善	589
<b>第7節</b>	<b>スパッタリング法による薄膜堆積の工業的応用</b>	573	4.3.2	3元系薄膜の作製	590
7.1	スパッタリング薄膜堆積の工業的応用における特徴	573	4.4	酸化薄膜の低温作製	591
7.2	スパッタリング法による薄膜堆積の工業的応用の実際	573	<b>第5節</b>	<b>イオンを用いた有機薄膜形成</b>	593
7.2.1	半導体プロセス	573	5.1	有機材料の特徴	593
7.2.2	ディスプレイデバイス	574	5.2	イオン化蒸着	593
			5.3	イオン化蒸着による重合膜の形成	593
			5.4	イオンアシスト蒸着重合	594
			<b>第5章</b>	<b>パルスレーザ蒸着(PLD)</b>	596
			<b>第1節</b>	<b>パルスレーザ蒸着の基礎</b>	596
			1.1	PLDの特徴	596
			<b>第2節</b>	<b>装置構成</b>	597

2.1 PLD成膜システム	597	(3) 揮発性向上への挑戦	620
2.2 パルスレーザ	598	1.4.3 原料の種類	620
2.3 PLDにおける反射高速電子回折(RHEED)	599	1.4.4 用途に合った原料の開発	622
第3節 アブレーション現象	599	(1) 求める膜種、分解温度に合わせた原料	622
3.1 アブレーション現象の概略	599	(2) ALD技術に適合する原料とは	622
3.2 PLDにおける薄膜の化学組成コントロール	601	1.4.5 安全な原料に向かって	623
第4節 PLDの応用	601	第2節 CVD装置	624
4.1 酸化物ヘテロ界面における新物性の探索	601	2.1 CVD装置概要	624
4.2 生体セラミックスの薄膜化	602	2.1.1 反応室構造	624
第6章 化学気相成長法(CVD)	605	2.1.2 加熱方式	625
第1節 総論	605	2.1.3 装置概略図と代表的膜種	625
1.1 熱CVDの原理と応用	605	2.1.4 CVD装置のシミュレーション	625
1.1.1 CVD	605	2.1.5 一般的な量産装置の開発流れ	626
1.1.2 熱CVDの原理	605	2.2 枚葉式装置	626
1.1.3 熱CVDの反応モデル	605	2.2.1 装置構造	626
1.1.4 製膜速度	606	2.2.2 ガス供給系	627
1.1.5 CVD反応速度式	606	2.2.3 排気系	627
1.1.6 熱CVD反応速度の解析	607	2.2.4 ウェーハ加熱機構	627
1.1.7 熱CVDの主要な反応場の判別	608	2.2.5 プラズマ機構	628
1.1.8 熱CVD反応速度への物質輸送抵抗の影響 の評価	609	2.3 バッチ式装置	628
1.1.9 熱CVD反応速度の温度依存性の解析	609	2.3.1 装置機構	628
1.1.10 生産装置のモデル	610	2.3.2 加熱方式	629
1.2 プラズマCVDの原理と応用	611	2.3.3 ガス供給法	629
1.2.1 プラズマCVD (の特徴)	611	2.3.4 プロセス	630
1.2.2 プラズマCVDの原理と反応モデル	611	2.4 自公転式装置	630
(1) 気相一次反応過程	611	2.4.1 装置構造とその役割	630
(2) 気相二次反応過程	611	2.4.2 ガス供給法と加熱方式	630
(3) 輸送過程	612	(1) シャワーヘッド型 (垂直方式)	631
(4) 表面反応過程	612	(2) インジェクター方式 (水平方向型)	631
1.2.3 プラズマCVDの反応速度解析	612	2.4.3 プロセス	631
1.2.4 プラズマCVDの生産装置のモデル	614	2.5 FPD用大型枚葉式装置	632
1.3 ALD	615	2.5.1 装置構造の特徴	632
1.3.1 ALD法とは	615	2.5.2 ガス供給系	633
1.3.2 ALDで成膜可能な材料	616	2.5.3 排気系	633
1.3.3 ALDの応用	616	2.5.4 基板加熱機構	633
1.4 原料	618	2.5.5 プラズマ機構	634
1.4.1 原料の変遷	618	2.5.6 クリーニング機構	634
(1) 気相成長技術初期の原料	618	2.6 CVD装置のシミュレーション	634
(2) 原料群の広がり	618	2.6.1 汎用ソフトウェアを用いた熱流体解析	634
1.4.2 原料の揮発性	619	2.6.2 誘導加熱型CVD装置の計算例	635
(1) 共有結合性原料	619	2.6.3 シミュレーションを行うための準備	637
(2) イオン結合性原料	619	第3節 半導体製造用CVDプロセス	639

総目次

3.1 多結晶シリコン膜	639	5.4.1 LTPSの場合	661
3.2 シリコン酸化膜	639	5.4.2 TOSの場合	662
3.3 Low-k膜	641	5.5 反射防止膜	662
3.4 シリコン窒化膜	641	第6節 表面コーティングプロセス	665
3.5 SiC膜	642	6.1 アルミナ(超硬、耐摩耗コーティング、 ガスバリア)	665
3.7 High-k膜	643	6.2 固体潤滑	667
3.8 金属膜	643	6.3 耐熱コーティング(TBC)	668
3.9 アモルファスカーボン	645	6.4 表面処理(撥水加工)	669
第4節 半導体製造用単結晶エピタキシャル成長CVD プロセス	646	6.5 DLC(固体潤滑、バスバリア、耐蝕)	670
4.1 GaAs/InP系化合物半導体	646	6.5.1 DLCの構造	670
4.1.1 概要	646	6.5.2 DLCの製膜方法	670
4.1.2 CVD原料	646	6.5.3 化学気相成長 (Chemical Vapor Deposition)	671
4.1.3 CVDプロセスの圧力と温度	646	6.5.4 物理気相成長 (Physical Vapor Deposition)	671
4.1.4 製膜速度・組成の制御	647	6.5.5 DLCの固体潤滑特性	671
4.1.5 ドーピング濃度の制御	647	6.5.6 DLCのバスバリア特性	672
4.1.6 反応器形状	647	6.5.7 DLCの耐腐食性	672
4.2 GaN系化合物半導体	649	6.6 ガスバリアコーティング	673
4.2.1 概要	649	第7章 ドライエッチング	675
4.2.2 GaN成長の基板	649	第1節 超微細加工プロセスにおける役割	675
4.2.3 低温バッファー成長	649	第2節 ドライエッチングプラズマ	675
4.2.4 気相反応の寄与	650	第3節 ドライエッチング装置の歴史	677
4.2.5 窒化物半導体のCVD反応器の特徴	650	第4節 ドライエッチングパラメータ	678
4.3 エピタキシャルシリコン	651	第5節 反応性イオンエッチング(RIE)	679
4.4 パワーデバイス用半導体	653	第6節 RIEでの表面反応例(Si, SiO <sub>2</sub> )	681
4.4.1 炭化珪素	653	第7節 ドライエッチングの例	681
4.4.2 窒化ガリウム	654	第8節 ドライエッチングプロセスステップ	683
第5節 太陽電池用・フラットパネル用CVDプロセス	656	第9節 ドライエッチングにおける問題点	684
5.1 アモルファス・微結晶シリコン	656	第10節 微細加工プラズマプロセスの今後の展望	685
5.1.1 結晶シリコン太陽電池	656	第8章 イオンビームエッチング	687
5.1.2 薄膜系太陽電池	657	第1節 イオンビームエッチング	687
5.1.3 ヘテロ接合型太陽電池	657	1.1 モノマーイオンビーム	687
5.2 低温多結晶シリコン	657	1.2 反応性イオンビームエッチング	687
5.2.1 低温多結晶シリコンTFTの構造	658	第2節 クラスターイオンビームエッチング	687
5.2.2 低温多結晶シリコンTFTのプロセス フロー	658	2.1 クラスターイオンビーム	687
5.2.3 結晶化プロセス	658	2.2 クラスターイオンによるスパッタリング	688
5.2.4 ゲート絶縁膜およびイオンドーピング	659	2.3 クラスターイオンによる有機材料エッチ ング	689
5.2.5 欠陥終端化技術	659	2.4 クラスターイオンによる表面平坦化加工	690
5.3 化合物半導体	660	2.5 高反応性中性クラスターエッチング	691
5.3.1 概要	660	第3節 集束イオンビーム加工	692
5.3.2 CVDによる製膜	660		
5.4 パッシベーション膜	661		

3.1 FIB装置の基本構成	692	第2節 分子ビームの検出	717
3.2 FIBの3機能	692	第3節 差動排気システム	717
3.3 加工アプリケーション事例	693	第4節 分子ビームの制御	718
3.4 イオン源の種類と加工性能	694	4.1 分子ビーム変調とパルス化	718
3.5 イオン種について	694	4.2 電場・磁場による制御	718
3.6 加工の高速化技術	695	4.3 レーザーによる制御	718
3.7 加工ダメージとその低減方法	696	第5節 分子ビーム回折	718
3.8 カーテニング効果への対応	696	第6節 分子ビーム散乱分光	719
<b>第9章 イオン注入</b>	697	第7節 分子ビーム緩和分光	720
第1節 イオン注入の特徴	697	<b>第2章 超音速分子ビームの応用</b>	723
第2節 イオンの分布	698	第1節 超音速分子ビームによる吸着分子のマイグレーション	723
第3節 イオン注入装置	699	1.1 イントロダクション	723
3.1 中電流イオン注入装置	700	1.2 実験	723
3.2 高電流イオン注入装置	701	1.3 分子動力学シミュレーション	724
3.3 高エネルギーイオン注入装置	702	1.4 結果	725
3.4 その他の不純物導入装置	703	第2節 超音速分子ビームによる吸着反応ダイナミクス	728
(1) プラズマドーピング装置	703	2.1 ノズル加熱とシード法による超音速分子ビームの加速	728
(2) クラスタ注入装置	703	2.2 大型放射光施設Spring-8のBL23SUにおける表面化学実験ステーション	729
(3) ガスクラスタ装置 (Gas Cluster Ion Beam)	703	2.3 超音速N <sub>2</sub> 分子ビームによるAl(111)表面の窒化反応ダイナミクス	730
3.5 イオン源	704	2.4 超音速O <sub>2</sub> 分子ビームによるNi(111)表面の酸化反応ダイナミクス	731
3.6 ビームライン	704	<b>第3章 状態選別分子ビームの応用</b>	734
3.7 エンドステーション	706	第1節 六極電場による配向制御分子ビーム生成とその表面反応への応用	734
3.8 真空排気系	706	1.1 六極電場を用いた分子配向の制御	734
第4節 イオン注入の半導体への応用	706	1.2 配向制御分子ビームを用いた表面反応の研究例	737
4.1 半導体集積回路	706	第2節 六極磁場によるスピン・回転状態選別酸素分子ビーム生成とその表面反応への応用	740
4.2 イメージセンサ	708	2.1 酸素分子の量子状態	740
4.3 パワーデバイス	708	2.2 状態選別O <sub>2</sub> 分子ビームの生成	740
		2.3 Stern-Gerlach実験例	742
		2.4 表面反応計測への応用	742
		2.4.1 立体効果計測	743
		2.4.2 スピン効果計測	743
		第3節 状態選別分子(原子)ビームの生成と気相反応ダイナミクスへの応用	745
		3.1 ラジカルビームの状態選別	745

**第4編 分子ビーム技術**

<b>第1章 分子ビームの基礎</b>	713
第1節 分子ビーム源	713
1.1 分子流ビーム源(effusive source)	713
1.2 ノズルビーム源(nozzle source)	714
1.3 シードビーム	716
1.4 放電型分子ビーム源	716
1.5 電荷交換型分子ビーム源	716
1.6 スパッタ分子ビーム源	716
1.7 レーザーアブレーション	716
1.8 レーザーデトネーション	717

総目次

3.2 OHラジカルビームの発生と状態選別 ..... 746

3.3 CHラジカルビームの発生と状態選別 ..... 746

3.4 多極子不均一磁場法による状態選別 ..... 747

    3.4.1 配向 $Rg(^3P_2)$ ビーム ..... 747

    3.4.2 配向 $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ ビーム ..... 748

3.5 状態選別分子(原子)ビームの気相反応ダイナミクスへの応用 ..... 748

    3.5.1 反応性の回転相関への応用 ..... 748

    3.5.2  $OH + HBr \rightarrow H_2O + Br$ 反応の立体効果 ..... 748

    3.5.3 多次元立体ダイナミクス ..... 749

**第4章 希ガス原子ビームの表面計測への応用** ..... 751

第1節 原子と表面の相互作用 ..... 751

第2節 希ガス原子散乱による表面構造の計測 ..... 751

第3節 希ガス原子散乱による吸着形態の計測 ..... 752

第4節 希ガス原子散乱による薄膜成長初期過程の実時間観測 ..... 753

第5節 希ガス原子散乱による吸着水素の計測 ..... 754

第6節 希ガス原子散乱による固さの計測 ..... 754

**第5章 レーザードネーション法による高速原子・分子ビーム生成とその表面反応への応用** ..... 756

第1節 開発背景 ..... 756

第2節 基本原理 ..... 756

第3節 装置構成 ..... 757

第4節 ビームキャラクタリゼーション ..... 758

第5節 応用例 ..... 759

    5.1 宇宙環境研究 ..... 759

    5.2 半導体表面酸化 ..... 760

    5.3 生体応用・表面改質 ..... 761

**第6章 金属原子ビームとその気相化学反応ダイナミクスへの応用** ..... 763

第1節 金属原子ビームの生成 ..... 763

    1.1 高温ノズル ..... 763

    1.2 前駆体分子の光解離 ..... 763

    1.3 レーザー蒸発 ..... 764

第2節 金属原子ビームの測定 ..... 764

    2.1 レーザー誘起蛍光法(LIF) ..... 765

    2.2 共鳴多光子イオン化質量分析法(REMPI-MS) ..... 765

    2.3 電子状態を選別した金属原子ビームの生成 ..... 765

第3節 金属原子ビームの化学反応ダイナミクスへの応用 ..... 765

**第7章 クラスタビーム生成** ..... 767

第1節 レーザー蒸発法 ..... 767

第2節 マグネトロンスパッタリング法 ..... 768

第3節 超音速自由噴流法 ..... 769

**第8章 液体分子ビーム生成とその放射光分光** ..... 771

第1節 はじめに：液体分子線の必要性 ..... 771

第2節 液体分子線の状態 ..... 771

第3節 確認実験の概要 ..... 772

第4節 分子線温度と相 ..... 773

第5節 水液体分子線からの放出電子スペクトル ..... 774

**第9章 微粒子ビームを用いたケイ素厚膜の作製と次世代蓄電池負極への応用** ..... 776

第1節 ケイ素負極の特徴 ..... 776

第2節 ガスデポジション法を用いた電極作製 ..... 776

第3節 ガスデポジション法を用いて得られたケイ素電極の負極特性 ..... 777

第5編 表面分析

**第1章 表面分析技術の概要** ..... 783

**第2章 電子を利用した分析技術** ..... 786

第1節 オージェ電子分光法(AES) ..... 786

    1.1 AESの原理 ..... 786

    1.2 AESの装置 ..... 787

    1.3 定性分析 ..... 787

    1.4 定量分析 ..... 788

    1.5 深さ方向分析 ..... 788

    1.6 線分析、面分析 ..... 789

    1.7 絶縁物の測定 ..... 789

第2節 光電子分光法 ..... 791

    2.1 歴史と原理 ..... 791

    2.2 電子分光装置 ..... 792

    2.3 光電子分光法の分析深さ ..... 792

    2.4 定性分析 ..... 793

    2.5 定量分析 ..... 793

    2.6 化学状態分析 ..... 794

    2.7 バンドアライメント ..... 794

        2.7.1 バンドギャップ ..... 795

        2.7.2 バンドオフセット ..... 795

    2.8 仕事関数計測 ..... 796

**第3章 電子顕微鏡** ..... 798

第1節 透過電子顕微鏡 ..... 798

    1.1 TEMの構造 ..... 799

        1.1.1 照射レンズシステム ..... 799

1.1.2 対物レンズ	799	4.5 生体試料観察への応用	820
1.1.3 拡大レンズシステム	800	4.6 ヘリウムイオンビーム照射によるルミネッセンス発光の可能性検討	820
1.2 試料装置	800	<b>第4章 X線検出分析法</b>	822
1.2.1 試料ステージ	800	第1節 電子線マイクロプローブ分析法(EPMA)	822
1.2.2 試料ホルダー	800	1.1 波長分散法	822
1.3 画像記録装置	801	1.2 エネルギー分散法	826
1.3.1 写真フィルム	801	1.2.1 X線の発生原理	827
1.3.2 デジタルカメラ (CCD、CMOS、直接露光)	801	1.2.2 X線の発生領域	827
1.4 走査像信号検出器	801	1.2.3 EDS検出部の構成	828
1.5 排気系	801	1.2.4 EDSで可能な分析	829
1.6 分析装置	802	第2節 蛍光X線分析法	831
1.6.1 エネルギー分散型X線分光器(EDS)	802	2.1 蛍光X線分析法の原理と応用分野	831
1.6.2 エネルギー損失分光器(EELS)	802	2.2 波長分散型とエネルギー分散型	831
1.7 収差補正装置	802	2.3 波長分散型の原理	831
1.7.1 球面収差補正装置の概要	802	2.4 応用例	832
1.7.2 球面収差補正装置の原理	803	2.4.1 超軽元素の分析	832
1.7.3 TEMとSTEMにおけるコレクタの効果	803	2.4.2 ニッケル合金、高合金鋼の分析	832
<b>第2節 走査電子顕微鏡</b>	805	<b>第5章 電子回折</b>	834
2.1 実用SEM	805	第1節 低速電子回折	834
2.1.1 SEMの原理	805	1.1 低速電子回折(LEED)装置	834
2.1.2 SEMで得られる情報	805	1.2 LEED図形の解釈	835
2.1.3 SEMの分解能の進歩	805	1.3 表面超構造とLEED図形	835
2.1.4 低加速電圧領域の高分解能化	806	1.4 表面形態と回折斑点形状	836
2.1.4.1 高輝度電子銃	806	1.5 回折斑点強度の入射電子エネルギー依存性	837
2.1.4.2 低収差対物レンズ	807	第2節 反射高速電子回折	838
2.1.5 低真空SEM	808	2.1 反射高速電子回折(RHEED)装置	938
2.1.6 低真空SEMの原理	808	2.2 RHEED図形の解釈	839
2.2 UHV-SEM	809	2.3 表面超構造とRHEED図形	840
2.2.1 原子ステップ像	809	2.4 RHEED強度振動	841
2.2.2 表面再構成構造	810	2.5 表面形態と回折斑点形状	841
2.2.3 グラフェン像	811	2.6 回折斑点強度の入射視斜角依存性	842
<b>第3節 低エネルギー電子顕微鏡・光電子顕微鏡</b>	813	<b>第6章 イオン・レーザを利用した分析技術</b>	844
3.1 LEEM/PEEM装置	813	第1節 二次イオン質量分析法	844
3.2 LEEM/PEEM像のコントラスト	813	1.1 ダイナミックSIMS	844
3.3 LEEM/PEEMによる磁気イメージング	814	1.2 スタティックSIMS	845
3.3.1 SPLEEM	815	第2節 イオン散乱法	848
3.3.2 XMCDPEEM/XMLDPEEM	815	2.1 イオン散乱法の分類	848
<b>第4節 ヘリウムイオン顕微鏡</b>	817	2.2 イオン散乱法の原理	848
4.1 Low-k膜パターン試料の観察	817	2.2.1 弾性散乱因子	848
4.2 絶縁膜中に埋め込まれたCu配線の観察	818	2.2.2 散乱断面積	849
4.3 グラフェン膜の電気伝導特性制御	819	2.2.3 阻止能	849
4.4 グラフェン膜のナノ孔微細加工	820	2.2.4 エネルギーストラグリング	850

総目次

2.3 中エネルギーイオン散乱法と低エネルギーイオン散乱法……………850

2.4 イオン散乱法による組成分析の例……………851

2.5 イオン散乱法による構造分析……………851

2.6 弾性反跳粒子検出法……………852

第3節 レーザ入射質量分析法……………853

3.1 MALDIによる分析……………853

3.2 IMSのための試料作製……………854

3.3 マトリックス塗布……………854

3.4 イメージング測定……………855

3.5 取得したデータの解析……………855

**第7章 探針を利用した観察法……………857**

第1節 走査トンネル顕微鏡……………857

1.1 走査トンネル顕微鏡の原理……………857

1.2 STM装置……………858

1.3 走査トンネル分光……………858

1.4 走査トンネルポテンショメトリー……………860

1.5 スピン偏極STM……………860

1.6 時間分解STM……………861

1.7 非弾性トンネル分光……………862

1.8 ESR-STM……………862

第2節 原子間力顕微鏡……………864

2.1 実用AFM……………864

2.1.1 探針・試料間相互作用……………864

2.1.2 AFMの装置技術……………864

2.1.3 AFMの動作方式……………865

2.2 ノンコンタクトAFM……………867

2.2.1 周波数変調検出法……………867

2.2.2 カセンサー……………868

2.2.3 周波数変調検出回路……………868

2.2.4 原子分解能観察例……………869

**第8章 力学特性計測装置……………871**

第1節 超微小硬さ試験法の概要……………871

1.1 硬さと超微小硬さ試験法(ナノインデンテーション法)……………871

1.2 荷重-変位曲線の解析法……………872

第2節 ナノインデンテーション法による薄膜の機械的特性評価……………873

2.1 塑性硬さの評価……………873

2.2 弾性定数の評価……………874

**第6編 巨大真空システム**

**第1章 大型加速器……………879**

第1節 KEK……………879

1.1 SuperKEKBの真空システム……………879

1.1.1 SuperKEKB……………879

1.1.2 ビームパイプ……………880

(1) 構造……………880

(2) SRパワー……………881

(3) 材質……………882

(4) 機械的特性……………882

(5) 接合……………882

(6) 表面処理……………883

(7) ビームパイプの種類……………883

(8) 特殊なビームパイプ……………883

1.1.3 接続フランジ……………884

1.1.4 ベローズチェンパーとゲートバルブ……………885

1.1.5 排気システム……………885

(1) 要求される圧力……………885

(2) 排気ポンプ……………886

1.1.6 モニターおよび制御システム……………887

1.1.7 電子雲不安定性対策……………888

(1) アンテナチェンパー型ビームパイプ……………889

(2) ソレノイド磁場……………889

(3) TiNコーティング……………889

(4) グループ(溝)構造……………889

(5) 電子クリアリング電極……………890

1.1.8 インピーダンス問題……………890

1.1.9 トンネル設置前作業……………891

1.1.10 トンネルへの設置と真空立ち上げ……………892

1.2 電子蓄積リングにおけるダストトラッピング……………895

1.2.1 ビーム寿命急落現象……………895

1.2.2 ダストの発生源……………895

1.2.3 ダストの大きさ……………895

1.2.4 力学的に安定なトラップ条件……………896

1.2.5 熱的に安定なトラップ条件……………896

1.2.6 ダストトラッピングの視覚的観測……………896

1.3 cERL真空システム……………897

1.3.1 エネルギー回収型線形加速器……………897

1.3.2 超高真空の実現……………898

1.3.3 低インピーダンスコンポーネント……………899

1.3.4 NEGコーティング……………899

第2節 J-PARC	901	(6) 真空ポンプ	923
2.1 陽子リニアック	901	(7) 真空計測	924
2.1.1 リニアック真空系の概要	901	(8) リングゲートバルブ	924
(1) リニアックの必要真空圧力	901	3.1.3 真空システムの据付と真空立ち上げ	925
(2) リニアック運転時の真空圧力	902	3.1.4 ビーム運転開始後の真空システム	925
(3) リニアック真空排気系の概要	902	(1) 運転中の圧力推移とビーム寿命の真空システム	925
2.1.2 各リニアック機器の真空系の特徴	903	(2) 主なトラブル	926
(1) 負水素イオン源及びLEBT	903	3.1.5 真空系の制御	927
(2) 高周波四重極リニアック(RFQ)	904	3.2 真空封止アンジュレータの真空	928
(3) ドリフトチューブリニアック(DTL, SDTL)	905	3.3 SACLAの真空	929
(4) 環結合型リニアック(ACS)	906	3.3.1 SACLAの構成	929
2.2 陽子シンクロトロン	908	3.3.2 要求される真空	930
2.2.1 真空システムへの要求	908	3.3.3 排気系のデザイン	930
2.2.2 J-PARC陽子シンクロトロン真空システムの設計思想	908	3.3.4 圧力の測定・機器保護	930
(1) ビームラインの超高真空維持	908	3.3.5 真空機器からの漏洩磁場対策	931
(2) 低放射化真空材料と耐放射線性機器	909	3.3.6 真空コンポーネント	931
(3) 大気圧からの迅速な排気	909	(1) 食い込み型フランジ	931
2.2.3 J-PARC陽子シンクロトロン真空システムの概要	909	(2) ボルト	932
2.2.4 構成機器	911	(3) 真空槽	932
(1) 大口径アルミナセラミックス製ダクト	911	(4) ベローズ	932
(2) 大口径チタン製ダクトとチタン製ベローズ	911	3.3.7 真空封止アンジュレータ	933
(3) 耐放射線性ターボ分子ポンプ	912	3.3.8 真空インターロック	933
(4) 耐放射線性ケーブル	912	3.4 放射光ビームラインの真空	932
2.2.5 真空機器の前処理	912	3.4.1 ビームラインの要求	933
(1) 真空壁の表面処理	913	3.4.2 フロントエンド	933
(2) 真空中熱処理	913	(1) 構成機器	933
2.2.6 真空性能	913	(2) インターロックシステム	936
2.2.7 近年の開発	915	3.4.3 光学系機器	937
(1) 強磁性体製ダクト	915	第2章 核融合	939
(2) キッカー電磁石のin-situでの脱ガス	915	第1節 核融合装置の真空システム	939
第3節 SPring-8/SACLA	918	1.1 JT-60SAの真空システム	939
3.1 蓄積リングの真空	919	1.1.1 JT-60SA計画及び装置の概要	939
3.1.1 蓄積リング真空システムの概要	919	1.1.2 JT-60SAの真空排気設備	940
3.1.2 真空チェンバー	920	1.1.3 真空排気設備の設置条件	941
(1) 構成	920	1.1.4 真空容器排気系	942
(2) チェンバー	921	1.1.5 クライオスタット排気系	942
(3) フランジ	922	1.1.6 排気シナリオ	943
(4) ベローズ	922	1.2 LHDの真空システム	945
(5) アプソーパー	922	1.2.1 大型ヘリカル装置の概略	945
		1.2.2 超伝導実験装置の特徴と排気の基本概念	946
		1.2.3 真空容器用真空排気装置	946



総目次

1.2.4 断熱真空容器用排気装置	947	2.2.3 照射装置	972
1.2.5 排気のシナリオと初期排気特性	948	(1) 標的としての生体組織の特性	972
1.2.6 リークテスト	949	(2) ブロード・ビーム法	973
1.2.7 壁のコンディショニング	950	(3) スキャンニング法	973
1.2.8 プラズマ生成実験と排気特性	950	2.2.4 患者固定装置	974
第2節 プラズマ対向材料	952	2.2.5 回転ガントリー	974
2.1 ダイバータターゲット材料	952	2.3 重粒子線がん治療の課題	975
2.2 第一壁材料	956	2.3.1 動く標的	975
第3章 大型真空システム	958	2.3.2 変化する標的	975
第1節 大型スペースチャンバ	958	2.3.3 施設の大きさ	975
1.1 人工衛星の設計検証と熱真空試験	958	2.3.4 照射過程の物理・生物・化学からの理解	976
1.2 スペースチャンバ	961	(1) RBEと放射線量の予測	976
1.2.1 宇宙環境の模擬	961	(2) 陽子と炭素イオンでどこが違うか	977
(1) 極低温	961		
(2) 真空	961		
1.2.2 スペースチャンバの設計と製作	961		
(1) 形状と構造	961		
(2) 真空装置としての考慮	963		
1.2.3 スペースチャンバ特有のリスク	964		
(1) 真空放電	964		
(2) 過冷	964		
(3) コンタミネーション (汚染)	964		
1.3 大型スペースチャンバの例	965		
1.3.1 13mφ スペースチャンバ	965		
(1) 真空容器	965		
(2) 真空排気系	965		
(3) 極低温系	966		
(4) ソーラシミュレータ	967		
第2節 重粒子線がん治療施設	968		
2.1 重粒子線がん治療の特徴とその物理的基礎	968		
2.1.1 放射線によるがん治療	968		
2.1.2 重粒子線がん治療の特徴	968		
(1) 加速器からの高エネルギー重イオン・ビーム	968		
(2) 高エネルギー重イオンの物質中での振る舞い	969		
(3) 放射線量と生体組織への効果	969		
(4) Braggピーク	870		
(5) がん組織の殺傷	970		
(6) 放射線量の予測と照射方法	971		
2.2 重粒子線がん治療の施設と主な装置	971		
2.2.1 加速器	971		
2.2.2 ビーム輸送系	972		

第7編 真空が牽引する次世代先端科学技術

第1章 真空の極限に迫る：極高真空への挑戦	981
第1節 極高真空スピニング偏極電子銃	981
1.1 スピニング偏極電子線の生成方法	981
1.2 スピニング偏極電子源	982
1.2.1 NEA表面作成	983
1.2.2 カソード電極およびアノード電極	983
1.2.3 スピニング偏極電子源における極高真空状態の実現	984
(1) 材質および表面処理	984
(2) 超高真空実現までのプロセス	984
1.3 極高真空スピニング偏極電子銃の実用的性能	984
第2節 極高真空プロジェクト	986
第3節 チタン材料による極高真空の実現	989
3.1 チタン材料のガス放出特性とその起源	989
3.2 チタン材料製真空装置による極高真空の実現	990
3.2.1 チタン材料製真空装置の製造	990
3.2.2 極高真空の実現	990
第4節 銅合金材料による極高真空の実現とその計測	993
4.1 0.2%BeCu合金とNiPめっき	993
4.2 0.2%BeCu合金の超低ガス放出化	993
4.3 イオンゲージの低ガス放出化	993
4.4 Q-massの低ガス放出化	995

4.5 0.2%BeCu合金製チャンバー……………995	(1) 平坦KBr(111)マイクロ/ナノ結晶……………1022
4.6 0.2%BeCu合金ケーシング製NEGポンプ……………995	(2) ペンタセン薄膜の2次元成長……………1023
4.7 0.2%BeCu合金製排気システム……………995	第4節 最近のグラファイト、グラフェンの新展開……………1024
<b>第2章 実環境測定のための真空システムとライフサイエンスへの応用……………997</b>	<b>第4章 真空科学技術の規格・標準の進歩……………1027</b>
第1節 電子ビーム（電子顕微鏡）への応用(SEM)……………997	第1節 真空の計量標準と工業標準……………1027
1.1 大気圧SEMの原理……………997	1.1 圧力真空の計量標準……………1027
1.2 応用例……………997	(1) 真空計の校正の必要性……………1027
1.2.1 液体中での動的観察の例（コロイダルシリカ微粒子の動き）……………997	(2) SI単位系……………1027
1.2.2 温度依存性の観察……………997	(3) 国家計量標準研究機関(NMI)の役割……………1027
1.2.3 電気化学反応のリアルタイム観察……………1000	(4) 圧力真空標準……………1028
第2節 電子ビーム（電子顕微鏡）への応用(TEM)……………1001	① 光波干渉式標準圧力計……………1028
2.1 環境制御透過型電子顕微鏡(ETEM)とは……………1001	② 重錘形圧力天びん……………1029
2.2 開放型ETEMの応用例……………1002	③ 膨張法……………1030
2.3 隔膜型ETEMの応用例……………1002	④ オリフィス法……………1030
2.4 グラフェンを用いた新しい隔膜型ETEM……………1003	⑤ 極高真空標準……………1031
第3節 イオンビーム（質量分析法）への応用……………1006	⑥ 分圧標準と標準コンダクタンスエレメント……………1032
3.1 イオンと固体との相互作用……………1006	⑦ 差圧標準と差圧標準を利用した低圧標準……………1032
3.2 高速重イオンによる2次イオン生成……………1006	⑧ リーク標準……………1033
3.3 MeV-SIMS法による質量イメージング……………1007	(5) 圧力真空標準の信頼性の確認……………1034
3.4 Ambient-SIMS技術……………1008	(6) 計測のトレーサビリティ……………1035
<b>第3章 真空科学技術におけるナノテクノロジーの世界……………1011</b>	1.2 真空の工業標準……………1035
第1節 ナノカーボン材料による電子源の開発……………1011	(1) 工業規格とは……………1035
1.1 背景……………1011	(2) 真空分野の工業標準……………1036
1.2 カーボンファイバー、ガラス様カーボン……………1011	
1.3 カーボンナノチューブ(CNT)……………1011	
1.4 グラフェン……………1012	
1.5 垂直配向グラファイトナノウォール(GMW)……………1012	
1.6 ダイヤモンド及びその他の炭素系材料……………1013	
第2節 超伝導体のナノ構造を用いた高感度粒子検出器の開発……………1014	
2.1 超伝導粒子検出器の動作原理……………1014	
2.2 質量分析装置……………1015	
2.3 超伝導ナノストリップイオン検出器(Superconductor nanoStrip Ion Detector)……………1016	
2.4 質量分析の例……………1018	
第3節 ナノスケール制御を目指した固液界面真空プロセスの開発……………1021	
3.1 固液界面真空プロセスとは……………1021	
3.2 イオン液体の真空蒸着……………1021	
3.3 イオン液体を介した結晶・薄膜成長……………1022	

**第8編 環境・安全・衛生対策と法規**

<b>第1章 化学物質の排出等汚染防止関連法……………1041</b>
第1節 大気汚染防止法……………1041
第2節 水質汚濁防止法……………1042
第3節 土壤汚染対策法……………1043
<b>第2章 化学物質管理の関連法……………1045</b>
第1節 労働安全衛生法……………1045
第2節 特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律……………1046
第3節 化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律……………1047
第4節 その他の化学物質管理関連法……………1049
4.1 消防法……………1049

総目次

4.2 高圧ガス保安法……………1049  
 4.3 毒物及び劇物取締法……………1049  
 4.4 揮発油等の品質の確保等に関する法律……………1049  
 4.5 農薬取締法……………1049  
 4.6 食品衛生法……………1049  
 4.7 有害物質を含有する家庭用品の規制に関する法律……………1049

**第3章 製品安全および情報伝達の関連法……………1050**

第1節 GHS……………1050  
 第2節 CLP規則……………1051  
 第3節 CEマーキング……………1052  
 第4節 CCC認証……………1053  
 第5節 各法律とPL法との関係……………1053

**第4章 廃棄物管理及び製品含有化学物質管理の関連法……………1055**

第1節 ELV指令……………1055  
 第2節 WEEE指令……………1056  
 第3節 その他各国のWEEE……………1057  
     3.1 インドRoHS(WEEE)……………1057  
     3.2 中国WEEE……………1057  
     3.3 カリフォルニアWEEE……………1057  
 第4節 J-Moss(JIS C 0950)……………1058  
 第5節 廃電池指令……………1058  
 第6節 REACH規制……………1059

**第5章 機器の高効率化の関連法……………1061**

第1節 ErP指令……………1061  
 第2節 エネルギースター(Energy Star)……………1062  
 第3節 トップランナー制度……………1062

第9編 計算物理

1. 第一原理シミュレーション……………1067  
     1.1 計算機マテリアルデザイン……………1067  
     1.2 表面・界面の第一原理シミュレーション……………1068  
 2. 表面反応における第一原理計算……………1068  
     2.1 反応性イオンエッチング……………1068  
     2.2 反応モデル……………1069  
     2.3 反応シミュレーション……………1070  
 3. 固体表面における水素ダイナミクス……………1071  
     3.1 水素の量子ダイナミクス……………1071  
     3.2 反応経路の決定……………1072  
     3.3 量子効果……………1074  
     3.4 分子振動の影響……………1074  
     3.5 量子状態からの拡散経路の予測……………1074  
 4. STMによる金属表面の観察……………1075  
     4.1 近藤効果の観察……………1075  
     4.2 磁性原子吸着金属表面における近藤効果……………1076  
     4.3 金属表面上の磁性原子ダイマー……………1078  
 5. 抵抗変化メモリ……………1079  
     5.1 抵抗変化メモリ……………1079  
     5.2 微視的動作機構……………1080  
     5.3 伝導性フィラメント……………1080  
     5.4 電極・抵抗素子界面での酸素欠損の挙動……………1081

索引

※本書に記載されている会社名、製品名、サービス名は各社の登録商標または商標です。なお、本書に記載されている製品名、サービス名等には、必ずしも商標表示 (®、TM) を付記していません。

## 編集委員会

### 〔編集委員長〕

笠井 秀明 明石工業高等専門学校長／大阪大学名誉教授

### 〔編集副委員長〕

越川 孝範 大阪電気通信大学名誉教授／重慶大学 客員教授  
大岩 烈 シエンタ オミクロン株式会社 代表取締役社長  
高橋 直樹 アトナーブ株式会社 上級アプリケーションエンジニア

### 〔編集顧問〕

尾浦憲治郎 大阪大学名誉教授  
岡野 達雄 東京大学名誉教授  
一村 信吾 早稲田大学研究戦略センター 教授  
齊藤 芳男 東京大学宇宙線研究所宇宙基礎物理学研究部門 特任教授

### 〔編集委員〕

#### 〈幹 事〉(50音順)

栗巢 普揮 山口大学大学院創成科学研究科物質工学系専攻 准教授  
小泉 達則 (元)キャノンアネルバ株式会社環境品質センター環境推進部 部長  
後藤 康仁 京都大学大学院工学研究科電子工学専攻 准教授  
寺岡 有殿 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門  
関西光科学研究所放射光科学研究センター 上席研究員  
中村 健 国立研究開発法人産業技術総合研究所計量標準総合センター  
分析計測標準研究部門 ナノ分光計測研究グループ長  
福田 常男 大阪市立大学大学院工学研究科電子情報系専攻 准教授

#### 〈委 員〉(50音順)

岡野夕紀子 株式会社岡野製作所 専務取締役  
岡本 昭夫 (元)地方独立行政法人大阪産業技術研究所電子・機械システム研究部 部長  
金澤 健一 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 名誉教授  
川人 洋介 大阪大学接合科学研究所 准教授

金正 倫計	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 J-PARCセンター 加速器ディビジョン 副ディビジョン長
逆井 章	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構核融合エネルギー研究開発部門 那珂核融合研究所 上席研究員
篠原 真	株式会社島津製作所 上席執行役員 基盤技術研究所 副所長
(故)関口 雅行	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構重粒子医科学センター 重粒子線がん治療普及推進チーム 主任研究員
高橋 大祐	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構環境試験技術ユニット 研究開発員
西村 節志	島津産機システムズ株式会社 顧問
長谷川修司	東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 教授
濱口 宗久	株式会社大阪真空機器製作所 取締役
備前 輝彦	公益財団法人高輝度光科学研究センター光源基盤部門 主幹研究員
福谷 克之	東京大学生産技術研究所基礎系部門 教授
間瀬 一彦	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 准教授
安江 常夫	大阪電気通信大学工学部基礎理工学科 教授

## 執筆者一覧 (50音順)

秋山 泰伸	東海大学工学部応用化学科 教授
新井 健太	国立研究開発法人産業技術総合研究所計量標準総合センター 工学計測標準研究部門 圧力真空標準研究グループ長
池田 圭	株式会社アテナシス 代表取締役
伊藤 博光	アルバックテクノ株式会社GCS本部計測センター計測課 主事
伊藤 雅章	大亜真空株式会社技術部 部長
岩井 秀夫	国立研究開発法人物質・材料研究機構技術開発・共用部門 材料分析ステーション表面・微小領域分析グループ グループリーダー
岩田 茂樹	一般社団法人東京環境経営研究所 執行理事
上田 良夫	大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻 教授
鶴飼 正敏	東京農工大学大学院工学研究院先端物理工学部門 教授
臼井 博明	東京農工大学大学院工学研究院有機材料化学部門 教授
薄井 洋行	鳥取大学大学院工学研究科化学・生物応用工学専攻 准教授
江利口浩二	京都大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 教授
大石 真也	公益財団法人 高輝度光科学研究センター光源基盤部門 主幹研究員
大久保雅隆	国立研究開発法人産業技術総合研究所エレクトロニクス・製造領域 上席イノベーションコーディネータ
大迫 信治	VISTA株式会社 代表取締役
大里 雅昭	株式会社荏原製作所精密・電子事業カンパニー精密機器事業部 環境製品技術部

- 大西 毅 株式会社日立ハイテクノロジーズ科学・医用システム事業統括本部  
事業戦略本部 本部長付
- 大村 孝仁 国立研究開発法人物質・材料研究機構構造材料研究拠点 副拠点長／  
高強度材料グループ グループリーダー
- 大山 浩 大阪大学大学院理学研究科化学専攻 准教授
- 小笠原弘道 明石工業高等専門学校 講師
- 岡田美智雄 大阪大学放射線科学基盤機構 教授
- 岡野夕紀子 株式会社岡野製作所 専務取締役
- 小川 真一 国立研究開発法人産業技術総合研究所  
エレクトロニクス・製造領域 ナノエレクトロニクス研究部門 招聘研究員
- 小栗 英知 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構J-PARCセンター  
加速器ディビジョン 研究主席
- 長田 利光 キヤノンアネルバ株式会社フィールドソリューション事業部  
コンポーネント開発部 部長
- 長田 容 公益財団法人産業廃棄物処理事業振興財団 技術部長
- 小野 慎司 明石工業高等専門学校 准教授
- 小野寺幹男 (元)株式会社アルバック マテリアル事業部
- 笠井 秀明 明石工業高等専門学校長／大阪大学名誉教授
- 金子 一秋 キヤノンアネルバ株式会社装置事業部装置開発第二部 部長
- 神谷潤一郎 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構J-PARCセンター 研究主幹
- 川上 雅人 東京エレクトロンテクノロジーソリューションズ株式会社TFF開発本部  
成膜開発センター エキスパート
- 川口 雅之 大阪電気通信大学工学部環境工学科 教授
- 川崎 忠寛 一般財団法人ファインセラミックセンター ナノ構造研究所  
環境電子顕微鏡グループ 主任研究員
- 川崎 洋司 住友重機械イオンテクノロジー株式会社愛媛事業所開発部  
プロセスマネージャー
- 河瀬 元明 京都大学大学院工学研究科化学工学専攻 教授
- 川野輪 仁 株式会社イオンテクノセンター シニアリサーチャー
- 神野 晃宏 トーカロ株式会社溶射技術開発研究所 次長
- 木ノ切恭治 真空テクノサポート 代表
- 草野 英二 金沢工業大学バイオ・化学部応用化学科 教授
- 倉橋 光紀 国立研究開発法人物質・材料研究機構先端材料解析研究拠点  
表面物性計測グループ 主席研究員
- 栗巢 普揮 山口大学大学院創成科学研究科物質工学系専攻 准教授
- 黒井 隆 日新イオン機器株式会社新事業推進部テクニカルマーケティンググループ  
グループ長
- 黒澤 一 檜山工業株式会社技術本部第二技術開発部 課長
- 桑原 真人 名古屋大学未来材料・システム研究所高度計測技術実践センター 准教授
- 小池土志夫 (元)株式会社アルバック
- 越川 孝範 大阪電気通信大学名誉教授／重慶大学 客員教授
- 後藤 実 宇部工業高等専門学校機械工学科 教授
- 後藤 康仁 京都大学大学院工学研究科電子工学専攻 准教授

- 小林 信一 埼玉大学名誉教授
- 小松 永治 神港精機株式会社装置事業部真空装置技術部開発課 課長
- 小森 彰夫 大学共同利用機関法人自然科学研究機構 機構長
- 近藤 実 (元)キヤノンアネルバ株式会社
- 近藤 行人 日本電子株式会社EM事業ユニット 技師長
- 齊藤 丈靖 大阪府立大学大学院工学研究科物質・化学系専攻 准教授
- 齊藤 芳男 東京大学 宇宙線研究所宇宙基礎物理学研究部門 特任教授
- 酒井 滋樹 日新イオン機器株式会社イオンビーム機器事業部  
イオンビーム技術開発2グループ グループ長
- 坂上 護 明石工業高等専門学校 客員教授
- 榊原 拓也 檜山工業株式会社技術本部第一技術開発部 課長代理
- 阪口 拓也 株式会社MORESCO機能材開発部作動油・真空油グループ
- 坂口 裕樹 鳥取大学大学院工学研究科化学・生物応用工学専攻 教授
- 逆井 章 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構核融合エネルギー研究開発部門  
那珂核融合研究所 上席研究員
- 坂田 卓也 一般社団法人東京環境経営研究所 シニアコンサルタント
- 桜井 英樹 サエス・ゲッターズ・エス・ピー・エー Solutions for Vacuum Systems Business Unit  
アプリケーション・エンジニア
- 佐々木優直 東京電子株式会社真空技術部
- 佐々木正洋 筑波大学数理物質系 物理工学域長／教授
- 塩野入正和 三愛プラント工業株式会社クリーンテック事業本部技術開発センター  
研究開発室 室長
- 白藤 立 大阪市立大学大学院工学研究科電子情報系専攻 教授
- 末次 祐介 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設 教授
- 須賀 三雄 日本電子株式会社アプリケーション統括室／経営戦略室 副室長
- 菅原 康弘 大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻 教授
- 杉浦 哲郎 株式会社荏原製作所精密・電子事業カンパニー精密機器事業部  
精密機器技術部HD技術課
- 杉山 正和 東京大学先端科学技術研究センター 教授
- 杉山 正行 キヤノンアネルバ株式会社フィールドソリューション事業部  
コンポーネント開発部コンポーネント開発第三課 課長
- 鈴木 敏生 株式会社アルバック技術開発部真空要素技術開発部真空要素技術研究室
- 鈴木 浩 一般社団法人東京環境経営研究所シニアコンサルタント
- 鈴木 基史 京都大学大学院工学研究科マイクロエンジニアリング専攻 教授
- 鈴木 雄二 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 教授
- 住森 大地 (元)株式会社ナ・デックスプロダクツレーザR&Dセンター
- 瀬木 利夫 京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻 講師
- (故)関口 雅行 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構重粒子医科学センター  
重粒子線がん治療普及推進チーム 主任研究員
- 関根 康一 株式会社ブイテックス東海工場設計部 主任技師
- 関根 尚 (元)助川電気工業株式会社品質管理部 取締役部長
- 埜田 公司 アルバックテクノ株式会社製品安全室 室長
- 高岡 毅 東北大学多元物質科学研究所 講師

- 鷹野 一郎 工学院大学工学部電気電子工学科 教授  
 高橋 直 公益財団法人高輝度光科学研究センター光源基盤部門 主幹研究員  
 高橋 大祐 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構環境試験技術ユニット 研究開発員  
 田川 雅人 神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻 准教授  
 滝川 浩史 豊橋技術科学大学電気・電子情報工学系 教授  
 田中 智成 株式会社アルバック技術開発部真空要素技術開発部 部長  
 谷本 育律 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設 准教授  
 玉川 孝一 (元)株式会社アルバック  
 多持隆一郎 株式会社日立ハイテクノロジーズ科学・医用システム事業統括本部  
 科学システム営業本部 本部長付  
 蔡 徳七 大阪大学大学院理化学研究科化学専攻 講師  
 筑根 敦弘 太陽日酸株式会社開発本部事業開発統括部 専門部長  
 坪川 徹也 株式会社島津製作所産業機械事業部TMP技術グループ グループ長  
 寺岡 有殿 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門  
 関西光科学研究所放射光科学研究センター 上席研究員  
 研谷昌一郎 (元)アルバック・クライオ株式会社京都低温技術開発センター 専門室長  
 土佐 正弘 国立研究開発法人物質・材料研究機構構造材料研究拠点接合・造型分野  
 トライボロジーグループ グループリーダー  
 中川 究也 京都大学大学院工学研究科化学工学専攻 准教授  
 中沢 正彦 (元)株式会社フジキン 東京技術研究所長／(現)ジーエフ設計 代表  
 中嶋 敦 慶應義塾大学理工学部化学科 教授  
 中嶋 薫 京都大学大学院工学研究科マイクロエンジニアリング専攻 准教授  
 (故)那須 昭一 (元)ウシオ電機株式会社 常務取締役  
 長田 光彦 アズビル株式会社藤沢テクノセンター技術開発本部商品開発部  
 中村 健 国立研究開発法人産業技術総合研究所計量標準総合センター  
 分析計測標準研究部門 ナノ分光計測研究グループ長  
 中村 誠 株式会社富士通研究所デジタルアニーラプロジェクト  
 西川 博昭 近畿大学生物理工学部医用工学科 教授  
 西川 正晃 ウシオ電機株式会社光源事業部技術部門第三技術部  
 西田 哲 岐阜大学工学部機械工学科 准教授  
 西村 健一 キヤノンアネルバ株式会社生産技術部生産技術課  
 長谷川繁彦 大阪大学産業科学研究所第1研究部門情報・量子科学系 准教授  
 長谷川修司 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 教授  
 花井 正博 多田電機株式会社応用機工場営業部営業第二課  
 花岡 隆 檜山工業株式会社技術本部第一技術開発部 副部長  
 羽深 等 横浜国立大学大学院工学研究院機能の創成部門 教授  
 早坂 孝宏 北海道大学大学院医学研究院消化器外科学教室 I 特任助教  
 林 広司 株式会社島津製作所分析計測事業部X線／表面ビジネスユニット  
 プロダクトマネージャー  
 東堤 秀明 株式会社パスカル 取締役会長  
 樋口 誠司 株式会社堀場製作所開発本部第2製品開発センター科学・半導体開発部  
 マネージャー  
 備前 輝彦 公益財団法人高輝度光科学研究センター光源基盤部門 主幹研究員



- 深津 晋** 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻 教授  
**福田 常男** 大阪市立大学大学院工学研究科電子情報系専攻 准教授  
**藤井麻樹子** 横浜国立大学大学院環境情報研究院自然環境と情報部門 講師  
**細見 博** 共和真空技術株式会社 取締役技術本部長  
**堀尾 吉巳** 大同大学工学部電気電子工学科 教授  
**本間 健二** 兵庫県立大学大学院物質理学研究科物質科学専攻 特任教授  
**本間 芳和** 東京理科大学理学部第一部物理学科 教授  
**町田 英明** 気相成長株式会社 代表取締役  
**松浦 徹也** 一般社団法人東京環境経営研究所 理事長  
**松尾 二郎** 京都大学大学院工学研究科附属量子理工学研究センター 准教授  
**松田 真一** 檜山工業株式会社技術本部第二技術開発部 副部長  
**松田 武志** 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構筑波宇宙センター管理部 主任  
**松本 信彦** 東京電子株式会社真空技術部 部長  
**松本 祐司** 東北大学工学研究科応用化学専攻 教授  
**松本 善和** 日本ブッシュ株式会社テクニカルサービス本部 副本部長  
**三浦 豊** 株式会社アルバック技術開発部解析・分析センター 部長  
**源 浩** 入江工研株式会社四国事業所中山工場技術グループ グループ長  
**三宅 雅人** 奈良先端科学技術大学院大学研究推進機構 准教授  
**村山 吉信** アルバック・クライオ株式会社技術本部第一技術部 部長  
**百瀬 健** 東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻 講師  
**森 研人** 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構有人宇宙技術部門  
宇宙飛行士・運用管制ユニット 研究開発員  
**森 伸介** 東京工業大学物質理工学院応用化学系 准教授  
**森山 孝男** 株式会社リガクX線機器事業部SBU WDX大阪分析センター  
グループマネージャー  
**安江 常夫** 大阪電気通信大学工学部基礎理工学科 教授  
**矢部 学** 入江工研株式会社テクニカルセンター開発グループ グループ長  
**山田 洋一** 筑波大学数理物質系 准教授  
**山野 英樹** 芝浦エレテック株式会社新規事業開拓推進センター 主幹  
**湯山 純平** (元)株式会社アルバック  
**横田久美子** 神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻 助手  
**吉川 保** 有限会社フェイス 代表取締役  
**吉田 肇** 国立研究開発法人産業技術総合研究所計量標準総合センター  
工学計測標準研究部門圧力真空標準研究グループ 主任研究員  
**吉田 素朗** 株式会社大阪真空機器製作所名張工場開発部  
(故) **渡辺 文夫** 有限会社真空実験室 代表取締役

## 全体構成概要

### 【第1部 真空工学の基礎】

〔第1編 希薄気体の性質〕	35
〔第2編 真空ポンプ〕	107
〔第3編 真空計測器〕	179
〔第4編 真空部品〕	219
〔第5編 真空材料〕	299
〔第6編 真空装置の取扱い〕	341
〔第7編 環境・安全・衛生対策と保守〕	371

### 【第2部 真空応用システム】

〔第1編 低・中真空の利用〕	455
〔第2編 金属材料の加工〕	487
〔第3編 薄膜〕	525
〔第4編 分子ビーム技術〕	711
〔第5編 表面分析〕	781
〔第6編 巨大真空システム〕	877
〔第7編 真空が牽引する次世代先端科学技術〕	979
〔第8編 環境・安全・衛生対策と法規〕	1039
〔第9編 計算物理〕	1065

この先をご覧いただくには、パスワードが必要です。

制限つきPDFにて電子試読を行っております。  
(制限内容：閲覧期間の設定、コピーやプリントの禁止など)

PDFの閲覧には、パスワードと専用のビューア（無料）が必要  
です。

費用は一切かかりません。

※WindowsのPCでのみご覧いただけます。予めご了承ください。

パスワード

<https://www.nts-book.com/nts>の電子試読 より、  
ページ下部のフォームからお申込み下さい。

ビューアのダウンロード

PDFは、株式会社スカイコム の SkyPDF Viewer（無償の  
PDFビューア）をダウンロードすることで閲覧可能です。  
※Adobe Acrobat Readerなど他のPDF閲覧アプリケーションでは  
ご覧になれません。

SkyPDF Viewer 無償ダウンロード：

<https://www.skycom.jp/free/>