

# イオン源工学

## 目次

### 第1章 イオン源に関する一般概念

1.1	イオン源の機能	1
1.2	イオン源における主要な物理量	1
1.2.1	引き出されるイオン電流の量	1
1.2.2	引き出されるイオンビームの質	4
1.2.3	イオンビームの輸送	6
1.3	イオン源の大電流化における諸問題	7
1.3.1	イオン源プラズマ	8
1.3.2	イオン引き出し系	12
1.3.3	イオンビーム輸送系	13
1.4	歴史的背景	14
1.5	イオン源の応用分野	18

### 第2章 イオン源に関する基礎物理過程

2.1	イオンとその属性	23
2.1.1	イオンの分類	23
2.1.2	電離電圧と電子親和力	24
2.1.3	電離過程	29
i)	粒子間衝突によるイオンの生成	30
(a)	電子との衝突による電離	30
(b)	電子との衝突による多価電離	32
(c)	粒子間衝突による負イオン生成	34
(d)	荷電変換による負イオン生成	37
ii)	熱電離	39
iii)	金属表面との相互作用によるイオンの生成	42
(a)	2次イオン放出	44
(b)	金属表面の仕事関数	44
(c)	反射型	45
(d)	スパッタ型	45

2.1.4	消滅過程	46
i)	粒子間再結合	46
ii)	壁面再結合	47
iii)	荷電変換	48
(a)	イオン源プラズマ中における荷電変換	48
(b)	イオンビーム輸送における荷電変換	49
iv)	負イオンの電子分離	50
2.2	中性粒子の蒸気圧	52
2.3	クラスター粒子の生成	55
2.4	プラズマと電子ビームの相互作用	65
2.4.1	電磁波動論的不安定性	66
i)	分散式	66
ii)	不安定性判別法	69
iii)	能動結合の解析	71
iv)	衝突効果を考慮した分散式	74
2.4.2	運動論的不安定性	76

### 第3章 イオン源プラズマ

3.1	1価イオンを主としたプラズマの生成	81
3.1.1	平均自由行程	81
3.1.2	プラズマ生成における重要なパラメータ	83
3.1.3	イオン閉じ込め時間	85
3.1.4	イオン化物質の供給	86
3.1.5	電離にあずかる電子の量	90
i)	電界の利用	91
ii)	電界と磁界の利用	92
iii)	不均一磁界の利用	94
3.1.6	放電エネルギーの選択	95
3.1.7	イオンの閉じ込め	98
i)	電界の利用	98
ii)	磁界の利用	99
3.2	多価イオンを主としたプラズマの生成	99
3.2.1	荷電状態密度分布	100

3.2.2	熱平衡モデル	101
3.2.3	コロナモデル	103
3.2.4	イオン閉じ込め時間を導入したモデル	104
3.3	負イオンを主としたプラズマの生成	107
3.3.1	熱平衡モデルによる負イオン生成率	108
3.3.2	プラズマ中での高密度水素負イオン生成	109
3.3.3	アルカリ金属を混入したプラズマ	110
3.4	分子イオンの成分比	111
3.4.1	水素イオンの成分比	111
3.4.2	金属化合物イオンの成分比	114
3.5	ビームプラズマ電離	118
3.5.1	電磁波動論的不安定性を用いたビームプラズマ電離	118
i)	エネルギーの流れ図	118
ii)	ビームプラズマ不安定性	119
iii)	プラズマ密度の評価	121
3.5.2	運動論的不安定性によるビームプラズマ電離	126

### 第4章 表面効果を利用したイオン生成

4.1	金属表面近傍原子における電子のエネルギー障壁	131
4.2	表面電離による正負イオンの生成	132
4.2.1	表面電離による正イオンの生成	132
4.2.2	表面電離による負イオンの生成	135
4.3	電界放出による正イオンの生成	136
4.3.1	ガスの電界電離	136
4.3.2	液体金属からのイオン放出	137
i)	液体金属イオン源の構造と種類	137
ii)	液体金属イオン源の動作原理	138
iii)	液体金属イオン源の電離機構	142
iv)	液体金属イオン源の構成材料	144
v)	液体金属の流量	145
vi)	プラズマボール	148
vii)	液体金属イオン源からの放出イオン電流	148
4.4	2次イオン放出による正負イオンの生成	149

4.4.1	2次正イオン放出	150
4.4.2	2次負イオン放出の理論	152
i)	熱力学モデル	153
ii)	表面効果モデル	153
(a)	表面効果モデル—イオン生成型	154
(b)	表面効果モデル—イオン中和型	154
4.4.3	2次粒子放出機構	155
i)	1次粒子の反射	155
ii)	スパッタリング	158
4.4.4	負イオン生成のための固体表面状態の最適化	160
i)	固体表面の仕事関数	161
ii)	セシウム表面層厚みの最適化	163
(a)	反射型	163
(b)	スパッタ型	163
4.4.5	2次負イオン放出の理論と実験の比較	166
i)	反射型	167
ii)	スパッタ型	172

第5章 イオンの引き出し

5.1	プラズマからのイオンビームの引き出しと形成—中和のない場合—	177
5.1.1	イオン放出面の形状	177
5.1.2	スケーリング則	179
5.1.3	引き出されるイオン電流の上限値	182
5.1.4	最適イオンビームの形成	183
i)	単孔電極系	183
ii)	スリット電極系	185
5.1.5	電流量のアスペクト比依存性	186
5.1.6	加速減速電極系	187
5.1.7	チャンネルからのイオン放出	188
5.2	プラズマからのイオンビームの引き出しと形成—中和のある場合—	190
5.2.1	空間電荷効果	190
i)	径方向の空間電荷力によるイオンビームの発散	191
ii)	軸方向の空間電荷効果による引き出されるイオン電流の空間電荷制限	192

iii)	イオン放出面の形状	194
5.2.2	電子によるイオン引き出し系の空間電荷中和効果	196
5.2.3	イオンビームの発散の緩和	196
5.2.4	引き出し得るイオン電流の空間電荷制限の緩和	198
5.2.5	イオン放出面の形状の改善	203
5.3	固定面からのイオンビームの引き出し	207
5.3.1	平行ビームを得るための電極系	209
5.3.2	円形断面集束ビーム	210
5.3.3	スリット引き出しによる帯状集束ビーム	210
5.3.4	点光源からのイオンビーム	211
5.3.5	引き出し電極のレンズ効果	212
5.4	イオン引き出し系の計算機シミュレーション	213
5.5	ビーム径	213
5.5.1	最小ビーム径	213
5.5.2	大口径ビーム	216

第6章 イオンビームの輸送

6.1	空間電荷効果と中和	219
6.2	レンズ	220
6.2.1	静電電極レンズ	220
i)	ドリフト空間	221
ii)	1枚電極レンズ	221
iii)	2枚電極レンズ	222
iv)	アインツェルレンズ	223
6.2.2	磁界レンズ	224
6.2.3	静電4重極レンズ	224
6.2.4	磁界4重極レンズ	225
6.3	偏向	226
6.3.1	静電偏向	226
6.3.2	静磁偏向	227
6.4	質量分離	227
6.4.1	扇型磁石	227
6.4.2	E×B分離器	228

6.4.3	4重極質量分析器	229
6.4.4	タイム・オブ・フライト法	230
6.5	加速	231
6.6	減速	231
6.7	イオンビーム軌道の計算機シミュレーション	232
6.7.1	プログラムの概要	233
6.7.2	プログラムの流れ各項目の説明	233
i)	入力	233
ii)	電界計算	234
iii)	イオン放出面の決定	237
iv)	軌道計算	238
6.7.3	プログラムの具体例	239
6.7.4	イオンビーム軌道の計算例	273
i)	アインツェルレンズ	273
ii)	固定面からのイオン及び電子の引き出し	273
iii)	プラズマからのイオン引き出し	278
iv)	減速電極系	278
第7章 イオンの検出		
7.1	イオン電流量	283
7.1.1	直接電流測定	284
7.1.2	電力測定	289
7.1.3	無接触測定法	290
7.1.4	その他の方法	293
7.2	エミッタンス	294
7.2.1	エミッタンスの不変性	294
7.2.2	エミッタンスと輝度の定義	296
7.2.3	2乗平均エミッタンス	298
7.2.4	エミッタンスとプラズマ特性との関係	300
7.2.5	エミッタンスの測定法	301
7.3	エネルギー幅	303
7.3.1	イオン源プラズマの電位変動	304
7.3.2	液体金属イオン源におけるエネルギー幅	305

7.3.3	エネルギー分析器	307
i)	反射電界型	307
ii)	静電プリズム型	310
iii)	磁界プリズム型	311
7.4	プラズマ特性	312
7.4.1	プラズマ密度と電子温度	312
i)	ラングミュア・プローブ法	312
ii)	空洞共振器を用いる方法	314
iii)	レーザー光解離を用いた負イオン密度の測定	315
7.4.2	電子エネルギー分布	316
i)	Druyvesteyn 法	317
ii)	X線計測による電子エネルギー測定	318

## 第8章 イオン源に関する材料および装置

8.1	イオン源の構成材料	323
8.1.1	高温材料	323
8.1.2	絶縁材料	324
8.1.3	真空材料	330
8.2	イオン化物質の供給系	333
8.2.1	室温で原子状のガスや単体分子	333
8.2.2	比較的蒸気圧の高い固体元素	333
8.2.3	高温においても蒸気圧の低い元素	334
8.2.4	イオン源の中での化合物合成法	335
8.3	真空排気系	341
8.3.1	イオン源に用いられる排気系	341
i)	油拡散ポンプ系	342
ii)	ターボ分子ポンプ	345
iii)	クライオポンプ	347
8.3.2	真空排気系の選択	350
8.3.3	ガス圧力と流量の測定	354
8.4	電源	359
8.4.1	イオン源プラズマ生成用電源	359
i)	フィラメント電源	361

ii)	放電用電源	362
(a)	放電用直流電源	362
(b)	放電用高周波電源	363
(c)	放電用マイクロ波電源	363
iii)	プラズマ生成用補助電源	365
8.4.2	イオン源動作電源電力高電位供給法	366
i)	高電位部の絶縁	366
ii)	絶縁トランス	367
iii)	絶縁棒付き発電機	368
iv)	高電位部の冷却	369
8.4.3	直流高電圧電源	370
i)	基本整流回路	370
(a)	トランス (変圧器)	372
(b)	整流素子	372
(c)	コンデンサ	373
(d)	抵抗	375
(e)	電線	376
ii)	倍電圧整流回路 —コッククロフト・ウォルトン回路	377
iii)	電圧の安定化	378
iv)	放電防止および保護回路	380
8.5	制御測定系	382
8.5.1	イオン源動作電源の制御	382
i)	電源電圧等の設定法	382
ii)	指示値の監視法	383
iii)	光ファイバー信号伝送	383
8.5.2	測定系等の保護	385
i)	サージをバイパスする素子	385
ii)	サージアブソーバ	387
(a)	整流ダイオードの逆並列接続	388
(b)	ツェナダイオードの逆直列接続	389
(c)	バリスタ	389
(d)	ガス放電管	390
(e)	火花ギャップ	390

iii)	計測装置等の保護回路	391
(a)	メータの保護	391
(b)	電源の保護	392
(c)	測定装置の保護	393
(d)	イオン源電極の保護	394

## 第9章 プラズマからイオンを引き出すイオン源の具体例

9.1	1価イオンを主としたイオン源 —金属イオン源を含む—	397
9.1.1	高周波放電型	398
i)	プラズマ生成室外励起型	398
ii)	プラズマ生成室内励起型	401
9.1.2	マイクロ波放電型	402
i)	ソレノイドによる磁界を用いる型	403
ii)	ソレノイドと強磁性体による磁界を用いる型	405
iii)	永久磁石と強磁性体による磁界を用いる型	406
9.1.3	電子振動型	409
9.1.4	電子衝撃型	411
i)	Kaufman 型	411
ii)	Freeman 型	414
iii)	径方向閉じ込め型	416
iv)	無磁界大電流型	417
v)	多極磁界大電流型	418
9.1.5	電子ビーム入射型 —ビームプラズマ型	420
i)	ビームプラズマ型イオン源の一般的性能	420
ii)	大電流動作の原理	423
iii)	ビームプラズマ型金属イオン源	437
iv)	低密度ガスの高効率電離	438
9.1.6	デュオプラズマトロンとその変形	440
i)	モノプラズマトロン	441
ii)	デュオプラズマトロン	441
iii)	デュオピガトロン	444
9.1.7	スパッタ型	445
i)	Hill and Nelson 型と電子衝撃型のスパッタイオン源	448

ii)	P I G型スパッタイオン源	450
iii)	デュオプラズマトロンとその変形のスパッタイオン源	452
9.1.8	クラスターイオン源	453
9.2	多価イオン源	456
9.2.1	P I G型	457
9.2.2	デュオプラズマトロンとその変形	463
9.2.3	マイクロ波放電型	464
9.2.4	電子ビーム入射型	472
9.2.5	レーザー照射型	479
9.3	負イオン源	480
9.3.1	荷電変換型	482
9.3.2	P I G型	482
9.3.3	デュオプラズマトロンとその変形	483
9.3.4	ボリュウムプロダクション型	486

iii)	マルチカサブ型	522
iv)	ホローカソード型	525
v)	デュオピガトロン型	526
10.3.2	スパッタ型	526
i)	Mueller & Hortig 型	528
ii)	UNIS とその変形	529
iii)	ANIS とその変形	533
iv)	VNIS	537
v)	NIABNIS	540

## 第10章 表面効果を利用するイオン源の具体例

10.1	表面電離型	493
10.1.1	熱放出型	493
10.1.2	背面供給型	495
10.1.3	前面供給型	497
10.1.4	表面電離型負イオン源	497
10.2	強電界印加型	500
10.2.1	電界蒸発型	500
10.2.2	ガス電界電離型	501
10.2.3	液体金属イオン源	503
i)	ニードル型	504
ii)	キャピラリー型	508
iii)	含浸電極型	508
iv)	共晶合金型	513
10.3	2次イオン放出型	516
10.3.1	1次イオン反射型	516
i)	マグネトロン型	517
ii)	P I G型	520