

# 目次

## 序章 開放端磁場系の発展

佐藤 照幸

0.1	ミラー磁場系における閉じ込め	1
(1)	断熱的閉じ込め	1
(2)	クーロン衝突	2
(3)	MHD 安定性	3
(4)	マイクロ不安定性	3
(5)	複合ミラー磁場系への発展	4
0.2	カusp磁場系における閉じ込め	5
(1)	断熱領域と非断熱領域	5
(2)	粒子の運動	6
(3)	粒子損失	7
(4)	MHD 安定性	7
(5)	端損失の軽減	8
(6)	複合カusp磁場系への発展	8
0.3	高周波封じ込め	9
(1)	電子サイクロトロン周波数帯の高周波封じ込め	10
(2)	イオンサイクロトロン周波数帯の高周波封じ込め	11
0.4	高周波封じ込めとカusp	12

## 第 I 部 高周波封じ込めの物理

### 第 1 章 高周波電磁場とプラズマ

佐藤 照幸, 渡辺 二太, 熊沢 隆平

1.1	はじめに	17
1.2	流体モデルによる固有モードの解析	17
1.3	静電イオンサイクロトロン波の固有モード	22
(1)	シート状プラズマの固有モード	25
(2)	円筒状プラズマの固有モード	28
(3)	ラインカuspの高周波封じ込め	31
(4)	ポイントカuspの高周波封じ込め	34
(5)	固有モードの空間的構造	35
(6)	プラズマのインピーダンス表示	36
(7)	シース共鳴との関連	39
1.4	イオンバーンステイン波の固有モード	39
(1)	シート状プラズマの固有モード	39
(2)	ラインカuspの高周波封じ込め	42
(3)	固有モードの空間的構造	43
1.5	磁場に垂直な静電場の効果	45
(1)	固有モードの変化 (理論)	45
(2)	固有周波数の変化 (実験)	47
第 1 章の付録		50
(1)	シート状プラズマの固有モード解析の経過	50
(2)	1.3 節 (1.50) 式の導出	53
(3)	シートプラズマにおける固有モードの形成	55

### 第 2 章 ポンデラモーティブ・ポテンシャルによる閉じ込め

熊沢 隆平, 羽鳥 尹承, 佐藤 照幸,  
渡辺 二太, 大林 治夫

2.1	ポンデラモーティブ・ポテンシャルの理論	59
(1)	概説	59
(2)	ポンデラモーティブ・ポテンシャル	62
(3)	断熱運動の臨界エネルギー	64
(4)	非断熱運動	66
(5)	数値計算の結果	67
(6)	進んだ力学理論—共変表示	70
(7)	進んだ	

力学理論—非局所表示	72	(8) 進んだ力学理論—非線形波動方程式	74
2.2 高周波封じ込めの理論	76		
(1) 単一粒子の高周波封じ込め	76	(2) 高周波封じ込めの計算機解析	81
(3) 高周波封じ込めの定常状態	85		
2.3 高周波封じ込めのモンテカルロ計算	89		
(1) 単一スピンドルカスプ	89	(2) 二重カスプ系	90
2.4 断熱封じ込めと非断熱封じ込め	91		
(1) 非断熱封じ込めとイオン加熱	92	(2) 高周波封じ込めのインピーダンス表示	96
(3) 断熱封じ込め (ミラー磁場)	99	(4) 断熱封じ込め (カスプ磁場)	103
2.5 ポンデラモーティブ・ポテンシャルと両極性電位	105		
(1) 測定法	105	(2) パラメータ依存性	107
(3) 空間構造	108	(4) 閉じ込め領域のプラズマ電位	110
2.6 粒子損失の軽減	115		
(1) 粒子損失の軽減	115	(2) 粒子損失の収支	116
(3) ラインカスプ封じ込めの比例則	117	(4) ミラー端封じ込めの比例則	121
(5) 比例則と非局所理論	125		
2.7 閉じ込めの改善	125		
(1) 反射イオン	125	(2) 閉じ込め領域の密度上昇	126
(3) レーザー生成プラズマの閉じ込め時間	128	(4) パワーバランス	131
(5) 荷電交換エネルギー損失	134	(6) 全エネルギー閉じ込め	135
2.8 高周波封じ込めに伴う電子加熱	138		
(1) 共鳴的電子加熱	139	(2) 短波長静電波のランダウ減衰	140
第2章の付録	142		
ポンデラモーティブ・ポテンシャルの平均法による導出	142		

### 第3章 高周波封じ込めに伴う不安定性と粒子損失

佐藤 照幸, 羽鳥 尹承

3.1 カスププラズマのバースト不安定性	147
(1) 不安定性の実験	147
(2) 変調不安定性の理論	148
3.2 RFC-XX プラズマの不安定性	150
3.3 パラメトリック不安定性	151
3.4 ポイントカスプの高周波封じ込めと異常粒子損失	152

## 第II部 軸対称直線型装置におけるプラズマ物理

### 第4章 プラズマの不安定性と波動

佐藤 照幸, 岡村 昇一, 渡辺 二太,  
西村 清彦

4.1 中空状プラズマの不安定性	159
4.2 カスプアンカーによるMHD安定性	162
4.3 ドリフト波不安定	169
4.4 シートプラズマにおけるドリフト波	172
4.5 ドリフトサイクロトロン損失錐不安定	179
4.6 静電イオンサイクロトロン波	181

(1) 磁力線方向に伝搬する静電波動	181	(2) イオン音波と静電イオンサイクロトロン波の結合	182
(3) 磁場に垂直な伝搬	185	(4) 磁場に斜めに伝搬する波の波面	187
4.7 イオンサイクロトロン波と圧縮性アルベーン波	187		
(1) イオンサイクロトロン波	188	(2) 圧縮性アルベーン波	189

### 第5章 ミラー磁場におけるプラズマ

熊沢 隆平, 岡村 昇一

5.1 イオンのスロッシング分布	193
5.2 リミターと両極性損失	198
5.3 高温電子モード	203
5.4 プラズマ電位の分布	204

### 第6章 RADIAL TRANSPORT ISSUES

HAROLD R. GARNER, LARRY S. PERANICH

6.1 SEGMENTED LIMITER RESULTS	209
(1) Low Density, ICH Sustained, ECH Heated Mode	210
(2) High Density, ICH Sustained Mode	212
(3) Low Density ECH Sustained Mode	213
6.2 LASER BLOWOFF RESULTS	215
6.3 SECONDARY ELECTRON DETECTOR MEASUREMENTS OF UP/DOWN ASYMMETRY	220
6.4 FLUCTUATIONS AND RADIAL TRANSPORT	221

### 第7章 RF TANDEM MIRROR MODES

HAROLD R. GARNER, LARRY S. PERANICH

7.1 SIMPLE TANDEM MODE	223
7.2 NEGATIVE POTENTIAL MODE	224
7.3 HOT ELECTRON MODE	228

### 第8章 カスプ磁場におけるプラズマ

大林 治夫, 佐藤 照幸, 羽鳥 尹承,  
渡辺 二太, 高山 一男

8.1 カスプ磁場中の粒子の運動	231
8.2 カスププラズマの定常状態と粒子損失	233
(1) スピンドルカスプ	233
(2) ピケットフェンス	235
8.3 ラインカスプのプラズマの厚さ	236
(1) TPD-Iのラインカスプ	236
(2) RFC-XX-Mのラインカスプ	237
(3) 高周波封じ込めの場合のラインカスプ	238
8.4 絶縁体壁とプラズマの形状	239
8.5 高ベータ・カスププラズマの閉じ込め	241

## 第Ⅲ部 高周波電磁場によるプラズマ加熱・生成の理工学

### 第9章 高周波加熱

佐藤 照幸, 羽鳥 尹承, 渡辺 二太

9.1 高周波封じ込め電極によるイオン加熱	245
(1) 多種イオンプラズマの加熱 245 (2) 加熱最適周波数の追跡 247	
9.2 ナゴヤⅢ型アンテナによるイオン加熱	248
(1) TPD-Ⅲ ミラープラズマ 249 (2) $n\omega_{ci}$ における加熱 250 (3) ナゴヤⅢ型アンテナの負荷抵抗 251	
9.3 ナゴヤⅢ型アンテナの軸方向アレイ	253
9.4 ナゴヤⅢ型アンテナの方位角方向アレイ	256
(1) RFC-XX 一様磁場プラズマ 257 (2) RFC-XX ミラープラズマ 258 (3) $n\omega_{ci}$ における加熱 259	
9.5 加熱の理論	260
(1) ナゴヤⅢ型アンテナの理論 260 (2) 加熱によるプラズマ電位の制御 262	

### 第10章 高周波電磁場によるプラズマ生成

岡村 昇一, 羽鳥 尹承

10.1 RFC-XX のプラズマ生成系	268
10.2 高周波電磁場の周波数と回転の効果	269
10.3 $m=-1$ モードのプラズマ	270
10.4 $m=+1$ モードのプラズマ	272
10.5 RFC-XX-M のプラズマ生成	274
10.6 軸対称アンテナの設計	275
10.7 回転電磁場とプラズマの輸送	276

### 第11章 大電力高周波技術

アダチケイゾー, 青木 高之

11.1 メガワット級高周波系	279
(1) 全体の系統 279 (2) 大電力増幅器 279 (3) 寄生振動 281 (4) 高周波放電とその対策 282 (5) 保護回路 284 (6) 高周波電極と整合回路 284 (7) 位相変調回路 288	
11.2 ラインカスププラズマへの高周波高電圧印加	288
(1) 等価回路 289 (2) 方位角方向対称性 291 (3) 高インピーダンス1点給電 293 (4) 低インピーダンス4点給電 295 (5) プラズマの負荷効果 297	
11.3 高周波放電洗浄	299

## 第Ⅳ部 高周波封じ込めの核融合工学

### 第12章 イオン種の選択的封じ込め

佐藤 照幸

12.1 不純物除去	305
(1) 核融合炉における不純物除去 305 (2) 多種イオンプラズマの高周波封じ込め 306	
12.2 トリチウムの回収	308
12.3 同位体分離	310
(1) イオンサイクロトロン共鳴法 310 (2) 選択的高周波封じ込め法 312 (3) 同位体分離装置の提案 312 (4) リチウム同位体分離 313	
12.4 排出プラズマによる水素製成	313

### 第13章 高周波封じ込めの改良

佐藤 照幸, 羽鳥 尹承, 渡辺 二太

13.1 最適周波数の追跡	317
13.2 高周波電極の浮遊電位の効果	318
13.3 イオンと電子に対する高周波封じ込め	320
13.4 二段高周波電極による封じ込め	321
13.5 電極アレイによる高周波封じ込め	324

### 第14章 核融合炉の概念設計

熊沢 隆平, 羽鳥 尹承

14.1 二重カスプ型 RFC 炉の立案	327
14.2 RFC 核融合炉	331
14.3 RFC-CC 計画	337

## 第Ⅴ部 計測系

### 第15章 計測系

アダチケイゾー

15.1 トムソン散乱	343
15.2 飛行時間型中性粒子エネルギー分析器	344
15.3 マイクロ波干渉計	346
15.4 リチウムビームプローブおよびレーザー誘起蛍光法を用いた高周波電場測定法	347
15.5 重イオンビームプローブ	350
15.6 レーザー蛍光法によるプラズマ中の水素原子密度の測定	352
15.7 その他の計測装置	354
(1) 飛行時間型多重グリッドエネルギー・質量分析器 354 (2) HCN レーザー干渉計 355 (3) 加熱電力変調による $\tau_E$ の測定 356 (4) 多コレクタファラデーカップ 358 (5) パルス高周波電圧の位相測定 359	
15.8 実験データ処理系	361

## 第VI部 高周波封じ込め研究の20年

### 第16章 研究の経過

佐藤 照幸, 大林 治夫

16.1 搖籃期 .....	367
16.2 第2次計画期 .....	370
16.3 第1発展期 .....	372
16.4 第2発展期 .....	375

### 第17章 実験装置

アダチケイゾー, 佐藤 照幸

17.1 A-1装置 .....	385
17.2 TPD-I号機 .....	386
17.3 TPD-II号機 .....	387
17.4 TPD-III号機 .....	389
17.5 RFC-XX装置 .....	393
(1) 磁場系 393 (2) 真空容器と排気系 397 (3) プラズマ源 400 (4) 高周波系 402	
17.6 RFC-XX-M装置 .....	403

### 第18章 研究体制と研究費

佐藤 照幸

18.1 グループメンバー .....	411
18.2 共同研究 .....	411
18.3 国際協力 .....	421
18.4 研究費 .....	421

### 資料・研究報告

資料 .....	427
研究報告 .....	457