

## 目次

まえがき	i
編集委員会	v
執筆者一覧	vii

## 第1編 核融合概論

第1章 核融合	3	3.2.4	ブランケット	30
1.1 核融合反応	3	3.2.5	第一壁	33
1.1.1 星の核融合反応	3	3.2.6	ダイバーター	33
1.1.2 地上の核融合反応	5	3.2.7	中性子照射損傷	33
第2章 核融合プラズマ	10	第4章 核融合炉技術評価	35	
2.1 核融合研究の歴史	10	4.1 はじめに	35	
2.2 核融合方式	12	4.2 核融合炉開発の推進理由	35	
2.2.1 核融合エネルギー	12	4.2.1 エネルギー資源	35	
2.2.2 磁場閉じ込め核融合(MCF)	13	4.2.2 エネルギー需要	36	
2.2.3 慣性閉じ込め核融合(ICF)	15	4.2.3 環境問題	36	
2.3 種々磁場閉じ込め方式の評価	17	4.3 基幹代替エネルギー源への要請条件	37	
第3章 トカマク核融合炉	20	4.3.1 エネルギー資源	38	
3.1 炉心プラズマ	20	4.3.2 エネルギー比	38	
3.1.1 トカマクの物理	20	4.3.3 経済性	40	
3.1.2 基本作動	20	4.3.4 環境安全性と安全性	43	
3.1.3 プラズマ内部の圧力平衡	21	4.4 技術的困難性	46	
3.1.4 外部磁場による平衡	22	4.5 おわりに	47	
3.1.5 磁気面	23	第5章 新しい核融合方式の可能性	49	
3.1.6 安全係数 $q$	23	5.1 アドバンス燃料核融合	49	
3.1.7 不純物による放射冷却	24	5.2 新着想核融合方式	52	
3.1.8 プラズマ加熱	25	5.2.1 トカマク方式ヘリウム3核融合	52	
3.1.9 プラズマ閉じ込め	26	5.2.2 磁場反転配位	53	
3.2 トカマク核融合炉工学	29	5.2.3 ヘリウム3核融合の魅力	55	
3.2.1 原理的構造	29			
3.2.2 磁場コイル	29			
3.2.3 DT核融合エネルギー	30			

## 第2編 慣性核融合

### 第1章 序論 .....59

- 1.1 慣性核融合研究の歴史 59
- 1.2 慣性核融合の原理 60
  - 1.2.1 慣性閉じ込め 60
  - 1.2.2 爆縮核融合 61
- 1.3 慣性核融合の特徴 62
- 1.4 慣性核融合の課題と現状 63
  - 1.4.1 炉心プラズマ研究の課題と現状 63
  - 1.4.2 炉工学課題と現状 64

### 第2章 レーザー爆縮の物理 .....67

- 2.1 レーザーとプラズマとの相互作用 67
  - 2.1.1 吸収機構 67
  - 2.1.2 プラズマ中での非線形現象 73
- 2.2 エネルギー輸送 81
  - 2.2.1 古典論 81
  - 2.2.2 熱流束制限係数 82
  - 2.2.3 新古典論 82
- 2.3 アブレーション爆縮 84
  - 2.3.1 燃焼波とアブレーション 85
  - 2.3.2 アブレーション圧力 87
  - 2.3.3 流体力学的効率 88
  - 2.3.4 等エントロピー圧縮とレーザー波形整形 91
  - 2.3.5 流体不安定性 94
  - 2.3.6 核融合点火と燃焼 99

### 第3章 エネルギードライバー .....105

- 3.1 はじめに 105
- 3.2 レーザー技術 105
  - 3.2.1 固体レーザー 105
  - 3.2.2 エキシマーレーザー 110
  - 3.2.3 一様照射技術 112
  - 3.2.4 波形整形技術 120
- 3.3 粒子ビーム技術 124
  - 3.3.1 軽イオンビーム 124
  - 3.3.2 重イオンビーム 130

### 第4章 燃料ペレット技術 .....134

- 4.1 はじめに 134
- 4.2 燃料容器技術 135
  - 4.2.1 ガラスシェル技術 135
  - 4.2.2 プラスチックシェル技術 137
  - 4.2.3 低密度プラスチックフォームシェル技術 139
- 4.3 燃料充填技術 143
  - 4.3.1 高圧トリチウム充填技術 143
  - 4.3.2 トリチウム置換技術 144
  - 4.3.3 高濃度トリチウム測定技術 146
- 4.4 燃料ペレット導入技術 147
  - 4.4.1 ストックによる導入技術 147
  - 4.4.2 レビテーション技術 148
- 4.5 クライオターゲット技術 149
  - 4.5.1 フォームクライオ技術 150
  - 4.5.2 ベータ線加熱法 151
  - 4.5.3 プラズマ加熱均一化法 152

### 第5章 爆縮核融合実験 .....154

- 5.1 はじめに 154
- 5.2 直接駆動爆縮実験 155
  - 5.2.1 スタグネーションフリー爆縮 155
  - 5.2.2 高密度爆縮 157
  - 5.2.3 流体不安定性の定量化 160
- 5.3 間接駆動爆縮実験 164
  - 5.3.1 X線駆動爆縮実験 164
  - 5.3.2 X線の閉じ込め 169

### 第6章 診断技術 .....171

- 6.1 診断技術の特徴 171
- 6.2 X線計測 172
  - 6.2.1 X線分光計測 172
  - 6.2.2 X線画像計測 174
- 6.3 核融合反応粒子計測技術 184
  - 6.3.1 中性子計測 184
  - 6.3.2 速中性子放射化法による絶対測定 185
  - 6.3.3 荷電粒子計測 188
  - 6.3.4 核融合反応時間計測 192
  - 6.3.5 核融合反応領域測定 196

- 6.4 イオン温度計測技術 201
  - 6.4.1 シングルディテクター中性子飛行時間法 202
  - 6.4.2 多チャンネル中性子スペクトルメーター法 202
- 6.5 密度半径積  $\rho R$  計測 204
  - 6.5.1 中性子反跳粒子計測 204
  - 6.5.2 2次核融合反応法 205
  - 6.5.3 中性子放射化法 207

### 第7章 慣性核融合炉概念設計 .....211

- 7.1 はじめに 211
- 7.2 慣性核融合炉設計の現状 211
- 7.3 レーザー核融合炉「光陽」の概念設計 213

- 7.3.1 エネルギーバランスとマスフロー 213
- 7.3.2 核融合炉の主要パラメーター 214
- 7.3.3 炉本体の構造と材料 215
- 7.3.4 三重水素増殖および炉の核熱解析 216
- 7.3.5 燃料系 217
- 7.3.6 レーザー系 218
- 7.3.7 経済性評価 219
- 7.4 慣性核融合炉の開発課題 221
  - 7.4.1 炉心プラズマの課題 221
  - 7.4.2 炉用ドライバーの課題 222
  - 7.4.3 炉工学の課題 222

## 第3編 磁場閉じ込め

### 第1章 プラズマ閉じ込めの一般論 ...227

- 1.1 粒子閉じ込め時間とエネルギー閉じ込め時間 227
- 1.2 新古典拡散損失 228
  - 1.2.1 トカマク 228
  - 1.2.2 ステラレーター 229
- 1.3 揺動損失 230
- 1.4 放射損失 230
- 1.5 トーラス閉じ込め比例則 231
- 1.6 タンデムミラーの端損失 232

### 2.4 閉じ込め特性の理解 264

- 2.4.1 理論的描像 264
- 2.4.2 SOL/ダイバータープラズマの閉じ込めと境界条件 270
- 2.4.3 実験結果との比較 272
- 2.5 おわりに 276
- 2.6 補足 276
  - 2.6.1 改善閉じ込め 276
  - 2.6.2 異常輸送の描像 278

### 第3章 外部導体系トーラスにおける閉じ込め .....280

### 第2章 トカマクにおける閉じ込め ...234

- 2.1 トカマクプラズマの特徴の概観 234
- 2.2 運転領域の限界——巨視的不安定性 235
  - 2.2.1  $q$  値の限界 236
  - 2.2.2 密度の限界 238
  - 2.2.3  $\beta$  値限界 241
- 2.3 閉じ込め特性 243
  - 2.3.1 エネルギー閉じ込め時間(OHプラズマとLモード) 244
  - 2.3.2 改善閉じ込めモード 248
  - 2.3.3 粒子閉じ込め時間 256
  - 2.3.4 不純物の閉じ込め 260

- 3.1 概論 280
- 3.2 理論的進展 282
  - 3.2.1 磁気座標と荷電粒子の閉じ込め 282
  - 3.2.2 磁気流体平衡・安定 286
  - 3.2.3 ダイバーター層の研究 294
  - 3.2.4 新古典輸送 296
  - 3.2.5 輸送コードによるプラズマ解析 300
  - 3.2.6 トロイダル電流とプラズマ回転 302
- 3.3 実験研究 306
  - 3.3.1 プラズマパラメーターの進展 306
  - 3.3.2 MHD平衡・安定性 308
  - 3.3.3 閉じ込め 312
  - 3.3.4 加熱 NBI/ECH/ICRF 315

3.3.5	ブートストラップ電流	316	4.4.6	電位形成と加熱に重要な真空/壁面制御	361
3.3.6	プラズマの回転	317	4.4.7	高周波タンデムミラー HIEI 装置	361
3.3.7	長時間保持	318	4.4.8	今後の研究課題と展望	363
3.4	大型ヘリカル装置計画(LHD)	320	第5章 高ベータ・トーラスにおける閉じ込め .....366		
3.4.1	計画の意義・目的	320	5.1	逆転磁場ピンチ(RFP), 超低 q(ULQ) プラズマ	366
3.4.2	研究の物理的検討	321	5.1.1	はじめに	366
3.4.3	装置設計	324	5.1.2	RFP の MHD 緩和	367
3.4.4	実験研究課題	327	5.1.3	RFP における MHD 緩和の動的過程	368
3.5	新しいアイデア HELIAS 計画	328	5.1.4	RFP におけるイオンの異常加熱	369
3.6	おわりに	332	5.1.5	RFP の閉じ込め	370
第4章 開放端系における閉じ込め ...334			5.1.6	運動論的ダイナモ理論	371
4.1	開放端系の特徴	334	5.1.7	RFP の研究課題と展望	372
4.2	開放端系閉じ込めの進展	335	5.1.8	超低 q(ULQ) プラズマ	373
4.2.1	ミラー磁場閉じ込めと両極性電位	335	5.2	スフェロマック	374
4.2.2	極小磁場による MHD 不安定性の抑制	336	5.2.1	スフェロマック研究の概要	374
4.2.3	ロスコーン不安定抑制と高ベータ値達成	337	5.2.2	スフェロマックの平衡と安定性および緩和現象	375
4.2.4	単一ミラーの限界と端損失抑制の必要性	337	5.2.3	スフェロマックの生成方法	377
4.3	タンデムミラー閉じ込めの基本原理	338	5.2.4	研究成果	379
4.3.1	電位による端損失の抑制とパスコフ則	338	5.2.5	おわりに	383
4.3.2	サーマルバリアーによる効率的電位形成	342	5.3	FRC	385
4.3.3	軸対称化による新古典的輸送の抑制	345	第6章 エッジ・プラズマ, 不純物制御 .....392		
4.3.4	MHD アンカー位置と捕捉粒子不安定性	348	6.1	周辺プラズマ	392
4.3.5	改良型アンカーによるタンデムの小型化	349	6.1.1	周辺プラズマとは	392
4.4	サーマルバリアー型タンデムミラー実験の現状	352	6.1.2	ランダムな磁場の役割	392
4.4.1	タンデムミラー装置の推移	352	6.1.3	ランダムな磁場中における粒子輸送過程	395
4.4.2	ガンマ 10 装置とサーマルバリアー電位形成	352	6.1.4	ランダムな磁場による周辺プラズマの制御	395
4.4.3	端損失抑制と電位閉じ込め比例則	357	6.1.5	ランダムな周辺磁場による不純物制御	397
4.4.4	非両極性および両極性径方向拡散	357	6.1.6	その他の制御手法	397
4.4.5	径方向電場制御と密度揺動	360	6.1.7	今後の展望	398
			6.2	端電極による電位制御	399
			6.2.1	プラズマ境界—シース形成	399
			6.2.2	電気二重層とサーマルバリア	401

6.2.3	端電極による径方向電位構造の制御	402
-------	------------------	-----

## 第4編 加熱と電流駆動

第1章 序論 .....409	2.7.3	種々の電流駆動法	432		
1.1	核融合プラズマの加熱	409	2.8	新古典論効果, 相対論的效果	433
1.1.1	核融合プラズマのパラメーター	409	2.8.1	アジョイント法	433
1.1.2	トカマク・プラズマの加熱	410	2.8.2	新古典論効果	434
1.1.3	プラズマ加熱研究の進展	411	2.8.3	相対論的效果	436
1.2	トカマク・プラズマの電流駆動	412	2.9	ブートストラップ電流	439
1.2.1	電流駆動の目的	412	2.10	今後の課題と展望	441
1.2.2	電流駆動の研究の進展	413	第3章 加熱・電流駆動プラズマの安定性と輸送 .....444		
1.2.3	電流駆動の課題	414	3.1	はじめに	444
第2章 加熱と電流駆動の一般論 .....416			3.2	加熱・電流駆動と安定性	445
2.1	高周波加熱と電流駆動の物理的過程	416	3.2.1	巨視的安定性	445
2.2	波動の伝播(冷たいプラズマ中の波動)	417	3.2.2	微視的不安定性	452
2.2.1	分散式	417	3.3	加熱・電流駆動プラズマの輸送	455
2.2.2	静磁場のない( $B_0=0$ )プラズマ中の波動	418	3.3.1	輸送が電流駆動に与える影響	455
2.2.3	静磁場中のプラズマ波動	418	3.3.2	加熱・電流駆動プラズマの輸送	457
2.2.4	CMA 線図	419	3.4	おわりに	459
2.3	波動の減衰と加熱(熱いプラズマ中の波動)	420	第4章 イオンサイクロトロン波加熱と電流駆動 .....461		
2.3.1	分散式	420	4.1	はじめに	461
2.3.2	平行伝播の波動	421	4.2	伝播特性	462
2.3.3	垂直伝播の波動	422	4.2.1	分散関係	462
2.3.4	磁場中プラズマ内の静電波	423	4.2.2	吸収機構	463
2.3.5	不均一プラズマ中の波の伝播と減衰	423	4.2.3	伝播解析	464
2.4	電流駆動の一般論	424	4.2.4	速度分布解析	465
2.5	電流駆動の準線形理論(1)ランダウ過程	426	4.3	速波加熱実験	466
2.6	電流駆動の準線形理論(2)サイクロトロン減衰過程	429	4.3.1	$^3\text{He}$ 少数イオン加熱	466
2.7	電流駆動の問題点	431	4.3.2	第2高調波加熱	466
2.7.1	高周波駆動電流に及ぼす捕捉電子の影響	431	4.3.3	強磁場側励起による加熱	467
2.7.2	ジュール加熱による電流駆動	431	4.3.4	不純物制御	467
			4.3.5	アンテナ位相制御	469
			4.3.6	NBI と ICRF の重畳	470
			4.3.7	ICRF 加熱時の H モード	470
			4.4	イオンバーンスタイン波加熱	472

4.5 トカマク以外の閉じ込め装置における ICRF 加熱 474

4.5.1 ステラレーター 474

4.5.2 開放端系 475

4.6 電流駆動 475

4.7 今後の課題と展望 477

第5章 低域混成波加熱と電流駆動 …478

5.1 はじめに 478

5.2 低域混成波の分散特性 478

5.3 プラズマ・スラブ内の LHW の伝播 480

5.4 トカマク・プラズマ中での LHW の伝播と吸収 481

5.5 低域混成波電流駆動(LHCD)実験 483

5.5.1 定常電流駆動実験 483

5.5.2 電流駆動性能係数 485

5.5.3 ランプアップ放電と OH トランス磁束の再充電 487

5.5.4 高周波トカマク(RF のみによる電流立ち上げと保持) 488

5.5.5 速波電流駆動実験 488

5.6 複合電流駆動実験 490

5.6.1 OH+LHCD 490

5.6.2 LHCD+ECH 491

5.6.3 LHCD+NBI 491

5.7 プラズマ制御 491

5.8 低域混成加熱 493

5.8.1 加熱, 電流駆動の領域 493

5.8.2 電子加熱 493

5.8.3 イオン加熱 494

5.9 今後の課題と展望 497

5.10 低域混成波結合系(ランチャー) 499

5.10.1 標準グリル結合理論 499

5.10.2 標準グリル結合実験 501

5.10.3 多分岐グリルアンテナ結合理論 501

5.10.4 多分岐グリル結合実験 502

5.10.5 新しい結合系 502

5.10.6 速波ランチャー結合 502

第6章 電子サイクロトロン波加熱と電流駆動 ……504

6.1 はじめに 504

6.2 電子サイクロトロン波の分散特性 504

6.3 トーラスプラズマ内での ECW の伝播と吸収 506

6.4 電子サイクロトロン電流駆動(ECCD) 508

6.5 電子サイクロトロン加熱(ECH)実験 508

6.6 電子サイクロトロン電流駆動(ECCD)実験 512

6.7 ECR によるプラズマ生成 514

6.8 高周波トカマク 516

6.9 プラズマ制御 518

6.10 今後の課題と展望 520

第7章 加熱と電流駆動の粒子シミュレーション ……522

7.1 本研究の目的 522

7.2 プラズマ, 波動励起用アンテナのモデル 525

7.3 ローウ・ハイブリッド波加熱と電流駆動 526

7.4 サイクロトロン・サブハーモニクス共鳴加熱の発見 527

7.5 電子サイクロトロン波加熱と電流駆動 529

7.6 フルートモード RF 安定化のシミュレーション 531

7.7 磁気音波, イオン・バーンシュタイン波によるイオン加熱 532

7.8 今後の課題と展望 535

第8章 高周波加熱システム ……538

8.1 総論 538

8.2 イオンサイクロトロン周波数帯アンテナ・給電系 538

8.2.1 給電・伝送系 539

8.2.2 加熱用アンテナ 540

8.2.3 アンテナのアレー化 542

8.2.4 おわりに 542

8.3 低域混成波帯, 速波電流駆動アンテナ伝送系 543

8.3.1 低域混成波帯アンテナ, 伝送系 543

8.3.2 速波電流駆動アンテナ, 伝送系 545

8.4 電子サイクロトロン波帯アンテナ・伝送系 545

8.4.1 ミリ波伝送系 546

8.4.2 モード変換 546

8.4.3 環状モード反射鏡アンテナ 547

8.4.4 幾何光学的回折理論 549

8.4.5 おわりに 550

8.5 電子サイクロトロン波帯ミリ波源 551

8.5.1 高出力ミリ波源—ジャイロトロン 551

8.5.2 ジャイロトロンの基本構造と動作原理 551

8.5.3 Whispering Gallery Mode の利用 553

8.5.4 ジャイロトロン開発の現状 554

第9章 中性粒子ビーム入射加熱 ……555

9.1 はじめに 555

9.2 ビーム粒子の捕捉 556

9.3 入射粒子の軌道 557

9.4 熱化 559

9.5 入射ビームがプラズマに及ぼす影響 562

9.6 ビームによる核反応 564

第10章 中性粒子入射による電流駆動 ……567

10.1 はじめに 567

10.2 中性粒子入射電流駆動の理論 568

10.2.1 ビームパワーの吸収と突き抜け 568

10.2.2 古典理論(大河電流) 568

10.2.3 新古典論によるイオン電流 569

10.2.4 逆流電子電流の修正 571

10.2.5 電流駆動効率 571

10.2.6 NBI 電流駆動による高ベータプラズマの維持 572

10.3 ビーム駆動電流の ICRF 加熱による増大効果 575

10.3.1 イオンサイクロトロン共鳴加熱による電流駆動 575

10.3.2 ICRF 増大効果の理論 575

10.3.3 ビームイオンの ICRF 選択加熱実験 577

第11章 中性粒子ビーム発生システム ……579

11.1 はじめに 579

11.2 装置システム概要 579

11.2.1 中性粒子発生原理と NBI 加熱装置 580

11.3 イオン源 582

11.3.1 ビーム引き出し 582

11.3.2 プラズマ源 584

11.4 ビーム加速とビーム光学 587

11.4.1 引き出しとビーム光学 587

11.4.2 加速系の設計 587

11.4.3 比例則 588

11.4.4 ビーム収束法 588

11.5 ビーム輸送系 590

11.5.1 中性化セル 590

11.5.2 偏向磁石 590

11.5.3 ビームダンプ 591

11.5.4 カロリメーター 592

11.5.5 真空排気システム 592

11.5.6 ビームエネルギー回収系 594

11.6 新しい方式と展望 595

11.6.1 水素負イオン源 595

11.6.2 負イオンシステムと展望 598

第5編 プラズマ診断

第1章 序論 ……603

1.1 磁場閉じ込め核融合プラズマの概要 603

1.1.1 核融合プラズマの主要パラメーター 603

1.1.2 磁場閉じ込め核融合装置の概要 604

1.2 核融合プラズマ診断の歴史と現状 606

1.2.1	プラズマ計測の揺らん時代	606
1.2.2	超高温プラズマ診断グループの誕生	607
1.2.3	わが国におけるプラズマ診断研究の推進	608
第2章 電磁波干渉法 .....609		
2.1	はじめに	609
2.2	プラズマ中の電磁波伝搬	609
2.3	透過干渉法	611
2.3.1	測定原理	611
2.3.2	位相差の検出方法	612
2.3.3	透過干渉計の実例	613
2.3.4	位相イメージ法	614
2.4	反射法	615
2.4.1	測定原理	615
2.4.2	反射法の適用	616
2.5	フラウンホーファー回折およびレーザーイメージング	617
2.5.1	フラウンホーファー回折法	617
2.5.2	レーザーイメージング法	619
2.5.3	高温プラズマへの適用例	620
2.6	ファラデー偏光計測	621
2.6.1	ファラデー回転	621
2.6.2	HCN レーザー偏光計	623
第3章 電磁波散乱測定 .....626		
3.1	はじめに	626
3.2	インコヒーレント・トムソン散乱	627
3.3	コレクティブ・トムソン散乱	630
3.3.1	熱的密度揺動からの散乱計測	631
3.3.2	非熱的電子密度揺動からの散乱計測	633
3.4	駆動散乱法	634
3.4.1	パワー変調電磁波ビームによる静電波動励起	635
3.4.2	パワー変調電磁波ビームの生成	636
第4章 電磁波放射のスペクトル分析 638		
4.1	X線領域の放射	638
4.1.1	結晶分光器とX線スペクトル	638
4.1.2	イオン温度計測	639
4.1.3	トロイダル回転速度計測	641
4.2	真空紫外域の放射	642
4.2.1	高電離多価イオンのエネルギー準位	642
4.2.2	高温プラズマにおける原子過程	643
4.2.3	プラズマ診断への適用	644
4.3	可視域の放射	645
4.3.1	スペクトル強度	646
4.3.2	ドップラー拡がりおよびシフト	647
4.3.3	ゼーマン効果	648
4.3.4	シュタルク拡がり	648
4.4	マイクロ波領域の放射	649
4.4.1	はじめに	649
4.4.2	計測原理	649
4.4.3	研究課題と研究状況	650
4.4.4	今後の展望	652
4.5	トモグラフィ計測	653
4.5.1	コンピュータトモグラフィ	653
4.5.2	再構成手法	654
4.5.3	トモグラフィ測定実験	655
4.5.4	まとめ	656
第5章 能動的分光法 .....658		
5.1	レーザー誘起蛍光法	658
5.1.1	不純物計測	658
5.1.2	プラズマ中の電場計測	660
5.2	ビームプローブ分光法	662
5.2.1	電子密度測定	662
5.2.2	荷電交換分光法	664
5.3	ビームプローブ・レーザー分光法	667
5.3.1	磁場測定	667
5.3.2	電場測定	669
5.4	プローブ用中性粒子ビーム源	669
5.4.1	熱速度ビーム	670
5.4.2	レーザープロオフビーム	670
5.4.3	Z-ピンチプラズマ銃法	670
5.4.4	荷電交換中性粒子ビーム	670
第6章 粒子計測 .....673		
6.1	受動的粒子計測	673
6.1.1	荷電交換中性粒子計測の原理	673
6.1.2	電磁場による分析	674
6.1.3	飛行時間分析法	675
6.1.4	おわりに	676
6.2	中性子計測	677
6.2.1	はじめに	677

6.2.2	中性子発生量計測	677
6.2.3	中性子発生プロファイル計測	679
6.2.4	中性子エネルギースペクトル計測	680
6.2.5	核融合 $\gamma$ 線計測	682
6.3	$\alpha$ 粒子計測	683
6.3.1	ビームプローブ荷電交換法	683
6.3.2	ペレット入射荷電交換法	684
6.3.3	協同トムソン散乱法	685
6.4	能動的粒子計測	686
6.4.1	減衰法	687
6.4.2	能動的荷電交換中性粒子計測	687
6.4.3	散乱法	689
6.5	重イオンビームプローブ法	690
6.5.1	測定原理	690
6.5.2	装置の構成	692
6.5.3	空間電位の測定	693
6.5.4	密度揺動, 電位揺動の測定	694
6.5.5	磁場の測定	695
6.5.6	装置規模の比例則	695
第7章 診断用レーザー .....697		
7.1	はじめに	697
7.2	ジャイロトロン	697
7.2.1	プラズマ計測用光源としてのジャイロトロン	697
7.2.2	ジャイロトロンの特長と開発の現状	698
7.2.3	ジャイロトロンをプラズマ計測用光源として用いる場合の検討	699
7.2.4	プラズマのミリ波散乱計測等への応用	700
7.2.5	おわりに—将来の展望	700
7.3	赤外・遠赤外CWレーザー	701
7.3.1	放電励起レーザー	702
7.3.2	CO <sub>2</sub> レーザー光励起遠赤外レーザー	704
7.4	赤外・遠赤外大出力パルスレーザー	706
7.4.1	はじめに	706
7.4.2	シングルモード大出力TEACO <sub>2</sub> レーザー	706
7.4.3	D <sub>2</sub> O レーザーシステム	708
7.4.4	おわりに	709

7.5	可変波長レーザー	710
7.5.1	可変波長レーザーの種類	710
7.5.2	色素レーザー	711
7.5.3	可変波長固体レーザー	712
7.5.4	非線形波長変換デバイス	713
第8章 遠赤外域検知器 .....716		
8.1	はじめに	716
8.2	ショットキー・バリアー・ダイオード検出器/ミクサー	716
8.2.1	電流伝導機構	717
8.2.2	ビデオ検出感度と遮断用波数	718
8.3	イメージング・アレイ	718
8.3.1	ミリ波イメージング・アレイの光学的な考察	719
8.3.2	光学系の設計	719
8.3.3	イメージング・アレイの応用例	720
8.4	検出器雑音	721
8.4.1	雑音	721
8.4.2	電磁波の検出と雑音	722
8.5	熱検出器	723
8.5.1	室温動作検出器	723
8.5.2	低温動作検出器	723
8.6	量子検出器	724
8.6.1	半導体光伝導検出器	724
8.6.2	超伝導検出器	724
第9章 周辺プラズマの診断 .....726		
9.1	静電プローブによるプラズマ周辺部の構造の計測	726
9.1.1	はじめに	726
9.1.2	核融合実験装置における静電プローブ計測	727
9.1.3	ヘリオトロンEのプラズマ周辺部の構造	728
9.1.4	おわりに	730
9.2	リチウムビームプローブによる密度揺動測定	730
9.3	分光測定を用いた周辺プラズマ中における不純物輸送の解明	734
9.4	周辺プラズマ中の水素分子と水素リサイクリング	737
9.4.1	励起原子ポピュレーション	737

- 9.4.2 衝突・輻射モデル 738
- 9.4.3 応用例—WT3 739
- 9.4.4 水素リサイクリング 739

第10章 雑音を含んだ信号の統計的性質  
と誤差の評価法 .....741

- 10.1 はじめに 741
- 10.2 各種統計分布 741
  - 10.2.1 ポアソン分布 741
  - 10.2.2 ガウス分布 742
  - 10.2.3  $\chi^2$ 分布 742
- 10.3 放射場のゆらぎ 743
  - 10.3.1 熱平衡にある放射場のゆらぎ 743
  - 10.3.2 複分布 743
- 10.4 集合平均と時間平均 744

第6編 コンピューターシミュレーション

第1章 シミュレーションとは—第三の研  
究法 .....753

- 1.1 シミュレーションの歴史 753
- 1.2 シミュレーションの使命 754
- 1.3 新しい科学の開拓—複雑性の科学 755

第2章 シミュレーション手法 .....756

- 2.1 粒子シミュレーション手法 756
  - 2.1.1 陽解法モデル 756
  - 2.1.2 半陰解法モデル 758
  - 2.1.3 その他の手法 759
- 2.2 磁気流体プラズマシミュレーション  
760
  - 2.2.1 2ステップLax-Wendroff法 760
  - 2.2.2 高精度アルゴリズム 761
  - 2.2.3 具体例にみる2つのアルゴリズムの比較  
762

第3章 新しいシミュレーション .....763

- 3.1 陰解法静電粒子シミュレーション 763
  - 3.1.1 1次元モデル 763
  - 3.1.2 2次元モデル 764
  - 3.1.3 ポアソン方程式の解法 765

- 10.4.1 定常不規則過程 744
- 10.4.2 エルゴード的不規則過程 744
- 10.4.3 定常標本過程 744
- 10.5 ガウス性不規則信号の線形および非線形  
変換 744
  - 10.5.1 確率密度関数 744
  - 10.5.2 ガウス性不規則信号 745
  - 10.5.3 ガウス性不規則信号の線形変換 745
  - 10.5.4 非線形変換 745
- 10.6 検知器雑音 746
  - 10.6.1 種々の検知器 746
  - 10.6.2 種々の雑音源 746
- 10.7 検波方式と信号対雑音比 747
  - 10.7.1 ビデオ検知におけるS/N 747
  - 10.7.2 ヘテロダイク検知におけるS/N 748

- 3.1.4 数値安定性解析 765
- 3.1.5 分散関係の検証 766
- 3.1.6 応用例 767
- 3.2 陰解法電磁粒子シミュレーション 768
  - 3.2.1 シミュレーション手法 768
  - 3.2.2 テスト結果 769
  - 3.2.3 実用化への課題 770
- 3.3 Vlasov-MHDシミュレーション 771
  - 3.3.1 方程式と初期条件 772
  - 3.3.2 結果—TAEモードの励起と飽和 772
  - 3.3.3 まとめと今後の課題 774
- 3.4 開放系粒子シミュレーション 775
  - 3.4.1 一般的考察 776
  - 3.4.2 定電流モデル 777
- 3.5 ヘリカル系プラズマのシミュレーション  
778
  - 3.5.1 ヘリカル系平衡コード(HINTコード)  
778
  - 3.5.2 ヘリカル系プラズマの非線形発展  
782

第4章 プラズマにおける複雑現象 ...785

- 4.1 エネルギー供給と構造形成 785
- 4.2 エントロピー排出と構造形成 789

- 4.3 自己組織化の統一シナリオ 792

- 4.4 おわりに 793

第7編 プラズマ理論

第1章 プラズマにおけるカオス .....797

- 1.1 カオス物理としての序論 797
- 1.2 異常輸送としての序論 799
- 1.3 標準写像 800
- 1.4 Radial Twist Mapping 803
- 1.5 磁力線とハミルトン力学 804
- 1.6 Two-Wave Hamiltonianと磁力線のカ  
オス 805
- 1.7 議論と展望 808

第2章 クーロン3体問題 .....809

- 2.1 プラズマ中のイオン—原子衝突 809
- 2.2 断熱基底による展開 810
  - 2.2.1 断熱近似と2原子分子 810
  - 2.2.2 イオン—原子衝突 811
- 2.3 束縛状態 813
  - 2.3.1 超楕円体座標による取扱い 813
  - 2.3.2 変分法 814
- 2.4 衝突過程 815

第3章 流体乱流と異常輸送 .....818

- 3.1 はじめに 818
- 3.2 モデル方程式系とInvariant Principle  
819
- 索引 855

- 3.3 gモード乱流に対するモデル方程式系  
821
- 3.4 Buckingham  $P_i$  Theorem 822
- 3.5 gモード乱流による輸送 823
- 3.6 Invariant Principleと混合距離理論の比  
較 825
- 3.7 Two-Point Renormalized Theory  
826
- 3.8 gモード乱流に対する径電場の影響  
828
- 3.9 おわりに 830

第4章 プラズマにおける数値解析法 831

- 4.1 はじめに 831
- 4.2 高温プラズマの分散関係式 831
- 4.3 プラズマ分散関数の数値計算法 833
- 4.4 プラズマ分散関数およびその導関数の数  
値計算用プログラム 836
- 4.5 変形ベッセル関数の数値計算法 841
- 4.6 N変数連立非線形方程式の数値計算法  
( $N=1, 2, 3, 4$ ) 843
- 4.7 非線形連立方程式の数値計算プログラ  
ムの使用例 851