目　　次

1. プラズマとは …… 1
1.1 プラズマの定義 …… 1
1.2 デバイ遮蔽 …… 3
1.3 核融合炉心プラズマ …… 4

2. プラズマの諸量 …… 9
2.1 速度分布関数，電子温度，イオン温度 …… 9
2.2 プラズマ振動数，デバイ長 …… 10
2.3 サイクロトロン周波数，ラーマー半径 …… 11
2.4 案内中心のドリフト速度 …… 12
2.5 磁気モーメント，ミラー磁場による閉じ込め，縦の断熱不変量 …… 14
2.5.1 ミラーの閉じ込め時間 …… 16
2.5.2 磁気モーメント …… 16
2.6 クーロン衝突時間，高速中性粒子入射加熱 …… 17
2.7 逃走電子，ドライサー電場，電気抵抗 …… 21
2.8 プラズマの時間および空間スケールの多様性 …… 22

3. 磁場配位と荷電粒子の軌道 …… 24
3.1 マックスウェルの電磁方程式 …… 24
3.2 磁　束　面 …… 26
3.3 荷電粒子の運動方程式 …… 27
3.4 回転対称系における軌道面 …… 30
3.5 トーラス磁場における案内中心のドリフト …… 32
3.5.1 トーラスを周回する非捕捉荷電粒子の案内中心 …… 33
3.5.2 トーラスの外側に捕捉されるバナナ粒子の案内中心 …… 34
3.6 案内中心のドリフト …… 35
3.7 捕捉粒子 (バナナ) の歳差運動 …… 37
3.8 バナナ粒子の軌道に対する縦電場の影響 …… 41

3.9 分極ドリフト ····· 42
3.10 電磁波の電子に働くポンデラモーティブ力 ····· 43

4. 分布関数とプラズマの基礎方程式 ····· 46
4.1 位相空間と分布関数 ····· 46
4.2 ボルツマン方程式，ブラゾフ方程式 ····· 47
4.3 フォッカー–プランクの衝突項 ····· 49

5. 電磁流体としてのプラズマ ····· 54
5.1 電磁 2 流体プラズマの運動方程式 ····· 54
5.2 電磁 1 流体運動方程式 ····· 56
5.3 簡単化された電磁流体運動方程式 ····· 58
5.4 磁 気 音 波 ····· 60

6. 平 衡 ····· 63
6.1 圧 力 平 衡 ····· 63
6.2 軸対称系および移動対称系における平衡の式 ····· 64
6.3 Grad–Shafranov 平衡方程式の厳密解 ····· 66
6.4 トカマクの平衡 ····· 68
6.5 ベータ比の上限 ····· 74
6.6 Pfirsch–Schlüter 電流 ····· 75

7. プラズマの閉じ込め (理想的な場合) ····· 79
7.1 衝突頻度が大きい場合の拡散 (古典拡散) ····· 80
7.1.1 電磁流体力学的取り扱い ····· 80
7.1.2 粒子的取り扱い ····· 82
7.2 トカマクにおける衝突頻度が小さい場合の電子の新古典拡散 ····· 83
7.3 ブートストラップ電流 ····· 85

8. 電磁流体力学的不安定性 ····· 88
8.1 交換不安定性およびソーセージ不安定性，キンク不安定性 ····· 89
8.1.1 交換不安定性 ····· 89
8.1.2 交換不安定性の安定条件，磁気井戸 ····· 92
8.2 電磁流体力学的不安定性の公式化 ····· 95
8.2.1 電磁流体力学方程式の線形化 ····· 95

8.2.2 エネルギー原理 ····· 98
8.3 円柱プラズマの不安定性 ····· 100
8.3.1 表面電流構成における不安定性 (Kruskal–Shafranov 条件) ····· 100
8.3.2 分布電流構成における不安定性 ····· 104
8.3.3 Suydam 条件 ····· 109
8.4 Hain–Lüst の電磁流体運動方程式 ····· 111
8.5 バルーニング不安定性 ····· 113
8.6 密度勾配と温度勾配がある場合の η_i モード ····· 117

9. 抵抗不安定性 ····· 121
9.1 ティアリング不安定性 ····· 121
9.2 抵抗性ドリフト不安定性 ····· 126

10. 電磁波伝播媒質としてのプラズマ ····· 131
10.1 冷たい無衝突プラズマの分散式 ····· 132
10.2 波の偏光性，カット・オフ，共鳴 ····· 135
10.2.1 波の偏光性と粒子の運動 ····· 135
10.2.2 カット・オフと共鳴 ····· 136
10.3 2 成分プラズマの波 ····· 137
10.4 いろいろな波 ····· 141
10.4.1 アルフベン波 ····· 141
10.4.2 イオン・サイクロトロン波 ····· 143
10.4.3 低域混成共鳴 ····· 144
10.4.4 高域混成共鳴 ····· 145
10.4.5 電子サイクロトロン波など ····· 145
10.5 静電波の条件 ····· 147

11. ランダウ減衰，サイクロトロン減衰 ····· 149
11.1 ランダウ減衰 (増幅) ····· 149
11.2 トランジット・タイム減衰 ····· 152
11.3 サイクロトロン減衰 ····· 153
11.4 準線形理論による分布関数の変化 ····· 155

12. 波の伝播，波動加熱 ····· 158
12.1 エネルギーの流れ ····· 159

12.2 光線追跡 162
12.3 熱いプラズマの分散式，波の吸収，プラズマ加熱 163
12.4 イオン・サイクロトロン周波数領域の波動加熱 (ICRF) 168
12.5 低域混成波加熱 (LHH) 172
12.6 電子サイクロトロン加熱 (ECH) 175
12.7 低域混成電流駆動 (LHCD) 178
12.8 電子サイクロトロン電流駆動 (ECCD) 181
12.9 中性粒子ビーム電流駆動 (NBCD) 184

13. 乱流によるプラズマ輸送 188
13.1 揺動損失，ボーム，ジャイロ・ボーム拡散，対流損失 188
13.2 磁気揺動による損失 194
13.3 閉じ込め時間の次元解析 194
13.3.1 Kadomtsev の無次元制約 194
13.3.2 エネルギー閉じ込め時間比例則についての制約 195
13.4 帯状流 196
13.4.1 ドリフト乱流の長谷川–三間方程式 196
13.4.2 帯状流の生成 204

14. 核融合研究の発展 211
14.1 極秘研究から国際的協力研究へ 212
14.2 Artsimovich の時代 214
14.3 大型トカマクへの道のり (石油ショックのころから) 216
14.4 代替方式 218

15. トカマク 221
15.1 トカマク装置 221
15.2 平衡プラズマ位置の安定性 225
15.2.1 縦長断面プラズマ・ベータ上限 226
15.2.2 垂直方向の移動に対する抵抗性シェルの効果 227
15.3 MHD 安定性および密度上限 229
15.4 縦長断面プラズマの MHD 安定なベータ上限 231
15.5 不純物制御，スクレイプ・オフ層，ダイバーター 234
15.6 L モードの閉じ込め比例則 235
15.7 H モードおよび閉じ込め改善モード 238

15.8 定常運転 245
15.8.1 非誘導電流駆動およびブートストラップ電流 245
15.8.2 新古典ティアリング・モード 247
15.8.3 抵抗性壁モード 247
15.8.4 ELM 247
15.8.5 ディスラプションの制御 249
15.8.6 高エネルギー粒子による不安定性 249
15.9 国際トカマク実験炉 (ITER) のパラメーター 249
15.10 先進的トカマクへの試み 259

16. 逆転磁場ピンチ (RFP) 264
16.1 RFP 配位 264
16.2 テイラーの緩和理論 265
16.3 MHD 緩和過程 268
16.4 RFP の閉じ込め 271
16.4.1 パルス的平行電流駆動 (PPCD) 273
16.4.2 振動場による電流駆動 274

17. 慣性閉じ込め 280
17.1 ペレット利得 281
17.2 爆縮 285
17.3 電磁流体力学的不安定性 288
17.4 高速点火 290

A. 熱いプラズマの誘電率の導入 295
A.1 熱いプラズマの分散式の公式化 295
A.2 線形化ブラゾフ方程式の解 297
A.3 熱いプラズマの誘電率テンサー 298
A.4 マックスウェル分布の場合の誘電率テンサー 301
A.5 プラズマ分散関数 302
A.6 静電波の分散式 305
A.7 不均一プラズマにおける静電波の分散関係 307
A.8 速度空間不安定性 310
A.8.1 ドリフト不安定性 (無衝突) 310
A.8.2 イオン温度勾配不安定性 (ITG) 311

A.8.3 種々の速度空間不安定性 …… 311

B. 物理定数，プラズマ・パラメーター，数学公式 …… 313

索 引 …… 317