

目录

中文版自序 —— 001

中文版序 —— 003

译者序 —— 005

前言 —— 007

第 1 章

核聚变堆特征 —— 001

1.1 作为能源的核聚变 —— 001

1.2 核聚变反应 —— 004

1.2.1 用于核聚变堆的核反应 —— 004

1.2.2 核聚变反应截面 —— 005

1.2.3 反应速率 —— 006

1.3 等离子体约束方式 —— 008

1.3.1 磁约束 —— 008

1.3.2 惯性约束 —— 015

第 2 章

核聚变堆基础 —— 019

2.1 能量平衡 —— 019

2.2 核聚变堆结构 —— 021

2.3 核聚变堆的发电条件 —— 023

2.4 堆芯等离子体条件 —— 025

2.5 核聚变堆对于等离子体的要求 —— 028

2.6 运行方案 —— 029

2.7 核聚变堆的开发研究阶段 —— 032

第 3 章

等离子体解析基础 —— 034

3.1 玻尔兹曼方程 —— 034

3.2 等离子体解析 —— 036

3.3 磁流体动力学方程 —— 038

3.4 动力学方程 —— 044

3.5 线性近似后的动力学求解(一维) —— 045

3.6 线性近似后的动力学求解(三维) —— 048

3.7 准线性理论 —— 052

3.8 湍流理论 —— 056

3.9 中子输运理论 —— 060

第 4 章

等离子体平衡与稳定性 —— 064

4.1 等离子体平衡 —— 064

4.1.1 等离子体压力 —— 064

4.1.2 平衡方程 —— 067

4.1.3 托卡马克平衡 —— 069

4.1.4 等离子体截面形状 —— 072

4.2 MHD 稳定性 —— 073

4.2.1 能量原理 —— 073

4.2.2 能量积分 —— 078

4.2.3 MHD 不稳定性 —— 078

4.2.4 MHD 模与共振面 —— 079

4.3 等离子体位移不稳定性 —— 081

4.4 扭曲不稳定性 —— 084

4.5 交换不稳定性 —— 087

4.6 气球不稳定性 —— 088

4.7 电阻不稳定性 —— 093

4.7.1 撕裂模 —— 094

4.7.2 新经典撕裂模 —— 100

4.8 漂移不稳定性 —— 101

4.8.1 存在密度梯度的情况 —— 101

4.8.2 离子中存在密度梯度、温度梯度的情况 —— 102

4.8.3 电阻漂移模 —— 105

4.8.4 漂移波对等离子体运输的影响 —— 108

4.9 电阻壁不稳定性 —— 109

4.10 高能粒子导致的不稳定性 —— 111

4.10.1 阿尔芬本征模 —— 111

4.10.2 鱼骨震荡 —— 115

4.11 锯齿震荡 —— 116

4.12 边缘局域模 —— 116

4.13 锁模 —— 116

4.14 今后的研究课题 —— 117

附录 4.2A —— 117

附录 4.2B —— 121

第 5 章

等离子体输运与约束 —— 129

5.1 约束时间 —— 129

5.2 等离子体输运	131
5.2.1 碰撞引起的扩散	131
5.2.2 湍流引起的扩散	132
5.3 约束定律	137
5.4 边缘局域模	142
5.5 比压极限	146
5.6 密度极限	147
5.7 高能粒子的约束	148
5.8 破裂	149
5.8.1 破裂发生时等离子体的行为以及破裂发生的原因	150
5.8.2 对反应堆部件的影响	153
5.8.3 应对破裂的措施	155
5.9 今后的课题	156

第6章

芯部等离子体设计

6.1 等离子体中粒子与能量的平衡(一维)	160
6.2 等离子体中粒子与能量的平衡(0维)	165
6.3 燃烧率	168
6.4 等离子体回路	170
6.5 堆结构	173
6.6 今后的课题	177

第7章

包层

7.1 包层应具备的功能	178
7.2 氦生产	179
7.2.1 氦生产的必要性	179
7.2.2 氦增殖比	180
7.2.3 氦倍增时间	181
7.2.4 提高氦增殖比的方法	182

7.2.5 氦的回收	186
7.3 热量的取出	187
7.3.1 能量倍增率	187
7.3.2 发电效率与冷却剂温度	188
7.3.3 温度分布	190
7.3.4 发电方式	192
7.4 屏蔽功能	197
7.5 维护	198
7.5.1 长寿命化	198
7.5.2 维护方式	201
7.6 包层设计	202
7.6.1 包层分类	202
7.6.2 设计条件	202
7.6.3 包层概念	203
7.6.4 设计示例	206
7.7 今后的课题	210

第8章

面向等离子体壁

8.1 面向等离子体壁应具备的功能	213
8.1.1 应具备的功能	213
8.1.2 限制器与偏滤器	214
8.2 偏滤器特性(稳态时)	215
8.2.1 偏滤器等离子体的基本特性	215
8.2.2 2点近似模型	217
8.2.3 接触、非接触状态	218
8.2.4 2维偏滤器分析模型	219
8.2.5 降低粒子、热负荷的方法	222
8.3 偏滤器特性(非稳态时)	224
8.3.1 ELM	224
8.3.2 等离子体破裂	225

8.4	限制器、偏滤器的结构	227
8.4.1	限制器、偏滤器的形状与种类	227
8.4.2	单零与双零的比较	229
8.4.3	偏滤器的形状	230
8.5	偏滤器设计	233
8.5.1	设计条件与设计项目	233
8.5.2	材料选择	234
8.5.3	结构概念	236
8.5.4	设计示例	237
8.6	第一壁	240
8.6.1	热负荷、粒子负荷	240
8.6.2	第一壁结构	241
8.6.3	设计示例	243
8.7	今后的课题	244

第9章

线圈系统 248

9.1	核聚变堆的线圈	248
9.2	超导线圈基础	249
9.2.1	超导特性	249
9.2.2	超导材料	250
9.2.3	超导线材的制造方法	251
9.2.4	超导导线	253
9.2.5	冷却方式	254
9.2.6	导体结构	256
9.2.7	线圈结构	259
9.3	环向磁场线圈基础	260
9.3.1	环向磁场线圈应具备的功能	260
9.3.2	线圈电流和线圈数量	261
9.3.3	线圈产生的电磁力	263
9.3.4	线圈形状	265

9.3.5	最大经验磁场	267
9.4	环向磁场线圈的设计	268
9.4.1	导体设计	269
9.4.2	线圈构造设计	269
9.4.3	支撑方式	270
9.4.4	设计示例	274
9.5	极向磁场线圈基础	278
9.5.1	极向磁场线圈应具备的功能	278
9.5.2	与控制等离子体位置和形状关联的线圈通电模式	279
9.5.3	极向磁场线圈的设置位置	279
9.6	极向磁场线圈的电流控制	280
9.6.1	确定等离子体形状的磁场位形	280
9.6.2	等离子体位置形状控制	282
9.6.3	控制方式	282
9.6.4	不同功能的线圈方式	284
9.6.5	混合线圈方式	284
9.7	极向磁场线圈设计	287
9.7.1	导体设计	287
9.7.2	线圈结构设计	288
9.7.3	设计示例	288
9.8	中心螺管线圈基础	290
9.8.1	中心螺管线圈应具备的功能	290
9.8.2	中心螺管线圈的磁场	291
9.8.3	磁通量的供给	292
9.9	中心螺管线圈的设计	292
9.9.1	导体设计	293
9.9.2	线圈结构设计	293
9.9.3	设计示例	294
9.10	今后的课题	296

第 10 章

等离子体加热 电流驱动—— 298

10.1 等离子体加热及电流驱动的必要性 —— 298

10.2 NBI 加热基础 —— 300

10.2.1 中性粒子束的离子化 —— 300

10.2.2 离子束流的轨迹 —— 302

10.2.3 能量交换引起的等离子体加热 —— 304

10.3 NBI 电流驱动基础 —— 307

10.3.1 驱动电流 —— 307

10.3.2 电流驱动效率 —— 308

10.3.3 穿透率 —— 310

10.3.4 实验求得的电流驱动效率 —— 311

10.4 自举电流 —— 311

10.5 射频波加热基础 —— 313

10.5.1 色散关系 —— 313

10.5.2 冷等离子体的色散关系 —— 315

10.5.3 热等离子体的色散关系 —— 316

10.5.4 麦克斯韦分布等离子体的色散关系 —— 317

10.5.5 射频波的性质 —— 318

10.5.6 射频波的传播特性 —— 321

10.5.7 加热原理 —— 325

10.5.8 波在非均匀等离子体中的传播 —— 327

10.6 各种射频波的传播特性 —— 329

10.6.1 阿尔芬波 —— 330

10.6.2 离子回旋波 —— 331

10.6.3 低混杂波 —— 335

10.6.4 电子回旋波 —— 338

10.7 射频波电流驱动基础 —— 340

10.7.1 电流驱动的一般理论 —— 340

10.7.2 利用波的动量实现电流驱动 —— 344

10.7.3 利用速度空间各向异性实现电流驱动 —— 348

10.7.4 实验获得的电流驱动效率 —— 356

10.8 NBI 系统设计 —— 359

10.8.1 设计要点 —— 359

10.8.2 系统概要 —— 360

10.8.3 负离子源 —— 362

10.8.4 束流输送系统 —— 364

10.8.5 设计示例 —— 365

10.8.6 今后的课题 —— 367

10.9 离子回旋波系统设计 —— 367

10.9.1 设计要点 —— 367

10.9.2 系统概要 —— 369

10.9.3 设计示例 —— 370

10.9.4 今后的课题 —— 372

10.10 低混杂波系统设计 —— 372

10.10.1 设计要点 —— 372

10.10.2 系统概要 —— 374

10.10.3 设计示例 —— 378

10.10.4 今后的课题 —— 380

10.11 电子回旋波系统设计 —— 380

10.11.1 设计要点 —— 380

10.11.2 系统概要 —— 382

10.11.3 设计示例 —— 385

10.11.4 今后的课题 —— 387

附录 10.5A —— 388

附录 10.5B —— 393

附录 10.7A —— 399

附录 10.7B —— 403

附录 10.7C —— 408

第 11 章

真空容器—— 417

- 11.1 真空容器应具备的功能 —— 417
- 11.2 超高真空维持与高温烘烤 —— 418
- 11.3 电阻的确保、等离子体位置控制、环向磁场纹波度 —— 420
- 11.4 堆内结构件的支撑、电磁力的支撑 —— 423
- 11.5 真空容器的冷却、辐射屏蔽、封闭、组装和维护 —— 425
- 11.6 真空容器设计 —— 427
 - 11.6.1 构造规格 —— 427
 - 11.6.2 设计项目 —— 428
 - 11.6.3 设计示例 —— 429
- 11.7 今后的课题 —— 433

第 12 章

燃料循环系统—— 435

- 12.1 燃料循环系统应具备的功能 —— 435
- 12.2 燃料循环系统的结构 —— 436
- 12.3 燃料注入系统 —— 437
- 12.4 排气系统 —— 438
 - 12.4.1 不同产生源的排放气体 —— 438
 - 12.4.2 真空排气系统 —— 439
- 12.5 燃料精炼系统 —— 444
- 12.6 氢同位素分离系统 —— 446
- 12.7 空气中氚处理系统 —— 448
- 12.8 氚水处理系统 —— 449
- 12.9 燃料储存系统 —— 449
- 12.10 氚的计量管理 —— 450
- 12.11 设计示例 —— 451
- 12.12 今后的课题 —— 454

第 13 章

低温恒温器—— 456

- 13.1 低温恒温器应具备的功能 —— 456
- 13.2 低温恒温器的结构 —— 457
- 13.3 热屏 —— 458
- 13.4 设计示例 —— 460
- 13.5 今后的课题 —— 462

第 14 章

核设计—— 465

- 14.1 核设计中应具备的项目 —— 465
- 14.2 射线屏蔽 —— 467
 - 14.2.1 主要屏蔽体 —— 467
 - 14.2.2 射线屏蔽的评估法 —— 469
- 14.3 剂量率 —— 471
- 14.4 核发热量 —— 471
- 14.5 射线辐照损伤 —— 472
 - 14.5.1 表面损伤 —— 472
 - 14.5.2 体积损伤 —— 474
- 14.6 放射性废弃物 —— 477
- 14.7 设计示例 —— 479
- 14.8 今后的课题 —— 484

第 15 章

运行维护—— 487

- 15.1 运行维护应具备的功能 —— 487
- 15.2 运行时间 —— 488
- 15.3 检查、维护对象设备 —— 490
- 15.4 维护频度 —— 491
- 15.5 远程维护方式 —— 491

- 15.6 远程维护过程 —— 493
- 15.7 堆内搬运设备 —— 494
- 15.8 设计示例 —— 495
- 15.9 今后的课题 —— 499

第 16 章

冷却系统 —— 501

- 16.1 冷却系统应具备的功能 —— 501
- 16.2 冷却系统的构成 —— 502
- 16.3 冷却性能 —— 504
- 16.4 设计示例 —— 505
 - 16.4.1 冷却系统构成 —— 505
 - 16.4.2 紧急状况时除去衰变热 —— 508
- 16.5 今后的课题 —— 508

第 17 章

电源系统 —— 510

- 17.1 电源系统应具备的功能 —— 510
- 17.2 电源系统的特性 —— 511
 - 17.2.1 电源设备容量 —— 511
 - 17.2.2 电力供应的装置和设备 —— 512
 - 17.2.3 降低线圈电源设备容量的技术 —— 512
 - 17.2.4 电源结构 —— 515
- 17.3 环向磁场线圈电源 —— 516
- 17.4 极向磁场线圈电源 —— 519
- 17.5 设计示例 —— 522
- 17.6 今后的课题 —— 525

第 18 章

运行控制系统和测量系统 —— 527

- 18.1 运行控制系统和测量系统应具备的功能 —— 527

- 18.2 控制基础 —— 528
- 18.3 运行控制系统 —— 533
 - 18.3.1 全系统控制 —— 533
 - 18.3.2 等离子体控制 —— 533
- 18.4 测量系统 —— 537
 - 18.4.1 被动性测量和主动性测量 —— 537
 - 18.4.2 探针测量 —— 538
 - 18.4.3 电磁波测量 —— 540
 - 18.4.4 粒子测量 —— 547
- 18.5 设计示例 —— 554
 - 18.5.1 运行控制系统 —— 554
 - 18.5.2 测量系统 —— 558
- 18.6 今后的课题 —— 559

第 19 章

安全性 —— 562

- 19.1 安全性应具备的事项 —— 562
- 19.2 放射性物质 —— 563
- 19.3 确保安全的方法 —— 568
 - 19.3.1 安全上的特点 —— 568
 - 19.3.2 安全性目标 —— 569
 - 19.3.3 确保安全的基本想法 —— 570
 - 19.3.4 安全设计的基本想法 —— 571
 - 19.3.5 安全设计的评估 —— 573
 - 19.3.6 废弃物处理 —— 574
- 19.4 设计示例 —— 575
- 19.5 今后的课题 —— 581

第 20 章

分析程序 —— 584

- 20.1 堆设计流程 —— 584

20.1.1	设计流程	——	584
20.1.2	堆设计流程	——	585
20.2	各种分析程序	——	588
20.3	堆设计系统程序	——	589
20.4	堆概念设计程序	——	591
20.5	经济性评估程序	——	600
20.6	等离子体动态特性评估程序	——	603
20.7	今后的课题	——	612