



# 目 次

巻頭言 .....	i
はじめに .....	iii

## 第 I 部 核融合炉の誕生

第 1 章 人類の進歩とエネルギー —エネルギーは人類の生存と繁栄にとって必須要素— .....	1
第 2 章 太陽で起きている核融合と地球で目指す核融合 —太陽の核融合反応は地上で実現できるか?— .....	7
第 3 章 核融合炉が成立する条件 —トカマクの発明とエネルギー増倍率向上の鍵を求めて—	
3.1 トカマクという大発明 .....	18
3.2 エネルギー増倍率と核融合炉成立条件 —プラズマの状態とエネルギー発生との関係— .....	20
3.3 プラズマ性能の予想方法 —これまでの実験でわかった性能と操作量との関係— .....	26
3.4 加熱パワーの必要最低値 (閾値) .....	32
3.5 核融合炉の性能に影響を与える他の要素 —プラズマがその複雑さをかいま見せるとき— .....	34
3.5.1 プラズマ中での分布の影響と過渡現象の利用 .....	35
3.5.2 装置状態の変化によるプラズマへの影響 .....	36
3.5.3 プラズマ中の不安定性の発生有無 .....	36

## 第4章 実現に最も近いトカマク型核融合炉

## —核融合炉工学に対する要求—

- 4.1 トカマク型核融合炉の機器構成…………… 40
- 4.2 運転シナリオ…………… 43
- 4.3 核融合炉のサイズと設計シナリオ概要…………… 46
- 4.4 炉工学機器開発への要求事項，達成度，課題…………… 59

## 第5章 核融合炉実用化への展望

## —地上の太陽を実現するシナリオ—

- 5.1 開発戦略—段階的研究開発—…………… 62
  - 5.1.1 実験炉段階…………… 64
  - 5.1.2 原型炉段階…………… 66
- 5.2 実験炉 ITER の概要…………… 66
- 5.3 原型炉概念の概要…………… 71

**第Ⅱ部 核融合炉を支える技術**

## 第6章 プラズマを閉じ込め磁場を作る超伝導コイル

- 6.1 核融合と超伝導の結びつき…………… 73
- 6.2 トカマク装置を構成する3種類のコイル…………… 75
  - 6.2.1 トロイダル磁場コイル…………… 75
  - 6.2.2 中心ソレノイド・コイル…………… 76
  - 6.2.3 ポロイダル磁場コイル…………… 78
  - 6.2.4 核融合実験炉 (ITER) 級の装置での各コイルへの要求性能…………… 78
- 6.3 超伝導コイル開発の技術課題…………… 79
  - 6.3.1 超伝導材料と臨界電流値性能…………… 79
  - 6.3.2 導体構造とパルス動作損失の低減…………… 79
  - 6.3.3 電磁力の支持…………… 84
  - 6.3.4 コイルの冷凍方式と電気絶縁性能…………… 86
- 6.4 核融合超伝導コイル用ヘリウム冷凍機…………… 88

## 目 次

6.4.1	冷凍機とは：ヘリウム冷凍機の熱力学的特徴	88
6.4.2	ヘリウム冷凍機の構成と開発成果	90
6.5	現時点での技術的総括	94
6.5.1	核融合実験炉 (ITER) に向けた技術	94
6.5.2	今後の展望 (将来に向けた技術)	94

## 第7章 高純度プラズマを保持する真空容器

7.1	真空容器の役割	97
7.1.1	超高真空	98
7.1.2	一周電気抵抗	98
7.1.3	強度と精度	99
7.1.4	遮蔽能力	100
7.1.5	真空シール性能	100
7.2	真空容器の基本構造	100
7.3	ITER の真空容器構造	103
7.4	現時点の技術的総括	104

## 第8章 プラズマを超高温にする加熱・電流駆動装置

8.1	ビーム加熱・電流駆動装置	107
8.1.1	原理	107
8.1.2	大出力イオン源の開発	109
8.1.3	負イオン源の開発	112
8.1.4	負イオンの加速	115
8.1.5	現時点での技術的総括	115
8.2	高周波加熱・電流駆動装置	117
8.2.1	電子サイクロトロン波帯の技術	118
8.2.2	イオンサイクロトロン波帯および低域混成波帯の技術	124
8.2.3	現時点での技術的総括	126

## 第9章 超高温プラズマ状態を見て操る計測・制御システム

9.1 計測・制御システムへの要求	129
9.2 制御技術の現状	133
9.2.1 平衡制御	133
9.2.2 プラズマ断面形状の実時間同定と凹状電流分布放電	137
9.2.3 密度制御，核融合反応率（中性子発生率）制御，ダイバータ部放射損失量制御	138
9.2.4 その他の制御	139
9.2.5 異常時のプラズマ停止方法	142
9.3 計測・制御技術の技術的総括—目標の達成度と今後の展望—	142

## 第10章 エネルギーを取り出し燃料を作るブランケット

10.1 ブランケットの役割	145
10.2 トリチウムの増殖生産	146
10.3 ブランケットの方式	147
10.4 ブランケットの構造	149
10.5 トリチウム増殖技術	151
10.6 熱を取り出す技術	153
10.7 放射線を遮蔽する技術	156
10.8 ブランケット製作技術	157
10.9 現時点での技術的総括	161

## 第11章 ブランケットを支える構造材料と燃料増殖材料

11.1 ブランケット構造材料	163
11.1.1 損傷の素過程	163
11.1.2 材料の損傷機構	165
11.1.3 材料の照射特性	167
11.1.4 候補材料	169
11.1.5 現時点での技術的総括	170

11.2	燃料増殖材料	172
11.2.1	固体増殖関連材料	173
11.2.2	液体トリチウム増殖材料	180
11.2.3	現時点での技術的総括	181
第 12 章	高熱に耐え真空容器などを守るプラズマ対向機器	
12.1	役 割	183
12.2	基本構成	184
12.3	ダイバータの機能	184
12.4	アーマ材料と損耗過程	186
12.5	プラズマからの熱	187
12.6	冷却構造材料	188
12.7	アーマ材料と冷却構造の接合	189
12.8	ダイバータ冷却構造の伝熱流動	191
12.9	ダイバータ冷却管の熱疲労	193
12.10	現時点での技術的総括	194
第 13 章	重水素やトリチウムを効率よく利用する燃料循環システム	
13.1	燃料循環システムの役割	197
13.2	燃料循環システムの構成	198
13.3	燃料循環システムに必要な技術	200
13.3.1	炉心からプラズマ排ガスを排気する真空ポンプ	200
13.3.2	プラズマ排ガスから水素同位体を回収する燃料精製技術	202
13.3.3	水素同位体を分離する深冷蒸留技術	205
13.3.4	燃料を貯蔵し管理する技術	206
13.3.5	燃料を安定に供給する技術	206
13.4	現時点での技術的総括	209

第 14 章 核融合炉を安全に保守する遠隔保守ロボット	
14.1 ロボットの必要性	211
14.2 ロボット技術	211
14.2.1 ブランケット保守用ロボット	211
14.2.2 ダイバータ保守用ロボット	215
14.2.3 配管の溶接・切断・検査用ロボット	218
14.3 現時点での技術的総括	219
第 15 章 核融合炉の安全性を確保する放射線防護システム	
15.1 安全確保の考え方	221
15.1.1 放射線防護のための基準など	221
15.1.2 核融合炉の特徴	222
15.1.3 核融合炉における安全確保の基本的な考え方	223
15.2 放射性物質閉じ込め（健全性維持）技術	223
15.2.1 閉じ込めの安全確保	223
15.2.2 閉じ込め障壁（真空容器）の構造健全性の維持	224
15.3 トリチウム安全取扱い技術	225
15.3.1 核融合炉におけるトリチウム安全閉じ込めの考え方	225
15.3.2 トリチウム閉じ込めにかかわる設備機器	227
15.4 放射性廃棄物処理	231
15.5 現時点での技術的総括	232
練習問題	235
参考図書	241
あとがき	245
索引	巻末

