

# 目 次

|                      |           |
|----------------------|-----------|
| まえがき                 | iii       |
| <b>1章 核融合炉の特徴</b>    | <b>1</b>  |
| 1.1 エネルギー源としての核融合    | 1         |
| 1.2 核融合反応            | 3         |
| 1.2.1 核融合炉に用いる核反応    | 3         |
| 1.2.2 核融合反応断面積       | 4         |
| 1.2.3 反応率            | 5         |
| 1.3 プラズマ閉じ込め方式       | 6         |
| 1.3.1 磁場閉じ込め         | 6         |
| 1.3.2 慣性閉じ込め         | 12        |
| <b>2章 核融合炉の基礎</b>    | <b>15</b> |
| 2.1 パワーフロー           | 15        |
| 2.2 核融合炉構成           | 16        |
| 2.3 核融合炉の発電条件        | 17        |
| 2.4 炉心プラズマ条件         | 19        |
| 2.5 核融合炉におけるプラズマ要求   | 22        |
| 2.6 運転シナリオ           | 23        |
| 2.7 核融合炉の段階的開発研究     | 26        |
| <b>3章 プラズマ解析の基礎</b>  | <b>28</b> |
| 3.1 ボルツマン方程式         | 28        |
| 3.2 プラズマ解析           | 29        |
| 3.3 電磁流体力学方程式        | 32        |
| 3.4 運動論的方程式          | 36        |
| 3.5 線形化した運動論的解析(1次元) | 38        |
| 3.6 線形化した運動論的解析(3次元) | 40        |
| 3.7 準線形理論            | 44        |
| 3.8 乱流理論             | 47        |
| 3.9 中性子輸送解析          | 51        |
| <b>4章 プラズマ平衡と安定性</b> | <b>55</b> |
| 4.1 プラズマの平衡          | 55        |
| 4.1.1 プラズマ圧力         | 55        |
| 4.1.2 平衡の式           | 57        |
| 4.1.3 トカマク平衡         | 59        |
| 4.1.4 プラズマ断面形状       | 61        |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 4.2 MHD安定性                  | 62         |
| 4.2.1 エネルギー原理               | 62         |
| 4.2.2 エネルギー積分               | 66         |
| 4.2.3 MHD不安定性               | 67         |
| 4.2.4 MHDモードと共鳴面            | 67         |
| 4.3 プラズマ位置不安定性              | 69         |
| 4.4 キンク不安定性                 | 71         |
| 4.5 交換型不安定性                 | 74         |
| 4.6 パルセーション不安定性             | 75         |
| 4.7 抵抗性不安定性                 | 79         |
| 4.7.1 テアリングモード              | 80         |
| 4.7.2 新古典テアリングモード           | 86         |
| 4.8 ドリフト不安定性                | 87         |
| 4.8.1 密度勾配がある場合             | 87         |
| 4.8.2 イオンに密度勾配、温度勾配がある場合    | 88         |
| 4.8.3 抵抗性ドリフトモード            | 90         |
| 4.8.4 ドリフト波のプラズマ輸送への影響      | 93         |
| 4.9 抵抗性壁不安定性                | 94         |
| 4.10 高エネルギー粒子による不安定性        | 96         |
| 4.10.1 アルヴェン固有モード           | 96         |
| 4.10.2 フィッシュボーン振動           | 99         |
| 4.11 鋸歯状振動                  | 100        |
| 4.12 周辺局所化モード               | 100        |
| 4.13 ロックトモード                | 100        |
| 4.14 今後の課題                  | 101        |
| 付録 4A                       | 101        |
| 付録 4B                       | 104        |
| <b>5章 プラズマ輸送と閉じ込め</b>       | <b>111</b> |
| 5.1 閉じ込め時間                  | 111        |
| 5.2 プラズマ輸送                  | 112        |
| 5.2.1 衝突による拡散               | 112        |
| 5.2.2 乱流による拡散               | 114        |
| 5.3 閉じ込め比例則                 | 117        |
| 5.4 周辺局所化モード                | 122        |
| 5.5 ベータ限界                   | 125        |
| 5.6 密度限界                    | 126        |
| 5.7 高エネルギー粒子の閉じ込め           | 127        |
| 5.8 ディスラプション                | 128        |
| 5.8.1 ディスラプション時のプラズマ挙動と発生原因 | 128        |
| 5.8.2 機器への影響                | 131        |
| 5.8.3 ディスラプション対策            | 133        |
| 5.9 今後の課題                   | 134        |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| <b>6章 炉心プラズマ設計</b>          | <b>137</b> |
| 6.1 プラズマの粒子及びエネルギーバランス(1次元) | 137        |
| 6.2 プラズマの粒子及びエネルギーバランス(0次元) | 141        |
| 6.3 燃焼率                     | 143        |
| 6.4 プラズマ回路                  | 145        |
| 6.5 炉構造                     | 147        |
| 6.6 今後の課題                   | 150        |
| <b>7章 ブランケット</b>            | <b>152</b> |
| 7.1 ブランケットに求められる機能          | 152        |
| 7.2 トリチウム生産                 | 152        |
| 7.2.1 トリチウム生産の必要性           | 152        |
| 7.2.2 トリチウム増殖比              | 153        |
| 7.2.3 トリチウム増倍時間             | 154        |
| 7.2.4 トリチウム増殖比の向上法          | 155        |
| 7.2.5 トリチウムの回収              | 159        |
| 7.3 熱の取り出し                  | 159        |
| 7.3.1 エネルギー増倍率              | 159        |
| 7.3.2 発電効率と冷却材温度            | 160        |
| 7.3.3 温度分布                  | 161        |
| 7.3.4 発電方式                  | 164        |
| 7.4 遮蔽機能                    | 167        |
| 7.5 保守                      | 168        |
| 7.5.1 長寿命化                  | 168        |
| 7.5.2 保守方式                  | 171        |
| 7.6 ブランケット設計                | 172        |
| 7.6.1 ブランケット分類              | 172        |
| 7.6.2 設計条件                  | 172        |
| 7.6.3 ブランケット概念              | 172        |
| 7.6.4 設計例                   | 175        |
| 7.7 今後の課題                   | 179        |
| <b>8章 プラズマ対向壁</b>           | <b>182</b> |
| 8.1 プラズマ対向壁に求められる機能         | 182        |
| 8.1.1 求められる機能               | 182        |
| 8.1.2 リミッタとダイバータ            | 183        |
| 8.2 ダイバータ特性(定常時)            | 183        |
| 8.2.1 ダイバータプラズマの基本特性        | 183        |
| 8.2.2 2点近似モデル               | 185        |
| 8.2.3 接触、非接触状態              | 186        |
| 8.2.4 2次元ダイバータ解析モデル         | 187        |
| 8.2.5 粒子・熱負荷低減策             | 189        |
| 8.3 ダイバータ特性(非定常時)           | 191        |
| 8.3.1 ELM                   | 191        |

|           |                         |            |
|-----------|-------------------------|------------|
| 8.3.2     | ディスラプション                | 192        |
| 8.4       | リミッタ、ダイバータの構造           | 193        |
| 8.4.1     | リミッタ、ダイバータの形状・種類        | 193        |
| 8.4.2     | シングルヌルとダブルヌルの比較         | 196        |
| 8.4.3     | ダイバータの形状                | 197        |
| 8.5       | ダイバータ設計                 | 200        |
| 8.5.1     | 設計条件と設計項目               | 200        |
| 8.5.2     | 材料選定                    | 201        |
| 8.5.3     | 構造概念                    | 202        |
| 8.5.4     | 設計例                     | 203        |
| 8.6       | 第一壁                     | 206        |
| 8.6.1     | 熱負荷、粒子負荷                | 206        |
| 8.6.2     | 第一壁構造                   | 207        |
| 8.6.3     | 設計例                     | 209        |
| 8.7       | 今後の課題                   | 210        |
| <b>9章</b> | <b>コイルシステム</b>          | <b>214</b> |
| 9.1       | 核融合炉のコイル                | 214        |
| 9.2       | 超伝導コイルの基礎               | 214        |
| 9.2.1     | 超伝導特性                   | 214        |
| 9.2.2     | 超伝導材料                   | 215        |
| 9.2.3     | 超伝導線材の製造法               | 215        |
| 9.2.4     | 超伝導線                    | 217        |
| 9.2.5     | 冷却方式                    | 218        |
| 9.2.6     | 導体構造                    | 220        |
| 9.2.7     | コイル構造                   | 223        |
| 9.3       | トロイダル磁場コイルの基礎           | 224        |
| 9.3.1     | トロイダル磁場コイルに求められる機能      | 224        |
| 9.3.2     | コイル電流とコイル数              | 224        |
| 9.3.3     | コイルに生じる電磁力              | 226        |
| 9.3.4     | コイル形状                   | 228        |
| 9.3.5     | 最大経験磁場                  | 230        |
| 9.4       | トロイダル磁場コイル設計            | 231        |
| 9.4.1     | 導体設計                    | 231        |
| 9.4.2     | コイル構造設計                 | 232        |
| 9.4.3     | 支持方式                    | 232        |
| 9.4.4     | 設計例                     | 235        |
| 9.5       | ポロイダル磁場コイルの基礎           | 238        |
| 9.5.1     | ポロイダル磁場コイルに求められる機能      | 238        |
| 9.5.2     | プラズマ位置形状制御のためのコイル通電パターン | 239        |
| 9.5.3     | ポロイダル磁場コイルの設置位置         | 239        |
| 9.6       | ポロイダル磁場コイルの電流制御         | 240        |
| 9.6.1     | プラズマ形状を決める磁場配位          | 240        |
| 9.6.2     | プラズマ位置形状制御              | 241        |
| 9.6.3     | 制御方式                    | 241        |
| 9.6.4     | 機能別コイル方式                | 242        |
| 9.6.5     | ハイブリッドコイル方式             | 243        |

|            |                     |            |
|------------|---------------------|------------|
| 9.7        | ポロイダル磁場コイル設計        | 245        |
| 9.7.1      | 導体設計                | 245        |
| 9.7.2      | コイル構造設計             | 246        |
| 9.7.3      | 設計例                 | 246        |
| 9.8        | 中心ソレノイドコイルの基礎       | 248        |
| 9.8.1      | 中心ソレノイドコイルに求められる機能  | 248        |
| 9.8.2      | 中心ソレノイドコイルの磁場       | 248        |
| 9.8.3      | 供給磁束                | 248        |
| 9.9        | 中心ソレノイドコイル設計        | 249        |
| 9.9.1      | 導体設計                | 249        |
| 9.9.2      | コイル構造設計             | 250        |
| 9.9.3      | 設計例                 | 250        |
| 9.10       | 今後の課題               | 252        |
| <b>10章</b> | <b>プラズマ加熱・電流駆動</b>  | <b>254</b> |
| 10.1       | プラズマ加熱・電流駆動の必要性     | 254        |
| 10.2       | NBI加熱の基礎            | 256        |
| 10.2.1     | 中性粒子ビームのイオン化        | 256        |
| 10.2.2     | イオンビームの軌道           | 257        |
| 10.2.3     | エネルギー緩和によるプラズマ加熱    | 259        |
| 10.3       | NBI電流駆動の基礎          | 262        |
| 10.3.1     | 駆動電流                | 262        |
| 10.3.2     | 電流駆動効率              | 263        |
| 10.3.3     | 突き抜け割合              | 265        |
| 10.3.4     | 実験で求めた電流駆動効率        | 266        |
| 10.4       | ブートストラップ電流          | 266        |
| 10.5       | 高周波加熱の基礎            | 268        |
| 10.5.1     | 分散式                 | 268        |
| 10.5.2     | 冷たいプラズマの分散式         | 269        |
| 10.5.3     | 熱いプラズマの分散式          | 270        |
| 10.5.4     | マックスウェル分布したプラズマの分散式 | 271        |
| 10.5.5     | 高周波特性               | 272        |
| 10.5.6     | 高周波の伝播特性            | 275        |
| 10.5.7     | 加熱の原理               | 280        |
| 10.5.8     | 不均一プラズマ中の伝播         | 281        |
| 10.6       | 各種高周波の伝播特性          | 283        |
| 10.6.1     | アルヴェン波              | 284        |
| 10.6.2     | イオンサイクロトロン波         | 285        |
| 10.6.3     | 低域混成波               | 289        |
| 10.6.4     | 電子サイクロトロン波          | 293        |
| 10.7       | 高周波電流駆動の基礎          | 295        |
| 10.7.1     | 電流駆動の一般論            | 295        |
| 10.7.2     | 波動の運動量を用いる電流駆動      | 299        |
| 10.7.3     | 速度空間の非等方性を用いる電流駆動   | 303        |
| 10.7.4     | 実験で求めた電流駆動効率        | 310        |
| 10.8       | NBIシステム設計           | 312        |

|            |                              |            |
|------------|------------------------------|------------|
| x          | 目次                           |            |
|            | 10.8.1 設計要件                  | 312        |
|            | 10.8.2 システム概要                | 313        |
|            | 10.8.3 負イオン源                 | 314        |
|            | 10.8.4 ビーム輸送系                | 316        |
|            | 10.8.5 設計例                   | 317        |
|            | 10.8.6 今後の課題                 | 318        |
| 10.9       | イオンサイクロトロン波システム設計            | 319        |
|            | 10.9.1 設計要件                  | 319        |
|            | 10.9.2 システム概要                | 320        |
|            | 10.9.3 設計例                   | 322        |
|            | 10.9.4 今後の課題                 | 323        |
| 10.10      | 低域混成波システム設計                  | 323        |
|            | 10.10.1 設計要件                 | 323        |
|            | 10.10.2 システム概要               | 326        |
|            | 10.10.3 設計例                  | 329        |
|            | 10.10.4 今後の課題                | 330        |
| 10.11      | 電子サイクロトロン波システム設計             | 331        |
|            | 10.11.1 設計要件                 | 331        |
|            | 10.11.2 システム概要               | 333        |
|            | 10.11.3 設計例                  | 336        |
|            | 10.11.4 今後の課題                | 338        |
|            | 付録 5A                        | 338        |
|            | 付録 5B                        | 344        |
|            | 付録 7A                        | 351        |
|            | 付録 7B                        | 355        |
|            | 付録 7C                        | 360        |
| <b>11章</b> | <b>真空容器</b>                  | <b>369</b> |
| 11.1       | 真空容器に求められる機能                 | 369        |
| 11.2       | 超高真空保持と高温ベーキング               | 369        |
| 11.3       | 電気抵抗の確保、プラズマ位置制御、トロイダル磁場リップル | 371        |
| 11.4       | 炉内構造物の支持、電磁力支持               | 374        |
| 11.5       | 真空容器の冷却、放射線遮蔽、閉じ込め、組み立て・保守   | 376        |
| 11.6       | 真空容器設計                       | 377        |
|            | 11.6.1 構造規格                  | 377        |
|            | 11.6.2 設計項目                  | 378        |
|            | 11.6.3 設計例                   | 379        |
| 11.7       | 今後の課題                        | 383        |
| <b>12章</b> | <b>燃料循環系</b>                 | <b>384</b> |
| 12.1       | 燃料循環系に求められる機能                | 384        |
| 12.2       | 燃料循環系の構成                     | 384        |
| 12.3       | 燃料注入系                        | 385        |
| 12.4       | ガス排気系                        | 386        |
|            | 12.4.1 発生源別の排気ガス             | 386        |
|            | 12.4.2 真空排気系                 | 387        |
| 12.5       | 燃料精製系                        | 391        |
| 12.6       | 水素同位体分離系                     | 393        |
| 12.7       | 空气中トリチウム処理系                  | 395        |
| 12.8       | トリチウム水処理系                    | 395        |
| 12.9       | 燃料貯蔵系                        | 396        |
| 12.10      | トリチウムの計量管理                   | 397        |
| 12.11      | 設計例                          | 397        |
| 12.12      | 今後の課題                        | 400        |
| <b>13章</b> | <b>クライオスタット</b>              | <b>402</b> |
| 13.1       | クライオスタットに求められる機能             | 402        |
| 13.2       | クライオスタット構造                   | 402        |
| 13.3       | 熱シールド                        | 403        |
| 13.4       | 設計例                          | 405        |
| 13.5       | 今後の課題                        | 407        |
| <b>14章</b> | <b>核設計</b>                   | <b>409</b> |
| 14.1       | 核設計に求められる項目                  | 409        |
| 14.2       | 放射線遮蔽                        | 410        |
|            | 14.2.1 主な遮蔽体                 | 410        |
|            | 14.2.2 放射線遮蔽の評価法             | 412        |
| 14.3       | 線量率                          | 414        |
| 14.4       | 核発熱                          | 414        |
| 14.5       | 放射線照射損傷                      | 415        |
|            | 14.5.1 表面の損傷                 | 415        |
|            | 14.5.2 パルクの損傷                | 417        |
| 14.6       | 放射性廃棄物                       | 420        |
| 14.7       | 設計例                          | 421        |
| 14.8       | 今後の課題                        | 424        |
| <b>15章</b> | <b>運転保守</b>                  | <b>427</b> |
| 15.1       | 運転保守に求められる機能                 | 427        |
| 15.2       | 運転期間                         | 428        |
| 15.3       | 検査・保守の対象となる機器                | 429        |
| 15.4       | 保守頻度                         | 430        |
| 15.5       | 遠隔保守方式                       | 430        |
| 15.6       | 遠隔保守のプロセス                    | 432        |
| 15.7       | 炉内搬送装置                       | 433        |
| 15.8       | 設計例                          | 433        |

|                        |            |
|------------------------|------------|
| 15.9 今後の課題             | 437        |
| <b>16章 冷却系</b>         | <b>439</b> |
| 16.1 冷却系に求められる機能       | 439        |
| 16.2 冷却系の構成            | 439        |
| 16.3 冷却性能              | 441        |
| 16.4 設計例               | 442        |
| 16.4.1 冷却系構成           | 442        |
| 16.4.2 非常時の崩壊熱除去       | 444        |
| 16.5 今後の課題             | 445        |
| <b>17章 電源系</b>         | <b>446</b> |
| 17.1 電源系に求められる機能       | 446        |
| 17.2 電源系の特性            | 446        |
| 17.2.1 電源設備容量          | 446        |
| 17.2.2 電力を供給される機器・設備   | 447        |
| 17.2.3 コイル電源設備容量低減技術   | 447        |
| 17.2.4 電源構成            | 450        |
| 17.3 トロイダル磁場コイル電源      | 451        |
| 17.4 ポロイダル磁場コイル電源      | 454        |
| 17.5 設計例               | 457        |
| 17.6 今後の課題             | 459        |
| <b>18章 運転制御系・計測系</b>   | <b>461</b> |
| 18.1 運転制御系・計測系に求められる機能 | 461        |
| 18.2 制御の基礎             | 462        |
| 18.3 運転制御系             | 466        |
| 18.3.1 全系制御            | 466        |
| 18.3.2 プラズマ制御          | 466        |
| 18.4 計測系               | 469        |
| 18.4.1 受動的計測と能動的計測     | 469        |
| 18.4.2 探針計測            | 470        |
| 18.4.3 電磁波計測           | 471        |
| 18.4.4 粒子計測            | 478        |
| 18.5 設計例               | 484        |
| 18.5.1 運転制御系           | 484        |
| 18.5.2 計測系             | 488        |
| 18.6 今後の課題             | 489        |
| <b>19章 安全性</b>         | <b>492</b> |
| 19.1 安全性に求められる事項       | 492        |
| 19.2 放射性物質             | 493        |
| 19.3 安全確保のあり方          | 497        |

|                     |            |
|---------------------|------------|
| 19.3.1 安全上の特徴       | 497        |
| 19.3.2 安全性の目標       | 498        |
| 19.3.3 安全確保の基本的な考え方 | 499        |
| 19.3.4 安全設計の基本的な考え方 | 500        |
| 19.3.5 安全設計の評価      | 501        |
| 19.3.6 廃棄物処分        | 502        |
| 19.4 設計例            | 502        |
| 19.5 今後の課題          | 508        |
| <b>20章 解析コード</b>    | <b>512</b> |
| 20.1 炉設計の流れ         | 512        |
| 20.1.1 設計の流れ        | 512        |
| 20.1.2 炉設計フロー       | 512        |
| 20.2 様々な解析コード       | 514        |
| 20.3 炉設計システムコード     | 515        |
| 20.4 炉概念設計コード       | 517        |
| 20.5 経済性評価コード       | 525        |
| 20.6 プラズマ動特性評価コード   | 527        |
| 20.7 今後の課題          | 534        |
| <b>索引</b>           | <b>537</b> |