

## 目次

まえがき	i
編集委員会	iii
執筆者一覧	v

核融合炉工学序論	.....I
1 核融合エネルギー	1
2 トカマク装置のプラズマ	3
3 トカマク核融合炉	5

## 第1編 核融合炉材料

第1章 核融合炉材料の諸問題	.....13	2.1.5 構造設計基準と材料特性変化	30
1.1 序論	13	2.1.6 材料データベースと材料評価	31
1.2 核融合炉材料に要求される特性	16	2.2 照射効果	32
1.2.1 コンポーネントと構成材料	16	2.2.1 核融合炉条件下の照射効果	32
1.2.2 プラズマ対向・高熱流束材料	16	2.2.2 照射欠陥形成の素過程	36
1.2.3 第一壁・ブランケット構造材料	17	2.2.3 ミクロ組織変化	48
1.2.4 トリチウム増殖材料	18	2.2.4 ミクロ組成変化	55
1.2.5 超伝導マグネット材料	19	2.2.5 核変換の効果 (I) He 効果	61
1.2.6 特殊目的材料	19	2.2.6 核変換の効果 (II) 水素, その他の効果	67
1.3 材料開発目標	20	2.2.7 照射組織変化の理論的取扱い	71
1.4 研究開発の進め方	22	2.2.8 核分裂・核融合照射相関	75
1.4.1 問題点の抽出	22	2.3 構造材料の開発	84
1.4.2 シミュレーション相関の考え方	23	2.3.1 材料開発の具体的目標	84
1.4.3 材料開発の考え方	25	2.3.2 各種合金系の特徴	90
第2章 構造材料の照射効果と材料開発	.....26	2.3.3 重照射による材料特性の変化	94
2.1 序論	26	2.3.4 照射・環境複合効果	110
2.1.1 照射研究と材料開発の基本指針	26	2.3.5 低放射化	118
2.1.2 照射研究の進め方と問題点	27	2.3.6 微小試験片試験法	126
2.1.3 強力中性子源開発	27	第3章 プラズマ対向材料	.....141
2.1.4 炉設計と材料開発	30	3.1 序論	141
		3.2 スパッタリングとエロージョン	143

3.2.1 はじめに 143

3.2.2 シミュレーション・コード 143

3.2.3 スパッタリング収量のエネルギー依存性 144

3.2.4 スパッタリング収量の入射角依存性 146

3.2.5 微分スパッタリング収量 149

3.2.6 境界プラズマによる炭素材ダイバーター板の損耗 158

3.2.7 むすび 160

3.3 水素同位体の蓄積と放出 162

3.3.1 序論 162

3.3.2 蓄積と放出の概念 163

3.3.3 実験手法 165

3.3.4 素過程のデータ 167

3.3.5 複合効果 191

3.3.6 水素リサイクリングと蓄積および透過量の評価 197

3.4 プラズマ対向材料の放射線損傷 207

3.4.1 プラズマ対向機器 207

3.4.2 炭素材の放射線損傷 208

3.4.3 高Z材の放射線損傷 217

3.5 プラズマ対向材料としての総合評価 219

3.5.1 各種黒鉛材料の概要 219

3.5.2 各種黒鉛材料の製法と特性 222

3.5.3 各種黒鉛材料の製法と特徴について 236

3.5.4 各種炭素材材料の真空工学的特性および表面特性の評価 238

## 第2編 核融合炉ブランケット工学

第1章 序論 .....413

1.1 核融合炉におけるブランケット 413

1.1.1 エネルギー利用から見た核分裂と核融合 413

1.1.2 核融合炉ブランケットの主要な役割 416

1.2 熱流体工学 418

第2章 第一壁工学 .....422

2.1 第一壁における異常現象 422

2.1.1 ディスラプションによる負荷 422

2.1.2 高熱負荷による熔融・蒸発 422

2.1.3 熔融層の移動 424

第4章 セラミックス等材料と接合技術 .....306

4.1 序論 306

4.1.1 セラミックスとは 306

4.1.2 核融合炉への適用 306

4.1.3 核融合炉セラミックス候補材 308

4.1.4 核融合セラミックスの研究 308

4.2 核融合セラミックスの特性 309

4.2.1 セラミックスの製法 309

4.2.2 セラミックスの特性評価 310

4.2.3 各論 312

4.2.4 セラミックス適用上の問題点 320

4.2.5 セラミックス等材料の特質 321

4.3 セラミックスおよび無機絶縁体の照射効果 333

4.3.1 はじめに 333

4.3.2 セラミックスの照射効果の基礎過程 341

4.3.3 セラミックスの構造特性とその照射効果 361

4.3.4 機能特性とその照射効果 372

4.3.5 むすび 381

4.4 材料の接合技術 386

4.4.1 接合の意義 386

4.4.2 接合法, 被覆法 386

2.1.4 再凝固層内の亀裂発生 428

2.1.5 凝固亀裂を有する材料の破壊強度 429

2.1.6 第一壁の設計とディスラプション 430

2.2 第一壁における電磁現象 431

2.2.1 序論 431

2.2.2 電気力学の基礎 431

2.2.3 強磁性体に働く電磁力 434

2.2.4 渦電流の評価手法 434

2.2.5 電磁場と弾性場の連成現象 437

2.2.6 第一壁の欠陥探傷と逆問題 439

2.3 第一壁・高熱流速機器の冷却 441

2.3.1 第一壁・高熱流速機器の使用条件と冷却方式 441

2.3.2 高熱流速除熱技術の進展 449

2.4 第一壁の構造強度 461

2.4.1 第一壁の構造と強度 461

2.4.2 黒鉛およびC/C-複合材の耐熱衝撃性とその中性子照射効果 465

2.4.3 被覆材の強度評価 471

2.4.4 高温材料の非線形挙動の構成式 478

2.4.5 寿命評価 484

2.4.6 第一壁の損傷診断技術 489

2.4.7 高磁場下のマイクロメカニクス 494

第3章 中性子工学とその周辺 .....500

3.1 核設計と核融合中性子工学 500

3.2 核設計の基礎 501

3.2.1 核データ 501

3.2.2 中性子・ $\gamma$ 線輸送問題 514

3.3 核設計上の諸問題 524

3.3.1 核融合中性子と炉材料の核反応 524

3.3.2 核融合中性子の遮蔽関連の諸問題 533

3.4 量子計測技術 546

3.4.1 中性子計測 546

3.4.2  $\gamma$ 線計測 555

3.4.3 計測機器のDT中性子照射効果 559

第4章 ブランケットの伝熱流動 .....565

4.1 ブランケット冷却の問題点と冷却方式 565

4.1.1 核融合炉ブランケットにおける核反応 566

4.1.2 ブランケットの役割と構成 566

4.1.3 ブランケット中での熱発生 567

4.1.4 ブランケット冷却の特殊性 568

4.1.5 冷却方式の特徴と設計例 569

4.2 液体金属単相冷却 573

4.2.1 液体金属冷却の特徴と問題点 573

4.2.2 磁場下の円管中の圧力損失 574

4.2.3 垂直磁場下の矩形管中の圧力損失 575

4.2.4 変化垂直磁場下の圧力損失 578

4.2.5 電気絶縁管による圧損低減 578

4.2.6 熱伝達に対するMHD効果 582

4.2.7 MHD圧力損失の炉冷却適用例 586

4.3 液体金属-ガス二相流冷却 588

4.3.1 本冷却方式の特徴 588

4.3.2 液体金属-ガス環状噴霧二相流 588

4.3.3 ヘリウム-リチウム環状噴霧二相流 589

4.3.4 磁場閉じ込め核融合炉の第一壁冷却方式の評価 593

4.3.5 今後の研究課題 594

4.4 ガスおよび固気二相流冷却 595

4.4.1 一般論 595

4.4.2 いくつかの特殊条件下の熱伝達 596

4.4.3 固気二相流, その対流熱促進機構 599

4.4.4 固気二相流の熱伝達の測定例 600

4.4.5 固気二相冷却方式の得失 604

第5章 ブランケットの構造強度 .....606

5.1 ブランケットの構造と強度 606

5.1.1 まえがき 606

5.1.2 機能と負荷条件 606

5.1.3 ブランケット構造物 607

5.1.4 FINESSEにおける開発計画策定手法 609

5.2 ブランケットの疲労強度 610

5.2.1 はじめに 610

5.2.2 クリープ-疲労相互作用 610

5.2.3 疲労に対する高速中性子照射効果 612

5.2.4 微小試験片による疲労特性評価 613

5.2.5 ディスラプションと疲労 615

5.2.6 おわりに 615

5.3 クリープ特性評価 616

5.3.1 熱クリープ特性評価 616

5.3.2 照射クリープ特性評価 618

5.3.3 クリープ疲労相互作用 619

5.3.4 まとめ 620

5.4 高温強度 621

5.4.1 はじめに 621

5.4.2 研究概説 621

5.4.3 実験結果 622

5.4.4 有限要素法によるクリープ変形解析 623

5.5 腐食強度 626

5.5.1 繰返し熱応力のステンレス鋼に及ぼす影響 626

5.5.2 ステンレス鋼とLiの反応 632

第3編 トリチウム

第1章 トリチウムプラズマ .....635

1.1 はじめに 635

1.2 トリチウムプラズマ 637

1.2.1 イオン注入水素透過 637

1.2.2 低温プラズマによる水素透過研究 637

1.2.3 ベレット入射 641

1.3 トリチウム-材料相互作用 641

1.3.1 GDP (Gas Driven Permeation) 641

1.3.2 熱拡散 642

第2章 ブランケットにおけるトリチウムの生成と回収 .....644

2.1 核融合炉燃料サイクルの特徴とブランケットにおけるトリチウム増殖・回収の重要性 644

2.2 トリチウム増殖材料 646

2.3 固体増殖材料の特性と製造 647

2.4 トリチウムと固体増殖材料との相互作用 647

2.4.1 H<sub>2</sub>Oの吸着・溶解挙動 648

2.4.2 H<sub>2</sub>の溶解挙動 649

2.4.3 増殖材料表面における交換反応 650

2.4.4 トリチウム回収実験における表面反応 650

2.4.5 照射効果とトリチウムの化学形 652

2.4.6 固体増殖材料中のトリチウム拡散係数 653

2.5 固体増殖材料からのトリチウム回収 654

2.5.1 固体増殖材料からのトリチウム放出プロセス 654

2.5.2 スイープガスからのトリチウム回収法 655

2.6 液体増殖材料の特性と製造 656

2.7 トリチウムと液体増殖材料との相互作用 657

2.7.1 Li中のトリチウム挙動 657

2.7.2 Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub>中のトリチウム挙動 658

2.7.3 熔融塩中のトリチウム挙動 659

2.8 液体増殖材料からのトリチウム回収 660

2.8.1 液体リチウム 660

2.8.2 Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub>合金 663

2.8.3 熔融塩 664

2.9 水溶液ブランケット材料 664

2.10 中性子増倍材料 667

2.10.1 核特性 667

2.10.2 機械的特性 667

2.10.3 化学的特性 668

2.10.4 照射特性 669

2.11 今後の課題 669

2.11.1 固体増殖材料開発 669

2.11.2 液体増殖材料開発 670

2.11.3 中性子増倍材料開発 671

2.11.4 トリチウム回収システム 672

第3章 主燃料系 .....676

3.1 核融合炉の主燃料サイクル 676

3.2 真空・移送系 677

3.3 燃料精製系 678

3.4 同位体分離系 680

3.5 燃料注入系 681

3.6 付属プロセス, 安全系 682

3.7 要素プロセスの基礎研究 682

第4章 分析・測定法 .....684

4.1 はじめに 684

4.2 絶対量の測定 685

4.3 化学形の分析および分圧測定 686

4.4 分圧測定 687

4.5 その他分圧計 690

4.6 トリチウム測定の問題点 690

4.6.1 トリチウムの吸着の影響 690

4.6.2 トリチウムの吸着対策 692

4.7 おわりに 693

第5章 トリチウムの安全取扱い .....695

5.1 はじめに 695

5.2 トリチウム閉じ込めシステム 696

5.2.1 多重閉じ込め 696

5.2.2 トリチウム回収法 696

5.3 トリチウムによる汚染と除染 699

5.4 廃棄物の処理・処分 701

5.4.1 廃棄トリチウムの固定化 701

5.4.2 廃棄トリチウム水の減容 702

5.5 送・排気用ポンプ類 702

5.6 トリチウムの貯蔵 703

第6章 自然環境におけるトリチウム 706

6.1 はじめに 706

6.2 自然環境におけるトリチウムの挙動およびそのレベルと変動 706

6.2.1 自然環境とトリチウム発生源 706

6.2.2 気圏におけるトリチウムの挙動 707

6.2.3 水圏におけるトリチウムの挙動 708

6.3 環境から食物へのトリチウムの移行 711

6.3.1 食物へのトリチウムの移行 711

6.4 トリチウムガス放出後の環境動態——その移行過程と線量評価モデル—— 713

6.4.1 大気拡散 713

6.4.2 大気中におけるHTのHTOへの変換 713

6.4.3 HTOとHTの湿性沈着 714

6.4.4 土壌および植物へのHTの乾燥沈着 714

6.4.5 土壌および植物へのHTOの乾燥沈着 716

6.4.6 土壌中のHTO挙動と経根吸収 717

6.4.7 土壌および植物からのHTO放出 718

6.4.8 線量評価モデル 718

6.4.9 SPEEDIについて 720

6.5 トリチウム異常放出例 722

6.6 まとめと今後の課題 724

第7章 体内動態 .....725

7.1 体内動態 725

7.1.1 トリチウム水 (HTO) の体内動態 725

7.1.2 OBTの生体内動態 729

7.1.3 トリチウムガス (HT) の体内動態 733

7.2 モデルと線量評価 734

7.2.1 体内動態モデルの意義 734

7.2.2 2コンパートメントモデル 734

7.2.3 3コンパートメントモデル 736

7.2.4 4コンパートメントモデル (ETHモデル) 736

7.2.5 OBTの直接摂取を考慮した3コンパートメントモデル 738

7.2.6 線量評価 738

第8章 生物影響 .....744

8.1 急性効果 744

8.1.1 造血障害 (*in vitro*, *in vivo*を含む) 744

8.1.2 腸 747

8.1.3 精子染色体 (ヒト) 749

8.1.4 ヒトリンパ球の染色体異常 750

8.1.5 個体死 753

8.2 晩発効果・発がん 756

8.2.1 線量依存性 757

8.2.2 組織特異性 757

8.2.3 生物学的効果比 (RBE) 758

8.2.4 線量率効果と回復 759

8.2.5 胎児・若年齢被曝 760

8.2.6 今後の研究課題 760

8.3 遺伝的影響 761

8.3.1 動物を用いた研究 761

8.3.2 培養細胞を用いた研究 762

8.4 トリチウムの発生に及ぼす影響 764

8.4.1 発生時期による放射線感受性の差 764

8.4.2 HTOによる催奇形性効果 764

8.4.3 放射線に高感受性の幼若卵母細胞系 765

8.4.4 卵母細胞死による不妊症 766

8.4.5 放射線に高感受性の胎生期終脳室帯細胞系 766

8.4.6 まとめと今後の課題 767

8.5 賀田効果 768

8.5.1 賀田効果 (Kada Effect) とは? 768

8.5.2 賀田効果を示す実験例——形質転換能の不活性化における賀田効果—— 768

8.5.3 賀田効果を示す実験例——水溶液中でトリチウム照射されたDNAの1本鎖切断—— 770

8.5.4 線量率が低くなるほど照射効果が增大する他の実験例 772

8.5.5 賀田効果をどう解釈するか? 772

8.5.6 今後の問題 773

8.6 適応修復 774

8.6.1 はじめに 774

8.6.2 トリチウムの適応修復の発見 774

8.6.3 実験システム 775

8.6.4 トリチウムの適応修復の放射線生物学的諸特性 776

8.6.5 おわりに 779

8.7 OBТ の生物効果 780

8.7.1 はじめに 780

8.7.2 <sup>3</sup>H-dThd の生物効果 780

8.7.3 細胞レベル 780

8.7.4 組織個体レベル 782

8.7.5 核変換 (transmutation) 効果はあるか? 783

8.7.6 培養マウス胚に対する OBТ の作用 783

8.7.7 <sup>3</sup>H-dThdβ 線による吸収線量推定の問題 783

第9章 保健物理——防護 ……………786

9.1 トリチウムのマイクロシメトリー 786

9.2 RBE と Q 値 788

9.2.1 線量当量と線質係数 (Q) 788

9.2.2 ICRP 勧告におけるトリチウムの Q 値 789

9.2.3 トリチウムの RBE と Q 値 789

9.2.4 Q 値と線量当量限度—今後の課題 790

9.3 ヒトの被曝線量 791

9.3.1 モニタリング 791

9.3.2 ムラサキツユクサ 794

9.3.3 環境トリチウムの地衣, 苔, その他の高等植物によるモニタリング 795

第4編 核融合実験装置の超伝導工学

第1章 核融合と超伝導工学 ……………817

1.1 はじめに 817

1.2 核融合特別研究開始以前の超伝導工学 818

1.3 これまでの研究成果の概要および今後の課題 819

第2章 超伝導線材・導体工学 ……………821

2.1 超伝導材料の電磁特性 821

2.1.1 磁束ピンニング現象概説 821

2.1.2 超伝導材料における磁束のピンニング 827

9.4 安全取扱い 798

9.4.1 取扱い施設とモニタリング 798

9.4.2 安全取扱い装置とモニタリング 798

9.4.3 安全取扱い器具・用具と基本操作法 799

9.4.4 使用トリチウムのインベントリー (使用量と回収量) 799

9.4.5 実験者のトリチウム体内摂取 799

9.4.6 トリチウム水の廃棄 800

9.4.7 トリチウム有機廃液の処理 800

9.4.8 取扱い上の留意点 800

9.4.9 今後の研究課題とその展望 800

第10章 ヒト・環境の安全性 ……………802

10.1 核融合におけるリスク源とその影響範囲 802

10.2 リスク源とポテンシャル・リスク源はどれほど危険か? 803

10.2.1 トリチウム 803

10.2.2 中性子および X 線 804

10.2.3 放射化 804

10.2.4 非電離放射線: 電場, 磁場, 高周波など 804

10.3 研究開発の目標 805

10.4 補論 805

10.4.1 トリチウムの発がんリスク 805

10.4.2 遺伝的影響 807

10.4.3 子宮内被曝による発生・発達障害 810

2.1.3 実用線材における磁束のピンニング 833

2.1.4 磁束ピンニングに関する最近の問題 837

2.2 超伝導材の電磁現象と交流損失 842

2.2.1 超伝導線材・導体の設計基準 842

2.2.2 超伝導フィラメントの電磁現象 845

2.2.3 パルス用多芯線およびケーブルの電磁現象 847

2.2.4 商用周波数交流用多芯線の電磁現象 852

2.3 実用超伝導線材の特性改善 857

2.3.1 NbTi 系線材・導体 857

2.3.2 Nb<sub>3</sub>Sn 線材・導体 861

2.3.3 超伝導線材特性の評価技術 865

2.4 先進超伝導線材の開発 870

2.4.1 Nb<sub>3</sub>Al 系線材の開発 870

2.4.2 NbN 線材の開発 872

2.4.3 シェブレル相線材の開発 874

2.4.4 交流用超伝導線材の開発 875

2.5 超伝導線材の機械的性質と歪効果 880

2.5.1 超伝導線材の機械的性質 880

2.5.2 超伝導線材における歪効果 881

2.6 放射線による照射効果 884

2.7 酸化物超伝導材料 886

2.7.1 はじめに 886

2.7.2 粒界弱結合 886

2.7.3 異方性 887

2.7.4 臨界電流密度と磁束クリープ 888

2.7.5 臨界電流密度と作製プロセス 888

第3章 超伝導マグネット構成材料工学 ……………890

3.1 マグネット構成材料の基礎 890

3.1.1 有機複合材料の発展と現状 890

3.1.2 無機/有機強化繊維材料 893

3.1.3 複合材料の形態と製造方法 894

3.1.4 複合材料の評価 895

3.1.5 複合材料の照射効果 897

3.1.6 核融合超伝導磁石用材料としての問題点 906

3.2 極低温用構造材料の開発と特性評価 909

3.2.1 序論 909

3.2.2 材料開発と極低温材料試験法の標準化 909

3.2.3 コイル支持構造材料および溶接継手の強度評価 910

3.2.4 材料の変形・破壊に伴う発熱評価 913

3.2.5 材料のすべりと摩擦係数ならびに発熱評価 915

3.3 超伝導マグネットの応力解析ならびに構造健全性評価 918

3.3.1 序論 918

3.3.2 コイルの剛性評価と設計 918

3.3.3 クライオメカニクスと構造健全性評価 923

第4章 超伝導マグネット工学 ……………926

索引 977

4.1 マグネットに生じる擾乱と安定化 926

4.1.1 クエンチの原因とマグネットの安定化 926

4.1.2 擾乱の種類 926

4.1.3 導体の動きによる擾乱 927

4.2 浸漬冷却導体の安定性 929

4.2.1 液体ヘリウムの熱伝達特性 929

4.2.2 浸漬冷却導体の静的安定性 933

4.2.3 浸漬冷却導体の過渡安定性 935

4.3 強制冷却導体の安定性 937

4.3.1 超臨界圧ヘリウムの強制冷却特性 937

4.3.2 強制冷却導体の安定性 939

4.4 交流用導体の安定性 941

4.4.1 はじめに 941

4.4.2 不安定性の要因 941

4.4.3 交流用導体の現状 942

4.4.4 kA 級導体の安定性 942

4.5 導体の動的冷却安定化 943

4.5.1 安定性基準 943

4.5.2 実験的検証 945

4.5.3 まとめ 946

4.6 クエンチ時に生ずる障害と保護方法 946

4.6.1 超伝導マグネットの保護項目 946

4.6.2 クエンチ時のコイル保護 947

4.7 ヘリウムの電気絶縁特性 948

4.7.1 真空 948

4.7.2 ヘリウムガス 949

4.7.3 液体ヘリウム 949

4.8 常伝導部の伝播特性 952

4.8.1 浸漬冷却導体における常伝導部伝播 952

4.8.2 含浸コイルにおける常伝導部伝播 954

4.8.3 強制冷却導体における常伝導部伝播 956

4.9 クエンチ検出法 958

4.9.1 電圧検出法 958

4.9.2 新しいクエンチ検出法 959

4.9.3 総合的クエンチ判定 961

4.10 マグネットの磁界計算 962

4.10.1 計算法 962

4.10.2 種々のコイルの磁界計算 968

4.11 マグネットの監視・診断 970

4.11.1 AE の発生源 970

4.11.2 マグネットの監視・診断 972