

# 目 次

ページ

第1章 核融合炉材料の諸問題 .....	1
1.1 序論 .....	(帝京大・宮原 昭) .. 1
1.2 核融合炉材料に要求される特性 .....	(東大工・石野 榮) .. 4
1.2.1 コンポーネントと構造材料 .....	4
1.2.2 プラズマ対向・高熱流束材料 .....	4
1.2.3 第一壁ブランケット構造材料 .....	5
1.2.4 トリチウム増殖材料 .....	6
1.2.5 超伝導マグネット材料 .....	6
1.2.6 特殊目的材料 .....	7
1.3 材料開発目標 .....	(東大工・香山 晃) .. 8
1.4 研究開発の進め方 .....	(東大工・石野 榮) .. 11
1.4.1 問題点の抽出 .....	11
1.4.2 シミュレーション関連の考え方 .....	11
1.4.3 研究開発の考え方 .....	12
第2章 核融合炉材料 (I) 構造材料の照射効果と材料開発 .....	14
2.1 序論 .....	(東大工・石野 榮) .. 14
2.1.1 照射研究と材料開発の基本指針 .....	14
2.1.2 照射の進め方と問題点 .....	14
2.1.3 強力中性子源開発 .....	14
2.1.4 炉設計と材料開発 .....	17
2.1.5 構造設計基準と材料特性変化 .....	17
2.1.6 材料データベースと材料評価 .....	18
2.2 照射効果 .....	19
2.2.1 核融合炉条件下の照射効果 .....	(東大工・関村直人) .. 19
2.2.2 照射欠陥形成の素過程 .....	(名大工・桐谷道雄) .. 23
2.2.3 ミクロ組成変化 .....	(北大工・高橋平七郎、大貫惣明) .. 36
2.2.4 核交換の効果 (I) He 効果 .....	(東北大金材研・松井秀樹) .. 43
2.2.5 核交換の効果 (II) 水素、その他 .....	(九大応力研・吉田直亮) .. 50
2.2.6 照射組織変化の理論的取扱い .....	(九大応力研・蔵元英一) .. 54
2.2.7 核分裂、核融合照射関連 .....	(九大応力研・室賀健夫) .. 60
2.3 構造材料の開発 .....	66
2.3.1 材料開発の具体的目標 .....	(東大工・香山 晃) .. 60
2.3.2 各種合金系の特徴 .....	(東京理科大・井形直弘) .. 71
2.3.3 重照射による材料特性の変化 .....	(東大工・香山 晃) .. 75
2.3.4 照射、環境複合効果 .....	(室蘭工大・三沢俊平) .. 92
2.3.5 低放射化 .....	100
2.3.5.1 核融合炉材料低放射化の意義と考え方 .....	(名大工・細井祐三、宮原一哉) .. 100
2.3.5.2 合金設計法 .....	(豊橋技大工・湯川夏夫) .. 103
2.3.5.3 鉄鋼材料の開発 .....	(東北大金材研・茅野芳夫) .. 106
2.3.5.4 セラミックス及び複合材料 .....	(東大工・香山 晃) .. 109
2.3.6 微小試験片試験法 .....	(北大工・岡田亜紀良) .. 111

第3章 核融合炉材料(Ⅱ) プラズマ対向材料 .....	123
3.1 序論 .....	(帝京大・宮原 昭) 123
3.2 スパッタリングとエロージョン .....	(岡山理大・山村泰道/核融研・川村孝弐) 125
3.2.1 はじめに .....	125
3.2.2 シミュレーション・コード .....	125
3.2.3 スパッタリング収量のエネルギー依存性 .....	126
3.2.4 スパッタリング収量の入射依存性 .....	127
3.2.5 微分スパッタリング収量 .....	131
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 .....	139
3.3 水素同位体の蓄積と放出 .....	143
3.3.1 序論 .....	(阪大工・田辺哲朗) 143
3.3.2 蓄積と放出の概念 .....	(阪大工・田辺哲朗) 144
3.3.3 実験手法 .....	(阪大工・田辺哲朗) 146
3.3.4 蒸過程のデータ .....	148
3.3.4.1 反射 .....	(名大工・森田健治) 148
3.3.4.1.1 序論 .....	148
3.3.4.1.2 粒子反射係数とエネルギー反射係数 .....	148
3.3.4.1.3 反射係数の決定法 .....	148
3.3.4.1.4 反射係数データ .....	149
3.3.4.1.5 結論 .....	150
3.3.4.2 吸着 .....	(富山大トリウム 研究センター・渡辺国昭) 152
3.3.4.2.1 吸着の起き易さ .....	152
3.3.4.2.2 吸着速度 .....	152
3.3.4.2.3 吸着種の安定性 .....	154
3.3.4.3 溶解 .....	(富山大トリウム 研究センター・渡辺国昭) 158
3.3.4.3.1 溶解速度 .....	158
3.3.4.3.2 溶解度 .....	158
3.3.4.4 黒鉛内の水素の拡散(Diffusion) .....	(名大工・森田健治) 163
3.3.4.4.1 序論 .....	163
3.3.4.4.2 拡散係数データ .....	163
3.3.4.5 捕獲(Trapping) .....	(名大工・森田健治) 164
3.3.4.5.1 序論 .....	164
3.3.4.5.2 捕獲係数の導出法 .....	164
3.3.4.5.3 捕獲係数のデータ .....	165
3.3.4.6 再結合(Recombination) .....	(東大工・山脇道夫、山口憲司) 167
3.3.4.6.1 序論 .....	167
3.3.4.6.2 再結合係数の導出 .....	167
3.3.4.6.3 再結合係数のデータ並びに比較 .....	168
3.3.4.7 脱着(Desorption) .....	(東大工・山脇道夫、山口憲司) 171
3.3.4.7.1 高水素被率表面での水素の脱着 .....	171
3.3.4.7.2 励起脱離 .....	172
3.3.5 複合効果 .....	173
3.3.5.1 序論 .....	(阪大工・田辺哲朗) 173
3.3.5.2 照射効果 .....	(阪大工・田辺哲朗) 173

3.3.5.2.1	序論	173
3.3.5.2.2	再放出(Reemission)	173
3.3.5.2.3	蓄積(Trapping & Retention)	174
3.3.5.2.4	透過(Permeation)	175
3.3.5.3	不純物効果 (東大工・山脇道夫、山口憲司)	177
3.3.5.3.1	序論	177
3.3.5.3.2	不純物の発生機構	177
3.3.5.3.3	水素同位体の輸送に及ぼす不純物の影響	177
3.3.6	水素リサイクリングと蓄積及び透過量の評価	180
3.3.6.1	水素リサイクリング (阪大工・田辺哲朗)	180
3.3.6.1.1	リサイクリング率	180
3.3.6.1.2	金属でのリサイクリング	180
3.3.6.1.3	黒鉛壁でのリサイクリング	181
3.3.6.1.4	モデリング	183
3.3.6.1.5	大型装置におけるリサイクリング	183
3.3.6.2	蓄積 (東大工・山脇道夫、山口憲司)	185
3.3.6.3	透過 (東大工・山脇道夫、山口憲司)	187
3.4	プラズマ対向材料の放射線損傷	189
3.4.1	プラズマ対向機器 (阪大工・田辺哲朗)	189
3.4.2	炭素材の照射損傷 (阪大工・田辺哲朗)	190
3.4.2.1	序論	190
3.4.2.2	HOPGの中性子照射損傷	191
3.4.2.3	HOPGのイオン照射損傷	192
3.4.2.3.1	組織変化	192
3.4.2.3.2	結晶子サイズ変化	195
3.4.2.3.3	結合構造変化	196
3.4.2.4	実用炭素材の照射損傷	197
3.4.2.5	今後の研究	198
3.4.2.5.1	工学的側面(今日的)	198
3.4.2.5.2	学問的側面(長期的)	199
3.4.2.5.3	R&Dシナリオ(試料の選択)	199
3.4.3	高Z材の照射損傷 (阪大工・田辺哲朗)	199
3.5	プラズマ対向材料としての黒鉛材の総合評価	203
3.5.1	各種黒鉛材料の概要 (北大工・日野友明)	203
3.5.1.1	[共通材料]、等方性黒鉛について	203
3.5.1.2	新[共通材料]について	204
3.5.2	各種黒鉛材料の製法と特性 (東洋炭素・岡田雅樹)	206
3.5.2.1	はじめに	206
3.5.2.2	黒鉛材の製造法	206
3.5.2.3	黒鉛材の物性	207
3.5.2.4	まとめ	213
3.5.3	各種黒鉛材料の製法と特徴について (ヒテック・生産技術部SC)	215
3.5.3.1	はじめに	215
3.5.3.2	黒鉛材料の製法	215
3.5.3.3	各種黒鉛材料の特徴	215

3.5.3.4	イピデン黒鉛材料の特徴	215
3.5.3.5	まとめ	216
3.5.4	各種炭素材料の真空工学的特性および表面特性の評価	217
3.5.4.1	ガス放出特性およびマイクロ表面積 (北大工・広畑優子)	217
3.5.4.1.1	はじめに	217
3.5.4.1.2	気体放出特性の測定 -- 昇温脱離装置	217
3.5.4.1.3	表面積の測定 -- 気体吸着法	219
3.5.4.1.4(a)	炭素材料から放出する気体の種類	220
3.5.4.1.4(b)	表面積と気体放出量の関係	221
3.5.4.1.4(c)	表面改質炭素材料の気体放出特性	223
3.5.4.1.4(d)	等方性黒鉛材の気体形状	224
3.5.4.1.4(e)	まとめ	224
3.5.4.2	パルスレーザービームを用いた等方性黒鉛のガス・放出特性 (九大応力研・室賀健夫)	226
3.5.4.2.1	はじめに	226
3.5.4.2.2	実験方法	226
3.5.4.2.3	実験結果と考察	226
3.5.4.2.4	まとめ	229
3.5.4.3	ガス透過性(1) (東大工・山脇道夫、田中 知、山口憲司、小野双葉/東洋大工・坂本雄一)	231
3.5.4.3.1	はじめに	231
3.5.4.3.2	トリチウムビーム試験装置の製作と照射試験	231
3.5.4.3.3	各種黒鉛材料の水素透過性	235
3.5.4.3.4	まとめ	238
3.5.4.4	ガス透過性(2) (名大工・兩宮進)	240
3.5.4.4.1	はじめに	240
3.5.4.4.2	実験	240
3.5.4.4.3	結果と考察	242
3.5.4.4.4	まとめ	242
3.5.4.5	各種炭素材料の高温酸化特性 (北大工・日野友明、橋場正男、山科俊郎)	243
3.5.4.5.1	はじめに	243
3.5.4.5.2	酸化速度測定装置	243
3.5.4.5.3	酸化実験結果	243
3.5.4.5.4	まとめ	245
3.5.4.6	構造分析 (富山大トリウム 研究センター・渡辺田昭、芦田完)	246
3.5.4.6.1	黒鉛材料	246
3.5.4.6.1.1	はじめに	246
3.5.4.6.1.2	ラマン分光	246
3.5.4.6.1.3	黒鉛の振動モード解析	246
3.5.4.6.1.4	各種炭素材料の構造特性	247
3.5.4.6.1.5	まとめ	250
3.5.4.7	炭素膜 (北大触媒化学研究センター・皆川秀紀 北大工・日野友明、山科俊郎)	252
3.5.4.7.1	はじめに	252

3.5.4.7.2	炭素膜の作成及び特性評価方法	252
3.5.4.7.3	炭素膜の構造とその評価	252
3.5.4.7.4	まとめ	256
3.5.4.8	熱的機械特性 (原研・関 昌弘、秋場真人、荒木正則、 橋山堅二、大楽正幸、染谷 清、小川益郎、伊勢英夫)	258
3.5.4.8.1	熱衝撃特性	258
3.5.4.8.1.1	各種第一壁材料の熱衝撃試験	258
3.5.4.8.1.1.1	まえがき	258
3.5.4.8.1.1.2	原研の高熱負荷試験装置	258
3.5.4.8.1.1.3	炭素系材料の熱衝撃試験	259
3.5.4.8.1.1.4	金属の熱衝撃試験	261
3.5.4.8.1.1.5	まとめ	261
3.5.4.9	黒鉛材料の耐熱衝撃性 (金材研・白石春樹、新野 仁、藤塚正和)	262
3.5.4.9.1	はじめに	262
3.5.4.9.2	電子ビーム照射装置	262
3.5.4.9.3	各種黒鉛材料の熱衝撃性	263
3.5.4.9.4	物性値との関係	265
3.5.4.9.5	表面の損耗	266
3.5.4.9.6	まとめ	268
3.5.4.10	セラミック、高融点金属被覆黒鉛材料および黒鉛材料の衝撃試験 (阪大工・三宅正宣、孫鳳根)	269
3.5.4.10.1	はじめに	269
3.5.4.10.2	パルス電子ビーム照射装置	269
3.5.4.10.3	熱衝撃試験結果	269
3.5.4.10.4	まとめ	273
3.5.4.11	レーザー照射による熱衝撃試験 (横浜国大・宇佐美誠二、 中井日佐司、戸田雅成、柿沼拓也)	275
3.5.4.11.1	はじめに	275
3.5.4.11.2	レーザー照射装置および放出粒子検出装置	275
3.5.4.11.3	実験結果	275
3.5.4.11.4	まとめ	277
3.5.4.12	破壊力学と破壊機構 (豊橋技科大・逆井基次)	278
3.5.4.12.1	はじめに	278
3.5.4.12.2	破壊靱性の定義とその実験評価	278
3.5.4.12.3	破壊靱性値	278
3.5.4.12.4	亀裂進展抵抗曲線(R-曲線)	280
3.5.4.12.5	耐熱衝撃と破壊靱性値	281
3.5.4.12.6	C/C 複合材の破壊挙動と耐熱衝撃性	281
3.5.4.12.7	核融合第一壁材としての炭素材が具備しなければならない 耐熱衝撃性能	282
3.5.4.12.8	まとめ	282
第4章 核融合炉材料(Ⅲ) セラミックス等材料と接合技術		284
4.1	序論 (東京工大原子炉工研・井関孝善)	284

4.1.1	セラミックスとは	284
4.1.2	核融合炉への適用	284
4.1.3	核融合炉セラミックス候補材	285
4.1.4	核融合セラミックスの研究	286
4.2	核融合セラミックスの特性	287
4.2.1	セラミックスの製法	287
4.2.2	セラミックスの特性評価	288
4.2.3	各論	291
4.2.4	セラミックス適用上の問題点	298
4.2.5	セラミックス等材料の特質	(阪大溶接研・岩本信也) 301
4.2.5.1	複合材料	301
4.2.5.2	製造方法	302
4.3	セラミックスおよび無機絶縁体の照射効果	(九大工・木下智見) 311
4.3.1	はじめに	311
4.3.2	セラミックスの照射効果の基礎過程	317
4.3.2.1	セラミックスの照射効果とその特徴	317
4.3.2.2	原子のはじき出しと、はじき出しの核エネルギー	318
4.3.2.3	電子励起によるはじき出し	322
4.3.2.4	はじき出しによる損傷間の相互作用	324
4.3.2.5	はじき出し損傷と電子励起との間の相互作用	325
4.3.2.6	電子励起間の相互作用	326
4.3.2.7	Cascade	329
4.3.2.8	自由欠陥	330
4.3.2.9	点欠陥集合体とその速度論	332
4.3.2.10	点欠陥の速度論	336
4.3.3	セラミックスの特性とその照射効果	337
4.3.3.1	力学的特性と照射効果	337
4.3.3.2	電気的特性と照射効果	344
4.3.3.3	誘電損失と照射効果	349
4.4	材料の接合技術	(阪大溶接技術研究所・岩本信也) 356
4.4.1	接合の意義	356
4.4.2	接合法の分類	356
4.4.2.1	接合法の2分類	356
4.4.3	各種接合法	356
4.4.3.1	機械的はめ合い	356
4.4.3.2	固相(拡散)接合	356
4.4.3.3	圧接	357
4.4.3.4	摩擦接合	357
4.4.3.5	反応接合法	358
	(1) ガス-金属共晶法	358
	(2) 固体間反応法	358
	(3) 活性金属法	358
	(4) 貴金属を用いる方法	359
4.4.3.6	電圧印加接合法	359
4.4.3.7	マイクロ波加熱の接合法	360

4.4.3.8	溶融溶接	360
4.4.3.9	超音波接合	361
4.4.3.10	イオン打ち込みの応用	361
4.4.3.11	共晶を用いる接合	361
4.4.3.12	ろう付けによる接合	363
	(1) ろう付けと接合金属側の反応	363
	(2) 遷移金属添加の役割	364
	(a) Tiの役割	364
	(b) Cu-Tiの物性に対する添加元素の影響	365
	(c) Ag-Cu-Tiろう付けの適用	365
4.4.4	被覆法	368
4.4.4.1	プラズマ溶射	368
4.4.4.2	高速溶射法	369
4.4.4.3	爆発溶射法	369
4.4.4.4	低真空溶射法	369
4.4.4.5	その他の被膜形成法	370
	(1) CVD (Chemical Vapor Deposition)	370
	(2) PVD (Physical Vapor Deposition)	370
	(a) 蒸発法	370
	(b) スパッタリング法	371
	(c) イオンプレーティング法	371
	(d) 核融合炉建設のための被覆法	371
	(e) 酸化物超伝導体被膜	372