

目次

物理定数の値 xiii
序論 xv

第1部 照射損傷過程

第1章 照射損傷イベント	3
1.1 中性子-核相互作用	3
1.1.1 弾性散乱	3
1.1.2 非弾性散乱	7
1.1.3 (n, 2n) 反応	8
1.1.4 (n, γ) 反応	9
1.2 イオンと原子の相互作用	9
1.2.1 原子間ポテンシャル	9
1.2.2 衝突キネマティクス	14
1.3 エネルギー損失	22
1.3.1 エネルギー損失理論	23
1.3.2 飛程の計算	29
第2章 原子の弾き出し	37
2.1 弾き出しの初等理論	37
2.1.1 弾き出し確率	37
2.1.2 原子弾き出しの Kinchin と Pease (K-P) のモデル	38
2.1.3 弾き出しエネルギー	39
2.1.4 電子的エネルギー損失の限界	42
2.2 K-P 弾き出しモデルの修正	43
2.2.1 エネルギーバランスにおける E_d の考察	43
2.2.2 現実的なエネルギー伝達断面積	43
2.2.3 電子励起によるエネルギー損失	44
2.2.4 結晶性の効果	46
2.3 弾き出し断面積	53
2.3.1 弾性散乱	53
2.3.2 非弾性散乱	53
2.3.3 (n, 2n) および (n, γ) 弾き出し	53
2.3.4 K-P モデルに対する修正と全弾き出し断面積	54
2.4 弾き出し速度	54
2.5 特性変化と照射量の相関	56
2.6 荷電粒子照射による弾き出し	57
第3章 損傷カスケード	63
3.1 弾き出し平均自由行程	63
3.2 一次反跳スペクトル	64
3.3 カスケード損傷エネルギーとカスケード体積	66
3.4 照射損傷のコンピュータシミュレーション	66
3.4.1 二体衝突近似 (BCA) 法	67
3.4.2 分子動力学 (MD) 法	68
3.4.3 キネティックモンテカルロ (KMC) 法	71
3.5 カスケード発達の段階	73
3.6 カスケード内での欠陥の挙動	74

第4章 点欠陥形成と拡散 83

4.1 照射誘起欠陥の性質 83

4.1.1 格子間原子 83

4.1.2 複格子間原子 85

4.1.3 格子間原子-不純物複合体 86

4.1.4 原子空孔 86

4.1.5 多重空孔 86

4.1.6 溶質-欠陥と不純物-欠陥クラスター 86

4.2 点欠陥形成の熱力学 86

4.3 点欠陥の拡散 89

4.3.1 拡散の巨視的記述 89

4.3.2 拡散の機構 89

4.3.3 拡散の微視的表現 91

4.3.4 ジャンプ頻度 Γ 92

4.3.5 ジャンプ頻度 ω 93

4.3.6 D の方程式 94

4.4 相関拡散 95

4.5 多元系における拡散 96

4.6 高速拡散経路に沿う拡散 97

第5章 照射促進拡散と欠陥反応速度論 101

5.1 点欠陥バランス方程式 101

5.1.1 領域1: 低温, 低シンク密度 102

5.1.2 領域2: 低温, 中間シンク密度 104

5.1.3 領域3: 低温, 高シンク密度 104

5.1.4 領域4: 高温 105

5.1.5 点欠陥バランス方程式の特性 106

5.1.6 単純な点欠陥バランスモデルの不足要因 107

5.1.7 カスケードが存在する場合の点欠陥バランス方程式 107

5.2 照射促進拡散 109

5.3 欠陥反応 110

5.3.1 欠陥生成 112

5.3.2 再結合 112

5.3.3 シンクへの消滅 112

5.3.4 シンク強度 112

5.4 反応速度律速過程 113

5.4.1 欠陥-ボイド相互作用 113

5.4.2 欠陥-転位相互作用 113

5.5 拡散律速反応 113

5.5.1 欠陥-ボイド反応 113

5.5.2 欠陥-転位反応 115

5.6 混合律速 115

5.7 欠陥-粒界反応 116

5.8 整合析出物と溶質原子 116

5.9 点欠陥の回復 117

第2部 照射損傷の物理的効果

第6章 照射誘起偏析 125

6.1 高濃度2元系合金における照射誘起偏析 126

6.1.1 連立偏微分方程式の解 129

6.1.2 格子間原子との結合 130

6.1.3 溶質寸法効果 131

6.1.4 温度の効果 131

6.1.5 損傷速度の効果 132

6.2 3元系合金におけるRIS 133

6.3 RISに及ぼす局所的組成変化の影響 135

6.4 RISに及ぼす溶質の効果 137

6.5 オーステナイト合金におけるRISの例 139

6.6 フェライト系合金のRIS 141

6.7 RISに及ぼす粒界構造の効果 143

第7章 転位微細組織 147

7.1 転位線 147

7.1.1 転位の運動 149

7.1.2 転位の記述法 150

7.1.3 変位, 歪み, および応力 151

7.1.4 転位のエネルギー 153

7.1.5 転位の線張力 154

7.1.6 転位に及ぼす力 155

7.1.7 転位間の相互作用 157

7.1.8 拡張転位 158

7.1.9 キンクとジョグ 159

7.2 積層欠陥ループと積層欠陥四面体 159

7.3 欠陥クラスター 161

7.3.1 クラスターを形成する欠陥の割合 161

7.3.2 クラスターの型 164

7.3.3 クラスター移動度 165

7.4 拡張欠陥 168

7.5 有効欠陥生成 170

7.6 転位ループの核生成と成長 170

7.6.1 ループ核生成 171

7.6.2 クラスタリング理論 174

7.6.3 クラスターダイナミクス法によるクラスター発達のモデル化 175

7.7 転位ループ成長 176

7.8 回復 179

7.9 格子間原子型ループ微細組織の発達 179

第8章 照射誘起ボイドと気泡 187

8.1 ボイド核生成 188

8.1.1 平衡ボイドサイズ分布 188

8.1.2 ボイド核生成速度 189

8.1.3 不活性ガスの効果 193

8.1.4 生成バイアスのもとでのボイド核生成 196

8.2 ボイド成長における欠陥シンクの取り扱い 197

8.2.1 シンク表面における欠陥吸収速度と濃度 198

8.2.2 点欠陥バランス 200

8.3 ボイド成長 201

8.3.1 温度依存性 203

8.3.2 損傷量依存性 204

8.3.3 バイアス付きシンクとしての転位の役割

206

8.3.4 損傷速度依存性 208

8.3.5 照射変数シフト 209

8.3.6 生成バイアスの効果 211

8.3.7 応力依存性 216

8.3.8 RISの影響 218

8.3.9 ボイド格子 218

8.3.10 微細組織と組成の影響 220

8.3.11 原子軌道履歴の効果 226

8.4 気泡 226

8.4.1 気泡の力学 228

8.4.2 成長則 229

8.4.3 転位ループパンチングによる気泡成長 230

8.4.4 気泡格子 231

8.4.5 ヘリウム生成 231

第9章 照射下相安定性 239

9.1 照射誘起偏析と照射誘起析出 239

9.2 反跳溶解 240

9.3 照射誘起不規則化 244

9.4 非整合析出物の核生成 247

9.5 整合析出物の核生成 250

9.6 照射誘起析出の例 252

9.6.1 フェライト-マルテンサイト鋼 252

9.6.2 オーステナイトステンレス鋼 255

9.7 準安定相 256

9.7.1 規則-不規則変態 257

9.7.2 結晶構造変態 257

9.7.3 準結晶生成 258

9.8 アモルファス化 258

9.8.1 化合物の生成熱と結晶構造の違い 259
 9.8.2 化合物の固溶範囲と臨界欠陥密度 260

9.8.3 アモルファス化の熱力学と速度論 262
9.9 原子炉炉心構成要素合金中の相安定性——267

第10章 イオン照射に独特な効果——273

10.1 イオン照射技術——273
10.2 組成変化——275
 10.2.1 スパッタリング 275
 10.2.2 ギブス吸着 279
 10.2.3 反跳注入 280
 10.2.4 カスケード(等方的, 弾き出し)混合 281
 10.2.5 表面組成変化に影響を与える過程の組み合わせ 287
 10.2.6 イオン注入中の注入粒子再分布 288
10.3 イオン注入のその他の効果——290
 10.3.1 粒成長 290
 10.3.2 集合組織 291
 10.3.3 転位微細組織 291
10.4 高線量ガス注入: プリスタリングと表層剥離——292
10.5 固相および不活性ガス気泡格子——295
10.6 電子励起による弾き出し——296
10.7 イオンビームアシスト成膜 (IBAD)——297
 10.7.1 微細組織 297
 10.7.2 残留応力 302
 10.7.3 薄膜集合組織 307

第11章 イオンによる中性子照射効果の模擬——315

11.1 中性子照射の代替としてイオン照射を用いることの動機——315
11.2 照射損傷のイオン照射に関係した側面の概観——316
11.3 RISの粒子タイプに対する依存性——318
11.4 種々の照射粒子タイプの利点と欠点——321
 11.4.1 電子 322
 11.4.2 重イオン 323
 11.4.3 陽子 324
11.5 粒子照射における照射パラメータ——324
11.6 陽子照射による中性子照射損傷の模擬——326
11.7 中性子照射損傷の自己イオン照射による模擬——330

第3部 照射損傷の機械的および環境的效果

第12章 照射硬化と変形——337

12.1 弾性および塑性変形——338
 12.1.1 弾性 338
 12.1.2 塑性 340
 12.1.3 引張試験 341
 12.1.4 降伏強度 342
12.2 照射硬化——343
 12.2.1 転位源硬化 344
 12.2.2 摩擦硬化 345
 12.2.3 硬化機構の重ね合わせ 350
 12.2.4 多結晶体の硬化 352
 12.2.5 照射硬化の飽和 353
 12.2.6 硬化の実測値と予測値の比較 355
 12.2.7 照射焼鈍硬化 357
 12.2.8 硬さと降伏強度の間の相関 357
12.3 照射金属の変形——359
 12.3.1 変形局在化 361
 12.3.2 変形機構図 363

第13章 照射クリープと成長——369

13.1 熱クリープ——369
 13.1.1 転位クリープ 371
 13.1.2 拡散クリープ 374
13.2 照射クリープ——375
 13.2.1 応力誘起優先ループ核生成 (SIPN) 376
 13.2.2 応力誘起優先吸収 (SIPA) 378
 13.2.3 優先吸収迂り (PAG) による上昇迂り 379
 13.2.4 転位バイアスで駆動される上昇迂り 380
 13.2.5 遷移クリープ 381
 13.2.6 ループアンフォールディング 382
 13.2.7 回復クリープ 383
 13.2.8 拡散クリープ: 何故照射の効果がないのか 384
 13.2.9 理論とクリープデータの比較 384
 13.2.10 照射修正変形機構図 387
13.3 ジルコニウム合金の照射成長とクリープ——387
 13.3.1 照射されたジルコニウム合金の微細組織 388
 13.3.2 照射成長 389
 13.3.3 照射クリープ 391

第14章 破壊と脆化——397

14.1 破壊のタイプ——397
14.2 金属の凝集強度——397
14.3 破壊力学——399
14.4 破壊力学試験——402
14.5 弾塑性破壊力学——402
14.6 脆性破壊——404
14.7 フェライト鋼の照射誘起脆化——407
 14.7.1 切欠き試験片衝撃試験 407
 14.7.2 DBTTと上部棚エネルギーの低下 409
 14.7.3 マスターカーブ法 410
 14.7.4 脆化の程度に影響を及ぼす因子 411
 14.7.5 フェライト-マルテンサイト鋼の脆化 414
 14.7.6 焼鈍と再照射 415
 14.7.7 疲労 415
14.8 低温から中間温度におけるオーステナイト合金の破壊と疲労——417
 14.8.1 破壊韌性に及ぼす照射の効果 417
 14.8.2 疲労に及ぼす照射の効果 419
14.9 高温脆性——420
 14.9.1 粒界ポイドと気泡 420
 14.9.2 粒界迂り 423
 14.9.3 粒界亀裂成長 424
 14.9.4 破壊機構図 425

第15章 腐食と応力腐食割れの基礎——429

15.1 腐食の形態——429
15.2 腐食の熱力学——432
 15.2.1 腐食の駆動力 432
 15.2.2 EMF系列と符号の規約 433
 15.2.3 安定性図 (Pourbaix 図) 436
15.3 腐食の速度論——440
15.4 分極——444
 15.4.1 混成電位理論 445
 15.4.2 ガルバニ対 446
 15.4.3 アノード/カソード面積比 448
 15.4.4 複数カソード反応 448
 15.4.5 その他の種類の分極 448
15.5 不動態——452
 15.5.1 不動態の理論 453
 15.5.2 酸中の活性態-不動態金属の挙動 454
 15.5.3 活性態-不動態腐食挙動に影響する因子 455
 15.5.4 不動態の制御 456
 15.5.5 活性態-不動態金属のガルバニ対 457
 15.5.6 不動態金属の孔食 458
15.6 すき間腐食——459

15.7 応力腐食割れ (SCC) —————	460	15.7.6 SCC の速度論	466
15.7.1 SCC 試験	461	15.7.7 応力腐食割れの機構	466
15.7.2 SCC 過程	462	15.7.8 亀裂伝播の予測モデル	468
15.7.3 金属学的条件	463	15.7.9 力学的破壊モデル	468
15.7.4 亀裂発生と伝播	463	15.7.10 腐食疲労	469
15.7.5 SCC の熱力学	464	15.7.11 水素脆化	470
第 16 章 腐食と環境支援割れに及ぼす照射の効果 —————	475		
16.1 水化学に及ぼす照射の効果 —————	476	16.3.2 フェライト系合金	488
16.1.1 放射線分解とその腐食電位に及ぼす影響	476	16.4 IASCC の機構 —————	489
16.1.2 酸化に及ぼす腐食電位の効果	478	16.4.1 粒界クロム欠乏	489
16.1.3 IASCC に及ぼす腐食電位の効果	479	16.4.2 照射硬化	490
16.2 酸化に及ぼす照射の効果 —————	481	16.4.3 変形モード	491
16.3 応力腐食割れに及ぼす照射の効果 —————	482	16.4.4 IASCC のモデル	492
16.3.1 オーステナイト合金	482	16.4.5 選択的内部酸化	493
		16.4.6 照射誘起クリープ	493