目　　次

1　序論—炭素と工業 …… 1

参考文献 …… 11

2　基礎編—炭素と炭素材料

2.1　炭素および黒鉛 …… 13

2.1.1　炭素の生成 …… 13
(1)　自然界の炭素 …… 13
(2)　炭素の生成 …… 14
2.1.2　炭素の同素体 (allotropy) …… 17
2.1.3　黒鉛の結晶構造と多結晶黒鉛 (polycrystalline graphite) …… 20
2.1.4　炭素質と黒鉛質 …… 24

2.2　一般炭素材料 …… 27

2.2.1　炭素材料の概念 …… 27
(1)　一般的性質 …… 27
(2)　標準の製造方法 …… 30
(a)　粉砕 (grinding, pulverizing) …… 32
(b)　ふるい分け（分級）(sieving, sizing) と粒度配合 …… 33
(c)　混ねつ (kneading) …… 33
(d)　成形 (forming) …… 34
(e)　焼成 (baking) …… 35
(f)　含浸 (impregnation) …… 36
(g)　黒鉛化 (graphitization) …… 37
(h)　加工 (machining) …… 39

2.2.2 フィラーとバインダー……40
(1) 石油コークス (petroleum coke) ……43
(2) ピッチコークス (pitch coke) ……45
(3) 天然黒鉛 (natural graphite) ……46
(4) 無煙炭 (anthracite) ……46
(5) カーボンブラック (carbon black) ……46
(6) コールタールピッチ (coal tar pitch) ……47
(7) その他のバインダーほか……48
2.2.3 炭素化と黒鉛化……48
(1) 液相・固相および気相炭素化……49
(a) 液相炭素化……51
(b) 固相炭素化……55
(c) 気相炭素化……56
(2) ソフトカーボン (soft carbon) とハードカーボン (hard carbon) ……57
(3) 黒鉛化 (graphit zation) ……60
(a) 黒鉛化の機構……61
(b) 黒鉛化度に関係する各種のパラメーター……63
(c) 黒鉛化に関与する主要因子……70
2.2.4 特殊処理と複合化……74
(1) 含浸 (impregnation) ……75
(a) 液相含浸……75
(b) 気相含浸……75
(2) 混合 (mixing) ……78
(a) 異種炭素粉末……78
(b) 金属粉末……79
(c) 非金属無機系粉末……79
(3) 被覆, 表面処理 (coating, facing) ……80
(4) 複合化 (繊維強化 (fiber reinforcing), 積層 (laminating)) ……81
(5) 特殊加工その他……83
(a) 熱間加工 (hot-working) ……83
(b) 接合……84
(c) その他……85

2.3 新しい炭素材料および炭素化合物 ……86

2.3.1 バインダーを用いない炭素材料……86
(1) 自己焼結炭素材料……87

(a) 粘結炭を原料とする炭素材料……88
(b) メソフェーズ微小球体（メソカーボン・マイクロビーズ）を原料とする炭素材料……90
(c) 半成コークス（semi-coke）を原料とする炭素材料……90
(2) 熱分解黒鉛（pyrolytic graphite）……91
(a) PG の生成条件……92
(b) PG の構造と生成機構……93
(c) PG の性質……97
(d) PG の用途……99
(e) PG 関連物質……99
(3) ガラス状硬質炭素(glasslike-, vitreous-hard carbon, polymer carbon)… 100
(a) セルローズカーボン（cellulose carbon）…… 105
(b) ポリマーカーボン（polymer carbon）…… 106
(c) グラッシーカーボン（glassy carbon）およびビトロカーボン（vitro carbon）…… 109
(4) 炭素繊維（carbon fiber）…… 109
(a) セルローズ（レーヨン）系炭素繊維…… 114
(b) PAN 系炭素繊維…… 114
(c) ピッチ系炭素繊維…… 115
(d) その他の原料による炭素繊維…… 115
(5) 炭化ケイ素繊維（silicon carbide fiber）…… 116
2.3.2 特殊の製法によるその他の炭素材料…… 118
(1) シート状可撓性黒鉛…… 118
(2) カーボンフィルム…… 119
(3) カーボンペーパー…… 120
(4) カーボンフォーム…… 120
(5) 黒鉛ウィスカー（graphite whisker）…… 120
(6) その他…… 121
2.3.3 黒鉛層間化合物（graphite lamellar compound, intercalation compound, insertion compound）…… 121
(1) 酸化黒鉛（graphite oxide）…… 122
(2) フッ化黒鉛（graphite fluoride）…… 123
(3) 伝導性黒鉛層間化合物…… 123
(a) 層間化合物の生成…… 124
(b) 層間化合物の構造…… 124
(c) 層間化合物の性質と応用…… 125

2.4 性質と試験方法……………………………………………………… 127
2.4.1 物理的性質 (physical properties) …………………………… 127
(1) 熱的性質 (thermal properties) ………………………………… 127
(a) 比熱 (specific heat), エントロピー (entropy), エンタルピー (enthalpy) ……………………………………………………… 128
(b) 蒸気圧 (vapor pressure) ………………………………………… 128
(c) 炭素の相図 (phase diagram) …………………………………… 130
(d) 熱伝導度 (thermal conductivity) ……………………………… 130
(e) 熱膨張係数 (coefficient of thermal expansion, CTE) ……… 133
(2) 電気的・磁気的性質 (electrical and magnetic properties) ……… 135
(a) 熱処理による電気的・磁気的性質の変化…………………… 136
(b) 電気比抵抗 (electrical resistivity) ………………………… 140
(3) 機械的性質 (mechanical properties) ………………………… 142
(a) 比重 (specific gravity), 密度 (density) ………………… 143
(b) 気孔径分布 (pore distribution) と通気率(permeability, admittance) … 144
(c) 機械的強さ (mechanical strength) ………………………… 148
(d) 弾性率 (modulus of elasticity, elastic modulus) ………… 150
(e) 応力—ひずみ関係 (stress—strain relationship) およびクリープ (creep) ……………………………………………………… 151
(f) かたさ (hardness) ……………………………………………… 153
2.4.2 化学的性質 (chemical properties) ………………………… 154
(1) 灰分 (ash content)……………………………………………… 155
(2) 吸着ガス (adsorbed gas) およびガス発生 (gas evolution) ……… 155
(3) 酸化 (oxidation) ……………………………………………… 157
(a) 不純物の影響………………………………………………… 158
(b) 組織構造および材質の影響………………………………… 158
(c) 温度の影響…………………………………………………… 159
(d) 炭素材料の酸化防止………………………………………… 160
(e) 湿式酸化……………………………………………………… 160
(f) 他種気体との反応…………………………………………… 161
(4) 高温での金属への溶解ならびに炭化物の生成………………… 161
(5) 層間化合物 (lamellar compound) の生成……………………… 163
引用文献………………………………………………………………… 163
参考文献………………………………………………………………… 170

3 応用編—応用製品とその使用技術

3.1 炭素材料の利用分野 173

3.2 応用製品 182

3.2.1 電気炉用電極および発熱体 182

(1) 人造黒鉛電極 (artificial graphite electrode) 184

(a) 形状と寸法 184

(b) 製法，品種および特性 190

(c) 電気製鋼と人造黒鉛電極 193

(2) 炭素電極 (carbon electrode) およびび自焼式電極 (self baking electrode) 207

(a) 電気炉用炭素電極 208

(b) 電気炉用自焼式電極 210

(c) アルミニューム電解製錬用電極（陽極および陰極） 215

(3) 溶接用炭素棒 (welding carbon rod) 217

(4) 抵抗発熱体 (heating element) 218

(a) 抵抗発熱炉 219

(b) 高周波誘導炉 220

3.2.2 炭素質耐火物 (cabonaceous refractory material) および断熱材 (heat insulating material) 227

(1) カーボンブロック (carbon block) 229

(a) 高炉技術の進歩とカーボンブロック 230

(b) 高炉用カーボンブロックの品質 232

(c) カーボンブロックのその他の応用 236

(2) カーボンペースト (carbon paste) および カーボンセメント (carbon cement) 237

(a) カーボンペースト 237

(b) カーボンセメント 237

(3) 断熱材 (heat insulating material, insulator) 238

3.2.3 その他の冶金用炭素および黒鉛製品 240

(1) 黒鉛管 (graphite tube) 240

(a) ガス吹込管 (fluxing tube) 241

(b) 吹精管 (injection tube) …… 241
(c) 熱電対保護管 (thermocouple sheath) …… 241
(2) るつぼ (crucible), ボート (boat) その他 …… 242
(a) 黒鉛るつぼ …… 242
(b) 黒鉛ボート …… 244
(3) ダイス (die), 鋳型 (mold, mould), 定盤 (disc, stool) その他 …… 245
(a) ダイス …… 246
(b) 鋳型 …… 247
(c) 定盤その他 …… 250
(4) ホットプレス用黒鉛型 (graphite mold for hot pressing) …… 250
(a) 使用圧力と耐圧強度 …… 251
(b) クリープ …… 252
(c) 鋳型への付着 …… 252
(d) 加熱用電源の設計 …… 253
(5) 治具 (jig) …… 253
(a) アロイ治具 …… 254
(b) ステム治具 …… 254
(c) その他の黒鉛治具 …… 255
(6) 鋼板熱処理炉用ロール (hearth roll) …… 255
(7) アルミニウム押出し成形用部品 (aluminium extrusion accessories) …… 256
(a) 案内管 …… 256
(b) 滑り板 …… 256
(c) 冷却架台 …… 257
3.2.4 加炭材 (carbon raiser) …… 257
3.2.5 弧光用炭素棒 (arc carbon) …… 257
(1) 映写用カーボン (projector carbon, cinema carbon) …… 258
(2) 耐候試験 (weathering test) 用アークカーボン …… 259
(3) 模擬太陽 (solar simulation) 光源用アークカーボン …… 259
(4) 分光分析用炭素電極 (spectroscopic carbon electrode) …… 259
(a) 加工電極 (preformed electrode) …… 262
(b) 分光分析用高純度黒鉛粉
(spectroscopically pure graphite powder) …… 262
3.2.6 黒鉛電解板 (graphite anode) および
解汞材 (denuder, amalgam decomposer) …… 263
(1) 食塩電解用黒鉛陽極 (graphite anode for chlor-alkali electrolysis) …… 264
(a) 製造方法, 形状および特性 …… 265

(b) 水銀法と隔膜法 …… 266
(c) 電解板の消耗と電解諸条件 …… 268
(d) 電解板の特殊含浸処理とその効果 …… 270
(e) ガス抜き孔および溝加工 …… 271
(f) 導電棒の接続 …… 272
(g) 黒鉛陽極と金属陽極 (DSA) …… 273
(2) 解汞材 (denuder, amalgam decomposer) …… 274
(3) その他の黒鉛陽極 …… 274
(a) 塩素酸ソーダ用陽極 …… 274
(b) 海水電解用陽極 …… 275
(c) 二酸化マンガン用陽極 …… 275
(d) 溶融塩電解 (fused salt electrolysis) 用陽極 …… 276
(e) 防食用黒鉛陽極 (グラウンドアノード, ground anode) …… 278
3.2.7 電池用炭素電極 (battery carbon) …… 279
(1) マンガン乾電池 (manganese dry cell) 用炭素棒 …… 279
(2) 空気電池 (air cell) 用炭素電極 …… 279
(3) 燃料電池 (fuel cell) 用炭素電極 …… 280
(4) 電池用のその他の炭素材料 …… 281
3.2.8 放電加工 (electric discharge machining (EDM) および
電解加工 (electrochemical machining (ECM) 用電極 …… 282
(1) 放電加工用電極 …… 282
(2) 電解加工用電極 …… 285
3.2.9 電機用ブラシ (electrica machinery brush) …… 286
(1) 製造方法 …… 287
(2) 性質と用途 …… 291
3.2.10 集電子 (current collector), 接点 (electrical contact),
電子管陽極 (electronic tube anode, valve anode) その他 …… 293
(1) 集電子 …… 293
(a) パンタグラフ用すり板 (pantagraph shoe) …… 293
(b) トロリーシュー (trolley shoe),
トロリーホイール (trolley wheel) …… 295
(2) 接点 …… 296
(3) 電子管陽極およびグリッド …… 297
(4) その他の電気用炭素製品 …… 298
(a) 可変抵抗体 (variable resistor) …… 299
(b) マイクロホンカーボン (microphone carbon) …… 300

3.2.11 機械用炭素製品 (mechanical carbon products)……300
(1) 品種，製造および性質……302
(a) 樹脂結合質……305
(b) 炭素結合質……305
(c) 樹脂含浸質……305
(d) 金属含浸質……305
(2) 品種の選定と設計……305
(a) 軸受……305
(b) シールリング……308
(c) ベーン……310
(3) 機械用炭素材料の使用例と実績……312
(4) 機械用炭素繊維複合材料……313
(5) パッキン，ガスケット材料としてのシート状可撓性黒鉛……321
(a) パッキン……322
(b) ガスケット……325
3.2.12 固体潤滑剤 (solid lubricant)……328
3.2.13 ブレーキシュー (brake shoe)……329
3.2.14 不浸透黒鉛 (impervious graphite) および
その応用製品（化学装置・部品）……330
(1) 不浸透黒鉛の製造と特性……331
(a) 製造……331
(b) 物理的性質……332
(c) 化学的性質（耐食性）……333
(2) 不浸透黒鉛製品……333
(a) 熱交換器 (heat exchanger)……335
(b) 塔 (tower) および槽 (vessel, tank)……340
(c) ぬれ壁式吸収装置 (falling film type absorber)……341
(d) ポンプ (pump) およびエゼクタ (ejector)……342
(e) ポーラスカーボン (porous carbon)……343
(f) 破裂板 (rupture disc)……343
(g) 配管および部品 (piping and fittings)……343
(h) カーボンセメント (carbon cement)……344
(3) 不浸透黒鉛製装置による化学プラント……345
(a) 無水塩化水素ガス製造プラント……346
(b) 有機塩素化合物廃液処理プラント……346
(4) 耐熱性不浸透黒鉛の応用……347

(5) 設計・保守・取扱い…… 348
(a) 構造設計と安全率…… 348
(b) 圧力容器規格…… 348
(c) 食品衛生法関連基準…… 349
(d) 不浸透黒鉛製品の事故原因と保守・取扱い要領…… 349
3.2.15 活性炭 (active carbon, activated carbon) とその応用…… 350
(1) 活性炭の製造・種類・性質…… 351
(2) 活性炭の応用…… 354
(a) 溶剤回収…… 354
(b) 脱臭…… 356
(c) 水処理…… 357
(3) 活性炭の再生…… 357
3.2.16 原子炉用黒鉛 (nuclear graphite) …… 358
(1) 減速材・反射材黒鉛の品質と製造の諸要因…… 359
(a) 主原料…… 360
(b) 成形方式…… 361
(c) 純化処理…… 361
(d) 形状，寸法および加工…… 362
(2) 原子炉用黒鉛の性質…… 363
(a) 核的性質…… 363
(b) 純度…… 364
(c) 冷却材 (coolant) との両立性 (compatibility) …… 365
(3) 放射線照射の影響…… 366
(a) 蓄積エネルギー (stored energy) …… 366
(b) 放射線損傷による物性の変化…… 367
(4) その他の原子炉用黒鉛—炭素被覆核燃料ほか…… 369
3.2.17 炭素繊維および炭化ケイ素繊維とその応用 …… 370
(1) 炭素繊維の製法と種類…… 372
(2) 炭素繊維の応用…… 374
(a) 普通質炭素繊維の応用…… 377
(b) 高強度・高弾性炭素繊維の応用…… 379
(3) 炭化ケイ素繊維の応用…… 389
(a) 炭化ケイ素繊維／金属複合材料…… 389
(b) その他の炭化ケイ素繊維強化複合材料…… 390
3.2.18 その他の炭素応用製品 …… 391
(1) 生体用炭素材料 (biocarbon) …… 391

(2) 放射線反射材料……391

3.3 炭素材料および炭素製品の取扱いと管理……392

3.3.1 保管・貯蔵……392
3.3.2 運搬時の取扱い……393
3.3.3 組立て，取外し，保全……393
(1) 芯出しと支持……393
(2) 接続……394
(3) 酸化の予防……394
3.3.4 設計，加工その他……394
(1) 設計……394
(2) 加工……395
(3) 加工上の特徴……395
(4) 加工方法の選択……396
(5) 加工による汚染……397
(6) 加工精度……397
3.3.5 安全対策……398
(1) 電気事故……398
(2) 滑り……398
(3) 安全衛生……399

3.4 炭素にかける期待—その将来構想……399

(1) 製造技術の変革……400
(2) 省エネルギーへの指向……402
(3) 炭素原料の見直し……402
(4) 極限材料としての期待……403
引用文献……403
参考文献……406
関連規格……407
・炭素原料，素材および製品に関係あるおもな日本工業規格（JIS）……408
・炭素協会規格（JCAS）……409