

目 次

基 礎 編

1. 序 章

- 1.1 水素とは何か…………… (太田健一郎・石原顕光) ……2
 - a. 水素エネルギー……………2
 - b. 原子・分子としての水素……………7
- 1.2 自然界における水素…………… (相原雅彦) ……11
- 1.3 水素利用の歴史…………… (松澤幸一) ……14
 - a. 16世紀～18世紀……………14
 - b. 19世紀……………15
 - c. 20世紀以降……………16

2. 水 素 原 子

- 2.1 水素原子・プロトン…………… (久保真治・小泉 智) ……19
 - a. 水素原子の構造……………19
 - b. 水素原子のイオンへの変化……………21
 - c. 水素化物の多様性……………21
 - d. エネルギー源としての水素……………22
- 2.2 宇宙の始まりと水素…………… (須藤 靖) ……24
 - a. 元素の起源とビッグバン理論……………25
 - b. ビッグバン元素合成と宇宙誕生最初の3分間……………26
 - c. 宇宙の晴れ上がりから再電離へ……………28
 - d. 宇宙の本当の組成……………28
- 2.3 同 位 体…………… (久保真治・小泉 智) ……29
 - a. 同位体と放射性同位体……………29
 - b. 水素原子の同位体……………30

c. 同位体効果	30
d. 重水素	31
e. 三重水素	32

3. 水素分子

3.1 水素分子	(秋葉悦男) 34
3.2 オルト水素とパラ水素	36
3.3 水素分子の物理的性質	38
3.4 状態図	42
3.5 水素分子の化学的性質	43

4. 水素と金属

4.1 水素と金属	(千星 聡・松尾元彰・折茂慎一) 47
a. 金属-水素系の反応と平衡状態	47
b. 金属-水素系の熱力学	48
c. 金属中での水素の占有位置	52
d. 金属-水素系状態図の実例	54
4.2 金属中の水素の電子状態	(鎌倉 望・藤森 淳) 57
a. 単体金属水素化合物の電子状態	58
b. 水素貯蔵合金の電子状態	63
4.3 金属中の水素拡散	(青木 清) 64
a. 水素透過の過程	65
b. 定常状態拡散とフィックの第1法則	65
c. Nb-TiNi合金の微細組織と水素透過度および水素拡散係数	66
4.4 金属表面への吸着	(西宮伸幸) 70
a. 表面吸着から水素吸蔵まで	70
b. 水素吸着および水素吸蔵の実験事実	72
4.5 水素吸蔵合金	(中村優美子) 73
a. 水素貯蔵量	75
b. 平衡吸蔵・放出水素圧力	76
c. 反応速度	78
d. 繰り返し特性	79
4.6 水素脆性	(松岡三郎) 79
a. 水素脆性とは	79
b. 水素脆性メカニズム	80

c. 水素脆化データベース	83
---------------	----

5. 水素の化学

5.1 水素の生成	(吉信 淳・犬飼潤治・小堀良浩) 86
a. 吸蔵・吸着した水素からの水素ガス発生	86
b. 電気化学的な水素の発生	89
c. 水素生成の熱力学	91
5.2 無機物との反応	(李 海文・竹下博之・折茂慎一) 93
a. ホウ化物	93
b. 窒化物	96
5.3 有機物との反応	(堀口良昭) 98
a. 概要	98
b. 不均一系触媒による水素添加反応	99
c. 均一系触媒による水素添加反応	102
d. 均一系触媒による不斉水素添加反応	103
5.4 燃料電池	(太田健一郎・石原顕光) 105
a. 燃料電池総論	105
b. リン酸形燃料電池	108
c. 熔融炭酸塩形燃料電池	108
d. 固体酸化物形燃料電池	110
e. 固体高分子形燃料電池	111
f. 直接メタノール形燃料電池	112
g. アルカリ形燃料電池	112
5.5 二次電池	(棚瀬繁雄) 113
a. 高圧型ニッケル水素電池	113
b. ニッケル-金属水素化合物電池	115
c. 可逆型燃料電池	118

6. 水素と生物

6.1 水素結合と遺伝子	(谷生重晴) 121
a. 水素結合	121
b. 水素結合と遺伝子の二重らせん	124
6.2 水素と生物のエネルギー生産	125
a. プロトンポンプ	125
b. プロトン駆動力と生物のエネルギー生産	127

c.	プロトンモーター	128
6.3	光合成生物の水素代謝	(櫻井英博) 129
a.	水素代謝の酵素	129
b.	光化学反応中心と光合成電子伝達系	130
6.4	発酵と水素発生	(谷生重晴) 133
a.	発酵水素発生の経路	133
b.	理論最大水素収率	136

7. 水素の分析

7.1	概 説	(石原顕光) 137
7.2	ガスクロマトグラフィー	(長沢尚三) 140
a.	ガスクロマトグラフの原理	141
b.	昇温脱離分析法による水素分析	146
7.3	物質のCHN分析	151
a.	セラミックス・金属材料	(内原 博) 151
b.	有機物	(森田正義) 158
7.4	ラザフォード後方散乱分析法, 水素前方散乱分析法, 核反応解析法	(齋藤正裕) 164
a.	ラザフォード後方散乱分析法 (RBS)	165
b.	水素前方散乱分析法 (HFS)	167
c.	核反応解析法 (NRA)	169
7.5	昇温脱離法	(山根常幸) 172
a.	昇温脱離法とは	172
b.	昇温脱離法の測定例	173
7.6	フーリエ変換赤外分光法	(関 洋文) 177
a.	装置の構成	177
b.	赤外吸収スペクトルの読み方	178
c.	FT-IR のおもな測定方法	178
7.7	核磁気共鳴分光法	(林 繁信) 183
a.	基本原理	183
b.	測定の基本	184
c.	装置の概要	184
d.	測定の実際	185
e.	得られる情報と測定例	186
f.	他の分析法との比較	191

7.8	ラマン分光法	(酒井 彰) 192
a.	ラマン分光法とは	192
b.	水素分子のラマンシグナル	194
c.	水素化物の伸縮振動によるラマンシグナル	195
7.9	陽子弾性散乱同時計数法による水素分析	(小松原哲郎) 197
7.10	放射光を用いた分析	(青木勝敏) 202
a.	放射光の発生原理と光源特性	202
b.	放射光を利用した水素化物分析の特徴	203
c.	放射光を利用した水素化物の分析	204
7.11	中性子を用いた分析	(池田 進) 211
a.	中性子と物質波	211
b.	中性子の発生	212
c.	中性子の核散乱	213
d.	中性子と同位体	215
e.	水素を含む物質の構造解析	216
f.	最近の研究：水素の波動関数	217
g.	水素の科学の新時代	222

8. 水素の燃焼と爆発

8.1	水素燃焼の特性	(吉川典彦) 224
a.	最小着火エネルギー	224
b.	燃焼素反応機構	225
c.	爆発限界	227
d.	予混合火炎の特性	228
e.	燃焼による一酸化炭素の生成	229
8.2	水素爆発の特性	230
a.	爆燃と爆轟	230
b.	爆轟波の特性	231
c.	爆燃による爆風の評価	232
8.3	混合燃焼	234
a.	メタン-水素混合燃料	235
b.	エタノール-水素混合燃料	237

応用編

9. 水素の製造

9.1 概説	(安田 勇)	240
9.2 化石燃料改質	(廣瀬正典)	242
a. 水蒸気改質法		243
b. 部分酸化法		245
c. オートサーマル法		247
9.3 石炭ガス化	(原 三郎)	248
a. 石炭ガス化技術の概要		248
b. 石炭ガス化の基礎		249
c. 石炭ガス化による水素製造		250
d. 石炭ガス化と水素製造を組み合わせたシステム		251
9.4 炭化水素の熱分解	(多田旭男・岡崎文保)	253
a. 原料種		254
b. 水素製造原理		254
c. プロセスフロー		254
d. エネルギーバランス		256
e. 経済性		256
f. 実証例・実績例		257
g. 他水素製造方式と比較した特徴		257
h. 実用化または普及に向けた課題		259
9.5 メンブレンリアクター	(白崎義則)	260
a. メンブレンリアクター型水素製造装置の原理・特徴		260
b. メンブレンリアクター型水素製造装置の開発状況		262
c. 実用化に向けた課題		266
9.6 副生水素	(岩下博信)	267
a. コークス炉ガス		268
b. 食塩電解		269
c. 石油化学工業		270
9.7 水電解	(小林由則)	272
a. 水電解とは		272
b. 水電解の特徴		273
c. 水電解の基礎		274

d. アルカリ水電解		276
e. 固体高分子水電解		277
f. 高温水蒸気電解		278
g. 普及に向けた課題		279
9.8 バイオマス		280
a. 発酵による水素発生	(谷生重晴)	280
b. 光合成による水素発生	(櫻井英博)	284
c. バイオマスからの熱化学的水素製造技術	(川本克也)	288
d. 超臨界水ガス化法	(松村幸彦)	299
9.9 光電気化学法	(堂免一成)	304
a. 原理		306
b. 光電極の例		309
9.10 光触媒		311
a. 水分解用光触媒への期待		311
b. 光触媒による水の分解反応の原理		311
c. 可視光応答性光触媒材料		313
d. 可視光照射下で水を分解する光触媒の開発事例		315
e. 水分解用光触媒の現状と課題		318
9.11 太陽熱を利用する水素生成	(玉浦 裕)	320
a. 集光太陽熱の化学エネルギー変換		320
b. 酸素欠損型酸化物による集光太陽熱からの水素生成		321
c. 集光ビームの急速照射による α 酸素放出反応		323
9.12 原子力を使う水素製造	(久保真治・小貫 薫)	327
a. 原子力を水素製造に利用する意義		327
b. 原子力を使う水素製造方法		328
c. メタンの水蒸気改質法		329
d. バイオマスのガス化法		330
e. 水の電気分解法		330
f. 水の熱化学分解法		332
g. 水のハイブリッド熱化学分解法		335
h. 水の放射線分解		336

10. 水素の精製

10.1 概説	(小淵 彰)	340
a. 規格から見た水素純度		340
10.2 吸着法		343

a. PSA 法	343
b. 最近の PSA 技術	347
10.3 膜分離法	349
a. 多孔質膜	349
b. 非多孔質膜	350
c. 金属膜	353

11. 水素の貯蔵

11.1 概説	(西宮伸幸) 356
a. システムとしての水素貯蔵密度	356
b. 高比表面積材料における水素吸着の質量密度と比表面積との間の一般則	358
c. 水素吸蔵合金の位置づけ	359
11.2 高圧ガス	(鈴木 譲) 360
a. 高圧水素容器	361
b. 水素コンプレッサー	363
c. 水素ステーション	365
11.3 液体水素	(神谷祥二) 365
a. 水素液化機	366
b. 液体水素容器	370
c. 液体水素容器の開発動向	372
d. スラッシュ水素	373
11.4 水素吸蔵合金	374
a. 有望な合金	(西宮伸幸) 374
b. 合金製造法	(角掛 繁) 380
c. 熱交換器つき容器	383
11.5 有機ハイドライド	(岡田佳巳) 386
a. 有機ケミカルハイドライド法の概要と特徴	386
b. ハイドライド種の選定	388
c. 開発動向	389
d. 水素供給コスト	389
e. 水素サプライチェーン構想	390
11.6 無機ハイドライド	(小島由継) 392
a. 無機ハイドライド	392
b. 触媒を添加した無機ハイドライド	400
c. 複合無機ハイドライド	401

11.7 炭素材料による室温での可逆的水素貯蔵	(西原洋知・京谷 隆・伊藤 仁・内山 誠) 407
a. 炭素系材料による水素の物理吸着量	408
b. ゼオライト鑄型炭素	409
c. ゼオライト鑄型炭素の水素物理吸着量	410
d. 物理吸着とスピルオーバーを併用した水素貯蔵	411
11.8 システムとしての水素貯蔵	(竹市信彦) 414
a. 高圧圧縮水素貯蔵の限界	415
b. ハイブリッド水素貯蔵容器	416

12. 水素の輸送

12.1 概説	(岡野一清) 420
a. 水素の性質と輸送の課題	420
b. 圧縮水素と液体水素の輸送	421
c. パイプラインによる水素の輸送	421
d. 水素含有化学物質による水素の輸送	421
12.2 長距離海上輸送	422
a. 水素輸送技術	(石本祐樹・福田健三) 422
b. 液体水素輸送タンカー	(神谷祥二) 432
12.3 陸上輸送	437
a. 圧縮水素と液体水素の輸送	(松岡美治) 437
b. 液体水素輸送コンテナ	(神谷祥二) 443
12.4 パイプライン輸送	448
a. 水素パイプライン	(川口 忍) 448
b. 天然ガス・水素混合ガス	(亀山寛達) 452

13. 水素と安全

13.1 概説	(渡邊正五) 456
13.2 水素検出技術	457
a. センサー	(申ウソク) 457
b. 可視化	(二宮英樹) 465
c. 漏洩検知, 付臭剤	(瀬尾敦子) 472
13.3 水素材料の安全性	478
a. 金属材料の安全性	(松岡三郎) 478
b. 高分子材料の安全性	(西村 伸) 481

13.4	水素エネルギーシステムの安全性	483
a.	水素・燃料電池自動車の安全性	(松島和男) 483
b.	高圧水素容器の安全性	(三石洋之) 487
c.	水素ステーションの安全性	(尾上清明) 491
d.	家庭用燃料電池の安全性	(田島敦也) 492
13.5	防爆技術	496
a.	防爆構造	(堀口貞茲) 496
b.	安全性試験施設 (海外)	(福本 紀) 498
c.	安全性試験施設 (国内)	(渡邊正五) 501

14. 水素の利用

14.1	概 説	(福田健三) 503
14.2	原料として	505
a.	アンモニア合成	(魚谷信夫) 505
b.	石油精製	(畑中重人) 514
14.3	触媒による燃焼	(魚谷信夫) 519
a.	火炎燃焼	520
b.	触媒燃焼	521
c.	アンモニアエンジン	522
14.4	医療と水素	(太田成男) 524
a.	酸化ストレスと抗酸化作用	525
b.	水素分子の生体内での抗酸化作用	526
c.	水素水の有効性と医学的利用の将来性	526
d.	水素水および水素ガスの臨床試験	527
14.5	発電機の冷却材	(丹 光義) 528
a.	発電機冷却方式	528
b.	水素冷却方式	529
14.6	核 融 合	(石本祐樹) 532
a.	核融合反応の種類	532
b.	核融合エネルギー研究	533
c.	核融合炉内の水素について	535
14.7	水素製鉄	(永浜 洋) 539
a.	鉄鋼業の現況	541
b.	水素還元の特徴	546
c.	水素製鉄の試み	549

15. エネルギーキャリアとしての水素の利用

15.1	概 説	(光島重徳) 555
15.2	エネルギーキャリアの必要性	(西宮伸幸) 559
a.	水素エネルギーキャリアの特徴	560
b.	エネルギーキャリアとしての水素を熱力学的にみる	561
15.3	燃料電池	563
a.	小型定置用燃料電池	(内田 誠) 563
b.	大型定置用燃料電池	(渡辺隆夫) 571
c.	燃料電池自動車	(宇野草一郎) 577
d.	燃料電池鉄道車両	(山本貴光) 584
e.	モバイル電子機器用燃料電池	(大岡秀行) 586
f.	燃料電池式ウォークリーフット	(徳田 肇・藤原 隼) 590
15.4	ニッケル-金属水素化物電池	(井上博史) 594
a.	ニッケル-金属水素化物電池の概要	594
b.	ニッケル-金属水素化物電池の高性能化と材料開発	596
c.	ニッケル-金属水素化物電池の用途展開	597
15.5	水素燃料ガスタービンエンジン	(山根公高) 602
a.	ガスタービンエンジンの原理	602
b.	水素燃料タービンの開発現状	604
c.	水素燃料タービンを利用したヨーロッパの水素燃料飛行機	604
15.6	水素ディーゼルエンジン	(赤川裕和) 607
a.	水素ディーゼルエンジンシステムの特徴、基本構成	607
b.	燃焼上の技術課題と対策	608
c.	水素ディーゼルエンジンの燃焼特性	609
d.	信 頼 性	611
15.7	水素エンジン	612
a.	水素エンジンの燃焼の理論と実際	(塩路昌宏) 612
b.	水素エンジン自動車	(山根公高) 619
15.8	航空・宇宙への利用	(曾根理嗣) 624
a.	輸送技術への水素の利用	624
b.	電力技術への水素の利用	626

16. 環境と水素

16.1	環境対策としての水素の歴史	(岡崎 健) 631
------	---------------	------------

a.	水素利用の歴史	631
b.	水素の環境問題への対応の歴史	631
16.2	石油の脱硫 (小堀良浩)	633
a.	水素化脱硫プロセスの概要	634
b.	ガソリンおよび軽油の脱硫	637
16.3	地球環境と水素 (岡崎 健)	639
a.	温暖化対策としての水素エネルギー導入の意義	639
b.	水素社会への中間シナリオ	639
c.	低炭素社会実現における水素の役割	640
16.4	水素をキャリアとしたエクセルギー増進	642
a.	エクセルギーとエネルギーの質	642
b.	燃料の水蒸気改質水素化によるエクセルギー増進	643
c.	自己熱再循環型バイオマスの水素リッチガス化	645
16.5	環境負荷係数 (石原顕光)	646
a.	エントロピーの観点の導入	646
b.	水素エネルギーシステムと物質循環	647
c.	エネルギー環境負荷係数の導入	650
d.	エネルギー環境負荷係数を用いた局所環境に及ぼす影響の評価	651

17. 水素エネルギーシステムの実現への道筋

17.1	概 説 (太田健一郎・石原顕光)	654
17.2	ローカル水素ネットワーク (岡島裕一郎)	655
a.	概 要	655
b.	ローカル水素ネットワークの形態	657
c.	ローカル水素ネットワークの国内実証試験例	661
d.	ローカル水素ネットワークの課題	661
17.3	水素立国をめざすアイスランド (松澤幸一・太田健一郎)	662
17.4	グローバル水素システム—パタゴニア風力と水素 (勝呂幸男)	667
a.	風力発電システム	667
b.	アルゼンチンのパタゴニア地方の2州の風況と地勢	670
c.	2州における潜在風力エネルギー量検討	673
d.	2州における風力発電の実績と今後の風車接置に関する考察	674
e.	水素の製造量とそのコストについて	674
17.5	各国・地域に応じた水素導入のシナリオ (相原雅彦)	676
a.	日本の水素導入のシナリオ	676
b.	アメリカの水素導入シナリオ	678

c.	EUの水素導入シナリオ	679
d.	日本, アメリカ, EUの水素エネルギー導入戦略の比較	681
17.6	自動車用水素インフラ (町田智英・池田哲史)	682
a.	インフラ整備のシナリオ	683
b.	自動車用水素インフラの現状	684
c.	自動車用水素インフラの今後	688
17.7	未来社会における水素エネルギーシステム (太田健一郎・石原顕光)	692
a.	地球レベルでの課題	692
b.	持続型成長への道	693
c.	未来の水素エネルギー社会	695

コラム

9-a	犠牲試薬を利用した水分解半反応 (堂免一成)	315
15-a	燃料電池の発明 (光島重徳)	564
15-b	リン酸形燃料電池の開発 (吉岡 浩)	573
15-c	日本初の燃料電池車 (池田宏之助)	579

索 引	697
-----	-----