

目 次

監修者序文	太田時男
第1章 水素エネルギーシステムの概要	1
第1節 地球環境問題の概観	3
1. はじめに	3
2. 地球環境問題の範疇	3
3. 地球環境問題の歴史的意義	7
4. 地球温暖化	7
5. 地球環境問題の意味するもの	9
6. 大いなるチャレンジ	11
7. 水素エネルギーシステム評価の視点	11
第2節 水素エネルギーの特徴	13
1. エネルギーの十字路：水素	13
2. 一次エネルギー資源	15
2.1 化石燃料	15
2.2 原子力	15
2.3 太陽エネルギー（直接）	15
2.4 間接太陽資源	15
2.5 その他の自然エネルギー	16
3. 水素燃料の特徴	16
3.1 高い可燃性	17
3.2 触媒活性	17
3.3 低公害性	18
4. 水素の貯蔵・輸送性の特徴	18
4.1 長距離輸送のニーズ	18
5. 水素エネルギーの変換の特徴	19
5.1 間接型水素エネルギー	19
6. 水素エネルギーの利用の方向	20
第3節 地球環境と水素エネルギー	23
1. はじめに	23
2. 地球温暖化と二酸化炭素	23
3. 二酸化炭素排出防止対策	25
4. 二酸化炭素の固定法	26
5. 二酸化炭素の接触水素化による再資源化 技術	27
5.1 メタノール合成	29
5.2 メタン化反応	30
5.3 炭化水素合成	30
5.3.1 直接合成法	31
5.3.2 一酸化炭素経由法	31
5.3.3 メタノール経由法	31
6. 水素の供給	32
7. おわりに	33
第2章 水からの水素製造技術	35
第1節 水の電気分解法	37
1. アルカリ水電解法	37
1.1 はじめに	37
1.2 アルカリ水電解の原理	38
1.2.1 電解電圧	38
1.2.2 効 率	40
1.3 水電解槽の構造	40
1.3.1 単極型電解槽	40
1.3.2 複極型電解槽	41

1.4	高圧式水電解槽	42	2.1.5.3	素子モジュールの現状技術と性能	68
1.5	実用されている水電解槽	44	2.1.6	プロセスエンジニアリング	68
1.6	進歩した電解槽	44	2.1.6.1	他の熱源からの熱供給プロセス (ALLOTHERMAL PROCESS)	70
1.6.1	電解の高温高圧化	44	2.1.6.2	熱自給プロセス (AUTO - THERMAL PROCESS)	71
1.6.2	高温化の問題点と解決法	44	2.1.7	プラント設計の可能性	71
1.6.2.1	隔膜材料	44	2.1.7.1	電解槽容器	71
1.6.2.2	電極	46	2.1.8	排熱回収	72
1.7	電解槽の開発例	47	2.1.9	コストの展望	73
1.7.1	サンシャイン電解槽	47	2.2	固体高分子型水電解法	74
1.7.1.1	温度	47	2.2.1	固体高分子型水電解の原理と技術背景	74
1.7.1.2	圧力	49	2.2.2	固体高分子型水電解の特徴	75
1.7.1.3	電流密度	50	2.2.2.1	一般的特徴	75
1.7.1.4	全体のシステム	50	2.2.2.2	電解特性における特徴	75
1.7.1.5	運転の結果	53	2.2.2.2.1	槽電圧	75
1.7.2	その他の進歩した電解槽	55	2.2.2.2.2	電流効率	76
1.7.2.1	ポリアンチモン酸隔膜の電解槽	55	2.2.2.2.3	ガス純度	76
1.7.2.2	エレクトロライザー槽	55	2.2.3	電解槽材料と技術の概要	77
1.8	電解水素のコスト	56	2.2.3.1	固体電解質として用いるイオン 交換膜	77
1.8.1	電解槽の設備費	56	2.2.3.2	膜への電極の接合法および触媒電 極	78
1.8.2	水素のコスト	57	2.2.3.2.1	膜 - 電極接合体の製造方法	78
1.9	おわりに	57	2.2.3.2.2	触媒電極	79
2.	固体電解質水電解法	58	2.2.3.3	給電体および電解槽の構成	79
2.1	高温水蒸気電気分解	58	2.2.4	固体高分子型水電解の性能の現状	80
2.1.1	はじめに	58	2.2.5	今後の課題と展望	82
2.1.2	水蒸気からの水素生産のための熱力 学	58	2.3	酸化物固体電解質水電解法	85
2.1.3	高温水蒸気電気分解の一般的特性	60	2.3.1	はじめに	85
2.1.4	高温水蒸気電気分解装置の構成要素	61	2.3.2	水蒸気電解の原理	85
2.1.4.1	設計要件	61	2.3.3	エネルギー効率上の利点	85
2.1.4.2	円筒型素子モジュール	62	2.3.4	プロセス上の利点	86
2.1.4.3	構成要素の必要条件	65			
2.1.5	電気分解動作データ	66			
2.1.5.1	一般的な電池 (素子) 動作の概要	66			
2.1.5.2	単素子の特性	67			

2.3.5 電解セルの構成と材料	87	1. 一次エネルギーとしての太陽エネルギー	113
2.3.5.1 固体電解質	88	2. 太陽エネルギーの化学的変換法	114
2.3.5.2 電極材	89	2.1 植物が行っている光合成反応	114
2.3.5.3 インタコネクタその他の部材	90	2.2 光エネルギーの化学エネルギーへの変換の原理	115
2.3.6. 適用できるプロセスとその開発状況	90	3. 半導体電極を用いる水の光分解	116
2.3.6.1 原子炉熱源を利用した大量水素の製造と電力貯蔵	90	3.1 半導体電極	116
2.3.6.2 太陽熱を利用した水素の製造	91	3.2 酸化チタン電極の特性と水の光分解	117
2.3.6.3 ヒートエンジンとしての水蒸気電解	92	3. 太陽光のもとでの水素発生実験	118
2.3.6.4 核融合用トリチウムの精製	94	4. 光触媒による水の光分解	121
第2節 熱化学サイクルによる水の分解法	96	5. 光触媒反応の応用	122
1. 熱化学分解法の原理	96	6. 生物による水の光分解と水素生産	124
2. 水の熱化学分解法の歴史	97	6.1 生物と光による水からの水素生産機構	124
3. 想定するエネルギー源	99	6.2 水素生産に関与する酵素	124
4. UT-3サイクル	99	6.2.1 ニトロゲナーゼの分子構造と作用	125
4.1 反応性セラミックス	101	6.2.2 ヒドロゲナーゼの分子構造と作用	126
4.2 熱化学サイクル用充填層反応器	102	6.3 水素生産を阻害する三大要素	128
4.3 熱化学サイクル用材料技術	102	6.3.1 酸素	128
4.4 熱化学サイクル用分離技術	104	6.3.2 電子を取り去る反応	128
4.5 MASCOTプラントによる連続運転	104	6.3.3 水素吸収酵素	128
5. ISプロセス	105	6.4 生細胞による水からの水素生産	129
5.1 水素連続製造試験	105	6.4.1 緑藻類による水素生産	129
6. プロセス排熱や核熱を利用する熱化学プロセスの経済評価	107	6.4.2 藍藻類による水素生産	130
7. 太陽熱を利用する熱化学プロセス	109	6.4.2.1 ヘテロシスト連鎖状藍藻類による水素生産機構	130
7.1 蓄熱と昇温機能を持つケミカルヒートポンプ	109	6.4.2.2 非ヘテロシスト連鎖状藍藻類による水素生産	131
7.2 プロセスの構成	109	6.4.2.3 好氣的窒素固定単細胞藍藻による水素生産	132
7.3 プロセスの可能性	111	6.5 細胞増殖を伴わない条件での水素生産と酸素生産の時間的分離	134
8. 水の熱化学分解プロセスにおける今後の課題	112	6.6 シネココッカス Miami BG043511の水素生産量と酸素に対する抵抗性	136
第3節 水の光分解法	113		

第3章 水素の分離・精製技術…………… 139

第1節 高分子膜による水素の分離法

…………… 141

1. 水素分離膜モジュール…………… 141

2. エンジニアリング的考察…………… 142

2.1 分離係数…………… 142

2.2 他の方法との比較…………… 142

2.3 アンモニアプラントパージガス…………… 143

2.4 石油精製プラント…………… 144

2.5 導入に当たって…………… 145

2.6 実績の例…………… 145

2.7 実績の例(その2)…………… 145

3. 高分子膜の最近の研究…………… 146

第2節 金属膜による水素の分離法

…………… 149

1. はじめに…………… 149

2. 分離の原理…………… 149

3. 溶解・拡散機構…………… 150

4. 水素分離膜として用いられる金属

および合金…………… 153

5. 分離膜の作製…………… 153

5.1 単独で使用される膜…………… 153

5.2 支持体上に形成された膜…………… 153

5.2.1 めっき法…………… 153

5.2.2 気相法…………… 154

6. 各種金属膜の水素分離能…………… 155

6.1 PdおよびPd合金膜…………… 155

6.1.1 実用分離膜…………… 155

6.1.2 分離能改善の試み…………… 157

6.2 バナジウム膜…………… 159

6.3 水素吸蔵合金膜…………… 160

7. 水素同位体分離膜…………… 163

8. 水素分離能に及ぼす原料ガス中の不純物の影響…………… 165

9. メンブレンリアクター…………… 166

10. おわりに…………… 167

第4章 水素の貯蔵・輸送技術…………… 171

第1節 気体水素の貯蔵・輸送…………… 173

1. 気体水素の貯蔵…………… 173

1.1 気体水素の貯蔵設備の種類と特徴…………… 173

2. 気体水素の輸送…………… 176

2.1 パイプラインによる気体水素の輸送…………… 176

2.2 高圧ガス容器による気体水素の輸送…………… 176

3. 気体水素の貯槽,容器に対する法規制…………… 180

第2節 液体水素における貯蔵・輸送

…………… 183

1. 水素の液化…………… 183

1.1 原料水素の精製…………… 183

1.1.1 パラジウム触媒による酸素の除去…………… 183

1.1.2 PSA (Pressure Swing Adsorption)…………… 183

1.1.3 低温吸着精製装置…………… 186

1.2 液化プロセス…………… 186

1.3 オルソ・パラ変換…………… 189

2. 液体水素の貯蔵と輸送…………… 192

2.1 貯蔵用タンク…………… 192

2.2 輸送・貯蔵兼用タンク…………… 194

2.3 輸送用タンク…………… 199

2.4 専用船計画	202	1.5 チタン系金属水素化物	229
2.5 パイピングによる輸送	205	1.6 ジルコニウム系金属水素化物	233
2.6 断熱	206	1.7 バナジウムおよびニオブ系金属水素化物	236
第3節 金属水素化物による水素の貯蔵・輸送	208	2. 水素の貯蔵・輸送システム	237
1. 金属水素化物の種類と特性	208	2.1 水素を貯蔵・輸送するために	237
1.1 金属水素化物に要求される特性	208	2.2 水素貯蔵容器開発と合金との関連性	238
1.1.1 初期活性	209	2.3 水素の貯蔵用として適した合金	239
1.1.2 反応熱	209	2.4 定置式水素貯蔵容器の開発	240
1.1.3 水素吸蔵量	211	2.4.1 国外における定置式水素貯蔵容器の開発	240
1.1.4 ヒステリシスとプラトーの傾斜	212	2.4.2 国内における定置式水素貯蔵容器の開発	244
1.1.5 微粉化と熱伝導性	213	2.5 水素ポンペに代わる移動用水素貯蔵容器	247
1.1.6 耐久性と被毒	213	2.6 水素の輸送に利用できる合金	248
1.1.7 反応速度	215	2.7 水素輸送容器の開発	249
1.1.8 安全性	215	2.8 発電機水素純度維持装置の開発	251
1.1.9 合金のコスト	215	2.9 水素貯蔵・輸送容器の開発の課題	252
1.1.10 合金特性の改善	215		
1.2 マグネシウム系金属水素化物	218		
1.3 カルシウム系〔金属水素化物〕	222		
1.4 希土類系金属水素化物	224		

第5章 水素の電力への変換技術 255

第1節 燃料電池 257

1. 概論	257
1.1 燃料電池の構成	257
1.2 燃料電池の中でのエネルギー収支	261
1.3 燃料電池の特徴	262
1.4 燃料電池の種類	263
1.4.1 アルカリ電解質型燃料電池	263
1.4.2 リン酸型燃料電池	263
1.4.3 熔融炭酸塩型燃料電池	263
1.4.4 固体高分子膜型燃料電池	264
1.4.5 固体電解質型燃料電池	264
2. アルカリ型電解質燃料電池	264
2.1 電解液循環型	265

2.2 スターブド電解液型	266
3. リン酸型燃料電池	270
3.1 はじめに	270
3.2 原理と電極反応	271
3.3 発電システムの基本構成	271
3.4 発電システムの構成要素—燃料電池本体 (発電部, Power Sectionとも呼ばれる)	272
3.4.1 セル構造と材料	272
3.4.2 スタックの構成	274
3.4.3 特性と寿命	275
3.4.4 電池性能に及ぼす運転条件などの影響	276
3.5 発電システムの構成要素—改質装置, 直	

交変換装置（逆変換装置）など……	277	5.5 端子電圧……	303
3.5.1 燃料改質装置……	277	5.6 電池材料の種類と性質……	304
3.5.2 直交変換装置（逆変換装置とも呼ばれる）……	278	5.6.1 固体電解質……	305
3.5.3 制御・保護装置……	278	5.6.2 空気極……	306
3.5.4 その他の構成機器……	279	5.6.3 燃料極……	307
3.6 発電システムの特徴……	279	5.6.4 インターコネクタ……	310
3.7 開発の現状……	279	5.7 燃料電池の構造と構成……	312
3.7.1 アメリカにおける現状……	280	5.7.1 単セル構造の分類……	312
3.7.2 わが国における現状……	280	5.7.2 平板型単セルとスタック構成……	312
3.7.3 ヨーロッパにおける現状……	283	5.7.3 円筒型単セルと集合体……	313
3.8 今後の課題と展望……	284	5.7.4 なぜ運転温度が1000℃と高いのか……	314
4. 熔融炭酸塩型燃料電池……	285	5.7.5 燃料電池発電システム……	315
4.1 はじめに……	285	5.8 研究開発の状況……	316
4.2 原理と電極反応……	286	5.8.1 わが国の研究開発の状況……	316
4.2.1 発電原理……	286	5.8.2 外国における研究開発の状況……	316
4.2.2 電極反応……	287	6. 固体高分子型燃料電池……	318
4.2.2.1 アノード反応……	287	6.1 原理と技術背景……	318
4.2.2.2 カソード反応……	288	6.2 特徴……	320
4.3 電池の構造と材料……	288	6.3 技術の概要と課題……	321
4.4 システムの構成……	289	6.3.1 電解質膜……	321
4.5 特性……	290	6.3.2 電極および膜への接合法……	322
4.6 開発状況……	292	6.3.3 作動条件と電池特性……	323
4.6.1 わが国の開発状況……	292	6.4 これからの用途……	324
4.6.2 アメリカにおける開発状況……	296	7. その他の燃料電池（メタノール燃料電池,ヒドラジン燃料電池）……	325
4.6.3 オランダ……	298	7.1 はじめに……	325
4.6.4 イタリア……	298	7.2 メタノール燃料電池……	325
4.6.5 ドイツ……	298	7.2.1 概要……	325
4.6.6 スペイン……	299	7.2.2 構成……	325
4.6.7 デンマーク……	299	7.2.3 反応……	326
4.6.8 スウェーデン……	299	7.2.4 電極……	327
5. 固体酸化物燃料電池……	300	7.2.5 開発状況……	327
5.1 はじめに……	300	7.2.6 特長と問題点……	328
5.2 固体酸化物燃料電池の原理……	301	7.3 ヒドラジン燃料電池……	329
5.2.1 固体酸化物燃料電池とは……	301	7.3.1 概要……	329
5.2.2 水素の酸化反応……	301	7.3.2 構成……	329
5.3 燃料電池の反応……	302	7.3.3 反応……	329
5.4 燃料電池の起電力……	303		

7.3.4	電 極	330	2.2.4	水素吸蔵合金電極	351
7.3.5	開発状況	330	2.2.4.1	電池用合金	351
7.3.6	特長と問題点	331	2.2.4.2	電極作製法	352
第2節 水素を用いる二次電池		332	2.2.4.3	水素の電気化学的吸蔵・放出機構	353
1.	気相水素を用いるニッケル・水素電池	332	3.	ニッケル・水素蓄電池	355
1.1	電池の概要	332	3.1	はじめに	355
1.2	電池の原理と電極反応	333	3.2	実用化への技術課題とその改善	357
1.2.1	電極反応および起電力	333	3.2.1	高容量かつ耐久性に優れる水素吸蔵合金電極	357
1.2.2	過充電,過放電時の電極反応	334	3.2.2	サイクル寿命特性	359
1.3	電池の構成および素材	334	3.2.3	急速充電特性	360
1.4	電池の構造	338	3.2.4	保存特性	362
1.5	電池の特性	340	3.3	実用化された高容量密閉式ニッケル・水素蓄電池	363
1.6	用 途	343	3.3.1	電池構造と電池構成	364
1.7	取り扱い上の注意	343	3.3.2	電池特性	364
1.8	最近の動向	343	3.4	今後の展開	368
1.8.1	世界	343	第3節 水素燃焼タービン発電システムの開発現状と今後の課題		370
1.8.2	日本での開発状況	344	1.	はじめに	370
2.	ニッケル・水素化物電池	346	2.	発電システムの特徴	370
2.1	はじめに	346	3.	開発動向	372
2.2	ニッケル-水素化物電池の作動特性と電池用水素吸蔵合金	347	3.1	海外の研究開発動向	372
2.2.1	電池構成	347	3.2	国内の研究開発動向	374
2.2.2	充放電反応とその特性	347	4.	今後の課題	376
2.2.3	密閉化と過充電・過放電反応	350	5.	おわりに	378
第6章 水素の動力への変換技術		381			
第1節 自動車用水素エンジン		383			
1.	はじめに	383			
2.	基本的出力特性	384			
2.1	出力に与える燃料の影響	384			
2.2	燃焼反応に関する計算	385			
2.3	燃料間の比較	386			
2.3.1	外部混合方式,水素とガソリンエンジンの比較	386			
2.3.2	筒内噴射方式,水素とディーゼル軽油の比較	387			
2.3.3	燃焼後モル数の減少	388			
3.	異常燃焼	389			
3.1	バックファイヤの影響	389			
3.2	BF発生メカニズム	390			
3.3	BF対策	392			

3.4 水素-酸素 (H ₂ - O ₂) エンジン	396	7.2.6 ポンプ内の作動測定	422
4. 低圧噴射2サイクルエンジン	398	8. まとめ	424
4.1 H ₂ 筒内噴射2サイクルの特徴	398	第2節 液体水素を用いた水素自動車	427
4.2 実験例	399	1. はじめに	427
5. 高圧噴射方式	400	2. 自動車への応用前の水素エンジン研究史	427
5.1 意義	400	3. 高圧水素タンク (別名ボンベ) 自動車	428
5.2 噴射法	401	4. 液体水素 (LH ₂)・外部混合方式	429
5.3 点火法	401	5. LH ₂ - 直接水素噴射自動車	444
5.3.1 熱面点火	402	5.1 低圧噴射 (または前期噴射)	444
5.3.2 火花点火	403	5.2 高圧噴射	450
5.4 燃 焼	405	6. 今後の動向	458
5.4.1 高圧噴射の燃焼特性	405	第3節 金属水素化物を用いた水素自動車	465
5.4.2 水素噴流の形成	406	1. はじめに	465
5.4.3 火炎伝播	406	2. 開発の背景と歴史	466
5.4.4 燃焼の改善	406	2.1 背景	466
6. NO _x 特性	411	2.2 開発の歴史と現状	466
6.1 燃焼ガス温度	411	3. 水素自動車の概要	468
6.1.1 初期燃焼	411	3.1 MH自動車の構造	468
6.1.2 混合気と燃焼最高温度 T ₄ の計算	411	3.2 水素自動車の性能	469
6.2 外部混合のNO _x	412	3.2.1 動力,燃費性能	469
6.3 噴射燃焼のNO _x	414	3.2.2 排気ガス性能	469
6.3.1 混合気形成とNO _x	414	3.3 MH自動車の安全性	470
6.3.2 高圧噴射法HIのNO _x とその抑制	414	4. 自動車用水素吸蔵合金	470
7. 液体水素 (LH ₂) とLH ₂ ポンプ	418	4.1 開発状況と課題	470
7.1 LH ₂ の必要性	418	4.2 自動車用吸蔵合金の要求特性	471
7.1.2 水素噴射のための高圧化が容易	418	4.3 合金開発の現状	473
7.1.3 冷却用	419	4.4 合金設計例と評価	473
7.1.4 問題点	419	4.4.1 PCT (水素圧-組成等温) 特性	473
7.2 LH ₂ ポンプ	420	4.4.2 反応速度	473
7.2.1 ポンプの大きさ	420	4.4.3 耐久性	473
7.2.2 無潤滑ピストンとシリンダすべり面	420	5. MH自動車用エンジン	474
7.2.3 熱膨張差の補正	420	5.1 MH自動車用エンジンの現状	474
7.2.4 シリンダ往復方式	421	5.2 MH加熱用エンジンの機能	474
7.2.5 ガス圧縮	422		

6. 燃料供給システム	475	4. 極超音速輸送機	522
6.1 システムの現状と課題	476	5. 環境についての考慮	527
6.2 燃料供給システムの要求仕様	476	6. 安全性	529
6.3 システム構成	478	7. おわりに	531
6.3.1 燃料タンクの構造	478	第5節 水素による高速推進機関	534
6.3.2 熱交換方式	478	1. はじめに	534
6.4 燃料の補給	480	2. 各国のスペースプレーン計画とそのエンジン開発	534
6.5 燃料系の安全システム	482	2.1 米 国	534
7. MH自動車の開発事例	482	2.2 英 国	535
7.1 マツダのMH試作車の概要	482	2.3 ドイツ	535
7.1.1 エンジン	483	2.4 ロシア	535
7.1.2 吸蔵合金	483	2.5 日 本	535
7.1.3 燃料タンク	483	3. 作動原理と性能	536
7.1.4 燃料供給システム	483	4. 空気吸入エンジン	537
7.2 マツダのMH試作車の性能	486	4.1 スクラムジェットエンジン	537
7.2.1 排気ガス性能	486	4.1.1 空気取入口	540
7.2.2 動力性能	486	4.1.2 燃焼器	540
8. 今後の研究課題	486	4.1.3 ノズル	540
9. おわりに	487	4.1.4 冷 却	540
第4節 水素燃料航空機	488	4.2 エアターボラムジェットエンジン	541
1. はじめに	488	4.3 LACE (液化サイクルエンジン)	542
2. 亜音速輸送機	488	4.4 RB545エンジン	542
2.1 概論	488	5. ロケットエンジン	544
2.2 エンジン設計	490	6. 燃 料	545
2.3 燃料搭載	493	6.1 燃焼特性	545
2.3.1 タンク構造	495	6.2 冷却能力	545
2.3.2 タンク断熱	498	7. その他の高速推進機関	548
2.4 燃料システム	505	第6節 金属水素化物を用いた動力変換システム	550
2.4.1 エンジンへの燃料供給	506	1. はじめに	550
2.4.2 燃料補給と排出	511	2. MHの特性とその材料	550
2.4.3 タンク通気弁と加圧	511	3. アクチュエータの構成とモデル	552
2.5 航空機の最終設計	512	3.1 原理的構成	552
2.6 他の燃料との比較	512	3.2 試作アクチュエータの構成	552
2.7 航空機の大小の比較	517	3.2.1 反応容器部	552
2.8 水素にした場合のコスト改善	517		
3. 超音速旅客機	518		
3.1 一般的記述	518		

3.2.2 駆動部	553	5. アクチュエータの駆動特性	558
3.3 アクチュエータのモデルと同定	553	5.1 変位出力アクチュエータの特性	558
3.3.1 モデリング	553	5.2 力出力アクチュエータの特性	560
3.3.2 パラメータ同定	555	6. おわりに	561
4. ペルチェ素子の非線形特性補償	557		
第7章 水素と熱の相互変換技術	563		
第1節 水素の燃焼技術	565	3.2 中高温用材料 (100~200℃)	587
1. 水素の燃料としての特徴	565	3.3 低温用材料 (0~-20℃)	587
2. 水素の炎燃焼技術	566	3.4 反応速度と寿命特性	588
2.1 従来型ガス燃焼器具の水素転用におけ る問題点	566	3.4.1 反応速度	588
2.2 水素開放炎のジレンマ	567	3.4.2 寿命特性	589
2.3 密閉型・空気圧送式燃焼炉におけるNO _x 発生レベル	568	3.5 まとめ	589
2.4 水素に適した炎燃焼技術	568	4. 熱利用システムの要素技術	590
2.4.1 高速バーナー	568	5. 熱輸送システムへの応用例	591
2.4.2 強化二段燃焼バーナー	569	5.1 試作熱輸送システムの仕様と構成	591
2.4.3 不活性ガス希釈燃焼	569	5.2 試作熱輸送システムの運転特性	592
3. 水素の触媒燃焼	570	6. 冷凍システムへの応用例	593
3.1 燃焼触媒	571	6.1 試作冷凍システムの仕様と構成	593
3.2 水素の触媒燃焼バーナー	574	6.2 試作冷凍システムの運転特性	595
4. おわりに	578	7. 保冷システム(花の育成システム)への応用 例	596
第2節 金属水素化物による熱利用技術	580	8. まとめと今後の展望	598
1. はじめに	580	第3節 金属水素化物ヒートポンプ	600
2. 金属水素化物の反応熱の応用原理	581	1. はじめに	600
2.1 金属水素化物の反応原理と温度レベル への対応	581	2. 金属水素化物ヒートポンプに用いられる水 素吸蔵合金	600
2.2 熱輸送システム,冷凍システムへの応用 の可能性	582	3. 金属水素化物ヒートポンプの原理	602
2.3 熱輸送システムの原理と特長	583	3.1 基本原理	602
2.4 冷凍システムの原理と特長	584	3.2 圧縮式ヒートポンプ	604
3. 熱利用水素吸蔵合金材料の要素技術	586	3.3 多重効用型ヒートポンプ	605
3.1 熱利用水素吸蔵合金に要求される特性 と開発課題	586	4. 金属水素化物ヒートポンプの実証試験例	606
		4.1 顕熱回収式低圧作動二重効用型冷暖房 ヒートポンプ	606
		4.1.1 システム構成	606

4.1.2 実証実験結果	609	611
4.2 大型熱駆動式ヒートポンプ	610	612
4.3 大型圧縮式ヒートポンプ	610	613
4.4 夜間電力利用冷暖房用蓄熱システム		
5. おわりに		613

第8章 地球規模での水素を媒体とするエネルギー利用システム 617

第1節 ユーローケベック水素パイロットプロジェクト(EQHPP) 619

1. はじめに	619
2. 論理的根拠	619
3. ユーローケベック水素パイロット計画	621
3.1 コンセプト	621
3.2 里程	621
3.3 第I期	622
3.4 第II期,システムの詳細規定	622
3.4.1 参加機関	622
3.4.2 プロジェクト管理機関	623
3.4.3 参照ケース	623
3.4.4 液体水素(LH ₂)輸送用のバージ船	623
3.4.5 安全性	623
3.4.6 コスト	623
3.4.7 媒体の選定	625
3.4.8 経済性	625
3.4.9 環境の側面	626
3.5 第III期および第IV期,詳細設計と建設	627
3.6 第III,0期,水素利用実証プロジェクト	627
3.6.1 都市交通用の輸送機関	627
3.6.2 航空機	630
3.6.3 国内水路の公衆輸送	631
3.6.4 製鉄における水素	632
3.6.5 貯蔵および輸送技術	633
3.6.6 コージェネレーション	634
3.6.7 安全性と標準規格	635
3.6.8 都市バスデモンストレーション結果	

統合のための管理運営システム 635

3.6.9 経済分析 636

3.6.10 配送システムの研究 636

3.7 資金 637

4. 結論 637

第2節 HYSOLARと太陽-水素-バイエルン 639

1. 枠組み	639
1.1 第二次太陽文明	639
1.2 エネルギー	640
1.3 エコロジー	641
1.4 エントロピー	643
1.5 国際性	644
2. HYSOLARと太陽-水素-バイエルン(SWB)	645
2.1 現状	645
2.2 最新の結果	649
2.3 関連研究	654
3. 将来	654
3.1 UNCEDのその後	654
3.2 太陽水素技術の課題	655
3.3 エクセルギー	656
3.4 国際協力の必要性について	657
3.4.1 地理的理由	657
3.4.2 経済的理由	657
3.4.3 生態学的理由	658
3.4.4 技術的理由	658

第3節 PORSHE計画 660

1. 究極のエネルギーシステム	660
2. ポルシェ計画	660

2.1	ポルシェ計画の経緯	660	4.	今後の展望	669
2.2	ポルシェ構想	661	第4節	水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) について	674
2.2.1	太陽エネルギー	662	1.	ニューサンシャイン計画について	674
2.2.2	水素エネルギー	662	2.	国際的水素エネルギー利用システム構築の意義	676
2.2.3	海洋利用	662	3.	水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) の概要	677
2.3	ポルシェシステム	664	4.	WE-NET のスケジュールなど	679
2.4	海洋筏の構造	664	5.	WE-NET に係る技術開発課題	679
2.4.1	筏の積載仕様	665	6.	WE-NET の国際展開	680
2.5	海水の淡水化	666	7.	WE-NET の計画作りの検討	680
2.6	副生産物	666			
2.7	システムの能力とコスト	666			
2.7.1	タービン発電方式試算	666			
2.7.2	太陽光電池方式	667			
3.	パラオ・ポルシェ	668			

第9章 水素エネルギー評価 681

第1節 地球温暖化に対する政策 683

1. はじめに 683
2. 短期政策 684
3. 長期政策 686

第2節 水素 (エネルギー) の安全性 692

1. はじめに 692
2. 水素の物性 692
3. 一般的な取り扱い上の安全対策 694
4. 人体に対する安全 695
 - 4.1 凍傷 695
 - 4.2 火傷 695
 - 4.3 爆風圧による損傷 695
 - 4.4 酸素欠乏症 696
5. 水素関連設備の安全対策 696

- 5.1 配置 696
- 5.2 構造 696
- 5.3 電気機器 698

第3節 水素エネルギーシステムの経済性 699

1. 経済性計算の新しい動向 699
2. 外部コスト 699
3. エネルギーの外部コスト 700
4. エネルギーの外部コスト計算の現状 701
5. 水素エネルギーの経済性 704

第4節 水素エネルギーシステムの将来展望 708

1. 展望の視点 708
2. 経済的平衡の時期 709
3. 市場浸透 712
4. 展望のまとめ 713

