水素エネルギーの科学と技術

―― カーボンニュートラル実現のキーテクノロジー ――

一般社団法人　日本エネルギー学会　編

コ ロ ナ 社

編集委員会

委員長　市川貴之（広島大学）

委員　五舛目清剛（産業技術総合研究所）

斉間等（広島大学）

執筆者

飯山明裕（山梨大学）：6.2 節

石原達己（九州大学）：6.3 節

市川貴之（広島大学）：1.1 節，2.1 節，2.2 節，2.4 節，3.4 節

金指正言（広島大学）：5.5 節

亀川厚則（室蘭工業大学）：3.1 節

川波肇（産業技術総合研究所）：4.1 節

久保田純（福岡大学）：4.4 節

郷右近展之（新潟大学）：5.2 節

古山通久（信州大学）：7 章

斉間等（広島大学）：2.3 節，4.3 節，5.1 節，5.4 節

志村祐康（産業技術総合研究所）：6.1 節

高井健一（上智大学）：1.2 節

鶴井宣仁（株式会社神戸工業試験場）：3.2 節

姫田雄一郎（産業技術総合研究所）：4.1 節

范勇（産業技術総合研究所）：6.1 節

福原長寿（静岡大学）：4.2 節

光島重徳（横浜国立大学）：5.3 節

宮岡裕樹（広島大学）：3.3 節

森山教洋（広島大学）：5.5 節

（2025 年 11 月現在，五十音順）

ま　え　が　き

1970 年代に発生したオイルショックを契機に，わが国ではサンシャイン計画と称して，環境問題の抜本的解決に重点が置かれたさまざまな研究開発がスタートした。当時の先進国を中心に水素をエネルギーとして利用する技術に注目が集まり，さまざまな要素技術開発が進められたのもこの時期以降である。わが国では 1990 年代から WE-NET プロジェクトとして研究開発が加速され，2000 年代以降も継続してさまざまな水素エネルギー関連の国家プロジェクトが進められてきた。並行して 2003 年以降から数年おきに発表されてきたエネルギー基本計画では原子力発電の重要性が謳われてきた。しかし，2011 年に発生した東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故により，わが国におけるエネルギー政策は大きく方向転換した。すなわち，2014 年に発表された第 4 次エネルギー基本計画には，再エネ電力を重視するとともに水素エネルギーの利用の重要性が記載された。これに呼応したわけではないが，2014 年暮れには水素燃料電池自動車が市場投入され，2015 年はまさに日本国内において「水素元年」と称される年となった。その後の 2018 年に出された第 5 次エネルギー基本計画では，2100 年断面でのカーボンニュートラル実現が明記され，水素・アンモニアの導入目標が具体的に記載された。しかし，欧州各国の批判を受け，2020 年には「1.5 ℃目標」に準拠する「2050 年カーボンニュートラル実現」を支持するエネルギー政策に方向転換した。本書を編集中の 2025 年において，再生可能エネルギー主力電源化を支えるグリーン水素のエネルギーとしての利用は既定路線となっている。

このように，わが国では国を挙げて水素エネルギー社会の実現に注力してきており高い技術力を誇る状況にある。しかしながら，学術界における水素エネルギー関連の研究は，さまざまな異なる学術背景を持つ研究集団により，さまざまな観点で研究開発が進められてきた。例えば電気化学分野では電解技術や

燃料電池技術，触媒分野では水蒸気改質や光触媒，さらにはアンモニア合成やメタノール合成およびさまざまな炭化水素合成などの研究開発が進められてきた。加えて，材料分野においては水素貯蔵材料や耐水素脆化の構造材料，あるいは膜や吸着材による水素の高純度化技術，低温工学では液化技術や高性能な断熱容器開発，化学工学分野ではさまざまな注目系での最適利用など，それぞれの領域において局所的な最適解が求められてきたのも事実である。もちろん，学会の枠を飛び越えた研究連携は重要視されつつも，その取り組みは限定的であったと言わざるを得ない。

こうした中，本書はそれぞれの分野における専門書ほどの詳細な記述は省きつつ，それでも水素エネルギーの研究開発に，新たにかかわる技術者や研究者，あるいは水素エネルギー技術を専門に学ぶ初学者に対し，学術ミニマムを記した教科書として構成したつもりである（また各節の最後の項（7 章は最後の節）では「おわりに」と題して，当該分野の今後の課題や展望について述べた)。そういう意味で，大学における教養レベルの物理学や化学で扱う水素原子および水素分子の構造から，金属材料中の水素の存在状態，熱力学や熱工学あるいは電気化学分野で扱うエネルギーとしての水素の取り扱い，さらには水素キャリアやエネルギーキャリアと称されるさまざまな水素を含む物質の性能にも触れつつ，当然ながら水素利用技術や水素製造技術の基礎的な考え方を盛り込んだ。また，水素を原料として作られるさまざまな化学物質や燃料などにも焦点を当て，その経済性の考え方にも触れた。内容は非常に多岐にわたるが，カーボンニュートラル実現において避けて通ることのできない水素のエネルギー利用が，理工系出身の教養として当たり前のように理解される時代になることを祈りつつ，本書が，「水素エネルギーを安全かつ経済性をもって利用される社会実現」の一助になれば，との思いで編集に携わったことをここに記しておきたい。

2025 年 11 月

編集委員会を代表して

市川 貴之

目　　次

1. 水素の基礎

1.1　水素の物性とエネルギーとしての水素……1
1.1.1　水素とは　1
1.1.2　水素分子の特徴　2
1.1.3　水素の化合物　5
1.1.4　エネルギーとしての水素　7
1.1.5　おわりに　9
1.2　金属材料の水素脆化……9
1.2.1　水素脆化研究の位置付け　9
1.2.2　水素の吸着から水素脆化破壊まで　10
1.2.3　水素分析方法　11
1.2.4　水素脆化破壊における潜伏期　13
1.2.5　水素脆化感受性評価と破壊形態　15
1.2.6　水素脆化理論　17
1.2.7　おわりに　18
引用・参考文献　18

2. エネルギーキャリアの概要

2.1　エネルギーキャリアの必要性……20
2.1.1　素材としての水素とエネルギーとしての水素　20
2.1.2　各種エネルギーキャリアの特徴　21
2.1.3　おわりに　24
2.2　液体水素……25
2.2.1　液体水素の特徴　25

2.2.2 水素の液化 26
2.2.3 液体水素の貯蔵・輸送 27
2.2.4 液体水素・冷熱の利用 28
2.2.5 おわりに 29
2.3 有機ハイドライド……29
2.3.1 ベンゼン環二重結合の安定性 29
2.3.2 エネルギーキャリアに用いられる有機ハイドライド 30
2.3.3 トルエンの水素化による MCH の合成 31
2.3.4 メチルシクロヘキサン（MCH）の脱水素反応 33
2.3.5 おわりに 35
2.4 アンモニア……35
2.4.1 アンモニアの歴史とその特性 35
2.4.2 アンモニアの貯蔵 37
2.4.3 アンモニアからの水素放出 39
2.4.4 おわりに 42
引用・参考文献 43

3. 固体貯蔵

3.1 水素吸蔵合金……46
3.1.1 水素エネルギーを貯蔵する水素吸蔵合金 46
3.1.2 水素吸蔵合金の熱力学的特性 48
3.1.3 水素吸蔵合金の種類 49
3.1.4 水素吸蔵合金と低圧水素 54
3.1.5 MH タンクの構成 54
3.1.6 おわりに 56
3.2 高圧水素……57
3.2.1 水素吸蔵合金による水素の高圧化 57
3.2.2 水素吸蔵合金の水素吸蔵特性 58
3.2.3 水素吸蔵合金を用いた熱で稼働するケミカルコンプレッサー 64
3.2.4 水素吸蔵合金を用いたケミカルコンプレッサーの開発の歴史 67
3.2.5 おわりに 68

3.3　無機系水素貯蔵材料……69
3.3.1　軽元素を用いる無機系水素貯蔵材料　69
3.3.2　無機系水素化物の特徴　69
3.3.3　水　素　化　物　71
3.3.4　錯体水素化物　73
3.3.5　複　　合　　系　75
3.3.6　無機系材料を用いた水素の貯蔵／輸送　78
3.3.7　お　わ　り　に　79
3.4　吸着材料による水素貯蔵……79
3.4.1　吸着現象と水素貯蔵　79
3.4.2　物理吸着による水素吸蔵　80
3.4.3　吸着水素量の分析方法　82
3.4.4　さまざまな多孔質材料　84
3.4.5　液体水素温度における吸着現象　85
3.4.6　お　わ　り　に　86
引用・参考文献　87

4. 化　学　変　換

4.1　ギ　　酸……91
4.1.1　水素キャリアとギ酸　91
4.1.2　ギ酸の水素キャリアとしての特徴　92
4.1.3　ギ酸からのガス（水素＋二酸化炭素）発生　95
4.1.4　ギ酸からの高圧ガス（水素＋二酸化炭素）発生　98
4.1.5　高圧水素の精製方法　101
4.1.6　ギ酸による水素貯蔵　105
4.1.7　お　わ　り　に　105
4.2　メタネーション……106
4.2.1　メタネーションとは　106
4.2.2　メタネーションの課題　107
4.2.3　構造体触媒反応システムによるメタネーション　109
4.2.4　原料の高速処理を伴うメタネーション　113
4.2.5　実プロセス排ガスのそのまま高速処理：オートメタネーション　115
4.2.6　お　わ　り　に　118

4.3 カーボンリサイクル技術……118
4.3.1 カーボンリサイクルによる燃料合成の意義 118
4.3.2 フィッシャー・トロプシュ合成法による炭化水素の製造 120
4.3.3 メタン合成 123
4.3.4 メタノール合成および関連反応 125
4.3.5 おわりに 128
4.4 アンモニア合成……128
4.4.1 アンモニア合成法と利用 128
4.4.2 H-B 法による NH_3 合成 129
4.4.3 NH_3 合成触媒 134
4.4.4 NH_3 電解合成 136
4.4.5 おわりに 140
引用・参考文献 140

5. 水素の製造技術

5.1 水蒸気改質による水素製造……146
5.1.1 水蒸気改質とは 146
5.1.2 メタンの水蒸気改質 147
5.1.3 メタノールの水蒸気改質 149
5.1.4 エタノールの水蒸気改質 151
5.1.5 グリセリンの水蒸気改質 152
5.1.6 おわりに 154
5.2 熱化学水素製造……154
5.2.1 熱化学水素製造の原理 154
5.2.2 熱化学プロセスによるさまざまな水素製造サイクル 156
5.2.3 高温太陽熱利用型熱化学プロセスによる水素製造サイクル 159
5.2.4 おわりに 161
5.3 再エネ電力からの水素製造技術としての水電解……162
5.3.1 再エネ電力からの水素製造の重要性 162
5.3.2 水電解の原理と効率 164
5.3.3 各種水電解技術の概要と課題 165
5.3.4 水電解の性能解析と低コスト化 169

5.3.5　お　わ　り　に　173
5.4　圧力スイング吸着法による水素精製……174
5.4.1　圧力スイング吸着法の原理　174
5.4.2　水素 PSA プロセス　175
5.4.3　お　わ　り　に　178
5.5　膜分離による水素精製……178
5.5.1　膜による水素分離　178
5.5.2　水素生成を伴うプロセス　179
5.5.3　水素分離膜の種類　180
5.5.4　無機無孔膜と無機多孔膜　181
5.5.5　Pd 膜および Pd 合金膜　182
5.5.6　アモルファスシリカ膜　183
5.5.7　ゼオライト膜　186
5.5.8　お　わ　り　に　188
引用・参考文献　188

6. 水素の利用技術

6.1　燃　　焼……196
6.1.1　水素燃焼の概要　196
6.1.2　燃焼速度と水素の特性　197
6.1.3　近年の水素燃焼技術の研究開発例　201
6.1.4　お　わ　り　に　206
6.2　固体高分子形燃料電池……207
6.2.1　固体高分子形燃料電池の普及状況　207
6.2.2　PEFC の構造・原理と材料　208
6.2.3　PEFC の性能と劣化　213
6.2.4　お　わ　り　に　217
6.3　固体酸化物形燃料電池……218
6.3.1　固体酸化物形燃料電池の特徴　218
6.3.2　SOFC の現状と課題，可逆動作セルへの展開　219
6.3.3　酸化物の H^+ 伝導と酸化物プロトン伝導体燃料電池（PCFC）の開発状況　225
6.3.4　お　わ　り　に　227

引用・参考文献 228

7. 水素利用の経済性

7.1 ネットゼロカーボンと水素エネルギー……230
7.2 国内における水素・燃料電池の現在地……231
7.3 水素利用の将来の姿……233
7.4 競合技術からみた水素利用の将来……235
7.5 経済性からみた水素製造の着手例……238
7.6 お わ り に……239
引用・参考文献……242

索 引 244

1.

水素の基礎

1.1　水素の物性とエネルギーとしての水素

1.1.1　水　素　と　は

水素は，1766 年に英国のヘンリー・キャベンディッシュが金属に強酸をかけて，燃える気体を単離することに成功して発見され，これが燃えて水ができることから文字通り水素と名づけられた[1)†]。この水素は原子番号 1 の最も軽い元素であり，空気の密度 1.293 g/L と比較しても 14 分の 1 程度と非常に軽く，標準状態で密度 0.089 88 g/L の気体である。また，絶対圧 101.3 kPa（1 気圧）で液化する温度は－253 ℃，固化する温度は－259 ℃であり，臨界点での温度および圧力は－240 ℃，1.3 MPa である。このため室温でどんなに圧縮しても液化はしない。そもそも，水素は宇宙で最も多く存在する元素であるといわれており，その質量割合は 75 %にものぼる。また，安定同位体としての重水素，放射性同位体としての三重水素が存在し，これらの天然存在比の割合から原子量は 1.008 となる。この数値にちなみ，一部のコミュニティでは 10 月 8 日を水素・燃料電池の日として祝しているようである。

表 1.1 に，水素の同位体とイオンの名称について記載した。われわれがよく使う水素（Hydrogen）は元素名であるが，慣用的に軽水素原子が水素と呼ばれており，これと区別して原子量が 2 の安定同位体は重水素（デューテリウム），原子量が 3 の放射性同位体は三重水素（トリチウム）と呼ばれる。加え

† 肩付き番号は，章末の引用・参考文献番号を示す。

表 1.1　水素の同位体とイオンの名称（慣用的に用いられている表現を太字で示した）

元素名	**水素（Hydrogen）**		
原子名	軽水素（Protium）	**重水素**（Deuterium）	三重水素（**Tritium**）
原子核構造	陽子 1	陽子 1＋中性子 1	陽子 1＋中性子 2
陽イオン	Hydron		
	Proton	Deuteron	Triton
陰イオン	**Hydride**		
	Protide	Deuteride	Tritide
原子量	1.007 9（1.008）		
	1.007 8	2.014	3.016
安定性	安定	安定	放射性

て，軽水素がイオン化して陽イオンとなったものはプロトン，重水素の陽イオンはデューテロン，三重水素の陽イオンはトリトンと呼ばれる。一方，陰イオンについては，一般的にヒドリドと称されることが多い。お気づきのことと思われるが，慣用的に使われている名称にアンバランスがある。

水素原子は，通常原子核に陽子 1 個とその周りの s 軌道に電子 1 個が格納された状態で構成される。この水素原子 2 個が，それぞれの s 軌道を混成させ，共有結合軌道を形成し，ここにアップスピンとダウンスピンの電子が 1 個ずつ格納された状態で水素分子を形成する[2)]。水素分子は最も小さく最も軽い 2 原子分子構造を取り，分子の持つ並進の自由度に加えて，分子を構成する原子間の伸縮と，分子の回転の自由度を有する。一般的には標準状態では並進と回転の自由度のみであり，摂氏数百度の温度まで伸縮振動は基底状態にあることが知られている[3)]。

1.1.2　水素分子の特徴

水素は常温常圧で気体の状態をとるが，液化温度が低く理想気体に近い性質を示すことが知られている。理想気体の状態方程式は，$p=\rho RT$ により記述されるが（ここで，p は気体の圧力，ρ は気体のモル密度，T は気体の温度，R

は気体定数とした），水素燃料電池車などで高圧水素タンクとして採用される70 MPa 程度の高圧条件では，理想気体の状態方程式から得られる密度と，実在気体の密度には 30 %以上の差が見られる。一方，実在気体を表す状態方程式としては，圧縮率因子 Z を用いて，モル密度 ρ の表記にすると以下のとおり記述される。

$$\rho = \frac{p}{ZRT}$$

それぞれの圧力，温度における Z 値が一覧表として提供されている。一方，ファンデルワールスの状態方程式で用いられる分子間力および分子体積の補正項 a,b をそれぞれ用いると

$$ab\rho^3 - a\rho^2 + (bp + RT)\rho - p = 0$$

の三次方程式の解がモル密度を与える。さらに，ビリアル展開を十分な数の項まで行ったうえで実測値を再現する係数を用いることで，より真の状態に近い関係を得ることが可能となる。すなわち，圧力と温度を与えることでモル密度を再現する情報が，米国国立標準技術研究所（NIST）から提供されている[4)]。より簡便にはそれぞれの気体の臨界点における物性値から得られる補正項 a,b の値 $24.8\times10^{-3}\ \mathrm{Pa\,m^6/mol^2}$ および $26.7\times10^{-6}\ \mathrm{m^3/mol}$ により，密度情報を得ることが可能であるが，その適用範囲を低温や高圧条件に広げた使い方をする場合は，NIST が提供するデータのほうがより正確な情報を提供しているととらえられている。

その他，水素の物性については**表 1.2** に示す。特筆すべき水素分子の性質としては，極端に低いガス状態および液体状態の密度，極端に高いガス状態での熱伝導度が挙げられる。水素分子は，二つの水素原子が結合した分子であり，軽水素に関してはプロトンがアップスピンおよびダウンスピンの内部自由度を有する。量子力学的に見てスピンの入れ替えで波動関数の符号が変わるものをパラ状態，符号が変わらないものをオルソ状態とする。この場合，パラ状態が基底状態となり，オルソ状態はそれに比べて不安定であるが，室温当りでは，熱的に励起され，縮退した三つの量子状態と一つのパラ状態が等分配され

表 1.2　水素の物性

密度（@ 標準状態）	0.089 88 g/L
密度（@ 沸点）	70.8 g/L
沸点	−253 ℃
凝固点	−259 ℃
臨界点	−240 ℃，1.3 MPa
熱伝導度	186.9 mW/(m·K)
融解潜熱	0.117 kJ/mol
蒸発潜熱	0.904 kJ/mol
オルソ-パラ転換熱	1.01 kJ/mol
標準モルエントロピー	130.7 J/(mol·K)
高位発熱量（HHV）	284 kJ/mol
低位発熱量（LHV）	240 kJ/mol

る。これに対して液体状態をとる 20 K（−253 ℃）程度では，熱力学的に安定なパラ状態に落ち着くことが知られ，オルソ-パラ転換を考慮する必要がある。すなわち，オルソ-パラ転換熱の大きさ 1.01 kJ/mol が蒸発潜熱 0.904 kJ/mol を上回るため，工業的には無視できない性質を持つことを忘れてはならない[5),6)]。

一方，水素を含む燃料すべてに当てはまるが，燃焼あるいは酸化反応によってエネルギーを取り出した後の状態として，水蒸気の状態と液体の水の状態が考えられる。詳細は後述するが，この違いにより低位発熱量（LHV）を用いる場合と，高位発熱量（HHV）を用いる場合がある。

さて，水素は空気中での爆発限界が 4 ～ 75 %と非常に広いことがその特徴として挙げられ，この値はメタンの 5 ～ 15 %やプロパンの 2 ～ 10 %と比べて圧倒的に広い。また，着火に必要なエネルギーはその他の可燃ガスと比べて圧倒的に小さく，わずかな静電気程度でも着火することが知られている[7)]。福島第一原発の建屋における水素爆発は，比較的気密性の低かった圧力容器内で発生した水素が建屋内に漏れ，比較的気密性の高かった建屋から漏れ出なかったことで生じたと考えられている[8)]。一方，水素ガスの拡散係数は，例えばメ

タンと比べて 4 倍程度，ガソリンと比べると 10 倍以上と大きく，オープンな場所では，一定の個所に滞留する危険性が低く爆発の危険性は低い[9]。

1.1.3　水素の化合物

水素原子は，水素原子とだけでなく，酸素や窒素原子とも共有結合を形成し，水やアンモニアなどの分子を形成する（**図 1.1**（a））。このとき，水素原子と共有結合軌道に格納された電子の位置が異なるため，一般的に水素は X 線回折など電磁波を用いた手法ではその原子位置を特定できないとされている[10]。

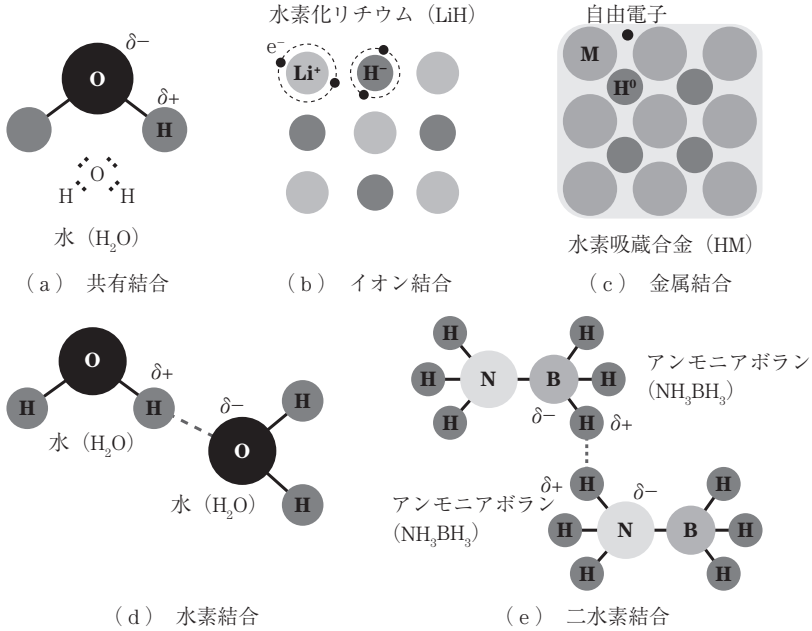

図 1.1　水素のさまざまな結合形態

一方，この水素原子は，アルカリ金属や多くのアルカリ土類金属とは，水素化物と呼ばれるイオン結晶体を構成する[11]。このときの水素は，結合する金属原子から電子を渡され，ヘリウム原子と等しい閉殻構造をとって陰イオンと

索　　引

【あ】

亜鉛／酸化亜鉛系サイクル 160
アザン 35
圧縮性流体 26
圧縮率因子 3
圧密化 55
圧力スイング吸着法 174
圧力–組成–等温線図 48
アニオン 6
アニオン交換形電解質膜 208
アニオン交換膜形燃料電池 208
アニオン交換膜水電解 168
アミド–イミド系 76
アモノリシス系 77
アモルファスシリカ膜 183
アルカリ水電解 165
アルキメデスの原理 83
アルミニウム水素化物 73
アンダーソン・シュルツ・フローリー分布則 120
安定同位体 1
アンミン 38
アンモニア 35, 128
　―― の気液平衡曲線 37
　―― の熱分解技術 41
アンモニア燃焼熱 36
アンモニアボラン 6, 74
アンモニアメタネーション 124

【い】

イオンクラスターネットワーク 210
イオン結合 5
イオン結晶体 5
一次元伝播火炎 200
イミド 76
陰イオン 6

【え】

液化アンモニア 21
　―― の直接電気分解技術 40
液化メタン 21
液体水素 21, 25
液体有機水素キャリア 23
液膜状態 33
エステル交換反応 152
エタノールの水蒸気改質 151
エタン 6
エチレンジアミン骨格 94
エチレンの生成 151
エネファーム 218, 231
エネルギー原単位 165
エレクトライド物質 135

【お】

オートメタネーション現象 116
オルソ状態 3
オルソ–パラ転換 4
オルソ–パラ転換熱 4

【か】

加アンモニア分解 39, 77
開回路電圧 213
改質器 149
火炎伝播速度 197
化学吸着 79
可逆動作型セル 223
拡散性水素 11
下限界応力 15
過剰吸着量 83
加水分解 77
ガス拡散層 208
ガス拡散抵抗 213
ガスタービンエンジン 201
カチオン 6
カチオン交換膜 167
活性化過電圧 213
活性炭 85
ガトリング・ガン 148
過熱液膜法 33
カーボン担体 215
カーボン担体触媒 211
カーボンニュートラルメタン 107
カーボンリサイクル 118
カーボンリサイクルロードマップ 119
カルシウムカーバイド 130
カルシウムシアナミド 130
間接加熱プロセス 147
乾留ガス 175

【き】

貴金属触媒 209
ギ　酸 91
　―― の脱水素化用の触媒 93
　―― の転化率 99
起動停止模擬プロトコル 166
希土類酸化物 135
ギブズの相律 58
擬へき開 15
吸着水素 80
吸着塔 177
吸着等温線 85
凝集圧力 85
共有結合 5
共有結合性有機構造体 84
擬粒界 15
き裂進展 16
均圧化操作 177
金属アミノボラン 75
金属／金属酸化物系サイクル 160
金属結合 5
金属酸化物／金属酸化物系サイクル 160

金属水素化物 47, 59
金属水素化物相 58
金属有機構造体 84

【く】

空気極 208
グラーツサイクル 202
グラフェンナノプレートレット 85
グリセリンの水蒸気改質 152
グリーン水素 9
グリーントランスフォーメーション 162
グリーンメタノール 24
グレー水素 8
クロスオーバー 166
クローズドサイクル 201

【け】

軽水素原子 1
結晶性アルミノケイ酸塩 186
ケミカルコンプレッサー 64
ケミカルハイドライド 46
限界電流密度 214

【こ】

高圧ガス保安法 38
高圧型水素吸蔵合金タンク 54
高圧水素 54, 57
高温ガス冷却型原子炉 156
高温ガス炉 156
高温太陽熱利用型熱化学プロセス 159
合金触媒 211
格子脆化理論 17
合成メタン 107
構造体触媒反応システム 109
小型円筒型 LSGM 膜 223
固相-気相反応 70
固相-固相反応 76
固体高分子形燃料電池 41, 207
固体酸化物形電解質 138
固体酸化物形燃料電池 41, 129
固体酸化物セル 218
固体酸化物水電解 168
コバルト触媒 122
固　溶 49
固溶限 53
孤立電子対 6

【さ】

サイクル特性 52
最小着火エネルギー 118
再生可能エネルギー 20
サイト 10
材料貯蔵 46
錯体水素化物 73
鎖式飽和窒化水素 36
散逸能 62
酸化ニオブ 72
酸化物イオン導電体 168
酸化物プロトン伝導体燃料電池 225
三重水素 1
酸素イオン伝導度 221

【し】

ジアザン 36
シェル＆チューブ式反応器 124
脂環式炭化水素 29
シクロアザン 36
シクロペンタジエニル基 94
四重極子モーメント 174
実在気体を表す状態方程式 3
ジーベルツ装置 82
ジーベルツ則 58
ジボラン 75
ジメチルエーテル 23, 127
車載式 MH タンク 55
重水素分布 11
重水素 1
集電長 219
自由度 58
重量法 83
昇温脱離法 11
消費電力 170
初期活性化特性 53
食塩電解 166
触媒サイクル 95
触媒充填型反応システム 108
触媒塗布電解質膜 208
侵入型 6
侵入型化合物 79
深冷分離法 101

【す】

水蒸気改質 146
水蒸気電解 223
水性ガスシフト反応 149
水　素 1
—— の均等化製造原価 240
—— の重量貯蔵密度 49
—— の量子性 6
水素 PSA プロセス 175
水素エンジン 201
水素ガスの圧縮率因子 62
水素化物 5, 71, 79
水素化ホウ素化合物 38
水素化マグネシウム 71
水素化リチウム 73
水素吸蔵合金 6, 46, 70
—— の水素化反応熱 48
水素吸放出の繰り返し特性 52
水素局部変形助長理論 17
水素結合 5, 6
水素昇圧 64
水素助長塑性誘起空孔理論 18
水素脆化評価方法 15
水素製造コスト 172
水素占有率 14
水素存在状態解析 11
水素脱離スペクトル 14
水素脱離の活性化エネルギー 14
水素タンク 46
水素貯蔵材料 69
水素透過流束 181
水素燃焼 196
水素爆発 4

水素分離膜 34, 180
水素・燃料電池戦略ロードマップ 231
スペーサー法 185

【せ】

ゼオライト膜 186
絶対吸着量 83
セパレーター 212
セミクローズドサイクル 202
セラミックス担体 215
セラミックス担体触媒 216
セリウム酸化物 160
セル電圧 169
全吸着量 83

【そ】

総括伝熱係数 111
総括物質移動係数 111
層流火炎 198
層流燃焼速度 198
ソーラープラント 161

【た】

第6次エネルギー基本計画 91
体積貯蔵密度 49
ターコイズ水素 9
多孔質隔膜 166
多孔質材料 84
多孔性有機ポリマー 84
多孔体骨格 81
ダックカーブ 9
脱硫器 149
ターフェル式 169
炭化水素系電解質膜 211
単相ナノチューブ 80

【ち】

超臨界状態 25
超臨界流体 25
直鎖状炭化水素 121
直接 LPG 合成法 127
沈殿鉄触媒 122

【て】

低圧水素 54
定荷重試験 15
抵抗過電圧 213
定置式 MH タンク 55
ディップコート法 222
鉄触媒 122
デューテリウム 1
デューテロン 2
電極触媒 137
電力コスト 170

【と】

等温平衡吸着量 175
透過性と選択性のトレードオフ 180
逃散能 62
トリチウム 1
トリトン 2
トルエン–MCH 系 31
トルエンの電解水素化反応 33
トルエン–メチルシクロヘキサン系 31
ドロップイン燃料 161

【な】

内部凝縮型反応器 126
ナトリウムアラネート 74
ナトリウムボロハイドライド 77
ナフタレン–デカリン系 30

【に】

二酸化炭素回収・利用・貯留技術 129
二酸化炭素循環システム 105
二次イオン質量分析法 11
二重結合 30
二重促進鉄触媒 134
二水素結合 5, 6
二相共存領域 49
二段階水素製造サイクル 160
二段式水素昇圧システム 66
ニッケル触媒 122

【ね】

熱化学水素製造 154
熱的平衡電圧 164
燃焼速度 197
燃料極 208
燃料電池 207
燃料電池・水素技術開発ロードマップ 209

【の】

濃度過電圧 213

【は】

配位子の劣化 100
バイオジェット燃料 152
バイオディーゼル油 152
廃棄物発電 239
媒体水素貯蔵 69
ハイブリッド MH タンク 54
バトラー・ボルマー式 170
バナジウム系 BCC 固溶体型合金 52
ハニカム形 109
ハーバー・ボッシュ法 36, 128
ハーフサンドイッチ型錯体 94
パーフルオロエチレンスルホン酸系カチオン膜 167
パラ状態 3
バルク水素 86
反応領域 198

【ひ】

非拡散性水素 12
非貴金属触媒 208
ヒステリシス 49, 59
引張試験 15
ヒドラジン 36
ヒドリド 2
ヒドリド化合物 135
比熱比 26
ビピリジン骨格 94
微粉化 55
ピンサー型配位子 94

【ふ】

ファラデー則 165
ファラデー定数 7
ファンデルワールス力 79
ファントホッフ式 61
フィッシャー・トロプシュ合成法 120
フェライト／ウスタイト系サイクル 160
フォージャサイト型ゼオライト 127
フガシティ 62
不均化 71
物質収支式 111
フッ素系スルホン酸膜 210
物理吸着 79
物理的貯蔵 46
フラットチューブラー型 219
プラトー圧 49, 59
プラトー領域 49
浮　力 83
ブルー水素 9
プレート型反応器 124
プロトン 2
プロトン交換膜 207
プロトン交換膜水電解 167
プロトン伝導性固体酸化物水電解 168
プロトン伝導性酸化物 168, 225
プロトン伝導性電解質膜 210
ブンゼン反応 158
粉末の充填率 55

【へ】

閉殻構造 5
平衡水素圧 53
平衡転化率 113, 147
ペロブスカイト酸化物 160
変成器 149
ベンゼン–シクロヘキサン系 30

【ほ】

ポアソンの式 26
放射性同位体 1
ホスフィン配位子 94
ポリカーボネート 119
ボロハイドライド 38
ホワイト水素 9

【ま】

マイクロチューブ型セル 222
膜電極接合体 208
膜反応器 180
膜分離 178
膜分離法 149

【み】

水電解水素製造 163
水電解のエネルギー変換効率 164
水の直接熱分解 154
水の理論電気分解電圧 7, 169
水分子 6
未燃ガス 197

【む】

無機系水素貯蔵材料 69
無機多孔膜 181
無機無孔膜 181
無電解めっき法 183

【め】

メタネーション 106
メタノール 21, 125
——の水蒸気改質 149
メタン 123
メタン合成 124
——の生成 151
メチルシクロヘキサン 21
メチルシクロヘキサン系有機ハイドライド 185

【ゆ】

有機架橋したアルコキシシラン 185
有効吸着量 175
有効水素吸蔵量 53

【よ】

陽イオン 6
溶解–拡散メカニズム 181

【ら】

乱流燃焼速度 199

【り】

理想気体の状態方程式 2
リチウムアミド 76
リチウムアラネート 74
リチウムイオン電池の価格低減の時系列的変化 237
リチウム媒介 NH_3 電解合成 139
リチウムボロハイドライド 73
粒　界 16
理論分解電圧 164
臨界点 1
リン酸・リン酸塩電解質 139

【る】

ルテニウム触媒 122

【れ】

レナードジョーンズ型ポテンシャル 80
連鎖成長確率 121

【ろ】

ロンドン分散力 80

【わ】

ワーキングキャパシティ 175

【数字】

4, 4′-ビスヒドロキシ-2, 2′-ビピリジン 99

【A】

AB5 タイプ 50
$ABO_{3-\delta}$ 160
Absolute H_2 83
AEM 208
AlH_3 73
ammine 38
Anderson-Schulz-Flory 分布則 120
anion exchange membrane 208
A-S-F 分布則 120
ATR プロセス 147
automatic thermal reforming 147
AWE 165

【B】

$BaCe_{0.7}Zr_{0.1}Yb_{0.1}Y_{0.1}O_3$ 225
BCC 構造 52
BCC 固溶体型合金 52
BDF 152
BET 法 85
bio-diesel fuel 152
BZCYYb 225

【C】

C_1 化学 120
C_2H_6 6
$[Ca_2N]^+H^-$ 135
CaC_2 130
$CaCN_2$ 130
CAPEX 170
catalyst coated membrane 208
CCM 208
CCUS 129
$CeO_{2-\delta}$ 160
CHA 186
Chahine の法則 84
CN メタン 107
COF 84
covalent organic framework 84
Cu-Zn-Al_2O_3-SiO_2 系 126
Cu-Zn-Cr 触媒 126

【D】

DDR 186
DME 127

【E】

Egg-Shell 触媒 123
e-methane 107
Excess H_2 83
e メタン 24

【F】

Fe_3O_4/FeO 系サイクル 160
Fischer-Tropsch 合成法 120
flamelet の概念 200
F-T 合成法 120

【G】

gas diffusion layer 208
gas to liquid 120
GDL 208, 212
GNPs 86
GTL 120
GX 162

【H】

Haber-Bosch 法 36, 128
H-B 法 128
HC 系電解質膜 211
Hydrogen Ladder 5.0 235
Hydrogen 1

【I】

IG 16
IG-like 15
intergranular 16
intergranular-like 15
Iodine-Sulfur プロセス 158
I-S プロセス 158

【K】

KIE 実験 98
kinetic isotope effects 98
Kubas 相互作用 79

【L】

$LaGaO_3$ 系酸化物 219, 221
$LaNi_5$ 系合金 50
large eddy simulation 204
LCOH2 240
Li^+/Li の標準電極電位 139
Li_2NH 76
$LiAlH_4$ 74
$LiBH_4$ 73
LiH 73
$LiNH_2$ 76
LSGM 221
LTA 186

【M】

MaH_2 71
MCH 31
—— の合成 31
MCH 生成反応 31
MCH の脱水素反応 33
MEA 208
membrane electrode assembly 208
metal hydride 47
Metal Hydride 48
metal-organic framework 84
methanol to gasoline 127
methanol to olefin 127
MFI 186
Mg_2Ni 71
MH 48
MH_n 60
MH タンク 47, 48, 54
micro-impinged jet array バーナー 202
MIJA バーナー 202
minimum ignition energy 118
M/M_xO_y 160
MNH_2BH_3 75
MNH_2-MH 76

moderate hot spot 114
MOF 84
MOF-177 85
MSC-30 85
MTG 反応 127
MTO 反応 127
multi-stacked 形 Ni/CeO_2 構造体触媒 113
M_xO_y/M_xO_y-5 系サイクル 160

【N】

N,N′ 二座配位子 94
N_2H_4 36
$NaAlH_4$ 74
$NaBH_4$ 39, 77
Nb_2O_5 72
NH_3BH_3 6, 74
NH_3 合成触媒 134
NH_3 電解合成 136

【O】

OH 自発光 203
operating expense 170
OPEX 170

【P】

PCFC 225
PCT 曲線 48
PCT 特性 58
Pd 合金膜 182
Pd 膜 182
PEFC 41, 207
PEM 207
PEMWE 167
perfluorosulfonic acid 膜 210
PFAS 211
PFSA 膜 210
Plain 形 109
polymer electrolyte fuel cell 207
POP 84
porous organic polymer 84
pressure swing adsorption 149, 174
proton exchange membrane 207
PSA 法 149, 174
Pt 系触媒 77
p-T 相平衡図 102

【Q】

QC 15
quasi-cleavage 15

【R】

r-DME 128
Robeson's upper bound 180

【S】

SAF 152
S/C 比 148
Segment 形 110
SIMS 11
single walled nano-tube 80
S-I プロセス 158
SOEC 223
SOFC 41, 129, 218
SOFC/SOEC 運転 224
Solid Oxide Fuel Cell 218
SPP-QP 膜 211
Stacked 形 110
Sulfur-Iodine プロセス 158
sustainable aviation fuel 152
SWNT 80

【T】

TDA 11
TDS 11
TEOS 前駆体 185
tetraethyl orthosilicate 前駆体 185
$TiCl_3$ 触媒 76
TiFe 67
TiFe 系合金 50
TOF 96
Total H_2 83
turn-over frequency 96

【U】

Univ. of Tokyo-3 プロセス 159
UT-3 プロセス 159

【V】

Van't Hoff 式 61
V-Ti 系固溶体型水素吸蔵合金 53
V 系 BCC 固溶体型合金 52

【W】

wash coat 法 110
Westinghouse プロセス 158

【Y】

Y_2O_3 安定化 ZrO_2 219
YSZ 219
Y 安定化 ZrO_2 138

【Z】

Zn-Cr 触媒 126
Zn/ZnO 系サイクル 160

【ギリシャ文字】

α 相 58
β 相 58
π 結合 30
σ 結合 30

水素エネルギーの科学と技術
── カーボンニュートラル実現のキーテクノロジー ──
Science and Technology for Hydrogen Energy
— Key Technology of Actualizing Carbon Neutralization —
© 一般社団法人 日本エネルギー学会 2026

2026 年 1 月 8 日　初版第 1 刷発行

検印省略

編　　者　一般社団法人
日本エネルギー学会
ホームページ https://www.jie.or.jp
発 行 者　株式会社　コロナ社
代 表 者　牛来真也
印 刷 所　壮光舎印刷株式会社
製 本 所　株式会社　グリーン

112-0011　東京都文京区千石 4-46-10
発 行 所　株式会社　**コ ロ ナ 社**
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan
振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)
ホームページ　https://www.coronasha.co.jp

ISBN 978-4-339-06676-0　C3040　Printed in Japan　(柏原)

本書のコピー, スキャン, デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。
購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は，いかなる場合も認めていません。
落丁・乱丁はお取替えいたします。