初歩から学ぶ無機化学

平川和貴 著

コロナ社

ま　え　が　き

現在の元素周期表には，人工的に合成された元素を含め 118 種類の元素が記されています。無機化学は，宇宙全体に存在するすべての元素について学び，研究する学問です。

日常の食事や飲み水に含まれる元素の種類を想像してみましょう。水には，水素と酸素，食物には，水の構成元素に加え，炭素，窒素，硫黄，リンあたりが主で，その他，ナトリウム，カルシウム，マグネシウム，鉄などがすぐに思い浮かぶかと思います。実際には，微量元素まで含めると周期表の大部分の元素が含まれる可能性があり，分析の精度を上げれば，天然に存在するすべての元素が検出されるのでないかといわれています。また，日常的な電化製品に使われている元素も同様に多岐にわたり，不純物の効果（影響）までを考慮すると，これもまた周期表の中でかなり多くの元素が関わっているといえます。

このように無機化学は，人間の生活の根幹に密接に関わる学問です。著者は，現在，工学部に所属していますが，特に「モノづくりのための学問」を本分とする工学部の学生にとって，無機化学は本質的に重要な分野です。学ぶ側の学生からすれば，周期表のすべての元素について勉強することを考えると気が遠くなるかもしれません。受験勉強から解放された大学 1 年生にとっては，大学に入ってからもまた暗記が待っていると思うかもしれません。しかし，恐れないでください。大学の無機化学は，決して暗記科目ではありません。全 118 種類（天然に存在している元素はもっと少ないですが）の元素の性質について，交通整理する術を人類は開発してきました。本書は，先人たちが開拓し，まとめあげた元素についての知識を「暗記」ではなく，「理解」することで学ぶことを目的としています。

1 章から 4 章までは，物理化学の基礎や一般化学と重複する内容が多いです

が，無機化学を学ぶための基本的な事項をまとめています。5 章では，元素の各論を扱い，典型元素の中で一部の主要な元素を中心にその基本的な性質をまとめています。元素の性質について，暗記ではなく，系統だった規則性を理解してほしいと考えます。6 章では錯体化学，7 章では固体化学を扱い，専門の無機化学に進むための導入的な内容をなるべく広く記しています。8 章では溶液化学を扱い，無機物質の関わる化学反応や分析化学の基礎を説明しています。9 章では核化学を扱っています。原子力発電や放射線治療などに関わる元素は数多く，無機化学の重要なテーマとなっています。最後に 10 章では生物無機化学の入門的な内容をまとめています。生物というと有機化学が重要と考えるかもしれませんが，実は無機物質に分類されるさまざまな物質が生命に必須であることがわかっています。そこで生命と数多くの元素との関わりについて，基本的な内容を簡単に扱っています。

本書で学んだ事柄によって，資格試験や大学院入試などの試験の合格につながるのみならず，その内容が，最先端の研究を行うための基礎としても役立つことを願っています。また，工学部や理学部など理系の学生だけでなく，化学に興味をもつ文系の学生を含め，教養課程の教科書や参考書などとしてもご活用いただければ幸いです。

なお，本書執筆にあたり，冨田靖正教授（静岡大学工学部）から貴重なご意見を頂戴しました。最後になりますが，ここに厚く御礼申し上げます。

2024 年 8 月

著　者

目　　次

1章　原　　子

1.1　原 子 と は …… 1
1.1.1　原子を構成する粒子 …… 2
1.1.2　元素の存在状態と成因 …… 3
1.1.3　原子と元素の違い …… 4
1.2　元素の電子状態 …… 4
1.2.1　水素原子とボーアモデル …… 4
1.2.2　量子力学（量子化学）入門 …… 8
1.2.3　原 子 軌 道 …… 10
1.2.4　多電子原子の構造 …… 13
1.3　イオン化エネルギーと電子親和力 …… 15
1.4　有効核電荷 …… 17
1.5　電気陰性度 …… 19
ま　と　め …… 23
章 末 問 題 …… 23

2章　周　　期　　表

2.1　周期表とは …… 24
2.1.1　現代の周期表，周期と族 …… 24
2.1.2　周期表とブロック分類 …… 25
2.2　周期表と元素の性質 …… 27
2.2.1　原 子 半 径 …… 27

2.2.2 イオン半径 …… 28
2.2.3 周期表と原子，イオンの大きさ …… 29
2.2.4 ランタニド（ランタノイド）収縮 …… 30
2.2.5 周期表とイオン化エネルギー，電子親和力，電気陰性度 …… 31
2.3 周期表と元素の存在状態 …… 33
ま と め …… 34
章 末 問 題 …… 35

3章 固体の形成

3.1 凝 集 力 …… 36
3.2 共有結合と分子性化合物 …… 36
3.3 金属結合と金属結晶 …… 37
3.4 最密充填構造 …… 38
3.5 イオン結合 …… 40
3.5.1 イオン結晶の構造 …… 41
3.5.2 イオン半径比と配位数 …… 43
3.6 格子エンタルピー …… 44
3.6.1 ポテンシャルエネルギー …… 44
3.6.2 ボルン・ハーバーサイクル …… 47
3.7 分 子 間 力 …… 49
3.8 水 素 結 合 …… 50
ま と め …… 50
章 末 問 題 …… 51

4章 分 子

4.1 共 有 結 合 …… 52
4.1.1 ルイス構造とローンペア …… 52
4.1.2 オクテット則 …… 53

4.1.3　2中心2電子結合と電子不足結合 …… 54
4.1.4　形式電荷・共鳴 …… 54
4.1.5　酸　化　数 …… 56
4.2　分子軌道法入門 …… 56
4.2.1　原子軌道と分子軌道 …… 56
4.2.2　水素分子とヘリウム分子イオン …… 58
4.2.3　結 合 次 数 …… 60
4.2.4　多電子原子の分子とさまざまな軌道 …… 61
4.2.5　フロンティア軌道 …… 63
4.2.6　等核二原子分子1：フッ素分子 …… 64
4.2.7　等核二原子分子2：酸素分子と三重項状態 …… 65
4.2.8　等核二原子分子3：窒素分子 …… 66
4.2.9　異核二原子分子1：フッ化水素 …… 68
4.2.10　異核二原子分子2：一酸化炭素 …… 69
4.2.11　混 成 軌 道 …… 71
4.2.12　不飽和結合 …… 73
4.2.13　バンド理論 …… 74
4.2.14　金属（導体）・半導体・絶縁体 …… 75
4.2.15　量子ドット …… 77
ま　と　め …… 79
章 末 問 題 …… 79

5章　典　型　元　素

5.1　元素の各論 …… 81
5.2　水　　素 …… 82
5.2.1　水素の同位体 …… 82
5.2.2　水素分子と原子核のスピン …… 83
5.2.3　水素原子の電子配置と化学的性質 …… 84
5.2.4　水素の化合物1：塩類似水素化物 …… 85

5.2.5 水素の化合物 2：分子性水素化物 …… 86
5.2.6 水素の化合物 3：金属類似水素化物 …… 87
5.3 希ガス（貴ガス） …… 87
5.4 アルカリ金属 …… 89
5.4.1 アルカリ金属単体の性質 …… 89
5.4.2 アルカリ金属単体の製法 …… 91
5.4.3 アルカリ金属のイオン化傾向 …… 92
5.4.4 アルカリ金属のイオンの大きさと水和半径 …… 94
5.4.5 アルカリ金属のアンモニアへの溶解 …… 95
5.4.6 アルカリ金属イオンを有機溶媒に溶かす方法 …… 95
5.4.7 アルカリ金属の酸化物とその他の化合物 …… 96
5.5 アルカリ土類金属（第 2 族元素） …… 97
5.5.1 アルカリ土類金属（第 2 族元素）単体の一般的な性質 …… 98
5.5.2 対角関係:アルカリ金属元素, 第 2 族元素, 第 13 族元素の類似性 …… 99
5.5.3 第 2 族元素の化合物 …… 100
5.6 ホウ素とアルミニウム …… 101
5.6.1 ホウ素の同位体 …… 102
5.6.2 ホウ素の化学的性質 …… 103
5.6.3 ボランの構造 …… 105
5.6.4 ホウ素のその他の化合物 …… 106
5.6.5 アルミニウム …… 107
5.6.6 アルミニウム単体の製法 …… 108
5.6.7 アルミニウムの化合物 …… 108
5.7 炭素とケイ素 …… 109
5.7.1 炭素の同位体 …… 109
5.7.2 炭素の単体と同素体 …… 110
5.7.3 炭素の化合物 …… 112
5.7.4 ケイ素の単体と製法 …… 113
5.7.5 ケイ素の化合物 …… 115
5.8 窒素とリン …… 116

5.8.1　窒素の単体と化合物 …… 116
5.8.2　リンの単体と化合物 …… 118
5.8.3　窒素またはリンを含む錯体 …… 120
5.9　酸素と硫黄 …… 120
5.9.1　酸素の単体とイオン …… 121
5.9.2　活性酸素と過酸化水素の製法 …… 122
5.9.3　硫黄の単体 …… 124
5.9.4　硫黄の化合物の例 …… 125
5.10　ハロゲン …… 125
5.10.1　ハロゲンの単体 …… 127
5.10.2　ハロゲン単体の製法 …… 128
5.10.3　フッ素の特徴 …… 129
5.11　オキソ酸 …… 131
5.11.1　周期表とオキソ酸 …… 132
5.11.2　おもな典型元素のオキソ酸 …… 133
5.11.3　ハロゲンのオキソ酸 …… 134
まとめ …… 135
章末問題 …… 139

6章　遷移元素と錯体化学

6.1　遷移元素とは …… 140
6.2　配位化合物 …… 142
6.2.1　配位結合 …… 142
6.2.2　錯体の命名法 …… 143
6.2.3　錯体の構造 …… 145
6.3　原子価結合理論と錯体の磁性 …… 149
6.4　結晶場理論 …… 152
6.5　配位子場理論 …… 155
6.6　金属錯体の電子状態と分光学 …… 155

6.6.1 金属錯体の色 …… 156
6.6.2 分光化学系列 …… 156
6.7 金属錯体の安定性と反応 …… 157
6.8 遷移金属元素の各論 …… 158
6.8.1 スカンジウム・イットリウム …… 159
6.8.2 チタン・ジルコニウム・ハフニウム …… 160
6.8.3 バナジウム・ニオブ・タンタル …… 161
6.8.4 クロム・モリブデン・タングステン …… 162
6.8.5 マンガン・テクネチウム・レニウム …… 163
6.8.6 鉄・コバルト・ニッケル …… 163
6.8.7 白金族元素 …… 164
6.8.8 銅・銀・金 …… 165
6.8.9 ランタノイド …… 167
ま と め …… 168
章 末 問 題 …… 169

7章 固 体 化 学

7.1 固体化学とは：結晶について …… 170
7.2 無機化合物の結晶構造 …… 170
7.2.1 イオンの最密充填と配位多面体 …… 171
7.2.2 晶系と単位格子，ブラベ格子 …… 171
7.2.3 代表的な結晶構造 …… 175
7.3 結晶による X 線回折 …… 177
7.3.1 X 線回折についての基礎知識 …… 178
7.3.2 空間群と消滅則 …… 179
7.4 固体の電気伝導 …… 180
7.5 固体の熱伝導 …… 182
7.6 誘電体と関連する物性 …… 182
7.7 格 子 欠 陥 …… 185

7.8　ナノ材料……185
まとめ……187
章末問題……188

8章　溶液化学

8.1　溶液化学とは……189
8.2　理想溶液と非理想溶液……189
8.3　酸と塩基……190
　8.3.1　酸と塩基の定義……190
　8.3.2　pH と pK_a……192
　8.3.3　HASB……193
　8.3.4　緩衝溶液……194
　8.3.5　水　　和……195
　8.3.6　加水分解……196
8.4　酸化還元……197
　8.4.1　酸化剤と還元剤……197
　8.4.2　標準酸化還元電位……199
まとめ……202
章末問題……203

9章　核　化　学

9.1　核化学とは……204
9.2　自然界の力と放射性同位体……205
9.3　放射線と放射能：関係する物理量……207
9.4　放射性同位体の半減期……210
9.5　アクチノイド……210
9.6　原子力発電の概要……212
9.7　核医学の概要……216

まとめ……217
章末問題……218

10章　生物無機化学

10.1　生物無機化学とは……219
10.2　酸　素……220
　10.2.1　酸素と活性酸素……221
　10.2.2　活性酸素の除去と生体防御……224
　10.2.3　窒素酸化物……225
10.3　アルカリ金属……225
10.4　第2族元素（アルカリ土類金属）……226
10.5　金属錯体……227
　10.5.1　金属錯体と酵素……228
　10.5.2　血液における酸素運搬……230
　10.5.3　金属錯体と光合成……234
10.6　金属が示す毒性……235
　10.6.1　重金属の毒性……236
　10.6.2　金属発がん……236
10.7　無機物質の薬理作用の例：抗がん剤……237
まとめ……238
章末問題……238

付　録……240
索　引……242

1. 原　　子

1.1 原子とは

世の中には，さまざまな物質が存在する。**混合物**（mixture）と**純物質**（pure substance）に分けられ，純物質は，**化合物**（compound）と**単体**（simple substance）に分けられる。単体を構成する物質を分類したものが**元素**（element）と呼ばれるが，2章の**周期表**（periodic table）で分類されるように元素は100種類以上知られている。元素は，それ以上分割できない粒子である**原子**（atom）で構成されている。（原子1つが元素とみなされる場合もある。）その原子の構造は，比較的単純である。**図1.1**に示すように，正電荷をもつ**原子核**（nucleus）の周りに負電荷をもち非常に軽い**電子**（electron）が存在している（回っているとみなすこともできる）。原子核は，正電荷をもつ**陽子**（positron）と電荷をもたない**中性子**（neutron）で構成されている。陽子と中性子の質量は，ほぼ等しく（中性子のほうが少し重いとされるが），それぞれ電子の1840倍程度の質量をもち，原子核の質量が原子の質量と考えてよい。

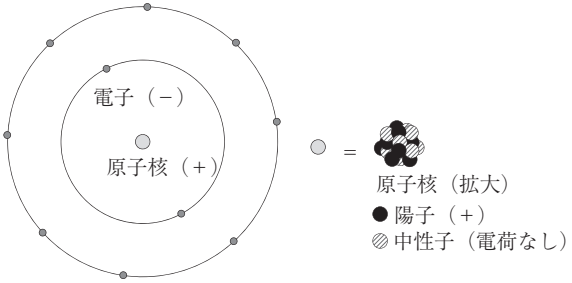

図1.1　原　　子

この世の中に存在する物質の性質は，さまざまである。常温で，**気体**（gas）か**液体**（liquid）または**固体**（solid）のものもあれば，水に溶けやすいものと溶けにくいもの，よく燃える物質と難燃性の物質，硬いものとやわらかいもの，電気を流すかどうか，**酸**（acid）と**塩基**（base）など，細かい性質を考えるときりがない。物質は原子で構成されているから，原子の種類で性質が決まるわけである。原子の性質に影響する重要な因子を考えていくと，電子の配置が化学的および物理的性質を決めているといってもよい。

現在，陽子数を**原子番号**（atomic number）として，元素を交通整理している。陽子数が等しい原子で構成される物質を同じ元素として分類するのである。陽子数が決まれば，電子数も決まる。中性原子であれば（イオンでなければ），陽子数と電子数は等しい。1.2節で説明するが，原子の中で電子の座席は決まっており，その数が決まれば，電子配置が決まり，性質も決まる。すなわち，陽子数でその元素の運命が支配されているといってよい。

1.1.1　原子を構成する粒子

〔**1**〕　**中性子**　　中性子は原子核を構成する粒子で，電荷をもたない。質量は，陽子とほぼ同じ（中性子のほうがわずかに重い）。陽子とは自然界で最強の**強い力**（strong force）（または**核力**（nuclear force））と呼ばれる力で結合している。中性子は，3つの**クォーク**（quark）と呼ばれる素粒子から構成されているが，本誌ではそれ以上深入りしないことにする。陽子数が同じ物質は同じ元素と分類されるが，中性子数が異なる場合，**同位体**（isotope）と呼ばれる。同じ元素であるが，原子としては同じではない。

〔**2**〕　**陽　子**　　陽子は原子核を構成する粒子で，正電荷（1つ当り＋1.602×10^{-19} C）をもつ。質量は，中性子とほぼ同じである。陽子は正電荷をもっているため，小さな原子核に集まっていると反発してしまう。しかし，陽子は，中性子と強い力で結合しており，その結合力は，陽子間の反発力を上回っている。陽子と中性子の数のバランスが悪いと原子核は不安定になる。安定な原子核は未来永劫，内部から**崩壊**（decay）することはない（外部からの

影響がなければその状態のまま）と考えられているが，不安定な原子核は内部から崩壊する。そのときに**放射線**（radioactive ray）を発し，**放射性同位体**（radioisotope）となる。原子核については，9 章の核化学で再び扱う。

〔3〕 **電　子**　電子は原子核の周りに存在する（回っているとみなすこともできる）非常に軽い粒子である。負電荷（1 つ当り -1.602×10^{-19} C）をもち，その絶対値は陽子の電荷と同じである。電子はそれ以上分解することができない素粒子であると考えられている。物質の性質は，電子の働きによって決まるといっても過言ではない。電子の受け渡しによって化学反応は起こり，エネルギーの出入りも連動する。(物質の燃焼や爆発も電子の働きのためである。) 電子の大きさについては，非常に小さい粒子とみなすこともできるが，厳密に議論するのが難しい。とりあえず，本書では，電子の大きさはよくわからないが，小さい粒子のようなものと考えておこう。

原子に関する用語について整理してみる。

1) 同位体：原子番号（陽子数）が同じであるが，**質量数**（mass number）（陽子数と中性子数の和）または中性子数が異なる原子を意味する。すなわち，同じ元素ではあるが，同じ原子ではない（元素と原子という用語の違いに注意）。
2) **同重体**（isobar）：質量数が同じであるが，原子番号が異なる原子を指す。陽子数が異なるので，たがいに異なる元素である。

1.1.2　元素の存在状態と成因

宇宙の起源は，**ビッグバン**（big bang）とされ，そのときから元素が作られていったと考えられる。最もシンプルな元素である水素が全宇宙で最も多く，重量比で 77％といわれる。ついで，ヘリウムが 21 ％程度といわれており，それよりも重い元素は，宇宙全体の割合としては，わずかであるといえる。これは**分光学**（spectroscopy）によってわかった。物質が発する光（電磁波）の波長は，物質特有な成分があり，宇宙から地球に届く光を分析すると，その起源を推定することができる。なお，地球の表面付近では，酸素が最も多く，続い

て，ケイ素，アルミニウム，鉄とされる。これらの存在比は，地球のどの部分を対象とするかで変わってくることに注意する。

1.1.3　原子と元素の違い

「原子」と「元素」は，非常に似ているが異なる用語である。化学の一般教養程度を学ぶのであれば，区別しなくても問題ないかもしれないが，専門科目として学ぶ工学系や理学系，薬学系など，理系の学生には，ぜひ違いを理解しておいてほしい。原子は，物質の根源の粒子であるが，元素は概念的な意味が強い。例えば，^{15}O と ^{16}O は，いずれも酸素であり，同じ元素であるといえるが，同じ原子ではない。また，^{16}O と $^{16}O_2$ は，同じ元素であり，同じ原子を含んでいる。しかし，^{16}O は，原子と呼べるが，$^{16}O_2$ は，同じ原子から構成された分子と呼ぶのが適切である。

1.2　元素の電子状態

元素の化学的，物理的性質は，電子の数とその配置でほぼ決まる。それでは，電子はどのように配置されているのであろうか？詳細は省略するとして，電子配置がわかってきた歴史を簡単に振り返りたい。まず，原子核の周りを電子が円運動しているモデルが提唱された。そこで，円運動の軌道という考えから，電子軌道という用語が生まれ，その軌道の形について議論されるようになった。円運動のモデルは，「長岡半太郎モデル」や「ラザフォードモデル」として知られている。単純に円運動とすると実際の原子の様子（実験結果）を説明できなかったが，もう少し突っ込んだ理論で実際の原子の性質を説明できるモデルが**ボーアモデル**（Bohr's model）である。その後，量子力学によって，元素の**電子状態**（electronic state）がわかってきた。

1.2.1　水素原子とボーアモデル

最もシンプルな原子である水素について議論したい。まず，電子を原子核

（水素の場合，1つの陽子）の周りを円運動していると考える「ボーアモデル」についてまとめる。このモデルでは，次の2つの条件が基本である。

① 電子は，原子核の周りを円運動している（**図 1.2**）。

② ただし，次の関係を満足する軌道でなければならない。

$$m_e v r = n\frac{h}{2\pi} \tag{1.1}$$

ここで，m_e：電子の質量，v：電子の速度，r：円運動の半径，h：プランク定数 6.626×10^{-34} Js，n：任意の整数（1, 2, 3, …）である。なお，原子核の質量は，電子に比べて非常に大きいので考えない（動かないものとする）。

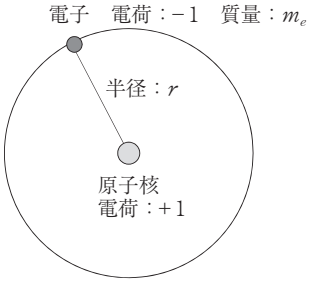

図 1.2 ボーアモデル
（水素原子の例）

ここで，②の条件の理論的裏付けは，すぐになされていなかったが，この条件を使うと実験結果が説明できたのである。例えば，水素放電（真空中に水素ガスを封入し電圧をかける実験）では，紫外線や可視光線が発生するが，その波長を予測することができる。この水素放電は，電気のエネルギーにより，水素分子が原子状態になった後，さらに水素原子の中の電子の配置が変わり，元の配置に戻るときに，余分なエネルギーを光として放出する現象である。電子の配置を理論的に計算できれば，その波長を計算することができる。図 1.2 に原子核の周りを円運動する電子を示す。式（1.1）で $n=1$ のとき，原子核に最も近い軌道を運動し，n が 2，3 と大きくなるに従って，円運動の半径も大きくなる。電子の軌道の半径は，どのような大きさでもよいわけではなく，n によって支配されるのが不思議なところである。原子核から近い電子のもつエネルギーは小さく，半径が大きくなるに従って大きなエネルギーをもつことが

索　　引

〔あ〕

アインシュタインモデル 182
亜塩素酸 135
アクセプター原子 142
アクチノイド 210
アクチノイド収縮 212
アザクラウンエーテル 96
亜臭素酸 135
アスタチン 126
アセチリド 113
圧電効果 184
圧力容器 216
アナターゼ 160
アナターゼ型 176
アミノ酸 223
アメリシウム 211
亜ヨウ素酸 135
亜硫酸 125
アルカリ金属 89
アルカリ土類金属 97
アルミニウム 101
アルミン酸イオン 109
アレニウスの定義 190
アロステリック効果 231
アントラキノン法 123
アンモニア 117

〔い〕

硫　黄 120
イオン化エネルギー 16
イオン化傾向 92
イオン結合 40
イオン結晶 36
イオン伝導 180
イオン半径 28
イオン半径比 43
異性化反応 230
位　相 11
位置エネルギー 6
一重項酸素 123
胃腸薬 227
一酸化炭素 112, 233
一酸化炭素中毒 234
一酸化窒素 225
イットリウム 159
医薬品 220
イリジウム 164
インドール環 232

〔う〕

ウェイド則 106
ウラン 210
ウルツ鉱型構造 42
ウンゲラーデ 62
運動エネルギー 6

〔え〕

液　体 2
液体金属 216
エックス線 28
エネルギー移動 223
塩化セシウム型構造 41
塩化物イオン 56
塩　基 2, 190
塩基解離指数 193
塩基解離定数 193
延　性 38
塩　素 126
塩素酸 135
エンタルピー 196
エンタルピー変化 44
エントロピー 196
塩類似水素化物 85

〔お〕

王　水 117, 166
黄リン 119
オガネソン 207
オキソ酸 106
オクテット則 15, 53
オストワルド法 117
オスミウム 164
オゾン 121
オルト水素 83
オールレッド・ロコウの定義 20

〔か〕

過塩素酸 134
化学結合 27
核医学 204
核化学 204
核　酸 221
格納容器 216
核反応 205
核物理学 204
核分裂 158, 206
核　膜 222
隔膜電解法 128
核融合 212
核　力 2, 205
化合物 1
過酸化水素 123, 222
過酸化物 56
過酸化物イオン 122
過臭素酸 135
過剰障害 235
加水分解 197
硬い塩基 193
硬い酸 193
カタラーゼ 224
活性酸素 123, 221
活　量 93
カテネーション 124
価電子帯 76
カーボンナノチューブ 112
カーボンナノホーン 112
カマリング・オネス 181
過ヨウ素酸 135

カリウム 91
カルコゲン 120
カルシウム 97
カルシウムアセチリド 113
カルボニル 144
カルモジュリン 226
岩塩型構造 41
還元剤 197
換算質量 82
緩衝作用 194
緩衝溶液 194
完全燃焼 234
完全反磁性 181
ガンマ（γ）線 207
がん抑制遺伝子 236

〔き〕

希ガス 19, 87
貴ガス 19, 87
希硝酸 166
気　体 2
軌道電子捕獲 206
希土類鉱床 159
ギブズエネルギー 196
逆位相 58
逆供与 234
吸収線量 209
凝固点降下 114, 189
凝集力 36
鏡像異性体 147
共　鳴 55
共鳴構造 55
共有結合 36
共有結合結晶 37
共有結合半径 27
極性結晶 184
キレート 148
銀 165
金 165
禁制帯 76
禁制反射 179
金　属 75
金属クラスター 147
金属結晶 36
金属半径 27
金属類似水素化物 87

〔く〕

グアニン 223
空間群 179
空間格子 171
空間線量率 210
クォーク 2
クラウンエーテル 95
グラファイト 37, 111
グラフェン 111
クリプタンド 96
グレイ 209
グロビン 230
クロム 162
クロロフィル 235
クーロン力 6

〔け〕

形式電荷 54
軽水素 82
軽水炉 216
ケイ素 99, 109
下　剤 227
結合エネルギー 20
結合距離 27
結合次数 60
結合性分子軌道 58
結　晶 37
結晶格子 171
結晶場 152
結晶場分裂 153
結晶場理論 152
ゲラーデ 62
原　子 1
原子核 1
原子価結合理論 150
原子軌道 57
原子状酸素 123
原子半径 27
原子番号 2
原子力発電 204
原子炉 160
元　素 1
減速材 216

〔こ〕

高温超伝導体 159
抗がん剤 237
合　金 39
光合成 221
抗酸化作用 224
抗酸化物質 224
格子エネルギー 44
格子エンタルピー 44
格子欠陥 185
格子定数 175
抗腫瘍効果 237
高スピン状態 233
高速増殖炉 216
酵素タンパク質 221
酵素反応 224
呼　吸 221
コークス 114
黒リン 119
固　体 2
固体化合物 34
コバルト 163
固有関数 8
孤立電子対 53
混合物 1
混成軌道 71

〔さ〕

最外殻電子 20, 24
最高被占分子軌道 63
最低空軌道 63
最密充填構造 38
サブユニット 229
細胞膜 222
酸 2, 190
酸塩基反応 191
酸化アルミニウム 108
酸解離指数 131, 193
酸解離定数 192
酸化還元 197
酸化還元電位 200
酸化還元反応 197
三角関数 9
酸化剤 197
酸化作用 125
酸化数 56
酸化ストレス 221
酸化損傷 237
酸化ダメージ 221
酸化チタン 160
酸化物イオン 122
三酸化硫黄 125
三斜格子 173
三斜晶系 173
三重結合 53
三重水素 82

酸　素 120
酸素イオン 122
酸素欠乏 234
三方晶系 173

〔し〕

次亜塩素酸 134
次亜臭素酸 135
次亜フッ素酸 133
次亜ヨウ素酸 135
磁　界 13
紫外線 222
磁気モーメント 151
磁気量子数 12
仕事関数 16
自己プロトリシス 191
磁　石 13
システイン 223
シスプラチン 147, 237
磁　性 13, 141
磁性体 177
実効線量 209
実在気体 190
質量数 3
シトムローム 229
シトムローム P450 229
自発分極 184
シーベルト 209
ジボラン 105
遮蔽材 215
遮蔽定数 18
周　期 24
周期表 1
重金属 236
重水素 82
臭　素 126
臭素酸 135
自由エネルギー 196
自由電子モデル 37
充満帯 76
重力相互作用 205
縮　退 65
主量子数 11
シュレーディンガー方程式 8
純物質 1
晶　系 171
硝　酸 117
常磁性 66
照射線量 210
衝　突 189
静脈血 233
消滅則 179
触媒作用 219
触媒反応 224
ショットキー欠陥 185
シラン 115
ジルコニウム 160
ジルコン 160
真空中 36
真空の誘電率 6
神経伝達 226
真正半導体 77
浸透圧 190
侵入型固溶体 40
振　幅 9

〔す〕

水　銀 158
水酸化マグネシウム 227
水酸基 131
水　素 82
水素イオン 84
水素化物イオン 84
水素結合 36
水素分子 58
水　和 195
水和水 94
スカンジウム 159
スーパーオキシド 222
スーパーオキシド
　ジスムターゼ 224
スピン量子数 13
スペシャルペア 235
スレーター則 18

〔せ〕

制御材 160, 215
制御棒 215
正　孔 77
正四面体 39
生成定数 157
静電引力 6
静電気的な引力 19
静電気力 36
正八面体 39
生物無機化学 219
正方晶系 171
生命活動 221
赤リン 119
セシウム 91
絶縁体 75
零点振動エネルギー 88
セン亜鉛鉱型構造 42, 175
遷移金属 140
遷移元素 25, 140
全生成定数 158

〔そ〕

双極子–双極子相互作用 50
双極子モーメント 49, 183
双極子–誘起双極子相互作用
50
族 24
束一的性質 190
組織荷重係数 209
素粒子 206
素粒子物理学 204
ゾーンメルティング 114

〔た〕

帯域溶融法 114
体心正方格子 171
体心直方格子 171
体心立方格子 40
体心立方格子構造 40
ダイヤモンド 37, 110
多核錯体 147
脱水作用 125
脱メチル化反応 230
多電子原子 12
ダルトナイド化合物 34
単位格子 171
炭化カルシウム 113
炭化ケイ素 115
炭化物 113
炭化物イオン 113
タングステン 162
単結合 53
炭　酸 133
炭酸イオン 112
単斜晶系 173
単純正方格子 171
単純単斜格子 173
単純直方格子 171
単純立方格子 171
弾性衝突 189
炭　素 109

単　体 1
タンタル 161
タンパク質 223

〔ち〕

チオクラウンエーテル 96
チタン 160
チタン酸カルシウム 177
窒　素 116
窒素酸化物 225
中心間距離 45
中性原子 14
中性子 1
超原子価化合物 53
超酸化物 56
超酸化物イオン 122
超伝導 181
超伝導体 177
超流動 88
直方晶系 173
直交方向 62
チロシン 223

〔つ，て〕

強い力 2, 205
抵抗率 180
低侵襲 217
底心単斜格子 173
底心直方格子 171
低スピン状態 233
定比例の法則 34
定容熱容量 182
テクネチウム 158
鉄 163
テネシン 126
デバイモデル 182
デュロン・プティの法則 182
電気陰性度 19
電気素量 6
電気抵抗 180
電気抵抗率 180
電気伝導度 75
電気伝導率 180
電気パルス 226
電極電位 92
典型元素 25, 81
点欠陥 185
電　子 1
電磁気相互作用 36, 205
電子軌道 56
電子交換 223
電子状態 4
電子親和力 17
電子線 83
電子対 15
電子対反発則 72
電子伝達 229
電子ニュートリノ 206
電子配置 13
展　性 38
電　池 189
点電子式 52
伝導体 76
電離作用 207
電離放射線 207

〔と〕

ド・ブロイ 7
銅 165
同位相 58
同位体 2
同位体効果 82
等価線量 209
同重体 3
導　体 75
動脈血 233
毒　性 217
ドナー原子 142
ドーピング 77
トリプトファン 223
トリフルオロ酢酸 131
ドルトン 34

〔な〕

内殻電子 17
ナトリウム 91
ナノ材料 185
ナノ粒子 186

〔に〕

ニオブ 161
ニクトゲン 116
二酸化硫黄 125
二酸化ケイ素 37, 115
二酸化炭素 37, 112
二重結合 53
ニッケル 163
ニュートリノ 205

〔ね，の〕

ネオジム 167
熱伝導 182
熱伝導率 182
熱容量 182
ネプツニウム 211
ネルンストの式 202
燃料ペレット 214
燃料棒 160, 214
濃硝酸 166

〔は〕

配位化合物 142
配位結合 120
配位子 120
配位子場理論 155
配位数 41
配位多面体 171
パウリの排他原理（排他律） 13
白リン 119
発がん性 236
白　金 164
白金触媒 117
白金族元素 164
発光ダイオード 77
波動関数 8
ハドロン 206
ハドロン数 206
バナジウム 161
ハーバー・ボッシュ法 117
ハーバー・ワイス反応 222
ハフニウム 160
ハミルトニアン演算子 8
パラジウム 164
パラ水素 84
ハロゲン 125
ハロゲン化物 126
半　径 6
反結合性分子軌道 58
半減期 210
反射材 214
半占有軌道 64
反電子ニュートリノ 82, 205
半導体 75
バンドギャップ 76
バンド理論 74
反発力 19

半反応式 198
反物質 206
万有引力 205

〔ひ〕

光増感剤 223
非結合性分子軌道 58
非結合電子対 53
ヒスチジン 223
ビタミン 224
ビッグバン 3
必須元素 159, 219
ヒドリド 144
ヒドロキシアパタイト 226
ヒドロキシルラジカル 123
被ばく 83, 209
被覆管 160, 214
ビーム 207
比誘電率 183
標準酸化還元電位 200
標準水素電極 92
標準電極電位 92
氷晶石 108
表面プラズモン吸収 165
非理想溶液 190
微量元素 220
微量必須元素 164

〔ふ〕

ファラデー定数 202
ファンデルワールス力 49
フィードバック 231
フェイシャル 147
フェルミ粒子 13
フェレドキシン 235
フェントン反応 222
フォノン 182
不活性ガス 88
不完全燃焼 234
節 10
不対電子 15
物質の三態 189
物質波 7
フッ素 126
フッ素樹脂 130
沸点上昇 189
物理化学 189
不定比化合物 34
不動態 108
不飽和結合 73
ブラッグの法則 178
ブラッグ反射 178
ブラベ 171
ブラベ格子 171
フラーレン 112
ブルッカイト型 176
プルトニウム 211
フレンケル欠陥 185
ブレンステッド・ローリーの定義 190
ブロック 25
ブロック分類 25
プロトポルフィリン IX 228
フロンティア軌道 64
分光化学系列 154
分光学 3
分散力 49
分子間力 37
分子軌道 57
分子軌道法 56
分子結晶 36
分子性化合物 34
分子性水素化物 86
分析化学 189
フントの規則 14

〔へ〕

平衡定数 157
ベクレル 208
ヘ　ム 228
ヘモグロビン 231
ヘリウム分子イオン 59
ベリリウム 97
ペルオキシナイトライト 225
ベルトライド化合物 34
ベルトレ 34
ペロブスカイト型構造 42, 177
変　性 236
ベンゼン 106
ヘンダーソン・ハッセルバルヒの式 195

〔ほ〕

ボーアマグネトン 151
ボーアモデル 4
方位量子数 12
崩　壊 2
放射化学 204
放射性医薬品 220
放射性同位体 3
放射線 3, 83
放射線化学 204
放射線荷重係数 209
放射線診断 204
放射線治療 204
放射線発生装置 207
放射能 83, 207
ホウ素 101
ホウ素中性子捕捉療法 217
ボーキサイト 108
ホスト–ゲスト錯体 96
ホスト–ゲスト相互作用 95
ホタル石型構造 42, 175
ポテンシャルエネルギー 44
ボラジン 106
ボラゾン 107
ボラン 104
ポーリングの定義 20
ホール・エール法 108
ポルフィリン 228
ボルン・ハーバーサイクル 48

〔ま〕

マイスナー効果 181
膜電位 226
マグネシウム 97
マーデルング定数 45
マリケンの定義 19
マンガン 163

〔み〕

ミオグロビン 231
水のイオン積 191
ミラー指数 175

〔め，も〕

メチオニン 223
メチル水銀 236
メリディオナル 147
面心直方格子 173
面心立方格子 39
モリブデン 162

〔や〕

薬理作用 220

軟らかい塩基 193
軟らかい酸 193
ヤーン・テラー効果 155

〔ゆ〕

有害性 236
誘起効果 130
有機水銀 236
有効核電荷 17
誘電体 177
誘電分極 183
誘電率 183
遊離基 53
遊離酸 135

〔よ〕

溶液化学 189
陽　子 1
溶　質 189
ヨウ素 126
ヨウ素酸 135
陽電子 206
溶　媒 189
弱い力 205
四フッ化ケイ素 115

〔ら〕

ラジカル 53
ランタニド（ランタノイド）
　収縮 31
ランタノイド 167
ランタン 167

〔り〕

理想気体 190
理想溶液 189
リチウム 91
立方最密充填構造 39
立方晶系 171
硫化水素 125
硫化炭素 125
硫化リン 119
硫　酸 125
硫酸バリウム 227
粒子線 207
量子化学 8
量子ドット 78
量子力学 8
両性水酸化物 108
菱面体格子 173
リ　ン 116
臨　界 213

〔る〕

ルイス構造 52
ルイスの定義 190
ルチル 160
ルチル型構造 42, 176
ルテチウム 167
ルテニウム 164
ルビジウム 91

〔れ〕

冷却材 213
レニウム 163
レプトン 206
レプトン数 206
連鎖反応 213

〔ろ〕

ロジウム 164
六方格子 173
六方最密充填構造 39
六方晶系 173
ローレンシウム 211
ローンペア 53

〔数字〕

2 中心 2 電子結合 54
3 中心 2 電子結合 54
5-アミノレブリン酸 228

〔D〕

d 軌道 11

〔F〕

f 軌道 11

〔H〕

HASB 193

〔N〕

n 型半導体 77

〔P〕

p 型半導体 77
p 軌道 10

〔S〕

s 軌道 10

〔X〕

X 線回折 177

〔ギリシャ文字〕

α線 102
α崩壊 101
α粒子 206
β^+ 崩壊 206
β-カロテン 224
β崩壊 83
π軌道 62
π結合 62
σ軌道 62
σ結合 62

―― 著 者 略 歴 ――

1995 年　東邦大学理学部生物分子科学科卒業
1997 年　東京大学大学院工学系研究科修士課程修了（応用化学専攻）
2000 年　東京大学大学院総合文化研究科博士課程修了（広域科学専攻），博士（学術）
2000 年　三重大学助手
2004 年　静岡大学助教授
2016 年　静岡大学教授
　　現在に至る

初歩から学ぶ無機化学
Introduction to Inorganic Chemistry

© Kazutaka Hirakawa 2024

2024 年 9 月 26 日　初版第 1 刷発行　★

検印省略

著　　者　平川和貴（ひらかわかずたか）
発 行 者　株式会社　コロナ社
　　代 表 者　牛来真也
印 刷 所　萩原印刷株式会社
製 本 所　有限会社　愛千製本所

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 978-4-339-06671-5　C3043　Printed in Japan　（新宅）

JCOPY　＜出版者著作権管理機構 委託出版物＞
本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は，そのつど事前に，出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088，FAX 03-5244-5089，e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

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。