

スタディガイド

(学習指導書)

〈化学1／化学2〉

『グレイ化学 物質と人間』

中島 弘一

法政大学通信教育部

スタディガイド（学習指導書）について

このスタディガイド（学習指導書）は「化学1／化学2」を履修するにあたり、指定市販本教科書『グレイ化学 物質と人間』（東京化学同人）を本学通信教育課程で学習する際の手助けとなるよう作成されたものです。

今後、指定市販本教科書で学習を進めていくにあたって、このスタディガイド（学習指導書）を大いに活用して学習に励んでください。

法政大学通信教育部

はじめに

指定図書として選定した「グレイ化学 物質と人間」は一般の読者をも想定したアメリカの教養の教科書である。第3章までが化学の基礎的な内容で、第4章以降は最近の身の回りのトピックスをふんだんに盛り込んだ内容豊富な教科書である。通信教育の学生が持つ多様な興味に応え得ると判断して教科書として選定した。ただし、高校までの教育課程がアメリカと日本では異なり、また最近の高校では化学が選択科目となっているために、高校で化学を選択しなかったもの、あるいは高校を出てしばらく月日が経過した学生には少し難しい内容となっている。このスタディガイドでは第1章から3章までの基礎の部分について高校化学の基礎ができていない学生向けに解説を加えることにした。教科書に取りかかる前にスタディガイドを一読し、教科書と併読しながら3章までの理解ができれば、残りの章の内容は容易に理解が進むものと思われる。4章以降は各自、自分の興味に従って読み進んでほしい。

1 周期表

今日、私たちはすべての物質が原子でできていることを知っている。この考えはわずか200年ほど前のドルトンの原子説(1803年)に始まる。さらに私たちは原子が陽子、中性子からなる原子核とその周りを回る電子から成っていることも知っている。しかし、この内部構造が解明されるのはドルトンからさらに100年以上も経過した後の話である。原子の種類が異なるとなぜ化学的性質が異なるのか？また、原子の性質を決める要素が何なのかは原子の内部構造が解明されて初めてわれわれはその仕組みを理解できるようになる。この化学的性質と原子の内部構造の関係解明に周期(律)表が果たした役割は非常に大きい。

ドルトンはその原子説の中で原子の相対的重さである原子量という概念を導入した。すなわち一番軽い元素である水素の原子量を1とし、水素1gに対する反応量を対応する別の元素の原子量とした。各元素の原子量が一つ一つ実験的に求められてくると、当時の研究者たちは元素の原子量と化学的性質を関連付けて考えるようになった。そして、両者の関係を疑いのないものとしたのが1869年に発表されたメンデレーエフの周期表である。テキストの12ページに原子番号順に103個の元素が並べられた今日の周期表が出ている

が(1999年にさらに6個の元素が追加され現在は109番目までの元素が知られている)、1860年ごろはおよそ60種の元素しか知られていなかった。今日の原子番号は原子核を構成する陽子の数を意味するが、当時は陽子の存在はおろか原子に内部構造があるなどということすら知られていない時であり、原子番号は重さの順に元素を並べたその順番でしかなかった。結局唯一知られていた重さで元素の化学的性質を説明しようと試みられた。

周期律とは元素をその重さの順に並べたときに元素の化学的性質が周期的に変化することからその名がある。たとえば、周期表の上から3番目の横の列の元素を左から順に眺めてみると、一番左端にあるナトリウム(Na)は容易にイオン化して一価の陽イオンになるのに対し、その次のマグネシウム(Mg)は二価の陽イオン、次のアルミニウム(Al)は三価の陽イオンになる(イオンについては後述する)。次の珪素(Si)はイオンになりにくいものの、次のリン(P)は逆に三価の陰イオンとなり、硫黄(S)が二価の、塩素(Cl)は一価の陰イオンとなり、右端のアルゴン(Ar)は全く反応を示さない不活性な元素である。折り返した次のカリウム(K)は一つ上のナトリウムと同様、一価の陽イオンとなる元素で、次のカルシウム(Ca)はその上の元素のマグネシウムと同じ二価の陽イオンとなる、というように周期表では、横方向には段階的に性質が変化するとともに、縦の列には良く似た元素が並ぶ。ほぼ重さ順に元素を並べただけで元素の性質がこのように変化するのである。元素の重さが変化することで原子の内部構造に周期的に変化する何かがあるから化学的性質が周期的に変化するわけで、まずは元素の重さについて考えてみよう。

原子は原子核を構成する陽子と中性子、およびその周りを運動する電子の3つの粒子からなると考えられている。陽子と中性子の重さはほぼ等しく、電子の重さは陽子の約2000分の1と軽い。したがって、原子の重さはほぼ陽子と中性子の重さの和に等しくなる。周期表は原子番号順に並んでいるが、原子番号は陽子数を意味し、陽子の数が増えると一般に中性子数も増えるので、原子番号が増えると原子の重さも増える。(一部、中性子数の増え方が不規則な箇所があり、そのため、正確に記すと原子番号順が重さの順になっていない箇所がある。)しかし、原子番号が増えても重さには周期的に変わる何かがあるわけではない。原子番号が増えると重さには無関係な電子数が増えることが周期性に関係する。

原子核の周りを運動する電子の数は陽子の数に等しい、したがって、原子

番号が増えると重さのほかに電子の数も増える。この電子の運動の仕方(電子配置)が周期性に関係する。中学や高校の化学の教科書を開いてみると、この電子の運動する軌道を電子殻として教えている。一番原子核に近い殻をK殻、その次がL殻、M殻、N殻と続く。これはK殻よりも内側に存在する軌道が後に見つかるかもしれないということで、アルファベットの中途なKから命名されることになった。しかし、今日ではK殻より内側に軌道は存在しないことが明らかとなり、アルファベットのK, L, M, N…に代わって主量子数と呼ばれる1から始まる数字でこの殻を区別している。すなわち、主量子数1がK殻、2がL殻、3がM殻という具合である。また電子の軌道は原子状態のときと、分子状態のときとで異なる軌道になると考えられており、原子状態の電子軌道を「原子軌道」、分子状態にあるときの軌道を「分子軌道」と呼び、特に原子軌道については計算によって軌道の形やエネルギーなどが詳しく求められている。原子軌道と各元素の電子配置がテキストの付録Iに収められている。

主量子数1のK殻にはただ1つの軌道(s)しかないが、主量子数2のL殻には2種(s, p)の、3のM殻には3種(s, p, d)の軌道がある。たとえば、s軌道は原子核を中心とした球形をしているのに対し、p軌道は原子核を対称に球を二つつないだ亜鈴状をしている。またそれぞれの軌道を区別するために主量子数と組み合わせでK殻のsを1s軌道、L殻では2s軌道、2p軌道などと表記する。同じ軌道でも主量子数が異なれば軌道の形状は同じで、半径が異なる(主量子数が大きいほど半径が大きく、半径が大きな軌道ほどエネルギーが大きい)。またs軌道は1つしかないが、各電子殻のp軌道には方向の異なる軌道が3つある。すなわち、x軸、y軸、z軸方向にのびたp軌道が3つある。d軌道では5つ、f軌道に至っては7つの軌道が同一電子殻中に存在する。どの軌道にも最大2個の電子が運動できるので、s軌道には2個の電子が、p軌道であれば最大6個の電子が、d軌道は10個、f軌道では14個の電子が運動できる。このような原子軌道は原子と光の関係を調べた研究によって解明され、原子軌道のs, p, d, fという記号はその当時の研究の名残りで、今日、軌道を区別するために使われてはいるが、特に何か意味を持つものではない。

さて、原子番号の順に電子配置がどのように変化するかを325ページから始まる付録Iから眺めてみよう。電子はエネルギーの低い軌道から順に詰ま

っていく。各軌道のエネルギーは基本的に主量子数の小さいほうがエネルギーは低く、各原子軌道間では、 $s < p < d < f$ の順にエネルギーが大きくなる。したがって、原子番号 1 の水素では 1s 軌道に電子が 1 個入り、原子番号 10 のネオンでは初めの 2 個が 1s 軌道に、次の 2 個が 2s 軌道に、残りの 6 個の電子が 2p 軌道に入る。原則、電子は表の左側の軌道から順に詰まっていくが、途中、d 軌道や f 軌道に入るときに、それより外の電子殻にある s 軌道や p 軌道に先に電子が入る不規則な入り方をするとところもある。こうして電子配置を眺めるとようやくその周期性に気づくだろう。12 ページの周期表のたとえば一番左端の元素の電子配置を比べてみよう。すなわち、原子番号 3 のリチウム、11 番のナトリウム、19 番のカリウム、37 番のルビジウム、55 番のセシウム、87 番のフランシウムである。これらには最外殻の電子配置がいずれも s 軌道に 1 個の電子があるという共通点を持つ。周期律表のその次の縦列は最外殻の s 軌道に電子が 2 個入っている元素が並び、逆に一番右端の元素については（ヘリウムを除いて）s 軌道に 2 個、p 軌道に 6 個の電子配置を共通に持つ。12 ページの周期表の上にはそれぞれ s^1 、 s^2 から s^2p^5 、 s^2p^6 などと注記されているが、それはその列の共通の電子配置を示しており、この最外殻の電子配置が元素の化学的性質を決めるのである。さて、周期表 (p12) の真ん中には d ブロックと表記されている（たとえば、21–30 の元素群）部分がある。これは d 軌道に電子が一つずつ詰まっていく、総勢 10 個の元素が横一列に並んでいるブロックである。表の 4 列目から初めてこの元素が並ぶのも、主量子数 3 から初めて d 軌道が現れるため、3 列目までには空白の表となっているのである。ここには上に挙げた電子配置が表の上に表記されていない。付録 I を見てみるとこれらの元素の最外殻の電子は d 軌道ではなく、それよりもひとつ外の電子殻の s 軌道に存在する。これらの元素は d 軌道の電子数こそ違いうが、化学反応にこの d 軌道の電子はあまり関係しないため、最外殻の電子軌道である s 軌道の電子がこれらの元素の性質を決定する、従って、 s^1 や s^2 の電子配置を持つ周期表左端の元素と似た性質を持つことになる。もうひとつ周期表には欄外に表記された 2 列の表がある。教科書の表には f ブロックと表記されている。その名の通り、電子が f 軌道に入っている元素で、総勢 14 個の元素が並んでいる。原子番号を見てわかるようにこれらの元素は周期表上は 3 番目の列の ${}_{57}\text{La}$ と ${}_{89}\text{Ac}$ の後に続く元素である。これらの元素はいずれも d ブロックの元素群と同様、最外殻の電子軌道は s 軌道で

あり、それより内側の電子殻の f 軌道の電子数のみ異なる元素群で、化学的性質は先ほどの d ブロックの元素群以上に似通った性質を持つ。周期表が縦の列で性質の似た元素が並ぶという考えからいうならば、これら f ブロックの元素はみな $_{57}\text{La}$ と $_{89}\text{Ac}$ と同じ位置に配置されるべき元素であり、表記が困難なために別に掲載されているしだいである。

周期表からわかるもう一つ重要なことが希(貴)ガス元素の電子配置である。これらの元素は周期表の一番右側に配置されており、これらの元素は s 軌道と p 軌道がすべて電子で満たされている。希ガス元素はいずれも空気中に原子状態で存在し、結合を全く作らない。これに対し、他の元素は必ず、他の原子との間で何らかの結合を形成している。これらのことから、元素の化学的性質は最外殻の電子配置に関係し、その殻の s と p 軌道が電子で満たされると安定した電子配置となり、満たされていない原子については 3 章で述べる化学結合を他の原子との間で形成し、見かけ上 s、p が電子で満たされるような電子の授受を行う。そのため、最外殻の電子殻を原子価殻、その殻を運動する電子を原子価電子と呼んでいる。周期表左端の元素は最外殻の s 軌道に電子が一つあるだけなので、原子価は 1 であり、したがって、その s 軌道の電子を失うと残りの電子配置は s に 2 個、p に 6 個の配置となることから安定な電子配置になると考えられ、原子核の陽子の数よりも電子の数が一つ少ないプラスの電荷を帯びた一価の陽イオンになり易い性質を持つ。一方、周期律表の左から 2 番目の元素は最外殻の s 軌道に 2 個、p 軌道に 5 個という電子配置を持つ、したがって、他の元素からもうひとつ電子をもらいうけると s^2p^6 の安定な電子配置を取りうるので、陽子数よりも電子が一つ多い、一価の陰イオンになり易い性質を持つことが理解できる。

2 錬金術師の夢

錬金術という言葉をご存知だろうか？日本の歴史には出てこないが、西洋の中世史には良く見かける言葉であり、事の起こりはギリシャ時代にさかのぼる。紀元前 450 年ごろエンペドクレスは万物は 4 つの元素(空気、水、土、火)からなるという説を唱え、アリストテレスが彼の説を受け入れるとともに、後のキリスト教の勃興がさらにこの 4 元素説を広める役割を果たした。すなわち、この 4 つの元素を支配するのが神の力であるというのである。しかし、万人が神を信じていたわけではなく、4 つの元素を自在にコントロー

ルすることができる第5の元素があると考えた人たちが安価な金属である鉛や水銀を第5の元素で金に変えられると信じた。それが錬金術であり、それを夢見ていた錬金術師は17世紀ごろまで実験を行っていたといわれる。彼らが試みたのは加熱や、酸による溶解といったいわゆる化学実験であり、化学反応のエネルギーでは鉛を金に変えることは不可能である。鉛を金に変えるには原子核の中の陽子の数を変えることが必要で、原子核の中に陽子を追加する、あるいは、陽子を原子核から取り出すには莫大なエネルギーが必要で、化学反応によって原子核の構成要素を変化させることはできない。しかし、原子力エネルギーを用いれば原子核の中の陽子の数を変えることが可能となる。

原子力エネルギーを理解するには核分裂と放射能を知る必要がある。初めに放射能から説明してみよう。放射能とは「放射性物質から放射線が放出される現象、あるいはその能力」をさす。放射性物質から放射される放射線には3種類あり、それは α (アルファ)線、 β (ベータ)線、 γ (ガンマ)線と呼ばれる。では放射性物質とはどのようなものか？どんなものがあるのか？キュリー夫人が発見したラジウム、原子力発電で利用されているウランは確かに放射性物質として誰もが知っている。がんの放射線治療で利用されているコバルト60なども聞いたことがあるのではなかろうか？このコバルト60は普通のコバルトと何が違うのか？「普通のコバルト」とは実にあいまいな表現だが、鉱山から産出されるコバルトは放射能を持っていない、普通のコバルトであり、これはコバルト59と呼ばれる。この59や60といった数字を「質量数」といい、原子核を構成する陽子と中性子の数の和を表す。すなわちコバルトは原子番号が27番なので、陽子数は27であり、普通のコバルトは中性子数が32個である。これに対して、放射性物質のコバルト60は普通のコバルトよりも中性子が一つ多い33個の中性子を原子核内に持つ。この中性子数の違いが放射能を持つか持たないかを分ける原因となる。

原子力発電所の原子炉の中ではウランの核分裂によって多量の中性子が放出され、その中にたとえば鉱山から産出された普通のコバルトを入れておくと、コバルトの原子核に中性子が入り込み放射能を持ったコバルト60に変化する。同様にして中性子数の異なるいろいろな原子が作り出されている。たとえば、酸素は原子番号が8で、従って陽子の数が8個の原子核を持つ。天然には中性子数が8個の酸素と9個の酸素の2種類があるが（すなわち、質

量数 16 と 17)、いずれも放射能は持たない。しかし、これよりも中性子数を多くすると放射能を持つ。また逆に中性子の数を 8 より少ない原子核となった酸素も放射能を持つ。天然に存在する放射能を持たないどんな原子でも、中性子を吸収させると放射能を持つようになる。もちろん、人工的に作り出されたから放射能があるというわけではない。人工的に作っても天然と同じ質量数の酸素であれば放射能は持たない。

では中性子の数がどのように影響しているのだろうか？原子核について考えてみよう。原子の大きさは約 0.1nm (n をナノと呼び、1 ナノメートルは 1 ミリメートルのさらに 100 万分の 1 で 10^{-9}m のこと) であり、原子核はさらにその 10 万分の 1 の大きさといわれている。この非常に狭い原子核に(水素を除いて)複数の陽子が存在する。陽子はプラスの電荷を持っているのでこのような狭い空間内では陽子同士に大きな反発力が働くが、中性子が存在することでこの反発力を上回る大きな引力が中性子と陽子の間には働き、原子核内に複数の陽子とどまっていられると考えられている。したがって、陽子数に対して少なすぎる中性子数では原子核は不安定となることは容易に理解しうる。では多すぎる中性子ではどうなるのだろうか。実は中性子を原子核から取り出し孤立させると数分のうちに陽子と電子に分解してしまう。陽子や電子では他の粒子に変化するなどという変化は起こらない。すなわち中性子は原子核内で陽子と相互作用している間は安定に存在するものの、相互作用するに足る陽子が原子核内にないと、すなわち陽子数に比して多すぎる中性子数の原子核では、少ないときと同様に原子核は不安定になってしまい、放射線を放出するという現象が現れる。

では原子核が不安定だと何ゆえ放射線が放出されるのだろうか？これは放射線を放出した後の原子核がどうなっているかを知ることによって容易に理解できる。たとえばコバルト 60 (陽子 27 個、中性子 33 個) は放射線を放出するとニッケル 60 (陽子 28 個、中性子 32 個) に変化する。それぞれの原子核内の構成粒子の数を見比べると理解できるように、放射線放出後は中性子が一つ減り、代わりに陽子が増えている。このニッケルは天然に存在する放射能を持たない原子と全く同じものであり、実際に放射能はない。すなわちコバルト 60 の原子核では必要以上の中性子があるために核内で中性子が陽子と電子に分解し、陽子は原子核内にそのまま留まるものの、電子は核の外に放出される。この核から放出された電子が β 線である。結果として原子核の

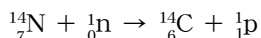
陽子の数が1つ増えるのでニッケル元素となる。一方、中性子が少なすぎる原子核では原子核の周りを運動している電子が原子核に取り込まれ、陽子と電子が融合し中性子に変化する。この際、 β 線は放出されないが、 γ 線が放出される。

α 線は大きな原子核を持つ放射性物質から一般に放出される。原子番号が84以上ではどのような陽子、中性子の組み合わせでも安定な原子核は作られず、すなわち、陽子や中性子数が一つしか変化しない β 線の放出パターンでは安定になれない。このような大きな原子核では一度に陽子2個と中性子2個が一塊となって放出される、これが α 線である。したがって α 線は原子番号2番のヘリウムの原子核そのものであり、これが放射性物質の原子核から放出される。もう一つの放射線である γ 線は質量をもたないエネルギー粒子であり、光やX線などと同じ電磁波に分類される。天然で自然に起こる反応は一般にエネルギー的に安定になる反応であり、放射能も放射線を放出することによって原子核は安定になる。単に構成粒子の組成が変化するだけではなく、エネルギー的にも安定になるにはエネルギーを放出する必要がある、その放出されるエネルギーが γ 線というわけである。原子核の陽子と中性子数が変化すると必ず γ 線は放出される。

このように原子核の陽子と中性子の数のバランスが悪い原子核はみな放射性を持ち、同じ元素でも中性子数によってバランスの良い安定した原子と、不安定な原子とが存在しうる。このように同じ元素でも中性子数の異なるものをそれぞれ同位体と呼び、不安定な同位体は放射線を放出して安定な原子核に変わろうとする。これを放射改変、または崩壊と呼び、一般には崩壊した原子核は安定な原子核に変わるので、崩壊して新しくなった原子核が安定であれば、もうそれ以上その原子核からは放射線は放出されない。

放射性物質がいつ放射線を放出して崩壊するかは同じ同位体でも決っていない。つまり観測後数分の間に崩壊するものもあれば、長時間経過しても崩壊しないものもある。ただし、統計的に比較するとそれぞれの放射性同位体ごとにある決まった時間で崩壊が生じていることがわかる。これは放射性同位体の半数が崩壊するのに要する時間で比較されているので半減期と呼ばれている。原子核が不安定なものほど半減期は短く、放射性物質でもそれほど原子核が不安定でなければ半減期は長い。ただし、半減期の倍の時間が経過するとその放射性物質のすべてが崩壊するのではなく、 $1/4$ の放射性物質

が残り、次の半減期までの間に 1/8 に減るというように、1/2 の階乗で改変が生じる。同じ半減期をもつ同位体がすべて改変し終わるには半減期の 8 倍から 10 倍の時間の経過が必要である。地球が誕生して約 46 億年といわれており、したがって、現在の地球には数億年以上の長い半減期をもつ放射性物質のみが残り、半減期の短い放射性物質はすでに崩壊して安定な原子に変化していると考えられる。テキスト 38 ページには半減期が 5730 年といわれる炭素 14 による年代測定の話が出ているが、地球上に存在するこの炭素 14 は太陽から降り注がれる強烈な宇宙線の中の中性子が大気上層部の窒素（陽子 7、中性子 7）に衝突し、陽子が弾き飛ばされ、中性子が原子核に残る核反応が生じている、結果として中性子が衝突した窒素は炭素 14 となる。



元素記号の左上には質量数が、左下には原子番号が表記されている。また、中性子(neutron)を n で、陽子(proton)を p で表している。このように常に大気の上層部では太陽から届く中性子によって炭素 14 は作られ続けているので、半減期が短いにも関わらず、天然に存在している。

さて、この章のもう一つの話題である、原子力について次に話をしてみよう。原子力エネルギーを取り出すには最も軽い水素原子同士を核融合する方法と、最も重いウランを核分裂する方法の二つがある。テキストには二つの話題について書かれているが、原子力発電として実用化している核分裂についてここでは補足しよう。

放射能は原子力発電事故に良く聞く言葉であるが、核分裂するのは天然に存在する物質の中ではウランのみであり、すべての放射性物質が核分裂するわけではない。しかも天然に存在するウランの 0.7% しかない、ウラン 235 のみが核分裂する。残りの 99.3% は質量数 238 のウランでありこれは核分裂を示さない。ウラン 235 が核分裂すると質量数がおおよそ 90 と 140 の二つの原子核に分裂する。この核分裂を自然核分裂というが、その半減期は非常に長く 2×10^{17} 年である。すなわちあまり頻繁に起こる反応ではない。ところがウランに中性子を照射し、その原子核に中性子を吸収させるととたんに核分裂する、これを誘導核分裂と呼び、原子力発電ではこの誘導核分裂によってエネルギーを取り出している。ウランが核分裂するとき二つの原子核に分裂するだけでなく、2~3 個の中性子も同時に放出されるので、この中性子を

利用して次々と周りのウランを連鎖的に核分裂させる。この連鎖反応を持続させるには、適度な濃度のウラン 235 と適度な中性子数が必要であり、通常の原子炉では 3%のウランを燃料として使い、中性子数を制御棒（中性子を吸収しやすい合金で作られている）で制御することで、定常的にエネルギーを取り出している。

原子力、ウランとくると、原子爆弾を誰もが思い浮かべるだろう。ウランで原爆を作るには、核分裂するウラン 235 の濃度を 80%以上にしなければならない。すなわち天然にわずか 0.7%しかないウラン 235 を同じ同位体のウラン 238 から分離して濃縮する必要がある。重さが約 1%異なるとはいえ、原子一つの重さは非常に軽い。したがって、この濃縮には大変な技術力がある。今やアメリカ、ロシアにとどまらず、中国、インド、パキスタン、北朝鮮までもが核爆弾を保持しているといわれているが、彼らはみなこの濃縮技術を持っているのだろうか？実はウラン 235 の他にもう一つ核分裂をする物質が見つかった。プルトニウムである。プルトニウムは地球上には存在しない。存在しないプルトニウムがどこにあるかということ、原子炉の中で生成される。原子炉の中には 3%のウラン 235 の他に 97%のウラン 238 が存在する。このウラン 238 はウラン 235 の核分裂の結果放出される中性子を吸収してウラン 239 になる。この同位体は β 線を 2つ放出することで中性子 2つが陽子 2つに変化し、結果として原子番号 94 のプルトニウム 239 に変化する。原子炉の中で約 1 年間核分裂が続けられると、約 1%のプルトニウムが生成される。プルトニウムはウランの中に生成されるので、使い終わった燃料棒を取り出し、化学処理するだけで、純度の高いプルトニウムができることになる。広島に落とされた原爆はウラン 235 から作られたものだが、長崎に落とされたのはこのプルトニウムで作られたものであり、今や原爆のほとんどはこのプルトニウムから製造されている。このプルトニウムはウランを核燃料としている以上、原子炉内で必ずできてしまう。しかし、核燃料となるウラン 235 が天然にわずか 0.7%しか存在しないことを考えると、このプルトニウムはこれからのエネルギー源として欠くことのできないものである。

かつて、日本では使用済みの核燃料をイギリスやフランスに運んでウランとプルトニウムを抽出していたが、青森県の六ヶ所村に核燃料再処理施設が完成し、今や自前でプルトニウムを抽出することが可能になった。これは自前で核爆弾を製造することができるようになったといっても過言ではない。

近隣のアジア諸外国に脅威とならないよう、我々はプルトニウムの利用を平和目的のみに限り、プルトニウムを蓄積しないように発電に使用する必要がある。これを目的として新型転換炉「ふげん」と高速増殖炉「もんじゅ」が開発、研究されてきたが、相次ぐ故障のために「ふげん」は開発が中止され、「もんじゅ」は研究がストップしている。高速増殖炉が実用化されるにはまだ当分先のこととなるので、プルトニウムを既存の原子炉内で使用する「プルサーマル計画」も検討されている。プルサーマルのプルはプルトニウムを指し、サーマルとは日本で稼働している原子炉を別名サーマル炉と呼ぶことからこの名がある。つまり、プルトニウムを専用の高速増殖炉ではなく、通常の原子炉（サーマル炉）で分裂させることからこの名がある。プルトニウムとウランでは中性子の吸収の条件が異なることから実際に実用化するまでにはまだ時間が必要である。

最後に原子力発電の問題について触れておこう。ウランが核分裂した結果生成される核分裂生成物は 100%放射能を持つ。これはウランが他の元素に比べて多くの中性子を核内に保持することが原因である。使用済み核燃料からウランとプルトニウムを抽出した残りは強力な放射能をもつゴミとなる。これをどこに保管（廃棄）するかが未だに決まっていない。はじめにも書いたが放射性物質はいつまでも放射線を出し続けるものではないが、半減期の長い放射性物質もあるため、ほとんど半永久的に管理する必要がある。またコバルト 60 を思い起こしてほしい。放射能を持たない原子でも中性子を吸収すると放射性となる。原子炉の中では多量の中性子が放出されるので、原子炉を構成しているコンクリートも放射能をもつようになる。現在日本では 55 基の原子炉が稼働しているが、いつまでも使い続けることはできない。廃炉となった原子炉は巨大な放射能をもったゴミの塊となる。今日では多くの国が原子力を利用してエネルギーを得ているが、どの国もこの放射性物質を廃棄する場所の確保ができていないまま、原子力を利用している。放射性廃棄物を捨てる場所の確保が日本でも差し迫った問題となっており、今後の大きな政治課題になることは間違いない。一般ごみの廃棄場所を確保することさえ難しい今日、漏洩すればより大きな被害を与えかねない放射性廃棄物を引き受ける自治体が果たして現れるだろうか？

3 化学結合

化学結合にはその形態から共有結合、配位結合、イオン結合、金属結合な

どの区別があるが、化学結合は基本的に電子の働きによる。この化学結合と電子の関係をテキスト 12 ページにある周期表を見ながら考えてみよう。両者の関係を理解する上で重要なのが貴(希)ガス元素と呼ばれる、周期表右端の元素群の化学的性質とその電子配置である。これらの元素はいずれも原子状態のまま結合を作らず、空気中に気体として存在するのでこの名がある。全く結合を作らない理由はその電子配置にある。これらの元素はいずれも最外殻の電子配置が s^2p^6 という共通の配置を持つ (原子番号 2 番のヘリウムは K 殻の s 軌道が満たされた状態)。M 殻以降には d 軌道や f 軌道が存在するが、原子の電子状態として d 軌道や f 軌道はあまり重要ではなく、各電子殻の s 軌道と p 軌道が電子で満たされた状態が安定な電子配置であることが、これら希ガス元素群の不活性さから類推される。逆に考えるならば、これらの元素以外は s^2p^6 という電子状態を持たない不安定な電子配置であるために、安定な配置となるよう電子をやり取りする。それが化学結合である。

はじめに分子の形成に重要な共有結合の仕組みから考えてみよう。この結合は原子番号 6 番の炭素から 9 番のフッ素までの 4 つの元素の分子を比較すると理解しやすい。これらの元素が水素と結合した化合物 (2 種以上の元素からなる物質を化合物という) を見ると、炭素 (s^2p^2) は 4 つの水素と結合し、メタン (CH_4) を、窒素 (s^2p^3) は 3 つの水素と結合してアンモニア (NH_3) を、酸素 (s^2p^4) は水素 2 つと結合して水 (H_2O) を形成し、フッ素 (s^2p^5) は水素 1 つと結合してフッ化水素 (HF) となる (化学式内の H の後の下付きの数字は結合している原子の数を意味する)。もう一度元素の原子番号と結合を形成する数を並べると、炭素 (原子番号 6) は 4 つ、窒素 (7) は 3 つ、酸素 (8) は 2 つで、フッ素 (9) は 1 つの結合を形成する。すぐにわかるように、原子番号と結合の数を足すといずれも 10 になる。フッ素の次の元素は希ガス元素のネオンであり、この元素の原子番号が 10、すなわち、電子配置と等しいことがわかる。このように各元素は希ガス元素に比べて少ない電子数の分だけ結合を形成することがわかる。すなわち、安定な電子配置、 s^2p^6 と比較して炭素は 4 つ電子が少なく、それを補うために 4 つの結合を形成し、窒素は 3 つの足りない電子を補うために結合を 3 つ、酸素は足りない 2 個の電子を 2 個の結合で、フッ素は電子が 1 個足りないから 1 個の結合を形成する。

この不足している電子を別の見方で見てみよう。もう一度第 1 章の説明を思い出してほしいのだが、s 軌道は 1 つの軌道があるのみだが、p 軌道は 3

つの等価な軌道があり、L 殻には合わせて 4 つの軌道がある。実は、原子が結合を形成するときこの s 軌道と p 軌道は合体し、最外殻の電子は合体してできた 4 つの軌道に分散する。各軌道には 2 個の電子が入るので、合わせて 8 個の電子が 4 つの軌道に入る。原子番号 6 の炭素は 6 個の電子のうち 2 個は K 殻にあり、残り 4 個が L 殻に存在する。これが最外殻電子（原子価電子）となる。したがって、L 殻の 4 つの軌道には炭素ではそれぞれ電子が 1 つずつしか入っていない。窒素は L 殻に 5 個の電子をもつので、4 つの軌道のうち 1 つには電子が 2 個入っているものの、残りの 3 つの軌道にはそれぞれ 1 つしか電子が入っていない状態である。酸素では 2 つの軌道が、フッ素には 1 つの軌道が電子 1 個となり、この電子 1 個が運動している軌道が結合を形成する。同様に、水素は原子番号が 1 なので、1 個の電子が K 殻の s 軌道に存在するのみであり、これが原子価電子となる。この水素の軌道と、電子が 1 個運動している軌道同士が重なり合うと合わせて 2 個の電子が 2 つの軌道を運動することになる。この 2 個の電子が 2 つの原子に共有されると考えるとそれぞれの軌道は電子 2 つで満たされたと考えうる。これが化学結合の 1 つである共有結合の仕組みである。電子の足りない軌道すべてに結合ができれば見かけ上安定な電子配置になることになる。共有結合の特徴の 1 つに同じ原子との間で 2 つ以上の結合が形成可能なことがあげられる。軌道同士が重なり合うことで、最大 3 つの結合が 2 原子間で形成可能となる。これをその数に応じて二重結合、三重結合と呼んでいる。

さて理解の早い読者は気づいたことと思うが、共有結合で安定な電子配置となるには炭素の様に（水素を除いて）最低でも 4 個の電子を持っていなければならない。これよりも少ない数では共有結合によって安定な電子配置と成りえない。これを s^2p^1 の電子配置を持つホウ素で考えてみよう。ホウ素は最外殻に 3 個の電子しか持たないために、形成できる共有結合は 3 つ、水素との結合では BH_3 となる。これは見かけ上アンモニア (NH_3) と同じように見えるが、窒素が最外殻に 5 個の電子をもっていたのに対して、ホウ素は 3 個しかなく、3 つの水素から提供される 3 個の電子を合わせても 6 個の電子しかない、従って、ホウ素の L 殻の 4 つの軌道のうち 1 つは電子が何も入っていない「空の軌道」であり、非常に不安定で、反応性の高い物質となっている。この空位の軌道に電子 2 個が入ると安定な物質となる。この電子を全く持たない軌道が電子を埋める結合方法が配位結合である。ここでもう一度アンモ

ニアの電子配置を考えてみよう。アンモニアの中心原子である窒素は3つの軌道で水素と共有結合を形成し、共有結合を作っていない電子軌道を1つ持っている。この軌道を運動している2個の電子を非共有電子対という。アンモニアが BH_3 に出会うと、この非共有電子対が BH_3 の空位の軌道に重なり合い、2個の電子を両原子が共有する。これが配位結合である。共有結合では両原子が電子1つずつを供出してこれを共有するのに対して、配位結合では一方の原子が2個の電子を供出し、それを2個の原子が共有する。配位結合は遷移金属元素の化合物によく見られる結合であり、身近なものとしては宝石や無機顔料の色が出現する理由に配位結合が関係していると考えられている。

さて周期律表の左端にある s^1 や s^2 の電子配置を持つ元素群はアルカリ金属、アルカリ土類金属元素と呼ばれる、陽性の強い元素群である。これらの元素はs軌道に電子を1つか2つ持ち、ホウ素よりもさらに電子が少ないために共有結合を形成することはできない。代わりにこの軌道の電子を失うことで安定な電子配置となりうる。もちろん、電子には原子核との間に引力が働いているので、その引力を上回る力が働かなければ電子が失われることはない。一方、 s^2p^4 や s^2p^5 の様な電子配置を持つ、酸素やフッ素は陰性の強い元素群であり、共有結合を形成するほかに、アルカリ金属のような陽性の原子から電子を奪い、それによって足りない電子を補うこともできる。結果として電子を奪われた陽性の元素は原子核の中の陽子の数よりも周りを運動する電子の数が少ないので全体としてプラスに帯電し、逆に酸素やフッ素は電子の数が多くなるのでマイナスの電荷をもつようになる。これをイオンと言い、プラスの電荷をもつものを陽イオン、マイナスの電荷をもつものを陰イオンという。この陰陽、両イオンはその電気的引力でお互い引き寄せあい結合を形成することとなる。これをイオン結合という。イオン結合は陽性元素である金属と陰性の強い非金属元素との間で見られる結合であり、金属元素同士、非金属元素同士ではイオン結合は決して形成されない。

さて初めに挙げた結合の種類で最後に残ったのが金属結合である。アルミニウムのような例外もあるが、アルカリ金属、アルカリ土類金属、遷移金属の電子配置に共通した電子配置は最外殻が s^1 あるいは s^2 という配置であり、金属性とs電子が関係あるものと推定できる。金属結合とはこのs軌道が無数に重なり合い、この重なり合った軌道を運動する電子が金属の導電性に関係していると考えられている。遷移金属元素は最外殻のs軌道より内側に、

満たされていない d 軌道、f 軌道が存在するが、必ずしもこれらの軌道が電子で満たされる必要はない。そのため化学的性質はいずれも非常に似通っている特徴を持つ。この結合の様式は先に挙げた他の 3 つの結合とは異なり、結合の結果、貴ガス元素の電子配置のような安定な電子配置とはなっていないと考えられる。したがって、より安定な電子配置となり得る酸素による酸化（イオン化）が生じ易い。

最後にもう一つだけ補足しておこう。テキスト 66 ページに有機化合物の簡略化した表記の仕方が説明されている。今日では生命に関わる現象についても科学の理解が進んでいる。そういった物質の構造はたくさんの原子からなり、すべての構成原子を表記したのでは構造を把握することができない。生命現象にとどまらず、石油から作られる様々な化合物はすべて炭素と水素を主要な成分とした有機化合物であり、これらを表記するとき、一部、あるいはすべての炭素や水素を省略しても理解できるようルールが決められた。すなわち、炭素は元素記号を省略してもよいが、水素を除く他の原子との間の結合は線（二重結合を形成しているときは二重線）で表す。線は原子同士の結合を表わすので線の交点に元素記号がなければ、そこには炭素が省略されていることがわかる。また水素が炭素と結合しているときはその結合線ごと省略する。炭素は必ず 4 つの結合を形成するので線の数进行数え、その数が 4 に満たなければ水素が省略されていることがわかる。有機化合物を構成する酸素、窒素などの他の元素は省略されることはない。

おわりに

最近ニュースでよく取り上げられる地球温暖化について少々解説しておこう。最近の異常気象？もあいまって「地球温暖化」という言葉を聞いたことがない人はいないだろう。そしてその原因が二酸化炭素にあるらしいということもほとんどの人は知っている。でも、なぜ二酸化炭素なのか？どのようにして二酸化炭素が地球を暖めるのか？をきちんと答えられる人は少ないだろう。さらに、研究者の中には二酸化炭素原因説を疑う人が少なからず存在するということを知っている人はもっと少ないのではないだろうか？

はじめになぜ二酸化炭素が地球を暖めるのか、正確には、地球からの熱の発散を二酸化炭素が妨げる仕組みを解説しよう。地球の温度（気温と考えても良い）が上昇する理由は人類が化石燃料等を多量に消費しているからでは

ない。太陽から降り注がれる多量のエネルギーを外(宇宙)に十分排出できないからというのが今日の考えであり、その排出妨げの首謀者が二酸化炭素であるという。24 時間、地球は日光を浴びている。そのエネルギー量はわずか 30 分の照射で、人類が年間に消費するエネルギー量に相当する、実に莫大なエネルギーが太陽から地球に降り注がれているのである。植物による光合成や海面からの水蒸気の発生などのエネルギー利用のほかは地球そのものの温度上昇に太陽からのエネルギーは消費される。温められた地球はそのエネルギーのほとんどを宇宙に再放出することで地球の温度はほぼ一定に保たれている。「温められた」と書いたが、太陽からの光のエネルギーは地球に吸収されることで熱エネルギーに変わる。この熱とは「もの」と「もの」とが接触することによって温度の低い方へ拡散していく。したがって、ほとんど何もない真空な宇宙に熱は移動できない。魔法瓶のお湯がなかなか冷めないのは内側の容器と外側の容器との間を真空にしているからである。では地球からエネルギーはどのように再放出されているのだろうか？温められた地球は太陽からのエネルギーを赤外線として宇宙に再放出しているのである。

さて、ここで熱と赤外線の関係を説明しよう。炎の中に針金を入れた、あるいはこれに類似した経験を誰もが持っているだろう。このとき、炎の熱で熱くなった針金は赤く光る。炎からその針金を出すと光はだんだん弱く、暗くなり、光らなくなる。でも、手をかざすと手のひらは熱さを感じる。これが赤外線である。実は固体を加熱するとその温度に応じて光が放出される。温度が低いうちは赤外線だが、温度が高くなると赤い光を放出し、さらに高くなると黄色光、白色光と変化する。温度は固体を構成する分子や原子の振動の程度を意味し、温度が高いほど振動が激しい。赤外線などの光は原子やそれを構成する電子等が振動することによって放出される。赤外線と可視光ではその振動数が異なり、振動数の小さい光が赤外線である。温度が低いうちは原子はあまり激しく振動していないので赤外線が放出されるが温度が高くなると振動数の大きな可視光線が放出され、赤く見えるようになるのである。赤い光は 500℃ほどにならないと放出されず、室温程度であればエネルギーの低い赤外線が放出される。サーモグラフィーという言葉を知ったことがあるだろう。人の体を特殊なカメラで撮影し、体の部位で体温が異なる様子を色を変えて映し出す装置のことである。人の体温は 37℃ほどであるが、部位でわずかに温度は異なる。異なるために放出される赤外線のエネルギー

や量が異なる。それを利用して温度を測定し色の違いで表示するのがサーモグラフィーである。

さて話を戻そう、地球は太陽の光で温められ、約 15℃という温度（平均表面温度）になる。地球の表面からは赤外線が放出され、その結果地球の温度は低下する。しかし、大気中の二酸化炭素が赤外線を吸収すると、二酸化炭素は周りの空気分子やほかの物質に衝突する際に、吸収したエネルギーの一部をそれらに分け与える。結果、地表面から放出されたエネルギーは二酸化炭素を仲立ちとして地球内部で堂々巡りされ、徐々に地球の温度が上昇するというのが二酸化炭素の「温室効果ガス」と言われるゆえんである。ではなぜ二酸化炭素なのだろうか？百科事典等をめくると空気の組成は窒素(78%)、酸素(21%)、アルゴン(0.9%)、二酸化炭素(0.04%)などと記載され、二酸化炭素は量的に非常に少ない成分である。窒素や酸素が赤外線を吸収しないのかというと、実はそうではない。上で、原子や電子の振動で光が放出されると書いたが、光は物質から放出され、逆に物質に吸収される。吸収される光の種類は物質の構造に左右される。特に赤外線は物質を構成する原子の振動運動に変換されるため、分子を構成する原子の数が多いほどいろいろなエネルギーの赤外線を吸収することができる。空気の主要な成分である窒素や酸素は2原子で構成された分子であるが、二酸化炭素は3原子で一つの分子が構成されている。2原子分子の窒素や酸素も赤外線を吸収するが、3原子分子である二酸化炭素のほうが吸収できる赤外線の範囲が広い。そのため、空気中の成分としては少ない量の二酸化炭素でも多くの赤外線を吸収することができ、温暖化の原因ではないかと考えられている。

さてこの単元の初めに、二酸化炭素原因説を疑う研究者もいると記述した。その説にはいろいろあるが、良く言われるのが水蒸気の効果についてである。上で二酸化炭素が窒素や酸素よりも温室効果が大きいのは構成する原子数が多いからだと説明したが、水分子も二酸化炭素と同様3原子で構成され、同程度の温室効果をもつ。その効果は、例えば、「放射冷却」で実感することができる。「放射冷却」とは冬の晴れた朝が寒い原因を説明する気象用語である。気温は明け方が最も低くなる時間帯であるが、まさしくこれは地表面から赤外線としてエネルギーが放出されるためである。ところが、空が曇っているとそれほど冷えない。つまり雲（水蒸気）が地表から放出された赤外線を吸収し、熱を周りの空気に分け与えるからである。どれくらいの水蒸気が空気

中に存在するかは場所や時間、気象条件によって変化するため、一定ではない。一般に公表されている空気の組成はいずれも「乾燥空気」についてであり、空気中の水蒸気量は公表されていない。ただ、砂漠の中を除けば、1%以上の水蒸気が存在するのは明確であり、そう考えるならば二酸化炭素よりもはるかに大きな温室効果を持つと考えられるのである。また他にはメタン(CH_4)をその原因と考える説もある。メタンは空気の主要な成分ではないが、凍った水の中に溶解したメタンハイドレートとして凍土や海底に多く存在することが知られており、これらが徐々に溶け出してきているのではないかと推測する研究者もいる。確かに地球の温度は上昇しているのだろうが、その原因がきちんと特定されていないのが実情である。

さて、このスタディガイドの終わりにということで加えた地球温暖化であるが、実際に身の回りに生じている現象を理解しようとする、それに関わる基礎的な事象は多岐に渡る。基礎項目だけの学習ではなかなか長続きできない。身の回りの現象と関連づけて講義してほしいという注文は多いのであるが、関連する内容が多岐にわたり、また化学に限らないことも多い。一つ一つの科目を根気よく勉強することで、初めは点在するだけの知識がやがてつながるようになれば、身近な現象をきちんと理解できるようになるだろう。最近はインターネットを通じて容易に情報が入手できるようになった。中には誤った情報が流れていることもあるが、多くの場合ちょっと知りたいことながら、体よくまとまっていることもあり、これらを参考とすることで容易な理解へとつながることもあるだろう。まずは興味のあることからスタートし、そこから生まれた疑問を一つ一つ解決して行くことが学習の近道かと思う。

スタディガイド化学1／2
(グレイ化学)

S0450-3-8
2024/3/1



スタディガイド (学習指導書)
〈化学1／化学2〉『グレイ化学 物質と人間』

2008 年 3 月 1 日 第 1 版第 1 刷発行
2024 年 3 月 1 日 第 1 版第10刷発行

発行所 法政大学通信教育部
102-8445 東京都千代田区富士見 2-17-1
電話 03 (3264) 6557
印刷所 株式会社 エイチ・ユー
102-0073 東京都千代田区九段北 3-3-5
法政大学 九段北校舎 8 階
電話 03 (3264) 9569