

5. 酸化・還元反応なくしては成り立たない日常生活

地球の酸化と生物の進化

地球を構成している万物は非常に多くの分子やイオンの集合によりできているという考えが自然科学の基礎になっています。このように万物のもとになる分子やイオンはわずかに 90 種類の原子が強い力で結合していますが、それらの原子の結合の違いにより異なる性質や機能を示す 5000 万種類以上の分子やイオンが現在までに調べられています。原子は陽子と中性子からなる原子核と電子で構成されていますが、原子核の周囲を電子が取り巻いている構造の原子から負電荷を持つ電子が放出されれば、原子は正電荷が過剰になりますから陽イオンになります。さらに、陽イオンが電子を放出して 2 価の陽イオンや 3 価の陽イオンになることもありますし、陰イオンが電子を放出して原子に戻ることもあります。反対に、外部からの電子を原子が受け取れば、原子全体として負電荷が過剰になりますから陰イオンになりますが、陰イオンがさらに電子を受け取って多価の陰イオンになることもあります、陽イオンが電子を受け取って原子に戻ることも有ります。原子やイオンから電子を放出する反応を酸化反応、原子やイオンが電子を受け取る反応を還元反応と定義しています。電子を放出する酸化反応がなければ電子を受け取る還元反応は起こり得ませんし、電子を受け取る還元反応がなければ電子を放出する酸化反応も起こり得ません。酸化・還元反応は電子を遣り取りする反応であり、酸化反応も還元反応も片方の反応だけでは進行せず、酸化反応が進行する時には還元反応が必ず同じ系の中で同時に進行します。

陽子を含む原子核との間の静電引力によって電子は原子の中に拘束されていますが、静電引力が電荷の大きさや距離に依存しますから、陽子や電子の数によりその静電引力の強さは異なります。言い換えれば、酸化や還元のし易さは陽子や電子の数により大きく異なります。陽子の数の少ないものから順に並べてゆきますと、それらの原子の酸化や還元のし易さの違いから 8 種類に大別される規則性が見られ表 3-1 のにまとめられます。この周期表で、対象とする元素より左側の元素との結合数を負の数字で、より右側の元素との結合数を正の数字で表し、それらの総和を対象とする元素の酸化数と定義します。また、陽イオンと陰イオンはその価数をそのまま酸化数と定義します。ここで定義された酸化数は対象となる元素の酸化状態や還元状態を示す概念で、その元素の酸化数が増大する変化を酸化反応、減少する変化を還元反応と考えると非常に理解し易くなります。

周期表の左上端に位置する水素原子同士が結合した水素分子は水素原子を含むあらゆる物質の中で最も還元状態にあります。宇宙の構成元素の 90%以上は水素ですから、誕生間もない 45 億年前には地球上も水素分子で被われた非常に高い還元状態の環境で、酸素分子は水に還元されてしまい大気中にはほとんど存在していませんでした。しかし、地球は比較的小さな天体で万有引力が小さいために、長い時間の間に軽くて拡散し易い水素は地球から次第に宇宙の彼方に飛散してゆきました。水から水素と酸素への分解と水素と酸素から水の生成は平衡反応ですから、水素が無くなるとともにわずかながら水の分解する反

応が進行しました。このような分解で生じた水素分子まで散逸してゆき、徐々に大気中の酸素分子の割合が高くなって地球は次第に酸化状態の環境になってきました。現在の地球の大気は約 75%の窒素分子と約 25%の酸素分子で構成され、水素分子は非常に微量しか含まれていません。

地球上には大量の水と二酸化炭素が残っていましたから、多くの植物は太陽からの光エネルギーを吸収して、6 モルの水を酸素 6 モルまで酸化分解し、二酸化炭素 6 モルを還元する光合成反応によりブドウ糖 1 モルを生産しています。水素の燃焼熱は 68kcal/mol ですから、水を酸素と水素に分解する反応は 68kcal/mol の吸熱反応で試験管の中では水の電気分解のようにかなり過激な反応条件の下で熱エネルギーや電気エネルギーで進行します。しかし植物の組織にとってはそのような過激な条件は適しませんから、水から酸素への酸化反応とともに鉄イオンやユビキノンや FAD の酸化・還元反応を中間に経由する複雑な一連の反応により水を酸化した時に生じる還元能力を NADP^+ から NADPH への変化に伝達しています。ここで生成した NADPH の還元能力により、縮合や分解や還元や環化などの反応を非常に複雑に繰り返し組み合わせて二酸化炭素を還元してブドウ糖を生産しています。

現在とは大きく異なって、酸素分子の無い地球環境の太古の昔から生き延びてきた微生物は大気中の酸素の有無など環境の変化に徐々に適応してきましたから、酸素分子を利用しない反応過程により生命活動を維持するための活力を生み出しています。太古から生き延びてきた酸素分子を必要としない嫌気性生物のほかに、強い酸化力を示す酸素が大気中に含まれる酸化状態の環境に適性を持つ多くの好気性生物が現在は棲息しています。このように地球上には酸素の無い状態でも棲息できる生物も酸素なくしては棲息できない生物も援け合ったり競い合ったりしながら共棲しています。糠味噌漬けやヨーグルトなどで日常生活に貢献している乳酸菌は太古から生き延びてきた嫌気性微生物ですから、栄養となるブドウ糖を酸化分解してゆきますが、帳尻合わせをするように最後に乳酸に還元しますから、一連の反応経過を通した全体としては酸化反応でも還元反応でもなく、酸化剤の酸素を必要としない反応です。お酒造りやパンの発酵などで日常生活になくてはならない酵母も太古から生き延びてきた嫌気性微生物ですから、栄養となるブドウ糖を酸化分解してゆきますが、最後にエタノールと二酸化炭素を生産して帳尻合わせをしていますから、一連の反応経過を通した全体としては酸化反応でも還元反応でもなく、酸化剤の酸素を必要としない反応です。

地球の歴史から見ればつい最近誕生した動植物は高い割合で酸素を含む大気中で進化してきましたから、好気性生物でブドウ糖から二酸化炭素までの酸化反応で発生する生成熱を生命活動の維持のための活力にしています。太古から生き延びてきた嫌気性生物の乳酸菌も酵母もブドウ糖を分解したときの約 20kcal/mol に過ぎない生成熱を生命活動を維持するための活力にしていますが、好気性生物はブドウ糖の燃焼熱に相当する 674kcal/mol の生成熱を生命活動の維持のための活力にしています。角砂糖が容易に燃えるようにブドウ糖も燃焼熱を発しながら激しく酸化されますが、燃焼のような急激な反応条件では生物は

火傷をしてしまい組織を維持することができませんから、生体内では徐々に酸化して少しずつ生成熱が発生するように非常に複雑な反応過程が用意されています。酸素の酸化の能力を NADP^+ へ受け継ぎ、発生する生成熱を ATP として蓄えて、 NADP^+ の酸化能と ATP の熱を利用して生体内の各器官や部位は機能しています。人間は典型的な好気性生物ですから、でんぷんや砂糖を栄養として摂取し、ブドウ糖まで消化して吸収しますが、呼吸により肺から吸収した酸素の酸化能を NADP^+ へ受け継ぎ、ブドウ糖を酸化して発生する二酸化炭素を肺から排出しています。この NADP^+ による酸化反応で発生する生成熱を ATP とし、ATP から ADP へ変化するときには発生する生成熱を活力にして脳や五臓六腑や筋肉などの体内の各部は支障なく機能しています。

現在の地球上には、太古の昔から生き延びてきた酸素分子を必要としない嫌気性生物のほかに、強い酸化力を示す酸素が大気中に含まれる酸化状態の環境に適性を持つ多くの好気性生物が棲息しています。人間はこの好気性生物の一種ですから高い熱効率でブドウ糖の分解反応の生成熱を活力にしていますが、酸素なくしては生命を維持のための活力を得ることができません。しかし、低い熱効率でブドウ糖を分解して活力にしている嫌気性生物は酸素の無い状態でも棲息できます。これらの嫌気性生物の援けを借りなければ、漬物を抓みながら一杯飲むこともできませんから、好気性生物ばかりで無く嫌気性生物とも援け合ったり競い合ったりしながら共棲しています。

文明を生み出した酸化・還元反応

誕生間もない 45 億年前には地球上も水素分子で被われた非常に高い還元状態の環境で、酸素分子は水に還元されてしまい大気中にはほとんど存在していませんでした。しかし、長い時間の間に軽くて拡散し易い水素は地球から次第に宇宙の彼方に飛散してゆきました。水素が無くなるとともに、わずかながら水の分解する反応が進行しましたが、このような分解で生じた水素分子まで散逸してゆき、徐々に大気中の酸素分子の割合が高くなって地球は次第に酸化状態の環境になってきました。現在の地球の大気は約 75% の窒素分子と約 25% の酸素分子で構成され、水素分子は非常に微量しか含まれていません。このように大気中に酸素が多くむくまれる酸化状態の環境では、還元状態にある物質は容易に酸化されます。木や草や石油や石炭などの還元状態の物質は反応熱を発生しながら酸化されますが、その反応熱が溜まると次第に温度が上昇します。温度が高くなりますと酸化反応が加速しますから、ますます多くの反応熱を発生するようになり急激に酸化反応の進行する燃焼の変化になります。乾燥や摩擦などの条件が揃えば木樹が生い茂る森の中でも、草木が燃え始め山火事に発展します。物が燃える現象は大気中に多くの酸素を含む酸化状態の環境では極めて進行し易い化学変化です。

燃料と呼ばれる木や草や石油や石炭などの還元状態の分子は酸素分子と衝突して酸化反応が進行しますから、燃料と酸素の互いに衝突する機会の多いほど反応が速やかに進行します。冬の寒い日にはコタツに入って丸くなり動かたないように、温度が低くなると

物質の分子の運動も遅くなりますが、温度が高くなると早くなりますから分子同士の衝突する確率が大きくなります。温度が低ければ燃料は酸素との衝突が少なく、酸化反応が徐々にしか進行しませんが、温度が高ければ酸化反応が急激に進行します。燃料と酸素が周囲に発散する熱量よりも燃料の酸化に伴う反応熱が優るときには、温度が上昇して反応の速度が大きくなりますから、限界温度を超えますと急激に酸化反応が進行して発火します。燃料と酸素と高温の 3 つの要素が揃ったときに着火すると思われますが、地球上には万遍なく空気が存在していますから、通常は空気の供給は自然に行われます。また、燃焼により熱が発生し、近接した燃料と空気の温度を上げますから、燃料の供給が続く限り 3 つの要素が揃った状態を保つことができ燃焼が続きます。しかし、これらの 3 要素の一つでも不足すれば燃焼が抑えられ鎮火すると思われます。

人類は象ほどには身体が大きくなく、キリンほどには背が高くなく、虎ほどには走れず、鯨ほどには泳げず、ハヤブサほどには飛べず、フクロウほどには闇夜で見ることもできません。このように多くの動物に比較しても人類は特段に秀でた能力を備えたわけではありませんが、多くの動物が山火事の折にはただ逃げ惑うのに対して、人類は燃料と酸素と高温の 3 つの要素を制御することにより、火を熾したり消したりして火を使いこなす知識と技術を習得しました。物が燃える現象は酸化状態の環境ではごく自然の化学変化ですが、この火を使いこなしたからこそが他の生物から区別して人間が優位に立つことのできた知識であり技術であり、文明の発展の基礎となるものです。

火を熾して寒さを凌ぐことができましたから、温暖な地域に住んでいた人間は極寒のベーリング海峡を渡って全世界に生活圏を広げてゆきました。動物は火を恐れますから、虎や狼のような動物をも撃退して安全な生活圏を確保し、山を焼いて肥沃な農地に開拓し農耕に利用してきました。焚火の火を利用して銅を精錬し、青銅製の精巧な道具を作ることができましたから、獰猛な獣も敏捷な鳥類も人類の餌食にすることができました。このように狩猟にも農耕にも役立ちますから、巧みに火を使いこなすことが文明の発展に欠くことのできない重要なことになってきました。摩擦熱を利用して苦労して作っていた火種も、火打石を使い、マッチを発明し、¥100 でライターを市販するまでになり、瞬時の着火まで可能にしました。柴や薪から石炭や石油、水素やプロパンなどのガスまで各種の燃料を使い、火吹き竹やふいごなどで強制的に空気を送り込み、竈や炉を作って燃焼の条件を整える工夫をして高温を作り出すことができるようになってきました。空気中での通常の燃焼ばかりでなく、ゆっくりと燃料を酸化して燃焼熱を長時間にわたり少しずつ発生させる工夫や、燃料と酸化剤を一体化した火薬を発明して着火と同時に反応が完結するほどの急激な燃焼を可能にしました。

高温の火を利用することが工夫されて初めて鉄器やガラスや磁器が作られましたから、性能の高い道具や武器を利用できるようになりました。物を燃やして動力に変換する技術を Watt が開発して、産業革命を引き起こしました。Ford が T 型の自動車を生産してから世界中に自動車革命が起り、ごく近い場所までの移動にも足を使わないために人間の足は

不健康に細くなりました。Columbus の時代には長時間をかけて横断していた大西洋をジェット旅客機は数時間で飛び越えて地球をどんどん小さくしています。Nobel が物を短時間に激しく燃やす技術の開発に成功しましたから、その強力な破壊力は土木技術の向上ばかりでなく武器弾薬の進歩に繋がりましたし、この空気の無い環境で物を燃やす技術は月までの旅行を可能にし、太陽系まで人類の庭のように小さくしてしまいました。Siemens らの多くの発明は物を燃やすことにより電気を生み出し、あらゆる面で便利で豊かな日常生活を可能にしました。逆に、酸化され易い鉄粉などの物質を燃焼しないように酸化させて生成熱を徐々に発生させる、火のない所に熱を出す技術が使い捨てカイロを生み出しましたが、この技術は密閉した容器内で利用しますと容器の中の酸素を簡便に取り除く脱酸素剤にも利用できます。このように色々と火を使いこなしたことにより初めて人類は霊長類と自称して多くの動物から差別できる文明を供えたと思われます。

原子間に電流が流れる酸化・還元反応

原子やイオンから電子を放出する反応を酸化反応、原子やイオンが電子を受け取る反応を還元反応と定義しています。電子を供給する酸化反応がなければ電子を受け取る還元反応は起こり得ませんし、電子を受け取る還元反応がなければ電子を放出する酸化反応も起こり得ません。自然界に存在する種々の原子やイオンはその構成する電子と原子核の関係がそれぞれ異なりますから、電子を放出したり受け取ったりする性質には差異があり、それぞれの酸化や還元のし易さも異なっています。この酸化や還元のし易さの違いが日常生活に広く利用されてきました。

シュウ酸第 2 鉄アンモニウムを浸み込ませた印画紙に黒く描かれた図を重ね合わせて、強い光を照射しますとや模様の部分は露光しませんから第 2 鉄イオンがそのまま残りますが、他の部分は露光しますから第 1 鉄イオンに還元されます。この露光した印画紙をフェリシアン化カリウム溶液に浸して紺青を生成しますと、光により第 1 鉄イオンに還元された部分だけ青色に呈色しますから、設計図や模様が青写真として転写されます。

溶液中の金属イオンを還元して生ずる金属は結晶核や容器の壁面や刺激により凝集して目に見えるような塊として析出してきますから、還元され易い銅や銀や金のイオンの水溶液に刺激を与えないように還元剤を加えますと、対応する金属の非常に薄い膜が容器の壁面などに付着します。壁の材質に関わらずガラスの表面などにこの金属膜が緻密に成長しますから銀鏡反応と呼ばれて古くから鏡の製造に用いられてきました。ゼラチンの中に塩化銀の微細結晶を懸濁させた膜に光が照射されますと還元反応が進行して、塩化銀の結晶の中に光の強弱に応じて微細な金属銀が生成します。還元剤で未反応の塩化銀を金属の銀に還元しますと、銀鏡反応と同じように露光により生成した微細な金属銀の粒子を核とするように析出して銀の粒子を大きく黒く成長させてゆきます。結ばれた像の光の強弱に応じて各部分が黒色に変化して、像の明暗が反転した形で膜の上に転写される 20 世紀に広く用いられた銀写真の技術です。

逆に、酸化剤の溶液を金属に接触させますと、金属が酸化されて対応するイオンになって溶液中に溶け込んでゆきます。銅板の上に傷をつけながら絵や模様を描き、その上に塩化第 2 鉄の水溶液を載せますと、傷の部分に塩化第 2 鉄溶液が入込み金属銅と反応して、金属銅が銅イオンに酸化して水に溶けて傷が大きな穴に成長します。この反応はエッチング法として銅版画の作成などに古くから用いられてきましたが、銀鏡反応などにより金属銅を薄く貼り付けたプラスチック板上に、油性のインクで配線図や模様を書き、塩化第 2 鉄水溶液に浸しますと、インクの塗られた部分は水を撥いて金属銅と塩化第 2 鉄水溶液が接触できず酸化・還元反応が進行しませんが、インクの無い部分では反応が進行して金属銅は水に溶け込んでしまいます。薬品とインクを洗い落とせば、インクで描いた模様のおりに金属銅がプラスチック板上に残りますから電子部品の基盤を作る技術に応用されています。このような技術の応用により、簡便で膨大な電子情報の処理や蓄積が可能になって、デジタル写真や複写装置が格段に進歩しましたから、銀写真も青写真も過去の技術として葬り去られてしまいました。

酸化反応と還元反応の定義から酸化・還元反応は電子を遣り取りする反応であり、酸化反応も還元反応も片方の反応だけでは進行せず、酸化反応が進行する時には必ず還元反応が同じの系の中で同時に進行します。酸化・還元反応は物質を構成する原子の間に負の電荷を持った電子の移動する反応ですから、電荷の移動を意味する電流の流れる変化と見ることもできます。金属亜鉛を硫酸銅水溶液の中に浸しますと酸化・還元反応が進行しますが、電極を装着した金属亜鉛の酸化反応の反応容器と電極を装着した硫酸銅の還元反応の反応容器を分離し、それぞれの電極を電線で接続しますと酸化により放出される電子が電線を通して硫酸銅水溶液へ移動しますから、酸化・還元反応が進行します。Daniell が考案したこの特殊な反応容器での酸化・還元反応による電線上に電流の流れる現象をもとに、種々の発明や改良がなされ、マンガン乾電池などの電池が実用化されました。

点火すれば水素は空気中で激しく燃えて水を生成しますが、水を酸素と水素に分解する逆の反応が太陽光のエネルギーで植物の組織内で進行しています。このように酸化・還元反応は可逆的な平衡反応で、エネルギーを加えれば強制的に逆向きに反応を進行させることができます。電池のように酸化・還元反応で遣り取りされる電子を通す電線に、発電所の力を借りて電子を逆流させれば、通常は自働的には進行しない酸化・還元反応を強制的に進行させることができます。水で満たした容器に 2 本の電極を装着し、発電所からの力を借りて電流を流しますと、水が分解してそれぞれの電極から水素と酸素が発生してきます。これは植物の組織内でしか観測できなかった、酸化・還元反応による水の分解が電氣を通すことにより進行したもので電氣分解と呼んでいます。中学校の理科でも取り上げられるほど教育的に高い意義を持つ水の電氣分解は実用的には全く意味のない現象ですが、酸化アルミニウムの電氣分解は工業的に金属アルミニウムを製造する方法です。

金属鉛と二酸化鉛を電極とする鉛蓄電池は金属鉛が鉛イオンに酸化し、電線上を電流となって電子が遣り取りされて、二酸化鉛も鉛イオンに還元される酸化・還元反応が進行し

ます。この鉛蓄電池の鉛電極に電子が移動するように逆向きに通電して電気分解しますと、容器中に溶け込んでいる鉛イオンが還元されて金属鉛が電極上に析出するとともに、鉛イオンが二酸化鉛にも酸化されて電極上に析出してきます。電池として電流を供給するときには金属鉛と二酸化鉛が消費されますが、逆向きに通電すれば消費された金属鉛と二酸化鉛が析出して再生されますから、発電機で発電された電力を貯蓄することができます。このように電力を貯蓄できる蓄電池がニッカド電池やリチウム蓄電池など種々開発されています。

銅や鉄やアルミニウムやケイ素などの金属を電極にして、金属から電子を放出するように電気分解しますと、対応する金属のイオンが電解液中に溶け込んでゆきますが、そのイオンは反対側の電極で電子を受け取って金属に還元されますから、電極間に発電所の力を借りて通電しますと一方の電極から他方の電極へ金属だけが移動します。不純物を多く含む粗銅を一方の電極にし、純粋の金属銅を他方の電極として電気分解しますと、粗銅中に含まれる金属銅だけが他方の電極に移動して銅が精錬され、不純物は電解槽に沈殿してきます。電気分解により金属を生成する方法は電気精錬と呼ばれ、金属銅ばかりでなく鉄やアルミニウムや金属ケイ素の精錬に広く用いられていますが、精錬に当たり多量の電力を要しますから、北欧やカナダなどのように比較的電力の廉価な地域で純度の高い金属ケイ素などは生産されています。また、電子を放出する電極に金や銀を用い、電子を受け取る電極にスプーンやフォークを装着して電気分解すれば、金や銀が電解槽にイオンとして溶け出しますが、同時にそれらのイオンがスプーンやフォークに金属として析出してきますから、電解槽を通過して金や銀の金属が反対の電極に移動します。電気精錬と全く同じ原理で他のものに金属をごく薄く析出させるこの技術をメッキと呼んでいます。

このように酸化・還元反応で遣り取りされる電子を電線を通して行えば、電池として電流を利用できますし、発電所の力を借りて電線を逆方向に電流を流せば逆向きの酸化・還元反応が進行する電気分解が起こります。この電気分解は電気エネルギーを利用した化学反応で、金属の製造や精錬ばかりでなく、蓄電池やメッキなどの技術にも応用されていますから、将来にわたり酸化・還元反応を利用した日常生活に有用な技術や知識がこの分野に多く期待されます。

本書では人間の生活の中で深く関わっている燃焼現象を含めて酸化・還元反応に関して化学の知識を織り交ぜながら独善的に見てきました。誕生間もない45億年前には地球上も水素分子で被われた非常に高い還元状態の環境でしたが、長い時間の間に軽くて拡散しやすい水素分子は地球から次第に宇宙の彼方に飛散してゆきましたから、徐々に大気中の酸素分子の割合が高くなって地球は次第に酸化状態の環境になってきました。太古の昔には酸素分子を必要としない嫌気性生物が誕生してきましたが、この地球環境の変化に対応するように酸素分子を必要とする好気性生物に進化してきました。酸化状態では還元性物質が急激に酸化する燃焼が起こりますが、好気性生物の人類はこの燃焼の現象に対応して巧みに文明を発展させてきました。燃焼熱を利用した高温を手中にし、酸化・還元反応の基本

となる電子の遣り取りを電流として利用するようになりました。地球の環境は長い間に次第に酸化状態に変化してきましたが、この酸化状態に適応して巧みに利用しましたから、人類は地球に君臨する霊長類に成り上がりました。しかし、この成り上がり者の文明が地球の環境を不自然な方向に捻じ曲げたり、自然の摂理に反して環境の酸化状態を進行させたのかもしれませんが。本書で酸化・還元反応に関する基本的な性質を少しでも深く知ることにより、何か一つでも化学の研究や教育に役立つものが見つけ出せば良いと思っております。また、逆に多くの化学的な技術や知識が自然の摂理に即した快適な日常生活を生み出す助けになれば、本書はさらなる意義を持つことになると思われます。本書が酸化・還元反応に関する基礎知識を深める上で貢献できればよいと思っています。

索引

あ

青写真.....50, 52, 90, 91
 アクチニド金属元素.....38
 アセチル補酵素.....71
 油火災.....24, 26, 27
 油焼け.....80, 81
 アマルガム法.....55
 アルカリ金属.....39, 40, 45
 アルカリ土類金属.....25, 45
 アルギニン.....76
 アルコール.....68, 74
 アルミニウム.....45
 Arrhenius.....18

い

EPA.....80
 硫黄.....9, 11, 12, 20, 25, 35, 57, 60, 61
 イオン.....36
 イオン化ポテンシャル.....38, 40, 41, 42
 イオン結合.....43
 異性化.....71
 陰イオン.....40, 41, 42, 43, 57, 62, 86
 引火.....9, 10, 11, 23, 24, 25, 27, 33, 35, 45
 引火点.....20, 21, 32

う

宇宙船.....11, 14
 運動速度.....31, 33

え

ATP.....69, 70, 72, 73, 74, 88
 ADP.....69, 70, 73
 エステル結合.....71
 エタノール.....70, 74, 75, 76, 78, 79, 87, 88
 エッチング.....42, 45, 49, 91

NADP⁺.....66
 NADPH.....66, 67, 72, 74
 エネルギー不滅.....28
 FAD.....66, 72, 87
 塩化第2鉄.....42, 49, 91
 塩橋.....54
 エンタルピー.....28
 エンタルピー変化.....29, 30
 エントロピー.....28
 エントロピー変化.....29, 30

お

王水.....48, 49
 Ostwald.....15

か

外殻電子.....36, 39, 40, 42
 解糖.....72, 83
 界面活性剤.....26
 解離.....43
 火炎地獄.....22
 化学泡消火器.....26
 化学エネルギー.....53, 54, 58, 59, 67, 74
 角砂糖.....0, 6, 7, 62, 71, 87
 隔膜.....56
 隔膜法.....56
 過酸化物.....80
 可視光線.....66
 加水分解.....80, 81
 ガソリン.....14, 21, 22, 25, 31, 35, 48, 62
 活性化エネルギー.....18
 活性化エンタルピー.....18, 19
 活性化自由エネルギー.....17, 19, 65
 カテコール.....82, 83, 85
 火薬.....11, 12, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 24, 89

ガラス.....9, 47, 89, 90
 カリウム.....6, 9, 12, 27, 45, 47, 51
 ガルバリウム鋼板.....47
 カルボン酸.....79, 80
 還元.....65, 66, 67, 72, 74, 87
 還元剤. 45, 46, 48, 51, 52, 53, 54, 57, 58, 59,
 60, 61, 82, 84, 85, 90
 還元状態.....44, 67, 73, 78, 86, 88, 92
 還元電位44, 45, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56,
 58, 59, 64, 66, 71, 73, 82, 83
 還元反応42, 43, 44, 53, 55, 56, 57, 58, 61, 86,
 90

き

機械泡消火器.....26
 希ガス元素.....38, 40, 41, 42
 貴金属.....7, 49
 危険物.....24, 25, 27, 101
 危険物取扱者.....24
 気体定数.....18
 軌道.....36
 キノン.....51, 71, 82, 85
 Gibbs.....28
 吸収.....71
 吸収波長.....50, 82, 83
 吸熱反応.....17, 28, 44
 金.....10, 25, 45, 49, 51
 銀鏡反応.....65, 90, 91
 銀写真.....50, 51, 90, 91
 金属亜鉛.....43, 47, 49, 53, 54, 58, 91
 金属イオン.....45
 金属錫.....46
 金属銅.....42, 43, 44, 49, 56, 91, 92
 金属ナトリウム.....55, 60

く

空中窒素固定法.....30

Coulomb.....38
 クーロンエネルギー.....38, 43
 クーロン力.....38, 39, 43
 クエン酸.....72
 クエン酸サイクル.....72
 グルタミン酸.....76
 グルテン.....76, 77, 78
 黒炭.....20

け

Kekulé.....82
 結合エネルギー.....29, 30
 煙.....5, 6, 11, 12, 16
 嫌気性生物. 68, 69, 70, 71, 78, 79, 87, 88, 92
 原子核.....36, 38, 39, 42, 43, 50, 86, 90
 現像.....51, 52
 元素記号.....38

こ

高温3, 5, 9, 10, 11, 12, 14, 19, 20, 21, 23, 26,
 27, 34, 45, 46, 61, 62, 63, 64, 77, 89, 92
 好気性生物.....68, 78, 79, 87, 88, 92
 光合成反応.....65, 87
 麹菌.....74, 75, 79
 酵素.....70, 71, 73
 香草.....84
 酵母.....70, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 87
 糊化.....76, 77
 黒鉛.....60
 Columbus.....90
 紺青.....52, 90

さ

酢酸.....79
 さしすせそ.....80
 砂糖.....77
 錆び.....7, 36, 42, 45, 46, 47, 48, 49, 65

錆止め.....	46, 47
酸化	74
酸化還元電位	44
酸化剤. 12, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 21, 23, 24,	
27, 42, 45, 46, 48, 49, 52, 53, 54, 57, 58,	
59, 60, 61, 62, 63, 71, 78, 79, 82, 84, 87,	
89, 91	
酸化状態44, 60, 62, 64, 68, 71, 78, 86, 87, 88,	
92	
酸化数.. 62, 63, 64, 65, 69, 70, 71, 79, 80, 86	
酸化電位44, 45, 46, 47, 49, 50, 52, 53, 54, 55,	
56, 58, 59, 60, 63, 64, 66, 71, 73, 82	
酸化・還元反応42, 44, 46, 48, 50, 51, 52, 53,	
54, 56, 57, 58, 61, 62, 66, 70, 74, 79, 82,	
84, 86, 87, 88, 90, 91, 92	
酸化反応42, 44, 53, 55, 56, 57, 58, 71, 72, 81,	
82, 86, 90, 91	
酸化分解	65, 67, 71
酸化防止剤.....	82, 84
酸素4, 6, 7, 11, 12, 14, 15, 20, 23, 26, 30, 34,	
36, 45, 47, 48, 49, 55, 62, 63, 64, 65, 66,	
67, 68, 69, 70, 71, 73, 74, 78, 79, 80, 81,	
82, 84, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92	
 し	
Siemens.....	3, 90
四塩化炭素.....	26, 63
ジオキシベンゼン.....	82
シキミ酸	84
自然の摂理.....	3, 93
自然発火	20
質量数.....	36
脂肪酸.....	80, 81, 82
自由エネルギー変化17, 18, 19, 20, 21, 22, 28,	
29, 44, 73	
周期表.....	37, 38, 42, 62, 86
縮合	67, 72

主量子数.....	36, 39, 40, 41, 42, 50, 51
焼夷弾	22, 24
消火.....	11, 15, 22, 23, 24, 26, 27
蒸気圧	20
硝酸エステル	14, 25
硝石.....	9, 11, 12, 14, 15, 23
醸造酒	70, 76, 79
状態方程式.....	31
消防法	24, 25
除去消火.....	23, 24, 27
食塩.....	56, 77
触媒.....	72
白炭.....	20

す

水銀.....	55
水銀化合物.....	56
水酸化ナトリウム	55, 56
水蒸気改質法	30, 34
水性ガス.....	34, 65
水素4, 6, 7, 14, 15, 20, 25, 27, 29, 30, 31, 32,	
33, 34, 35, 36, 41, 43, 44, 45, 49, 50, 55,	
56, 57, 59, 61, 62, 63, 65, 68, 78, 84, 86,	
87, 88, 89, 91, 92	
水素燃料.....	31, 34, 35
水素放電管	51
水素陽イオン	36
スペクトル.....	50

せ

製鉄.....	64, 65
静電引力.....	36, 86
正電荷	36
精錬.....	56, 57
遷移金属.....	38, 44
遷移状態.....	17, 19

そ

速度13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 31, 32, 33, 38,
48, 50, 58, 68, 89
素反応.....30, 43, 49, 53

た

焚火.....3, 5, 6, 12, 89
脱酸素剤.....48, 82, 84, 90
脱出速度.....33
脱水.....72
脱炭酸.....72, 84
Daniell.....53, 91
ダニエル電池.....54, 58
炭化水素.....29, 31, 32, 34, 62
単結合.....82, 84
炭酸.....72
炭水化物.....68
炭素4, 6, 7, 12, 13, 23, 26, 29, 31, 32, 34, 45,
58, 62, 63, 64, 65, 67, 70, 71, 72, 74, 75,
76, 77, 78, 79, 81, 82, 84, 88
単体塩素.....56
タンニン.....83
蛋白質.....73

ち

蓄電池.....53, 60
窒息消火.....23, 24, 26, 27
着火.....11, 14, 19, 20, 23, 27, 89
中性子.....36, 38, 86
チリ硝石.....15
チロシン.....82, 85
鎮火.....10, 11, 14, 20, 21, 26, 27, 89

つ

使い捨てカイロ.....45, 48, 90
附木.....9, 21

て

出会いの反応.....13, 16, 67
DHA.....80
TNT.....15, 16
鉄3, 7, 10, 17, 25, 26, 44, 45, 46, 47, 48, 51,
52, 56, 62, 64, 65, 71, 87, 89, 92
鉄錆.....7, 42, 45
鉄の金属.....7, 42, 45
点火4, 6, 9, 11, 12, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 22,
28, 32, 63, 71, 91
電解質.....55, 57, 58
電気エネルギー.....53, 54, 55, 57, 58, 59
電気化学.....4
電気火災.....24, 26
電気精錬.....92
電気分解4, 34, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 65, 87,
91, 92
典型金属.....38
電子.....36, 38, 43
電磁気学.....4
電子親和力.....40, 41, 42
電子の遣り取り.....50, 52, 54, 57, 58, 93
電磁波.....50, 51, 52, 66, 83
電磁誘導.....4
電子を遣り取り.....44, 86, 91
電池..4, 52, 53, 54, 57, 58, 59, 60, 61, 91, 92
電導性.....55, 60
でんぷん.....68, 70, 71, 75, 76, 77, 78, 79

と

銅.....44, 45
同位元素.....36
糖化.....79
東京大空襲.....22
灯油.....14, 21, 22, 24, 31
糖類.....68, 70, 74, 75, 79

トタン	45, 47
DOPA	85
鳶口	22

な

鉛蓄電池	53, 58, 59, 60, 92
------------	--------------------

に

二酸化炭素 4, 6, 7, 12, 13, 14, 18, 23, 26, 29,	
30, 31, 34, 35, 45, 62, 63, 64, 65, 67, 70,	
71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 87	
2重結合	73
ニトロ基	16
ニトログリセリン	15
ニトロセルロース	14
乳酸	75
乳酸菌	69, 70, 73, 74, 87

ね

熱化学方程式	30, 34
熱力学の3法則	28
燃焼 4, 5, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18,	
19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30,	
31, 32, 34, 45, 48, 62, 63, 64, 65, 70, 71,	
73, 87, 88, 89, 90, 92	
燃焼熱 . 12, 14, 18, 19, 27, 29, 30, 31, 32, 34,	
48, 63, 71, 73, 87, 89, 92	
燃料 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 19, 20, 21, 22,	
23, 24, 27, 28, 29, 31, 32, 34, 35, 62, 63,	
88, 89	

の

濃度	13, 16, 17
Nobel	3, 17, 90

は

Haber	15
灰	5, 6, 46, 64

麦芽	75, 77
麦芽糖	75
爆発 11, 13, 14, 15, 16, 17, 24, 27, 32, 45, 48	
発火	9, 10, 20, 22, 24, 25, 89
発火点	20, 21
発光	50
発酵	7, 15, 45, 70, 74, 75, 79, 84
発電	54, 56, 57, 58, 59
発熱反応	17, 28, 29, 30, 44
バニリン	84
Balmer	50
ハロゲン元素	40
パン . 7, 14, 29, 34, 45, 63, 65, 75, 76, 77, 78,	
87, 89	
反応座標	17, 19
反応速度定数	13

ひ

火打石	7, 9, 10, 12, 18, 21, 89
非金属元素	38
火消し壺	14, 17, 23
ピルビン酸	69, 70, 71, 72, 73, 83
ピロガロール	48
火を熾す	5, 7, 9, 10, 11, 12, 18, 62, 64
火を使いこなす	3, 7, 9, 10, 13, 89
頻度因子	18

ふ

Faraday	4, 6
ファラデー定数	4
ふいご	10, 14, 17, 21, 89
フェニルプロパノイド	83, 84
フェノール	82
フェリシアン化カリウム	51
フェロシアン化カリウム	51, 52
Ford	89
付加	72, 80

附木	9, 22
普通火災	24, 26, 27
沸点	20, 32
負電荷	36
ブドウ糖	65, 67, 68, 71, 72, 73, 75, 76
不飽和脂肪酸	81
プラスチック	42, 91
Planck の定数	38
ブリキ	47
プロリン	76
分子	67, 72, 84, 86
分子式	65
粉末消火器	26

へ

平面構造	60
Hess	30
ペプチダーゼ	80, 81
ヘモグロビン	71
変性	81
ベンゼン	82, 84

ほ

防火	22, 23, 26
芳香族化合物	84
珉瑯	47
飽和脂肪酸	81
ほくち	9, 10, 18, 21
補酵素	72
補色	66
炎	4, 5, 6, 11, 14, 20, 71
ポリフェノール	83

ま

薪	5, 10, 13, 21, 23, 24, 57, 89
摩擦熱	5, 9, 89
マッチ	6, 7, 9, 10, 12, 18, 20, 21, 22, 89

み

水俣病公害	56
-------------	----

め

メチオニン	81
メッキ	46, 47, 56, 57, 92
メラニン	85
綿火薬	14, 15, 16
Mjendjeljejev	38, 42

も

木炭 10, 11, 12, 13, 14, 20, 24, 45, 63, 64, 65	
モル	71, 72, 73

ゆ

誘電率	38
ユビキノン	66, 71, 87

よ

陽イオン 36, 39, 40, 41, 42, 43, 49, 55, 56, 59,	
62, 86	
陽子	36, 37, 38, 39, 40, 42, 43, 86
陽子数	36, 38
溶媒	55
葉緑素	66

ら

ライター	7, 10, 12, 18, 21, 22, 89
ランタニド金属元素	38

り

Lyman	50
リゲニン	83
リグノイド	83
理想気体定数	31
リチウム	45, 57, 58, 60, 61, 92
リノール酸	80, 81
リボフラビン	66, 71

Rydberg.....38

リン 3, 6, 9, 15, 16, 17, 24, 89

れ

冷却消火24, 26, 27

ろ

ロイシン76

ロウソクの科学..... 4

わ

別れの反応..... 16, 18

Watt..... 3, 89