

人類の贅沢を化学する

改訂版

鹿島 長次

(2007.2)

目次

1. まえがき	3
地球の今昔.....	3
人類の横暴な贅沢の現状.....	3
2. 地球は釣り合ったシーソーの上に	6
地球はエネルギーのシーソーの上.....	6
エネルギー不滅の法則.....	6
地球を構成する元素は不変.....	7
物質の持つ化学エネルギー.....	9
還元性物質が蓄える化学エネルギー.....	10
物理的に形状が変化する機械的風化.....	11
化学組成が変化する化学的風化.....	13
地球は物質のシーソーの上.....	13
3. 物質を使い捨てる贅沢	15
金属は錆び易い.....	15
金属の精錬にはエネルギーが必要.....	16
足尾鉍毒事件.....	17
金属を使い捨てる贅沢.....	18
プラスチックを使い捨てる贅沢.....	20
4. 二酸化炭素を出す贅沢	22
金星、火星の大気は二酸化炭素.....	22
地球は水の惑星.....	24
火成岩から溶け出した海の塩.....	26
二酸化炭素は大気中から石灰石へ.....	29
生物の素材は二酸化炭素.....	32
光合成の機構.....	33
二酸化炭素の大気中濃度と植物の繁殖速度.....	35
人類の贅沢で発生する二酸化炭素.....	36
5. 二酸化硫黄を出す贅沢	40
二酸化硫黄の毒性.....	40
硫黄のおまけ付き石油.....	41
硫酸製造と硫黄鉍山の閉山.....	44
6. 苛性ソーダを浪費する贅沢	46
苛性ソーダと単体塩素.....	46
単体塩素の用途と需要.....	48
クスリとリスク.....	48
有機塩素系物質の毒性.....	52

ハロメタンとハロエタン	54
塩素漂白と塩素殺菌	58
オゾンホール	60
ソーダ工業の将来	64
7. エネルギーを無闇矢鱈に使う贅沢	66
エネルギーの釣り合う地球	66
人類が使用するエネルギー量	67
化石燃料の燃焼によるエネルギー	68
原子燃料によるエネルギー	68
地球を傷つけるエネルギーの浪費	71
8. 人類の贅沢	74
人類の贅沢を抑える術	74
人類に許される贅沢	75
索引	77

1. まえがき

地球の今昔

地球は約 45 億年前に太陽系の惑星のひとつとして誕生し、いろいろの変遷を経て現在に至っています。その間、暖かい太陽の光が変わりなく地球に降り注いできましたが、何度かの極めて気温の低い氷河期や気温の高い間氷期を経験しました。1720 年にファーレンهایتが温度計を発明してから、世界各地の気温が比較的正確に測定されるようになりましたが、20 世紀の半からは世界各地の平均気温が少しずつ高くなる傾向が見られています。この気温上昇の変化は単なる氷河期、間氷期のサイクルの 1 つなのかもしれませんが、また、世界各地で発生している種々の天変地異の頻度がこの気温上昇に関連するかのようになっているように感じられます。通信の発達により瞬時に広く情報が世界中を流れるために天変地異がしばしば発生しているように感じられるだけなのかもしれませんが、気温の上昇と天変地異の頻度の間に関連性があるのかもしれません。地球を征服したと思いがっている人類は石油をどんどん燃やして地球狭しと動き回り、生活環境を快適にすべく夏は冷房を冬は暖房をし、昼間のように煌々と灯りを点して昼夜の別なく活動しています。自然の摂理に反するようなこの人類の驕りと贅沢が気温の上昇をもたらし、ひいては度重なる天変地異を引き起こす原因となっているのかもしれませんが。

もし人類の贅沢が気温の上昇、大気汚染、自然の破壊などを引き起こし、これらの変化を原因とする天変地異が地球環境の破壊に繋がるものであれば、由々しき問題と考えなければなりません。そこで本書では人類の贅沢を化学的に検討してみようと思います。関連性が明らかになるようであれば、よりよい地球環境にして行くための反省の材料になるものと思われる。

人類の横暴な贅沢の現状

人類が動物の一種として地球上に進化してから数万年になりますが、その間に人類はより安定したより快適な生活をするために肉体を使い、知恵を絞ってきました。常に食べるものに困らないように食料を貯蔵するようになりました。雨露を避け寒さを凌ぐために、木の下や洞窟などに生活していましたが、自分でねぐらを作るようになり次第に家屋が形成されるようになりました。外界から身体を守るためには衣服を着用する知恵も生まれてきました。このように、文明の初期には自然界にある材料を集めてきて簡単な加工を加えたものでしたから、小鳥が木の梢に巣を作ったり、蜜蜂が花の蜜を溜め込むのと同じで、物質の変化の上では全く自然現象を乱すものではありませんでした。

人類を含めて全ての生物は種を保存し繁殖するために、生命活動を続けています。2 種以上の種がその繁殖のために競合するときには、互いに争い滅ぼしあう弱肉強食、自然淘汰という自然の摂理が働きます。文明が発展するにつれて、確実に食料を得るために農耕が始まり、森を焼いたり、野に水を引き入れたりするようになりました。原生していた木草を取り除いて、食料の供給に適した作物を移植するようになりました。耐久性に富んだ毛皮や織物を着用するようにもなりました。この時点で人類は既に多少自然に手を加え、自然現象を乱すようになりましたが、人類の生活に必要な自然の破壊に限られており、弱肉強食、自然淘汰という自然の

摂理を逸脱するものではありませんでした。人類が生活を維持し、繁殖するための最小限の自然破壊ですから、この程度では人類の贅沢とは考えられないと思われます。

近年になって知識や技術が進歩向上するにつれて、人類は安定した生活、快適な生活を飽くなきまでに追及するようになりました。子々孫々の代までの食料を安定して確保するために、食料を大量に溜め込むようになりました。必要な栄養を摂取するための食料から、しだいに趣向を加味した食物に変化してゆきました。この段階では必要以上の食糧を生産しているのですから、人類は食料の安定供給や味覚の満足という贅沢を始めたこととなります。繊維を色々と染め上げて華やかな衣服を織り上げるよ



うになりましたが、これも気持ちを晴れやかにし、他の人と差別するための人類の贅沢の始まりでしょう。雨露を凌ぎ外敵から身を守るための住居も大きく堅牢なものになってきました。焚き火を囲んで夜の暗闇から逃れていましたが、ローソクを点して暗黒の世界を駆逐することができるようになりました。これも生活を快適にするための人類の贅沢の始まりでしょう。

さらに、文明の進歩とともに人類の贅沢は限りなく増大してゆきました。現代では、人類の食料を牛や豚や鶏に食べさせて、食肉や鶏卵や乳製品として食卓に並べていますが、この変換効率は決して高いものではありません。魚屋さんには春先でも秋刀魚が並び、隣のショーケースにはアフリカの近海で獲れたマグロの刺身が売られています。夏野菜の胡瓜やトマトは冬でも店頭にあふれ、イチゴの最盛期はクリスマスの時期に移ってしまいました。比較的収穫量の少ないコシヒカリやササニシキが珍重され、さらに糠として玄米の10%以上も精米してしまいます。2004年に農水省が日本の家庭を調査した結果では、このように多くのエネルギーを無駄遣いして作った食物の約8%を食べることなく捨ててしまっています。

2005年の夏からはクールビズなる運動が展開されました。しかし未だに、真夏の猛暑の中でも男性は背広にネクタイをして冷房の利いたオフィスで働いていますから、腰の周りに毛布を巻いて寒さ除けをしながら多くの女性が同じオフィスで事務を取っています。厳寒の真冬に室内を強く暖房し、スリッパドレスにミニスカートの女性がアイスクリームを好んで食べています。定員が5人以上もある大きな自動車に1人だけで乗って、多くの人が遠い道のりを通勤しています。日の長い夏など、日の出から数時間も寝静まっていて街に殆ど活気が出てきませんが、その同じ街が日の沈んでから賑わい始めます。東京都心の新宿、渋谷、池袋、六本木の街角では終日眠ることなくネオンが瞬き活動しています。弥次さんや喜多さんは江戸から京都まで10日以上をかけて旅したそうですが、新幹線は150分ほどで旅人を運んでしまいます。そのため多くの人があ直に大した用事もなく東京と京都の間を往復しています。東京やロンドンやニューヨークを往き来する旅行者の中には、比較的重要でない用事や仕事以外の用件のための

旅行者が多く含まれており、大部分の人は地球狭しと動き回る必要もありません。殆どの場合には単なる航空燃料の無駄遣いに過ぎません。現代の人類、特に都市部に生活する人類はとてつもない贅沢をしており、その例は枚挙にいとまがありません。

さらに、軍事行動はその本質自体が殺戮と破壊を目的とし、全く生産性のない浪費です。アメリカ合衆国からはるかに遠く離れたペルシャ湾まで数万トンもある航空母艦を航行してゆき、イラク各地を爆撃して破壊を続けています。航行のための燃料、爆撃機のジェット燃料、爆撃のための火薬、その他諸々の戦略物資の消費は膨大なものでしょう。攻撃のために多用されている各種のミサイルは燃料、爆薬、巡航用のエンジン、攻撃目標までの誘導制御装置など全て一度に消費してしまいます。戦争のための消費は全て、人類の本来的に必要な物質の消費とは全く無関係なものであり、人類の最大、最悪な贅沢と思われれます。

人類が動物の一種として生活するために必要な最小限を超えて物質やエネルギーを消費することは、浪費であり、人類の贅沢と考えられます。さらに、人類との共存ができずに人類の贅沢の犠牲になり、多大の被害を被ったり、種の存続まで危うくされた生物がいることは、人類の横暴と云わざるを得ません。本書では環境省環境統計集の資料を基に、人類の贅沢によりどのような物質が浪費され、どのような物質が無為に生産されているか化学的に考察して、人類の無用の贅沢と横暴を戒める材料に出来ればと考えています。

2. 地球は釣り合ったシーソーの上に

地球はエネルギーのシーソーの上

人類の贅沢によりどのような物質が浪費され、どのような物質が無為に生産されているか科学的に検証するためには、まず、地球の本来の姿を考える必要があると考えました。特に、ここでは地球全体のエネルギー収支を考えて見ましょう。

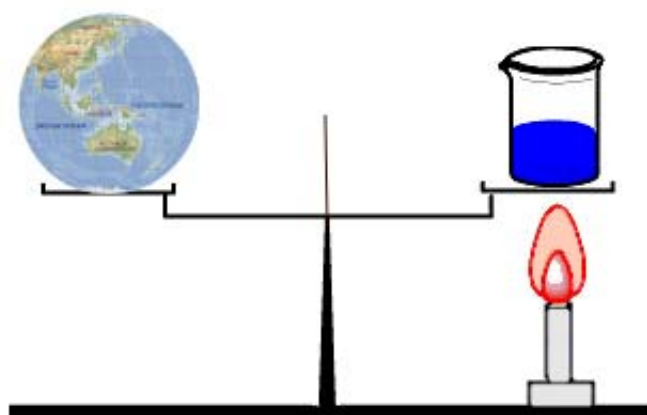


図2-1 釣り合った地球

地球は 45 億年前に誕生してから、太陽の引力圏内において太陽の周りを公転しており、地球の引力圏内で月が地球の周りを公転しています。さらに、地球自身も約 24 時間周期で自転しています。この 3 つの天体が相互作用しているため、その運動は徐々に遅くなっており、その変化で生ずるエネルギーは太陽から供給される光エネルギーに比べれば僅かですが、潮汐現象や偏西風などのような運動エネルギーの形で地球に影響を与えています。この 3

つの天体の相互作用以外の惑星間の相互作用は無視できるほどわずかしか受けていません。

地球が太陽から 1.5 億 km 離れていますから、太陽の輻射する光エネルギーはその 4.8 億分の 1 とごく一部しか地球には到達しません。しかし、水素の核融合反応で高温に燃えている太陽は毎秒 10^{23} kcal の大量の光エネルギーを輻射し続けていますから、地球全体が受ける太陽の光エネルギーは毎秒 1.5×10^{13} kcal もの膨大なものです。地球に到達した光エネルギーの 70% に相当する毎秒 1.0×10^{13} kcal のエネルギーは大気中および地表に吸収されて地球の持つ総エネルギー量を増加させますが、残りの 30% は反射してしまいます。地球は太陽などに比べれば極めて低温ですが、宇宙空間に比べればかなり高温を保っていますから、地球自体も大量の熱エネルギーを輻射しております。図 2-1 の漫画のように、この地球が熱輻射する総エネルギーは、自転や公転などの地球の運動が遅くなった時に発生するエネルギーと、太陽から供給される光エネルギーの総和に釣り合っています。45 億年という長い年月の間に地球の持っていた運動エネルギーの変化と太陽から供給される光エネルギーが宇宙空間への熱輻射などによる地球の消費するエネルギーと釣り合うようになり、現在の状態の地球を維持できるようになって来ました。言い換えれば 45 億年かけてエネルギー的なシーソーは釣り合うようになったと考えられます。現在の地球はエネルギーのシーソーに乗っており、エネルギーの総量に変化がありませんから、地球はエネルギー的には外界から遮断され独立した一つの世界と考えることが出来ます。

エネルギー不滅の法則

自転や公転などの地球の運動が遅くなった時に発生するエネルギーと、太陽から供給される

光エネルギーの総和は地球が熱輻射する大量の熱エネルギーに釣り合っています。現在の地球はエネルギーのシーソーに乗っており、エネルギーの総量に変化がありませんから、地球はエネルギー的には外界から遮断され独立した一つの世界と考えることが出来ます。

地球の自転や公転は地球自体が持っている運動エネルギーによるものですが、この地球の運動の僅かずつ遅くなる変化により、発生するエネルギーは海水面を定期的に上下させる潮汐現象をもたらします。また、大気の上層部で偏西風の現象の原因にもなっています。つまり、海水や大気の運動のエネルギーに変換されています。

地球に吸収された太陽の光エネルギーは熱エネルギーに変換されて大気や地表を温めます。このとき地表の材質の違いにより暖まり方が必ずしも一様でないため、温度差が生じます。この温度差は対流を引き起こし、大気中に低圧部と高圧部を生みますから大気の流れとなります。また、海水中の温度差は黒潮や親潮やメキシコ湾流となって海水の対流を引き起こします。結果として太陽の光エネルギーは熱エネルギーに変換し、さらに運動エネルギーに変換されます。また、太陽の光エネルギーから変換された熱エネルギーは、地表の水を蒸発させて雲を生み、大気の流れに乗って海から遠く離れた地まで水蒸気は移動し、雨や雪を降らせる循環を引き起こします。水蒸気の移動により高地に降った水は海まで流れ下ります。このとき太陽から供給された熱エネルギーは水の運動エネルギーに変換されますが、雷などの電気エネルギーに変換されることもあります。さらに、地表に到達した太陽の光を吸収して植物は二酸化炭素からブドウ糖への還元により化学エネルギーに変換されます。高い化学エネルギーを持ったブドウ糖などの還元物質は二酸化炭素まで酸化されることにより、その化学エネルギーは生物の生命を維持するために消費されます。また、化学エネルギーを持った還元物質は、ごく一部ですが石炭や石油などの化石燃料として 45 億年の間に蓄えられてきました。

光エネルギーから、熱エネルギー、運動エネルギー、化学エネルギー、電気エネルギーなど色々な形にエネルギーは変換されていますが、外界から遮断され独立した一つの世界として、地球の中ではエネルギー不滅の法則が成り立っています。これらの各種のエネルギーの割合も長い年月の間に平衡になり、一定な潮流や潮汐運動を続け、規則的な気候変化を維持するようになって来ました。

地球を構成する元素は不変

自転や公転などの地球の持っていた運動エネルギーの変化と太陽から供給される光エネルギーが地球の熱輻射熱として消費するエネルギーとシーソーのように釣り合っていると考えられ、エネルギーの総量に変化がありませんから、外界から遮断され独立した一つの世界と考えることが出来ます。次に、人類の贅沢によりどのような物質が浪費され、どのような物質が無為に生産されているか化学的に検証するために、ここでは地球全体の物質収支を化学的に考えて見ましょう。

太陽の光エネルギーのほかに、太陽の中で起こっている核融合反応の折に副生する中性子や原子やイオンも宇宙線となって太陽から放射され、地球上にも到達しています。また、隕石などの形で地球の引力圏内に吸収されてしまう小さな天体も原子やイオンからなっています。地球の引力が小さいために地球からの脱出速度は毎秒 11.18km ほどしかありませんから、このような元素の増加とは反対に分子運動の速度が大きな水素やヘリウムは 45 億年の間にほとんど

散逸してしまいました。表 2 - 1 には、宇宙の平均的な元素組成と、地球の元素組成を比較しておきましたが、この表からも明らかなように、地球では極端に水素とヘリウムが少ししか存在しません。分子運動の速度の大きな水素やヘリウムの分子は既に地球から散逸してしまっていることを意味しています。分子運動の速度が遅い分子だけが現在の地球に存在し、もはや

表 2 - 1 地殻中と宇宙における元素存在比(%)

元素	地殻中	宇宙		
		Suess.Urey (1856)	Cameron (1966)	松井義人 (1967)
¹ H	0.14	92.8074	92.2190	86.0215
² He	0.00	7.1462	7.4928	13.7097
⁶ C	0.18	0.0081	0.0478	0.0331
⁷ N	0.01	0.0153	0.0086	0.0098
⁸ O	46.60	0.0499	0.0836	0.0753
¹⁰ Ne	0.00	0.0200	0.0084	0.0427
¹¹ Na	2.80	0.0001	0.0001	0.0002
¹² Mg	2.10	0.0021	0.0030	0.0028
¹³ Al	8.10	0.0002	0.0003	0.0002
¹⁴ Si	27.70	0.0023	0.0029	0.0027
¹⁵ P	0.12	0.0000	0.0000	0.0000
¹⁶ S	0.05	0.0009	0.0017	0.0013
¹⁷ Cl	0.03	0.0000	0.0000	0.0000
¹⁸ Ar	0.00	0.0003	0.0007	0.0006
¹⁹ K	2.60	0.0000	0.0000	0.0000
²⁰ Ca	3.60	0.0001	0.0002	0.0002
²² Ti	0.44	0.0000	0.0000	0.0000
²⁴ Cr	0.02	0.0000	0.0000	0.0000
²⁶ Fe	5.00	0.0014	0.0024	0.0024
²⁸ Ni	0.00	0.0001	0.0001	0.0001
³⁷ Rb	0.03	0.0000	0.0000	0.0000
³⁸ Sr	0.03	0.0000	0.0000	0.0000
⁴⁰ Zr	0.02	0.0000	0.0000	0.0000
⁵⁶ Ba	0.03	0.0000	0.0000	0.0000
⁹² U	1 × 10 ⁻⁵	0.0000	2 × 10 ⁻⁵	1 × 10 ⁻⁵

全く散逸しませんから、地球を構成する $6.0 \times 10^{24} \text{kg}$ の質量の元素と比較すると、その元素の増減は無視できるほど微量です。しかもその約半分の元素は酸素、約 1/4 の元素はけい素です

からほとんど岩石と考えることができます。

言い換えれば、地球の元素の種類と総量が不変ですから、物質が化学的に如何に変化しても、物質不滅の法則が成り立っていることになります。このように考えてくると、元素の種類と総量においても地球は外界から遮断され独立した一つの世界と考えることができます。

物質の持つ化学エネルギー

前に考えたように地球ではエネルギーも物質も形態は変化しても総量に変化のない外界から独立し、遮断された世界であることが判りました。物理学の基礎となる熱力学の3法則によりますと、外界から独立し遮断された閉鎖系では、エネルギーも物質も形態は変化してもその総量は不変であり、エネルギー不滅の法則、物質不滅の法則と呼ばれています。また、エネルギーを発散しながら物質の拡散する方向に変化が起こり、逆に集合させるためにはエネルギーを必要とすることが、エントロピーの増大するように変化が起こるといふ熱力学の法則として認められています。

多くの小学生が学ぶ小学校の昼休みを考えてみてください。先生が何もしなくても給食が終わると、生徒は元気に運動場に飛び出してゆき遊び始めます。昼休みが終わると先生は始業のチャイムを鳴らして生徒を教室に呼び集めます。そして大きな声を張り上げて勉強が出来るように席に着かせます。それでもだめならば、先生は生徒の注意を引くような話や行動をとるでしょう。このようにして、生徒を教室という秩序の中に纏めて行きます。先生はチャイムを鳴らしたり、声を張り上げたり、注意を引くような行動をとりましたが、この時先生はかなりのエネルギーを使わなければなりません。物質は分子がある秩序を持って集合して形作られますが、このように秩序を持って集合するときには、分子は小学生と同じように集合のためのエネルギーを必要とします。逆に、物質も小学生も放って置けば少しづつエネルギーを放出して次

表 2 - 2 共有結合半径

H	Be	B	C	N	O	F
0.33	1.07	0.89	0.77	0.70	0.66	0.64
	Mg	Al	Si	P	S	Cl
	1.40	1.26	1.17	1.10	1.04	0.99
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br
1.35	1.31	1.26	1.22	1.18	1.14	1.11
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I
1.53	1.48	1.44	1.40	1.36	1.32	1.28
Au	Hg	Tl	Pb	Bi		
1.50	1.48	1.47	1.46	1.46		

第に分子や小学生の秩序を乱して散り散りばらばらに拡散してゆきます。このように物質や元素を集合させるために必要であり、拡散する際に放出されるエネルギーをエントロピーと呼ん

でいます。

いろいろな元素が互いに引き付けあって結合するときには、結合することにより安定化するために、結合エネルギーと呼ばれるエネルギーを放出して分子を形作ります。この時、原子間の距離は表 2 - 2 に挙げたそれぞれの共有結合半径の和になるときにもっとも大きな結合エネルギーを放出します。また、結合の方向は元素により大きく異なります。炭素やけい素のように原子価が 4 価の元素ではその結合の方向はお互いに 109.5 度の角度を持つときに最も安定しています。しかし、多くの元素で構成される分子においては、全ての元素を結ぶ結合の原子間距離と結合角を最適に保つことは出来ませんから、当然そこには歪みが生じてきます。そこで、放出するすべての結合エネルギーと歪みのエネルギーの総和をエンタルピーと呼んで、元素が集合して分子を形作ったときに放出する総エネルギーと考えています。放出するエネルギーが大きいほどこのエンタルピーの値が負に大きくなり、安定な分子と考えることが出来ます。反対に、エントロピーが正の方向に大きいほど、その分子は化学エネルギーを貯えていると考えることが出来ます。

このエンタルピーとエントロピーの 2 種類のエネルギーを足し合わせたものは自由エネルギーといい、その物質のもつ化学エネルギーの総計と考えてよいでしょう。これらの 3 種のエネルギーには式 2 - 1 のような関係が成り立っていますから、エントロピーは温度の影響を受ける性質があり、温度が下がると次第に 0 に近づきます。

$$G = H - TS \quad \text{式 2 - 1}$$

冬の寒い日に小学生があまり運動場に出て行かないようになる事も何となく肯ける気がします。ただし、G は自由エネルギー、H はエンタルピー、S はエントロピー、T は絶対温度を意味しています。太陽からの光エネルギーは熱エネルギーや運動エネルギーなどに色々変換されますが、エネルギーの一部は化学変化を引き起こし、化学エネルギーの形で物質に蓄えられます。また、この蓄えられた化学エネルギーは化学変化をすることにより放出され他の形のエネルギーに変換されます。

還元性物質が蓄える化学エネルギー

太陽からの光エネルギーは熱エネルギーや運動エネルギーなどに色々変換されますが、エネルギーの一部は化学変化を引き起こし、化学エネルギーの形で物質に蓄えられます。また、この蓄えられた化学エネルギーは化学変化をすることにより放出され他の形のエネルギーに変換されます。その物質に蓄えられた化学エネルギーは、エンタルピーとエントロピーの 2 種類のエネルギーを足し合わせたものと考えられますが、エントロピーよりもエンタルピーのほうが一般に大きな値を示します。ここでエンタルピーは物質を構成する分子の結合エネルギーと歪みエネルギーに由来するものですから、化学エネルギーの主体は結合エネルギーの変化と考えてよいでしょう。

たとえばメタンガスが燃えて水と二酸化炭素になるときは 4 本の C - H 結合と 2 本の O = O 結合が切れて、4 本の O - H 結合と 2 本の C = O 結合が出来ます。メタンガス、酸素、水、二酸化炭素の分子の何れもほとんど歪みエネルギーを含んでいませんから、結合エネルギーの

変化がエンタルピーの変化と考えられます。結合エネルギーはそれぞれ 1 モル当たり C - H 結合 : 99 kcal、O = O 結合 : 98 kcal、O - H 結合 : 111 kcal、C = O 結合 : 179 kcal ですから、この反応で放出されるエネルギーは式 2 - 2 より

$$\text{結合エネルギー変化} = (111 \times 4 + 179 \times 2 - 99 \times 4 - 98 \times 2) \text{ kcal/mol} = 210 \text{ kcal/mol}$$

式 2 - 2

と計算されます。この結合エネルギーの変化はメタンガスが蓄えている化学エネルギーと考えてよいでしょう。

多くの植物は太陽からの光エネルギーを吸収して、二酸化炭素と水を化学的に変化させてブドウ糖を生産しています。これは 6 分子の二酸化炭素と 6 分子の水から 1 分子のブドウ糖と 6 分子の酸素を生ずる変化ですから、12 本の C = O 結合と 12 本の O - H 結合から 5 本の C - C 結合、5 本の O - H 結合、7 本の C - O 結合、7 本の C - H 結合、6 本の O = O 結合への変化と考えられます。この化学変化では多少の歪みエネルギーが加わりますから、植物は 180g のブドウ糖を生産することにより太陽の光エネルギーから 673 kcal の化学エネルギーを蓄えています。

一般に化学エネルギーを蓄える物質は、メタンガスやブドウ糖のように比較的の高い還元状態にあり、酸化されることによりその化学エネルギーを放出します。特に、この酸化反応が短時間に進行し、全ての化学エネルギーが放出されると非常に高温になりますから、この反応を燃焼と呼び、このときに放出する化学エネルギーを燃焼熱と呼んでいます。蓄えられる化学エネルギーの大きさを比較するために表 2 - 3 には種々の有機化合物の燃焼熱をまとめておきます。

物理的に形状が変化する機械的風化

地表を構成する物質が日射、空気、水、生物などの作用によって次第に破壊され、分解されることを風化といい、物理的に形状が変化する機械的風化と化学組成が変化する化学的風化があります。ある秩序を持って形を成している物質が破壊され、形状が変化してゆく機械的風化では分子間に働くエンタルピーと秩序の変化によるエントロピーの両方が変化します。一般に、分子が規則正しく配列している物質が破壊される際には、その分子の間に働く分子間力が切断されるためエンタルピー的にはエネルギーを吸収し、秩序が拡散する方向に変化するためにエントロピー的にはエネルギーを放出します。岩石や氷山のように比較的規則正しい配列をした物質の破壊の場合には、エンタルピーの変化がエントロピーの変化に優るため、外からの熱エネルギーや運動エネルギーの供給を受けて起こる吸熱反応となります。

表 2 - 3 種々の有機化合物の燃焼熱(kcal/mol)

物質名	分子式	燃焼熱	物質名	分子式	燃焼熱
ホルムアルデヒド	CH ₂ O	134.1	アラニン	C ₃ H ₇ NO ₂	387.7
蟻酸	CH ₂ O ₂	62.8	ウレタン	C ₃ H ₇ NO ₃	397.2
メタン	CH ₄	210.8	プロパン	C ₃ H ₈	526.3
尿素	CH ₄ N ₂ O	151.6	グリセリン	C ₃ H ₈ O ₃	397.0
メタノール	CH ₄ O	170.9	酢酸エチル	C ₄ H ₈ O ₂	536.9
メチルアミン	CH ₅ N	256.1	ベンゼン	C ₆ H ₆	782.3
アセチレン	C ₂ H ₂	312.0	フェノール	C ₆ H ₆ O	732.2
シュウ酸	C ₂ H ₂ O ₄	60.2	アニリン	C ₆ H ₇ N	811.7
エチレン	C ₂ H ₄	331.6	ヘキサン	C ₆ H ₁₄	989.8
アセトアルデヒド	C ₂ H ₄ O	279.0	シクロヘキサジエン	C ₆ H ₈	847.8
酢酸	C ₂ H ₄ O ₂	209.4	シクロヘキセン	C ₆ H ₁₀	891.9
アセトアミド	C ₂ H ₅ NO	282.6	シクロヘキサン	C ₆ H ₁₂	937.8
グリシン	C ₂ H ₅ NO ₂	234.5	ブドウ糖	C ₆ H ₁₂ O ₆	673.0
エタン	C ₂ H ₆	368.4	ベンズアルデヒド	C ₇ H ₆ O	841.3
エタノール	C ₂ H ₆ O	327.6	安息香酸	C ₇ H ₆ O ₂	771.2
ジメチルアミン	C ₂ H ₇ N	416.7	ベンジルアルコール	C ₇ H ₈ O	894.3
エチルアミン	C ₂ H ₇ N	408.5	安息香酸メチル	C ₈ H ₈ O ₂	943.5
アセトン	C ₃ H ₆ O	426.8	オクタン	C ₈ H ₁₈	1302.7
蟻酸エチル	C ₃ H ₆ O ₂	391.7	ステアリン酸	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	2711.8

氷は水の分子が規則正しく配列して固化した状態です。このように分子が配列するためにはエントロピー的には大きなエネルギーを必要としますが、分子が近くに存在するために水素結合などの分子間力も大きくなり、エンタルピー的にはかなりのエネルギーの放出となります。実際、水から放出されるエネルギーを奪って冷却しなければ、水は結氷しません。逆に、氷が0で融けて液状の水になるときはエンタルピー的なエネルギーの吸収が支配的になり、1g当たり80 calの融解熱を必要とします。山に積もった雪や北極の氷山も同じ氷で出来ていますから、機械的に風化するためには多量の熱エネルギーを必要になります。

岩石は種類により成分も分子の配列も異なりますから、雪や氷山のように簡単な系として考えることは出来ませんが、一般的には機械的に風化するときエンタルピーの変化がエントロピーの変化に優るため、エネルギーの供給を必要とします。氷の体積膨張による運動エネルギーで岩石を破碎することが知られています。また、海の波や川の流れることによって岩石を削ってゆくことが知られています。水の流れや風に乗って移動する岩や砂同士の衝突により破碎することも知られています。このように各種の運動エネルギーの供給により、岩石は次第に砂に細粒化し、機械的な風化が進行してゆきます。逆に、砂や泥土が全く移動することなく堆積してい

ると、長い年月の間にはわずかつつエネルギーを放出して、新しい秩序を作り上げてゆきます。砂の間に秩序が生まれれば砂岩に固化し、火山灰は凝灰岩に成長します。

化学組成が変化する化学的風化

物理的に形状が変化する機械的風化は組織や秩序の破壊に由来するエントロピー変化と分子間力に由来するエンタルピー変化を伴っていますが、何れのエネルギー変化も比較的小さいと考えられます。これに対して、化学組成が変化する化学的風化は機械的風化に結合エネルギーに由来するエンタルピー変化が加わります。機械的風化に影響を持つエントロピー変化と分子間力に由来するエンタルピー変化に比較して、結合エネルギーに由来するエンタルピー変化は非常に大きなものと思われます。たとえば、水の分子間力として働いている水素結合のエネルギーは約 6 kcal/mol、水の O - H 結合エネルギーは 111 kcal/mol と見積もられています。このように、分子間力に比較して原子間の結合エネルギーが非常に大きいため、化学エネルギーを放出する化学反応を含む化学的風化のみが進行します。

植物が太陽の光エネルギーを吸収して生産するブドウ糖が酸化されて放出される化学エネルギーは、蛋白質や脂肪、セルロースなどのあらゆる生物を構成する物質を生産するエネルギーとして使われます。また、ブドウ糖は重合して植物を形作るセルロースに変化しますから、セルロースもブドウ糖と同じように多くの化学エネルギーを蓄えています。植物が枯死して残された落ち葉や枯れ木も当然多くのセルロースを含んでいます。これらの落ち葉や枯れ木には茸が生えたり、白蟻が巣を作ったりして次第に朽ちて風化が進んで行きます。このときセルロースは昆虫や微生物の栄養源として水と二酸化炭素まで酸化され、放出される化学エネルギーは昆虫や微生物の命の活力となります。セルロースなどは物質が燃焼して化学エネルギーを放出し、水と二酸化炭素に分解してゆきますから、焚き火や山火事で落ち葉や枯れ木が燃えるときも化学的風化と考えることができます。

寒冷地のように生物にとって厳しい生活環境では、落ち葉や枯れ木の化学的風化は中間の単体炭素の段階までしか進行せず、二酸化炭素までの酸化が完結しません。また、砂漠のように湿度が低く高い気温の環境では、生物が棲息し難く、乾燥と脱水が進行して炭化してゆきます。地球上に棲息する生物は単体の炭素をほとんど栄養源とすることが出来ませんから、このように炭化した植物は風化し難いため累積してゆきます。このとき化学エネルギーを蓄えたままで化学的風化が終結してしまいます。スコットランドの泥炭のように余り炭化の進行していない初期の段階の石炭や、単体炭素の含有率が極めて高い粘結炭など種々の石炭が地球上に化学エネルギーを蓄えています。

上に挙げた例でも判るように化学組成が変化する化学的風化は結合エネルギーに由来するエンタルピー変化によるため、化学エネルギーを蓄えた物質から自然界で次第に安定な物質に変化するものと見る事が出来ます。

地球は物質のシーソーの上

地球全体は太陽から毎秒 1.0×10^{13} kcal の光エネルギーを大気中および地表に吸収して、地球の持つ総エネルギー量を増加させていますが、地球が宇宙空間に比べればかなり高温を保っていますから、地球自体も大量の熱エネルギーを輻射しております。また、太陽の引力の下で

太陽の周囲を公転し、地球は 24 時間で自転し、さらに月が地球の周囲を公転しています。これらの地球や月の運動も次第に遅くなっていますから、その運動の変化は潮汐運動などの運動エネルギーに変換されて地球の持つ総エネルギー量を増加させています。地球の誕生から 45 億年の間に地球は徐々に冷えて、熱輻射して消費するエネルギー量が次第に減少してきましたので、地球の持っていた運動エネルギーの変化と太陽から供給される光エネルギーの総量に拮抗するようになりました。、現在では地球の全エネルギーの収支は完全に釣り合っており、地球はエネルギー的には外界から遮断され独立した一つの世界と考えることができます。さらに、光エネルギー、運動エネルギー、熱エネルギー、化学エネルギーなどの種類別のエネルギーの割合も完全に釣り合っていますから、地球はエネルギー的にシーソーの上に乗っていると考えることができます。

太陽の中で起こっている核融合反応の折に副生する中性子や原子やイオンも宇宙線となって太陽から放射され、地球上にも到達しています。また、隕石などの形で地球の引力圏内に吸収されてしまう小さな天体も原子やイオンからなっています。このような元素の増加とは反対に、地球の引力が小さいために分子運動の速度が大きな分子を引き付けておくことができず、45 億年の間に水素やヘリウムはほとんど散逸してしまいました。現在、地球に存在する分子はもはや全く散逸しませんから、地球を構成する $6.0 \times 10^{24} \text{kg}$ の質量の元素と比較すると、元素の増減は無視できるほど微量です。言い換えれば、地球の元素の種類と総量が不変ですから、元素を基礎に考えても地球は外界から遮断され独立した一つの世界と考えることができます。

元素の種類と総量が不変でも、その元素の結合の仕方は色々と変化しますから、これに伴い化学エネルギーも変化します。植物が太陽の光エネルギーを吸収して生産するブドウ糖やセルロースなどは多くの化学エネルギーを蓄えています。植物が枯死して残された落ち葉や枯れ木には茸が生えたり、白蟻が巣を作ったりして次第に朽ちて風化が進んでいきます。このとき枯死した植物は昆虫や微生物の栄養源として水と二酸化炭素まで酸化され、放出される化学エネルギーは昆虫や微生物の命の活力となります。また、焚き火や山火事で燃えるときも物質の変化とともに化学エネルギーを放出します。このような物質のサイクルのほかに、寒冷地や砂漠のように生物にとって厳しい生活環境では、落ち葉や枯れ木の化学的風化は中間の単体炭素の段階までしか進行せず、二酸化炭素までの酸化が完結しません。このとき一部の化学エネルギーを蓄えたままで化学的風化が終結してしまいます。このように蓄えられる化学エネルギーの量も 45 億年の間に一定量に落ち着いてきました。

元素の種類と総量が不変でも、結合様式や組織や秩序の異なる物質の割合が変化すれば、当然、化学エネルギーの総量も変化します。エネルギーが完全に釣り合っている地球では、運動エネルギー、熱エネルギー、化学エネルギーなどの種類別のエネルギーの割合も完全に釣り合っていますから、結合様式の異なる種々の物質も一定の割合で平衡に達し、地球は物質的にもシーソーの上に乗っていると考えることができます。

人類の贅沢によりどのような物質が浪費され、どのような物質が無為に生産されているか化学的に検証するために、地球の本来の姿を考えてきましたが、その結果、種々の形のエネルギーと種々の物質が一定の割合で現在の生き生きとした地球を構成しており、地球の全てのこと

がシーソーの上に乗って平衡を保っていると結論されます。

3. 物質を使い捨てする贅沢

金属は錆び易い

多くの金属元素は酸化されて錆びてゆき、地球上では金属酸化物が大部分の岩石を構成しています。そこで、酸化反応とその逆反応の還元反応について少し考えてみることにしました。酸化反応と還元反応には基本的な2つのことがあります。基本的な第1点は、還元反応は物質を構成する原子に電子が加わり増加する反応であり、酸化反応は物質を構成する原子から電子を出して原子自体は電子の減る反応であることです。酸化される原子と酸化する原子が反応するとき、酸化する原子から酸化される原子へ電子の遣り取りが起こります。つまり、この反応系では酸化される原子の酸化反応と酸化する原子の還元反応が同時に起こることになります。この酸化還元反応の電子の遣り取りを電池という形で利用すれば、化学反応から電気エネルギーを生み出すことになります。また、系内に電気を通すことで強制的に電子の遣り取りを助けてやることにより、酸化還元反応を起こさせることが出来ます。このような反応を電気分解あるいは電気化学反応と呼んでいます。

金属が錆びて金属イオンに変化するときには金属元素は電子を放出するため、酸化・還元反応が電子の遣り取りと定義されていることから、金属元素は酸化されたこととなります。反対に金属イオンから金属になる変化は還元反応となります。さらに、鉄、ニッケル、コバルト、錫、銅などの遷移金属と呼ばれる金属では異なる価数をもつ複数のイオンが安定に存在します。これらのイオンで価数が変化することは、やはり電子の出入りが金属元素に起こりますから酸化あるいは還元反応になります。例えば2価の鉄のイオンは酸化されて3価の鉄のイオンへ変化しますし、還元されて金属の鉄に戻ります。基本的な第2点は、このように多くの物質には多段階の酸化の状態があり、酸化する性質と酸化される性質を兼ね備えた物質も存在することです。

このような多段階の酸化状態は炭素を中心とする物質にも存在します。二酸化炭素は1つの炭素原子からなる最も酸化された状態の物質であり、1段階還元されると蟻酸になります。この蟻酸はさらにホルムアルデヒドに還元されます。ホルムアルデヒドは酸化されれば蟻酸に戻りますが、還元されればメタノールを生成します。このメタノールは炭化水素のメタンまでもう1段階還元されます。つまり、炭素には二酸化炭素から炭化水素までの間に3種の酸化状態の違う中間の物質があります。これらの5段階の酸化状態の間は相互に酸化反応あるいは還元反応により変換されます。多段階の酸化状態は酸素、窒素、りん、硫黄などの非金属元素にも同じように存在します。このような多段階の酸化状態を持つ2種類の物質が反応するときには、酸化される物質がどちらなのかきわめて複雑で判り難くなります。そのため、反応を実際になくとも酸化反応の状態がわかるように酸化還元電位により酸化する強さを表すようにしています。酸化反応はその酸化還元電位よりも大きな酸化還元電位を持つ酸化剤で進行します。このように酸化還元電位の相対的な大小により酸化還元反応の進行が左右されますから、水から水素への還元の電位を基準として多くの物質の酸化還元電位が一般的に表されています。参考のために多くの酸化剤の酸化還元電位を表3-1にまとめました。

この表から分かるように銅、銀、金などの限られた金属を除いて、ほとんど全ての金属イオ

ンは負の酸化還元電位を示しています。このことは基準となる水と反応して金属が酸化され、水は水素に還元されることを意味しています。特に、酸化還元電位の著しく小さなナトリウムやカリウムなどのアルカリ金属、カルシウムやマグネシウムなどのアルカリ土類金属は極めて激しく水と反応します。現代生活で大量に用いられている金属のアルミニウムや鉄も速やかに水と反応して錆びてゆきます。地球上には至る所に水が存在していますから、この他ほとんどの金属は水の影響で金属酸化物に風化してしまいます。

表 3 - 1 種々の物質の酸化還元電位(V)

酸化剤	生成物	酸化還元電位	酸化剤	生成物	酸化還元電位
Ca ²⁺	Ca 金属	-2.76	ピルビン酸	乳酸	-0.19
Na ⁺	Na 金属	-2.71	Sn ²⁺	Sn 金属	-0.14
Mg ²⁺	Mg 金属	-2.38	Pb ²⁺	Pb 金属	-0.13
K ⁺	K 金属	-2.29	Fe ³⁺	Fe 金属	-0.04
Al ³⁺	Al 金属	-1.66	H ⁺	H ₂	0.00
SO ₄ ²⁻	SO ₃ ²⁻	-0.92	ユビキノン	ユビキノール	0.05
SiO ₂	Si 金属	-0.84	シトクローム(Fe ³⁺)	シトクローム(Fe ²⁺)	0.29
Zn ²⁺	Zn 金属	-0.76	Cu ²⁺	Cu 金属	0.34
酢酸	アセトアルデヒド	-0.58	NO ³⁻	NO ²⁻	0.42
Cr ²⁺	Cr 金属	-0.56	H ₂ SO ₃	S	0.45
S	S ²⁻	-0.51	Fe ³⁺	Fe ²⁺	0.77
CO ₂	シュウ酸	-0.49	Hg ²⁺	Hg 金属	0.80
Cr ³⁺	Cr ²⁺	-0.41	Ag ⁺	Ag 金属	0.80
Fe ²⁺	Fe 金属	-0.41	NO ³⁻	NO	0.96
シスチン	システイン	-0.34	Br ₂	Br ⁻	1.07
NAD ⁺	NADH	-0.32	O ₂	H ₂ O	1.23
Co ²⁺	Co 金属	-0.28	Cr ₂ O ₇ ²⁻	Cr ³⁺	1.33
Ni ²⁺	Ni 金属	-0.23	Cl ₂	Cl ⁻	1.36
FAD	FADH ₂	-0.22	Au ⁺	Au 金属	1.70
CO ₂	蟻酸	-0.20			

金属の精錬にはエネルギーが必要

一般に、ある物質が新しい物質に化学反応をして変化してゆくとき、熱エネルギーや光エネルギーや電気エネルギーなどを放出します。また、熱エネルギーや光エネルギーや電気エネルギーを加えてやらないと化学変化が起こらないこともあります。物質の化学変化においてはその自由エネルギーは変化しますが、同時に余った一部のエネルギーは熱エネルギー、光エネルギー、電気エネルギーあるいは運動エネルギーとして放出されます。このように余ったエネルギーを放出するような発熱反応は自動的に容易に進行してゆきます。

石炭や石油が燃焼するときに多量の光エネルギーと熱エネルギーを放出しますが、このとき石油や石炭の炭化水素は二酸化炭素と水まで一気に酸化してしまいます。この燃焼という化学変化は少量の物質が酸化して発生する熱エネルギーにより、近くにある他の物質の酸化反応を引き起こして行く連鎖的な反応です。石油や石炭の燃焼反応でなくても、炭素を中心元素とする物質は酸化するときに同じようにエネルギーを放出します。これとは反対に多くの物質の還元反応では、熱エネルギーや光エネルギーや電気エネルギーを加えてやらなければ進行しません。

鉄やアルミニウムやナトリウムなどの金属も同じように発熱しながら金属酸化物に酸化されて行きます。種々の金属の酸化反応で発生するエネルギーを表 3 - 2 に抜粋しておきました。この表で分かるように、金以外の全ての金属が酸化されるときに生成熱を放出して酸化物を生成します。このことは地球上のほとんど全ての金属元素が次第に酸化物に風化して行くことを意味しています。また、広く地殻中に散在している金属酸化物を精錬して純粋の金属にするためには、エントロピー的に金属酸化物を集めて純粋にしてゆくばかりでなく、エンタルピー的にも多くのエネルギーを要することを意味しています。

表 3 - 2 金属酸化物の生成熱 (kcal/mol)

原料		生成物	生成熱	原料		生成物	生成熱
Na	O ₂	Na ₂ O	100.7	Ni	O ₂	NiO	58.4
K	O ₂	K ₂ O	86.8	Cu	O ₂	CuO	33.0
Mg	O ₂	MgO	145.8	Cu	O ₂	Cu ₂ O	43.0
Ca	O ₂	CaO	152.1	Cu	S	CuS	11.6
Al	O ₂	Al ₂ O ₃	380.8	Ag	O ₂	Ag ₂ O	7.0
U	O ₂	UO ₂	269.7	Ag	S	Ag ₂ S	7.6
Si	O ₂	SiO ₂	208.3	Au	O ₂	Au ₂ O ₂	-12.3
Cr	O ₂	Cr ₂ O ₃	288.9	Zn	O ₂	ZnO	83.3
Cr	O ₂	CrO ₂	147.9	Hg	O ₂	Hg ₂ O	22.2
Mn	O ₂	MnO	96.7	Hg	O ₂	HgO	21.5
Mn	O ₂	MnO ₂	123.0	Hg	S	HgS	10.9
Mn	S	MnS	44.6	Sn	O ₂	SnO	66.0
Fe	O ₂	FeO	64.6	Sn	O ₂	SnO ₂	137.4
Fe	O ₂	Fe ₂ O ₃	195.2	Sn	S	SnS	18.5
Fe	O ₂	Fe ₃ O ₄	266.8	Pb	O ₂	PbO	52.4
Fe	S	FeS	23.1	Pb	O ₂	Pb ₂ O	64.0
Co	O ₂	CoO	57.5	Pb	S	PbS	22.4

足尾鉍毒事件

1 万年ほど以前に人類が始めて金属の精錬に成功した銅は、かなりの硬度を持ち成型し易く

腐食し難いため、道具や武器の材料として極めて優れていました。そこで金属の銅を中心とする文明が世界各地に開けてきましたが、その後鉄器文明の発展とともに銅器の重要性は若干減少しました。金属の銅が比較的錆びにくく、高い電気伝導性と熱伝導性を持ち、圧延や鋳造も容易なため、人類は電気器具や鍋や硬貨など多くの製品にその優れた性質を利用しています。

栃木県の足尾銅山は17世紀初頭から銅を産出してきた日本有数の銅鉱山で、1973年に閉山するまで



図3-1 足尾地方の地図

黄銅鉱 (CuFeS_2) が掘り出されていました。ここで掘り出された黄銅鉱は石炭と燃焼炉で加熱することにより粗銅とした後に、電気分解を行って純銅に精錬していました。この粗銅まで純度を上げる工程で多量の二酸化硫黄が排出され、足尾の周辺の草木が完全に枯死してしまいました。さらに、銅やカドミウムを含む鉱毒が図 3 - 1 に示すように下流の渡良瀬川流域の漁業や農業に多大の被害をもたらしてしまいました。足尾銅山から排出される有害物質の被害について、1901年に栃木県佐野市に住む田中正造が天皇に直訴状を手渡すという当時としては極めて異例の行動をとりました。この田中正造の行為は足尾鉱毒事件として日本中に波紋を広げた最初の公害問題の事件となりました。

表 3 - 1 および表 3 - 2 に示す酸化還元電位や生成熱から分かるように、比較的僅かなエネルギーを消費するだけで、酸化銅や硫化銅から容易に還元して銅の金属に精錬することが出来ます。現在の銅の精錬は硫化銅あるいは酸化銅を主体とする銅鉱石から燃焼炉で石炭と加熱して粗銅を作りますが、複成する二酸化硫黄が生物に対して有毒であるために、その排出をすることなく処理する必要があります。さらにこの粗銅の電気分解により純銅を生産していますが、エネルギーの損失が全くないと仮定しても純銅を生産するためには、1kg 当たり 840 アンペアの電流を 1 時間通電するほどの電気量を必要とします。ちなみに、家庭で使われている 100 ワットの電灯の 1 時間に消費する電気量が電流 1 アンペアの 1 時間の通電に相当します。このように二酸化硫黄の処理のための労力と多量のエネルギーを費やして生産された金属の銅ですから、不要になった銅製品であっても金属銅を回収することなく廃棄することは人類の非常な贅沢と思われる。

金属を使い捨てる贅沢

地上に多く分布しているカンラン岩系の岩石が 9.4%、石灰岩がその重量の 0.4% ほど鉄を含むなど、鉄は地殻を構成する元素のうちで 4 番目に多く存在していますが、純粋の鉄金属に精錬することは容易ではありません。何処にでもある岩石ではなく比較的鉄の含有率の高い鉱石を探し出し、掘り出します。広い地球上でもブラジル連邦共和国のミナス地方のように含有率

の高い鉱石は局在していますから、効率よく鉄鉱石を掘り出すことには経済的な利害が生じ、戦争の原因になることさえあります。含有率の高い鉄鉱石を集めてきて、純度を高めることはエントロピー的に多くのエネルギーを必要とします。

地殻中では鉄はほとんど酸化物あるいは硫化物として存在していますから、エンタルピー的に多量のエネルギーを加えなければ鉄の金属に還元することは出来ません。純粋の酸化鉄を還元して鉄 1kg を生産するために 1740 kcal のエネルギーを必要とします。実際に製鉄工場では、高温の溶鉱炉で鉄鉱石を炭素と加熱して還元し、高い純度まで鉄の金属に濃縮します。さらに、電気炉などで多量のエネルギーを使って純粋にしてゆきます。このように低い純度に拡散している鉄の酸化物から純粋な形の金属まで集めるためには、エントロピー的にもエンタルピー的にも多量のエネルギーを必要とします。

一方、純粋な形の鉄は刃物や釘や自動車やそのほか多くの物に加工されて広く社会に利用されますが、利用価値がなくなると最後にはほとんど全てゴミとして捨てられ、自然に錆びて酸化鉄として土に拡散して戻ってゆきます。純粋な形の鉄の金属はエンタルピー、エントロピーの何れの点でも高い化学エネルギーを蓄えています。ゴミとなり酸化されて土の中に拡散することによりそれらの化学エネルギーは放出されてしまいます。言い換えれば純粋な鉄の金属をゴミとして捨てることは多量の化学エネルギーの浪費をしていることになり、これも人類の贅沢です。

鉄のほかにも近年多くの種類の金属が人類の生活の中で用いられていますが、その中で代表的な金属アルミニウムと金属けい素についても考えて見ましょう。金属アルミニウムは電気伝導性と圧延性に富み、比重が小さく大きな引っ張り強さを示すため、建築材料や電気部品から家庭用の金属箔や飲み物の容器となるアルミ缶に至るまで種々の製品に用いられています。また、金属けい素は電氣的に半導体の性質を示すために、極めて重要な素材として IC 部品や太陽電池に用いられています。鉄と同じように地殻中に多量に存在する酸化アルミニウムと酸化けい素から金属アルミニウムと金属けい素まで還元するために、1kg 当たりそれぞれ 4700 kcal および 7440 kcal のエネルギーを必要とします。ちなみに、石油 1L を燃焼したときに発生するエネルギーは 9400kcal ですから、エネルギーの損失が精錬の工程で全く無いと考えても、金属アルミニウムおよび金属けい素を 1kg 精錬するためには石油をそれぞれ 0.5L および 0.8L 必要とします。実際の火力発電の効率や電気分解による精錬の熱効率を考慮すると、純粋な原料酸化物からこれらの金属を 1kg 精錬するためには 5~10L の石油を消費すると思われる。このように金属アルミニウムも金属けい素も鉄に比べて格段に還元し難く、多量のエネルギーを必要としています。しかも、これらの金属は不純の状態では良好な性質を示さず、高い純度が要求されますから、その精錬には鉄とは比較にならないほどの技術とエネルギーを必要とします。このように高価な金属を用いた製品も、利用価値がなくなればほとんど回収することなく廃棄されており、見過ごすことの出来ない人類の贅沢ではないでしょうか。

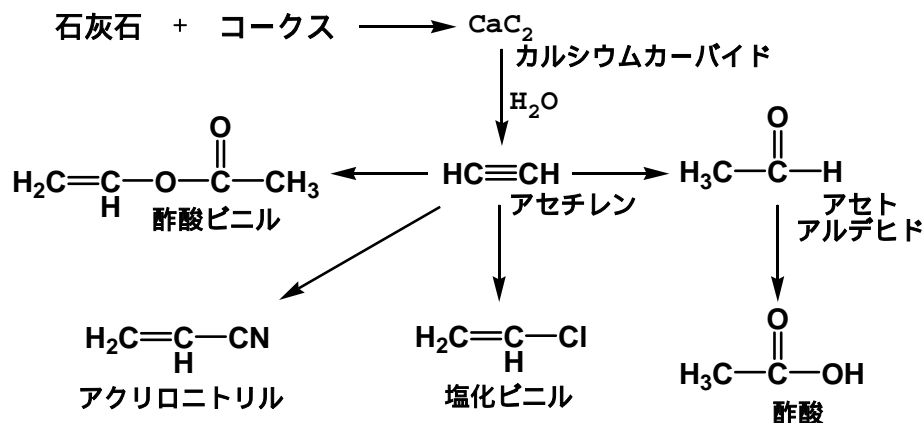
さらに、非常に類似した性質を持つ金属元素では、鉱石の中にそれらの類似元素がしばしば共存します。亜鉛は乾電池や亜鉛引き鉄板(トタン板)や真鍮(黄銅)、洋銀(ジャーマンシルバー)、マンガン青銅などの種々の銅亜鉛合金など多くの用途を持つ金属ですが、カドミウムという元素が類似しているために鉱石中に混在します。亜鉛の精錬の際にカドミウムを分離して取り除かなければなりません。カドミウムはイタイイタイ病の原因になる人類にとっては極めて強

い毒性を示す元素ですから、全く遺漏なく回収し廃棄するためには多量のエネルギーと高い技術を必要とします。このように精錬における廃棄物の処理の困難な金属を用いた製品も、利用価値がなくなればほとんど回収することなく廃棄されており、見過ごすことの出来ない人類の贅沢ではないでしょうか。

金属の鉄やアルミニウムやけい素や亜鉛に限らず、ディーゼルエンジンの排気ガスをきれいにする白金触媒、乾電池に使われているリチウムやニッケル、電子部品に広く用いられている存在量の少ない各種の金属もゴミとして土の中に拡散していきます。このような化学エネルギーを蓄えた物質の廃棄は、必要以上の消費として人類の贅沢と考えられます。さらに、蛍光灯に使われている水銀は高い化学エネルギーを蓄えているばかりでなく、強い毒性を示しますから、ゴミとして拡散してゆけばエネルギーの浪費ばかりでなく毒物による地球の汚染にも繋がります。

プラスチックを使い捨てる贅沢

1950年代に第2次世界大戦から復興するに当たり、日本には石油資源はほとんどなく、国内で自給できる天然資源は石炭と石灰石だけでした。そのため、その両者を高温で加熱して製造できるカルシウムカーバイドは極めて有望な有機物質の原料とされていました。カルシウムカーバイドは式3-1に示すように水と反応してアセチレンを容易に生成します。アセチレンが多く有機化合物に変換できる極めて反応性に富んだ工業原料であることをドイツ人のレップの命懸けの研究により明らかにしていました。例えば、アセチレンは水と反応するとアセトアルデヒドを生成しますが、続く酸化により酢酸を合成できます。アセチレンは塩化水素と反応すれば塩化ビニルを、酢酸と反応すれば酢酸ビニルを、さらに、シアン化水素と反応すればアクリロニトリルを容易に生成します。このようにして容易に合成できるアセトアルデヒド、酢酸、塩化ビニル、酢酸ビニル、アクリロニトリルなどは何れもプラスチックや工業薬品の原料として極めて重要な物質ですから、このカルシウムカーバイドからアセチレンを経る化学工業は脚光を浴び希望に満ちた工業でした。



式3-1 アセチレンの化学反応

一般に、化学反応は化学式で表すことのできる主反応のほか、実際には多くの副反応が起こります。アセチレンと各種の化合物との反応には塩化水銀や硫酸水銀などの水銀化合物が有効な触媒として働きますから、アセチレン工業では盛んに水銀化合物が用いられました。しか

し、この希望に満ちた化学工業においても、ジメチル水銀やジエチル水銀の生ずる副反応が起こります。化学工業はより大きな収益を追求し経費を削減するために、これらの有機水銀化合物は回収されることなく廃液として海に捨てられていました。水銀化合物は海水に溶けて拡散してゆきましたが、アサリやハマグリなどの貝類には水銀が残留し蓄積する傾向がありました。熊本県水俣にアセチレンを原料とする日本で最も大きな化学工場がありましたが、その近くには漁民が住んでおり、毎日のように魚介類を食べて生活していました。その人たちの体内に水銀が蓄積して、水俣病と呼ばれる中毒症が発症したのです。

この中毒症患者に対する責任問題で長い年月にわたり公害訴訟が続き、結局、化学工場が全面的に責任を負うことになりました。中毒症患者に対する保障と水銀化合物の完全な回収のために、多額の経費が必要になり、アセチレンを原料とする希望に満ちた化学工業は最も悲惨な最期を迎えてしまいました。同時に多少生産経費は多くなりましたが、酢酸や塩化ビニルや酢酸ビニルやアクリロニトリルなどの工業薬品を石油から製造する方法が開発されました。このように多くの社会問題を経験し、多くの犠牲の上に、現在の石油化学工業は成り立っています。プラスチックや化学工業製品を浪費することは単なる贅沢だけでなく犠牲者のことを考えなければなりません。

4. 二酸化炭素を出す贅沢

金星、火星の大気は二酸化炭素

テニスのボールが飛んできて身体にぶつかると力を受けて痛みを感じます。同じように、質量を持った分子が気体の状態になって自由に動き回り、壁に衝突すると壁は何がしかの力を受けます。これを圧力といいます。地球の大気が地球の表面に衝突するときに生まれる圧力を大気圧といい、海拔 0m では 1cm^2 に約 1kg となります。気体の衝突で受ける力は分子の数が少なければ少なく、分子の数が多ければ受ける力も大きくなります。言い換えれば、圧力は自由に動き回る気体の分子の密度に比例するという事です。密度がある一定の体積中の分子の数を意味していることから、気体の圧力はその体積に反比例し、気体の分子の数に比例します。

また、ゆっくりしたテニスのボールにぶつかってもあまり痛くありませんが、強烈なスマッシュのボールにぶつかると痣が出来るほど痛いものです。物質の衝突で生まれる力はその物質の速度が速ければ速いほど大きくなります。温度が高くなって分子の運動が激しくなると、壁に衝突する数も増加しますが同時に分子の速度も大きくなります。結果として温度が高くなれば気体の圧力が高くなります。体積 V の器の中に N 個の分子の気体を入れると、温度 T のときに、器の中の気体の圧力 p は温度と分子の数に比例し器の体積に反比例します。比例定数を R とすれば式 4 - 1 のような関係式で表すことができ、これを理想気体の状態方程式と呼んでいます。

$$pV = NRT \quad \text{式 4 - 1}$$

この関係式は理論的には自由に動き回る分子同士の相互作用が全くない理想的な気体に対する関係式ですが、現実には存在する水素やヘリウムや窒素や酸素などあらゆる気体の関係を比較的に良く表していますから、実際の化学の研究に便利に用いられています。

テニスのボールがぶつかる場合に比べて、同じ速さのサッカーのボールがぶつかる場合ははるかに痛く感じるでしょう。つまり、物質の質量が重ければ重いほど物質の衝突で生まれる力は大きくなります。それにもかかわらず、式 4 - 1 が質量の違う水素の場合にも酸素の場合にも成り立ちます。このことは気体の持つ運動エネルギーが気体の種類に影響されず、重い気体はその分子の運動速度が遅く、軽い気体は運動速度が速いことを意味しています。このような気体分子の運動の速度と分子の質量 m の関係は式 4 - 2 で表すことができます。

$$v = \sqrt{\frac{3RT}{Nm}} \quad \text{式 4 - 2}$$

気体のうちで最も軽い水素分子の質量を 2 とすると、代表的な気体のヘリウムは 4、アンモニアは 17、水は 18、ネオンは 20、窒素と一酸化炭素は 28、酸素は 32、アルゴンは 40、二酸化炭素は 44、二酸化硫黄は 64、塩素は 71 ですから、水素とヘリウムはずば抜けて軽い分子で、水、アンモニア、ネオンがこれらに続きます。このため、水素とヘリウムの分子は極めて早く分子運動をしています。

太陽系には 10 個の惑星が太陽を中心に公転しており、我々の地球は内から 3 番目の軌道を公転しています。この 10 個の惑星のうち、最も外側の軌道を公転している惑星は近年その存在を公表されたばかりで、その真偽のほどは確かではありません。次の 9 番目の冥王星は体積が極端に小さく非常に遠距離のため余り性質がはっきりしていません。表 4 - 1 に示すように、地球に近い水星と金星と火星は大きさも密度も地球と類似していますが、それらの外側に公転している木星と土星と天王星と海王星の 4 つの惑星は体積が大きく、太陽と同じようになり小さな密度を持っています。このことから、内側の軌道を公転している水星と金星と地球と火星の 4 個の惑星は、45 億年前に同じように誕生したものと考えられます。これらの惑星に対して、外側の軌道を公転している木星と土星と天王星と海王星の 4 個の惑星は別の経過で誕生したものと考えられます。マリナー 2 号が金星に接近して以来、ベネラ 7 号、ベネラ 14 号などの宇宙船が金星に軟着陸して、金星表面の大気および地表の岩石の情報を送信してきました。また、1975 年にパイキング 1 号・2 号が火星への軟着陸に成功しましたが、近年になって米航空宇宙局(NASA)の無人探査機『スピリット』と『オポチュニティー』が火星着陸に成功し、水の湖の痕跡を始め火星表面の多くの情報が送信されてきています。現在までに得られた情報を総合すると、金星、地球、火星、小惑星などの地殻の元素組成はほとんど類似しているようです。金星、地球、火星、小惑星などのようなすでに冷えて固まった天体の平均の元素組成は地球の地殻の元素組成と同じと考えてよいでしょう。当然、内側の惑星と外側の惑星はそれぞれ類似した大気を持っていたものと考えられます。

地球を含む内側の 4 個の惑星は外側の惑星に比べて小さな質量しか持っていないから、万有引力も当然弱くなります。物質が表 4 - 1 の脱出速度を上回る速度で運動するとき、その惑星の引力を振り切って飛び出すことができます。気体分子の運動の速度は大気中でも式 4 - 2 の

表 4 - 1 太陽系の惑星の形

	半径 (km)	体積 (地球=1)	質量 (地球=1)	密度 (g/cm ³)	脱出速度 (km/s)	太陽エネルギー (地球=1)
太陽	696000	1304000.000	332946.000	1.41	617.50	
水星	2439	0.056	0.055	5.43	4.25	6.6700
金星	6052	0.857	0.815	5.24	10.36	1.9100
地球	6378	1.000	1.000	5.52	11.18	1.0000
火星	3397	0.151	0.107	3.93	5.02	0.4300
木星	71398	1316.000	317.832	1.33	59.57	0.0370
土星	60000	745.000	95.160	0.70	35.56	0.0110
天王星	25560	63.000	14.540	1.27	21.29	0.0027
海王星	24760	58.000	17.150	1.64	23.49	0.0011
冥王星	1142	0.006	0.002	2.07	1.23	0.0006
月	1738	0.029	0.012	3.34	2.38	1.0000

ように表すことができますから、軽い気体分子は速い速度で運動しますし、気温が高くなれば早く運動するようになります。分子運動の速度が惑星の脱出速度を超えときには、その気体は惑星の引力圏から散逸してしまいます。水星や冥王星のように脱出速度の小さな惑星では大気を保持することはほとんど出来ません。外側を公転している木星などの大きな4個の惑星では脱出速度が大きいため、最も軽い水素分子でも散逸できませんから、表4-2に示すように、大気の成分は45億年の間にほとんど変化せず、水素が主成分のままできると考えられます。これに対して、金星と火星では脱出速度があまり大きくありませんから、45億年の間に大気中から水素やヘリウムのような軽い分子は散逸してしまい、質量の重い二酸化炭素が主成分になってしまいました。

表4-2 太陽系惑星の大気の成分(%)

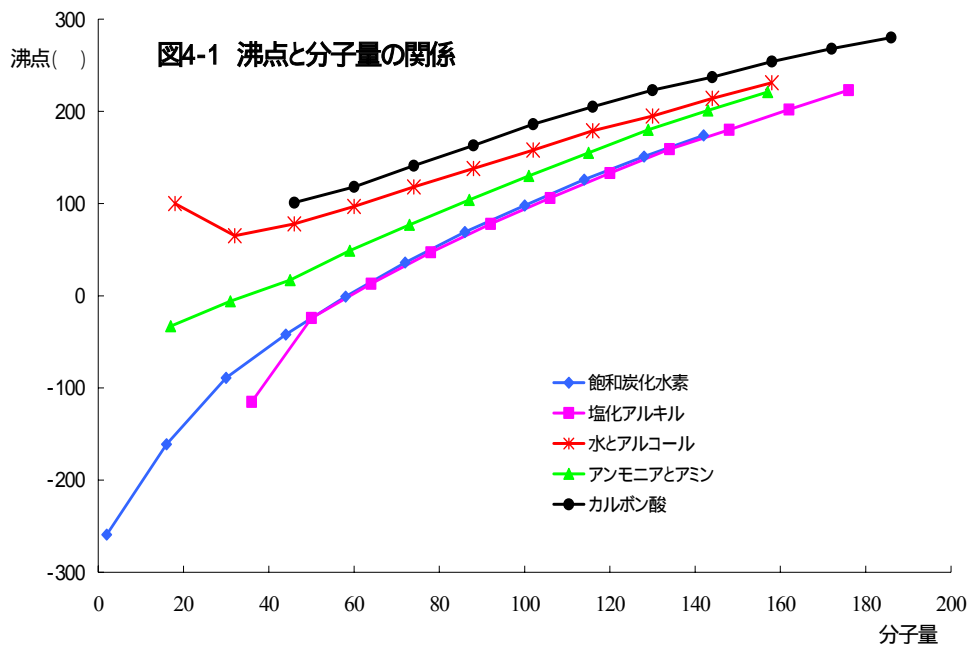
気体名	分子式	質量	金星	地球	火星	木星	土星	天王星
水素	H ₂	2				89	96	85
ヘリウム	He	4				11	4	15
ネオン	Ne	20	4.4x10 ⁻⁴	1.8x10 ⁻³	2.5x10 ⁻⁴			
アルゴン	Ar	40	1.9x10 ⁻³	9.3x10 ⁻¹	1.6			
窒素	N ₂	28	3.4	78	2.7			
酸素	O ₂	32	6.9x10 ⁻³	21	1.3x10 ⁻¹			
二酸化炭素	CO ₂	44	96	3.2x10 ⁻²	95			
二酸化硫黄	SO ₂	64	1.9x10 ⁻²					
水	H ₂ O	18	1.4x10 ⁻¹	2.8	3x10 ⁻²	1x10 ⁻⁴		
一酸化炭素	CO	28	4x10 ⁻⁵	1.2x10 ⁻⁵	7x10 ⁻²	1x10 ⁻⁷		
オゾン	O ₃	48			3x10 ⁻⁶			
メタン	CH ₄	16				2x10 ⁻¹	5x10 ⁻¹	6x10 ⁻¹
アンモニア	NH ₃	17				2x10 ⁻²	2x10 ⁻²	
アセチレン	C ₂ H ₂	26				1.0x10 ⁻⁵	3x10 ⁻⁵	2x10 ⁻²
エタン	C ₂ H ₆	30				5.5x10 ⁻⁴	7.0x10 ⁻⁴	
りん化水素	PH ₃	33				1x10 ⁻⁴	1x10 ⁻⁴	
大気圧(atom)			90	1	0.006			

地球は水の惑星

惑星の大きさや質量や比重などの点で、地球が金星や火星と極めて類似していることから、誕生当時の地球の大気は金星や火星の大気と類似していたものと思われます。にもかかわらず、太陽系の惑星の大気の組成表から金星と火星の二酸化炭素の割合が非常に高く、その間に挟まった地球の大気だけに二酸化炭素の割合が極端に低くなっています。地球の大気は主に窒素と

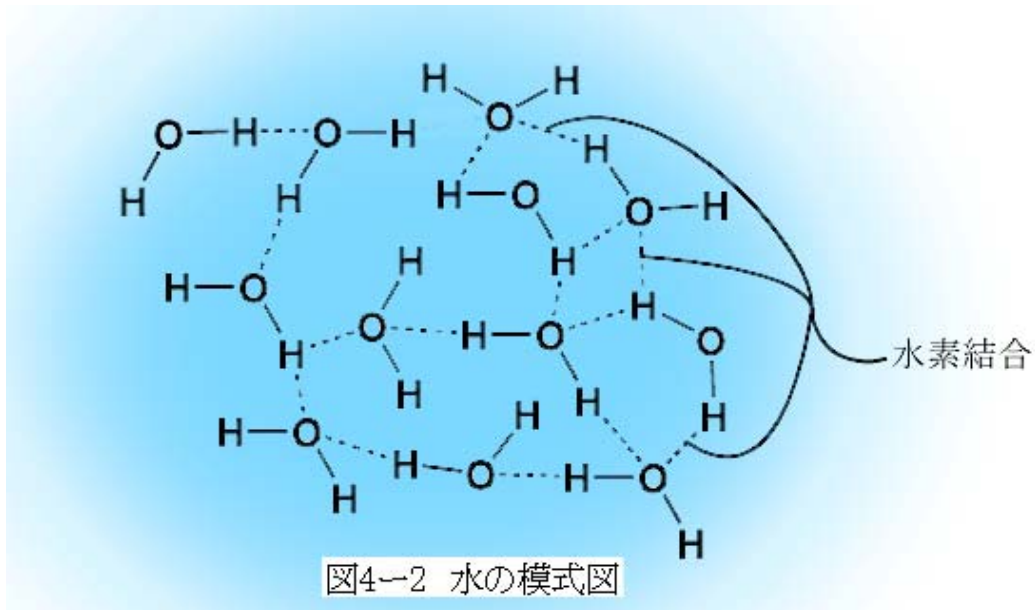
酸素で構成されており、二酸化炭素はわずかに 0.03%しか含まれていません。二酸化炭素は地球の大気を構成する気体の中では最も重い質量を持っていますから、45 億年の間に脱出速度を超えて散逸していったとは考えられません。地球の大気の成分変化は金星や火星の大気の変化とは異なった過程を経たものと考えねばなりません。

マリナー2号が金星に接近して以来、ベネラ7号、ベネラ14号、スピリット、オポチュニティーなどの無人探査機が金星や火星に着陸し、多くの情報が送信してきています。現在までに得られた情報を総合すると、火星に過去の水の痕跡が確認されたのみで、液体の水は現在ではほとんど存在していません。これに対して、大きな海が地球を覆っていますから、地球の大気が金星や火星のものとは大きく異なる成分になった原因は多量の水の存在にあると思われます。そこで、液状の水の構造から水の性質を考えて見ましょう。



水の分子は水素 2 原子が酸素 1 原子と結合して出来ている非常に簡単な構造を持っています。有機化合物のいくつかの同族系列の沸点と分子量の関係を図 4 - 1 のグラフに示しますが、一般に地球上では、分子量 100 程度の有機化合物は約 100 で沸騰します。しかし、同じように簡単な分子の構造をもつメタンやアンモニアと比較すると、分子の質量や高さの違いがほとんど無いにもかかわらず、水の融点は 0、沸点は地球上で約 100 と高温です。このような水の特異な性質は水の分子が単独の挙動を取らず、たくさんの水分子が絡み合って一塊としての挙動をとるためと考えられます。解離定数(pka) 15.7 の水は弱いながらも酸性を示す物質であり、常に水素陽イオンと水酸イオンに若干解離しています。また、水の酸素は結合していない電子対を持っていますから水素陽イオンを受け取る塩基の性質を兼ね備えています。そのため、水から解離した水素陽イオンが隣の水分子と酸塩基反応をして水分子上の水素の交換を起こします。このような水分子の水素原子が隣の水分子に結合を変更してゆく交換が瞬時に起こるため、水素原子は原子価が 1 でありながら、あたかも水素原子が 2 つの酸素原子に結合しているような性質を示します。このような結合を水素結合といい、水素原子の上に多少正電荷を帯びた状態となっており、水の場合にはこの水素結合の強さは約 6kcal/mol と見積もられています。

模式的に考えれば、液状の水は図 4 - 2 に示すように、水の分子が水素結合により 3 次元の網目状に絡まった構造をとっていると思われます。液状の物質から気体分子として飛び出す状態を沸騰といますが、水の場合には水素結合で絡み合っているために飛び出し難くなってしまい、結果的に沸騰し難くなって高い沸点を示すこととなります。また、液状の分子が整列して分子間の運動が止まることを凝固といますが、液状の水は分子が絡まっているために整列し難くなり高い凝固点を示す現象が現れます。しかも、この水素結合が固体から液体、液体から気体への状態の変化において、大きな融解熱および気化熱を必要とする原因にもなっています。



金星は地球より太陽に近いために、地球の 2 倍近い光エネルギーを受け続けています。そのため気温が水の沸点より高くなり、水は液体で存在できません。また、火星は脱出速度が小さいために大気を多く保持できず大気圧が低くなりますから、金星と同じように火星でも液体の水は存在できません。さらに、水蒸気は質量が小さいために比較的速い分子運動の速度を持っていますから、ほとんど水は金星と火星から散逸してしまいました。これに対して、地球は温暖な気候を持っているため、水は液体の状態ですべて存在しました。しかも、水は強い水素結合で絡み合っているため気化しにくく、水は地球からほとんど散逸しませんでした。結果的に 45 億年の間に太陽系の中で地球だけが、水の惑星になってしまいました。

火成岩から溶け出した海の塩

一般に、物質が溶媒に溶ける現象は溶質の溶ける前後における平衡の変化ですから、その平衡定数 K の値が物質の溶け易さを意味します。2 つの系間のエンタルピー変化を H 、エントロピー変化を S 、その系の絶対温度を T 、気体定数を R とするとき、平衡定数 K とエネルギー変化の関係は式 4 - 3 で表すことができます。物質が溶媒の液体の中に入り込んで拡散するときには、物質のエントロピー変化が増大して安定化するため物質は溶媒に溶けてゆきます。エントロピー変化は温度に依存する量ですから、アイスコーヒーに砂糖を溶かすことが難しく、しばしば液状のシロップを用意しますが、温度が高くなれば、安定化が大きくなりますから溶解度は大きくなります。当然、ホットコーヒーには砂糖を入れても簡単に溶けてくれます。表 4 - 3 には代表的ないくつかの物質の水に対する溶解度の温度変化を纏めておきます。

$$K = \chi e^{\frac{\Delta H - T\Delta S}{RT}}$$

式 4 - 3

しかし、液状の水は水素結合により、水分子が絡み合っ一塊としての挙動をとると考えられますので、その 3 次元の網目の中に物質が入り込み拡散するためには、網目の隙間を見つけて入り込むか水素結合を切って入り込まなくてはなりません。3 次元的水素結合の網目を切れば、水の安定化を

表 4 - 3 水に対する溶解度

	0	20	40	60	80	100
NaCl	35.7	36.0	36.6	37.3	38.4	39.8
NaHCO ₃	6.9	9.6	12.7	16.4		
カリ明礬	3.0	6.0	13.6	35.3		154.0
グリシン	141.8	225.2	331.6	452.6		671.7
コハク酸	2.8	6.9	16.2	35.8	70.8	120.9
ブドウ糖	9.2	20.6	43.3	78.3	125.0	185.0
尿素	40.0	51.9	62.3	71.8		88.0

犠牲にしなければなりませんから、エンタルピー変化が増大してしまいます。当然、エントロピーの増大による安定化はあるものの、Kの値は小さくなり物質が溶けにくくなります。物質が非常に小さな分子で出来ている場合には、その分子は網目の隙間に入り込める可能性があると考えられます。そのような場合には、水素結合によるエネルギーの安定化を犠牲にすることなく、エントロピーの増大による安定化があるものと思われるから水に溶け込んでゆくと思われれます。小さな元素の水素やヘリウムで出来た水素やヘリウムの分子は最も小さな分子と考えられますが、そのような小さな分子でも水に対してほとんど溶けませんから、如何なる分子を取り込むためにも水の水素結合の隙間は十分な大きさを持っていないことになり、水素結合の網目を切ることなく物質が水の中に入り込むことは出来ないことになります。

液状の水では水素結合により、水分子が絡み合っ一塊としての挙動をとると考えられますので、その 3 次元の網目の中にほかの物質が入り込むためには、水素結合を切らねばなりません。当然、エントロピーの増大による安定化はあるものの、水素結合によるエネルギーの安定化を犠牲にしなければなりません。水素結合が本質的に酸からの解離による水素陽イオンの供給と受け取る塩基との間の水素陽イオンの遣り取りにより、酸の水素原子が塩基分子に結合を瞬時にしてゆく交換反応であるため、塩基として働くことの出来る 1 対の電子を持つ分子は水と水素結合をすることが出来、安定化して水に溶けるようになります。

また、液状の水は水素結合をしているために、水を構成している水素原子は若干ながら正電荷を帯び、酸素原子は同じく僅かに負電荷を帯びています。一方、イオン結合性の物質は水の中で陽イオンと陰イオンに解離し、両イオンはそれぞれ電荷を帯びます。この電荷を帯びたイオンが正負に若干電荷を帯びた網目の中に入り込んでも、そのイオンの電荷が適当に分散できるように安定化し、水素結合を切ることによるエネルギーの損失を打ち消します。このため、

表 4 - 4 イオン性の物質の水に対する溶解度(g/100g)

	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	OH ⁻	CN ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	HPO ₄ ²⁻	S ²⁻	SO ₄ ²⁻
Na ⁺	36	47.5	88	63.5	37	21.5	9.6	7.7	15.8	19.8
K ⁺	34	65.2	31.6	112	71.5	52.5	24.9	159		107
Mg ²⁺	54.5	96.5	42.1							26.2
Ca ²⁺	74.5	143	56.39	0.17		3.5x10 ⁻³	0.17	2.0x10 ⁻²		0.208
Ba ²⁺	35.7	104	9.2	3.89		2.2x10 ⁻³				2.0x10 ⁻²
Al ³⁺	47.3		73	9x10 ⁻⁴						26.7
Fe ²⁺	37.6	53.5	45.6	7x10 ⁻⁶					7.0x10 ⁻⁵	26.5
Fe ³⁺	91.9		46.6							
Co ²⁺	34.6		50	3.2x10 ⁻⁴	4.2x10 ⁻³				3.8x10 ⁻⁴	26.5
Ni ²⁺	39.6	56.7	48.5	1.3x10 ⁻³		9.3x10 ⁻³				37.8
Cu ²⁺	41.5	55.9	55.58	3.0x10 ⁻⁵					3.3x10 ⁻⁵	20.7
Zn ²⁺	367	81.7	117.5	4.2x10 ⁻⁴	4.9x10 ⁻⁵					53.8

電荷を帯びたイオンは水の中でその電荷を分散することが出来るために、安定化し水に溶けません。

金属元素を含む物質は多くの場合にイオンになりやすく、水の中にイオンとして溶けてゆきます。しかし、金属イオンとその相手となる陰イオンの性質により、表 4 - 4 に示すように水に対する溶け易さは異なります。一般に、金属イオンと硝酸あるいは塩酸で生成する硝酸塩や塩酸塩は非常によく水に溶けますが、硫酸やりん酸や炭酸の塩類はあまり溶けません。また、ほとんどのカリウム(K)、ナトリウム(Na)などのアルカリ金属の塩類はよく水に溶けますが、マグネシウム(Mg)やカルシウム(Ca)やバリウム(Ba)などのアルカリ土類金属の塩は若干溶解性が悪くなります。さらに、鉄(Fe)やアルミニウム(Al)の塩類はかなり溶け難くなり、酸化アルミニウムや酸化ケイ素はイオン性が少ないためほとんど水に溶けません。

地球の誕生からまもなく固化して地殻が出来上がりましたが、その後も内部に液状で残ったマグマが世界各地の火山から噴出してきます。本来の地球の成分が固化してできた岩石は火成岩と呼ばれ、表 4 - 5 に示すような成分を含んでいます。この火成岩は機械的風化により礫や砂に破碎され、土にまで微細化されて、水に流されて移動してゆきますが、そのとき、水に溶け易いナトリウムやカリウムやマグネシウムやカルシウムの塩類は水に洗い流されてゆき、酸化ケイ素や酸化アルミニウムなどを多く含む砂礫は水に溶けずに残って層をなして積み、種々の変性を受けて堆積岩に固化してゆきます。このように火成岩は次第に堆積岩に変化してゆきますが、そのときに水によく溶ける成分が流出してしまうため、若干岩石の組成が変化します。また、溶け出したイオンは海に流れ込み、世界中の海はナトリウムやカリウムやマグネシウムやカルシウムのイオンを多く含む塩辛くなってしまうました。火成岩と堆積岩の成分比の違いを、このように各成分の水に対する溶解度を基に合理的に解釈できましたが、例外的に

酸化カルシウムと二酸化炭素の増加だけは水に対する溶解性では説明できません。

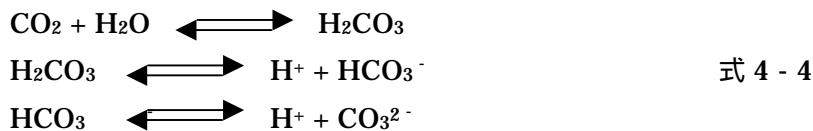
二酸化炭素は大気中から石灰石へ

大きな海が地球を覆っていますから、地球の大気が金星や火星のものと大きく異なる成分になった原因は多量の水の存在にあると思われます。そこで、地球に大量にある液体の水が大気を構成する気体に対してどのように影響するか調べて見ましょう。水はほとんど全ての気体を溶かしますが、その溶け易さは表 4 - 6 に示すように種類により大きく異なります。現在の地球の大気の成分のうちで、アンモニアや硫化水素や二酸化硫黄は極めてよく溶けます。酸素は窒素よりも若干多く溶けますが、それでも 1 L の水に 0.003 L しか溶けません。これに対して、二酸化炭素は酸素の 30 倍に相当する 0.086 L 溶けますから、かなり良く溶ける気体と考えることが出来ます。

水に溶けた二酸化炭素は式 4 - 4 のように水と反応して炭酸となり、水素イオン、炭酸水素イオン、炭酸イオンに一部解離して酸性を示します。表 4 - 6 で分かるように、圧力を高くすると水に大量の二酸化炭素を溶かし込むことができ、炭酸の濃度が高くなります。この反応は完全な可逆平衡反応ですから、溶け込む二酸化炭素が減少すれば、炭酸の濃度は低くなり、炭酸の濃度が高くなれば二酸化炭素として水から発砲して行きます。ビールやシャンパンのような発泡酒は高い圧力で二酸化炭素を溶かし込んで高い濃度の炭酸としてありますから、栓を開けて圧力を下げると一気に泡を出して気体になり二酸化炭素が逃げてゆきます。しかし、栓を開けて数時間を経過したビールでも僅かづつは発砲を続けることから分かるように、この可逆反応はゆっくりした変化で、平衡に達するまでに時間がかかります。

表 4 - 5 地殻中の主な化合物組成 (%)

		火成岩	堆積岩	全地殻
酸化けい素	SiO ₂	59.12	57.95	58.87
二酸化チタン	TiO ₂	1.05	0.57	0.95
酸化アルミニウム	Al ₂ O ₃	15.34	13.39	14.92
酸化第二鉄	Fe ₂ O ₃	3.08	3.47	3.16
酸化第一鉄	FeO	3.80	2.08	3.43
酸化マンガン	MnO	0.12	0.00	0.10
酸化マグネシウム	MgO	3.49	2.65	3.31
酸化カルシウム	CaO	5.08	5.89	5.26
酸化ナトリウム	Na ₂ O	3.84	1.13	3.25
酸化カリウム	K ₂ O	3.13	2.86	3.07
五酸化燐	P ₂ O ₅	0.30	0.13	0.26
水	H ₂ O	1.15	3.23	1.60
二酸化炭素	CO ₂	0.10	5.33	1.24



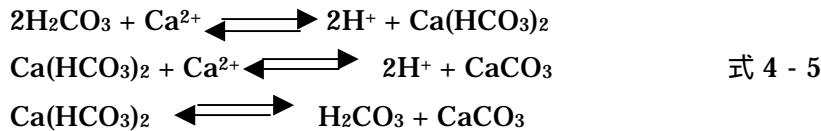
金星や火星の大気のように、生まれたての地球の大気中に多量に含まれていたと考えられる二酸化炭素は、長い年月の間に地球を覆う多量の水に溶けて炭酸になってゆき、大気中の二酸化炭素濃度が減少していったと考えることができます。しかし、大気中の二酸化炭素が水に吸収されたとしても、火成岩中よりも堆積岩中に増加する現象を説明できません。

表 4 - 4 に示すように、種々の金属の塩化物や硝酸塩は水によく溶けますが、炭酸水素塩は

表 4 - 6 水に対する気体の溶解度 (mg/L, 20)

気体		1 気圧	2 気圧	5 気圧	10 気圧
水素	H ₂	0.17	0.35	0.88	1.76
ヘリウム	He	0.15	0.31	0.77	1.55
アンモニア	NH ₃	526000.00			
ネオン	Ne	0.98	1.98	4.99	10.01
アセチレン	C ₂ H ₂	119.31	241.45	607.87	1218.58
窒素	N ₂	2.37	4.80	12.09	24.23
エチレン	C ₂ H ₄	15.36	31.09	78.27	156.91
酸素	O ₂	4.47	9.05	22.79	45.69
硫化水素	H ₂ S	3846.00			
アルゴン	Ar	6.39	12.92	32.54	65.22
二酸化炭素	CO ₂	168.06	340.12	856.28	1716.56
酸化窒素	NO ₂	117.11	237.00	596.68	1196.13
二酸化硫黄	SO ₂	112800.00			
クリプトン	Kr	28.80	58.29	146.74	294.17
キセノン	Xe	72.97	147.68	371.81	745.35

かなり溶け難く、炭酸塩はさらに溶解度の低いことが明らかです。特に、カルシウムイオンと炭酸が反応して生成する炭酸水素カルシウムは 0.2%しか溶けませんし、炭酸カルシウムは 0.004%しか溶けません。塩化カルシウムは水によく溶けますから、カルシウムイオンのかなり濃い溶液を調整することができます。この溶液に二酸化炭素を吹き込むと、式 4 - 4 に従い炭酸水素イオンと炭酸イオンが生成しますが、カルシウムイオンが溶液中に存在するため、式 4 - 5 の反応により水に対する溶解度の低い炭酸水素カルシウムと炭酸カルシウムが白濁して沈殿を始めます。この白濁する反応は鋭敏ですから、二酸化炭素の存在を確かめる呈色反応としてしばしば利用されています。



火成岩は機械的風化により礫や砂に破碎され、土にまで微細化されて、水に流されて移動してゆきますが、そのとき、水に溶解易いナトリウムやカリウムやマグネシウムやカルシウムの塩類は水に洗い流されてゆき、酸化ケイ素や酸化アルミニウムなどを多く含む砂礫は水に溶けずに残って層をなして積み、種々の変性を受けて堆積岩に固化してゆきます。このようにして、溶け出したイオンは海に流れ込み、世界中の海はナトリウムやカリウムやマグネシウムやカルシウムのイオンを多く含み塩辛くなってしまいました。カルシウムイオンが溶けた海に二酸化炭素が溶け込んでくれば、溶解度の低い炭酸水素カルシウムと炭酸カルシウムが沈殿します。炭酸よりカルシウムイオンが過剰に存在するときはより溶解度の低い炭酸カルシウムが沈殿しますから、炭酸の濃度が低下し、式 4 - 5 の平衡は右に偏りさらなる二酸化炭素の水に対する溶解が進みます。結果として、カルシウムイオンが海に溶けて存在する間は、海は二酸化炭素を吸収し、炭酸カルシウムを沈殿し続けます。沈殿した炭酸カルシウムは種々の変性を受けて石灰石や大理石などの堆積岩に成長します。火成岩が機械的な風化をして堆積岩に進化する間に、カルシウムイオンが二酸化炭素を吸収して、石灰石や大理石として堆積岩に進化してゆきました。この化学反応により堆積岩の平均的な成分として、酸化カルシウムと二酸化炭素が増加したことを合理的に説明できます。

大理石や石灰石の主成分である炭酸カルシウムは水に極めて溶解難い物質ですが、ごく一部炭酸イオンとカルシウムイオンに解離して水に溶けます。二酸化炭素の溶けた水溶液に炭酸カルシウムを加えると、水の中ではカルシウムイオン、炭酸イオン、炭酸水素イオン、水素イオンの 4 種のイオンが平衡状態で共存します。炭酸カルシウムより炭酸水素カルシウムの方が水に溶解やすいため、炭酸カルシウムは少しづつ水に溶解出してゆきます。すなわち、二酸化炭素が存在するときには炭酸カルシウムの溶解反応が進行します。小川は森の中を流れる間に、二酸化炭素を水の中に溶かし込み、二酸化炭素を溶かし込んだ水が大理石などの石灰石の上を流れるとき、主成分の炭酸カルシウムを溶かしてゆきます。長年の間には石灰岩の塊に大きな穴が開いてしまいます。この穴を鍾乳洞と呼んでいますが、この鍾乳洞の中には穴を開けていった川が必ず流れています。大理石の多い地中海に面した国々や山口県の秋吉台には大きな鍾乳洞が点在しています。

金星や火星の大気と同じように、生まれたての地球の大気中には二酸化炭素が多量に含まれていたと考えられます。海に覆われた地球では水を介して、この二酸化炭素は火成岩中に多量に含まれている酸化カルシウムと結合して炭酸カルシウムとして沈殿したため、長い年月の間に地球の大気中の二酸化炭素濃度が減少していったと考えることが出来ます。

生物の素材は二酸化炭素

表 2 - 5 に示す太陽系惑星の大気の組成表から金星と火星の二酸化炭素の割合が非常に高く、その間に挟まった地球の大気だけに二酸化炭素の割合が極端に低くなっています。また、地殻を構成している火成岩と堆積岩の 2 種類の岩石中に含まれる二酸化炭素を比較してみると、表 4 - 5 に示すように二酸化炭素は極端に堆積岩の中に偏在しています。本来、地殻を構成していた火成岩が風化して水に溶けたり砂のように細かく変化し、水とともに移動して別の場所に溜まり固まって堆積岩が出来てきます。この水を介した移動の間に、水に溶けている二酸化炭素が炭酸としてカルシウムイオンと反応し、炭酸カルシウムとして沈殿しました。このとき、大気中の二酸化炭素は雨などで洗われるため、次々と水に溶けて炭酸を供給しますから、カルシウムイオンがほとんど水の中になくなるまで、炭酸カルシウムが沈殿してゆきます。この沈殿が

表 4 - 7 地殻の総炭素量に対する二酸化炭素の割合

地殻の厚さ (km)	地殻の質量比	地殻の質量 (kg)	地殻中の総炭素量 (kg)	総炭素量に対する CO ₂ の割合
10	0.47%	2.82×10^{22}	5.07×10^{19}	96.58%
15	0.70%	4.23×10^{22}	7.60×10^{19}	64.44%
20	0.94%	5.63×10^{22}	1.01×10^{20}	48.37%
25	1.17%	7.03×10^{22}	1.27×10^{20}	38.72%
30	1.40%	8.43×10^{22}	1.52×10^{20}	32.29%

堆積岩として地殻の一部を構成するため、地球の大気中からは二酸化炭素が極端に減り、堆積岩中に濃縮してしまったものと考えられています。

現に、金星の大気中の二酸化炭素は 4.0×10^{20} kg と推定されていますが、地球の大気に含まれる二酸化炭素の総量はわずかに 1.8×10^{15} kg、堆積岩中に固定化されている二酸化炭素は約 1.8×10^{20} kg と見積もられています。二酸化炭素の分子量は 44、炭素の原子量は 12 ですから、二酸化炭素中の炭素の質量は大気中に 4.9×10^{14} kg、堆積岩中に 4.9×10^{19} kg と換算できます。他方、地球の地殻の厚さは陸地部で表面から 20 ~ 30 km、海中では約 10 km であり、地球の半径が 6376 km と見積もられていますから、地殻の平均的な厚さに対する地殻中の総炭素量および堆積岩中の二酸化炭素の占める割合を表 4 - 7 のように仮定してみました。多く見積もっても地殻の質量は、地球の質量 6×10^{24} kg の約 1% に当たる 6×10^{22} kg と換算でき、表 2 - 1 に示すように、炭素は地殻中に約 0.18% 含まれていますから、その総炭素量は 10.8×10^{19} kg と見積もることが出来ます。この地殻中の総炭素量の約 50% に相当する 4.9×10^{19} kg の炭素量が二酸化炭素の形で堆積岩の中に埋蔵されていることとなります。

炭酸カルシウムの形で多量に埋蔵されている二酸化炭素は化学的に平衡状態にありますから、若干量は大気中や水の中にも分布しています。多くの植物は太陽からの光エネルギーを吸収して、二酸化炭素と水を化学的に変化させてブドウ糖を生産しています。このようにブドウ糖を生産することにより太陽の光エネルギーから化学エネルギーを蓄えますが、逆反応としてブドウ糖が二酸化炭素と水に酸化されるときに蓄えられた化学エネルギーを放出します。この逆反

応で放出される化学エネルギーを植物は生命を維持する活力にします。また動物や多くの微生物は植物が蓄えた化学エネルギーを横取りして、生命を維持する活力にしています。

光合成の機構

炭酸カルシウムの形で埋蔵されている二酸化炭素が化学的に平衡状態にあり、若干量は大気中や水の中にも分布していますから、多くの植物は太陽からの光エネルギーを吸収して、二酸化炭素と水を化学的に変化させてブドウ糖を生産しています。これは式 4 - 6 に示すように、6 分子の二酸化炭素と 6 分子の水から 1 分子のブドウ糖と 6 分子の酸素を生ずる変化ですから、12 本の C = O 結合と 12 本の O - H 結合から 5 本の C - C 結合、5 本の O - H 結合、7 本の C - O 結合、7 本の C - H 結合、6 本の O = O 結合への変化と考えられます。この化学変化では多少の歪みエネルギーが加わりますから、植物は 180g のブドウ糖を生産することにより太陽の光エネルギーから 673 kcal の化学エネルギーを蓄えています。



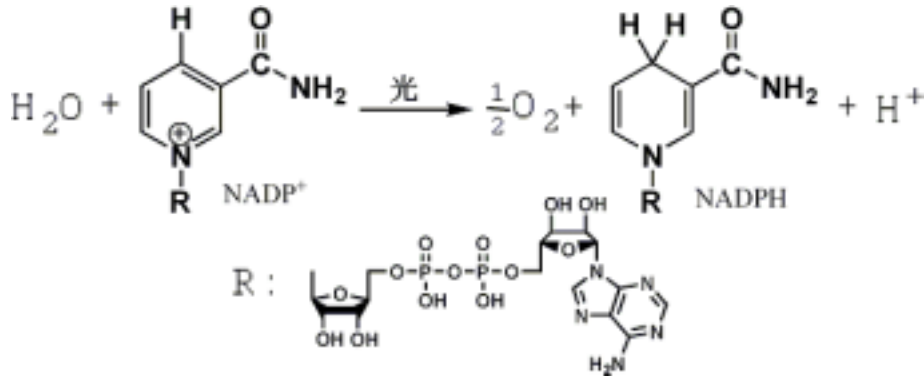
式 4 - 6 は、二酸化炭素が還元されてブドウ糖に変化し、同時に水が酸化されて酸素を生成しますが、この反応が完結するために 673 kcal のエネルギーを必要とすることを意味しています。しかし、反応するために 6 分子の二酸化炭素と 6 分子の水の分子が同時に衝突する可能性は全くありませんから、この反応は多段階の反応を複雑に組み合わせ、小さなエネルギーの積み重ねにより成り立っています。水を酸化して酸素を発生させる反応は試験管の中では熱エネルギーや電気エネルギーで進行しますが、かなり過激な条件を必要とします。植物の組織にとってはこの過激な条件は余り適しませんので、植物の中では主に光エネルギーで進行します。

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

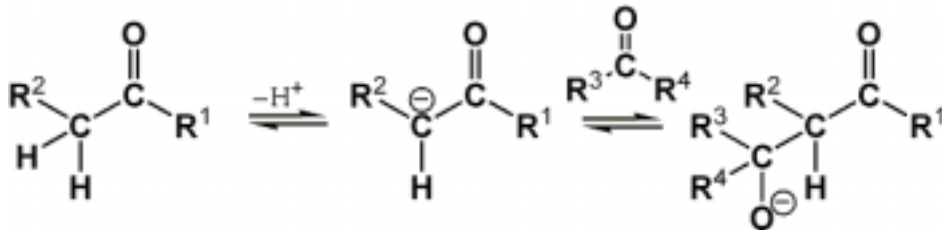
式 4 - 7 光エネルギーと波長の関係式

式 4 - 7 に示すように電磁波のエネルギーはその波長に反比例するため、短い波長の光ほど高いエネルギーを持っています。ただし、 E はエネルギー (kcal/mol)、 h はプランク定数、 λ は波長 (cm)、 c は光の速さ (cm/s) を表しています。X 線や γ 線のようにきわめて短い波長の電磁波は宇宙生物を形作っている物質の共有結合を切断するに十分な高いエネルギーを持っています。短波長の紫外線でも共有結合を切断してしまいます。逆に赤外線などのより長波長の光は物質を還元するには不十分なエネルギーしか与えません。地球上には太陽から 250 nm よりも長波長の電磁波が到達しますが、中でも赤色の光を多く含んでいますから、生物にとって赤色の可視光線が水を酸化するのに適当な光と考えられます。その波長の光を最も効率よく吸収する物質は RGB 3 原色系の補色にあたる緑色の物質ですから、還元反応に有効な波長の領域の光を最も効率よく吸収する物質は黄色から緑色をしています。ちなみに、植物はその生体を構成する糖類やでんぷんを生産するために葉緑素という緑色の物質を介して光エネルギーを利用しています。

植物の組織の中では式 4 - 8 に示すように、葉緑素は太陽の光を吸収して得たエネルギーで水を酸素まで酸化し、 NADP^+ を NADPH まで還元します。この反応で生成した NADPH は NADP^+ に戻るときに、 $\text{C}=\text{O}$ 結合や $\text{C}=\text{N}$ 結合を還元する能力を持っていますから、水の酸化で生まれた還元力を伝達する触媒の役目をしています。



式 4 - 8 太陽光による水の酸化反応



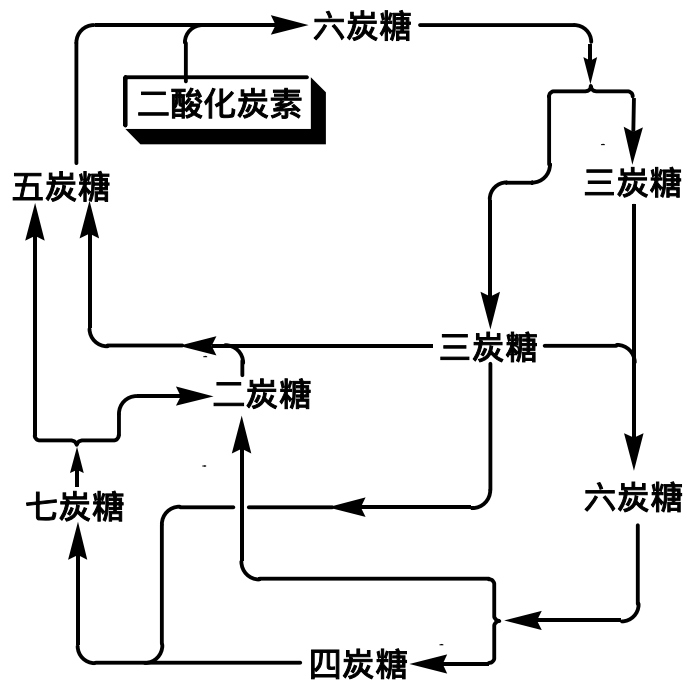
式 4 - 9 アルドール型反応の機構

一般に $\text{C}=\text{O}$ 結合はその電気陰性度の違いから、炭素上がかなり高い反応性を持っています。また、 $\text{CH}-\text{C}=\text{O}$ のように隣接する炭素上に水素が結合している場合には、 $\text{C}=\text{C}-\text{OH}$ の構造を持つエノール体に容易に異性化するため、隣接する炭素上も高い反応性を示します。式 4 - 9 に示すように、この 2 つの反応点で $\text{C}-\text{C}$ 結合を形成する反応をアルドール型縮合反応と呼んでいますが、このアルドール型の反応は極めて小さな自由エネルギー差の容易に進行する平衡反応で、反応条件が極めて温和なため、生物体を構成する多くの物質はこの反応で生産されています。例えば、生物体内では酢酸がこの反応で次々に縮合し脂肪酸が生産されています。

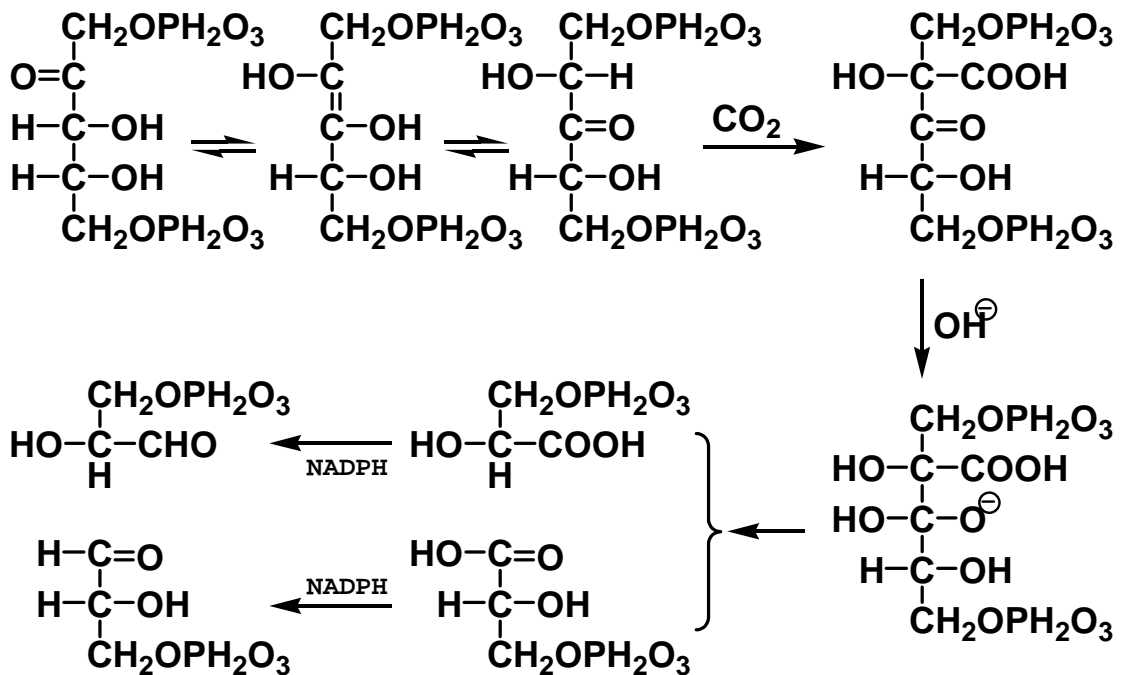
二酸化炭素からブドウ糖への反応においても、炭素原子同士が結合する反応はこのアルドール型の縮合反応で進行しますが、その過程で、アルドール型の縮合反応とその逆反応が複雑に組み合わされていることが知られています。式 4 - 10 にはブドウ糖が植物中で生産される時に経過すると考えられる多段階の複雑な反応過程をまとめましたが、特に五炭糖に二酸化炭素が取り込まれて、三炭糖のグリセルアルデヒドの 2 分子に変化する過程を式 4 - 11 に示しておきます。その過程においてカルボン酸の部分が NADPH によりアルデヒドに還元されてゆきます。結局、6 分子の二酸化炭素がブドウ糖に変化するためには 12 モルの NADPH による還元が必要であり、全て太陽光による水の酸素への酸化反応により供給されています。

植物の中では太陽の光を吸収して、水が酸化され、二酸化炭素がブドウ糖に変換されて固定化されてゆきます。この変化により二酸化炭素は還元度の高い物質に変換され、多くの太陽が

らの光エネルギーが蓄えられます。



式 4 - 10 光合成反応の複雑な反応過程



式 4 - 11 光合成反応の一部の機構

二酸化炭素の大気中濃度と植物の繁殖速度

多種多様な化学反応があるにもかかわらず、反応の形態は出会いの反応 (2 分子反応) と別れ

の反応（1分子反応）の2種類しかありません。出会いの反応は2種類の分子が衝突し反応するもので、別れの反応はある分子が別の分子に分解あるいは変性してゆくものです。

A子さんとB君はそれぞれ広い東京にわびしく暮らしていましたが、二人は仕事の都合で毎日同じ電車に乗るようになり、いつの日からかB君はA子さんに惹かれるようになりました。B君の情熱が通じて、ついに二人は幸せな恋人として結ばれることになりました。この恋愛物語を振り返ってみると、A子さんもB君もわびしい生活をしてきたためかなり精神的に不安定で恋人の欲しい状態にありました。また、偶然に二人が度々出会う機会に恵まれました。さらに、B君の情熱的なエネルギーがA子さんの心を動かし二人とも幸せになったのではないのでしょうか。化学反応における出会いの反応はこの恋愛物語と極めてよく似ています。反応する2種類の分子は反応性が高いほど容易に反応が進行しますし、反応の前と後で安定性が増加する変化の場合に反応が容易に進行します。さらに、2種の分子が互いに衝突する機会が多いほど反応は速やかに進行します。

2種の分子の衝突する機会はそれぞれの分子の数に比例しますし、それぞれ、分子の運動の速度にも比例します。ある器の中の分子数を濃度と呼んでいます。出会いの反応の速度はそれぞれの分子の濃度の積に比例します。また、溶媒の粘度が大きいほど分子運動が制限されるため反応は遅くなりますが、温度が高くなると溶媒の粘度が小さくなり、分子の運動の速度も速くなりますから、出会いの反応の速度は温度が高くなれば飛躍的に速くなります。

C子さんとD君は仲の良い恋人同士でしたが、最近何かと気の合わないことが多くなってきました。C子さんは洒落たコーヒーパーラーで美味しいケーキを食べることが好きですが、D君は赤提灯でいっぱい飲むことをこよなく好みます。以前はお互いに無理をしていましたが、だんだんと我慢の限界になって来ました。ある日のデートでこの限界を超えてしまい、分かれることになってしまいました。この恋の破局の原因はC子さんとD君が互いに引き付けあっていた愛の力が弱まったためであり、外部の人の影響は無いと考えることが出来ます。化学反応における別れの反応もこのC子さんとD君の関係に良く似ています。二つの原子を結ぶ結合が不安定であればあるほど、別れの反応は容易に進行して行き、それ以外の物質はこの反応に影響を与えません。表2-2にまとめた元素の放射壊変は最も典型的な別れの反応であり、外界の影響を全く受けず、陽子と中性子を結び付けている力が相対的に小さいために起こります。

二酸化炭素からブドウ糖の生産される光合成反応では、多くの分子が結合してゆくため、出会いの反応と考えられます。この一連の反応の速度を支配する段階は太陽の光を受け、水の酸化によりNADPHの生成する反応と思われるから、二酸化炭素の量が多少増減しても光合成反応があまり促進されるとは思われません。しかし、十分な光エネルギーを受ける温室で植物を栽培するとき、大気中の二酸化炭素の濃度を高くすることにより植物の成長が促されるという報告がありますから、二酸化炭素の出会いの反応も僅かながら光合成に影響を与えているのかもしれない。

人類の贅沢で発生する二酸化炭素

地球の誕生から45億年の間に、エネルギー的にも物質的にも不滅の法則が成り立つようになり、シーソーの上に乗ったように安定しました。地球の誕生当時には金星や火星と同じ程度に、大気中に含まれていた多量の二酸化炭素も水を介して次第に炭酸カルシウムとして堆積岩

表 4 - 8 京都議定書の骨子

数量目的

●対象ガスの種類及び基準年

二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素（1990 年を基準年）

- ・ HFC、PFC、SF6（1995 年を基準年とすることができる）

●吸収源の扱い

土地利用の変化及び林業セクターにおける 1990 年以降の植林、再植林及び森林減少に限定。農業土壌、土地利用変化及び林業の詳細な扱いについては、議定書の第 1 回締約国会合あるいはそれ以降のできるかぎり早い時期に決定。

●約束期間

第 1 期は、2008 年～2012 年の 5 年間

●先進国及び市場経済移行国全体の目標

少なくとも 5%削減

●主要各国の削減率（全体を足し合わせると 5.2%の削減）

- ・ 日本： - 6% 米国： - 7% EU： - 8% カナダ： - 6% ロシア：0% 豪州： + 8% NZ：0% ノルウェー： + 1%

●次期約束期間への繰り越し（バンキング）

認める

●次期約束期間からの借り入れ（ボローイング）

認めない

●共同達成

欧州共同体などのように複数の国が共同して数量目的を達成することを認める

●排出量取引

認める。締約国会合において、ガイドライン等を決定する。

●共同実施

先進国間の実施。

2. 途上国の義務の実施の促進

- 途上国を含む全締約国の義務として、吸収源による吸収の強化、エネルギー効率の向上等詳細に例示。

3. クリーン開発メカニズム

- 先進国とのプロジェクトにより、途上国の持続可能な成長に資すると共に、右プロジェクトにより生じた温室効果ガス排出の削減を活用することにより、先進国の数量目的達成にも使えることとするもの。

4. 資金メカニズム

- 条約で規定された資金メカニズム（GEF）が引き続きこの議定書の資金メカニズムであることを確認。

5. 発効要件

- 議定書を締結した国数が 55 カ国以上であり、且つ締結した附属書Ⅱ国の 1990 年における CO₂ の排出量が同年における附属書Ⅱ国による CO₂ の総排出量の 55%を越えることを発効要件として規定。

（採択されなかったもの）

- 途上国の自発的な参加についての条文は、途上国の反対により最後の段階で削除され、又、米国が主張していたエボルーションについても見送られた。

中に移動し、現在ではその 99.999%が石灰岩や大理石として固定化されています。また、植物

は二酸化炭素と水から光合成によりブドウ糖を生産し、幹や葉を作り上げていますが、動物や微生物は生命の維持のために植物の生産した物質を二酸化炭素まで分解します。結局、生物は二酸化炭素を消費して多くの物質に変換しますが、また二酸化炭素にまで化学的に風化しますから、平衡状態にあり二酸化炭素の増減はほとんどありません。

しかし産業革命以後、石炭や石油などの化石燃料を大量に燃やして人類は贅沢を始めました。従来、シーソーの上に乗って平衡に達していた地球に突然大量の二酸化炭素が放出され始めました。そこで、1997年に日本が中心になって人類の贅沢を反省する会議を京都で開きました。その折に合意された京都議定書を外務省が骨子にまとめましたので表 4-8 に掲げましたが、中でも二酸化炭素の数量規制が最も重要と考えられています。そこで人類が排出する二酸化炭素の現況を化学的に調べ、二酸化炭素を出すことが本当に人類の贅沢かどうか検証してみようと思いました。

まず始めに、地域別、発生源別の二酸化炭素の排出量を表 4-9 に挙げておきます。アジアとヨーロッパと北米がほとんど同じ量の二酸化炭素を排出しています。国別では、特にアメリカ合衆国が突出して排出量が多くなっており、日本は世界の総排出量の約 5%を排出しています。二酸化炭素の発生源を自動車や航空機や鉄道や船が排出する運輸関係、暖房や火力発電などのために排出するエネルギー関係、一般的な工業で排出する工業関係、何れにも含まれない発生源の 4 つに大別しますと、エネルギー関係が最も二酸化炭素を多量に排出しています。人類が世界中で排出する二酸化炭素の総量は 1980 年には 1.8×10^{13} kg でしたが、1999 年には 2.3×10^{13} kg まで増加しています。大気中に含まれている二酸化炭素の総量が 1.8×10^{15} kg ですから、毎年、人類は大気中に約 1%づつ二酸化炭素を増加させていることとなります。しかし、地殻中に固定化されている二酸化炭素の総量は 1.8×10^{20} kg ですから、大気中から地殻中へ移動して

表 4-9 地域別二酸化炭素排出量 (10^9 kg)

国名	運輸		エネルギー		工業		その他		合計	
	1980	1999	1980	1999	1980	1999	1980	1999	1980	1999
日本	198	288	333	448	252	261	127	166	910	1163
アメリカ合衆国	1347	1832	1936	2668	796	556	698	605	4777	5662
北アメリカ	1554	2099	2106	2996	959	708	811	728	5429	6531
オセアニア	64	97	102	197	52	58	14	17	232	369
ヨーロッパ	795	1220	1698	1601	1130	744	1033	802	4656	4367
アフリカ	109	162	158	324	124	134	45	79	437	698
アジア	935	1500	2315	4387	2186	2404	1162	1266	6598	9557
南アメリカ	210	326	144	227	155	212	65	109	575	874
世界	3683	5505	6551	9897	4642	4337	3176	3079	18051	22818

固化する平衡が速やかに

進行するのであれば、あまり大きな影響を持つとは思えません。この大気中から地殻中へ二酸化炭素が移動して固化する速度よりもはるかに人類の排出する速度が速ければ、二酸化炭素を出す人類の贅沢が地球に大きな影響を持つことになります。

1960年から40年間の全世界の二酸化炭素の年平均排出量と大気中の二酸化炭素の平均濃度を示すグラフを図4-3に示しておきます。最近の30年間に世界中で人類の贅沢により排出する二酸化炭素は平均して 2.0×10^{13} kg であり、大気中に含まれる二酸化炭素の総量の約1%に相当しますから、大気中の二酸化炭素は毎年1%ずつ増加することになります。これに対して、

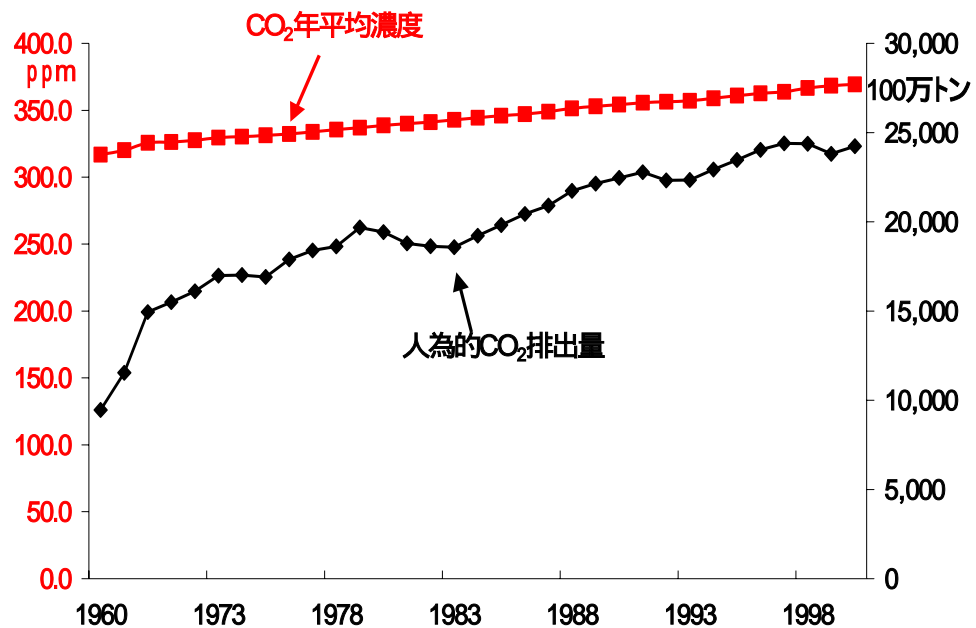


図4-3 二酸化炭素の大気中の濃度と人為的な排出量

実際に大気中で増加する二酸化炭素の量は図4-3の赤色で表したグラフのように、毎年1.3 ppm (0.0013%)程度しか増加していません。言い換えれば、人類の贅沢により排出された二酸化炭素は大部分炭酸カルシウムや炭酸マグネシウムになって堆積岩中に固化され、大気中にはほとんど残留していないことになります。しかも、海水中には多量のカルシウムやマグネシウムがイオンとして溶け込んでいますから、二酸化炭素を炭酸塩として固化する能力を未だ充分に残しています。このように考えてくると人類が贅沢のために排出する二酸化炭素の量を現在の水準に保つのであれば、さほど危惧する事ではないと化学的データは示しています。

5. 二酸化硫黄を出す賢沢

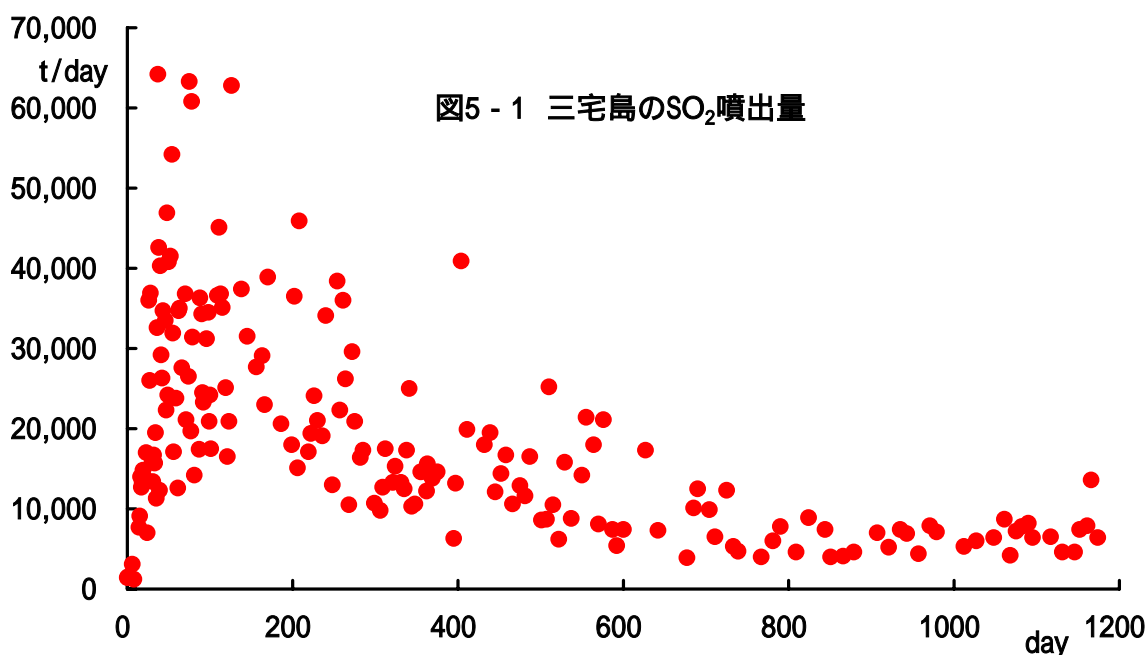
二酸化硫黄の毒性

硫黄には硫化水素、単体硫黄、二酸化硫黄、無水硫酸など色々の酸化状態の化合物があります。二酸化硫黄は硫化水素または単体硫黄を燃焼すると発生しますが、金属硫化物を空気中で高温に加熱しても発生します。二酸化硫黄は硫黄を含む化石燃料（石炭、石油）の燃焼によっても発生する大気汚染の主要物質であるとともに、酸性雨の主要原因物質でもあります。無色不燃性の二酸化硫黄は分子量 64.06、気体密度 2.927gdm⁻³、凝固点-75.5、沸点-10 などの物性を持ち、酸化バナジウムなどの触媒により無水硫酸まで酸化されます。二酸化硫黄と無水硫酸はそれぞれ SO₂ および SO₃ の分子式を持つために、この 2 種類の気体を総称して SOX あるいは SO_x と呼んでいます。無水硫酸は水によく溶けて、最も強い酸としてよく知られている硫酸になります。また、二酸化硫黄は亜硫酸ガスとも呼ばれ、同じように非常に水によく溶け、亜硫酸となって強い酸性を示します。さらに亜硫酸は強い還元性を示しますから、容易に酸化されて硫酸に変化してゆきます。このため、二酸化硫黄は硫酸製造の原料のほか、殺菌剤、漂白剤、還元剤などに使用されています。

生物は多くの水を含んでいますので、SOX の気体と接触するとそれぞれ亜硫酸あるいは硫酸になりますから、その強い酸性により生体組織を破壊してしまいます。窒息させるような強い刺激臭のある、腐食性の気体でほとんど全ての生物にとって強い毒性を示します。ウサギやマウスは 10ppm で 90 日間曝露してもほとんど影響を受けませんが、植物では 1ppm 以下でも光合成が阻害されます。高濃度の障害を受けると、葉に白色や褐色の斑点ができたり、落葉したりします。人では結膜炎を引き起こしたり、上気道を冒すために咳や呼吸困難、胸痛などの症状を引き起こします。慢性中毒になると気道狭窄による喘息のような症状が生じ、高濃度の吸収では肺浮腫、声門浮腫のために死亡することもあります。大気汚染に係る環境基準では、二酸化硫黄は 1 時間の 1 日平均値が 0.04ppm 以下であり、かつ、1 時間値が 0.1ppm 以下であることとされています。

第 4 章で示したように、一般に、多くの金属元素を含む物質はイオンとして水に溶けますが、金属イオンとその相手となる陰イオンの性質により、表 4 - 4 に示すように水に対する溶け易さは異なります。金属イオンと硝酸あるいは塩酸で生成する硝酸塩や塩酸塩は非常に水に溶けますが、硫酸やりん酸や炭酸の塩類はあまり溶けません。また、ほとんどのカリウム (K)、ナトリウム (Na) などのアルカリ金属の塩類はよく水に溶けますが、マグネシウム (Mg) やカルシウム (Ca) やバリウム (Ba) などのアルカリ土類金属の塩は若干溶解性が悪くなります。さらに、鉄 (Fe) やアルミニウム (Al) の塩類はかなり溶け難くなります。金属のイオンの相手となる陰イオンの組み合わせが替わることにより、金属の塩類が水溶液から結晶として沈殿してきます。地球の誕生当時に大気中に多量に存在した二酸化炭素が海中に含まれていたカルシウムイオンにより炭酸カルシウムの形で沈殿して、堆積岩中に移動して行きました。同様に、カルシウムイオンを含む水に二酸化硫黄や無水硫酸が溶け込むときに白色の硫酸カルシウムの沈殿が起こります。生じた沈殿は時として石膏と呼ばれる堆積岩に成長してゆきます。

伊豆七島の三宅島は 2001 年 8 月 26 日に噴火を始めましたが、1 ヶ月後には噴火の最盛期に



なり、1日に60,000トンもの二酸化硫黄を噴出しました。気象庁では三宅島から噴出した二酸化硫黄の量を毎日のように観測し、報告していますので図5-1にまとめました。2001年10月の最盛期には、風に乗って300kmも離れた神奈川県や静岡県にまでしばしば二酸化硫黄を含む気団が流れてきました。そのため、三宅島の全島民は島の外に避難し、その後1200日にわたって島外生活を余儀なくされました。現在では火山活動もかなり沈静化してきましたが、それでも未だに毎日5000トン程度の二酸化硫黄を噴出しています。噴火が始まってから三宅島が噴出した二酸化硫黄の総量は1650万トンと見積もられていますが、このほとんど全ては雨などに洗われて海に溶け込み石膏などとして沈殿していったものと思われます。三宅島ほどに多量ではありませんが、2004年9月1日に噴火を始めた浅間山も二酸化硫黄を毎日4000トン程度噴出しています。

このように世界中の火山では地殻中の金属硫化物が高温で地上に噴出するときに空気や水により酸化されて、二酸化硫黄を多量に放出します。そのため多くの火山の周辺では石膏などの金属の硫酸塩が多量に堆積し、地下水も硫酸イオンを多く含むためしばしば若干酸性を示します。特に温度の高い地下水は多くの硫酸イオンを溶かし込み、硫酸泉あるいは明礬泉と呼ばれる温泉になって湧き出しています。群馬県の草津温泉の成分はカルシウム、マグネシウム、アルミニウムの塩酸塩と硫酸塩のほかに多量の硫酸を含んでいますから、ほとんど全ての生物が棲息できないほどに高い酸性の約pH2を示しています。そのため多くの病原菌を殺菌する効果があり、古くから万病に効く温泉としてよく知られるようになっています。

硫黄のおまけ付き石油

東京工業品取引所の調べによると表5-1で分かるように、1973年に日本に輸入された石油は2.9億kLでした。間もなく起こった第1次オイルショックにより石油の消費量は20%近くも激減しましたが、まだ2億kL以上の石油を輸入しています。このように大量に輸入される石油は、その原産地により含まれる硫黄分の量が0.1%から2.6%まで大きく異なっています。2001

年度に日本が輸入した石油は表 5 - 2 に示すようにサウジアラビア、アラブ首長国連邦などの主に中東産油国から約 2.4 億 kL ですが、その石油には平均して 1.2% 程度の硫黄分を含んでいました。この硫黄分の含有率と石油の総輸入量から計算すると、年間 290 万トンの硫黄もついでに輸入してしま

うこととなります。硫黄分を除去する処理をしないままにこの石油を全て燃焼したとすれば、当然含まれている硫黄分は 570 万トンの二酸化硫黄として大気中に放出されることとなります。

1950 年代までは多量に含まれる硫黄分を除去する処理をせずに、自動車や火力発電の燃料にしていました。その当時、大分、岡山、千葉など多くの臨海地帯に石油コンビナートが建設されましたが、三重県の四日市市にも三菱モンサントが中心になって大きな石油コンビナートが建設されました。石油コンビナートでは輸入された原油をガソリン、ディーゼル油、灯油、重油など色々の溜分に製油し、揮発性の高い部分はパイプで隣接する別の化学工場に送られ、ポリエチレンなどの化学製品の原料として供給されていました。また、重油はパイプで隣接する火力発電所に送られ、燃料として用いられました。このような石油を中心とした複合的工場群では、多量の硫黄分が燃焼され二酸化硫黄として大気中に排出されていました。1959 年ごろから、工場群に近い四日市市では大気中の二酸化硫黄の濃度がかなり高くなってきました。四日市市の住民が呼吸するたびに二酸化硫黄が肺の中に入り硫酸となって、肺の組織を破壊す

表 5 - 1 年度別石油輸入量

年度	石油輸入量 (kL)
1973	288,609,000
1990	238,480,000
1996	216,822,000
1997	209,231,000
1998	206,442,000
2000	254,604,000
2001	239,784,000
2002	241,898,000

表 5 - 2 日本の石油輸入量とその硫黄含有量

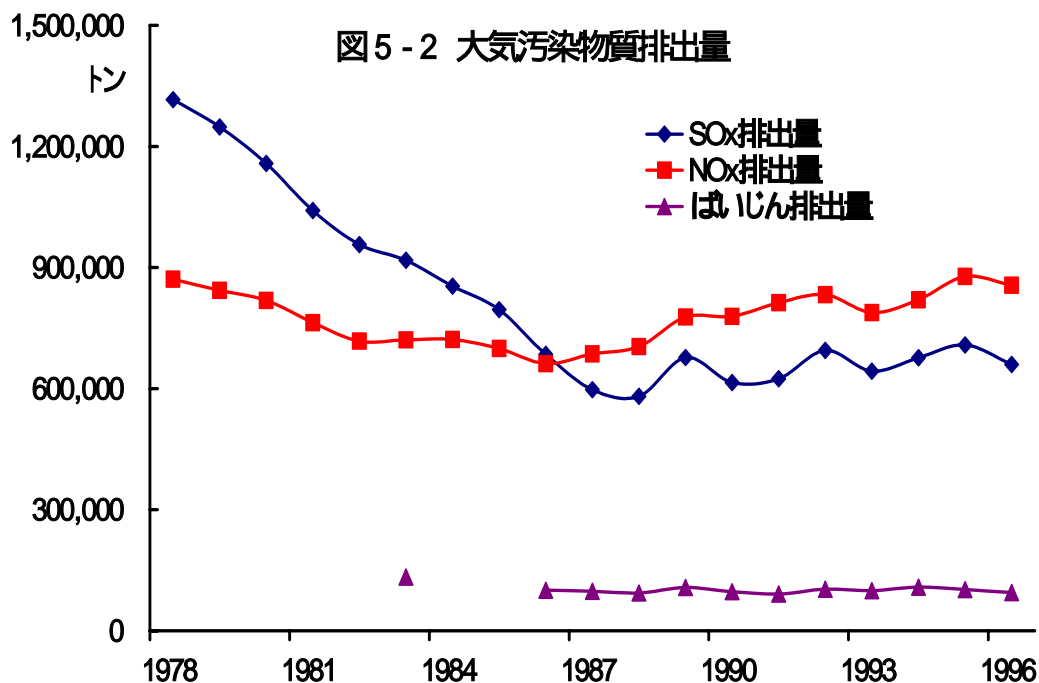
原産国	輸入量	輸入比率	平均硫黄分	硫黄含有量	SO ₂ 重量
	kL	%	%	t	t
サウジアラビア	53,365,000	22.3	2.098	796,000	1,592,000
クウェート	17,219,000	7.2	2.600	318,000	637,000
イラン	29,874,000	12.5	1.650	351,000	701,000
イラク	12,433,000	5.3	2.510	222,000	444,000
カタール	25,594,000	10.7	1.850	337,000	673,000
アラブ首長国連邦	57,200,000	23.9	1.440	586,000	1,172,000
オマーン	14,402,000	6	1.070	111,000	219,000
インドネシア	10,391,000	4.3	0.090	7,000	13,000
中国	4,046,000	1.7	0.130	4,000	7,000
その他	14,511,000	3.5	1.235	127,000	255,000
合計	239,784,000		1.195	2,857,000	5,714,000

るようになってゆきました。結果として、喘息に罹る四日市市の住民が急増しましたので、四日市喘息と呼ばれ、大きな公害問題にまで発展してゆきました。

他方、イギリス、フランス、ドイツなどの西ヨーロッパの工業地帯でも、多量の石油が消費されていまして、付随して多量の二酸化硫黄が大気中に放出されていまして。この二酸化硫黄は風に乗って東に流れ、雲の中の水滴に溶け込んで希硫酸を含む酸性の雨となり、ドイツ南部地方に降り注ぎました。黒い森を意味するシュバルツバルトと呼ばれるドイツ南部地方は古くから深い森に覆われていまして、硫酸を含む酸性雨により森の荒廃が急激に進み、国境を越えたヨーロッパの大問題に発展しました。

ガソリンやディーゼル油の中に含まれていた硫黄分も自動車が走り回る間に、二酸化硫黄を含む排気ガスとして道路に撒き散らしていまして。この二酸化硫黄は空気より比重が 2 倍ほど重いため、交通量が多く盆地のような地形の道路で SOx の濃度の特に高くなる傾向がありました。東京都新宿区柳町の交差点はこの条件に合致していたため、付近の住民はしばしば排気ガスによる目の異常を訴えることになりました。そこで東京都や環境庁が毎日定期的に大気中の SOx の濃度を測定し、その値が高くなる気象条件の時には注意報を発令するようになりました。

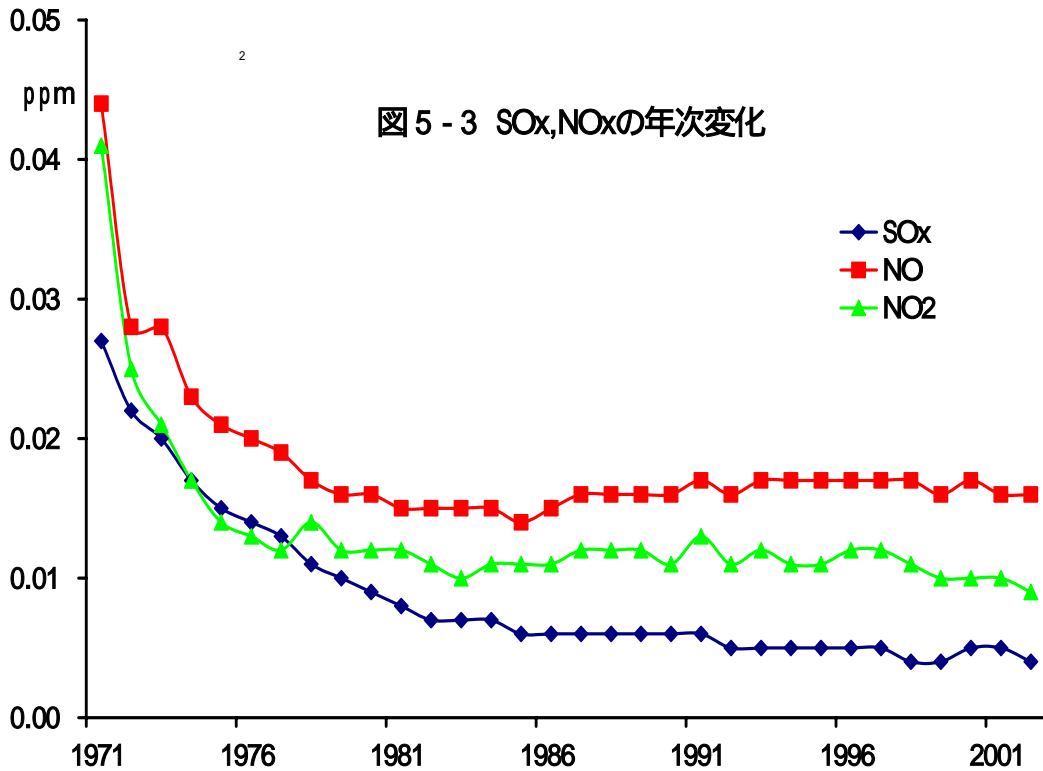
さらに、1967 年に公害対策基本法が制定され、工場内で公害物質を処理することを企業は義務付けられました。これに伴い、自動車エンジンの改良や石油精製の折に硫黄分を取り除く処理などの努力がなされ、二酸化硫黄の排出はかなり抑えられるようになりました。図 5 - 2 には環境省が報告している日本国内における SOx の排出量の年次変化を示しておきますが、これによると 1980 年代の後半からは石油に含まれる硫黄分の約 90% が取り除かれるようになりま



したが、未だに 10%ほどが大気中に SOx として排出されています。近年日本国内で排出されているこの約 60 万トンの二酸化硫黄は、三宅島で噴火以来放出されてきた 1650 万トンの二酸化硫黄に比べれば極めて少なく、現状が維持される限りは余り問題視する必要がないように思います。環境省の報告による大気中の SOx 濃度の年次変化においても図 5 - 3 に示すように、1980

年代後半からは 0.005ppm 以下に落ち着いています。

このように考えてくると、全世界が日本国内程度の二酸化硫黄の排出基準を守ることは技術的に可能であり、二酸化硫黄の排出という観点からは現在の石油の使用量は余り人類の贅沢には当たらないこととなります。



硫酸製造と硫黄鉱山の閉山

明治維新以来、日本は工業立国を目指していましたが、自給の出来る工業原料は石灰石と硫黄と品質の悪い石炭に限られると考えられていました。火山の多い日本国内には岩手県の松尾鉱山や北海道阿寒地方の安田硫黄山などのように、多くの硫黄鉱山が点在していました。産出した硫黄を二酸化硫黄に酸化し、さらに、酸化バナジウムを触媒として無水硫酸まで酸化して、水に吸収させて硫酸を製造していました。硫酸はもっとも強い酸の一種ですから、極めて重要な工業薬品として安価に大量に生産されています。また、加硫といい、ゴムあるいは類似の高分子化合物に硬度と強い弾性を持たせるために、硫黄を多量に加えます。このように工業的に重要な硫黄の需要に対応すべく、多くの硫黄鉱山が活発に硫黄を産出していました。

しかし、1950年代からの技術革新により石炭の需要が減り、石油がエネルギーの源として取って代わるようになりました。そのため、大量の石油が輸入されるようになり、石油のおまけとして硫黄も多量に輸入することになってしまいました。日本が輸入している石油はサウジアラビア、アラブ首長国連邦などの主に中東産油国から約 2.4 億 kL ですが、その石油は平均して 1.2% 程度の硫黄分を含んでいます。この硫黄分の含有率と石油の総輸入量から計算すると、年間 290 万トンの硫黄を石油のおまけとして輸入してしまうことになります。近年ではその約 90% に相当する硫黄分を石油から除去する処理を行っていますから、除去された硫黄分は年間

250 万トンに昇ります。2001 年度に日本で生産された硫酸は 673 万トンですから、硫酸製造の効率を 90%と見積もっても原料となる硫黄の必要量は 244 万トンに過ぎません。亜硫酸ナトリウムや次亜硫酸ナトリウム（ハイポ）などの還元性を持つ化学薬品の原料やゴムの加硫などの需要を考慮に入れても、銅や亜鉛などの重金属の精錬の折にも二酸化硫黄が大量に発生しますから、現在では硫黄の需給は若干供給過剰になっています。

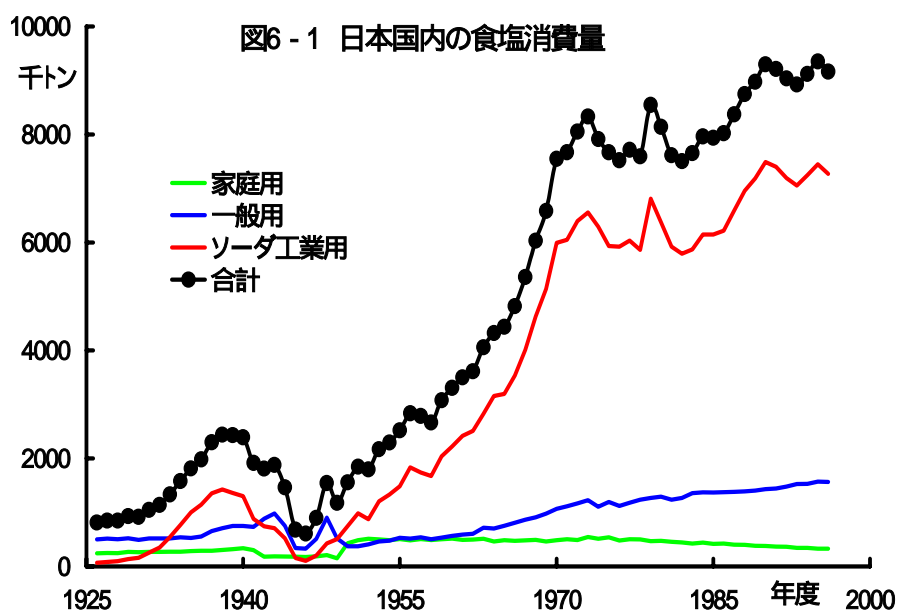
結局、銅や亜鉛などの重金属を鉱石として輸入したときのおまけと、石油を輸入したときのおまけの硫黄分だけで、日本国内の硫黄の需要を十分に賄うことが出来るようになりました。そのため、経費をかけて硫黄鉱山で硫黄の採掘することは経済的に成り立たなくなってしまいました。日本には比較的効率の良い良質の硫黄を産出する鉱山が点在していますが、結果として 1960 年代の終わりには全て閉山になってしまいました。

全世界が日本国内程度の二酸化硫黄の排出基準を守ることは技術的に可能であり、火山など地中からの排出量に比較して、人類の贅沢による二酸化硫黄の排出量は余り問題にはならないことになります。しかし、増長する人類の贅沢から石油や重金属の消費量はますます増える傾向にありますから、何れ硫黄は供給過剰になると考えられます。この需給の不均衡の解決策は新たに硫黄の需要を増加するような製品の開発と人類の贅沢を抑えること以外にありません。

6. 苛性ソーダを浪費する贅沢

苛性ソーダと単体塩素

海水中に含まれる食塩は 4.0×10^{15} トン、岩塩などの形で地殻中に埋蔵されている食塩は 1.0×10^{13} トンと推定されています。このようにほとんど無尽蔵の食塩は世界の至る所で入手できる最も安い資源と考えられます。現在人類が世界で消費している食塩は 1 年間に 1.7×10^8 トン程度で、海水から 26%、岩塩や鹹水の形で地殻中から 70% 供給されています。1920 年代後半に日本国内で消費された食塩は食用に 2.5×10^5 トン、工業原料として 9.8×10^4 トンほどでした。財団法人塩事業センターがまとめたデータをもとにした図 6 - 1 に示すように、その後の約 70 年間にソーダ工業の原料としての消費量が飛躍的に増加し、最近 10 年間の平均消費量は食用の食塩が 3.8×10^5 トン、炭酸ナトリウム、水酸化ナトリウム(苛性ソーダ)、および塩素を含む物質などの工業製品の原料として 7.0×10^6 トンの食塩が消費されています。重工業生産の増加とともにこのように増加してきたソーダ工業用の食塩は、おもに炭酸ナトリウムの製造と食塩の電気分解の 2 つの化学工業の主原料に充てられています。



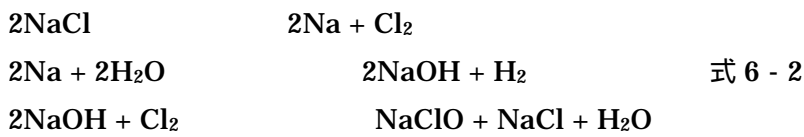
食塩と石灰石からアンモニアを触媒として用いて、大量に炭酸ナトリウムがソルベイ法により製造されています。この炭酸ナトリウムの製造過程は原料の石灰石の焼成や中間に生成する炭酸水素ナトリウムの焼成など複雑な多くの反応段階を巧みに組み上げたものですが、総括的には式 6 - 1 の反応にまとめられるもので大量のエネルギー消費を伴います。



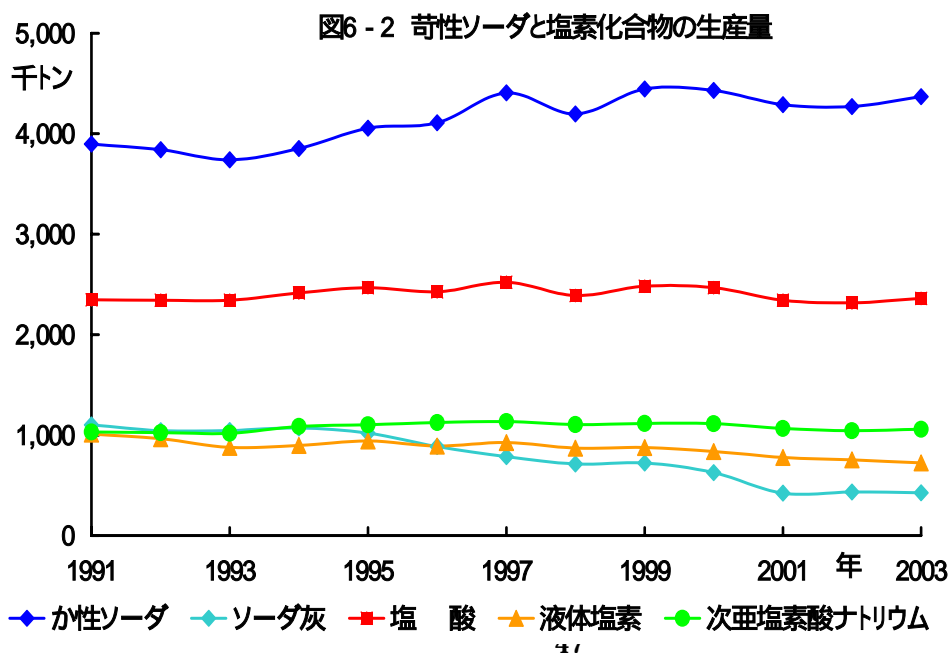
ここで製造される炭酸ナトリウムはソーダ灰と呼ばれ、ガラスの重要な原料になっています。しかし、複成する塩化カルシウムは極めて廉価で、豪雪地帯の道路の融雪剤などに用いられていますが、あまり有効な利用とは思えません。塩化カルシウムの有効な利用法を開発しない限

り、ガラスの需要に伴い塩化カルシウムは過剰に製造されてしまう結果になりますから、ガラスの浪費は無用の塩化カルシウムの製造と大量のエネルギーの消費となり、人類の贅沢になってしまいます。

工業原料として食塩は水酸化ナトリウムの製造において最も多量に消費されています。食塩水を電気分解すると、式 6 - 2 に示すように陰極に金属ナトリウム、陽極に単体塩素が遊離してきます。金属ナトリウムは溶媒の水と反応して水酸化ナトリウムと水素になりますから、食塩 58.5g の水溶液を電気分解すると、40g の水酸化ナトリウムと 35.5g の単体塩素と 1g の水素ガスが生成します。単体塩素は水に多量に溶け込んでしまい、水酸化ナトリウム水溶液と混合しますと次亜塩素酸ナトリウムに変化してしまいます。そのため、食塩水の単純な電気分解では水酸化ナトリウムも単体塩素も効率的に製造することが出来ません。



陽極と陰極の生成物の混合を避けるために、陽極に水銀を使い、電極の水銀と生成する金属ナトリウムを液状のナトリウムアマルガムとして反応槽から取り出し、別室に移動させてからナトリウムアマルガムに水を反応させることにより水酸化ナトリウムを生成する製造法が開発されました。このアマルガム法は単体塩素と水酸化ナトリウムの混合することが全くありませんから、両者を純粋に効率よく製造できるため、1960 年代には日本の水酸化ナトリウム製造を担う方法になりました。第 3 章で示した水銀触媒によるアセチレンの反応の副反応がもとで発生した水俣病公害が丁度この頃に社会問題になり、水銀の排出規準が極めて厳しくなってきました。アマルガム法による水酸化ナトリウムの合成は理想的には全く水銀の排出がないと思われませんが、実際には多少の副反応が起こり水銀化合物の漏洩は免れません。水銀の漏洩を皆無にするためには高性能な水銀の回収設備を必要とし、経済的に大きな負担になってきました。そのためアマルガム法は立ち行かなくなり新しい技術が要求されました。



現在ではナトリウムイオンと水だけが通り抜け出来るような隔膜で、食塩水の入った陽極槽と水酸化ナトリウムを生成する陰極槽を隔離する隔膜法で食塩の電気分解が行われています。これにより陽極槽に食塩水を供給して通電すると単体塩素が遊離してきます。隔膜を通り抜けてきたナトリウムイオンは陰極で水素ガスを発生しながら水酸化ナトリウムを生成します。この製造法は電解槽に隔膜で仕切りを作り生成してくる単体塩素と水酸化ナトリウムを混合することなく取り出す方法で、経済的にも効率の良いものです。

先進諸国の国民総生産（GNP）と水酸化ナトリウム(苛性ソーダ)の生産量には相関性が認められ、GNPが10倍の国では水酸化ナトリウムを約10倍生産しています。このように国力の尺度と見なすことのできる水酸化ナトリウムの生産量をはじめ、図6-2にはソーダ工業会がまとめた炭酸ナトリウム(ソーダ灰)、塩酸、単体塩素および次亜塩素酸ナトリウムの生産量の変化を示しておきます。この統計資料によりますと、最近15年間の日本国内における水酸化ナトリウムの生産量は年率平均で1.3%増加していますが、次亜塩素酸ナトリウムは微増に留まり、単体塩素と炭酸ナトリウムはそれぞれ1.9%と8.3%減少しています。ソルベイ法によるソーダ灰の製造においては炭酸ナトリウムと塩化カルシウムの消費量の釣り合うことが望ましいことです。同じように食塩の電気分解においても、水酸化ナトリウムと単体塩素の消費量の釣り合うことが望まれます。近年、水酸化ナトリウムの消費量が増加し、単体塩素の消費量が減少していることは、日本の化学工業における大きな問題になりつつあります。

単体塩素の用途と需要

生産量が国力の尺度と見なすことのできるほどに水酸化ナトリウムは工業的に重要な化成品であり、食塩の電気分解により生産される水酸化ナトリウムと単体塩素の消費量は釣り合うことが望まれます。ソーダ工業会の集計によりますと、表6-1に示すように近年の日本国内の単体塩素の消費量の30%は塩化ビニルの製造に用いられています。また、ポリウレタンの原料となるトルエンジイソシアネート(TDI)およびメチレンジフェニルイソシアネート(MDI)、酸化プロピレンの調製にも単体塩素が用いられています。このようにプラスチック製造で消費されるほかに、調味料、無機薬品、染料などの合成中間体製造に広く単体塩素が用いられています。総需要の15%に相当する単体塩素が消費されてポリハロメタンやポリハロエタンなどが低分子量の炭化水素から合成されており、塩素系有機溶媒あるいは冷媒として広く用いられています。また、古くからDDT、BHC、パラジクロロベンゼンなどの塩素系の殺虫剤や農薬が広く用いられており、単体塩素が原料として消費されてきました。さらに、単体塩素が強い酸化作用を示すことから、漂白剤や殺菌剤として広く用いられており、紙やパルプの漂白、上水道の水質維持のために用いられています。

このように多種多様の用途に用いられているため、1990年代には水酸化ナトリウムの需要に対して約13%ほど単体塩素が不足しており、国外から輸入されていました。その後急激に単体塩素の需要が減少してきましたから、ソーダ工業としては大きな問題になりつつあります。

クスリとリスク

人類を含む全ての生物は極めて精巧に組織された一連の化学反応によりその生命活動を維持しています。あらゆる物質がそれらの化学反応に関与するときには、必ず大なり小なり影響を

与えます。この影響が生命活動に有利に働く物質をクスリと呼んでいます。反対に、この影響が生命活動

表 6 - 1 国内の単体塩素需給実績 (単位:1,000 トン)

会計年度(4~3月)	1988	1989	1990	1991	1992
単体塩素生産量	3,117	3,273	3,448	3,409	3,359
(か性ソーダ換算量)	(3,556)	(3,732)	(3,937)	(3,896)	(3,840)
回収単体塩素量	667	703	714	726	736
塩素誘導品の輸入	644	650	598	560	553
合計	4,428	4,426	4,760	4,695	4,638
紙・パルプ	273	273	252	226	212
塩化ビニル	1,323	1,390	1,468	1,424	1,469
調味料	38	35	30	32	31
塩素系溶剤	477	— 460	409	371	359
クロロメタン	260	281	289	296	305
酸化プロピレン	286	331	325	345	300
TDI・MDI	168	185	201	217	225
無機薬品	365	377	393	390	396
染料・中間物	156	175	195	182	179
その他	1,084	1,117	1,195	1,210	1,164
合計	4,430	4,624	4,757	4,693	4,640

に不利に働く物質を毒と呼んでいます。生命を維持する化学反応は種にかかわらずかなり共通性を持っていますが、動物と植物の違いあるいは昆虫と哺乳類や広葉の草と稲のような草など種類の違いにより、特異な生体内の化学反応も多種多様に含まれています。しかも、物質が生体内反応に関与するときには、物質の量に比例し生体の重量に反比例した影響を与えます。そのため、種類により影響の仕方が異なりますが、同じ種類の生物に対しては生体の小さいものほど大きな影響を受けます。生命活動を維持するための精巧に組織された多種多様な反応のうちで、ある反応の過程にはクスリとして作用する物質も、他の反応の過程には毒として作用することがあります。また、少量ではクスリとして作用する物質が限量を超すと毒として作用することもあります。言葉を替えれば、全ての物質はクスリの働きと毒の働きを持っており、クスリの使用にはリスクを伴います。

1998年にロシア連邦共和国のウラジオストックで起こった韓国領事殺害事件で使用された毒薬はネオスティグミンプロミドという重症性筋無力症の治療薬でした。筋無力症を患う人にとってはこの物質は大切なクスリですが、韓国領事やその事件の犯人にとっては明らかに毒の物質です。このような極端な例でなくても、アルコールのように少量では人の精神を落ち着かせ、社会を平和にする働きをしますが、多量に飲めばアルコール中毒を起こし、短時間に 600ml

以上のアルコールを飲むと 50%以上の方が死に至る猛毒となります。

クスリには人体に直接作用して生命活動を改善する医薬品のほかに、人間生活を豊かにするための物質が化学薬品、工業用薬品、農業用薬品（農薬）などとしてあらゆる分野で用いられています。窒素や燐やカリウムを多量に含む土壌では農産物の収穫が向上するため、尿素などの肥料と呼ばれる農業用薬品を畑の土壌中に供給しています。農作物が環境からの悪影響を最小限にするように、農作物の成長を促進したり、殺菌剤や殺鼠剤や殺虫剤を散布したり、除草剤を使用して雑草を駆逐しています。これらの農薬は人類にとって有益な生物の生長を助ける役目をしていきますから、クスリの作用をしていることとなります。しかし、殺鼠剤や殺虫剤は人類にとってはクスリでも、鼠や昆虫にとっては毒の作用を持っています。鼠も昆虫も人類と同じように動物ですから、彼らの生命活動を維持するための化学反応と類似の化学反応を人類も持っています。それらの動物を殺傷するためのクスリは当然人類にとっても毒の作用をもっているに違いありません。亜ヒ酸は「石見銀山」あるいは「猫いらす」として古くから殺鼠剤として用いられてきましたが、その強い毒性のために殺人にも誤用されてきました。例えば、1998年に起こった和歌山カレー事件では殺鼠剤用の亜ヒ酸がお祭りのために用意されたカレーの中に混入され、2人の尊い命を奪いました。このようにクスリは使い方を誤ればかなり高いリスクを伴っています。

さらに生命活動を直接維持する化学反応ばかりでなく、地球上で進行するあらゆる化学反応に対しても、全ての物質は大なり小なり関与して影響を与えます。人類にとってはクスリであっても、他の生物を含めて全地球にとっては毒となっているかもしれません。クスリが自然の本来の釣り合いを壊すことになり、周り回って人間生活に芳しくない結果をもたらすことも多々あります。人類が動物の一種として生活するために必要な最小限を超えて物質を消費することは、全地球に対して必要以上の毒を撒き散らすことになり、これは自然の摂理に反するような人類の驕りであり贅沢と考えられます。

このようにクスリを必要以上に使用することは浪費であるばかりでなく、大きなリスクを伴います。そのため、クスリの効果があらわれる最少量を有効量（ ED_{50} ）として示し、クスリの必要量を知ることができるようにしています。しかし、クスリの効果を人類に対して直接試験することは安全性の点で問題がありますから、鼠や犬や猿などの哺乳動物を使って試験をしています。当然試験動物の体重が異なりますから、有効量はクスリの有効最小量を体重で割って1kg当たりの有効量として規格化しています。このようにして、クスリの効果が50%の人にあらわれる必要量は有効量（ ED_{50} ）に体重を掛け合わせて算出できるようにしています。同じようにアレルギーや種々の病気が50%の人に発症する最小量も有効量（ ED_{50} ）として物質の毒性を知ることができるようにしています。さらに、50%以上の人を死に至らしめる最小量を致死量（ LD_{50} ）とし、物質の究極の毒性を表しています。人類の持つ新陳代謝作用や解毒作用や自然治癒などの能力が物質に十分に働く場合には、短時間にはクスリの作用も毒の作用もあらわれますが、時間の経過とともに物質が浄化されてしまいそれらの作用は弱くなってしまいます。有効量と致死量は何れも短時間の間にあらわれる物質の性質であり、急性薬効あるいは急性毒性を示す非常に有用な指針となります。しかし、新陳代謝作用や解毒作用が充分には働かず体内に蓄積する物質については、時間の経過とともに物質の体内に蓄積する量が増加するために、当然生命活動を維持する化学反応に与える影響も次第に増加するものと思われれます。クスリの

効果が次第に増加することはあまり問題になりませんが、物質の蓄積による毒の効果が増加することは人類にとって好ましいことではありません。このような物質に対しては耐容量という指数を用いるようになってきましたが、これは生命活動を維持する化学反応に与える影響を一生にわたって受けても全く毒性が観測されないと推定される量を意味します。

1960年代のベトナム戦争の折に、アメリカ軍は深いジャングルの中に潜むゲリラ兵に大いに悩まされました。そこでアメリカ軍はクロロフェノキシ系農薬と呼ばれる植物成長ホルモンの作用を攪乱する農薬を枯葉剤として大量に散布しましたが、不純物としてダイオキシン類が含まれていたためさらに大きな中毒事件に発展してしまいました。このダイオキシン類のなかでも、図 6-3 に示す 2,3,6,7-テトラクロロジベンゾダイオキシンが最も強い毒性を示すと考えられており、その致死量 (LD_{50}) は $6 \times 10^{-7} \text{g/kg}$ ですから、ふぐの毒より 10 倍ほど強い毒ではないかと思われます。しかし、この化合物の耐容量は 1kg の体重の動物に換算して 1 日に 10^{-12}g と見積もられており、この微少な耐容量は現実的な目安としては、耳搔きで 1~2 杯のダイオキシンでも日本人全員に何がしかの悪影響を与えるかもしれないということを意味しています。

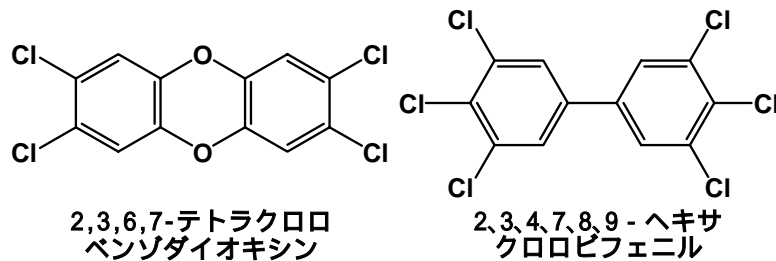


図 6-3 ダイオキシンと PCB の構造

現在では、ダイオキシン類の場合にはこの耐容量が社会的な許容量に採用されていますから、ほんの少しでもダイオキシン類が発生してしまうと大きな社会問題になってしまいます。埼玉県所沢でごみの焼却炉の灰とともにダイオキシン類が一緒に排出された事件が 1999 年に起こりましたが、原因は塩化ビニルを含むごみを比較的温度の低い焼却炉で焼却処理したときにダイオキシン類が発生してしまったものと考えられています。その後、公的機関が運営するごみ焼却炉は石油などの助燃剤により高温で焼却できるように改良され、塩化ビニルなどの塩素化合物を焼却してもダイオキシン類を発生する事故は起こらなくなりました。しかし、家庭や小規模の企業などでごみの焼却ができなくなってしまいましたから、公的機関は大量の助燃剤を浪費して大量のごみの処理をしなければならなくなりました。

PCB と呼ばれる塩素原子が多く結合したビフェニル化合物は融点が低く沸点が高い性質から揮発性が低く、広い温度範囲で液体の状態になる物質です。この PCB は長時間放置しても全く濃縮したり揮発したりせず熱的に極めて安定に存在する液体であったため、トランスのコイルやコンデンサーを保護する絶縁油や熱交換器の熱媒体やインクの溶剤などに広く使用されていました。しかし、熱交換器の故障が原因で PCB の食用油への混入事故が起こり、かねみ油症事件と呼ばれる中毒事件が 1968 年に発生しました。その後の研究で PCB の中でも 2,3,4,7,8,9-ヘキサクロロビフェニールは図 6-3 に示すようにダイオキシン類と類似の分子構造をしているため、致死量は 1.25g/Kg 、1 日当たりの耐容量は $3.5 \times 10^{-6} \text{g/Kg}$ と極めて毒性の強い物質であることが明らかにされました。1960 年代には工業的に約 60000 トンほど使用されており、しかも

PCB が熱的に極めて安定に存在する液体の性質を持つことから廃棄処理を困難にしたため、大きな社会問題に発展しました。

塩ビ工業・環境協会の資料によりますと、塩化ビニル樹脂は耐薬品性と耐久性に優れ、比較的高い軟化温度を持ちながら柔軟性に富んでいるため、水道管や床材や壁材などの建築資材、電線の絶縁材に多く利用されています。塩化ビニル樹脂はポリエチレン、ポリプロピレン、ポリスチレンと並んで大量に生産されており、表 6 - 1 に示すように近年では日本国内で消費される単体塩素の 30% は塩化ビニルの製造に用いられています。しかし、塩化ビニルの焼却がダイオキシンの発生の原因と考えられるようになり、不要になった塩化ビニル製品の廃棄が容易でなくなってきました。塩化ビニルも PCB も極めて優れた性質を持つ物質ですが、塩素原子を含むために廃棄処分が困難で多額の経費を必要とします。結果として、PCB の生産は禁止され、塩化ビニルの需要は減少する傾向になってきました。1990 年代には水酸化ナトリウムの需要に対して約 13% ほど単体塩素が不足していましたが、塩化ビニルの需要の減少により急激に単体塩素の需要が減少してきましたから、ソーダ工業としては大きな問題になりつつあります。

有機塩素系物質の毒性

クスリには人体に直接作用して生命活動を改善する医薬品のほかに、農業生産を豊かにするための農業用薬品（農薬）が広く用いられています。窒素や燐やカリウムを多量に含む土壌では農産物の収穫が向上するため、尿素などの肥料と呼ばれる農業用薬品を畑の土壌中に供給しています。農作物が環境からの悪影響を最小限にするように、農作物の成長を促進したり、殺菌剤や殺鼠剤や殺虫剤を散布したり、除草剤を使用して雑草を駆逐しています。これらの農薬は人類にとって有益な生物の生長を助ける役目をしていきますから、クスリの作用をしていることとなります。しかし、殺鼠剤や殺虫剤は人類にとってはクスリでも、鼠や昆虫にとっては毒の作用を持っています。鼠も昆虫も人類と同じように動物ですから、人類が生命活動を維持するための化学反応と類似の化学反応を彼らも持っています。それらの動物を殺傷するためのクスリは当然人類にとっても毒の作用をもっているに違いありません。

塩素を含む有機化合物は動物の生命活動を維持する化学反応において一般に毒の影響を示します。そのため近年多くの有機塩素系殺虫剤が開発されてきました。1945 年に太平洋戦争に敗戦した日本国内は、社会の秩序がほとんど崩壊してしまい、極めて衛生状態が悪くなり、種々の伝染病が蔓延しました。それらの伝染病の蔓延を防ぐために、ノミやシラミやだにを駆除する目的で、多量の DDT と BHC が散布されました。DDT も BHC も有機塩素系の物質でかなり有効な殺虫効果を示しました。長いこと入浴していない孤児たちには DDT の粉末を頭が白くなるほどに散布しました。年末の大掃除には必ず畳の下に白く DDT を撒いて蚤や虱の侵入を防いでいました。DDT は世界中で大量に使われてきましたが、中毒による死亡例はほとんど報告されていません。その後、ディルドリン、エンドリン、アルドリンなど種々の塩素系殺虫剤が開発されましたので、それらの化学構造式と致死量を図 6 - 4 に示しておきます。

しかし、これらの有機塩素系殺虫剤は神経細胞に起こる化学反応に影響を与えて、下、唇、顔などに知覚異常が現れ、運動神経の異常から震えが止まらないなどの多くの症状が現れました。しかも、これらの有機塩素系殺虫剤は脂肪に溶解易いために脳に蓄積し、新陳代謝し難く、運動失調、痙攣の症状が進行します。そのためこれらの有機塩素系殺虫剤の耐容量は約 5.0×10

7g/kg/日ほどと見積もられています。環境省 POPs 対策検討会資料によりますと、12 種類の有機塩素系化合物が 2004 年 2 月に 50 ヶ国の加盟国によるストックホルム条約に基づき法的に残留性有機汚染物質(POPs)に指定され、地球環境汚染の防止のため製造・使用が禁止または制限されました。

有機塩素系殺虫剤の *p*-ジクロロベンゼンは現在でも家庭で広く使用されていますが、長時間にわたり接触していると頭痛、吐き気、幻聴など各種の症状があらわれ、マウスに対する致死量は 2.56 g/kg、ラットに対する致死量は 500 mg/kg、人類に対する致死量は 857 mg/kg と動物に対す

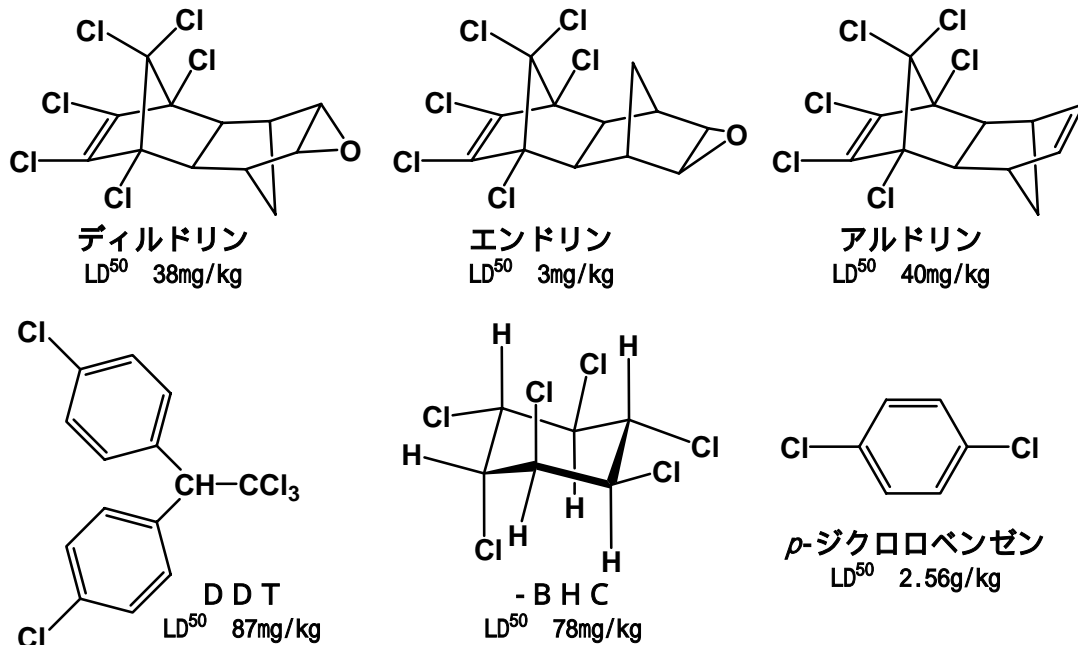


図 6 - 4 塩素系殺虫剤の化学構造式と致死量

る違いのあることも報告されています。人類は不利益を与える虫だけを選び分けることができず、全ての虫を駆除するように殺虫剤を使用しています。このように殺虫剤を大量に使い、

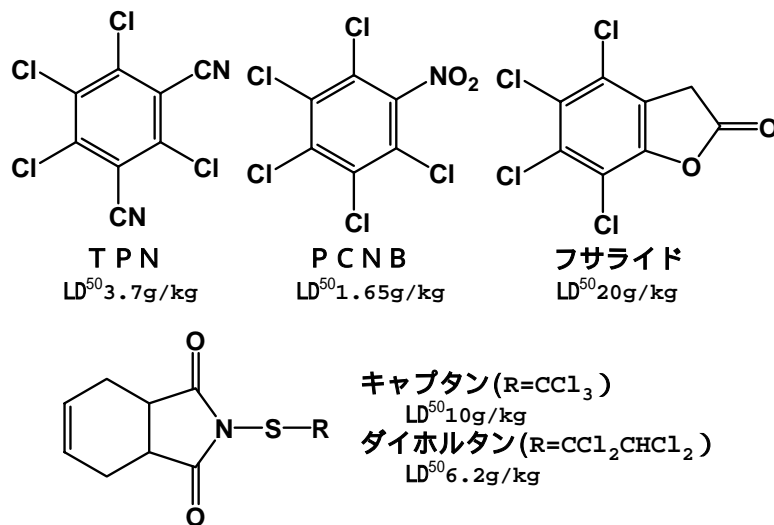


図 6 - 5 塩素系殺菌剤の化学構造式と致死量

毒の物質を撒き散らして無益の殺生をしています。これは殺虫剤の浪費であり、人類の驕りであり贅沢と考えられます。将来は必要以上に殺虫剤を散布することなく、必要最小限の虫を駆除する方法を確立するものと思います。

生物に対する作用の仕方は異なりますが、有機塩素系化合物は殺虫剤だけでなく殺菌剤としても有効に作用します。高い化学反応性を持つ有機塩素系化合物が SH 基や OH 基に作用して酵素の働きを阻害するために微生物の生命活動に影響を与えます。このような殺菌効果を持つ有機塩素系物質としては、図 6 - 5 に構造式で示すような農薬が使用されています。

これらの塩素系殺菌剤は致死量の値が大きく、急性の毒性は食塩や酢酸のような食品と同程度に弱いものです。しかし、ダイオキシンや PCB と同じように、塩素系殺菌剤はベンゼン環上に多くの塩素原子を持つ構造をしていますから、DNA などにも影響を与える可能性のある物質と考えられ、催奇形性や発がん性の危険があります。そのため、PCNB およびキャプタンの耐容量はそれぞれ 7×10^{-6} g/kg、 10×10^{-4} g/kg と見積もられています。

さらに、図 6 - 6 に構造式で示す 2 - メチル - 4 - クロロフェノキシ酢酸、2,4-ジクロロフェノキシ酢酸、2,4,5-トリクロロフェノキシ酢酸のエステルあるいは塩類はクロロフェノキシ系農薬と呼ばれています。この系統の農薬は植物成長ホルモンの作用を攪乱するため、植物の成長の調整剤や除草剤として用いられています。特にこのクロロフェノキシ系農薬は広葉の草木に顕著に作用しますから、米や麦の栽培の折に雑草となる広葉の草を除草することができます。しかし、これらの農薬は人類に対して悪性リンパ腫の発症などの発がん性、催奇形性、胎児毒性などが明らかになっています。

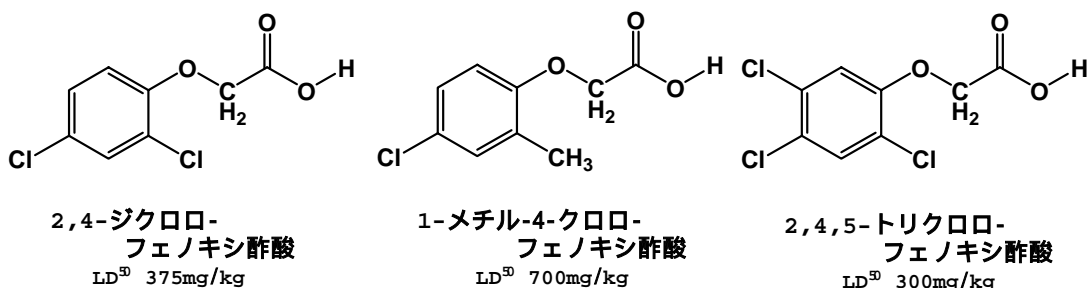


図 6 - 6 クロロフェノキシ系農薬の化学構造式と致死量

これらの多くの塩素系農薬は人類に対する強い毒性と土壌中への残留汚染が著しいため、既に製造や使用の禁止されているものもあり、現在使用されているものでも次第に規制されてゆく傾向にあります。この塩素系農薬の使用規制と使用量の減少も、単体塩素の需要の減少をもたらすため、ソーダ工業としては大きな問題になりつつあります。このように農薬を大量に使い、毒の物質を撒き散らして無益の殺生をしています。これは農薬の浪費であり、人類の驕りであり贅沢と考えられます。将来は必要以上に農薬を散布することなく、必要最小限の虫を駆除し、最小限の殺菌をし、最小限の除草をする方法が確立するものと期待します。

ハロメタンとハロエタン

塩化ビニル、酸化プロピレン、TDI、MDI などプラスチック関連の物質の製造のための単

体塩素の消費量に次いで、ハロメタンやハロエタンなどの塩素系溶剤と塩素系冷媒が単体塩素の需要の大きな部分を占めています。ハロメタンやハロエタンは図 6 - 7 に示すように、メタンやエタンなどの炭化水素と単体塩素を混合し紫外線照射あるいは高温加熱しますと、紫外線の吸収あるいは高温による結合の開裂で塩素分子から塩素ラジカルを生じる開始反応が始まります。生成した塩素ラジカルは炭化水素と反応してアルキルラジカルと塩化水素になり、さらにアルキルラジカルが塩素分子と反応して塩素ラジカルとハロメタンあるいはハロエタンになる連鎖反応が進行します。この反応系はラジカル同士が衝突して反応する停止反応が起こるまで継続しますから、触媒的な開始反応により反応系全体ではハロメタンあるいはハロエタンと塩化水素を生成します。

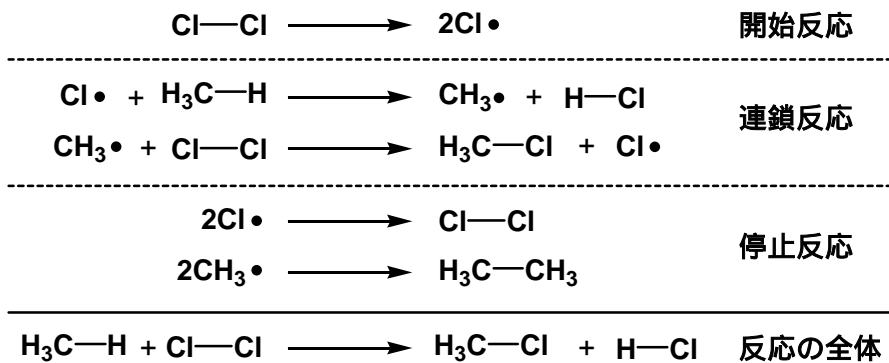


図 6 - 7 ハロメタンの生成反応

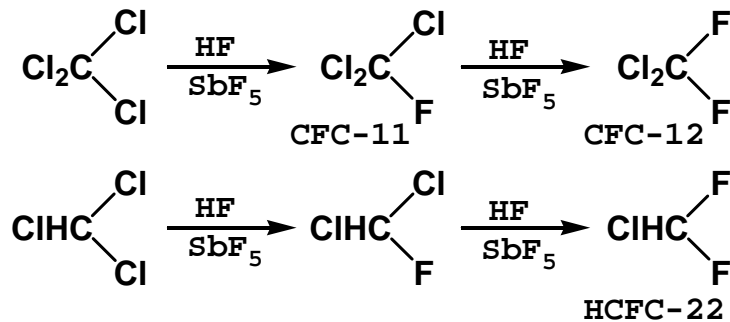


図 6 - 8 フロンの生成反応

このように合成されたハロメタンには塩素の数により塩化メチル、塩化メチレン、クロロホルム、四塩化炭素の 4 種類があり、ハロエタンには塩素の数およびその結合位置により 9 種類、2 重結合を含むハロエチレンには塩化ビニルなど 5 種類があります。これらの塩素原子を含むハロメタンあるいはハロエタンに五フッ化アンチモンなどの触媒存在下フッ化水素を作用させると、図 6 - 8 のように塩素原子がフッ素原子に置き換わるフッ素化反応が進行し、フロンと呼ばれる含フッ素ハロメタンあるいは含フッ素ハロエタンが生成します。

これらの有機ハロゲン化物のうちで工業的に広く用いられてきたハロメタンおよびハロエタンの熱的性質、引火性、溶解性、毒性を表 6 - 2、表 6 - 3 にまとめました。これらの有機ハロゲン化物は何れも比較的難燃性で、分子中のハロゲン原子の数が多くなるほど引火性はなくなります。特に四塩化炭素は古くは消火剤として用いられたこともありますが、消火後に残る四塩化炭素の蒸気が毒性を示すために近年では用いられなくなってしまいました。表 6 - 3 に示す

誘電率の値から

分かるように、これら有機ハロゲン化合物はメタンやエタンと同じように油の性質を持っていますから、親油性の物質を良く溶かします。炭素-フッ素結合は炭素-水素結合よりも大きな110kcal/molの結合エネルギーを持っており、炭素-塩素結合もかなり大きな77kcal/molの結合エネルギーを持っています。そのためハロメタンやハロエタンを構成する結合は簡単には開

表6-2 ハロメタン、ハロエタン類の熱的性質

化合物名	分子式	融点	沸点	気体比重	比熱	融解熱	気化熱
メタン	CH ₄	-182.6	-161.4	0.57		14.30	122.50
塩化メチル	CH ₃ Cl	-97.0	-24.0	1.80			98.48
塩化メチレン	CH ₂ Cl ₂	-97.0	41.0	3.03	0.29	12.90	78.70
クロロホルム	CHCl ₃	-63.5	62.0	4.26	0.23	18.40	58.70
四塩化炭素	CCl ₄	-23.0	76.7	5.49	0.20	3.90	46.60
フロン (CFC-11)	CCl ₃ F	-111.0	24.0	4.91	0.21		43.10
フロン (CFC-12)	CCl ₂ F ₂	-158.0	-30.0	4.32	0.23		39.47
フロン (CFC-113)	CCl ₂ FCClF ₂	-35.0	48.0	6.69	0.22		35.07
フロン (CFC-114)	CClF ₂ CClF ₂	-94.0	38.0	6.10	0.24		32.51
フロン (CFC-115)	CClF ₂ CF ₃	-106.0	-39.0	5.52	0.29		30.11
フロン (HCFC-22)	CHClF ₂	-146.0	-41.0	3.09	0.30		55.81
フロン (HCFC-124)	CHClF ₂ CF ₃	-119.0	-12.1	4.88			
フロン (HCFC-141 b)	CH ₃ CCl ₂ F	-103.5	32.1	4.18			
フロン (HCFC-142 b)	CH ₃ CClF ₂	-131.1	-9.8	3.59			
フロン (HFC-134a)	CH ₂ FCF ₃	-101.0	-26.2	3.64			
エタン	CH ₃ CH ₃	-172.0	-88.0	1.08		22.50	116.90
塩化エチル	CH ₃ CH ₂ Cl	-138.7	12.3	2.30	0.43	16.40	91.40
1,1-二塩化エタン	CH ₃ CHCl ₂	-98.0	59.0	3.54			
塩化エチレン	CH ₂ ClCH ₂ Cl	-40.0	84.0	3.54	0.30	21.30	72.20
トリクロロエチレン	CHCl=CCl ₂	-73.0	86.7	4.69	0.22		
1,1,2-三塩化エタン	CH ₂ ClCHCl ₂	-35.0	114.0	4.76	0.27	20.68	
テトラクロロエタン	CHCl ₂ CHCl ₂	-44.0	146.5	6.00	0.27		
テトラクロロエチレン	CCl ₂ =CCl ₂	-22.0	121.0	5.93	0.22		

裂せず化学的に不活性で熱的にも安定な性質を示します。

ハロメタンもハロエタンも融点は極めて低く、沸点もあまり高くありませんから、液化し易い気体あるいは気化し易い液体の状態では地球上では存在しています。これらの性質を持つハロメタンとハロエタンは水にあまり溶けない油性の物質を溶かす溶媒として極めて適しています。油性物質に対してベンジンやリグロインなどの石油系の溶媒と類似の溶解度を持ちながら、引

火性が弱いので火気に対する安全性が高く、揮発性が高いので溶媒の除去が容易です。そのため、衣料品のドライクリーニングや電子部品の洗浄のための溶媒として広く用いられてきました。

フッ素を含むハロメタンは氷点下の沸点と融点示すため室温では気体ですが、わずかに圧力を

加えるだけで容易に液化し、メタンやエタンと異なり引火性を持ちません。そのため、化粧品や殺虫剤などの各種の薬剤や塗料を噴霧するためのスプレーガスとして近年広く用いられるようになってきました。

表 6 - 3 ハロメタン、ハロエタン類の溶解性と毒性

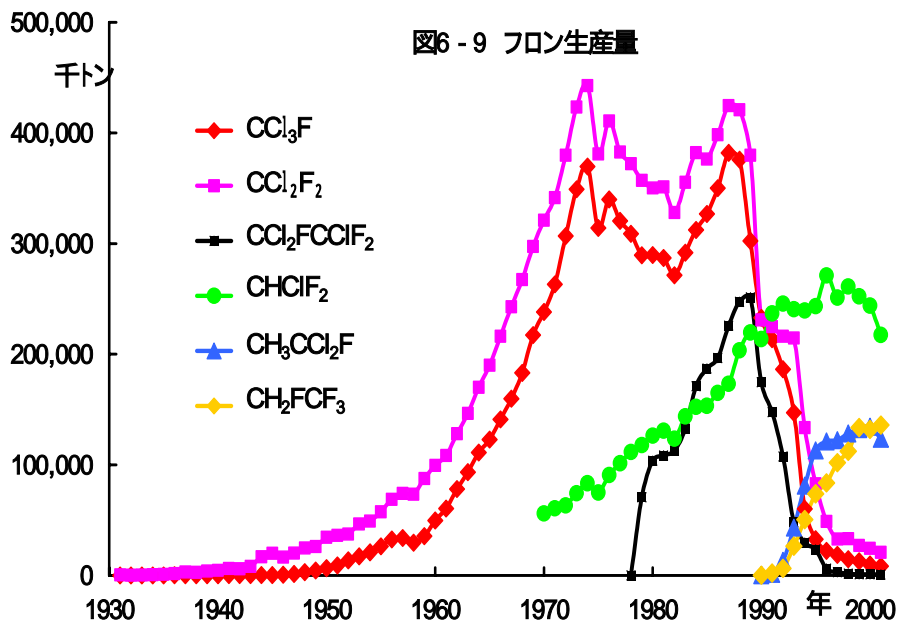
化合物名	分子式	比重	引火点	誘電率	水溶性 (g/m l)	毒性 (LD ⁵⁰)	毒性 (ppm)
メタン	CH ₄	0.55	536	1.70	0.019		
塩化メチル	CH ₃ Cl	1.00	631	12.60			3150
塩化メチレン	CH ₂ Cl ₂	1.33	なし	9.08	0.027	3.0g	
クロロホルム	CHCl ₃	1.48	なし	4.81	0.0074		
四塩化炭素	CCl ₄	1.59	なし	2.24	0.0008	7.9g	25
フロン (CFC-11)	CCl ₃ F	1.49	なし	2.28	1	1.74g	100000
フロン (CFC-12)	CCl ₂ F ₂	1.50	なし	2.13	0.28	3.38 g	800000
フロン (CFC-113)	CCl ₂ FCF ₂	1.56	なし	2.41	0.2	43g	200000
フロン (CFC-114)	CClF ₂ CClF ₂	1.53	なし	2.26	0.13	2.25g	87000
フロン (CFC-115)	CClF ₂ CF ₃	1.30			0.058		800000
フロン (HCFC-22)	CHClF ₂	1.21		6.11	3		220000
フロン (HCFC-124)	CHClFCF ₃	1.40	なし				230000
フロン (HCFC-141 b)	CH ₃ CCl ₂ F	1.23			0.42	5.0g	62000
フロン (HCFC-142 b)	CH ₃ CClF ₂	1.11			0.19		128000
フロン (HFC-134a)	CH ₂ FCF ₃	1.21			0.15		50000
エタン	CH ₃ CH ₃	0.45			0.0047		
塩化エチル	CH ₃ CH ₂ Cl	0.92	-50		0.0057		
1,1-二塩化エタン	CH ₃ CHCl ₂	1.18			0.006	14.1g	
塩化エチレン	CH ₂ ClCH ₂ Cl	1.26	13		0.011	770mg	
トリクロロエチレン	CHCl=CCl ₂	1.46	なし	3.42	0	5.86g	7800
1,1,2-三塩化エタン	CH ₂ ClCHCl ₂	1.44			0		
テトラクロロエタン	CHCl ₂ CHCl ₂	1.59			0.003	8 0 mg	
テトラクロロエチレン	CCl ₂ =CCl ₂	1.63		2.30	0.0002	8.85g	6000

一般に低い沸点を持つ物質は気体の状態で加圧しますと液化し温度が上がります。空気や水でその液体を冷やし、適度に冷えた液体を減圧にして気化させると、このとき気化熱を奪いま

すから、気体になった物質は温度が下がります。この操作を繰り返しますと、加圧部分を水や空気で冷やすだけで、減圧部分では氷点下まで冷却されます。このようにして冷却装置は加圧するためのエネルギーで冷却するもので、このように液化と気化を繰り返す物質は熱の移動をする冷媒として働きます。

す。フロンと呼ばれるフッ素を含むハロメタンやハロエタンはメタンやエタンと同程度の沸点と気化熱を持っており、しかも火気に対する安全性と化学反応に対する不活性を兼ね備えています。このため冷蔵庫や冷房装置の冷媒として各種のフロンが広く用いられるようになっていきます。

ハロメタンやハロエタンはこのように溶媒としてもスプレーガスとしても冷房装置の冷媒と



しても極めて優れた性質を示すために、大量に生産され、これに伴い単体塩素も大量に消費されるようになりました。特にフッ素原子を含むフロンは火気に対する安全性と化学反応に対する不活性を兼ね備えているため、図 6 - 9 に示すように 1960 年以後急激に生産量を伸ばしてゆきました。ハロメタンやハロエタンなどの塩素系溶剤と塩素系冷媒が単体塩素の需要の大きな部分を占めるようになり、水酸化ナトリウムの需要との釣り合いの点でソーダ工業にとっては重要な工業製品と考えられます。

塩素漂白と塩素殺菌

単体塩素は種々の物質と反応して塩素陰イオンになりますが、この反応で単体塩素は塩素イオンまで還元され、相手となる物質を酸化しますから、強力な酸化剤として働きます。この酸化する能力を利用して、染料の合成、紙やパルプの漂白、水道水の殺菌がなされており、単体塩素のそのための消費量は全消費量の 20%にも及んでいます。このときの塩素の物質収支を考えると、食塩の電気分解による塩素イオンの酸化で単体塩素を製造し、物質の漂白や殺菌の過程で単体塩素を還元して塩素イオンに戻しています。しかし、酢酸やアセトアルデヒドやエタノールなど限られた種類の物質は単体塩素と反応して、図 6 - 10 に示すようにクロロホルムを副生しながら酸化分解してゆきます。このようにクロロホルムを副生する物質は種類としては

限られていますが、生命活動に密接に関係する物質が多く、広く地球上に分布しています。

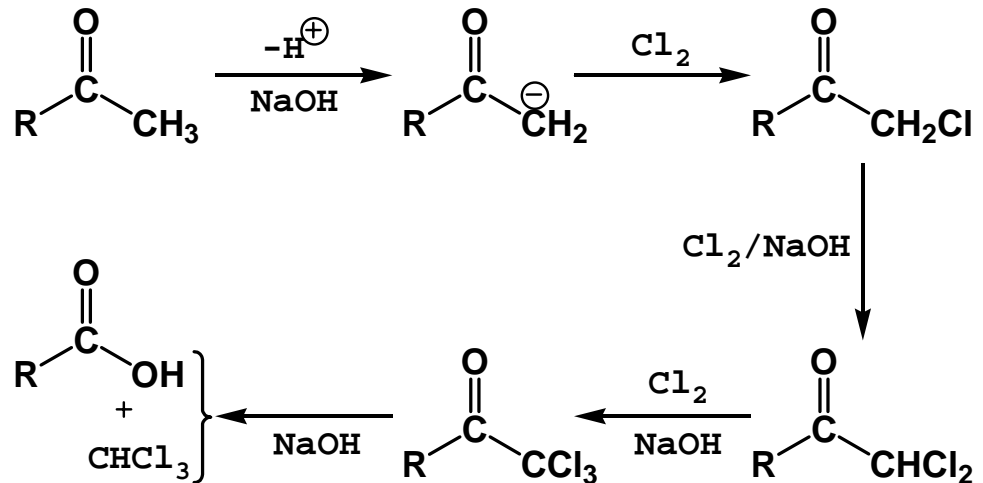


図 6 - 10 クロロホルムを副生する反応の機構

木材にはリグニンと呼ばれる黄色の色素が 20~30%も含まれていますから、木材からパルプや紙に加工しても、日焼けしたような黄色の紙にしかなりません。そのためパルプや紙に加工する工程の中で、この色素を酸化し無色の物質に漂白するために単体塩素が大量に使用されています。単体塩素はリグニンなどの大部分の有機化合物と反応して塩素イオンに還元されますが、同時にリグニンは酸化されて塩素原子を含む芳香族化合物に変化します。このときの塩素の物質収支を考えると、食塩の電気分解による塩素イオンの酸化で単体塩素を製造し、リグニンの漂白の過程で単体塩素を還元して塩素イオンに戻すと共に、リグニンを酸化しています。結局、副産物に水酸化ナトリウムを生産しますが、紙やパルプを白く漂白することは多量のエネルギーを消費するものであり、白い紙を無駄に使うことは人類の贅沢ではないでしょうか。

日本国内には水道法という法律が施行されており、上水道に供給する水の水質基準が箇条書 6-1 に掲げるように詳細に規定されています。これにより、供給される水は種々の毒性物質や病原生物、異常な味や臭いから汚染されていないことが義務付けられています。さらに、第 2 項では衛生上の措置として給水の残留塩素を遊離残留塩素として 0.1mg/L 以上保持するよう規定しています。このことは水道水を単体塩素あるいは単体塩素を発生する薬品で殺菌せねばならず、しかも、水道の各末端まで供給される水道水には単体塩素が過剰に残らなければならないと規定しています。当然供給元から近い末端と遠い末端では単体塩素の消費される量が異なりますから、必要量以上に単体塩素が注入され、残留することになります。このようにして残留した単体塩素は水道水の特異な悪臭の原因になるばかりでなく、大気中に拡散してゆきます。

種々の物質が溶け込んでいる水を殺菌するときには、当然それらの不純物も単体塩素で酸化されます。この不純物の酸化反応において単体塩素が塩素イオンに変化する場合には、あまり憂慮すべきことはないように思います。しかし、生命活動に密接に関係する酢酸やアセトアルデヒドやエタノールなどの物質は広く地球上に分布しており、クロロホルムを副生します。このクロロホルムは若干の毒性を持ち、極めて厳しい排出基準で規制された物質です。水道のための水、特に有機物質の多く含む水を単体塩素で殺菌することはクロロホルムを副生する問題を含んでいますから、必要以上に水道水の塩素殺菌はすべきでないように思います。

箇条書 6-1 水道法（水質基準）

第4条 水道により供給される水は、次の各号に掲げる要件を備えるものでなければならない。

1. 病原生物に汚染され、又は病原生物に汚染されたことを疑わせるような生物若しくは物質を含むものでないこと。
2. シアン、水銀その他の有毒物質を含まないこと。
3. 銅、鉄、弗素、フェノールその他の物質をその許容量をこえて含まないこと。
4. 異常な酸性又はアルカリ性を呈しないこと。
5. 異常な臭味がないこと。ただし、消毒による臭味を除く。
6. 外観は、ほとんど無色透明であること。

2 前項各号の基準に関して必要な事項は、厚生労働省令で定める。

水中に単体塩素を注入することによって水中に残留した有効塩素をいい、次亜塩素酸などの遊離有効塩素（遊離残留塩素）とクロラミンのような結合有効塩素（結合残留塩素）に区分される。残留塩素の測定にはオルトトリジン法とDPD法がある（水道整備課長通知）。衛生上の措置として給水の残留塩素を遊離残留塩素として0.1mg/L（結合残留塩素の場合は0.4 mg/L）以上保持するよう規定している（水道法施行規則16条）。なお、オルトトリジン法は平成12年12月26日付け通知により平成14年4月1日より検査方法から削除され、新たにDPDによる吸光度法が採用されている。

人類は本来病原生物に対してかなり抵抗力を持っていますから、水道水も完全に滅菌する必要はないように思います。自然災害や生活環境の悪化などにより病原生物による伝染病の蔓延の危険が増加する場合に限り、水道水の単体塩素濃度を上げるよう注入量を変化させる弾力的な運用が可能と思われます。このような運用により多量のエネルギーを使って製造した単体塩素を無駄に消費することを避けられるのではないのでしょうか。さらに、特異な悪臭を持つ水道水を本来の水に近い香りに改善することができるでしょう。1000mm/年以上も平均降水量のある日本の各地には美味しい水が多く湧き出していますから、わざわざヨーロッパアルプスの水をビンに詰めてミネラルウォーターを輸入する必要がなくなるのではないのでしょうか。無益な単体塩素の大気への拡散ばかりでなく、ミネラルウォーターのためのビンの原料や詰める手間や輸送の経費など、水道水への単体塩素注入量を調節する運用で簡単に節約できる浪費は、人類の贅沢ではないのでしょうか。

オゾンホール

オゾンは分子式 O_3 、結合距離は 1.28Å、結合角は 127 度を持つ酸素同素体であり、地上の大気中に約 0.05ppm 含まれ、空気(酸素)あるいは水の電気分解により製造することができます。オゾンは青色で特異臭を持つ有毒な気体で、-111 で青色の液体に、-193 で固体になります。高濃度では不安定で爆発的に酸素に分解します。水には極く少ししか溶けませんが、低温でメタノールあるいは塩化メチレンに多少（約 $4 \times 10^{-2}M$ ）溶け青色の溶液になります。オゾンは強い酸化性を示すため、古くから酸化剤として各種の化合物の合成に用いられてきました。近年はその酸化性を利用してプールの水の浄化殺菌などにも用いられています。

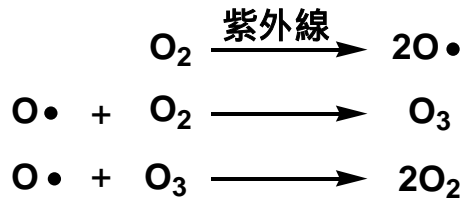
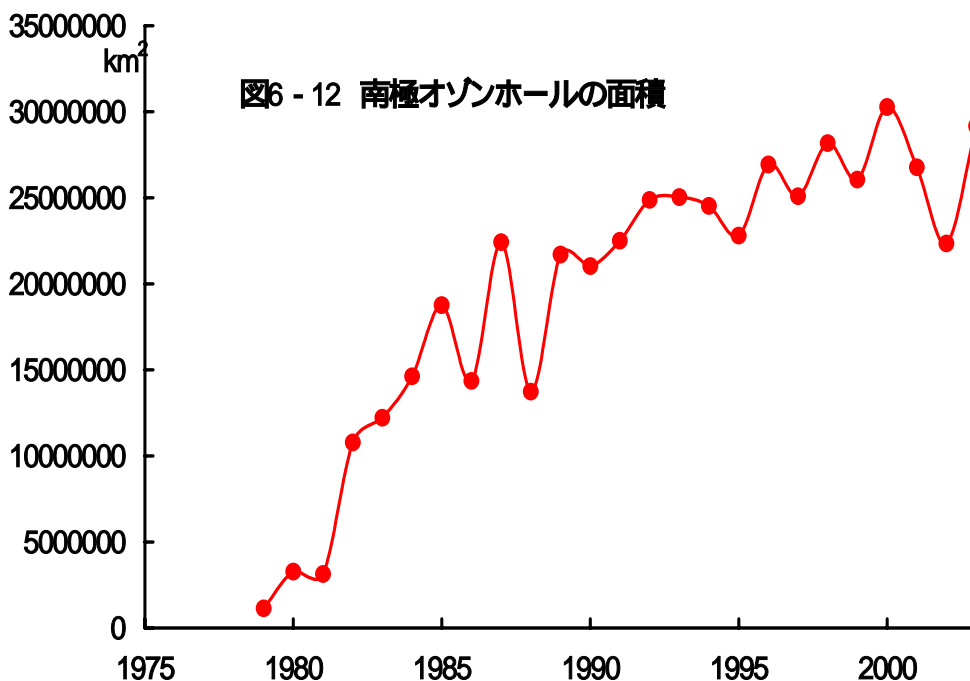


図 6 - 11 紫外線によりオゾンの生成する機構

大気の約 1/5 を占める酸素分子が紫外線を吸収すると、図 6 - 11 に示すような反応が進行してオゾンが生成します。紫外線の強い夏の季節に自動車の排気ガスの濃度が高くなりますと、排気ガスに含まれる窒素酸化物が触媒の働きをして、酸素からオゾンが生成します。ここで生成したオゾンは光化学オキシダントの主成分であり、目に沁みたり、咳や喉痛の原因になります。地球のはるか上空では太陽から降り注ぐ強い紫外線を直接酸素分子が吸収してオゾンの生成を続けており、長い年月の間に地球を包むようにオゾンを多く含む層が形成されました。

紫外線は高いエネルギーを持った光ですから、オゾンの生成だけでなく生物にとっては有害な作用をします。人類は多少の紫外線に対しては、皮膚の中にメラニンという黒い色素を作り防御の体制を作りますが、太陽からの強い紫外線を直接浴びていると、ほとんど全ての生物は絶滅すると思われる。幸い、地球を包むオゾン層が紫外線を吸収して、地表を太陽の強い紫外線から遮蔽する働きをしています。

1970 年代に南極の上空でこのオゾンの多く含む層に穴の開いていることが発見されました。そのオゾン層の薄くなったところをオゾンホールと呼んでいます。図 6 - 12 に示すようにこのオゾンホールが年々成長し、南極大陸より大きくなってしまいました。このままの勢いで拡大成長してゆきますと、地球を包んでいるオゾン層がなくなり、太陽からの強い紫外線が地表に届いてしまうのではないかと危惧されました。多くの地球科学者がその原因について考えま



したが、その中でオゾンホールの破壊は人類の使い捨てたハロメタンやハロエタンが引き起こしているという説が多くの研究者の支持を得ました。図 6 - 13 に示すような化学変化により、大気中に拡散したハロメタンやハロエタンの炭素 - 塩素結合は上空で太陽からの強い紫外線を吸収し、開裂して塩素ラジカルを生成します。この塩素ラジカルが反応してオゾンが分解して酸素と酸化塩素を生成しますが、酸化塩素は反応性が高くさらにオゾンと反応して塩素ラジカルを再生してしまいます。この反応はラジカル同士が反応する停止反応が起こるまで続く連鎖反応ですから、1 つの塩素ラジカルが生成しますと多くのオゾンが酸素に分解してゆきます。実験室でフラスコの中にオゾンとハロメタンを入れて紫外線を照射して調べて見ますと、確かにオゾンが分解されることからこの一連の化学反応は検証されました。

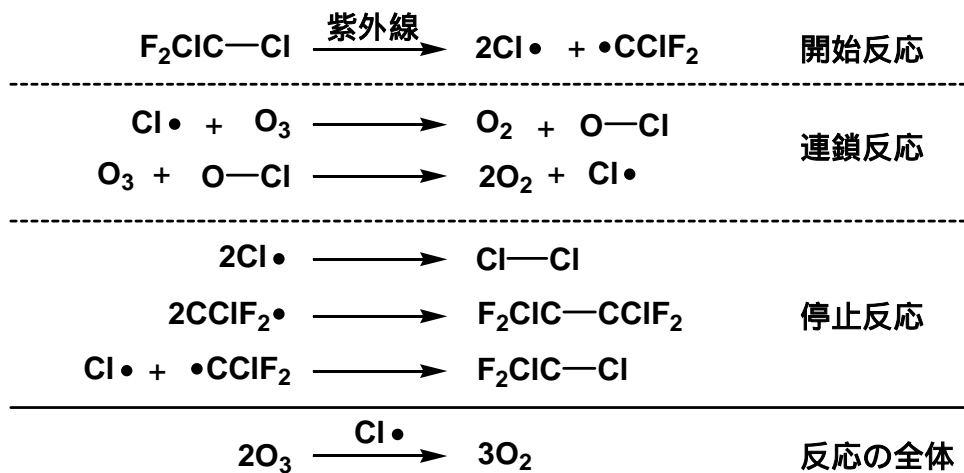


図 6 - 13 ハロメタンやハロエタンによりオゾンの分解する機構

オゾン層が上空になくなってしまうと、人類も紫外線に直接曝されることになり非常に危険ですから、あわてた環境省などの関係機関は急いでハロメタンやハロエタンの製造、使用、排出を規制するようにしました。しかし、 CCl_3F や CCl_2F_2 などのハロメタンやハロエタンは有機溶媒や冷媒として広く使われるようになっていましたから、簡単に製造禁止や使用禁止にすることができません。やむを得ず、代替品としてオゾンの分解する速さが遅く、溶媒や冷媒としての用途に合った $CHClF_2$ や CH_3CCl_2F などの水素原子を含むハロメタンやハロエタンを選び許可するようにしました。1990 年代に為されたそれらの製造や使用の規制と指導によるハロメタンやハロエタンの生産量の変化は図 6 - 9 にはっきりと現れています。これらの規制の効果がある程度顕れているかのように、図 6 - 12 で分かるようにオゾンホールの拡大の速度は鈍ってきています。

しかし、オゾンホールがハロメタンやハロエタンによって拡大するという説にもいくつかの疑問点が残っており、ハロメタンやハロエタンだけ規制すれば全て解決できるとは思えません。第 1 の疑問点は現在の水道法では水質保全のために塩素殺菌を義務付けており、しかも、全ての水道末端まで単体塩素が残留するほどの過剰の単体塩素を注入するように規制しています。前節で述べたように、病原生物の塩素殺菌においてはハロメタンを副生することが考えられます。ここで副生するハロメタンが当然オゾン層の破壊の原因になることも考えられます。さらに、残留した単体塩素は大気中に拡散してゆきます。オゾン層の破壊が塩素ラジカルの発生に

起因すると考えられていますから、図 6 - 7 に説明しました塩素分子が紫外線を吸収して塩素ラジカルに分解する反応もオゾン層を破壊する原因になると思われます。現在考えられているオゾン層破壊の機構に基づけば、水質保全のための塩素殺菌はハロメタンやハロエタンの排出と同じ程度に多くの問題を含んでいることとなります。

近年、水質保全のためにオゾン酸化による殺菌の技術がプールなどの閉鎖系の水に対して導入されています。オゾンは酢酸やアセトアルデヒドやエタノールなどに対してもハロメタンを生成することはありませんし、大気中に拡散しても塩素ラジカルを発生することはありません。水道水の水質保全のために塩素殺菌からオゾン殺菌に切り替えることはオゾン層の破壊を防ぐ有効な方策と思われます。しかし、大気中に拡散したオゾンは光化学オキシダントと同じ毒性を人類にもたらします。単体塩素と若干異なってはいますが、オゾンも芳しくない臭い匂いを持っていますから、残留するほどに過剰に使用してオゾン殺菌することは適当でないと思われます。さらに、単体塩素の消費量が減少する結果になりますから、水酸化ナトリウムの需要との釣り合いにおいて、ソーダ工業にとっては大問題になると思われます。

第 2 の疑問点としてはハロメタンやハロエタンが先進工業国で主に排出されており、そのハロメタンやハロエタンが大気中に拡散しても南極に集中するとは考えられません。北半球に多くの先進工業国が点在していることから北極にもハロメタンやハロエタンは当然拡散していると思われます。にもかかわらず、何故、南極上空だけにオゾンホールが生まれ、北極上空にはオゾンホールはほとんど観察されないのでしょうか。東京やニューヨークの上空など地球の至る所にオゾンホールが生まれても不思議はないのではないのでしょうか。世界中の研究者が協力して、1990 年以降は北極上空のオゾン層の観測を続けていますが、その結果北極上空のオゾン層でもオゾンの減少が観測されています。しかも、北極上空のオゾンの濃度変化と北極地方の気温の変化の間に関連性が見出されてきました。北極地方の成層圏の低温域が広いときにオゾン層のオゾンの濃度が減少しています。この温度との相関性の現象とハロメタンやハロエタンがオゾンを分解する化学反応とはあまり結びつかないように思われます。これからのさらなる研究が必要と思われます。

さらに、第 3 の疑問点は表 6 - 1 に纏めたようにハロメタンやハロエタンの気体の比重が 4 倍以上も空気の比重より重いことです。一般に比重の重い気体は下の方に沈み、軽い気体は上の方に昇ってゆきます。空気の温度を気温より 100 高くすると空気の比重は 25%軽くなりますが、空気がこのようにわずかに軽くなっただけで熱気球を上空に浮き上がらせることができます。同じように地表の空気が夏の陽に暖められて軽くなると、地上 10000m 以上にも上昇気流が起こり入道雲が発達します。このようなわずかな気体の比重の違いでも、重い気体は下の方に沈み、軽い気体は上の方に昇ってゆきます。気体の拡散運動や大気の大気対流現象が活発に起こっても、比重が 4 倍以上も違う気体は容易に上空に拡散して行くとは思えません。その上、南極や北極のように気温の低い地域では、下降気流が起こりますから、地球規模の大気対流を考えると極地の上空には重い気体が局在し難いと考えられます。比重の重いハロメタンやハロエタンが高い高度にあるオゾン層にまで達するためには、地表ではかなり高いハロメタンやハロエタンの濃度を保たねばならないことになってしまいます。実際に 2000 年 8 月に岩手県三陸の上空で東京大学の研究者が気球を用いて観測した結果、上空の希薄な大気の中に約 10^{10} 分の 1 しかハロメタンやハロエタンが含まれていないことを報告しています。このような希薄な濃度の

状態で生成した塩素ラジカルとオゾンが衝突する確立は極めて低く、オゾンの分解反応が観測できるほどに早くなることは考え難く思います。

このように幾つかの疑問は残りますが、環境省や関係機関はハロメタンやハロエタンの排出がオゾン層の破壊の原因であると結論し、その製造、使用、排出に厳しい規制をしています。この規制は単体塩素の需要に大きく影響を与えており、水酸化ナトリウムの需要との釣り合いの点でソーダ工業にとっては大きな問題になっています。

ソーダ工業の将来

ほとんど無尽蔵の食塩は世界の至る所で入手できる最も安い資源と考えられます。この無尽蔵の食塩はおもに炭酸ナトリウムの製造と食塩の電気分解の 2 つの化学工業の主原料に充てられています。これらの 2 つの化学工業はソーダ工業と呼ばれ、膨大なエネルギーを費やして炭酸ナトリウムと水酸化ナトリウムを製造していますが、同時に炭酸ナトリウムの製造では塩化カルシウム、食塩の電気分解では単体塩素が副生してきます。食塩の電気分解においては水酸化ナトリウムと単体塩素はほぼ 1:1 の割合で生成してきますが、単体塩素は海水中や大気中への廃棄や長年にわたる貯蔵などのできない極めて毒性の強い危険な工業製品ですから、両者の消費量も釣り合うことが望まれます。近年、水酸化ナトリウムの消費量は増加する傾向にありますから、単体塩素の消費量の増加も望まれます。

現在、表 6 - 1 に示すように、塩化ビニルなどのプラスチックの製造、医薬や農薬など種々の化学薬品の合成、紙やパルプの漂白、水道水の殺菌、ハロメタンなどの溶媒や冷媒の製造などに単体塩素は使われています。しかし、医薬や農薬は強い毒性のために使用が制限される傾向にあります。塩化ビニルは廃棄処理の折に PCB の発生の危険があり、利用が敬遠されつつあります。オゾン層の破壊の原因がハロメタンやハロエタンと考えられていることから製造も利用も極端に制限されるようになっていきます。さらに、水道水の殺菌もオゾン層の破壊などに関連して、近い将来オゾン殺菌に変更されるのではないかと考えられます。このように種々の問題から、単体塩素の消費量が減少する傾向にあり、益々その傾向は顕著になってくると思われ、日本の化学工業における大きな問題になりつつあります。

この大問題の解決策としては、多少効率が悪く経済的に不利ではあっても、食塩の電気分解によらず、炭酸ナトリウムの熱分解など別途の方法により水酸化ナトリウムを製造してゆくことが考えられます。例えば、ソルベイ法により炭酸ナトリウムを合成し、その後熱分解などで水酸化ナトリウムを製造すると、2.5 倍以上の経費が掛かり極めて経済的に不利になりますが、極めて毒性の強い危険な工業製品の単体塩素を副生しませんから、塩素化合物の使用に伴う問題は回避されます。現在、水酸化ナトリウムは最も安価で利用しやすい塩基性の薬品として使われていますが、入手し難い高価な塩基性の薬品になり、代替品として水酸化カルシウムが最も安価で利用しやすい塩基性の薬品となる可能性があります。

他の解決策としては水酸化ナトリウムの消費量を減少させる方法です。水酸化ナトリウムの主な用途は強い塩基性の薬品およびナトリウムイオンの供給源の 2 つに大別することができます。水酸化ナトリウムが高価な塩基性の薬品になるときは、水道水や排水の中和などの用途は代替品の水酸化カルシウムで置き換えることが可能と思われれます。しかし、木材からのパルプの製造、アルミニウム原料の調製、石鹼や洗剤の製造、化学繊維や工業薬品の製造にはナト

リウムイオンの高い水溶性が利用されており、水酸化カルシウムでは代替できません。石鹼や洗剤は油分を洗浄するのに極めて有効な物質ですが、現在はかなり過剰に使用されています。そのため、排水は高いBOD（生化学的酸素要求量）の値を示して、石鹼や洗剤が拡散していますから、地球環境を汚染するばかりでなく、無用の水酸化ナトリウムの浪費になり、意味のない贅沢となります。使用量を必要最小限になるように、食器の洗浄や洗濯の洗剤の使用法を工夫すべきではないでしょうか。さらに、第3章で述べたアルミニウム金属の無用の浪費は水酸化ナトリウムの無用の浪費にもなり、過剰の単体塩素を生み出すこととなりますから、大きな贅沢といえるでしょう。

7. エネルギーを無闇矢鱈に使う贅沢

エネルギーの釣り合う地球

地球全体が受ける太陽の光エネルギーは毎秒 1.5×10^{13} kcal もの膨大なもので、その 70% に相当する毎秒 1.0×10^{13} kcal のエネルギーは大気中および地表に吸収されて地球の持つ総エネルギー量を増加させます。逆に温度の低い宇宙空間に地球が熱や光を輻射するために減少する総エネルギー量は、自転や公転などの地球の運動が遅くなった時に発生するエネルギーと、太陽から供給される光エネルギーの総和に釣り合っています。45 億年という長い年月の間に化石燃料などの形でわずかなエネルギーを蓄えただけで、地球の持っていた運動エネルギーの変化と太陽から供給される光エネルギーが地球の消費するエネルギーとほぼ釣り合うようになり、現在の状態の地球を維持できるようになって来ました。

このように地球はエネルギーのシーソーに乗っており、エネルギー的には外界から遮断され独立した一つの世界と考えることが出来ます。そのため、地球の中ではエネルギー不滅の法則が成り立っており、光エネルギー、熱エネルギー、運動エネルギー、化学エネルギー、電気エネルギーなど色々な形にエネルギーは相互に変換されていますが、地球のエネルギーの総量は変化がありません。

地球の自転や公転などの運動エネルギーは海水面を定期的に上下させる潮汐現象をもたらし、大気の上層部で偏西風を吹かせます。地球に吸収された太陽の光エネルギーは熱エネルギーに変換されて大気や地表を温めます。しかし、地球の自転軸と公転軸の間に傾きがあるため、地球上の場所により太陽からの光エネルギーの量には差が生じます。その上、地表の材質の違いにより暖まり方が必ずしも一様でないため、地球上の場所により温度差が生じます。この温度差は対流を引き起こし、大気中に低圧部と高圧部を生みますから大気の流れとなります。また、海水中の温度差は黒潮や親潮やメキシコ湾流となって海水の対流を引き起こします。太陽の光エネルギーは地表の水を蒸発させて雲を生み、大気の流れに乗って海から遠く離れた地まで水蒸気は移動し、雨や雪を降らせる循環を引き起こします。水蒸気の移動により高地に降った水は海まで流れ下ります。このとき太陽から供給された熱エネルギーは水の運動エネルギーに変換されますが、雷などの電気エネルギーに変換されることもあります。さらに、地表に到達した太陽の光を吸収して植物は二酸化炭素からブドウ糖への還元により化学エネルギーに変換されます。高い化学エネルギーを持ったブドウ糖などの還元物質は二酸化炭素まで酸化されることにより、その化学エネルギーは生物の生命を維持するために消費されます。人類が生活に利用しているエネルギーも本来的には、このように平衡に達した各種のエネルギーの一部と考えられるものでした。また、化学エネルギーを持った還元物資は、ごく一部ですが石炭や石油などの化石燃料として 45 億年の間に蓄えられてきました。

光エネルギーから、熱エネルギー、運動エネルギー、化学エネルギー、電気エネルギーなど色々な形にエネルギーは変換されていますが、外界から遮断され独立した一つの世界として、地球の中ではエネルギー不滅の法則が成り立ち、一定の潮流や潮汐運動を続け、規則的な気候変化を維持するように平衡になって来ました。爆発したり、衰弱したりして太陽が光エネルギーの供給を乱さない限り、地球上は将来にわたって安定した進化を続けていくと思われれます。

幸い太陽は長年にわたり一定の光エネルギーを地球に供給し続けていますが、詳細に調べて

みますとわずかながらエネルギーの供給量に変化があります。太陽の表面には黒点と呼ばれるニキビのような吹き出物が11年周期で増減します。太陽が熱く燃えると、若さの象徴のようなこの吹き出物ができますから、太陽からのエネルギーの供給量が増加します。1958年以来地球に到達する宇宙線の強度が測定されてきましたが、その結果、黒点の増減に関して11年周期で10～15%宇宙線の強度の変化することが明らかになってきました。宇宙線の増減は太陽から発散される宇宙線の増減でない機構が考えられているようですが、太陽の活動が活発になると影響することを意味しています。

農林水産省の研究機関が1978年に出した作物の冷害に関する報告によれば、冷害を引き起こす気候変動の原因は太陽の黒点の増減と火山の大噴火によると考えられています。歴史に残る江戸時代の三大飢饉とよばれる享保(1732年)、天明(1782年)、天保(1833年)の飢饉はいずれも黒点の下降期にあたり、気温が下がって冷害になりました。また、過去の記録から気象学者ラ-ナ-は、11年周期で変化する太陽の黒点の数が最小となるとときとブラジルのコ-ヒ-産地での降霜被害の間には極めて高い相関性があり、20世紀に限れば発生した10回の霜害のうち9回に当てはまると考えております。太陽の黒点による太陽から供給されるエネルギーが多く見積もっても10%程度の変化に過ぎなくても、地球上におけるエネルギーの平衡の状態を乱すことになり、地球全体が大きな変化に見舞われることになると考えられます。

人類が使用するエネルギー量

総務省統計局「世界の統計 2003」によりますと、近年、人類は表7-1に示すような量のエネルギーを消費しています。全人類が1年間に全世界で消費しているエネルギー量は 9.5×10^{16} kcalと推測されています。地域別にはアジア、北アメリカ、ヨーロッパの地域で多くのエ

表7-1 国・地域別 一次エネルギー年間消費量

国(地域)	年次	エネルギーの消費量(単位:kcal)					
		固形	液体	ガス	電力	総計	1人当り
日本	98	1.03×10^{15}	2.35×10^{15}	7.55×10^{14}	1.12×10^{15}	5.27×10^{15}	4.17×10^7
アメリカ合衆国	98	5.95×10^{15}	8.97×10^{15}	6.30×10^{15}	2.62×10^{15}	2.38×10^{15}	8.70×10^7
ナイジェリヤ	98	5.24×10^{11}	8.26×10^{13}	6.27×10^{13}	5.37×10^{12}	1.51×10^{14}	1.43×10^6
アジア	98	1.24×10^{16}	1.07×10^{16}	5.25×10^{15}	2.19×10^{15}	3.05×10^{16}	8.47×10^6
北アメリカ	98	6.32×10^{15}	1.14×10^{16}	7.63×10^{15}	3.28×10^{15}	2.86×10^{16}	6.06×10^7
南アメリカ	98	2.50×10^{14}	1.76×10^{15}	9.65×10^{14}	5.26×10^{14}	3.50×10^{15}	1.04×10^7
ヨーロッパ	98	5.52×10^{15}	8.52×10^{15}	9.74×10^{15}	4.14×10^{15}	2.79×10^{16}	3.83×10^7
アフリカ	98	9.22×10^{14}	1.07×10^{15}	6.12×10^{14}	1.07×10^{14}	2.71×10^{15}	3.61×10^6
オセアニア	98	6.11×10^{14}	4.67×10^{14}	2.78×10^{14}	6.58×10^{13}	1.42×10^{15}	4.87×10^7
世界	96	2.71×10^{16}	3.34×10^{16}	2.44×10^{16}	1.02×10^{16}	9.50×10^{16}	1.66×10^7
	97	2.67×10^{16}	3.38×10^{16}	2.47×10^{16}	1.01×10^{16}	9.52×10^{16}	1.64×10^7
	98	2.60×10^{16}	3.39×10^{16}	2.45×10^{16}	1.03×10^{16}	9.47×10^{16}	1.60×10^7

エネルギーが消費されていますが、1人あたりに換算しますとヨーロッパと北アメリカの人が特に多く消費しています。この統計で最もエネルギー消費量の少ないナイジェリアの人は1年間に 1.4×10^6 kcalであり、約ドラム缶1.5本分の石油に相当します。これに対して、世界中で最もエネルギーを大量に消費しているアメリカ合衆国では、一人当たり一年間に 8.7×10^7 kcalのエネルギーを消費しています。この量はドラム缶88本分と換算することができ、ナイジェリアの人の約60倍に相当します。ナイジェリアの人も十分な人間生活を送っていますから、数本のドラム缶の石油でアメリカ人も普通の生活をすることができると思われ、残りのドラム缶80本の石油は浪費されているエネルギーであり大きな贅沢といえるでしょう。日本人は1人当たり1年間に 4.2×10^7 kcalを消費していますから、41本のドラム缶の石油と換算することができ、35本もの石油を浪費する贅沢をしていることとなります。

化石燃料の燃焼によるエネルギー

表7-1に纏めた固体エネルギーは石炭、亜炭、泥炭、オイルシェールなど、液体エネルギーは原油および液化天然ガス(LNG)、ガスエネルギーは天然ガスをそれぞれ燃焼して発生するエネルギーを意味しており、火力発電により発生するエネルギーも各項目に分けて含まれています。この3つの分類のエネルギーは何れも化石燃料を燃焼して発生させていますから、当然二酸化炭素の発生を伴います。国や地域別に消費される全エネルギーの各分類の割合を表7-2に纏めました。ナイジェリアやサウジアラビアなどの産油国では液体燃料への依存の割合が高く、石炭の産出量が多い中国では固体燃料への依存度が高くなっています。石炭も石油もほとんど産出しない日本やスウェーデンは比較的化石燃料への依存度が低くなっています。

1997年に討議された京都議定書により化石燃料の燃焼に伴う二酸化炭素の総量を規定することになりました。二酸化炭素の増加は第4章で述べましたが、あまり危惧することはないように思いますが、この議定書により埋蔵量に限界のある化石燃料の消費が抑えられることは化石燃料をより長期にわたり利用可能にするとおもわれます。その上、エネルギーの総消費量を抑える効果があれば、人類の贅沢を戒める極めて意義のある議定書と思われる。

原子燃料によるエネルギー

表7-1および表7-2で電力の項は水力、地熱、風力、潮汐、波力、ソーラー、原子力など各種の発電方法による電力で、火力発電は含まれていません。この項目のエネルギーは二酸化炭素の排出が全くありませんから、京都議定書の規制を受けません。この項目のうちで原子力発電以外の水力、地熱、風力、潮汐、波力、ソーラーなどの発電方法による電力エネルギーは太陽からの光エネルギーあるいは地球が固有に持っているエネルギーから変換するもので、エネルギー不滅の法則が成り立っている地球で色々と相互に変換されて行く光エネルギー、熱エネルギー、運動エネルギー、化学エネルギーに含まれる電気エネルギーです。そのため、このエネルギーを消費しても地球全体の総エネルギー量の増加には結びつきません。

水力発電は太陽からの光エネルギーで温められた水が水蒸気になり雨や雪になって降り、海拔の高いところに移動した水が流れ落ちるときの運動エネルギーを利用するものです。この水の循環する系を利用しているため、光エネルギーを電気エネルギーに変換する発電法ですから、二酸化炭素を発生することもなく、人類の贅沢とは見えません。しかし、水力発電をするため

にはダムを造り、電力を利用し易いように送電線を張り巡らし、強度の強い水車を持った発電機を用意しなければなりません。ここで大量のセメントと電線用の金属銅と大きな力に耐える水車用の特殊な金属を必要とし、大量のエネルギーを使って大量の廃棄物を出しながら、この水力発電の系は築き上げられました。このように水力で発電される電気エネルギーは多くの資源とエネルギーを消費して生み出されるものですから、この水力発電による電気エネルギーを消費することは人類の贅沢と考えられます。

表 7 - 2 国・地域別 一次エネルギー年間消費量の割合

国(地域)	年次	固形	液体	ガス	電力
日本	98	19.6%	44.7%	14.3%	21.3%
アメリカ合衆国	98	24.9%	37.6%	26.4%	11.0%
中国	98	76.0%	18.7%	2.6%	2.7%
サウジアラビア	98	0%	55.7%	44.3%	0%
ナイジェリヤ	98	0.3%	54.6%	41.5%	3.6%
スウェーデン	98	6.1%	32.0%	1.9%	60.0%
アジア	98	40.7%	35.0%	17.2%	7.2%
北アメリカ	98	22.0%	39.9%	26.6%	11.4%
南アメリカ	98	7.1%	50.2%	27.6%	15.0%
ヨーロッパ	98	19.8%	30.5%	34.9%	14.8%
アフリカ	98	34.0%	39.5%	22.6%	3.9%
オセアニア	98	43.0%	32.8%	19.5%	4.6%
世界	96	28.5%	35.1%	25.7%	10.7%
世界	97	28.0%	35.5%	25.9%	10.6%
世界	98	27.5%	35.8%	25.8%	10.9%

地熱、風力、潮汐、波力などのエネルギーを電気エネルギーに変換する発電方法は水力発電と同じように、地球のエネルギーの平衡に取り込まれたもので、地球の総エネルギー量を変化するものではありません。しかし、これらの発電を可能にする立地条件は極めて厳しく、大電力を供給する系にはなり得ません。岩手県松尾のような高い地熱を持つ土地は世界中に多くはありません。季節を問わず、間断なく風が吹き続ける土地も多くありません。海の沖合いならばともかく沿岸地帯で潮流が常に流れる場所は世界中でも限られており、しかも満潮時や干潮時には潮流が止まることが多いと思われます。海の波は間断なく押し寄せていますが、そのエネルギーはあまり大きくはありませんから、大電力を供給するためには不向きな発電法です。

ソーラー発電は近年開発された発電法で、雨天の日が少ない地方ではかなり効率的に太陽からの光エネルギーを直接電気エネルギーに変換できます。しかし、大電力を供給するためには不向きな発電法で、しかも夜間は全く発電できません。その上、エネルギーの変換をする発電施設の部品は極めて純度の高い金属けい素を必要とするため、第 3 章で述べたように発電施設

を作るためには大きなエネルギーの消費を必要とします。結局見かけ上は地球のエネルギーの平衡に取り込まれたもので、地球の総エネルギー量を変化するものではありませんが、施設や設備を作り保守するときに多量のエネルギーと資源を消費しなければならず、これらの発電方法による電気エネルギーを浪費することはやはり人類の贅沢と考えられます。

これに対して現在行われている原子力発電は地殻中に残存しているウランウム (^{235}U) などの原子燃料が核分裂するときに発生する熱エネルギーを利用するもので、化石燃料と同じように原子燃料は埋蔵量に限りのある、地球の財産とも思えるエネルギー源です。図 7 - 1 に示すようにウランウム (^{235}U) は中性子と反応すると、クリプトン(Kr)、ストロンチウム (Sr)、ヨウ素 (I)、キセノン (Xe)、バリウム (Ba) などに分解しますが、そのとき中性子と多量のエネルギーを放出します。ここで放出される中性子がまたウランウム (^{235}U) と反応しますから、ウランウムの核分裂は連鎖的に進行します。この原子力発電はこのようにウランウム (^{235}U) の核分裂により放出されるエネルギーを利用するもので、長短 4 つの特徴があります。第 1 の特徴は効率的に大電力量を発電することが可能であり、しかも全く二酸化炭素を発生しません。第 2 の特徴は発電に必要な原子燃料のウランウム (^{235}U) は表 2 - 1 に示すように地殻や宇宙における存在比が極めて低く、純粋な形で取り出すことが困難です。しかも、原子燃料の純度が低いときには 2 次的に放出される中性子がウランウムと反応する確率が低くなるために連鎖反応が円滑に起こらなくなりますから、高い技術により大量の化学薬品とエネルギーを用いて高純度に原子燃料を精製しなければなりません。第 3 の特徴は原子燃料の濃度が高すぎる場合には、連鎖反応が早くなりすぎて安全に制御できなくなります。発電のための連鎖反応を安全に制御するためには極めて厳密な反応条件を必要とするため、かなり高い技術力が要求されます。しかもこの連鎖反応において生物にとっては極めて有害な放射線を放出しますから、事故を起こすことは絶対に許されません。1986 年にソヴィエト連邦のチェルノブイリで発生した原子力発電所の事故では、連鎖反応を制御することができなくなり、多量の放射性物質がウクライナを中心に世界中に拡散してしまいました。

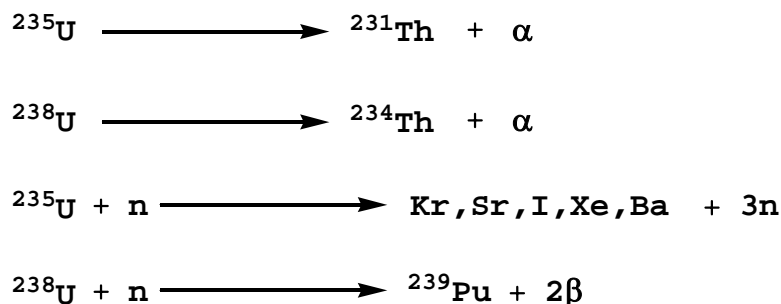


図7 - 1 ウランウムの核反応

さらに、第 4 の特徴として、原子燃料から発電に利用できるエネルギーを取り出した後に、原子炉に強い放射能を持つ廃棄物が残ります。この放射性廃棄物にはクリプトン(Kr)、ストロンチウム (Sr)、ヨウ素 (I)、キセノン (Xe)、バリウム (Ba) などの核分裂による核種のほかに不純物として存在するウランウム (^{238}U) およびそのウランウム (^{238}U) が中性子と反応して生成するプルトニウム (^{239}Pu) が含まれています。プルトニウム (^{239}Pu) は原子燃料として利用が可能なため分離して廃棄物からの再生が試みられていますが、未だ経済的に採算の取れる

状態にはありません。そのほかの放射性廃棄物は焼却処理などでは処理できず、現在までに安全に処理する方法が開発されていませんから、地球上に拡散しないように青森県六ヶ所村などに厳重に保管しています。日本では約 40 年間原子力発電が続けられていますが、その間に排出された放射性廃棄物は全て保管されています。しかし、現在の密封して保管する方法は年月を経るごとに次第に経費が高むようになります。これらの廃棄物はこの先 100 億年ほど放射能を出し続けますから、放射能汚染を引き起こさない安全な廃棄処理技術を考え出さなければなりません。

現在行われている原子力発電が地殻中に存在している原子燃料の核分裂するときに発生する熱エネルギーを利用するもので、化石燃料と同じように原子燃料の埋蔵量に限りがありますから、地球の財産とも思えるエネルギー源を消費していることとなります。太陽では図 7-2 に示すように水素が核融合して巨大なエネルギーを放出し続けていますが、水素は宇宙に最も多く存在する元素で、太陽の組成の 90% 以上を占めていますから、エネルギー源としては無限と考えても良いほどです。地球上にも水の形でほとんど無限に近い量の水素原子が存在していますから、この水素を核融合すれば化石燃料が枯渇しても無限にエネルギーを供給できると考えられます。核融合反応により発生するエネルギーの利用は戦争のための兵器として水素爆弾においてのみ成功しています。現在まで、核融合反応により発生するエネルギーを安全に制御する平和利用は未だ成功していませんが、重水素同士の核融合や重水素と 3 重水素との核融合の反応が盛んに研究されています。これらの核融合反応では連鎖反応を起こすために極めて高い温度が必要になりますが、そのほかにも放射能の発生の問題や安全性の問題など多くの超えなければならない問題点があり、核融合反応の平和利用はまだ遠い将来のことと思われる。しかし、この重水素同士の核融合反応では 4g の重水素から約 $7.5 \times 10^7 \text{kcal}$ 、2g の重水素と 3g の 3 重水素の核融合では約 $4.1 \times 10^8 \text{kcal}$ のエネルギーを放出します。この核融合により放出されるエネルギーを完全に利用することができるとすれば、わずかに 300 トンの重水素を核融合するだけで 1 年間に全世界の人類の消費する全エネルギーを賄うことができる計算になります。核融合反応の平和利用の技術が完成した暁には全く燃料の枯渇の心配もなく、しかも二酸化炭素の発生のないエネルギーを無限に利用できるようになると考えられます。

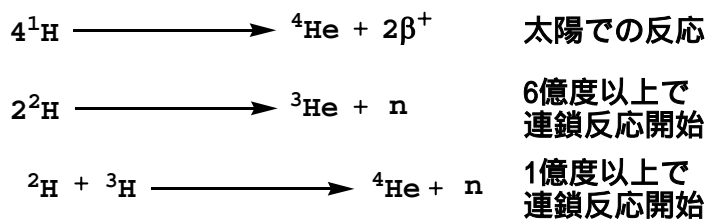


図7-2 水素の核融合反応

地球を傷つけるエネルギーの浪費

45 億年という長い年月の間に化石燃料などの形でわずかなエネルギーを蓄えただけで、地球の持っていた運動エネルギーの変化と太陽から供給される光エネルギーが地球の消費するエネルギーとほぼ釣り合うようになり、現在の状態の地球を維持できるようになって来ました。地球全体が受ける太陽の光エネルギーは毎秒 $1.5 \times 10^{13} \text{kcal}$ もの膨大なもので、その 70% に相当

する毎秒 1.0×10^{13} kcal のエネルギーは大気中および地表に吸収されて地球の持つ総エネルギー量を増加させます。この太陽から供給される光エネルギーは 1 年間に 3.15×10^{20} kcal と換算することができます。

温度の低い宇宙空間に地球が熱や光を輻射するために減少する総エネルギー量は、自転や公転などの地球の運動が遅くなった時に発生するエネルギーと、太陽から供給される光エネルギーの総和に釣り合っています。45 億年という長い年月の間に化石燃料などの形でわずかなエネルギーを蓄えただけで、地球の持っていた運動エネルギーの変化と太陽から供給される光エネルギーが地球の消費するエネルギーとほぼ釣り合うようになり、現在の状態の地球を維持できるようになって来ました。

このように地球はエネルギーのシーソーに乗っており、エネルギーの総量に変化がありませんから、地球はエネルギー的には外界から遮断され独立した一つの世界と考えることが出来ます。そのため、地球の中ではエネルギー不滅の法則が成り立っており、光エネルギー、熱エネルギー、運動エネルギー、化学エネルギー、電気エネルギーなど色々な形にエネルギーは相互に変換されてきました。地球上におけるこのエネルギーの平衡の状態を乱すことがあれば、地球全体が大きな変化に見舞われることになるでしょう。

総務省統計局の統計資料によりますと、毎年、全人類が全世界で消費しているエネルギー量は 9.5×10^{16} kcal と推測されています。多少過大に推測されているようにも思われますが、この膨大なエネルギー量は太陽が地球に供給している光エネルギーの総量の約 0.03% に相当します。人類が消費しているエネルギーの中には、太陽からの光エネルギーの変換による水力発電で得られるエネルギーや、太陽エネルギーにより成長した材木を燃焼して得られるエネルギーも含まれます。しかし、その大部分は 45 億年の間に蓄積された化石燃料からのエネルギーや 45 億年の間にも消滅しないで残ったウランなどの原子燃料からのエネルギーを消費しています。このことは地球全体で起こる潮汐運動、大気の流れ、海流現象、気象現象を含めた水の循環、植物の成長などあらゆる変化の原動力となるエネルギーが太陽からのエネルギーよりも約 0.03% 多く供給されていることとなります。太陽の黒点の増減に伴って太陽から供給されるエネルギーが多く見積もっても 10% 程度の変化に過ぎなくても、地球上におけるエネルギーの平衡の状態を乱すことになり、人類が飢饉などの大きな変化に見舞われた経験から考えて、全人類が全世界で消費しているエネルギー量が地球全体に及ぼす影響は無視できない物と考えられます。

現在はまだ実現していませんが、将来、核融合反応により生ずるエネルギーを自由に安全に利用できるようなれば、人類はエネルギーの供給に関してさほど憂慮する必要がなくなるかもしれません。しかし、この核融合が成功すれば地球全体で起こるあらゆる変化の原動力となるエネルギーの総量が格段に増加するに違いありません。多くのエネルギーを消費すれば当然地球から熱輻射などにより発散してゆくエネルギーも増加して行くと思われませんが、急激なエネルギーの総量の増加は地球のエネルギーのシーソーを傾かせることになり、再びシーソーが釣り合うまでには長い年月を要することになるでしょう。その間に、潮汐運動、大気の流れ、海流現象、気象現象を含めた水の循環、植物の成長などは従来の釣り合いが崩れて、極地の氷が融け出したり、潮流が変化したり、局地的な大雨や旱魃が発生したり、動植物の大発生や絶滅など種々の変化が起こる可能性があります。

大げさにいうならば、人類が必要以上のエネルギーの無闇矢鱈に浪費をすることは、45 億年かけて貯蓄した化石燃料のエネルギーを単に消費して枯渇させるだけでなく、地球の乗っているエネルギーのシーソーを傾かせてしまい、種々の変化を引き起こす最も恐るべき贅沢ではないかと考えられます。人類が必要以上のエネルギーを無闇矢鱈に浪費をする贅沢は地球を傷つける結果を招きます。

8. 人類の贅沢

人類の贅沢を抑える術

地上の植物は地中から水と何がしかの必須の元素を取り込み、地上で二酸化炭素と太陽からの光エネルギーを吸収して生命活動を維持するための活力となる物質を合成していますし、水中の植物は水に溶けた素材と太陽の光エネルギーを吸収して活力となる物質を合成しています。しかし、人類を含めて全ての動物は自分自身の組織の中に生命活動を維持するための活力の源になる物質を合成する能力を持っていません。当然、生命活動を維持するための活力となる物質を植物あるいは他の動物から取り込まねばなりません。そのため、全ての生物の間には弱肉強食、自然淘汰、共生など色々な形の関係が発生してきます。人類は敵対するものをできる限り駆逐し、活力となる物質をより安定に供給できるように肉体的な努力をし、知恵を駆使してきました。食用になる動物を家畜として養い、農耕により野菜や穀類を作付けてきました。作物の成長の助けとなる肥料や直射日光をできる限り与え、生長に害をなす微生物や昆虫や草虫はできる限り駆除します。このような農耕や畜産により、自然が作り出してきた弱肉強食や自然淘汰の摂理を歪め、人類の身勝手な共生を作り出してきました。

太陽からの光エネルギーがないところでは生物は生命活動の活力となる物質を合成することができません。地球全体が吸収する太陽の光エネルギーは毎秒 1.0×10^{13} kcal でほぼ一定していますから、人類の身勝手な共生により自然の摂理をかなり歪めても、生産できる食料には一定の限度があると考えられます。言い換えれば地球に住める人類の数には限度があることとなります。人間社会には地域の格差や貧富の格差がありますから、この人口許容量よりもはるかに少ない人口のときに、既に食料の取り合いから争いが起こってしまうでしょう。この人口の限界点は意外に小さな値ではないかと思われます。これからの人類の平和で安定した生活を継続するためには、現代のような個々の人間が身勝手に贅沢をすることは許されなくなるでしょう。

人類の多くの贅沢が多くの負の遺産を生み出してきました。大量のエネルギーを消費して、大量の害毒を撒き散らして、45 億年の間に釣り合ってきた地球のシーソーを傾かせています。これまで、このような大量の害毒の発生を規制する対応の後に回ることが多かったように思います。多くの犠牲の後に足尾鉍毒事件や水俣病発症事件が社会問題になり、かなり遅れて対応策として法規制がなされてきました。オゾンホールが現れてからハロメタンやハロエタンの排出規制がなされるようになりました。かねみ油症事件やベトナム戦争の後遺症から PCB やダイオキシンの耐容量が見積もられて、毒の拡散を止めることになりました。さらに京都議定書の承認により二酸化炭素の発生を抑制する動きが出てきましたが、エネルギーの無制限な浪費が根本の問題として残っています。これらの多くの社会問題において、問題の発生から対応策がとられるまでに長い年月が経過しています。

ある現象が問題化するまでに長い時間が経過し犠牲者が出ます。ついで、その現象の因果関係が色々と調べられ、原因が追究されます。さらに、その原因を解決する対策が考えられ法制化します。水俣病の場合には 1950 年代から水銀化合物の漏洩が始まり、60 年代に因果関係が確認され、70 年代に法制化が進み、被害者の補償が認められたのは 1980 年代でした。このよ

うに毒に対する安全の研究と行政的対応は遅れを取ってしばしば後手に回ります。

逆に、行政的対応に因果関係の追及が追いつかない場合もあります。オゾンホールが発見されてその対策が急がれました。地球科学者は色々な学説を考えましたが、ハロメタンやハロエタンがその原因物質であろうという説もその一つでした。完全に因果関係が証明されたわけではありませんがとりあえず法制化しましたので、結果として現在でも多くの疑問点が残っています。

現代のように自然の摂理を無視して、無闇矢鱈とエネルギーを無駄に使う贅沢が人類に許されて良いとは思えません。京都議定書で二酸化炭素の排出量を規制するようになりましたが、二酸化炭素の大気中への濃縮は大きな問題ではないのかもしれませんが。犯人を逮捕し犯罪が抑えられるのであれば「別件逮捕」も許されるように、エネルギーの浪費が抑えられるのであれば京都議定書は極めて意味のある規制と思われる。

人類に許される贅沢

人類を含めて全ての生物は種を保存し繁殖するために、生命活動を続けています。2種以上の種がその繁殖のために競合するときには、互いに争い滅ぼしあう弱肉強食、自然淘汰という自然の摂理が働きます。文明が発展するにつれて、確実に食料を得るために農耕が始まり、森を焼いたり、野に水を引き入れたりするようになりました。原生していた木草を取り除いて、食料の供給に適した作物を移植するようになりました。耐久性に富んだ毛皮や織物を着用するようにもなりました。この時点で人類は既に多少自然に手を加え、自然の摂理を歪めるようになりましたが、人類の生活に必要な自然の破壊に限られており、弱肉強食、自然淘汰という自然の摂理を大きく逸脱するものではありませんでした。人類が生活を維持し、繁殖するための最小限の自然破壊ですから、この程度では人類の贅沢とは考えられないと思われます。

近年になって知識や技術が進歩向上するにつれて、人類は安定した生活、快適な生活を飽くなきまでに追及するようになりました。子々孫々の代までの食料を安定して確保するために、食料を大量に貯め込むようになりました。必要な栄養を摂取するための食料から、しだいに趣向を加味した食物に変化してゆきました。この段階では必要以上の食糧を生産しているのですから、人類は食料の安定供給や味覚の満足という贅沢を始めたこととなります。繊維を色々と染め上げて華やかな衣服を織り上げるようになりましたが、これも気持ちを晴れやかにし、他の人と差別するための人類の贅沢の始まりでしょう。雨露を凌ぎ外敵から身を守るための住居も大きく堅牢なものになってきましたが、これも生活を快適にするための人類の贅沢の始まりでしょう。人類が安定した生活を送り、子孫の繁殖ができる最小限の蓄えと住居の確保が贅沢との境目ではないでしょうか。

人類の食料を牛や豚や鶏に食べさせて、食肉や鶏卵や乳製品として食卓に並べていますが、この変換効率は決して高いものではありません。魚屋さんには春先でも秋刀魚が並び、隣のシヨーケースにはアフリカの近海で獲れたマグロの刺身が売られています。夏野菜の胡瓜やトマトは冬でも店頭にあふれ、イチゴの最盛期はクリスマスの時期に移ってしまいました。比較的収穫量の少ないコシヒカリやササニシキが珍重され、さらに糠として玄米の10%以上も精米してしまいます。季節に即した旬の食物、その土地土地で収穫された食物、本来の姿を保った食物など、自然の摂理にのっとった食物を身体の状態にあった量だけ食べることが望ましく思わ

れます。食べ残しなどは最も憤むべき贅沢ではないでしょうか。

地球上には人類の住めないほど高温の土地はほとんどありませんし、極地以外では人類の生活できないほど寒冷な土地もありません。大量の水のお陰で地球は極めて温和な気候の惑星ですから、僅かな暖房が必要なだけで、冷房など全く生活には必要ないと思われます。わずかな生活圏に自然に適応した生活をするときには、エネルギーの消費量も大いに抑えることができるでしょう。現代の人類、特に都市部に生活する人類はとてつもない贅沢をしており、その例は枚挙にいとまがありません。

さらに、軍事行動はその本質自体が殺戮と破壊を目的とし、全く生産性のない浪費です。アメリカ合衆国からはるかに遠く離れたペルシャ湾まで数万トンもある航空母艦を航行してゆき、イラク各地を爆撃して破壊を続けています。航行のための燃料、爆撃機のジェット燃料、爆撃のための火薬、その他諸々の戦略物資の消費は膨大なものでしょう。攻撃のために多用されている各種のミサイルは燃料、爆薬、巡航用のエンジン、攻撃目標までの誘導制御装置など全て一度に消費してしまいます。戦争のための消費は全て、人類の本来的に必要な物質の消費とは全く無関係なものであり、人類の最大、最悪な贅沢と思われます。

人類が動物の一種として生活するために必要な最小限を超えて物質やエネルギーを消費することは、浪費であり、人類の贅沢と考えられます。さらに、人類との共存ができずに人類の贅沢の犠牲になり、多大の被害を被ったり、種の存続まで危うくされた生物がいることは、人類の横暴と云わざるを得ません。

索引

3	
3次元の網目	26, 27
B	
BHC	48, 52
D	
DDT	48, 52
N	
NADP ⁺	34
NADPH	34, 36
P	
PCB	51, 52, 54, 64
S	
SOX	40
あ	
亜鉛	19, 20, 45
足尾鉍毒事件	17, 18, 74
アセチレン	12, 20, 21, 24, 30, 47
亜硫酸ガス	40
アルカリ金属	16, 28, 40
アルカリ土類金属	16, 28, 40
アルドール	34
アルミニウム	16, 17, 19, 20, 28, 29, 31, 40, 41, 64
い	
硫黄	15, 18, 40, 41, 42, 43, 44, 45
硫黄鉍山	44, 45
引火性	55, 57
う	
運動エネルギー	6, 7, 10, 11, 12, 14, 16, 22, 66, 69, 72
え	
エネルギーのシーソー	6, 7, 66, 72, 73
エネルギー不滅の法則	6, 7, 9, 66, 69, 72

塩化カルシウム	30, 46, 48, 64
塩化ビニル	20, 21, 48, 49, 51, 52, 54, 55, 64
塩素ラジカル.....	55, 62, 63, 64
エンタルピー.....	10, 11, 12, 13, 17, 19, 26, 27
エントロピー.....	9, 10, 11, 12, 13, 17, 19, 26, 27

お

オゾン	60
オゾン層.....	61, 62, 63, 64
オゾンホール.....	60, 61, 62, 63, 74, 75

か

解離定数.....	25
化学エネルギー	7, 9, 10, 11, 13, 14, 19, 20, 32, 33, 66, 69, 72
化学的風化.....	11, 13, 14
可逆反応.....	29
拡散.....	9, 11, 19, 20, 21, 26, 27, 59, 60, 62, 63, 65, 70, 71, 74
核分裂	70, 71
隔膜法	48
核融合	6, 7, 14, 71, 73
火成岩	26, 28, 29, 30, 31, 32
化石燃料.....	7, 38, 40, 66, 68, 70, 71, 72, 73
加硫.....	44, 45
カルシウムイオン	30, 31, 32, 40
還元.....	7, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 19, 33, 34, 40, 45, 58, 59, 66
還元剤	40

き

機械的風化.....	11, 13, 28, 31
気化熱	26, 56, 57, 58
気体定数.....	26
気体の比重.....	63
揮発性	42, 51, 57
京都議定書	37, 38, 68, 69, 74, 75
共有結合.....	9, 10, 33
金属イオン	15, 16, 28, 40
金属けい素.....	19, 70
金属元素.....	15, 17, 19, 28, 40
金属酸化物.....	15, 16, 17

く

クロロフェノキシ系農薬.....	51, 54
クロロホルム.....	55, 56, 57, 58, 59

け

結合エネルギー.....	10, 11, 13, 56
解毒作用.....	50
原子価.....	10, 25
原子燃料.....	69, 70, 71, 72
原子力発電.....	69, 70, 71
元素組成.....	8, 23

こ

光合成.....	33, 35, 36, 38, 40
黒点.....	67, 73

さ

殺菌剤.....	40, 48, 50, 52, 53, 54
殺鼠剤.....	50, 52
殺虫剤.....	48, 50, 52, 53, 54, 57
酸化7, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 24, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 52, 54, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 66, 68, 69, 70, 74, 75	
酸化還元電位.....	15, 16
酸化状態.....	15, 40
酸化反応.....	11, 15, 17, 34, 59
酸性雨.....	40, 43
酸素.....	8, 10, 11, 15, 22, 24, 25, 27, 29, 30, 33, 34, 60, 61, 62, 65
残留塩素.....	59, 60

し

自然治癒.....	50
自然淘汰.....	3, 74, 75
自然の摂理.....	3, 50, 74, 75
弱肉強食.....	3, 74, 75
自由エネルギー.....	10, 16, 34
状態方程式.....	22
食塩.....	46, 47, 48, 54, 58, 59, 64
除草剤.....	50, 52, 54
新陳代謝作用.....	50

す

水銀.....	20, 21, 47, 60, 74
水銀化合物.....	20, 21, 47, 74
水酸化ナトリウム.....	47, 48, 59, 63, 64
水質基準.....	59, 60
水素イオン.....	29, 31
水素結合.....	12, 13, 25, 26, 27, 56
水力発電.....	69, 72

せ

正電荷.....	25, 27
精錬.....	16, 17, 18, 19, 45
石灰石.....	20, 29, 31, 44, 46
セルロース.....	13, 14
遷移金属.....	15

そ

ソーダ工業.....	46, 48, 52, 54, 58, 63, 64
ソーダ灰.....	46, 48

た

ダイオキシン.....	51, 52, 54, 74
大気圧.....	22, 24, 26
堆積岩.....	28, 29, 30, 31, 32, 38, 39, 40
耐容量.....	51, 52, 54, 74
対流.....	7, 63, 66
脱出速度.....	7, 23, 25, 26
炭酸.....	28, 29, 30, 31, 32, 33, 36, 39, 40, 46, 48, 64
炭酸イオン.....	29, 30, 31
炭酸塩.....	30, 39
炭酸カルシウム.....	30, 31, 32, 33, 36, 39, 40
炭酸水素イオン.....	29, 30, 31
炭酸水素カルシウム.....	30, 31
単体塩素.....	46, 47, 48, 49, 52, 54, 55, 58, 59, 60, 62, 63, 64, 65
単体炭素.....	13, 14

ち

地球の元素組成.....	8
致死量.....	50, 51, 52, 53, 54
中性子.....	7, 14, 36, 70, 71

て

出会いの反応.....	35, 36
鉄	15, 16, 17, 18, 19, 20, 28, 29, 38, 40, 60
電気陰性度.....	34
電気エネルギー	7, 15, 16, 17, 33, 66, 69, 70, 72
電気分解.....	15, 18, 19, 46, 47, 48, 58, 59, 60, 64
電池.....	15, 20

と

銅	15, 17, 18, 45, 60, 69
---------	------------------------

な

難燃性	55
-----------	----

に

二酸化硫黄.....	18, 22, 24, 29, 30, 40, 41, 42, 43, 44, 45
二酸化炭素.....	7, 10, 11, 13, 14, 15, 17, 22, 24, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 66, 68, 69, 70, 72, 74, 75

ね

熱エネルギー.....	6, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 33, 66, 69, 70, 71, 72
熱輻射	6, 7, 14, 73
燃烧.....	11, 12, 13, 17, 18, 19, 40, 42, 68, 72
燃烧熱	11, 12

の

農薬.....	48, 50, 51, 52, 54, 64
---------	------------------------

は

発熱反応.....	16
ハロメタン	54, 55, 56, 57, 58, 62, 63, 64, 74, 75

ひ

光エネルギー.....	6, 7, 10, 11, 13, 14, 16, 17, 26, 32, 33, 35, 36, 66, 69, 70, 72, 74
光化学オキシダント.....	61, 63
漂白剤	40, 48

ふ

ブドウ糖.....	7, 11, 12, 13, 14, 27, 32, 33, 34, 36, 38, 66
プラスチック	20, 21, 48, 54, 64
フロン	55, 56, 57, 58
分子運動.....	7, 14, 22, 24, 26, 36

へ	
平衡定数.....	26
平衡反応.....	29, 34
ほ	
放射性廃棄物.....	71
み	
水の惑星.....	24, 26
水俣病公害.....	47
三宅島.....	40, 43
む	
無水硫酸.....	40, 44
め	
メタンガス.....	10, 11
ゆ	
融解熱.....	12, 26, 56
有効量.....	50
歪みエネルギー.....	10, 11, 33
よ	
溶解度.....	26, 27, 28, 30, 31, 56
溶質.....	26
溶媒.....	26, 36, 47, 48, 56, 58, 62, 64
葉緑素.....	33, 34
四日市喘息.....	43
り	
硫酸.....	28, 40, 41, 42, 43, 44, 45
硫酸カルシウム.....	40
わ	
別れの反応.....	36