

**GSCN**
Green & Sustainable
Chemistry Network

グリーン・サステイナブル ケミストリーは、 持続可能な社会を支える人と環境に やさしい化学のことです。

グリーン・サステイナブル ケミストリー (Green & Sustainable Chemistry, GSC) は、グリーン ケミストリー (GC)、サステイナブル ケミストリー (SC) ともよばれ、持続可能な社会を支える人と環境にやさしい化学のことです。

化学技術は生活を豊かにする上で欠かせませんが、使い方を間違えると人や環境に害を与えることもあるので十分な注意が必要です。GSC 運動は人と環境が調和した持続可能な社会のために化学技術の人々が安心して活用できるように、1992年の国連環境会議で取り上げられ、米国を中心に進められてきました。

日本でも GSC に各学会や団体がそれぞれ取り組んできましたが、2000年3月に産学官が連携して GSC を進めるため、グリーン・サステイナブル ケミストリー ネットワーク (GSCN) が設立されました。GSCN の基本的理念は「化学にかかわるものは自らの社会的責任を自覚し、化学技術の革新を通して人と環境の健康・安全をめざし、持続可能な社会の実現に貢献すること」にあります。GSC の実現には化学者の真摯な努力が必要ですが、それと同時に、市民の方々に化学技術の実力と限界そして GSC の考え方を正しく知っていただくことも重要です。市民と専門家のよりよい協力関係が社会にとっても学術にとっても欠かせなくなってきました。

GSCN では GSC に関する研究推進、研究支援、情報、教育、国際交流、GSC 賞の活動を行ない、グリーンケミストリーの理念を広く社会に理解していただくための活動に取り組んでいます。

グリーンケミストリーのめざすもの

- ・ 廃棄物を出してから処理するのではなく、始めから出さない。
- ・ 環境や人体に対して毒性のない物質を使って合成する。
- ・ 機能が同じなら、できるだけ毒性の少ない物質をつくる。
- ・ 溶媒はできるだけ毒性の少ないものを使う。
- ・ エネルギー消費を最小限にする。
- ・ 可能な限り、化石燃料などの枯渇性資源ではなく再生可能な原料を使う。
- ・ 触媒を活用する。
- ・ 化学製品は使用后、無害なものに分解し、残留性がないようにする。
- ・ 爆発、火災、有害物質の漏出などの事故が起こらない安全な方法をとる。

きれいな空気と雨

窒素酸化物 (NO_x、ノックス)、硫黄酸化物 (SO_x、ソックス)、炭化水素 (HC)、SPM (suspended particulate matter、浮遊粒子状物質、粒径10 μm以下の粒子) などの大気汚染物質は、主に工場、発電所、自動車から大気中へ放出されます。これらの大気汚染物質は大気中で反応し、光化学スモッグや酸性雨などの原因となる物質を生成します。

酸性雨とは、主として硫酸や硝酸が溶解した酸性の強い雨のことです。酸性の強さを示す尺度としてpHが使われています。pH7が中性で、この値が小さいほど酸性が強いことを表します。一般にはpHが5.0以下の雨を酸性雨といいます。酸性雨の主な原因は上記のSO_xやNO_xで、これがいろいろな反応を受け、雨水に溶けて硫酸、硝酸となり酸性の強い雨になるのです。これらの汚染物質は気流などによって長い距離を運ばれ、国境を越え、発生源から数千 km も離れたところで酸性雨が観測されたりします。英国やドイツの工業地帯の排煙により北欧の湖水が酸性化し、米国で排出されたSO_x等がカナダに酸性雨を降らせるという国際問題として注目を集めています。このため、酸性雨問題の解決には国際的な協力が大事です。

我が国では排煙や排ガス中のSO_xを除去する技術が進んでおり、過去30年間に大気中のSO_xは激減

しました。このような技術はグリーンケミストリーの対象です。世界各国と比べると、人口一人あたり酸性雨原因物質の排出は、日本は最少レベルにあり、環境先進国と誇ることができます。

NO_xは、燃料に窒素分がなくても、燃焼の際に空気中の窒素と酸素が反応して生じます。そのため、燃焼の際のNO_xの生成は避けることができませんが、現在では、排煙や排ガスからNO_xを除く技術が進みました。すぐれた触媒の開発などにより、乗用車1台からのNO_xの排出は、30年間で約40分の1に減りました。しかし、大都会などではNO_xの濃度が、環境基準を越えることもあります。これは、自動車1台からのNO_x排出は減っているのに、自動車の台数が増えているためです。自動車から排出されるNO_x、炭化水素、SPMの削減技術の開発が求められ、現在、その実用化が進められています。例えば、クリーンエンジン、ディーゼル排出粒子除去技術などです。さらにクリーンにするために、いろいろな対策が考えられていますが、電気自動車、燃料電池車、ソーラーカーの開発、普及もその例です。これらの自動車に使うバッテリー、燃料電池や太陽電池の開発や改良にもグリーンケミストリーがかかわっています。

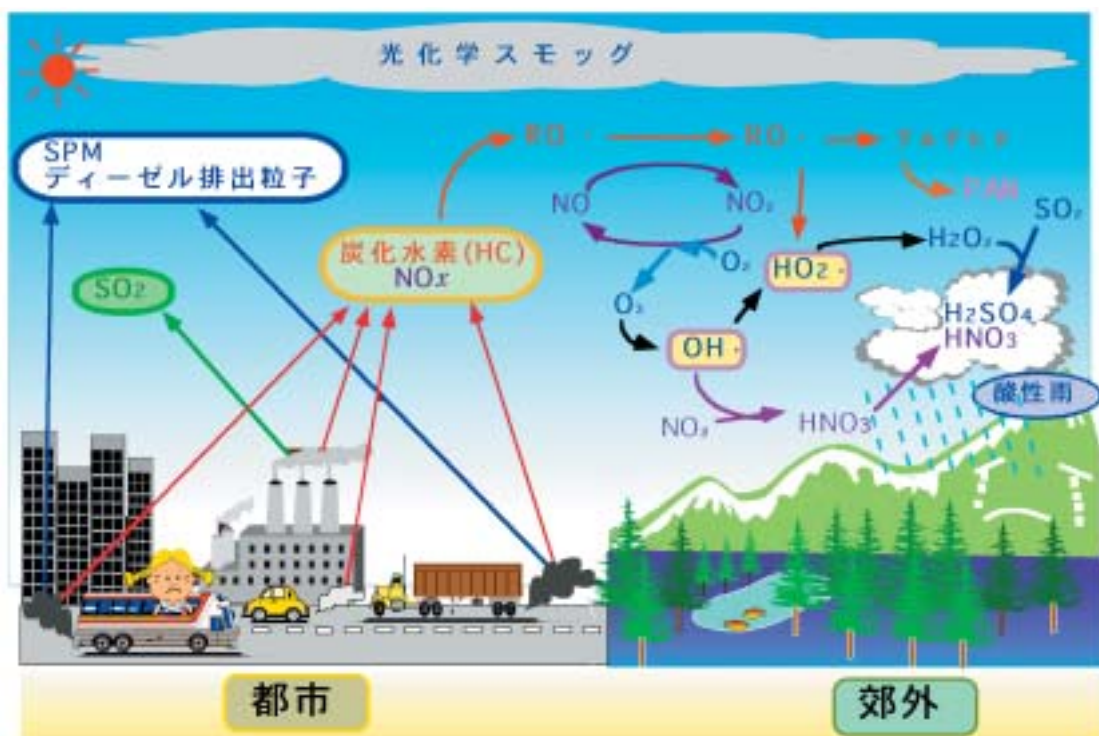


図1 地球上で起きている光化学反応とその原因物質

地球温暖化の化学

地球表面の温度は地球を取り巻く大気により温暖に保たれており、この効果を**温室効果**といいます。この効果を示す大気の成分を**温室効果ガス**とよび、その代表的な気体は水蒸気、二酸化炭素 (CO₂)、メタン、フロンなどです。温室効果に寄与する気体の筆頭は水蒸気で、二酸化炭素がそれに次ぎます。2番手の二酸化炭素は、人間が生きるために空気中の酸素を取込み二酸化炭素を排出する呼吸をはじめとして、石油や石炭などの化石燃料（全エネルギーの4分の3を得ている）の燃焼により放出されます。したがって、二酸化炭素の排出量はエネルギーの消費量に比例するといわれ、もしも全世界の人々が現在の日本と同じ経済的レベルの生活をするならば、地球全体の二酸化炭素排出量は2倍以上になるといわれています。

大気中の二酸化炭素濃度は測定結果が積み重ねられており、図1にハワイのマウナロア山、南極点、日本の岩手県綾里の測定データが示されています。マウナロア山や綾里では、季節変動が観測されていますが、どの地点でも年々濃度が増加しています。近代工業化が起こる前は、280 ppm とほぼ一定だったのが、20世紀に入って急速に増大し、現在では 360 ppm を越えています。二酸化炭素以外の温室効果ガスであるメタン、フロンなども、人為的な原因で近年急速に増加しつつあります。このような温室効果ガスの急増が、温暖化をもたらしているのではないかとされています。

温暖化が起こると、気温の上昇による氷河の融解などにより、海面の上昇、気候の変動、それにとともな

う生態系の破壊など地球環境は大きく影響を受けることが危惧されています。

このような背景のもとに、1992年国連総会で気候変動枠組条約が締結され、1997年に京都で開催された第3回締約国会議において、京都議定書が採択され、二酸化炭素、メタンなど6種類の気体を対象に、先進国の削減目標が定められました。

温室効果ガスである二酸化炭素とグリーンケミストリーのかかわり方には次の二つの方向があります。第一は二酸化炭素を地球温暖化の主役ガスとみなし、二酸化炭素濃度を急激に増大させないための化学、あるいは減少させるための化学に取り組むことです。化石燃料の消費を少なくするような方法、例えば、バイオマス（植物由来の資源：燃焼で発生するCO₂は、原料の植物が大気から吸収したもので、石油などと違い、総体として大気中のCO₂を増加させないと考えられる）の活用など他のエネルギー源の開発が挙げられます。第二に省エネルギーに努めることも大きく貢献することになります。

図2には、1998年における各国の1人1日あたりの二酸化炭素の排出量 [kg] を示しました。米国の排出量は多く、日本の2.2倍です。日本は1人1日あたりでは24.6 kgで、体重の半分程度の二酸化炭素を排出しています。しかし、この値は環境先進国のドイツより少なく、日本の省エネルギー技術の高さによるといえます。しかし、1973年に比べると、ドイツの一人当たりの排出量が約3/4に減少しているのに対し、日本は逆に10%増加しています。エネルギーを大切に使い、環境に対する高いモラルを持ちつつ、環境技術の発信国を目指しましょう。

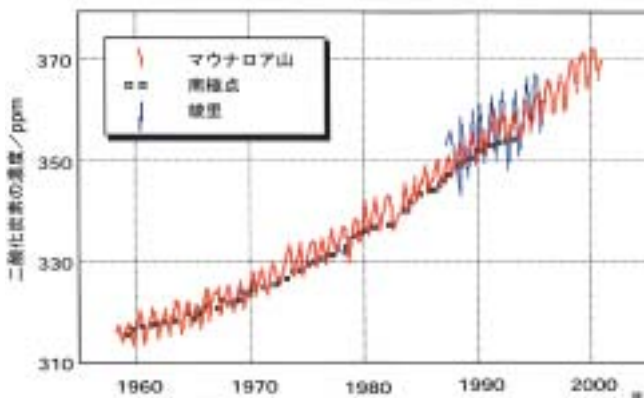


図1 マウナロア山（ハワイ）、綾里（岩手県）および南極点における二酸化炭素濃度

マウナロア山、綾里では季節変動が観測され、南極点ではそれがない。夏と冬での光合成の差を反映している。
[気象庁の気候変動監視レポート(1998)のデータと <http://cdiac.esd.ornl.gov/home.html>のデータによる]

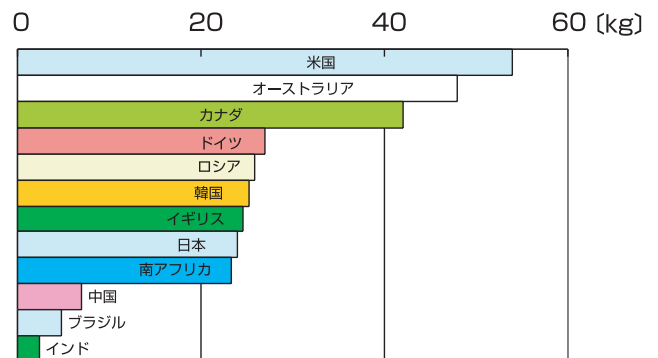


図2 1人、1日あたりのCO₂排出量 1998年
[<http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/top98.tot> ; <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/top98.cap> のデータによる]

オゾン層を護ろう

大気中のオゾンは、その約90%が地上から10～50 km上空の成層圏と呼ばれる領域に集まっています。この成層圏オゾンが、オゾン層とよばれています。

地球をとりまくオゾン層は、太陽光に含まれる紫外線（波長 100～390 nm）のうちの有害な UV-B (286～320 nm) の大部分を吸収し、私たち生物を守っています。このオゾン層が CFC（クロロフルオロカーボン類：ほとんどは飽和炭化水素の水素の一部をフッ素と塩素で置換した化合物；日本ではフロンと呼んでいる）やハロン（炭化水素の水素を臭素や他のハロゲンで置換した化合物、消火剤に用いられる）などの物質により破壊され、南極域上空では、春（9～11月）になると、オゾンの量が大きく減少してオゾンホールが観察されるようになりました。オゾン層のオゾンの量が1%減少すると、地上に降り注ぐ UV-B の量は 1.5%増えるとされています。UV-B の増加により、皮膚がんや白内障の増加、免疫抑制などの人の健康への影響のほか、動植物の生育阻害などの生態系への影響が懸念されています。

オゾン層破壊の犯人とされたフロンは、1928年に家庭用電気冷蔵庫の冷媒として発明されたものです。それまで使用されていたアンモニア、二硫化炭素は腐食性、毒性が強かったのに対し、フロンは不燃性、高度の安定性、無味無臭、毒性が少ない、物を溶かしやすいなど多くのすぐれた性質をもっています。そのため、フロンは冷媒以外にさまざまな用途に広

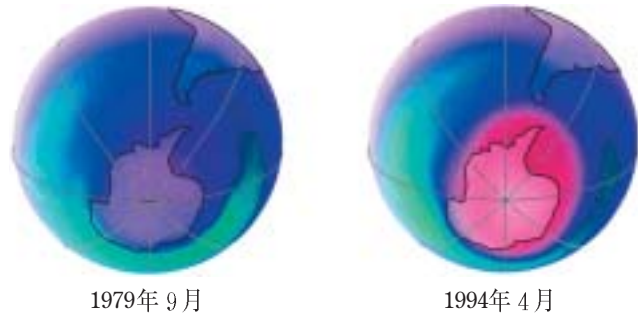


図2 南半球における全オゾン濃度分布

青色は高濃度、赤色は低濃度を示す。1994年には、オゾン濃度の低いオゾンホール（赤色）が南半球上空に現れている。[http://svs.gsfc.nasa.gov/public_html/gshirah/toms/ による]

く使われ、「夢の化合物」ともてはやされました。ドライクリーニング洗浄液、電子部品洗浄剤、溶剤、ウレタンフォーム用発泡剤として全世界的に広く使用され、私たちの豊かで快適な生活を支えてきました。1974年に、化学反応の専門家であるモリーナとローランドは、フロンに含まれる塩素原子がオゾン層破壊を引き起こすことを警告しました。その予言通り1980年代からオゾンホールが観測されるようになりました。夢の化合物はオゾン層破壊の犯人だったのです。1995年、モリーナとローランドは気象学者クルッツエンとともにノーベル化学賞を受賞しました。

国際的に協調してオゾン層保護対策を推進するため、「オゾン層の保護のためのウィーン条約」（1985年）、「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」（1987年）などが採択され、CFCおよびハロンの生産量を段階的に削減し全廃することが合意されました。

その結果、CFCなどの大気中濃度は北半球中緯度では、1990年頃まで増加傾向にありましたが、最近ではほぼ横ばい、種類によっては、急速に減少しています。また、2002年9月には、これまでどんどん大きくなってきていたオゾンホールの縮小が、初めて観測されています。

冷蔵庫、エアコン、座席のマット、ドライクリーニングがない生活は考えられないでしょう。オゾン層破壊の原因となるCFCに代わる物質—代替フロン—などの有用な物質をつくるのはグリーンケミストリーです。

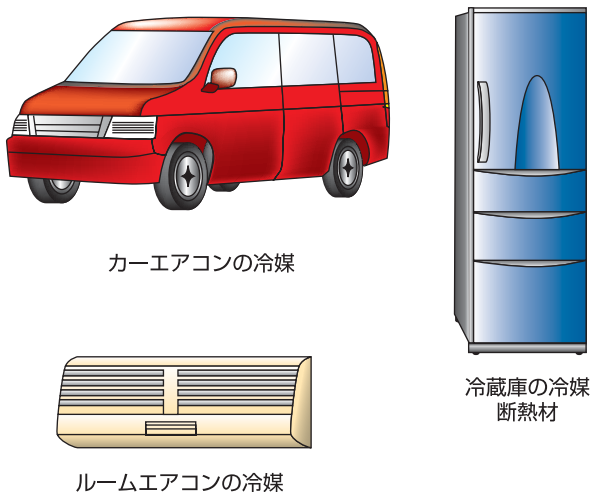


図1 CFCはこんなところに使われてきました

貴重な水資源

海は地球表面の7割を占め、その海水量は13.4億km³と全水量の96.5%を占める膨大な量です。水の残りの大部分は地下水あるいは氷河です。淡水は、河川水、湖沼水に地下水を加えても、全水量の0.8%で、人間が直接利用する淡水の河川水や湖沼水は0.008%、約10万km³に過ぎません。

日本の年平均降水量は1714mmで世界年平均の1.8倍と恵まれていますが、面積が狭く、人口が多い日本では平均水資源量は約4200億m³、人口1人当たり年間約3300m³で世界平均の半分以下で、水資源は豊かだとは言えません。図1は日本の水資源の利用状況を示したもので、生活用水の年間取水量が約164億m³で、実際には人口1人当たり毎日324Lを使っていることとなります(国土庁調べ)。生活用水の大部分は水道で供給され、水道の普及率は96%を超えています。工業用水は552億m³ですが、この77%を回収、再利用し、138億m³を新たに補給しています。農業用水は590億m³に達しています。

日本は水道水をそのまま飲用できる、世界でも数少ない国の一つです。水道水を造る浄水処理には従来の急速砂ろ過方式では除去できない異臭味の原因物質や、微量な有害有機・無機物質を取り除くために微生物、吸着剤、分離機能性膜などを用いた高度浄水処理が利用され、グリーンケミストリーが活用されています。

生活用水の水源として海水を逆浸透膜で淡水化する技術が開発され、沖縄や中近東などで活用されています。こうした機能性膜の開発もグリーンケミストリーの対象となります。

化学工業では、化学反応の溶媒として、多量の有機溶剤を用いてきました。また、ドライクリーニングでも有機溶剤を使用しています。これらが事故などで、地下水に流れ込んだり、土壌を汚染する恐れがあります。この問題解決の1つに、有機溶剤の使用を避けることが考えられま

す。グリーンケミストリーの立場からは水を溶媒としたり、超臨界二酸化炭素を使用する方法などが研究されています。

船底塗料の有機スズ化合物による海洋汚染も大きな問題となりましたが、グリーンケミストリーの観点から、環境毒性がなく、水中での分解も速く、しかも船底塗料としての効果の優れた物質が開発されています。

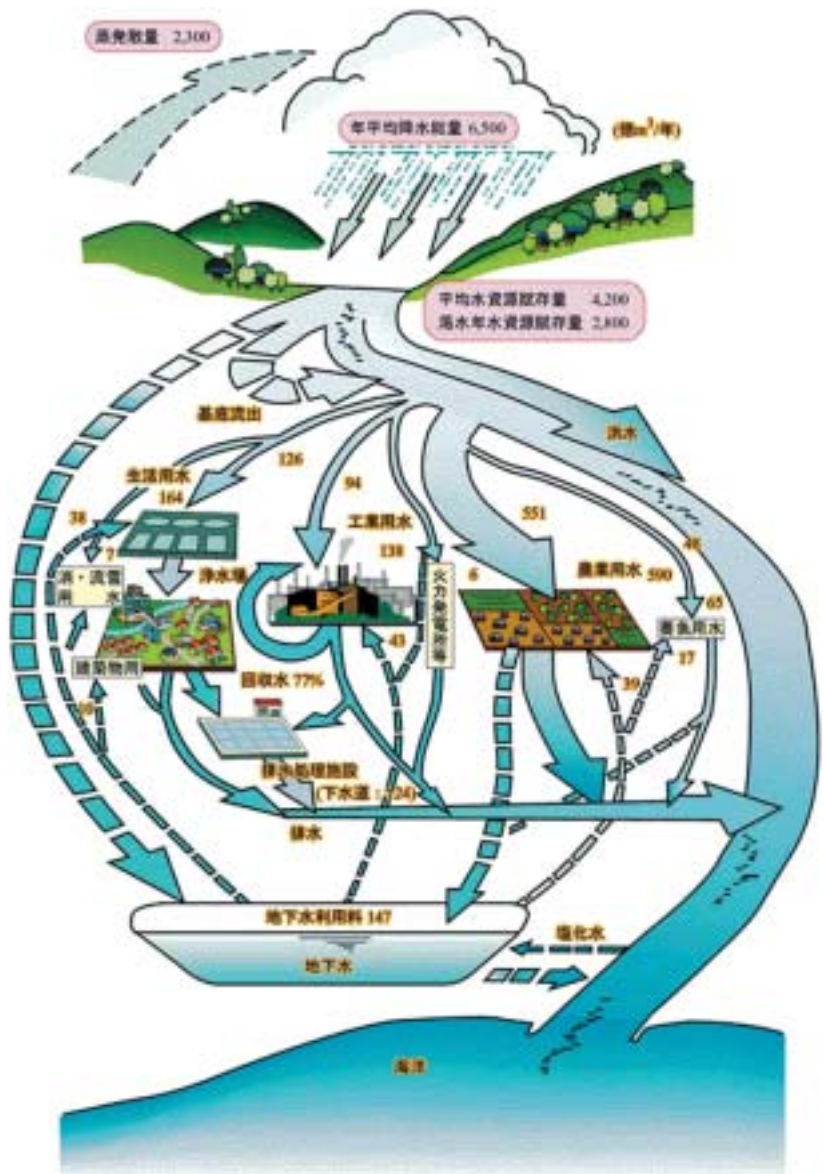


図1 水の循環

出典：「日本の水資源（水資源白書平成12年版）」国土庁長官官房水資源部編（2000）。

エネルギーを大切に

私たちは莫大なエネルギーを使いながら暮らしています。エネルギーを生み出す源は、化石燃料の燃焼などの化学変化であり、これはケミストリーの世界だといってよいでしょう。たとえば、自動車エンジン内でのガソリンなどの燃焼を考えてみましょう。燃焼の結果、二酸化炭素が排出されるとともに**窒素酸化物**や**硫黄酸化物**のように化学変化により有害な廃棄物が環境に出てくる場合があります。こうした環境を汚し、生物を傷める物質をなるべく出ないようにする営みが、環境にやさしい化学であり、グリーンケミストリーの精神なのです。

エネルギーは一次と二次エネルギーに分類されます。一次エネルギーは化石燃料、原子力、水力、風力など加工する前のエネルギーを、二次エネルギーは電気、都市ガスなど加工・変換後のエネルギーを示します。

1997年時点の日本は人口比率（世界の2.2%）をはるかにしのぎ、世界の一次エネルギーの5.4%を使っています。総供給量（石油換算4.60億トン）の79%強（同3.63億トン）までが化石燃料で、うち60%近くを石油が占めています。世界のお手本といってよいほど省エネを進めてきたとはいえ、産業活動の拡大を反映して一次エネルギー総供給量の伸びも大きく、2000年では5.59億トンで、1990年対比で約15%の増加になっています。こうした状況にある日本では「エネルギーを大切に」するライフスタイルが今後ますます重要になります。

有害な廃棄物を減らす方法の一つが**省エネルギー**

です。省エネルギーは貴重な化石資源の節約になり、多くの資源を子孫に残せませし、化石資源を燃やしたときに出る二酸化炭素や有害物質も減らせます。

ただ、ある行動や技術が本物の省エネルギーになるかどうかの判定は意外にむずかしいのです。たとえば太陽光発電についてみると、設備、運転などに必要な投入エネルギーを分母、太陽電池パネルが生むエネルギーを分子にした値（産出／投入比）が1を超すなら省エネルギーになります。しかし、現時点で1を超えているかどうかについては、いろいろな見かたがあります。寿命が50年とか100年もあれば1を超すと考えられるので、寿命改善に向けた今後の努力に期待したいと思います。

今の予想では、2010年代に石油の探掘量が下り坂に向かい、石炭もいずれ枯渇します。世界エネルギー消費の全てを現行の原子力発電でまかなえば、ウラン資源は10年分もありません。つまり、わずか10世代ほどあとには地下資源のない時代が来ます。そのとき頼ることができるのは**太陽エネルギー**しかありません。

太陽エネルギーは、**風力発電**、**太陽光発電**、**植物由来の資源**（バイオマス）等の形で利用でき、総量は十分にあります。とりわけバイオマスの発酵でつくるエタノールは、そのまま燃料になるほか、種々の化学製品の原料にもなります。そのため、グリーンケミストリー分野でも、**バイオマス技術**に大きな注目が集まっています。

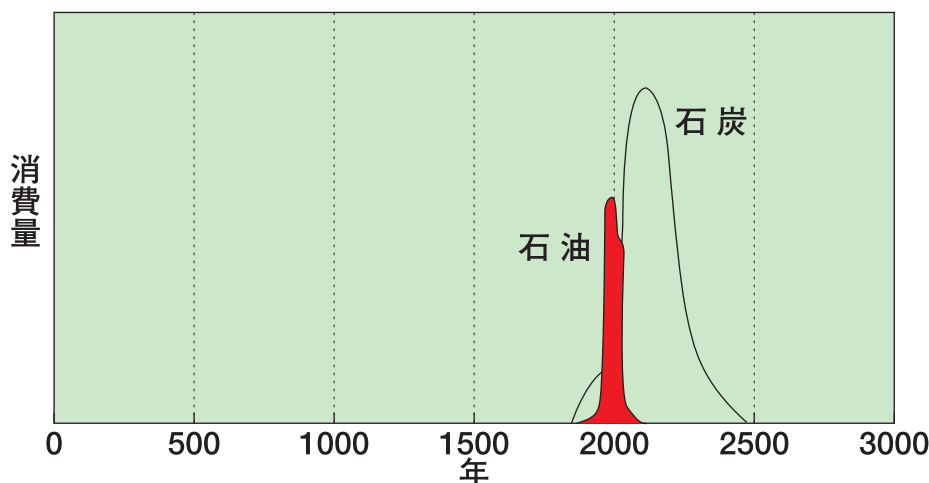


図1 西暦0～3000年における石炭・石油の消費予測

出典：M.Perutz著、中馬一郎訳、「科学はいま」、p.62、共立出版(1991)。

環境にやさしい物づくり

現在、私たちの豊かで快適な生活を支えるために、化石資源を利用して多くの有用な物質がつくられています。しかし、大量に生産・消費・廃棄されるこれらの物質が、環境に対してさまざまな悪影響を及ぼすことが指摘されています。このような背景のもとに、1990年代にグリーンケミストリーという考えが誕生し、世界的に広がってきました。原料、生産、廃棄の全ての段階で、環境にやさしい物づくりが始まっています。そのような試みのいくつかの例を紹介しましょう。

(1) 再生可能な原料の使用

現在、有機物質は、主として化石資源である石油を原料としてつくられています。しかし、石油の埋蔵量には限りがあり、その可採年数は40年といわれています。これからは、出来る限り石油の消費量を少なく、再生可能な資源を使用することが必要です。その再生可能な資源の一つとして植物由来のバイオマスがあります。小麦、トウモロコシ、ジャガイモなど穀物由来の糖質系バイオマス、例えばデンプンは接着剤や生分解性プラスチックの原料として、さらにアルコール類の発酵原料としても用いられています。また、グルコース（ブドウ糖）から、医薬品、農薬、香料などの合成も可能ですし、大豆油を利用したインク（大豆油インク）も作られています。

(2) 有機溶媒を使わない工夫

ヒトに有害で、環境問題を起こしてきた揮発性有機溶媒を使わずに化学反応を行う研究が進んできています。環境に対して害が少ない、理想的な溶媒として水があり、現在では数多くの化学反応が水性溶媒中で行うことができるようになってきています。最近、毒性がなく環境に優しい溶媒として特に注目されているのは超臨界状態の水や二酸化炭素です。加圧・加熱によって液体とも気体とも異なる超臨界という状態になりますが、これは環境負荷の小さい有機溶媒代替物として期待されています。一つの例として、ナイロンの原料として重要なカプロラクタムの合成があります。現在カプロラクタムは硫酸を触媒としてシクロヘキサノンオキシムという化合物からつくられますが、この方法では強酸を使う上に硫酸アンモニウム（硫安）という副生成物ができます。これに対し図1に示すよう

に超臨界水中での反応は触媒を必要とせず、無用の硫酸アンモニウムも生成しないので環境にやさしいといえます。また、酸やアルカリは触媒としてよく使われますが、このように超臨界水中では、触媒なしで進む反応がこのほかにも多数見出されています。

これ以外にも、溶媒を用いない反応や固体どうしの反応も研究されており、いずれも環境にやさしい物づくりといえます。

(3) 環境調和型触媒の活用

さまざまな反応に対して優れた触媒を開発し、利用することにより、反応の選択性を上げ、廃棄物（副生成物など）の発生を削減し、エネルギーと資源を節約したグリーンプロセスへの変換が進んでいます。例えば、上述したカプロラクタムの合成でも、新しいすぐれた触媒が開発され、超臨界水を使わなくても無用の硫酸アンモニウムを副生しない方法が実用化されつつあります。

触媒作用を有するタンパク質である酵素や微生物を利用する反応は、生体内と同様に常温・常圧、水中で進むため、省エネルギーで廃棄物の削減にも役立つという利点があります。

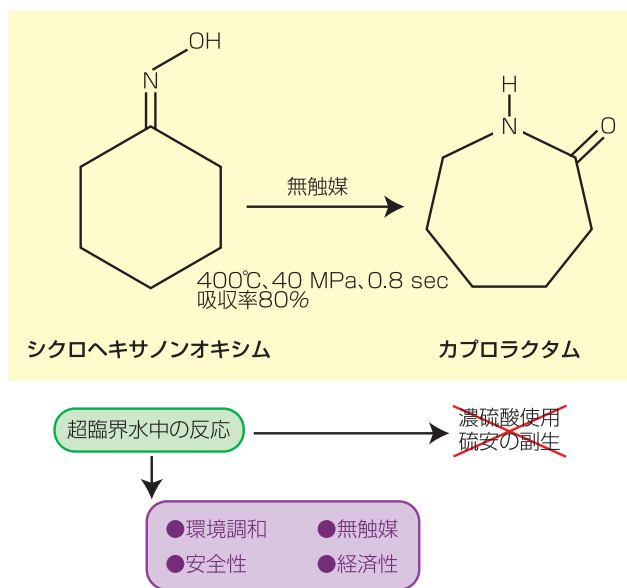
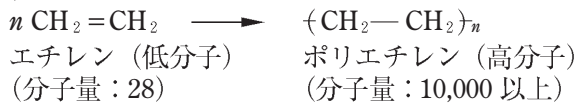


図1 カプロラクタムの新しい合成法
 産業技術総合研究所東北センターの研究

環境にやさしいプラスチック

一般に分子量が1万以上のものを高分子とよんでいます。高分子は低分子をたくさんつないでつくります。



高分子には、天然高分子と合成高分子があります。天然高分子は、タンパク質、デンプン、セルロースなどです。合成高分子は、ポリエチレン、ポリ塩化ビニル、ポリエチレンテレフタレート (PET、ペット) などで、一般にプラスチックといわれています。プラスチック製品は、私たちの身の周りにたくさんあり大変役立っています。2000年には白川秀樹博士が、電気を通さないと考えられていたプラスチックに電気を通すことができることを発見した研究で、日本で初めて高分子化学の分野でノーベル化学賞を受賞されましたが、これからもいろいろな働きをする新しいプラスチック (機能性高分子) が開発されるでしょう。

プラスチックは安い・丈夫・錆びない・腐らない・軽いなどといった長所のために、大量に使われてきていますが、反面このようなプラスチックも使用後に安易に捨てられると、とても困ったこととなります。たとえば



図1 身のまわりのプラスチック

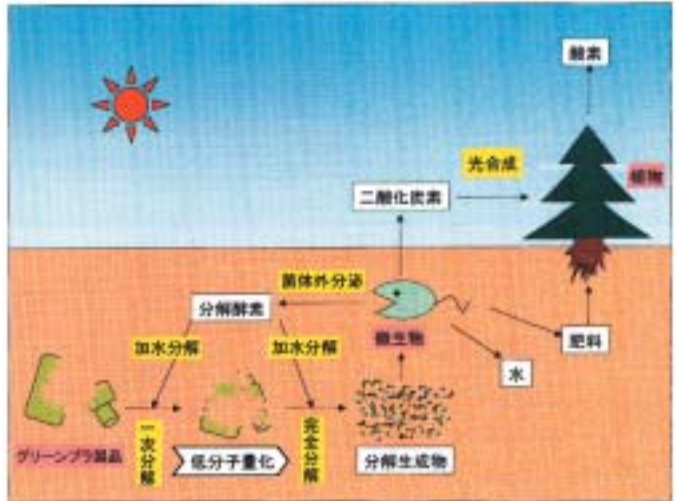


図2 グリーンプラスチックの分解過程と炭素循環のようす

(1) プラスチックは腐らないので、いつまでも土の中に残り、人間の健康や生態系にとって有害な物質が溶出するおそれがあります。また、海の上を漂い、海洋生物にも悪い影響を与えます。

(2) プラスチックの一部は、燃焼すると有害な物質を発生する恐れがあります。

そこで、これらの問題を解決するために面白いプラスチックの研究・開発が行われています。それは、自然環境中で分解するプラスチックです。このようなプラスチックのことを生分解性プラスチック (グリーンプラスチック、愛称: グリーンプラ) とよび、グリーンケミストリーの重要な分野の1つです。図2に示すように土壌中の微生物が分泌する酵素により分解し、自然界の炭素循環に組み込まれます。このグリーンプラには、ある種の微生物の体内で作られるもの、植物や動物がつくる天然高分子を利用するもの、化学合成によりつくられるものなどがあります。これからは、グリーンプラを上手に利用することにより、化石資源である石油の消費と廃棄プラスチックの量を減らしていくことが必要になってきています。

GSCN 運営委員長 御園生 誠

GSCN 教育グループ 柘植秀樹・荻野和子・竹内茂彌・渡辺 正

* なお、本冊子ではグリーンケミストリーを GSC と同義で用いています。

* さらに詳しく GSC についてお知りになりたい方はやさしく書かれた「環境と化学~グリーンケミストリー入門~」(東京化学同人)をご覧ください。