

2回にわたり、既に多くの研究機関で取り組まれている活動の一端をご紹介しました。GSCは非常に広範な技術領域を含むため、活動の全体像を把握することはなかなか困難ですが、22ページに関連のWebサイトをまとめましたので、是非ご利用ください。これまでに試みられた多くの研究・技術開発努力はGSCとしての必要条件を満たしていると考えられます。今後重要なことは、GSCとしての十分条件を如何にして組み込むかにあると考えております。GSCNは、製品や製造プロセスのライフサイクルを見通した最適化技術の確立に向けて、学際・業際での知恵の交換と総合化により、構想実現を図ります。皆様の積極的な参画をお願い致します。

## PART1

## 化学工学の再構築と グリーン・サステイナブルケミストリー (GSC)

東北大学大学院工学研究科化学工学専攻 新井邦夫

化学工学会事務局より、本誌に化学工学の立場からグリーンケミストリーに関して寄稿するように依頼を受けた。小生その任に当たらずと固辞したが、超臨界流体はグリーンケミストリー(GSC)に密接に関連している研究課題の一つであるから、その分野を専門としている小生が書くのは一種の義務であると説得され、引き受けることになってしまった。

確かに、GSCという明確な行動指針を意識していたかは別として、学術会議や超臨界流体利用技術先導研究開発の専門委員会において、大量生産、大量消費、大量廃棄の20世紀型文明から環境調和・物質循環型社会の21世紀型文明を実現するためには、本質的に環境負荷低減技術となり得る波及効果の高い超臨界流体利用技術等の基盤技術の確立とそれらの成果を基にして新たな化学工学体系を構築することの必要性を標榜してきた一人として、寄稿の機会を与えられたことに感謝せざるを得ない。

### はじめに

第17期学術会議での化学工学研究連絡委員会及び物質創製工学研究連絡委員会化学プロセス工学専門委員会の対外報告、未来社会を支える「統合的化学工学」の構築と国際的ケミカルエンジニアの育成において、早急に構築すべき基盤技術として、以下の6つの課題をあげている。

- 物質のメソスコピックな構造を制御するための基盤技術
- 高分子材料精密製造プロセスの基盤技術
- 触媒を利用する基盤技術
- 超臨界流体を用いる基盤技術

### バイオテクノロジーを用いる基盤技術 物質循環のための基盤技術

これらは、環境調和・物質循環型社会の構築を最重要視して、21世紀の我が国化学産業の競争力強化に必須な共通性の高い「基盤技術」として提示した。さらに、その研究・開発を産官学が連携して行い、その過程で得られる成果を「統合的化学工学」の構築に結実し、全人類の知的共有財産とするために、「化学技術統合研究機構」の設立を提言した。

この提言はまさに本年3月に設立されたGSCネットワーク(<http://www.gscn.net/>)の趣旨にも対応するもので、ここでは、本対外報告を骨子とし、化学工学の再構築がGSC運動の推進に本質的に貢献し得ることを述べてみたい。

## 化学工学体系の再構築は必要か

20世紀において文明が急速に発達した要因として、基礎及び応用科学分野における学問の著しい進歩があげられる。学問とは体系化された知識である。それにより知識が公共化され、世代と国境を越えて、時間的、空間的伝達が可能になり、科学技術の普及と発展を可能にする。現象の理解を最終目標とする自然科学(Science)においては、科学的発見や成果そのものが体系化に直接結びつく。これに対して、自然現象を応用して社会の発展に寄与することを目標とする工学(Engineering)においては、社会的背景の変遷により、その体系は意識的、恒常的に変革あるいは再構築されるべきものと考えられる。

工学体系の構築が、産業の発展にとっていかに重要であったかを示す典型例は、約80年前の米国における化学工学の成立に見ることができる。当時の米国は、欧州に比べ化学産業では後進国であり、化学技術者の人材育成が急がれていた。そこで、当時の化学プロセスの設備・工程を科学的に解き明かし、化学のみならず、物理も数学も用い、さらには経済的観点と分類学的手法をも導入して、今日の化学工学体系の原形を誕生させた。その後、化学工学は全世界に普及し、科学技術の成果を取り込み、工学の一分野として確立された。このような世界に先駆けた体系化の経験は創造性発現の社会的環境の原点とも考えられ、米国では、化学工学は、多くの革新的プロセスを成立させる工学として機能的に働き、米国の化学産業の世界におけるトップランナーとしての地位を揺るぎないものとしている。80年も前に化学工学を誕生させた米国での現在に続く化学産業の隆盛に見られるように、工学体系化の経験が、産業の発展に国際的に貢献するのみではなく、国内の人材の育成、技術の創成の強力な基盤となり、産業創成を効果的、効率的に促進することは注目すべき事実である。

一方、平成7年11月15日に施行された「科学技術基本法」に明確に示されているように、我が国が科学技術に関してキャッチアップの時代を終焉し、フロントランナーの一員として、自ら未開の科学技術分野に挑戦し、創造性を最大限に発揮し、「科学技術創造立国」として未来を切り拓いて行くための必要な施策を講ずることが求められている。この重要な施策の一つとして、21世紀の産業を支える人材の育成が挙げられるが、その基盤となる学問体系の整備・改革についての真剣な論議が必要と考える。特に、工学の体系は前述したように社会的・経済的ニーズにより変遷すべきものであり、20世紀における大量生産、大量消費、大量廃棄の社会から環境調和・

物質循環型社会への急速なパラダイムシフトが迫られている状況において、物質生産を支える工学としての化学工学の再構築は必須と考える。真の意味での学問体系の構築体験の無い我が国がこのような社会の要請に応え得る工学体系化に世界に先駆けて果敢に挑戦していくことが、国際的な貢献を果たすと共に、我が国固有な条件に根差した「科学技術創造立国」を実現する重要な戦略の一つと考える。

## 化学工学は如何に変わるべきか

物質の機能や状態は原子、分子そのものの一次構造とそれらの集合で形成される高次構造に依存する。物質生産を取り扱う工学の化学の分野では、“What to make”の視点からは物質の構造と機能の関係や構造の形成についての理解と解明に重点が置かれ、“How to make”の視点からは生産プロセスでこれら構造を形成させる最適な手法の確立に重点が置かれる。多くの場合、実験的手法と生産プロセスが一致することは希で、実験室の成果を基に段階的なプロセス開発研究を経て生産プロセスが決定される。

従来、前者の役割を応用化学、後者を化学工学が担ってきたが、GSC行動指針のもとに、環境調和・物質循環型社会を効果的、効率的に実現するためには、前者の研究段階においても生産プロセスを的確に想定し得る“How to make”の視点が、また後者のプロセス開発研究においても、物質の構造と機能の関係や構造の形成についての理解と解明にも積極的に関与し得る“What to make”の視点が必要と考える。そのためには、これまで、応用化学と化学工学が「化学製品の社会への供給」を支える工学という共通の使命、目的を持ちながらも、ややもするとお互いが乖離していた状況を是正し、共通の目的の下に工学の立場から統一された手法、すなわち、「基盤技術」を共同して開発し、それらを共通の工学基盤として夫々が専門性を深めた体系化を進めることが重要と考える。化学工学(“How to make”)の立場からは、積極的に“What to make”をも発想し得る「新たな化学工学体系」の構築が望まれる。

学術会議の対外報告においては、従来の学問領域を超えた広い領域の知力を結集して、物質・エネルギー変換において重要でかつ共通性の高い冒頭に述べた6つの「基盤技術」の開発と、さらに、その成果をもとに以下に示す特性を有する「統合的化学工学」の体系化の提案を行った。

科学と工学を融合・統合した工学体系であり、物質

創製、プロセス設計、操作条件の設定、装置設計という一連の業務に対処できる工学である。

物質の生産と処理のための新しい場の開拓に貢献できる工学である。

高度な精密構造制御や微細加工技術の開発に貢献できる工学である。

ミクロな現象の解明による新しい装置設計法の確立に伝える工学である。

地球環境・物質循環という巨大なシステムから原子・分子レベルの微視的システムに至る多様なシステムの物質・エネルギー変換プロセスを対象にする工学である。

## 統合的化学工学の体系化による GSC運動の促進

化学に関連する産業では、不断に使用してきたエネルギー・資源の枯渇、環境問題により、物質循環と環境負荷を考慮した、原料選択と製品設計、及び製造プロセスの選択等、製品の全ライフサイクルを見通した製造工程の根本的な変革が必須とされており、この認識がGSC運動の発端と考える。

一方、化学工学は多様な原料から多様な製品を製造するための装置、機械、プラントの設計、建設、運転と技術とその基礎の学術を含んだもので、外部的制約条件の変更に柔軟に対応できる体系を有するものである。すなわち、化学工学の最も大きな特徴は、化学プロセスを構成するあらゆる要素技術を、反応操作や蒸留、吸収、吸着、伝熱等の多くの単位操作として分割して、各装置の設計・操作方法を確立し、それらを外部制約条件の下に最適なシステムとして組み合わせることにより、如何なる化学プロセスでも汎用的に設計し得る体系を有している。この方法論は極めて強力で有効であり、20世紀における石油資源を原料とした数多くの新しい物質の製造プロセスの開発やその製造コストの削減等、実用化に大きな貢献をなしてきた。

このような化学工学的手法は、GSC行動指針に盛り込まれている制約条件下で、化石資源のみではなくバイオマスや廃棄物等への原料の多様化、反応操作の多様化、製品機能の多様化と益々多様化する化学・材料プロセスの設計にも極めて有効と考える。しかし、このようなプロセスに必要とされる要素技術は従来の単位操作や反応操作のみでは不十分であり、ここに、GSC運動の促進のためにも、冒頭に述べたような早急に開発すべき基盤技術を特定し、その開発の実践を通して、「統合的化学工

学」の体系化が必要と考える。

従来から、化学工学の研究は手法の開発を主目的とするため、安全性が高く、毒性の低い物質をモデル物質として用い、その結果を実際の物質操作に適用する方法を用いてきた。従って、化学工学の研究そのものは本質的にグリーン指向の高い研究と言える。しかし、これはあくまでも研究の範囲内であり、実プロセスに用いる物質の安全性にも積極的に関与することが求められる。“What to make”の視点も取りいれて体系化された「統合的化学工学」は、前述した特性を有することにより、種々の分野でのGSC運動の成果を効果的、効率的に実用プロセスに反映する役割を担うと同時に、基礎、応用、開発研究の段階においてもGSCに有効な手法の選定や開拓に寄与できる工学として位置づけられるものとする。

## おわりに

本文は、第17期学術会議の報告を骨子とするものの、その正確な紹介を意図したものではない。報告の趣旨から逸脱する個所が存在するとすれば、全て小生の個人的責任に帰すものである。ご容赦いただければ幸いです。



## PART 2

# グリーンサステイナブルケミストリー 高分子学会の取り組み

東京工業大学大学院 井上 義夫

プラスチック、合成ゴム、合成繊維などの高分子材料は軽量で、丈夫で腐らず、しかも安価に入手できる素材として航空機、エレクトロニクス機器などのハイテク製品から種々の生活用品に至るまで人間生活のあらゆる分野で使用され、私たちに便利で豊かな生活をもたらしている。高分子材料は今や生活の必需品となっていると言ってよい。ほとんどの高分子材料の原料は有限化石資源である石油に依存しており、したがって高分子材料の生産はエネルギー資源問題と直接的に関わっている。また、プラスチックゴミ処分問題や環境流出プラスチックによる生態系の破壊などに見られるように使用後、廃棄物になった時の高分子材料は地球環境問題と深い関わりを持っている。高分子学会では、資源問題と地球環境問題という高分子材料が抱える二つの大きな問題の重要性を認識し、これらの問題に早くから積極的に取り組んできている。ここでは、「グリーンサステイナブルポリマー（この用語は高分子学会で正式に認知されている訳ではない）」に関する高分子学会の取り組みの現状について述べる。

## はじめに

化石資源である石油を原料とする現在の高分子材料生産システムは、20世紀半ばから主に先進工業国の基幹産業として発展し、高分子材料の大量生産を可能にしたが、一方で石油資源枯渇と地球環境破壊という二つの深刻な問題をもたらした。1998年の世界のプラスチック総生産量は約14,000万トンで、その約10%が日本で生産されている。日本での1989年から10年間のプラスチック生産量は約1,220万トン（1989年）～1,520万トン（1997年）の間で推移している。1997年の日本での1人当たりの年間プラスチック消費量は97.2kg（前年比3.6%の増加）であり、ドイツの124.0kg（前年比7.8%増加）、米国の145.0kg（前年比1.4%増加）と比べると多いとは言えず、一時的な増減はあっても今後しばらくは我が国でのプラスチック消費量増加の傾向は続くであろう。発展途上国の中には10%を越す高水準の消費量増加を示している国もある（プラスチック、50（6）、17（1999））。世界的にも、21世紀の少なくとも前半はプラスチック消費量は増加し続けるものと考えられる。

高分子材料の使用量が増加すれば、当然の結果として廃棄物量も増加する。1997年には、日本の全プラスチック廃棄物の排出量（使用済排出量と生産加工ロス量の合計）は950万トンに達した。この内の24%が単純焼却、34%が埋立により処分され、有効再利用されたのは燃料と発電で合わせて約30%、リサイクルにより再生産にま

わされたのは12%であった（出典：プラスチック処理促進協会調査結果（1999年6月））。プラスチックは丈夫で腐らないので埋立処分した場合、累積量は増大する一方であり、都市部を中心にして埋立て用地を確保することが年々困難になっている。埋立処分で問題になるゴミ量は重量ではなくて体積であり、ゴミ全体の体積に占めるプラスチックの割合は極めて高い。従って、廃棄物最終処分場の延命化のためにはプラスチック廃棄物を減容化する必要がある。また、プラスチック廃棄物の環境中への流出による地球環境破壊も見逃すことのできない大きな問題である。

前出の1997年の統計によると単純焼却処分と燃料、発電用に有効利用された分を合わせて全プラスチック廃棄物の半分以上が焼却されている。1990年代に入って、焼却の際の二酸化炭素と有害物質の排出による地球環境破壊の問題が顕在化した。

工業製品の大量生産を可能にし、物質的に豊かな生活をもたらした20世紀の著しい産業技術の進歩はエネルギー・資源の大量使用を前提としている。21世紀を目前にして、エネルギー・資源の大量消費型の社会システムを見直し、持続可能な循環型社会構造を構築しようという機運が盛上がっている。プラスチックを初めとする高分子材料の大量生産を可能にしている主原料は枯渇が心配される石油資源である。

米国地質調査所は、米国を除く世界の今後利用可能な推定石油埋蔵量は2兆1,200億バレルに達すると推定し、

これまでの100年間の生産量は5,390億バレルであるとしている。<2000年4月3日、朝日新聞>。米国エネルギー省による世界のエネルギー需給の予測<2000年3月22日、朝日新聞>によれば、1997年を基準にして2020年のエネルギー消費量は60%増加する。エネルギー供給量の中の原油が占める割合は1997年で39%であり、2020年にも原油が相変わらず38%のエネルギーを供給すると予測されている。21世紀の少なくとも前半のエネルギー資源の約4割を20世紀後半と同様に石油に頼らざるを得ないようである。持続可能な社会を構築するためには石油資源の節約と代替エネルギー資源の開発は必須である。地球上に無尽蔵に存在し、究極の資源とも言える水と二酸化炭素から太陽光の助けにより生合成される生物有機資源を石油代替化学工業原料としていかに有効に利用するかが持続可能な材料システムの構築のカギとなるであろう。

## 高分子学会の活動

高分子学会では、地球環境問題の解決に積極的に貢献するために、約10年前から「年次大会」と「高分子討論会」に環境問題を主題とする特定テーマを設定し、討議を重ねてきている。最近になって、環境問題の取り組みの重要性が益々高まり、関連研究発表件数が増加する傾向にあることにより、平成12年度からは「年次大会」と「高分子討論会」の両方に六つの一般テーマ発表分野の一つとして「環境と高分子」分野を常設することになった。先に行われた第49回年次大会（平成12年5月29日～31日、名古屋）での同分野での口頭発表とポスター発表の合計の発表件数は76件であった。第49回高分子討論会（平成12年9月27日～30日、仙台）では一般テーマ発表分野「環境と高分子」に加えてさらに特定テーマ「環境適合性高分子の設計と応用」を設定している。高分子分野の環境問題を取り上げているのは国内の学会に限られているわけではない。高分子材料が関係する環境問題は地球環境問題である。最近行われる高分子関係のほとんどの国際会議には環境関係が重要項目として取り上げられている。

高分子学会では、「年次大会」と「高分子討論会」に加えて研究会でも環境問題に取り組んでいる。高分子学会の研究会は、高分子科学技術の広範な分野での専門、学際活動の必要性に鑑み、焦点を絞った研究交流と最新情報の交換および提供を行うことを目的としており、現在24の研究会が設置されている。研究会設置の目的を達成するために、研究会への入会は高分子学会会員であることを条件としてはいない。多数の会員の要請により、高分子学会では1992年に「エコマテリアル研究会」と「ポリマーリサイクル研究会」の二つの研究会を設置し、活発な活動を展開してきている。研究会による高分子材料

の環境問題の取り組みはこれら二つの研究会に限定されている訳ではなく、「土木建築材料研究会」、「反応工学研究会」などの研究会においても検討対象とされている。

以下に「エコマテリアル研究会」と「ポリマーリサイクル研究会」の設立趣旨と活動状況を紹介する。

### 1. 高分子学会エコマテリアル研究会

本研究会の設立趣旨と活動概要は次のとおり。「地球環境問題と資源・エネルギーに関する諸問題が人類の生存に関わる最重要課題として全世界規模での解決を迫られていることを背景に、本研究会は1992年に発足した。本研究会は、エコマテリアルという新しい概念の新材料を高分子科学、材料科学、環境科学、微生物学、バイオテクノロジーなどの広い視野から多面的に研究し、地球環境保全、資源の有効利用と循環型社会の構築に役立つ高分子材料を創成することを目標として活発な活動を行っている、学際色が極めて強い研究会である。本研究会の研究対象分野は次のとおりである。(1)使用中は優れた性能を持続的に発揮し、廃棄後は微生物等により速やかに分解され、無機化する生分解性高分子材料の設計と評価・試験方法の検討、(2)大気や水の浄化、砂漠の緑化、炭酸ガスの固定化および有効利用、廃油回収、金属回収、酸素富化、土壌改良などのさまざまな方面で環境保全に役立つ、新しい機能性材料の分子設計と技術開発に関する方法論の検討<1998年度研究会運営委員長・井上義夫：高分子、47巻、487頁、1998年>。表1には最近3年間の研究会活動を示した。

表1. エコマテリアル研究会の最近の研究会活動

98 - 1 研究会、平成10年6月25日、26日
1) 生分解性ポリエステルブレンドの相構造 (東京工業大学生命理工学部) 吉江尚子
2) 生分解性多糖材料の新展開 (セルロースの結晶構造と酵素分解機構 (京都大学木質科学研究所) 杉山淳司
3) 生分解性多糖材料の新展開 (キチン・キトサンの化学修飾とその応用 (東洋大学工学部) 石井茂
4) 生分解性ポリマー合成の新展開 (生分解性ポリマーの酵素合成 (京都大学大学院) 宇山浩
5) 生分解性ポリマー合成の新展開 (酵素を用いる生分解性高分子の合成 (慶應義塾大学理工学部) 松村秀一
6) 生分解性プラスチック「グリーンプラ」の新展開 (理化学研究所) 土肥義治
98 - 2 研究会、平成10年11月6日
1) セルロースからの生分解性高分子に関する最近の検討 (京都大学大学院農学研究科) 吉岡まり子
2) ポリアミノ酸誘導体の応用と開発 (三井化学機能性材料開発センター) 玉谷弘明
3) 生分解性ポリエステルの放射線グラフト重合および架橋 (群馬大学工学部) 三友宏志
4) 生分解性ポリエステルの結晶化と構造・機能 (理化学研究所高分子化学研究室) 阿部英喜
98 - 3 研究会、平成11年3月26日
1) ポリ乳酸繊維・不織布・フィルム「テラマック」について (ユニチカ) 望月政嗣
2) ポリエステルカーボネートの特性と応用 (三菱ガス化学) 高桑恭平
3) 白色腐朽菌による合成高分子の生分解 (静岡大農) 西田友昭
4) ポリアミノ酸の生分解 (上智大理工) 讃井浩平

99 - 1 研究会、平成11年7月9日

- 1) 糖質を活用した生分解性ポリエステル合成 (名大院生命農学) 岡田鉦彦
- 2) GlycoscienceからGlycomaterials Scienceへの展開 (北大院理) 西村紳一郎
- 3) 藍藻によるポリヒドロキシ酪酸の生産 (生工工学工研) 浅田泰男
- 4) リン化合物存在下における脂肪族ポリエステルの合成 (物質研) 増田隆志

99 - 2 研究会、平成11年11月11日、12日

- 1) PETの微生物分解 (京都工繊大学繊維) 小田耕平・木村良晴
- 2) コンポスト化環境下における生分解性プラスチックの分解性 (筑波大農林工学) 木村俊範
- 3) 乳酸系高分子の医療への応用 (鈴鹿医療医科大) 筏義人
- 4) 生分解性プラスチックの識別表示について (生分解性プラスチック研究会) 野長瀬三樹
- 5) 超高分子量生分解性ポリエステルの生合成、物性および生分解性 (理研) 岩田忠久
- 6) 環境調和型高分子素材の分子設計 (生命研) 常盤豊
- 7) 生分解性プラスチック研究の新展開 (東工大院生命理工) 井上義夫

99 - 3 研究会、平成12年3月23日

- 1) ポリエチレンの微生物分解について (化学物質評価研究機構) 大武義人
- 2) 「セルグリーン」について (ダイセル化学) 伊藤正則 3) ポリブチレンサ
- 3) クシネート系生分解性樹脂「ピオノール」の成形加工性と用途開発 (昭和電工) 今泉光博
- 4) 「LACEA」の市場開発 (三井化学マテリアルサイエンス研) 大淵省二

2000 - 1 研究会、平成12年7月4日

- 1) 熱帯産バイオマスの利用のための高速L-乳酸発酵 (九州大学大学院生物資源環境科学研究科) 石崎文彬
- 2) ポリ乳酸コポリマーの合成と性質 (物質工学工業技術研究所高分子化学部) 岡岡正雄
- 3) 生分解性脂肪族ポリエステル及び共重合体の合成と性質 (物質工学工業技術研究所有機材料部) 曹阿民
- 4) ポリアスパラギン酸分解微生物とその分解酵素の性質 (理化学研究所高分子化学研究室) 田島健治

## 2. 高分子学会プラスチックリサイクル研究会

本研究会の活動概要は次の通り。「経済システムにおける物質の循環を促進し、環境の負荷を低減して社会を持続可能なものとするために、わが国では1993年に環境基本法が施行された。それに続いてリサイクル法、容器包装リサイクル法などが施行され、資源循環型社会の構築へ向けた動きが一段と高まっている。本研究会では、これまでマテリアルリサイクルのための材料開発・分離技術、ケミカルリサイクル等について調査研究を行うとともに、廃プラスチックの回収・輸送の問題、廃棄物埋立て地の問題等に、LCA的手法を適用した研究を実施し、その成果を講演会で発表してきた。今後さらに、リサイクル性を含めたライフサイクルの観点からプラスチックリサイクル技術を展望し、有用な技術・素材を開発するための課題を提言できるよう研究活動を進める」<1998年度研究会運営委員長・増田隆志：高分子、47巻、492頁、1998年>。表2には最近3年間の研究会活動を示した。

### 表2. プラスチックリサイクル研究会の最近の研究会活動

第7回講演会、平成10年7月8日

- 1) 廃プラスチックリサイクルと再商品化技術 (プラスチック処理促進協会) 井上毅
- 2) 技術開発にインセンティブを与えるためのLCAと京都会議への対応 (東洋製罐 技術情報室) 沖慶雄
- 3) 廃プラスチックと環境のかかわりおよびそのLCA的評価 (国立環境研) 中杉修身
- 4) 容器包装リサイクル法施行後のPETリサイクルと再商品化の進展状況 (東洋製罐 環境対策室/PETボトル協議会) 木原弘二
- 5) 容器包装リサイクル法施行後の現状とその他プラスチック容器包装への対応 (日本容器包装リサイクル協会) 土居敬和

98 - 2 研究会、平成10年10月15日

- 1) Indenti Plast (1997, Brussels, Belgium) にみるプラスチック判別技術 (住友化学) 三宅彰
- 2) 静電分離技術による分離 (センコー工業) 藤田嘉久
- 3) 湿式分離技術の現状と課題 (荏原製作所) 中敷国晴
- 4) センサーを用いる廃プラスチックの分離 (総論) (三菱重工) 米田健一
- 5) プラスチック選別装置 (近赤外) (新潟鉄工所) 小川齊
- 6) PVCボトル回収システム (X線) (新明和工業) 筒井陽一郎
- 7) Kissplotlight (特殊可視光) (三石化エンジニアリング) 浅葉文雄
- 8) 総合討論：司会 明高高司

第8回講演会、平成11年2月15日

- 1) ISO1400シリーズと環境ラベル・LCA (国立環境研) 後藤典弘
- 2) エコラベルとグリーンマーケティング (エコマネジメント研) 森下研
- 3) 環境ラベルTYPE1および2の最近の動向 (産業環境管理協会) 上原春夫
- 4) 環境ラベルTYPE3の最近の動向 (日本規格協会) 吉村秀勇
- 5) 日本のエコマークとその改善 (日本環境協会) 田口整司

99 - 1 見学会、平成11年7月13日

- ・NKK 京浜製鉄所
- ・東芝 京浜事業所入船分工所

第9回講演会、平成11年12月3日

- 1) 持続可能な循環型社会構築へ向けた産業技術政策 (工技院 物質プロセス技術) 加藤正男
- 2) グリーンケミストリーとプラスチックリサイクル (工学院大環境化学) 御園生誠
- 3) プラスチック容器包装廃棄物リサイクルの今後の方向 (プラスチック容器包装リサイクル推進協議会) 日向寺昭夫
- 4) 廃プラスチックリサイクル品に関する試験評価方法の標準化について：廃棄物固形化燃料および製品等について (化学技術戦略推進機構 高分子試験・評価セ) 高野忠夫
- 5) プラスチック分離技術の現状 (オプト技研) 天野敏男
- 6) 塩ビ業界のリサイクルへの取り組み (三菱化学 塩ビ事業) 新居宏美
- 7) 加熱脱塩素技術と廃プラ高炉原料化システム (日本鋼管 総合リサイクル事業推進) 家本 勅
- 8) 含塩素廃プラスチックの熱分解と塩素収支 (日本省エネ・環境製品) 村田勝英
- 9) NGKガス変換溶融プロセスを用いた廃棄物処理技術 (日本ガイシ エンジニアリング事業) 柳瀬哲也
- 10) 廃プラスチック高温噴流床ガス化技術 (川崎重工明石技研研) 庄司恭敏
- 11) 廃プラスチックの化学工業原料化へ向けたガス化技術 (宇部興産 環境事業) 亀田修

99 - 2 研究会、平成12年3月2日

- 1) わが国のPRTRおよびMSDS法制化への取り組みについて (通産省化学物質管理課) 西村正美
- 2) 環境ホルモンの現状と対策 (SPEED'98プロジェクト等について) (環境庁環境保健部環境安全課) 中山綱
- 3) 企業にとっての環境ホルモン問題 (三菱化学 環境安全部) 西川洋三
- 4) ダイオキシン類の発生源と対策 (資源環境技術総合研) 今川隆
- 5) 超臨界水によるダイオキシンの低減化・無害化技術 (物質研) 佐古猛
- 6) ポリカーボネートの環境問題をめぐる話題と取り組みについて (出光石化) 中間俊輔・迫田篤信

2000 - 1 見学会、平成12年6月9日

- ・川崎製鉄(株) 千葉製鉄所

## おわりに

文頭でも述べたように現在、高分子材料のない生活は考えられないほどまでに高分子材料は人間生活のあらゆる分野で使用されている。最近のPETボトルのリサイクル状況一つをとってもわかるように、高分子材料の関係する環境問題は複雑な社会システムと切り離して解決することはできない。高分子材料の関係する環境問題は、個々の高分子材料を構成する分子レベルの問題にとどまらず、資源エネルギー問題や複雑な社会問題とも密接に関係しているのである。高分子学会は、高分子材料の関係する資源エネルギー問題と環境問題の解決を目指して、グリーンサステナブルポリマーシステムの構築に真剣に取り組んでいる。

# グリーン・サステイナブルケミストリー (GSC) シンポジウムの開催に向けて

グリーン・サステイナブルケミストリー (GSC) シンポジウム実行委員長  
上智大学理工学部 瀬川幸一

1998年に化学関連11団体をメンバーとした「グリーンケミストリー連絡会(GC連絡会)」が(財)化学技術戦略推進機構(JCII)が事務局となり発足した。その連絡会において「グリーン・サステイナブル・ケミストリー(GSC)」とすることおよびその基本理念、活動の基本骨格が決められ、本年3月にはGSC活動の中心組織として、10団体(日本化学会、化学工学会、高分子学会、日本化学工業協会、バイオインダストリー協会、新化学発展協会、物質工学工業技術研究所、化学情報協会、化学物質評価研究機構、化学技術戦略推進機構)3オブザーバー(通産省、NEDO、IUPAC)から構成される「グリーン・サステイナブルケミストリーネットワーク(GSCネットワーク)」が発足した。そのGSCネットワーク主催による初の公開行事として、来る10月12日13日両日には、第1回GSCシンポジウムが開催される予定である。関係各位のご協力のもと、是非、シンポジウムが成功裡に終わることを願うものの一人である。

## 「グリーンケミストリー」とは

「グリーンケミストリー」とは、今まで“Environmental Benign”, “Environmental Friendly Chemistry”, “Clean Chemistry” などと呼ばれてきたものを統合した言葉と概念である<sup>1)</sup>。普及に先導的な役割を果たしてきた米国の環境保護局(EPA)によれば「化学品の設計・製造から廃棄・リサイクルまで全ライフサイクルにわたって、人間の健康や環境に害を与える原料、反応試薬、反応、溶媒、製品をより安全で環境に影響を与えないものへの変換を進めること。また、変換収率、回収率、選択性の高い触媒やプロセスの開発によって廃棄物の少ないシステムを構築する。」こととされている。経済協力機構(OECD)では“Sustainable Chemistry”を統一的な旗印とすることが加盟国間で合意され、1998年以来日本も参加して活発に活動が開始されている。

米国では前述のEPAが中心となって「グリーンケミストリー」を積極的に推進しており、EPA内に研究所“Green Chemistry Institute (GCI)”が1997年に設置された。この研究所の役割は産業、政府、大学および国立研究所のパートナーシップを構築し、主として情報発信による「グリーンケミストリー」の推進を行うことである。また研究資金として“Technology for a Sustainable Environment: NSF/EPA Partnership for Environmental Research”のプログラム名でNSF(National Science Foundation)とEPA協同で定期的な公募が行われており、関連学会活動や広報活動なども他国と比較して一歩進ん

でいる。一方、産業界にとって「グリーンケミストリー」は製造プロセスで利益を生み出し、製品の競争力強化と商品価値を高める技術であると同時に「グリーンケミストリー」に取り組むことでの企業モラル向上や「化学技術および化学産業」の社会への貢献を示すよい機会であるとの意識が定着しつつある。

最近、Industrial Ecologyという言葉が、頻繁に使われるようになってきた。この言葉は、Science of Sustainabilityという言葉に置き換えることも出来、社会、産業界の持続発展性を踏まえた、より実際の「グリーンケミストリー」運動に発展しつつあることを示している。この考え方は、社会一般から孤立することなく産業界が、経済的、文化的、技術的に進化することが求められているとも言えよう。これらの問題に対処するためには、原料から製品に、またその利用、廃棄、更にはそのリサイクルに至るまでの全物質サイクルについての評価およびその最適化が重要となる。

現在、環境問題としては、温暖化、酸性雨、オゾン層破壊などが重要課題として取り上げられ多くの対策がとられてきた、また最近、ダイオキシン等有害化学物質に対する関心が高まり、それらの物質の生態系への影響について活発な研究が行われてきている。更には、プラスチックのリサイクル技術、およびその技術を可能にするインフラ整備などに大きな関心を持たれている。しかし、環境的に好ましくない物質が排出されなくなったからといって、環境問題が化学産業に全く影響を与えていないわけではない。現状は、化学反応プロセスで副生

する物質を環境的に無害な形に変換したり、廃棄するために、多大な経費やエネルギーが費やされている。エネルギーの消費は、新たなエネルギー生産過程を必要とし、それがまたCO<sub>2</sub>やNO<sub>x</sub>の排出をもたらすことになる。また多くの溶媒を用いるプロセスや、多くの反応ステップを要するプロセスはエネルギーの消費が大きく、これら環境負荷の低減のために、プロセスの変換や改良が求められている。

また、化学物質を取り扱う事業所に対しては、環境汚染物質排出・移動登録(PRTR: Pollutant Release and Transfer Register)制度が具体化しつつあり、高収量、高収率だけがプロセスの選択の基準であった時代から環境との調和を含めた総合的視点が要求されている時代が変わりつつある。

### 「グリーン・サステイナブルケミストリー」の視点

Roger A. SheldonはE-factorおよびAtom Utilizationという指標を提唱し、それぞれの化学プロセスの評価基準に使っている。E-factorとは一つのプロセスの中での副生成物の重量と生成物の重量の比で表し、ゼロエミッション目指す評価基準に相当するものである。Sheldonは化学産業を石油精製工業から川下に向かって、バルクケミカルズ、ファインケミカルズ、および、製薬の四つのカテゴリーに分類し、それぞれの相対的な生産量とE-factor [副生成物(kg) / 主生成物(kg)] を示した<sup>2)</sup>。

これによると、石油精製工業におけるE-factorは0.1であるのに対し、バルクケミカルズのそれは、1から5程度、ファインケミカルズは5から50に増加し、製薬に至っては25から100以上に急増する。言ってみれば川下に行くほど廃棄物(副生成物)の割合が大きくなり、ゼロエミッションプロセスの構築のためには、今後、それぞれのプロセスを見直し、環境負荷低減のために、大きな開発努力が必要となる。一方、それぞれの生産量は石油精製から川下に向かって一桁ないし二桁ずつ逆に減少する。したがって、それぞれの分野別の総合的な環境負荷を表現するには製造量とE-factorの両者を考慮して評価するのが妥当であろう。これらの負荷を軽減するためにはまさしく「グリーンケミストリー」運動の実践によって解決を図ることになる。

Paul T. Anastas, John C. Warnerらによる“Green Chemistry: Theory and Practice”の中に「グリーンケミストリー」の12箇条が提示されている<sup>3)</sup>。この中には、合成ルートをよく吟味し、溶媒や反応試薬の選択により、より安全かつ廃棄物のない(ゼロエミッション)プロセス

を構築し、環境負荷の低減を図ることが重要であることを指摘している。これら12箇条はファインケミカルズおよび製薬を対象とした比較的小規模の製造プロセスに対して提示されたようであるが、それぞれの項目がこれからの化学産業の方向性を良く表している。筆者らは次に掲げる3項目が化学工業にとって改善すべき重要課題であると考えている。

環境問題の視点から改善を要するプロセス

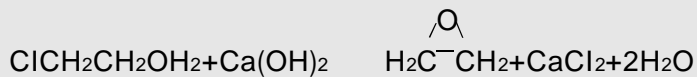
- (1) 廃棄物が大量に発生するプロセス  
(ゼロエミッション)
- (2) 危険物を扱うプロセス(環境リスク)
- (3) エネルギー多消費プロセス  
(資源エネルギー・温暖化)

上記のような問題を抱えるプロセスについては、プロセスのより環境負荷の少ないプロセスへの見直しも、重要であるが、同時に、そのプロセスによくマッチした触媒の探索も、重要な因子となる。不均一系固体触媒は従来から、石油精製、バルクケミカルズ製造の分野で広範囲に利用され、その触媒の性能は、環境負荷を評価するときの重要な因子の一つである。

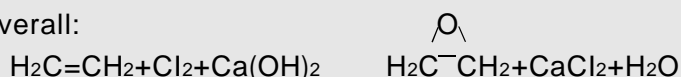
### シンポジウムに向けて

前述のAtom Utilizationとは化学反応の量論式の中で目的とする化合物の分子量と生成物すべての分子量の合計の比で表示し、そのプロセスの廃棄物に対する負荷を考える方法である。例えば、エチレンオキシドの合成におけるクロロヒドリン法は、環境問題に淘汰された古典的なプロセスということが出来る。この方法では、エチレンクロロヒドリンが中間体として単離されることなく、エチレンオキシドに変換される。エチレンオキシドの収率は約80%に達し、この点では優れたプロセスと言えよう、しかし、用いられた塩素はすべて事実上無価値となってしまふ。この方法では、エチレンオキシド1tあたり3-3.5tのCaCl<sub>2</sub>が生成してしまふ。このように、クロロヒドリン法では、多量の塩素を要するにもかかわらず、殆ど無価値のCaCl<sub>2</sub>としてしか回収されず、また廃水処理に問題を抱えていた。1960年代にAg触媒を用いるエチレン酸化法の出現のもとに、エチレンクロロヒドリン法は淘汰された。

エチレンクロロヒドリン法が直接酸化法にとって代わられた理由は、高価な塩素の使用量が多いこと、副生物の生成が多いこと、反応熱の回収も難しくエネルギー多消費プロセスであることによる。しかし、開発当初のAg触媒は上式のようにAtom Utilizationが100%にも拘わらず、燃

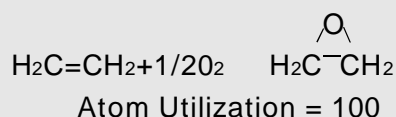
**エチレンクロロヒドリン法**

Overall:



Molecular weight      44      111      18

Atom Utilization = (44/173)x25%

**エチレン酸化法**

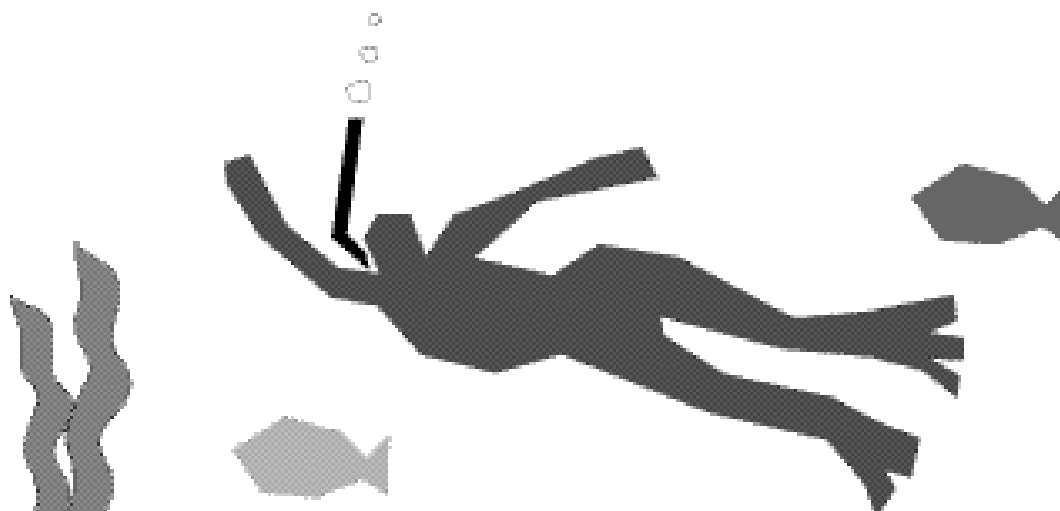
焼反応によるCO<sub>2</sub>が副生し触媒性能が充分でなかった。現在は、燃焼反応を抑制する触媒の改良が進み、実験室には90%以上の収率でエチレンオキドが得られるプロセスに進化している。活性成分であるAgは担体に担持された状態で使用される。担体は燃焼活性を下げるため大きな細孔と小さな表面積のγ-アルミナが用いられているが、微量の金属酸化物の添加によりその機能を改良する試みがなされている。触媒成分としてはアルカリ、アルカリ土類金属の添加、特にCsの添加により選択性が大きく改善された。また完全酸化を抑制するために1,2-ジクロルエタンのようなインヒビターを系内に数ppm添加する方法が採用されている。

化学産業は、自然界に存在する種々の資源を利用して、これに化学的な物質変換と加工を行い、製品を作る産業である。化学産業によって、社会の発展や、人間生活の向上に役立てようとする製品の開発が行われ、それぞれの時代における合理的な技術が生み出されて発展してきた。それは社会のすべての主要な分野、例えば、農業、食料、衣服、住宅、交通、通信、そして医療の中で大き

な影響を与えてきた。化学技術とは本来「豊かさと利便さ」を追求し、自然のある一面をうまく利用とする道具であるが、一般に特定の目的を効率よく達成しようとするればするほど、その他の所へツケが回るのは自然の理である。そのこと自体は必ずしも非難すべきことではないが、歴史的に見ると、そのツケが人間から地域環境へ、そして、地球環境へと行きついたといえる。これらのツケを解決する手段として、「グリーンケミストリー」の概念がまさしく重要となる時代に入ったと言えよう。前述のシンポジウムではポスター発表も計画されており、多数の参加をお願いする次第である。

## &lt; 参考文献 &gt;

- 1) NEDO-JCII 調査報告書：「グリーンケミストリーによるCO<sub>2</sub>発生抑制に係わる調査研究」(1999).
- 2) R. A. Sheldon, Chemtech, No.3, 38 (1994).
- 3) 日本化学会・化学技術戦略機構 訳編、渡辺正・北島昌夫 訳：「グリーンケミストリー」丸善(1999).



## PART4

# 加圧熱水反応を利用したバイオマスからのエネルギー／ケミカルズ製造

- 資環研・バイオマス研究室におけるGSCへの取り組み -

資源環境技術総合研究所 小木 知子

バイオマスは再生可能で大気中のCO<sub>2</sub>を固定するため、環境調和型のエネルギー資源として注目され、今後バイオマスエネルギーの大量導入をはかることやバイオマス由来の素材を有効利用することがIPCCやCOP3で提言されている。バイオマスの主たる構成要素であるリグノセルロース系物質は地球上で最も豊富でしかも再生可能な有機資源であり、これを基点として多くのケミカルズへ誘導することができる。現在石油などの化石資源より製造している多くの製品を将来はバイオマスから生産するいわゆる“ポストペトロケミカルズ”構想は、将来の石油資源逼迫の時代には重要度を増すと考えられ、構築のための技術開発が重要となってくる。バイオマスを育成し環境修復を図るとともに、育成したバイオマスからまず上流部門で付加価値の高いケミカルズを抽出・製造し、暫時利用した後最終下流部門ではエネルギーへの変換を図る、いわゆるバイオマスの総合的カスケード利用は、今後の環境問題、エネルギー問題に大きく寄与すると考えられる。

資環研バイオマス研究室では、バイオマスを熱化学的、あるいは生物学的手法により、エネルギーやケミカルズへと変換するプロセス、あるいはバイオマス廃棄物をより省エネルギー型（エネルギー自立型）で処理するプロセスの開発を行ってきた。本稿ではそのうちの加圧熱水反応を利用したバイオマスからのケミカルズ／エネルギー製造研究として、樹皮からのタンニンの抽出製造、藻類からのテルペンオイル製造回収、セルロース系バイオマスからの水素／メタン製造を紹介させていただく。図1に反応温度とバイオマスの熱変換反応の相関を示す。反応温度や得られる生成物に応じて抽出、流動化、液化、ガス化と名称が変わってはいるが、基本的には加圧熱水を利用した反応である。

## 加圧熱水抽出による樹皮からのポリフラボノイドの抽出

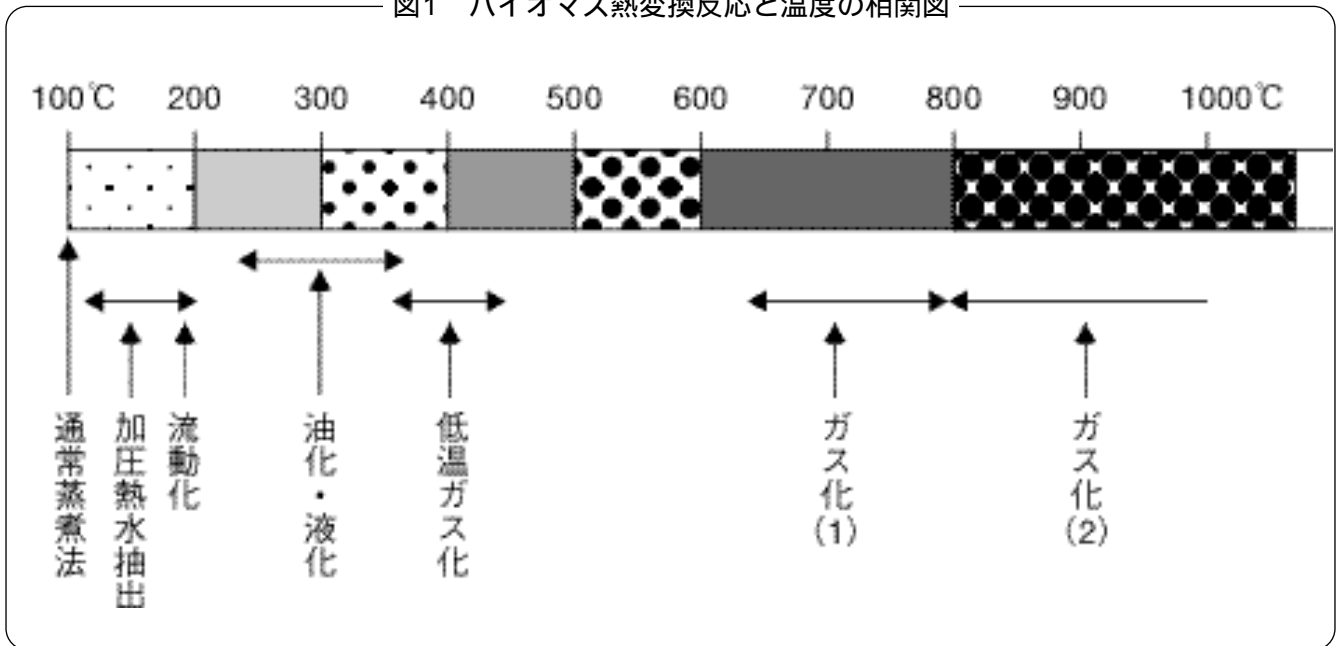
植物の各部からの有用天然物質の抽出は、通常は常圧で大量の水を用いて長時間煮出す蒸煮法で行われる。加圧熱水を用いると短時間、少量の媒体で効率よくバイオマスから有用物質を抽出・製造することができる。

オーストラリアでは広大な面積にラジアータパイン（松）が植林されており、木材部は建材用に使用されるが樹皮部は多くは未利用のまま廃棄されている。この樹皮中にはポリフラボノイド（タンニン）化合物が多量に（樹皮重量の30～40%）含まれており、特にラジアータパインのタンニンは縮合型で、木材接着剤原料として有用

であり、これより得られる接着剤は、ホルムアルデヒドを放出しないため今後需要の増加が見込まれている。図2に代表的なタンニンの構造を示す。

この樹皮を種々の条件で加圧熱水抽出を行ったところ、樹皮に対して4倍量の1%水酸化ナトリウム溶液を用い、140℃・初気圧10気圧・抽出時間0分（処理温度到達後ただちに冷却）の条件下で、抽出収率31.3%と、従来法と同等の収率でタンニンが得られた。本法による抽出は、従来法に比較し溶媒量が1/5と少なく、抽出時間も短時間であるため、抽出に要するエネルギー量が従来法の1/6程度でよいことが明らかになった。さらに、タンニン以外の部分も含めた樹皮の総合利用の観点から、樹皮の可溶化とそれに伴うケミカルズ製造も試みている。過酸化水

図1 バイオマス熱変換反応と温度の相関図



素 0-15%存在下、温度（100-140℃）の条件下で加圧部分酸化反応を行ったところ、樹皮の可溶化は過酸化水素濃度および反応温度に依存し、過酸化水素濃度15%、反応温度120℃の際に最大収率47.4%で可溶性成分が得られた。GC-MSスペクトル解析の結果、得られた可溶性成分にはコハク酸、マロン酸、マレイン酸等の低分子が含まれており、これらの混合物はイソシアネート系接着剤の原料として利用可能と考えられる。

本研究はオーストラリア・CSIRO 森林総合研究所と京都大学・木質科学研究所との共同研究で行った。前述のようにラジアータパインから得られるタンニンを用いて製造した樹脂は耐水性に富み、またメラミン系樹脂のようにホルムアルデヒドを放出しないため、高品質で低環境負荷素材として優れている。京都大学木質科学研究所では、ラジアータパイン樹皮を用いて、ホルムアルデヒドの使用量をより少なくし、また木材樹皮の全量を利用すべく、ラジアータ樹皮の熱水抽出物にホルムアルデヒドと木粉を加え、得られたタンニン含浸木粉を圧密加熱成型してプラスチック様成型物：タンニンプラスチックを製造している。タンニン：木粉 = 1：1にホルムアルデヒド2～8%添加で得られた成型物は、フェノール樹脂成型物に匹敵する強度を有する。将来はバイオマス由来の成分のみで成型剤を製造することを目指している。

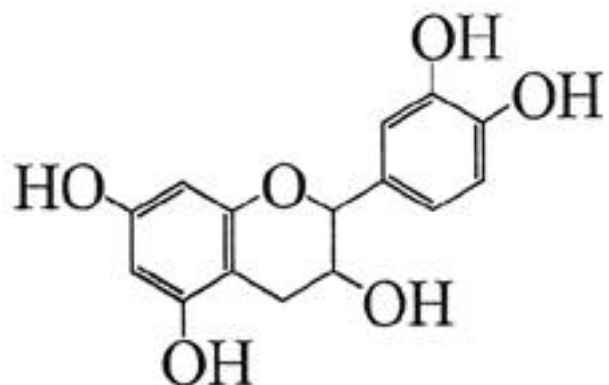
### 液化反応による藻類からの生産物質回収

微細藻類は成長が早く、光合成により二酸化炭素を有機物に固定することができ、同時に水圏の窒素やリンと

いった富栄養物質を吸収することができるため、微細藻類の利用が環境問題の対策技術として有効な手段の一つであると考えられ注目されている。

緑藻類の一種；Botryococcus brauniiは体内にポツリオコッセンとよばれるC<sub>34</sub>H<sub>58</sub>（C：30～36）をメインとするテルペノイド系炭化水素オイルを細胞内に蓄積する（写真）。このオイルの効率的回収に当たり、本研究で開発した液化法を適用した。本液化法はバイオマスを水とアルカリ金属触媒の存在下、高温（～300℃）高圧（～100気圧）で反応させ、一段階でオイルを得るもので、水素や一酸化炭素など還元性ガスを用いず、また反応が水溶液中で進行するため原料の脱水乾燥が不要で、含水率の高いバイオマスを対象とする反応に適している。実験はオートクレーブを用いて行い、培養したBotryococcus brauniiをネットですくってオートクレーブにいれ、触媒

図2 タンニン（ポリフラボノイド）の一例



として $\text{Na}_2\text{CO}_3$ を5%重量添加、200~340 で1時間反応を行ったところ、300 の時最大収率(64%)でオイルが得られた。

また*Botryococcus braunii*は下水二次処理水で連続培養すると、処理水中の窒素やリンなどの無機塩類を自己の栄養源として吸収し、水中の無機塩類を低減できるので、炭化水素生産と同時に排水浄化ができる。*Botryococcus braunii*は淡水産緑藻類であるが、この他にも適合溶質として炭素化合物(グリセロール)を生産する海水産植物プランクトンであるドナリエラについても耐環境性向上を目的とした代謝機能の研究を行っている。

なお本研究で用いた液化法は種々のバイオマス廃棄物に応用が可能で、アルコール発酵残渣、下水汚泥などでも液化によりC重油相当のオイルが得られ良好な結果を示した。中でも下水汚泥については、通産省の大型プロジェクトの下でオルガノ(株)と共同で0.5t/dのベンチスケールの連続プラントを当所内に建設し、その成果をふまえ、資源エネルギー庁の補助金を受けて、この10倍のスケールの実証プラントを、茨城県利根浄化センターに建設した。

### 低温ガス化によるセルロース系バイオマスからの水素/メタン製造

含水バイオマスを金属Ni触媒存在下、350 前後の比較的低温(ただし高压)で反応させると、水素、メタンなどのガスが一段階で効率よく得られる。水素はクリーンで理想的なエネルギー/ケミカルズとして期待されている。従来法では乾燥した原料を1000 程度の高温で反応させるため、含水率の高いバイオマスには必ずしも適当でない。

セルロースを原料にNi金属触媒を用いて種々の条件下でガス化を行ったところ、400 13MPaではメタンが主に生成されるのに対し、350 18MPaでは水素が主に生成されることが分かった。400 13MPaでは水は気相としての

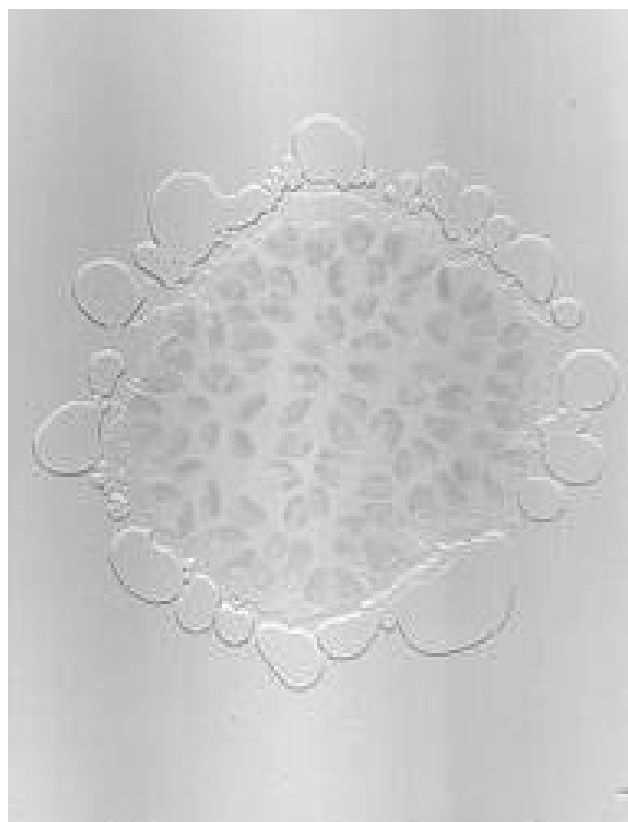


写真 テルペンオイルを生産する緑藻 *Botryococcus braunii*

(まわりの白い泡が生産されたテルペン。藻類をつぶしたところ)

み存在し、この中でシフト反応とそれに続いてメタン化が速やかに進行するのに対し、350 13MPaでは水は一部液体として存在し、触媒を取り囲むためメタン化の進行速度が遅くなると推測される。

本プロセスでは、含水状態のセルロース系物質の98%以上がガス化される。本法を焼酎廃液に適用し、低温ガス化により処理したところ、水素が得られるとともに廃水中の有機物質がほとんど分解されることが明らかになり、エネルギー回収型の有機廃水処理法としての応用も期待できる。

