

記 録

文書番号	S C J 第 23 期-290919-23541200-068
委員会等名	日本学術会議化学委員会・総合工学委員会・材料工学委員会合同触媒化学・化学工学分科会
標題	物質変換と CO ₂ 排出削減、その現状と課題 ～化学の視点から～
作成日	平成 29 年（2017 年）9 月 19 日

※ 本資料は、日本学術会議会則第二条に定める意思の表出ではない。掲載されたデータ等には、確認を要するものが含まれる可能性がある。

この報告は、日本学術会議化学委員会・総合工学委員会・材料工学委員会合同触媒化学・化学工学分科会での審議結果を踏まえ、取りまとめ公表するものである。

日本学術会議化学委員会・総合工学委員会・材料工学委員会合同
触媒化学・化学工学分科会

委員長	阿尻 雅文	(第三部会員)	東北大学・教授
副委員長	藤田 照典	(第三部会員)	三井化学株式会社・シニア・リサーチフェロー
幹事	後藤 雅宏	(連携会員)	九州大学・教授
幹事	北川 尚美	(連携会員)	東北大学・教授
	安保 正一	(連携会員)	大阪府立大学・教授
	岩澤 康裕	(連携会員)	電気通信大学・特任教授
	植畠 陸男	(連携会員)	大阪府立大学・客員教授
	工藤 昭彦	(連携会員)	東京理科大学・教授
	辰巳 敬	(連携会員)	独立製品評価技術基盤機構・理事
	所 千晴	(連携会員)	早稲田大学・教授
	馬場 由成	(連携会員)	宮崎大学・教授
	藤岡 恵子	(連携会員)	株式会社ファンクショナル・フルイッド・代表取締役
	村松 淳司	(連携会員)	東北大学・教授

本報告の作成に当たっては、以下の方々のご協力を頂いた。

梶川 裕矢	東京工業大学・准教授
菊池 康紀	東京大学・特任准教授
野田 優	早稲田大学・教授
福島 康裕	東北大学・准教授
伏見 千尋	東京農工大学・准教授

要 旨

第4期科学技術基本計画では、イノベーションの重要性を前面に掲げ、研究開発の重点化を従来の科学技術分野に基づくものから課題解決を目指したものへと転換した。そして、府省横断型の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の創設など、産学官・関係府省が一体となって研究開発および社会実装を進める取り組みを推進してきた。

第5期科学技術基本計画でも、知の資産の持続的創出を目指し、多様で卓越した知を絶え間なく創出し、その成果を経済的、社会的・公共的価値として速やかに社会実装していく国となることを目標の一つとして掲げている。国内のみならず国外においても、先端的な研究成果と社会的な課題解決との間を繋ぐ何らかの新たな仕組みを作ることが重要視されている。

本分科会では、22期において、特に化学関連分野について、エネルギー、資源、環境、CO₂削減の視点から、社会の将来ビジョンとその達成に必要な多様な個別要素技術を、「記録」として整理した。本23期では、これらの分野での技術開発が日進月歩であることから、22期でまとめた内容をさらに更新・充実させるとともに、更なる展開を目指し、ビジョン・オリエンテド・リサーチの問題意識の下、特に物質変換・循環とCO₂排出削減の観点から、現状と課題、その課題解決に向けた技術提案を整理する。

1章では、「はじめに」として、それぞれの構想提案について、物質変換とCO₂削減の観点での社会構築全体における位置づけ、意義を明確にしている。

2章では、「要素技術開発における現状と課題、その解決に向けて」の方策をまとめている。まず、化学品原料の多様化を背景とした物質変換のあり方について考え方を述べ、特に今後中心になると想定されるメタンを原料とした化学品製造について、メタノールとオレフィン製造を例にあげて議論している。次に、将来的にはバイオマスを化学品製造の原料とすることも重要であること、さらに自然エネルギーの利用が進めば、バイオマス利用ではなく人工光合成も可能となること、から、これらの要素技術の課題、システムとしての課題と解決方法についても議論している。また、化学品の製造のみならず、そのリサイクル技術の視点も重要であり、その課題と対策についても考え方を述べている。さらに、これらの技術を社会実装する上では、社会・産業全体システムにおけるエネルギー利用を削減していくことが必須となるため、特に低温排熱利用を取り上げ、その重要性を述べている。

このような議論の中、個別の新規要素技術を産業あるいは社会に組み込むのではなく、まず、新たな未来社会、あるいは新たな産業構造を作りあげていく将来構想を掲げ、そこからのバックキャストにより、必要な要素技術を抽出していく、ビジョン・オリエンテド・リサーチともいえるアプローチが必要との考え方が浮かび上がってきた。それを達成するには、個別要素技術が産業・社会システムの中でどのような影響を与えうるのかを多角的に評価する方法が必要となろう。地域社会への技術の実装を考える場合には、その評価関数として、経済、環境、産業構造のみならず、地域の文化といった面も必要となる。このような議論を踏まえ、最後に、技術を社会実装したときの社会への影響の評価、市民

との情報の共有、それによるヴィジョン構築の重要性についても述べている。

そして、3章では、「おわりに」として、これらをまとめるとともに、その中から見出された新たな方法論の可能性と今後の展望について述べている。

目 次

1. はじめに	1
2. 要素技術開発における現状と課題、その解決に向けて	7
2. 1 将来の化学品原料源の選択と開発すべき技術	7
2. 2 現在の主要化学原料としての石油の未来	11
2. 3 メタンからメタノールへの直接転換	13
2. 4 メタンから低級オレフィンへの直接転換	15
2. 5 バイオマスの完全利用のための総括的な製造システム構築の重要性	19
2. 6 エネルギー投入を抑えた物質変換と CO ₂ 削減を両立することができる人工光 合成技術の確立に向けた研究環境の整備	21
2. 7 光触媒水素製造（人工光合成）と植物工場（光合成）の融合	24
2. 8 資源循環に寄与する固体分離濃縮技術の熟成	26
2. 9 資源循環のためのレアメタルリサイクルと分離技術	29
2. 10 熱エネルギー有効利用の飛躍的拡大	32
2. 11 総合技術アセスメント、社会協働と地域社会における未来社会ヴィジョン 創成	35
3. おわりに	39
<用語説明>	41
<参考資料 1> 審議経過	47
<参考資料 2> シンポジウム開催	48

1. はじめに

阿尻 雅文
野田 優
梶川 裕矢
菊池 康紀
伏見 千尋

持続可能な社会構築は、経済性を求めた時代から、価値生産と環境保全との両立の時代への移行と捉えることもできる。モノづくりの評価は、従来、エネルギー・物質資源と経済コストの側面から議論されていたが、CO₂をはじめとした排出物の削減等、環境をも評価軸として持つようになった。エネルギーは、生活、製造、輸送に使われるエネルギーに大別できるが、ここでは、製造に使われるエネルギーと、CO₂ 排出削減に焦点を当てる。製造は、物質の変換・分離そのものであり、それに伴うエネルギー消費をいかに削減できるかが、CO₂ 排出削減につながる。

そのために、物質をエクセルギーで評価し、原料（リサイクルも含め）からの物質変換プロセスを考える。外界からのエネルギー・仕事の注入を低く抑えること、そして、物質変換および化学エネルギー変換の際に発生したエネルギー（多くの場合、熱）をいかに回収し、他の物質変換プロセスに用いるかが重要となる。

本分科会では、22 期において、特に化学関連分野について、エネルギー、資源、環境、CO₂ 削減の視点から、社会の将来ビジョンとその達成に必要な多様な個別要素技術を、「記録」として整理した。本 23 期では、この分野では、技術分野も日進月歩であることから、その内容をさらに更新・充実させるとともに、この記録の更なる展開を目指し、ビジョン・オリエンテド・リサーチの問題意識の下、特に物質変換・循環と CO₂ 排出削減の観点から、現状と課題、その課題解決に向けた技術提案を整理する。なお、このような議論は、時間軸によって大きく異なってくる。数百年といった超長期にわたる視野での議論も重要であるが、ここでは 2050 年以降までの社会と技術の在り方に焦点を絞り、技術、生産、環境、そして社会との関係を議論していきたい。

環境適合性の指標が入ることで、モノづくりの経路（原料の選択や物質変換経路）も再考する必要がでてきた。現在、原油から、種々の化学製品の合成が、エチレン、プロピレン経由で行われているが、分子構造の大きな変化を伴う製造方法となっており、それが大きなエネルギー投入の原因になっていないかを検討する必要がある。また、シェールガス・メタンを原料とする化学製品を合成する場合についても、同様である。現行技術の、メタンから水蒸気改質により、CO と水素を作る反応は大きな吸熱反応であり、大きなエネルギー投入が必要となる。さらに、CO と水素から、メタノールや炭化水素を合成できるが、それはより大きな発熱反応である。その反応熱を有効に利用できなければ、多量の化学エネルギーを熱として損失していることとなる。メタンから直接メタノールを合成する反応は、小さな発熱反応であり、エネルギー投入を抑える点で重要である（2.3 章参照）。同様に、メタンから直接オレフィンを合成する手法の開発も重要である（2.4 章参照）。

原料を何にするかを含め、物質変換に必要な仕事を最適化していく必要がある。特に、大きなエネルギー投入が行われている原料関連の物質変換・分離プロセスについて、新規触媒開発、新規反応・分離プロセス開発が必要となる。同じ物質生産を、廃棄物（廃プラ）、バイオマス、メタン等、を含め、再検討していく必要がある（2.1、2.2、2.3、2.4、2.5章参照）。よりエネルギー消費の少ない物質変換プロセス、システムの構築が期待される。ただし、分散している廃棄物やバイオマスなどの未利用資源や再生可能資源を利用する場合、規模の経済性を含め、原料を転換することによる波及的な効果を十分に理解しておく必要がある。

このように、物質生産は、環境と経済の両立を目的としつつなされるものであるが、新規プロセス技術の果たす役割が極めて大きいこと、またその意義は全体システムの中で考える必要があることから、その技術アセスメントも重要であることが認識される。

化学産業で製造される製品群は、例えば、断熱材や高強度軽量材料（航空機用炭素繊維）に代表されるように、それが、冷暖房に要するエネルギーの削減、燃費の向上を通して CO₂ 排出の削減に寄与している。化学産業には、これら製品としての貢献に加えて、化学を介したゼロエミッション、さらにはカーボンネガティブの実現も期待されている。これらについても触れる。

電力や輸送用燃料のようにエネルギー変換に使われる炭化水素はユーティリティ・カーボン、製品材料として固定される分をフィードストックカーボン（炭化水素製品）と呼ばれており、それぞれの使用量をエネルギー換算で比較すると前者が 15.0 EJ、後者が 3.5 EJ であり、およそ 4 : 1 である²⁾。フィードストックカーボンについては、最終的に燃焼しさえしなければ、CO₂ となることはないため、資源として化石資源を用いてもよい。しかし、社会に蓄積した炭素は廃棄物として排出され、埋め立て処分地の問題から、燃焼廃棄・エネルギー回収されているのが現状ではある。CO₂ を濃縮し、地下岩盤あるいは海底に貯蔵する Carbon dioxide Capture and Storage (CCS) 技術開発が進められている背景を考えると、将来的には燃焼・廃棄により生じる CO₂ を貯蔵するのではなく、炭化水素固体の直接貯蔵の意義もその環境への影響を考慮しつつ議論する必要もあろう。今世紀末までの時間範囲に限れば、生分解性高分子等を除き、主製品のほとんどは安定貯蔵が可能である。我が国のプラスチック生産量は 1,075 万トン/年²⁾であるから、焼却せずに埋設することでも、我が国の CO₂ 排出量 14 億トン/年の一部を削減できる。

製造に要するエネルギー（CO₂ 排出）の削減については、すでに述べてきた。それでも排出される CO₂ についてのアプローチもある。CO₂ を取り込んだポリマー合成は、ポリマー製造だけでなくその原料の製造も考慮し、全体で CO₂ 排出量を CO₂ 取り込み量より低く抑えられれば、直接的な CO₂ 固定効果となることは言うまでもない。また、バイオマスを原料とするバイオポリマーの利用も重要である。バイオマスは、CO₂ を固定して得られているから、バイオマス起源のポリマー合成で、既存のポリマーを置き換えることは、ゼロエミッションへ向けての可能性を与える（2.5章参照）。同様の効果を人工的に行うことも考えられる。自然エネルギーを用いて水素が合成できれば（2.6、2.7章参照、太陽光発電・電解も）、人工光合成も可能となり、上記のバイオポリマーと同様の効果が得られ

る。将来的にエネルギー用途を上回る十分な水素が確保されるのであれば、CO₂を原料とした生産はカーボンネガティブとしての位置づけもでてくる。(2.1章参照)。バイオポリマー利用は、量的にも速度論的にも十分とは言えないかもしれないが、すでにあるバイオマス原料を用いる即効性のある技術としてその重要性が位置づけられる。一方で、バイオマス合成と太陽光利用水素製造を比較すれば、太陽光からの化学エネルギーへの変換効率は後者が高く、将来的には経済性も含めて重要な位置づけとなりうる。

無機材料についても同様である。原料からの選別・分離、反応、精製等、多くのプロセスを経て、物質・材料が製造されている。これらのプロセスに必要な仕事量を最適化していく必要がある。分離の理論的な最小仕事は $-RT \ln(x)$ (R は気体定数、 T は絶対温度、 x はモル分率)であり、それに近づく技術開発、システム開発が重要となる(2.8章参照)。

社会に物質が蓄積して飽和すると、新たに投入した分だけ廃棄物が発生する。省資源および廃棄物削減の観点でリサイクル技術の重要性は論を待たない。加えて、特に金属材料の場合は、酸化物として存在する天然資源を還元するよりも還元状態で得られる金属廃棄物を再利用する方が、省エネルギー・CO₂排出削減の観点でも有利となる(2.9章参照)。

これらの物質変換に必要なエネルギー・仕事の投入とエネルギーの回収と再利用が重要となる。物質変換におけるエネルギー・仕事の投入は、熱や電気エネルギーだけでなく、物質を介して化学エネルギーで行われることが多い。例えば、化学合成では、酸化・還元等を繰り返す行うことが多い。このとき、水素(酸化、還元)の制御が物質変換に大きな役割を果たす。その他の酸化剤、還元剤も同様である。これらは高エクセルギー、高エネルギーの物質であり、反応を介して、エネルギーを投入していることと同等である。

したがって、水素については、生活におけるエネルギー利用だけでなく、物質変換におけるエネルギー投与の観点でも重要である。高エクセルギー、高エネルギーの物質を生産するために、従来、化石資源を用いていたため、大きなCO₂排出を引き起こしていた。それに対し、太陽光を利用して水から水素を作りだすことができれば、物質変換に必要な化学エネルギーを得ていることになる(2.1、2.6、2.7章参照)。水素だけでなく、バイオマス、メタンも高エクセルギー物質として、位置づけられる。

先に述べたように、物質変換プロセスにおいて排出される熱エネルギーの利用は、物質変換システム全体における、エネルギー・仕事投与量とそれに伴うCO₂排出を削減することとなる。熱エネルギーの質は温度で決まる。高温の熱エネルギーは電力等の仕事に変えることができるが、低温からはカルノー効率の制約を受け、高効率で仕事に変換することはできない。そのため、低温の熱利用技術の開発が今後重要となる。また、熱エネルギーは、量は保存されながらも質は低下するため、高温から低温へのカスケード利用が望ましい。鉄鋼やセメント産業の高温廃熱の利用なども重要となろう。このような熱の利用を考えると、熱の排出源と利用する場が異なることが多く、蓄熱・輸送も重要となる。さらに、吸熱的な反応等を組み込めば、温度レベルを上げること(エクセルギー再生)も可能となる。生活におけるエネルギー利用だけでなく、物質変換においても、このような熱エネルギー利用をいかに進めるかが重要となる(2.10章参照)。

「社会的課題とそれを解決するための技術・方法論マップ」では、エネルギーとモノづくり・物質循環、CO₂循環をともなう産業・社会システムにおいて、議論してきた要素技術の位置づけとそれを社会実装する際の課題、その解決の鍵となる技術や方法論を整理した。2050年までの時間軸において、これらの課題を社会実装するまでの目標期間を表にまとめるとともに、それが達成された時の、現在から将来にわたるエネルギー、化成品製造の資源とCO₂循環の変化を図に示している。

以上、化学産業を中心とし、将来的に望ましい姿を考えることで、CO₂排出とエネルギー消費の削減、および物質循環に必要な要素技術が浮かび上がり、その意義も明確となる。要素技術が全体システムにどのように影響を与えるか、環境、経済性等の観点からの多角的技術評価（総合的技術アセスメント）が重要となる。

同様の考えは、個々の地域社会への技術導入の場合でも適用できる。物質変換プロセスのみならず、輸送、くらし等、生活に必要なエネルギーも含め、様々な要素技術が、各地域特有の未利用の物質・エネルギー資源の活用とあわせ、社会に導入される。この地域社会の将来ビジョンを作りあげるのは、その自治体そして住民であり、このような新たな要素技術の社会への影響に関する情報は、十分に知らされている必要がある（より深い視点でのサイエンスコミュニケーション）。上記で議論した、資源、エネルギー、環境に関する新技術導入による影響は、経済、産業構造、安全のみならず生活環境や文化論も含め、多角的視点から、俯瞰的、総合的に考えて議論する必要がある。その多様な価値を反映する評価関数を考え、最適化していく必要がある。科学技術者から固定されたシナリオと結果を一方通行で自治体・住民に提供するのではなく、両者がコミュニケーションをとりながら複数のシナリオを作成して、その結果を複数の評価関数にまとめる。評価結果を大きく変えうる別の要素技術の開発や導入も議論する。両者で長期的展望も議論しながら、自治体・住民が評価関数の重みづけをしてシナリオを選定することを、科学技術者はサポートする。このようなビジョン構築と新たな要素技術開発、そして、その社会実装が連動すれば、細分化・深化した学問を統合し、あるいは社会科学も含めた融合学術が新たに生まれる可能性もある。

課題解決型のニーズ・オリエンテド・リサーチは、工学、技術者の本来の姿であるが、ビジョン・オリエンテド・リサーチ、さらには市民とビジョンをもとに作り出す、社会協働型研究の場も必要となろう。

参考文献

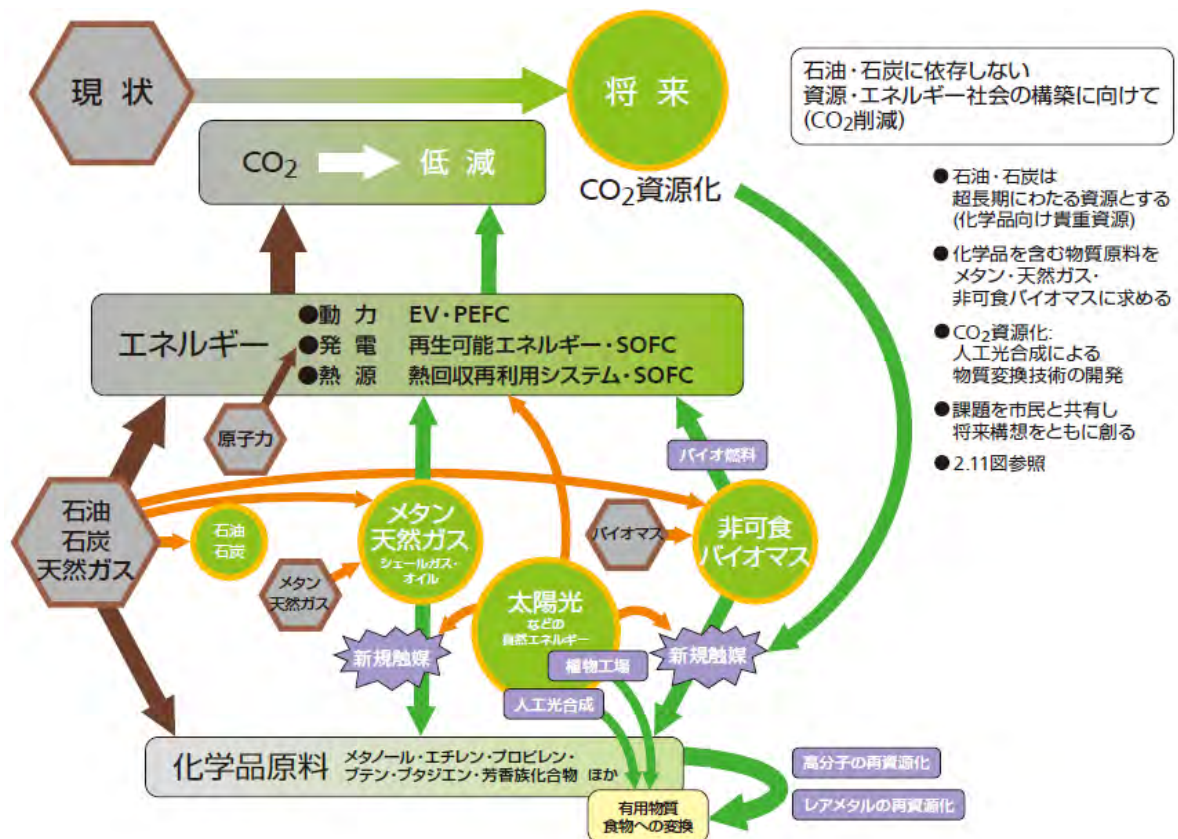
- 1) 資源エネルギー庁・エネルギー白書（2016）
- 2) http://www.jpif.gr.jp/3toukei/conts/2016/2016_genryou_c.htm



社会的課題とそれを解決するための技術・方法論マップ

各課題について社会実装までの目標期間

短期 (10 年)	中期 (20 年)	長期 (30 年超)
非可食バイオマスからエチレン (5 年) 非可食バイオマスからプロピレン	メタンからエチレン	メタンからメタノール 二酸化炭素からメタノール メタンから低級オレフィン
バイオマス利用のための製造システム構築	人工光合成と植物工場	人工光合成技術
既存のプロセスや技術を活用したりサイクルプロセスの最適化 レアメタルリサイクル 熱エネルギー有効利用	新しい発想に基づく固体分離濃縮技術等、新規リサイクル技術の開発	リサイクル配慮設計に基づく動静脈連携型のリサイクルシステムの確立



現在から将来にわたるエネルギー、化成品製造の資源と CO₂ 循環の変化

2. 要素技術開発における現状と課題、その解決に向けて

2. 1 将来の化学品原料源の選択と開発すべき技術

藤田 照典

2. 1. 1 背景

化学品（用語説明参照）の主要な原料源は、現行のナフサ（用語説明参照）、エタンからメタン（天然ガス由来（シェールガス（用語説明参照）、メタンハイドレート（用語説明参照）を含む）2.2、2.3章参照）、石炭、非可食バイオマス（用語説明参照）などに徐々にシフトして行くと考えられる。ここで、環境負荷の大きい石炭の利用には一定の制限がかかり、また存在密度の低いバイオマスは原料源として補完的な位置付けになる可能性が高い。化学品の原料源は最終的には CO₂（2.6、2.7章参照）や非可食バイオマス（2.5章参照）に頼らざるを得ない。しかし、シェール革命やメタンハイドレートの発見により原料源変化への対応技術開発に与えられた時間が延びた。幸運である。

化石資源の可採量と可採年数(2015年末)

	石油……………	1兆6,976億バレル	50.7年
	天然ガス(メタン)・	186.9兆m ³	52.8年
	石炭……………	8,915億トン	114年

出典:BP Statistical Review of World Energy 2016

化学技術の開発は一般に生成物の「付加価値の向上」（経済性の確保）を第一の目的として行われている。この前提は、「エネルギーは無限に存在し、かつ CO₂ の負の影響は無視できる」である。これらの前提が変わりつつある現在、技術開発の考え方も変える必要がある。すなわち、「付加価値の向上」とともに「投入エネルギーの最小化と自然エネルギー（再生可能エネルギー）利用の最大化」（⇒ CO₂ 排出量の最小化）という視点を入れなければならない。

人類のエネルギー消費は、その大半が化石資源の酸化反応によるエネルギーで賄われており、その最終生成物は CO₂ と水である。CO₂ 大量排出の影響は、既に気温上昇、集中豪雨（洪水、土砂災害）、突風や竜巻、猛暑、日照不足など顕在化し始めており、排出量の削減は待ったなしの状況にある。今後は化学品製造の技術改良、新技術開発ともに CO₂ の排出量が少ないことが前提となる。原料源の変化に対応する技術は生産規模が特に大きいため、CO₂ の排出量が少ない、は絶対条件になる。

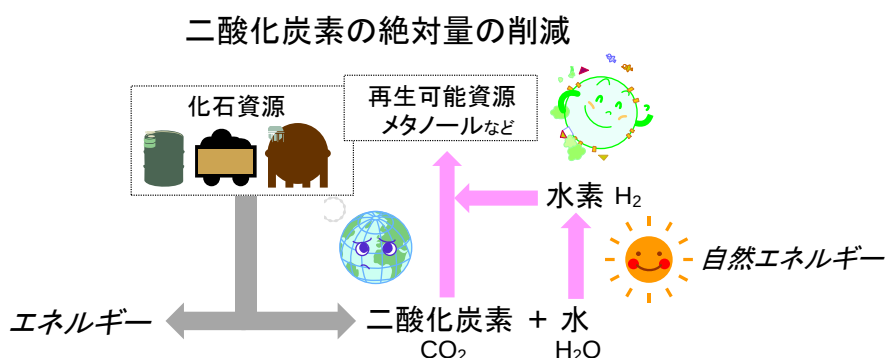
「はじめに」に記載した通り、化学品のカーボンライフサイクル分析（用語説明参照）から、断熱材や軽量材料に代表されるように、製品使用における CO₂ 排出削減への化学産業の貢献は大きい。しかし、化学産業は、電力、鉄鋼に次いで CO₂ を排出するエネルギー多消費型産業である。したがって、これら製品を通しての貢献に加えて、化学技術を活用

する製造時の更なる CO₂ 排出量の削減も必要である。

一方、現状の延長では CO₂ の排出量削減は可能としても、その絶対量は増え続ける。持続可能な社会を実現するためには、CO₂ の絶対量を削減させる技術の開発が必要である。エネルギー変換部門の CO₂ 発生を自然エネルギー代替によりゼロにした上で、余剰の自然エネルギーを用いた CO₂ の効率的な還元反応 (⇒ 資源化) も重要である。CO₂ の還元では水素による還元反応が特に重要である。水素は水と自然エネルギーから製造することができる (光触媒、光電極; 太陽光発電・太陽熱発電/電気分解)。水素は還元性高エネルギー化合物として二酸化炭素の資源化にとどまらず、アンモニアなどの化学品製造においても極めて重要な化合物である。自然エネルギーを利用する水からの水素製造は、持続可能な社会の実現のために最も重要な技術の一つである (2.6、2.7 章参照)。

人類のエネルギー消費量は石油換算で 133.7 億トン (世界の一次エネルギー総消費量、2012 年、電気事業連合会) であるが、この値は地球上に降り注ぐ太陽光エネルギー 1 年分の約 0.02% に過ぎない。従って、太陽光エネルギーを有効利用することができれば人類のエネルギー消費を賄うとともに、CO₂ の還元反応によりその絶対量を削減させることもエネルギー量からは十分可能である。

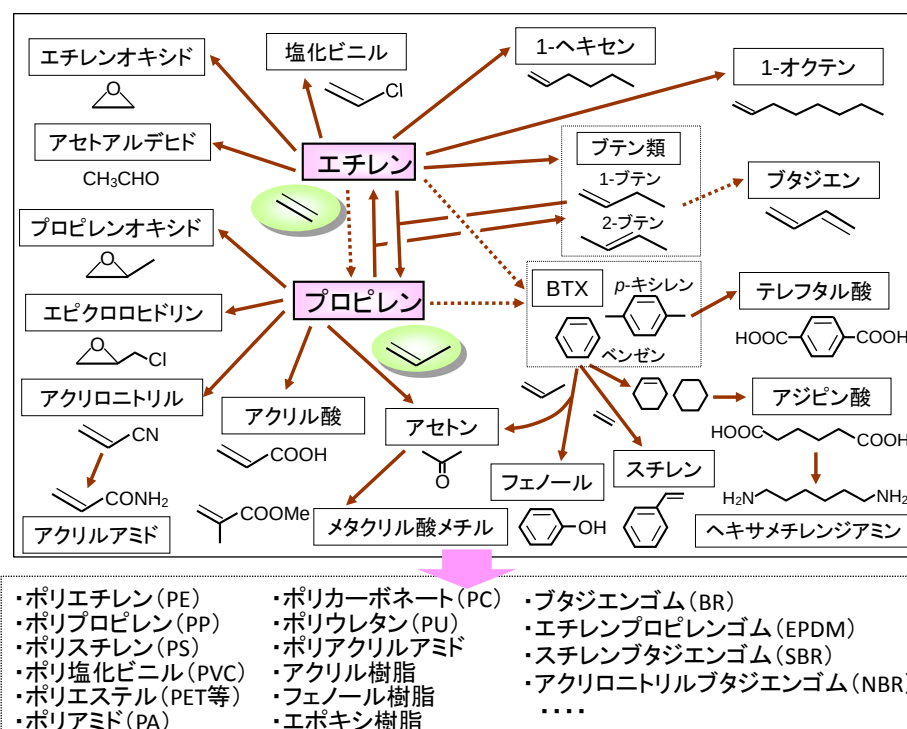
自然エネルギーを、エネルギー利用に加えて物質生産にも利用する場合に、新たに必要となる自然エネルギー量を評価しておく必要がある。「はじめに」に記した通り、現在、化成品製造に利用される炭化水素は、エネルギー換算で全化石資源の 1/5 である。CO₂ の還元による固定の寄与は全 CO₂ 排出の 1/5 と大きいが、このように自然エネルギーを利用して CO₂ を原料として化成品製造を行う場合、全エネルギー消費の 1/4 以上の自然エネルギーを化成品製造に使うこととなる。



2. 1. 2 現状と課題

五大汎用樹脂 (用語説明参照) に代表される人類生活のベースとなる主要化学品はエチレン、プロピレンがあれば製造することができる (下図)。従って、化学品製造におけるキー化合物はエチレンとプロピレンである。

化学品製造のキー化合物はエチレンとプロピレン



化学品の原料源が現行のナフサ、エタンから他のものに代わっても、既存の技術やインフラを最大限活用することは重要である。従って、原料源変化への対応では、新しい原料源からエチレン、プロピレンが効率的に製造できる技術の開発が必要である。技術開発の考え方は「投入エネルギーの最小化と自然エネルギー利用の最大化」($\Rightarrow$ CO_2 排出量の最小化)である。

2. 1. 3 課題解決に向けて

①原料源の選択

現行のナフサ、エタンに代わりうる原料源の中では、カーボンニュートラルの視点から非可食バイオマスの活用が、またその存在量の多さからはメタン (可採年数はシェールガス、メタンハイドレートも含めると 300 年以上と推定されている)、さらには自然エネルギー由来の水素が十分に獲得できれば CO_2 (事実上、無限に存在) の利用が重要である。目指すのはこれらを原料とするエチレン、プロピレンの効率的な製造技術の開発である。

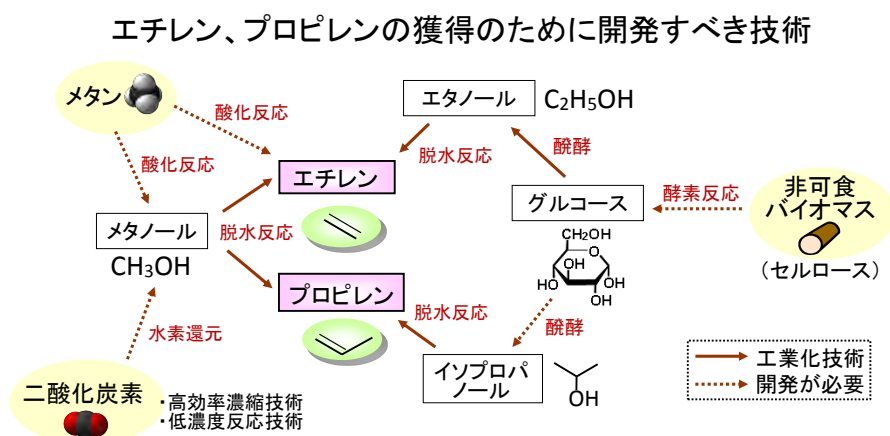
②用いる反応の選択

CO_2 の排出が少ない技術を開発することが前提になる。この前提から酸化反応 (発熱反応であるため、投入エネルギーが一般に少ない $\Rightarrow$ CO_2 の排出が少ない) および醗酵 (酵素反応も含む: 温和な条件で目的反応が進行) が使いたい反応である。一方、廃棄物という切り口では脱水反応 (廃棄物は水: 水は無害かつ灌漑利用など利用価値が高い) が好ましい。また、 CO_2 の資源化 (還元) には発熱反応である水素還元反応を用いるのが合理的

である。

③開発すべき技術

開発すべき技術は、メタン、CO₂および非可食バイオマス（セルロースなど）を原料源とするエチレン、プロピレンの「経済性があり、かつ環境に優しい（CO₂の排出が少ない、廃棄物が少ない）」製造技術である（下図）。CO₂の利用に関しては、自然エネルギー由来の水素の獲得とともに CO₂の高効率濃縮技術や低濃度反応技術の開発も必要となる。下図の技術は酸化反応、醗酵・酵素反応、脱水反応、水素還元反応からなる。



上図はメタンからのメタノール合成やエチレン合成やグルコースからのイソプロパノール合成など難易度の高い反応を含む。現状では、活性、選択性ともに不十分であるが、全て原理的に可能な反応である。これらの反応を効率的に起こす鍵は触媒の開発にある。

日本の置かれた厳しい財政状況から、上述の技術開発は限られた予算・人員で実施せざるを得ない。現在、化学品の原料源に関連した多くの国家プロジェクト等が実施されている。これらのプロジェクトを上記①-③の切り口で、優先順位をつけた上で、予算配分を見直す必要があると考える。

参考文献

- 1) 藤田照典、“21 世紀の触媒科学、新たなイノベーションに向けて”、化学経済、2007 年 1 月号、p.47-53.
- 2) 工藤昭彦、井上晴夫、国武豊喜、瀬戸山亨、佐山和弘、堂免一成、森川健志、日本学術会議公開シンポジウム、人工光合成研究の最前線—資源・環境・エネルギー課題解決と新産業創成のための革新的科学技術開発—、2015 年 12 月 9 日、日本学術会議講堂、講演要旨集
- 3) 岩野昌夫、染宮昭義、永原肇、馬場文明、藤田照典、司会：伊澤慎一、“座談会 地球環境問題の中で、プラスチックの役割を再評価する”、プラスチックスエージ、

2009 年 1 月号、 p.53-80.

- 4) 日本学術会議化学委員会、触媒化学・化学工学分科会（藤田照典、辰巳敬、植畠陸男、北川尚美、安保正一、今成真、工藤昭彦、相馬芳枝、藤岡恵子）、“資源・環境・エネルギーを切り口とする 21 世紀の触媒化学・化学工学に課せられた課題”、「記録」、SCJ 第 22 期 260901-22641200-039（2014）.
- 5) 市川真一郎、藤田照典、“将来の化学原料源の選択と開発すべき技術”、エネルギー・資源、2017 年 5 月号、p.7-11. [Vol. 38(3), p.126-130 (2017)]

2. 2 現在の主要化学原料としての石油の未来

辰巳 敬

2. 2. 1 背景

まず現在の化学品生産の主要化学原料の多様化について、その現状と将来展望について述べる。

原油価格は2014年以降大きく下落した。世界経済の減速傾向とともに原油の供給過剰感があつて、パリ協定が発効したものの、コスト面で問題がある再生可能エネルギー開発に対する弾みがついていない。しかしながら、化石燃料、特に石油以外からの化学品の製造は長期的には必須の課題である。石油精製業の再編、規模の段階的縮小とともに、製油所の構造改革をはじめとして、国際競争力を有するコンビナートへの変革を進める必要がある。その中で従来の石油化学品を原油や天然ガスなどの石油ナフサ以外から製造する技術の開発が大きな課題である。バイオマスからの化学品は当面はdrop-in replacements（完全互換品、用語説明参照）の製造に重きを置くものの、バイオマス由来の独自の製品の開発へのシフトが望まれる。長期的には、CO₂を広く化学原料とするために水素をCO₂フリーで製造することが重要課題である。

2. 2. 2 現状と課題

原油価格は2008 年夏にWTIバレルあたり150ドル近い最高値をつけたものの、リーマンショックによって下落が続き、2009年初頭には40ドルを割り込んだ。その後反転し、2014年中期までは100ドル前後で推移したものの、それ以降、シェール革命（用語説明参照）と産油国の生産調整の不調、世界経済減速による供給過剰感から大きく下落した。2016年2月にほぼ30ドルの底値をつけた後、OPECの生産調整もあつて50ドル台まで回復した。しかしながら、このレベルの原油価格では、再生可能エネルギーがコスト的に競争力を持つレベルに比べて大幅に低く、再生可能エネルギー開発への弾みがついていない。

我が国において、石油は8割弱がエネルギー用途であり、化学プロセス原料として使用される石油は2割強に過ぎない。エネルギー用途の中でも最大のガソリンの需要は、ハイブリッド車の普及と電気自動車、燃料電池車の導入、人口の減少によって低下が見込まれ

る。また、石油火力発電所は約四十年前から新設されておらず、重油の需要量はわが国に輸入される原油の性状に比較してはるかに少ない。このような状況において、石油を原油として輸入しトータルに活用するというこれまで日本がとって来た消費地精製主義の維持継続を図るために、石油精製業界の再編、精製規模の段階的縮小とともに、製油所の構造改革が進みつつある。また、電力自由化を始めとする我が国のエネルギーシステム改革への対応も大きな課題である。いずれにせよ、石油製品は連産品であるがゆえに、エネルギー源としての石油消費の動向は化学原料としての石油の未来に大きく影響する。

一方、シェール革命を主な原因とした天然ガス供給の増大と価格の大幅な下落によって、米国ではエタン原料となる安価なエチレンの生産が増大し、また、中国では自国の廉価な石炭をガス化し、メタノール経由でエチレン、プロピレンを製造する動きが活発化している。この種の非石油化石資源からの製法の発展により、従来からの石油化学原料の製造体系の変革が迫られている。

さらに、化石資源ではなく、再生可能資源から化学原料を製造する技術の開発が必須である。再生可能エネルギー・資源の中で、液体燃料や化学原料を直接与えることができるのは唯一バイオマスであり、他の太陽光、風力、水力、海洋、地熱などの資源は電力、熱、動力の発生源となるのみである。現在でもフルフラール、ポリ乳酸などがバイオマスから製造されている。さらに、2.1章でも述べた通り、バイオマスから低級オレフィンを経率よく大規模に製造できれば、**drop-in replacements** として既存の石油化学大系に組み込むことができることから、開発が盛んに行われている。また、究極の炭素資源である CO₂ を再生可能エネルギーを利用して有用な化学原料とする研究も進められている。

2. 2. 3 課題解決に向けて

① 総合エネルギー産業化へ向けて

コンビナートの連携・統合による石油産業の構造改革と効率化は従来から RING（用語説明参照）として国の主導のもと取り組まれてきたが、引き続き、生産革新、新技術への挑戦により、国際競争力を有するコンビナートへの変革を進める必要がある。また、石油精製－石油化学－化学－電力－ガスの連携・統合による総合エネルギー産業化が必須であろう。

② 化学原料の多様化

従来の石油化学品を石油ナフサ以外から製造する技術としては多くのアプローチがあろう。もとより、石油精製業の構造改善は原油性状と製品需要のギャップを埋める点から重要課題であり、減圧軽油、残油の接触分解を C3、C4 オレフィンの増産型とするプロセスは有望である。また、メタノール合成法の改良（2.3章参照）、さらにはメタンの直接変換（2.4章参照）などメタンの化学原料化の効率向上が課題である。いずれも 80 年代から開発研究が行われてきたものの実現が困難であった課題であり、ブレークスルーが望まれる。このためには新規な触媒や分離材料の開発と反応工学が融合した産学によるオープンイノベーション体制が必要である。一方、世界的なエタンクラッキングへのシフトによ

り、従来型ナフサクラッキングでの連産品として得られるプロピレン、ブタジェン、BTX（ベンゼン、トルエン、キシレン）が相対的に不足することから、それらに特化した製法の開発が重要である。

③ バイオマスおよび CO₂ の化学品原料化の方向性

バイオマスから、従来の石油化学品と同等の品（drop-in replacements）を製造する方法の開発が近未来的には主流となる（2.5章参照）。バイオマスは、石油よりも高い O/C 原子比と低い H/C 原子比を有し、構造も大きく異なることから、バイオマス独自の特長を有する製品が誘導できるポテンシャルがある。従来の石油化学品と差別化できるバイオマス由来製品も幾つか出つつあり、そのような特長のある製品のさらなる創製が望まれる。また、バイオマス独自の有用な化学品を製造するためには、新規な触媒反応プロセスの開発も重要となる。炭化水素としての石油の利用には選択的な酸化反応が重要であったが、石油と比較して高い O/C 原子比と低い H/C 原子比を持つバイオマスを化学品として利用するには還元過程もしくは脱水過程がより重要である。中でも脱水過程は吸熱反応であるものの、水素等の原料が不要でかつ水が副生するのみであるため、選択的な脱水反応で有用な化学品を製造する触媒反応の開発が重要であろう。いずれにせよ、石炭ベースの化学工業の体系が石油ベースの体系に置き換わり成熟するまでに要した時間を考えつつ、特長のある製品開発と新規な触媒開発の両面からバイオマスベースの化学品開発に取り組むべきと考える。

一方、CO₂ は決して不活性な分子ではないが、化学ポテンシャルが低く、還元剤を多く必要とするため、現状では化学原料としては限定的である。コストと規模（水素のエネルギー利用量以上の生産の必要性）の点から、近未来における商業化は困難であろう。そもそも CO₂ を化学原料とするプロセスの開発は、CO₂ を転化する反応がその低い化学ポテンシャルから平衡的に不利なものが多いこと、さらに還元によって水が大量に発生することから、触媒化学および反応工学の観点から非常にチャレンジングである。したがって、化石エネルギーから得られる従来型の水素を用いて CO₂ から化学原料を得る基礎研究を行うことで技術基盤をあらかじめ構築しておき、CO₂ フリーの水素が調達できるようになった時点で当該技術を速やかに活用できるよう受け皿を用意しておく必要がある。

2. 3 メタンからメタノールへの直接転換

植 嵩 陸男

2. 3. 1 背景

化成品製造（物質変換）に要するエネルギー、すなわち CO₂ 排出量をいかに低減できるかは重要な課題であり、2.1、2.2 章でも述べたように、化学品の主要原料源の多様化も重要な視点である。メタンを原料とする化成品製造について、資源、経済性と環境保全の

両立の視点から議論をすすめてみたい。

現在、世界の熱、電、動力エネルギーおよびあらゆる分野に広く利用されている化成品などは石油、石炭などの化石資源に大きく依存しており、化石資源は人類の発展と豊かさには不可欠な資源である。しかしその埋蔵量は有限であり、また広範な利用により排出される CO₂ 増加による地球環境悪化によって人類の健全なる永続性が危機にさらされている。この危機感から、化石資源とくに石油に代わる資源として、近年世界各地で発見された、メタンハイドレートやシェールガスなどの埋蔵量の多い天然ガスが注目され、エネルギー・化学原料に変換するための革新的な技術の創製が強く望まれている。なかでも国産資源として近年特に有望視されているメタンハイドレートは日本の石油依存度を大きく低下させる資源・エネルギーとなりうるものであり、メタンの採掘単離技術の開発が進められているところである。メタンからの化学原料への変換技術、とくに有用化学物質の基礎原料となるメタノールへの直接合成技術は、注目される重要技術であるが、いまだ実施可能な水準にはほど遠く、高難度選択酸化反応の域を脱していない。2.1、2.2 章でも述べられているようにメタノールは現在ある化学原料の鍵となりうる重要な基礎化合物であるゆえ、メタンのメタノールへの直接変換技術は、日本のこれからのエネルギー政策および化学原料調達政策に関連する重要な技術である。しかしながら日本を含む世界規模でのメタノール直接変換の開発研究は続いているが、未だこの課題は解決されていない。

現在、メタノールはメタンおよび天然ガスから製造される合成ガス (CO+H₂) 経由で製造されている。しかしメタンは化学的に安定なため、この合成ガス経由の方法ではメタンを CO と水素に変換する際には 750~900℃ の高温処理が不可欠となり、エネルギー大量消費型のプロセスとなっている。このためメタンと酸素から温和な条件下で直接合成できる技術の創製は、将来メタンを資源とする日本の技術戦略として重要なものである。これまで培ってきた研究開発の延長では課題解決は困難とみられ、このような高難度研究課題には、近年発達を見る計算化学・計測技術の導入および有望な人材の確保と育成、ならびに国内外と有効に連携できる組織運営体が不可欠である。

2. 3. 2 現状と課題

メタンや低級アルカン（用語説明参照）から化成品やエネルギー原料への変換技術は地球規模で重要であるが、とくにメタンからメタノール直接合成はいまだ技術的難度が高く進展はない。しかしながら、天然資源として豊富に存在するメタンや低級アルカンを効率よく活性化する画期的な触媒の創製が実現できれば、国際的にもインパクトが非常に高い。本分科会の前報告の記録（2014 年 9 月 1 日付作成）を基に、この課題に対する問題意識がさらに高まり、その重要性が認識され、大型プロジェクトの実現に向け議論がなされた。結果として平成 27 年度文部科学省が選定した戦略目標「多様な天然炭素資源を活用する革新的触媒の創製」のもと科学技術振興機構（用語説明参照）の戦略的創造研究推進事業 JST-CREST（用語説明参照）が発足した。今後の進展が大いに期待されるところであり、難度の高い課題への挑戦が始まったところである。

2. 3. 3 課題解決に向けて

① 基礎科学の充実

メタンからメタノールへの直接合成プロセス開発の鍵である触媒の開発は相当難度の高い課題であり、現状では試行錯誤的な部分もある。それは触媒の作用機構、すなわちメタンの触媒への吸着、さらに酸素との反応によるメタノールの生成機構が完全に解明されていないことにも起因する。開発中の触媒は固体触媒がほとんどで、無機酸化物を触媒の支持体として用い、その表面および内部に触媒の活性成分（遷移金属や貴金属の化合物）を担持したものが多い。これらの触媒の性能および触媒作用機構を解析するための高性能計測機器は数多く存在し、またその高性能化も進んでいる。しかし反応中の挙動すなわち反応場を直接捉え、反応の本質を直接見る解析装置は種々開発途上にあり、早期実用化が期待される。また本課題は、将来の資源・エネルギーに関わる重要なテーマで、産業界にとっても将来の社業に関わる重要な課題でもあり、産学官連携による課題解決が求められる。

② 市民とともに構築する社会システム

メタンからメタノール直接合成のような高難度技術について、人、物、金、時間をつぎ込むだけで、効率的に目標が達成できるかは難しいところもある。やはり研究者も巻き込んだ組織体の活気・情熱が不可欠ではなかろうか。国産メタンハイドレートからのメタンが自給できれば、エネルギー・化成品原料も自給できる新たな社会が構築でき、かつ地球環境に調和したエコな技術を全世界に発信できる素晴らしいものになることを、適切な情報の公開のもと、市民と共に将来の夢や目標を共有し、新たなエネルギー・物質原料に対応した社会の構築を共に描くことができれば、研究者、組織も活性化され、目標達成に向け大いに弾みがつくのではないかな。

2. 4 メタンから低級オレフィンへの直接転換

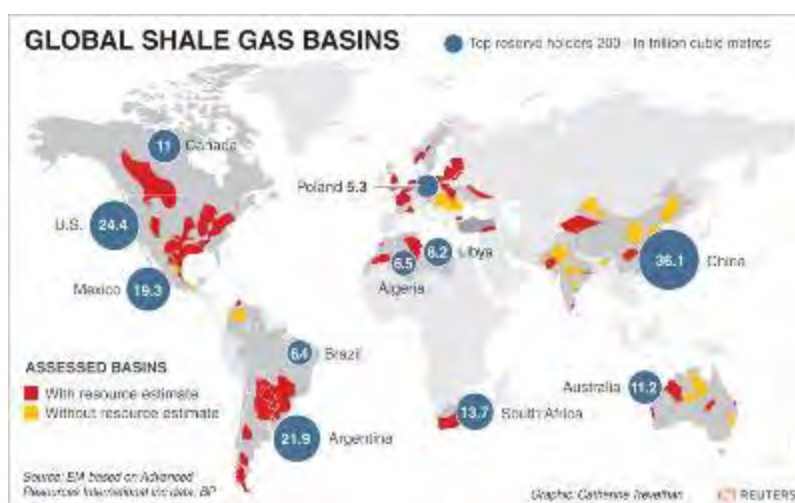
村松 淳司

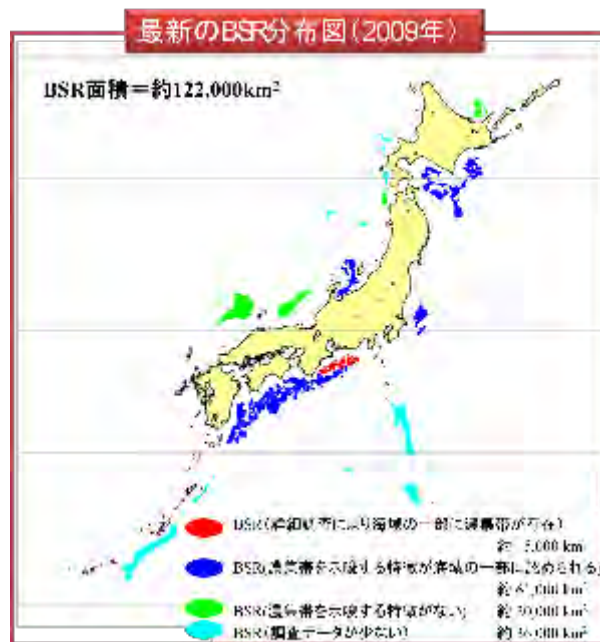
2. 4. 1 背景

メタンからのメタノール製造（2.3章参照）だけでなく、低級オレフィン等、化学原料の合成ルートの開発も重要である（2.1、2.2章参照）。そこでは、低級オレフィン合成を、原油を原料とする場合とメタンを原料とする場合の物質変換に必要な最小エネルギーの比較から議論されるべきである。さらに、メタンからの低級オレフィンへの物質変換プロセスについても、使用エネルギーを最小とするプロセスを志向すべきである。吸熱的なメタン改質により CO、水素を合成し、その後、熱的なプロセス結合なく、発熱的なフィッシャートロピッシュ合成（用語説明参照）を行うシステムでは、大きなエネルギー消費（CO₂排出）につながる。そのため、メタンから直接オレフィン合成を行う新たなプロセスが必要である。

本技術については、2.2章でも述べたように、1980年代から技術開発が進められてきた。ここでは、過去行われてきた技術背景の下、直接合成技術に焦点を絞って、本技術の可能性について議論を行いたい。

いわゆる在来型の炭化水素資源に代わる、アメリカでのシェールガス革命を受け、石油や石炭よりもカロリー当たりのCO₂排出量が少ない、メタンから展開する新たな化学産業の構築が期待されている。米エネルギー情報局（E I A）は、2012年、世界で採掘可能な新型天然ガスのシェールガスの埋蔵量は約2,060,000億m³に上るとの推計結果を明らかにし、中国が最も多くを占めた。E I Aはシェールガスが埋蔵されている頁岩（けつがん）層の地中分布状況から、現在の技術で採掘可能な範囲で推定。シェールガスの埋蔵量は天然ガス全体の約32%を占めたと、報じている。一方、日本のメタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムは2010年にメタンハイドレート起源BSR分布図を公表し、南海トラフにおけるメタンハイドレート原始資源量を約11,415億m³（P_{mean}）と算出している（日本の天然ガス消費量は約1,125億m³（2014年））。





このメタンの低級オレフィンへの直接転換プロセスの開発こそ、次世代のオレフィン転化システムの構築に結びつくものと期待されている。そのためには、メタンを高度に活性化し、低級オレフィン（エチレン、プロピレン、ブテン類）への直接転換を可能にする新しい触媒材料の創製が、必要不可欠である。たとえば、メタンの活性化触媒作用が期待でき、金属超微粒子を設計・調製し、それらを多孔質酸化物（ゼオライト、セリア、チタニア、ランタニア）の有するナノ空間内に精密配列させる。こうして全く新しい触媒材料を創製し、メタンの超活性化と低級オレフィンへの直接転換を実現する。基礎化学品である低級オレフィンの原料を石油由来ナフサからメタンに移行させるパラダイムシフトに資するものであり、メタンから高付加価値化学品への自在転換を実現・確立させることにつながる。

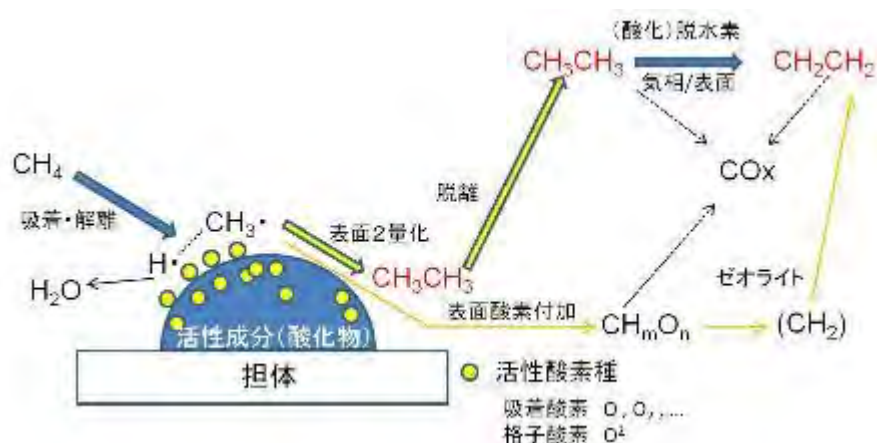
天然ガスの主成分であるメタンをはじめとするエタンなどの不活性低級アルカンの有効利用に直結する触媒反応プロセスの開発では、高価な酸化剤（過酸化水素など）や還元剤を使用しないアトムエコノミー（用語説明参照）の高い触媒反応プロセスが期待される。このような不活性低級アルカンを活性化する新しい「反応場」を追究することは、新しい「触媒材料」の設計に資する新概念の創出に繋がる。

こうした新たな触媒化学プロセスの構築は、石油化学、資源化学、材料化学などの関連分野に与える波及効果は大きい。北米ではシェールガスの急激な生産拡大と価格低下により開発企業の収益が悪化している。しかし、我が国の化学企業が本提案技術を海外展開し、ナフサ由来の化学品を上回る価値を有する化学品へと自在転換が可能になれば、我が国の化学企業が強力な国際競争力を獲得しうる。併せて国内でも製鉄に付随して多量のコークオーブンガス（用語説明参照）が産生し、安価かつ化学利用が進んでいない中で、メタンの直接転換技術が展開できれば、国内でも新規プロセス開拓が可能となるだろう。

2. 4. 2 現状と課題

メタンを直接化学品に変換するパスは複数あるが、最も可能性があるのは、酸素存在下での低級オレフィンへの直接転換であり、すなわち、メタンの酸化的カップリング反応である。これは発熱的反応であるため、熱的に独立した反応システムとして構成できる。メタンからエチレンが合成されれば、エチレンから二量化で生成されるブテンから既存のメタセシスプロセス（用語説明参照）によりプロピレンの合成ができる、など、多彩な展開が期待できる。

メタンを水蒸気改質せずに直接エチレン、プロピレンやブテン類に転換することができれば、たとえ収率が低くても最短のルートであるのでエネルギー的にも経済的にも成り立つ。メタンを直接化学品に変換するパスには、酸素共存の有無、酸化剤の利用など複数あり、これらの多くは熱力学的に可能であるが、メタン転化率、選択率の改善においては速度論的な制御が不可欠となる。これまでのメタン活性化研究において、Y型、A型、MFI型ゼオライトにAg⁺交換した細孔内のAgイオンクラスターが水素分子を可逆的に不均等解離吸着すること、解離したCH₃は反応性が高いためエチレンと反応してプロピレンが生成することなどが見いだされているが、性能は十分とは言えず、活性化効率の更なる改善、低級オレフィン収率の向上が望まれている。



2. 4. 3 課題解決に向けて

① 計算科学と革新的触媒開発

メタンの低級オレフィンへの直接転換を可能にするには革新的触媒開発が必要となる。触媒機能を高めるためには2次構造の制御、すなわちメソポーラス化も重要である。特に、C-H結合の活性化、C-C結合形成触媒設計において、酸化物-金属-メタンの三相界面の制御・それらの位置関係の最適化が重要となる。従来、このような金属酸化物と金属ナノ粒子間の相互作用を考慮した上で金属種を設計することは困難であったが、たとえば、コンビナトリアル計算化学の概念を活用した金属触媒種設計や全く独自の大規模分子動力学計算手法を開発・活用することで、金属種の探索、金属酸化物と金属ナノ粒子の最適構造を予測することができる。

② 構造化触媒

現状のメタンカップリングの問題点を乗り越えるために、これまでとは異なるメタン活性化法の開発が必須である。すなわち、メタンを高度に活性化し、低級オレフィンへ直接転換を可能にする新しい触媒材料の開発が必要不可欠である。メタンの解離により生成した CH_3 を触媒表面で二量化させ、エタン、エチレンにさせ、あるいは、ゼオライト触媒上にマイグレート（用語説明参照）させ、炭素鎖を延ばした炭化水素を合成させる。そのための触媒設計は、メタン活性化成分を、多孔質酸化物（ゼオライト、セリア、チタニア、ランタニア）の有するナノ空間内に精密配列させることが考えられる。こうした全く新しい構造触媒によりメタンの超活性化と低級オレフィンへの直接転換を実現することができる。

さらに、表面 CH_3 が部分酸化された活性種が、MFI 型ゼオライト（用語説明参照）などによる MTG 反応（用語説明参照）を受けて、ベンゼン類などの高級炭化水素の合成される新規ルートの開発が期待される。

2. 5 バイオマスの完全利用のための総括的な製造システム構築の重要性

北川 尚美

2. 5. 1 背景

本「記録」のはじめに、2.1、2.2 章でも述べたように、バイオマスの化学品原料としての利用は、物質変換（大きな化学構造の変化）に必要なエネルギーという観点から、適切な製品群を対象とすべきであろう。しかし、化学品を最終的に燃焼処分することを考える（CCS のように貯蔵することを前提としない）場合、バイオマスは、化学品のライフサイクルにおける CO_2 ゼロエミッション（用語説明参照）のための重要な化学原料と位置づけられる。原理的に高効率での CO_2 固定が期待される人工光合成（2.6、2.7 章参照、太陽光発電・電解も含め）の技術が確立するまでの間は、非可食性バイオマスからの化学品合成技術は重要な位置づけとなる。ここでは、バイオマス変換の技術ではなく、関連技術を社会実装していく場合の課題に焦点をあてて議論を進めたい。

バイオマスを原料に化学品などを製造する技術は、石油製品を代替するクリーンで持続可能な化学品製造技術といわれている。すでにいくつもの国家プロジェクトが進んでおり、様々な要素技術が盛んに開発されている。しかし、実際に商業的な化学品製造プラントを販売、導入、稼働させようという段階からはほど遠い状態にある。真にこの技術の実用化を目指すのであれば、この原因をしっかりと解析することが重要である。要素技術の変換効率が低く技術自体の更なる開発が必要なのか、操作条件が過酷でエネルギー投入量が大きすぎるのか、触媒が高価で採算性が低いのか、製品品質が低くユーザーの要求に満たないのか。当然、各要素技術によって問題点は異なるだろうが、しっかりと解析し、正しく認識する必要がある。

一方で、このまま個別の要素技術開発を主体とする研究を継続しても進展が期待できな

い可能性も高い。バイオマスは多成分混合物であり、既に主要な部分は食料や材料として出荷されて産業が成立しており、残っているものはほとんど価値のない部分である。この価値のない部分を原料として、如何にコストのかからない手法で価値を高めるかが産業化のポイントとなる。その際、一つの成分の変換だけでなく、複数の成分、最終的には全ての成分を高付加価値化して製品化することが採算性を高める有効な手法となる。そのためには、これまでに提案されてきた数多くの要素技術の中から、最も効率的な技術を選択、それらを連結させて多段の変換プロセスを構築し、バイオマスの完全利用のための総括的な製造システムを創り出す必要がある。

2. 5. 2 現状と課題

バイオマスを化学品に変換するための要素技術開発に取り組む研究者は非常に多い。現状では、変換ルートが多様性を増やすことを目的とした研究が主体となっており、技術の実用性を高めることを目的とした実バイオマスを用いた変換挙動の検討や触媒の耐久性の議論も増えつつある。ただし、要素技術に着目した場合、その技術において最も変換効率を高くすることが目的となるが、複数の技術を連結させて多段プロセスを構築する際には別の視点が必要となる。例えば、原料組成に応じた成分分離法と変換の順序の最適化、副生物の反応活性や分離の容易さを考慮した変換技術の選択と組み合わせ、システム全体での効率的な熱利用を考慮した操作温度の設定、などである。システム全体での生産効率を高めることが目的となるため、異なる視点での要素技術の見直しが必要となる。しかし、後者の要素技術を組み合わせて多段プロセスを構築、総括的な製造システムを設計できる研究者は、非常に少ないのが現状である。この原因は大きく2つある。1つは、新規性が分かり易く学術論文なども書きやすい新たな要素技術を見出す基礎的な研究に従事する研究者が増え、産業化に必要不可欠であるものの、新規性が見えにくく学術論文などが書きにくいプロセスやシステムを創り出す応用研究に従事する研究者が少なくなったこと。もう1つは、学問の細分化が進み、あまりにも多くの専門的な要素技術が開発され、それらを全て把握することが難しく、どの要素技術の組合せがベストマッチなのかを適切に判断する手法がないこと、である。

2. 5. 3 課題解決に向けて

① 総括的な変換システム

要素技術を連結させて総括的な変換システムを創り出すためには、化学工学の学問的な視点が役立つ。そのため、化学工学の専門家を中心として、非可食性バイオマスを活用するスマート化学生産システムの構築に向けての問題点の抽出に取り組んでいる。ここでは、非可食性バイオマス由来化学品製造プロセスの社会実装を目的とし、その化学変換経路を網羅するデータベースを構築（約800報の文献）、エネルギー・環境・経済性の複合的評価手法を構築することで技術やシステムの課題を抽出、原料の発生速度やその季節変動を考慮したサプライチェーン・バリューチェーン（用語説明参照）の検討、を行っている。こ

こで得られた知見や手法は、バイオマスの完全利用のための総括的な製造システムを創り出す基盤の一つとなる。

② 地域社会と新技術の融合

また、原料となるバイオマスは、各地域によって様々であり、その地域によって産業構造も大きく異なる。そのため、開発技術の導入によって、農・林・水産業による本来の主産物の増産や安定生産、さらには地域の雇用や経済循環を生み出すことのできる真の好循環システムの構築までを目指すことが重要である。つまり、導入したシステムの継続的な運用を実現するためには、各地域の産業構造、物質やエネルギー、経済の循環状況を十分に把握した上で、地域社会の同意を得たシナリオやロードマップを作成し、それに沿った形で製造システムを設計、地域主導の形で技術導入することが必要となる。

地域への技術の社会実装とその課題については、2.1 1 章でも議論したい。

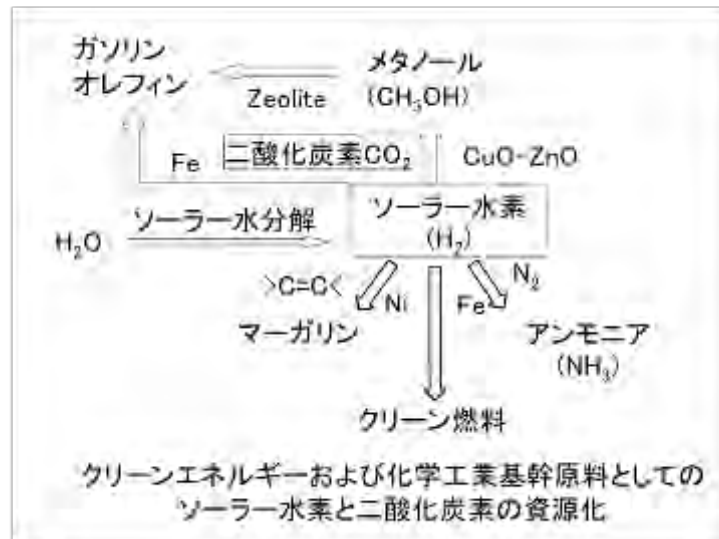
2. 6 エネルギー投入を抑えた物質変換と CO₂ 削減を両立することができる人工光合成技術の確立に向けた研究環境の整備

工藤 昭彦

2. 6. 1 背景

CO₂ 量を削減するには、CO₂ を排出しない技術の確立、CO₂ を利用する技術の開発が必要である。2.1～2.4 章では、化学産業において化石資源を有効利用しながら CO₂ の排出を抑えた物質変換の重要性を提案している。また、2.5 章では、バイオマスの化学原料としての利用による化学品のライフサイクルにおける CO₂ ゼロエミッションの観点からの重要性を議論した。その先の、さらに有効な技術として、人工光合成（用語説明参照）の確立が強く望まれている¹⁻³⁾。化学産業での物質変換において、水素は不可欠な物質である。この水素を化石資源に頼らず、太陽エネルギーを使って水から製造することができれば、CO₂ の排出を抑えることができる。さらに、この水から製造した水素（ソーラー水素）をエネルギー需要以上に供給できれば、それを CO₂ の還元、すなわち物質変換に利用することで、CO₂ を削減することができる。このように、人工光合成による水からの水素製造技術を確立することは、二酸化炭素を排出しない、さらには利用するという観点から一石二鳥の技術と言える。太陽光の有効利用技術と人工光合成に関する研究開発、特に「水の光分解による水素製造の研究開発」は、エネルギー・環境・資源課題の解決の観点から長期的課題として重要である。

ここでは、このようなエネルギー、物質変換としての技術背景の理解の下、人工光合成の現状と課題、その解決、可能性について議論したい。



現在の人工光合成の世界的な研究動向を見ると、その多くが人工光合成を構築するためのパーツの研究に留まっているようである。この研究領域は、化学、物理、材料など多くの研究分野の境界領域に属する。したがって、異分野の学協会が連携することにより、学術かつ技術面において相補的な知見が得られ、相乗効果が期待される。さらには、放射光等の先端かつ高度な計測法を利用することが不可欠である。このような連携により、新たな科学技術上の革新的な発明・発見がなされ、基礎研究のみならず実用化に向けた応用研究が加速されると期待される。そのためには、異分野の学協会の協調体制を作り、さらには研究を推進するための研究組織、研究場所、研究資金などの環境づくりが重要である。光触媒を使った水分解による水素製造は、ホンダーフジシマ効果（用語説明参照）に始まり、現在でも日本がリードしている科学技術分野である。人工光合成技術が確立されれば、それは純国産の技術となり、日本の強みを発揮することができる。

2. 6. 2 現状と課題

人工光合成として、太陽光エネルギーを使って効率的、元素戦略的（用語説明参照）、経済的な観点を満足する下記の反応系を構築することが求められている。

- (1)水から水素（ソーラー水素）を製造する。
- (2)(1)で製造されたソーラー水素を使って、二酸化炭素を有用な物質に変換する。
- (3)水と二酸化炭素から、直接有用な物質を合成する。

これらの反応において、いくつかのプロジェクトで、研究の進展が見られる。たとえば、新学術領域「人工光合成による太陽光エネルギーの物質変換：実用化に向けての異分野融合」（AnApple、用語説明参照）やJST さきがけ「光エネルギーと物質変換」（用語説明参照）において、基礎科学的成果が蓄積されている。また、(2)のプロセスの実用化を目指したNEDO プロジェクト「グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発（革新的触媒）二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発」（ARPCChem プロジェクト、用語説明参照）において、既存の材料の改良で遅いながらも効率は徐々に向上している。現状の太陽エネルギーから水素エネルギーへの変換効率（目標：太陽電池ではなく光

触媒材料で 10%) としては、日本で開発された粉末光触媒材料を用いた光触媒シートで 1%、光触媒電極で 3%が発表されている。しかし、現時点では効率が不十分であるため、まだ実用化レベルではない。既存光触媒材料の高効率化、新たな光触媒材料開発が不可欠である。

一方で、太陽光＋水分解（光触媒以外）で水素を作るその他の系として、下記の系が研究されている。

- ・集光型太陽電池＋水電解装置：24%
- ・ペロブスカイト太陽電池⁴⁾＋水電解装置

人工光合成研究開発を進めて効率の良い系を設計するためには、基礎科学的視点から、活性を支配する因子、メカニズムの解明が不十分である。先端計測を駆使した基礎・応用科学の視点から、光触媒設計指針の確立、光触媒サイエンス（用語説明参照）の展開などにおいて、科学技術上の革新的な発明・発見が必要である。日本の当該分野の研究レベルはトップクラスであるが、これまでは主に個々の研究者による個別の研究開発が進められてきた。この視点からは、個々の研究者ベースでの共同研究は展開されているが、大局化・体系化した連携は不十分である。

2. 6. 3 課題解決に向けて

柔軟に基礎研究（材料開発など）・応用研究（高効率化、低コスト化、モジュール化など）を継続する必要がある。光触媒材料開発により、急速に進展する可能性有るため、それが可能な研究環境作りが必要である。具体的なソリューションとして、次に述べるようなことが考えられる。

① 融合研究の重要性

本研究分野は、化学系の学協会である触媒学会、光化学協会、電気化学会などが中心に個別に活動を行ってきた。しかし、近年になって物理系の応用物理学会や表面科学会で人工光合成を取り上げたセッションが開催されるようになってきた。講演会では、バックグラウンドが異なる研究者が講演者となっている場合が多々見られるようになってきた。そのことから判断して、主催者や参加者は、お互いの分野に興味があることは確かである。一方で、1970-80年代にかけて、人工光合成の研究が盛んに行われた時期があったが、その頃に比べて材料開発や先端計測・理論計算科学が格段に進歩していることから、研究ステージや取り巻く状況がかなり良くなっている。先端高度計測関係としては、高エネ研や Spring8 の研究者も人工光合成研究に興味を持っている。さらに、化学委員会・分析化学分科会の目指すところとマッチングがある。また、理論的・計算科学的視点からは、ポスト京のプロジェクトが立ち上がって、人工光合成も課題に取り上げられている。それをきっかけにこれらの関係者との連携を深めることが重要である。これによって、広い学際領域にわたる協調体制を築くチャンスが得られる。それをプロジェクトにつなげられれば、充実した研究組織、研究場所、研究資金などの環境づくりが可能となり、人工光合成が加速され、大きな進展が期待される。このような研究環境を通して、幅広い研究分野および世代の人材育成も可能となる。

以上を総括すると、当時の課題解決に関して、進みは早くはないが、土台ができつつある。しかし、それらの課題解決に向けて、体制作りを加速し、融合的な研究を早急に実施する必要がある。

参考文献

- 1) 堂免一成、瀬戸山亨監修、「光触媒/光半導体を利用した人工光合成 ～最先端科学から実装技術への発展を目指して～」、エヌ・ディー・エス (2017)。
- 2) 光化学協会編、井上晴夫監修、ブルーバックス「人工光合成とは何か」講談社 (2016)。
- 3) 石谷治、石田斉、野崎浩一「人工光合成—光エネルギーによる物質変換の化学」、三共出版 (2015)。
- 4) 宮坂力「ペロブスカイト太陽電池の特徴とエネルギーハーベストへの応用」桑野 博喜、竹内 敬治 監修、シーエムシー出版 (2015)。

2. 7 光触媒水素製造（人工光合成）と植物工場（光合成）の融合

安保 正一

2. 7. 1 背景

次世代クリーンエネルギーとして水素が注目され、環境調和型で持続可能な方法で水から水素を製造する技術の確立が望まれている。一方、食料生産において、地球温暖化等による急激な気象変動や農地環境の破壊や汚染、また生産者の高齢化のため、安全な農作物を計画的に必要な量生産することが困難となり、安定した安心安全な農産物生産の技術の確立が望まれる。2.5章で述べたバイオマス利用、2.6章の人工光合成のアプローチの融合による課題解決の可能性をここでは議論したい。

2. 7. 2 現状と課題

水からの水素製造法として人工光合成として光触媒で水を水素と酸素に分解する研究がなされているが、その実用化にはまだまだ時間が掛かると考えられ、何か他の系と融合しないと光触媒のみでは実用化が難しいとの見方もある。実用化が困難な大きな原因の一つは、水を酸化して酸素を発生させる過程が困難で効率が向上しないこと、光触媒が酸化され活性劣化が起ること、が挙げられる。一方、太陽光の恵による食料生産においては、急激な気象変動や農地の砂漠化等の環境破壊や環境汚染が広がっており、また食料生産に携わる生産者の高齢化も進み、安定して安全安心の食料生産を周年計画的に生産することが困難な状況になっている。さらに生産された食料の長距離輸送もコスト面での大きな負担になっている。

2. 7. 3 課題解決に向けて

① バイオマスと水分解による水素生成

各種の光触媒を開発し水を水素と酸素に分解する人工光合成系の研究が行われているが、水素利用の実用化には、水の酸化過程を含む反応効率のさらなる向上とともに混合ガスとして生成する水素と酸素の分離技術（別途コスト必要）等が課題として存在する。純水からの水素と酸素の製造が実用化レベルの技術に確立できるまでの間、純水でなくバイオマスを含んだ水を用い薄膜系光触媒で分解すれば、バイオマスが水より容易に酸化されるため高効率で水から水素を製造できる。（ただし、この系では酸素でなく CO_2 が生成する。）

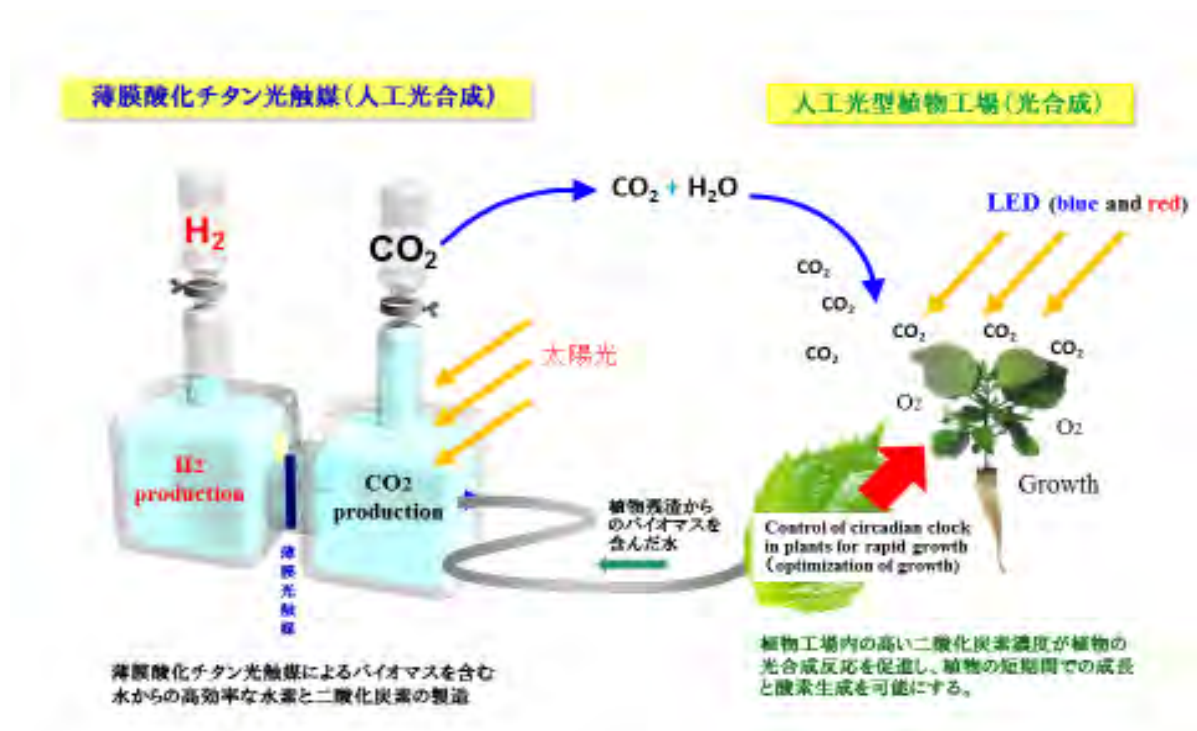
② 自然光合成と人工光合成との融合システム

気象変動や農地環境破壊・汚染等の影響を受けない、安定した農産物の生産方法として、大都市内や近郊での空ビル等を活用し、LED 人工光の下で安全安心の野菜等を周年計画的に生産可能な植物工場¹⁻⁴⁾（用語説明参照）の利用が広がっている。植物工場では、狭い空間を効率よく使い生育環境（温度、湿度、 CO_2 濃度等）を制御することで露地栽培（用語説明参照）より短い期間で生産が可能となる。特に、栽培室内の CO_2 濃度は大気の4倍程度として植物の光合成速度を最適化するため植物は露地栽培の半分程度の日数で成長する。

これら光触媒の人工光合成系と植物の光合成系を融合し、農産物の根や利用しない葉からのバイオマスを含んだ水を光触媒で分解すれば高効率で水から水素を製造できる。同時に、バイオマスから生成する CO_2 は、植物工場内で植物の光合成を促進し短期間での成長と酸素を放出させるために使われる。この様に光触媒系と植物工場の融合により、高効率で水素の製造が可能となり、同時に、安全安心の農産物の生産も可能となる。

尚、大規模植物工場で、光触媒で製造する CO_2 のみでは足りない場合は工場から排出される CO_2 を回収して利用する。また、植物工場内の LED 等の電力は太陽パネル（太陽光の比較的波長の長い可視光）から供給し、光触媒は太陽光の比較的波長の短い紫外－可視光を使うので、太陽光の有効利用にも繋がる。

下記にイメージ図を示す。



参考文献

- 1) 小倉東一、安保正一； 食品産業センター機関誌「明日の食品産業2」, 2014年4月号, 17-22頁.
- 2) 河口友紀、小倉東一、安保正一； シー・エム・シー月刊誌「機能材料」Vol. 34, 2014年8月号, 67-74頁.
- 3) 安保正一、和田光生、福田弘和； 日本工業出版「光アライアンス」, 2016年6月号, 27-33頁.
- 4) 安保正一、福田弘和、和田光生、「植物工場の生産性向上、コスト削減技術とビジネス構築 --今、注目されている植物工場とは、その全容--」、シーエムシー出版 (2015).

2. 8 資源循環に寄与する固体分離濃縮技術の熟成

所 千晴

2. 8. 1 背景

生産された物質が社会の中で飽和すれば、その廃棄物の利用（リサイクル）が有効となる。2.1～2.7章では、有機資源の物質変換とエネルギー、さらに研究開発のあり方について述べてきた。廃棄物の原料としての利用も重要な視点である。2.8、2.9章では、無機資源にかかわる技術と社会構築について議論したい。資源循環についての課題と求めら

れる研究開発アプローチについて述べる。

資源循環型社会に向けた取り組みが全世界的に加速する中、外界からのエネルギーや仕事の注入を低く抑えたプロセスの構築には、固体分離濃縮技術で特に課題が認められる。当該分野は 1990 年代に産業構造の変化や経済的状況によって研究開発が一時減速し、現在の難処理鉱石や資源循環といった新たな課題に直面して重要性が再認識されている。その熟成のためには、前後の関連する分離濃縮技術のみならず、社会的、経済的な境界条件を熟知した研究者や技術者との知識の構造化を進め、目の前の課題だけを比較的短期間で解決するという成果を求めるだけでなく、俯瞰的かつ長期的視野にたった研究者を育成する必要がある。

2. 8. 2 現状と課題

資源循環型社会構築に向けた取り組みは日本のみならず全世界で加速する方向にあり、例えばヨーロッパから発信された循環経済（Circular Economy）政策などはその状況を象徴している。資源循環を低エネルギー・低仕事で達成するためには、リサイクルシステムの構築に向けた法整備、リサイクルインフラの整備といった社会的な課題も多いが、技術的観点からすれば、固体から有用資源を処理再生するための固体分離濃縮技術と、さらに濃縮物から分離精製する技術とのベストミックスが不可欠である。前者は選鉱、あるいは前処理や中間処理と称される技術であるが、現状では多くの課題を抱えている。

その理由の 1 つは、前者のように固体を固体のまま分離濃縮する技術は、省エネルギー型の資源循環システム構築を達成するために必要不可欠な技術であるものの、後者のイオンや液体の状態で分離精製する技術に比べて一般に分離濃縮特性は確率的であり、一般化、ひいては理論化がより困難である点にある。このことは、昨今の科学技術分野において、比較的短期間で多くの論文発表を始めとする成果を求められる状況とは必ずしも相容れず、結果として資源循環を対象とする分離濃縮技術研究の多くが、より成果の出やすいイオンあるいは液体での分離精製技術に偏りやすい傾向を生んでいる。

もう 1 つの理由は、固体分離濃縮技術分野における人材不足である。これは歴史的には 1990 年代の鉱山不況に端を発する。固体分離濃縮技術は古くは選鉱技術として発展した分野であり、国内には世界共通語ともなっている「黒鉱」と呼ばれる難処理鉱石を対象とした緻密な選鉱技術を有していたものの、1990 年代にほとんどの国内鉱山が閉山し海外鉱山へ進出したのと共に、自然と国内での選鉱技術研究は減速した。現在になって海外から分離濃縮が容易な鉱石が入手しづらくなり、資源安定供給への不安とも相まって、難処理鉱石への選鉱技術研究が再び重要視されているが、この間 20 年余り、経済的な状況と目の前の課題だけに影響されて固体分離濃縮技術研究の進展が遅れた影響は、資源循環という新たな課題を抱えている現状では非常に大きい。

2. 8. 3 課題解決に向けて

① 学術的視点から

学術的に解決すべき研究課題としては、固体分離濃縮技術のミクロレベルな機構解明や、選択破壊の科学的理論の確立が挙げられる。いずれも基礎的研究と、資源循環を対象とした応用研究とのかい離が大きい分野であるが、例えば、近年発展している高度固体分析技術を駆使することによって、これまで対象の複雑性でのみ議論されてきた種々の分離濃縮特性に対し、理論的な機構解明が進められ、ひいてはプロセス改善や新規分離技術の開発につながる可能性が大きい。一例としては、シンクロトロン（用語説明参照）の利用を環境や資源循環分野にも積極的に広げ、固体分離濃縮プロセスにおける元素ごとの形態把握を詳細に実施することなどが挙げられる。

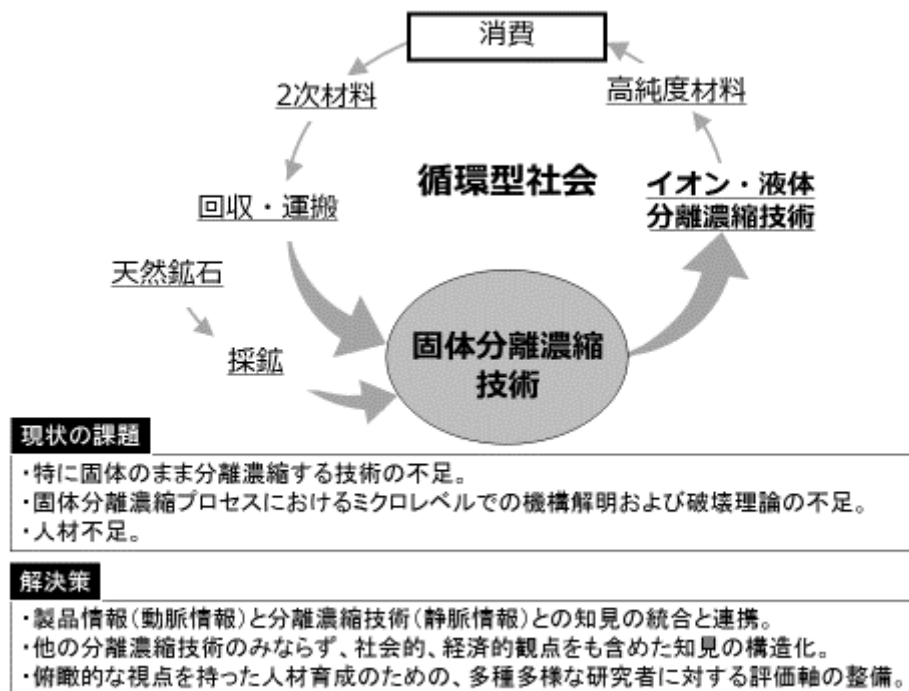
② 知識の構造化と新規技術開発

固体分離濃縮技術研究者と液体・イオン分離濃縮技術研究者、あるいはそれらの技術開発の境界条件となる社会的・経済的課題を熟知する研究者の知識の構造化と、それらを俯瞰的視野でとらえる研究者の育成も重要な課題である。上述の通り、固体分離濃縮技術は、低エネルギー・低仕事型の資源循環システム構築に欠かせないものの、一般に分離はこれらの技術だけでは達成されず、さらに高純度化する分離精製技術の前段に位置する。したがって、ある特定の物質のみに特化した技術開発は意味がなく、対象に含有されるすべての物質の最適な分配を常に考慮しながら、経済的にも環境的にも受容される技術を開発することが社会から求められている。そのためには、多分野にわたる必要条件をよく熟知し、真に社会から求められている技術開発に着手するための、それぞれの分野の知識の構造化と、構造化された情報から各研究者が正しい役割分担を認識することが重要である。このような知識の構造化プロセスの中から、固体分離濃縮と、液体・イオン分離濃縮の相互を補完し融合された画期的な新規分離技術が生み出される可能性も高い。

③ 製造と分離・回収のシステム統合

さらには、資源循環にかかわる分離濃縮技術者と、廃棄前の各種製品を生み出す研究者や技術者との交流と知識の構造化も重要である。資源循環での分離対象は廃小型家電などの人工物であることから、使用されている材料や強度、構造などが製造年代やメーカーによって実に多種多様にわたっている。しかしながら、こういった情報は、最適な分離技術の開発および分離プロセスの構築に当たり非常に重要な情報であり、これまでに研究者や技術者が蓄積してきた経験知を統合し、IT技術を駆使しながら広く公開して、利用可能な情報へと集約する必要がある。

上記いずれも、現状のままの科学技術系研究者への評価軸だけでは、自然には熟成されにくい分野である。俯瞰的視野や社会活動等も研究者として評価される指標づくりもまた、上記の実現に向けて重要な検討事項である。



資源循環に寄与する固体分離濃縮技術に係る課題と解決策

2. 9 資源循環のためのレアメタルリサイクルと分離技術

後藤 雅宏

2. 9. 1 背景

次に、より付加価値の高いレアメタル（用語説明参照）について、資源循環、技術開発の在り方について議論したい。

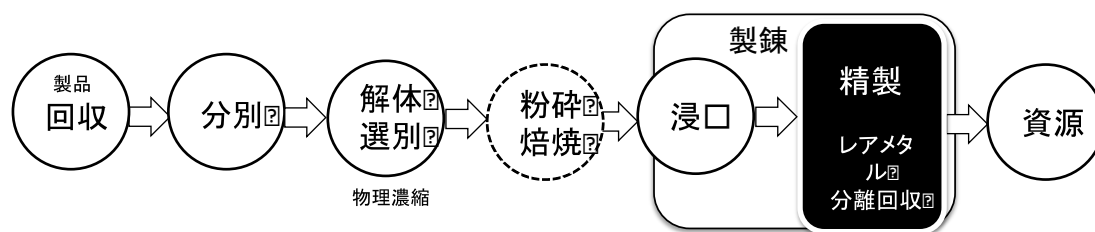
レアメタルは、先端産業のビタミン剤といわれ、電子機器、家電品、自動車などあらゆる製品の機能向上に貢献している。我が国には天然資源が少なく、ほとんどの金属原料を輸入に頼っているため、レアメタルの価格高騰による産業への影響について、しばしばニュースで取り上げられる。一方、日本はレアメタルの最大の消費国であり、これらの金属は使用済み製品として国内に蓄積している。資源を確保するために、また増え続ける廃棄物処理に対処するために、2001年には家電品リサイクル法が、2013年には小型家電リサイクル法が施行された。「都市鉱山」といわれるこれらの使用済み製品から金属を回収する場合、天然鉱山からの精錬法が応用できる。しかしながら、廃棄物特有の課題があるために金属の再資源化まで進んでいる例はあまりない。このような状況下で廃棄物は国境を越え、不適切な処理によりアジア諸国に環境リスクをもたらしている。貴重な資源を海外に流出させないために、また国内外の環境を守るためにもリサイクルの推進が必要である。

2. 9. 2 現状と課題

さまざまなハイテク機器には欠くことのできないレアメタルであるが、その供給体制は脆弱である。2010年のレアアース（用語説明参照）の急激な価格高騰は、日中の政治問題に端を発した中国の輸出制限によるものである。自動車、電子産業界に危機感が高まり、レアメタルのリサイクルにも関心が集まった。

レアメタルの最大の消費国である我が国には、製品としてレアメタルが蓄積している。たとえば、金 6,800t（世界の年間消費量に対する比率 2.7）、白金族(PGMs)2,500t（同 5.7）、レアアース 300,000t（同 2.5）である¹⁾。これまで使用済み製品の大半がリサイクルされることなく廃棄されてきた。増え続ける廃棄物処理には処分場の確保が必要であり、不法投棄および有害物質の漏出による環境汚染も問題となっている。さらに、アジアに目を向けると、中国をはじめとする各国で、日本や欧米先進国からの使用済み製品の輸入が増加している。再利用のためだけではなく、有価金属の資源として不法な売買が行われ、安価な人件費のもとでリサイクル処理が行われている。PCB（用語説明参照）や重金属のような有害物質が河川や土壌に漏出したり、有価物が取り出された後の残渣が放置されたりするなど、環境汚染が深刻になっている。使用済み製品に資源としての価値が見いだされれば、国内でのリサイクルが促進され、適正な処理によって環境汚染の防止にも繋がると考えられている。

都市鉱山と言われる廃棄物の金属資源としての品位は、かなり高いことが知られている²⁾。たとえば、携帯電話の基板には金、パラジウム、銀、銅などが含まれる。金は携帯電話一台 140g に 50mg 程度含まれているが、天然資源で同じ量を得ようとする と 53kg の鉱石が必要と報告されている³⁾。これは天然鉱石の品位が 1g/t 程度であるのに対し、使用済み携帯電話が 300g/t 以上の優良な資源であることを示すものである。都市鉱山が天然資源より高品位であるにもかかわらず、レアメタルを含む廃家電品のリサイクルは、それほど進んでいない。資源としてまとまった量の確保が難しく、また廃棄物からレアメタルのみを取り出すには手間を要するためである。2001年には家電品リサイクル法が制定され、テレビ、冷蔵庫、エアコン、洗濯機の回収が義務づけられた。2009年に環境省、経産省による使用済み小型家電の回収モデル事業が開始されると、福岡県でもレアメタルリサイクルの事業化のために小型家電の回収試験が始まった。集められた使用済み製品からレアメタルを再資源化する流れは図1のようになる。回収した製品は分別、解体され、選別されて



レアメタルリサイクルの流れ

有用金属が物理濃縮される。解体・選別工程では手作業も多く、物理濃縮までにかかなりのコストを要する。さらにレアメタルの製錬工程を経て再資源化されることになる。ブラウン

管テレビの場合、筐体とプリント基板およびブラウン管（CRT）に分けられる。プリント基板は、金などレアメタル資源として回収される。ブラウン管はパネルガラスと後部のファンネルガラス（用語説明参照）に切断され、それぞれ処理される。ファンネルガラスから外された部品で有用なものは集められる。パネルガラスには三色の蛍光体が塗布されているため、これを剥離し、ガラスはカレット（用語説明参照）にして再利用される⁴⁾。ここで剥離した蛍光体には、高濃度のレアアースが含まれているが、効率の良い分離回収法がないために、現在は埋め立てに付されている。蛍光管の場合、蛍光体はガラス内側表面に塗布されている。蛍光管の処理は、水銀等の有害物質を除去して、口金部を切り、残ったガラス部からガラス内側の蛍光体を吸引剥離する。ガラスはガラスカレットにして再利用されている。北九州市では、廃蛍光体の一部が蛍光体に再調製され、再生蛍光管として販売されている⁵⁾。40W 直管型蛍光管（重さ約 250 g）の場合、塗布されている蛍光体は約 5 g であるため、非常に高品位な資源と言えるが、大半は廃棄されているのが現状である。価格が高い金、白金族などの一部は回収されているが、その他のレアメタルについてはほとんどリサイクルが行われていない。レアメタルリサイクルには、図 1 の各工程での省力化が重要であるとともに、製錬工程において、微量のレアメタルを高効率に分離回収する技術開発が必須である。

2. 9. 3 課題解決に向けて

① 資源開発・廃棄物処理・環境の視点の統合と社会実装

鉄やアルミニウムなど量が多く単一素材として分けやすいものはリサイクルが進んでいるが、使用済み製品中のレアメタルは少量で組成が複雑なためコストがかかる。我が国におけるレアメタルのリサイクルは、将来的に大量消費されることを見越して、1980 年代から計画されてきたが、経済性に見合う再資源化技術がないことから、あまり進まなかった。近年アジア経済が活発になり、レアメタルの獲得競争による価格の高騰とともに再び注目されるようになってきた。と同時に、資源開発や廃棄物処理による環境破壊も新たな課題として浮かび上がっている。たとえば、レアアースの生産は現在ほとんど中国によって賄われているが、埋蔵量自体は世界の中でそれほど多いわけではない。米国などのかつての生産国は、安価な人件費と環境に配慮しない採掘方法による中国との価格競争に破れ、撤退を余儀なくされた。その結果、中国では鉱山のある地域での土壌や河川の汚染が問題になっている。また、東アジア各国では、先進国からの資源ゴミの受け入れと有価金属の不適切な方法での回収による健康リスクが指摘されている。資源が豊富である中国ではこれまでリサイクルには関心が薄かったが、最近は環境問題と絡めて意識が高まっている。新しい分離技術としてのレアアースのリサイクルもまだコスト的には解決すべき課題が数多く残されている。最も重要な点は、回収から資源化まで一貫したシステムのなかで、個別の技術を発展させるとともに、最終目的である社会実装の観点からの最適システムの構築が望まれる。リサイクルの状況は時々の金属価格によって変動するが、関心が高い今、これを一過性に終わらせるのではなく、将来にわたって世界共通の問題として継続する必要がある。

参考文献

- 1) 独立行政法人 レアメタル・レアアース特集、物質・材料研究開発機構資料
<http://www.nims.go.jp/research/elements/rare-metal/>
- 2) 原田幸明、元素戦略アウトルック「材料と全面代替戦略」第1章、p1-21、(独)物質・材料研究機構 (2007)
- 3) 環境省編 平成25年度環境・循環型社会・生物多様性白書 (2005)
- 4) F. Yang、F. Kubota、Y. Baba、N. Kamiya、M. Goto、J. Hazard. Mater.、254-255、79-88 (2013)
- 5) <http://www.j-relights.co.jp/business>

2. 10 熱エネルギー有効利用の飛躍的拡大

藤岡 恵子

2. 10. 1 背景

2.1～2.9章では、新たな産業・社会構築のヴィジョン構築とそのために必要な、物質変換とそれに必要なエネルギー量(CO₂排出量)削減の達成のアプローチを多角的に議論してきた。物質変換(分離も含む)に必要なエネルギーについては、各要素技術・プロセスを熱的に独立させてしまうと、各プロセスは必ず発熱系となる。しかし、プロセスを熱的に結合させることで(排出される熱エネルギーを他のプロセスで用いる)、必要なエネルギーを大幅に削減することができる。そのためには、エネルギーの貯蔵、輸送技術が必要となる。ここでは、熱エネルギーの有効利用の観点から、システム全体のあるべき姿を考えてみたい。また、そのために必要な施策についても議論したい。

日本はGDPあたりのエネルギー消費量が最も小さい国の一つであり、世界最高水準の高いエネルギー効率を持つが、それでも一次エネルギーの1/2以上はエネルギーとして価値があるにも関わらず有効利用されず、最終的に熱として廃棄されている。CO₂排出量削減において、今後大幅な削減が期待できる分野は限られているが、未利用熱エネルギーの有効利用は、産業分野だけで約0.3兆kWhの排熱があると見積もられ、高いポテンシャルを持っている。また、太陽熱、地中熱などの再生可能エネルギー熱の利用にも大きな余地を残している。熱エネルギーの有効利用は一次エネルギー消費量とCO₂排出量の削減に大きな寄与が期待されるが、広く社会に定着するには至っていない。その理由は、熱利用に不可欠な回収・輸送・貯蔵に係る技術にコストや安定性の点で改善の必要があるという技術的な問題、技術的に完成していても投資効率の低さから普及しにくいという経済的な問題、熱利用のためのインフラが存在しないという社会的な問題など、多岐にわたる。

このような現状にあつて、熱エネルギーの高効率回収・有効利用を実現する基盤を形成することが問われており、そのための緊急の課題として、排熱と熱需要の詳細なデータに基づいた戦略的な技術開発、構築可能な熱需給市場の提示と経済的可能性の検討、熱利用技術が必要とする多くの学問分野と産業界を結んだネットワークの形成が不可欠である。また、客観的な事実に基づいた熱利用の可能性やそれによってもたらされるメリットを可視化して市民に示し、あるべき熱利用社会の姿を共有することも重要である。

2. 10. 2 現状と課題

2. 10. 2. 1 現状の概観

未利用熱エネルギーは、太陽熱、地熱、河川・海洋熱、冰雪熱、バイオマス熱などの自然エネルギー由来の再生可能エネルギー熱と、工場排熱、ごみ焼却場排熱、下水熱などの都市・産業排熱に大別できる。再生可能エネルギー熱は大きな賦存量を持つが、稀薄性、偏在性、変動性が積極的な利用を妨げている。環境保護との両立も今後重要になってくる課題だろう。都市・産業排熱については、石油化学コンビナートや製鉄所のように高温で大規模、集中的といった利用しやすい条件を備えた排熱の回収・利用はある程度進んでおり、熱利用を大きく進展させるためには中低温、分散の熱エネルギー利用が鍵となる。これについては次のような問題がある。

熱エネルギーの温度や形態は多様で広く分布しており、有効利用のためには供給と需要の質的、時間的、空間的な不一致を繋げる必要があり、熱を回収、貯蔵、輸送する技術の高効率化が不可欠である。長年にわたって多くの技術開発が行われているが、実用化の推進には結びついていない。また、熱エネルギーは輸送が容易ではなく輸送中の放熱による損失と質の低下が伴う。送電線が全国に網羅され、輸送損失が少なく、エクセルギーが減少しない電力と比べると、利便性が低い。さらに、現存の熱利用市場が小さく新たな技術革新や投資、量産による低価格化が進まないことも実用化と普及を妨げている。

2. 10. 2. 2 熱利用技術・システムの課題

熱利用促進がCO₂排出量削減に対するポテンシャルの大きさから、長年にわたって多くの技術開発が行われてきた。にもかかわらず広く社会に普及するに至らなかった理由として以下が考えられる。

第一に、シーズ・オリエンテッドな技術開発の偏重がある。日本の熱利用技術は個々の要素技術としては世界をリードする位置にあるものが多く、また内閣府や経済産業省の大型プロジェクトのもとで多くの研究開発が遂行されてきた。しかしながら、その成果が熱利用の拡大につながらなかったのは、技術開発がシーズから出発してそれを進展させる方向が主流であり、要素技術やシステムの開発を市場で普及するための課題解決に収束させてゆく目的意識が不足していたことに大きな原因があったと考える。

第二に、熱利用促進のシナリオまたは戦略の不在がある。到達すべきゴールとそこへ至る道のりの想定が意識されないまま個別の要素技術開発が行われてきたが、熱利用機器、シ

システムの普及には結実していない。また、戦略の不在と同根の問題としてコスト評価など実際の社会導入に必要な因子の検討が十分でなく、熱利用機器の開発者、製造者としての企業の参画を促さなかった。

第三に、上記の問題の背景としての総合的な熱需給データの不在がある。排熱のデータとしては2001年に公表された産業界への調査結果¹⁾が現在でも最も多く引用されている。この事実が示すように、排熱や自然エネルギー熱の発生や賦存量、熱需要に関する大規模な調査は長年行われていない。地域や特定の事業分野についての分散した熱需給データは少ないながらも存在するが、全国的なあるいは一定の範囲内の総合的なデータはなく、熱需給市場の想定を困難にしている。

2. 10. 3 課題解決に向けて

① 熱エネルギー需給市場形成の基礎となるデータ収集

以上の現状に対して第一に必要なのは、最も基礎となる未利用熱と熱需要の総合的なデータ収集である。大規模な調査を早急に実施すべきであるが、並行して、個別に分散して存在する既存のデータの集積と解析を行い、需給マッチングと必要な技術課題を抽出することも重要である。データの収集によって想定される市場規模を示し、技術・システム開発や熱供給・利用側としての産学の新規参入を促すことが可能になる。さらに、常に変動する実際の熱需給に動的に追従できる手法の確立も同時に進行する必要があるだろう。

② 熱利用戦略の策定

未利用の熱エネルギーは、比較的高温で発電など利用価値の高いエネルギーに変換できる温度域から、100℃以下の低温域まで広範囲に存在し、形態もガス、温水、固体と様々で、それを利用する技術も熱の質、用途に応じて多岐にわたる。したがって、熱エネルギーの高効率利用のためには、供給側の熱源温度や供給量などの条件と需要側の用途を正確に把握して、数多くある熱利用技術の中から条件にかなうものを選択し、熱源、用途、技術の適切な組み合わせによって最大限の利用を図る必要がある。そのためには、総合的なデータを基礎とした熱需給市場の想定とそこから要求される開発課題の絞り込み、必要なシステム構成をフィードバックした技術開発が求められる。また、時間軸の設定も重要である。例えば、最も大量に廃棄されている100℃以下の低温排熱は、温水としての直接利用、電気駆動ヒートポンプの熱源としての利用が現在の主な用途であるが、より長期的には化学蓄熱を用いた熱の改質（利用価値の高い温度への変換）による利用範囲の拡大も視野に入る。

③ 学術分野間の相互連携ならびに産業界を結んだネットワーク形成

熱利用技術が必要とする学術分野は広く、理学や技術にとどまらない多くの分野の連携が実装可能で社会の要請に合致した熱利用の推進に寄与する。一方で、熱利用技術研究者・機関相互の一層緊密な連携と情報交換、評価基準の統一も必要である。技術だけでなく、インフラや制度の整備、社会的合意の形成など社会実装へ向けた課題の抽出も重要である。

熱エネルギー利用技術開発センターを設置して、知見の共有、測定機器などの共同利用、熱利用の社会実装シナリオに基づいた戦略を持った材料とシステムの開発を主導し、個別に獲得されてきた成果を総合することも有効であろう。

参考文献

1) 省エネルギーセンター、工場群の排熱、2000 年

2. 1 1 総合技術アセスメント、社会協働と地域社会における未来社会ビジョン創成

阿尻 雅文
梶川 裕矢
菊池 康紀
野田 優
福島 康裕

2. 1 1. 1 背景

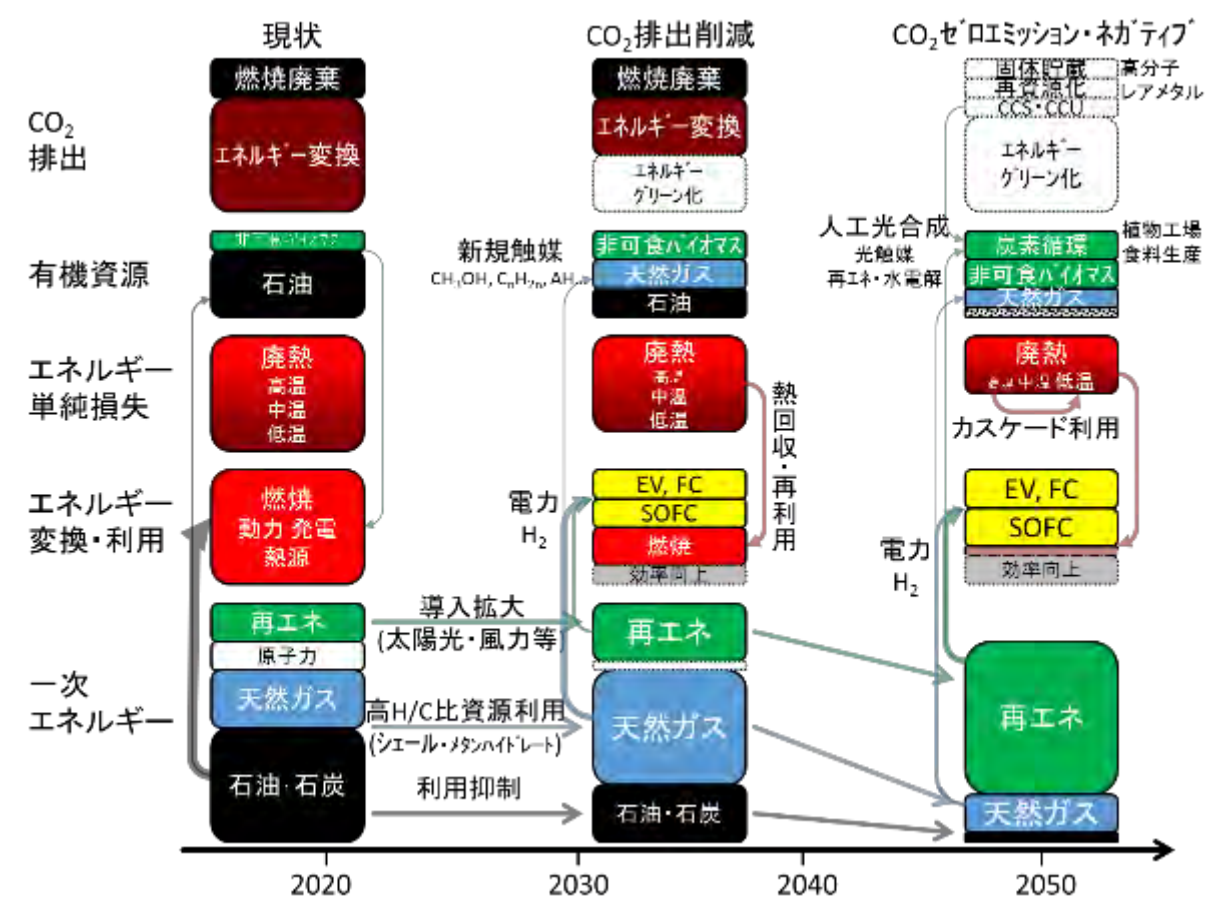
第4期科学技術基本計画では、イノベーションの重要性を前面に掲げ、研究開発の重点化を従来の科学技術分野に基づくものから課題解決を目指したものへと転換した。そして、府省横断型の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の創設など、産学官・関係府省が一体となって研究開発および社会実装を進める取り組みを進めてきた。

第5期科学技術基本計画でも、知の資産の持続的創出を目指し、多様で卓越した知を絶え間なく創出し、その成果を経済的、社会的・公共的価値として速やかに社会実装していく国となることを掲げている。国内外において、分野を問わず、先端的な研究成果と社会的な課題解決との間を繋ぐ何らかの新たな仕組みを作ることが重要視されている。

しかし、大学が生み出す知識・技術と企業ニーズや社会ニーズとの間に生じるかい離を埋める取り組みも未だ必ずしも十分には機能しておらず、その方法論は、未だ模索段階にあるようである。

2.1～2.10章では、エネルギー・環境・資源と化学技術という限られた領域ではあるが、この課題に対する一つのアプローチを示している。それらをまとめた「1. はじめに」の図・表を、本章の視点で整理したものを下図に示す。我々はそこで示してきた、有望技術の応用展開というシーズ・オリエンテド・リサーチ、特定の課題解決に向けたニーズ・オリエンテド・リサーチに加え、個別の新規要素技術を産業あるいは社会に組み込むのではなく、まず、新たな未来社会を作り上げていく、あるいは新たな産業構造を作りあげていく将来構想を掲げ、そこからのバックキャストにより、必要な要素技術を抽出していく、ビジョン・オリエンテド・リサーチともいえるアプローチも複数の角度から議論してき

た。これらの技術が、産業・社会システムの中で、どのような影響を得られるかを多角的に評価しつつ、ビジョン構築と技術開発との双方向のアプローチが、科学と社会とのかい離を埋めていくことにつながると考えている。



石油・石炭に依存しない資源・エネルギー社会の構築に向けて(CO₂削減)
(1章 図参照)

ビジョン構築と要素技術開発の双方向のアプローチは、科学・技術の地域社会への社会実装の文脈で考えるとその重要性や課題がいっそう明確となる。現状の産業構造やその他の社会インフラ、制度、文化などの下では現状の延長線上の仕組みしか描けず、地域社会の抱える深刻な諸課題の解決策を見出すことはおぼつかない。歴史的、文化的経緯を踏まえつつも、現状の縛りにとらわれずに、未来志向で望ましい地域社会ビジョンを自治体と住民が主役となり描く必要がある。しかしながら、エネルギー・環境・資源物質循環といった分野の科学・技術が革命的な発展をとげ、それが地域社会に与える影響が大きくなっているにも関わらず、主役である自治体と住民はその技術の詳細や影響を十分に理解できていないのが現状であろう。また逆に、地域の課題、ビジョンを明確にできない中で、課題解決型の技術開発ができるだろうか。地域と技術開発、研究活動の在り方と共に、これらをどのようにつないでいけば良いのか、再考する必要がある。

2. 1 1. 2 現状と課題

課題解決型のニーズ・オリエンテド・リサーチは、工学、技術者の本来の姿である。産業、社会システムの中で、要素技術の位置づけが評価されるべきであるが、最近、技術の細分化と深化にともない、要素技術の研究が進む一方、技術群の相互関係や全体システムとの関係の議論が希薄になっている傾向もみられる。分野によっては、技術ドリブンの研究が多く、本来の課題解決型のアプローチからの乖離も見られる。

産業技術開発やイノベーションに関する問題だけでなく、社会と科学とのかい離の問題も叫ばれて久しい。サイエンスカフェ等、新たな技術を市民に分かりやすく説明する場の設定は、最近広く行われるようになってきた。しかし、技術そのものではなく、個別の新技术を地域社会に導入した時の影響を、市民が理解できるように説明する（「技術の見える化」）活動は極めて限られているのが現状である。そのような、わかりやすい技術情報が市民に十分に与えられていないことが、地域社会の未来のヴィジョンの構想づくりを困難とする一因となっている。

2. 1 1. 3 課題解決に向けて

① ヴィジョン・オリエンテド・リサーチ

課題解決型のニーズ・オリエンテド・リサーチは、工学、技術者の本来の姿であるが、これをさらに未来の地域社会のヴィジョン達成のために必要な技術開発を行うヴィジョン・オリエンテド・リサーチへと進化させる必要がある。2.1～2.10章に記載したように、現在の課題の解決のためのニーズ・オリエンテド・リサーチを推し進めるのと同時に、ヴィジョン・オリエンテド・リサーチの具体的事例の累積と、方法論の構築が現代社会における工学の果たす役割として重要となってきた。しかし、最近では、技術の細分化と深化にともない、分野によっては、そのニーズ・オリエンテド・リサーチからの乖離さえ散見され、上記で論じた方向に対して逆行している恐れもある。新しいアプローチの下での研究を奨励し、成果を認めていくような態勢を学術界では整えていくことが急務である。

② 総合的技術アセスメントと人財育成

また、このようなアプローチ・評価・社会創成を担う人財の育成は、未来社会構築にもっとも大切である。特に、本「記録」で焦点を当てた、資源、エネルギー、環境技術については、それが地域社会に導入されたとき、その地域の産業構造、環境、社会構造に与える影響が極めて大きい。また、地域ごとに、入口となる未利用の物質・エネルギー資源や、価値化の出口も異なり、システム設計も異なってくる。この影響を、経済、産業構造、安全のみならず文化論も含め、多角的視点から、俯瞰的、総合的に考えて評価、最適化していく、総合的な技術アセスメントが重要となる。すでに、このような研究も一部の研究者により進められており^{1,2)}、特定地域における技術パッケージの議論³⁾などが進められているが、これは地域社会創成・活性化の鍵ともいえるアプローチであり、今後さらに大きな展開が図られる仕組みづくり、人財育成が必要となろう。

③ 社会協働

地域社会の将来ヴィジョンを作りあげるのは、本来その自治体そして住民であるが、そのために必要な、上記の「技術の社会への影響」に関する情報は必ずしも十分に与えられていないのが現状である。論文や特許という形での成果発表や技術紹介はもちろん重要であるが、それだけでは自治体や住民には技術を使いこなすことはできない。地域社会に適合した複数のシナリオを自治体と住民とともに考え、システムを設計してアセスメントした結果を客観的・定量的に提供し、自治体と住民に分かり易く選択肢を提示する「技術の見える化」と協働メカニズムの確立が重要である。これは、サイエンスコミュニケーションの新たなあり方ともとらえることができる。地域におけるシンポジウムの開催⁴⁾に加え、地域の基幹産業についても配慮した研究⁵⁾とそのコミュニケーション⁴⁾も必須であり、科学技術者主体となった技術・システムのプッシュは避けるべきといえる。こうしたコミュニケーションが、将来地域社会のヴィジョン構築につながっていくものと考えられる。

④ 学術の融合と社会システム

ヴィジョン・オリエンテッド・リサーチのアプローチにおける、社会と技術開発、研究活動の在り方を考える際には、人の生活や行動、意識、そして社会そのものを対象とする社会科学の諸分野や、地域での産業の主役である農学や林学、水産学など、さらにはこれらの資源の保全に関わる環境工学や生態学などとの連携が重要である。また、個々の技術を、地域社会の持つ様々な境界条件と、低炭素化のようなグローバルな制約条件の下で矛盾を生じないようなヴィジョンとして構成していくためにシステム工学を再構築する必要性がある。システム工学は、例えば化学プロセスシステムのように、各分野の中で閉じるのではなく、上記のような分野をまたがった試みを積極的に行っていくべきである。そのような先駆的取り組みはみられ始めている²⁾が、まだまだ端緒に着いた段階であり、研究の推進の歩幅を大きくしていくことが必要であろう。

⑤ アクションリサーチ

地域社会ヴィジョンを作るとともに、現存技術を活用してシステムを作り社会に実装する実践が欠かせない。システムを具体化してこそ、重要な要素技術が明確化される。既存技術で対処できなければ、そのために必要な新規技術開発のターゲットが明確となる。それと上記、総合的な技術アセスメント、技術の見える化と市民とのコミュニケーションの統合は、地域社会そのものをともに作っていく、まさに「アクション・リサーチ」ともいえる新たな活動となる。このようなアプローチは、社会創成を担うものであり、このような人財の育成を強力に進めていく必要がある。また、ヴィジョン構築と新技術開発そしてその社会実装が連動すれば、細分化・深化した学問を統合し、あるいは社会科学も含めた融合学術が新たに生まれる可能性もある。

参考文献

- 1) 菊池康紀, 尾下優子, 福島康裕, 帰結的ライフサイクル思考に基づく離島地域のエネルギーシステム設計, ペトロテック, Vol.39 (6), pp. 461-467 (2016)
- 2) 菊池康紀, 尾下優子, 地域資源利活用のための統合的情報基盤の要件定義, 人工知能, 30(2), 157-162 (2015)
- 3) Yasunori Kikuchi, Yuichiro Kanematsu, Masamichi Ugo, Yosuke Hamada, Tatsuya Okubo, Industrial Symbiosis Centered on a Regional Cogeneration Power Plant Utilizing Available Local Resources: A Case Study of Tanegashima, Journal of Industrial Ecology, 20(2) 276-288 (2016)
- 4) 東京大学「プラチナ社会」総括寄付講座、自然と共生するスマートエコアイランド 種子島シンポジウム、西之表市、2014年8月2日．西之表市、自然と共生するスマートエコアイランド 動き始めた大学等との連携による新たな可能性、西之表市、2016年3月6日．西之表市、自然と共生するスマートエコアイランド 持続的な社会へ向け、産学公で広がる連携、西之表市、2017年3月11日
- 5) Ouchida K.; Fukushima Y.; Ohara S.; Sugimoto A.; Hirao M.; Kikuchi Y. Integrated Design of Agricultural and Industrial Processes: A Case Study of Combined Sugar and Ethanol Production、AIChE Journal、Vol 63 (2) pp.560-581 (2017)

3. おわりに

阿尻 雅文

第4期科学技術基本計画では、イノベーションの重要性を前面に掲げ、研究開発の重点化を従来の科学技術分野に基づくものから課題解決を目指したものへと転換した。第5期科学技術基本計画でも、知の資産の持続的創出を目指し、多様で卓越した知を絶え間なく創出し、その成果を経済的、社会的・公共的価値として速やかに社会実装していく国となることを掲げており、先端的な研究成果と社会的な課題解決との間を繋ぐ何らかの新たな仕組みを作ることが重要視されている。日本学術会議においても、科学と社会との乖離が指摘されており、その解決のためのアプローチの開拓の重要性が述べられている。様々な取り組みが進められているが、いまだ模索段階というのが現状であろう。

本「記録」では、2章で述べたように、様々な角度、視点から、社会実装の方法について議論を進めてきた。今期においては、これらの技術の社会実装を意識し、それぞれの技術背景に横たわる背景、社会実装における課題、その Solution をまとめた。

「2.1 将来の化学品原料源の選択と開発すべき技術」、「2.2 現在の主要化学原料としての石油の未来」では、化成品生産と今後の多様な原料の可能性について展望を示した。

「2.3 メタンからメタノールへの直接転換」、「2.4 メタンから低級オレフィンへの直接転換」では、その中でもメタンを原料とした製造法について述べた。大きな化学構造の変化をとみなわない物質変換の重要性を述べた。「2.5 バイオマスの完全利用のための総

括的な製造システム構築の重要性」では、バイオマスの原料化とそれによる CO₂ 排出削減効果について述べた。「2.6 エネルギー投入を抑えた物質変換と CO₂ 削減を両立することができる人工光合成技術の確立に向けた研究環境の整備」、「2.7 光触媒水素製造（人工光合成）と植物工場（光合成）の融合」では、自然エネルギー由来水素により、人工光合成、CO₂ の固定化のアプローチが議論され、人工光合成が最終的な姿として議論が展開されている。一方、自然エネルギー由来の水素があれば、それを化石資源由来のエネルギーに代替することで、CO₂ を削減でき、エネルギー論的な観点からは、あくまで余剰の水素があったときに CO₂ 固定に使うべきという立場もある。本「記録」の中でも（たとえば「1. はじめに」の一部や2.1 1章と各章との間）、2つの異なる立場での記述がなされている部分もある。今後、さらに議論を進め、単なる技術論に終わることなく、エネルギー、環境、物質変換を総合的に考えた将来の社会 Vision づくりを進めていきたい。「2.8 資源循環に寄与する固体分離濃縮技術の熟成」、「2.9 資源循環のためのレアメタルリサイクルと分離技術」では、無機資源の利用について述べている。物質は、社会の中に飽和すれば、その利用、資源リサイクルが重要となる。2.1～2.9章では、これらの物質変換に必要なエネルギーを最小とするような技術について述べてきたが、特に重要な熱利用の側面について「2.10 熱エネルギー有効利用の飛躍的拡大」では、熱利用システムの重要性を述べている。

これらの様々な視点での議論の中で、いくつか共通の考え方の重要性が浮かび上がった。個別の新規要素技術を産業あるいは社会に組み込むのではなく、まず、新たな未来社会を作り上げていく、あるいは新たな産業構造を作りあげていく将来構想を掲げ、そこからのバックキャストにより、必要な要素技術を抽出していく、ヴィジョン・オリエンテッド・リサーチともいえるアプローチが必要との共通の考えが示されている。どのような社会を構築するのかという社会ヴィジョンによって評価関数を決め、システムの中での技術の位置づけを総合的に評価し、その成果をヴィジョン構築にフィードバックする、社会と科学・技術の相互作用が重要となる。

地域社会が技術の実装先である場合、技術が社会、産業にどのような影響を与えるかの情報を市民と共有し、ともにヴィジョンを作っていく（アクション・リサーチ）が重要である。ヴィジョンの構築と、ヴィジョン・オリエンテッドな要素技術開発が共に必要であり、そこでは、エネルギー・環境、文化といったより多角的な評価軸も必要となる。

2-11 では、その考え方の重要性を述べたが、議論も緒についたばかりであり、その内容については不十分である。来期は、これらの議論をさらに深め、新たな視点については、提言等の「意志の表出」に向けた議論の場を作っていきたい。

＜用語説明＞

2-1

化学品

化学的な組成、性質を特徴とする化合物。工業原料として用いられることが多い。水酸化ナトリウム、硫酸などの無機化合物を始め、有機化合物としてフェノール、テレフタル酸、アクリル酸、ブタジエン、医薬中間体・医薬品、農薬中間体・農薬やポリエチレン、ポリプロピレン、ポリスチレン、ポリエステル、ポリアミド、ポリウレタンなどの樹脂がその例である。

ナフサ

原油の常圧蒸留で得られる沸点範囲が概ね 30～180℃の炭化水素留分。2015 年の国産ナフサ 1,907 万キロリットル（経済産業省「資源・エネルギー統計」）、輸入ナフサは 2,780 万キロリットル（財務省「貿易統計」）。スチームクラッキングによりエチレン、プロピレンなどのオレフィンやベンゼン、トルエンなどの芳香族化合物に変換できる。

シェールガス

頁岩（シェール）層から採取されるメタンを主成分とする天然ガス（天然気）。従来のガス田ではない場所から生産されることから、非在来型天然ガス資源と呼ばれる。

メタンハイドレート

低温かつ高压の条件下でメタン分子が水分子に囲まれた、網状の結晶構造をもつ包接水和物の固体である。およその比重は 0.9 g/cm³ であり、堆積物に固着して海底に大量に埋蔵されている。メタンは、石油や石炭に比べ燃焼時の CO₂ 排出量がおよそ半分であるため、地球温暖化対策としても有効な新エネルギー源であるとされる。一方、メタンそのものは大きな温室効果を持ち、その地球温暖化係数は 25（CO₂=1）である。

非可食バイオマス

再生可能な生物由来の有機性資源のうち、食糧と競合しないもの。林地残材、稲わら、麦わら、もみ殻、マフア油、ジャトロファ油、微細藻類などがある。これらからセルロース、ヘミセルロース、リグニン、油脂などが得られる。

カーボンライフサイクル分析

社会全体でのGHGの排出削減への貢献を分析する手法。原料採取、製造、流通、使用、廃棄に至るライフサイクル全体を俯瞰した視点でのGHGの排出状況および削減への貢献を数値化する。化学産業（2005年）においてはライフサイクルでのCO₂排出33億トンに対して、断熱材や軽量材料による排出削減貢献量は36億トンである（国内および世界における化学製品のライフサイクル評価 第3版、日本化学工業協会、2014年3月）。

五大汎用樹脂

低密度ポリエチレン (LDPE)、高密度ポリエチレン (HDPE)、ポリプロピレン (PP)、ポリスチレン (PS)、ポリ塩化ビニル (PVC)の 5 つの熱可塑性樹脂をさす。一般生活に欠かせない重要な樹脂である。低価格であるが性能は比較的高い。生産量が合わせて約 1.9 億トン (世界、2014 年 : 2016 年版「世界化学工業白書」、化学経済) と多く合成樹脂全体の約 70%を占める。

2-2

drop-in replacements

完全互換品。既存の体系にそのまま組み入れることができる代替品。

シェール革命

主に米国で、頁岩 (シェール) 層に含有されている非在来型の天然ガスを水平坑井掘削や水圧破碎といった方法で採掘することが 21 世紀に入って盛んに行われるようになり、シェールガス革命と呼ばれた。このシェールガスの開発技術を応用して、流動性の悪い地層に存在する原油成分 (タイトオイル、シェールオイル) を生産することが 2010 年あたりから活発化し、ガスの生産のみに限られなくなったことから、シェール革命とも呼ばれるようになった。

RING

石油コンビナート高度統合運営技術研究組合 (Research Association of Refinery Integration for Group Operation) 平成 12 年に設立され、経済産業省の補助金を活用して、石油コンビナートの国際競争力強化を目指し、事業の再編、強靱化に取り組んでいる。

2-3

低級アルカン

一般式 C_nH_{2n+2} で表される鎖式飽和炭化水素である。メタンやエタンのような炭素数が小さいものを低級アルカンと称す

科学技術振興機構

国立研究開発法人科学技術振興機構 (Japan Science and Technology Agency、略称 : JST) は、科学技術振興を目的として設立された文部科学省所管の国立研究開発法人。文部科学省の競争的資金の配分機関の 1 つ

JST-CREST

国が定める戦略目標の達成に向けて、課題達成型基礎研究を推進し、科学技術イノベーションを生み出す革新的技術シーズを創出するためのチーム型研究

2-4

フィッシャートロピッシュ合成

Franz Fischer と **Hans Tropsch** によって開発された、一酸化炭素の接触水素化反応による炭化水素合成の総称である。

メタセシスプロセス

二種類のオレフィン間で結合の組換えが起こる触媒反応のことで、重合反応をも含む。

マイグレート

異種表面を含む触媒表面上を吸着分子等が移動することを指す。

アトムエコノミー

グリーンケミストリーの考え方からきていて、ある化学プロセスにおける、含まれるすべての原子の変換効率のことを指し、出発物質や触媒を適宜選択することで効率を上げることができる。

MFI 型ゼオライト

天然に産する鉱物グループである沸石のことを指す、ゼオライトの一種で、ZSM-5 や、そのアルミニウムを含まないシリカライトを含む。

MTG 反応

Methanol to Gasoline の略語で、触媒反応によってメタノールが炭化水素のガソリン留分に転化する反応を指す。

コークオープンガス

製鉄所のコークス炉から排出されるガス COG のことを指すが、広い意味で、製鉄所などで利用されていない合成ガス ($\text{CO} + \text{H}_2$) 一般を指すことがある。

2-5

ゼロエミッション

リサイクルを徹底することにより、最終的に廃棄物をゼロにしようとする考え方。異業種の連携により、ある産業では廃棄物となるものを、別の産業で原料として使い、廃棄物を社会全体で利用しつくそうとするもの。国連大学が提唱。

サプライチェーン

企業の経営・管理で使用する用語で、原材料・部品の調達から、製造、在庫管理、販売、配送までの製品の全体的な流れのこと。それぞれの工程が別個にあるのではなく、鎖と

してつながっているという意味で、特に物流の仕組みや上流・下流を含めた複数企業間の連携を強調している場合もある。

バリューチェーン

事業活動を機能ごとに分類し、どの部分（機能）で付加価値が生み出されているか、競合と比較してどの部分に強み・弱みがあるかを分析し、事業戦略の有効性や改善の方向を探ること。1つの製品が顧客のもとに届くまでには、さまざまな業務活動が関係する。

2-6

人工光合成

太陽エネルギーを利用して水と二酸化炭素から、燃料や化学製品を作る化学反応。この反応では、太陽エネルギーが蓄積可能な化学エネルギーに変換される。資源・エネルギー・環境問題解決のキーテクノロジーとなることが期待されている。

ホンダーフジシマ効果

若干の外部電圧を印可した TiO_2 半導体電極に紫外光を照射することにより、水が分解して対極（白金電極など）から水素、 TiO_2 半導体電極から酸素を生成する反応を指す。1960年代後半に発見され、光エネルギーを使って水を分解し水素を製造する反応の研究のきっかけとなった。

元素戦略

汎用性元素を用いることにより、希少元素を使わない、または極力使用量を減らして、いろいろな機能材料を作り出すという戦略を指す。たとえば、貴金属に代わる汎用性元素を用いた触媒開発がある。

新学術領域、AnApple

文部科学省研究費補助金の新学術領域「人工光合成による太陽光エネルギーの物質変換：実用化に向けての異分野融合」（平成 24-28 年度）の英語名 All Nippon Artificial Photosynthesis Project for Living Earth の略称。

JST さきがけ「光エネルギーと物質変換」

独立行政法人科学技術振興機構のさきがけ研究（戦略的創造研究推進事業の個人研究型）の1領域である。人類にとって理想的なエネルギー源である太陽光による広義の物質変換を介して、光エネルギーを化学エネルギーに変換・貯蔵・有効利用し得る高効率システムの構築を目指した研究が展開された。

ARPCChem

NEDO プロジェクト「グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発（革新

的触媒) 二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発」の英語名 Artificial Photo Synthetic Chemical Process の略称。光触媒を用いた水分解による水素製造、水素酸素ガスの分離、二酸化炭素の接触水素化のテーマからなる。ソーラー水素と二酸化炭素からオレフィン等の基幹化学品の製造を実用化することを目的としたプロジェクトである。

光触媒サイエンス

光触媒研究における基礎となる学際領域を総括して光触媒サイエンスと呼んでいる。材料科学に加えて、先端計測や理論計算などが含まれる。

2-7

植物工場

植物工場とは、施設内で植物の生産環境(光、温度、湿度、二酸化炭素濃度、養分、水分等)および生育のモニタリングを基礎とした高度な環境制御を行うことにより、野菜等の植物の周年計画による生産を可能にする栽培施設を言う。(1) 太陽光利用型、(2) 完全人工光型、および(3) 太陽光・人工光併用型の3つに大別できる。植物工場の実用化は、気候変動や季節に影響されることなく、また不幸にして放射性物質で汚染された土地や砂漠地帯・寒冷地帯でも生鮮野菜・食料の安全・安心した供給を可能にし、新産業創出にも直結することから、環境・食料・エネルギー・資源に係る課題解決に繋がると期待され、経済成長戦略の一翼として国家施策にも位置付けられている。

露地栽培

露地栽培とは、温室などを用いなくて、太陽光の恵みを受け自然の気候条件のもとで自然の土地や畑で植物を栽培することを言う。

2-8

シンクロトロン

粒子の加速にあわせて、磁場と加速電場の周波数をコントロールする事によって、加速粒子の軌道半径を一定に保ちながら加速をおこなう円形加速器をさす。電子シンクロトロンによって、高強度で強い指向性を持つ均一なシンクロトロン光を得ることができ、これを最先端の材料分析などに利用することができる。

2-9

レアメタル

レアメタルは、文字通りに埋蔵量が少ないというだけではなく、技術的に分離・回収が難しいか、産出国に偏りがあるために入手が困難な金属を指す。我が国では、産業に不可欠で安定供給が望まれる 31 鉱種が 1984 年に通商産業省(現経済産業省)によりレアメタルと定義されているが、需要の動向によってこれ以外もレアメタルに入れられている。レアアース(希土類)やプラチナ、パラジウムのような白金族金属の可採年数は、銅、亜鉛、

鉄などより遥かに長いにもかかわらず、希土類は世界の生産量の約 95%を中国が、白金属類も南アフリカとロシアで 9 割以上を占める寡占性の高い金属であるために、国の政策や紛争により価格変動にさらされる典型的なレアメタルである。

希土類（レアアース）

レアアースは、原子番号 21 のスカンジウムおよび 39 のイットリウムと 52 から 71 のランタノイドの 17 元素の総称である。一連の元素は最外殻が同じ電子配置を持ち、原子番号が増えるとともに一つずつ内側の軌道に電子が満たされていくという特異な電子配列を示す。これが磁氣的、光学的、化学的に優れた性質を生み出し、さまざまな高機能材料として応用されることになる。たとえば、蛍光管やテレビ、パソコンのディスプレイに用いられる蛍光体の赤色にはイットリウム(Y)とユーロピウム(Eu)が、緑色にはランタン(La)、セリウム(Ce)、テルビウム(Tb)が、青色にはユーロピウムが用いられ、発光効率や色調などで優れた性能を発揮する。またハイブリッド自動車や電気自動車の駆動用モーター、パソコンなど電子機器のハードディスクドライブに組み込まれる希土類磁石（Nd-Fe-B 焼結磁石）には、ネオジム(Nd)やジスプロシウム(Dy)が用いられる。

PCB(Poly Chlorinated Biphenyl)

P C Bは Poly Chlorinated Biphenyl(ポリ塩化ビフェニル)の略称で、ビフェニルの水素原子が塩素原子で置換された化合物の総称である。置換塩素の数やその位置の違いにより理論的に 209 種類の異性体が存在する。熱に対して安定で、電気絶縁性が高く、耐薬品性に優れている。加熱や冷却用熱媒体、変圧器やコンデンサといった電気機器の絶縁油、可塑剤、塗料など、幅広い分野に用いられた。一方、生体に対する毒性が高く、脂肪組織に蓄積しやすい。発癌性があり、また皮膚障害、内臓障害、ホルモン異常を引き起こすことが知られている。

ファンネルガラス

ブラウン管の背面にある漏斗状のガラスのことを指す。パネルガラスより、高い X 線吸収性能を有することが特徴である。しかし、鉛を多く(25%程度)含んでおり、このことが、ブラウン管の処理およびリサイクルを困難にしている。

カレット

カレット（Cullet）とは、ガラス製品（ソーダ石灰ガラス）をリサイクルする際に、いったん破碎した状態の「ガラス屑」のことである。広義では、破碎される前の廃ガラス製品（空きびん）なども指す。

<参考資料 1> 審議経過

<第 23 期>

平成 26 年 (2014)

- 12 月 26 日 触媒化学・化学工学分科会 (第 23 期第 1 回)
役員の選出、活動方針、今後の進め方について 等

平成 27 年 (2015)

- 5 月 20 日 触媒化学・化学工学分科会 (第 23 期第 2 回)
今後の進め方について、シンポジウム企画、大型研究計画 等
- 8 月 18 日 触媒化学・化学工学分科会 (第 23 期第 3 回)
シンポジウム企画、年次報告、今後の進め方について、大型研究計画 等
- 12 月 9 日 触媒化学・化学工学分科会 (第 23 期第 4 回)
今後の進め方について、大型研究計画、シンポジウム企画 等
- 12 月 25 日 触媒化学・化学工学分科会 (第 23 期第 5 回)
大型研究計画、今後の進め方について、シンポジウム企画 等

平成 28 年 (2016)

- 4 月 18 日 触媒化学・化学工学分科会 (第 23 期第 6 回)
シンポジウム企画、意志の表出に向けてのスケジュール 等
- 7 月 29 日 触媒化学・化学工学分科会 (第 23 期第 7 回)
シンポジウム企画、意志の表出に向けての議論、年次報告 等
- 9 月 2 日 触媒化学・化学工学分科会 (第 23 期第 8 回)
シンポジウム企画、意志の表出に向けての議論、今後の進め方 等
- 11 月 8 日 触媒化学・化学工学分科会 (第 23 期第 9 回)
シンポジウム企画、意志の表出に向けての議論、環境科学分科会との意見
交換、今後の進め方 等
- 12 月 21 日 触媒化学・化学工学分科会 (第 23 期第 10 回)
シンポジウム企画、意志の表出に向けての議論、今後の進め方 等

平成 29 年

- 1 月 17 日 触媒化学・化学工学分科会 (第 23 期第 11 回)
シンポジウム企画、意志の表出に向けての議論、環境科学分科会との意見
交換 等
- 2 月 2 日 触媒化学・化学工学分科会 (第 23 期第 12 回)
意志の表出に向けての議論、記録案の検討、今後の進め方について 等
- 4 月 4 日 触媒化学・化学工学分科会 (第 23 期第 13 回)
記録案の承認について等

＜参考資料２＞シンポジウム開催

・公開シンポジウム「人工光合成研究の最前線 ―資源・環境・エネルギー課題解決と新産業創成のための革新的科学技術開発―」

日時：平成 27 年 12 月 9 日（水）13:00～18:30

場所：日本学術会議講堂

主催：日本学術会議化学委員会・総合工学委員会・材料工学委員会合同触媒化学・化学工学分科会

(1)文部科学省研究費補助金

新学術領域「人工光合成による太陽エネルギーの物質変換：実用化に向けての異分野融合」(AnApple)、

(2)国立研究開発法人科学技術振興機構、

(3)人工光合成化学プロセス技術研究組合(ARPCChem)

「二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発（人工光合成プロジェクト）」

共催：東京理科大学 研究戦略・産学連携センター

参加者：講演者等 7 名、その他の参加者 180 名

・公開シンポジウム「市民と科学者で考えるこれからのエネルギー」

日時：平成 28 年 9 月 2 日（金）13:00～17:20

場所：日本学術会議講堂

主催：日本学術会議化学委員会・総合工学委員会・材料工学委員会合同触媒化学・化学工学分科会

公益社団法人化学工学会

共催：公益社団法人日本化学会、一般社団法人日本機械学会、公益社団法人応用物理学会、公益社団法人石油学会、一般社団法人触媒学会、一般社団法人日本エネルギー学会、一般社団法人エネルギー・資源学会、公益社団法人日本伝熱学会

参加者：講演者等 5 名、その他の参加者 149 名

・公開シンポジウム「越境大気汚染と酸性雨―現場から将来予測まで―」

日時：平成 28 年 11 月 8 日（火）13:00～17:40

場所：日本学術会議講堂

主催：日本学術会議環境学委員会環境科学分科会、化学委員会・総合工学委員会・材料工学委員会合同触媒化学・化学工学分科会

共催：国立研究開発法人国立環境研究所、大気環境学会植物分科会、大気環境学会関東支部植物影響部会、大気環境学会酸性雨分科会、酸性雨研究会

参加者：講演者等 10 名、その他の参加者 104 名

・公開シンポジウム「資源循環型社会を構築するための技術とその社会実装への取り組み」

日時：平成 29 年 1 月 17 日（火）13:00～17:30

場所：日本学術会議講堂

主催：日本学術会議環境学委員会環境科学分科会、化学委員会・総合工学委員会・材料工学委員会合同触媒化学・化学工学分科会、農学委員会農業生産環境工学分科会、材料工学委員会材料の循環使用検討分科会、総合工学委員会持続可能なグローバル資源利活用に係る検討分科会

公益社団法人化学工学会

後援：日本農業工学会、一般社団法人 資源・素材学会、一般社団法人 日本鉄鋼協会、一般社団法人 廃棄物資源循環学会、環境資源工学会、日本 LCA 学会、NPO エコデザイン推進機構

参加者：講演者等 11 名、その他の参加者 191 名

・公開シンポジウム「社会協働と地域社会における社会ヴィジョン創成への挑戦」

日時：平成 29 年 9 月 5 日（火）13:00～17:15

場所：鹿児島県西之表市民会館

主催：日本学術会議環境学委員会環境科学分科会、化学委員会・総合工学委員会・材料工学委員会合同触媒化学・化学工学分科会、

共催：公益社団法人化学工学会

後援：西之表市、中種子町、南種子町

参加者：講演者等 9 名、その他の参加者 256 名

・公開シンポジウム「次世代エネルギー社会の超低炭素化に向けた課題とチャレンジー温室効果ガス 80%削減のフィージビリティとリアリティについて考えるー」

日時：平成 28 年 9 月 14 日（木）13:30～17:45

場所：日本学術会議講堂

主催：日本学術会議化学委員会・総合工学委員会・材料工学委員会合同触媒化学・化学工学分科会

公益社団法人化学工学会

共催：公益社団法人日本化学会、一般社団法人触媒学会、一般社団法人エネルギー・資源学会、公益社団法人日本伝熱学会

協賛：公益社団法人石油学会

参加者：講演者等 4 名、その他の参加者 203 名