

(別記様式)

記 録

文書番号	SCJ第22期260901-22641200-039
委員会等名	日本学術会議化学委員会触媒化学・化学工学分科会
標題	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
作成日	平成26年(2014年)9月1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。

この記録は、日本学術会議化学委員会触媒化学・化学工学分科会での審議結果を、取りまとめ公表するものである。

触媒化学・化学工学分科会

委員長 藤田 照典（第三部会員） 三井化学シンガポール R&D センター（株）

副委員長 辰巳 敬（連携会員） 東京工業大学

幹事 植鳶 陸男（連携会員） 大阪府立大学

幹事 北川 尚美（連携会員） 東北大学

安保 正一（連携会員） 大阪府立大学

今成 眞（連携会員） 元三菱化学(株)

工藤 昭彦（連携会員） 東京理科大学

相馬 芳枝（連携会員） 元神戸大学

藤岡 恵子（連携会員） （株）ファンクショナル・フルイッド

本記録作成にあたり、東京工業大学・加藤之貴准教授にご協力いただきました。

目次

1. はじめに	3p
2. これからのエネルギー供給	
2. 1 熱エネルギーの高効率回収・有効利用技術の開発	4p
藤岡 恵子	
2. 2 環境調和型社会実現への太陽光の有効利用	6p
安保 正一	
2. 3 人工光合成技術の確立に向けた関連学会の協調と太陽光水分解水素研究センター設立	8p
今成 眞、工藤 昭彦	
3. 現在の主要化学原料としての石油の未来	10p
辰巳 敬	
4. これからの化学原料源の選択	
4. 1 化学産業が人類に貢献し続けるために必要な技術	12p
藤田 照典	
4. 2 石油に代わるエネルギー・化学原料開発のための先進的技術の開発	15p
植畷 陸男	
4. 3 バイオマスの徹底利用のためのシステム構築	18p
北川 尚美	
5. おわりに	20p

記録：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

1. はじめに

化学委員会、触媒化学・化学工学分科会では、「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」について議論を行っている。

化学製品の原料は現在その大部分が石油である。最近の調査（2010 年末）によればその可採年数は OPEC で 100 年、また非 OPEC では 26 年であり、全世界平均で少なくとも 56 年と見積もられている。一方、石油に代わり化学製品の原料となりうる石炭、天然ガスの埋蔵量もそれぞれ 122 年、60 年（シェールガスを除く）とされ、原料資源枯渇の緊急の危機感は和らいだ感がある。しかしながら、これらの原料は有限な資源である以上、可能な限り効率的に使うことが人類の使命である。

化学製品の原料に比べてはるかに規模の大きいのがエネルギーの原料である。従って、化学製品の原料選択はエネルギー原料の選択に密接に関係する。

課題には、比較的短時間で解決を目指す短中期的な課題と、次世代での解決を目指す長期的な課題があるが、エネルギー供給源の選択では、短中期的課題として、現在未利用である熱エネルギーの有効利用技術、また長期的課題としては太陽光の有効利用技術と人工光合成に関する技術開発が求められる。

一方、化学製品の原料は、現在、石油（ナフサ）が中心であり、今後、天然ガス（シェールガス、メタンハイドレートも含む）、石炭、バイオマスに緩やかにシフトしていくと考えられる。この考えをベースに化学品原料の中心が石油から上記のものに変わっても、人類生活のベースとなる汎用化学品（コモディティ）をリーズナブルな価格で必要量供給することを可能とする技術開発も重要である。

本記録では、「これからのエネルギー供給」「現在の主要化学原料としての石油の未来」「これからの化学原料」の順に課題を抽出しまとめた。

2. これからのエネルギー供給源の選択

2. 1 熱エネルギーの高効率回収・有効利用技術の開発

藤岡 恵子

日本はGDPあたりエネルギー消費量が世界最小レベルである省エネルギー先進国だが、それでも一次エネルギーの約7割が有効利用されず、年間1兆kWhもの未利用熱エネルギーのほとんどが排熱として廃棄されている。熱エネルギーの有効利用は一次エネルギー消費量削減に大きな寄与が期待されるが、未利用熱の温度や形態は多様で広く分布しており、供給と需要の質的、時間的、空間的な不一致が利用推進を妨げている。

したがって、熱エネルギーの有効利用には、発生する熱と利用側の時間、場所の相違を繋げる技術の確立が不可欠であり、熱エネルギーを回収、貯蔵、輸送する技術の高効率化が重要である。このような技術としては、水や砕石、躯体などの顕熱蓄熱、氷や様々な無機・有機材料を用いる潜熱蓄熱、化学反応や吸着現象を利用した化学蓄熱がある。顕熱ならびに潜熱蓄熱は装置が単純で成熟度の高い技術として実用化されているが、長期間の貯蔵や輸送には適さないため、主として単一の構造物や狭い範囲での短期間の蓄熱に利用される。化学蓄熱は、比較的蓄熱密度が高く、また長期間にわたって損失なく熱エネルギーを貯蔵でき、適用可能な温度域が大きいなどの利点があるが、装置の複雑さ、耐久性、経済性などの点で実用化に至っていない。このように、それぞれの蓄熱技術に長短があるが、熱エネルギー利用を大きく進めるには、中長期的な課題として他の技術と比較して高度な性能向上が期待できる化学蓄熱に着目した技術開発が重要である。

化学蓄熱では、代表的な材料として高温度域では酸化カルシウム、酸化マグネシウム、低温度域では塩化カルシウムなどの無機塩と水、アルコールの反応がある。自動車用空調や燃料電池の排熱を利用した増熱（給湯・暖房）と冷熱生成（空調）を目的とした開発事例があるが、実用化には、装置の小型化、反応材の耐久性、利便性、価格の点で大幅な改良が求められている。特に、競合技術と匹敵する出力速度増大が第一段階の課題で、そのためには利用目的に応じた反応材の開発、装置・材料双方の熱伝導性向上による小型化が必要である。熱エネルギーの需要と供給の不一致を解消できる化学蓄熱の利点を活かすためには、広範囲な需給状況の把握と熱輸送を促進するインフラ整備も長期的な課題となる。これらの課題は化学蓄熱以外の蓄熱技術においても同様である。

このように、熱利用技術の開発には、機器構成要素としては蓄熱材料、装置、熱媒体など、解析の対象としては合成、触媒、伝熱、物質移動など、実際の運用面では生産プロセスのエネルギー的最適化など、多くの分野での相互協力が必要である。また、要の一つである蓄熱材料開発、触媒技術では、化学分野での基礎的知見と工学的なプロセスから要求される条件の調整が重要になる。実用化には応用実証、

熱エネルギー需給データベース、蓄熱市場の確立も必須で、工学にとどまらない広がり求められる。これまでの開発過程ではこれら多岐にわたる学術、技術分野を横断しての研究体制が模索されてきたが、個別の取り組みによる進展の幅は限定的であった。

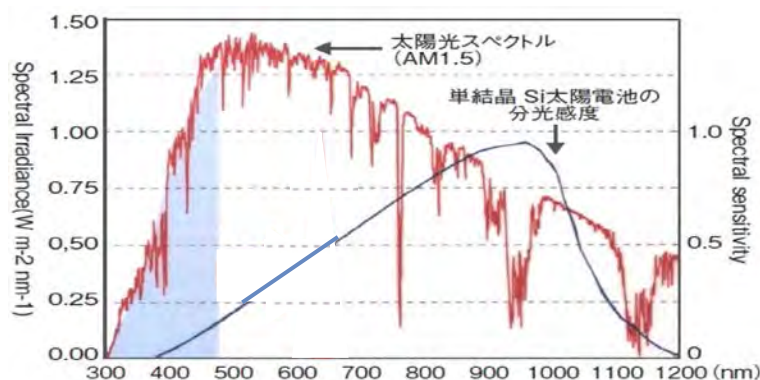
今後の熱エネルギー有効利用の実用化と広範な普及のためには、例えば材料開発におけるナノオーダーの化学分子設計からメートルオーダーの装置設計までの連携した展開とフィードバックのように、個別に獲得されてきた多くの分野、異なった水準の知見を総合しなければならない。この課題解決には、学術分野間相互の連携と産業を結んだネットワークと研究開発拠点の創設が必要であり、その核となる組織を産官学の枠を超えて形成することが望まれる。

以上

2. 2 環境調和型社会実現への太陽光の有効利用

安保 正一

太陽光は全ての生命活動の起源であり、クリーンで無尽蔵のエネルギー源である。太陽光を持続可能な環境調和型エネルギー源として利用するため、太陽光の波長域を大別し、(1) エネルギーの大きな短波長光(図の 500 nm より短波長)、(2) ソーラパネルで有効に利用されている可視・近赤外光(図の 500nm-1100nm の間)と(3) エネルギーとしては小さい赤外光領域に分け、それぞれを棲み分け、適した形での有効利用を可能とする新規薄膜材料の開発を組織的に行い、それらを利用したシステムを統合化することで、太陽光を最大限有効に利用する環境調和型社会の実現を目指す必要がある。



(1) のエネルギーの大きい短波長の光を利用し、薄膜光触媒によって水を完全分解し水素と酸素の製造を行うことは極めて重要な課題である。ただ、光触媒により純水から水素と酸素を産業レベルで製造するには、光触媒の効率を上げる等、まだまだ実用化までには研究が必要で時間が掛かりそうである。一方、アルコール等の有機物(バイオ廃材)を溶解した水からの水素製造反応では、OH ラジカルの水素引き抜きで生じる有機ラジカル種から光触媒への電子注入が起こるため、水からの水素製造効率は極めて高くなる。しかし、有機物は犠牲剤として作用し、酸化され二酸化炭素を生成する。一方、ソーラパネルの発電効率はかなり向上している。この発電により LED を光源とし、高濃度の二酸化炭素環境下で植物の光合成を促進することで短期間に野菜等の植物を育成する人工光型植物工場が開発され、経済成長戦略の一翼を担うと期待されている。

これらを背景に、(1) の波長の短い太陽光と薄膜光触媒を利用し、バイオマスを溶解した水からの高効率な水素製造と(2) のソーラパネルの発電による LED を利用した植物工場を統合することで、高効率で水素製造を行い、生成する二酸化炭素は植物工場での光合成を促進し、野菜を高効率に生産するとともに酸素を生成する太陽光利用システムが構築できる。この様に、新規な薄膜材料を開発することで光触媒(人工光合成)と光合成をハイブリッド化した太陽光利用システムの実用化が可能となる。

太陽光の全波長域を利用に適した形で利用し、それらを統合化・ハイブリッド化することで太陽光の有効利用を可能とする。今なら、この分野で世界のトップランナーとして幅広い大きな展開が可能になるであろう。

以上

2. 3 人工光合成技術の確立に向けた関連学会の協調と太陽光水分解水素研究センター設立

今成 眞、工藤 昭彦

今後も持続的に地球環境と人類生活を維持して行くために、資源・環境・エネルギー分野での科学技術の課題解決が特に重要である。太陽電池や二次電池など触媒化学・化学工学に直接には関係しない重要な課題もあるが、触媒化学・化学工学分野での短中期的課題としては、特に枯渇の心配が顕在化しつつあり、価格も高騰しつつある石油に替わるものとして、天然ガス(シェールガスやメタンハイドレートを含む)や石炭、バイオマスなどの経済性が良く環境にも良い方法での利用が、化学製品の原料のみならずエネルギー原料の面でも重要である。この面での課題については3、4章で論じられる。長期的課題としては、太陽光の有効利用技術と人工光合成に関する研究開発が重要となる。その中で、特に「水の光分解による水素製造の研究開発」が重要課題である。この課題が解決されれば、環境に良い方法により安価な水素が獲得できる。水素は、石炭、重質油、場合によっては天然ガスやバイオマスより、化学製品やエネルギー原料を製造する際のキー原料になる。また、燃料電池で直接エネルギー原料とすることも可能である。人工光合成を的にする場合、CO₂の水素化を経由することも考えられる。

1968年本多・藤嶋による水分解(水素・酸素生成)酸化チタン光電極が発表されて以来、光触媒の高性能化を目指し国内外で多くの研究が進められてきた。2000年に入り、可視光応答型の光触媒が開発されて以後ソーラー水分解(人工光合成)をコンセプトに国内外の産業界も含め社会的に実用化の要請が強まっている。現在は世界的に研究が再燃し、米国(ハブ拠点に多分野の研究者集結)、欧州(クレスト的)はじめ韓国、中国でもソーラー燃料をコンセプトに国家レベルでの重点化が図られてきている。ただ、現在の世界的な研究動向を見ると人工光合成系のパーツの研究に留まっている部分が多々ある。日本では、国家レベルでの取り組みは遅れていたが、文部科学省による新学術領域「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年-28年度)や経産省の「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)」がスタートした。後者のプロジェクトでは、開発項目として二酸化炭素と水と太陽光からケミカルズ製造(ソーラー水分解光触媒、水素-酸素分離膜、CO₂の水素化によるオレフィン製造)で産学官連携の取り組みが始まったところである。

「水の光分解による水素製造の研究開発」における現時点での課題点は次の通りである。

(1) 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。

(2) 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。

(3)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。広い学際領域にわたる協調体制が必要である。

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。これには、異分野の学協会の協調体制を作り、さらには「太陽光水分解水素研究センター」という拠点を立ち上げることが重要である。これにより、世界をリードする展開が大いに期待される。同センターに異分野の研究者を集め、本格的な研究開発を実施するべきである。

以上

3. 現在の主要化学原料としての石油の未来

辰巳 敬

今後の化学原料の選択は今後のエネルギー選択と密接に関連する。大気中の二酸化炭素濃度の増加と化石資源の枯渇に対する懸念から、再生可能エネルギーの開発が1990年代以来進んできた。しかし、再生可能エネルギーには既存エネルギーに比べての割高さや、不安定な出力という問題点が残る一方、シェールガス、シェールオイルが採掘技術の革新によって新たな化石燃料として登場し、化石資源枯渇のリスクがやや緩和した状況が見られる。

石油は、化学原料として天然ガスや石炭に比べて格段に優れているがゆえに、この半世紀の間、主要化学原料として豊かな暮らしを支えて来た。石油は8割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割程度ではあるものの、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。ガソリンの需要は開発途上国では大きな伸びが予想されるものの、日本においては、ハイブリッド車の普及、人口の減少、燃料電池車、電気自動車の開発も進められていることから、ガソリンの使用量の減少が見込まれ、また、石油火力発電所は三十数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を将来も継続していくべきかさえ議論となる可能性がある。

この点はさておき、石油の利用はその特性を活かす方法、いわゆるノーブルユースに特化すべきであり、ガソリン、灯油（ジェット燃料）、軽油（ディーゼル油）等の輸送機関用燃料と化学原料が石油の賢明な利用法である。しかし、原油により異なるものの、石油はこれらのノーブルユースに適した性状とはなっておらず石油精製によるマッチングがより重要になりつつある。さらに石油化学プロセスのグリーンイノベーションは必要であり、石油化学反応プロセスの新触媒反応ルート開拓によるプロセス転換は重要である、従来の反応プロセスを、新しい触媒反応ルートの開発によって、より省資源、低コスト、持続性型プロセスへ転換することなしには競争力は維持できない。中でも、石油化学の根幹であるナフサ熱分解プロセスをプロピレン増産が可能な接触分解プロセスとするパラダイム変換ができれば画期的であり、そのための触媒開発は重要な課題である。これについては、シェールガスや中東の天然ガスを原料にしたプロセスとの競争となる部分も多く、この点における不利は否めないが、これらを輸入して我が国立地とするのは困難である。いずれにせよ、メタン、エタン、プロパン等の低級アルカン類を効率的に化学物質に変換する技術は重要になる。あるいはメタノールさらに将来的には合成ガスを利用したプロセスによるオレフィン製造技術も重要である。これらの分野の日本の触媒技術は先進的な位置づけにあり、世界の開発をリードするポテンシャルは高い。しかしながら、いずれの化石資源を原料にす

るとしても、日本においてグラスルーツのプラントを建設する可能性は低く、我が国で開発した技術を海外で展開するという展望を視野に入れるべきである。

将来的には化石資源ではなく再生可能資源から化学原料を作ることが必須となる。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が、バイオマスから低級オレフィンを効率よく大規模に製造できれば、既存の石油化学大系に組み込むことができるので、石油代替品として重要な地位を占めることになり、近未来的にはその種のアプローチが主流となろう。一方、化石資源は生物体を構成する物質が還元されて生成した、炭化水素を主成分とするものであるのに対して、バイオマスは還元過程を経たおらず、石油化学製品とは異なる製品の製造に適した原料とも考えられ、そのような製品と製造プロセスの開発に努める意義はある。

以上

4. これからの化学原料源の選択

4. 1 化学産業が人類に貢献し続けるために必要な技術

藤田 照典

化学品原料源の中心は、現行の石油（ナフサ）から将来的には他のものにかわっていくと予想される。原料源がかわっても、人類生活のベースとなる汎用化学品（コモディティケミカルズ）をリーズナブルな価格で供給し続けることは、化学産業の使命の一つである。

本項では4. 1. 1の「仮定」のもと、化学産業が上記の使命を果たすための短中期的な技術課題について考察し、まとめた。

4. 1. 1 化学品原料源の将来変化の仮定と原料源のシフト

「仮定」

化学品の原料源は、現行の石油（ナフサ）中心から天然ガス（シェールガス、メタンハイドレートを含む。以下同様）、石炭、バイオマス（セルロース等）に緩やかにシフトし、最終的には太陽光を利用する人工光合成が原料源となる。しかし、環境負荷の大きい石炭の利用には一定の制限がかかり、また存在密度の高くないバイオマスは原料源として補完的なものとなる。一方、温暖化対策から短中期的にも炭酸ガスの資源化（炭酸ガスの絶対量削減）が求められる。

上記「仮定」を受けた化学品製造の原料源は、現在の石油（ナフサ）中心からメタン、エタンなどの天然ガス、CO/水素〔天然ガス・石炭由来〕、グルコース〔好ましくは非可食バイオマス由来〕、炭酸ガス〔火力発電・製造プロセス排出等〕などに、環境負荷低減の視点を入れながら緩やかにシフトすると考えられる。

4. 1. 2 各原料源から製造可能な化学品

化学産業が冒頭の使命を果たすための短中期的技術課題を明らかにするため、キーとなる原料源から製造可能な化学品を下記にまとめた。

1) ナフサ <現在の中心原料源>

・エチレン、プロピレン、1-ブテン、ブタジエン、ベンゼン類などに変換できる（工業化技術）。これらの炭化水素類から種々の汎用化学品が製造されている（工業化技術）。

2) メタン

・CO/水素に変換できる（工業化技術）。CO/水素からメタノールや炭化水素類が製造できる（工業化技術）。また、メタノールから種々の化学品（エチレン、プロピレン、ガソリン、酢酸など）が製造できる（工業化技術）。

・エチレン、プロピレン、ベンゼン、メタノールなどに直接変換する技術が検討され

ているが、いずれも難易度が高く長期的テーマである（工業化未達）。

＜日本近海にメタンハイドレートが大量に存在することから、メタンを原料とする化学品製造技術の開発は重要である。メタンは安定な化合物であるため、この変換反応は一般に多エネルギー消費であり炭酸ガスの排出が多い。従って、温暖化対策からメタンの変換反応は炭酸ガス資源化技術との組み合わせが望ましい。＞

3) エタン

- ・エチレンに変換できる（工業化技術）。エチレンはプロピレン、1-ブテンに変換できる（工業化未達）。
- ・ベンゼン類に変換できる（工業化未達）。

4) グルコース

- ・エタノールに変換できる（工業化技術）。エタノールからエチレンが製造できる（工業化技術）。エチレンはプロピレン、1-ブテンに変換できる（工業化未達）。
- ・イソプロパノールに変換できる（工業化未達）。イソプロパノールからプロピレンが製造できる（工業化技術）。
- ・セルロースはグルコースに変換できる（工業化未達）。

5) 炭酸ガス

- ・水素との反応でメタノールに変換できる（工業化未達）。メタノールから種々の化学品（エチレン、プロピレン、ガソリン、酢酸など）が製造できる（工業化技術）。炭酸ガスの資源化には水素の調達がカギとなる。水素は将来的には水の光触媒分解（or 光電気分解）により工業的に入手可能になるとと思われる（2. 2および2. 3参照）。炭酸ガスの資源化は、火力発電やメタン原料の化学品製造など炭酸ガスを大量に放出するプロセスとの組み合わせが効果的である。

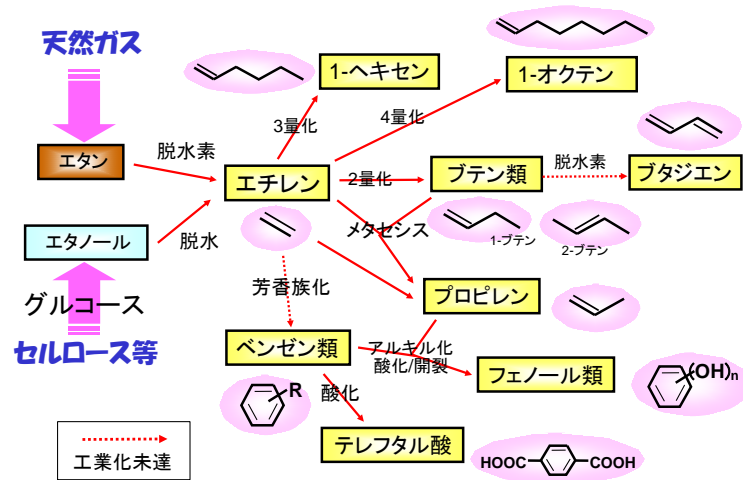
4. 1. 3 原料源のシフトによる化学品の入手難易度の変化と技術課題

4. 1. 2より、化学品の原料源が石油（ナフサ）からメタン、エタン、グルコース、炭酸ガスなどにかわることにより、

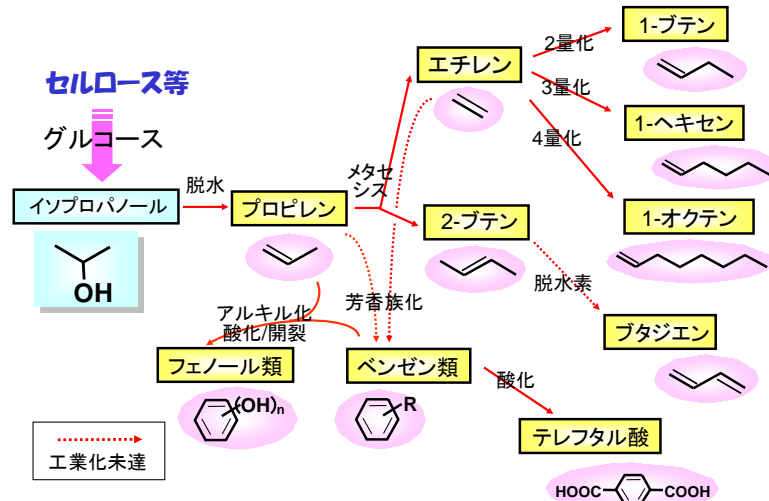
- ・エチレンは引き続き容易に製造できる。
- ・プロピレンの入手がやや困難になる。
- ・ブタジエン、ベンゼン類の入手が相対的に困難になる。

一方、下記に示す通り、エチレン（上図）とプロピレン（下図）から、ブタジエン、ベンゼン類を含めほぼ全ての汎用化学品が製造可能である。従って、原料源のシフトに対応するためには石油（ナフサ）以外の原料源からエチレン、プロピレンを効率よく製造する技術の開発が必須となる。

エチレンからの化学品製造



プロピレンからの化学品製造



以上の考察から、化学品の原料源が石油（ナフサ）から他のものにかわっても、「人類生活のベースとなる汎用化学品（コモディティケミカルズ）をリーズナブルな価格で供給し続ける」という化学産業の使命を果たすには、短中期的に以下の技術開発が必要である。

- ・ プロピレンの効率製造（エチレン原料、グルコース原料）。
- ・ エチレン、プロピレンからの化学品の効率製造 [ブタジエン、ベンゼン類の効率製造が特に重要である]。

一方、長期的には、メタンの化学品への直接変換技術の開発が求められる（4. 2 参照）。

以上

4. 2 石油に代わるエネルギー・化学原料開発のための先進的技術の開発

—メタンからメタノール直接変換技術の開発—

植 嶋 陸 男

国産資源として近年特に有望視されているメタンからの化学品原料への変換技術、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、いまだ実施可能な水準にはほど遠く、高難度選択酸化の域を脱していない。メタンの化学品原料への変換技術は、日本のこれからのエネルギー政策および化学品原料調達政策に関連する重要な技術である。

日本における、メタンを含むアルカン類の有効かつ効率的な利用技術に関する研究開発は以前から実施されており、たとえばニューサンシャイン計画中の「地球環境産業技術開発」の一課題として、高効率でメタノール、ホルムアルデヒド等有用物質に変換する選択酸化触媒の開発課題がとりあげられた、1992年から2001年までの10年間、多額の資金が投入され実施されたが、その結果の評価は、工業レベルでの直接酸化プロセスの可能性は現状では見えない状況にある、というものであった。これ以降も日本を含む世界規模でのメタノール直接合成の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、世界で約6,000万トンの規模で生産されている(2013年推定、IHS社報告書)。日本は製造基地がなく全量輸入で、年間輸入量は170万トンである(2013年実績、財務省貿易統計資料)。

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出は、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。以下、メタンからメタノール直接変換技術の動向と今後の対応について述べる。

4. 2. 1 メタンからメタノール直接変換技術(参考1)

1) 気相無触媒反応

1980年代アメリカ、オーストラリアを中心に、気相法によるメタンの部分酸化によるメタノール合成検討を政府機関、大手石油会社も参画して行われた。しかし1990年代初頭の合成ガスのメタノール合成技術レベルの進展を踏まえ、1990年代後半には経済性から開発を断念し実質的に研究終結となった。この方法では、メタンと酸素の系で実質的なメタン転化率を得ることが出来ず、酸化剤として酸化活性の高いN₂Oを使う、あるいはハロゲンなどが必要で経済性に見合う条件での選択性確保が困難であった。

国内では、2010年、東京工業大学の野崎等によって気相無触媒方式で常温常圧下

「マイクロプラズマリアクター方式」にて、メタノールとホルムアルデヒド総合収率が約 30%に達したことが報告された。以後、実用的な実施状況の報告はない。

2) 液相反応

Hg および Pt 錯体を触媒とする硫酸液相中で部分酸化する米国の Catalytica 社の方法が紹介されている。この技術は 1997 年から政府プロジェクトとして実施されたが、メタノール収率は目標値を達成したものの、3 段反応と環境負荷の大きいことが実用化を困難にした。また同時期に Cu-,Fe-Phthalocyanine 錯体触媒での液気相反応も紹介されてはいるが、メタン転化率が低く実用レベルには至っていない（参考 2）。

3) 気相触媒反応

この反応の触媒探索研究は日本でもっとも活発に行われ、東京工業大学の塚グループにより、Fe-P 系、Eu 系が提案され、その類似物質が各国の研究者によって検討された。東京大学の藤元と静岡大の上野は、各々フィラメントという特殊な触媒形態および大過剰の水蒸気雰囲気下、生成メタノールの逐次酸化を制御し、80~90%の高い選択性を報告しているが、いずれも工業的な実施には相当な困難が予想された。硝酸溶融塩やヘテロポリ酸も検討されたが、評価できる結果は得られなかった。2013 年になってロシア Boreskov Institute of Catalysis から酸化剤として N₂O を用いるものの、触媒として FeZSM-5 ゼオライトを用い 160°C の温和な条件下（圧は広範囲）メタン転化率 60~70%、メタノール選択率 80~90%の結果が報告され（参考 3）、現在の最も性能の高い触媒反応評価結果である。この工業的に N₂O を使用する方法が、省エネ、省資源、環境低負荷の視点と経済性から大規模生産方式として適合するか否かの評価は今後の課題である。

また、同時期に報告された、メタノール気相合成用の触媒（固体触媒）の最近の報告例を集計しまとめた報告（参考 4）によれば、合成ガス経由に代わるメタンからメタノールへの直接合成用の気相触媒の開発は、世界中で検討されているものの、大きく道を開く可能性を持った新規触媒系の開発には至っていない。

4) その他の方法

バイオ関連で、メタン水酸化酵素を用いる実用化に向けた基礎的研究は、国内でも行われているが、実用化の評価は今後の進展次第である。また、超臨界水中でのメタンのメタノールへの直接酸化についての報告もあるが、これに関しても基礎的研究で実用化評価の段階ではない。

4. 2. 2 目指すべき開発方向

メタノールは、石油に代わる燃料の基礎化合物になりえるほか、石油ナフサから誘導される工業基礎化学品、例えばオレフィン類（エチレン、プロピレン等）や芳香族

類（ベンゼン、トルエン、キシレン等）製造のナフサ代替原料になりうるものである。そしてメタンからメタノール直接変換技術は、日本の石油依存度を大きく低下させる国策戦略技術となりうるものである。前記 3) 項で述べた気相触媒反応による直接変換技術は、他の技術に比較して大量生産に最も適した方法と考えられ、また日本はこの分野における触媒開発の知見の蓄積および人材も多く、他の国に比べ格段に優れた位置付けにあり、国としてこの技術開発を推進、強化することが重要である。

4. 2. 3 今後の検討課題

メタンからメタノール直接変換技術開発の鍵は、気相触媒酸化プロセス用のメタン活性とメタノール選択性の高い新規触媒系の開発にある。触媒の形態としては、①無機系固体触媒と②有機無機複合系固体触媒の2種が考えられるが、①②いずれも高性能を示す触媒の設計のためには、独創的なアイデアが求められ、その支援として、コンピューターケミストリーによる触媒設計は大いに活用すべきである。また並行して、省エネルギー製造プロセス開発を視野に、化学工学視点からの実用化触媒設計も有用な課題である。

また推進体制を検討するにあたっては、独創的発想に長けた研究者の確保と人材の育成を兼ねた体制を図ることが重要で、そのための具体策を検討する必要がある。今後、提言作成までに詳細を検討する。

以上

(参考 1) : 「環境調和型触媒技術研究開発（周辺動向調査）」

株式会社ダイヤリサーチマーテック 平成 14 年 10 月 2 日

(参考 2) Direct conversion of methane to methanol

Robert Raja, Paul Ratnasamy,

Applied Catalysis A: General 158(1997)L7-L15

(参考 3) Oxidation of methane to methanol on the surface of FeZSM-5

Zeolite,

E. V. Starokon, M. V. Parfevov, S. S. Arzumanov, L. V. Pirutko, A. G. Stepanov, G. I. Panov,

Journal of Catalysis 300(2013)47-54)

(参考 4) Single step oxidation of methane to methanol towards better understanding,

P. Khirsariya, R. K. Mewada,

Procedia Engineering 51(2013)409-415

4. 3 バイオマスの徹底利用のためのシステム構築

北川 尚美

持続的に発展可能な循環型社会の構築には、バイオマスの利活用が必要不可欠である。2003年から「バイオマス・ニッポン総合戦略」に基づきバイオマス利活用に関する様々な政策が各省庁で個別に進められてきた。しかし、2011年に初めて行われた政策評価で、全事業の84%が効果的に実施されておらず、関連施設の約7割が赤字、など厳しい状況が指摘された。主な原因は、個別の技術開発に焦点が当てられ、原料生産から収集・運搬、製造、利用までの全体システムを構築するという俯瞰的視点が十分に導入されなかったことにある。例えば、全体の物質とエネルギーの流れを把握せず、採算性向上のために製造プラントを大型化し、実際には稼働させる原料が調達できない、エネルギー供給や廃棄物処理、製品精製などのコストを考慮せずに経済性を評価し、実際には大きな赤字、などの問題が散見する。また、社会ニーズに即した対応を考慮せず、バイオマス由来製品の品質が不安定で実際には使う人がいない、などの問題もある。

バイオマスやエネルギーの利活用や循環型社会構築に関する学問は、いずれも多岐の分野で個別に進展している。日本学術会議でも、社会学、農学、食料科学、環境学、化学、総合工学、機械工学、土木工学・建築学、材料工学の分野別委員会で各々類似研究が進められているが、必ずしも十分な連携が取られていない。特に、環境・経済・社会面からの統合的な評価や市民生活との関連にまで踏み込んだ議論は僅少である。これは各省庁においても同様であり、その結果、実施された様々な事業で有効な成果を得るに至らなかったと推測される。

化石資源は局所的に濃く存在する限られた資源であり、百数十年かけてこれを効率的に利用する世界共通の技術や学問が発展し、現在の社会が構築された。これに対し、バイオマスは広く薄く存在する再生可能資源であり、地域社会に応じた利活用システムの構築が重要となる。しかし、関連する学問はスタートしたばかりで、システム全体を俯瞰的に評価できる段階にまで至っていない。このようなレベルまで短期間で発展させるには、広範な学術分野で個別に蓄積されつつある知見や情報の集約と強固なネットワーク形成、学術の融合が必要不可欠である。例えば、技術に着目すると、現代生活に不可欠なプラスチックなどの化学品は、全て石油から酸化反応で合成されるが、バイオマスからは還元反応で合成されるため、従来とは異なる新たな基盤化学が必要となる。また、システムに着目すると、地域の産業構造や物質・エネルギーの流れを有効利用して原料生産から収集・運搬、製造、利用までの一貫システムを構築するには、適切な単位操作の選択と全体の物質やエネルギー収支を把握・評価する新たな融合学術領域「総合プロセス工学」などが必要となる。

前述の問題点を解決し、食・素材・エネルギーとしてのバイオマスの徹底利用を実現、真の好循環型社会を構築するには、様々な分野に分散するバイオマスに関連する

技術や知見、情報、社会ニーズを集約して統合的・俯瞰的視点で捉え、広範な分野の学術知識を構造化させることで「知の統合」を図ること、各バイオマスの発生量や現状での利用状況、成分組成などを十分に把握した上でその特長を活かした徹底利用システムを構築すること、が必要不可欠である。

以上

5 おわりに

本記録では、化学委員会、触媒化学・化学工学分科会が2011年12月から議論を行っている、「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」について要旨をまとめた。今後、さらに議論を深め、提言としてまとめる予定である。

完