

第 15 回公益社団法人化学工学会 SCE・Net 総会記念講演会の記録

「今後の化学産業の方向性（私見）と SCE・Net への期待」

京都大学教授 化学工学専攻

前 一廣 先生

講演内容

以下の流れで今後の化学産業の方向性についての私見を述べ、最後に SCE・Net へ期待するものをお話しして総会の記念講演とする。

1. 資源、エネルギー、環境制約下での科学技術を見つめ直す→パラダイムシフトの必要性
2. 社会構造変革、化学産業改革の方向性
3. 農工融合型産業育成の重要性（バイオマス原料へのシフト）
4. 柔軟性に富んだ高効率マイクロ化学技術の可能性
5. 必要な技術は？必要な研究領域は？
6. SCE・Net への期待

人類は道具を使うことにより産業を発展させ、ソフトウェアの創製により文化を育んできた。また、人類は集団を形成して外界（外敵）と戦い、技術革新によりそれを乗り越えて発展してきた。人類の生存にかかわる各種の制約条件が明らかになってきた現在、社会を先導していくような技術および政策は社会の要請にマッチしていなければ意味がない。

現在人類が抱えている問題のうち、人口問題、食糧問題、エネルギー・資源問題が特に大きく、エネルギー・資源問題は全ての問題に絡んでいる点で重要である。我国はさらに、資源海外依存率 97%、食糧海外依存率約 65%、農作物の高い石油依存性、2030 年には 30% 減という労働者人口の減少、などの問題を抱えている。

再生可能エネルギーについて考えてみる。2010 年の 1 世帯当たりのエネルギー消費量は 40,000MJ/年、この 50.1%が電力で電力消費量は 5,500kWh/年である。太陽光+蓄電方式では 1 戸につき 3kW のパネルを 100m² 敷くと年間発電量は 2,738kWh となり約 50%の電力をカバーできる。ただし 550 万円の初期投資が必要で、寿命 20 年とすると 50 円/kWh で現在のコストの倍の電力となる。エネルギー密度で見ると 98.6MJ/敷地 m²・年となる。

一方林野庁のデータから試算するとバイオマスのエネルギー密度は 66MJ/森林 m²・年である。熱電利用必須で利用率 80%としてもエネルギー密度は太陽光発電の約半分となり、居住空間の 2 倍の森林面積が必要ということになるが、大きな違いは CO₂ の吸収効果があるということである。しかし、太陽光+蓄電方式は本当に大丈夫だろうか。一般家屋の屋根への設置は OK であるが、農地利用のメガソーラーはどうだろうか。多湿地の増大による生態系の変化、ウィルス繁殖、パネル上の温度上昇によるローカル気象変化、など新たなリスクを良く考える必要がある。また、エネルギーは最も売価の易いビジネスであり、

しかも世界の将来の食糧不足は明らかである。我国にとって食糧自給率の向上は必須であり、したがってメガソーラーはあくまで2次産業用として工場内に設置すべきである。

次に地球温暖化について考えてみる。北極海の氷が減り高山の氷河が小さくなっているのは事実である。海流の動きが変化して気候の2極分化が進み、欧州が寒冷化しシベリアが温暖化するかもしれない。そうなれば、シベリアの地中のメタンが大量に大気中へ放出される恐れがある。また、ウィルスの越年によるパンデミックな疫病被害や海水のpH変化に弱い珊瑚の死滅などのリスクも大きくなる。これに対して自然エネルギーの導入で対応するという意見があるが、エネルギーを消費すれば必ずその何割かは廃熱となって大気中に放出される。エネルギーの消費構造のパラダイムシフトが重要であり、石油代替という発想の技術や政策では本質的な解決にならない。

人類は食糧革命、材料革命、産業革命、情報革命を経て発展してきたが、それらは技術の発達によるものである。しかし、それらによる豊かさの創出は常に人口の増加で食いつぶされてきた。将来のエネルギー・資源問題や人口問題の解決には科学技術が不可欠であるが、新しい価値観が必要である。温暖化の元凶とされる大気中のCO₂は地球規模のカーボン循環の一部であり、地殻のプレート運動も含めた大きな循環により安定化が図られている。CO₂の存在比を見ると深海での滞留量が38,100Gtonで大気中の存在量750Gtonの約50倍と圧倒的に大きい。化石燃料の燃焼によるCO₂は5.5Gton/年であるから深海を下手にいじることによるバランスの崩れのリスクがいかに大きいかがわかる。また、プレートがピンと跳ねただけで東北の大地震や大津波になる。我々はそのような状況の中で生きていることを再認識すべきである。

それでは新しい価値観とはどんなものか。例えば微分（局所時間）発想から積分的長期スパン発想に基づく政策への転換であり、また一極集中から多極分散、地方分散、小規模農工都市への転換である。工業を、資源～エネルギー～環境負荷の連鎖という観点から地域分散型に再構築し、一次産業でも二次産業でもない「地域産業」とする。ローカルに見れば再生可能エネルギーが経済的に成立つ可能性もでてくる。

化学産業の方向性については2012年に化学工学会産業界交流委員会から提言が出されている。今後の化学産業に求められていることはいくつかあるが、エネルギー原単位の低減については従来からの単位操作の連結では限界があり、新概念に基づく高効率操作理論が必要である。また、製造プラントは革新的本質安全設計であるべきで、化学物質規制への対応の面からも廃棄物レスが好ましい。ビジネスモデルの面では東レとユニクロによるヒートテックのような異業種間の連携も重要になる。

化学産業の国内地域立地を可能とする方策の一つは原料シフト（バイオマス利用）である。日本には原材料は無いように見えるが化学品製造に関しては選択肢—バイオマス—がある。製紙業ではすでにバイオマス資源のサプライチェーンを有しており、さらなる技術開発により農業からの廃棄物の受入れも可能となり、新しい定住社会の展開も可能となる。我国のバイオマス資源はエネルギーとしてみれば1,800petaJであり、利用率を30%とする

と我国のエネルギー総需要（23,000PJ）の2.3%にすぎない。したがって化学原料としての利用が合理的と思われる。

現代の石油コンビナートは原油の9割はエネルギーとして使われ、化成品に使われる量は1割程度である。その化成品への変換過程をみると主に酸化反応から成り立っており選択率は低い。バイオマス由来物質は酸素を含んでいるので化成品への変換は還元反応主体となり、触媒の開発が必要だが選択率は高い。バイオマスに原料シフトした各地域における農工融合型産業は基本的に小規模化学産業の集積であり、産業として競争力を持ちグローバルに通用する付加価値製品を生産するにはさらなる技術展開が必要である。その中には、複雑系の工学、厳密機能設計の工学、廃熱を利用したりサイクルのための吸熱・濃縮工学、安全設計工学などが含まれる。

マイクロ化学技術は化学工学者にとって身近な次元解析から予測できるものである。それによれば、滞留時間は流路サイズによらず一定であるが、熱交換時間と拡散時間は流路サイズの2乗に反比例する。均相一次反応では反応時間は流路サイズによらないが、拡散律速の異相一次反応では反応時間は流路サイズの2乗に反比例する。この特性によりマイクロ化学技術は迅速混合、高速熱交換、短滞留時間反応、界面での高物質移動速度等のポテンシャルを有する。

たとえば混合時間1~10msecで完全混合を達成でき手のひらサイズの5cm角のマイクロミキサーで80T/Yの処理が可能すでに工業化されている。総括伝熱係数が大きくなり容積当りの伝熱面積も大きくなるので伝熱速度が数十倍になり、 $\Delta t=1^{\circ}\text{C}$ でも熱回収可能な熱交換器も開発されている。また一気に混合し一気に反応することで反応の過程での副反応を抑えることができる。通常のバッチ反応では副反応を抑制するため -50°C 以下の低温操作を要する反応（選択率83%）を、素反応経路に従ってマイクロミキサーを組込んだ連続システムで反応することにより、常温（ 20°C ）でも88%の選択率を得ることができた。

また、 $300\mu\text{m}$ 以下のマイクロ空間では火炎の伝播が起こらず原理的に爆発の心配がない。それゆえマイクロ空間は本質安全空間であり、例えば、過酢酸を用いた酸化反応でも高速熱交換のもとで安全に操作でき、かつ高選択率で目的物を得ることができた。充填層や気泡塔のような気液接触を用いる操作ではマイクロ化により気液界面積の飛躍的な増大を図ることができる。これにより、気液反応の飛躍的な効率アップ、抽出時間・吸収時間の大幅な短縮（1/100程度）が可能となり、水添加反応等を含むすべての気液反応で成功を納めている。

マイクロ化技術による大量生産についてみると、バルク用マイクロリアクターとしてはすでに1万ト/年レベルの生産は可能となっている。更に一歩進んで付帯設備も含めて小型化し、プラントとして1/10にコンパクト化する技術が開発されつつある。この“モジュール工場”はスタートアップには10分、シャットダウンには15分しか要しないという特長を有し、従来の化学工場の24時間シフト勤務からDayシフト（Daily Stop）に運転形態を変えられる可能性を持っている。このモジュール工場は、見方を変えればモバイル工場

でもあり、運搬することができる。東アジアに展開すればアジアの環境を維持しながら地域の発展に寄与でき、そのための主要ツールになり得る。一方、日本国内においては地方へ運ぶことにより国内立地を目指した地域分散型化学産業の中核施設とすることができ、一次産業と融合した地域固有の新産業の形成を先導することができる。

単位操作を中心としたこれまでの化学工学はスケールアップが主要課題であった。マイクロ化技術はそれとは反対にスケールダウンによる移動速度の高速化と $\Delta G=0$ の反応条件の実現、本質安全化を主要課題とする。これまで述べてきた諸々のことを考えると化学工学は変わるかもしれない。そのためにはやるべきことがまだまだ沢山あるが。

最後に SCE・Net への期待を述べると共にお願いをしたい。

まず、これまでに蓄えた有用な知識・経験の若手技術者への還元である。そのためにはぜひ WEB の活用を検討して欲しい。今の若者はツイッターはやるけれども人に聞くということをしてしない。みんな Net で調べる。“ネット寺子屋”を開いてトラブルシューティング等を逆引きで引けるようにしたら興味を持つかもしれない。とにかく一度使用させること、便利だ、ということを実感させることである。できる範囲で検討してみたい。

つぎに、福島原発に係る「特別ワーキング活動」への協力をお願いしたい。いろいろ難しい問題があるが、学会として原発処理の終結にむけての我々なりのストーリーとそれに必要な技術のまとめをしたいと思っている。

三つ目は、化学工学系教員の評価向上のための定量的な指標の構築と外部資金獲得への支援について協力してもらいたい。いま、地方大学では化学工学系講座が減少しており、化学産業のための生産系技術者育成は危機的状況にある。これを止めるには化学工学系教員の評価の向上が必須と考えている。

どれもむずかしいお願いであるが、私の期待とお願いは別として、ぜひ、今後も「子孫へ何を残すかを考えた社会的活動」にご努力願いたい。

(文責：SCE・Net 幹事 齋藤興司)