公益社団法人 化学工学会 http://www.scej.org/

特集 小スケールの化学工学

化学工学は「スケールアップの学問」と言われる。スケールアップに伴う諸問題を解決する事は重要であり，またスケールアップすることによって有利に働く問題もある。（比表面積減少による放熱ロス減少，コンタミの減少，動機械の効率向上等）

本企画は「小スケールの化学工学」と題して，スケールダウンに伴う「ロスの増加」「効率の低下」といった視点を変え，「小スケールという制約の下で，如何に効率・精度を上げるか」のための技術に焦点を当てる。スケールダウンが求められるキーワードとして①地産地消，②分散化，③可搬性を設定し，スケールダウンによって発生する課題に立ち向かっている技術の紹介・解説をお願いする。

（編集担当：斎藤昌男）†

小スケールの化学プロセスの動向

花岡 隆昌

1. はじめに

化学工学の扱う範囲は化学工業にとどまることはなく，エネルギー，金属，バイオテクノロジー，半導体等々，およそ物質の関わる範囲すべてに広がっている。その中核は従来からの単位操作による研究成果を生産設備に移す具現化と，大量生産の実現によるコストダウンと高効率化，スケールメリットの極限の追求にある。その結果，大量生産の効率化と産業集積が実現し，我々は豊かな生活を享受するに至っている。まさに化学工学はスケールアップを追求する学問である。

一方，ニーズや生活の多様化・消費サイクルの早さから，大型化したシステムが必ずしも適さない分野も顕在化してきている。その一つは分散型のエネルギーや資源の活用であり，もう一つは消費者ニーズの多様化による少量多品種生産やオンデマンド生産への対応である。

Trend and Near Future of Small-Scale Chemical Processes
Taka-aki HANAOKA（正会員）
1986年　東北大学理学研究科化学専攻博士課程前期修了
現　在　（独）産業技術総合研究所 コンパクト化学システム研究センター　研究センター長
連絡先；〒983-8551　宮城県仙台市宮城野区苦竹4-2-1　産業技術総合研究所 東北センター
E-mail　hanaoka-takaaki@aist.go.jp

2014年11月18日受理

例えば地域に分散して存在するバイオマス資源を製品に変換する場合や，リサイクル資源を活用する地産地消型の産業プロセスでは，原材料の収集・移動等を考慮すると，一定の範囲の原料を利用する地域分散型の処理が効率的であり，大型化には限度がある。他方では，新しい技術の迅速な導入や新製品への対応のため，設備に対する大型投資の負担を避け，フレキシブルでリスクを回避し易い，モジュール型のプロセス開発へのシフトも見られる。

これらの動きには東日本大震災も影響している。産業分野においても，地震と津波による直接の人的被害／生産設備の被害以外に，交通路の寸断による流通困難な状況下で，サプライチェーンの脆弱性が顕在化し，それらへの対応が大きな課題となったのは記憶に新しい[1]。影響は化学産業においても大変厳しく現れた。生産設備の大型化と集約化の結果，多くの化学製品からのサプライチェーンは長く複雑となっており，その寸断によって川下製品に大きな影響が発生した。過酸化水素の例では，東日本各地で震災や計画停電のため操業が停止，最大時には我が国の設備能力の7割に及んだ。このため半導体産業や漂白用途等へ影響が現れ，復旧には3ヶ月以上が必要であった[2]。このような危機回避のためにも，分散型プロセスへのニーズが顕在化しつつある。これらのニーズから小スケール向けの化学工学，すなわちスケールダウンに伴う「運転上のロスの増加」「生産効率の低下」「分散処理」「熱の管理」という課題

† Saito, M.　平成25, 26年度化工誌編集委員（2号特集主査）出光興産（株）生産技術センター

著作権法により無断での転載等は禁止されています

に対応し，その制約下で生産効率と精度，安定性，エネルギー効率を向上させていく技術が求められている。

2. 「地産地消」に向かうエネルギー源

従来から，離島や非電化地域を対象に分散型の電力システムについて開発が進められている。また震災と原子力発電所の事故による電力不足以降，地域における小規模エネルギー源開発が活発化し，固定価格買取制度によって再生可能エネルギーの導入が加速された。さらに電源の安定化とリスク回避のため，スチームやガスタービン自家発電や大型蓄電設備のニーズも増加している[3)]。

発電設備は一般的に，大型ほど効率が向上するため，メガソーラーや大規模風力発電，地熱発電の開発が推進されている。一方，小型風力，小規模水力，温泉発電，地中熱利用，地域バイオマス発電等の，効率的には劣るが初期投資の少ない，小規模分散型の再生可能エネルギーも導入されつつあり，大型設備でカバーできない資源を掘り起こし，エネルギーの「地産地消」化の加速が期待されている。

これら技術の普及に対応するためには，小型機器の高効率化と低コスト化という相反しがちな課題に取り組みつつ，分散型電力を最大限に活用できるスマート・グリッドなどの運用方法の確立，海外市場も視野に入れたエネルギー機器の標準化と製造技術の開発も重要であろう（図1）。これらの機器やシステム化の課題の多くに，化学工学的なアプローチが求められていることは言うまでもない。

特に今後の分散型エネルギーとして，水素を利用した燃料電池の利用が重要課題となっている。既に普及しつつある定置型燃料電池とは別に，燃料電池自動車の普及に向けて水素ステーション等のインフラ整備が不可欠であり，オフサイト型（高圧水素または液体水素をステーションへ運搬）とオンサイト型（ステーションで水素を製造）が検討されている。いずれの方式でも初期費用削減のため，小型化，標準化，モジュール化が不可欠であり，高効率化への化学工学の貢献が重要となっている。

3. 生産技術の分散化

エネルギー産業だけではなく，拠点集中と大型化のメリットを最大限に活かしてきたモノづくりの世界でも，生産拠点の分散化・小型化・可動化の動きが広がっている。

化学産業においても，機能性化学品やファインケミカルズの製造で，分散型生産や小規模化への対応が検討されている。すなわち小規模のプロセスには，生産の迅速な立上げと市場投入までの時間短縮，少量多品種生産や需要変動への対応，ローカルな原料の利用，経済情勢の不安定性による初期投資リスクの回避，サプライチェーンの安定化等のメリットが期待されるためである。

もちろん小規模プロセスでは，大規模プロセスに比べコストや効率の点にデメリットがあり，これを超えるメリットを明確にする必要がある。これらの課題を検討するためEUでは，次世代の小スケール化学工場のモデル化を目指し，FP7 Projectの中でF3-Factory，CoPIRIDE[4)]，POLYCAT等のプロジェクトを実施してきた。これらでは小規模工場に適した技術開発を実プロセスに基づいて実施しつつ，開発した技術を実装する新たなモジュール型工場のコンセプトも開発してきた。特にEvonik社では，Evotrainerというコンテナ型工場モデルを提案している（図2）。これは生産に必要な反応器，制御システム，原料貯蔵，安全・保安設備等をモジュール化し，柔軟な運用が可能で可動式のコン

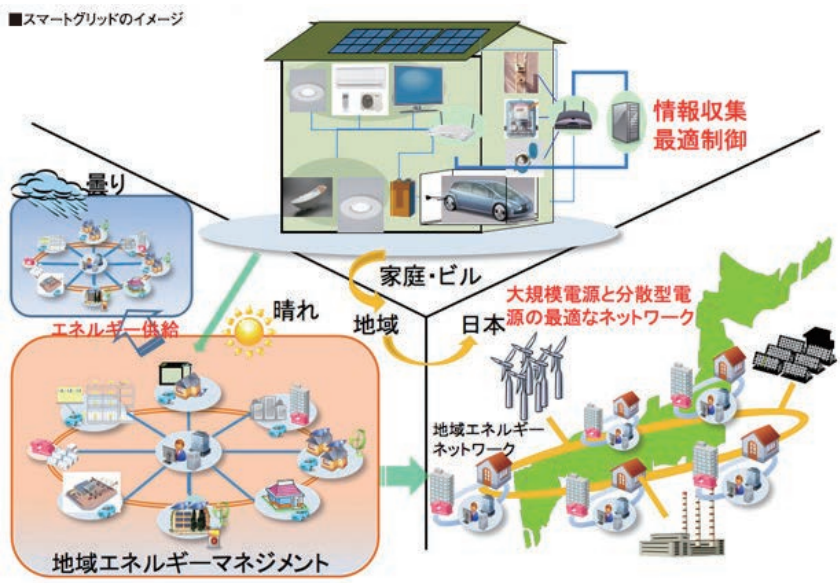

図1　スマート・グリッドのイメージ（資源エネルギー庁のHPより転載）

著作権法により無断での転載等は禁止されています

図2　Evotrainer内の多目的統合型プラント
(P. Löb *et al.*：*Chem. Ing. Tech.*, 86(9), 1367(2014)より転載)

図3　デスクトップ型のプロトタイプ高温高圧反応システム

テナ(3×12 m)に収めたものであり，外部とのインターフェイスも標準化されている[5]。

マイクロ化学プロセス技術は小スケール化学工場のキーテクノロジーである。今後さらに高効率化するためには，大型化が難しいために未利用の新技術や，スケールメリットが期待し難く導入されてこなかった要素技術を最適に統合化することが期待される。一方では小規模でこそ可能となる，運転条件の精密制御や安全確保しやすさを生かし，標準化やパッケージ化を含めたプロセス全体のメリットを具体化していくことが必要である。

4. 分散型化学プロセスへの我々の取り組み

最後に分散型化学プロセスを目指す研究開発例として，産業技術総合研究所コンパクト化学システム研究センターでの取り組みを紹介したい。我々は化学工学・合成化学・材料化学等を基盤に，低環境負荷でシンプルな化学プロセス技術開発，特に小型・分散型の生産技術や多品種の製造に対応するコンパクトな技術の開発を目標としている。

プロセスの分散化・小規模化により，大型のプロセスで使いにくい新技術の導入も可能となることが期待される。超臨界プロセスに代表される高温／高圧利用技術や，膜分離，マイクロ波などの新反応場技術，極めて反応性や発熱性の高い条件下でのプロセスも，安全性を確保しつつ利用できる。また小規模化により，反応条件を時間と空間の両面から計測・制御できるようになるため，より制御された化学プロセスの実現も期待される。そして，これらのプロセス開発には，コンパクトな装置システムと反応の開発の両面が不可欠である。研究センター名はこれらの多くの意味を込めて，前研究センター長の水上富士夫が作った「コンパクト化学」という言葉によっている[6]。それに向けて現在取り組んでいる例を紹介したい。

4.1　高圧・フロー反応プロセス

高温高圧の水の中では，ユニークな化学反応が進行することが知られている。これらの反応は高温故に反応性が高く，必要な反応時間が極めて短いことが多い。しかしバッチ型の反応装置では昇温・冷却に時間を要し反応の制御性が悪い。一方マイクロリアクターでは温度（熱交換）及び時間を精密に制御(ミリ秒単位)できることから，高効率のプロセスが期待できる。この考え方の下に，必要なデバイスと装置を開発し広い反応に適用している。例えば，芳香族ニトロ化反応では，耐蝕性を高めたマイクロチューブ反応器を用い，無触媒のニトロ化反応を高い収率で実現した[7]。また本誌マイクロリアクター特集号で紹介[8]させていただいたように，色素合成のためのクロスカップリング反応にも適用し，様々な有機合成反応で良好な成績を上げている。そして技術コンセプトを広く知っていただくため，デスクトップ型のプロトタイプ高温高圧反応システムも製作した(**図3**)。

4.2　膜分離プロセス

大型の化学プロセスにおける分離プロセスのエネルギー消費は極めて大きく，膜分離の適用による省エネ化が期待されてきた。我々もゼオライト膜の開発と利用に関する開発を行っており，水や二酸化炭素の分離に優れた特性を示す膜を開発してきた。しかし膜分離プロセスはスケールメリットが現れにくく，大型のプロセスへの適用は進んでいるとは言えない状況である。現状では膜性能（特に処理量）と初期投資に由来する経済性，耐久性に由来するプロセス信頼性が課題であると言える。

一方で例えば，多品種／少量の香料や食品添加物生産に多いエステル化プロセスでは，転化率を上げるため生成する水の除去が不可欠である。このような例に小型で省エネルギー型の膜分離プロセスを適用することは実現可能性が高い。この際に問題となるのは，原料である酸に対する膜安定性であり，現在新規材料の創生を含めた分離膜素材の

著作権法により無断での転載等は禁止されています

公益社団法人 化学工学会 http://www.scej.org/

図4　流通型マイクロ波照射装置

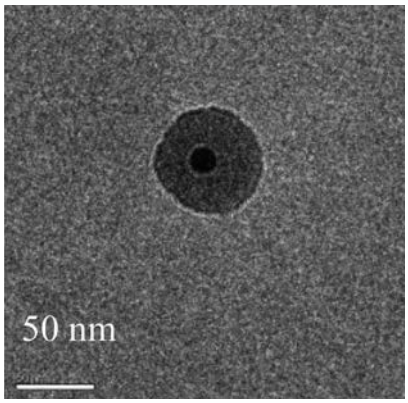

図5　銀コアシリカシェルナノ粒子

改良, 製造条件の最適化について開発をおこなっている[9]。

4.3　マイクロ波利用プロセス

小規模な化学プロセスには，高い制御性と起動・停止の柔軟性が期待される。対象物質を選択的かつ急速に加熱するマイクロ波加熱はこのような要望に沿った技術であり，近年，化学合成における研究例が多数報告されている[10]。

当研究センターでも，マイクロリアクターへの適用に最適化された，連続反応用のマイクロ波合成装置（**図4**）を開発している。特に制御性を高めるため，反応場状態のモニタリングや制御システムと組み合わせてモジュール化することにより，可搬性や迅速な設置が可能なシステムとなっている。また複数台の装置を並列に連結することによって適量生産に対応したシステムを可能とし，また直列に接続することにより多段の反応を一気通貫で実施することも可能である。**図5**は直列接続のマイクロ波合成装置を用いて，1段目に銀ナノ粒子を合成し，2段目でシリカで包接させた銀コアシリカシェル複合粒子の電子顕微鏡写真である[11]。当センターのマイクロ波照射装置は直列や並列運転が容易な流通型システムであるとともに，初期の投下資本を少なくして増設が容易という，モジュラー型の設備の特徴を有する。このため分散型の物質生産システムにも適用可能であり，このような特徴を生かした化学プロセスの開発を進めているところである。

5.　おわりに

「化学工学はスケールアップの学問」と言われることは多く，多くの問題を解決して来た輝かしい歴史がある。一方では様々な情勢から，地産地消，分散・オンサイト生産，可搬性，迅速な立ち上げ，柔軟な多品種生産等に対応してほしいというニーズも産まれてきている。スケールダウンの制約の中で，効率・コスト・精密さ・安全性を化学工学の力によってどのように解決していくべきか，本特集の中で考えるヒントとなれば幸いである。

引用文献

1）化学ビジョン研究会緊急取りまとめ, 経済産業省（2011）
2）『震災とサプライチェーン』化学品需給を追う, 化学工業日報, 2011年08月30日
3）例えば：内発協ニュース, 2013年8月別冊号
4）*Green Processing and Synthesis*, **2**（5）, 379-380（2013）
5）Löb, P. *et al.*：*Chem. Ing. Tech.*, **86**（9）, 1367（2014）：*Evonik Elements*, **37**（4）, 12-17（2011）
6）山辺正顕：産総研TODAY, **5**（6）, 2-3（2005）
7）川崎慎一朗：高圧力の科学と技術, **20**（1）, 33-39（2010）
8）川波肇：化学工学, **77**（11）, 804-806（2013）
9）長谷川泰久：*PETROTECH*, **35**（9）, 632-636（2012）
10）和田雄二他監修:「マイクロ波化学プロセス技術Ⅱ」, シーエムシー出版（2013）
11）Nishioka, M. *et al.*：*Chem. Lett.*, **40**（10）, 1204-1206（2011）

著作権法により無断での転載等は禁止されています