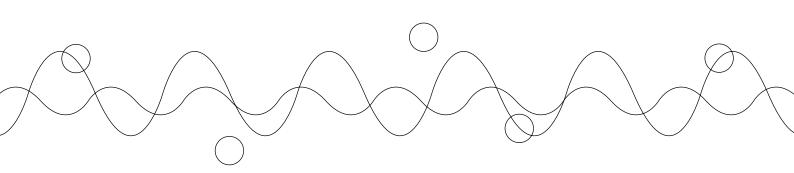
# 科学技術未来戦略ワークショップ報告書 分離工学イノベーション

2015年12月23日 (水) 開催



# エグゼクティブサマリー

本報告書は、国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) 研究開発戦略センター (CRDS) が平成 27 年 12 月 23 日に開催した科学技術未来戦略ワークショップ (WS) 「分離工学イノベーション」に関するものである。

自然界は種々の物質からなる多様な混合物で構成されており、そこでは多くの化学反応が同時進行的に起きている。私たち生物の体内も状況は同じであり、血液中では無数の物質が入り混じって流れている。これは自然界がエントロピー最大化に向かって流れていることから生ずる必然の結果ともいえる。このような中で、人間が持続可能な社会を実現し、そこで生きていくためには、混合物から有用な物質を選別して取り出し、不要物を取り除く作業が必要となる。この作業はエントロピーを減少させる事を意味し、そのためにはエネルギーの投入が必要となる。このように、目的となる物質を高精度に且つできる限り低エネルギーに分離するプロセスは、物質合成と並ぶ化学の基本プロセスであり、産業においても極めて重要な位置を占めている。

本ワークショップは、様々な対象混合物について、目的とする物質だけを取り出す/または不要物を取り除く等の分離操作を、従来に比して格段に低エネルギー且つ高精度におこなうことを目指して「分離工学イノベーション」を掲げ、分離に関する多様な科学技術の専門家間で議論を深めた。化学工学に代表される既存の学術体系によって構築されてきた分離プロセス・機能を、現代の科学技術・イノベーションの観点から、そして将来社会・産業の要請から捉え直し、異分野科学技術の連携・融合から得られる知識と技術によって革新する取り組みを検討した。必要となる科学技術・プロセス・システム、その開発を促進するための政策などの議論を行い、分離工学イノベーションの有効な研究開発戦略策定の一環となることを目指して開催したものである。ワークショップではまず、JST-CRDSにおける調査・分析結果から得られた全体像、課題、研究開発戦略検討の仮説を提示し、その後に分離工学イノベーションへの期待、各技術的手法の最新動向や課題、重要ニーズに関する話題提供、最後に総合討論を行った。

各話題提供では、主に次のような様々な分離の技術課題や先端動向、ニーズが語られた。

- ・世界の人口増による著しい水資源不足に対処するための、廃水処理や海水淡水化での 分離技術。
- ・シェールガス・シェールオイルがエネルギー源として大きく期待されているが、採掘 時に生ずる大量の汚染水が深刻な環境問題を引き起こす懸念があり、採掘随伴水の有 効な分離技術。
- ・石油化学産業における従来の蒸留プロセスを代替する、あるいは膜分離等の他手法と の組合せによる低エネルギー型の分離技術。
- ・国を越えて極めて広範囲に影響がおよぶ PM2.5 のような大気汚染物質の分離技術。
- ・火力発電所等で大量に発生する地球温暖化ガス (CO<sub>2</sub>) の分離・回収・貯蔵技術。
- ・将来の水素社会到来に伴う、高純度の水素の分離・貯蔵技術。
- ・新しい分離材料としての可能性が期待されるイオン液体や、超臨界流体を用いた、医

分離工学イノベーション

薬品や食品成分など特定成分の分離技術。

- ・高い選択性と高純度化を実現する晶析技術。
- ・鉱物資源の選鉱、製錬、リサイクルにおける、特定固体物質の分離技術。世界の資源 国において良質の鉱山は減少しており、ヒ素等の有害な不純物を多く含む低品位鉱の 採掘に着手せざるを得ず、目的とする物質を低環境負荷、低エネルギーで分離する事 が要請されている。また、使用後製品リサイクルにおける希少元素の分離技術は、経 済性の観点が大きな課題である。
- ・特定の細胞、タンパク質などの生体物質分離。疾患の早期診断・治療、低侵襲治療や、 医薬品成分など、高精度で高速の分離プロセスが求められている。近年、細胞代謝の 過程で細胞内の不要な物質を細胞外に運び出す機能を有する、細胞外小胞の1つ「エ クソソーム」の研究が活発化している。エクソソームはがんなどのバイオマーカーと して注目されているが、高精度の有効な分離技術・定量計測法はまだ確立されていな い。生体物質の分離においては、分析と一体になった技術開発が必要であり、患者の 負担を減らす目的で、あるいは元々体内に少量しか存在しないという制約から、極微 量での分離・分析が求められる。マイクロ流体デバイスの実用化や、超臨界流体クロ マトグラフィーのさらなる技術革新が期待される。

総合討論では、各分離対象によって求められるプロセス全体の最適化や、個々の分離技術の組合せ・複合化、実証試験設備の在り方、基礎科学データの不足やシミュレーター開発の必要性、研究環境面の課題、学協会の活性化や個々の学会を横断する議論・連携の必要性、産学連携の方策、セクター間での問題や情報の共有方法、そして社会システム・制度の在り方まで、極めて多岐に渡った。

本ワークショップの議論を踏まえて CRDS では、今後国として重点的に推進すべき研究開発領域、具体的な研究開発課題、その推進方法の検討を含めて、戦略プロポーザルとして提言を発行する予定である。

# 目 次

エグゼクティブサマリー	•••••	i
ワークショップの趣旨説明「分離工学イノベーション」 永野 智己 (JST-CRDS)		1
第一部 気体・液体の分離		
「分離工学の現状と将来への挑戦課題・資源開発に関連した膜・吸着分離を例に・」		
一ノ瀬 泉(物質・材料研究機構)		6
「分離工学イノベーションを実現するために・膜工学からの視点・」		
都留 稔了(広島大学)		12
「膜分離材料の現状と課題、将来展開」 吉宗 美紀(産業技術総合研究所)		19
「超臨界流体を用いた分離の科学技術と諸課題」 猪股 宏(東北大学)		27
「イオン液体・超臨界流体技術における相平衡に関する研究動向と将来展開」		
下山 裕介(東京工業大学)		35
「高度セレクティブセパレーション・晶析の発展・」 滝山 博志(東京農工大学)		46
第二部 資源・固体(元素)の分離		
「次世代固相分離技術」           大和田秀二(早稲田大学)		54
「レアメタルの低エネルギー・環境調和型分離技術の課題と将来展望」		
岡部 徹(東京大学)		63
「これからの製錬研究」 宇田 哲也(京都大学)	•••••	71
第三部 バイオ・医薬食農系の分離		
「生体物質の分離:導入に代えて」 児山 圭(JST-CRDS)		77
「生体関連物質の分離・分析技術イノベーションの展望」澤田 誠(名古屋大学)		79
「マイクロ流体デバイスによる分離技術の現状と課題」 山田 真澄(千葉大学)		84
「生体関連物質の先端分離技術 ・エクソソームの分離・」		
糸長 誠(JVC ケンウッド)	•••••	90
総合討論 (ファシリテーター 永野 智己)		94

## ワークショップの趣旨説明「分離工学イノベーション」

永野 智己(科学技術振興機構 研究開発戦略センター)

研究開発戦略センター(CRDS)は、国内外の科学技術動向を調査・分析し、国として 重要な研究開発領域・課題の特定やその推進方法等について、戦略プロポーザルというか たちで提言書をまとめて発信する、いわば公的シンクタンクの機能を担っている。提言の 作成にあたっては、科学技術分野全体の動向を構造的に俯瞰したうえで、戦略的に検討を おこなうことが欠かせない。そのような俯瞰のベースとして CRDS では、ナノテクノロ ジー・材料分野、環境・エネルギー分野、システム・情報科学技術分野、ライフサイエン ス・臨床医学分野の各分野において、それぞれの研究開発動向をまとめた俯瞰報告書を二 年毎に発行している。各分野動向の俯瞰・調査分析の結果から抽出した注目領域のひとつ に「分離工学」がある。本ワークショップのタイトル「分離工学イノベーション」は、持 続可能な社会を目指す上で、目的とする物質を取り出す、または不要物を除く、といった 混合物分離を、低エネルギー且つ高精度におこなうことが強く求められているという、社 会・産業背景に検討の端を発している。私たちの住む世界では、自然界のほとんどの物質 は混合物で構成され、多くの反応が同時進行している。生体物質も同様である。「分離」 がキーとなるものは、例えば、水に代表される液体物質の分離技術は世界スケールで重要 な課題であるし、近年注目されるシェールガスの採掘時に生ずる大量の随伴水・汚染水の 分離、放射性物質の分離、含水率の高いバイオ燃料の低エネルギーの分離なども強く求め られている。また気体物質に関しても、大気汚染物質や温室効果ガスの分離・回収、水素 社会到来への期待から、高純度水素の分離が必要である。一方、鉱物資源に代表される固 体物質の分離に目を転ずれば、低品位化が課題となっている鉱山からの希少元素分離・濃 縮、使用後製品からの有用元素の分離は産業的に強く求められている。ライフ・バイオ関 連分野でも、疾病の早期診断・治療、疾患患者への治療負荷低減や医薬品成分などに対す る高いニーズから、目的組

織・細胞・タンパク質・DNA、特定分子に対する高精細・高純度な分離・分析技術が求められている。

## 検討の背景



- 持続性社会を目指す上で混合物分離はキー
  - ▶ 生体系含め、自然界は混合物で構成され、多くの反応が同時進行
  - ▶ 持続可能社会実現には混合物から目的物を取出す、または不要物を除く、 分離プロセスがキー "特に環境・エネルギー、健康医療分野"
  - ▶ 化学産業ではエネルキー多消費のプロセスに代わる省エネプロセスを希求
- マクロからナノスケールまで分離技術革新へ多くの社会的期待
  - 水に代表される液体成分の分離技術は世界スケールの課題 飲料可能な水資源不足、2025年には世界人口の30%が水ストレス下に シェールガス、サンドオイル採掘で生ずる大量の随伴水・汚染水

福島原発事故で発生した大量の放射性物質汚染水

福島原光争成で光生した人里の放射性物員汚染 含水率の高いバイオ燃料の分離濃縮

- ▶ 固体物質・特定元素の分離
  - 低品位化する鉱物資源からの元素抽出、使用後製品からの有用元素分離
- > 大気汚染、温室効果ガスへの対応
  - 効率的なCO2や、大気中有害物質の分離・回収への必要性
- ▶ 水素社会到来への期待(燃料電池)
- 高純度の水素分離・生成・吸蔵技術の必要性
- 疾病の早期診断・治療、疾患患者への治療負荷低減
  - 目的組織・細胞・タンパク質・DNAの高精細な分離分析、高速透析・濾過

図 0-1 検討の背景

て化学工学において体系化されてきた分離工学を、科学技術によるイノベーションの可能性という観点からとらえ直し、どのようなボトルネックにチャレンジすることが必要なのか、そのための研究・開発環境にはどんな場や仕組みが求められるのかを検討しなくてはならない。本ワークショップでは、こうした分離に関する課題を基礎科学・学術と、応用開発の両面から検討する。そして各方面のニーズを前にして、高難度の分離を工業的に実現するための中長期の方策を議論し、より有効な研究開発戦略を策定する一環として開催するものである。

図 0-2 は 2015 年度に作成したナノテクノロジー・材料分野全体の俯瞰図である。上部は社会・産業との符号を考慮した構成としている。ナノテクノロジー・材料分野の科学技術はその直下に位置づけて、右方の政策としての共通課題支援策を常にセットで考慮しながら、下から上に向かう流れとして科学、共通基盤から物質・材料、デバイス・部素材までを縦に記載している。これらの科学・技術を融合あるいは統合することによって、社会・産業の諸領域への本質的な貢献を企図している(ナノテクノロジーのシステム化と呼んでいる)。俯瞰図には様々なキーワードをちりばめており、分離技術に関するワードが関係する諸領域を赤線で大きく囲って示している。

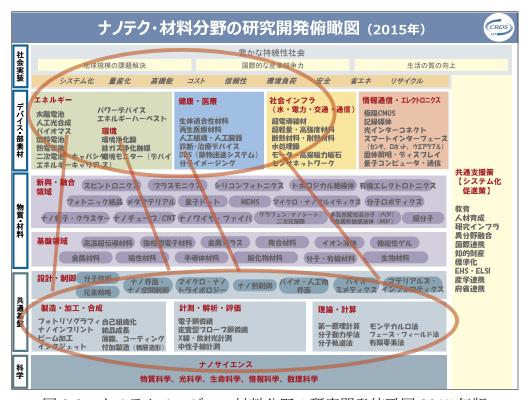


図 0-2 ナノテクノロジー・材料分野の研究開発俯瞰図 2015 年版

一般に分離の基本的な 原理は、機械的分離、平衡 分離、速度差分離に大別さ れる。いずれも対象となる 混合物に外的なエネル ギーを投入することで分 離を実現し、分離後の物質 はエントロピーの低下を 伴う。通常、分離対象物質 の単位エネルギーあたり の処理量と分離性能は、図 0-3 のようにトレードオフ の関係にあるが、分離性能 を高く保ったまま、必要な 処理量の分離を実現する イノベーションが目標と

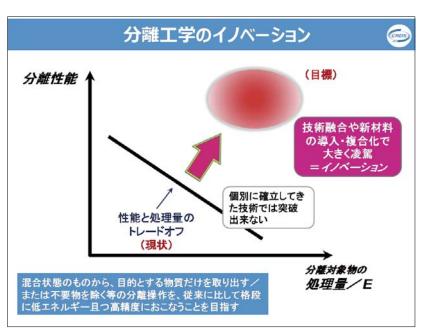


図 0-3 分離工学イノベーションのイメージ

なる。そこでは、個別に確立されてきた技術手法だけでは突破できない分離を、技術融合 や新材料・デバイスの導入、反応との組合せなど複合化することによって、大きく凌駕す ることが求められる。

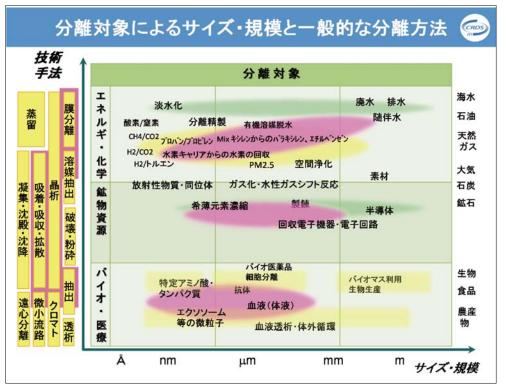


図 0-4 分離対象によるサイズ・規模と一般的な分離方法

図 0-4 は、横軸に分離対象のサイズ、縦軸に分離の技術的手法をとり、分離の対象物をおおまかに分布したものである。ナノメートルよりも小さなスケールから、実際のプロセ

ス規模を考えればメート ルスケールまで幅広く、生 体内のバイオ系物質のよ うにプロセス規模の面で も極微量しか存在しない ものまでがある。このよう な検討スコープから、工業 的な分離の実現が求めら れる対象物と、そのための 技術手法・プロセスを特定 していく必要がある。個々 の単位操作として見れば、 それぞれの技術手法の多 くは成熟しており研究開 発要素を見出すことは難 しい。しかし、求められる

## 初期仮説



- 仮説1 ①気体・液体の分離、②資源・固体物質(特定元素)の分離、③バイオ・医薬食農系分離(微量生体物質)の分離、の大きな3つの方向性(柱)で考えるべき。
- 仮説2 従来の分離工学を革新するには、新材料の適用や、反応との組み合わせなど複合的な分離による省エネルギー・低コストの実現が特に重要である。そのためには、求められる分離の問題(複数)を、化学工学だけでなく、基礎物理・基礎化学、システム・エンジニアリングの研究者の共通課題にしていくことが必要である。
- 仮説3

  ①②③に共通する基盤技術(溶液化学基礎論や、シミュレーション、その場計測技術など)は別個に扱うのではなく、上記3つのそれぞれの方向性に向かう研究開発のなかで一緒に取り組むべき。また、特に溶液論のような基礎学術は、大きな予算ではなくとも、長期的持続的に取り組み続けなくてはならない。そのための研究環境(仕組み)が必要である。

以上の帰結として、分離工学は今、社会・産業ニーズの変化に伴いジャンプが 求められており、取り上げるべき諸条件は整ってきたといえる。

図 0-5 分離工学イノベーション検討の初期仮説

効果的な分離の実現、すなわち抜本的なエネルギー利得やコストメリットの得られる分離は、科学的原理に立ち返っての検討や、新材料・新デバイスの導入、最先端の計測技術やシミュレーション・モデリングを駆使し、技術手法をプロセス・システムとして組合せ、複合化・最適化し、系全体として実現することを目指すべきであろう。

CRDSでは、本ワークショップを開催するにあたって、事前の調査・分析からいくつ かの仮説を構築した。なかでも図0-4におけるピンク色で示す対象や技術手法は特に深掘 りすべきと考えられ、また、大きな方向性として3つ、すなわち①エネルギー・石油化 学産業に代表される気体・液体の分離、②鉱物資源に代表される固体物質の分離、そして ヘルスケアや農業・食品産業との関連から、③バイオ・医薬食農系の分離、という3本 柱で検討を進めることが妥当であるとの仮説を構築した。さらに、あらゆる分離の方向性 に共通する基礎科学・基礎技術は、共通基盤として横断的に取り扱うべきであり、タテヨ コのマトリックス構造で研究開発戦略を構築すべきと考えている(図 0-6)。ここでもう 一点指摘しなくてはならないことは、分離に関わる基本的な科学的知識と技術を身につけ た人材についてである。特に、産業界からはこのような人材の減少に大きな懸念の声があ り、大学においても化学工学や金属製錬の学術分野へ進学する学生数の減少は顕在化して いる。専門知識・技術の蓄積と継承の面でも危ぶまれる状況にある。これは容易には解決 しえない難題であるが、産学の人材需給ギャップが拡大傾向にあるなかで、分離工学イノ ベーションに必要な研究開発環境・制度・仕組み、学術分野と大学工学部の在り方につい ても議論し、中長期の方策を見出さねばならないだろう。これらはぜひ最後の総合討論で 扱いたい。

以上のように本ワークショップは、既存の化学工学の学術体系を越え、金属・製錬、生体関連物質の分離・分析までを広く横断的に扱い、新時代に求められる新たな分離工学構築へ向かう一歩とすべく開催するものである。ぜひ活発な議論をお願いしたい。



図 0-6 研究開発戦略の構成検討図

## 第一部 気体・液体の分離

## 分離工学の現状と将来への挑戦課題 - 資源開発に関連した膜・吸着分離を例に -

一ノ瀬 泉(物質・材料研究機構 高分子材料ユニット)

膜あるいは吸着剤を用いた挑戦課題について紹介する。最初に世の中の変化として掴んでおかなければならないこととして 2 例挙げる。一つは PM2.5 であり、環境破壊は昔からあったが今回は少し違うぞと皆が認識するようになり、中国ではほとんどの人がマスクをするようになった。アジアの各工場地帯、巨大都市では共通課題であり、北京や上海、モンゴルのウランバートル、インド、アンカラなど、決して中国だけの問題ではない。エリアが広く、広大な範囲に大気汚染が進んでいる。影響を受けるのはアジア全体で 40 億人ともいわれる。ちゃんと対処しようとすれば、電力、製鉄、化学、自動車などの基幹産業に大きな影響を与えることになり、この影響は今後長く続くと考えられる。

もう一つは原油価格である。米国に端を発するシェールオイルの増産で、マージンで決まっていたオイル価格から大きく外れ、圧倒的に増産できるようになってしまった。掘削方法の新技術により、石油の可採埋蔵量は1兆バレル増えている。これまでに1.5兆バレルを使ってしまったなどといわれていたが、さらに1兆バレル増えたということになる。世の中がシェールの世紀に変わった。アメリカはシェールで中東はオイルとよくいわれが、今のシェール地図には中東の情報が入っていない。これは情報がないということだが、石油はシェール層からつくられるので、よく考えれば大油田の下には当然、巨大なシェールオイルが眠っている。これは恐らく常識になっているだろう。そう考えると、この価格低下の傾向は1世紀の単位で続くだろうと考えられる。また、これまでは水がないとシェールは開発できないということだったが、最近の状況では窒素あるいは $CO_2$ の圧入でも十分に可能になり、こちらのほうが良いという話もカナダやアメリカで出てきた。将来的に考えると、採掘において水は要らなくなるかもしれない。それと同時に、高性能のガス分離装置が非常に重要になるだろう。

日本の石油化学界は徐々に衰退している。アメリカではシェールガスベースのプラントが増設されているが、日本の石油化学プラントは約45年、老築化が進んでいる。稼働率は高くなく70%程度、収益率に課題がある。一方、中東では日本を含む外国からの投資によってエチレンの供給量が非常に増えており、中国を超えている。海外移転が確実に進んだとき、日本はどうするだろうか。石油化学が弱くなると、素材産業や繊維産業、タイヤ産業はどうするのかを考えなければならないだろう。大きな影響が日本に起こり得る。通常、石油は常圧蒸留で分ける。脱硫が大事になるが、技術的にはかなり完成されている。メタンと水から CO2 と水素をつくることが基盤であり、その水素を使ってメルカプタン等から硫化水素を取り出す。硫化水素を取り出し、酸素で燃やして、さらに硫黄まで持っていく。この流れを水素でぐるぐる回している。そのため水素分離の技術が必要になり、深冷分離、PSA、膜分離などをやりながら、恐らく毎日自動車に乗る人は1年当たり20から30キロぐらいの硫黄をつくっていることになる。水素をぐるぐる回すことを考えると、今後余剰の水素がかなり出てくるのではないかと考えている。

石油を分けて一番使われるものはナフサである。ナフサというのはいわゆる C4 から C9 ぐらいの揮発性の高い炭化水素の成分で、これを分解してエチレン、プロピレンができる。問題は、エチレンやプロピレンをどう分けるかということで、エチレンの沸点はマイナス 104 度、エタンがマイナス 89 度、これを分けるのは蒸留塔でおこなうが、90 メートルくらいの高い蒸留塔で 20 気圧という高圧をかけて、液体になる温度まで冷やして蒸留する。大きなエネルギーを要する冷却装置が要るということである。また、大きなエネルギーを使う産業がここ日本で縮小しているということでもある。

分離技術を大きく分けると、まず蒸留、そして凝集沈殿、吸着、膜分離がある。それぞれに巨大な産業が結びついており、蒸留では石化プラント、凝集沈殿では水事業、吸着・吸収ではガス分離、膜では海水淡水化であり、1兆円を超える産業になっている。我々は材料屋で膜を扱うが、技術は非常に重要であり、材料はそれをサポートするような役割を担っている。即ち、材料だけでは使えず、技術が必要である。分離工学の特徴は、対象の広さであろう。10のマイナス6乗メートルスケールのマイクロチップの分離から10の18乗メートルぐらいまで。海水淡水化でどのくらい世界で水を処理しているか、石油の処理量、ビールの生産量、天然ガスの輸送量、水素自動車の消費量、血液検査(これは数ミリリットルだが)、マイクロからメガあるいはエクサにかけてすごいスパンで物事を考える必要がある。



図 1-1 分離技術と分離材料

要素技術を見ると、深冷分離、減圧分離、あるいは凝集沈殿、遠心分離、吸収・吸着、イオン交換等がある。これら要素技術をシステム化、統合化、あるいはコンパクト化し、大規模化することでさらにすぐれたシステムができる。将来は、包括的にメガシティをターゲットにすることが良いのではないかと考えている。水素自動車も、分離材料で大きく変わる。環境・エネルギーあるいは住環境、水、空気、これらを含めて、科学技術政策でも掲げる超スマート社会のシステム化を目指していかなければいけない。

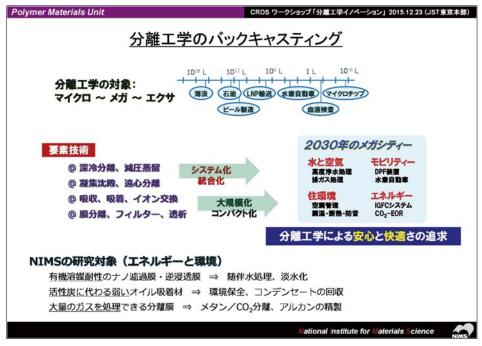


図 1-2 分離工学のバックキャスティング

NIMSではこれらの課題をブレークダウンし、特にエネルギーと環境を意識した例として、有機溶媒耐性の分離膜の研究開発をおこなっている。シェールガス採掘時の随伴水や、淡水化、あるいは活性炭に代わる吸着剤、大量のガスを処理できる分離膜(メタン/CO2分離、アルカンの精製等)、いずれも新しい話題ではないか、技術と材料を掘り下げていかなければ解決できない課題である。

カタールのガス生産について簡単に紹介したい。ペルシャ湾沖で海底からメタンを採る が、混合物でC1、C2、C3、ペンタンプラス、硫化水素、水も入っていて塩化ナトリウ ムも入っている。これを 90 気圧のパイプラインで 60km 運んでいる。イメージとしては ガスが半分、水が半分のもので、どろどろの状態のものを高圧で運んでいる。コンプレッ サーで圧縮するのだが、熱があると温度が上がってしまうために先に冷却する。そしてま ずナフサを得る。液体にならないところはガスとして回す。ここで問題なのは、大量の随 伴水が出てくることである。随伴水は処理する必要があり、その後ガスの吸着分離、(ア ミンガスリアクター)、ゼオライト、脱水処理等をしていく。随伴水処理は大きなビジネ スになっており、そのコストは世界で約10兆円を越えていると言われている。NIMSで はこれに対応するために、カーボン系の膜の研究開発をおこなっている。この膜は、油に 使える水処理膜である。イランなどで、随伴水を飲めるようにする提案をしているが、現 状のRO膜と比べてろ過性能は同じぐらいである。NaClの除去率は95%ぐらいしかない。 しかし、実用化の可能性があると考えており、JST の COI プログラムで量産化の研究開 発をしており、Roll to Roll の成膜装置で、製造プロセスの実証を目指している。膜の状 態をいうと、高分子の基材の上に数 10 ナノメートルの膜をつくっている。これでも十分 に性能が出ることがわかっている。現在、カーボン膜の内部構造を制御し、表面に3ナ ノメートルぐらいの分離機能層を構築し、その下にやや大きな穴を持つバッファ層を作る ことで、性能向上を目指している。

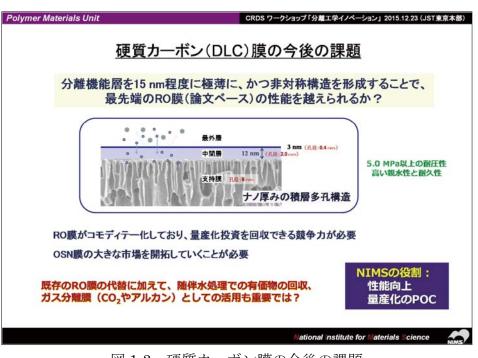


図 1-3 硬質カーボン膜の今後の課題

随伴水に関しては、随伴水中に入っているオイルをいかに回収していくかも課題である。 随伴水中のオイルはほとんどがナフサなので、非常に高価なものである。その吸着剤を検 討しており、NIMSでは Polycapture という多孔性吸着材の開発をおこなっている。随 伴水中に溶けている、またはコロイド状のオイルを吸収して取り出すが、そのエネルギー コストを下げることが課題である。

吸着したものは脱着が難しく、現在はスチームを使っているが、これをポンプでできないかと検討している。既存の活性炭や有機の吸着剤よりも、はるかに吸着力が弱い吸着剤をつくろうということである。それにより脱着のスピード、エネルギーを稼いで、最終的にはペンタンプラス、ナフサ成分の回収を低エネルギーでやろうということを提案している。非常に高いハードルであり、オペレーションまで考えて性能を出すというのは本当に難しい。それでも、量産化の検討が始まり出している。

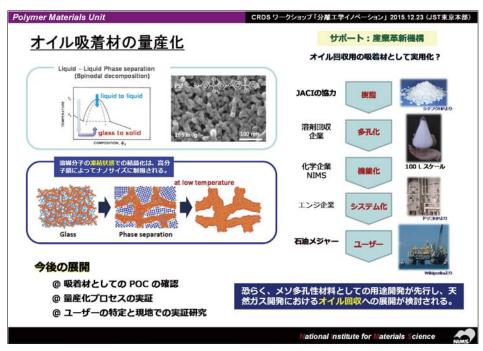


図 1-4 オイル吸着材の量産化

最後にガス分離について一言述べる。特に CO<sub>2</sub> の分離、アルカンの分離、あるいは孔径を制御したもので水素や BTX の分離、こういったガスの分離は今後非常に重要になると考えている。

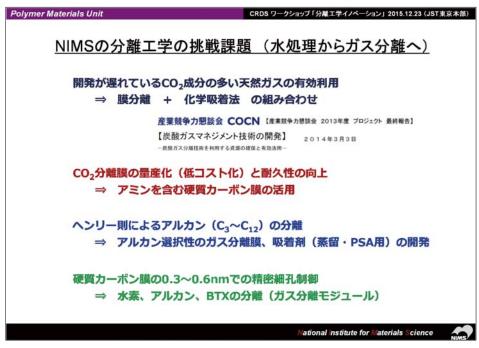


図 1-5 NIMS の分離工学の挑戦課題

#### 質疑・コメント

- ・脱着について、わざと弱い力で簡単に脱着できるというのはすばらしい提案。ぜひ実現してほしい。コンプレッサーに比べてポンプのほうが馬力は弱くて済む。ポンプで押せるようなプロセスシステムでできればいい。それに耐えられるような膜をつくっていただきたい。
- ・大気汚染への対応はどうすればよいか。
- →日本の脱硫システムを持ち込むということはあると思うが、まだ高価で採用されていないのが現状。石油中に含まれる硫黄をいかに取り除くか、決定打がない。
- ・エネルギーとコストを考えなければ、分離技術はある。大気汚染でも、NOX・SOX をすべて除去できるしパーティクルも対応できる。しかし発展途上国はコスト的にやらない。地球温暖化の CO2 回収技術だってあるが、電力会社はやらない。それは経済コストが見合わないから。分離工学は必ずそこに行き着く。もっと安くといっても必ずコストはかかり、先進国は基準ぎりぎりのところまでとるが、それ以上はやらないし、資金のない国ではできない。グローバルに規制がかからない限りよくならない状況ではないか、そこをどう考えるか。実際に使うためにはどうするのかを分離工学に携わる人はもっと考えないといけない。今、本当に技術がまだなくて、分けることができないものは何か、ニーズとしては何があるのかが一番肝心。
- →海水淡水化の膜に関しては既存の膜を超えたい。20%でも性能がいいものを同じコストでつくれば世界を席巻できる。研究開発に参画している企業からは非常に強い要望がある。カーボン膜の中をさらに設計していくことで、性能が上がる指針がでつつある。大気汚染に関しては、世の中の意識が変わったということがまず大事。北京で街を歩く人の全員がマスクをしているというような状況があり、意識が変われば国も動くことになる。世界中の人が見ているなかで、新しいプラントを立ち上げるときは、環境面のウェイトが上がってきている。その意味で変化を認識しており、今後は環境問題に対する資金の使い方も変わってくるだろうと考えている。

## 分離工学イノベーションを実現するために - 膜工学からの視点 -

都留 稔了(広島大学大学院工学研究院)

膜分離工学からの視点から話をしたい。分離精製というのは、環境・エネルギー・バイオ分野におけるキーテクノロジーである。分離には機械的分離、速度差分離、平衡分離など様々な手法があり、かつ、それらほとんどに代替の技術がある。例えば水を分離しようと思ったら別に膜じゃなくてもいいし、他の水処理法がいくらでもある。これをやるからにはこの技術じゃないとできないものや、圧倒的な技術的優位性が見えるような分離技術を開発しなければ、生き残っていけない。

国内外の膜分離の歴史を振り返りたい。現在、日本の膜技術は成功例が多く、世界トップレベルである。最初は水処理が主なニーズで、1959年に Loeb Sourirajan が初めて実用に耐えられるような逆浸透膜を開発した。その10年後には実用化が始まって現在に至っている。国のサポートが大きく、日本の中ではアクアルネッサンス、MAC といった国家プロジェクトで支えられたことで、世界トップレベルの技術開発ができた。気体分離に関しても1980年、Prism 膜というのが世界で初めて実用化された後に、日本ではC1 化学が契機となり膜開発が進み、その後に世界トップ性能を示すポリイミド膜が実用化された。このように、国家プロジェクトに誘発された製品が現在は世界を席巻している。

実際に分離工学イノベーションを考えた場合、新しい材料が大事なのはもちろんだが、 非対称性をもたせて薄くて強度の高いものにすることや、耐薬品性、長寿命化などの改良 技術も大きなブレークスルーを生む。

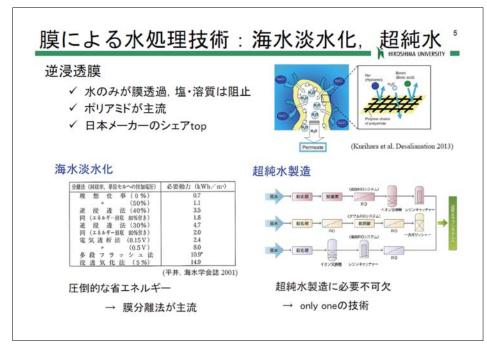


図 2-1 膜による水処理技術

膜による水処理技術において、海水淡水化や超純水製造がどうして日本が世界トップレベルの技術になり得たかを考える。逆浸透膜というのは非常に小さな水分子のみが膜を透

第

過して、塩分等は出てこないというもので、ポリアミド膜が主体である。日本のメーカーが世界のトップシェア、70%ぐらいを占めている。海水淡水化から水を得るために必要な最小エネルギーというのが熱力学的に定義でき、50%の水を回収するときには、1.1 kWh/t というふうに一意に決まる。他の電気透析法や多段フラッシュ、普通の蒸留法と比べると、逆浸透膜法の場合、圧倒的な省エネルギー性能を持っている。このようなプロセス評価と高機能膜の開発が相まって、中東でまず実用化が進んだ。また今の超純水製造のプロセスにおいても、膜分離は欠かせない技術になり、オンリーワンの技術になっている。こういった技術を目指していかなければ、勝っていけない。

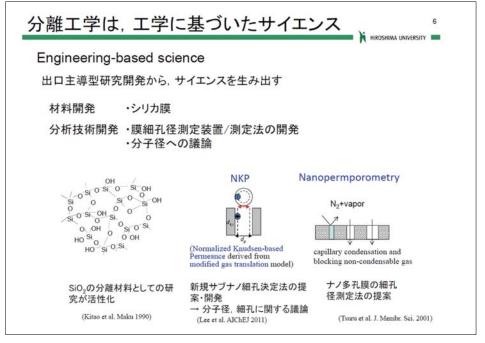


図 2-2 出口主導の研究からサイエンスを生み出す

分離自体は出口主導型で代替技術は複数あるため、その中でどれがいいのかという競争になる。実用化という観点も非常に大事だが、分離工学というのはサイエンスという観点からも仕事を進めるべきである。こういう観点から私の例を三つ紹介したい。

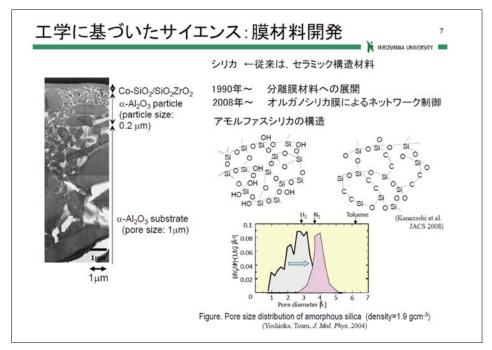


図 2-3 世界初のシリカ膜による水素分離

私たちの研究グループは、世界で初めて水素分離がシリカ系の膜で可能であることを報告した。図 2-3 に示すように、シリカ膜は Si-O-Si 結合のネットワークからなるが、その Si-O-Si 結合の空隙は、水素だけを透過させる。シリカ膜の分離層厚みは 100 ナノメートルから 50 ナノメートルぐらいの超薄膜である。1990 年以前は、シリカというのは膜分離材料としてはあまり認められていなかった。この様なシリカネットワークで分子の分離ができるということが明らかとなり、シリカ材料やセラミック材料による分離が活性化し、そのサイエンスが生まれてきた。

このネットワークの細孔は1-5Å位の細孔径を有し、これをチューニングして水素/窒素分離などが実現できる。さらに、Si-O-Siネットワークの中にカーボン材料を入れる、たとえば Si-C-C-Si 結合を Si-O-Si ネットワークにいれることで、細孔径分布をチューニングができることも明らかとした。

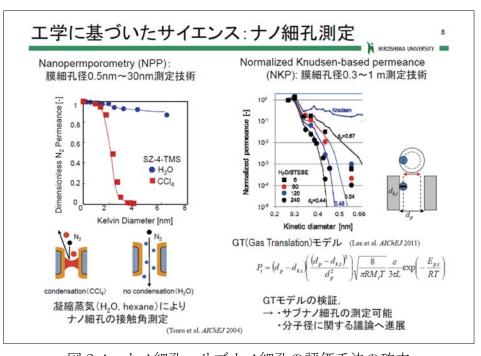


図 2-4 ナノ細孔・サブナノ細孔の評価手法の確立

すべての研究において先端を極めてゆくと、より高度な計測技術が必要になってくる。 これまでに、多孔膜のサブナノ細孔やナノ細孔を測定・評価する方法を開発してきた。

ナノ細孔を測定するためには Nanopermporometry といって、細孔径が 0.5 ナノメートルから 30 ナノメートルを測定する技術を開発した。これは膜の中に窒素ガスと四塩化炭素を供給する。四塩化炭素は細孔内で毛管凝縮して窒素の透過を妨げることによって、細孔径分布を測定することができる。四塩化炭素の代わりに水を使うと、疎水的な膜だと水が毛管凝縮せず窒素が素通りする。こういった凝縮条件を変えることでナノ細孔の親疎水性まで評価できる。

サブナノメートルでの細孔径測定技術として、GTモデルが有用である。実際の膜細孔のガス透過機構を検討する上で、様々な種類のガスの分子を用いて透過性をはかると、サブナノ細孔の測定技術として使える。分子の大きさを変えて透過を測定するとシミュレーションとよく合う。このような実験を行うことで、水素のような簡単な分子でも分子径に議論の余地があることがわかってきた。これはすなわち、エンジニアリングが先行主導して生み出されるサイエンスである。

図 2-5 Process Intensification の概念

化学工学の分野では Process Intensification の概念があり、2000 年ころより一般化してきた。そこではダウン

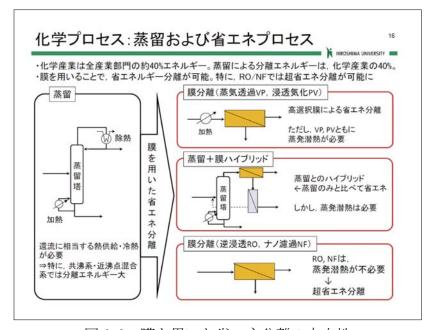


図 2-6 膜を用いた省エネ分離の方向性

「分離工学イノベーション」ワークショップの趣旨説明

第

今後、取り組むべき研究開発としては、例えばエネルギー、環境、水、バイオ、ライフサイエンス、が大事だ。出口をまず設定した上で新しい材料開発があり、それを基盤技術がサポートする。この際に分離方法の相互比較ができるような仕組みや、分離データのデータベース化が必要になる。高純度化や処理性、分散性、コンパクトになるかどうか、耐久性、等が求められる。

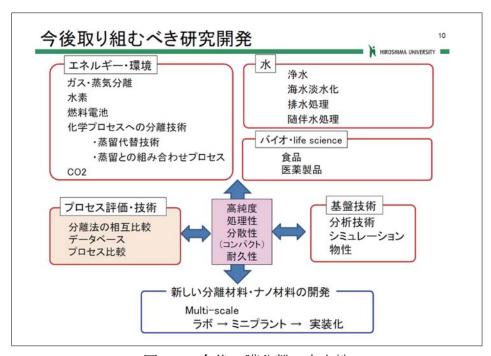


図 2-7 今後の膜分離の方向性

20世紀は石油の世紀と言われ、21世紀は水の世紀と言われている。様々なガス分離、さらには蒸気系の分離、そして液相系の分離で考えると、分離膜に関しては 20世紀が水処理膜の開発の時代だったが、21世紀は石油処理膜、シェールガス・オイル処理膜みたいなものをやらないといけない。我々がこれから目指すべきはこういった石油処理、シェールガスのような処理である。石油や化学プロセスの分離のための膜開発はチャレンジングなので、それこそ産官学の連携が必要になる。

方向性を幾つか紹介したい。有機溶媒系ナノろ過という技術がヨーロッパではかなりのブームになっている。ヨーロッパは化学メーカーが強く、その化学プロセスで膜を使いたいというニーズがあり、国際会議はヨーロッパが中心に行っている。様々な膜、高分子やセラミックを使って、溶媒回収等に用いるケースや、化学プロセスへ応用していくケースがある。逆浸透膜(RO)やナノろ過によって有機溶媒の分離を行いたいというのが一つの大きなポイントである。

さらに資源開発における分離技術の貢献という点では、シェールガスやシェールオイルの随伴水の処理、CO2分離、様々なガス分離が考えられる。

分離工学としては、分離対象をはっきり決める必要性があるのではないか。気相系なら、例えば水素、ヘリウム、CO<sub>2</sub>、有機ガス、水蒸気分離を、液相系では化学プロセスの新技術として有機溶媒系混合物のろ過等が考えられる。これらの応用分野において、新しい分離材料や手法をもちいて、各種の分離試験を行なう。その結果を比較すると、プロセスの

エンジニアリングに基づいたパフォーマンス評価ができるようになる。その評価基準は、 選択性なり、処理性、コンパクト性、耐久性などである。

#### 質疑

- ・実用性という点で考えたときに、実際には長尺で多数の膜になるが、細かい解析がメートルスケールの長尺になったときに、均一に制御できるのか。また、劣化しないのか。
- →実用化を考えるとそこが大事。私どもはまだ、長時間の使用や、長尺の実スケール、セミコマーシャルのような形での評価技術を行っていない。実用性の観点では、そこに必要な技術がある。
- ・膜プロセスをどう捉えるかということでいうと、膜が破過した場合に、破過の予測ができない現状を考えると、有価物を抜くか、無価物を抜くかという点は重要ではないか。また、欠陥を見つける、いつか欠陥が生まれたときにプロセスがだめになるということに対して、抜くべきものと抜いてはいけないものを考える必要があるように思う。併せて、膜の診断技術も重要ではないか。
- →センシングによって診断することが考えられるが、他の方法は見出されていない。
- ・水処理について、Process Intensification、ハイブリッドで様々に組み合わせるという ところは非常に同意できる。分離というものを広げていくためには、複数の技術を組み 合わせ、出口設定に合わせてやっていくというのが非常に重要ではないか。
- →組み合わせで何が本当にベストかというのを、しっかり評価できる技術も必要になる。

## 膜分離材料の現状と課題、将来展開

吉宗 美紀(産業技術総合研究所 化学プロセス研究部門)

本講演では、分離膜の「材料」という視点で話をする。私自身は、炭素を材料とする炭素膜の開発を行っており、産業に資する研究、実用化につなげる研究に重点を置いている。図 3-1 に膜の種類を示した。分離膜は、用途や分離対象のサイズいくつかの種類に分類される。現在実用化されている水処理膜というのは、逆浸透膜・限外ろ過膜・精密ろ過膜の3種類で、ナノーマイクロメートルのオーダーの分離である。まだ、十分に実用化していないところとして、分子分離やナノろ過が挙げられ、このあたりが研究のターゲットになる。ここでターゲットとする「気体(蒸気を含む)の分離」とは「分子の分離」であり、分離対象が1ナノ以下になることから、分離の難度は非常に高くなる。ターゲットとなる分離対象を、図 3-1 の下に示した。例えば、酸素と窒素の分離は、0.46 nm と 0.64 nm の分離であり、サイズで分けることが非常に困難であることは明らかである。

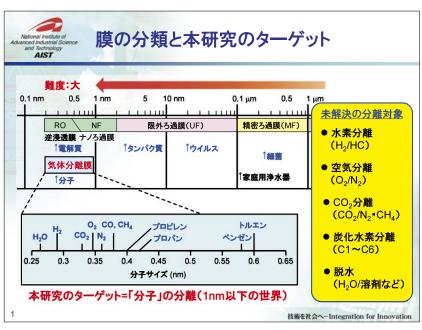


図 3-1 膜の分類と本研究のターゲット

分子分離で未解決かつニーズの高い分離対象を図 3-1 の右に示した。未解決とは、従来の分離方法では分離ができない、あるいはエネルギー消費が大きいという意味である。炭化水素からの水素の分離精製、空気からの酸素の分離、メタンや窒素からの二酸化炭素の分離、構造の違う炭化水素同士の分離、さらに溶剤などからの水の分離(すなわち脱水)、の5つである。

分離膜の種類ごとに使用されている膜材料は異なっており、代表的なものを下記に挙げる。

1. 分子分離膜としての芳香族ポリイミド膜、シリコーンゴム、A型ゼオライト、パラジウム膜など

- 2. 逆浸透膜(RO膜)としての芳香族ポリアミド膜、酢酸セルロース膜
- 3. 限外濾過膜(UF 膜)としてのポリスルホン膜、ポリエーテルスルホン膜、再生セルロース膜
- 4. 精密ろ過膜 (MF 膜) としてのポリオレフィン膜、テフロン膜、ポリビニリデンフル オライド膜、アルミナなど

さらにその他としてイオン交換膜(電気透析膜)としてのポリエーテルスルホン膜などがある。

分離膜の実用化を考えたとき、膜分離材料として求められる条件は、

- 1. 分離性能が高いこと(分離対象にあった細孔径を形成できる)
- 2. 薄膜化が可能であること(目的の形状に加工でき、欠陥無く大流量を流せる)
- 3. 安定性が高いこと(分離対象に対する耐性をもち、目詰りしにくい)
- 4. 材料が安いこと(製品価格に大きな影響をあたえる)

という点が挙げられる。膜分離材料の研究というのは 100 年以上の歴史があるが、市場に出ている膜としては、上記に示した通り、単純な構造を持つ安い材料でかつ種類もかなり限定されているのが現状である。つまり、膜の実用化という観点から見ると、従来技術に勝るためにはかなりコストに制約がかかることを認識する必要がある。水処理膜は 40年かかって実用化したと言われており、現在は材料そのものの開発は成熟し、省エネ化に向けたところに研究の重点が移っている。

分子分離用の高分子膜の現状を図 3-2 に示した。ここでは例として酸素 / 窒素を挙げたが、これは Robeson プロットと呼ばれる膜の透過性と分離性のトレードオフの関係を示す有名なグラフであり、他の分離系でも同じ状況である。これを見ると、横軸となる処理量と、縦軸となる性能は両立せず限界がある。また高分子膜になってくると使用環境に制限があり、膜として使える高分子材料そのものについては、開発に限界があると思われ、研究対象は後で述べる無機材料の分離膜にシフトしつつある。



図 3-2 分子分離膜の現状と課題

このプロットにあるのはいわゆる論文ベースの性能であり、実用化スケールでこのままの性能が出せるということはまずありえない。そのような中で、分子分離膜で実用化している数少ない膜として、宇部興産のポリイミド膜が知られる。これは非常にすぐれた膜であり、かなりの企業努力を重ねて実用化されたものと推測される。



図 3-3 無機分離膜の種類と特徴

最近の無機分離膜の種類と特徴を図 3-3 にまとめた。これを見ると、緻密膜としては金属膜(水素溶解拡散分離)やペロブスカイト膜(酸素イオン透過分離)、シリカ膜(分子ふるいならびに修飾)、ゼオライト膜(吸着)、炭素膜(分子ふるい)などが挙げられる。また、新しい無機材料を用いた分離膜としては、MOF(Metal Organic Framework)・ZIF(Zeolitic Imidazolate Framework)膜は金属と有機の構造体の配位結合で形成される多孔性物質からなる分離膜で注目が集まるものの一つである。MOF は吸着剤としても最近注目を集めている。また、カーボンナノチューブ膜や酸化グラフェン膜も理論上は性能が高いということで注目が集まっているが、結晶空隙を埋める手法が難しいため大面積化して選択性を上げるのが難しいようである。

高分子膜の最近の動向としては、水素製造や CCS(Carbon Capture and Storage)などの政策に絡めて水素・ $CO_2$  分離膜の開発が盛んである。TR(Thermally Rearranged)ポリマー膜や、PIM(Polymer of Intrinsic Microporosity)膜は、無機膜並みの多孔性を有しながら優れた気体分離性能を有することが知られている。他には高分子材料にアミン基などの塩基性物質を複合化させた促進輸送膜や、高分子材料にナノ粒子などを複合化させた Mixed Matrix 膜などが知られる。促進輸送膜は RITE などで  $CO_2$  分離を対象に開発されており、また PIM 膜と Mixed Matrix 膜を組み合わせた例としては、首都大学東京の川上らのグループが、PIM 膜の表面にナノ粒子を分散させて世界最高レベルの二酸化炭素分離性能を達成しており、緻密な分子設計が可能になってきている。

次に私が気体分離膜、分子分離膜で感じている壁というのを幾つか挙げたい。「分離」 というのは新しい技術ではなく、蒸留や吸着といった先行技術があって、他の方法でもで きるというのがまず一番の大きな壁である。膜しか分離技術がなければ膜が採用されるが、 既存技術に対して圧倒的に勝っていかないと採用されない。

もう一つ、気体分離については、市場が水処理より大きくないために、企業側のモチベーションを上げるのが難しい。そういう意味では、現在の水素社会に向けた動きというのが追い風になりうるし、CO2の排出抑制というのは国の政策が必要だろう。

さらには、需要と膜の能力の不一致が挙げられる。膜の駆動力というのは主に圧力差だが、分離したいものが必ずしもガス圧力を持っているわけではなく、それに圧力をかけようとするとコンプレッサーを使うこととなる。水処理などの液体の圧縮では、コンプレッサーはそれほどエネルギーを消費しないが、ガスの場合はそこで非常にエネルギーがかかる。したがって、膜の性能が足りなくてコンプレッサーを使ったりすると、それだけで既存技術に負けてしまう。

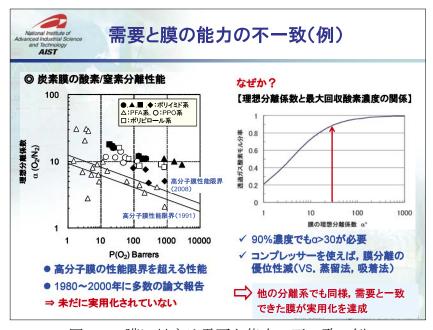


図 3-4 膜に対する需要と能力の不一致の例

ここで需要と膜の能力の不一致例として一つ例を図 3-4 に示す。私は炭素膜の研究をしているが、そもそもなぜ炭素膜が注目されたかというと、酸素と窒素の分離で限界線を超える膜というのは今までなかったが、炭素膜が唯一、これを超えられるということで非常に注目を集めた。しかし、まだ実用化には至っていない。空気は 21% の酸素を含むが、そこから 99% の酸素を得ようとすると膜の性能は分離係数で 100 以上が必要となる。90% でも分離係数 30 が必要である。炭素膜は高分子膜よりは分離係数が高いが、結局、性能限界があって分離係数 100 という数字は出ない。ならば二段分離にしてコンプレッサーを使えば濃縮はできるが、そうすると、深冷分離や PSA に負けるということで、結局、実用化されていない。

同様のことが、CO<sub>2</sub>分離においてもいえる。CO<sub>2</sub>の主な排出源として、排ガス、天然ガス、バイオガスがあるが、圧力としては常圧かすごく高圧かのどちらかで、膜分離が有利な状況ではなく、どの分離方法でも欠点と長所があって決め手に欠けるというのが現状である。つまり、他の分離法を考慮しつつ、需要と膜の能力をマッチングさせることが重

第

### 要である。

もう一つ、膜に期待されるところとして反応分離というのがある。今、検討されているのが脱水素、脱水反応である。この反応に対して反応速度と透過速度のバランスを考えたり、温度を考えたり、触媒等々でまた高温になってくるとシール技術といったところを考える必要がある。今後バイオマスを原料とする反応に膜を適用するということになってくると、酸化反応とかが新しいターゲットになると思うので、このあたりに膜が使えればおもしろい。

また、分子分離の難しいところとして、分子の分離なので欠陥だったり、シールだったりというところの難度が水処理等々に比べて非常に上がる。図 3-5 に、欠陥の存在が膜の分離性能に与える影響を試算した結果を示す。

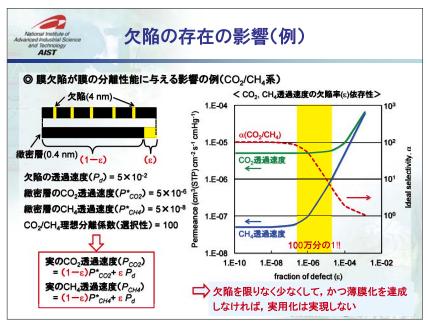


図 3-5 膜における欠陥の存在の影響

これは、バイオガス分離( $CO_2/CH_4$ )を想定した計算であるが、バイオガスから 99% のメタンをとろうと思ったら分離係数 100 の選択性が要る。私の膜は 0.4~nm ぐらいの孔の膜だが、そこに仮に 4~nm の径の欠陥があったとする。膜中の欠陥の割合(欠陥率)が増えてくると、4~nm というのは水処理では全く問題にならない孔だが、気体分離では、欠陥率が  $10^{-6}$  より大きくなったときには性能が出なくなる。つまり、膜に対して 4~nm の欠陥を 100~分の 1 以下にしなければならないということであり、これが非常に分子分離で大変なところで、材料研究者が片手間にトライして成果が出るという世界ではない。

最後に、高圧ガス法規の問題である。せっかくニーズが高圧にあるものに対して研究を したいと思っても、法規で10気圧が壁となる。この壁は非常にもったいなくて、ここに かかる煩雑さによってもなかなか研究の手が出せないという現状がある。

このような気体分離用の膜材料の状況は、私の開発している炭素膜でも同様であり、先に示した通り、分離性能は高分子膜よりも高いけれど、実用化できていないのが現状である。そこで、私は実用化の課題が、製造コスト、モジュール化、用途開拓の3点にあると考え、実用型の炭素膜の開発と炭素膜の特性を活かした用途開拓に取り組んできた。現

在まで、産業界との連携の経験や NEDO プロジェクトなどを 10 年近く獲得できている 状況を考えると、実用化にはまだ道のりはあるけれども、この方針は間違っていなかった と考えている。

実用型の炭素膜の開発における産総研の成果の特徴は以下の2点である。まず安価な材料であるPPOから初めて高性能炭素膜の開発に成功し、中空糸膜という形状でこれを実現したことで、膜コストの大幅カットが可能になった。そして、中空糸炭素膜の課題であった「脆さ(機械強度の弱さ)」について、柔軟性の高い炭素膜を開発したことで、膜モジュール作製時の破損が大幅に減少した。これらの成果が認められ、現在膜メーカーと共同で製品化に取り組んでいる。



図 3-7 産総研での炭素膜に関する取り組み

第

一方、用途開発においては、競合する既存技術や高分子膜の性能を考慮し、「炭素膜でしかできない、あるいは炭素膜だけが優れている」という分離対象に絞って開発を進めてきた。図 3-8 の左に炭素膜の透過特性を、高分子膜と比較した図を示しているが、炭素膜は分子ふるい能によって、非常に高い選択性を示すことが特徴である。この点を踏まえて炭素膜の適用可能性が高い分離対象を図 3-8 の右に示した。この中のいくつかの分離系はプロジェクトで検討実績があり、現在は SIP プロジェクトにおいて、水素ステーション用の有機ハイドライドからの水素分離を検討中である。多様な分離系において、炭素膜の省エネ性が高いことは試算結果として得られているので、直近の課題として、膜メーカーと共同で大型モジュールを作製することに注力しており、ユーザーサイドで評価いただき、実績を積んでいきたいと考えている。

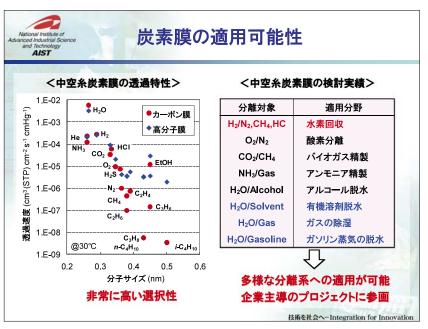


図 3-8 炭素膜の適用可能性

最後に、新しい技術として「膜分離」を導入してもらうためには、安心・安全・安価の3つが必須であり、膜分離には実績が不足していると感じている。すでに他の分離技術があり、お金とエネルギーを大量に使えば「分離はできる」という現状を考えると、膜分離の最大のメリットは「省エネ(ランニングコストの低減)」にあることを強く意識する必要があると思われる。気体分離において膜分離技術の社会実装を考えるのであれば、材料開発に限らず、プロセスまでを俯瞰した幅広い研究開発が必要である、産学官の連携が不可欠である。

#### 質疑・コメント

- ・膜と他の技術との競合の点では、既存技術が強いケースが有るとは思うが、前提条件次 第ではないか。例えば CO<sub>2</sub> とメタンの分離の場合、もともとは少しの CO<sub>2</sub> を分離すれ ばよかったが、CO<sub>2</sub> のほうがどんどん膨らんできて、そうすると分圧が高くなって膜 分離のほうがいいというようなケースが出てきている。PSA もよく使われているが、 大きな分子量のものが入ってくると抜けないという問題がある。量産化の方策は必要だ が、良い膜が作れたら、結構、用途はあると感じる。
- →そのとおりである。ただ、企業とかなり議論してきたが、それなりのスケールができて からと言われる。ラボレベルでできただけだとなかなか使ってもらえない。そこで、コ スト度外視で処理量も度外視で、性能だけ実証するようなモジュールを作り、皆さんに 使ってもらえるものをつくって、試してもらうのが良いと考える。
- ・高圧ガス法規についてはどう考えるか。
- →もう少し手続を簡便にしていただきたい。安全性はもちろん大事だが、手続に半年以上 かかっているような状態では研究にならず、国際競争上も極めて不利を強いられている。
- ・石油の場合にかなり高付加価値のものを抜く場合、膜は地下や海洋でもうまく分離ができるというのが一つの強みのような気がする。そうすると、要らないものまで地上に持ってくる必要がない。そういう可能性はあるか。
- → PSA の欠点はエネルギーを食うというのに加えて、スペースをとるというのが大きな問題だ。洋上の天然ガスの分離のようなケースだとコンパクトさを活かして膜分離を採用しようという動きもある。
- ・膜分離の駆動力は圧力のケースが多いが、電力や磁力を駆動力とする可能性はあるか。
- →まだアイデアレベルだ。コンプレッサーで電力を消費するくらいだったら、それを駆動力に使ったほうがいいのかもしれない。ただ見通しのある結果が出ているというわけではない。

第

## 超臨界流体を用いた分離の科学技術と諸課題

猪股 宏(東北大学工学研究科 超臨界溶媒工学研究センター)

超臨界流体は臨界点を超えた高密度の非凝縮性流体で、さらさらとした液体、浸透性はガスに近いイメージで、水と CO2 が最も利用され、最近はその他の流体が使われつつある状況である。臨界点は気体と液体の区別がつかなくなる点である。固体、液体にもあるだろうが、非常に高圧で識別されていないと思う。相転移の視点からすると臨界点は無限小の幅の相転移が発生する点である。気体と液体が一致する点なので潜熱や相転移の幅がないと考えると、エントロピーや物性にとって非常に特異な点である(図 4-1)。

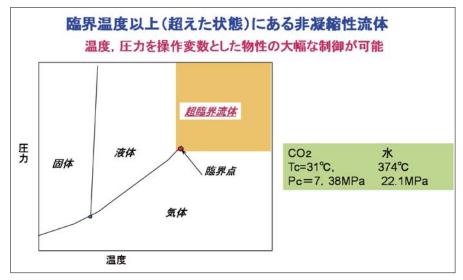


図 4-1 超臨界流体の定義

表 4-1 に示すように、超臨界流体の密度、粘度、拡散係数などの物性は、気体と液体の間にある。密度は液体寄り、粘度、拡散係数は気体寄りなので、さらさらしている。これが動粘度にあらわれており、動粘度は気体の 1/10 が液体、さらにその 1/10 が超臨界流体で、非常に滞留を起こしやすいという流体となる。また、界面張力は界面がないので基本的には非常に小さいく、物質がすごく細かいところに入り込む界面応力は考える必要がない。

表 4-1 超臨界流体の物性の特徴-気体、液体および超臨界流体の物性値

物性	気体	超臨界流体	液体
密度 [kg/m³]	0.6~2	300~900	700~1600
粘度 [10 <sup>-5</sup> Pa•s]	1~3	1~9	200~300
拡散係数 [10-9 m²/s]	1000~4000	20~700	0.2~2
動粘度 [10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s]	100	1~10	10
界面張力 [mN/m]	~0	~ 0	20~70

超臨界流体を分離プロセス、分離工学の分離溶媒として考えたときの特徴を図 4-2 に示す。ゼロ界面張力に近い、潜熱に比較して小さくプロセスにおける状態変化に伴うエントロピー値は非常に小さい、Enhancement Factor は理想気体と比べるとかなり大きく他の操作との複合化が容易である。晶析においては、通常、過飽和度を温度などで調整するが圧力操作で制御できる。圧力の伝搬速度は非常に速く、温度や物質の混合と比べるとはるかに均質性が高く、低粘度であるためマイクロ流路にも適した流体である。また、 $CO_2$  や水を使う場合、安全・安心な溶媒といえる。

- ・ゼロ界面張力
- 潜熱に比較して、小さなΔH
- Enhancement Factorが大きい
- ・他の操作の複合化が容易
- ・晶析の過飽和度を圧力操作で実施 ー伝搬速度が大、伝搬の均質性が大ー
- ・マイクロ流路に適した流体(低動粘度) ー低圧力損失ΔP
- 安全 安心な溶媒

図 4-2 分離溶媒としての超臨界の特徴

超臨界流体は装置、初期の設備投資が高いため、これまで脱カフェイン、サプリメントやフラグメントの抽出など、非常に高付加価値のあるものの分離に使われている。CO2では化学的安定性、無害、無極性ということで無極性有機溶媒(例えばヘキサン)の代替として使用する動きがある。また、エントレーナ添加を併用して、サプリメントや薬の前躯体などの経口物質等(食品、化粧品、医薬品)の選択的抽出で実用化されている割合が高いと思う。しかし、超臨界流体本来の特徴的物性制御性を利用したものは少ない状況にある。図 4・3 は研究室の典型的な超臨界の CO2 を使った抽出装置を示す。ガスボンベ、ポンプがあり、抽出、減圧をして分離する。例えば、青、黄、赤で示す固体抽出をする場合、セルに入れて抽出すると、超臨界と溶質成分の選択性に従って、選択性が高い青に続いて黄、赤が溶出される。ここで抽出を止めたら 100%の濃縮ができるものではなくやや濃縮という形になる。本来は目的成分の濃縮が達成できれば理想的であるが、実際は難しいのが現状である。

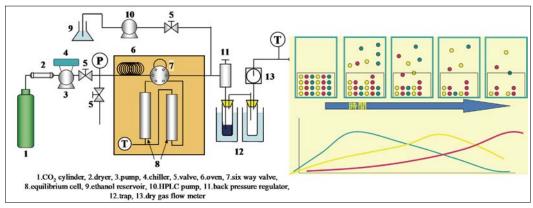


図 4-3 一般的な超臨界 CO2 抽出装置

第

固体の溶出、超臨界流体中でどのくらい溶解するかを、熱力学の式で図 4-4 に示す。溶解度は蒸気圧項と親和性の項で示される。親和性の項は圧力補正があり圧力が高いほど溶解度は大きくなり、温度が高いほど、蒸気圧、昇華圧の項が高くなるため、高温・高圧ほど大きいことになる。

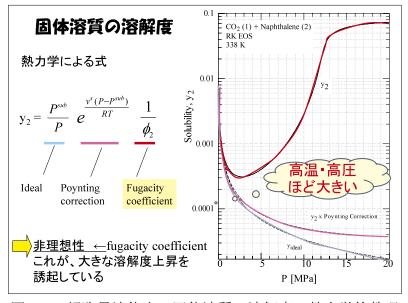


図 4-4 超臨界流体中の固体溶質の溶解度の熱力学的整理

ある物質を熱変性が心配されるため、約  $40^{\circ}$ C、圧力 25MPa(250 気圧)あるいは 50 MPa で  $CO_2$  抽出する場合、例えば固体材料を  $CO_2$  に入れて抽出する、 $CO_2$  に精油成分を溶かす場合、50MPa、 $40^{\circ}$ Cでは  $CO_2$  の比重が 1 を超えるため重くなるので、溶かすというより押出し効果になり、収率は上がるが選択性は悪くなる(図 4-5)。欧州でホップのエキスを取る場合、圧力を 50MPa 程度にして全部分離するため、いろいろなもの全手が分離・抽出される。従って、流体を装置の上側、下側から流入させた結果が異なる。物性や相状態を考える必要がある。

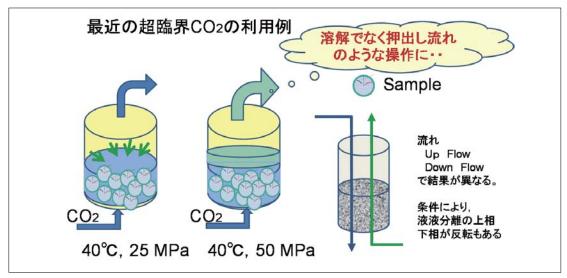


図 4-5 最近の超臨界 CO2 利用例

溶媒を選定するパラメータとして、ポリマーなどで使われる SP 値(Solubility Parameter)がある。図 4-6 に示すよう常温の条件で SP 値を溶媒としてプロット、ヘキサン、クロロホルム、アセトン、メタノール、水の順番になる。図 4-6 には  $CO_2$  の計算値を示している。

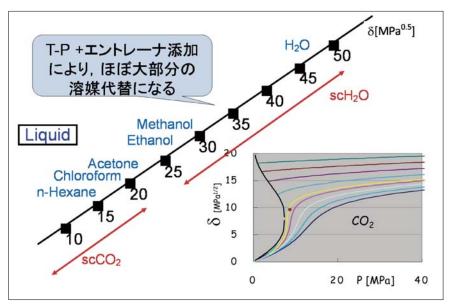


図 4-6 溶媒特性の制御性:溶解度パラメータ SP値(溶媒選定の指標)

溶媒でヘキサンとアセトンを混ぜる場合、滴定のように1滴を均一に、また、大量に扱うとすると非常に難しいのに対し、CO2の超臨界であれば圧力制御ができ伝搬性や均質性が非常に高いため、適正な操作をすることで、図 4-3 に示した分画の特性を図 4-7 に示す点線のようピークが立った形で、効率向上が見込めると考えている。

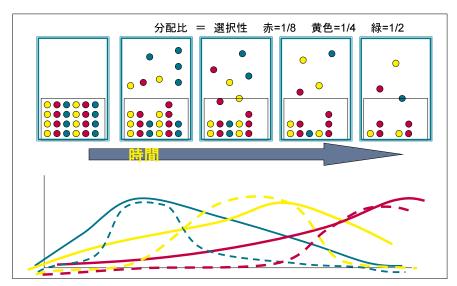


図 4-7 超臨界抽出による分画の可能性

但し、課題は選択性が足りない場合には、選択的抽出のために、抽出操作に精留操作による一部液化還流させて選択性を向上させることも想定される。超臨界の抽出セルは蓋を開けて固体を入れる回分操作となる。歩留まり向上を狙うためにセルの切り替えをするにも限界があり、超臨界流体を分離の適用に壁がある。連続操作ができればいいと考えている(図 4-8)。<機械工学との連携が不可欠>

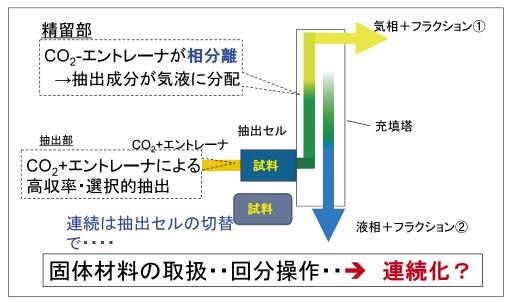


図 4-8 超臨界流体抽出-精留プロセス(選択的分離・分画)

図 4-9 に示す超臨界クロマトグラフィでは、ガスクロマトグラフィと液クロマトグラフィの中間のようなシステム、カラムは液クロカラムが使われている。ガスクロのキャピタリーカラムが使えれば、分画性能が向上すると思う。耐圧性や流動抵抗の課題があるが、材質変更で耐圧性を高めたり、細くして溶媒の液クロで圧力勾配を利用できるようになると、迅速で高分解能のクロマトグラフィが可能になると思う。マイクロ流路の適用でその可能性が高まると考えている。但し、1ml/分の分析を行なう超臨界クロマトフィでも、高圧ガス製造設備となり大型の装置と同じ届出、手続きが必要となる。

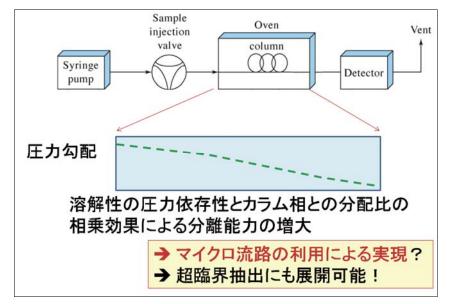


図 4-9 超臨界クロマトグラフィによる分取・分画(所要時間短縮、分離性能向上)

さらに、図 4-10 に示すようにゼロ界面張力に近い溶媒を液体から気体にする蒸発では 界面応力はほとんど発生しない。蒸気圧線上で赤線のような操作により木材を乾燥する場 合は、均質相経となりほとんど縮まないことになる。これは、多孔質材料の開発などに適 用できると考えている。

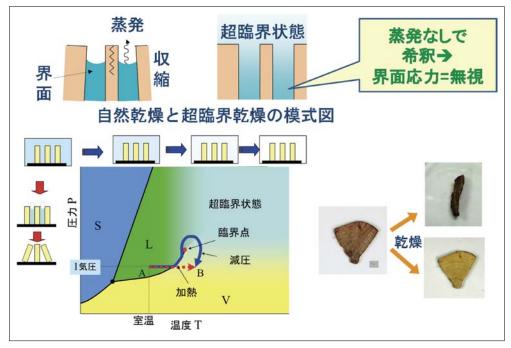


図 4-10 界面張力の利用:洗浄-乾燥(脱溶媒)-鋳型除去

図 4-11 はナノポーラスシリカの例で、ナノポーラスシリカのテンプレートを超臨界状態で除去し、その後、別の物質を表面に担持すると、きれいに放射状の孔が空き金属微粒子を担持できる。触媒製造や膜素材に触媒を担持するといった複合化が可能になると思っている。

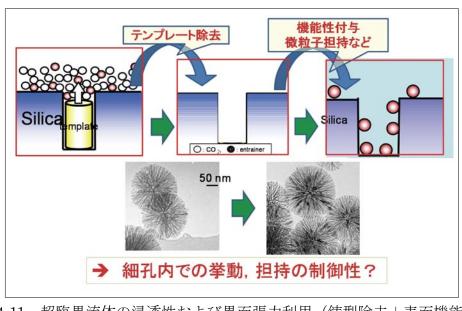


図 4-11 超臨界流体の浸透性および界面張力利用 (鋳型除去+表面機能化)

複合化の例としてイオン液体と超臨界が考えられる(図 4-12)。ほとんど蒸発しないものに  $CO_2$  を入れると、超臨界の特徴の高い浸透能力を利用し、高粘性のものを低粘性化したり、反応と分離のハイブリッドで効率化することができる。物性に立脚した分離プロセスの複合化、高度化ができると思っている。また、晶析操作で、固溶体を原料として共晶形にして相分離をする場合に、温度ではなく速い圧力伝播を利用し、均質的な浸透構造を作ることができ、材料の開発で応用できると期待している。

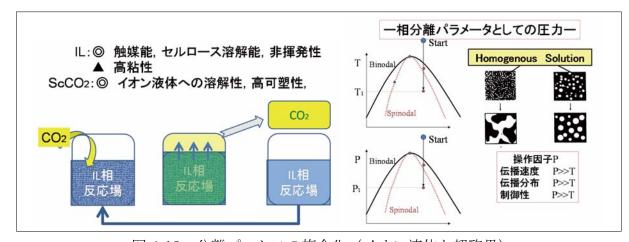


図 4-12 分離プロセスの複合化(イオン流体と超臨界)

超臨界流体の課題として連続的な高圧処理があげられる。ベルトコンベヤーを用いた一連の操作で、1 気圧から高真空にして半導体製造が行われている。これを逆に加圧し、超臨界で減圧する一連の操作が連続的にできるようになると、処理単価やプロセス製造コストが安くなると思っている。それには、化学工学だけではなく機械工学との融合がなければいけない。また、共通課題として物性データ充実させ安全装置をきちんと設計することで、高圧ガス保安法で特例を認めて頂くことができるようになればいいと思っている。

#### 質疑・コメント

- ・コストに見合うアウトプット考えると超臨界はおもしろいと思う。特に海外で80%は キラル分離にSFC (Supercritical Fluid Chromatography、超臨界流体クロマトグ ラフィ)が使用されているので、他では代用できない強みがあると思っている。医薬品 化合物を合成した方が分析精製するよりは結構な労力を要する。全自動で速い分析は、 創薬やドラッグデザインに専念できるという効果が大きいので、省力化や高速化進めて いくのも一つのアウトプットと思う。超臨界をクロマトグラフィで見たときに、ある程 度流速を上げても分離度が基本的にはほぼ低下しないという利点を最大限利用するため に、マイクロリアクターを使用することもできると思う。薬物同位体の抽出、前処理分 野でも便利だと思うので、超臨界だけではなく、是非一緒に出口を考えたい。
- →濃度が非常に薄いものを濃縮する前処理に適用できると思う。自然対流しやすい特徴を 生かし、薄いものを濃くするように循環、濃縮して、次にインジェクションする超微量 成分の分析を考えたい。
- ・プロセス効率化の視点で、分離膜と超臨界、超臨界と吸着剤の組合せが考えられる。超 臨界と多孔材分離膜の研究動向はどうか。
- →余り例はない。超臨界では溶出濃度が非常に薄い。例えば、生理活性物質はそれ程多くなく、これを分離しようとすると後段で吸着をすることが多い。膜では高圧という駆動力が基本的にあることから、ガス分離と溶出操作を分けることも考えられる。
- ・超臨界流体としては水と  $CO_2$  が着目されている。超臨界は低分子の溶解性は高いが高分子は難しいと思われる。水とアルカンを混ぜるなどエントレーナを添加し混ぜることで、途中の溶解パラメーターが埋まる現象、溶媒として例えば NMP (N-methylpyrrolidone、N-メチルピロリドン)に匹敵する溶解性が出る可能性について、安定性も含めて議論できればよい。
- → NMP は是非検討したいと思っている。CO₂ はと四重極があり極性分子との相互作用も期待できるし、水素結合供与性と受容性の物質を混合した場合には固液での共融点のように、各々の純成分とはかなり異なる特性を示すことがあり、同等ではないが NMP のような挙動を示すことも期待できるので、そのような組合せも是非実施したいと思う。
- ・メタノールと CO の混合系の臨界点は、それぞれの臨界点の単純和にならない。臨界点で高いピークを描く場合があるが、臨界点近傍の物性予測は進んでいるのか。
- →天然物や高分子は予測が難しいが、本日示した物質であればほとんど予測できる。
- ・金属の酸化物、塩化物、炭酸塩などの無機物で、超臨界流体に溶けるものはあるのか。
- →単体では難しく、金属もキレートの側鎖に超臨界に親和性のあるようなテールを付ける と溶けるが、溶解度はそれ程高くない。
- ・超臨界と晶析のハイブリッドでは、多成分系の相図の理解が重要だと思う。推算での超 臨界流体中の多成分系の相図などは、どの程度整理されているのか。
- → 1% 程度が混合された場合で、今回示した物資であれば推算は可能な状態である。純物質のデータが不足していると困難だと思われる。エラーバー大きく見ることが必要で、非常に非理想性が高いものであれば、エラーが大きくなる可能性が大である。

### イオン液体・超臨界流体技術における相平衡に関する研究動向と将来展開

下山 裕介(東京工業大学大学院理工学研究科)

イオン液体と超臨界流体に関して、分離技術の基盤となる相平衡に関する研究動向と、 今後の研究開発の視点について提案したい。

イオン液体はいろいろな技術に使われており、相平衡という基礎的知見が必要であう。 図 5-1 に示すようにイオン流体は有機系のカチオンと無機系のアニオンが組合わさり、且 つ、室温付近で液体状態の液体である。イオン流体はカチオンやアニオンの種類を変え、 最適化することで、液体が持つ溶解性、拡散性を制御すると室温付近で極めて低い蒸気圧 となる。プラスとマイナスのカチオンとアニオンのイオン液体で、温度 180℃、圧力 100Pa といった極めて低い蒸気圧を示すことがわかっている。

イオン液体は、分離溶媒としては CO<sub>2</sub> のガス吸収溶媒、膜材料として CO<sub>2</sub> 透過分離、水溶液からの金属抽出、芳香族や環式炭化水素の分離、液体クロマト移動相の添加物として分離効率向上させるものとして使用されている。材料の観点では、蓄電池、太陽電池、燃料電池などの電解質液あるいはポリマーなどと組合せ、ゲル化して膜として使われている。最近は、シリカやゼオライトにイオン液体を担持あるいはコーティングしてイオン液体自体を触媒として用いた有機合成などの報告がされている。

## <イオン液体 (Ionic liquid)>



- ✓ カチオンとアニオンから構成される液体状態の溶融塩
- ✓ カチオン・アニオン種により、溶解性・拡散性をコントロール
- ✓ 室温付近において、極めて低い蒸気圧(10<sup>2</sup> Pa at 180°C)\*
- 分離溶媒: CO<sub>2</sub>ガス吸収, CO<sub>2</sub>透過分離, 金属抽出(水処理)芳香族/環式炭化水素分離液体クロマト移動相への添加物
- ▶ 材料開発:電解質液(膜),イオン液体担持触媒

\* Thermochim Acta 439 (2005) 158 - 160

図 5-1 イオン液体における相平衡

イオン液体の技術と相平衡の関係を整理した。蒸気圧が低く溶媒ロスを低減する目的からガス吸収で、現在、使用されているアミン水溶液などにかわる吸収溶媒として期待されている。カチオンやアニオンを変えて $CO_2$ の高い溶解性を示すものを探索、アミン水溶液と混合する研究もおこなわれている。図 5-2 に分離溶媒としての利用について示す。イオン液体は非常に高い粘性で、 $CO_2$ の拡散性、物質移動という観点ではマイナスの印象があると思われる。さらにイオン液体は非常に高価で20万円/kg程度と言われており、大量に使う吸収プロセスへの適用はコストがかかると言える。しかし、ガス吸収プロセス

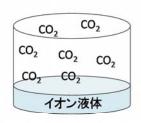
分離工学イノベーション

を念頭にした基礎研究では、イオン液体に対する CO2 溶解度の知見が必要となる。

ガス吸収プロセスにおけるイオン液体による  $CO_2$  分離の方法として、膜透過があげられている。アルミナやゼオライトなどの多孔質の孔内にイオン液体を支持、担持する方法とイオン液体自体を親和性の高いポリマーと混合し、多孔質のポリマー膜にイオン液体を含侵させるとゲル化する方法の 2 種類が報告されている。イオン液体の膜分離は、ガス吸収法に対してイオン液体の使用量を大きく低減できるメリットがある。多孔質内に担持されたイオン液体に対する  $CO_2$  の溶解度、イオン液体単体、純成分ではなくポリマーと組合わせたイオン液体ゲルに対する  $CO_2$  の溶解度などの知見が必要になり、相平衡、基礎知見が重要となる。

## ▶ CO₂ガス吸収

- >> CO<sub>2</sub>の溶解度により、カチオン・アニオン種を 選定 <sup>1,2</sup>
- >> イオン液体+アミン水溶液での利用3
- >> イオン液体の高い粘性により拡散性の低下
- >> 高価格により吸収溶媒の大量供給が困難





ガス吸収プロセスの設計において

イオン液体に対するCO,の溶解度(気液平衡)

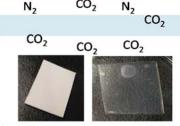
1. J. Chem. ID 473584 (2014). 2. Ind Eng. Chem. Res., (51 (2012) 8149. 3. Appl. Ene., 154 (2015)771.

## ▶ CO₂透過分離(膜分離)

- >> ガス吸収法と比較して、イオン液体の使用量を低減
- >> 多孔質膜の孔内にイオン液体を支持 <sup>1,2</sup> CO<sub>2</sub>
  - → アルミナ、ゼオライト、チタニア等を使用
- >> イオン液体をゲル化させた膜3
  - → イオン液体と親和性の高いポリマーを使用



イオン液体膜の設計において



CO,

高分子多孔質膜 イオン液体ゲル

多孔質内に担持されたイオン液体に対するCO2の溶解度イオン液体"ゲル"に対するCO2の溶解度

1. Sep. Purif. Tech. 122 (2014) 440. 2. J. Phys. Chem. C 117 (2013) 18434. 3. J. Membr. Sci. 497 (2016) 1.

図 5-2 イオン液体技術における相平衡:分離溶媒としての利用

第

イオン液体を材料として用いる方法とて、ゲル化させ太陽電池、蓄電池、燃料電池などの電解質液、や電解質膜として利用する研究もある。図 5-3 にイオン液体の電解質膜を作製するプロセスを簡単に示す。溶液中にポリマーとイオン液体を溶解、キャスティング、乾燥させて電解質膜を得る方法があげられる。材料作製するプロセスでは、溶媒に対してイオン液体とかポリマーがどのように溶解して均一相を形成させることが可能かといった基礎知見が重要になる。また、乾燥工程ではイオン液体、ポリマー、溶媒を含んだ多成分系の気液平衡の知見も必要となる。

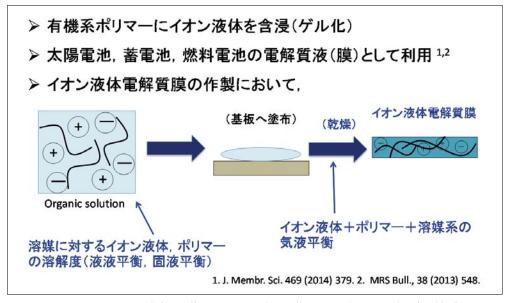


図 5-3 イオン液体技術における相平衡:材料開発(電解質膜)

上述の通り、イオン液体を分離溶媒、材料として使うということが報告されているが、そのプロセスや材料を設計する場合には、基礎的な溶解度や相平衡の知識が絶対的に必要となる。相平衡のデータを取得、把握する目標があると、まず、測定してデータを蓄積するアプローチが必要である。しかし、相平衡データの蓄積を目標とした場合、どのように測定するか、カチオンとアニオンの種類によって溶媒性質が変化するため、カチオンとアニオンの組合せを幾つか変えたり、温度を変える操作条件の影響も把握する必要がある。実験的にデータを取得して必要な相平衡を得ることは、時間的にもコスト的にも非常に難しいと言われている。そのため、理論モデルを構築し、得られた実験データと比較しながら理論モデルの適用性と精度を確認し、最終的に理論モデルから相平衡を予測する、目的とする溶解性や相分離を有するイオン液体のカチオンやアニオンを設計するアプローチが非常に効率よく、役立つと考えられる(図 5・4)。

分離工学イノベーション

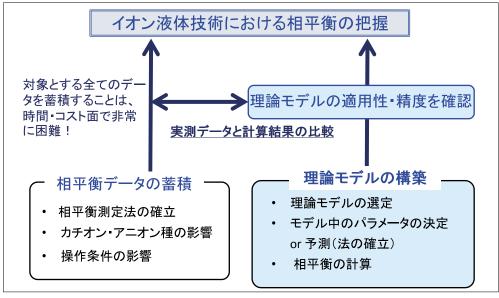


図 5-4 イオン液体技術における相平衡の研究

これまでのイオン液体の相平衡に関する研究を図 5-5 に整理して示す。気液平衡、液液平衡、固液平衡と分けて考えると、気液平衡でよく報告されているのがガス溶解度あるいは有機溶媒系の気液平衡である。特に、 $CO_2$  のガス吸収の分離溶媒として使うニーズがあり、 $CO_2$  に関する報告が多くある。アプローチとしては温度や圧力を変え、溶解性がどのように変化するかを検討している。

液液平衡では、液液抽出にイオン液体を用いる基本的なものから、水溶液との二液相、 有機溶媒との二液相などの報告がある。ここでは主に抽出となるため、それぞれの相に対 する分配における溶出種の影響やカチオンとアニオンの種類の影響などが検討されている。

固液平衡への適用として、糖類、金属類、薬物などの溶解しにくいものの溶解度が報告されている。ここでも、溶出種の影響やカチオン、アニオン種の影響を測定により実測データを蓄積するアプローチの研究が報告がされている。

#### <測定データの蓄積>

気液平衡: ガス溶解度 1,2, 溶媒系の気液平衡 3,4

>> 操作条件(温度・圧力)の影響

液液平衡: 水相との二液相系5,有機溶媒相との二液相系6

>> 分配における溶質種、カチオン・アニオン種の影響

固液平衡: 糖類の溶解度 7, 金属の溶解度 8, 薬物の溶解度 9

>> 溶質種、カチオン・アニオン種の影響

1. Acc. Chem. Res. 40 (2007) 1208; 2. Fluid Phase Equilibria 406 (2015) 10; 3. Fluid Phase Equilibria 354 (2013) 156; 4. J. Chem. Thermodyn. 87 (2015) 58; 5. J. Chem. Thermodyn. 91 (2015) 404; 6. Fuel Proce. Tech. 125 (2014) 207; 7. Fluid Phase Equilibria 403 (2015) 167; 8. J. Chem. Eng. Data 59 (2014) 726; 9. Fluid Phase Equilibria 356 (2013) 18.

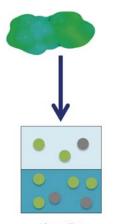
図 5-5 イオン液体系の相平衡に関する最新動向:測定データの蓄積

理論モデルでは図 5-6 に示す通り、気液平衡では圧力、体積、温度の関係を表す状態方程式を用いた熱力学的方法が主に報告されている。液液平衡や固液平衡では液相理論、溶液理論に基づくモデルが主流となっている。最近では、イオン液体のアニオンやカチオンの1分子を量子化学計算など用いて表面電荷を求め、その結果を熱力学的に組合わせることで相平衡を求めるアプローチも報告されている。この方法はカチオンやアニオン種、いろいろなカチオンやアニオンの組合わせを最適化するといったスクリーニングの方法に適用されている。

イオン液体系の相平衡に関する現状と将来展開として表 1 に纏めた。測定のアプローチと理論モデルのアプローチ、また、気液平衡、液液平衡、液液平衡として整理している。現状、気液平衡、液液平衡はデータの蓄積が進んでいる、理論モデルの構築が非常に活発化しているとして、二重丸(◎)、丸(○)、三角(△)で示している。固液平衡に関しは、まだまだデータも少なく、理論モデルの報告も少ない状況である。最も重要な項目は応用技術との関連性である。相平衡を測定する、相平衡を理論解析する研究は丸や二重丸としているように数多く報告されているが、実際に背景としている分離プロセスや材料開発に余りつながっていなのが現状である。測定データを取得する、計算をすることだけが目的になっている印象で、応用技術との関連をつけた相平衡研究のアプローチに方向転換する、さらに材料開発に必要な相平衡研究も充実させる必要があると考えている。

## <理論モデルの構築>

- > 気液平衡: 状態方程式
  - ✓ 圧力一体積一温度の関係を表す方程式
  - ✓ 分子会合の寄与を導入した修正モデル 1,2
- ▶ 液液平衡·固液平衡:溶液論
  - ✓ 分子表面電荷を利用した推算 3,4
  - ✓ カチオン・アニオン種のスクリーニングへ利用



- 1. Fluid Phase Equilibria 332 (2012) 128; 2. J. Chem. Thermodyn. 89 (2015) 41. <sup>(相平衡)</sup>
- 3. Fuel Pro. Tech. 126 (2014) 112; 4. Fluid Phase Equilibria 383 (2014) 134.

図 5-6 イオン液体系の相平衡に関する最新動向:理論モデルの構築

表 5-1	イオン液体系の相平衡に関する将来展開
表 5-1	イオン液体糸の相半衡に関する将来展開

	気液平衡 一分離溶媒一	液液平衡 一分離溶媒一	固液平衡 一材料開発一 一固体抽出一	応用技術との関連 (現状の課題)
測定	<ul><li>◎</li><li>(ガス溶解度)</li></ul>	(二相系)	▲ (糖類, 金属の 溶解度)	△ (種類・条件が限定) (相平衡測定のみが目的)
理論モデル	◎ (状態方程式)	△ (溶液論)	△ (溶液論)	× (汎用性, 適用範囲を重視) (相平衡計算のみが目的)

「応用技術」との関連づけた相平衡研究のアプローチへ 材料開発に必要となる相平衡研究の充実

図 5-7 に示すように、超臨界流体は抽出、晶析、乾燥など、主に分離溶媒として使われている。反応溶媒としても、CO2 膨張液体、水、超臨界メタノールがバイオディーゼルの合成などに使われている。ここではナノ粒子、多孔質材料、高分子複合体や薄膜といった材料創製プロセスにフォーカスして、必要となる相平衡の知見をピックアップする。超臨界流体の特徴は、臨界圧力付近で連続的に大幅に密度が変化することで、大幅に連続的に変化する密度変化を使って物質の溶解性、拡散性を制御することで様々な材料プロセスに適用している。

図 5-8 にナノ粒子の製造について示す。超臨界容体急速膨張法がナノ粒子あるいは薄膜の製造に最近は使われている。原理はまず、超臨界二酸化炭素の中に固体の溶質を溶解させ、固体中に溶出したものを一気に大気圧に噴射させてナノ粒子を精製したり、有機薄膜を作ることに適用されている。ここで重要になるのが超臨界二酸化炭素に対する固体の溶解度である。これは噴射過程における過飽和度の把握により、粒子サイズや結晶構造を制御することに関連するためである。超臨界乾燥は主にエアロゲルといったシリカや金属酸化物、最近ではカーボンエアロゲルの作製に使われている。界面がない状態で乾燥ができるので、物質がもともと持っている構造を壊さずに多孔質材料ができる利点がある(図5-9)。ここで重要になるのが、どの条件で気液平衡から均一相に変換するかという気液平衡に関する知識である。超臨界乾燥の過程では海面が下がるのではなく、界面自身が消えていくという状態で乾燥が行なわれる。

「分離工学イノベーション」ワークショップの趣旨説明

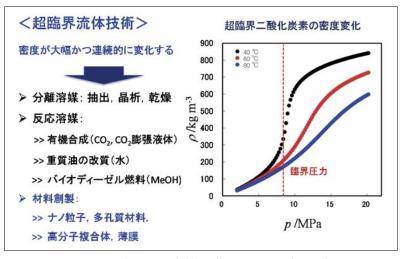


図 5-7 超臨界流体技術における相平衡

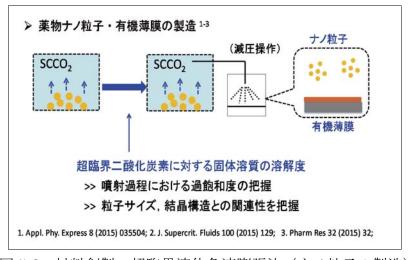


図 5-8 材料創製:超臨界溶体急速膨張法(ナノ粒子の製造)

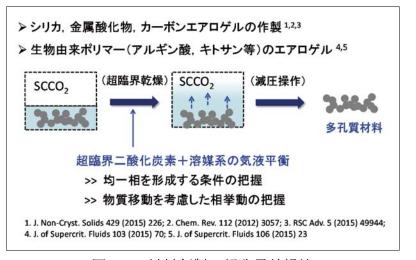


図 5-9 材料創製:超臨界乾燥法

最近、エマルション抽出法が注目されている。O/W エマルションを作り、超臨界二酸化炭素に接触させることによりエマルション中のオイルだけを抽出し最終的に高分子のナノ粒子を作る方法がある(図 5-10)。ここで重要となるのは超臨界二酸化炭素、エマルション系の気液平衡で、これを使って抽出条件を設定、最適化するアプローチになる。

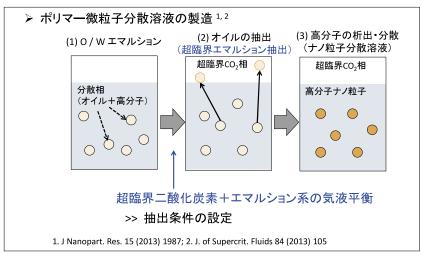


図 5-10 材料創製:超臨界エマルション抽出法

超臨界プロセスではバッチ操作となり連続化が難しいという課題がある。超臨界相と液相の二相系を扱う場合は、マイクロ流路内に液相と超臨界相が交互に流れるようなスラグ流を使い、連続プロセスへの展開も可能となると考えている。

超臨界流体のプロセスでも図 5-11 に示す通り、相平衡データの実験的なアプローチと理論モデルによる理論的なアプローチを並行して進めていく必要がある。測定データにおいては、気液平衡では分光法を取り入れ高圧下でオンライン測定する方法や測定時間を短縮する研究が多くなっている(図 5-12)。モデルでは、状態方程式を適用する、超臨界二酸化炭素に溶出が溶けている場合、クラスターを形成していると言われている会合体の形成に基づくモデルも提案されている(図 5-13)。

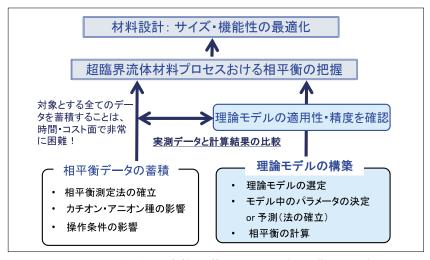


図 5-11 超臨界流体技術における相平衡の研究

#### <測定データの蓄積>

#### 超臨界二酸化炭素+溶媒系の気液平衡

- >> 近赤外, ラマン分光を取り入れた高圧下オンライン測定1,2
- >> 操作条件(温度・圧力)の影響

#### 超臨界二酸化炭素に対する溶解度

- >> 紫外可視分光を取り入れた高圧下オンライン測定3,4
- >> 測定時間の短縮・装置のコンパクト化
- >>操作条件(温度・圧力), 溶質種の影響
- 1. Fluid Phase Equilibr. 360 (2013) 265; 2. J. of Supercrit. Fluids 104 (2015) 221
- 3. Talanta 146 (2016) 789; 4. Fluid Phase Equilibr. 297 (2010) 155

図 5-12 超臨界流体系の相平衡に関する最新動向:測定データの蓄積

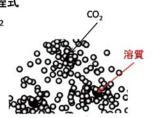
#### <理論モデルの構築>

#### 超臨界二酸化炭素+溶媒系の気液平衡

- ✓ 圧力一体積一温度の関係を表す状態方程式
- ✓ 分子会合の寄与を導入した修正モデル 1,2

#### 超臨界二酸化炭素に対する溶解度

- ✓ 状態方程式,溶液論に基づくモデル 3,4
- ✓ 会合体形成に基づく密度 5,6



1. Fluid Phase Equilibria 397 (2015) 1; 2. J. Supercrit. Fluids 96 (2015) 86; 3. J. of Supercrit. Fluids 90 (2014) 73; 4. Fluid Phase Equilibria 362 (2014) 11; 5. Fluid Phase Equilibria 375 (2014) 332; 6. Chem. Eng. Res. Des. 9 2 ( 2 0 1 4 ) 2734.

図 5-13 超臨界流体系の相平衡に関する最新動向:測定データの蓄積

超臨界流体の場合、気液平衡、溶解度ともに非常に測定と理論モデルが充実して研究されているが、実用的な応用技術との関連が薄いと考えられる。今後の展開として、イオン液体、超臨界流体ともに基礎技術は重要であるが、応用技術と直結して関連づけたアプローチへの展開が必要である。

#### 質疑・コメント

- ・イオン液体をきちんと定義して議論する必要がある。イオン液体は室温で溶融塩ですが 有機溶媒に溶かしたり、触媒上に担持した瞬間イオン液体ではなくなる。分離でバルク としてのイオン液体用いる場合はいいが、表面に固定したり、溶かすとそれを構成する カチオン、アニオンの各々の性質が効くため分けて考える必要がある。無機の溶融塩で は室温も含めてかなり長い歴史があり、相平衡などいろいろな議論されている。イオン 液体も歴史は古くどのようにお考えか。
- →バルク体と触媒に担持されたものは全く物質性も異なり、呼び方も分け方もわけるべき と言うことには私も賛成する。物性の面から見ても、バルク、ゲル、固体に担持したも のは大きく異なる。ただし、現状ではバルクの性質をそのまま使って設計されていると

思っている。

- ・応用が必要だと言うことだが、この技術のステークホルダーは誰になるのか。この学問 を高めていくことによる科学技術としての効果、企業の投資意欲が高まるなどの社会的 効果はどうか。
- →超臨界を使って材料を作る場合、プロセスを設計や条件を決める工程が必ず必要となる。 特に実用化する場合、超臨界の中が均一なのか、目的とする固体の溶質がどれだけ溶け ているのかなどの基礎的な知見が必要になると思っている。現状、基礎的な知見は大事 だと言われるが、基礎的知見から材料を制御できるということが少し不足していると 思っている。基礎技術と応用技術をつなげながら進めていくべきだと考えている。
- ・新しい技術を導入する、判断することに利用されると思う。利用することに見合うアウトプットをもっと明確にすれば、広がるのではないか。
- ・超臨界、イオン液体に限らず、産業界では日本のあらゆる科学の分野で実測データと理論の摺り合わせが不足していると考えられている。知財や著作といった問題をクリアした上でデータを扱え、そこに安心してデータを蓄積し、活用していくプラットフォームが必要である。米国ではプラットフォーム化を進めており是非、検討頂ければと思う。
- ・分離膜では、多孔体の中の液体はバルクと異なる実験データが多くある。イオン液体も 多孔体の中の物性はかなり異なる。固体なのか、液体なのか、それとも物性が変わると いったことが、シミュレーションや理論モデルの中にもあると最初の質問に対する答え になるのではないか。これらの現状、これからの発展についての考えを教えてい頂きた い。
- →シミュレーション手法として分子シミュレーションがあるが現在、バルクの液体の中の シミュレーションが非常に多くなっている。最近では、多孔質内やカーボンナノチュー ブ中での挙動をシミュレートする例もある。今後これらの例が増えていくことに期待し ている。
- ・価格は下がらないと言うことであるが、量産されればまた応用も開けるのではないか。
- →高いとは言われるが、最初の頃に比べ下がってきていると思っている。高い理由として 精製が非常に難しいことがあげられる。特に水分量を減らすことが非常に難しいと思っ ている。
- ・イオン液体は、測定、理論モデル、分離が実際の課題に対して関連付けができていない ということだが、現実の物質に適用できるようなレベルに各々の技術が達していない、 モデルとしても不十分だと言うことなのか。それとも研究者マインドが問題なのか。
- →モデルの能力不足もある。モデルを作り計算するだけではなく実測データと比較し、適 用性の評価が重要である。実測データも複雑な系や多成分系になると不足していことも あると思っている。
- ・昔の理論も個々のことを余り考えていなもの、プラス、マイナスしか考えないものが多いと思う。分子の個性を入れていくことはもっと難しいことになるが、理論モデルが塩化アルミニウムの系であればどのレベルで、適用できない課題は何かなどご意見を頂きたい。
- →溶融塩では、状態方程式を使い非常に広い範囲で計算できると言われている。イオン液体が大きく違うのは、完全にプラスとマイナスに分かれていないところで、解離乗数で考えると約4割程度がプラスとマイナス、その他は中性の分子で、既存モデルが使え

ない理由と考えている。

- ・溶融塩は濃厚塩なのでイオン対や三重イオン対になっていたりする。難しい電解質溶液 論であることは確かだが、イオン液体ならではの分子の形といった問題もあると思われ る。
- ・用途で大きいところはポリマーで、CO2の超臨界を使ってポリシーであればスピノル バルンカンあるいは発泡とするなどの判断もできると思う。産業上使用されているが、 データベースがないのでポリシーの系、アクリルの系、塩ビの系でも相当に強力なデー タベースになると思っている。

#### 高度セレクティブセパレーション - 晶析の発展 -

滝山 博志 (東京農工大学大学院工学府)

晶析は「結晶化を利用して物を分離する」ということで、本ワークショップの気体・液体と固体の中間にあたる。結晶性でしかも粒子群をつくるという性質を持っていることが他の分離の方法との違いである。図 6·1 に示すように、99.99%の高純度化に貢献するといったプロセスイノベーションに使うことができること、さらに、新規な物をつくるというプロダクトイノベーションにも使えるという点が、ほかの分離工学とは異なる部分である。

## 晶析(分離操作十粒子製造)

1:分離・精製-目的成分のみを<mark>分離</mark>

高度分離精製(有機物99.9%以上) 異性体分離(光学異性体分離、構造異性体分離・・・) 結晶多形制御 オイルアウトの阻止

**Process Innovation** 

2: 粒子群製造ー結晶性の粒子群として製造

単一分散結晶群製造(CV恒20%)

超微粒子製造

**Product Innovation** 





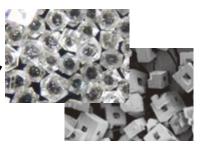


図 6-1 晶析の特徴 (シーズ)

晶析とほかの技術との接点を考えてみる。例えば合成の分野では、最後の精製課程で、再沈法とか再結晶法とかという名前がつけられ利用されている。固体材料を創製の分野では、アトマイジング法、水熱合成法などと晶析は呼ばれている。膜や膜の材料をつくるプロセスでも、精製段階で晶析法が使われているが、言葉が違う。このように合成や材料創製法における精製段階に、実は晶析というテクノロジーが隠れている。CRDSが提示した仮説には「プラットフォームが必要か」という項目があるが、晶析は使っている言葉が違うが利用されている分野は多くあり、プラットフォームは必要であると考えている。

晶析研究のボトルネックは、どこにあるかというと、晶析では溶液を蒸発させるとか、冷やすとかということで、常に非平衡状態で分離操作が進む部分である。例えばどこで結晶化が起きて、それが成長していくのかを考えて見よう。図 6-2 に示すように、現状での晶析、結晶成長研究は、対象としている結晶化現象が、何を推進力にしているかを議論する平衡論、そしてそれらの現象がどの程度の速さで起きているのかという単純な速度論に

第

関しては進んでいる。ところが、図 6-2 のように、ある混合物の溶液の中から純粋なものが析出する、結晶の核化現象が、いつどこで始まるかという核発生の理論と、結晶化が進んでいく際の溶液の状態が一体どこにあるのかという操作ポイントの軌跡については残念ながらまだよくわかっていない。核発生理論と測定技術がボトルネックになっていて、これがブレークスルーに通じる部分と考えている。

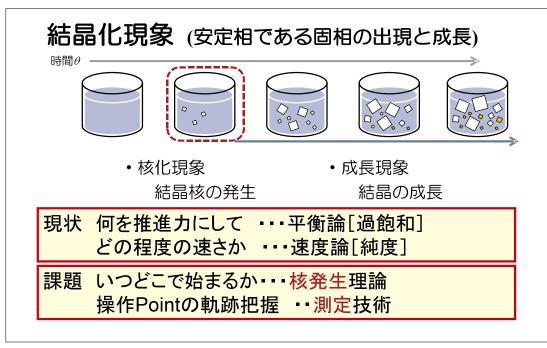


図 6-2 晶析研究の現状とボトルネック

図 6-3 は、晶析のニーズについて、299 社に対して化学工学会の晶析技術分科会がインタビューした結果であるが、例えば、品質上として純度で困っているとか、粒径分布で困っているとか、結晶の形状で困っているという問題がある。これに関しては、例えば、図 6-3 の下の図のようにマリモ様の結晶があったとき、今の技術であれば、ロット状の結晶

にするとか、プレートにするとか、プレートにするなど、ニーズがロートできるなど、ることがローションをは応える。 しょう アー・アン できるは応える。 いっか 安定性といないをできるが できるが できるが 研究のが といる といる といる といる といる できるが 研究のが かってある。

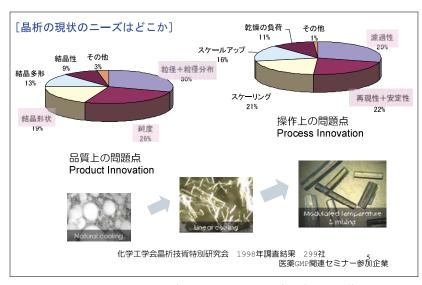


図 6-3 晶析研究の現状の問題点 (ニーズ)

晶析の展望を話す前に、 今の晶析の現状で最先端は どこにあるかを考えてみよ う。

図 6-4 は、硫酸マグネシウム MgSO4の相図である。縦軸が温度、横軸が組成になっている。これを見ると、硫酸マグネシウムの水溶液とはいえ、Bのあたりでオペレーションすると氷が析出してくる。 従って、MgSO4の水溶液から、氷

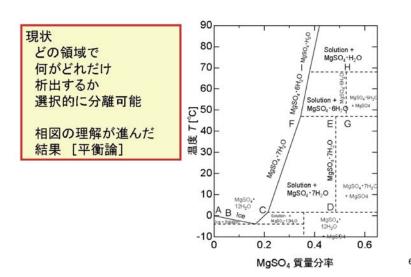


図 6-4 晶析による Selective Separation (シーズ)

を析出させて濃縮することは可能であることがわかる。では、ダイレクトに硫酸マグネシウムを析出させたいとすると、C-Fでは7水和物が析出し、Fの右では6水和物が析出することになる。すなわち、晶析の現状として、どの領域で何を選択して、それがどれだけ析出するかに関しては、このような相図の理解が進んだ結果として可能になっている。

もう一つ、操作ポイントの軌跡が、今どこにあるのか(相図上)ということが把握できれば、品質制御は可能であると言われている。例えば、図 6-5 (a) で、ある液を P 点から冷却して、S で核が発生すれば、その核が溶質成分を消費し始めるので、操作ポイントが相図上で左側に動くといった情報である。そうすると、結晶の推進力もわかることとなる(図 6-5 (b))。このように、操作ポイントの軌跡の把握が晶析では大事で、そこのブレークスルー手法の解決が最先端に対するチャレンジになる。

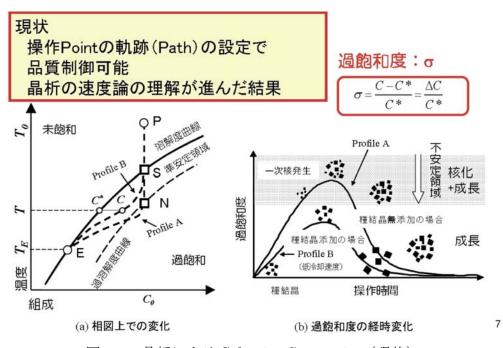


図 6-5 晶析による Selective Separation (現状)

第

ところが、困難な問題がある。結晶として固相を析出されるのが晶析であるが、実は図 **6-6** のように、

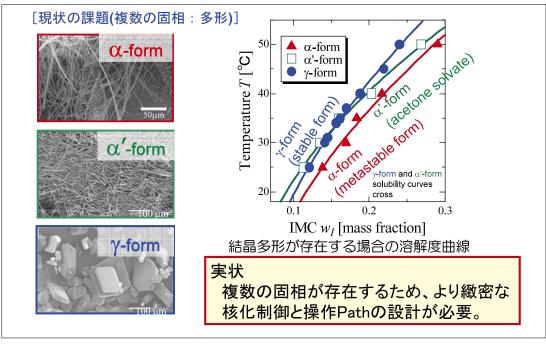


図 6-6 晶析による Selective Separation (実状)

結晶多形の問題があり、複数の固相が存在する場合がある。結晶多形の例としては共有結合のネットワークであればダイヤモンドとグラファイトという関係として知られている。図  $6\cdot6$  に示すのは、医薬品のインドメタシンの例である。分子構造は全く同じだが結晶のパッキングとして $\alpha$ 、 $\alpha$ '、 $\gamma$  という異なる状態が存在する。このように、物質としては全く同じでも、結晶のパッキングの状態が違うことが結晶多形である。この場合、相図は少し複雑になるので、同種の結晶を析出させようとすると、相図上で狭い領域を操作ポイントの軌跡を通さなければならなくなる。従って、複数の固相が存在するときに、より緻密にどこで核発生させ、どこを通すかという設計が重要になる。

もし、操作ポイントの軌跡に関する問題解決ができたときに、何ができるだろうか。例を挙げてみよう。有機物の場合、混合物の中からある成分を分離しようして推進力を与える、すなわち冷却や蒸発、あるいは第三成分を加えるなどの操作を行った場合、結晶ではなくてオイル化が起こるということがしばしばある。オイル化すると、結晶を析出させて分離しようとしても、濾紙の上には結晶ではなくオイルが存在するような状況になってしまう。これは、図 6・7 の相図のように、固液平衡の近くに液液平衡があるためで、分離できたとしても分離後の組成は CHまでとなってしまう。固体が析出していれば、組成はもっと高くなるはずである。では、どうすればよいかというと、固液平衡と液液平衡の狭い領域で、核発生を起こさせて、溶液組成を低組成側に移動させれば、今までオイル化して結晶化できなかった系からでも結晶化が可能となる。すなわち、今まで分離できなかったものから分離が可能となる。もう一つは核化の制御である。例えば図 6・7 の右図はタウリン結晶である。相図の中のどこで核発生させるかによって結晶形態が異なることがわかって

いる。すなわち、核化をうまく制御できれば、いままで存在が隠れていたあるいは知られていなかった結晶形態を創製することが可能になり、プロダクトイノベーションにもつながると期待できる。

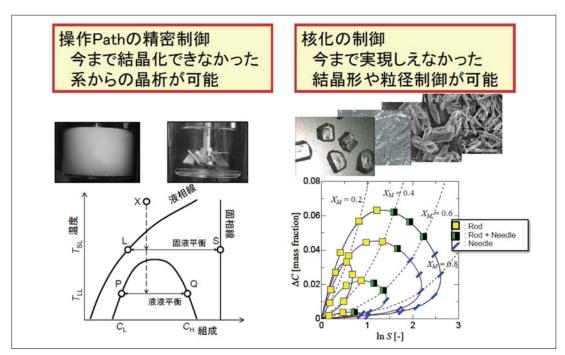


図 6-7 操作 path の設定で実現可能

海外の動向を紹介したい。晶析では大きな国際会議が 3 年に一度開催され、300 人以上の研究者が集まる。図 6-8 にはその国際会議で議論されたトピックスの 1999 年からの統計を示す。結晶多形に関する議論は青色で右肩上がりになっている。一方、緑色のFBRM(Focused Beam Reflectance Measurement)、これは数ミクロンから数ミリメートルの粒子群をそのままインラインで分析する装置であるが、これを使った研究が伸びている。また、FTIR(Fourier Transform Infrared Spectroscopy)によって過飽和度、溶液の状態をそのまま観察するという研究や、ラマン分光によって析出した結晶多形の分析に関する研究が伸びてきている。仮説 3 の「測定技術」では、晶析の分野だと PAT(Process Analytical Technology)と呼ばれる技術に代表されるその場観察技術が必須となっている。

核発生の測定あるいは利用技術、そしては操作ポイントの軌跡設計が新規に可能になると、次世代に実現可能な技術として、医薬品では共結晶というトピックスがある。共結晶というのは、ある複数の分子がある決まった組成で結晶化した状態である。例えば、ナトリウム、カリウム、塩素などのイオンが入っている溶液から食塩を結晶化させるのと同様な発想だとは思うが、夾雑系の中から単成分ではなく、複数成分をある決まった組成で結晶化させる発想は今までには無い。その手法が先ほどの相図の利用で具体化できるのではないかという議論もあり、結晶を使った分離工学のアプローチに大きな期待がかけられている。

第

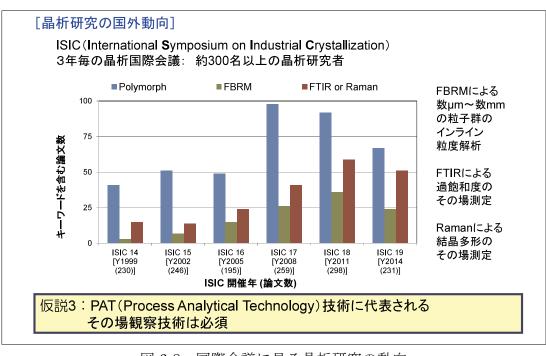


図 6-8 国際会議に見る晶析研究の動向

以上を総括しよう。結晶を使って分離する技術である晶析の場合、プロセスイノベーションとプロダクトイノベーションの両方に答えられるパフォーマンスは持っていると考えられる。結晶多形のような複数の固相系がある場合でも、核化と操作ポイントの軌跡を設計することで対応は可能であるし、夾雑系から複数成分をある組成で析出させるといったニーズにも対応が可能である。

研究領域としては、どこで相変化を起こさせるのかという核発生の理論、そしてその後、 どのような状態で結晶化が進んでいくかという操作ポイントの軌跡の把握などが、今後ま すます重要となると考えられる。すると、最終的には例えば夾雑物質系から未利用な資源 を選択的に分離するといった地球規模の課題にもチャレンジ可能であると考えている。

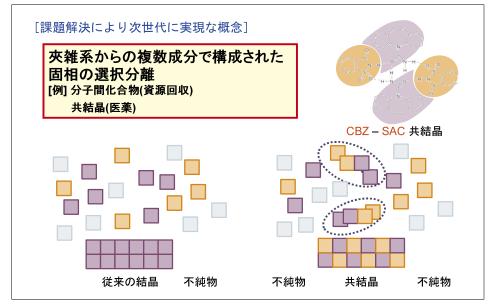


図 6-9 核化制御と操作パス設計で実現可能

#### 質疑・コメント

- ・最後のほうで「選択的な分離」といったが、広い意味で見たら、光学異性体の分離も考えられるだろう。今、バイオ医薬がふえているが、低分子の70%ぐらいがブロックバスターのうちのキラルだったと思う。今、創薬はスピードが重要なので、選択的にクロマトグラフィをとってくるより、こっちのほうが一回、当たればずっと繰り返しいけるわけで、これはすごくおもしろい。プラットフォームと言われたが、いかにしてスクリーニングをするかという第一段階と、それから、ファインチューニングするというのは、これは別に選択的じゃなくても一緒のことだと思うので、そこの部分をどれだけ高速化できるか、省力化できるか、個人差をなくせるかということだと思う。何かお考えがあるか。
- →例えば今、医薬品開発にはハイスループット化が望まれている。通常、合成した後の精製で、わざわざ、溶解度をとって相図を描くということは行わないが、現在の技術であれば相図を描くことも比較的簡単になっている。例えば L 体、D 体あるいは夾結晶の相図を描くというのは比較的容易になってきている。なので、そのあたりの周辺技術をわかりやすく示すとか、わかりやすい理論を発展させるとかを行えば、ハイスループット化が進むと思う。それができれば合成から製品まで、かなりのスピードで開発ができると思う。
- ・核発生の理論が重要で、いろんな分析手法とかが研究されているということだが、いろんな系がある中である一般的な理論を導き出すというのは難しそうに思う、どういうイメージを持っておられるのか。
- →今まで核発生というのは三次元の空間で、いつ、どこで起こるのかわからないということでディテクトが難しかった。ところが、晶析とは別の分野で、単分子膜 SAM (Selfassembly Monolayer)を使うことや、あるいはテンプレートを使って核発生させる研究がある。これらは、核発生理論の研究ではなく、例えば粒径分布を制御することに利用できるという展開を見越しているが、見方を変えれば、二次元の空間に結晶を起こすということで、非常に観察しやすくなっているとも捉えることが可能である。少なくとも深さ方向までは考えなくても良くなっているので、これを利用した研究が進むと、核発生が一体どういうメカニズムで進んでいるかがさらに解析できると思う。
- ・操作ポイントの軌跡のコントロールであるが、かなり精密に制御しなければいけないの かなと感じたが、どのぐらいのスケール、ボリュームでこういうものは可能なのか。
- →実際、今、PAT (Process Analytical Technology) 技術を活用する動きが活発であるので、 10 m³ ぐらいのものでもセンサーをセッティングして状態を監視、推定する技術は進んできている。今まさに研究が進んでいるという状況にあるので、それらの技術と合わせれば、精密なことは充分可能であると考えている。
- ・例えば装置全体をどんとやるのではなくて、部分、部分に応じて細かく制御するというようなことをやるのか。
- →マイクロリアクター的な話もさせていただいたが、晶析の分野でも小型装置を用いた連続化の動向があり、スケールアップもナンバリングアップで対応するという動きがある。 そう考えると、大型装置では難しかったことを、細かく制御するために、装置自体も小

第三部

型化して精密に制御するような方向性は充分に考えられる。

- ・上記の質問と関係するが、スピノーダル点のデータとかというのは、集められるのか。
- →今は難しいと思う。今回対象としているスピノーダル点は固液平衡の近傍にあるため、 液液平衡と固液平衡のどちらが先に達成されるかになり、速度論が関与してしまうため 難しい。固液平衡の専門家と液液平衡の専門家というのが合同で議論できるような場が あれば、何か見えてくるのではないかと思う。

## 第二部 資源・固体(元素)の分離

### 次世代固相分離技術

大和田秀二(早稲田大学理工学術院)

固体の状態でどう分離するかを専門としている。ただ、化学系で固相分離(Solid Phase Separation)というと、液中のある種の成分を固相に吸着して分離するというのが一般的であるが、それとは意味が全く違い、あくまでも固体状態でどう分離するかである。この技術は、天然資源、および、人工資源、いわゆる廃棄物などの成分分離の前処理として使われるということをまずご理解いただきたい。

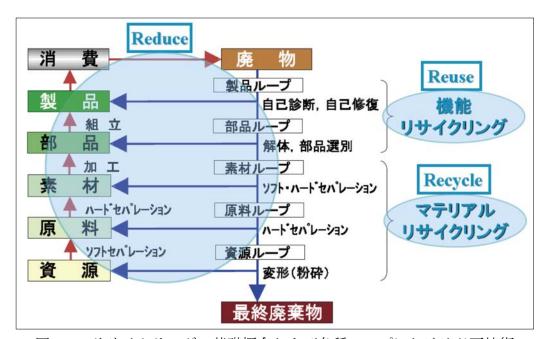


図 7-1 リサイクリングの基礎概念および各種ループにおける必要技術

基本的には廃棄物の話を図 7-1 に書いた。この前に廃棄物では基本的には機能が非常に重要なので、リユース(機能リサイクリング)いうことはあるが、最後はどうしてもマテリアルリサイクルになってくるので、どうするかというと、うまく壊して、そして、うまく分けるということになる。

どんな分ける技術があるのかというと、基本的には、図 7-2 に示すように固相の分離と 液相の分離という 2 種類の分離がある。私は、固相分離をソフト、液相分離をハードと 勝手に呼んでいるが、どんな特徴があるか。いわゆる資源の分離という意味でどんな特徴 があるかというと、固相分離は基本的には固体状態なので、結晶構造を壊さずに分離をする不均一系の分離になる。一方、液相分離というのは、結晶構造を壊して、分子、原子レベルにしての均一系の分離ということが相対的には言えるだろう。

準静的に固体を分ければ基本的にはエネルギーは要らないので、固相分離はかなり省エネルギー的である。液相分離は基本的には相転移を伴うので、活性化エネルギーが必要なので、かなり物質・エネルギーを消費するという状況になる。

## 資源リサイクリングにおける2種類の分離技術の比較

比較項目 ソフトセパレーション ハードセパレーション (固相分離) (液相分離)

特 微 結晶構造を破壊せずに分離 結晶構造を破壊して分離

不均一系の分離(固体の分離) 均一系の分離(イオンの分離)

環境負荷 低(省物質・エネルギー的) 高(高物質・エネルギー消費的) 理論的背景 各操作に関する基礎理論のみ 各操作・イオンに対して理論あり

**信頼性** 低 高

有害物質 そのまま 無(有)害化の可能性

\*「環境調和型分離システム」構築には、両者の効果的な組み合わせが必須。

図 7-2 資源リサイクリングにおける 2 種類の分離技術の比較

ただし、固相分離は先ほど申しましたように不均一系の分離なので、要は確率分離にしかならない。理想的な分離はなかなか難しい。理論的な背景も薄弱であるし、分離の信頼性も低い。一方、液相分離はそれの逆ということになるわけである。ところが、今、例えば天然、人工の両方の資源の中で求められている技術は何かというと、いかにエネルギーを使わずに、いかに低コストでうまく回していくかというものである。この固相分離の分野は、かなり進展しているが、まだやってみなければわからないよという世界と言っても過言ではない。ここをもう少しブラッシュアップしていかないと、日本の循環型社会というのは多分、できないだろうと考える。

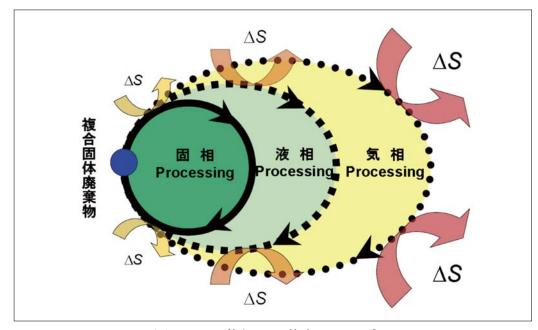


図 7-3 固体処理の基本コンセプト

基本的には、固体の複合廃棄物があったときに、固相で回して、もう一度、固相で利用するわけであるから、固相内で回すのか、液相を介すのか、あるいは、気相まで介してしまうのかということになると、なるべく質を落とさずに固相のままで利用したいというのが一つの発想である。

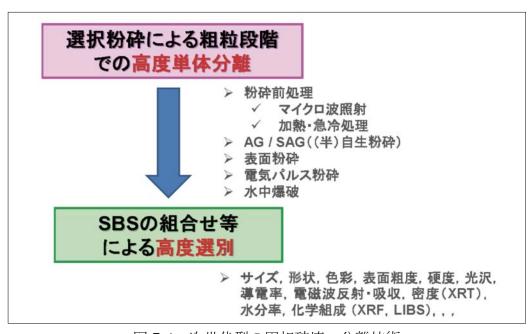


図 7-4 次世代型の固相破壊・分離技術

高度粉砕と高度選別固相分離の技術は基本的には、壊す技術と分ける技術の二つで成り立っている。今までの粉砕というのは、やみくもにぐじゃぐじゃ壊してしまっていた。ボールミルという代表的な粉砕機で粉砕に使う正味のエネルギーは投入エネルギーのわずか 1%で、非常にエネルギー効率の低いプロセスである。この改善のために、いろいろな研究がなされてきた。すなわち、基本的には全部を壊すのではなくて壊したい部分だけを壊していくというものである。例えば成分分離でいうならば、一番重要なのは異相境界面を選択的に壊してほかのものは壊さずにおくということになる。これができるとエネルギー効率が相当上がると期待される。これによって単体分離で一つの粒子が一つの成分になってい

るような状態ができると、これをどう分けていくかということになるが、最近、高度に分けられる技術が出てきた。これは、センサーベーストソーテイング (SBS) といって、各種のセンサーを使いかにそれらを組み合わせていた。図7-4にあるように最近では化学分析までして分けているというような技術まで出てき

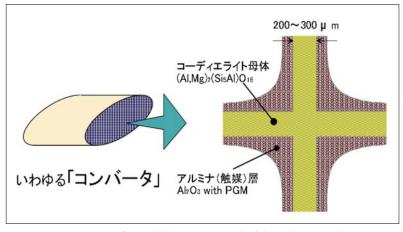


図 7-5 自動車排ガス浄化触媒の基本構造

ている。固相状態で特にまた空気中でということになる。その事例を幾つか紹介する。

一つは、自動車排ガス浄化触媒からの PGM の濃縮である。自動車排ガス触媒は基本的には図 7-5 のような構造をしており、PGM が含まれているのは表面にあるアルミナ層だけである。従来は、全部砕いて全部熱で溶かしてその後に溶媒で溶かして溶媒抽出でPGM を回収するのであるが、加熱・急冷をするだけで、熱の膨張率の違いによって、異相境界面にクラックが入り、PGM が入っているアルミナ層だけにマイクロクラックが入り、分離することができるようになる。これをシミュレートしてみると、アルミナ層にだけ引っ張り応力が働いて、基質であるところのコーディエライト層には圧縮応力しか働かない。基本物質はどんなに圧縮力を加えても、最後は引っ張り力でしか割れないので、アルミナ層にだけマイクロクラックが入るのである。

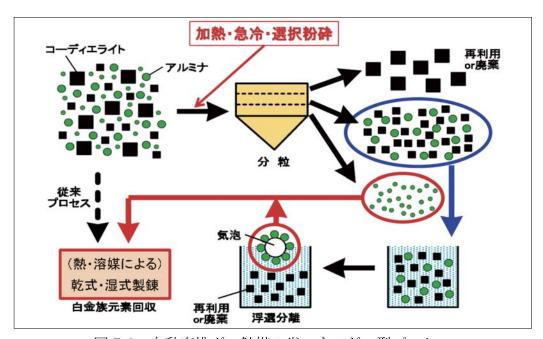


図 7-6 自動車排ガス触媒の省エネルギー型プロセス

今まではぐじゃぐじゃに壊して、全て、乾式、湿式による製錬が行われていたのだが、図 7-6 に示すようにうまく壊してやれば、これをサイズに分けるだけで小さいものだけにアルミナ層が濃縮して、これだけ製錬の工程に持っていきたい。中間のものはある程度、物理化学的な方法で分離をして、アルミナ層だけを製錬に持っていけるので、かなりの省エネルギーになる。

もう一つは最近、話題になっている廃電子機器からのレアメタル回収である。廃電子機器、特に基板は金属リッチである。貴金属や銅というのは銅製錬に持っていけば、ほとんど全てが銅と合金をつくるので高効率で回収することができるが、レアメタルの多くは銅製錬に持っていくとスラグに入ってしまうので回収できない。従って、銅製錬にいく前に、レアメタルを何かの方法で分けてやらなければいけない。ここは賢く壊すことが必要で、そのうちの一つ電気パルス粉砕を紹介する。電気パルス粉砕というのは、50年ぐらい前に、ソビエト時代に現象としてはわかっていたが、応用はほとんどなされてこなかった。基本的に水の中にある固体に高電圧パルスを瞬時に、非常に短い時間に流してやると、実はパルスは水にいかず、固相にいくのである。しかも、異相境界面は基本的には電気的な弱部

なので、そこに沿って電子なだれが起きる。そこから異相境界層の昇華が起こって、つまり、マイクロ爆発が起こって、異相境界面だけを壊すというようなことができるのである。

これは15年ぐらい前にハイパーコールという石炭に関するナショプロがあって、力学的な粉砕でやると石炭質は全然単体分離しないが、電気パルス粉砕だときれいに単体分離をすることが認められて

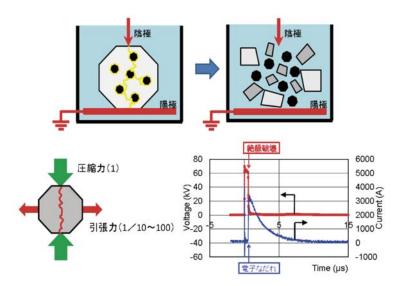


図 7-7 電気パルス粉砕の原理

いる。破断面を見ても異相境界面に沿ってクラックが走るということがわかる。

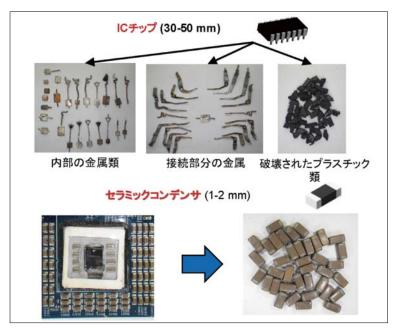


図 7-8 基板実装部品の電気パルス粉砕の産物

電気パルス粉砕の電子機器への応用を紹介する。図 7-8 は、IC チップで、左上の写真は内部の電極類、上中の写真は足の部分、右上はプラスチックである。壊れるのはプラスチックだけである。金属類は一切壊れずに裸にすることができる。こんなことは力学的なエネルギーでは不可能で、電気パルス粉砕ではできるようになる。右下図は、左下図の基板から電気パルスで分離したセラコンであるが、壊れずに全て一つ残らず剥離することができる。セラコンにはパラジウムが入っているので、パラジウムの濃縮物ができる。タンタルコデンサーならばタンタルの濃縮物ができるので、基本的には銅製錬の前にこれらを分離・回収する、あるいは濃縮することができる。

高度選別の目的は3つである。①精製するために最後は製錬が必要であるが、鉄製錬、銅製錬、鉛製錬、亜鉛製錬などのプロセスに適切な品質のフィードを送ること。②次の工程の禁忌成分をなるべく事前に除去をすること。③この固相選別でかなりの高純度素材をつくってやろうということである。

これらの目的を達したのが  $2 \sim 3$  年前まで 3 年間、NEDO プロでやったアルミニウム・水平リサイクルである。アルミニウム製品のスクラップにはいろいろなアルミ合金類が混じっている。現状では、混じったままで溶解をして二次地金としてガソリン自動車エンジンの素材づくりにしか役に立たないが、ここに高度な固相選別、いわゆるセンサーベーストソーテイングを適用してやると、サッシに使われる 6063 合金というものを固体状態のまま、しかもかなりの高濃度で分離することができるので、省エネルギー効果が大きいということがアルミ協会の試算でわかっている。これはパイロットプラントで試験をした結果、今までの固体分離では 99. 何%という純度のものはほとんどできなかったが、センサーベースのソーティング技術を使うと、99%以上のものが  $95 \sim 96$ %ぐらいの回収率で得ることができる。サッシのメーカーでインゴットをつくって分析して、実用に耐えることも証明をされ、既に、商業化が行われている。

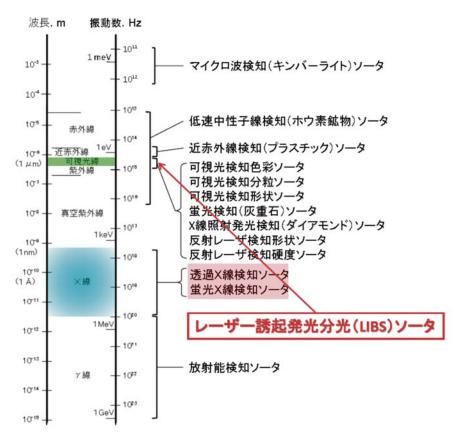


図 7-9 各種電磁波を利用するソーティング

ソーティング技術というのは、基本的にいろいろな電磁波を照射して、反射特性とか、 透過特性を見るが、先ほどの例で使ったのは、透過エックス線と蛍光エックス線ソーター を使う。蛍光エックス線ソーター、7~8年ぐらい前に初めて開発されたが、初めは大変 驚いた。なぜかというならば、蛍光エックス線の分析を研究室でやるとすれば大変なこと になるわけです。ところが、これが空気中でディテクターを20センチ試料から離して、およそ3m/sぐらいの速度で動いている状態で、蛍光エックス線を検知するような技術開発が行われている。これはセンサー感度の向上と、もう一つはバックグラウンドを消去するソフトウエアの高度とによってできたことである。

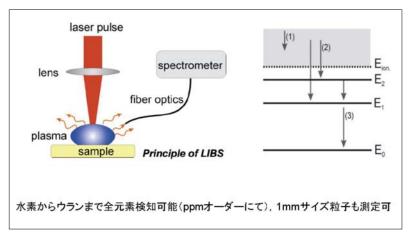


図 7-10 レーザー誘導プラズマ分光 (LIBS) ソーター

ただ、蛍光エックス線は軽元素に弱いので、アルミ合金等、軽元素の合金については検出ができないので、その改善には LIBS(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy)という技術を使う。これは ICP(Inductively Coupled Plasma)の登場によって日本ではほとんど廃れた技術である。レーザーを固体にぽんと当てることによってプラズマを立たせて、そして、プラズマを発光分光することによって元素分析を行う。これは固相分離には非常に役に立つ。空気中でレーザーを当てる、そして、そこからプラズマを発光分光で分析すればよい。例えば今でも火星では LIBS のロボットが動き回って、周辺の石について LIBS 分析をしている。

それから、まだ、研究段階であるが、海洋資源もレーザーを当てることによって、探査をするだけではなくて分析まですることが行われつつある。これをソーターとしてうまく利用できれば、いろいろな元素分析が ppm オーダーで定量化することができる。今まで確率分離であった固相分離が、センサーベーストソーテイングを使えば、かなりシャープな理想分離に近いものが得られるということになる。

金属生産プロセスでは、普通に壊して、普通に分けて熱で溶かして高純度化して、そして、最後に電解精製というのが銅の最終的な産物、99.999%の銅をつくる組み合わせであるが、高精度で固相分離できれば、乾式製錬で高純度化するプロセスを削除することができる可能性がある。図 7-11 は、LCA(Life-Cycle Assessment)の結果であるが、鉱石のプロセスで従来のプロセスだと、24,8GJ/Cu-tのエネルギーがかかる。ところが、今のようなプロセスにすると、従来のリサイクルプロセスの 3分の 1 ぐらいのエネルギーにできるということになる。

リサイクルでは、解体、破砕、選別、乾式製錬、電解精製というプロセスがあるが、うまく固体で分けることができれば、図 7-11 の最下段のように二段階で入れかえることができて、恐らくエネルギー消費も非常に小さな 3 分の 1 ぐらいで済むということになる。産学連携がうまくいけば、大きな省エネ効果が生まれるだろうと考えている。

最後に、ただ、固相分離をうまくするには何でもいいから、どんな廃棄物でも分けろというのは無理で、最終的にはうまく製品デザインをつくっていただいて、そして、それに従ってうまく分けていくということが非常に重要であることを強調しておきたい。

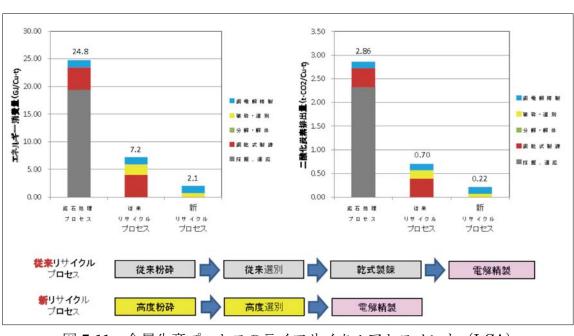


図 7-11 金属生産プロセスのライフサイクルアセスメント (LCA)

#### 質疑・コメント

- ・天然鉱山の場合には、それぞれの鉱山ごとにかなりばらばらな組成を持っているが、一度、わかってしまうと類似の組成のものが 10 年、20 年、出てくるということで、個別対応で個別対応の経験の集積から、一つの学問体系が工学として成り立っているというところがある。しかし、都市鉱山の場合はある瞬間のものが混沌であり、かつ、それが年々変化していくという状況をどうまとめるかというのが天然鉱山よりもさらに難しい。どういうところから分離工学を都市鉱山向けにカスタマイズしていくということが推奨されるとお考えか。
- →まさにポイントである。分離の基本というのは、上流側でいかにしっかりとした技術を使うかに限る。製錬のところでは精緻に分ける技術があるが、固相の分離技術というのは精緻に分かれていないので上流でどううまく分けるかということが大事だという話をした。天然の資源というのは天然がつくったので、我々は手が出せない。ところが人工物というのは我々がつくっているので、循環型というのをしっかりと念頭に置いてつくれば、成分分離に利するようなつくり方、あるいは製品にそういう情報を含ませておけば、そういうデータを集積することによって、そのデータをきちっと自動化されたプロセスに入れてやることによって、そのデータだけである程度、機械が自動的に分離する。製品にもう少し細かいデータをそこに載せてやれば、そういうことも可能になるということで、いかに製品デザインが重要かということになる。

あと、例えば異相境界面に高電圧パルスを印加するのであれば、電気的に導電的なものを1層入れてあげるような技術開発、例えば絶縁性のものと導電性のものをうまく組み合わせながら、いろんな機能を出していくことを考えると、非常に合理的な全体プロセスができ上がると考えている。

・日本のリサイクル技術はアカデミックのレベルでは世界的レベルにあるが、残念ながら 産業が育っておらず、国内のリサイクルプラントというのはドイツ製とかが非常に多い。 今後、アカデミックのレベルの技術力を産業発展につなげていくために、どんなことが 必要か。

→産総研では、「戦略的都市鉱山研究拠点(SURE)」で、固相の分離技術の人たちを集めて、技術研修とか、そういったものを大々的にやっている。固相分離の業界はこれまでアカデミックの世界と縁を絶っていたため、技術革新が非常に遅れていた。でも、今は大分変わってきたので、そういう人たちをうまく、教育させていただければ、恐らくここの伸びしろというのは非常に大きいと考えている。そういう組織をつくっていくことが非常に重要である。

第

## レアメタルの低エネルギー・環境調和型分離技術の課題と将来展望

岡部 徹 (東京大学 生産技術研究所)

チタンやレアアース、貴金属を始めとするレアメタルの製錬・リサイクルプロセスに関する研究に 25 年以上、地道に取り組んできた。製錬・リサイクルプロセスは、目的とする有価物を原料の中から分離・回収する技術であり、分離工学も密接に関係する分野である。

例えば、航空機の素材としても需要が増加しているチタンは、酸素や鉄との結合力が非常に強いという特徴を持つ。そのため、航空機部品の製造過程などで生じるチタンのスクラップをリサイクルする場合には、スクラップ中に不純物として含まれる酸素や鉄の除去が重要な技術的課題となる。中国から輸出規制で一躍有名となったレアアースは、主に磁石の基幹材料として使用されており、今後も同分野での需要の増加が見込まれる。しかし、このような磁石合金のスクラップからレアアースを分離・回収する場合には、内部に含まれるバインダーや表面に付着しているコーティングが、効率の良いリサイクルを阻害することも多い。白金やパラジウム、ロジウムといった白金族金属は、宝飾用途のイメージが強いが、実際には自動車の排ガス浄化触媒などの工業製品に使われる量が非常に多い。触媒スクラップからの白金族金属の分離回収は産業的に重要な取り組みであるが、スクラップ中に含まれている白金族金属は数千 ppm 程度と微量成分であること、化学的に安定であり水溶液中に抽出分離が難しいこと、白金族金属間での相互分離が難しいことなどから、技術的には多くの困難が伴う。

日本は、非鉄金属の製錬・リサイクルに関する工学研究および産業については、世界的のトップランナーである。日本は、エネルギーコストや人件費が高く、また環境規制も非常に厳しいため、製錬・リサイクルの実施に有利な国ではない。しかし、日本は、高い技術力をもとに、海外から銅精鉱や亜鉛・鉛精鉱などの天然資源を輸入して製錬を行い、高品質な金属を世界中に提供している。また、日本は、多くのレアメタルを、非鉄金属の製錬プロセスを利用して、高い効率で分離・リサイクルしている。さらに貴金属の精錬・リサイクルも日本は強く、例えば、世界中から自動車の排ガス浄化触媒などの貴金属を含むスクラップを集めて、そのリサイクルを行っている。

レアメタルの製錬・リサイクルに不可欠な分離技術を考えるにあたっては、資源供給制約、技術制約、環境制約という3つ制約のどれが大きな要因かを良く考える必要がある。一例としてレアアースの状況を紹介する。現在、中国がレアアースの世界市場で95%以上のマーケットシェアを獲得しているが、これは資源を有し原料コストが低いというのも一要因ではあるが、採掘や製錬を行う上での環境コストが極めて低いことも重要な要因である。例えば、レアアースの製造における代表的な分離技術として溶融塩電解と溶媒抽出が挙げられる。溶融塩電解は高温のフッ化物溶融塩を使って分離するため、その過程でフッ化水素ガスが発生する。このため、日本でレアアースの溶融塩電解を実施する場合は、排ガス処理等の設備コストが高くなり、高い環境コストを費やす必要がある。溶媒抽出につ

いても、プロセスに伴って発生する重金属を含む酸や有機溶媒の無害化処理コストがかかるので、日本国内での実施するのはコスト的に難しい場合が多い。レアアースの供給に関するボトルネックは、資源供給にあるのではなく、今では、環境コストの差によって生じた溶媒抽出や電解製錬などの精錬プラントの寡占化が問題となっている。

日本では、今後も、自動車産業、ロボット産業、電池などのエネルギー関連産業が成長していくと期待され、それに伴い高度に分離精製されたレアメタルの使用量も増大する。このため、前述の3つの制約を考慮したリサイクル技術を世界に先んじて開発しておく必要がある。

例えば、白金、パラジウム、ロジウムといった白金族金属は、鉱石中の含有用は数ppm オーダだが、自動車の排ガス浄化触媒には数千ppm 程度含まれている。現在は、主に 1995 年から 2000 年に製造・販売された自動車の排ガス浄化触媒から白金族金属をリサイクルしているが、10 年後にリサイクルすべき白金族金属の量は倍増する(図 8-1)。新興国での自動車需要の増加と、政界的な排ガス規制の強化によって、白金族金属の需要は今後もさらに増大すると考えられる。スクラップ中の白金族金属は、南アフリカやロシアの貴金属製錬所を利用すれば、鉱石処理と共に分離・回収できる。しかし、本手法では、処理プラントの立地が限られるのと、貴金属を分離回収するまで時間がかかり過ぎるため、日本をはじめとするスクラップの発生する現地で、貴金属のリサイクルを行うのが合理的である。

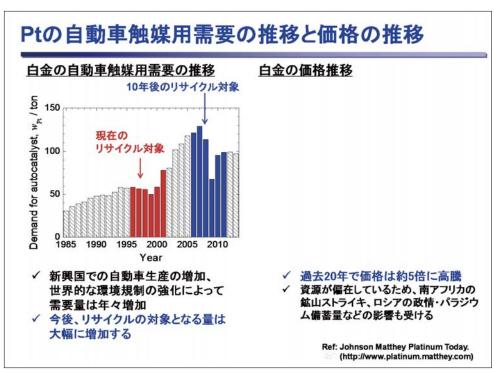


図 8-1 Pt の自動車触媒用需要の推移と価格の推移

一般的には、白金族金属は塩酸などの強い酸化剤を含まない酸では水溶液中に溶かすことができない。そのため、リサイクルプロセスにおいて、白金族金属を水溶液中に分離抽

出する場合には、王水などの強力な酸化剤を含む酸を用いて長時間の処理が必要であり、有害な廃液や排ガスなどが多量に発生する。しかし、このような特徴を有する白金族金属も、活性金属の蒸気を利用して合金化処理し、その後酸化処理すると、条件によっては、塩酸にも容易に溶けることを我々は見出している(図 8-2)。現在、本技術を元に、塩水をかけるだけでスクラップ中の白金族金属を効率良く分離抽出できる環境調和型の新しいリサイクル技術の確立を目指して基礎研究を行っている。

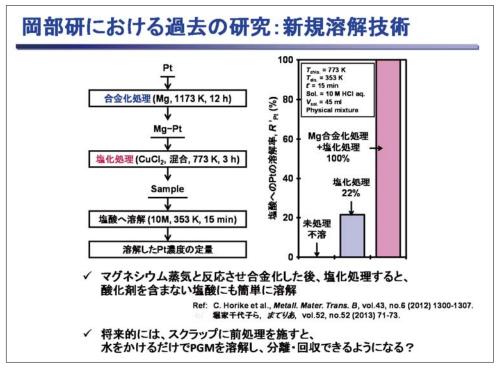


図 8-2 岡部研における過去の研究:新規溶解技術

また、白金族金属をスクラップから分離回収するための別のアプローチとして、合金化、硫化、無電解めっきといった化学処理と磁力選別などの選鉱技術を高度に融合した新たな物理濃縮技術の開発も行っている。例えば、回収した排ガス浄化触媒に対して、鉄やニッケルを無電解めっきした後、粉砕、磁力選別を行うと、磁性粉末として白金族金属を分離濃縮することができる(図 8-3)。リサイクル技術は、単に効率の良い分離手法を開発したらよいわけではなく、他の技術と組み合わせて最適化を図り、社会実装するところまでを視野に入れて推進することが大切である。

分離工学イノベーション

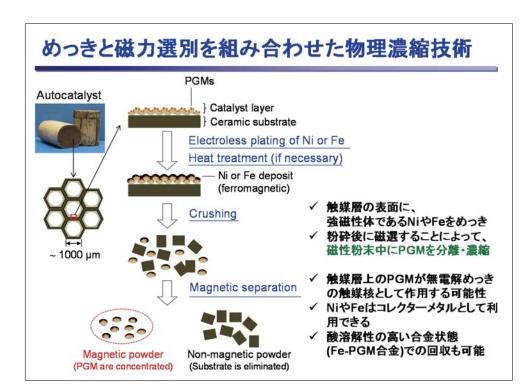


図 8-3 めっきと磁力選別を組み合わせた物理濃縮技術

レアアースの場合、鉱石中に放射性元素が含まれる場合が多いため、鉱石を掘るだけで環境を破壊する。製錬を行う工程でも有害な排ガスや廃液等が発生する(図 8-4)。そこで、以前から環境負荷の少ないレアアースの化学的な分離法の開発を行ってきた(図 8-5)。

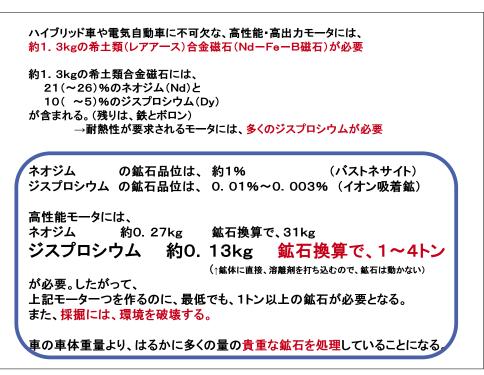


図8-4 高性能・高出力モータに不可欠な希土類

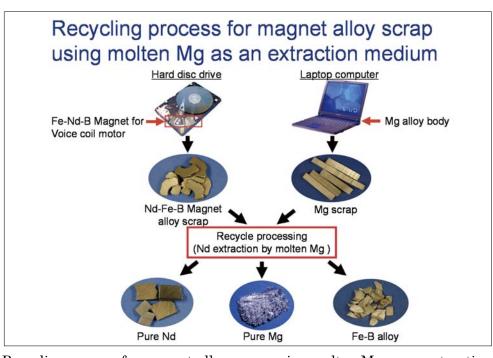


図 8-5 Recycling process for magnet alloy scrap using molten Mg as an extraction medium

レアアースのリサイクルについては、コストがかかり、現状では中国から鉱石から製造される合金を買ってくるほうが安い。他のレアメタルについても、リサイクルせずに廃棄し、新たに海外から鉱石由来の原料を購入するほうが経済的な合理性が高い場合が多い。しかし、今後、自動車やロボットの高機能化が進み、レアメタルを多量に使用するようになる。センサー、モーター、バッテリー、排ガス浄化触媒などに膨大な量のレアメタルを消費するため、自動車はレアメタルの塊となる(図 8-6)。



エネルギーや省エネ関連の製品も、レアメタルを多量に使用するようになる。このような流れの中で、今後は、エネルギー消費が低く、害悪を出さずに分離・精製し、リサイクルしていくための環境調和型の技術開発が持続可能な社会をつくるために重要である(図8-7)。

# レアメタルの低エネルギー・環境調和型 分離技術の課題と将来展望

高効率、省エネルギーかつ、有害な廃液等を発生しない、環境調和型のレアメタルのリサイクル技術、すなわち、 分離技術の開発は、今後、一層重要となる。

非鉄冶金、金属製錬工学は、多様な分離技術を利用する工学分野である。

レアメタルのリサイクル技術の社会実装には、 高度な分離技術の開発が不可欠である。

日本は、高度な分離技術をさらに発展させ、世界のトップランナーとして走り続けるべきである。

図8-7 レアメタルの低エネルギー・環境調和型分離技術の課題と将来展望

#### 質疑・コメント

- ・国として旗を立てるということを考えた場合、どういう技術課題がチャレンジングなの か。
- →私が現在、力を入れているリサイクル技術の開発テーマは貴金属のリサイクルである。 貴金属のリサイクルはビジネスになるため、国内外の企業も真剣にやっている。その中 で、日本の企業はかなり高いレベルにある。貴金属の使用状況は、技術の進歩とともに 大きく変化しているので、リサイクル技術を開発する上で課題は多い。貴金属とは別に、 チタンのリサイクルに関する研究も行っている。航空機へのチタンの重要は毎年増大し ており、さらに普及が進み、チタンがレアメタルからベースメタルになっていくと、チ タンのリサイクルも考える必要がある。現状では、チタンやその合金のスクラップから 不純物の酸素や鉄を除くことは大変難しく、リサイクルの大きな阻害要因となっている。
- ・化学プロセスの場合、分離の基本的なエネルギー消費はどのぐらいであるのかという定量的な議論も重要あり、それに対して、今のリサイクル技術はどういう位置にあるかというような解析が必要だ。金属の場合、エネルギーコスト的にはほぼ 100%の効率まで

いっているのか。

- →レアメタルの中では、エネルギーが問題になるのはチタン製錬ぐらいだ。白金やジスプロシムなどの高付加価値のレアメタルのが場合、エネルギーコストはあまり問題にならない。しかし、例えば、溶融塩電解を用いてレアアースの合金を製造する場合、約1000℃のフッ化物溶融塩を利用して酸化物原料を直接電解するのでそれなりにエネルギーは消費する。エネルギーコストよりも大きな問題は、環境コストである。フッ化物の溶融塩電解の場合、空気中の水分とフッ化物が反応してフッ化水素ガスが出る。日本ではフッ化水素ガスを巨大なスクラバーで除去し、無害化までやらなければオペレーションできない。排ガスや廃棄物の処理コストが競争力の差になっている。
- ・電池や触媒などを開発するときは性能ばかり一生懸命やり、回収のことは考えていない。 回収・リサイクルまで含めた全体を考えたコストを誰が見るのかというのは大事である。 例えば電池の電極にある鼻薬を入れると性能がよくなり、それだけを見たらいいことだ が、それを入れたがために回収が非常に難しくなって、社会全体としては、本当は損を するということが起こっているのではないか。
- →まさにそのとおりである。例えば、一時期、コバルトを使用しない、2次電池の開発がかなりはやった。資源的な供給制約が大きいレアメタルの代表格であるコバルトを一切使わないという意味ではすばらしい技術である。しかし、この場合、リサイクル業者が回収するインセンティブが全くなくなる。二酸化炭素の排出量だけでなく、マテリアル、とくに廃棄物の発生量という観点からのLCA も考える必要がある。
- 枯渇が危惧される金属は本当にあるのか。
- →長年、レアメタルについてみてきたが、レアメタルの中で枯渇性があるものは見当たら ない。ただし、資源供給制約があるレアメタルはいくつかある。その代表例が白金であ る。白金は、資源的には、今後100年以上は十分に採掘できる膨大な資源量があり、 南アフリカだけで100年分は存在し、探査が進めば資源量はさらに増えるだろう。し かし、商業ベースで稼働できる鉱山は南アフリカとロシアにしかないというのが問題で ある。白金族元素のパラジウムは、ロシアが生産量の半分以上を占めるので、カントリー リスクを考えると供給リスクが大きいレアメタルである。チタン、リチウム、スカンジ ウムは実質上無尽蔵と言っていい。ネオジム、ランタンも無尽蔵であるが、採掘時の環 境負荷が大きく、それをどうするかが最大の問題となっている。今は、中国がほぼ全量 を供給しているが、仮にオーストラリアと米国の鉱山が稼働するだけで世界に供給でき る。米国の鉱山は閉山したが、枯渇したわけではなく、環境コストが高く、ビジネスと して競争力がないため閉山した。供給障害が起こりやすいレアメタルとしてレニウムも ある。レニウムの増産が難しいのは、レニウムはモリブデンの副産物であり、そのモリ ブデンの多くが銅の副産物として生産されているため、仮に需要が増大しても増産でき ない。現状では経済合理性をもって年間に取り出せるレニウムの量が 50 トンとほぼ決 まっている。副産物のレアメタルは主産物の生産量によって生産量が規定される。白金 族金属のロジウムは白金の副産物なので、白金を200トン生産すると、その約1/5の、 40トンのロジウムが得られる。重要が増えても減っても、白金の生産が変わらない場合、 ロジウムの生産量は、一定となる。

- 金属精錬ではヒ素が以前から問題になっているが、現状はどうなっているのか。
- →ヒ素のような有害物は日本が輸入する精鉱にも含まれていることがあるが、日本では適 正に処理されている。ただし、ヒ素の多くは、採掘や選鉱等で、極力現地に残して日本 国内に運び込まないよう工夫がなされている場合が多い。

## これからの製錬研究

宇田 哲也(京都大学大学院工学研究科)

製錬を紹介する。製錬は非常に古くさい言葉だが、反応を進めるためのアイデアの宝庫であると認識して欲しい。

製錬とは、元素分離である。漢字で製錬と精錬があり、場合によって使い分けることがあるが、要するに、元素を分離していることである。分離するためには、それぞれを二つの相に分けることが必要である。固相と液相、液相と気相、固相と気相など、二つの相に分けることが基本である。

例えば、鉄鋼製錬では、鉄と酸素を溶けた鉄の液相と気相に分ける。銅の製錬では金属の銅の液相と酸化物が溶けた液相、気相の三つに分ける。マグネシウムの製造法(ピジョン法)は、液相と気相に分ける。ニッケルと鉄の分離では、鉄は沈殿し固相、ニッケルは溶液の液相になる。液相と液相の分離では、溶媒抽出で水とオイルの分配平衡を使う。固相と固相は選鉱、物理選別になる。(図 9-1)

## 製錬・精錬とは元素分離のこと

分離するためには、それぞれを2相に分けることが必要

固相

液相

気相

#### ロ 液相と気相

Fe:鉄鉱石(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)をFeとCO<sub>2</sub>(CO)に分ける。 Cu:カルコパイライト(CuFeS<sub>2</sub>)からCuとFeOとSO<sub>2</sub>に分ける。

- □ 固相と気相(Mg:ピジョン法)
- □ 液相と固相(NiとFe:液相と固相(沈殿))
- □ 液相1と液相2(希土類:溶媒抽出、Fe:メタル・スラグ)
- □ 固相1と固相2(硫化物と酸化物:浮遊選鉱)←選鉱

図 9-1 製錬・精錬とは

過去の分離方法を紹介する。1900年のマリー・キュリーの頃の希土類の分離法は、分別結晶法である。ラジウムとポロニウムの溶けた溶液を半分ぐらい析出させる。すると、必ずどちらかの元素だけが濃化するので、それをさらに溶かす作業を繰りかえす。これを数千回から数万回やったというふうな話が残っている。今、希土類の分離は溶媒抽出方法になっている。

溶媒抽出はオイル相と水相があり、それに酸化剤を入れて、例えばネオジムとジスプロシウムでは、酸化剤のpHを調整し高くすると、プロトンが不足するので、プロトンが水相に移る。すると、電気的中性の条件が合わなくなり、希土類は電荷補償で移動する。。

希土類がオイル層に移る場合、ネオジムとジスプロシウムで割合が異なる。ネオジムとジスプロシウムが分離する差は、たかだか、1.2 倍とか 1.3 倍、大きくても 2 倍程度である。

この溶媒抽出法が、現在の希土類の工業的生産法に使われている理由は、両方とも液相であるからである。分離のビーカーは、100 個でも 1,000 個でも簡単に並べることができるので、99.9%の高純度化を目指す希土類分離ができる。

一般的に希土類は3 価、セリウムは4 価と考えられる。しかし、2 価も結構安定で、ヨウ化物になると、希土類のうち11 種類が2 価である。2 価のヨウ化物は、蒸気圧が3 価に比べて100分の1ぐらいである。2 価と3 価をつくり分け、それを蒸留分離できると考えて、若い頃に研究した。

サマリウムとジスプロシウムを 1 対 1 で混合し、サマリウムをアルミ還元して 2 価にしておき、蒸留を行うと、サマリウムが 98%、ジスプロシウムは 98%に分離できる。しかし、コストやエネルギー消費の観点では、先ほどの溶媒抽出には及ばない。乾式分離の場合は、さらに高効率で行う必要がある。

次は銅の製錬である。銅製錬に還元剤は要らない。カルコパイライト( $CuFeS_2$ )に空気を吹きつけるだけで金属の銅ができる。これは非常にすぐれた方法だが、その途中で鉄も分離する必要がある。また、銅も分離する必要がある。カルコパイライトに酸素を吹きつけて、酸化物の融体(スラグ)と硫化物の融体(マット)の両方とも高温 1,100 度ぐらいで液体にして、金属の銅を作るプロセスである。

銅がなぜ酸化製錬が可能かを説明するケミカルポテンシャル図(図 9-2)がある。横軸に硫黄分圧  $Ps_2$ 、縦軸に酸素分圧  $Po_2$  のそれぞれ対数をとる。現実のオペレーションラインが、金属の銅の安定領域を通るが、金属鉄の安定領域を通らないということが判り、硫化物と酸化物、硫化物と金属が分離できるということが判る。この図があるのは、過去の製錬技術蓄積のおかげと思う。

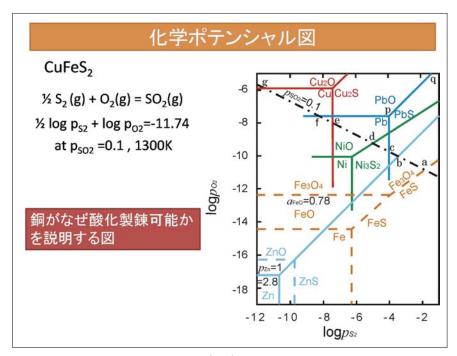


図 9-2 化学ポテンシャル図

マグネシウムは、ピジョン法で真空製錬する。ドロマイトと言われるライムとマグネシアの混合物に対して、シリコンを還元剤としてマグネシウムを得る。温度は1,200度ぐらい。あるとき、京大の化学研究所の先生が、シリカをマグネシウムで還元するという論文があるが、実験方法を教えてくれと来た。先ほど、マグネシウムはシリコンを還元剤として使うと説明したが、その論文では、シリカをマグネシウムで還元してシリコンを製造する。従って、一方ではシリコンがマグネシウムの還元剤だが、他方ではマグネシウムがシリカの還元剤である。よくよく考えると、ピジョン法のほうが非常にすぐれた方法であり、還元剤としてシリコンを使うが、一緒にライム(CaO)を入れることで、シリカは Ca2SiO4 になる。

こうすると非常に活量の下がったシリカができる。また、マグネシウムを回収するために、 分圧の低いマグネシウムができる。言い換えると、分圧の低いマグネシウムしかできない。 そこで、精製系の活量を下げることで反応を右に進めている。さもなければ、反応は左に 進む。そういうことを冶金学、製錬学の先輩たちが構築してきたことに最近、気づいた。

亜鉛と鉛の製錬では、亜鉛と鉛は一緒に鉱物として出てくるので、昔から一緒に製錬するインペリアルスペリティグプロセスというイギリスで開発された方法がある。両方とも炭素還元して金属の鉛は蒸気圧が亜鉛に比べて小さいので下方に溜まり、亜鉛はガスとして上方に行く。還元反応は炭素で還元するので CO が出てくるが、この反応は低温では逆反応が起こる。亜鉛ガスと CO が反応して酸化亜鉛ができる。これを冷却して集めるがなかなか難しい。そこで、溶けた鉛のシャワーで温かいまま、鉛に亜鉛を吸収させ、低温で亜鉛だけを分離する。この分離は、鉛は重たく、亜鉛は軽いので亜鉛が上に浮いてきて、それを集めるという原始的な方法である。

チタンについて説明する。チタンは海水中で決してさびない。多摩川にかかっている羽田空港 D 滑走路の下に使われている。ボーイング 787 では 15%の重量がチタン合金である。チタンは将来、自動車、電車、船舶等々へ使って欲しい。チタンは酸化チタンから最後にチタンを製造するが、チタンと酸素の分離は非常に難しい。分離する元素ペアで考えると、周期律表の組み合わせの中で最も難しいと考える。

その分離方法は、いきなり酸化チタンから酸素をとるのは大変難しいので、とりあえず、 塩素を与え、酸素はカーボンに与える。これは例えば、愛し合っているカップルを別れさ せるために、まず、新しいパートナーを与え、一旦カップルの形を変えておき、最後に別 れてもらうステップを踏むようなことをしている。チタンは利用用途が広い金属だと思い、 最近は、還元プロセスがバッチ操作であることにまだ課題が起こっていることを考え、精 力的に研究している。(図 9-3)

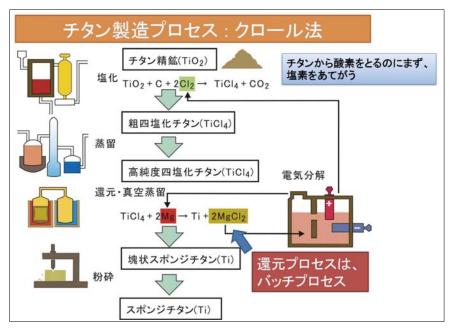


図 9-3 チタン製造プロセス:クロール法

製錬とは、二相以上に分離することで、反応を進めるためのアイデアの宝庫がある。今回、乾式で酸化還元だけの話をしたが、酸化還元、中和沈殿、蒸留、硫化物で分離、亜鉛中のニッケルをヒ化物で分離などの研究がある。

具体的例で、プロトン伝導体で  $CsH_2PO_4$  がある。2003 年当時、非常に良い伝導度を示すという研究があり、脱水分解して液体が生成し伝導度が上昇すると考える学説と、一方、脱水分解とは別に固相・固相の相変態が起こると考える学説があった。 $CsH_2PO_4$  が脱水分解する反応が起こるか否かは、熱力学の知識を使って考える必要がある。(図 9-4)

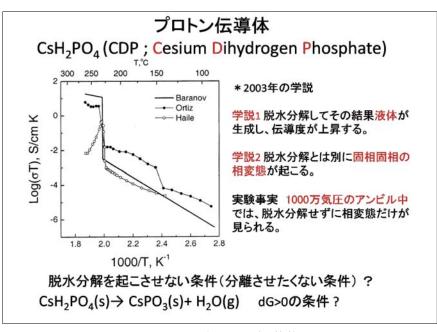


図 9-4 プロトン伝導体

しかし、珍しい物質なのにエンタルピーの報告しかなく、エントロピーが不明であった。 エントロピーは精製の反応のガスのモル数で決まり、エントロピー変化は、ガスができる ときの気体分子数の増減で決まると熱力学で学んだので、エンタルピーがわかっていたら、 エントロピーは導出できるので、脱水温度も導出できる。このように製錬学で培われたノ ウハウ、学問は、機能性材料の合成でも生きると考えている。

これから製錬研究では、金属製錬の研究者と無機化学の研究者の相互交流がさらに進むことを希望する。製錬で培った知識、ノウハウ、学問というのは非常に有用であると考えるので、多方面に発展し、応用できて欲しい。それがマテリアルイノベーション、そして、ソーシャルイノベーションにつながって欲しい。

製錬研究で目指すべきことと、もたらされる未来を示す。

研究1は、放射光を活用したサブミクロンレベルでの現象のその場観察。チタンが還元されるところを見た人は誰もいない。それをぜひ見てみたい。

研究2は、反応過程・溶液中の物質の挙動の原子分子レベルでの理解を進める。

研究3は、電解製錬における電力の省力化

研究 4 は、チタンの新製錬法の確立(技術革新でレアメタルをコモンメタルに)研究の進展でもたらされる未来は、

- 1. 技術力の強化による製錬業の永続的な国内存続可能性の向上
- 2. 新時代における画期的な新商品開発力の提供。
- 3. あらゆる国際産業へのプラスの相乗効果の期待。
- 4. リサイクル社会(工程内リサイクルと市場からのリサイクルの両方)の継続的な進展による世界的な環境保全への貢献

#### 質疑・コメント

- ・目指す研究の問題とゴールをそれぞれ分けて教えてほしい。
- →例えば、チタンと酸素、カルシウムと酸素、プラセオとネオジウム、これらを高効率に

- 分離できるような観察や、シミュレーションができるようにしたい。
- ・還元のプロセスのところで、実は反応をうまく使いながらシリコンとマグネシウムの還元ができているときに、水の分解も熱化学的にサイクルすると、1,000 度は要らなくて500 度くらいで分解できるという熱化学プロセスが提案されていて、そこでは種々の熱力学のデータベースをもとに設計する手法がある。そして、いろんな水を低温で分解するプロセス(IS プロセス、ユーティリスリープロセスなど)が複数提案されている。例えば金属系では、そのような計算幾何学的なアプローチはどの程度、可能か?
- →例えば、高温の気相反応は 1,100 度や 1,000 度以上の反応だが、その気相状態は分子が どのような状態で存在するのかわかっていないことが多い。例えばダイマーか、モノマー かは、そういう分子の計算は可能と思うので、専門家にやってもらいたい。
- ・他の発表で均一相から物が出てくる核発生の話があった。これらは非常に共通点が多い と思う。
- →核発生の潜伏期や発生場所の発表を聞いて、まさに同じことを思った。そしてそれをコ ントロール、再現性よくできるようにしたいと思う。
- ・業界が若干違っていても共通問題はあるということだ。
- →その通り。
- ・よく砂からシリコンをつくるという話があり、実際に可能と言われているが、チタンの酸化物から直接、チタンができるとすごいと思う。その見通しや熱力学的な見通し、例えばどのような圧力領域ならば、可能という話はあるか。
- →酸化チタンから直接チタンを製造するのは一応、可能。製錬の研究というのは、は分離して、製品の純度の良否や、エネルギー消費量がどれだけかという話が大事、分離するだけならなんでも分離できる。再説明になるが、まずはチタンに塩素を与え、四塩化チタンにした後、チタンと酸素の縁を切ると、酸素も系外に排出するので、そこから製錬するのが現状のプロセスでエネルギー効率もよいチタンに関して固相、液相のデータベースや熱力学データはそろっている。それらに基づいても酸化チタンからダイレクトに脱酸素するのが良いとは言えない。
- ・希土類、レアアースの説明で、工業的にはほとんど唯一の希土類分類法と溶媒抽出という話があった。希土類は種類によらず、サマリウムとジスプロの分離のように、乾式の分離手法が適用できるのか?
- →種類によらずとまでは言えない。11 元素は 2 価なので、11 元素とその相手方にはできる場合がある。例えば、サマリウムとネオジウムでは一番良い分離結果を自分の研究で出せている。しかし、プラセオジウムとネオジウムは双子元素だが、1 回の分離で例えば 70%回収ぐらいにしかならない。分離率の向上が必要である。
- ・工業的実用性は不明だが、一段操作でここまで分離できたのは製錬工学上、すごいデータである。

## 第三部 バイオ・医薬食農系の分離

生体物質の分離:導入に代えて

児山 圭 (CRDS ライフサイエンス・臨床医学ユニット)

冒頭の「仮説」にあるように、「分離工学イノベーション」では、鉱物等の固体分離、石油資源等の液体分離の他、生物系の分離についても1つの柱として考えてみたい。ただし、これまでプレゼンテーションをされた「固体分離」「液体分離」分野とは、スケール感が異なる。少し例を挙げて説明する。

例えば薬を作ることを考えてみる。薬は身体の特定部位の働きに対して効果を示す有効成分とそれ以外から構成されているが、有効成分そのものについて、これを全て人工的に合成することは困難であったり、コスト面で不利になったりする。そのため、植物や動物などからこれらを「分離」して抽出することが必要になるだろう。また、一般に健康診断では、血液を採取し、採取した成分から、疾患に関連するものを「分離」して検出する。このように「分離」するプロセスは医薬系を含め、バイオ分野でも重要なファクターであることがわかる。

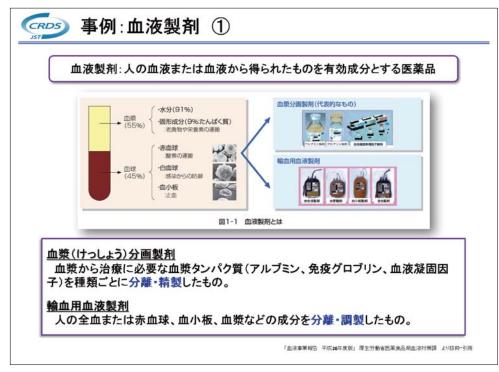


図 10-1 血液製剤のための分離

この血液については、検査に使う他、「血液製剤」の原料として使われる。この際、血液全てを使うのではなく、これを遠心分離して、血漿成分と血球成分に「分離」し、血漿成分から必要な物質を抽出して薬として利用することがある。図に示したようなアルブミン製剤、グロブリン製剤、血液凝固因子といったようなものである。こうした必要な成分のみを抽出するという必要性の他、安全性の観点から、例えばウイルス、病原菌を除去す

るといった効果を含め、分離技術は非常に重要な役割を果たしている。

この生物系分野における分離技術について、なぜイノベーションが必要なのかを考えてみたい。血液製剤などにおける分離のように、必要な要素技術は、実のところ、固体分離、液体分離と共通の部分がある。もちろん、扱う量が異なるが、例えば、膜分離などにおいては、必要な成分を捕捉するためのサイズは共通であろう。また、先ほども事例にあがった「超臨界流体クロマトグラフィー」のような、生体の中の状態を保持して、必要なものを分離する技術なども利用される。超臨界流体クロマトグラフィーは先進的な技術であるが、これ以外にイノベーションがなぜ必要なのであろうか。また、生物における分離、疾患のマーカーなどは、既に分離の手法が確立しているではないかという意見もあるだろう。

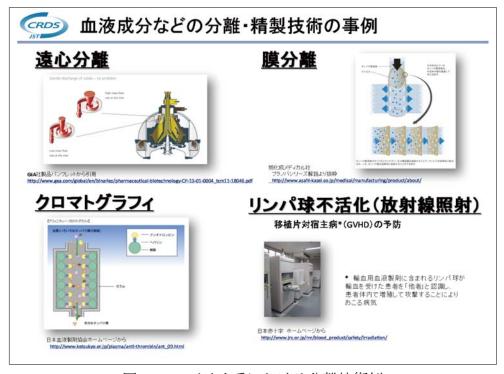


図 10-2 バイオ系における分離技術例

しかし、新たに人類の脅威となるようなウイルスや病原菌が登場し、既存の技術が転用できない場合、創薬プロセスにおいて必要な有効成分が抽出できない、あるいは抽出にコスト面が見合わない場合を考慮にいれると、この方面でも分離技術には不断に革新が必要となるのは明らかであろう。

加えて言うならば、分離されたことが確実であるか、といったような、分離に加えた計 測分析技術、言い方を変えると、分離を含めた計測分析システムといったものの革新が必 要になるのではないだろうか。こうしたことを踏まえ、このセッションでは、生物系分野 における分離技術の革新、他分野でこれまで紹介されたような技術の転用の可能性、研究 プロジェクトとして考えていく際、何が重要であるのかを議論いただきたい。

## 生体関連物質の分離・分析技術イノベーションの展望

澤田 誠(名古屋大学環境医学研究所)

生物分野のうち、特に脳機能の解明を目指して研究している。脳は生体の中でも特に複雑な構造を取り、その機能も多岐にわたっている。生体における分離分析は、これまでは生理活性物質などの生体分子そのものが分離単位と考えられてきた。しかし、イメージングなどの手法の開発により物質そのものからそれらが複合的に連携して織りなす機能を捉えることの重要性が示されるようになり、その分離単位は「細胞」「細菌」「ウイルス」といったサイズ、塊が対象とされるようになってきている。したがってバイオ系分野では、個別の機能をもっている単位が分離の対象として重要で、その分離分析技術のイノベーションが必要となる。

脳の場合、ある神経細胞を取り出し、その構成成分を分析する場合、対象の神経細胞と 隣接する神経細胞は脂質やタンパク質、核酸などの基本的な構成要素が同じであっても機 能が全く異なっている。こうしたものをどのように区別するかという点が医学や生物学に おける分離の最重要ポイントであろう。

近年、分析技術の発展に伴い、質量分析が登場し、より高感度・高精度な分析が可能となっている。しかし、個別の単位で機能が異なる細胞など、その単位を壊さずに分離しなければならないとなると、こうした最新技術に合わせて従来の方法を組み合わせることが一つのブレークスルーを生み出すことがある。その一つとして、最新技術を上手に使うための試料前処理技術が必要になってくるであろう。

こうした技術の例として、本日は、「ホットメルトフィルム」というもの、「レーザーマイクロダイセクション」というものをキーワードとして、本来は物質の分析装置である質量分析装置を

用いて生体の 機能を見ると いう技術を紹 介したい。ここ で「見る」と 言ったのは、機 能を「見える」 ようにすると いう意味で、ど の位置に存在 する細胞が、ど のような機能 をもっている かを三次元で 見えるように するというこ とである。

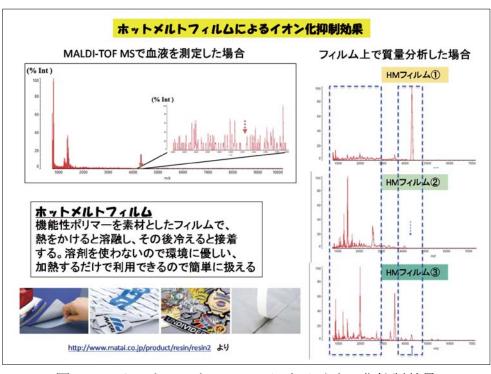


図 11-1 ホットメルトフィルムによるイオン化抑制効果

まず、ホットメルトフィルムであるが、例えば、アイロンで熱接着するようなワッペンに用いられているもので、溶剤を使わない接着剤として、非常に安価で入手できるものである。このフィルムの上で質量分析を行うと、必要な成分のみを「見える」ようにすることができる。このフィルムには何種類かあるが、素材を変えると、見える物質のプロファイルが変化する。示した事例はマウスの血液を測定したものであるが、1番目は $A\beta$ (アミロイドベータ)が非常に感度よく見える。かわりに低分子は分析できない。2番目のものでは、 $A\beta$ は見えないが、1500 くらいのピークはよく見える。3番目ではまた違うものが分析できる。このように、素材の種類を変えると対象とする物質の物性に依存して取り分けて分析できる。これをイオン化抑制と言っている。逆説的ではあるが、見える形で「分離しないで」分析をする、言い換えると、分析に不要なものはイオン化しないで分析しようというコンセプトである。

アルツハイマー病のマウスのモデルでの例で、マウスの脳のうち、海馬を分析した結果を示す。フィルムの有無で質量スペクトルのピークパターンは変化する。フィルムがない場合は見えないが、フィルムがあると機能を保有しているペプチド、DNAといった生体高分子が見えてくる。これはレーザーにより容易にイオン化される低分子はフィルムによりイオン化されず、高分子のみが分析できることを示している。得られたデータから、対象となる高分子を特定し、プロテアーゼ阻害剤の有無で判別したところ、これがペプチドであることがわかった。特に、タンパク質合成の途上で働きその後切断され排除されてしまうシグナルペプチドや通常の生化学的手法では検出が極端に困難な脂溶性のペプチドが確認できる。これらのペプチドは、アルツハイマー病患者と健常な方との比較から、アルツハイマー病のマーカーとして利用出来ることがわかってきた。これまで、アルツハイマー病のマーカーとして利用出来ることがわかってきた。これまで、アルツハイマー病のマーカーとして利用出来ることがわかってきた。これまで、アルツハイマー病のマーカーとして用いられたものと併せて、より診断の確度を上げることができると期待される。

このように、非常に簡単で、安価な材料を使うことで、解析の精度が上がり、診断の精度向上だけではなく、投薬の作用を検証するような方法も産み出されると期待できる。

近年、「質量イメージング」という方法が流行しており、光学顕微鏡像を見ながら、特定の部分をイオン化し、その部分を構成する分子を判別することができるようになっている。現在、島津製作所から質量イメージングの専用装置として iMScope という名前で売り出され、例えば抗がん剤の薬物動態を見ることができるようになった。最先端技術の応用例であるがそれでも限界があり、原理的な問題から現在でもこの装置ではおおよそ分子量が 2000 以下の生体内物質や薬の分析にしか使えない。

この問題を解消するため、高価な専用装置ではなく一般的に用いられる汎用の質量分析系と組み合わせて、レーザーマイクロダイセクションという細胞を一つ一つ切り出す装置を導入し、先に述べたホットメルトフィルムを用いて、切り出した細胞を質量分析することで、専用機と同じ効果を持たせることが可能となった。

この方法では、分子量 3 万程度の高分子物質まで分析することが可能で、アルツハイマー病マウスの例では、A  $\beta$  の単量体、二量体、三量体の組織内での位置情報を持ったままでの検出に世界で初めて成功した。さらに、この手法では対象とする物質の生体内分布を三次元表示できる。このことにより、どの位置のどの細胞が、どのような変化を起こし病気を引き起こしているかが見えるようになる。



図 11-2 ホットメルトフィルム、レーザーマイクロダイセクションを併用した質量イメージング法

この方法では、高分子だけでなく、薬剤の分布も調べることができる。図はピロピルカンというけいれん作用がある薬剤で、薬を投与してからおよそ 40 分から 1 時間で効果が発揮される。しかし、脳へは投与後 10 分程度で飽和濃度に達することがわかっている。この脳に届いてから効果を発揮するまでの時間差が今までは説明できなかったが、今回紹介した分離技術を基本とした質量イメージング法を用いることによって、実際にけいれんに関連している海馬、脳梁の神経細胞に痙攣を誘発するピロピルカンが投与後 30 分かかってようやく到達することがわかった。つまり、機能単位である神経細胞を 1 つ 1 つ分離しないと薬剤の作用やその生体応答は説明できないわけで、新たな技術による分離は薬剤の正確な作用の解明という点でも非常に重要ということが言える。

今後、どのような方向を目指していくべきかを考えてみたい。先に示したシグナルペプチドは、タンパク質が合成される際、特定の細胞内小器官に取り込まれるための輸送マーカーとして働くが、取り込まれた後用済みになって切断され分解排除されると考えられてきた。しかし、これは単に従来の分離分析技術がそれらの検出できなかったからに過ぎず、その生物学的意義が正確に捉えられてこなかった。最近、ある種のウイルスが免疫制御に関わるタンパク質のシグナルペプチド様の物質を使って免疫系からの攻撃を逃れる機能を持っていることが発見された。先に説明したアルツハイマー病の原因となる異常なペプチドの集積もシグナルペプチドを切り出すメカニズムの異常として説明されるようになってきた。さらに、特定タンパク質由来のシグナルペプチドがiPS細胞に作用して肝臓細胞や心筋細胞への分化を誘導することも報告されている。この様にシグナルペプチドは生体の機能の調節に重要な役割を持っている可能性があるにもかかわらず分離分析が困難であったため、研究がほとんど進んでいない。シグナルペプチド研究は分離分析技術のバイオ面でのイノベーションにより新しい生物機能分子として説明されることになる可能性を秘めている。

一方、シグナルペプチドはタンパク質の種類により構造が異なる、つまり、タンパク質を特定することができる、「マイナンバー」のようなもので、シグナルペプチドを網羅的に調べていくことで、この細胞がどういったタンパク質を、いつ作ったのかを見ることができるようになるだろう。現在のオミクス技術のうち、ゲノミクス、プロテオミクスなどはまだ機能を特定する技術として成熟していないが、ホットメルトフィルムなどを活用して網羅的にシグナルペプチドを検索する技術を開発ことで、従来技術では届かなかった生物の様々な機能、細胞の運命、疾患の状態、薬物動態などが見えるようになるのではないか。生物系分離技術の向上には、このような新たな手法の組み合わせが必要ではないかと考えられる。

#### 質疑応答

- ・ホットメルトフィルム法において、フィルムの材料により感度が大きく異なるとのこと であるが、例えばタンパク質とか、特定の分子種に対して感度が大きく向上するなど、 相関関係は解明されているか。
- →現時点で、理論的になぜこれが起こるかはわかっていない。実験的には、フィルムの上にタンパク質を載せるだけでは効果が発揮されず、一度フィルムを熱で溶かして融合させなければならない。なお、質量分析法におけるマトリクスの作用もそのメカニズムはよくわかっていないが、経験的に効果のあるマトリクスは3000種類程度あると言われている。ホットメルトフィルムは通常、エチレンビニルアセテートが使い易く、50度くらいで溶け、生体成分に影響なく分析できるが、アクリル系、ウレタン系など基材の種類により、マトリクスがイオン化するメカニズムに干渉することがあるようだ。この辺りについては、化学分野の知見が重要で、現時点では経験論的にどの基材で何が有利かを調べている。
- ・溶融温度と接触時間、滞留時間のようなもので、分析対象の物質が正確に測定できてい ない可能性があるのか。
- →タンパク質は70度以上になると変性し、これが夾雑ピークとなるため、現在、60度くらいで処理できるものを開発している。これまで調べた限りではサンプリングによる変化は見られていない。
- ・分析対象が単一細胞、もしくは単一分子ではあるが、これは分離ということができるか。 これまでのセッションとの接点を考える時、共通項は何か。
- →冒頭に述べたように、次の世代の生物系分離では、機能単位の分離が基本になる。これ 以上分離をすると差が見えないということもあり、座標位置を保ったままの分析手法と してレーザーマイクロダイセクションの事例を紹介した。また、ホットメルトフィルム は、「分離しない」分析技術であるが、他にも超臨界流体を用いた分離技術、水に溶け にくい生体物質のみを抽出する技術、薬効成分のみを抽出する技術など、他分野で既に 用いられている手法で使えるものがあれば取り入れてみたいと考えている。その意味で ホットメルトフィルム法は最初の接点と思う。原理はよくわかっていないところがある が、単にイオン化制御だけではなく、生物系以外の物質を分画する技術に使えないかと も考えている。
- ・質量分析装置としては TOF-MS を利用している。TOF-MS は分離技術ともいえ、その性能を上げることは 1 つのターゲットになり得るだろう。質問は、レーザーマイクロ

部

ダイセクションにおいて、細胞1つを見ることが可能であるが、細胞の一部を取り出してみる、その中に含まれるペプチドを見たいというような要望はないか。

- →薬剤分布については、現在、LC-MS、つまり液体クロマトグラフィーを使っており、 クロマトグラフィーに詳しい先生方からのアドバイスがいただければと考える。また、 従来のLC-MS は溶液にして測定するため、空間位置情報という概念はない。しかし我々 の技術では空間分布が見えるという点が従来技術に比べ優れている点と考える。細胞よ り細かいものを見たいという要望は多くあり、現在、空間分解能を上げる方法を開発し ている。この方法では1ミクロンの空間分解能であり、サブセルラー分析、エクソソー ム1個を狙った分析といった分析の可能性がある。分析感度の問題から1ミクロンの 空間分解能で分離した試料の分析には、感度の高いTOF-MSが必要になるが、こちら は現在開発が進められていると聞いている。
- ・アルツハイマー病の事例があったが、この方法を早期診断に活用できる可能性はあるか。
- →お示ししたのは 5 例の患者であり、ばらついていたと思うが、これは進行段階で早期から後期まで含まれている。各段階で 5 例ほど見て、マーカーの絞り込みを行っている。
- ・生物の機能を見たい場合、本当は分離を何もせず、生きたままで、どこかで見られることが一番ではないか。その意味では分離工学が入る余地はないのかもしれない。
- →分離は重要である。機能イメージングという方法があるが、現時点では、例えば大脳皮質のどの場所、側頭葉のどこかが活性化されている、ということしかわからず、細胞レベルでは情報が得られない。細胞レベルの情報であれば、どの神経細胞が活性化されているかを解明できる。PET や fMRI では、脳の抑制性神経と興奮性神経の両方が光り、判別ができない。
- →ご質問にあったように、人間を対象とした医学的な診断、治療を考えれば本当は何も組織や体液を取り出さず、写真を撮影するか、なんらかのイメージング法で身体の内部を見たりできればよいのかもしれない。しかし、現実に存在する技術では、そこまでの域に達しておらず、どうしても組織、体液を分離し、あるいはただいまの発表にあったような、特定成分のみを見るという手法が不可欠になるであろう。その意味では生物系においても分離は非常に重要と言える。

#### マイクロ流体デバイスによる分離技術の現状と課題

山田 真澄 (千葉大学大学院工学研究科)

図に、顕微鏡のステージ上に設置された、数マイクロメートルから数十マイクロメートルの流路構造を加工した基板を示した。この流路は、入口が1つ、出口が3つある構造となっている。希釈した血液を連続的に送液すると、1つの出口だけから赤血球が流れ出る。流路の構造設計に工夫が施されており、血液成分中の血球が入らない細さに加工されているためである。流路をさらに複雑に加工することで、サイズの小さい赤血球とサイズの大きな白血球を完全に分離し取り出すということも可能になる。このように、流路構造を精密に計算して設計することで、単に血液を流し入れるだけ、という簡単な操作で細胞を高精度に分離することができる。

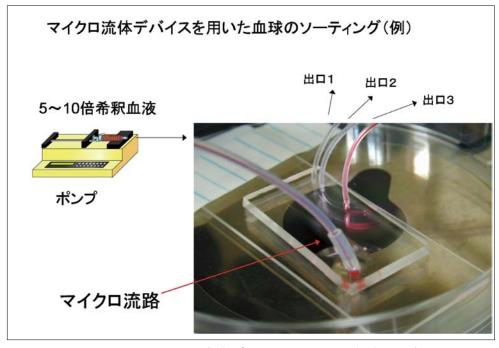


図 12-1 マイクロ流路デバイスを用いた血球の分離

次の例では、シリコンの板を削りこれに深さの異なる格子状のナノ流路を形成し、ガラス板を貼り合わせたものを使用している。この流路にタンパク質と抗体の混合水溶液を電気浸透流によって導入する。タンパク質と抗体の複合体はサイズが大きいため深い流路(深さ300 ナノメートル)に沿って下の方に流れ、一方でフリーの抗体は浅い流路(深さ60 ナノメートル)に導入されるため、流れの方向に沿って斜めの方向に流れていく。タンパク質と同程度の大きさの流路構造を用いることによって、タンパク質をサイズによって連続的に分離できることを示した例であり、連続的な分子精製やターゲット分子の定量分析に応用可能である。さらに、抗体とタンパク質による複合体形成反応がどのような時間スケールで起こるかというような研究にも応用できる。

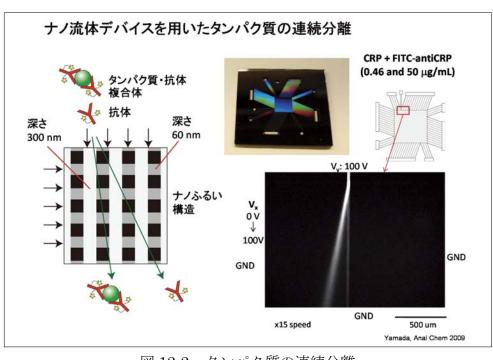


図 12-2 タンパク質の連続分離

マイクロ流路、ナノ流路を用いた生体関連分子の分離は世界中で行われており、新規手法が次々と提案されている。特定の細胞の選抜を行うマイクロ流路構造や、RNA、DNA、タンパク質などの生体高分子を高速に分離するナノ構造体が開発されてきた。マイクロ流路には、以下のような特長がある。(1)溶液を連続的に導入し流れを生じさせると、安定な層流が形成され、任意の流路構造を用いることで流れのプロファイルを正確に制御することが可能。層流は乱流に比べて予想しやすいため、計算による流れの予想が容易。(2)マイクロ流路を用いた分離操作は比較的簡単に操作可能。そのため、分離操作の機械化、自動化を行う上で有利。(3)操作が連続的であることが多く、サンプルの前処理技術やターゲットの検出技術と直列的に接続、あるいは他の分離技術と組み合わせることも可能。(4)高速分離が可能であり、少量のサンプルであれば分離要する時間はわずかで、通常スケールの実験系では困難な生体粒子の操作も可能。(5)細胞分離の場合、既存の手法では細胞のサイズ、表面のバイオマーカー、比重が分離パラメーターとして頻繁に利用されているが、マイクロ流路を用いると、例えば細胞形状(変形)、接着性、運動性、電気特性といったパラメーターを用いた分離も可能。

生物分野における分離技術のうち、医療における診断や治療を目的とした場合、例えば 血液中には低分子やタンパク質などの小さなものから、エクソソームや細胞といった大き なものまで存在しているため、その中から必要なものを選抜する、希少な成分だけ分取・ 解析することが非常に重要である。

近年、循環がん細胞が注目されている。これは血球細胞 10 億個のうち 1 個、1 ミリリットル中に 1 個程度存在すると言われるが、これを採取する必要がある。この際、精度の高い採取が重要であるため、マイクロ流路を利用した新規手法の開発が活発になっている。また、再生医療の分野においては、iPS 細胞から正常に分化した細胞と未分化の細胞を分類し、必要な細胞のみを効率的に採取する技術が必要になる。医薬品分野では、抗体医薬品を効率良く精製することも重要である。また医療目的の他にもバイオリファイナリーに

おけるバイオマスの精製など、分離技術への期待は大きい。

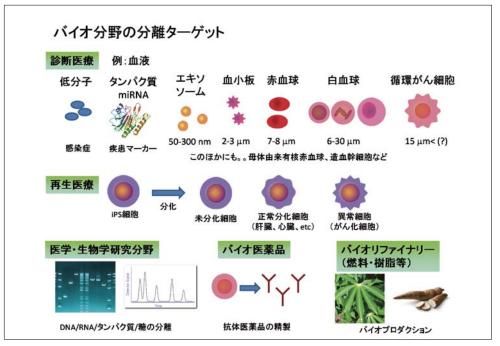


図 12-3 生物分野の分離ターゲット

細胞の選抜を例にとると、多くの場合遠心分離が利用されている他、磁気抗体分離、フローサイトメトリーが用いられている。こうした技術において、操作の簡便さと分離の精度は二律背反の関係にあり、遠心分離のような方法ではコストはかからないが精度が低く、一方、フローサイトメトリーでは高精度の分離ができるがコストは高い、と言える。生物系の分離技術においては、この間を埋めるように、簡便な操作で、より精度よく分離する方法やシステムを構築するということが今後の課題となる。また、多くの細胞分離手法では、抗体を用いて標識して細胞を分離するということが行われているが、抗体を用いずに、細胞を非標識で選抜する技術の開発は重要である。

どのような技術が生物系の分離に革新をもたらすか、ということについて考えたい。細胞の分離・選抜においては、非標識で精度よく細胞を分離するシステムを実現する必要がある。特に再生医療の場合、分離した細胞を体内に持ち込む必要があるため、非標識での分離は重要な革新となり得る。また、循環がん細胞においては、これを効率的に採取することで、がんの早期発見や、抗がん剤の薬効評価などが可能になるだろう。

#### バイオ分野の分離に求められる革新とは

#### 細胞の分離・選抜

非標識細胞の分離 → 抗体が不要 → 再生医療・診断医療への展開 循環がん細胞(100億個に1個)の分離と定量 → がん診断医療における革新

#### エキソソームの分離・濃縮

高速な分離・濃縮 +RNA検出などの他の操作との統合
→ 診断医療における革新



BD FACS Aria™ III Cell sorter

#### 生体高分子の分離

DNA·RNAの高速分離 と同定・シーケンシング→ 統合化分析システムの開発 タンパク質の高速分離と高感度定量 → 診断医療・バイオ医薬品製造における革新

#### 既存の手法の高機能化

フローサイトメトリーの高機能化 (検出・ソーティング以外の機能を付与?) 貴重な細胞・ターゲットをロスすることなく回収するシステムの開発

これらを簡便・迅速・安価・自動的に行うシステムとして マイクロ・ナノ流体デバイス技術の重要性・応用可能性が高まっている

図 12-4 バイオ分野の分離に求められる革新

また、エクソソームの分離も大きなトピックである。エクソソームの分離には時間や手間がかかるため、これを簡便かつ精度よく回収することができれば、様々な疾病の早期診断を行うためのマーカーとして利用できるものと期待されている。

DNA やタンパク質のような生体高分子の分離については、それらを単に分離・精製するだけではなく、同時に分析・同定するシステムが重要である。質量分析などの既存の分析手法を用いてもよいが、サンプルの前処理から分析システムまでの一連の操作を統合した分離・分析システムの開発が今後強く望まれる。さらにタンパク質については、バイオ医薬品の製造においてもその精製手法の革新が重要になるであろう。

さらに、既存の分離手法や装置の高機能化も求められている。フローサイトメトリーについては、現在、アメリカの2社がほぼ市場を独占しており、日本でもソニーが新しい装置を発売して、同分野に参入しようとしている。こうした装置の今後の発展としては、単に既存の技術を簡便にしていくだけではなく、新たな機能として、サンプルの前処理との一体化や、他の分離手法との組み合わせによる高機能化などの発展が考えられる。

このようなバイオ分野における分離システムに革新をもたらすためにも、マイクロ流路技術が活用可能である。マイクロ流路技術は既に 20 年ほどの歴史を持っており、分析装置の一要素として組み込まれているものも多いが、それ自身が単体の汎用デバイス・商品として成功している例はあまり多くない。その理由としては、通常のマイクロ流路システムでは、サンプルの処理量が十分でないことが挙げられる。先に例示したシステムでは、1分あたりの血液サンプルの処理量は、数十マイクロリットル程度である。分離精度を維持しつつ、いかに処理量を増やすかという点が重要になる。また、操作性として、マイクロメートルサイズの流路構造は閉塞が起きやすい、という課題があるため、閉塞を起こしにくい流路材料の開発や表面処理技術も必要となる。さらに、高精度な製造構造を比較的安価に作製するための技術も必要となる。流路構造の製造にはクリーンな環境が求められることが多いが、大量生産できる設備・技術とクリーンな環境の両立が必要になる。

加えて流体解析や分離挙動のシミュレーション技術も必要となる。微小な空間において、 分離の際にどのような現象が起きているか、そのメカニズムが不明である例もあるため、 流体の解析技術も重要であると言えよう。また、機器の面で述べたように、計測分析など のシステムとの連携・統合・システム化、多様な研究者との連携が重要である。さらに、 マイクロ流路に限って言えば、「マイクロ流路でしかできない」というキラーアプリケー ションを実証することも重要になるだろう。

最後に国として行うべき点について考えてみたい。我々研究者からの視点で言うと、ユーザーと技術の側の連携不足という現状があると考えられる。例えばマイクロ流路を作る研究者が医学系研究者に実物を提供すると、あたかもワンタッチでボタンを押すだけで期待通りの分離が達成されるようなイメージを持たれるケースが多いが、これは現実との間でかなりのギャップがある。ユーザーと研究開発者の連携によって、どのようなターゲットを分離したいか、あるいは分離できるのか、議論した上で、特定の目標に適した技術者・研究者・ユーザーを集めるといったような仕組みがあれば、当該分野の技術革新が加速するものと考えている。

#### 質疑応答

- ・事例としてあげられた産学官連携プラットフォームだが、具体的に何について連携する ことを考えておられるか。
- →産の側は、分離技術のユーザーであると同時に開発者であるとも言える。たとえば大学では、学生が手作業で作製しているため、ユーザーに流路構造を大量に供給するということも難しい。ユーザーに対して技術をアピールすることも大事であるが、作製プロセスの高効率化は必須である一方で、学の側では研究としてやりにくい。このような連携を能動的に模索する仕組みが必要であると考えられる。
- ・産の側ではナノデバイスに必ずしも好意的でない場合が多い。精度の面などでは産としての要求水準を満たしていないと思われ、連携するための決定打が必要。まず、協力をするという文化が必要か。
- →連携には必ずしもナノデバイスありきではなく、マイクロ流路技術でも実現できる分離とそうでないことがある。例えば分離したいターゲットにどのようなものがあるか、ニーズについてユーザーの側に伺いたいこともある。特定の対象を分離できなくて困っている、あるいは、そうした技術がないか、という提案を受ける場としても機能する機会が重要ではないかと考える。現在、産学のコミュニケーションをとる場というものはほとんどないのではないかと思う。
- ・この分野で、課題を決めてマイクロフルイディクスを最適化できるかというとそこまでは難しい。デザインルールがないように思われる。論文が書けるレベルのものはできるであろうが、企業で使える、実用化できるというところまで至らないように思われる。半導体ではデザインルールをいろいろ作り、CADによる設計を行い、目標に達するものが作られるように思うが、マイクロ・ナノ流体の分野ではそこまでのものがないのではないか。こうしたデザインルールを分野として定めることが大きなポイントではないかと思う。
- ・半導体では最先端のラインは日本国内に数が少なくなっている。古い減価償却期間が過

ぎているサイズが大きな加工ラインはかなりあり、マイクロ流路の試作にも適用できると思われる。CRESTの研究者にもこうしたラインをうまく作って成果を挙げている例もあり、既存ラインの活用は可能性があると思われる。

医薬品メーカーなどに対して、あるいは医学系研究者に対して、彼らが魅力的と思う 提案を出せるかがカギにではないか。ユーザー側が「面白い」と思えるようになること で、ポジティブなフィードバックがかかって、流路をつくるメーカーも乗り気になる。 その意味で、医薬メーカー等に有効な情報をいかにして出していくかが重要であろう。

- ・都市鉱山を研究している立場から考えると、分離工学の両極端にいるような感じがする。 我々の分野では、1日単位でトンのレベルで処理ができない、少なくとも数十キロの処 理ができないものはボツになってしまう。少量しかできないが、今までにないようなア イディアで分けるというものが埋没しているが、何に使えるかわからないという状況に ある。ただし、我々のアプローチでは、金属分離を想定するため、比重、磁性、導電性 は金属相互の物体差があるということを想定している。こうした対象が生物系の分離に 存在するか。具体的には非常に強い磁性をもつ粒子があって、これを高精度に取り除く、 採取量として数キログラムとるというようなものがあるか。
- →通常のマイクロ流路を用いた操作では、1分間で最大1ミリリットルという処理量であるが、用途によってはそれで十分であることも多い。また、マイクロではなくて、ミリメートルサイズの流路を多数並べ処理量を上げる方法も考えうる。例えば流路を数十個並列化して、毎分500ミリリットルの処理を行う研究事例もある。ただし処理量は分離精度とトレードオフの関係にあるので、着地点が合致することが重要かと思われる。
- ・マイクロ流路を分離手法として検討したことがあるが、その時に思ったのは、半導体のロジック設計と異なり、診断なら診断として用途が明確であれば、標準化が不要なのかもしれないということ。その場合には、どうしても1つずつの対応にならざるを得ないということもあって、ビジネスモデルを作るのが難しいと感じた。
- ・生物系分離で求められる革新のうち、細胞に関して重要な点は、標準細胞の分離と思われる。抗体が不要というニーズがあるが、これは、特定の細胞を分離する場合に重要。 抗原抗体反応などで特定の細胞を捕まえると思うが、その際、蛍光標識をつけているものを不要にするということと思われる。循環がん細胞は数が非常に少ない、その際、マイクロ流路を使って分離するにはどのような手法を用いるのか。
- →循環がん細胞は通常の細胞よりサイズが大きい。また、血球系の他の細胞と比べて変形 しにくいという特性もある。これらを利用して、流路中で変形するものを除外する方法 も考えられる。また、大きさだけで分離する手法は様々なものが開発されている。抗体 を用いた蛍光標識による分離は、分離精度が高いものの、アプリケーションが限定され てしまうことが難点である。なお、抗体標識を用いずとも、表面マーカーと相関のある 因子を用いる分離手法も考えられる。
- ・SHG(二次高調波)を用い、無染色で細胞の種類を分別することができるようになってきた。ファブリケーションの施設ではTIA(つくばイノベーションアリーナ)という組織があり、そこでは様々なサービスがあり、ニーズに応えることも可能であろう。

## 生体関連物質の先端分離技術 - エクソソームの分離 -

糸長 誠(JVC ケンウッドメディカルシステム開発タスクフォース)

JVC ケンウッドは 2008 年に日本ビクターとケンウッドが合併してできた会社で、民生機器、カーナビといったようなものを開発・生産している。この流れの中で、光ディスク技術を開発してきた。この技術は微細な情報ピットを高精度に検出し、ディスク表面を高精度に走査できるため、バイオ試料の検出に適していると考えたことから、ターゲットをエクソソームに絞って開発に取り組んできた。

次世代のバイオマーカーとして、その候補はたくさんあるが、その中でもエクソソームは大変有望とされている。ただ、現在でも、その簡便な定量計測法は確立しておらず、エクソソームの研究も未成熟な段階となっているため、後発メーカーも参入チャンスがあると考えた。

エクソソームは体内の細胞から分泌される小胞で、血液、尿などの体液の中に大量に存在している。大きさは30から200ナノメートルで、約30年前に発見されている。これは、細胞内の不要物を細胞の外に排出する機能をもっており、「細胞のごみ捨て場」と見なされてきた。しかし、2007年に、エクソソーム中にマイクロRNAという遺伝子情報が含まれていることがわかり、注目を集めるようになった。エクソソームは脂質二重膜で構成されており、表面に様々なタンパク質、内部にマイクロRNAなどが含まれている。

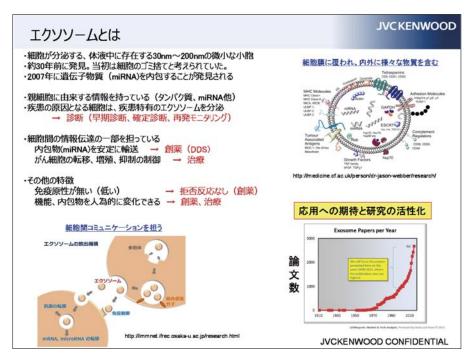


図 13-1 エクソソームとは

エクソソームは細胞から分泌されるものであることから、その内部と表面に、エクソソームを分泌した細胞に由来する情報(分子他)を保有している。つまり、どの細胞が分泌したかで、中身も外側も変化することになる。疾患の原因となった細胞なら、疾患特有のエクソソームを出していることになり、これを検出することで、早期診断、確定診断などに

用いることができると考えられている。

エクソソームは他の細胞に移ることで、物質の細胞間輸送の一部を担っている。また、 外側の膜は非常に安定なことから、輸送される分子などは安定して輸送される。また、表 面のタンパク質を使って、特定細胞を見分けている。これらを利用して、薬を特定の細胞 に送り届けることができないかという期待もある。

さらに、エクソソームの内外の分子が、がん細胞の転移、増殖抑制に関わることが分かり始めている。この特性を利用した治療法も検討されている。

血液中でのエクソソームは小さいが非常に数が多い。1ミリリットルの血液中で、白血球、赤血球は10<sup>6</sup> から10<sup>9</sup> 個あるのに対し、エクソソームは10<sup>12</sup> 個程度あるとされている。これを分離するために一番容易なのは粒径による分離であるが、同程度の大きさであるリポタンパク、タンパク質複合体も分離されてしまうため、粒径だけでは分離しきれない。また、エクソソームにもいろいろな種類があることから、特定のエクソソームだけを分離するというニーズが存在する。

また、分離だけではなく、定量する手法を確立することが重要である。診断の確立をするためには、純度の低い分離をしたとき、どのくらいのエクソソームがはいっているかを調べることが重要であり、特に血液中に大量の夾雑物がある時、可能であれば前処理なしで測定することが望まれる。

先ほど話題になった、循環がん細胞の場合は、1ミリリットルのうち、数個存在すると、 卵巣がんや乳がんなどは再発がわかるとされているが、循環がん細胞とエクソソームは大 きさも数も異なるため、診断に使うには異なる技術が必要となる。

エクソソームを粒子として見た場合、代表的な分離手法は超遠心分離である、これが現時点でエクソソーム分離の標準手法である。概ね 10 万 G で 1 ~ 3 時間遠心分離機にかけて得た沈殿物を、緩衝液に溶かすことで分離精製を行っている。この方法では、処理時間が長いこと、エクソソームの収率が 10 ~ 15% と低いことが課題である。他の方法としてクロマトグラフィー、マイクロフィルターとタンパク質除去フィルターの組み合わせ、試薬を用いた沈殿法などがあるが、一長一短あり、決定版がないのが現状である。また、粒子としてのエクソソームの測定法として、ナノ粒子追跡法、コールター法、フローサイトメーター、動的光散乱法などがある。

エクソソームの機能面での分離・抽出法としては、表面に存在するタンパク質や糖鎖を 検出する方法がある。これは抗原抗体反応を用いた方法、マイクロ流路を組み合わせた方 法、ビーズを使う方法などが提唱されているが、こちらについても決定版はない。

こうした中で開発したのが、Blu-rayディスクの装置を検出に利用したイムノアッセイ 法である。基板上でイムノアッセイ反応を行い、これを光ディスク装置で検出している。 この方法では、既に民生機器として確立された技術をもとにしており、機器として生産す る際、コスト面では非常に有利と思われる。

諸外国ではエクソソームの治療応用、工業化を目指す例もあり、アメリカ、イギリスでは透析治療に用いることが検討されている、乳がんに使う抗体薬であるハーセプチンが効かなくなることがあるが、その機序にエクソソームが関与しており、フィルターを用いてエクソソームを除去することで薬効の回復を目指している。また、創薬を目的として、フィルタリング法でエクソソームを大量に作成する例もある。

エクソソームをどのように分離するかという点については、エクソソームの使用目的で

変わってくる。生物学的な活性を保持する必要があるか、スケールをどのように考えるか、 機能性の有無、生体適合性など、異なる機能が要求される。こうしたニーズを踏まえつつ、 分離を検討していく必要があるだろう。

また、人工的にエクソソームを作るという方法も期待されている。例えば診断する場合、エクソソームの検出が重要となるが、その際、標準試料が必要となるが、エクソソームには標準となるものが今のところない。標準がないと、とりあえず今日は測定できたが、翌日はわからない、精度が変化するなどの問題があるので、難易度の高い課題ではあるが、実施する価値はあるだろうと思われる。

#### 質疑応答

- ・分離工学のサイエンスとアウトプットの両方が含まれる内容と感じた。マーケティング 戦略を考えた場合、市場があるか、という点が問題になると思うが、その点はどうか。
- →現時点でエクソソームを診断、治療に使うにはまだ早計で、研究段階にあると思われる。 ただ、国際競争相手の欧米では、薬事に載せない診断が可能で、日本よりも早く展開す る可能性がある。これを実現するための研究基盤技術開発ではワンチャンスあり、これ を踏まえて大きな市場に結びつけることができるのではないかと思われる。
- ・次には海外との競争に勝てるかという点がある。日本として勝てるか、その価値は長く 続くかという点もあると思われる。
- →少なくとも勝ちたいという意識の下でやっているが、長く続くかどうかは、診断技術の 伸展の度合いとも関係するであろう。現在、細胞間コミュニケーションを含め、研究の 進展が著しいが、こうした点が一度、診断、治療に適合すれば長く利用できる技術にな り得ると思われる。
- 戦略としてブルーオーシャンになっていると思うが、
- *→*そのつもりではある。
- ・既にいくつかの企業でエクソソーム分離解析装置が販売されている。その資料によれば、 あれこれ測定できるとの記載があるが、これらとの差分はどのようなところにあるのか。
- →既存装置は基本的に粒子の測定装置であり、試料の前処理は必須である。具体的には血清、体液から直接の計測はできない。我々の装置は前処理なしで、診断に耐えうる精度、 安定性を備えることが目標である。
- ・現時点でこの分野、日本は弱いと思われる。ナノ粒子計測を行う企業はたくさんあり、 エクソソームを対象にしようという企業も増えたが、5年前にはなかった。企業の内部 で経営陣に説明して、その重要性が理解されてこなかった。その意味では、本日の発表 で、エクソソームが重要であることが認識された点は非常によいと思う。

なお、分離膜など、いろいろと使える技術は多いと思うが、日本が一番弱いのは、こうした課題について、実際に技術開発をしている人に情報が届かないこと。アメリカの場合はベンチャーがあるため情報が早いのではないかと思う。日本は潜在的な技術開発力は高いので、この件について逆転できる可能性は高いと考える。なお、装置の性能差などについては、エクソソームの研究を積極的に主個成っている国立がん研究センターのグループが詳しいと思われる。

・標準物質がないのは決定的と思うが、そもそもエクソソームの物性はわかっているのか。 論文は出ているが、全てクライオ電子顕微鏡での観察結果である。クライオ電顕像が本 当の姿か疑問である。

- →この研究でここまで来ることができたのは、JST の先端計測プログラムで支援があったからと思っており、大変に感謝している。また、物性については、本当の姿は未だ完全にはわかっていないと思っている。現在の標準物質の案として、脂質二重膜に2つのタンパク質をつけたようなものができるのではという考え方があるが、それが標準となり得るかについては、限定的にしかできないのではないかと思っている。
- ・抗体が既に存在しているとのことであるが、これは選別することなく、多様なエクソソームを捕捉できるものか。また、捕捉した後、エクソソームの何を調べると診断につながるのか。
- →大半のエクソソームにあると言われるタンパク質を抗体とし、これを狙う。ただし、その場合でも、全部は獲れていないのが現状で、大半のエクソソームが持っているとされる CD63 たんぱく質に対する抗体でも反応しないものがある。おそらく複数の種類の抗体を混合する必要がある。診断については、エクソソームの外側に何があるか、あるいは内側に何が入っているかの 2 種類がある。外側の例では、膵臓がんの診断に用いることができるエクソソームがあると言われているが、これと同じものを乳がん患者が出しているという論文も出ている。また、内側の物質での診断は、中に含まれるマイクロ RNA の存在、発現パターンで比較し、診断の確度を上げることが研究されている。
- ・内側に含まれるマイクロ RNA による診断については、国立がん研究センターのグループが研究を進めているが、疾患マーカーの種類ごとに、特許が成立するようで、国際的な知的財産権取得の競争になっているという。その意味で、エクソソームが内包するものだけでなく、表面たんぱく質の種類との組合せでの診断、新たな分離技術による、診断方法の確立など、分離技術からの波及効果の高さという観点で、今後も研究の進展が望まれる。

## 総合討論

分離工学イノベーション

ファシリテーター 永野 智己(科学技術振興機構 研究開発戦略センター)

これまでの各プレゼンテーション・質疑を踏まえて、(1) CRDS が事前提示した仮説「分離の研究対象を3つの分野(気体・液体の分離、資源・固体物質の分離、バイオ・医薬食農系の分離)として検討することの妥当性」について、(2) 重要研究開発課題および各セッションを越えて必要となる共通基盤科学技術について、(3) 研究開発の研究環境、学会、産学連携、情報の共有、社会システム、の各観点から議論を行った。以下では要旨を示す。

- (1) 仮説「分離の研究対象を3つの分野(気体・液体の分離、資源・固体物質の分離、バイオ・医薬食農系の分離)として検討することの妥当性」について
  - 気液の分離、固体の分離と分けているが、例えば下水処理場で高度な水をつくることがある。水処理は、液体と固体を行ったり来たりしながら分離をしていく。ここで深い線で分けることで、現場も分かれてしまうことがないようにしなければならない。
  - 三つの分野で考える際に、さらに分野と分野とをつなぐ梁が必要である。
  - 一例として、尿から金や白金を分離する技術を、アメリカと中国の企業が東京都の浄水技術に目をつけて買い取ったという話がある。そこまでの技術が日本にあるが、その先がつながらないというのは縦割りの影響のように思う。分離工学でも、物質や資源は都市鉱山の中にもあるし、バイオ系の物質も重要ターゲットを選び、大きな目標となる方向性があると良い。
- (2) 重要研究開発課題および各セッションを越えて必要となる共通基盤科学技術について ○プロセス全体
  - 各発表は、膜や抽出という単位操作が基本となっている。しかし、バイオは目的指向で入口から出口まで考えるものであり、先の大きなものも見る必要がある。例えば膜分離でコストは改善したが、逆に前処理は高額になったということがある。分離プロセスをトータルできちんと見なければならない。例えば食塩電解が使われるようになったのは水銀の使用が規制されたからだ。今から 40 数年前にイオン交換膜を使った電気透析装置を研究していたが、RO ができてきた途端に役に立たなくなった。そういうトータルの社会的な背景も含めた分離技術や、価値を考える必要がある。単位操作だけのコストダウンだけ見ていたら、実際の水処理をやり始めたら難しい問題が出てくるのであり、システム全体で設計する必要がある。
  - 全く同感。膜の研究一筋できたが、最初はいい膜をつくればいいと思った。ところが、いい膜とは何かといっても、結局、プロセス全体を見たときに膜だけ性能が良くても仕方がない。膜はオーバースペックになっていて、他が律速ということは幾らでもある。ところが、本当の産業としてのニーズがわかっていないということがあり、そして、他の部分で何をしないといけないか、そこでエネルギー

第

部

をどれだけ消費するかという計算ができない。膜分離のエネルギーだけなら計算できる。ニーズによっては、膜では高純度分離は達成できないので、全体システムを考える単位操作の研究者が必要である。しかし、単位操作しかやらず、プロセス全体を見る、いわゆる化学工学でプロセスシステム工学の専門家が極端に少な過ぎることが一番問題ではないか。研究者は自身が研究する単位操作がベストだと思いたくなるが、それでは、分離工学イノベーションは進まない。そういう体制をどうつくるか、ある種の国の政策的な主導が入る必要があるのではないか。

- 膜という観点から、シーズやモジュール、モジュールの構造など全部が効率に効いてくるので、全体を研究する必要がある。もちろん、前処理、後処理、分離の操作の組み合わせなども含めて、様々な対象によって最適な技術があることを考える必要がある。
- 実用化を考えるときに、サイエンスやテクノロジーオリエンテッドだけではだめ だ。オブジェクティブオリエンテッドでどうするか。今回は分離工学という立場 から見ているが、ある程度の一つのオブジェクティブを見定めておく必要がある。 分離工学の研究者だけでは実現しない。
- 分離技術は完全にニーズオリエンテッドである。あるものを分離することが日本の戦略として必要だと決めたら、これを分離するには膜か、吸着か、抽出か、さらに、膜だったらポンプはどうかを考える必要がある。海水淡水化システムのエネルギー消費量が非常に下がっているが、その半分以上はエネルギー回収によるもので、膜の性能は貢献していない。機械屋がエネルギー回収装置をつくったからである。分離対象が決まると分離手法だけじゃなくて、機械や制御系なども議論する必要があるが、十分に研究されていない。海外の技術に対して優位に立つにはどうするかを議論すべきで、そのためには何を重要視するかを、誰かが責任を持って決める必要がある。
- 以前、バイオエタノールからプロピレンを製造するプロジェクトをやったことがある。バイオエタノールの供給、反応の触媒研究者、その後の分離、それから、全体を見るプロセスといった幅広い研究者が集まり体制を組んだ。そのとき、膜はあくまで一つの分離手段であり、蒸留や吸着との比較評価もした。プロジェクトの目標値は、いくらでプロピレンが製造できるかであり、それが蒸留で達成できないならば膜を採用しようとプロセス側の人も考えた。触媒担当者も膜を使う場合での必要な計算を行った。分離がメインではなく、そういう大きい目標に対して上流から下流までが一体となったプロジェクトでは、単位操作の融合ができる。

#### ○実証試験設備

● 大規模の場合、特に天然ガスの分離、CO₂のフラクチャリングなど、海外展開を視野に入れる技術開発では、例えば実ガスのテストが必要。一企業だけでは対応困難な場合には、国家プロジェクトのような仕組みが必要になる。例えば共通の研究機関があって、そこでは実ガスのテストができ、そこへ種々の膜を持ちこみテストができるならば、研究はかなり進展する。一企業でその技術開発のために試験設備を設置して、試験を行うのは莫大なお金と時間がかかる、そこまでの

リスクを取れない。基盤技術開発の段階では、商業化しても最終的に利益が出る か不明であり、簡単に試験をやってみることは難しく、まず無理と考えられる。 海外のガスを持ち込んで試験をする必要があるような場合、国レベルでの共通試 験機関のような仕組みがないと、実証研究は進まないのではないか。

#### ○シミュレーター

- これからはデータ駆動型の設計が、ソフトウエア、ハードウエアを含めてメーンストリームになってくる。そのための下地づくりが非常に重要。
- 横串のシミュレーション技術が要るという話があるが、そのときに一つ間違えるとシミュレーションは各論になる。例えば吸着膜の計算用やマイクロ流路の計算用である。システム的なことを対象にするならば、分離工学全体にわたるようなシステム的なシミュレーションを考えるべき。これは LSI の世界では行われている。LSI で一番重要なシミュレーターは、デバイスシミュレーターである。それと同じようなものが必要。産業界では、プラントシミュレーターという小規模なものがあるが、きちんと分離工学全体を通すようなものが必要である。但し、難点は、この種のシミュレーターは一点物になる。一点物なので市販ができない。従って、特殊解向けのシミュレーションシステムをつくるという新しい考え方を入れる必要がある。
- (3) 研究開発の研究環境、学会、産学連携、情報の共有、社会システムなどについて ○研究環境
  - 現状は、極端に言うとプロセス全体を見ると論文が書けない。論文が書けないと 大学では扱えない。すると、役にも立たなくても、何かを少し変えた分離操作を 研究することで論文を書く。ここを変えるのは技術の問題ではなく、大学教員の 評価基準をどうするかということである。
  - プロセスシステムの研究開発では本当に論文が書けないので、若手はついてこない。研究成果として、見かけ上の成果は求めないと官が旗印を上げてはいるが、実際は見かけ上の研究成果と出口ばかりを求めており、若手は右往左往して、結局、器用貧乏になってしまっている。
  - 要素技術の積み重ねでプロセスシステムを研究するというスケールの大きな話があった。国の研究プロジェクトなどに応募する時に、限定的なトピックではなくて、もう少し広いトピックだと若手研究者はチャレンジしやすい。
  - いわゆる LCA やプロセスの評価で、これが論文にならない場合、論文を書かなくてもよい人たちがグループをつくるべきである。そういう場で、あなたの分離技術はだめで、他の方がもっと良いと、きちんと評価できるような仕組みを作ることが、実際のプロジェクトには必要。
  - 私たちが教育するのは、20代の学生である。マクロな視点が大事だとは思うものの、それは高度な学問、高度な考え方がまず必要であるので、学生や院生にはなかなか理解できない。自分の経験を思い返してみると、非常に狭い領域を深掘りして、これだけは世界の誰にも負けないと、ある反応に関しては、自分は世界の誰よりも知っているというところから研究をスタートさせたような人が多いと

思う。自分のスコープというのはだんだん広げて行くものではないか。

#### ○学会

- 化学工学会に参加しているが、色々な部会が多数あっても、自身の研究テーマ以外の話を聞くことがない。バイオ部会に属するが、膜の話、晶析の話があると思いながら聞かないことが、自身の意識としても問題。
- 学会では、部会ごとのシンポジウムを開催しても、自分が所属しているところに参加するだけや、他には委員会に参加することぐらいで、横のつながりを持つ機会が少ない。例えば、委員会でよく会っているのに、超臨界と膜の研究者はいない、といった話はよくある。横つながりの議論を行って、産学連携で、秘密を保持して共通課題を解決するような形で、社会実装を目指したものを分離プロセスで行う方策はある。
- 大きい学会は、学会内にセクショナリズムがある、小さい学会の場合は学会自身の垣根があり、乗り越えないといけないというのは常に感じる。例えば部会の発表がA会場からZ会場まであると、Z会場で何をやっているかは全くわからない。旗を誰かが掲げて日本はこっちに向かう必要があるというコンセンサスを得て、そこに異分野の研究者全員が、その旗を見て向かっていくのが垣根を破る唯一の方法ではないか。
- 分離工学の場合は、分離対象を決めて、手法でやるとすると手法の人しか集まらなくなる。分離対象を決めるというと、何を分離対象にするかという、ここが大変なわけである。対象になり、そこにニーズのある人たちは非常に喜ぶが、外された方は非常に文句をいう。しかし、そこを決める必要がある。

#### ○産学連携

- これまで分離のアウトプットとして求められているものが、比較的狭いレンジにおさまっていたと思う。実は分離対象物質の多様性がこれまで余り議論されてきていない。おそらく、これまでの大量少品種ではなく、少量多品種型の分離膜が必要になる。そのためには生産コスト低減も必要。膜に限定すると、分離膜の原理をどう深掘りしていくかすごく重要だ。改めて立ち返って、原理の部分を深くアカデミアや国研が中心に掘り下げるのは大変重要である。
- 私は自分で学会を開いて産学一緒にやっているので、かなり産学の歩み寄りはあると思う。しかし、官が入ると企業はノーと言いたがる。企業は国の資金を嫌がる傾向があるので、バーチャルな組織体制をつくって対応することを考えるが、実際にその体制で研究を進めると、かえってそれが障壁になることを危惧している。恐らく産学が共同研究する時には、国が支援すべき具体的な内容を示すのが良い。
- 分離工学イノベーションを何のためにするかというと、生産性向上とパラダイムシフト。生産性向上は0から1に変える必要はなくて、タイムセービング、コストセービング、レーバーセービング、企業はそこに結構こだわる。アカデミアの研究者は0から1にこだわる。もちろん、それはパラダイムシフトだが、誰でもできるようにするのもパラダイムシフトだと思うので、今後、このような議

論をもっと産官学で一緒にできたらいい。

● 大学の研究者が再現性よく高性能な膜を開発したとしても、それは現状から少し進んでいる程度で、どうしてこういう性能が出るのか、その構造の解析が不十分である。それがわかってくれば、工業的に量産化する時に発生する問題が理解できる。そのような基礎的な部分は産学連携でやるのがよい。

#### ○情報の共有

- 例えば本日のような会議をアナウンスすると、参加する研究者間のネットワーキングができる。
- 例えば流路の研究は、10年前に比べたらかなり普遍的な技術になってきた。多くの研究者がある評価に使うという意味では、流路の系は非常にすぐれている。 そのような共通的基盤技術、課題が、簡単に皆さんでシェアできて使えるような場があったら良い。
- マイクロナノシステム学会では、マイクロ流路を使う研究者が多い。流路という 技術を使いたいという人がいても、そういう学会があることもあまり知られてい ない。場や情報をいかにシェアするかが重要。
- 複数からデータベースが重要との発言があった。マテリアルズ・インフォマティクスのプロジェクトでもそうだが、データの入力をどうするかが課題である。すなわち、みんな、データを使いたいが、誰も出したいと言わない。これをどうするかだ。

#### ○社会システム

- 部分最適の集合は、全体最適とは違う。リサイクルの分野で、もし最高レベルの 中間処理プラントを複数並べたとしても、プラントの最適化ができるプレーヤー は残念ながら日本におらず、機能していないケースが多い。投入する物質がどん どん変わることもあるが、そこをどうやって最適化するかというのが一つの課題 である。これにはもっと物理と化学のすり合わせを進めて、お互いが理解し合っ て一番良い点を探り合うことがさらに必要。中間処理と製錬の連携、製錬前処理 の強化、資源を循環させることを前提にすれば、動脈と静脈が連携するというこ とが必要になる。動脈側が回収することを想定して製品をつくることができれば、 最終的にはまた動脈に戻ってくるというが、非常に難しい。問題は、全体最適化 といっても、リサイクルの分野は、フィールドが他の分野に比べても広くて、ほ ぼ、全産業分野にまたがる話になってしまうこと。それを社会全体で見たときに、 どういうバランスを持って構築するのが良いかの答えを持つ人はまだいない。こ れを表現するのに最近、群盲象を評すという言葉を使っている。別に間違ったこ とはみんな言っていないが、ただ、誰も象全体を把握していないから、循環型社 会構築の方策を言い切れない。そろそろ、日本がその先手を打って、回答を出す という努力をすべき。そのキーテクノロジーとして分離工学の技術水準が、社会 全体の最適化水準を決めるようになるだろう。
- 先端技術はもちろん重要であるが、実用化を考えたときには先端技術だけではだめで、既存技術でもある程度特徴的な技術とどう組み合わせていくかが非常に重

「分離工学イノベーション」ワークショップの趣旨説明

の分離

要になる。例えば欧州は、高電子パルスや LIBS の技術は、過去に一旦、廃れた技術である。日本は一旦、技術が廃れると誰も研究しない。ところが、欧州は、実は官ではなく産が支えて、継続して産学協同の種々のプロジェクトを立ち上げている。今、センシングの技術は日本が強い。でも、組み合わせ技術では残念ながら欧州に負けている。少し考えを変える必要があると思う。つまり目的をどう設定するかだ。どんな産業を育てていきたいのか、我々だったら、静脈産業をどう育てますかという場合に、どんな技術が必要かを考え、そこから深掘りを進めることだ。

- 日本人は器用貧乏である。とにかく器用だ。海外に比して、特に非鉄製錬の分野の技術力は圧倒的に高いが、社会システムを組んだりするところで見劣りがする。幸い、製錬分離技術は世界をリードしており、例えばチタンでは世界需要の2割を製造し、高品位チタンは航空機用として輸出している。白金の資源は日本に全くないが、世界の約2割を世界中から集めてきて製錬して車に積んでいる。そういう意味では高い競争力がある。しかし、社会システムが弱い。
- 固体の分離では、もし、チタンが汎用的な金属として使われるようになったら、 鉄に頼ってきた社会から、鉄の腐食から解き放たれるので、国土インフラの強靭 化にも共通し、恒久的・半永久的に使える施設ができる。すると世界は、大きな 変革、生活のスタイルを変えると考えるので、こういう技術こそ日本が築くべき ではないか。
- 1990 年代の単位操作は大型のバッチ式や、石油化学のコンビナートに基づいたものであったが、半導体技術の横展開から、新たにミクロなチップを使い、かつ、過去の単位操作ではできないような反応がいとも簡単にできるようになってきた。例えばレーザーパルスですぐに昇温できる、かなり理想形に近いことができるというものを手にした。今後はそれをどう利活用するか。医療では疾病等にどう活路を見出すかに、日本が力を持って進めるべきところだろう。

#### 付録 1. プログラム

開催名称:科学技術未来戦略ワークショップ「分離工学イノベーション」

開催日時:2015年12月23日(水祝)10:00~18:00

開催会場:国立研究開発法人科学技術振興機構 東京本部別館2階セミナー室

(敬称略)

司会 永野智己(JST-CRDS)

10:25~11:15 セッション 1. 気体・液体の分離

セッションコーディネーター 関根 泰 (JST-CRDS)

「分離工学の現状と将来への挑戦課題・資源開発に関連した膜・吸着分離を例に・」 一ノ瀬 泉(NIMS)

「分離工学イノベーションを実現するために・膜工学からの視点・」

都留稔了(広大)

「膜分離材料の現状と課題、将来展開」 吉宗美紀(AIST)

「超臨界流体を用いた分離の科学技術と諸課題」 猪股 宏 (東北大)

「イオン液体・超臨界流体技術における相平衡に関する研究動向と将来展開」

下山裕介 (東工大)

「高度セレクティブセパレーション・晶析の発展・」 滝山博志 (農工大)

13:40~14:55 セッション 2. 資源・固体(元素)の分離

セッションコーディネーター 佐藤勝昭 (JST-CRDS)

「次世代固相分離技術」 大和田秀二(早大)

「レアメタルの低エネルギー・環境調和型分離技術の課題と将来展望」

岡部 徹(東大)

「これからの製錬研究」 宇田哲也(京大)

15:10~16:25 セッション 3. バイオ・医薬食農系の分離

セッションコーディネーター 児山 圭 (JST-CRDS)

「生体関連物質の分離・分析技術イノベーションの展望」 澤田 誠(名大)

「マイクロ流体デバイスによる分離技術の現状と課題」 山田真澄(千葉大)

「生体関連物質の先端分離技術 - エクソソームの分離 - 」 糸長 誠(JVC ケンウッド)

16:30~18:00 総合討論 (ファシリテーター 永野智己)

論点 1. CRDS 事前提示仮説の検証に関する議論

論点 2. 重要研究開発課題および各セッションを越えて必要となる共通基盤科学技術

論点 3. 研究開発の推進方策・研究環境、学会・分野連携、産学の人材ギャップ等

18:00 閉会 曽根純一 (JST-CRDS)

## 付録 2. 参加者一覧

(敬称略、五十音順)

#### (発表者)

- ・一ノ瀬 泉 国立研究開発法人物質・材料研究機構 高分子材料ユニット ユニット長
- ・猪股 宏 東北大学工学研究科附属 超臨界溶媒工学研究センター 教授
- ・糸長 誠 株式会社 JVC ケンウッドメディカルシステム開発タスクフォース シニアスペシャリスト
- 宇田 哲也 京都大学大学院工学研究科 教授
- ·大和田秀二 早稲田大学理工学術院 教授
- 岡部 徹 東京大学生産技術研究所 副所長
- •澤田 誠 名古屋大学環境医学研究所 教授
- 下山 裕介 東京工業大学大学院理工学研究科 准教授
- ・滝山 博志 東京農工大学大学院工学府 教授
- •都留 稔了 広島大学大学院工学研究院 教授
- ·山田 真澄 千葉大学大学院工学研究科 准教授
- ・吉宗 美紀 国立研究開発法人産業技術総合研究所 化学プロセス研究部門 主任研究員

#### (コメンテータ)

- ・大木 達也 国立研究開発法人産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 環境管理研究部門 総括研究主幹
- ・武脇 隆彦 株式会社三菱化学 科学技術研究センター 無機系機能材料研究所 グループリーダー
- ・中尾 真一 工学院大学工学部環境エネルギー化学科 教授
- 三輪 勝彦 武田薬品工業株式会社 医薬研究本部化学研究所 主席研究員
- ・山根 深一 東レ株式会社研究・開発企画部 担当部長

#### (関係府省・機関)

- ・守屋 直文 内閣府政策統括官(科学技術・イノベーション担当)付 (総合科学技術・イノベーション会議事務局)共通基盤グループ 政策 企画調査官
- ・田巻 孝敬 文部科学省研究振興局参事官(ナノテクノロジー・物質・材料担当)付 学術調査官
- ・松本 明善 文部科学省研究振興局参事官(ナノテクノロジー・物質・材料担当)付 行政調査員
- ・小野 真沙美 文部科学省研究開発局環境エネルギー課 専門官
- ・原田 千夏子 文部科学省研究開発局環境エネルギー課 行政調査員
- •村山 昌平 経済産業省産業技術環境局研究開発課 調査官
- · 平塚 淳典 経済産業省産業技術環境局研究開発課 研究開発専門職
- ・石田 勝昭 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター 環境化学ユニット ユニット長

- ・山下 勝 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター 環境化学ユニット 主任研究員
- ・高島 正 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター 環境化学ユニット 研究員
- ・長谷川健太 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター 新領域・融合ユニット 研究員
- · 松波 成行 国立研究開発法人物質 · 材料研究機構 調査分析室 室長
- ・伊藤 和典 一般社団法人ナノテクノロジービジネス推進協議会 事務局長

#### (JST-CRDS 分離工学チーム)

- ・曽根 純一 上席フェロー (ナノテクノロジー・材料ユニット)
- ・永野 智己 フェロー・ユニットリーダー (ナノテクノロジー・材料ユニット)
- 佐藤 勝昭 フェロー (ナノテクノロジー・材料ユニット)
- ・緒方 寛 フェロー (環境・エネルギーユニット)
- ・関根 泰 フェロー (環境・エネルギーユニット)
- ・松田 一夫 フェロー (環境・エネルギーユニット)
- ・児山 圭 フェロー (ライフサイエンス・臨床医学ユニット)
- ・中本 信也 特任フェロー

#### (JST-CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット)

- ・伊藤 聡 特任フェロー、国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究機構 コーディネーター
- ・魚崎 浩平 特任フェロー、国立研究開発法人物質・材料研究機構 フェロー
- ・馬場 嘉信 特任フェロー、名古屋大学大学院工学研究科 教授
- ・村井 眞二 特任フェロー、奈良先端科学技術大学院大学 特任教授
- ・荒岡 礼 フェロー
- ・末村 耕二 フェロー
- ・中山 智弘 フェロー・エキスパート
- ・馬場 寿夫 フェロー
- ・宮下 哲 フェロー

#### (JST)

- ・浅野 佳那 経営企画部 イノベーション企画推進室 重点分野推進チーム ナノテクノロジー・材料分野 研究監補佐
- ・古旗 憲一 低炭素社会戦略センター (LCS) 企画運営室長
- ・ 富中 利冶 環境エネルギー研究開発推進部 主任調査員
- ・廣瀬 哲 研究プロジェクト推進部 グリーンイノベーショングループ 主任調査員
- ・橋山 富樹 研究プロジェクト推進部 グリーンイノベーショングループ 主任調査員
- ・川原 隆幸 産学連携展開部 研究支援グループ 技術移転プランナー
- ・福井 信義 産学連携展開部 研究支援グループ 技術移転プランナー

#### ■ワークショップ企画・報告書編纂メンバー■

総括責任者: 曽根 純一 上席フェロー (ナノテクノロジー・材料ユニット)リーダー: 永野 智己 フェロー (ナノテクノロジー・材料ユニット)メンバー: 佐藤 勝昭 フェロー (ナノテクノロジー・材料ユニット)

緒方寛フェロー(環境・エネルギーユニット)関根泰フェロー(環境・エネルギーユニット)松田一夫フェロー(環境・エネルギーユニット)

児山 圭 フェロー (ライフサイエンス・臨床医学ユニット)

中本 信也 特任フェロー (企画運営室)

※お問い合せ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2015-WR-10

# 科学技術未来戦略ワークショップ報告書 分離工学イノベーション

平成 28 年 3 月 March 2016 ISBN 978-4-88890-492-6

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センターナノテクノロジー・材料ユニット Nanotechnology/Materials Unit, Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

〒 102-0076 東京都千代田区五番町 7 番地

電 話 03-5214-7481 ファックス 03-5214-7385

http://www.jst.go.jp/crds/index.html

© 2016 JST/CRDS

許可無く複写/複製することを禁じます。 引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission. Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

