CRDS-FY2015-SP-04

戦略プロポーザル

分離工学イノベーション

～持続可能な社会を実現する分離の科学技術～

STRATEGIC PROPOSAL

Innovations in Separation Engineering

- Separation Science and Technology for a Sustainable Society -

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

研究開発戦略センター（CRDS）は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立って行う公的シンクタンクの一つで、文部科学省を主務省とする国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）に属しています。

CRDS は、科学技術分野全体像の把握（俯瞰）、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。

「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

公的な科学技術研究は、個々の研究領域の振興だけでなく、それらの統合によって社会的な期待に応えることが重要です。「戦略プロポーザル」が国の政策立案に活用され、科学技術イノベーションの実現や社会的な課題の解決に寄与することを期待しています。

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧下さい。

http://www.jst.go.jp/crds/about/index.htm

エグゼクティブサマリー

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。我々、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用となる。このように、目的となる物質を高精度に且つできう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。事実、例えば今後予想される世界の人口増による、著しい水資源の不足に対処するために、廃水処理や海水淡水化での分離技術は必須になっている。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、その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、ここでも有効な分離技術が求められている。さらには福島第一原子力発電所事故に伴う大量の汚染水に含まれる放射性物質の分離、再生可能エネルギーの一つとして期待される微細藻類からのバイオ燃料精製時の脱水分離など、多数の社会的かつ産業的な価値を産み出す分離が重要視されている。これら液体に関する分離工程では、従来、蒸留プロセスが多用されてきたが、石油化学産業の消費するエネルギー内の約 40% を蒸留操作が占め、低エネルギーの分離技術が求められている。一方、気体においても PM2.5 のような大気汚染物質の分離が、また火力発電所で大量に発生する温暖化ガス（CO_2）の分離・回収の必要性、また将来の水素社会の到来に伴い、高純度の水素の分離・貯蔵が産業的に重要になっている。固体における分離は鉱物資源の選鉱、製錬、精錬から始まるが、世界の資源国において良質の鉱山は減少しており、ヒ素等の有害な物質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求されている。このようにして得られた資源をもとに人類は多様な製品を工業的に生産し、消費していく。使用後に廃棄される大量の製品群は、鉱石のような自然界の混合物に対し、人工的混合物とみなすことができるが、リサイクルするためには再び分離の対象物となり、物質循環が課題となる。現状ではこれら自然界の混合物と人工的混合物の分離を共に実現するうえでの、技術的、経済的乖離は大きいが、将来の社会において持続可能な物質循環を成立させる意義は極めて大きく、目を背けてはならない。一方、生体に目を向ければ、特定の細胞、タンパク質などの生体物質の分離においても、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要求されている。これらバイオ系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、しかも上記の気体・液体・固体の分離技術と異なり、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ことから、極微量での分離・分析が求められてくる。

このような中で、本提言が取り上げる分離工学イノベーションとは、複数物質の混合状態にある混合物から、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すものである。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提案する。今、分離がキーとなるような社会・産業的に重要な諸課題に対し、分離過程を支配する共通の科学的原理に立ち返りつつ、工学的手法によって目的物質の分離を実現する分離工学イノベーションが求められている。

一般に分離の基本原理は、機械的分離、平衡分離、速度差分離に大別される。本提言では、近年のナノテクノロジーや先端計測技術、シミュレーション技術の飛躍的進展を活用し、これら基本原理と、分離操作を担う媒介となる材料・デバイス・プロセスを、原子・分子レベルで制御することによって、従来は困難であった低エネルギー・高精度な分離操作の実現を目指す。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、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。すなわち、分離工学を体系化し、横断的な取り組みからイノベーションへ結びつけることを目指す。

本提言で扱う分離の対象課題は、大別した 3 つの主要ニーズ・方向性に分類される。1. 気体・液体の分離、2. 鉱物資源・固体の分離、3. バイオ・医薬食農系の分離、である。さらにこれらを横断する共通基盤的課題が重要であり、ここでは特に学術界の貢献が求められ、例えば混合溶液中の相分離過程や結晶核形成メカニズムの解明と自在制御、それらを把握するためのその場計測技術や、計測不可能な現象を把握するためのシミュレーションモデルの確立などが主要課題となる。上述の 3 つの方向性は、それぞれに求められる分離のスケール・規模や精度が大きく異なり、目的に応じて適用すべき分離技術またはその組合せ、システムも異なってくる。要求分離性能は用途によって決まり、それぞれの性能を実現するためにはコストも意識した新しい分離技術・プロセスや分離素材の開発が必要である。

1 の気体・液体の分離では、吸着分離、膜分離、吸収分離、の各研究開発課題につき本報告書では述べている。これらの分野では各種ゼオライトや、MOF（Metal Organic Framework: 多孔性有機金属錯体）、ナノカーボン材料といった新材料が、またイオン液体や超臨界流体などを用いた次世代型分離技術が登場しているが、蒸留などの分離技術代替への障壁は高く、新技術だけに頼るのではなく、既存分離技術との組み合わせによって、プロセス・システム全体として分離性能の大幅な向上を図ることが重要となる。

2 の鉱物資源・固体の分離では、リサイクル製錬、金属製錬・基礎学理について述べている。製錬技術の歴史は長く、成熟した技術分野と見られがちだが、依然として分離が困難な重要な元素ペアが多い。近年のナノ加工・評価技術、計算科学・モデリング、データ科学の進展を取り入れる事により、この分野は大きく変貌する可能性を秘めている。

3 のバイオ・医薬食農系分野の分離では、感染症等の原因物質の単離や簡易検査、疾患関連成分の精密検査、植物・食品の有効成分分離につき述べている。生体には未解明の機能分子が多く存在し、機能分子間の相互作用の理解が十分でなく、機能的に連携する分子群を、その機能・状態を維持したまま特異的に分離・分析する手法の開発や、解析結果を統合して最新の情報科学によって解析することが求められている。

以上、分離の対象によりその装置や設備のスケールはトンを超える巨大なケースからピコリットル、フェムトリットルの超微量の世界まで多岐に渡るが、その根本原理は、ナノ

メートルサイズの分子の持つ形状、物理的、化学的、電気的性質の違いに基づき、分離を行う点で共通する。すなわち、対象物質の物理的形状や大きさに対応した物理的な構造を用意し、対象物質の化学的親和性の違いを利用して分離していく。この意味で、これら分離プロセスを分子レベルで理解し、新手法、新材料の開発により分離工学のイノベーションを引き起こすうえで、横断的共通基盤技術の確立が重要である。これらを主体的に担う学術界への期待も大きい。産業界と学術界との役割分担および連携がまさに求められ、その推進方法についても述べている。

Executive Summary

The natural is composed of diverse mixtures comprising various substances, where numerous chemical reactions occur simultaneously. The similar situation holds true in the living organisms, where countless mingled substances flow in the blood. Such is the inevitable consequence of the nature which progresses inexorably toward entropy maximization. Thus, in order for human begins to achieve a sustainable society and survive, it is our important task to sort and extract useful substances from mixture, as well as to remove unwanted matter. This work represents a decrease in entropy, which requires input of energy.

The process for precise separation of desired substances with minimum energy consumption is a basic process in chemistry comparable to material synthesis and occupies an extremely important position in industry, as well. In fact, separation technologies are indispensable in wastewater treatment and seawater desalination, for example, in order to cope with the significant shortage of water resources associated with the expected population rise of world. Shale gas and shale oil have shown great promise as an energy source, but the large amount of contaminated water produced when mining shale is a serious environmental concern, where an effective separation technology is required. There has also been an emphasis placed on separation processes that produce great social and industrial merits, including the separation of radioactive material from the massive amount of contaminated water produced from the Fukushima Daiichi nuclear disaster, and the dehydration of microalgae in biofuel refining performed to extract compounds expected to serve as renewable energy. To date, distillation processes have been heavily used in the separation of liquids, but such distillation processes account approximately 40% of the total energy consumption in the petrochemical industry, requiring new low-energy separation technologies.

Industry is also facing many challenges with gases, including the need to separate air pollutants such as PM2.5 and to separate and recover greenhouse gases (CO_2) generated in large quantities by thermal power plants, as well as the importance of separating and storing high-purity hydrogen for the coming hydrogen society. The separation technologies of solid mineral resources are basically the dressing, smelting, and refining processes. However, due to the declining number of quality mines in resource-rich countries, we are now forced with having to mine low-grade ore that includes many harmful substances, such as arsenic and, hence, need to develop technologies for separating target substances with less energy and low environmental impact. Human beings industrially produce and consume wide variety of products based on the resources obtained from this mineral processing. The massive amounts of products discarded after use can then be treated as artificial mixtures, as opposed to the natural occurring mixtures like ore, and can once again be subjected to separation in order to recycle these products. This material cycle is now an important issue confronting humankind. Although great technological and economic hurdles exist at

present in achieving the separation of both naturally occurring mixtures and artificial mixtures, it is a challenge for humankind to overcome, since establishment of a sustainable material cycle will be extremely important in the future society.

In terms of living organisms, high-speed and high-precision separation processes are needed for separating specific cells, proteins, and other biomaterials to realize early diagnosis and treatment of diseases, minimally invasive procedures, and the production of pharmaceutical ingredients. Technical development of separation processes for biological material must also be integrated with analyses. Moreover, unlike separation technologies for gases, liquids, and solids described earlier, separation and analysis on biological material must be performed on infinitesimal quantities either to reduce the impact on the patient or simply because the body inherently includes only small amount of such materials.

The innovations in separation engineering addressed by this proposal are targeting at a marked improvement of conventional separating technologies with reduced energy consumption and improved precision in separating operations, such as the extraction of desired materials or the removal of unwanted substances from mixtures consisting of diverse substances in a mixed state. This proposal proposes drastic efforts to innovate separation engineering by reconsideration of processes and functions formulated by existing science and technology, represented by chemical engineering. This proposal is based on future demands of society and industry from a modern perspective of innovation in science and technology, and based on knowledge and skills acquired through the merging and integration of technologies of other fields. In order to solve various important social and industrial issues in which separation is crucial, innovation is strongly required that realizes separation of target substances by means of engineering methods while returning to the basic scientific principles that governs the separation processes.

The basic principles of separation can roughly be divided into three categories; mechanical separation, equilibrium separation, and speed-difference separation. This proposal aims at achieving energy-saving, high-precision operations of separation by making use of dramatic advances in recent nanotechnology, state-of-the-art measuring technologies, and simulation technologies to control at the atomic and molecular level these basic principles of separation, as well as agents of the separating operations such as materials, devices, and processes. The goal of this innovation is to achieve a required separation throughput per unit energy of separated substance while maintaining a high performance, despite there is generally a trade-off relationship between performance and throughput. In this proposal, separation problems that cannot be solved by individually developed technologies will be surpassed drastically by merging different technologies, introducing new materials and devices, and combining reactions. In other words, the goal of this proposal is to systematically organize separation engineering to create a direct path from cross-disciplinary efforts to innovation.

The challenges for separation addressed in this proposal can be divided into three major requirements or directions: (1) gas-liquid separation, (2) separation of mineral resources and solid wastes, and (3) separation in biological, pharmaceutical, agricultural, and food systems. The basic issues that intersect these three categories are also important. Some of these issues that will require contributions from academia in particular include the establishment of an in-situ measuring technologies for elucidating and learning how to control crystallization mechanisms and phase separation processes in mixed solutions, and simulation models for identifying unmeasurable phenomena. The required scale and precision differs greatly among the three directions described above and, hence, the separation technology or combination of technologies and the system employed will differ according to the objective. Requirements for separation performance are also determined based on the application. Accordingly, it will be necessary to develop new separation technologies and processes and separating materials with consideration for cost in order to achieve these requirements of performance.

For (1) gas-liquid separation, this proposal discusses the various R&D challenges in adsorption, absorption, and membrane separation. These fields have seen the emergence of new materials, such as zeolites, metal-organic frameworks (MOF), and nanocarbons, and next-generation separation technologies employing ionic liquids and supercritical fluids. However, the barrier to finding replacements for conventional separation technologies such as distillation is high and may not be overcome by depending solely on new technologies. It is important that we greatly improve separation performance in the overall process and system by combining new separation technologies with existing technologies.

For (2) separation of mineral resources and solid wastes, this proposal describes metal recycling and the basic theory of smelting. Smelting is often regarded as a mature field owing to its long history, but there are still many important element pairs that are difficult to separate. We have the potential to greatly transform this field by incorporating recent advances in nanofabrication and evaluating technologies, computational science and modeling, and data science.

For (3) separation in biological, pharmaceutical, agricultural, and food systems, this proposal describes the isolation and simplified testing for causative agents of infectious diseases, for example, the thorough examination of disease-related components, and the separation of active constituents in plants and foods. Living organisms possess numerous unexplained functional molecules whose interaction is not sufficiently understood. Therefore, we need to develop technologies for specifically separating and analyzing classes of molecules that are functionally related, while preserving their functions and states, and to consolidate the analysis results and analyze these results using the latest information science.

As described above, the scale of the apparatus and equipment needed in the separation process ranges widely from an enormous case weighing more than one

ton to an ultramicro scale of picoliters or femtoliters, depending on the subject of separation, but the fundamental principles are shared among all methods in that separation is achieved based on the shape of molecules at the nanometer level and differences in their physical, chemical, and electrical properties. Thus, we can prepare a physical structure that corresponds to the physical shape and size of the target substance and separate the target substance using its difference in chemical affinity. This shows the importance of establishing intersecting basic technologies common to all separation processes in order to understand these separation processes at the molecular level and develop new technologies and new materials that can bring about innovation in separation engineering, and therefore academia is expected to play an important role in this endeavor. This proposal describes the heightened need for industry and academia to share roles and collaborate, as well as how such collaboration can be implemented

目　　次

エグゼクティブサマリー

Executive Summary

１．研究開発の内容 …… 1

２．研究開発を実施する意義 …… 5

２－１．現状認識および問題点 …… 5

２－２．社会・経済的効果 …… 13

２－３．科学技術上の効果 …… 15

３．具体的な研究開発課題 …… 17

４．研究開発の推進方法および時間軸 …… 24

付録 1．検討の経緯

付録 2．国内外の状況

付録 3．専門用語説明

1．研究開発の内容

分離工学イノベーションとは、複数物質の混合状態にある混合物から、目的とする物質だけを取り出す／または不要物を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すものである。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提案する。今、分離がキーとなるような社会・産業的に重要な諸課題に対し、分離過程を支配する共通の科学的原理に立ち返りつつ、工学的手法によって目的物質の分離を実現する、すなわち分離工学イノベーションが求められている。

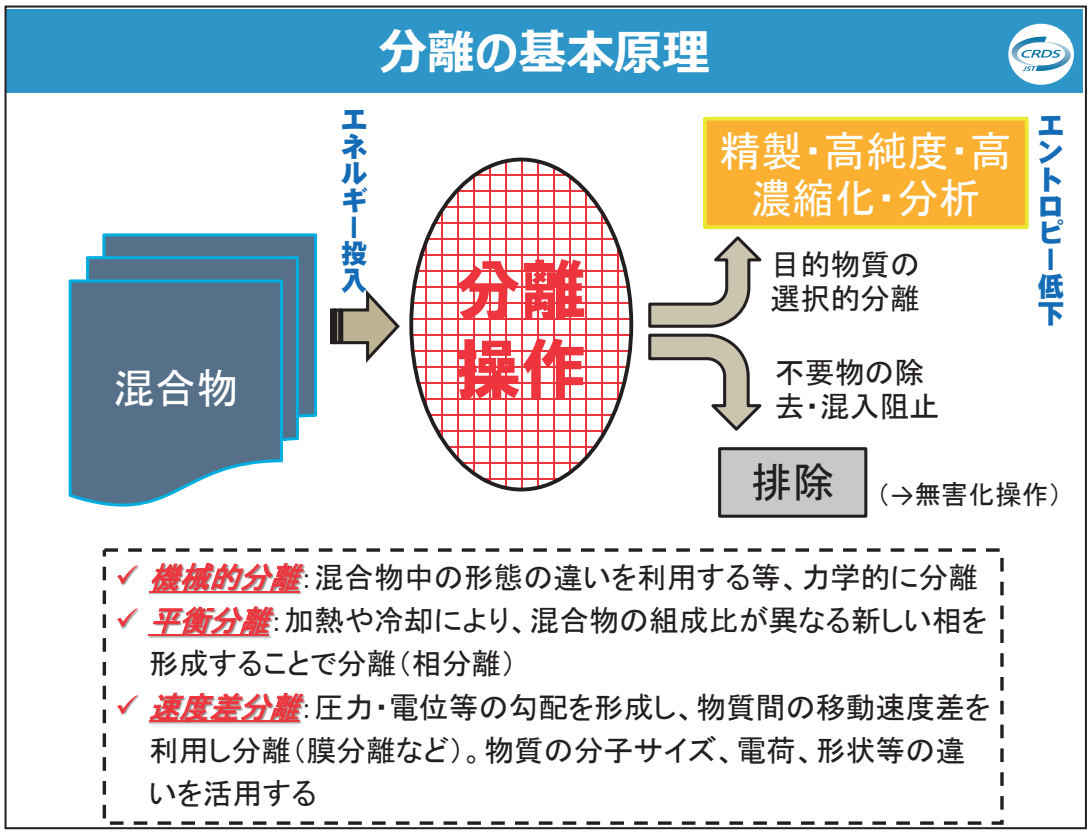


図 1-1 分離の基本原理

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。本提言では、近年のナノテクノロジーや先端計測技術、シミュレーション技術の飛躍的進展を活用し、これら基本原理と、分離操作を担う媒介となる材料・デバイス・プロセスを、原子・分子レベルで制御することによって、従来は困難であった低エネルギー・高精度な分離操作の実現を目指す。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、下図 1-2 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。

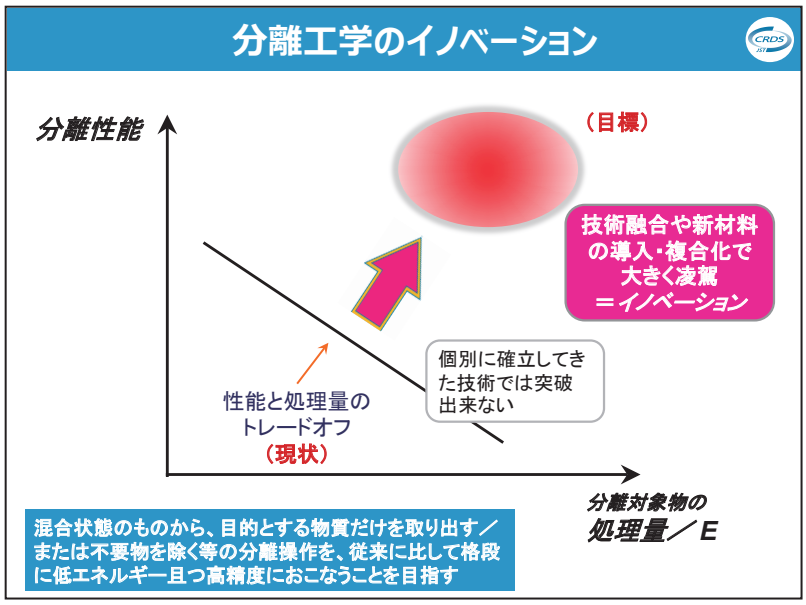


図 1-2 分離工学に求められるイノベーション

本提言で扱う分離の対象課題は、大別した 3 つの主要ニーズ・方向性に分類される。1. 気体･液体の分離、2. 鉱物資源･固体の分離、3. バイオ･医薬食農系の分離、である（詳細は第 2、第 3 章を参照）。さらにこれらを横断する共通基盤的課題が重要であり、ここでは特に学術界の貢献が求められ、例えば混合溶液中の相分離過程や結晶核形成メカニズムの解明・自在制御、それらを把握するためのその場計測技術や、計測不可能な現象を把握するためのシミュレーション・モデルの確立などが主要課題となる。上述の 3 つの方向性は、それぞれに求められる分離のスケール・規模や精度が大きく異なっている。

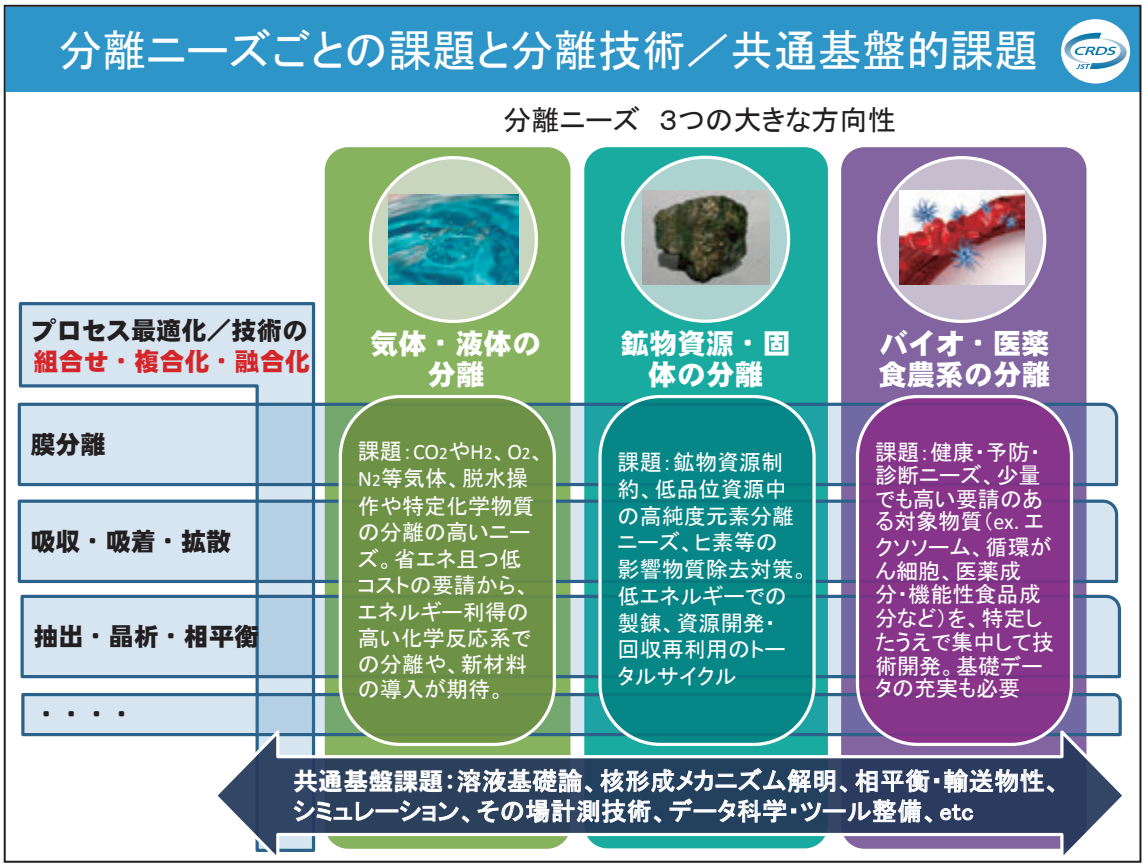


図 1-3 分離工学イノベーションの研究開発構成

目的に応じて適用すべき分離技術またはその組合せ、システムも異なってくる。従って、実用スケールや耐久性・分離性能確保の課題を十分に考慮した研究開発が求められ、いわゆる大学研究室レベルと実利用環境・産業レベルとの間にある技術的完成度のギャップの解消する、産学協同の研究開発体制を構築する必要がある。

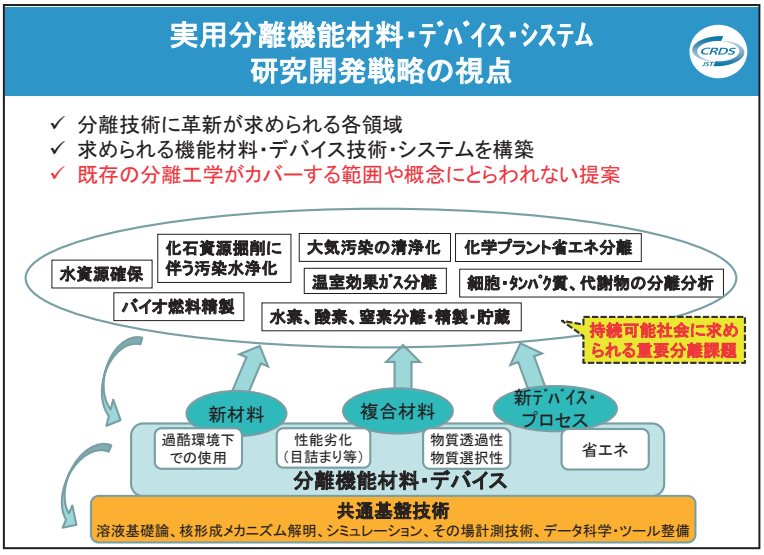


図 1-4 分離工学の研究開発戦略の視点

研究開発によって生み出された分離技術が工業的に用いられるかどうかは、分離性能とコストで決まる。要求分離性能は用途によって決まり、それぞれの性能を実現するためには新しい分離技術・プロセスや分離素材の開発が必要となる。従来、分離工学の研究開発者は、必ずしもニーズとしての要求分離性能を的確に把握せず、限られた条件下でより高性能な技術を開発することを目標としてきた面がある。その結果、コスト意識が希薄で、高い分離性能が得られても、コストが見合わないというケースが多々あった。今後は実際のシステム・ニーズに基づくプロセス検討がまずなされ、そこで必要となる分離性能が決められ、更に実用化可能なコストが概算され、そのうえで分

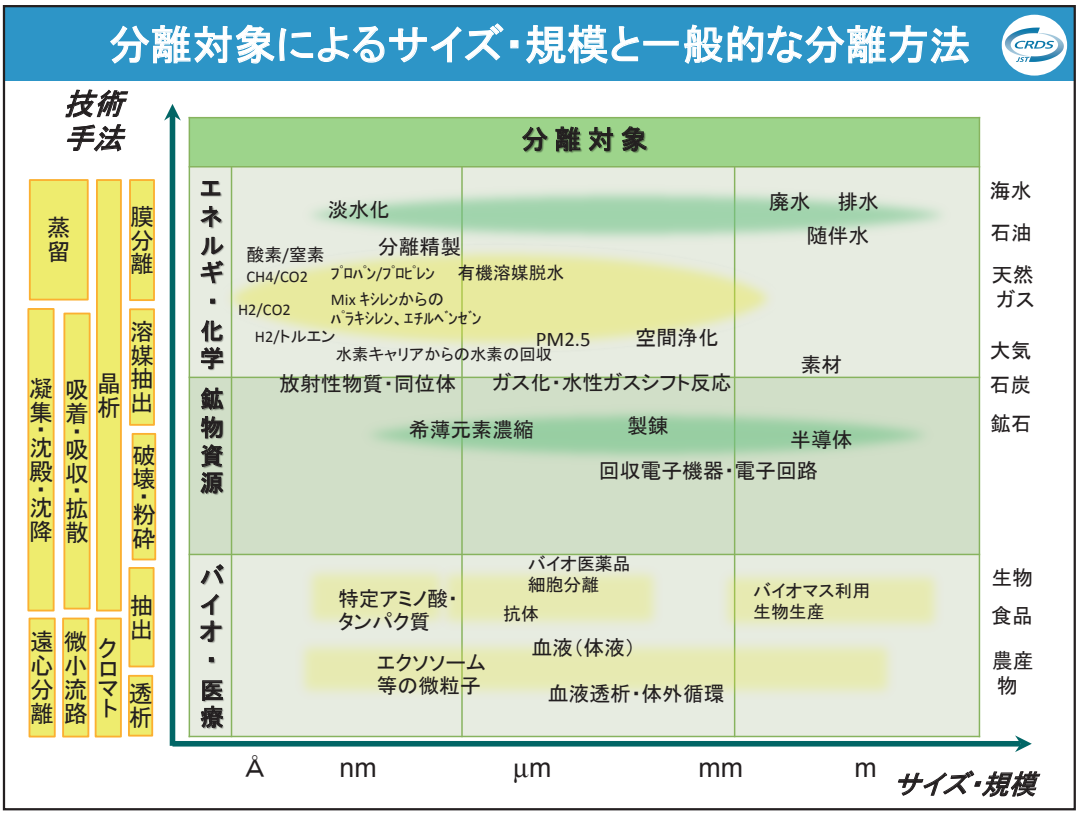


図 1-5 分離対象・手法の全体像

離技術の選択、新技術の開発をおこなうという流れにすることが求められる。すでに実用化されている蒸留などの分離技術を代替するような新技術を導入する障壁は高く、新方式だけに限るのではなく、既存分離技術との組み合わせによって、プロセス・システム全体として大幅な分離性能の向上が望めるケースや、コスト削減・省エネルギーを実現する新技術の開発が重要である。一方、過去の研究開発プロジェクトに目を向けると、特定の分離対象と分離技術を明確にターゲティングしている傾向が強い。その場合、吸着・吸収剤や分離膜といった分離材料の一般的な設計開発指針を構築した上での新たなニーズへ対応するための研究開発が必要となる。しかし、根本的な分離機構・現象解明・理論解析を扱うことができず、また基礎科学データの蓄積も不足していることから、産業界は新技術導入の可能性検証に踏み出しにくい面があった。したがって、これら共通基盤的な課題は、とりわけ文部科学省や JST の果たす役割が重要となる。

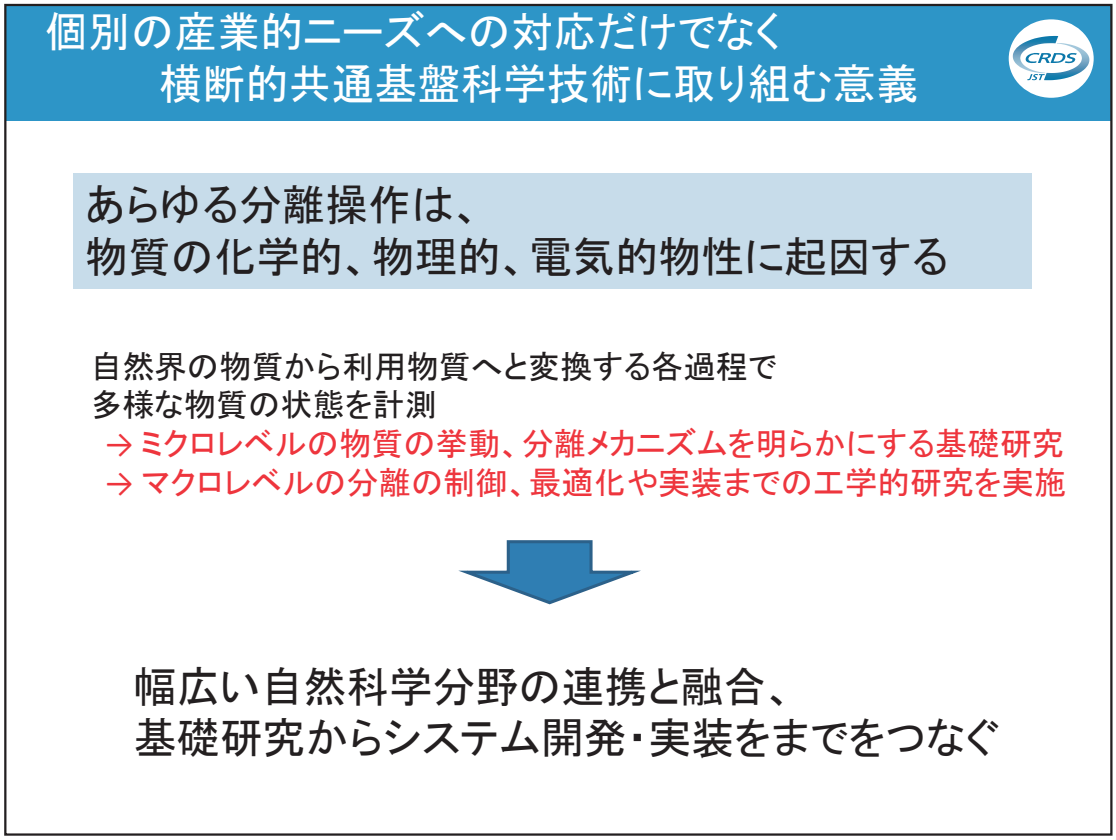


図 1-6 分離工学に関する横断的共通基盤科学技術

2．研究開発を実施する意義

私たちの社会活動は、多くの場面で自然界に存在する化石資源、鉱物、海水、大気、生物などから、目的の物質を人工的に選別、分離し使いやすくし、燃料、原料、食料、様々な製品として利用している。自然界の複雑な状態にある物質から、目的の物質を得る分離操作では、前述の通り系内エントロピーの低下に伴う外的なエネルギーの投入が必要となる。将来の持続可能な社会を実現するための、環境影響物や有害物等不要物の分離･回収、リサイクルによる資源の有効利用においても同様である。また、超高齢化社会や食糧問題を前に、人、動物、植物などの生体メカニズムや関連性を解明し役立てようとする要請に対しては、物質を分離し、分析、評価することが基盤となる。このような分離工学に対する社会の要請は高く、分離操作の高効率化、省エネルギー、コスト削減など、分離工学のイノベーションによる多数の社会的・経済的効果が期待される。また、あらゆる分離操作は、物質の化学的、物理的、電気的物性に起因する。自然界の物質から利用物質へと変換する各過程で、多様な物質の状態を計測し、ミクロレベルの物質の挙動、分離メカニズムを明らかにする基礎研究、マクロレベルの分離の制御、最適化や実装までの工学的研究を実施することにより、幅広い自然科学分野の連携と融合、基礎研究からシステム開発・実装をまでを考えることのできる人材育成といった、科学技術上の効果が期待できる。以下ではこれらについて、具体的に詳述する。

2－1．現状認識および問題点

分離工学イノベーションの研究開発を実施する意義について、第 1 章に示した 3 つの主要ニーズ・方向性（1. 気体・液体の分離、2. 鉱物資源・固体の分離、3. バイオ・医薬食農系の分離）ごとに分けて記載する。また、これらを横断する共通基盤的課題に関しては、第 3 章で具体的な研究開発課題として記載する。

(1) 気体・液体の分離

気体、液体の分離は、平衡分離（蒸留、吸着、吸収、抽出）、速度差分離（膜分離、電気泳動、遠心分離）や晶析、イオン交換など、石油精製、石油化学、天然ガスや合成ガス精製、海水淡水化、浄水、排水処理、食品分野等で、工業的に幅広く利用され成熟したとされる分野である。工業・化学的分離の現象サイズとプロセス規模を図 2-1 に整理した。分離現象のサイズはナノメートルからマイクロメートルだが、実プロセスの規模はメートルから 100 メートル単位と、小規模から大規模まで幅広い分野をカバーしている。

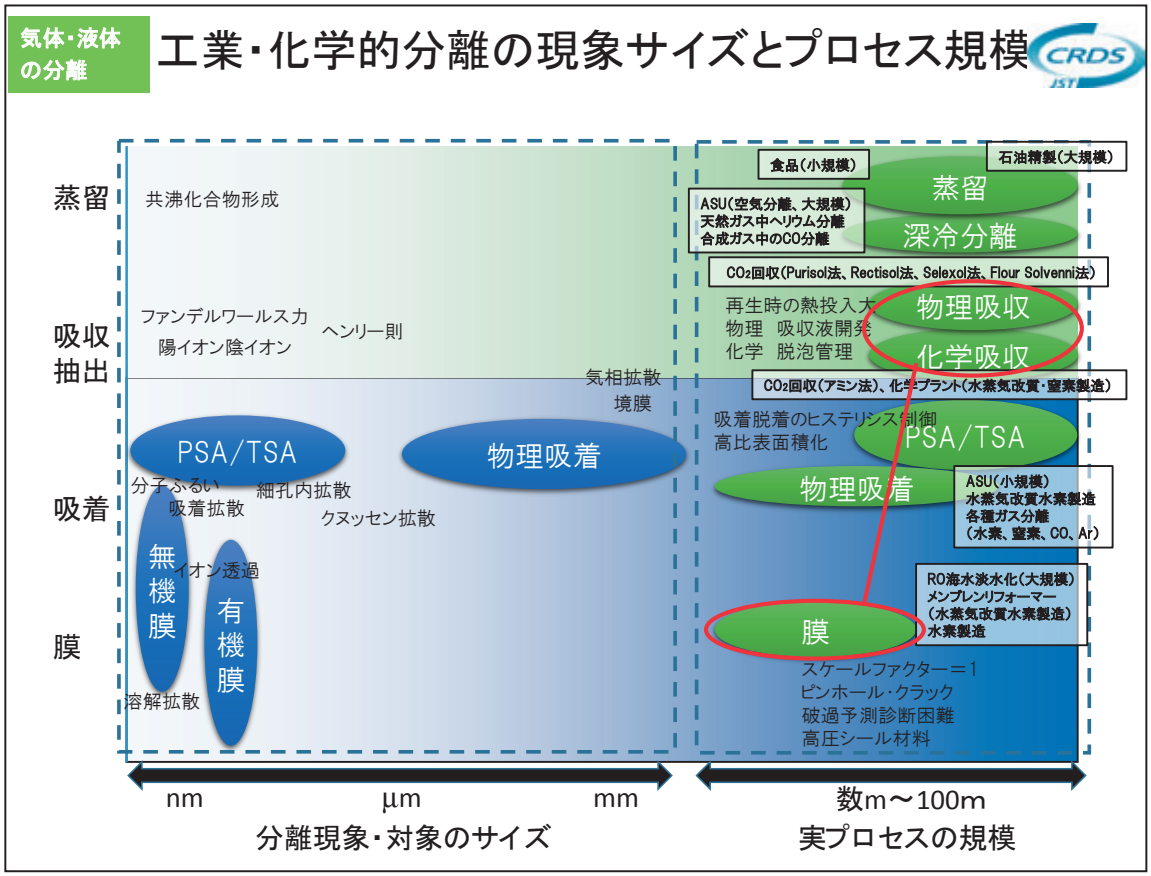


図 2-1 工業・化学的分離の現象サイズとプロセス規模

石油化学産業におけるエネルギー消費は、産業分野の約 15%に相当し、そのエネルギー消費の約 40%が蒸留操作に伴う分離・精製によるものである。また、例えば分離蒸留塔でエチレンとエタンを分離する場合、その段数は 120 ～ 150 段程度、プロピレンとプロパンに至っては 250 段程度が必要とされており、省エネルギー化、高効率化、コンパクト化、低コスト化のニーズは高い。しかしながら、既存の石油精製、石油化学システムでは最適化が図られており、また、長期信頼性・安定性・安全性（耐久性や耐汚れ性など）やメンテナンスの容易さが優先されるため、格段のエネルギー低減やコスト低減が見通せないかぎりは、新たな分離システムを導入するインセンティブは働かない状況にある。現在おこなわれているのは、蒸留操作に使用された熱エネルギーを回収し、再利用または別利用するコジェネレーションが一般的であるが、限られた高温の熱を除いては、再利用も難しい状況にある。

気体・液体の分離は石油化学産業の他にも、様々なかたちで行われる。例えば、飲料可能な水資源が不足し、現在でも世界で 19 億人の飲料水は安全でなく、さらに、世界における廃水の 80%は未処理のまま水域に放流されている。海水淡水化や浄水における液体成分の分離技術は世界スケールの課題である。特に淡水化技術では、大きな電力を要するため、電力・コストの低減が求められている。

また、シェールガス、オイルサンド採掘の際に生ずる大量の随伴水・汚染水処理や地球温暖化の原因となっている温室効果ガス（CO_2 等）の低コストで効率的な回収や固定、将来の水素エネルギー社会に向けた、天然ガスからの高純度の水素分離・精製、

CO_2 回収、さらには、微細藻類から生成した含水率の高いバイオ燃料の分離濃縮など、いずれも分離技術の革新が求められている。

これらのニーズに対して、現在、膜を使用した分離技術や、超臨界流体を用いた濃縮、晶析などの研究や、分離においてトレードオフの関係にある分離対象物質の処理量と分離性能の改善、省エネルギー化のため、「蒸留と分離膜」、「反応と分離膜」、「化学吸収や物理吸収と分離膜」の複合化・融合といった研究開発が行なわれている。

しかし、多くの研究は理想的な条件での試験・実証が行なわれ、実環境における試験を行なう環境が整っていないことから、長期信頼性、安全性の評価が困難な状況にある。また分離対象物質間における相平衡や輸送物性の把握における測定手法・装置の開発や理論解析モデルの構築では、一般的な化合物や混合系、温和な条件を対象とした実測データや、理論解析に関する研究が多く、実際の分離技術開発で対象となる複雑化する混合系や相状態に適用できない。そのため、プロセス設計に必要な基礎的知見が得られず、試行錯誤に大きく頼った技術開発となっている傾向がある。さらに、実装に際してのスケールアップした分離装置の製造方法（欠陥のない薄膜の実用化スケールでの製造など）やエンジニアリングまで視野にいれた研究開発が不足している。

また、分離操作を担う、媒体となる材料研究開発では、新機能を発現する膜材料や吸収材料の開発・適用が期待されている。例えば、相平衡・相分離を利用した超臨界流体では、連続的な高圧処理を可能とする超臨界流体取扱技術が待たれている。溶液中から不純物が混ざらないかたちで結晶を析出させる分離操作の晶析では、結晶核の発生や結晶成長が非平衡状態で生じるため、品質（粒径分布、粒子形状、純度等）や操作性（ろ過性、再現性など）が安定せず、向上が期待されている。新しい分離材料として期待されているイオン液体（常温溶融塩）では、多種多様なイオン対による物質系が提案されているが、応用との関連付けや、イオン液体そのものの低価格化が求められている。

(2) 鉱物資源・固体の分離

現代社会は、鉱物資源から分離抽出された多種多様な元素の機能を活用した材料によって支えられている。例えばエレクトロニクス産業においては、この半世紀の間に周期表上の 3 分の 2 に相当する元素が使用されるまでに至った。鉱物資源から必要な元素を取り出す際の初期段階では、鉱山が存在する海外現地で各種の選鉱（分離）が行われる（コラム 1 参照）。近年は鉱石そのものの品位（鉱石中の金属含有量、重量百分率で表すか、貴金属の場合はトン当たりグラムで表す）の低下や枯渇の懸念が問題になっている。資源ナショナリズムの台頭も相まって、需要が高く採掘・精製難度の高いものほど、鉱山の奥地化や高地化、深部化が進み、鉱石が低品位化することで、採掘・選鉱コストが増大する。低品位化に伴う、環境対策、難処理鉱化（鉱石に含まれる不純物・有害物質の増加）が問題となる。例えば、銅の場合、以前は銅の含有量が 1% を超える鉱石が採掘の対象であったが、低品位化が進行している現在では 0.5% 程度のものもコストをかけて選鉱している。日本は、鉱山現地の選鉱工程で銅品位を 20% 以上に高めた精鉱を、製錬原料として輸入している状況にあり、製錬技術そのものの高度化、すなわち高純度・低コストを実現する鉱物資源分離技術が必要になっている。特に、レアメタル・レアアースの高効率・省エネルギーで環境調和型

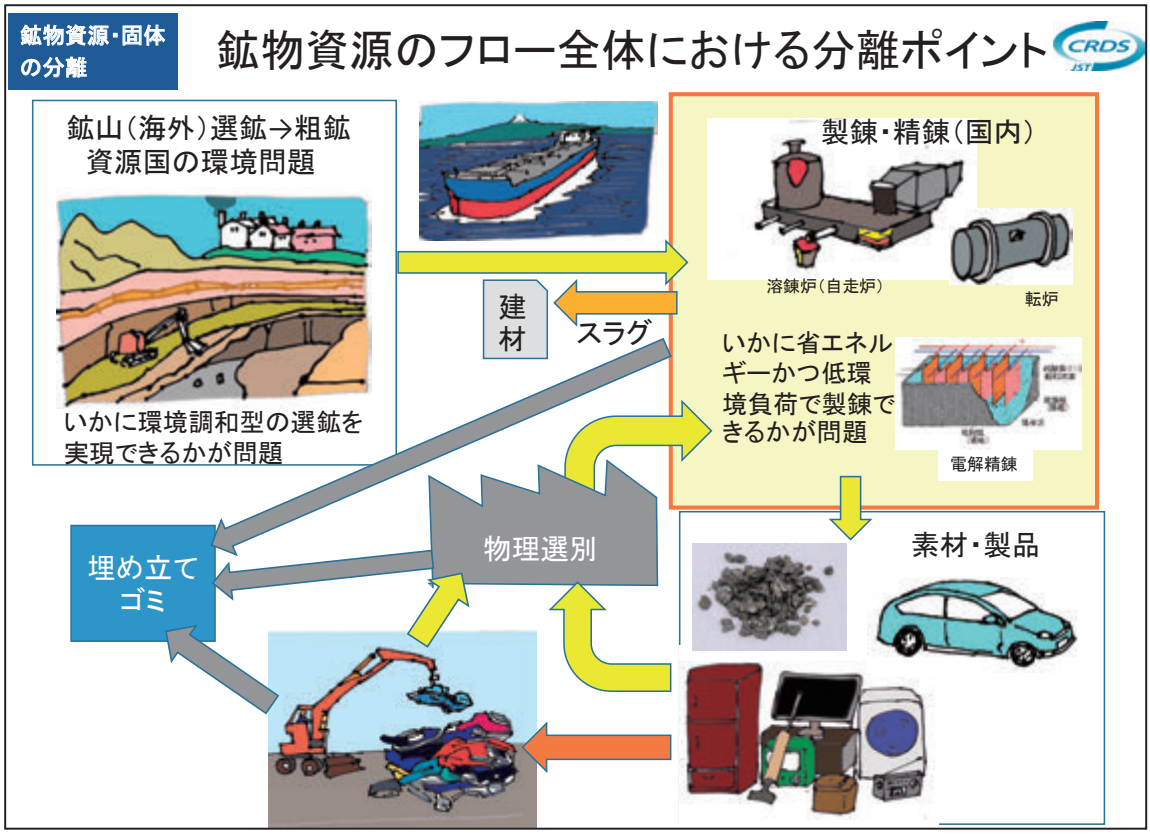


図 2-2 鉱物資源のフロー全体における分離ポイント

の製錬（分離）技術の革新が求められている。また、製錬・精錬後は部素材・製品として各種産業で使用されたのち、製品廃棄時にはリサイクルによって必要元素を選別し、再び製錬工程へ戻るため、ここでも選別から製錬にかけての分離の高効率化・高純度化・低コスト化が求められている。

日本では、多くの金属の分離（製錬・精錬）が、資源・エネルギーコストの不利にも関わらず、国内で行われている。製錬産業の存在は国内の産業基盤を支えている面があり、例えば、自動車産業の産業競争力の一端は、強度・加工性に優れた鋼を鉄鋼メーカーが製造してきたことにある。日本の製錬産業は高い国際競争力を保有しているが、その背景は高い技術力にある。昨今、この分野は成熟した技術と見なされ、技術革新が滞るとともに、大学等における当該教育研究分野の縮小などに対し、人材育成・供給に対して産業界から懸念の声が上がっている。

リサイクルでは、製品廃棄物から有用元素を分離するためには、機械的な分離（粉砕等による物理選別）をおこなったのち、最終的には何らかの形で溶かして液相で分離する製錬技術を用いる。複雑な混合物である廃棄物を、物理選別を経ずに溶解製錬プロセスにかけると、大量のスラグを生みだし、分離効率・エネルギー効率が悪い。従って、液相プロセスの前に、如何に固相のままで、エネルギーをあまりかけずに高精度の分離をするかが重要となる。固相のまま準静的に分離する方法には、さまざまな固体物性を用いる。例えば、自生粉砕によって自身の境界面で分離を起こす AG/SAG ミル法、導電率の違いで加熱・非加熱状態を作り境界面にひずみが生じて分離するマ

イクロ波を照射法、加熱・急冷事前処理、表面剥離粉砕、電気パルス粉砕などが開発されているが、実装には至っていない。また、物理選別の対象を判別・同定する目的で、センサーベーストソーティング（SBS）という、色、形状、硬度、NIR（近赤外）、EC（渦電流）、XRT（X 線透過）、XRF（X 線蛍光）、LIBS（レーザー誘起ブレークダウン分光）などで、対象物を識別し、圧縮空気を用いて個別に仕分ける手法が研究されている。現状では、コストの問題から実験段階にとどまっている。製品のリサイ

【コラム 1　鉱物資源の選鉱と製錬（精錬）】

金属の製錬は、分離・抽出の繰り返しにより行われる。この技術が「固体分離」で重要になる。例えば銅鉱石には通常 0.5% しか黄銅鉱は含まれていないが、これを製錬に持ち込む前の段階で、数十 % 程度含まれるまで濃縮するのが「選鉱」である。選鉱の手法には、浮遊選鉱や磁気選鉱などがある。選鉱された鉱石は製錬工程へ持ち込まれ、溶錬炉で熔融還元されることで、金属が分離される。

浮遊選鉱は、鉱石の粉末（直径 1 μ m 位）を入れた水中に油脂や界面活性剤を添加して、気泡をブクブクと噴出させる。油や界面活性剤と親和性のある粒子のみが泡につかまって上昇し流出する。このプロセスを何度も繰り返すなかで、分離対象の金属が濃縮されていく 。銅の場合､鉱石に含まれる銅硫化物が酸化物（主として酸化ケイ素）の油に対する親和性の違いを活用している。このプロセスは、鉱石産出地で行われる。

磁気選鉱は、鉱物をその磁性の強さの差を利用して分別する方法である。磁気的吸引力と補助的分離力（摩擦、慣性、遠心力など）を利用して磁性の異なる粒子を分離するもの。鉱物を磁性により分類すると、磁鉄鉱などの強磁性のもの、赤鉄鉱などの弱磁性のもの、それに非磁性のものの 3 種に分けられる。

製錬は、鉱石から金属を分離抽出する過程のことである。「精錬」という漢字もあるが、こちらはすでに一定程度高い品位の金属を、さらに高めるときに使われることが多い。製錬を Smelting､精錬を Refining とすることもある。**溶融還元**は、選鉱後の鉱石を高温で溶融し還元して金属を取り出す製錬プロセスである。銅の場合、濃縮された鉱石を溶錬炉（自溶炉）で溶融させることで、

$$CuFeS2 + O2 \cdots \rightarrow Cu + SO2 + FeOx$$

の反応で銅が還元され、硫黄と鉄は酸化される。黄銅鉱中の鉄の大部分はスラグとして除去される。この反応は、発熱反応なので**自律的に溶融還元が進む**省エネルギープロセスである。

このプロセスは、副産物として金の精錬に使われる。このプロセスに金鉱石を加えると、金は銅との親和性がよいので合金化して取り出せる。この技術は、スクラップから有価金属を取り出すにも使われる。

溶融炉で得られた固形物（Cu と FeOx）から Cu を取り出すには、硫酸銅溶液中での電気分解が用いられる。硫酸は繰り返し使われる。

クル段階だけを取り出しての技術開発はエネルギー的にもコスト的にも不利であり、製品の設計段階、材料・部品の選択段階で、リサイクルプロセスを十分に考慮した製品開発は今後ますます要求される。

(3) バイオ・医薬食農系の分離

生物を対象とした研究を行う場合、生体に含まれる成分の存在の有無、その濃度などに従って、成分を単離するか、あるいは他と明確に区分して計測・分析を行うなどの必要がある。上述の化石資源や鉱物資源は、産業上はトンのスケールで扱うものであるが、生体関連物質に求められる分離は極微量のピコリットル（10^{-12}l）やフェムトリットル（10^{-15}l）以下、分子・細胞のサイズレベルでの高精度の分離が要求される。なお、生体関連物質を対象とした分離では、多くの場合、「分離」と「計測・分析」を一連のプロセスとして実施しており、分離・計測・分析を一体的に考えたシステムとして最適化することが求められる。この前提を十分に認識しつつ、以下では他分野との共通項である基盤技術の重要性をまず念頭に置き、分離の観点から整理している。

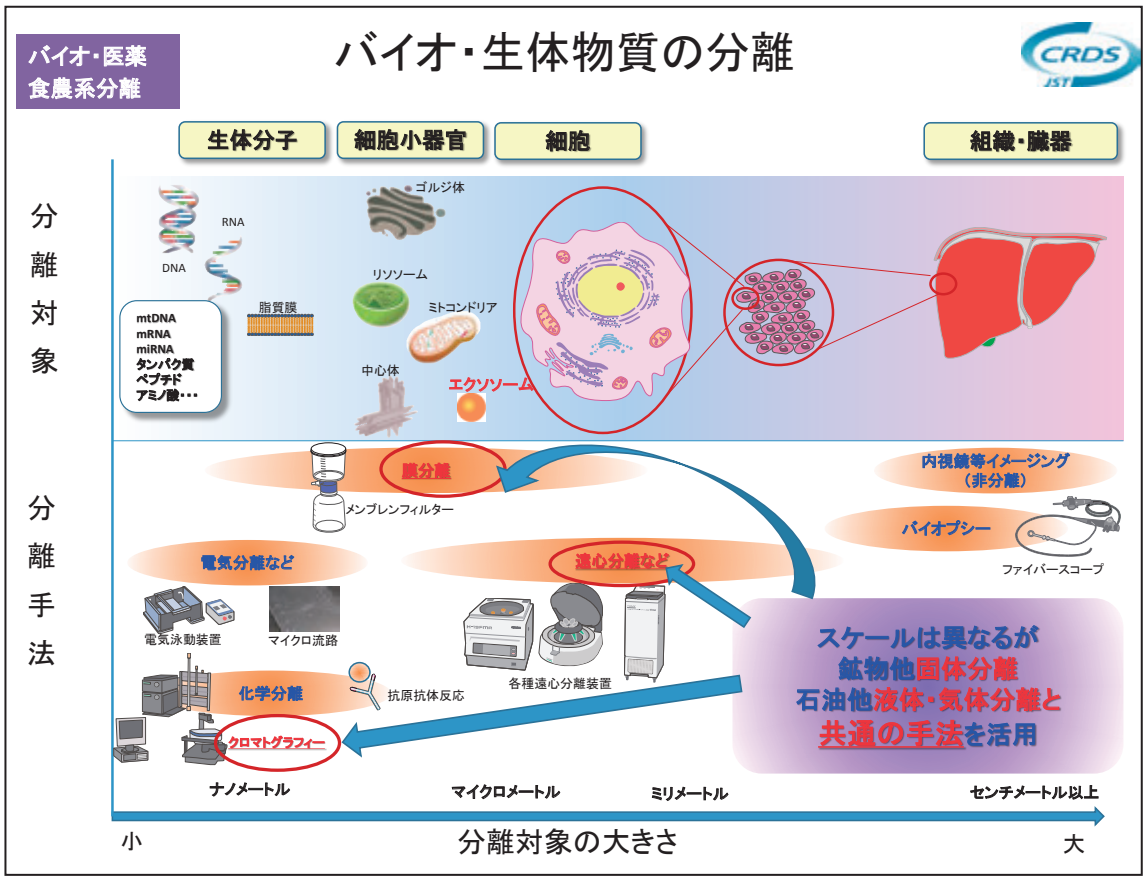


図 2-3 バイオ・生体物質の分離

身近な例として、健康診断での血液検査を説明する。生活習慣病の多くは、血液中に含まれる生体成分の分量や濃度などを指標としてリスクを判定している。脳梗塞を例にとると、血液中に含まれる LDL コレステロールの濃度が対象となる。過剰な LDL コレステロールが次第に血管内に蓄積して血管を塞ぎ、最終的には血流を阻害してしまい、血液や血液が輸送する酸素や栄養物質が滞り、組織が機能しなくなる。

このため、血液検査ではLDLコレステロールの値を精度よく計測・分析する必要があり、対象物以外の成分と分離した上で値を決定しなければならない。血液中の成分を分離するためには、通常は遠心分離により、血漿成分と血球成分を分離するが、その上でさらに血漿成分からなんらかの分離手法を用いて対象成分を分離・分析する必要がある。

分離するべき対象はこうした分子には限らない。例えば、肝臓がんや肝硬変が進行すると、肝臓の組織が線維化し、肝臓の機能が正常に働かなくなる。この場合、血液中にある生体成分からは線維化の度合いがわからないため、最終的には、肝臓の組織を一部採取して分析をする必要がある。こうした組織採取の方法をバイオプシーというが、これも生物を対象とした分離の一つのプロセスといえる。医療に関連した分離の場合、上述のように、多くはなんらかの形で生体を傷つけて成分を分離しなければならないのが現状である。研究用途で対象がモデル生物の場合、例えば臓器まるごとを摘出しても問題にならないが、対象が人となった場合、検査や研究用途で臓器全て、あるいは血液全てを採取すれば生命の危機に瀕するため、こうした目的での分離は可能な限り低侵襲、可能ならば無侵襲で行う必要がある。ヘモグロビンなど、血液中の一部の成分は、中赤外領域の光源を用いた分析装置によりデータを得ることができる場合があるが、医学的な診断を確実にできるレベルで分析するような装置はほとんどない。そのため、現実的な課題として、出来るだけ低侵襲で少量の試料を正確に分離し、分析する手法・装置が強く求められている。

医療以外でも生物に関連した分離が必要な場面がある。例えば医薬品の製造である。経口摂取する医薬品の成分は、治療に有効な成分の他、これを包み込む錠剤の成分などを混合して製造されているが、有効成分の多くは、必ずしも人工合成できるものばかりではない。その成分を含む天然物から必要な成分を分離した上で、製造プロセスに投入する必要がある。例えば、乳がんや肺がんの治療薬（抗がん剤）として知られるビノレルビンの有効成分は植物アルカロイドの一種である。これを含むニチニチソウからアルカロイドを抽出するプロセスが必要となる。このプロセスについては、固体の鉱物資源や、気体・液体の化石資源の分離抽出技術と共通した技術が利用できる可能性がある。

また、調味料や医薬品などでは、光学異性体の一方は有用なものであっても、もう一方は不要、場合によっては有害な場合がある。この際、不要な異性体を分離するか、あるいは有用な物質のみを選択的に合成する必要がある。例えば、調味料として知られるグルタミン酸では、L−グルタミン酸にうま味を感じ、D−グルタミン酸は無味であることが知られている。工業的に合成されたグルタミン酸からL体のみを分離するため、D体とL体の混合物を含む溶液からD体とL体を交互に析出させて分離する方法が開発されている。また、抗ヒスタミン剤や抗てんかん剤に用いられる医薬成分の光学異性体分離では、キラルクロマトグラフィーが多く適用されている。この方法は、クロマトグラフィーの充填剤に一方の異性体のみを分離する機能を備えたキラル固定相を用いる。さらに近年の医薬品では、人間の免疫システムを利用した抗体医薬品が登場しているが、抗体医薬品は特定のタンパク質（抗体）で構成されており、人工に合成することが困難で細胞培養から生産されている。細胞には目的とするタンパク質以外に多様な物質が含まれているため、医薬品として必要な純度に高めるため

にアフィニティクロマトグラフィーと呼ばれる方法が利用されている。この方法も生化学的な相互作用（抗原抗体反応など）をカラム部分に用いるが、クロマトグラフィーの手法自体は他の分野と共通している。

生体成分の分離分析にはもう一つ留意するべき点がある。生物は多様な成分から構成されている複雑系であるとともに、これらの多くは液中に存在し、多様な成分と相互作用しながら存在している。これらを分離して分析した場合、分析した物質の状態は生体内の状態を反映しない場合がある。このため、生体内の状態を保全したまま分離・分析する手法として、超臨界流体を媒体としたクロマトグラフィーを用いる場合がある。この手法はごく少量の試料を精度良く分離分析できるが、超臨界流体を扱う装置は、高圧ガスを用いるため、導入と設置には法規制に適合する必要があり、これらを利用する研究者、企業などからなる研究会において、導入を迅速化するための対応や規制当局との調整が検討されている。

2－2．社会・経済的効果

(1) 気体・液体の分離

洋上石油プラントなどの資源開発、シェールオイル・シェールガスの生産、水素製造、化石エネルギー利用後の CO_2 分離・有効利用、石油化学プラントの高効率化・省エネ化、浄水・海淡技術など、一層の高効率化（省エネ）と低コスト化が競争力の鍵を握ることになる。

石油精製、石油化学産業では、エネルギー消費の約 40%が蒸留操作による分離・精製によるものである。2013 年度のわが国の原油処理量 1,914 百万 kL に対して、石油精製では原油換算で 1,645 万 kL（2013 年度）、石油化学で 2,857 万 kL（2012 年度）相当のエネルギーを消費している。蒸留分離のエネルギーを 40% として、もし 50% 省エネが達成できるとすれば、900 万 kL のエネルギー消費削減につながる。2013 年の世界の石油一次エネルギー消費は原油換算で 4,210 百万トンで日本（202 百万トン）の 20 倍の消費となる [1、2、3]。

また、2013 年のエネルギー起源の世界 CO_2 排出量は 392 億トン（日本 12 億トン）であり、わが国の発電による CO_2 排出量は 5.8 億トンと約 50% を占める。CO_2 分離回収の市場は未だ未成熟であるが、COP21「パリ協約」で示された気温上昇 1.5℃未満を達成目標とする場合、将来的にはゼロエミッションにする必要があり、火力発電所からの CO_2 分離回収のみでも大きな社会的インパクトがあることになる [1]。

水処理を例に考えると、2013 年の水ビジネス市場（上下水道、産業用水、海水淡水化）は 50.3 兆円（運営・管理 42.1 兆円、プラント建設 8.2 兆円）とされており、2025 年には 110 兆円規模に拡大するとの予測がされている。また、2013 年の海水淡水化能力は 784m 万㎥ / 日、2025 年には約 2.5 倍になると予想されている（2025 年市場規模予測は 4.4 ～ 7 兆円）。海水淡水化向けの RO 膜市場は日本が 60% 以上を占めている [4]。こうしたことから、水処理に関わる分離技術の省エネルギー・低コスト化、高耐久化の求めは高い。

今後も、石油精製、石油化学、排ガス処理、水処理など大きな市場があり、気体・液体分離の高効率化、低コスト化はエネルギー消費削減や CO_2 排出削減や我が国の産業競争力強化に大きく寄与するものである。

(2) 鉱物資源・固体の分離

レアメタルに代表される、鉱物資源を活用した製品の有用性・必要性には論を待たない。なかでも、わが国産業における原料部分でのエネルギー・コスト低減と供給確保に資する技術開発は鍵となる。上述した高効率・省エネルギーで環境調和型の製錬（分離）技術の革新によって、バリューチェーンの川上部分に対しての力を持つことつながる。鉱物資源を持たないわが国にとって、原料供給側に対し影響力を有し、安定した原料確保を確立するためには、先進的な分離技術を持つことが重要である。

1　石油業界における地球環境保全の取り組み 2014 年版、石油連盟、2015 年 2 月
2　日本化学工業協会における地球温暖化対策の取組、日本化学工業協会、2015 年 12 月
3　アジア / 世界エネルギーアウトルック 2015、（一財）日本エネルギー経済研究所、2015 年 10 月 他
4　最近の水ビジネス市場と主要プレーヤーの動向、日本総研、2014 年 3 月 他

分離が非常に困難な素材の例として、チタン製錬におけるチタンと酸素の分離がある。現在実用化されている製錬方法はバッチ式で、巨大なエネルギーを投入しなくてはチタンを分離することはできないため、生産性の低さ・コストの問題もあってチタンは汎用素材にはなっていない。もし低エネルギー・低コストでチタンを製錬することができれば、チタン合金がステンレスを代替する場面も出てくると予想される。金属チタンの年間世界生産量は 24 万トン（2012 年）であるが、これはステンレスの生産量のおよそ 200 分の 1 であり、上述の低生産性と高コストが背景にある。ステンレスがチタンに替わった社会を想像してみよう。チタン合金は超々ジュラルミンを上回る優れた比強度をもち、純チタンは極めて優れた耐食性を示すばかりでなく、酸化物として資源が豊富に存在するという特徴もある。そのため、チタンは社会インフラから航空機まで幅広い用途への利用が期待される金属である。現状では、大きなエネルギーを要するチタン製造プロセスの革新は、分離工学にとって極めてチャレンジングであるが、チタン製錬の革新に成功した場合、部素材を使った産業構造の全体に影響を及ぼすことになると考えられる。

上記のチタンは一例であるが、鉱物資源分離技術の革新は、多くの産業へのプラスの相乗効果が期待される。現在は高価なために使用が拡大しないものが新たに使用できるようになって登場する新商品という意味だけではなく、製錬副産物による貢献や、製品リサイクルにおける分離工程の革新が部素材産業へ効果を及ぼすことになる。

一般にリサイクルは経済的には不利なケースがほとんどであるが、循環型社会へ徐々に移行していくことが、社会の長期ビジョンであることに変わりはない。鉱物資源を得るには天然鉱石を使用し、現地で不純物除去するのが現状ではたしかに最も低コストである。しかし地球上で長い時間をかけて作られ、大量のエネルギーを使って得られた貴重な元素を、経済的に成立しないがために再利用を進められないことは、持続可能社会の実現にとって障壁である。Value of Nature の概念を如何に捉えて、環境調和を実現する新しい技術によって資源リサイクルを推進するかが鍵となる。

(3) バイオ・医薬食農系の分離

生体に関連した物質の分離の場合、社会的に大きな貢献が期待されるのは、新たな疾患マーカーの発見である。特に治療方法が未知の疾患の場合、原因となるウイルスや微生物、原因物質などを単離した上で、原因となるものが生体内でどのような働きをして、体内で異常を引き起こすのかという、生体内のプロセスを解明することが重要である。特に致死率の高い感染症等の疾患の場合、早急に原因を究明することが罹患者の命を救うことになり、大きな社会貢献につながる。

感染症では、原因となるウイルスや病原菌を単離し、また、これらが働きかける生体物質（タンパク質、アミノ酸、ペプチドなど）を単離することで疾患の機序を解明し、治療薬の開発につなげることができる。

また、感染症に限らず、がんに代表される主要疾患にかかわる生体物質の高精度の分離・分析は、早期診断・早期発見の観点から強く求められている（第 2 章 -3 科学技術上の効果に詳述）。

その他、特定の医薬品成分や、機能性を有する食品成分の分離精製・結晶化などには、不純物を取り除くことや、精製効率の面で難しい対象物質が多くあり、高精度・低コストの分離技術が特に求められている。

２－３．科学技術上の効果

本提言は分離工学のイノベーションを掲げるものであるが、科学技術としての新しさや魅力とも組み合わせられることで、目標とするイノベーションがドライブされると考えられる。したがって、以下では各主要ニーズに関係する科学技術上の効果を記載するが、分離工学を全体として捉え推進することが肝要である。

(1) 気体・液体の分離

石油化学産業に代表される気体･液体の分離工程の多くは、工業的に成熟しており、代替技術を産業として実装するインセンティブが出にくい状況にある。しかし、将来的には抜本的な省エネルギー化、高効率化、コンパクト化、低コスト化が求められ、基礎技術として、分離に用いる材料のみならず、処理量と分離性能を同時に高めるための分離機能の融合や反応と分離の一体化などの研究が必要である。すなわち、現在は実現していない、複数の分離や反応を組み合わせた複合プロセスの基盤的な科学技術の創出が求められている。

また、実環境での長期信頼性、安全性評価も大きな研究項目であり、研究を通じて分離対象の化学的、物理的性質や機能メカニズムのデータベース化、シミュレーション技術が生み出されることになる。さらには基礎研究から分離装置の製造、システム運用まで視野に入れた、エンジニアリングを含めた産学官共通議論の場が形成される（第 4 章の推進方策も併せて参照）。それによって、産学官で開発目標を明確にし、PDCA サイクルをまわすことができれば、わが国の基盤科学技術の向上に大きく寄与すると考えられる。

(2) 鉱物資源・固体の分離

製錬産業に代表される鉱物資源・固体の分離は、上述の石油化学工業における分離工程と同様に、成熟した技術分野と見られがちである。しかし、近年のナノ計測・評価技術、ナノ加工技術、計算科学・モデリングなどの進展を取り込むことによって、大きく変貌することが期待できる。このような基礎研究から新たな科学技術が生みだされる波及効果も期待されよう。高温での固体物質分離プロセスを、放射光によってその場観察する技術が確立すれば、低品位粗鉱の処理・不純物成分制御のみならず、他の高温プロセス分野への応用が期待され、その波及効果が期待される。また、液相から固相への結晶核発生過程、融液中での反応過程、溶液中の物質輸送過程を原子・分子レベルで理解することは、晶析を含む分離工学における共通基盤となる。

マテリアルズ・インフォマティクスの発展と、物理的分離技術および適切な分離手法を見いだすためのアルゴリズムの構築は、リサイクルを前提とした持続社会形成のための重要な科学技術基盤として、国内外への貢献が期待できる。

昨今、資源・金属系学科の消滅が相次ぎ、特に産業界への人材供給の枯渇、研究面での資源開発・製錬基礎技術の開発・向上の先行きが危ぶまれている。このような背景にあって、若手のオンリサーチトレーニングが図られ、中核的な研究開発人材が育成されることも大きな効果であろう。

(3) バイオ・医薬食農系の分離

バイオ系の分離技術では、特定の疾患の要因となるような物質を生体内の状態を反映したままで単離することのできる技術が、重要な意味をもつ。なかでも未知の疾患の場合は、その原因物質の単離によって初めて明らかになることが多く、単離自体に科学的意義がある。既存の疾患では、例えばがんの転移機構に関する研究が挙げられる。原発部位（はじめにがんが発症した臓器などの身体における部位）から他の部位へ転移する場合、もとの部位に存在するがん細胞の一部が細胞代謝の過程で血液中に流れ出し、他の部位へ輸送されて定着することで転移するというメカニズムが提唱されている。このような血液中に流出したがん細胞を循環がん細胞（Circulating Tumor Cell：CTC）といい、CTC を単離し、解析する研究が行われている。がんは現在でもわが国において死因トップ 3 に含まれる重篤な疾患であり、転移機構の解明、CTC の性状や物理・化学的性質の解明は医学の発展に対して大きく貢献することが期待できる。このように、疾患の前後で変化する物質（バイオマーカー）を新たに見出すことで薬の開発につながることから、生体内に存在する様々な因子を高精度に単離する技術の開発は特に重要である。

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」が、がんなどのバイオマーカーとして注目されている。このエクソソームは、内部に含む mRNA（メッセンジャー RNA：細胞内部で DNA の塩基配列を転写）や miRNA（マイクロ RNA：転写の課程等で切断された RNA の断片）、タンパク質の他、エクソソームを構成する膜タンパク質自体にも疾患マーカーとしての可能性が指摘され、分離・分析方法が検討されているが、もともと微量であるために、必要十分な量を高精度に分離することは極めて困難である。現在、いくつかの単離用抗体が開発され、市販されているものもあるが、起源によって異なるエクソソームの形状、大きさは多種多様であり、高速・高精度に分離するためには多数の課題が残っている。疾患の原因究明においては、これに続く創薬プロセスへいち早くたどり着くためにも、高い再現性を持ちながら、高速・高精度に分離できるかが重要となる。

こうした複雑な混合物の中に存在する特定の細胞や生体物質を分離・選抜する技術は、再生医療、幹細胞生物学、診断医療などバイオ分野における様々な応用において必須である。しかしながら既存の分離手法では、「装置や試薬のコスト」と「分離の精度」がトレードオフの関係にある。一例を挙げると、高精度な分離を可能とするフローサイトメーターは数千万円する一方で、遠心分離などの簡易的な手法では分離精度がまったく不十分である。これらのギャップを埋めるシステム、つまり簡便な操作と比較的安価な装置を用いて、ターゲットを正確に分離・選抜する手法や装置が実現できれば、バイオ分野における分離工学のイノベーションが実現すると期待される。このように、特定の疾患について、非常に少量の試料から簡単な操作で必要な因子を分離できるような仕組みには、常にニーズがあり、科学技術研究の深化によって初めて実現するものである。

3．具体的な研究開発課題

各研究開発課題は、分離対象・応用の目的によって必要となる分離技術やそのプロセス・規模が異なるために、実用に近いフェーズに向かうほどそれぞれ別の取り組みが必要になる。しかし、分離対象の最小単位はいずれも原子・分子～マイクロメートルスケールであり、基礎となる科学的原理や活用する技術には共通するものが多数ある。そこで、応用開発研究のみでは為し得ない新たな分離工学イノベーションの種となる新技術や共通原理・共通ツールを「気体・液体・固体・バイオを横断する共通基盤技術」としてまとめている。以下、4 つに分けて記載する。

(1) 気体・液体の分離
(2) 鉱物資源・固体の分離
(3) バイオ・医薬食農系の分離
(4) 横断的共通基盤科学技術（気体・液体・固体・バイオの横断）

(1) 気体・液体の分離

気体・液体の分離では、まず、吸着や膜分離を用いた分離が期待される。また、吸収分離についても改良の余地が残されている。これらについての研究開発課題を示す。

（吸着分離）

まず、吸着による気体あるいは液体の分離においては、従来から用いられている各種のゼオライト材料（A 型、MFI 型、Y 型、β 型、MOR 型など各種）のみならず、MOF（Metal Organic Framework）などの新材料が台頭しており、無機物質をベースとして、無機有機ハイブリッド材料を含めた、材料表面の親・疎水性や電子親和力の違いなどを活かした吸着分離が期待される。ゼオライトの場合は、現在 200 種類を超える構造（フレームワークと呼ばれる）が知られるが、8 員環・10 員環・12 員環といった細孔を形成する原子の数の違いや、細孔の次元数、すなわち細孔のネットワークが土管のような直線か、網目状あるいは 3 次元に入り組んだ構造か、などによって、吸着特性が大きく異なる。また近年は、ゼオライトを形成するシリコンとアルミニウムと酸素のみならず、ヘテロ元素と呼ばれる異種元素（鉄、ガリウム、チタニウム、リン、ホウ素など）を導入した構造も知られ、これらを用いた異種の物質の吸着特性の違い、ならびにそれを活かした物質の分離については、現在研究途上であり、物質合成と DFT（density functional theory）などの計算化学を用いた分離機能評価の体系化が課題である。

（膜分離）

膜分離については、無機膜、有機膜、炭素膜といった各種の材料が知られる。さらには、それぞれにおいて、自立型の膜、あるいは支持膜（支持体に分離機能層が担持された膜）が知られる。同一の膜分離材料の場合、透過量は活量差（圧力や温度や濃度など）に比例し、膜の厚みに反比例することが知られるため、強度を有しながらもなるべく薄くて緻密な膜を合成することが期待される。一方で、現時点では、二次成長法と呼ばれる種結晶を塗布したうえでの製膜方法が支配的なため、より高度な製膜

技術の開発、すなわち緻密かつ薄層の膜を欠陥（ピンホールや粒界・クラック）無く作りうる技術の開発が課題である。また、無機膜などの場合は、表面に汚染物質が付着する（ファウリング）ことや、温度・圧力の変化などにより、結晶性が長期的には低下することなどが知られるため、劣化診断・予測ならびに劣化後の修復技術が要求されるが、いずれも現時点では開発されていないため、今後これらの基礎的な検討が課題である。また現在研究開発途上にある炭素膜は、ごく限られたサイズの分子・分離対象にしか適用できず、構造制御技術による分離機能レンジの拡大が望まれる。

ターゲットとしては、現在、工業的に実用化されていない、あるいは十分に実用化されていないがニーズの大きな分離系を対象とする分離技術の開発が必要である。例としては、水素 /CO_2 分離、CO_2/CH_4 分離、CO_2/ 空気分離、CO_2/ 窒素分離、酸素 / 窒素分離、He/CH_4 分離などがあげられる。石油化学・天然ガス改質関連産業においては、既存の蒸留塔をそのまま代替することは難しく、複合化や組み合わせによる消費エネルギーの低下が期待される。

水系の膜分離では、海水淡水化や下水・廃水処理での大きなイノベーションは困難とされるが、新しい技術として、精密ろ過膜の粒子分級への応用があげられる。精密ろ過膜はこれまで粒子と水との分離に用いられてきたが、粒子を大きさで分ける分級技術としては認識されてこなかった。マイクロメートルからサブマイクロメートルサイズ領域の粒子の分級技術は適当な既存技術がなく、膜分級法が期待される。また、実用的には反応と分離を組み合わせた膜反応器の開発は今後の大きなテーマである。反応プロセスを行い、その後に分離精製というプロセスから、今後は反応と分離精製の一体化プロセスの実現が待たれる。

（吸収分離）

吸収分離においては、吸収液の組成、分離特性に応じて、物理吸収（セレクソールなど）、化学吸収（アルカノールアミンなど）、イオン液体や超臨界流体などを用いる次世代型吸収が知られる。このうち、物理吸収については、海外勢に技術的に支配されており、再生時のエネルギー低減のためのプロセス操作効率化を除けば、材料開発としての研究の余地は小さい。化学吸収は、脱泡などの課題が残されており、起泡しにくい物質の開発、特定の物質を選択的に吸収する材料の開発、再生時に小さいエネルギーで吸収物を放出しやすい構造の設計などが求められる。イオン液体は、アニオン・カチオンの多種多様な構造が提案されており、吸収特性についても検討が進められている。イオン液体は合成・精製コストが高いことが課題とされており、今後はより安価な製造法、イオン液体を機能的に保持しうる支持膜の調製と利用、などの開発が期待される。超臨界流体としては、二酸化炭素あるいは低級炭化水素（ブタンなど）がメインとなると考えられる。それらへの吸収特性の予測は現時点では断片的であり、多用な物質の分離などに用いるための基礎的なデータ補完が課題である。超臨界流体の特徴である高溶解性と高拡散性を利用した反応／相分離場の形成や、超臨界流体中での反応過程における相挙動の解明、複数種の超臨界流体の混合系の活用などが課題である。

(2) 鉱物資源・固体の分離

(粉砕・選別)

固形物（鉱石、スクラップなど）を原料とする金属製錬や廃棄物からの有用元素リサイクルでは、固形物の粉砕・選別による前処理が必要になる。前処理の際、粉砕によって得られる粉砕粒の組成が重要であり、製錬・回収の対象となる元素の粉砕粒中の濃度を極力高めた状態で粉砕することが望ましい。特に廃電気・電子機器の場合、リサイクル対象となる元素が特定の部品・部材に局在している場合が多く、この状態を維持しつつ粉砕・選別する技術が必要である。複数の粉砕手法と選別手法を組み合わせることにより、このような粉砕・選別が可能であることが示されているが、廃電気・電子機器は種類が多様であり、商品サイクルも短いものが多く、人工知能の活用などにより最適な手法の組み合わせを迅速かつ低コストに見出す技術の開発が必要である。資源回収において、都市鉱山は不均一な複雑系であるため、金属の種類と含有量、状態、サイズ、分布などの種々の物性に関わるデータベースの構築と、最適な選別条件を見つけるアルゴリズムの開発が課題である。

(リサイクル製錬)

金属製錬で汎用される電解精錬では、リサイクル原料の活用促進にともない、従来は想定していなかった不純物元素が電解槽中の電解液に混入する場合がある。製錬の品質を高く維持する必要があり、不純物元素が電解に及ぼす影響を把握・体系化することが課題である。

(金属製錬・基礎学理)

元素の分離を目的とする製錬では、チタンと酸素、カルシウムと酸素、コバルトとニッケル、プラセオジムとネオジム、など分離が特に困難とされる元素ペアに着目し、これらを効率よく分離することを目的とした研究開発を推進する必要がある。いずれも製錬技術開発の長い歴史の中で分離困難とされてきた元素ペアであることから、これまでの延長線上で試行錯誤を繰り返しても分離効率の改善は難しい。製錬反応の原理に立ち返って検討を行い、従来の製錬手法にとらわれない発想も積極的に取り込んでいく必要がある。

製錬反応は 1000℃を超える高温や反応性の高いガス中で行われるため、反応素過程の解明はほとんど進んでいない。SPring-8 などの放射光施設で利用できる高輝度硬 X 線単色光を用いれば、重元素を含む系のイメージングが可能であり、製錬反応の解析にも有効である。製錬反応のその場観察を可能とする設備を整え、データの収集・解析を行うことが求められる。

製錬反応にはマクロな熱力学では説明できない現象も多い。このような現象については、第一原理計算ならびに第一原理分子動力学との融合による原子・分子レベルでのシミュレーション解析が必要である。とくに電解精錬では電極 - 溶液（水溶液，溶融塩）界面で起こる現象の解明に向け、計算手法開発も含めて研究開発を行う。また、高温気相の平衡計算など現在の方法論の範囲で十分に行うことができる場合は、重要な系について計算を実行していく。

以上のような研究開発課題に取り組むことで、製錬反応の精密な制御や、新たな反

応経路の発見につながる知見を獲得することが課題である。

(3) バイオ・医薬食農系の分離

生体に関連した物質といえども、分離に必要な技術は固体分離や液体分離と共通のものが多い。分子レベルであれば、質量分析、クロマトグラフィー、MEMS 技術などであり、生体成分レベルであれば、遠心分離等の技術である。これらの技術の多くは他分野とも共通している。バイオ・医薬品・食品・農業系の分離については、こうした分離技術を用いる前に、いかにして必要な対象物を処理していくかというところが最初の課題である。そして、生体の微量成分の分離技術やそれに基づく分析技術の進展により、生体の「機能」を可視化する技術を創生することが求められる。生体は多くの分子の集合体であるが、その中の分子が相互作用することによって機能を発揮する。分離技術を駆使し、相関する多数の生体分子を同時検出してその変化をクラスタリングすることができれば、機能を記述できるようになる。さらにこれを目的単位ごと（単一細胞、単一分子、細胞集団、クラスター分子、微小組織・器官）に行えるだけの検出感度を実現することが必要となる。

生体にはまだ未解明の機能分子が多く存在し、機能分子間の相互作用の理解が十分ではないことなど課題が多いが、機能的に連携する分子群をその機能を保持した状態で特異的に分離分析する手法の開発や、そのような解析結果を統合してビックデータとして解析することなどができれば、まさに分離工学イノベーションがライフサイエンス・医療研究を革新することになる。

生体は様々な成分が複雑に関係している上､多くは液中で存在している。そのため、単離して大気中に曝露した場合は、生体内に存在した形態と物理的・化学的性質が異なり、生体内の状態を把握できない場合がある。この場合は、例えば超臨界流体クロマトグラフィーのような技術で、生体内の状態を保持して分離する必要がある。

以上のようにバイオ系の分離技術では、正確に分離できるとともに、分離されたものの性状をも把握することが不可欠な場合が多い。その点では、計測分析技術の一環として捉え、試料の分離、適切な前処理、計測･分析の全ての技術を、技術のユーザー･利用状況に応じて組み合わせて高度化していくことが求められる。利用先ごとに考えると、実装段階では以下のような研究開発課題が挙げられる。

(既知の感染症等の簡易検査)

既知の疾患の場合、抗原抗体反応等により、血液などの体液で判定するが、短時間での判定が求められ、また、検査プロセス自体も研究者が利用するような複雑な機器を使うことができない。そのため、疾患マーカーが既知である場合には、簡易且つ迅速に原因を判定するための分離分析技術を実装する必要があり、加えて、検査に用いることができる試料は大量に採取できないことから、少量の試料で判定が可能な高精度の技術であることが必要となる。

(疾患の精密検査)

血液などの比較的低侵襲で採取しやすい試料から重症度などが判定しにくい場合、バイオプシーなどの方法で、生体組織を採取し、顕微鏡で観察することで判定が行わ

れる。この場合、可能な限り侵襲度を低く、なるべく少量を採取するための手法が合わせて必要である。分離する部位を正確に見出し、他の部位に影響を与えない分離手法を開発することが課題である。

（植物・食品等に関する有効成分の分離）

創薬プロセス、あるいは機能性食品やサプリメントといったようなものを製造する過程では、疾患の検査とは異なり、原料成分を高精度に最大限抽出する分離技術が求められる。複雑な多成分である場合が多く、目的の物質に特異的な抽出材料・プロセスを開発することが課題である。

(4) 横断的共通基盤科学技術（気体・液体・固体・バイオの横断）

分離技術・プロセスを開発するにあたっては、扱う対象物質の分子構造、相状態、物性が多種多様になっているため、試行錯誤による分離プロセスの設計や操作条件の最適化は非効率的であり、対象とする化合物、混合系の相平衡や輸送物性といった基礎物性の把握が必須となる。 一方で、相平衡や輸送物性、結晶核形成・成長メカニズムの解明・把握における、測定手法・装置の開発や理論解析モデルの構築では、多種の混合系や広域な条件をターゲットとする傾向が強く、一般的な化合物や混合系、温和な条件を対象とした実測データや､理論解析に関する研究が多いのが現状である。したがって分離工学イノベーションを実現するには、高い分離効率や材料の機能性のみを追求するのではなく、基礎物性に基づいた物理化学現象の解明や、分離機構や材料創製機構の解明を伴った研究であることが求められる。

基礎的な要素技術の例としては、無機合成における結晶の核発生・成長制御、とりわけ結晶軸方向ごと（例えばc軸方向だけ、など）に狙った方向への選択的な核成長などがあげられる。これが実現できれば、分離機能を実現する上で、特に吸着材料や膜材料にとって大きなブレークスルーとなりうる。また、分離機能の予測・診断・解析技術はまだ道半ばであり、パームポロシメトリ（特定のプローブ分子を吸着させての分離機能の確認）やDFTによる予測など、技術開発の確立が期待される。複雑な構造の形成や分離過程、系やデバイス全体で分離動態のシミュレーションを可能とするマルチスケール計算、高次元のデータから目的とする機能との法則性（有効因子）を抽出する情報科学技術（ビッグデータ解析、マテリアルズ・インフォマティクス、AI等）、実験的手法（その場計測技術、試作・プロセス・評価技術）を有機的に連携させることが課題である。

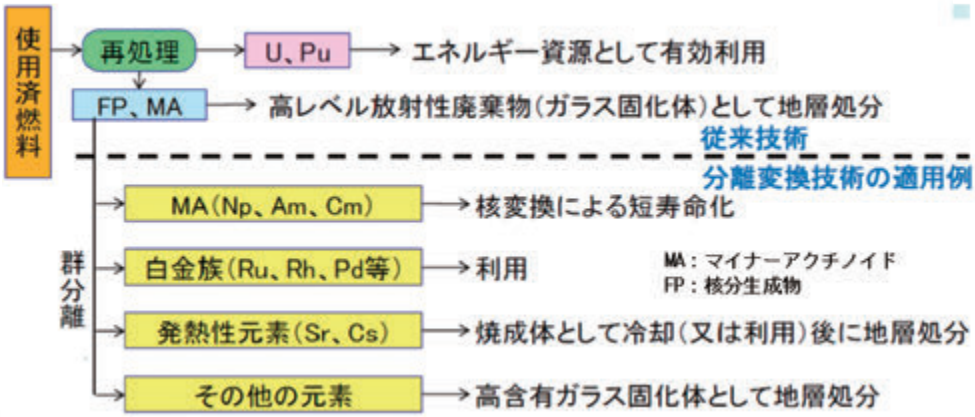
プロセスとしては、劣化診断・予測技術、ファウリング予防の為の表面修飾技術などが挙げられる。これら要素技術が熟成され、上記各技術が高度化した場合には、大幅にエネルギー消費を削減しうる分離プロセスが実現可能となる。また、高純度化や小型化などのメリットを享受することも可能になる。

バイオ系の例のように、微量な成分を分離する場合には、微細加工技術を用いて作製した精密なデバイス構造（たとえば流路構造）を利用することによって、これまでバルクの系において行ってきた分離操作を代替する、より正確かつ効率的な分離が実現すると期待される。例えば、クロマトグラフィーや電気泳動において用いられる分子の網目や微小孔を、人工的に設計した分離場によって代替することで、分離サイズ

の精密制御や分析時間の大幅な短縮、実験操作の簡易化および高機能化、などが達成されると考えられる。そのような研究段階のアイデアを実用化段階に飛躍させるためには、新規分離手法の実証に加えて、必要なデバイス構造の簡便で安価なファブリケーションプロセスの開発、流体解析などのシミュレーション技術、キラーアプリケーションの探索、簡便に使用できるユーザーインターフェースの開発など、様々な基盤技術が必要となる。これらの技術開発を行い、各方面の分離工学プロセスと融合することで、新しい分野の開拓が可能になるものと期待される。

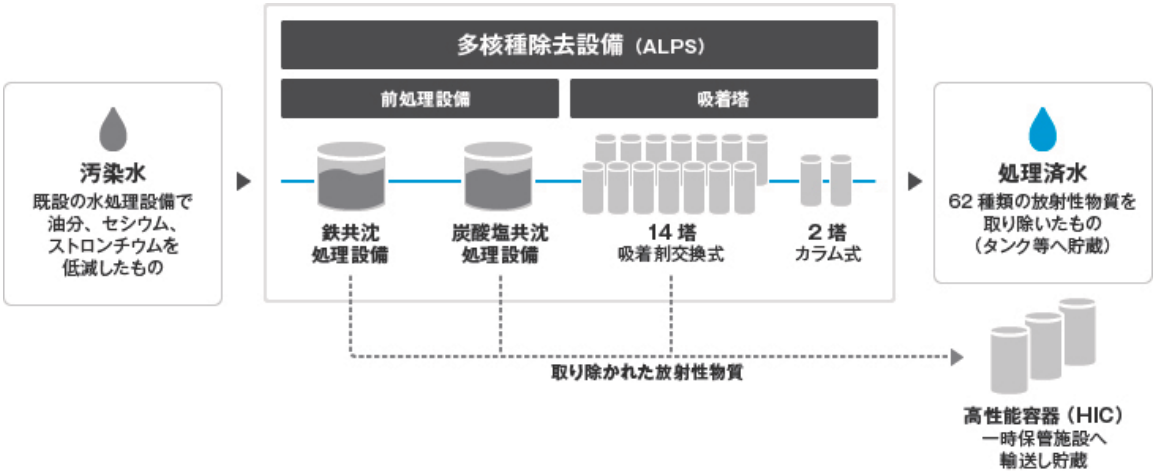
【コラム 2　放射性廃棄物の分離】

原子力利用におけるバックエンド技術として、高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性核種をその半減期に応じて分離する群分離技術、長寿命核種を短寿命核種や非放射性廃核種に変換する変換技術の研究が行なわれている。我が国では、高速増殖炉サイクルに最適化されたアクチノイドを一括回収する先進湿式法（MEXT 法）が開発中であり、実廃液試験による小規模試験に着手した段階である。仏、米では Purex 法をもとにした分離回収技術を開発している。変換技術としては、わが国を初め、欧米中で発電用高速炉利用（FR）や加速器駆動システム（ADS）の検討、研究開発が行われている（下図）[1]。



2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災による東京電力福島第一発電所事故により、廃炉や放射能に汚染された大量の瓦礫、汚染水、汚染土壌等の処理が直面する課題となっており、技術開発、検証試験を行なうと共に、実際の汚染物の処理が行なわれている。

汚染水処理では、セシウム、ストロンチウム吸着設備や多核種除去設備（ALPS）によりトリチウム以外の放射性物質を分離・除去している。経済産業省では汚染水に残るトリチウム分離技術の知見を得るため、「汚染水処理対策技術検証事業（トリチウム分離技術検証試験事業）」において、海外メーカによる Combined Electrolysis Catalytic Exchange（CECE）、Water Distillation、Combination of CECE and Water Distillation に加え、国内メーカー、大学による触媒機能を有した低温真空蒸留法、燃料電池を用いた電解再結合法、多連電解槽式電解法、多段式晶析法、二段階ガスハイドレード法などの検証試験を実施している[2、3]。



多核種除去設備（ALPS）[4]

汚染土壌については、湿式、乾式の分別、分級洗浄、化学処理、加熱処理による土壌の浄化・減容技術の開発、実証が行なわれており、一日も早い実装が待たれる[5]。

引用・参考資料）

1. 群分離・核変換技術に関する国内外の状況、原子力科学技術委員会群分離・核変換技術評価作業部会資料、（国研）日本原子力研究開発機構、2013 年 8 月 他
2. 「汚染水処理対策技術検証事業」進捗状況について、汚染水処理対策委員会事務局、2015 年 3 月
3. 汚染水処理対策技術検証事業（トリチウム分離技術検証試験事業）追加公募の採択、資源エネルギー庁、2015 年 2 月
4. 汚染水の浄化処理、東京電力 HP
http://www.tepco.co.jp/decommision/planaction/alps/index-j.html
5. 福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務【除染技術実証試験事業編】報告書、日本原子力研究開発機構、2012 年 6 月 他

4．研究開発の推進方法および時間軸

気体・液体の分離技術、特に石油化学産業の蒸留分離をすべて代替するような技術は見当たらないが、石油の採掘、すなわち油ガス田開発とその際の随伴水処理の部分では、省エネルギーの要請から分離膜技術が大いに期待されているところである。日本は分離膜の要素技術は世界トップレベルといわれるが、分離膜単独では省エネルギーを達成することはできない。分離膜を用いたプロセス・システム技術を構築することでようやく省エネルギーが得られる。

鉱物資源・固体の分離で注目されるのはレアメタル等の精錬技術であるが、リサイクルという社会システムの整備が不可欠である。現在のリサイクルでは、中間処理、物理選別、化学選別を最適化できる社会制度・構造になっていないため、多くの場面でリサイクルはコスト構造がマイナスになる。将来的には発想を変えて、リサイクルでの分離を前提に製品設計を行い、リサイクルのコストメリットを出すことができるような社会システムにしていくことが求められる。

バイオ･医薬食農系の分離は、上記 2 分野とスケールが異なり、分離は極微量のピコリットル（10^{-12}l）やフェムトリットル（10^{-15}l）以下、分子・細胞のサイズレベルでの高精度の分離が要求される。対象スケールが小さいために、要素技術の完成がそのまま実用・社会実装につながる可能性が高い。分離対象が、例えばエクソソームのように近年新しく発見された細胞内の小器官であると、分離する技術だけでなく、分析・解析技術も同時に必要となる。高い医療上のニーズを持つ分離対象物質の場合、精緻でかつ簡便な技術として完成することが求められ、様々な周辺技術の同時開発が必要である。

これら各分離技術を社会実装までつなげていく際に、以下のような観点での推進方策が必要になる。

大規模スケールで扱うことが前提となる気体・液体の分離技術の多くは、産業上、海外にエンジニアリングとして輸出できることが求められる。プロセス・システムの技術実証段階では、例えば海外産油・ガス国との共同研究開発の形態を取る必要があろう。特に、使用環境を加味した現地での実証は極めて重要である。また、産油・ガス国の研究開発機関にとって、日本の新技術による実証実験は、単に技術開発による知的財産取得や設計ノウハウ取得だけでなく、高等教育における重要テーマに位置づけているケースが多い。現地国ではそうした共同研究案件に長期間の研究予算措置を設定する一方で、日本側は現地側と同様の多年度の予算措置が難しいことが多く、海外研究機関との協業実現には日本側の制度が大きく影響する。プロセス・システムの実証設備運転では、分離膜の破過のような運転上の具体的トラブルを想定し、それを事前に察知する診断予測技術や破過後の修復技術などを設計に考慮するエンジニアリング作業が不可欠なため、早い段階から日本側での産学連携体制構築が必要である。さらに、開発した技術の知財の所有については、相手国機関との調整に国レベルの関与が必要となる。このようなことから、特に国際共同スキームに長けた機関によるプロジェクト・ファンディング体制の充実が求められる。

実用化へ向けては、大量・効率生産を指向したプロセス・システム化が必須である。これには基礎物性の計測技術、理論解析、基礎物性を蓄積したデータベース、シミュレーショ

ンに関する基盤技術の確立が必要となる。実装にはプロセス・システムの長期運転信頼性を検証する必要があるが、先端技術を開発する複数の研究者が、類似のテーマで個々に試験設備を自前で製作するのは時間とコストの無駄になりかねない。そこで例えば、実証レベルに近い試験運転が可能な設備を持つ、実証試験センターを公的研究機関内に設置し、且つそれが国の保安法規を十分に満足し、研究開発者が実用化研究を行えるような仕組みが必要であろう。これにより研究開発を加速し、国際競争を優位に進めることが可能となる。

鉱物資源・固体の分離では、将来的には社会システム全体でのコストダウンが必要になる。中間処理、物理・化学選別の最適設計手法の確立を行う必要があり、これには国が社会システムのルールを設定することで、研究者はそのルールの存在と稼働を前提として、より本質的な研究に注力することができるようになる。研究開発課題例の一つに、高温反応のその場観察があるが、例えば放射光施設に高温プロセス観察専用のビームラインを設けることが挙げられる。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や、電解精錬におけるその場観察技術の構築など共通基盤技術については、公募型のファンディングによる研究開発が相応しい。製錬研究では、数十年前に断念したアイデアの根本問題を現代の技術力を使って再度チャレンジすることも必要であろう。対象物の不均一性・複雑性がもたらす、固体選別に対する科学的アプローチの阻害は、各国共通の課題であり、諸外国の研究開発も未だ明確には打開の方向に動いていない。わが国がその技術革新に一早く着手することにより、世界トップの分離技術を保有することが可能になる。一方、分離技術は様々な分野が競争力を獲得しうる重要なツールといえるが、社会生活に直接的な影響を与える種々の製品そのものとは異なり、目的達成に資する技術課題突破の解決手法に過ぎない。したがって、分離工学イノベーションの結果としての国際競争力を獲得するには、社会システムや制度などと同時に発展させることが重要である。

バイオ･医薬品食農系の分離では、既知の疾患マーカー等では、液相分離や膜分離といった既存の精製分離技術が適用されている。他方、未知の疾患マーカー等では、分離対象や分離技術の標準化を含めて、様々な手法が模索されている。例えばエクソソーム分離の場合、遠心分離法に加え、抗原抗体反応を用いた分離などが試みられているが、エクソソーム自体の大きさが定まっていないこと、エクソソームを構成する膜タンパク質を分析対象とするか、エクソソームという小胞の内部に含まれる分子群を対象とするかで分離手法も異なるなど事情もあることから、研究を加速するために、分析手法、対象、結果などをまとめたデータベースの構築や標準エクソソームの設定が要請されている。このような最先端のバイオ系研究を支える基盤を確立していくための研究開発などを国が支援することが重要である。

横断的共通基盤科学技術（気体・液体・固体・バイオの横断）は、上記の各分離技術を統合的に捉えた分離工学イノベーションに必要不可欠な横断領域であり、特に学術界において既存の学会・コミュニティーを越えた研究開発活動が求められる。例えば、相平衡や輸送物性、結晶核形成・成長メカニズムの解明・把握における、測定手法・装置の開発、シミュレーション・理論解析モデルの構築等である。これらは、共通的な解析・計測・装

置開発をおこなうことや、基礎物性に関するデータが特に不足していることから、データ整備をおこなって共通使用できるようにすることが求められる。複雑な構造の形成や分離過程、系やデバイス全体で分離動態のシミュレーションを可能とするマルチスケール計算、高次元のデータから目的とする機能との法則性（有効因子）を抽出する情報科学技術（ビッグデータ解析、マテリアルズ・インフォマティクス、AI 等）、実験的手法（その場計測技術、試作・プロセス・評価技術）を有機的に連携させることが重要である。

そして、新規に見出した知と技術を産業界へ提供する、または産業で課題となっている分離の問題を科学的に解明する、という両方向のやりとりを、当事者を介しておこなうための場が必要である。第 2 章でも触れたように、分離に関する基礎学術分野は、学術を発展させて次世代を担う人材の育成と、同時に産業界から強く期待されている基本的な分離の科学技術を身に付けた人材の、供給面での懸念とがある。これらは短期間には解決できない問題であり、必ずしも大型の資金でなくとも、中規模の資金を 10 年程度以上継続的に投資することで、始めて変化を起こすことができる。例えば、各地に分散している研究者に関して、いくつかの主要機関がハブ的な中核機関となって研究開発活動をおこない、ハブに人材と知が世代を越えて蓄積されるような継続的な方策が求められる。現在、気体・液体を対象とした分離工学を扱う、コアとなる学会は化学工学会である。一方で、金属製錬やバイオ系の分離技術を考えると、その枠組を超えた広範な連携が必要となる（日本金属学会、資源・素材学会、日本分子生物学会、日本機械学会、日本化学会、高分子学会、日本分析化学会、日本分析機器工業会、等）。

冶金・製錬分野の歴史を振り返ると、わが国においてはドイツに学んだ多くの研究者が明治時期に日本鉱業会を設立、1 万人を超える大きな組織として発展してきた。しかしながら 1960 年代以降、国内鉱山の閉山などに伴い大きく会員を減らし、1988 年には資源・素材学会と名称を変更、現在は 1900 人強の組織となっている。この他に、1937 年に創立された日本金属学会（会員数 5000 人強）がこの分野をカバーしている。

東京大学は、1877 年に東京開成学校と東京医学校とを併せて形成され、法・理・文・医の 4 学部体制となり、工学は理学部の中に入った。理学部の学科構成は、化学科、数学科・物理及星学科、生物学科、工学科、地質及採鉱冶金学科の 5 学科であった。1885 年の改組で、工芸が独立し、法・理・文・医及び工芸の 5 学部組織となった。1886 年帝国大学令の公布により、前年工部省から文部省に移管されていた工部大学校と工芸学部を合併して工科大学を構成した。この工科大学には、土木・機械・造船・電気・造家・応用化学・採鉱冶金の 7 学科構成だった。1909 年、採鉱冶金学科は、採鉱学科と冶金学科の独立の 2 学科となる。1919 年当時、冶金学科は , 東京大学、京都大学、九州大学の 3 大学に置かれていた。このように、冶金工学は旧帝大はじめ有力大学において重要な学科を構成していた。東京大学には設立時から冶金工学科が存在したが、昭和 49 年に金属工学科に名称を変更、平成 13 年にはマテリアル工学科に名称を変更した。これは、当時の学内進学振り分けにおける定員充足の低さなど（＝志望学生の減少）によるものである。他の大学でも、冶金工学は看板を軒並み掛け替えて、マテリアル・材料系学科へと組織替えを行ってきたが、現在も縮小傾向にある。また、化学工学分野では、わが国では 1936 年に化学機械協会が設立され、1960 年台に大きく会員を増やした。その後、化学工学会に名称を変更し、最盛期には 1 万人を超える会員を擁した。2000 年以降、大学での学科廃止などに伴い、会員は徐々に減少し、現在は 7000 人強となっている。わが国では、東北大学、静岡大学、京

都大学が黎明期に化学工学科を設立し、その後は東京工業大学や他の旧帝大に化学工学科が展開された。分離を含めた単位操作が学問分野を形成した時代は、わが国の化学工学科は定員を大幅に増やし、産業界の要請に応えてきた。その後、学問としての単位操作そのものは完成し研究案件が残っていないとされる現在は、産業界から基礎教育への要請があるために、教養・基礎教育は大学で堅実に残っているものの、研究フェーズとしてはほぼ残っていない。現在東京大学は、化学工学科を化学システム工学科へと名称を変更（平成8年)、他の大学も軒並み化学工学科を化学工学コースなどに縮小している。

このような背景にあって、分離工学イノベーションという新しい知の融合を促進するには、上述の伝統的なディシプリンの枠を超えた学際連携を進めない限りは為し得ない。先端の研究者・技術者は学協会活動を通じ、自身の研究の位置づけや課題を新たに認識するために、基礎研究者、応用研究者、工学者間のネットワークを構築・発展させるべきである。同時に、様々な学術分野において、広く分離工学への理解と発展を促進していく必要がある。

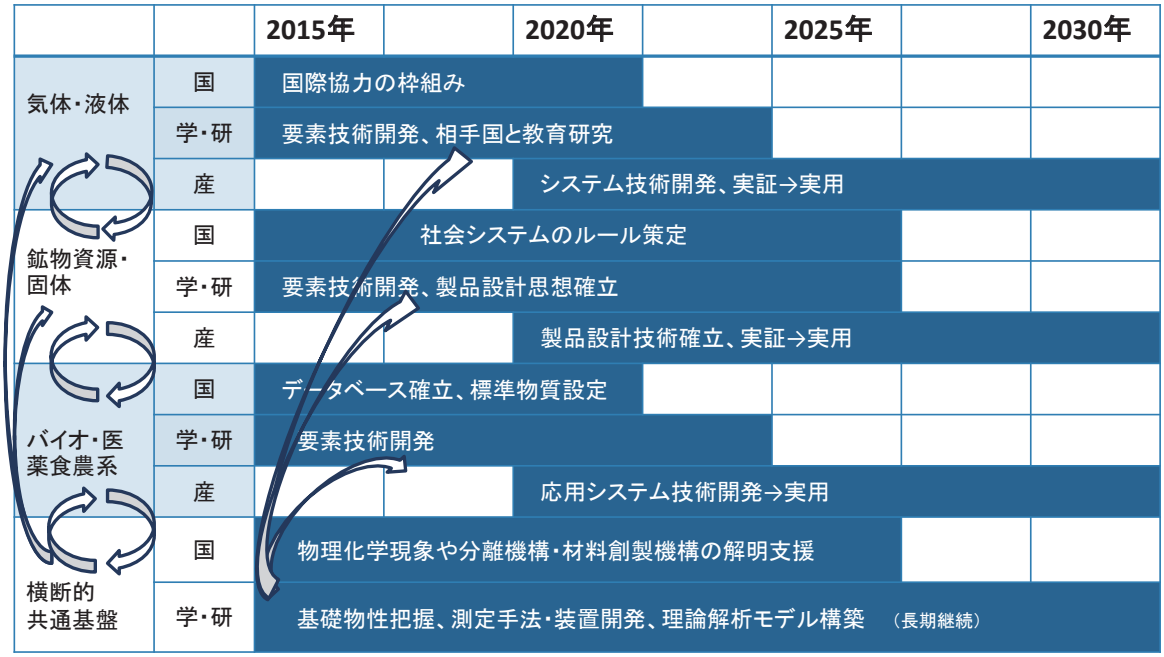


図 4-1 各主体に求められる方策と時間軸

【コラム 3　研究試験設備への保安規制】

大学や研究機関で試験設備を開発・設置する際に、たとえ限られた条件下で使用する小規模な装置（例：超臨界クロマトグラフィー）であったとしても、大規模工場の施設と同じ保安規制（例：高圧ガス保安法施行令）が適用されるため、研究環境の構築・維持には多大なコストと時間をかけなければならない。試験設備の制作費や維持費が高額となることや、導入までには長期間を要することが課題とされている。これがネックとなり、国際的な研究開発競争上不利になることや、導入そのものに足踏みする研究機関や研究者は多い。結果的に、技術の発展を遅らせてしまい、弊害となっている面がある。前提としてもちろん、法令遵守と安全は最優先されなければならず、法規には慎重且つ十分な検討が求められる。研究試験設備に関しては、規模が小さく(独立・非連結のようなケースで)、扱うガス等の物質にも危険性が非常に少ないものについては、適切な適用除外規定等の緩和に関する検討が求められる。

付録１．検討の経緯

・JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、平成 27 年度に戦略プロポーザルを作成すべきテーマの候補を、CRDS 戦略スコープ 2015 策定委員会において指定し、平成 27 年 4 月に CRDS 内にプロポーザル作成のための検討チームを発足させた。その後、チームにおいて提言作成へ向けた調査・分析を重ねた。
・チームでは、調査によって国内外の研究開発動向・技術水準を明らかにしながらスコープの焦点を絞り、その過程において提言の方向性を検討するため、以下の有識者との意見交換・インタビューを実施した。
・その上で、分離工学イノベーションの研究開発に関して CRDS が構築した仮説を検証する目的で、科学技術未来戦略ワークショップを開催した（次頁参照）。ワークショップの結果は報告書として平成 28 年 3 月に CRDS より発行（CRDS-FY2015-WR-10）。
・CRDS では以上の調査・分析の結果と、ワークショップにおける議論等を踏まえて、平成 28 年 3 月に本戦略プロポーザルを発行するに至った。

■意見交換・インタビューを実施した識者　（敬称略、所属・役職は実施時点）

内容		氏名	所属
気体・液体の分離	無機・セラミックス材料	網治　登	（一財）ファインセラミックスセンター
	セルロース材料	新井　隆	（株）ダイセル
	分離工学一般	伊東　章	東京工業大学
	膜分離	一ノ瀬　泉	国立研究開発法人物質・材料研究機構
	超臨界流体・イオン液体	猪股　宏	東北大学
	無機・セラミックス材料	大石　裕信	（一財）ファインセラミックスセンター
	セルロース材料	大塚　喜弘	（株）ダイセル
	膜分離	喜多　英敏	山口大学
	吸収材料・イオン液体	児玉　大輔	日本大学
	無機・セラミックス材料	佐々木優吉	（一財）ファインセラミックスセンター
	超臨界流体・イオン液体	佐藤　善之	東北大学
	相平衡・物質移動	下山　裕介	東京工業大学
	無機・セラミックス材料	髙田　雅介	（一財）ファインセラミックスセンター
	晶析	滝山　博志	東京農工大学
	膜分離	武脇　隆彦	（株）三菱化学科学技術研究センター
	分離工学一般	中尾　真一	工学院大学
	無機・セラミックス材料	永野　孝幸	（一財）ファインセラミックスセンター
	セルロース材料	浜田　豊三	（株）ダイセル
	ナノカーボン複合材料	林　卓哉	信州大学
	膜分離	細川　宏	三菱レイヨン（株）
	分離一般	山根　深一	東レ（株）
	膜分離	吉宗　美紀	国立研究開発法人産業技術総合研究所
鉱物資源・固体の分離	精錬・相分離	宇田　哲也	京都大学
	固相分離・リサイクル	大木　達也	国立研究開発法人産業技術総合研究所
	固相分離・リサイクル	大和田秀二	早稲田大学
	精錬、レアメタル	岡部　徹	東京大学
	鉱物資源処理	柴山　敦	秋田大学
	リサイクル	中島　賢一	（株）リーテム
	精錬、レアメタル	中村　崇	東北大学
バイオ・医薬食農系の分離	医薬系物質分離	馬場　健史	九州大学
	生体物質試料処理	澤田　誠	名古屋大学
	生体物質分離	糸長　誠	（株）ＪＶＣケンウッド
	医薬系物質分離	三輪　克彦	武田薬品工業（株）

■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
プログラム：

	司会	永野智己（JST-CRDS）
10:00 ～ 10:05	開会	曽根純一（JST-CRDS）
10:05 ～ 10:25	趣旨説明	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）

ワークショップ招聘識者：　（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）

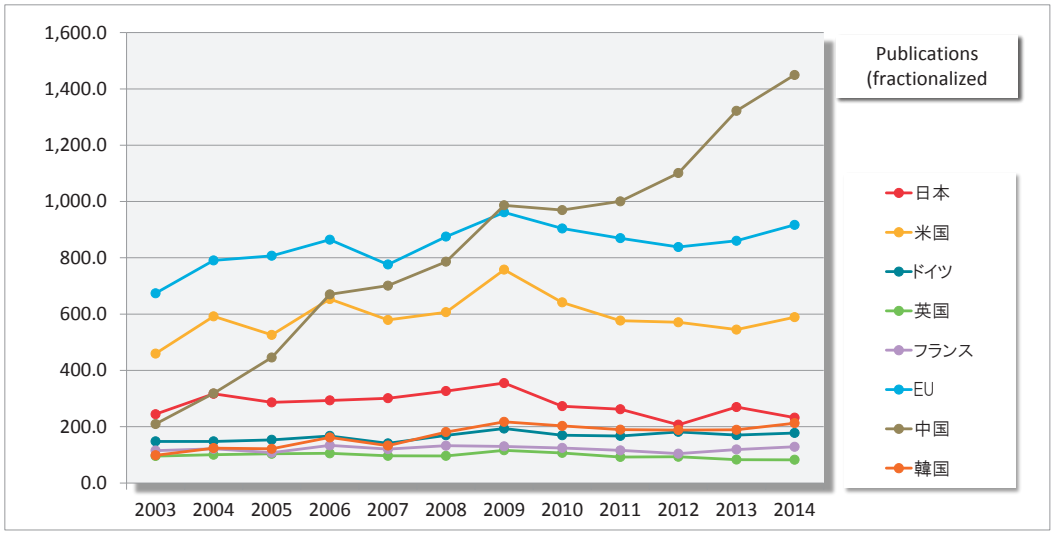
・大木達也　国立研究開発法人産業技術総合研究所
　エネルギー・環境領域　環境管理研究部門　総括研究主幹
・武脇隆彦　株式会社三菱化学 科学技術研究センター
　無機系機能材料研究所　　グループリーダー
・中尾真一　工学院大学工学部環境エネルギー化学科　教授
・三輪勝彦　武田薬品工業株式会社 医薬研究本部化学研究所　主席研究員
・山根深一　東レ株式会社研究・開発企画部　担当部長

（CRDS 特任フェロー）

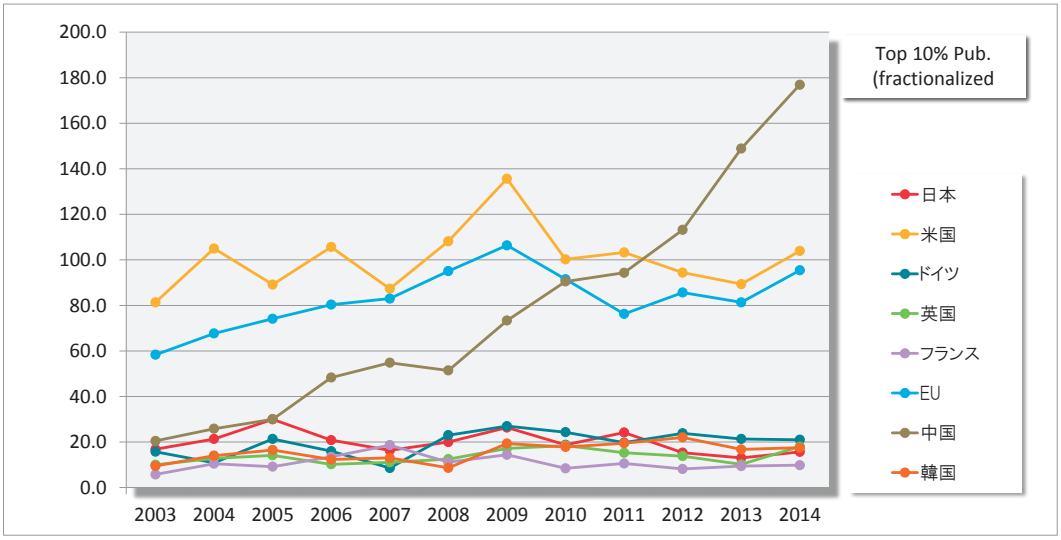
・伊藤　聡　国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究機構　コーディネーター
・魚崎浩平　国立研究開発法人物質・材料研究機構　フェロー
・馬場嘉信　名古屋大学大学院工学研究科　教授
・村井眞二　奈良先端科学技術大学院大学　特任教授

付録２．国内外の状況

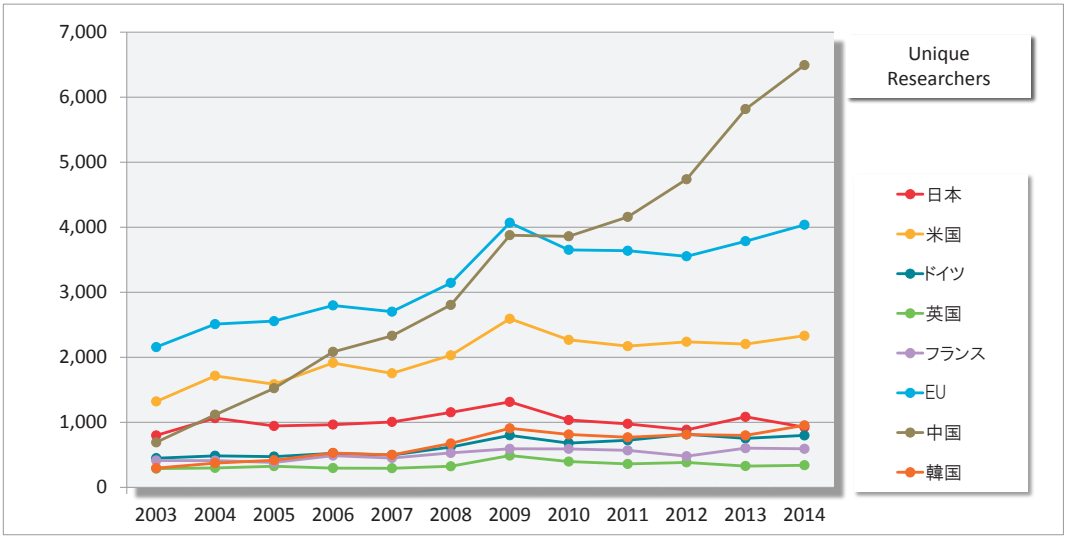
分離工学に関する、論文数の動向を示す。以下では、2003 年から 2014 年までの、国別の論文数の推移、被引用数トップ 10% 論文の国別の数、論文からみた研究者数のグラフ、である。（※論文からみた研究者数とは、各年の論文数について、研究者 ID で名寄せしたものを指す）



グラフ 1 分離工学に関する国別の論文数推移



グラフ 2 分離工学に関する被引用数トップ 10% 論文の国別の数



グラフ３論文からみた研究者数の推移

データ註）

註 1. 各グラフは、エルゼビア社が提供する Scopus データベースを用いて CRDS が作成。

註 2. 対象国は、日本、米国、ドイツ、英国、フランス、EU（28 か国）、中国、韓国。EU（28 か国）は EU 加盟国 28 か国の合計値。

註 3. 論文からみた研究者数とは、各年の論文数について、研究者 ID で名寄せしたものを指す。

註 4. 分離工学に関する論文の範囲・条件は、以下の検索領域・検索式による。

検索領域	検索式
・Chemical Engineering (miscellaneous) ・Colloid and Surface Chemistry ・Environmental Engineering ・Fluid Flow and Transfer Processes ・Materials Chemistry ・Materials Science (miscellaneous) ・Mechanics of Materials ・Polymers and Plastics ・Metals and Alloys	・separation AND (Membrane OR Microfiltration OR Nanofiltration OR Ultrafiltration OR Reverse Osmosis OR Forward Osmosis OR Adsorption OR Absorption OR Equilibrium OR Mechanical OR Distillation OR Extraction OR Crystallization OR Phase OR Supercritical fluid OR Ionic liquid OR MOF OR PCP) ・membrane AND (Microfiltration OR Nanofiltration OR Ultrafiltration OR Reverse Osmosis OR Forward Osmosis OR Adsorption OR Absorption OR Equilibrium OR Sieve OR Zeolite OR Silica OR Polymer OR Inorganic OR Composite OR Carbon)

以下、気体・液体、鉱物資源・固体、バイオ・医薬食農系の各分離についての内外動向を示す。

1. 気体・液体の分離

気体・液体の分離技術は、旧来からエネルギー消費量が非常に大きい大量生産設備で多用されてきた。石油・石油化学・化学という重化学産業が代表的である。重化学産業内では蒸留分離技術が中核をなしてきたが、それは技術的に成熟していると言われ、膜分離のような代替技術は経済性の観点から成立できない状況である。しかし、その重化学産業の入口と出口部分を見ると、1）原油ガス田におけるガス分離（CO_2 や低級炭化水素の分離）、2）シェールガス、サンドオイル採掘で生ずる大量の随伴水・汚染水の分離、3）燃焼設備の排ガス中からの CO_2 の分離回収　などは、大気・環境汚染、温室効果ガスへの対応という観点から、新技術や新材料技術の開発およびプロセス革新が強く期待されている。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。

(1) ガス分離

シェールガス・オイル関連では CO_2/ メタン、窒素 / メタンなどの分離やエタン / エチレン、プロパン / プロピレン、水素 /CO_2 などの分離に関する報告が増加している。

- 米国：シェールガスにおけるガス分離の研究が進む。
- 欧州：CO_2 対策とガス化学工業への経済性を踏まえた将来展望に基づき、FP7 の枠組みにもとづく、ガス分離に関するプロジェクトを推進。

(2) 水処理

- 米国：分離膜素材に関する研究から膜の工業化に至る幅の広い研究が行われている。高濃度塩溶液の浸透圧を駆動力とする正浸透膜に関心が高まっており、多くのベンチャー企業が活動している。
- 欧州：伝統的に基礎研究が盛ん。
- 中国：基礎研究から産業化まで急速にレベルが向上している。排水基準の厳格化が応用研究を後押しし、100 社をはるかに超える膜メーカーが存在する。
- 韓国：水処理に関する大型プロジェクトの影響で、分離膜の研究が活発化している。
- 日本：分離膜メーカーは高い競争力を維持するが、中国，韓国、シンガポールなどのアジア勢の追い上げが激しい。応用研究では、NEDO プロジェクト※が 2013 年度に終了。

※エネルギーイノベーションプログラム・環境安心イノベーションプログラム ナノテク・部材イノベーションプログラム「省水型・環境調和型水循環プロジェクト」水循環要素技術研究開発 革新的膜分離技術の開発（2009 ～ 2013 年度）

文部科学省と科学技術振興機構の「革新的イノベーション創出プログラム（COI Stream）」においてアクア・イノベーション拠点が選定され、海水や油を含む水などから、安全で安心な水を作る技術研究から社会実装を目指す活動が始まっている。

(3) CO_2 回収分離

燃焼設備の排ガス中からの CO_2 の分離において、従来の化学吸収法（アミンなどの溶媒を用いて CO_2 を吸収液に吸収させ分離する方法）による分離回収コストは 4200 円 /t-CO_2 である。これを資源エネルギー庁の研究開発ロードマップによると、物理吸収法（高圧下で物理吸収液に吸収させ分離する方法）で分離回収コスト 2000 円台 /t-CO_2（2020 年頃目処）を目指し、膜分離法（CO_2 が選択的に透過する膜を用いて分離する方法）で分離回収コスト 1000 円台 /t-CO_2（2030 年頃目処）を目指している。

科学技術振興機構のプログラム「先端的低炭素化技術開発（ALCA）」において、「革新的省・創エネルギー化学プロセス」の領域で、既存プロセスに比して大幅な省エネが見込める CO_2 分離膜の研究が行われている。

米国 DOE は、分離効率を向上させるため膜分離法＋吸収法のように 2 つの分離技術を組み合わせる研究を開始している。これに対して、日本では、膜型反応器を提唱し、反応操作と分離操作を一体化してエネルギー効率を向上させる研究を行っている。

米DOE 国立エネルギー技術研究所(NETL)
新規CO2分離回収技術の開発に16プロジェクトを採択

総額30M US$　August 13, 2015

PJの狙い：吸収液、吸着剤、膜等のCO2分離回収技術の限界を超える

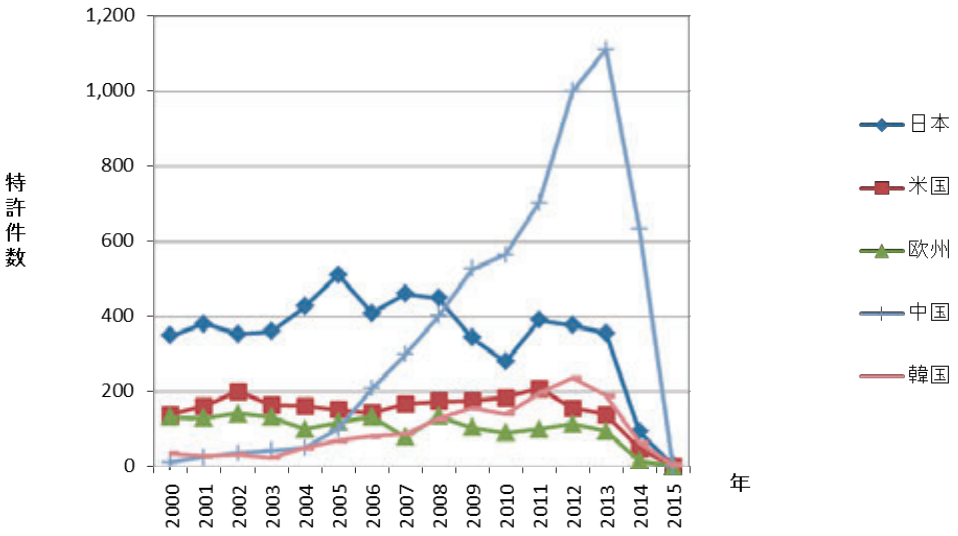
採択課題の技術手法	
① 膜分離法＋吸収法	⑧ イオン液体＋マイクロカプセル（固体吸収材）
② 高分子繊維＋MOF（吸着）	⑨ 分子ふるい高分子＋Pdナノ材料（膜分離）
③ 膜分離法＋吸収法	⑩ 吸着法＋水性ガスシフト反応器
④ 金属イオン＋アミン（吸収）	⑪ 膜分離法＋吸収法＋水性ガスシフト反応器
⑤ デンドリマー＋MOF（固体吸収材）	⑫ 膜分離法＋低温プロセス
⑥ アミン＋多孔質高分子（吸着）	⑬ 吸収液＋非水系（吸収）
⑦ 吸収液＋相分離（吸収）	⑭ 膜分離法＋水性ガスシフト反応器

※微細藻類関連（2件）を除く

http://netl.doe.gov/newsroom/news-releases/news-details?id=a3df8c77-500f-4880-8f04-cb19bc1488b0

特許動向の比較：

ここでは一例として膜を使用した分離技術に関する特許は、日本の件数が 400 件程度で推移し、諸外国に比べて多い。しかし、中国の急増により 2009 以降は中国が上回る。



公開特許件数の各国比較（膜分離）

データ註）

- 対象とする知財庁：日本（JPO）、米国（USPTO）、欧州（EPO）、ドイツ（DPMA）、英国（UKIPO）、フランス（INPI）、中国（SIPO）、韓国（KIPO）の 7 か国 1 地域庁。
- 対象データ：各庁別公開特許件数を集計。DB は Derwent World Patent Index を使用。公開特許は一般に出願から 18 か月後に公開されること、また登録特許は出願から審査を経て登録されることから、特許出願からデータベースへの収録までにタイムラグがあるため、直近の数年間は見かけ上値が過小に集計される傾向を持つことに留意。
- 検索式：{membrane AND (separat* OR treatment OR filte*)} OR "Reverse Osmosis Membrane*"　OR nanofilter　OR "ultrafiltration membrane" OR "microfiltration membrane" OR "ion-exchange membrane" OR "forward osmosis membrane"

2. 鉱物資源・固体の分離

製錬を中心とする鉱物資源・固相分離の分野は、技術的に成熟していると見なされ、国内外とも、長らく大きなプロジェクトが見られない分野である。日本においては 2000 年頃から、希少金属の供給危機が意識されはじめ、省庁横断で、いわゆる元素戦略を実現するための構想が立てられ、2007 年から文部科学省の元素戦略プロジェクト（産官学連携型）および経産省の希少金属代替プロジェクトが開始された。2010 年からは、JST 戦略的創造研究推進事業 CREST/ さきがけがスタート、さらに、2012 年からは文部科学省の元素戦略プロジェクト（研究拠点形成型）が開始された。2015 年度からは、SIP「構造材料」プロジェクトが開始されている。これらのプロジェクトは、そのスコープに「分離」を含むものの、必ずしも分離工学の革新を狙うものではなかった。

海外に目を転じると、米国 DOE が 2011 年 12 月に“Critical Materials Strategy”と題した 190 ページにおよぶ報告書を刊行、その中で、日本、EU、中国、韓国の元素戦略を比較するとともに、米国の取るべき 3 つの柱として、1. グローバルなサプライチェーンの多様化、2. 元素代替技術の開発、3. 元素のリサイクル・再利用・効率的利用を掲げている。これに基づいて、DOE は 2013 年度に、希土類研究拠点を形成する事業をスタートするなど、日本の元素戦略を追随する研究開発が進められているが、分離工学に焦点を当てたものではない。

EU は HORIZON2020 の中で、アルカリ岩・カーボナタイト中のクリティカル原材料、低品位鉱・廃棄物からの金属回収、FeAl 系極限環境耐性材料、超硬材料の開発など鉱物資源およびそのリサイクルに関する基礎的な研究を継続的に支援しているが、これらに関しても、分離工学革新という視点では行われていない。

3. バイオ・医薬食農系の分離

バイオ関係については、分離工学に特化したプロジェクト等の大きな動きは無い。一部の課題単位、例えば超臨界クロマトグラフィーによる分析装置の開発が、JST の先端計測分析技術・機器開発プログラムを通じて開発されたケースなどがある。特定の天然物成分の抽出や、医薬品成分の結晶化研究開発などは、それぞれの目的（例えば疾患）を明らかにした施策のなかでおこなわれることが一般的である。

付録３．専門用語説明

MOF（Metal Organic Framework: 多孔性有機金属錯体）

金属イオンとそれらを連結する架橋性の有機配位子を組み合わせることによって作製される、周期性の高い空間・空隙を持つ結晶性の高分子構造。配位高分子は、プルシアンブルーなど古くから知られ、これを構成する金属や配位子の特性に注目した研究は従来からなされてきたが、1990 年代になり、それらを三次元的に組み上げた構造の内部空間に着目し、多孔性材料として注目されるようになった。多孔性配位高分子、porous coordination polymer（PCP）とも呼ばれる。

マテリアルズ・インフォマティクス

計算機科学（データ科学、計算科学）と物質・材料の物理的・化学的性質に関する多様で膨大なデータを駆使して、物質・材料科学の諸問題を解明するための科学技術的手法。その最大の特徴は、計算機を用いて人間の能力では処理できない規模のデータから重要な事象を導き出し、理論的な事象の捉え方を質的または量的に進展させることで、物質・材料科学の重要事象を解明することにある。これを用いることによって、物質・材料に関する設計原理の発見や新物質の発見から材料開発に至るまでの各過程が加速され、全体の時間を短縮することが可能になる。

エクソソーム（exosome）

細胞の内部から不要になった物質（タンパク質、アミノ酸、DNA 断片、RNA 断片など）を取り込み、細胞外に排出する機能をもつ、直径が 30 ～ 200nm 程度の小胞（小さな袋状構造）。エクソソームの外側を構成する膜タンパク質、およびエクソソームの内側に含まれる物質の双方とも、生体の状態、特に疾患の証拠となる情報を保有していると考えられており、新たなバイオマーカーとして注目されている。

疾患マーカー（バイオマーカー）

生体に含まれる物質のうち、生体の状態を表す情報を保有しているものの総称を一般に「バイオマーカー（生体の標識）」と呼ぶが、そのうち、疾患に罹患しているかどうか等の判定等に利用可能なものを特に疾患マーカーという。例えば血液中にごく少量流れる「循環がん細胞（Circulating Tumor Cell: CTC）」などの細胞そのもの、細胞から排出された DNA 断片、RNA 断片などの生体関連分子などの種類がある。

ゼオライト（沸石）

アルミニウムのケイ酸塩でイオン交換性の高い陽イオンを含み、弱く保持された水分子と結合し、三次元網目構造を持つなどの特徴を有す鉱物の総称。結晶構造中に比較的大きな空隙を持ち、分子ふるい、イオン交換材料、触媒、吸着材料として利用される。現在では、さまざまな構造や性質を持つゼオライトが人工的に合成されており、工業的にも重要な物質となっている。

イオン液体（常温溶融塩）

常温で液体の状態で存在し、カチオン・アニオンのイオンのみからなる塩（えん）をいう。NaCl に代表される無機塩は、小さなイオンから構成されており、イオン間の静電相互作用が非常に強いために、800℃以上に加熱しないと液体にならない。無機イオンよりも大きい有機イオンを用い、イオン間の相互作用を弱めると、室温付近でも液体状態のイオン液体ができる。一般に 100 ℃以下で液体状態の塩のことをイオン液体と呼んでいる。イオン液体は、①ほとんど蒸発しない、②イオンのみから構成されるので電気を良く通す、③液体として利用できる温度域が広い（氷点下～ 400℃程度）、④有機イオンを構成イオンとしているために多様性に富み、様々な物性・機能を持たせることができる、など興味深い特徴を持つ。

超臨界流体クロマトグラフィー

クロマトグラフィーとは、カラムと呼ばれる管の中に保持された固定相と、対象物質との相互作用によって混合物を分離、検出する分析法である。カラム内において、固定相と呼ばれる物質の表面あるいは内部を、移動相と呼ばれる物質が通過する過程で物質が分離されていく。移動相に気体や液体ではなく、超臨界流体を用いたクロマトグラフィーのこと超臨界流体クロマトグラフィーという。コーヒーの脱カフェインのように、原料物質のうちから不要な成分のみを抽出する技術としても用いられる。移動相の物質には、二酸化炭素の他、二酸化炭素に若干の有機溶媒を加える方法などが利用されている。

破過

分離膜を用いて流体から不純物を分離する場合、何らかの原因で分離膜が破れることや分離性能が低下することで、不純物が除去されずに漏出する様をいう。活性炭を用いて不純物を吸着分離する場合の「破過」は、活性炭の吸着性能が飽和条件に達して、不純物が除去されずに漏出する様を言う。

■戦略プロポーザル作成メンバー■

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-SP-04

戦略プロポーザル

分離工学イノベーション

～持続可能な社会を実現する分離の科学技術～

STRATEGIC PROPOSAL

Innovations in Separation Engineering

- Process and Function of Separating Mixtures for Sustainable Society -

平成 28 年 3 月　March 2016

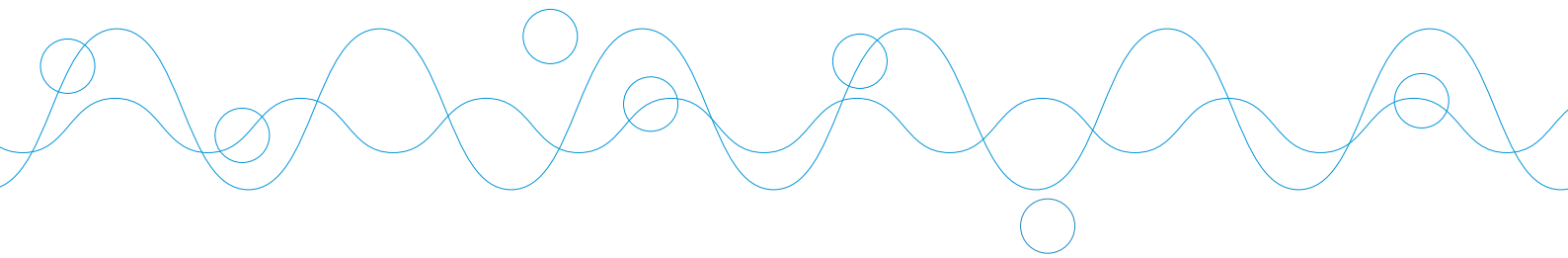
ISBN978-4-88890-491-9

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.

ISBN978-4-88890-491-9