

【産業競争力懇談会 2014年度 プロジェクト 最終報告】

## 【革新的高機能分離素材の開発(分離・除去・吸着)】

2015年3月5日

産業競争力懇談会 **COCN**

## 【エクゼクティブサマリ】

### 1. 本プロジェクトの背景と目的(なぜ「分離機能」に着目したのか)

産業競争力の向上においては、同時に省エネルギーかつ低環境負荷な「真の持続社会の実現」を伴う必要がある。そのためには、資源入手段階、製造段階、使用段階および廃棄段階といった製品のライフサイクルを考えて、それぞれの段階での効率化・省エネ(省資源)化を達成する必要がある。その観点において、分離という機能はいずれの段階にも存在しており、かつ重要な役割を果たしている。これまでも、個々の段階における分離機能に着目した効率化や省エネ化については多くの成果があり、産業競争力の向上や低環境負荷の推進に寄与してきている。

一方で、今後地球温暖化や環境汚染、資源・エネルギー・食料・水の供給不足を克服することは、我が国の生活基盤の維持・向上および産業競争力向上の観点から、以前に増してその重要性が増している。また、これらは人類共通の課題である、所謂「グローバルイシュー」でもあり、我が国と産業界にはそれらを解決する責務があると考ええる。

これらの状況を踏まえ、改めて分離の観点から既存の技術を俯瞰すると、分離対象物質の多様化への対応やそれらの存在地域・場所(マイクロレベル～マクロレベル)への導入最適化などに未だ解決されていないニーズがあることが判明し、その解決手段として、多種多様な混合系からニーズに合わせて有用な物質やエネルギーのみを選択的に取り出す、あるいは有用な物質やエネルギーを閉じ込めて系から漏洩させない新機能素材の開発の必要性を見いだす事が出来た。元々、我が国はこの分野でトップクラスの技術と実績があり、この様な新規素材の開発に関しては、適切な方向付けができれば他国の追随を許さない技術的優位性を有すると考えられる。そこで、潜在ニーズが顕在化して、他国との技術開発競争が激化する前に我が国が先手を打つことができれば、将来にわたる産業競争力の強化が可能となる。

しかしながら、高性能な新機能素材も、それ単独では上記ニーズへの対応は難しく、それらを適切な組み合わせ(システム化)とする事で、これら新機能素材の性能を最大限引き出す事も必要となる。また、素材技術とシステム技術の両方を国内に囲い込み、適切なクローズ戦略をとることにより、他国の参入障壁を作り、更なる産業競争力の向上も可能となる。

一方で、様々な産業や、ライフサイクルにおける個々の段階への適応を考えた場合、分野個別に素材やシステムの開発を進めるだけでは、研究開発全体の効率が悪く、結果として目標とする機能発現はむずかしいと考えられる。そこで、これらを横串的に横断する共通基盤技術の必要性も見いだした。すなわち、「分離の原理」に立脚し、それを解明・深化する、テーマ横断的な「計測・シミュレーション分野」が必要となる。

以上の観点から、本プロジェクトでの開発項目としては、「高選択的分離・除去・吸着新機能素材」、「革新的分離プロセス」および「分離原理の解明・深化」を設定した。(図1)

また、調査の方向性としては、技術や分離対象物質を幅広く設定することにより俯瞰的な調査を行った後に、当該分野での潜在ニーズを見だし、新たに開発すべき技術について個々に検討することで、産業競争力の向上のために取り組むべき施策について提言としてまとめた。

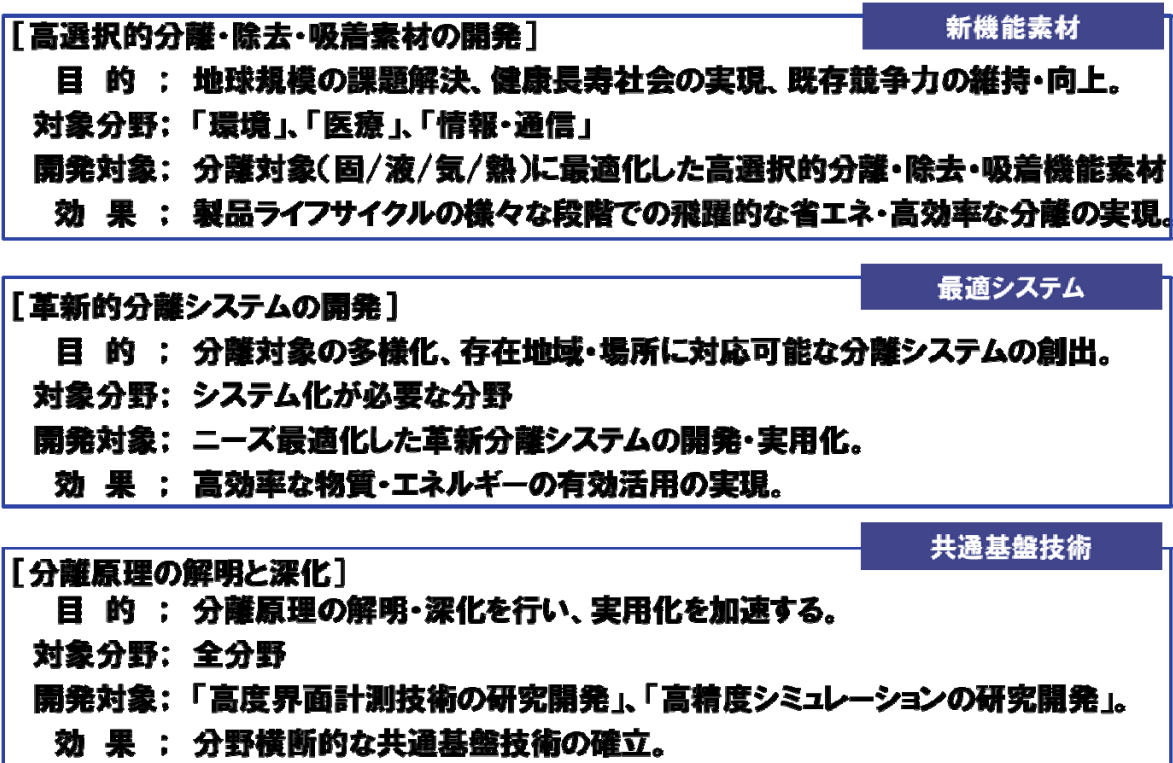


図1 プロジェクト開発対象

## 2. 検討の視点と範囲

図2にまとめたように、まずは「分離の原理」に基づき、「分離」を素材に対する溶解性や拡散性の差を利用して、物質(もしくはエネルギー)を選択する技術と定義し、その構成要素である「溶解項」、「拡散項」、「透過項」のうち、特に分離選択性に対して重要な「溶解項」について、その支配因子である、①素材自体の構造(孔径径など)、②分離素材／物質の相互作用に着目した。この分野の基礎的研究については我が国のポジションは高く、様々な先進的計測技術や高精度なシミュレーション技術を保有する。そこで、これら分析・評価・解析技術の解明／深化を産官学の連携により進めることで、他国の追従を許さない基盤技術の確立を目標に検討した。なお、これら基盤技術は、産業の入り口から出口までのあらゆる場面に分離工程が存在することから、産業全体における共通基盤技術になり得るものと考えられる。

次に、「分離の原理」からの実用化への橋渡しに関して、潜在ニーズが存在し、かつ、本プロジェクトにおいて実用化を目指す「高選択的分離・除去・吸着新機能素材」や「革新分離システム」の効果がもっとも発揮できる分野として以下の3分野を設定した。

なお、実用化を目指す各種素材・システムに関しては、持続社会の実現の観点から、製品設計の段階において、廃棄時の経済性および環境負荷に関してLCAによる検討を行いながら進めることが必要である。

第1の分野としては「環境分野」を設定した。これは地球規模の課題解決に必要不可欠な水・空気・資源等の有効利用に深い関係があり、それ故、産業および社会全般に大きな影響力を有する分野になる。

特に本プロジェクトにおいては、新機能素材の開発のみではなく、分離対象物質や利用可能なエネルギーの多様化にも対応したシステムを構築することで、地域での雇用創出による地域振興・地方再生を意識した地域ニーズ対応型システムの構築についても検討した。

第2の分野としては「医療分野」を設定した。これは、今後実現が望まれる低コスト健康長寿社会の実現に深い関係があり、また、iPS細胞の利活用など、我が国が今後も世界のトップランナーであるべき技術に関係する分野になる。本プロジェクトにおいては、治療・診断・予防の3領域に関して、それぞれ革新分離技術の応用による展開について検討した。

第3の分野としては「情報・通信分野」を設定した。これは対外的にも既に強い産業競争力を有している電子デバイスに関する分野の競争力維持および向上を目的として、その中で分離技術を積極的に取り込むことによりどのような貢献が可能か検討した。

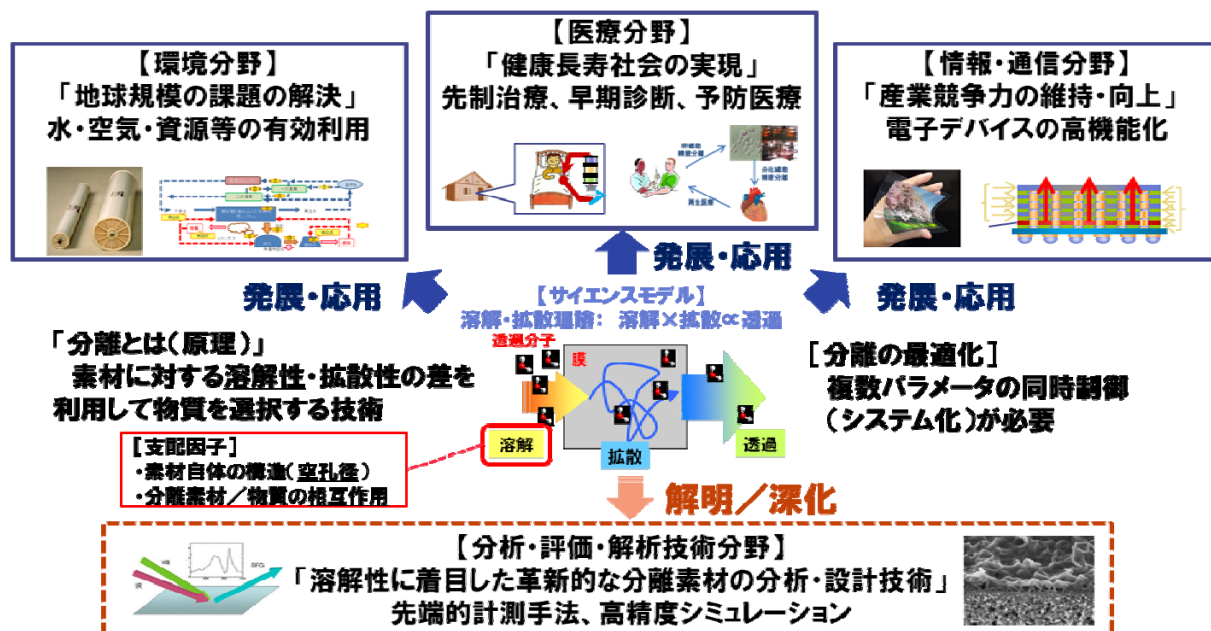


図2 プロジェクト全体像

### 3. 産業競争力強化のための提言および施策

#### ○環境分野「持続可能社会実現に向けた高効率・高機能分離技術の創出」

人類が永続的に地球上で暮らせる持続社会実現のためには、①水・空気・鉱物・バイオマス等の基礎資源を有効活用し効率的に循環利用すること、②環境中に広がる汚染物質を効率的に除去すること、が必要である。これら課題を解決するためには効率的な工業操作が必要であり、分離技術の革新が期待される。特に、汚染地域や資源産出が地域によって多様化している現在、従来のエネルギー大量消費型分離技術ではなく、分離対象物質や地域場所に適した効率的省エネ型の分離技術や、自然エネルギー、バイオマス等の再生可能なエネルギー活用が求められている。この要求に対しては、新素材開発のみならず、様々な種類の分離技術の最適な組み合わせ、すなわち「分離技術のハイブリッド化」により、高効率かつ高選択分離が可能な技術が実現できると考える。

また、その実現には、産官学連携も含めた、トータル開発システムの構築も併せて考えていく必要があり、企業における実用化と、それを後押しする国の開発支援や法規制整備が実行段階で必要となる。

#### [特に注力すべき施策]

##### ①膜分離システムを用いた自立・分散型水処理システム

- ・高効率分離膜および汚泥処理・資源化システム開発による分散型水処理システムの構築
- ・水再利用用途に応じた高効率選択的分離技術の開発
- ・産官学連携による地域社会における分散・水循環システムの効率化推進

##### ②効率的資源回収システム

- ・低濃度金属資源(レアメタル)含有排水からの生物機能を用いた高効率回収システムの開発
- ・革新的分離膜と低エネルギー消費・高効率吸着剤のハイブリッド化による希薄資源回収プロセス
- ・バイオマス総合利用に向けた膜分離システム技術の開発

##### ③空気中の浮遊微細粒子の分離技術など、空気浄化に関する技術進化

- ・分離技術の省エネ化・高効率化・長寿命化
- ・複数の分離技術のハイブリッド化とセンシング技術との統合化
- ・低価格・高感度・小型・オンサイト化・素材開発およびICTの融合

#### [産官学の役割分担]

個々の企業では実用化をめざして技術開発を行うが、そのためには開発の加速を目的とした国プロの設立や補助金制度が効果的である。また、協調領域の基礎研究は大学や国研などの研究機関での推進が必要となる。さらに、計測方法の標準化や規制改革については、業界および地域を横断した取り組みが必要である。特に、自立・分散型水処理システムにおいては、一次産業と二次産業の産業連携により水やエネルギーを地域で循環させて有効活用する必要があり、その推進するための省庁および地方行政横断的な動きが重要となる。(例; 上水や下水、農業用水の新基準の設定。河川・ダム、水資源の管理者と農業用水、上水、下水関係者の協力)さらに、技術をパッケージ化しインフラ事業として海外展開を行う場合には、国際的な連携も必要となり、関係諸外国との連携構築には国に期待するところが大きい。

#### [実現時の社会的インパクト]

「自立・分散型の水循環システム」の実現により、コンパクトなスマートシティを実現し、上下水道システム・インフラ老朽化による維持管理問題の解決や災害に強い都市の構築に繋がる。さらに、有害物質の高効率選択的分離技術により、安心安全な水を必要な場所で供給することが可能となり、新たなビジネスに繋がる。また、排水中の有価物の効率的再利用が可能となり新たな産業創出に繋がる。なお、創出産業の規模は、2025 年の世界の工業用水処理やその他(施設建設を含む)が約10兆円と予測されており、分離素材・システムとして、売り上げ、数千億円～1兆円、1万人規模の雇用が期待できる。

「効率的資源回収システム」の実現により、希薄資源を海水や排水等から取り出すことが可能となり、資源輸入に伴う政治リスクが低減され、さらに資源消費国から資源産出国に変貌する可能性がある。な

お、希薄資源回収の需要は今後拡大されると予測されるが、リチウムだけでも約1000億円の売り上げ規模であり、他の希薄資源も含めると大きな市場が期待できる。分離素材、システムとしては、売り上げ、数千億円、数千人規模の雇用が期待できる。

「非可食バイオマス利用技術」の実現により、我が国の石化資源の依存度の低減に貢献できる。また豊富なバイオマス資源を有する近隣アジア地域に対し、統合されたシステム・インフラ技術として輸出することで我が国の産業発展にも貢献することが期待される。なお、非可食バイオマスの分離精製・回収システムのマーケットはバイオ燃料やバイオケミカルの原料となる糖を製造するシステムが当面の牽引役となるが、2025年におけるバイオ燃料とバイオケミカルの市場は、それぞれ、120兆円、24兆円と推定されている(Silicon Valley Bank, 2012年)。

「空気中の浮遊微細粒子の分離など、空気浄化に関する技術進化」の実現により、浮遊性微粒子に対し、今後予想される問題が拡大する前に、諸外国に先駆けて先手を打ち、それを計測・分離する技術を普及させることで、安心・安全な国際モデルを提供することができる。また、技術をパッケージ化することで、安心・安全な空間を提供するビジネスとして、世界に先駆けて日本発の新しい産業を創出することができる。なお、市場規模などは対象が非常に多岐にわたるため未定である。

#### ○医療分野「高度分離技術による安全・安心な長寿社会の実現」、

今後の少子・高齢化社会における健康・長寿社会の実現のためには、①疾患予防による健康維持増進、②早期診断・治療による迅速な社会復帰、③個の医療の実現による健康寿命の延伸とQOLの向上が重要となり、治療、診断、予防それぞれにおいて革新分離技術の開発が必要であり、下記のような開発の支援や法制度の整備を提言する。

##### [特に注力すべき施策]

- ①患者のQOL向上に大きく寄与する「在宅医療対応型分離デバイス」の開発推進
  - ・高機能分離デバイスへの薬事行政インセンティブの付与。(一貫した推進施策の提示)
  - ・透析における在宅医療システム創出のための研究開発推進
- ②細胞治療・再生治療における細胞製造のための分離技術の開発推進
  - ・革新的細胞分離技術創出のための研究開発推進
  - ・臨床機関、バイオプロセス関連企業と部材メーカーの連携推進(オールジャパン推進体制構築)
  - ・細胞培養、分離精製プロセス構築・管理のためのレギュレーション整備
- ③経皮吸収型製剤および経皮ワクチンのための機能材料開発技術の推進
  - ・産学官で連携した研究開発環境の構築(連携構築支援)
  - ・機能性材料開発のための研究開発推進
  - ・予防医療へのインセンティブを高める制度の検討、予防医療等に係る研究開発への人的および資金的リソース配分の拡大

##### [産官学の役割分担]

医療分野の提言を実現し競争力のある新産業を創出するためには、企業による材料開発、デバイス化、システム化技術開発に加え、医工学、医学など様々な領域の連携を必要とし、このため、産業界とし

ては、さまざまな企業間連携による技術の融合やアカデミア、臨床機関との連携で臨床ニーズを発掘し、開発を推進する必要がある。また、それに加えて、国に対しては、一貫した推進施策の提示のような薬事行政インセンティブの付与や、臨床機関、バイオプロセス関連企業と部材メーカーのオールジョパンの推進体制構築への支援などが必要となる。

#### [実現時の社会的インパクト]

「透析治療における在宅医療対応型デバイス」の実用化により、患者の精神的負担の軽減や、生活の質の向上および労働力の確保につながる。なお、現在の国内透析医療費は1.3兆円に上るが、約10%が在宅透析機器を使用することになるだけでも、約1500億円の新たな市場が創出される。また、在宅透析に対応した低侵襲型のモニタリング機器が開発されることで、在宅透析の普及がさらに加速され、新たな機器の市場の創出とともに在宅透析市場の拡大が図られる。

「細胞治療・再生治療における細胞製造のための分離技術」の実用化により、輸入品が圧倒的シェアを占める当該分野における国内製品のシェアを向上させることができる。また、細胞治療・再生医療の安全性の確保とコスト削減のための最重要の課題である細胞培養の効率化と細胞の分離・精製の効率化に寄与する分離素材・分離システムの開発や効率的なプロセスのわが国での実用化は、iPS細胞技術を中心とした再生医療におけるわが国の先進性を、バイオプロセスにおける装置・消耗品類の海外に対する優位性にも広げることになるとともに、我が国の再生医療の国際競争力を確保する上で、キー技術のひとつになるものとしてきわめて重要である。

「経皮吸収型製剤および経皮ワクチンのための機能材料技術」の実用化により、低コストで安全性の高い経皮ワクチンの広範な感染症への適用やガン抗原に対して効果的な細胞性免疫の誘導を図ることでガンの効果的な免疫治療法の提供にもつながり、国民の生活の質の向上および医療費の削減に寄与する。

#### ○情報・通信分野「革新高機能分離・隔離素材による産業競争力の向上」

情報・通信産業は我が国の基幹産業であり、特に電子デバイス製造における外部環境からの隔離機能素材や熱分離機能素材は重要であり、今後、電子デバイスの高性能化・高速化に伴い、世界市場の拡大が予想される中で我が国が有するシェアの維持・成長のためには、我が国が保有するこれらの素材開発技術に磨きをかけつつ、新規な特性を付与した高機能分離・隔離素材に関する共通基盤技術開発および体制の構築が重要となる。

そのためには、産官学連携により、従来の隔離・分離機能を飛躍的に向上させた高機能分離・隔離素材の創出・実用化および生産システムの開発を併行して進めていく必要があり、併せて国からの開発支援や法規制の整備も必要となる。

##### [特に注力すべき施策]

##### ①高性能フレキシブルバリア素材の開発

- ・ガラス同等のバリア特性を有するフレキシブルバリア素材の開発
- ・サプライチェーン・メーカー相互連携体制の構築(連携構築支援)

##### ②半導体デバイス用熱分離素材の開発と実装技術の開発

- ・3D半導体実装用の熱分離素材開発と工法、装置の一体開発推進
- ・革新的な工法開発のための開発センターの構築（連携構築支援）

### ③水素技術関連素材の開発

- ・高性能水素ガスバリア素材・水素分離膜の開発
- ・高イオン伝導性と超低ガス透過性を両立する電解質膜の開発
- ・サプライチェーン・メーカー相互連携体制の構築（連携構築支援）

### 〔産官学の役割分担〕

「フレキシブルディスプレイ」に関しては、最終製品に加工するまでに、素材メーカー、パネルメーカー、半導体メーカー、ディスプレイメーカー等複数のメーカーが関与する。実用価値の実証及び顧客の使用テストにより顧客ニーズを素材にフィードバックするには、これらのメーカーが相互に連携することが必要不可欠である。各素材の開発や測定技術の確立は企業及び大学が担当するが、特に大学には新規革新技術の創出に注力して頂きたい。また、共同研究開発体制の構築及びフレキシブルディスプレイの普及に必要な法整備に関して国の支援をお願いしたい。

「半導体用の熱分離素材」に関しては、日本の半導体産業に依然高い競争力を有している材料分野、また同様な状況にある製造装置分野を今後も世界の中で維持、伸張していくためには、熱分離素材とそれをういた3次元実装などの工法および装置の一体開発を加速するため、国プロの設置による支援が効果的である。また、半導体実装分野は、ウェハ製造分野のような世界大手数社が牛耳っているのとは異なり、工法や材料が多岐に渡ることから特化、専門化した中小の企業により担われている部分も多い。これらのベクトルを揃えオールジャパンの力を結集するためには、国家支援および中立な立場の拠点を中心とする枠組みの整備が重要である。

「水素技術関連素材の開発」に関しては、燃料電池等の活用による水素社会の構築に必要な材料であり、今後の需要も期待できる分野であることから、国プロによる加速支援が効果的である。また、産官学によるオールジャパンのサプライチェーン連携体制の構築が必要であり、併せて国の支援を期待したい。

### 〔実現時の社会的インパクト〕

「フレキシブルディスプレイ」の実用化により、使用時の利便性が向上するだけでなく、真のユビキタス社会の実現に貢献でき、新たな産業の創出も期待できる。なお、フレキシブルディスプレイは2020年に約2兆円の市場規模であり、実用化による新規雇用の創出も期待できる。

「半導体用の熱分離素材」の実用化により、半導体製品の3次元積層化の普及への貢献が期待できる。これらは、今後のIoT普及とビッグデータ解析技術の向上によるフルインテリジェントな社会、これに相乗効果と自動車の自動運転の実用化、本格普及、さらにはこれらによる社会の安全安心化の推進、暮らしやすい高齢化社会の実現を力強く後押ししていくと考える。なお、経済的効果としては、2011年で82.7兆円と日本産業の中でも最大規模の産業である情報・通信分野において、利便性を向上させ、かつ省エネルギー、環境負荷低減につながる日本独自の高性能素材の開発を行うことで、日本の国際的な産業競争力を強化し、新規雇用を創出する事が期待できる。



「水素技術関連素材」の実用化により、今後燃料電池自動車用途を中心に需要が見込まれる水素の製造・貯蔵・輸送・利用において、その効率を飛躍的に向上させることにより、水素製造コストの低減が期待できることから、水素社会を進めて行く上で鍵となる技術である。なお、水素社会全体の市場規模は、2050年に、周辺インフラを含めると、世界で160兆円であり、その時点での水素の需要は7.5兆m<sup>3</sup>であり、販売金額ベースではおよそ240兆円となる。

#### ○テーマ横断的分野「選択的高効率分離材料創出のための計測・シミュレーション技術の研究・開発」

上記応用3分野の提案において革新的新素材創出の加速や、高効率システムの構築のためには、我が国が世界をリードしている先端分析手法や、高精度な分子シミュレーション手法のような、計測・シミュレーション手法を分離に適した手法に発展させる必要がある。さらに、計測とシミュレーションの組み合わせなど、複数の手法を相補的に活用することで従来は得られなかった知見が期待でき、これは産業共通の基盤技術となり得る可能性を持つ。分離の原理解明という共通の目的の下、個々の手法を発展させるとともに様々な手法の連携によるシナジー効果を引き出すには、基盤技術開発を担当する組織の設置と、以下の研究開発を推進することが望ましい。

- a. 分離材料(モデル材を含む)の構造および特性の実環境計測・解析技術開発
- b. 界面化学に立脚した分離材料と分離対象物質との界面構造・相互作用の解明
- c. 原子・分子レベルの分離現象シミュレーション技術開発

#### [産官学の役割分担]

分離の原理解明という共通の目的の下、個々の手法を発展させるとともに、様々な手法の連携によるシナジー効果を引き出すには、基盤技術開発を担当する組織を設置し、以下に挙げる研究開発を推進することが望ましい。基盤技術開発を担当する組織は、分離素材の研究開発もしくはその計測・解析で実績のある大学または公的研究機関をハブとする事が好ましく、国研との連携など国の支援に期待するところは大きい。産業界は、分離素材についてのニーズを示して基盤技術の方向性を定めるとともに、計測サンプルの提供や測定・シミュレーション結果の素材開発へのフィードバックを行う。基盤研究と素材開発のインタープレイを促進することにより、分離の基礎科学の深化と革新的な分離素材の開発が強調して進むことが期待できる。さらに、基盤研究の成果を産業界が広く活用できるようにするため、産業界による先端計測装置活用の推進や、ソフトウェア開発を含めた「京」、ポスト「京」コンピュータ活用を促進する仕組みの整備も必要となり、併せて国の理解と支援を要請したい。

#### 4. 今後の進め方

今後、我々のプロジェクトにおいては、本提言に基づいて、より具体的な開発内容の設定や実施体制の検討のため、必要となる各プレイヤー(産・官・学)の検討および相談・協議を進めて行く。また、その過程で検討・企画に必要な組織体制についても検討する。なお、プロジェクトの実現においては、個々の提言の種類およびフェーズが多岐にわたることから、全体の同時実現と、個々のテーマの個別実現の両面から検討を行い、産業競争力の向上の観点から優先順位を明らかにしてあるべき姿を検討し、一日も早い実現に向けて鋭意努力していく所存である。

## 【目 次】

1. 本プロジェクトの背景と目的(なぜ「分離機能」に着目したのか)	3
1-1. 検討の視点と範囲	4
2. 環境分野「持続社会実現に向けた高効率・高機能分離技術の創出」	5
2-1. 背景	5
2-2. 課題	6
2-2-1. 分離対象物質と技術の俯瞰	6
2-2-2. 水循環に関する状況と課題	7
2-2-3. 希薄資源の回収に関する状況と課題	8
2-2-4. 空気浄化に関する状況と課題	9
2-2-5. 地域毎の環境汚染の状況と課題	9
2-2-6. 非可食バイオマスの利用状況と課題	9
2-3. 提言	9
2-3-1. 膜分離システムを用いた自立・分散型水処理システム	10
2-3-2. 効率的資源回収システム	14
2-3-3. 空気中の浮遊微細粒子の分離など、空気浄化に関する技術進化	16
3. 医療分野「高度分離技術による安全・安心な長寿社会の実現」	17
3-1. 背景	17
3-2. 課題	18
3-2-1. 医療分野において必要とされる分離機能	18
3-2-2. 「治療」	18
3-2-3. 「診断」	20
3-2-4. 「予防」	21
3-3. 提言	21
3-3-1. 透析治療における在宅医療対応型デバイス	21
3-3-2. 細胞治療・再生治療における細胞製造のための分離技術	22
3-3-3. 経皮吸収型製剤および経皮ワクチンのための機能材料技術	23
4. 情報・通信分野「革新高機能分離・隔離素材による産業競争力の向上」	24
4-1. 背景	24
4-2. 課題	25
4-2-1. フレキシブルバリア素材	25
4-2-2. 半導体用の熱分離素材	27
4-2-3. 水素技術関連素材	30
4-3. 提言	30
4-3-1. 高性能フレキシブルバリア技術	30
4-3-2. 半導体用の熱分離素材と実装	31
4-3-3. 水素技術関連素材	31
5. テーマ横断的分野	
「選択的高効率分離材料創出のための計測・シミュレーション技術の研究・開発」	32
5-1. 先端計測・シミュレーション手法の現状	32
5-2. 革新高機能分離素材の開発に望まれる計測・シミュレーション手法	34
5-3. 提言	38
6. まとめ	42

## 【はじめに】

本報告は、「分離」という、ものづくりの川上から川下までのあらゆる段階において存在する「分離」に係わる素材、技術およびシステムを革新させることの重要性に着目したものである。その結果として対象とする技術分野が、環境、医療、情報・通信など多岐にわたり、さらに基礎的な研究の重要性に関する幅広い提言内容になっている。

### ◆「分離」に着目した理由

我が国の産業競争力の源である「ものづくり」において、原材料やその品質の確保、工業プロセスにおける個々の工程の効率化・省エネ化および生産の代償として出てくる種々の廃棄物の回収・再利用など、あらゆる段階に「分離」という操作が存在している。これまでは分離工程は工程全体の中の一汎用工程という認識から、多様なニーズに対応できず、機能を最大限発揮できない場合があった。

そこで、本報告では、分離工程をシステムの中の重要な一つの工程と認識した上で、必要な機能を有する新しい素材を用意し、それらをシステムの中に適切に組み合わせることで全体の効率・性能を飛躍的に向上させ、汎用工程の限界を超えて機能を最大限に発揮させる可能性について検討を行った。

### ◆本報告により実現を目指す産業競争力強化上の目標・効果

本報告では、「分離」の切り口で我が国の産業競争力の強化を睨んだときに、多くの候補テーマの中から、今後のニーズや技術動向を鑑み、「環境」、「医療」、「情報・通信」および共通基盤技術としてこれらを加速する「計測・シミュレーション分野」を検討テーマとして設定した。設定したテーマはいずれも我が国として力を入れていくべき分野である。また、「分離」を、ニーズに対応するための専用工程として認識し、その素材からシステム全体まで網羅して開発していくことの重要性について検討し、同時に必要な技術開発やそれを支える国の支援などについて検討した。

これを国全体として推進することにより、産業の様々な分野および段階において、我が国の目指す「安全・安心な社会」および「持続社会」の実現に寄与し、ひいては我が国の産業競争力の向上に資するものとする。

産業競争力懇談会  
会長(代表幹事)  
西田 厚聰

## 【プロジェクトメンバー】

○プロジェクト主査	恒川 哲也	東レ株式会社
○プロジェクト主査付	前 一廣	京都大学
	真壁 芳樹	東レ株式会社
○メンバー（所属機関名あいうえお順）		
	中本 信也	（独）科学技術振興機構 研究開発戦略センター
	大島 永康	（独）産業技術総合研究所
	早川 由夫	（独）産業技術総合研究所
	楠川 宏之	大日本印刷株式会社
	青木 孝夫	東レ株式会社
	木村 将弘	東レ株式会社
	茂本 勇	東レ株式会社
	菅谷 博之	東レ株式会社
	佃 明光	東レ株式会社
	野中 敏央	東レ株式会社
	阪井 英隆	パナソニック株式会社
	増田 悟	三菱化学株式会社
	近藤 豊光	三菱樹脂株式会社
	安永 望	三菱電機株式会社
	村瀬 圭	三菱レイヨン株式会社
	吉岡 睦彦	JSR株式会社
	中山 慶祐	JX日鉱日石エネルギー株式会社
○プロジェクト事務局	尾関 雄治	東レ株式会社
	山根 深一	東レ株式会社
○COCN実行委員	内田 友申	JX日鉱日石エネルギー株式会社
	清水 一治	東レ株式会社
○COCN企画小委員	金枝上 敦史	三菱電機株式会社

## 【本 文】

### 1. 本プロジェクトの背景と目的(なぜ「分離機能」に着目したのか)

産業競争力の向上においては、同時に省エネルギーかつ低環境負荷な「真の持続社会の実現」を伴う必要がある。そのためには、資源入手段階、製造段階、使用段階および廃棄段階といった製品のライフサイクルを考えて、それぞれの段階での効率化・省エネ(省資源)化を達成する必要がある。その観点において、分離という機能はいずれの段階にも存在しており、かつ重要な役割を果たしている。これまでも、個々の段階における分離機能に着目した効率化や省エネ化については多くの成果があり、産業競争力の向上や低環境負荷の推進に寄与してきている。

一方で、今後地球温暖化や環境汚染、資源・エネルギー・食料・水の制約の克服は、我が国の生活基盤の維持・向上および産業競争力向上の観点から、以前に増してその重要性が増している。また、これらは人類共通の課題である、所謂「グローバルイシュー」でもあり、我が国と産業界にはその解決に責務があると考ええる。

これらの状況を踏まえ、改めて分離の観点から既存の技術を俯瞰すると、分離対象物質の多様化への対応やそれらの存在地域・場所(マイクロレベル～マクロレベル)への導入最適化などに未だ解決されていないニーズがあることが判明し、その解決手段として、多種多様な混合系からニーズに合わせて有用な物質やエネルギーのみを選択的に取り出す、あるいは有用な物質やエネルギーを閉じ込めて系から漏洩させない新機能素材の開発の必要性を見いだす事が出来た。元々、我が国はこの分野でトップクラスの技術と実績があり、この様な新規素材の開発に関しては、適切な方向付けができれば他国の追随を許さない。そこで、潜在ニーズが顕在化して、他国との技術開発競争が激化する前に我が国が先手を打つことができれば、将来にわたる産業競争力の強化が可能となる。

しかしながら、高性能な新機能素材も、それ単独では上記ニーズへの対応は難しく、それらを適切な組み合わせ(システム化)とする事で、これら新機能素材の性能を最大限引き出す事も必要となる。また、素材技術とシステム技術の両方を国内に囲い込み、適切なクローズ戦略をとることにより、他国の参入障壁を作り、更なる産業競争力の向上も可能となる。

一方で、様々な産業や、個々の段階への適応を考えた場合、分野個別に素材やシステムの開発を進めるだけでは、研究開発全体の効率が悪く、結果として目標とする機能発現はむずかしいと考えられる。そこで、これらを横串的に横断する共通基盤技術の必要性も見いだした。すなわち、「分離の原理」に立脚し、それを解明・深化する、テーマ横断的な「計測・シミュレーション分野」が必要となる。

以上の観点から、本プロジェクトでの開発項目としては、「高選択的分離・除去・吸着新機能素材」、「革新的分離プロセス」および「分離原理の解明・深化」を設定した。(図1)

また、調査の方向性としては、技術や分離対象物質を幅広く設定することにより俯瞰的な調査を行った後に、当該分野での潜在ニーズを見だし、新たに開発すべき技術について個々に検討することで、産業競争力の向上のために取り組むべき施策について提言としてまとめた。

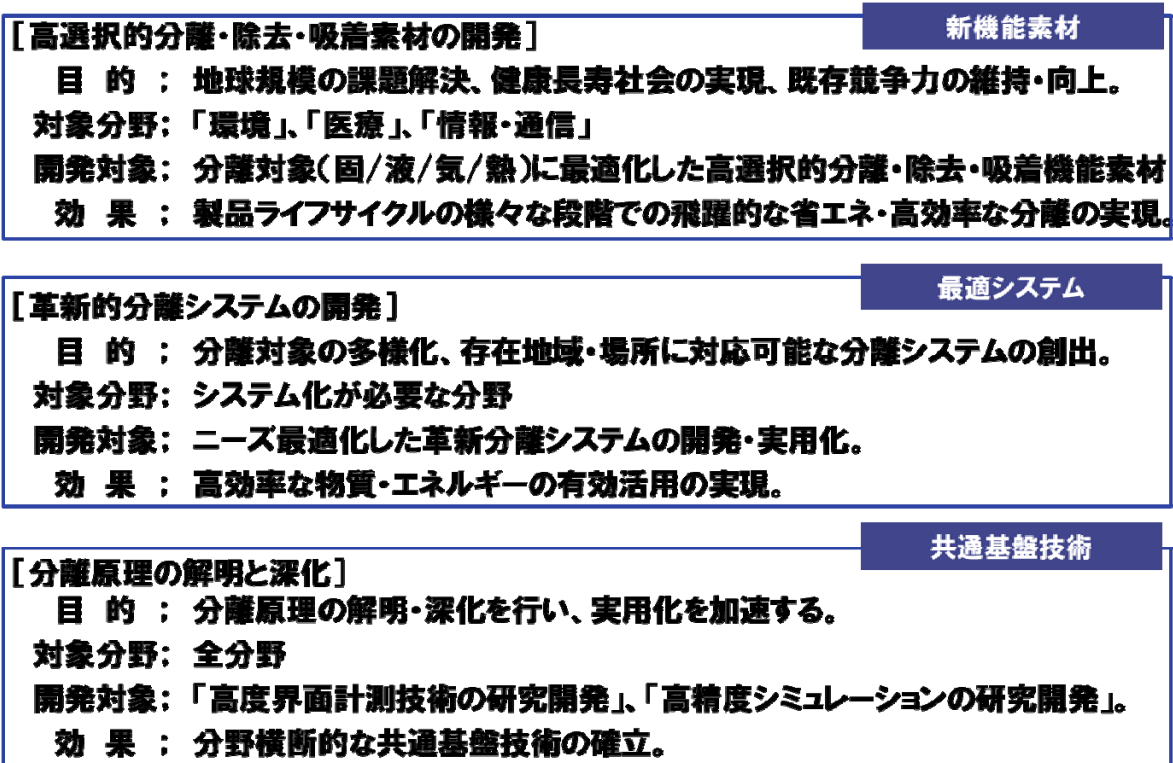


図1 プロジェクト開発対象

#### 1-1. 検討の視点と範囲

図2にまとめたように、まずは「分離の原理」に基づき、「分離」を素材に対する溶解性や拡散性の差を利用して、物質(もしくはエネルギー)を選択する技術と定義し、その構成要素である「溶解項」、「拡散項」、「透過項」のうち、特に分離選択性に対して重要な「溶解項」について、その支配因子である、①素材自体の構造(孔径径など)、②分離素材／物質の相互作用に着目した。この分野の基礎的研究については我が国のポジションは高く、様々な先進的計測技術や高精度なシミュレーション技術を保有する。そこで、これら分析・評価・解析技術の解明／深化を産官学の連携により進めることで、他国の追随を許さない基盤技術の確立を目標に検討した。なお、これら基盤技術は、産業の入り口から出口までのあらゆる場面に分離工程が存在することから、産業全体における共通基盤技術になり得るものと考えられる。

次に、「分離の原理」からの実用化への橋渡しに関して、潜在ニーズが存在し、かつ、本プロジェクトにおいて実用化を目指す「高選択的分離・除去・吸着新機能素材」や「革新分離システム」の効果がもっとも発揮できる分野として以下の3分野を設定した。

なお、これら3分野の提言において実用化を目指す各種素材に関しては、持続社会の実現の観点からも、製品設計の段階において、廃棄時の経済性および環境負荷に関してLCAによる検討も必要となる。

第1の分野としては「環境分野」を設定した。これは地球規模の課題解決に必要不可欠な水・空気・資源等の有効利用に深い関係があり、それ故、産業および社会全般に大きな影響力を有する分野になる。特に本プロジェクトにおいては、新機能素材の開発のみではなく、分離対象物質や利用可能なエネルギー

一の多様化にも対応したシステムを構築することで、地域での雇用創出による地域振興・地方再生を意識した地域ニーズ対応型システムの構築についても検討した。

第2の分野としては「医療分野」を設定した。これは、今後実現が望まれる低コスト健康長寿社会の実現に深い関係があり、また、iPS細胞の利活用など、我が国が今後も世界のトップランナーであるべき技術に関係する分野になる。本プロジェクトにおいては、治療・診断・予防の3領域に関して、それぞれ革新分離技術の応用による展開について検討した。

第3の分野としては「情報・通信分野」を設定した。これは対外的にも既に強い産業競争力を有している電子デバイスに関する分野の競争力維持および向上を目的として、その中で分離技術を積極的に取り込むことによりどのような貢献が可能か検討した。



図2 プロジェクト全体像

以下、各分野における検討結果および提言を記載する。

## 2. 環境分野「持続可能社会実現に向けた高効率・高機能分離技術の創出」 (地域、目的に応じた資源循環システムの構築)

### 2-1. 背景

地球上に存在する水・空気・鉱物・バイオマス等は、地球誕生以来、自然が長い年月をかけて蓄積してきた資源であり、人類にとってかけがえの無い存在である。我々は、これらの資源を短期間で使い切ることなく、永続的に維持する責任があり、持続的に資源を活用する持続可能社会を実現させなければならない。

例えば水については、太陽エネルギーにより、海・陸から水が蒸発し、降雨により戻るという水循環が継続的に行われているが、この水循環の中で人類が活用可能な水資源はごく一部である。さらに、水資

源は地域や季節で偏りがあり、量的にも十分とは言い難い。また、人口増による消費の加速、食料不足、温暖化といった地球規模の急速な変化がこの問題をより複雑化している。このような中、限られた水資源を持続的に活用する技術が求められる。

一方、大量消費に伴う環境汚染も地球規模レベルで深刻化している。一部地域では、自然環境による自己浄化作用を越えた汚染が広がりつつあり、持続可能社会実現にとって避けることのできない課題である。水からだけでなく、空気や土壌からの汚染除去は、資源循環という観点で欠かせない課題であり、たとえばPM2.5の問題や、原発事故の影響による土壌汚染など、懸念されることは多い。

さらに、環境汚染と同様に化石燃料や鉱物(レアメタル、リン等)の埋蔵資源の減少も大きな課題である。採掘可能な埋蔵資源は限られているが、人類は産業革命以来、加速的にこれらの利用を増やしている。このような自然が蓄積してきたスピードに比べて非常に速く一方通行的な資源の利用は、いずれ破綻をきたすと考えられ、持続可能社会実現の大きな課題である。

また、持続可能社会実現にむけた別のアプローチとしては、再生可能なバイオマス資源の活用がある。バイオマスは光合成で二酸化炭素を固定するため、そのバイオマスを原料として生産された製品の燃焼等で発生する二酸化炭素は、カーボンニュートラルと言われており、有効な資源活用法である。特に、今後の世界人口増加を背景に食料と競合しない非可食バイオマスの利用が重要な課題である。

これら課題を解決するためには、環境浄化や資源回収などの工業的な操作が必要であり、分離技術の活用が期待される。特に、汚染や資源が地域場所によって多様化している現状を踏まえると、これまでのようなエネルギー大量消費型の分離技術ではなく、地域場所に適した効率的な省エネ型の分離技術や、自然エネルギー等の持続可能なエネルギー活用が求められる。

## 2-2. 課題

高機能分離素材に関連する技術の状況と課題についてまとめた。

### 2-2-1. 分離対象物質と技術の俯瞰

混合されている物質を分離する場合、沸点や比重、大きさ、溶解度など構成成分の物理的性質の違いを利用して、さまざまな方法が研究され実用化されている。この中でも、膜や吸着剤を利用した分離は、蒸留法などに比べて、熱エネルギーを必要としないため、一般に省エネ技術であり、近年、研究開発と実用化が進んでいる。この膜分離・吸着分離は、様々な場所で使用されており、今後さらに発展することが期待されている。分離機能の向上を達成するには、素材設計による「選択性」や、高透過性といった「分離効率」の向上が重要となる。革新的な分離素材の設計には、素材そのものの構造だけでなく、素材と分離対象物質との相互作用や、分離対象物質の素材内部での振る舞いに着目した計測・シミュレーション手法の革新が必要となる。これにより、効率的に分離素材の研究や設計を行うことができ、飛躍的な分離機能の向上が進むと考えられる。

現状の分離の対象物質ごとに使用されている場所(環境)の俯瞰図(図3)から、家庭～地球規模にわたる領域において、様々な物質の分離が行われていること、持続可能社会実現に向けて必要となる分離対象物が多く存在すること、がわかる。例えば、自然の水源や排水から水を得る際、濁質や塩類、有害物質をそれぞれ効率良く分離する技術や、希薄資源を有効活用する技術が必要と考えられる。この図から、いくつかの具体的課題が存在し、これらを統合的に解決することにより実現できる産



業と、このために次世代の分離技術の進むべき方向性が見えてきた。次にいくつかの課題を述べる。

( ) : 具体例、【 】 : 媒体や用途

規模 (レベル)	個人	都市、産業		水処理施設	自然、水源	
場所	家庭	オフィスビル 商業施設・病院	生産施設、資源工場・施設 農業、林業	上水処理、下水処理、 海水淡水化	地下水、河川、湖沼、 森林	陸、海、空
分離対象物質	気体	消化ガス (CH <sub>4</sub> ,CO <sub>2</sub> ,H <sub>2</sub> )【メタン発酵、分離精製】				天然ガス
		温室【除湿、加温】				
		排気ガス・ばい煙、燃焼ガス (PM <sub>2.5</sub> ,PM <sub>1.0</sub> ,SPM,NO <sub>x</sub> 、SO <sub>x</sub> 、ばいじん等、CO、CO <sub>2</sub> ) 【工場・焼却炉・自動車・船舶・航空機・発電所等】				
		空気 (酸素、窒素)【冷却、溶剤、用水脱気(電子材料、電池、半導体製造水の脱酸素)】				
	液体	汚泥、コロイド、凝結、粘土【家庭用浄水器、産業用水、産業排水、上下水処理、海水】				
		塩類、有機物 (リン、窒素等)【家庭用浄水器、産業用水、産業排水、再利用、海水】				
		有害物質 (重金属、放射性物質、農薬、界面活性剤、色素、亜硝酸、トリハロメタン前駆体)【家庭用浄水器、産業用水、産業排水、上下水処理、海水、土壌】				
		リチウムイオン【電池】	塩、有機物 (タンパク質、多糖、カフェイン)【医薬、食品】			メタン、シェールオイル 【メタンハイドレート】
		ナトリウム【燃料電池】	バクテリア【医療用水】	希薄資源(レアメタル、レアアース、ヨウ素、リン、貴金属)【回収】		
			尿毒素【血液】	水 (バイオエタノール、IPA、酢酸) 【排水蒸留プロセス代替】	色度、臭気成分【上水】	水質素【海水】
固体	飲料 (お茶、コーヒー、フルーツジュース)	イオン【逆浸水】	硬度成分【上水】			
	スケール成分					
	廃油	油分【油水分離、陸排水】				
	金属粉、燃えカス 【エンジンオイル】	水銀	水【食品の脱水】	汚泥【排水】	水銀	黄砂、火山灰
	生ゴミ	非可食性【付】(農業加工残さ、建材)			非可食性【付】(木屑、草屑、藻類)	
	アレルギー (花粉、埃、ダニなど)	菌、ウイルス【医薬、食品】			微生物汚染物質	
菌、ウイルス、ク립ト【家庭用浄水器、共同浴場、プール、共同浴場、産業用水、産業排水、上下水処理、家畜感染症】						

持続可能社会実現に必要な分離対象物質: ( )

図3. 対象物質と使用場所(環境)の俯瞰図

## 2-2-2. 水循環に関する状況と課題

### A. 水資源有効活用の課題

産業で必要とする水資源の量や水質は異なるため、社会全体で水資源をいかに効率的に利用するかが重要である。たとえば、ある産業で使用した排水を別の産業が活用するためには、除去すべき物質と残すべき物質を明確化し、必要な物質だけを処理して次の施設で使用するといった効率化が求められている。

効率化は、特に水資源の有効利用についてあまり議論されてこなかった一次産業において、その余地が大きい。国内二次産業で蓄積された技術を一次産業にも生かし、水の再利用の効率化を図ることが求められている。また、地下水のように自然が数百年かけて蓄積した水資源の減少への対策や、雨水等あまり活用が進んでいない水資源の活用も、併せて検討する事項である。

### B. 排水資源有効活用の課題

生活排水や産業排水の浄化規制はより厳しくなる傾向にあり、高度処理の必要性が生じている。しかしながら、高度処理を行うためには多大なエネルギーを要し、世界的には普及が進んでいない。一方、排水は大きな潜在的エネルギーを有しており、必ずしも全て浄化されるものではなく積極的に利用する試みもなされている。しかし、高BOD含有産業排水処理等の一部を除いては、その潜在的エネルギー利用は進んでいない。このように、排水を有効な資源の1つと考えることにより、水浄化による再利用と排水中の潜在的エネルギーや資源の利用とのバランスが必要である。

現在の都市型下水処理システムは、長く膨大な管路を介して排水を集約し、大型設備を使用して処理し再利用するシステムが普及している。しかし上記システムでは、大規模処理設備への水の移送集約と再利用地域への分散の必要性から、下流側への水の位置エネルギー廃棄と、上流側へのポンプアップエネルギー消費等、多大なエネルギーを消費する。また、大規模設備は膨大な数、長さの管路の点検を要し、さらに、今後は50年以上経過した老朽化管が急増し、これに起因した道路陥没の増加が懸念されることから、維持コストも莫大である。さらに、広範囲な地域から流入する下水の水質を把握することも容易ではない。

### 2-2-3. 希薄資源の回収に関する状況と課題

鉱山廃水や工場等からの排水において、比較的高濃度の排水に対してはすでに回収技術・回収システムが確立しているが、低濃度の排水に対しては有効な処理方法が少ない。また他の処理方法はあるものの経済的に成立しないために、未処理のまま、または希釈して環境中に放出されている。特に、希薄資源（貴金属、レアメタル、レアアース、ヨウ素、リン等）は分離回収にエネルギーを多く消費し、回収効率が低いいため、一部を除きコスト高により商業利用が困難な状況である。図4には、海水からの回収対象となる有価物と経済性評価を示した。まだ、多くの有価物が経済的に成り立たない状況であるが、技術革新により回収可能になると期待できる物質もいくつか存在するため、その実現が求められている。



8

#### 2-2-4. 空気浄化に関する状況と課題

地球上の空気は、人類や生物にとって必須で、なくてはならない資源であるが、PM2.5に代表される浮遊粒子状物質や感染症など、様々な要因によって汚染されつつある。それらによって人々の健康・安全・安心が脅かされており、このままでは2030年には大気汚染で440万人が死亡すると予測されている(OECD 予測)。

これまで、建物など一定の閉じられた空間や、汚染物質が発生する出口、屋外等で、それらを浄化する様々な技術が使われているが、用途や分野毎に個別の分離技術が培われ、専用の装置の開発に留まっている。そのため、社会課題が新たに発生した場合には、それに対応した技術や機器が都度開発されており、大きな産業には成長していない。

今後、焼却炉等から発生するPM2.5より微小な浮遊微細粒子(PM1.0等)が問題化していくと予想されているが、それらの発生メカニズムや人体への影響などを明らかにすることが求められる。また、空間における粒子量をリアルタイムに計測し、安全なレベルまで分離することが必要となる。

それらを個々の用途に応じて技術開発を行うと非効率であるため、用途や分野を横断して対応することが必要となる。また、分離技術のハイブリッド化やセンシング技術との統合、発生源が高熱である場合に対応した耐熱性も求められる。

#### 2-2-5. 地域毎の環境汚染の状況と課題

環境汚染は持続可能社会実現の上で避けて通れない課題であり、特定の地域や使用状況に応じて異なっている。例えば、分離除去が難しい有害物質(放射性元素、ヒ素、重金属、油分、有機物等)による汚染の拡大は、これらが発生する特定のその地域において大きな問題であり、解決されなければならない必須課題である。しかしながら、有害物質を選択的に取り除くことは一般に難しく、プロセスも非効率であるといった技術的課題がある。

#### 2-2-6. 非可食バイオマスの利用状況と課題

デンプン、粗糖など可食原料から、バイオ燃料、乳酸、コハク酸など様々な化学品が発酵生産されているが、デンプン、粗糖など発酵原料の価格の上昇と、将来的に食料との競合の回避のために、非可食バイオマスへの原料シフトが急務である。非可食バイオマスにもセルロース・ヘミセルロースといった多糖が含まれるため、これらを効率的に加水分解して糖を製造することができれば、原料シフトは原理的には可能である。但し、可食原料からのデンプン、粗糖に比べると、不純物が多く、また加水分解に要するエネルギーあるいは酵素コストが課題となっている。

### 2-3. 提言

持続可能社会を実現させるためには、これまでに述べた個々の課題について総合的に取り組み、飛躍的な技術進歩がなされることが期待される。従来の単なる分離素材・技術の進化だけでなく、様々な種類の分離技術の最適な組み合わせ、すなわち「分離技術のハイブリッド化」により、高効率で高選択分離な技術が実現できると考える。ここでそれらを解決するための提言を示す。

## 2-3-1. 膜分離システムを用いた自立・分散型水処理システム

### A. 従来技術の課題

「分離技術のハイブリッド化」、すなわち革新分離技術による付加価値創出のコンセプトを図5に示す。従来分離技術による排水の再利用では、再利用水とそれ以外の廃棄物に分離するのみであり、廃棄物量が多くなる、エネルギー消費量が多いといった課題があった。これに対し、革新分離技術を用いることにより、効率良く排水から有価物を分離することにより、より付加価値を高めることが可能となると考えられる。さらに革新分離技術では、廃棄物量やエネルギー消費量を少なくすることが求められる。このような革新分離技術を用いた自立・分散型水処理システムの構築により、新たな産業創出が期待される。

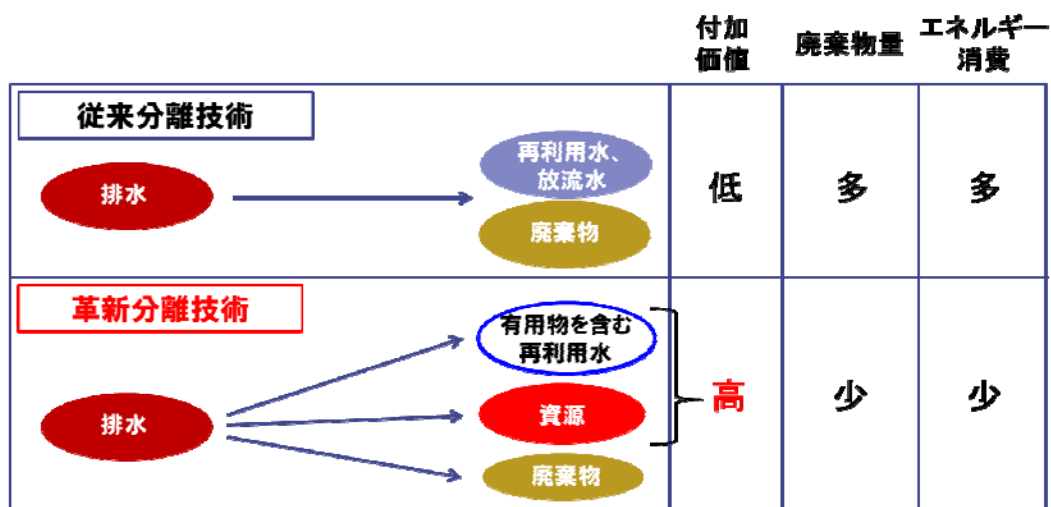


図5. 革新分離技術による付加価値創出のコンセプト図

### B. 達成手段の概要

#### (1) 高効率分離膜および汚泥処理・資源化システム開発による分散型水処理システムの構築

下水処理システムの課題を解決する方法として、膜分離を用いた自立・分散型の水処理システムを提案する。膜分離システムはスケールメリットが働かない分、小型設備に適した水処理システムである。分散型の水処理システムとすることで、無用な配管や中継ポンプ場が不要となり、排水の再利用も容易となる。また、分散型とすることで下水の集約範囲も限定されて下水水質の把握も容易となるため、地域の特徴に合わせた水処理システムを選択することも可能となる。さらに、本システムで発生した汚泥からエネルギーを再生すること等によりエネルギー的に自立した水処理システムを構築できる。これを実現するための自立・分散型水処理システムのフローを図6に示す。本システムの開発により、従来よりもイニシャルコスト、ランニングコストで 50%減を目指す。

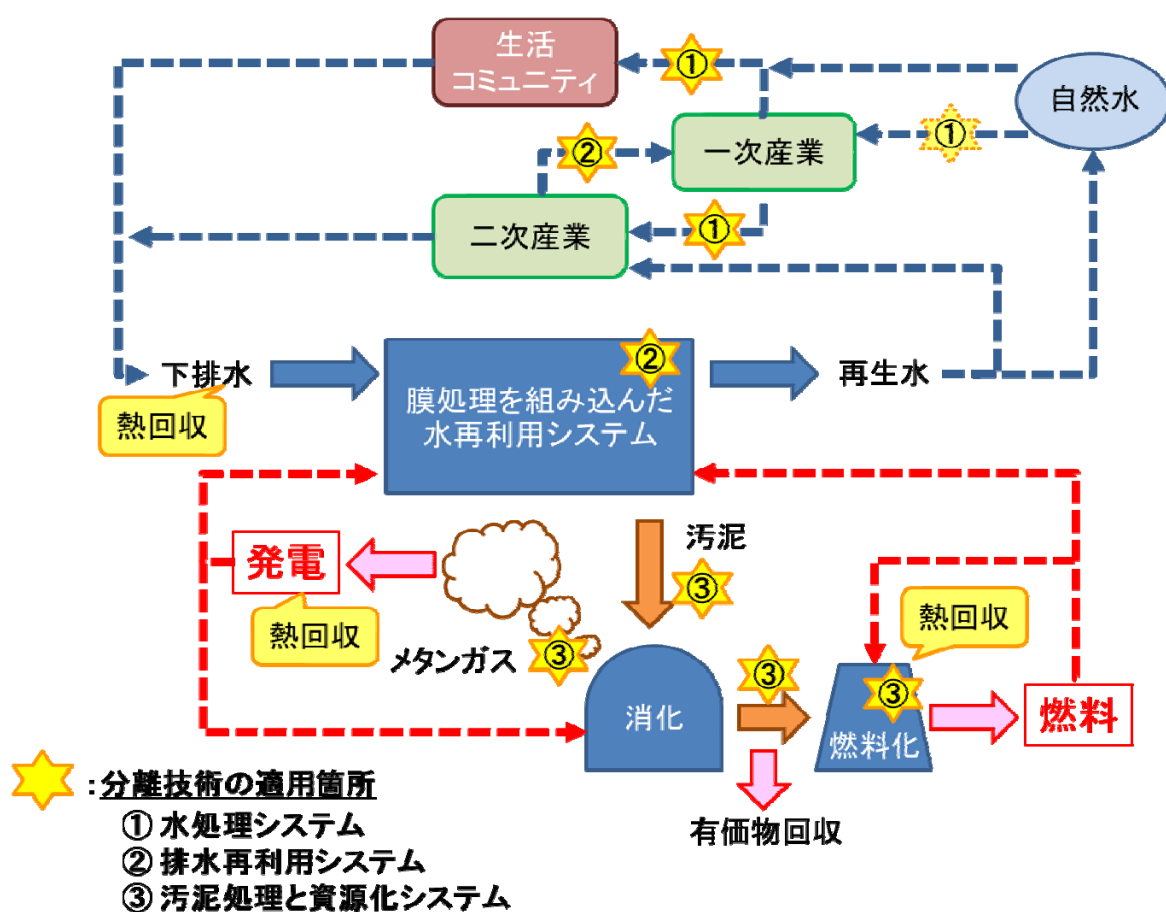


図6. 自立・分散型水処理システムのフロー

#### ①水処理システム

具体的な水処理システムとして、例えば、膜処理と浄化槽タイプの水処理設備との組合せが挙げられる。さらに、微生物付着担体と膜処理との併用による高流束化や大気を微生物と直接接触させて曝気風量を削減する水処理方式と膜処理との併用等、微生物を使用した水処理を膜分離システムに適した方式を採用することも有効である。

上記水処理システムにおいて、膜分離システムの中核である膜の高性能化を実現することによって、低環境負荷で有害物質の除去が可能となる。高性能化の一つとして分離技術のハイブリッド化、ここでは、膜を単なる分離手段として使用するだけでなく、膜の構造、材質、洗浄方法を進化させることによって、排水中の難分解性有害物質を吸着、分解できる機能を持たせる。このような膜を社会実装できるよう実証試験を複数のサイトで実施する。

例えば、高除去逆浸透(RO)膜・高選択ナノろ過(NF)膜の技術を大きく発展させ、革新的な膜構造制御技術を適用し、膜厚や分子間隙を nm サイズで制御することにより、除去性能を現行から飛躍的に向上させ、有害物質の分離性を高めた高除去分離膜が開発できると考える。

また精密ろ過(MF)膜において、膜の材質に排水中の有害物質を吸着、酸化できる物質を織り込むことにより、膜を単なる分離プロセスとしての機能だけでなく、排水中の有害物質を酸化、分解できる。これによって濃縮排水中の有害物質を大幅に低減できる。もしくは膜洗浄時に使用する洗浄

剤として、酸化力の強いオゾン等を使用することで膜に吸着した有害物質を分解することも可能である。

以上述べた膜を開発するにあたっては、膜材質の変化を把握できる分析技術の向上が必須である。例えば、酸化剤による膜材質の変化を分析、解析することにより、膜の強度、寿命を推測できるだけでなく、より強固で高性能な膜の開発にフィードバックできる。

## ②排水の再利用システム

上述した水処理システムで得られた排水は、低濁度で微生物フリーであるため再利用用途が広い。さらに上記で提案した水処理システムにおいて排水中の物質を選択的に分離、残留させることで、製造業等の二次産業で開発が進められてきた排水の再利用技術を農業等の一次産業へも適用できる。すなわち、リンや窒素等の肥料として使用できる物質を再利用水中に残留させることで、農業に適した再利用水を供給する。さらには一次産業だけでなく、各分散型の水処理システムから生成される再利用水の水質・水量等を元に用途に応じて融通することも可能となる。

## ③汚泥処理と資源化システム

分散型水処理システムで発生した汚泥を効率的に処理するためにはある程度の規模で集約しなければならず、複数の分散型水処理システムをグループ化する、もしくは移動式汚泥処理設備を使用する等の対応が求められる。

自立・分散型水処理システムを構築するためには、小型化に特化した汚泥処理システムの開発に加えて、汚泥の持つ有機物を効率的にエネルギーとして取り出す必要がある。

一つ目の汚泥からのエネルギー回収方法として、汚泥の消化処理によるメタンガスの回収がある。消化処理時の微生物反応効率を高めてメタンガス発生量を増大させると共に、メタンガス中に含まれる炭酸ガス、水素、及び水(水蒸気)を効率的に分離するデバイス・素材の開発およびそれを用いたシステムを構築が必要である。さらに、消化汚泥を効率的に膜分離することによって、消化槽内の SRT(固形物滞留時間)を大幅に向上でき、メタンガス発生量の増大が容易となる。

二つ目の方法として、汚泥の固形燃料化がある。その前処理として、フィルタプレス等により汚泥中の水を効率的に分離して、より省エネルギーで脱水性を向上させることが有効である。さらに固形燃料化のプロセスにおいても汚泥の含水率を極限まで効率的に低減することで、より低エネルギーで燃料化が可能となる。また、本汚泥処理においてリンや貴金属等の有価物回収も可能である。

上述した汚泥から取り出したエネルギーを分散型水処理システムで使用するにより、自立型の水処理システムを構築できる。さらに、下排水に含まれる熱エネルギーや消化発電、固形燃料化時の排熱回収や太陽光等の自然エネルギーの併用も有効である。

このような自立・分散型水処理システムを社会実装することで、原油高、為替等のリスクを低減してより安定した生活が保障される。

## (2)水再利用用途に応じた高効率選択的分離技術

自立・分散型水処理システムを構築するための、水再利用用途に応じた高効率選択的分離技術も必要である。水資源の循環利用のためには、有害物質を効率的に除去し封じ込める技術が求められるが、現状は高コスト、低除去率といった課題がある。また、有害物質の高除去率を達成す

るためにはエネルギーを多く消費する傾向にあり、プロセスの効率化が求められている。また、従来技術では有害物質のみでなく、有価物も一緒に分離してしまうことが多く、有価物が有効利用されていない。

課題解決のためには、飛躍的に選択性や透水性を高めた分離素材を開発し、分離効率の向上、エネルギー消費量の削減を達成することが求められる。これには、分離素材を計測・シミュレーション手法によって機能性を発現する機構を明らかにし、得られた知見から素材の設計、例えば膜の孔径や孔径分布、分離対象物質との親和性最適化に落とし込む必要がある。この結果、分離膜であれば分離対象物の除去率を従来比10倍以上、透水量を従来比2倍以上にするといった革新分離素材の開発により、コストおよびエネルギー消費量の削減が可能になると考えられる。さらに、分離・吸着素材と対象物質の界面相互作用について、実環境下における測定解析手法の開発により、飛躍的に吸着効率を高めた吸着素材の設計に繋がると考えられる。これにより、有価物を選択的に透過させ、有害物質（ヒ素、重金属、亜硝酸等）のみを取り除くといった高選択分離性吸着素材の開発が可能となり、有価物の有効利用に繋がると考えられる。また、膜と吸着といった異なる単位操作の分離技術は、効率的に分離可能な分離対象物質の濃度や分離条件が異なるため、これら技術のハイブリッド化と最適プロセス設計は、コストおよびエネルギー消費量削減に重要な技術と考えられる。

### (3) 産官学連携による地域社会における分散・水循環システムの高率化推進

自立・分散型水処理システムにおいては、農業などの一次産業、製造業、電力産業などの二次産業など、複数の産業が連携して水やエネルギーを有効活用する。このため、産学が構築する新技術を実用化するためには、官も連携した取り組みが重要となり、たとえば、従来の上水や下水、農業用水の基準をそのまま適用するのではなく、新たな基準が必要となることも想定される。また、流域の河川・ダム、水資源の管理者と農業用水、上水、下水に携わる関係者が協力する必要があり、これらを推進するための省庁を横断した国としての役割は重要である。

### C. 実現時の社会的インパクト

自立・分散型の水循環システムにより、地方におけるコンパクトなスマートシティを実現し、インフラ老朽化による上下水道システム維持管理問題の解決や、災害に強い都市の構築に繋がる。また、エネルギー消費量の低減、廃棄物量の低減といった環境負荷低減が可能となると考えられる。さらに、有害物質の高効率選択的分離技術により、安心安全な水を必要な場所で供給することが可能となり、新たなビジネスに繋がる。また、これまで自然界中に排出していた、排水中の有価物の効率的再利用が可能となり、新たな産業創出に繋がる。

創出産業の規模は、2025年の世界の工業用水処理やその他（施設建設を含む）が約10兆円と予測されていることから、分離素材・システムとして、売り上げ、数千億円～1兆円、1万人規模の雇用が期待できる。



## 2-3-2. 効率的資源回収システム

### 2-3-2-1. 希薄資源の回収システム

#### A. 従来技術の課題

自然界中に存在する希薄資源は、これまで十分に有効利用されているとは言えない。これは効率的な分離回収技術が存在しないこと、また分離したとしてもその純度が低いこと、再利用するには更に精製が必要になるといった、コストが従来型資源よりも高く、経済性が成り立たないことが理由としてあげられる。しかしながら我が国は資源の多くを輸入に頼っており、近い将来予想される従来型資源の枯渇に対応するため、これまで使われてこなかった希薄資源の有効活用が、政治的リスク低減といった観点からも求められている。

#### B. 達成手段の概要

##### (1) 低濃度金属資源(レアメタル)含有排水からの生物機能を用いた高効率回収システムの開発

ある特定の微生物などはその生物機能により特定の金属を蓄積することが知られている。また、対象金属が極低濃度な環境においてもその機能により外部からのエネルギーを供給することなく蓄積が可能であることが特徴であり、イオン交換樹脂などの10~100倍蓄積できる例もある。(表1)しかしながら、金属を蓄積した微生物を、その機能を低下させることなく効率的に回収・分離する技術が確立されておらず、課題となっている。

これらの微生物機能を利用、さらに改質することと膜分離技術を組み合わせることにより、低エネルギー消費且つ高効率な金属回収システムを構築する。

微生物	回収対象金属
マンガン酸化菌	マンガン
金酸還元菌	金
鉄還元菌	白金族, 金
セレン酸還元菌	セレン
硫酸性温泉紅藻	ネオジム, ディスプロジウム, ランタン, 銅

表1. バイオミネラリゼーション・バイオソープションによる金属回収の例

(2) 革新的分離膜と低エネルギー消費・高効率吸着剤のハイブリッド化による希薄資源回収プロセス  
効率的な希薄資源の回収分離技術として、蒸留法等従来技術に比べて低エネルギー・低環境負荷システムの構築が可能な、革新的分離膜と低エネルギー消費・高効率吸着剤のハイブリッド化による希薄資源の回収プロセスが考えられる。分離素材の開発としては、各種材料を分子精密制御することにより、除去対象物質を特異的に除去可能な高選択性の獲得が可能になると考えられる。また、高効率分離素材の組み合わせや、取扱性が良くコンパクトな分離プロセスや、高効率に被吸着成分を脱着・再生する低エネルギー・低コスト吸着プロセスの開発が必要である。また、粘性の高い物質や、不純物の多い物質に対して有利な繊維状の吸着体などの開発も必要である。

資源回収の具体例としては、レアメタル・レアアース資源、ヨウ素、リン等があげられる。例えばリチ



ウムを例にとると、現在リチウムは鉱石や塩湖から回収分離、精製されているが、近い将来需要が供給を上回ることが予想されている。さらに、産出地が偏っており、政治リスクや輸送による環境負荷が大きい。これら課題に対応するため、海水等からのリチウムの回収が考えられるが、現状プロセスでは高コストであり実用化されていない。そこで、原子・分子レベルでの吸着現象シミュレーション技術の開発により、吸着速度を飛躍的に高めた吸着剤といった高効率な分離素材を開発し、現状プロセスのコストを半減することにより、希薄な状態で存在する資源を、低コスト、低エネルギー消費量で回収可能な新規プロセスの構築が必要となる。

### C. 実現時の社会的インパクト

資源の多くを輸入に頼る我が国にとって、希薄資源を海水や排水等から取り出すことができれば、政治リスクが低減され、資源消費国から資源産出国に変貌することができる。さらに、輸送等にかかる環境負荷の低減も見込まれる。また、資源の地産地消が可能となり、資源の循環再利用を各地方で行うことができる。さらに各地に存在する希薄資源の回収プロセスを構築することにより、各地に新たな産業を生み出すことができると考えられる。希薄資源の需要は今後拡大されると予測されるが、リチウムだけでも約1000億円の売り上げ規模であり、他の希薄資源も含めると大きな市場が期待できる。分離素材、システムとしては、売り上げ、数千億円、数千人規模の雇用が期待できる。

## 2-3-2-2. バイオマス資源の回収システム

### A. 従来技術の課題

非化石資源である非可食バイオマスの利活用の現状は、米国を中心としたバイオ燃料(エタノール)製造技術開発が中心であるが、将来的には、燃料だけでなく高付加価値な各種化学品、各種素材の製造技術の開発が求められている。このためには、非可食バイオマスのみに含まれるセルロース、ヘミセルロース、リグニンなどの生体高分子の特色を生かした各種素材への適用あるいは変換技術の開発が重要であり、そのためには、各成分の精密分離技術および他のバイオ技術と融合したシステム技術の開発が必要となっている。

### B. 達成手段の概要

非可食バイオマスからの各種化学品の製造実現に向けて、多くの化学品製造の共通の原料となる安価で高品質な非可食バイオマス由来の糖を製造し、この糖を原料として各種化学品を製造するシュガープラットフォームの確立が必要である。そのためには、膜分離技術により非可食バイオマスに由来する種々の不純物を分離除去し、糖を分離精製・回収する技術が求められる。また非可食バイオマス由来のセルロース、ヘミセルロース、リグニンなどからの素材製造を実現するためには、それぞれの成分を分離するための分離技術と成分変換技術を融合した非可食バイオマス分離精製・回収システム技術の開発が不可欠である。

こうした非可食バイオマスからの糖の分離・製造技術および非可食バイオマス分離精製システムの開発においては、対象とする非可食バイオマスに適合した技術を開発する必要がある。国内外で安

価かつ持続的に入手可能な原料と対象として、非可食バイオマスの糖への変換技術、および非可食バイオマス分離精製から素材に至るまでの一貫した技術開発を行い、大規模な実証試験を行なう必要がある。

#### ○必要な施策

- ・非可食バイオマスから糖を製造し、その糖を原料とした各種ケミカルへの変換技術(微生物、酵素ケミカル)と膜分離精製を融合したシュガープラットフォーム技術開発
- ・バイオマス由来成分の分離精製・回収技術(リグニン、セルロース、ヘミセルロース)と素材化技術開発
- ・バイオマス原料から各種ケミカル製造までの一貫製造システム技術実証

### C. 実現時の社会的インパクト

非可食バイオマス利用技術が開発され実用化されれば、我が国の石化資源の依存度低減に貢献できる。また我が国として強みある変換技術を開発することができれば、豊富なバイオマス資源を有する近隣アジア地域に対し、統合されたシステム・インフラ技術として輸出することで我が国の産業発展にも貢献することが期待される。非可食バイオマスの分離精製・回収システムのマーケットはバイオ燃料やバイオケミカルの原料となる糖を製造するシステムが当面の牽引役となるが、2025年におけるバイオ燃料とバイオケミカルの市場は、それぞれ、120兆円、24兆円と推定されている(Silicon Valley Bank, 2012年)。

### 2-3-3. 空気中の浮遊微細粒子の分離など、空気浄化に関する技術進化

#### A. 従来技術の課題

PM2.5を初めとして、更に微小な浮遊微細粒子(PM1.0等)も含めて今後社会問題となると予想されているが、それらの発生メカニズムや人体への影響などは十分に明らかになっていない。

また、微小な浮遊微細粒子、特に $0.3\mu\text{m}$ 以下の粒子は従来のフィルター等で捕えることは難しく、捕集効率と透過性との共存も課題となっている。更に、静電気捕集との組み合わせも行われてはいるが、その効果は限られている。

微小な浮遊微細粒子の発生源は高熱であることが多く、耐熱性の素材も求められている。

#### B. 達成手段の概要

空気浄化に関する技術としては、分離技術とセンシング技術に大別される。それらの技術進化の方向性としては、分離技術は、省エネ化、高効率化、長寿命化、技術の複合化、Passive型、高速化、大量処理の観点で、センシング技術については、低価格化、高感度化、小型化、オンサイト、ICT融合(即時、常時モニタリング)の観点が重要なポイントとなると考えられる。またそれらを組み合わせてパッケージ化した展開も必要となる。

浮遊微細粒子の分離技術としては、従来のフィルターを微細化するだけでは、透過性やコスト面から実用化が難しく、耐熱性素材のナノファイバーのフィルター開発や静電気捕集技術を長寿命化した

上でハイブリッド化する技術開発が必要となる。また、センシング技術としては、現在のパーティクルカウンタ等の高精度化やリアルタイム計測やシステム化が必要となる。

これらは各々の分野や用途で分散して技術開発を行うと非効率であるため、それらを横断しオールジャパンで取り組むことが重要である。

### C. 実現時の社会的インパクト

今後問題となりそうな微小な浮遊性微粒子に対し、問題が拡大する前に先手を打ち、それを計測・分離する技術を普及させることで、安心・安全を提供することができる。また、空気を一定の空間に閉じ込めた上で、汚染物質の計測技術と分離技術とをパッケージ化することで、安心・安全な空間を提供するビジネスとして、世界に先駆けて日本発の新しい産業を創出することができる。

※空気浄化に関しては、産業競争力懇談会2014年度「安心・安全の実現に向けた空気浄化技術」の研究会で検討しており、社会的課題と技術の鳥瞰図、および技術ロードマップの作成を行った。今後、具体的な提言を検討する予定である。

### ○民間での取り組みと政府への要望

これらを実現し、競争力のある新産業を創出するためには、例えば、個々の企業は個別の技術開発を行うが、協調領域の基礎的な研究開発は大学などの研究機関で、計測方法などの標準化や規制改革については、業界を横断し国も含めた取り組みが必要である。また、技術をパッケージ化し、インフラ事業として海外展開を行う場合には、国とも連携して取り組む必要がある。

## 3. 医療分野「高度分離技術による安全・安心な長寿社会の実現」

### 3-1. 背景

世界的に高齢化が進む中、今後期待される健康・長寿社会の実現を進めていくためには、①疾患を予防することによる健康維持増進、②疾患の早期診断・早期治療による迅速な社会復帰、③適切な治療法の提供による個の医療の実現を通じて健康寿命の延伸、QOLの向上を図ることが重要であり、治療、診断、予防における革新技術の創出が求められている。

生体においては、その恒常性の維持のために、老廃物の排出、生体膜を介した情報伝達、種々の物質の合成・分解、物質移動など複雑な機能を維持するための要素として、極めて精緻な分離機能が実現されている。

一方、人工膜や各種分離手法による分離技術が、われわれが快適な生活を送るために既に多くの分野において利用されている。これら実用化されている分離機能は主に分離対象物質の分子サイズや電荷に大きく依存しているが、生体膜がもつ精緻な機能を実現し、さらなる飛躍的な選択性や処理性能を得ることにより、医療分野における、治療、診断、予防への貢献が期待される。

### 3-2. 課題

#### 3-2-1. 医療分野において必要とされる分離機能について

医療分野において必要とされる分離機能を治療、診断、予防の観点からその要素を調査した(図7)。

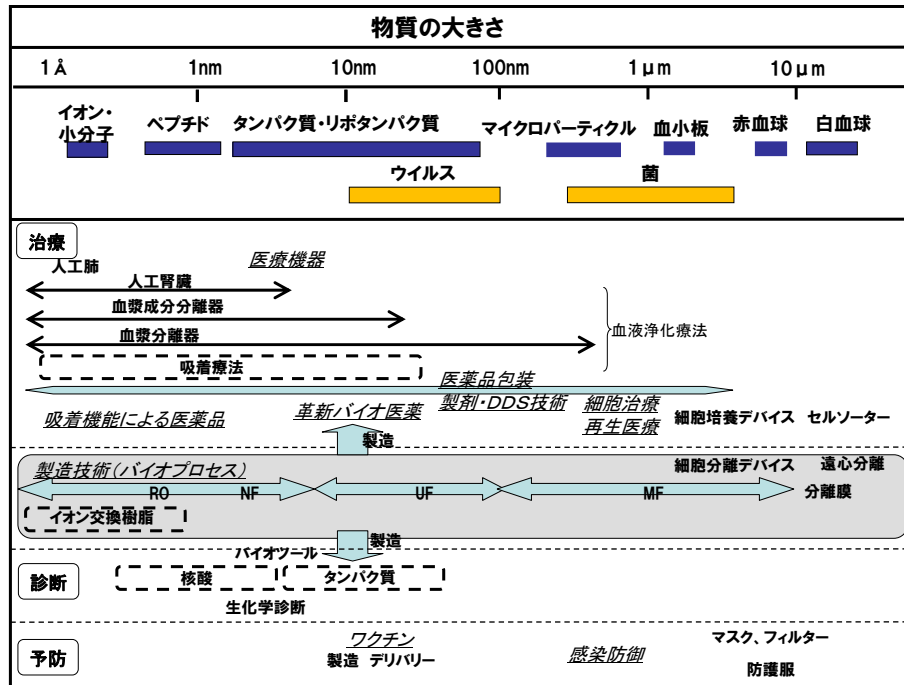


図7. 医療分野において活用される分離機能

「治療」、「診断」、「予防」における、分離機能の活用の現況とその課題を次項にまとめる。

#### 3-2-2. 「治療」

治療において必要とされる分離機能としては、分離機能そのものが治療として使用されるケースと分離機能が医薬品などの製造に使用されるケースがある。

##### (1) 医療機器

分離機能そのものが治療として使用されるケースとして、透析などを代表とする血液浄化療法がある。血液浄化とは、体液の是正、病因物質の除去を目的とする治療法で血液透析をはじめ、血漿交換、吸着療法などの体外循環治療であり、膜や吸着剤が分離・除去のための機能素材として使用される。

血液透析における今後の課題としては、透析膜の抗血栓性、生体適合性のさらなる追求や在宅透析をより簡便にする透析システムの開発が挙げられる。また、血液透析では、わが国は既に世界市場の1/4を占める一大市場となっている一方で、国内市場の伸びは限定的であるため、今後グローバル市場でイニシアチブを握るグローバル施策の企画・立案が課題としてあげられる。

また、『血液浄化療法(アフェレシス療法)』は体外循環によって血中から病気の原因となる液性因子(抗体、炎症性サイトカイン、有害代謝物質、中毒物質など)や細胞(リンパ球、顆粒球、ウイルスなど)を除去し、病態の改善を図る治療法であり、また二次的効果として免疫能の賦活や細胞機能の回復

(対外免疫調節・免疫修飾)が生じ、血液レオロジーや循環動態が改善する(日本アフェレシス学会ホームページ [http://www.apheresis-jp.org/modules/general/index.php?content\\_id=4](http://www.apheresis-jp.org/modules/general/index.php?content_id=4))。このように『血液浄化療法(アフェレシス療法)』は副作用の少ない療法でもあり、また薬物療法のみでは治療が困難な難治性疾患の治療において多大な貢献を果たしており、さらなる適応症の拡大や新しい治療法の創出につながる新吸着材料の開発が求められる。また、本年閣議決定された「健康・医療戦略」にも述べられている「医薬品と医療機器が融合した新たなコンビネーションプロダクトの研究開発」の推進が期待される。

## (2)細胞治療・再生医療

「健康・医療戦略」には「疾病の根治を目指す治療法の開発や、他に代替手段の無い重篤な疾患の治療方法の確立等に向けて、再生医療研究について、基礎から臨床まで一貫した支援を実施し、早期の実用化を目指す。」ことが述べられているが、「体外で加工または改変された自己由来、同種由来または異種由来の細胞を投与することによってヒトの疾病または損傷を予防、処置、治療ないし緩和する」(FDA の定義)細胞治療も含めて、細胞治療・再生医療については、今後益々の研究開発の推進が求められている。このような背景の中で本年11月には再生医療等の安全性の確保等に関する法律が施行されるに至り、実用化に向けた研究開発の加速が期待される。

この領域においては、細胞の特性を保持したまま目的とする細胞を分離する技術、とくに細胞治療・再生医療として治療に用いられる細胞の効率的な培養と分離の技術が現実的な治療コストの実現にも極めて重要であり、目的細胞に応じたきめ細かな分離技術の開発が課題となる。

## (3)吸着機能による医薬品

分離機能そのものが医薬品としても利用されている。イオン交換樹脂や活性炭で見られる機能を作用原理としたものであるが、代表例としては、高脂血症の治療における、コレステロールアミン、コレステリド等による胆汁酸の吸着除去、また、高カリウム血症における、陽イオン交換樹脂によるカリウム吸着での吸収抑制、腎不全における球状活性炭による尿毒素の吸着での尿毒症症状の改善等がある。これらの経口医薬は広く使用されているものの、服用感、服用量などの面からさらなる改良が求められており、吸着の選択性の向上や吸着能の向上がダイレクトに服用感、服用量の改善につながることから、優れた吸着機能を引き出す材料開発が課題である。

## (4)革新バイオ医薬製造技術

分離機能が製造に使用されるケースとしては、バイオ医薬品がある。バイオ医薬品(ペプチド、核酸、抗体等)は低分子医薬品よりターゲットへの特異性が高いことから効果が顕著であり、副作用も少ないことが期待されている。

一方で、製造技術などバイオ医薬品を支える周辺産業がほとんど日本になく、欧米の企業から技術やノウハウを導入している状態であり、わが国にバイオ医薬品製造に関する産業を産官学で一体となって構築していくことが必要である。

「健康・医療戦略」においても、「iPS 細胞等の幹細胞技術や、ICT 技術、合成生物学的手法による

新世代の生体分子技術等新しい技術を用いた抗体・核酸・ワクチン等の創薬・製造関連技術を開発し、「日本におけるバイオ医薬品製造能力の向上に向けた技術開発や周辺産業の充実、バイオ医薬品の研究開発に係る人材の育成」の必要性が取り上げられている。

このような製造技術において、分離精製技術は、安価で効率的な製造プロセス構築に鍵となる工程であり、クロマト分離において連続化を図る一方、水性二相分配、膜分離等の分離技術も検討していく必要がある。また、バイオ医薬品の製造プロセスでは、個々の要素技術を強化していくことに加え、プロセス全体を最適化していくことが重要である。

#### (5) 製剤・DDS(ドラッグ・デリバリー・システム)技術

前項の革新バイオ医薬を代表としたペプチド・タンパク医薬や核酸医薬では、注射でしか適応できない薬剤を経口、経皮、経粘膜などのルートで簡便に服用できるようにする技術が求められている。このような領域においては、例えば経皮剤では、例えばマイクロニードルなどの様に皮膚のバリア機能に対して物理的・化学的に薬物の透過促進を図る技術が必要である。また体内での薬物の安定性確保や特定部位での薬物の放出を担う選択的な薬物保持と放出を担う機能材料が求められている。また、治療の利便性向上や患者負担の軽減・QOLの向上に貢献する使用性の改善に対しても、ニーズを見据え、精密にデザインされた分離機能材料や放出制御材料の開発が課題である。

#### (6) 医薬品包装技術

医薬品包装に求められる材料としては、酸素や水分、そして光などのバリア機能のさらなる追求とともに、投与・服用の簡便さや正確さを補助するために、材料・デバイス技術双方からの技術開発が重要であり、分離機能の活用も期待される。

また、新規製剤用の包材としては、製剤の安全性を高める機能を有することが必要となっており、また、製剤投与のデバイスとしての機能を付加することも求められている。例えば、製剤の安全性向上として細菌やウイルスを高選択的に分離・除去・吸着する機能を包材が発揮することが挙げられる。

### 3-2-3. 「診断」

「健康寿命」の延伸を実現するために、発症予測／発症前診断により早期の治療介入を行う先制医療や、奏効率の高い治療を行う個別化医療が期待されている。先制医療や個別化医療では、病気の進展の度合いごとに患者個人の病状を把握するための疾患層別／個別診断や早期診断など、診断技術の革新が必要である。

このような診断技術の革新のためには、疾患の発症の指標となる診断マーカー(DNA、RNA、タンパク質など)の特定とともに、このような生体中に極微量に存在する疾患マーカーを高感度で検出する技術の開発が課題である。生体内微量成分の高感度検出のためには、検出の妨害成分を除去する生体成分前処理技術が分離・吸着の機能材料として求められている。

#### 3-2-4. 「予防」

近年の大災害や事故の多発、世界的な感染症の流行など、社会の安全・安心を脅かす危険や脅威が顕在化してきている。このような危険や脅威に対して、医療の観点から予防や感染防御の技術を発展させることが重要である。

予防的な観点からは、ワクチンの製造技術として、革新バイオ医薬で前述した技術や、効率的なデリバリー技術として粘膜を中心とした製剤・DDS技術が求められており、同様に革新的分離機能材料の創出が重要である。また、日常の感染症予防においては、空気や水の浄化が重要であり、空気浄化器、浄水器の高性能化、その部材であるフィルター、分離膜などの高性能化が益々求められている。

#### 3-3. 提言

以上の課題の中で、とくに分離機能材料の機能向上が発展をもたらす領域について、以下の提言を行う。

##### 3-3-1. 透析治療における在宅医療対応型デバイス

「在宅治療は、単に入院や頻回通院の解消策にとどまらず、患者のQOLを考えた場合、もっとも望ましい医療の姿といえる。特に血液透析治療は移植が成功しない限り終生続けねばならない治療であり、患者が医療施設で過ごす時間の累積は膨大なものとなる。在宅血液透析は、特に生命予後が良いとされる頻回または長時間透析を、医療施設の事情に左右されず、自分の生活スタイルに合わせて実施することができるという利点があり、患者のQOLを考えた場合、非常にメリットの大きい治療法といえる。」  
(（社）日本透析医学会 在宅血液透析管理マニュアル)

在宅医療については、本年閣議決定された「健康・医療戦略」(<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/kenkouiryuu/senryaku/index.htm>)にも述べられており、「在宅医療等に資する小型製品の研究開発」の推進が期待される。しかしながら、透析に必要な資材の運搬費や光熱費など患者自身の費用負担、介助者が必要、在宅医療実現への課題は多い。

本年2月には、物質・材料機構の研究者が「災害時に人工透析代替を目指す高性能ファイバーの開発慢性腎不全の応急処置のための携帯型“透析”システムへ道」として吸着による透析液不要の小型透析システムを発表した。(<http://www.nims.go.jp/news/press/2014/02/p201402190.html>)

しかしながら、透析治療にて除去が期待される成分のうちの成分であるクレアチニンの除去機能を有するにとどまり、このため、応急処置のみの限定使用が想定される。

したがって、今後、透析治療同等の除去機能を有するデバイスで、費用および保管スペースを要する透析液の不要な吸着機能による在宅透析用小型システムの実用化が在宅透析の抱える課題をとりのぞくソリューションとして必須であると認識され、その実用化の推進を提言する。

さらに、在宅透析において、透析時の低血圧や筋痙攣、抜針事故への対処は重要な課題であり、患者に低侵襲型のモニタリング機器を装着して、患者の変化を常時モニタリングすることでより安全かつ介護者の負担を軽減した在宅透析が可能となる。したがって、このような、在宅透析の患者を対象とした低侵襲型のモニタリング機器開発の推進についても合わせて提言する。

また、長期的な視点では、iPS細胞からの腎再生技術について、アカデミアでは徐々に基礎的技術の親展が報告されており、腎再生に関する基礎研究への継続的な支援、産業化推進も重要である。

## ○民間での取り組みと政府への要望

本領域での治療デバイス開発においては、材料開発、デバイス化、システム化の技術に加え、医工学、医学など様々な領域の連携を必要とし、このため、産業界としては、さまざまな企業間連携による技術の融合やアカデミア、臨床機関との連携で臨床ニーズを発掘し、開発を推進する必要がある。また、それに加えて、行政面での下記のような推進策が求められる。

## ○必要な施策

- ① 高機能デバイスに対する、薬事行政面でのインセンティブの付与。  
(研究開発、治験、承認申請、償還価格など川上から川下までの一貫した推進施策)
- ②在宅医療推進のため、地域包括ケア体制の整備と在宅透析を支援する医療体制の整備
- ③血液透析における在宅医療システム創出のための研究開発推進(本領域での医工連携の推進など)

## ○実現時の社会的インパクト

わが国の透析人口は約30万人であり、週 3 回の血液透析のために施設に通院することは患者負担も大きく、また活動性のある患者の労働力を減少させている。このような課題に対し、透析液の不要な吸着機能による在宅透析用小型システムの実用化は、在宅透析の普及に寄与することが明確であり、患者の精神的負担の軽減や、生活の質の向上につながる。また、現在の国内透析医療費は1.3兆円に上るが、約10%が在宅透析機器を使用することになるだけでも、約1500億円の新たな市場が創出されることになる。また、在宅透析に対応した低侵襲型のモニタリング機器が開発されることで、在宅透析の普及がさらに加速され、新たな機器の市場の創出とともに在宅透析市場の拡大が図られる。

### 3-3-2. 細胞治療・再生治療における細胞製造のための分離技術

細胞治療・再生治療の実用化は、日本が世界をリードして寄与していくべき領域である。実用化として必要な要素としては、臨床での治療法の探索・開発とともに治療に使用するiPS細胞や幹細胞由来の特定細胞の大量生産技術の確立が不可欠である。現在、産業界としては、「一般社団法人再生医療イノベーションフォーラム(FIRM)」を設立し、産業界が主体となって広範な産官学民の関係者やメディアとの意見交換を行い、産業化のプロセスと新たな再生医療社会へのコンセンサス形成に向けて、具体的な再生医療実現の道筋を示すための活動を行っている。4) <http://firm.or.jp/>

再生医療の実用化に向けて重要な課題の一つである治療コスト低減の観点では、とくに、治療に用いる細胞や組織の製造において、細胞培養の効率化(分化・誘導の効率化、大量自動培養システム)と細胞の分離・精製の効率化が最重要の課題である。このような課題に対しては、膜分離技術の活用で、連続的で効率的な細胞培養システムの構築や従来の遠心分離技術に代わる効率的な分離・濃縮システムの開発が重要である。また、iPS細胞や幹細胞由来の特定細胞を純度良く取得する技術が細胞治療・再生医療の安全性確保を担保する技術となる。このような観点からは、セルソーター技術のさらなる開発推進に加え、抗体を固定化した分離機能材料など新たな視点での材料・システム開発が必要である。こ



のように、細胞治療・再生治療における細胞製造のための分離技術における革新技術創出に向けては、治療目的ごとの、医工連携での研究開発推進が必要であり、その実用化推進を提言する。

#### ○必要な施策

- ①革新的細胞分離技術創出のための研究開発推進
- ②臨床機関、バイオプロセス関連企業と部材メーカーの連携推進(目標共有化)。(オールジャパンを結集した推進)
- ③細胞培養、分離精製プロセス構築・管理のためのレギュレーションの明確化。

#### ○実現時の社会的インパクト

再生医療の周辺産業の市場規模(国内)は、2020年950億円、2030年5500億円と推計されており、その半分を細胞培養装置などの装置や消耗品が占めている(再生医療の実用化・産業に関する報告書 最終取りまとめ 再生医療の実用化・産業に関する研究会 平成25年2月)。しかしながら、このようなバイオプロセスにおける装置・消耗品類はこれまで輸入品が圧倒的な優位にあった。このため、細胞治療・再生医療の安全性の確保とコスト削減のための最重要の課題である細胞培養の効率化(分化・誘導の効率化、大量自動培養システム)と細胞の分離・精製の効率化に寄与する分離素材・分離システムの開発や効率的なプロセスのわが国での実用化は、iPS細胞技術を中心とした再生医療におけるわが国の先進性を、バイオプロセスにおける装置・消耗品類の海外に対する優位性にも広げることになるとともに、我が国の再生医療の国際競争力を確保する上で、キー技術のひとつになるものとしてきわめて重要である。

#### 3-3-3. 経皮吸収型製剤および経皮ワクチンのための機能材料技術

経皮吸収型製剤とは、薬物を含有した貼付剤から経皮的に吸収させて、肝臓での初回通過効果を受けずに長時間にわたり安定した薬物濃度を維持できる DDS 製剤である。経口投与が困難な患者にも使用可能、薬物の除去は皮膚から貼付剤を剥がすことにより容易に行えるなど、安全性と利便性を兼ね備えている。狭心症に用いるニトログリセリンや硝酸イソソルビド、更年期障害に用いるエストラジオール、また、癌性疼痛時に用いるフェンタニル製剤などがあげられる。しかし、薬物の皮膚透過速度を一定に保つことが困難な場合が多く、現在のところ適用できる薬物が限られている。

経皮吸収型製剤の構造は、マトリックスタイプとリザーバータイプに分類できる。マトリックスタイプは支持体、薬物を含む粘着層、貼付時に剥がすライナーからなるシンプルな構造をしている。リザーバータイプは薬物放出制御膜により薬物の供給がコントロールされておりマトリックスタイプよりも血中濃度の長時間一定化について優れているが、薬物成分の種類によっては十分とは言えない場合がある。

従って、リザーバータイプの放出制御膜として薬物成分に適応した選択的な薬物保持・放出を高度制御できる高機能素材を開発・応用できれば、薬物の血中濃度を長時間にわたり高精度に一定化することができ、これまで適用できなかった広範囲の薬物を、治療効果向上や患者負担軽減に優れた経皮吸収型製剤へ適用することができるようになる。このため、経皮吸収型製剤放出制御膜の高機能化の推進を提言する。

また、皮膚からの薬物投与という観点では、新興・再興感染症への対策は喫緊の国家的課題であり、とくに注射針不要で使用法が簡便で医療技術者が不要、非侵襲的、室温保存が可能で輸送・保管が低コストなどの特徴を有する経皮ワクチンの広範な感染症への適用が求められている。本技術は、開発途上国を中心に全世界に貢献する技術である。このためには、経皮ワクチン特有の有効性向上技術として、皮膚最外層にあるバリアである角質層の透過促進技術、および効果的な抗原特異的免疫応答を誘導する技術の進化が求められる。

経皮ワクチンは、従来型の製薬企業だけではなしえない、高機能材料技術の寄与が大きい技術であるため、効果的な作用を発現する経皮ワクチンの実用化に向け、とくに機能材料による経皮デリバリー技術(透過促進)と経皮での効果的なアジュバント技術(免疫応答誘導)の実用化推進を提言する。

#### ○必要な施策

革新的経皮ワクチン技術開発においては、ワクチン開発と経皮デバイス開発、アジュバント開発、それぞれの技術開発において、基礎科学(アカデミア)、ものづくり(産業界ー製薬・材料・デバイス)、臨床(臨床機関)の密接なコミュニケーションを前提とした技術開発・製品開発の体制を産業界として整備することが重要である。また、ワクチン開発と経皮デバイス開発、アジュバント開発がトータルに密接な連携をとり、ターゲットを定めた研究開発の推進が必要である。このため、行政面での下記のような推進策が求められる。

- ① 予防医療へのインセンティブを高める制度の検討、予防医療等に係る研究開発への人的・資金的リソース配分の拡大
- ② ワクチン開発、経皮デバイス開発、アジュバント開発 それぞれの研究開発の推進を図るとともにトータルをコーディネートする研究開発の体制構築の推進

#### ○実現時の社会的インパクト

皮膚の免疫機能を利用する経皮ワクチンは、注射によるワクチン投与にくらべて非侵襲的で安全性が高く、その輸送や保管が簡単である。このため、経皮デリバリー技術(透過促進)と経皮での効果的なアジュバント技術(免疫応答誘導)の実用化は、経皮ワクチンの広範な感染症への適用、そしてガン抗原に対して効果的な細胞性免疫の誘導を図ることでガンの効果的な免疫治療法の提供にもつながる。

### 4. 情報・通信分野「革新高機能分離・隔離素材による産業競争力の向上」

#### 4-1. 背景

日本産業の中でも、情報・通信産業は市場規模が2011年で82.7兆円と、日本の基幹産業であり全産業中最大規模の産業である。情報・通信分野の多くの技術は社会基盤性と生産性改善能力を有し、将来に向けても引き続き高度情報通信ネットワーク社会の実現に向けて、日本の国際的な産業競争力の強化に結び付く情報・通信分野の科学技術への投資促進が期待できる。しかし一方で、厳しい国際競争の中で、優秀な技術を産業競争力に有効に結び付けられず、苦闘している企業も多いのが実情である。

情報・通信産業の中でも、その産業を支える半導体等電子デバイス、特にその製造段階で重要な役割を担っている高機能素材に関して、日本企業は大きなシェアを占有してきた。高機能な素材を開発するにあたって、日本企業は研究開発を競争力の源泉とし、自社の強みとする技術をさらに発展させ、顧客とすり合わせてきた結果として、高い国際競争力を維持してきた。ただし、今後世界市場が拡大する中で、こうした高機能素材開発においても、海外の顧客によるグループ内企業からの調達の進展等により海外の部材メーカーが市場参入してきたこと、成長性が期待できる市場に多くの内外の企業が参入し参入過多による供給力過剰の状況が生じていること、などの理由から、素材市場においても日本企業のシェアが縮小する傾向が見られるようになっており、今後引き続き日本企業の高機能素材技術を国際的な産業競争力に結び付けるためにも、さらに日本の独自の技術に磨きをかけつつ、日本の科学技術政策を国際的な産業競争力強化に結び付けるため産学官一体となった共通基盤技術開発が重要となる。非常に幅広い情報・通信産業の中でも、ここでは「外部環境からの隔離」および「内部環境からの分離」の視点から日本の高い技術力が生かせる素材開発について提言する。また、同様なコンセプトで、来るべき水素社会に対する、「分離機能」を有する新機能素材の持つ可能性についても言及する。

#### 4-2. 課題

##### 4-2-1. フレキシブルバリア素材

情報・通信デバイスは、今後もモバイル用途の大きな伸びが期待され、軽量かつ曲げられるあるいは折り畳めるフレキシブルディスプレイが求められている。フレキシブル化により、衣服のポケット等に入れやすい等の持ち運びの利便性の向上、腕時計のように腕に巻く、あるいは衣服に貼り付ける等のいわゆるウェアラブルディスプレイとしての応用、曲面を持つ機器のケースにも貼り付けられるので機器のデザイン性の向上等の利点がある。また、設置型のディスプレイも超大型(100インチ以上)は、移動設置の点、あるいは、使用しない時はロール状に巻き取ることで設置スペースを有効利用可能となる点からフレキシブル化が必要となっている。ディスプレイでは、製造は中国、韓国、台湾企業が競争力を持っているが、材料は日本が優位性を保っており、フレキシブル化に必要な先進部材・素材を日本が握ることで、日本企業の競争力を強化させることができる。

モバイル用ディスプレイの代表的なものとして、液晶ディスプレイ(LCD)と有機ELディスプレイ(OLED)がある(図8)。LCDは構造が複雑でかつ、折れ曲げ時の応力により位相差が発生し、画像のずれやにじみが生じ易いためフレキシブル化の難易度が高い。これに対して、OLEDは部材数も少なく、位相差も生じないためフレキシブル化に適している。

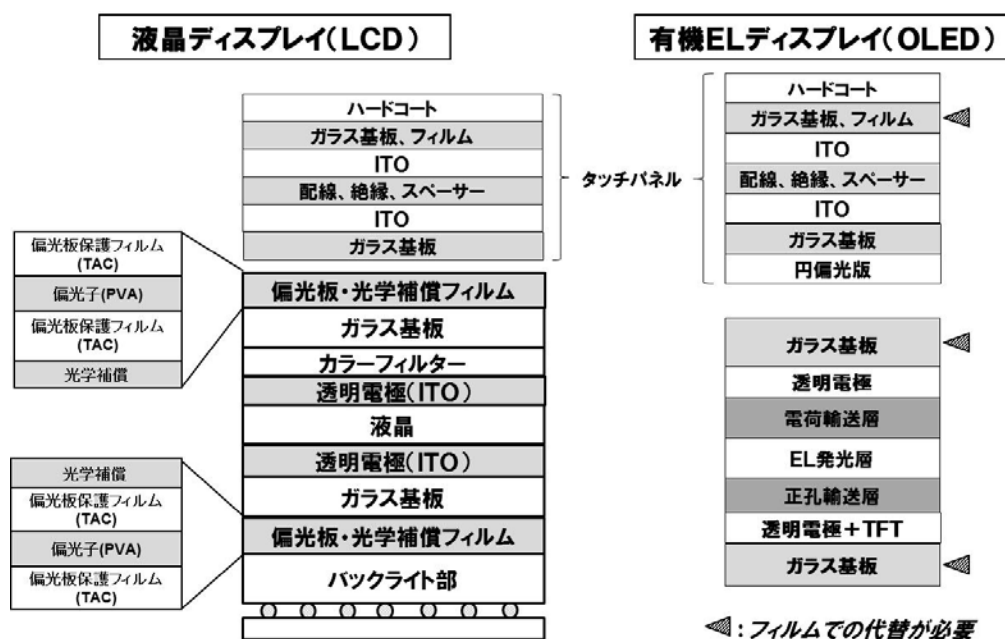


図8. ディスプレイの構造

OLED のフレキシブル化において、特に難度が高い部材は、基板やカバーに用いるガラス代替フィルムの開発であり、要求特性をまとめた(表2)。加工時に必要な耐熱性や寸法安定性の他に、フレキシブルディスプレイに必須の特性として以下の特性があり、現在全ての要求特性を充たすフィルムは存在しない。

- ・ガスバリア: 有機発光体素子、有機半導体素子を劣化させる水分の遮断

目標: 水蒸気透過率  $10^{-6} \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$  以下

- ・表面硬度: ディスプレイの傷からの遮断

目標: 鉛筆硬度7H以上

そこで、高耐熱性で熱膨張係数の小さい耐熱ポリマー(芳香族ポリアミドや芳香族ポリイミド等)からポリマーを選択し、無色透明フィルムを成形する技術を確認することで、ガラスを代替できる信頼性を持ち、かつフレキシブル性を発現するフィルムを開発する。高耐熱ポリマーの多くは、芳香族系ポリマーであるため着色しており、耐熱性を維持した状態で無色透明化することは難しい。官能基を芳香環へ導入しポリマーの立体構造を制御する等の新規ポリマー設計指針を確立し、解決する。ガスバリア、表面硬度等の機能付与には、フィルム単体での対応は限界があり、コーティング層を設けることで改良する。コーティングメーカーは、多層積層技術や有機／無機ハイブリッド技術を活用し改良を行い、フィルムメーカーは、コート層に適した表面設計で協力する。ガスバリア、表面硬度共にコート層の厚膜化により大きな効果が得られるが、耐屈曲性が低下することから、薄膜で達成する技術の開発が必須である。

	構成部材	機能	フィルムへの要求特性
タッチパネル	<div>カバーフィルム</div> <div>タッチセンサー</div> <div>円偏光板</div>	→パネル保護	[高表面硬度:9H]、耐屈曲性、[反射防止]
表示パネル	<div>基材フィルム</div> <div>透明電極</div> <div>EL発光層</div>	→基板	[ガスバリア性]、低熱膨張係数、耐屈曲性、無色透明性、 [反射防止]、[高表面硬度]、[耐薬品性]
	<div>透明電極+TFT</div> <div>基材フィルム</div>	→基板	[ガスバリア性]、低熱膨張係数、耐熱性、耐屈曲性、 [耐薬品性]

[ ]:コーティング技術の活用が必要

表2. OLED 用部材と要求性能

ディスプレイやタッチパネルへの加工は、パネルメーカー、半導体メーカーあるいはディスプレイメーカー等の最終製品メーカーにて行い、実用価値の実証及び顧客の使用テストにより顧客ニーズを素材にフィードバックする。

#### 4-2-2. 半導体用の熱分離素材

日本の半導体製造業の大きな衰退とは別に、半導体関連材料分野では日本企業は依然大きな勢力を保っており、特に先端素材分野では、非常に高い競争力を維持している。2013年の半導体材料市場規模は400億ドル以上という巨大市場である(図9)。この市場での存在を維持拡大して行くことは我が国の産業にとって非常に重要である。半導体製造が海外が主となる中での材料の技術力の維持、強化、進化のためには、具体的な材料の要求特性の抽出、設定ができる環境を保持することが必要で、そのためには規模は小さくとも先端の半導体製造技術開発力を維持していくことが重要であると考えられる。

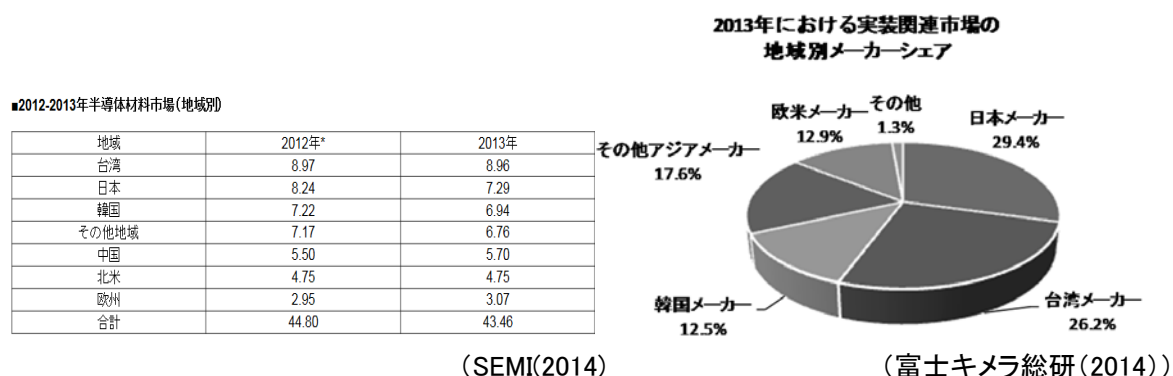


図9. 半導体材料市場

これまで約30年に渡り、ムーアの法則に沿うようにトランジスタの高集積化を担ってきた半導体の微細化ペースの鈍化がここ5年程で顕著になってきている(図10)。2次元の高集積化ペースの鈍化を補ってシステムパフォーマンス向上を維持していく手段としてTSV(シリコン貫通ビア)を用いて半導体チップを3

次元に積層する構造を導入することが期待され、活発に研究開発され、製品化予告の発表が行われている。

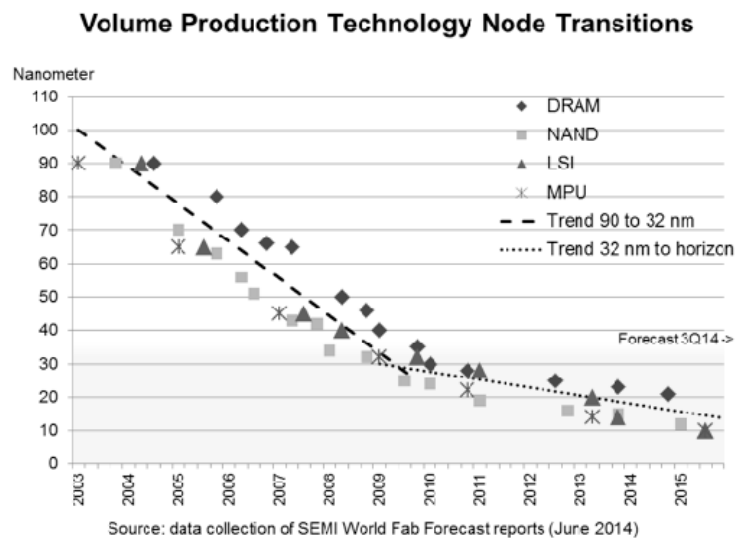


図10. 半導体の微細化

微細化による高集積化の場合は、動作電圧を下げることを並行して進めることで、性能対比での低消費電力化が進められてきている。しかしながら、3次元積層の場合は、トランジスタの微細化は進まない。一方で、3次元的に集積度が上がるために、2次元的には積層分相当の電力密度の増大が起こる。3次元積層を行っていない現行のロジックのハイエンドプロセッサにおいても発熱は大きく、放熱のため巨大な空冷ファン、水冷システム等ヒートシンクの設置が対策として施されている。3次元積層では、半導体チップが複数積層されるため、下側のチップからの放熱はその上部に積層されたチップを介し、最終的には最上部のチップまでを介して行う必要がある。このためチップ間の高い熱伝導性が必要となる。半導体チップ間は、接続される半導体チップに設けられた電極とパッドの導電接続で信号伝送が行われる。この導電接続も熱伝導パスとして機能させることは可能であるが、チップの全面積に占めるこれらの面積割合は決して大きくなく、これら以外の絶縁領域も熱伝導を担うエリアとして活用することが重要である。

3次元積層の主要な課題として実装コストがある。半導体プロセスは一般にトランジスタ形成から始まるウェハ製造工程と、それを個片化して基板に電氣的に接続、実装する後工程に分けて捉えられる。ウェハサイズとその中に形成されるチップサイズに依存するが、1ウェハ上には数百から千を超えるチップが形成されており、前工程ではこれらの数のチップが1枚のウェハとして一括で形成されていく。しかしながら、半導体チップを基板に実装する後工程においては、個片に切り出されたチップが基本的には個別に1個1個処理される。このため、3次元積層時のチップ実装をチップ1個1個行う場合は、1パッケージについてその積層チップ数分の実装回数が必要となる。これに対し、従来の2次元の微細化による高集積化の場合には、微細化による実装の難易度が上がることがあってもチップ実装回数は1回であり、この点での極端なコストアップは起きにくい。したがって、従来のコンシューマーレベルでの普及を伴う半導体システムの高性能化ペースと市場拡大を維持し、社会の効率、利便性の向上を持続していくためには、

微細化の延長に近いレベルでの実装コストで3次元積層を可能とする実装工法と材料の開発が非常に重要であり、今後の半導体製造の競争の舞台の一つとなると推定される。したがって我が国がこの分野での先駆的開発に成功することより圧倒的な地位を確立できるものとする。

前記のように、3次元積層による発熱に対して応えられる従来にない高い放熱性の各種パッケージング材料の開発はもとより、この高い放熱性を有した上で、実装コスト課題に応える積層実装工法を実現する材料の開発が極めて重要である。3次元積層の低コスト化は、複数個のチップを一括で実装することが解となる。このような工法としては、ウェハ状態で積層するという方向とチップ単位で積層するものの位置合わせまでの仮置きをしておき、複数をまとめて一括で接続するという方向の2つがある。3次元積層のメリットを生かすために、接続端子、ピッチが従来になく数 $\mu\text{m}$ ～数十 $\mu\text{m}$ と微細であること、チップが50 $\mu\text{m}$ 以下と薄いこと等から、1チップ単位の実装でも現在実用化されている生産技術の範囲では難易度は高く、一括実装においては、より一層の高難易度となる。難易度が高いが実現時のインパクトは大きく、デファクト的な広がり期待できる前記の一括3次元積層の実現に向けた工法を伴った材料開発を我が国として積極的に推進していくことを提案する。この材料は、絶縁性と熱伝導性を合わせ持つもので、熱伝導と電気伝導を分離する材料となり、それ以外にも耐熱性、機械物性、加工性等多くの物性が求められるものとなる。

半導体を基本に据えるシステムが行う情報の伝達・処理と熱との関係を以下にまとめる。情報の伝達、処理は、基本的には電子、イオン、原子、分子、光子等の動きに基づいて行われている。超伝導体中の電子移動のようにエネルギー損失を伴わない現象も存在するが、殆どの場合はエネルギー損失が生じる。超伝導体状態以外では電子の移動によりフォノンとの衝突により、熱損失が生じる。光による情報伝送は大陸間光ファイバー網などで利用されている通り、かなりの低損失が実現されているが、光コンピューティングが実現されていない現状では、電子を媒体に用いる情報処理、光電変換が存在し、光子移動のみでのシステムが成り立たずシステムとして見た場合には電子移動による損失からは逃れられていない。つまり電子の移動に大きく依存している情報通信の現状においては、発熱は不可避であり、情報の処理、伝達における熱マネジメントは、地球規模の課題である。

より細部を見ると、現在のコンピュータがノイマン型であり、スイッチング機能が必要であるので、この点に関し、微細化能を併せ持つものとしての半導体は材料として今後も当面は主流であると考えられる。また伝送媒体としては、臨界温度が室温を超えない超伝導物質の現状からして、当面は銅などの常伝導金属が用いられるであろうと考えられる。半導体中も常伝導金属中も電子移動はフォノンとの衝突による熱エネルギー損失が発生する。

上記のことから情報通信分野での高密度化は、定性的には高発熱を伴うため、同分野の発展には、熱マネジメントが極めて重要になる。情報通信分野の高密度化は、各機能部位の小型化と等しく、電子移動の領域を空間的に小さく狭く限定する行為に等しい。つまり、構造体としては電子移動性の物質と絶縁物質が3次的に微細に形状設計、製造されたものとなる。電子は熱キャリアでもあるので、導電性物質は熱伝導性物質でもある。しかしながら、上記のように情報通信デバイスとして機能するためには、絶縁物質を介した分離を行わないと機能を発現できないため、全体の熱マネジメントには熱を良く通し、電子を全く通さないという分離機能を有する絶縁物質が材料としては非常に重要である。

#### 4-2-3. 水素技術関連素材

今後期待される水素社会の到来に向けて、水素の製造から貯蔵・輸送および燃料電池などの水素利用デバイスの効率化・低コスト化は重要な課題であり、その実現に向けた技術的な課題としては、水素製造時の効率化、水素の貯蔵・運搬の効率化と安全性確保、および利用のための燃料電池の効率化など、多岐にわたる技術開発が必要である。

個々の技術課題については、2008年度COCN報告書「燃料電池自動車・水素供給インフラ整備普及プロジェクト～低炭素社会を目指して～」をはじめ、様々なレポートなどに詳細な記載があるため、本プロジェクトでは、「分離」の機能を適応することで技術課題を克服できる可能性について検討した。

#### 4-3. 提言

##### 4-3-1. 高性能フレキシブルバリア技術

###### (a) 提言

フレキシブルディスプレイは、最終製品に加工するまでに、素材メーカー、パネルメーカー、半導体メーカー、ディスプレイメーカー等複数のメーカーが関与する。実用価値の実証及び顧客の使用テストにより顧客ニーズを素材にフィードバックするには、これらのメーカーが相互に連携することが必要不可欠である。各素材の開発や測定技術の確立は企業及び大学が担当するが、特に大学には新規革新技術の創出に注力して頂きたい。また、共同研究開発体制の構築及びフレキシブルディスプレイの普及に必要な法整備に関して国の支援をお願いしたい。なお、既存の国家PJとの関係は以下の通りであり、補完関係にある。

- ・経産省(NEDO)「革新的低消費電力型インタラクティブシートディスプレイ技術開発」

中小型ディスプレイのための軽量薄型化・消費電力化等の付加価値向上と低コスト化の技術開発。

- ・経産省「山形大学有機薄膜デバイスコンソーシアム」

有機EL、有機太陽電池、有機TFT等の有機エレクトロニクスデバイスに適用できるフレキシブル基板の開発に向けた、従来の透明電極であるITOに替わる透明電極の開発及びロール to ロール生産要素技術の開発。

- ・経産省(NEDO)「次世代プリントエレクトロニクス材料・プロセス基盤技術開発」

プラスチックフィルム基板上に大面積、低欠陥で均一、信頼性の高いTFTアレイを形成するための、低温プロセス、材料(半導体、絶縁体、導体)及び高精度・高速で位置合わせ可能な連続印刷プロセス・装置の開発。標準的な製造ライン印刷技術によるTFTアレイ製造実証。

###### (b) 実現時の社会的インパクト

フレキシブルディスプレイの創出により、折り曲げや巻き取りによって持ち運びの利便性が向上するだけでなく、これまで携帯できなかった大型のディスプレイを屋外でも視聴可能となり、インターネットの情報や映像配信を、いつでも必要な時に利用することが可能となる。また、屋内でも、必要な時だけ引き出して使える直視型大画面ディスプレイの実現が可能となる。

フレキシブルディスプレイは2020年に約2兆円の市場規模があり、フレキシブル化に必要な高機能素材を日本が独占することで、国際的な産業競争力を強化し、新規雇用を創出する。



#### 4-3-2. 半導体用の熱分離素材と実装

##### (a) 提言

4-2-2で述べたように、日本の半導体産業に依然高い競争力を有している材料分野、また同様な状況にある製造装置分野を今後も世界の中で維持、伸張していくためには、難易度は高いが必要性が今後益々高まる熱分離素材とそれを用いた3次元実装などの工法、装置の一体開発を国家プロジェクトとして支援を要請したい。半導体製造の中で後工程とよばれる半導体実装分野は、前工程と呼ばれるウェハ製造分野のような世界大手数社が牛耳っているのとは異なり、工法や材料が多岐に渡ることから特化、専門化した中小の企業により担われている部分も多い。これらのベクトルを揃えオールジャパンの力を結集するためには、国家支援および中立な立場の拠点を中心とする枠組みの整備が重要である。工法開発のためには、各種の装置が必要となるため、実装分野のあらゆる最先端の装置が揃うセンターを設置し、メインストリームで基本となる革新的な工法の技術開発プロジェクトを設定するだけでなく、各材料、装置などの各種関連企業が自社の開発のためにも利用できる制度を設定し、開かれた吸引力のあるものとすることを提案したい。

また、半導体実装は、半導体を実用に供するための技術でありビジネスに直結するものである。さらにはコストが最も重要な性能のひとつでもあるので、全体的な構造、プロセスの設計や開発は産業界が主となり行うものとする。一方で、これをささえるベース部分は、我が国の産業競争力の源泉となるもので、各部分の要素技術、熱、構造の詳細なシミュレーション等はサイエンティフィックな追及が必要でもありアカデミック界からの強力な支援を期待する。

##### (b) 実現時の社会的インパクト

人類の生活の利便性や効率の向上に対し、情報通信分野の製品は継続的な技術開発により大きく貢献してきた。本提案の技術開発では、情報通信技術進歩のベースを担ってきた半導体製品の高密度化のペースダウン、ストップの回復を図る3次元半導体の普及への貢献が期待できる。これらは、今後のIoT普及とビッグデータ解析技術の向上によるフルインテリジェントな社会、これに相乗効果と自動車の自動運転の実用化、本格普及、さらにはこれらによる社会の安全安心化の推進、暮らしやすい高齢化社会の実現を力強く後押ししていくと考える。

経済的効果としては、2011年で82.7兆円と日本産業の中でも最大規模の産業である情報・通信分野において、利便性を向上させ、かつ省エネルギー、環境負荷低減につながる日本独自の高機能素材の開発を行うことで、日本の国際的な産業競争力を強化し、新規雇用を創出する。

#### 4-3-3. 水素技術関連素材

##### (a) 提言

水素利用全般において、その効率化および安全性の向上を実現するためには、従来よりも漏出水素の割合を飛躍的に低減した「高性能水素ガスバリア素材」の開発が必要である。また、水素分離型改質器の拡大に向けては、「高性能水素分離膜」の開発が重要である。さらに、将来の再生可能エネルギーの循環利用を見越した、水素製造における水電解法の拡大においては、「高イオン伝導性と超低ガス透過性を両立する電解質膜」の開発が重要となり、イオンや分子を効率的に分離する素材の開発が期待されている。これらの素材の開発においては、「分離原理の解明・深化」による気体・液体水素の膜透過

性の原理解明を通した新素材の研究・開発に期待する部分大きい。また、水素のサプライチェーン・メーカー相互連携体制の構築や水素の取扱いに関する規制緩和は重要であり、従来からも進められているがこの点での国の支援に期待するところは大きい。

#### (b) 実現時の社会的インパクト

「水素技術関連素材」の実用化により、今後燃料電池自動車用途を中心に需要が見込まれる水素の製造・貯蔵・輸送・利用において、その効率を飛躍的に向上させることにより、水素製造コストの低減が期待できることから、水素社会を進めて行く上で鍵となる技術である。なお、水素社会全体の市場規模は、2050年に、周辺インフラを含めると、世界で160兆円であり、その時点での水素の需要は7.5兆 $m^3$ であり、販売金額ベースではおよそ240兆円となる(日経BP電子版 2013/10/30)。

### 5. テーマ横断的分野「選択的高効率分離素材創出のための計測・シミュレーション技術の研究・開発」

#### 5-1. 先端計測・シミュレーション手法の現状

分離素材の開発では、計測・計算によって機能性を発現する機構を明らかにし、得られた知見を材料生産現場・合成技法開発にフィードバックし活かすことが重要である。特に、より高度な分離機能を発現する素材を開発し、一層の国際競争力強化・イノベーション加速を実現するためには、従来の計測・計算法のみならず、分離現象解明のための先端的な手法を開発・高度化し、これらを複合的に利用することが重要である。本プロジェクトが対象とする分野は、医療・環境・情報通信と多岐に亘り、それ故取り扱う分離素材も様々である。そこで、先ず分離素材に関連して現在利用可能な、あるいは近い将来利用可能になると期待される先端計測法およびシミュレーション手法の状況・仕様について概略を調べ、また実際にどのような研究課題に対して有効かを検討した。

図11に、対象分野と分離物質のサイズでマトリックスの形式にまとめた先端計測・シミュレーション手法の俯瞰図を示す。この中には、陽電子消滅分光(PAS)等の我が国が世界をリードしている先端分析手法、あるいは「京」戦略拠点で開発された超並列計算ソフトを用いた世界最先端の各種シミュレーション手法が含まれる。

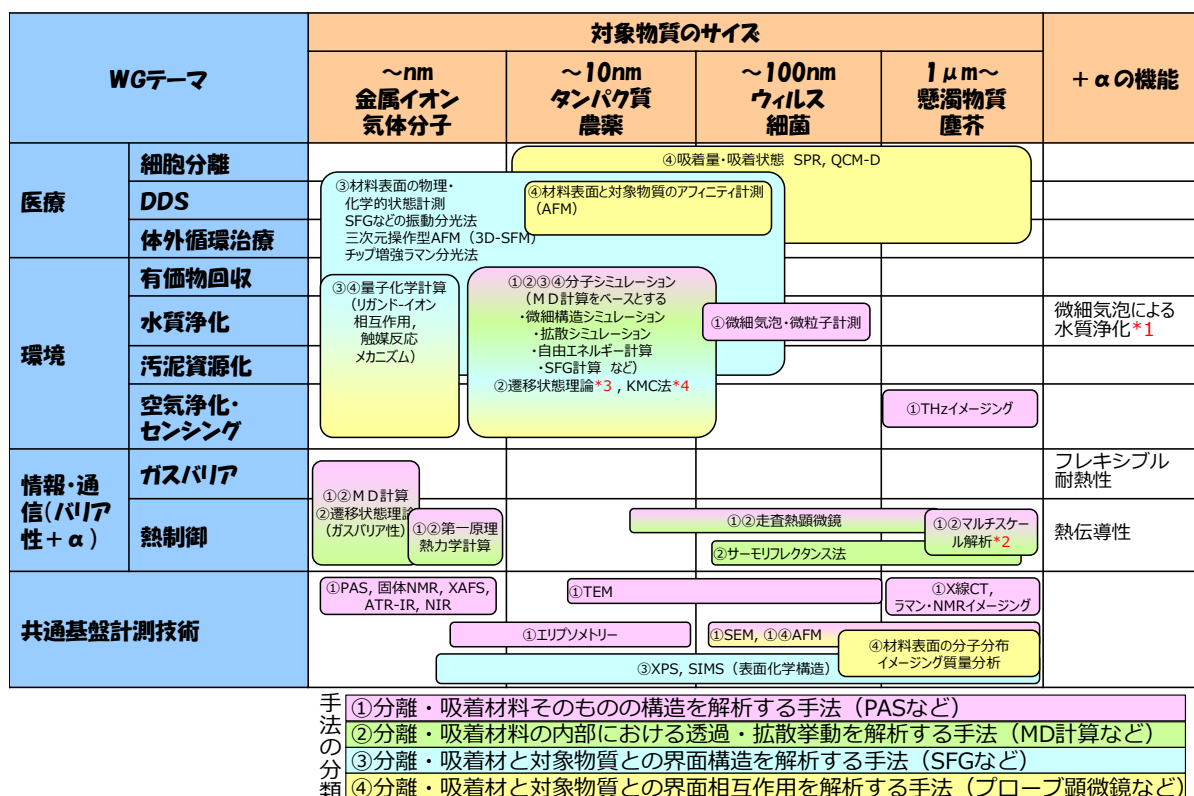


図11. 計測・シミュレーションに関する俯瞰図

(注)

- \*1 サブミクロン～ミクロンサイズの微細気泡を水中に放出し対流を発生させることにより、貧酸素化した対象水域全体の溶存酸素濃度を高め、浄化担体である好気性微生物を活性化する。酸化剤や凝集剤等の薬剤を使用しない為、人体や自然環境に安全な手法。
- \*2 5－2節(e)項参照。
- \*3 主に多孔質材料における透過性の予測に用いられる手法で、ポテンシャルエネルギー(より精密には自由エネルギー)の極小点から別の極小点へ遷移する際の障壁の高さに基づいて遷移確率を決定する。化学反応論における遷移状態理論と同様の枠組み。
- \*4 動的モンテカルロ(kinetic Monte Carlo)法。複数の素過程の組み合わせから成る系の時間発展をシミュレーションする手法の1つ。個々の素過程が起きる確率をパラメータとして与えておき、変化が起きる原子(要素)と素過程を確率に基づいてランダムに選択することで、系全体の時間発展をシミュレートする。素過程として、原子間結合の組み替えや、材料中のサイト間移動を定義すれば、拡散シミュレーションに応用できる。

革新的高機能分離素材に必要とされる基本的な機能は、「選択性」と「効率」である。高選択性は高効率の必要条件であるから、素材設計の上で、まずは選択性を高めることが重要である。

膜透過による分離では、透過物質の選択性は、膜素材への溶解性および／または膜中の拡散速度の差に依存する。また、吸着による分離では、素材表面に対する吸着エネルギーの差が重要である。従って、革新的高機能分離素材の開発にあたっては、素材そのものの構造に加えて、分離対象の素材内

部での振る舞いや、素材と分離対象との相互作用に着目することが重要と考えられる。このような観点から、図11の手法を下記の4つのカテゴリに分類した。

- ①分離・吸着素材そのものの構造を解析する手法
- ②分離・吸着素材の内部における透過・拡散挙動を解析する手法
- ③分離・吸着素材と対象物質との界面構造を解析する手法
- ④分離・吸着素材と対象物質との界面相互作用を解析する手法

環境、医療および情報・通信の各分野によって、分離の対象とする物質のサイズは様々であるが、素材そのものの微細構造の解明(カテゴリ①)はいずれの分野でも重要なため、図では共通基盤計測技術に位置づけている。特に、サブナノサイズの物質を分子ふるい機構によって分離する素材では空孔サイズ分布の解析が重要であり、透過型電子顕微鏡(TEM)による直接観察の解像度が及ばない極微細領域では、陽電子消滅分光(PAS)やエリプソメトリーのように、分離対象のサイズに応じた構造解析手法を発展させる必要がある。

一方、カテゴリ③に属する種々の分光法や原子間力顕微鏡といった手法は幅広い物質サイズをカバーしており、医療と環境の両分野において素材表面の解析に活用できる手法であることがわかる。また、これらの手法には試料調製や測定環境の制限がなく、分離素材が使用される環境での測定が可能なことも大きな利点である。

同様に幅広い分離対象に対応している手法として、分子動力学(MD)計算等の分子シミュレーションが挙げられる。個々の原子・分子をコンピュータ上にモデル化する分子シミュレーションは、近年のスパコンおよびソフトの進歩によって、微小なイオンや気体分子だけではなく、タンパク質のような巨大生体分子まで原子レベルで解析できるレベルに到達している。また、シミュレーションは計算結果の解析方法を工夫することで①～④全ての情報を引き出せる特長を有する一方、結果の信頼性を保証するには、計算精度を実計測によって確認する必要がある。そこで、計算結果が実素材の特性を再現することを計測によって確認しつつ、計測では直接観測が不可能な空間・時間分解能の情報を引き出すといった、計測とシミュレーションとの相補的活用が、分離現象を解明する上で汎用的かつ有効なアプローチと考えられる。

なお、熱マネジメント素材については、透過する主体が分子やイオンといった物質ではなく、熱(=内部エネルギー)であるため、他の分野とは異なる手法が要求される。サーモリフレクタンス法や走査熱顕微鏡といった計測手法により、ミクロンオーダーの空間分解能で熱浸透率や熱拡散率のマッピングが可能となっているが、さらなる空間分解能の向上とともに深さ方向の構造や界面等の影響評価が求められている。また、第一原理計算や分子シミュレーションによる熱伝導シミュレーションも研究されており、今後の発展が期待される。

## 5-2. 革新的高機能分離素材の開発に望まれる計測・シミュレーション手法

計測・シミュレーション手法を概観した上で、環境、医療および情報・通信の各分野WGから計測・シミュレーションに対するニーズ、現在活用されている手法および課題をヒアリングして、4つのカテゴリごとに整理した。結果を表3に示す。

カテゴリ①については、現在活用されている構造解析手法の多くが絶乾・高真空環境での計測を前提

としており、乾燥によって素材の真の構造を解析できていない懸念があるのに対して、液中もしくは湿潤環境下といった実環境における測定の必要性が伺える。また、構造規則性を持たない高分子膜のような素材を実環境下で超高解像度に直接測定するのは非常に困難と考えられるため、実環境を反映した大規模モデルによる分子シミュレーションを実測定と相補的に活用することにより、素材の真の構造の解析が進展すると期待される。さらに、実環境測定によって精度を確認された大規模モデルは、分子シミュレーションによる透過挙動解析(カテゴリ②)の入力データとして活用できるため、透過現象の分子論的な理解がさらに進むと期待できる。

カテゴリ③④は、素材と分離対象との界面構造・相互作用に着目した解析である。これらについては、界面化学の分野で発展してきた和周波発生(SFG)分光法や表面間力測定といった計測手法が有効と考えられ、素材の構造と界面特性との相関を解析することにより、分離素材設計の指針を得られると期待できる。また、これら先端計測の結果を分子レベルの微細構造と結びつけて解析する上では、やはり第一原理計算や分子シミュレーションが有効であり、カテゴリ①②と同様、計測とシミュレーションとの連携が重要である。

上記の観点から、分離の原理を解明し革新的素材を設計する上で注目すべき計測・シミュレーション手法を抽出し、これらについて先行研究を調査した。以下、大きく構造(カテゴリ①②)と界面(カテゴリ③④)に分けて述べる。

#### ①分離・吸着素材そのものの構造を解析する手法

#### ②分離・吸着素材の内部における透過・拡散挙動を解析する手法

##### (a) 陽電子消滅分光(PAS)

PASは、膜部材のイオン・分子に対する分離特性を支配するサブナノメートルサイズの分子間空隙を評価することができ、過去10年程の間に海水淡水化用分離膜や血液透析膜、あるいはバリア材等の解析に適用され、その原理的な有用性が確認されている。現状では形態や性状の異なる各種部材をより的確に評価するため、例えば、薄膜中のサブナノ空隙を大気圧環境下で計測する技術(環境制御PAS)が開発されるなど、計測手法の高度化が進みつつある。計測装置の開発および応用実績において、日本が世界をリードしている。[5-1] 同技術を産業界へ普及させるため、分離素材の実用環境測定におけるデータ生産性の向上が期待されている。

##### (b) エリプソメトリー

エリプソメトリーは、気体吸着法と組み合わせることにより、PASでは評価が困難な大きさが2nm以上の細孔を高感度評価できる。従って、PASと相補的に用いることで、広範囲の細孔計測が可能となる。フロー式気体吸着測定に加え、熱光学係数や昇温脱離など膜部材の熱特性を解析できる環境制御型測定システムが日本で開発、実用化されている。[5-2] これまでに半導体デバイス用絶縁膜部材の細孔構造や固体高分子形燃料電池用イオン伝導性高分子超薄膜の吸湿特性の解明に役立てられている。産業界における分離素材開発を加速するためには、普及型測定装置の実用化と、プローブ分子の極性やサイズと得られる細孔情報との関係についての標準化が求められている。

##### (c) テラヘルツ分光法

テラヘルツ分光法は、光波と電波の中間に位置するテラヘルツ波帯に物質固有の吸収帯や反射帯が存在することを利用した、定性分析が可能な非破壊検査ツールである。[5-3] テラヘルツ波は物質透過性を有することから、空気浄化のためのディーゼル排気微粒子除去フィルターのようなかさ高い部材に対しても吸着物質の時分割3次元分布を観測することが可能であり、同手法によるイメージング技術の実用化が進められている。将来的には特定部位で薬剤放出を行う薬剤被覆のモニタリングなどに向けて、高強度テラヘルツ光源を用いた実用環境中の分光イメージング技術の開発が期待されている。

#### (d) 分子シミュレーション

分子動力学法を中心とする分子シミュレーションについては、「京」戦略拠点で精力的に理論・ソフトの開発が実施されている。例えば、水分子を顕微鏡に含む数百万～1千万原子のモデルを用いた生体分子の大規模シミュレーション[5-4]は、タンパク質や小ウイルスの構造や機能をシミュレートしており、医療分野における生体分子と分離素材との相互作用にも応用できる可能性がある。

分離という観点から注目されるのは、非平衡 MD による透過係数の直接計算法である。[5-5] また、溶解・拡散理論における溶解項を自由エネルギー計算から、拡散項を MD 計算から求めようとする試みもなされており、高分子素材への水分子の溶解自由エネルギーや、アルコール分離膜の分離性能を再現可能であることが報告されている。[5-6]

これらの手法を、実環境における高分子の高次構造や界面構造を考慮して分子素材の複雑な構造を反映したシミュレーションモデルに展開するためには、大規模な計算機資源の利用およびシミュレーションソフトの高度化が必須であり、ポスト「京」コンピュータの活用を視野に入れた理論およびソフトの研究開発が望まれる。

#### (e) マルチスケールデータ解析

広いスケールに渡る不均質性構造や階層構造をもつ分離素材のような材料の解析では、システム全体を第一原理により取り扱うことが困難であり、これまでのミクロからマクロに向かうクラスター描像や周期セル描像に基づくデータ解析は、現実系への適用が困難となる場合が多い。それよりもむしろ、通常とは逆の発想が有用となる。つまり、計測される実際のマクロ特性およびミクロからマクロレベルの構造情報をもとにミクロ特性を逆推定し、微視的理論等で比較参照すべき情報を得るマルチスケールデータ解析が有力なツールとなる。本手法は、これまでパワーデバイス用放熱シート材料として開発された窒化ホウ素(BN)粒子を分散配向制御した高熱伝導性シート中の粒子配向性と熱拡散異方性の関係に適用され、従来の手法で得ることが困難であった種々のスケールにおける配向乱れの程度と熱特性との関係が明らかになっている。本手法は熱拡散に限らず、分子等の拡散現象の解析にも適用可能である。NMR 等による母材-粒子界面の結合情報や、第一原理計算結果を加味することで、拡散現象における異種界面抵抗の影響を詳細に検討することも可能になると期待される。

#### ③分離・吸着材と対象物質との界面構造を解析する手法

#### ④分離・吸着材と対象物質との界面相互作用を解析する手法

#### (f) 和周波発生分光法

和周波発生(SFG)現象は、2次の非線形光学効果を利用した振動分光法である。偶数次の非線形光学効果は、対称中心の存在する系では起こらず、反転対称性の破れた場である表面や界面で起こるこ

とが知られている。そのため、液体・高分子表面や大気圧下での表面、液-液、固-液界面のような埋もれた界面など、従来の表面科学で扱うことの難しかった未開拓の界面現象を解析する手法として、近年では広く用いられるようになってきた。[5-7] また、理論計算による SFG スペクトルシミュレーション手法が提案されており [5-8]、界面構造とスペクトルとを分子モデルによって結びつける手法として有望であるが、実環境における分離素材の複雑な界面構造を解析するには、素材に適したパラメータの整備など応用に向けた技術開発を進める必要がある。

#### (g) 表面間力測定

2 つの表面の間に働く相互作用をその表面の間の距離を変えて直接測定するもので、相互作用力の距離依存性が得られるため、表面間力の起源の解明に威力を発揮する。表面力装置(Surface Forces Apparatus; SFA)では、バネばかりの原理を用い、光干渉法等でバネの変位を精密に測定することで、距離 0.1 nm、力 10 nN という高い分解能が得られる。[5-9] SFA は、従来、コロイド界面化学における微粒子間相互作用力の直接測定のために開発されたが、現在では生体分子間相互作用、分子間の特異的な相互作用(分子認識)、固液界面における液体の構造化など、様々な分野に応用されている。分離素材と分離対象物質との相互作用は、特に医療分野における吸着素材の除去性能や生体適合性の原理解明に非常に有効と考えられる。

#### (h) 液中 AFM

先端 AFM のうち周波数変調原子間力顕微鏡(FM-AFM)は、界面の面内方向を高い分解能で解析できるという他の表面分析手法にはない特長をもっている。種々の改良により、固液界面における水和構造の 3 次元的可視化、固体表面上の生体分子の高分解能イメージング、電気二重層の原子・分子スケール解析が可能になってきている。[5-10]

液中という実環境に近い条件下で表面、界面状態の計測が可能な FM-AFM の技術開発は現在も急速に進行しており、凹凸の大きな試料の高分解能イメージング、電荷分布計測、さらには、3 次元機能・物性マッピングに向けた開発が進められている。このような開発を加速するとともに、その成果を分離素材の高機能化に迅速に活用していく必要がある。

#### (i) イメージング質量分析法

イメージング質量分析法は質量分析に測定対象の空間分布を計測する機能を付加したものである。イメージング方式には、測定対象のイオン化に用いるレーザーやイオンのビームを走査するプローブ走査方式と、レーザー光を広範囲に照射し、イオン化した分子を静電レンズ系で検出器に収束させるイオン光学像投影方式がある。プローブ走査方式の空間分解能は 10  $\mu\text{m}$  程度で測定にも長時間を要するが、イオン光学像投影方式は短時間で測定が可能であり、空間分解能も 1  $\mu\text{m}$  に達している。空間分解能は検出器の空間分解能により制限されることから、検出器の見直しによりさらに高い空間分解能も期待できる。[5-11]

イメージング質量分析法は細胞の分析などこれまで主にライフサイエンス分野への応用が進められてきた。イオン化できる分子種の拡大といった課題はあるものの、分離素材の表面状態や吸着物の解析にも適用できるものであり、分離素材分野への適用拡大が期待される。

#### (j) 第一原理計算・量子化学計算

力の計算に経験的パラメータを用いない第一原理計算や量子化学計算は、計算負荷が高いためモデ

ルの大きさに制限があるものの、吸着材と除去対象物質との吸着エネルギーを分子レベルで精密計算するのに適した手法である。

また、経産省「未利用熱エネルギーの革新的活用技術」プロジェクトでは、量子輸送理論による電気伝導度、電子熱伝導度およびフォノン熱伝導度の第一原理計算を活用した断熱・伝熱・熱電変換シミュレーションが実施されている。[5-12] また、「京」戦略拠点においても第一原理計算に基づくフォノン熱伝導の理論計算が実施されている他、ポスト「京」重点課題プロジェクトでは量子・古典統合シミュレーションによる無機／有機界面の熱伝導解析を実施する計画があり、これらの手法は半導体実装における熱マネジメント素材の設計に活用できる可能性がある。

### 5-3. 提言

#### ○必要な施策

以上のように、我が国では分離の原理解明に寄与する様々な手法が開発されているが、これらは必ずしも分離素材や現象の解析を主目的とする手法ではないため、分離に適した手法に発展させる必要がある。さらに、種々の計測・解析技術とシミュレーションの組み合わせなど、複数の手法を相補的に活用することで従来は得られなかった知見が期待できる。分離の原理解明という共通の目的の下、個々の手法を発展させるとともに様々な手法の連携によるシナジー効果を引き出すには、基盤技術開発を担当する組織を設置し、以下に挙げる研究開発を推進することが望ましい。

- a. 分離素材(モデル材を含む)の構造および特性の実環境計測・解析技術開発
- b. 界面化学に立脚した分離素材と分離対象物質との界面構造・相互作用の解明
- c. 実環境を反映した原子・分子レベルの分離現象シミュレーション技術開発

基盤技術開発を担当する組織は、分離素材の研究開発もしくはその計測・解析で実績のある大学または公的研究機関をハブとし、個々の計測・シミュレーション手法について一線の研究者が参画して密な情報交換・連携の下、多様な計測およびシミュレーション手法を相補的に活用するとともに、必要であればモデル素材も作成することにより、分離の科学を深化させる。産業界は、分離素材についてのニーズを示して基盤技術の方向性を定めるとともに、計測サンプルの提供や測定・シミュレーション結果の素材開発へのフィードバックを行う。基盤研究と素材開発のインタープレイを促進することにより、分離の基礎科学の深化と革新的な分離素材の開発が強調して進むことが期待できる。

また、基盤研究の成果を産業界が広く活用できるようにするため、産業界による先端計測装置活用の推進や、ソフトウェア開発を含めた「京」、ポスト「京」コンピュータ活用を促進する仕組みの整備も提言したい。



	環境		
	ニーズ	分析・解析手法	課題
①内部構造	原子座標(無機結晶など) 結晶構造 動径分布	XRD(結晶など規則性構造を持つもの) 中性子散乱(〃) XAFS TEM 量子化学計算・第一原理計算 分子シミュレーション	規則構造のない素材の構造解析  電子線による損傷 空間・時間スケールの制限 計算結果の検証
	空孔径・分布(サブ nm～nm)  〃 (10nm～) 〃 (100nm～)	上記手法の他 PAS(環境制御 PAS) エリプソメリーナノパーム ポロメトリー ガス吸着 SEM	・連続性の定量化 ・湿潤測定(前処理(真空、乾燥)による構造変化抑制)
	表面構造	IR, NIR(液中 IR) Raman(チップ増強ラマン) THz XPS SIMS NMR SEM(湿潤 SEM) AFM(液中 AFM, 走査熱顕微鏡) XAFS(顕微 XAFS) 量子化学計算・第一原理計算 分子シミュレーション(実環境モデル)	・湿潤測定(前処理(真空、乾燥)による構造変化抑制) ・複数手法による高精度化 ・分子レベルまでの超高解像度測定 ・複合成分の個別高解像度測定
	配向(異方性材料の場合)	XRD Raman AFM(走査熱顕微鏡) マルチスケール解析 屈折率	
	欠陥	TEM AFM	
	耐熱性 熱膨張係数  吸湿性 湿度膨張係数	DSC TMA, DMA 分子シミュレーション TMA	吸湿性に関する一般的な測定法が確立されていない。
	溶解自由エネルギー ガス 液体 金属イオン 有害物質	溶解度測定 量子化学計算 分子シミュレーション(自由エネルギー計算)	
②透過・拡散	拡散係数 ガス	PFG-NMR THz	ガスバリア性:短時間で正確に測定できる手法

	環境		
	ニーズ	分析・解析手法	課題
②透過・拡散	液体 金属イオン 有害物質 タンパク質	分子シミュレーション(非平衡 MD) 遷移状態理論 KMC 電気泳動	
	伝導率 熱 電気(絶縁性)	サーモリフレクタンス法 走査熱顕微鏡 第一原理計算 分子シミュレーション	$\mu\text{m}$ ～サブ $\mu\text{m}$ サイズの微粒子 高電圧下の絶縁性測定
③界面構造	素材／分離対象流体界面	IR Raman SFG、HD-VSFG 分子シミュレーション(SFGシミュレーション)	・濃度、速度、せん断力分布
	吸着構造 ガス 金属イオン 有害物質 ファウラント タンパク質 細胞	IR Raman SFG QCM-D 量子化学計算・第一原理計算 分子シミュレーション(SFGシミュレーション)	・水和構造定量化 ・In situ, in operando 測定
	フィラー／マトリックス界面 (複合材料の場合)	TEM 分子シミュレーション(QM/MM)	
④界面相互作用	表面自由エネルギー	接触角 IGC	
	界面相互作用	SFA IGC	
	吸着エネルギー・平衡定数 ガス 金属イオン 有害物質 ファウラント タンパク質 細胞	吸着等温線 エリプソメトリー SPR AFM QCM-D 量子化学計算・第一原理計算 分子シミュレーション(自由エネルギー計算)	実計測手段
	マトリックス／フィラー界面の熱・電気伝導性	第一原理計算 分子シミュレーション(QM/MM)	

表3. 計測・シミュレーション手法の現状と課題(太字は本報告で注目した項目)

※表中の計測・シミュレーション手法略称(アルファベット順)

AFM	Atomic force microscopy. 原子間力顕微鏡
HD-VSFG	Heterodyne-detection of VSFG. ヘテロダイン振動和周波発生分光
IGC	Inverse gas chromatography. 逆ガスクロマトグラフィー
IR	Infrared. 赤外分光
KMC	Kinetic Monte Carlo. 動的モンテカルロ
MD	Molecular dynamics. 分子動力学
NIR	Near infrared. 近赤外分光
NMR	Nuclear magnetic resonance. 核磁気共鳴
PFG-NMR	Pulse-field gradient NMR. パルス磁場勾配 NMR
PAS	Positron annihilation spectroscopy. 陽電子消滅分光
QCM-D	Quartz Crystal Microbalance with Dissipation Monitoring
QM/MM	Quantum mechanics/molecular mechanics. 量子・古典統合シミュレーション
SEM	Scanning electron microscope. 走査型電子顕微鏡
SFA	Surface force apparatus. 表面間力測定
SFG	Sum-frequency generation. 和周波発生分光
SIMS	Secondary ion mass spectroscopy. 2次イオン質量分析
SPR	Surface plasmon resonance. 表面プラズモン共鳴
TEM	Trans electron microscope. 透過型電子顕微鏡
THz	テラヘルツ分光
XAFS	X-ray absorption fine structure.
XPS	X-ray photoelectron spectroscopy. X 線光電子分光
XRD	X-ray diffraction. X 線回折

(参考文献)

- [5-1] 特集: 陽電子をプローブとしたナノ材料評価技術, 産総研 TODAY 2014-09, pp. 2-11 (2014).
- [5-2] 伊藤ら, 「分光エリプソメトリー及びエネルギー可変陽電子消滅法によるシリカスパッタ薄膜の細孔構造解析」, Journal of the Ceramic Society of Japan, Vol.112, pp.338-341 (2004).
- [5-3] テラヘルツテクノロジーフォーラム編, 「テラヘルツ技術総覧」, NGT 出版, pp. 389-474, (2007).
- [5-4] 杉田, 「細胞内分子ダイナミクスのシミュレーション」, [http://www.scls.riken.jp/research/01\\_dynamics/](http://www.scls.riken.jp/research/01_dynamics/); 岡崎, 「全原子シミュレーションによるウイルスの分子科学の展開」, <http://www.cms-initiative.jp/ja/research-activities/subject-general/topic3/focus1>
- [5-5] 吉岡, 「多孔性無機膜の分子シミュレーションと気体透過性予測」, 膜(MEMBRANE), 39, 357-365 (2014).
- [5-6] 茂本, 「ERmod を活用した高分子機能膜設計に向けて」, CMSI 広報誌“TORRENT” No. 8, pp. 7; 北畑, 川上, 茂本, 松林, 「分子動力学シミュレーションによる分離膜の分離性予測」, Polymer Preprints, Japan Vol. 63, 6247 (2014).
- [5-7] 宮前, 「和周波発生分光による界面の分析評価・解析」, Polyfile, Vol. 49 2012 年 10 月号.
- [5-8] 森田, 「界面和周波発生分光の分子シミュレーション」, 分子シミュレーション研究会会誌“アンサンブル”, 10, 21-24 (2008).
- [5-9] 特集「表面間力の直接測定が拓く新たな視野」, 表面科学, 18, 589-624;
- [5-10] 山田, 「FM-AFM が明らかにする固液界面の微視的描像」, 日本学術振興会 産学協力研究委員会 ナノプローブテクノロジー第 167 委員会, <http://www.npt167.jp/roadmap/008.html>
- [5-11] 豊田, 「有機機能性材料開発の現場で求められるイメージング質量分析技術」, JST-CRDS 俯瞰ワークショップ報告書 ナノ計測技術領域分科会, CRDS-FY2014-WR-04, pp. 47-52 (2014).
- [5-12] 中村, 石田, 浅井, 「未利用熱の活用を目指したフレキシブル熱電材料と蓄熱・断熱材料の理論・シミュレーション設計」, 産総研 TODAY 2013-2, pp. 4-5.

## 6. まとめ

以上のように、我々のプロジェクトにおいては、「産業競争力の強化」と「持続社会の実現」を同時に実現する事を主目的として、「分離」をキーワードとした調査・提言活動を実施した。

その結果、産業の出口として設定した「環境分野」、「医療分野」、「情報・通信分野」およびテーマ横断的な基礎研究分野である「分離原理の解明と深化」の合計4分野に関して、製品の製造から使用までのあらゆる段階において、製造工程として又は素材の機能として存在する「分離」には、依然として多くの解決すべき課題が存在し、その解決により従来技術では実現不可能であった多種多様な分離対象への高選択的なアプローチや、更なる省エネルギー化の可能性を見いだすことができた。

さらに、我が国が保有する先端素材やその開発・製造技術および先端計測・シミュレーション技術を適切に組み合わせた「ハイブリッド分離」の概念を用いることにより、これらの開発を加速できる可能性を見いだすことができた。

また、「分離原理の解明と深化」は、これまで単独で存在していた、有機合成化学、高分子化学、化学工学および界面科学などを統合した、新たな技術分野を形成する可能性があり、産業に共通する横断的な技術分野となり得ることも見いだした。

これらの実現においては、企業単独での開発では極めて困難であり、より大きな枠組みの中で我が国の分離関連技術の統合が必要であり、大学や公的研究機関との連携はもとより、出口製品を構成する適切なサプライチェーンの構築も必要となる。この点で国の理解と支援が重要と考えられる。

今後、我々のプロジェクトにおいては、本提言に基づいて、より具体的な開発内容の設定や実施体制の検討のため、必要となる各プレイヤー（産・官・学）の検討および相談・協議を進めて行く。また、その過程で検討・企画に必要な組織体制についても検討する。なお、プロジェクトの実現においては、個々の提言の種類およびフェーズが多岐にわたることから、全体の同時実現と、個々のテーマの個別実現の両面から検討を行い、産業競争力の向上の観点から優先順位を明らかにしてあるべき姿を検討し、一日も早い実現に向けて鋭意努力していく所存である。

以 上

産業競争力懇談会（COCN）

東京都千代田区丸の内一丁目 6 番 6 号 〒100-8280

日本生命丸の内ビル（株式会社日立製作所内）

Tel : 03-4564-2382 Fax : 03-4564-2159

E-mail : cocn.office.aj@hitachi.com

URL : [http : //www.cocn.jp/](http://www.cocn.jp/)

事務局長 中塚隆雄