

JAIMA平成28年度第2回環境規制関連セミナー  
2016/09/26(月)

# 固相分離技術において 分析技術に求められるもの ～戦略プロポーザル 「分離工学イノベーション」を踏まえて～

**佐藤勝昭**

(国研)科学技術振興機構(JST)  
研究開発戦略センター(CRDS)フェロー



# はじめに

- JST-CRDSでは、2015年度の戦略プロポーザル「分離工学イノベーション」をまとめ、政府関係機関に提言した。
- この提言では、気相・液相分離、鉱物・固相分離、生体物質分離について、これまでの分離技術を超えた新しい研究開発の必要性を記述している。
- 本セミナーでは、この提言の概略を述べるとともに、私が主体的に関わった固相分離について説明し、分析・計測技術への課題を述べたい

# CONTENTS

- CRDSの活動のご紹介
- 戦略プロポーザル「分離工学イノベーション」の概略
- 「鉍物・固相分離」の現状と課題
- 分析・計測技術に求められるもの

# 研究開発戦略センター（CRDS）のご紹介

【科学技術イノベーション創出に向けた調査・分析及び研究開発戦略の提案を行う】

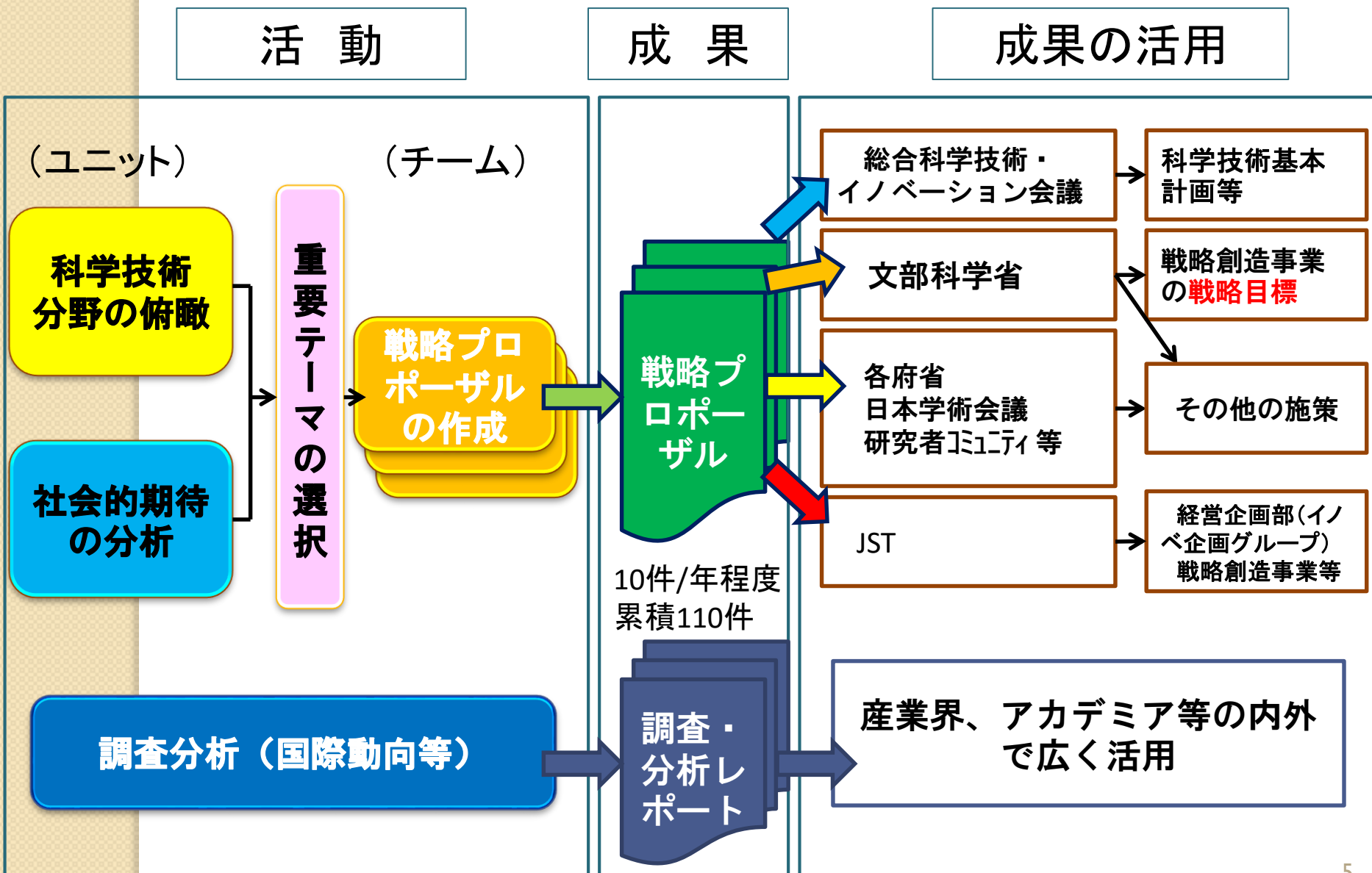
- ◎ 国内外の科学技術政策及び研究開発の動向、社会的・経済的ニーズ等の調査・分析を行い
- ◎ 我が国が進めるべき研究開発対象を特定し、科学技術システムの改善に向けた質の高い提案を行う。

## ●補足

- ・ 国が重点投資すべき研究開発領域、課題を提言
- ・ 必要に応じて政策的・制度的な課題も取り上げる
- ・ 中立、衡平、公正にエビデンスベースで戦略を立案
- ・ 調査・分析レポートも積極的に外部に情報提供

公的シンクタンク

# CRDSの活動フローと成果の活用



# CRDSの運営体制

2016年9月現在

2003年7月設立

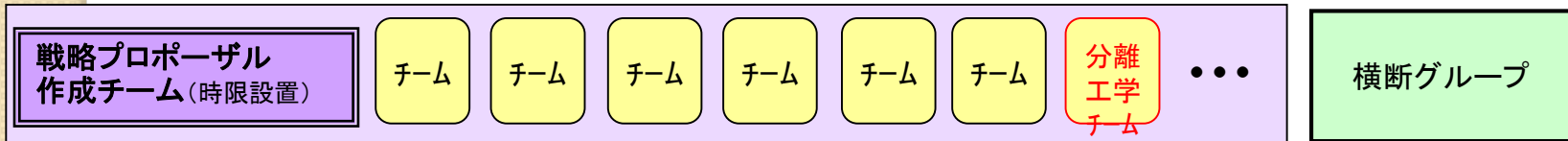
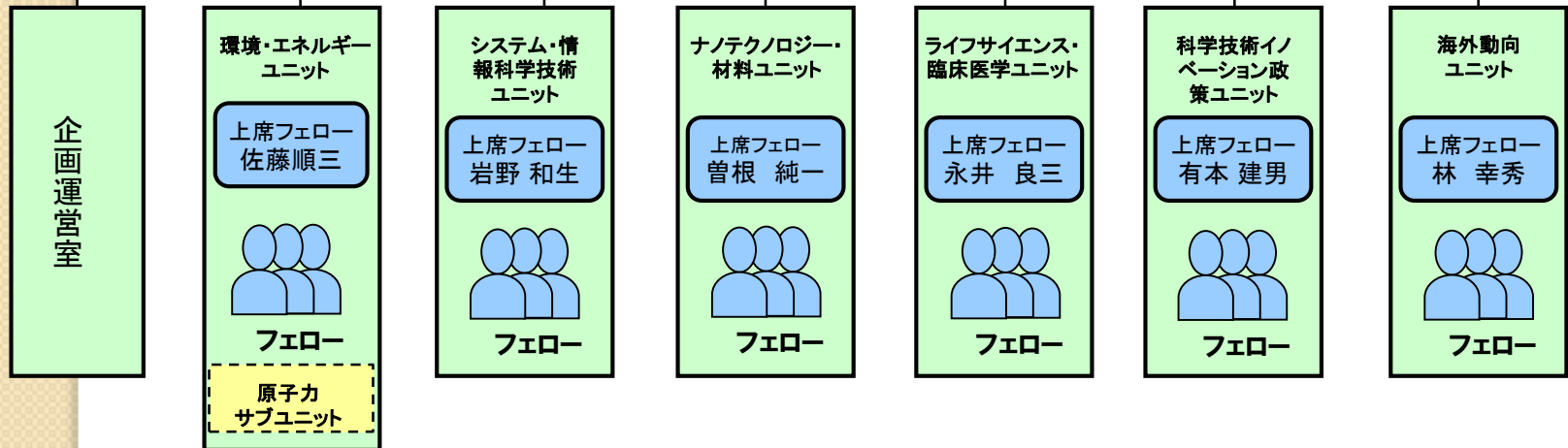


センター長 野依 良治

センター長代理 倉持隆雄

副センター長 中原 徹

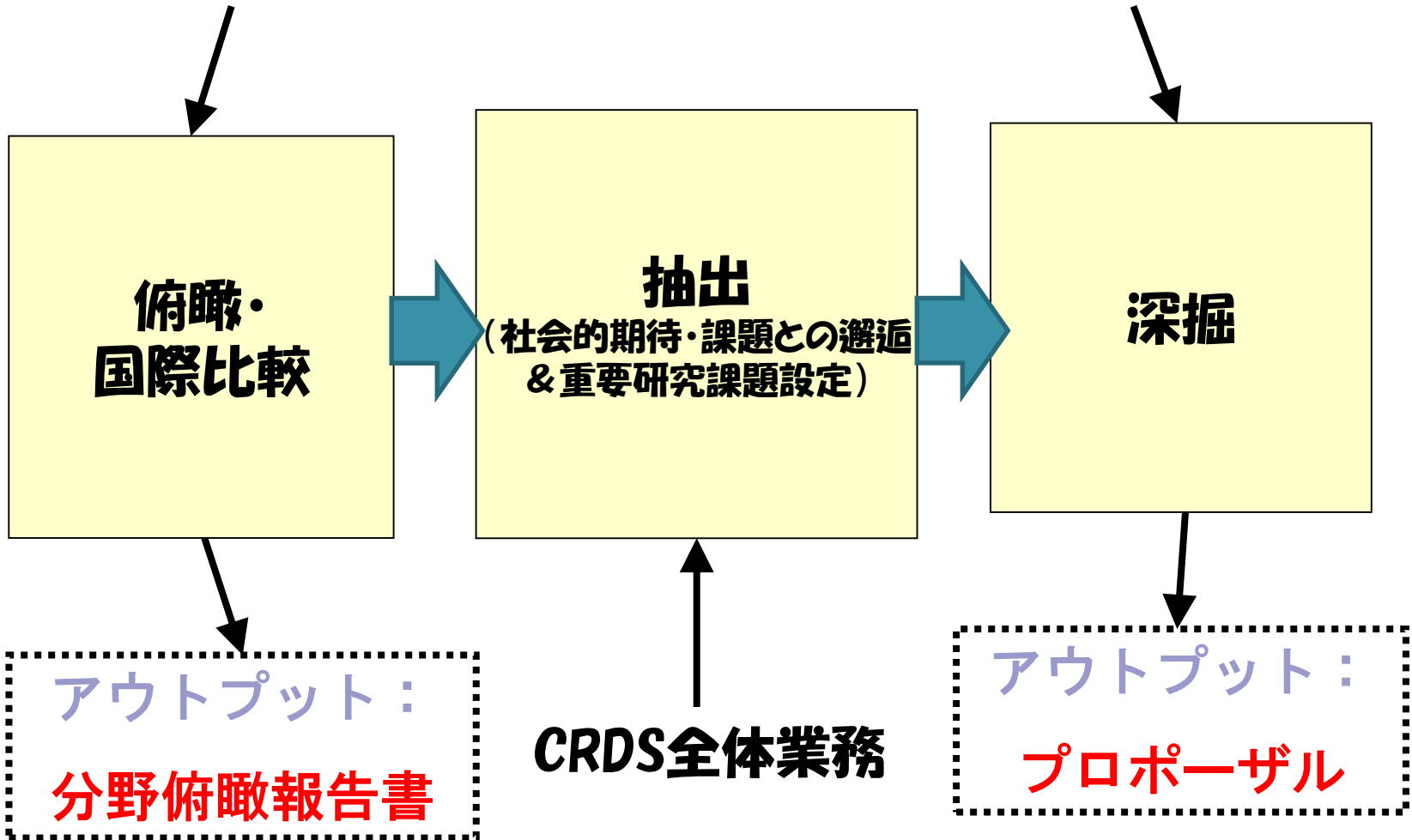
上席フェロー  
黒田昌裕 岩瀬忠篤  
藤山和彦



# CRDSの戦略立案プロセス

分野別ユニット(定常的)

チーム業務(時限的)



# ナノテクノロジー・材料分野の俯瞰図 (2015年版)

豊かな持続性社会

地球規模の課題解決

国際的な産業競争力

生活の質の向上

システム化

量産化

高機能

コスト

信頼性

環境負荷

安全

省エネ

リサイクル

## エネルギー

太陽電池  
人工光合成  
バイオマス  
燃料電池  
熱電変換  
二次電池・キャパシタ  
エネルギーキャリア

パワーデバイス  
エネルギーハーベスト

### 環境

環境浄化膜  
排ガス浄化触媒  
環境モニター (デバイス)

## 健康・医療

生体適合性材料  
再生医療材料  
人工組織・人工臓器  
診断・治療デバイス  
DDS (薬物送達システム)  
分子イメージング

## 社会インフラ (水・電力・交通・通信)

超電導線材  
超軽量・高強度材料  
断熱材料・耐熱材料  
水処理膜  
モータ・高保磁力磁石  
センサネットワーク

## 情報通信・エレクトロニクス

極限CMOS  
記録媒体  
光インターコネクト  
スマート・インターフェース  
(センサ、ロボット、ウェアラブル)  
固体照明・ディスプレイ  
量子コンピュータ・通信

## 新興・融合 領域

スピントロニクス フラスモニクス シリコンフォトニクス トポロジカル絶縁体 有機エレクトロニクス

フォトニック結晶 メタマテリアル 量子ドット MEMS マイクロ・ナノフルイティクス 分子ロボティクス

ナノ粒子・クラスター ナノチューブ/CNT ナノワイヤ・ファイバ グラフェン/ナノシート/二次元薄膜 多孔性配位高分子 (PCP) / 金属有機構造体 (MOF) 超分子

## 基盤領域

高温超伝導材料 強相関電子材料 金属ガラス 複合材料 イオン液体 機能性ゲル

金属材料 磁性材料 半導体材料 酸化物材料 分子・有機材料 生物材料

## 設計・制御

分子技術 ナノ界面・ナノ空間制御 マイクロ・ナノトライボロジー ナノ熱制御 バイオ・人工物界面 バイオミメティクス マテリアルス・インフォマティクス  
元素戦略

## 製造・加工・合成

フォトリソグラフィ ナノインプリント ビーム加工 インクジェット  
自己組織化 結晶成長 薄膜、コーティング 付加製造 (積層造形)

## 計測・解析・評価

電子顕微鏡 走査型プローブ顕微鏡 X線・放射光計測 中性子線計測

## 理論・計算

第一原理計算 分子動力学法 分子軌道法  
モンテカルロ法 フェース・フィールド法 有限要素法

共通支援策  
【システム化促進策】

教育  
人材育成  
研究インフラ  
異分野融合  
国際連携  
知的財産  
標準化  
EHS・ELSI  
産学連携  
府省連携

## ナノサイエンス

物質科学、光科学、生命科学、情報科学、数理科学



# 戦略プロポーザル「分離工学 イノベーション」の概略

プロポーザルを作った  
「分離工学イノベーションチーム」

チーム総括： ◎曾根純一 上席フェロー  
チームメンバ： ○永野智己 (ナノ・材U)  
佐藤勝昭 (ナノ・材U)  
児山 圭 (ライフ・臨床U)  
緒方 寛 (環境・エネU)  
関根 泰 (環境・エネU)  
中本信也 (特任フェロー)

# プロポーザルの背景

## ■ 持続性社会を目指す上で混合物分離はキー

- 生体系含め、自然界は混合物で構成され、多くの反応が同時進行
- 持続可能社会実現には混合物から目的物を取り出す、または不要物を除く、分離プロセスがキー “特に環境・エネルギー、健康医療分野”
- 化学産業ではエネルギー多消費のプロセスに代わる省エネプロセスを希求

## ■ マクロからナノスケールまで分離技術革新へ多くの社会的期待

### ➤ 水に代表される液体成分の分離技術は世界スケールの課題

飲料可能な**水資源不足**、2025年には世界人口の30%が水ストレス下に  
 シェールガス、サンドオイル**採掘で生ずる大量の随伴水・汚染水**  
 福島原発事故で発生した大量の放射性物質汚染水  
 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

### ➤ 固体物質・特定元素の分離

**低品位化する鉱物資源**からの元素抽出、使用後製品からの有用元素分離

### ➤ 大気汚染、温室効果ガスへの対応

効率的な**CO<sub>2</sub>**や、**大気中有害物質の分離・回収**への必要性

### ➤ 水素社会到来への期待（燃料電池）

高純度の**水素**分離・生成・吸蔵技術の必要性

### ➤ 疾病の早期診断・治療、疾患患者への治療負担低減

**目的組織・細胞・タンパク質・DNA**の高精細な分離分析、高速透析・濾過

# 主な分離技術と分離機能材料

## 蒸留



常圧蒸留、減圧蒸留、  
加圧蒸留、深冷蒸留、  
多段フラッシュ蒸留

固液分離、液液分離、  
気液分離、ガス分離、  
同位体分離

精留塔、**石化プラント**

## 凝集沈殿



凝集剤、砂濾過、  
凝集防止剤、

凝集分離、遠心分離  
ハイドロサイクロン、  
フローテーション

活性汚泥処理  
水道事業

## 吸着・吸収



活性炭、ゼオライト、  
イオン交換樹脂、  
アミン化合物

圧力シフト吸着 (PSA)  
熱シフト吸着 (TSA)  
抽出分離

吸着カラム／吸着塔  
**ガス分離**

## 膜分離



精密濾過、限外濾過、  
逆浸透RO膜、  
正浸透FO膜、無機膜

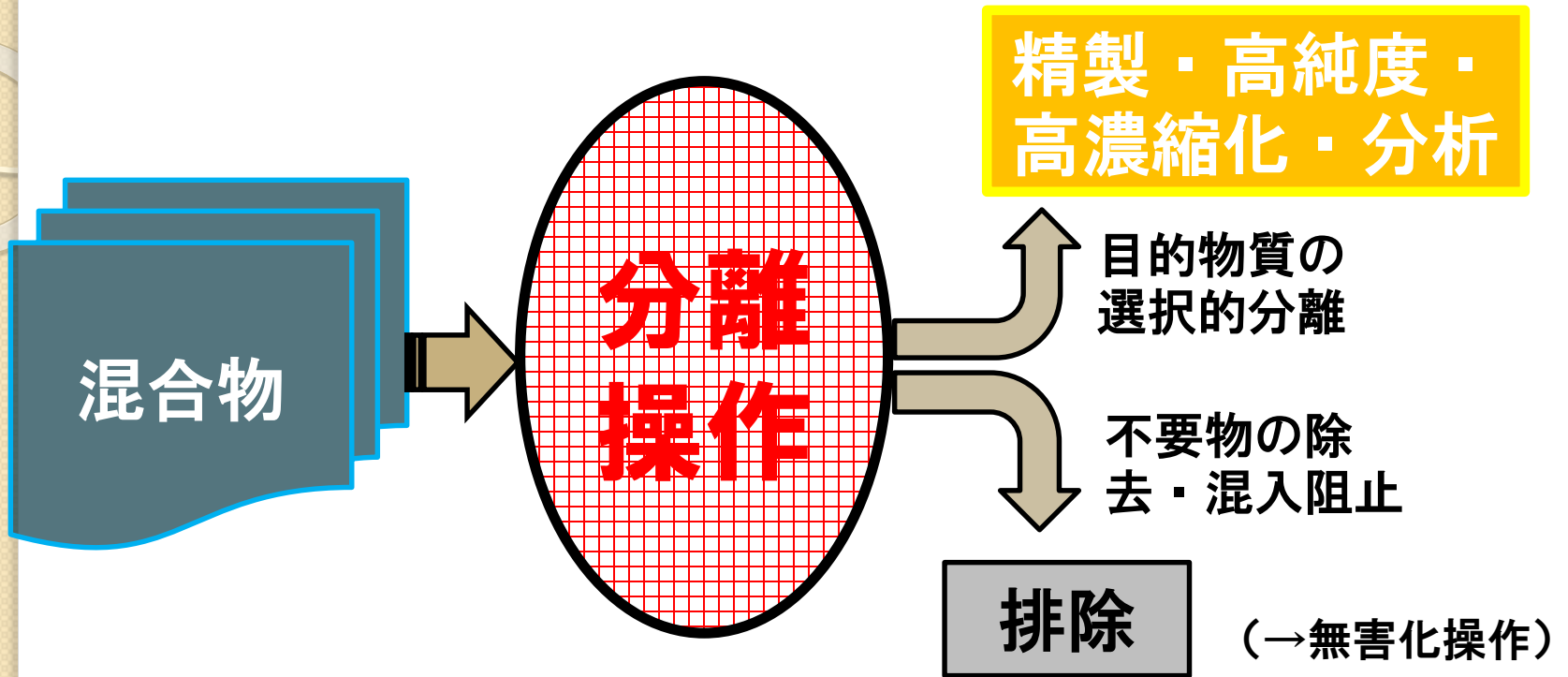
加圧濾過、透析  
パーバレーション  
膜蒸留

中空糸／平膜  
モジュール／**淡水化**

# 分離工学イノベーション 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。

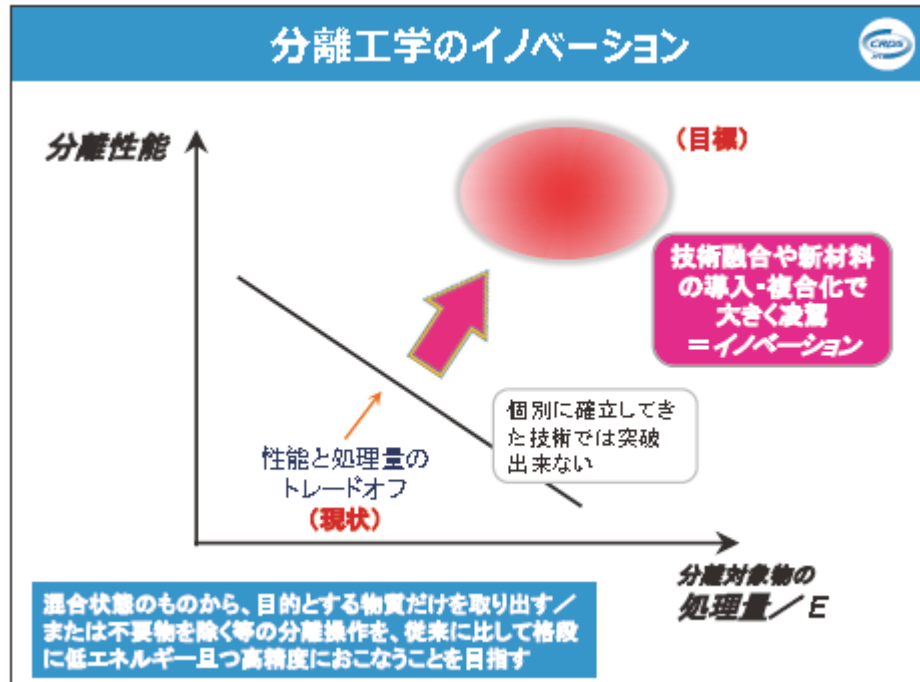
# 分離の基本原理



- ✓ **機械的分離**: 混合物中の形態の違いを利用したり、力学的に分離
- ✓ **平衡分離**: 加熱・冷却により、混合物の組成比が異なる新しい相を形成することで分離。相分離
- ✓ **速度差分離**: 圧力・電位等の勾配を形成し、物質間の移動速度差を利用し分離。膜分離など。物質の分子サイズ、電荷、形状等の違い

# 分離の基本原則と本提言の目標

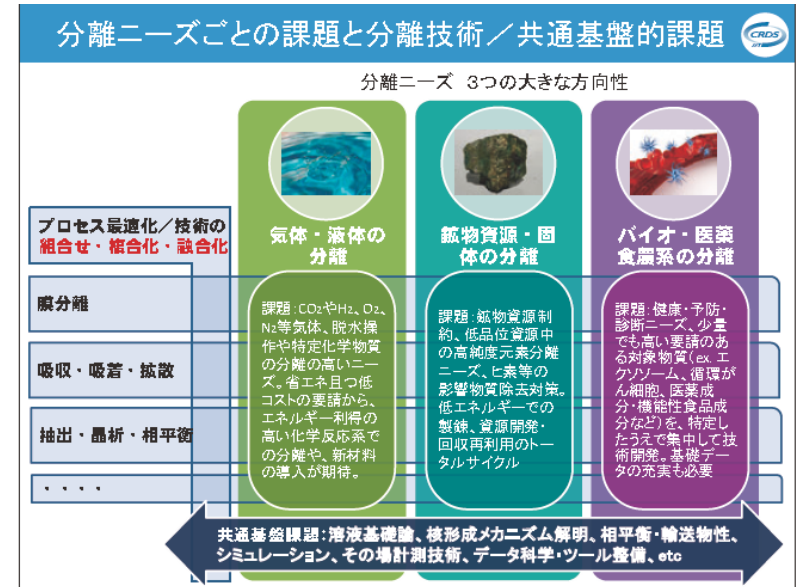
- 一般に分離の基本的な原理は、機械的分離、平衡分離、速度差分離に大別される。対象となる混合物に外的なエネルギーを投入することで分離を実現し、分離後の物質はエントロピーの低下を伴う。
- 本提言では、近年のナノテクノロジーや先端計測技術、シミュレーション技術の飛躍的進展を活用し、これら基本原理と、分離操作を担う媒介となる材料・デバイス・プロセスを、原子・分子レベルで制御することによって、従来は困難であった低エネルギー・高精度な分離操作の実現を目指す。
- 通常、分離対象物質の単位エネルギーあたりの処理量と分離性能は、図のようにトレードオフの関係にあるが、分離性能を高く保ったまま、必要な処理量の分離を実現するイノベーションが目標となる。





# 分離の対象課題の3分類

- 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・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。



# 分離ニーズごとの課題と分離技術／共通基盤的課題



分離ニーズ 3つの大きな方向性

プロセス最適化／技術の  
組合せ・複合化・融合化

膜分離

吸収・吸着・拡散

抽出・晶析・相平衡

...



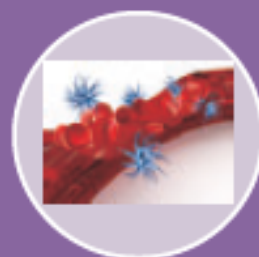
気体・液体の  
分離

課題: CO<sub>2</sub>やH<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>等気体、脱水操作や特定化学物質の分離の高いニーズ。省エネ且つ低コストの要請から、エネルギー利得の高い化学反応系での分離や、新材料の導入が期待。



鉱物資源・固  
体の分離

課題: 鉱物資源制約、低品位資源中の高純度元素分離ニーズ、ヒ素等の影響物質除去対策。低エネルギーでの製錬、資源開発・回収再利用のトータルサイクル



バイオ・医薬  
食農系の分離

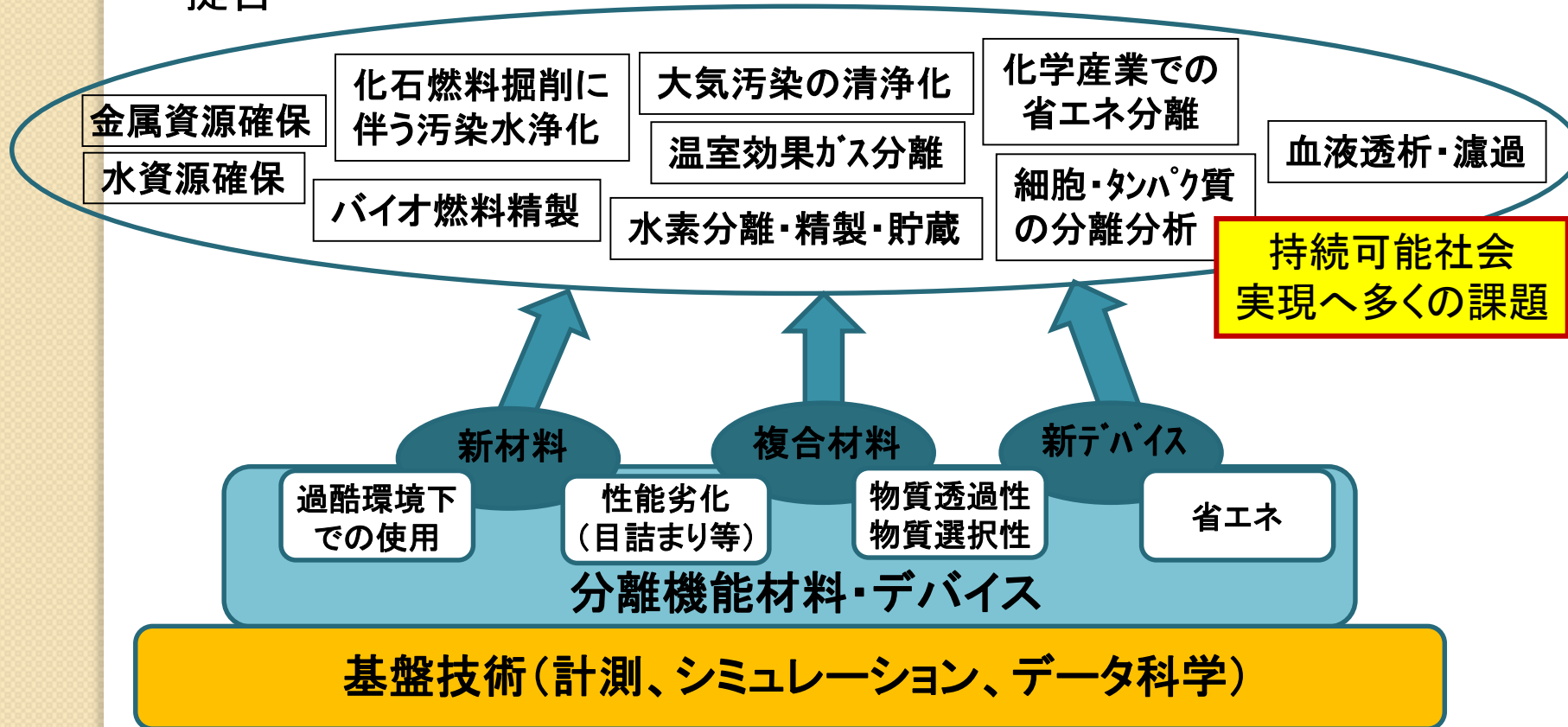
課題: 健康・予防・診断ニーズ、少量でも高い要請のある対象物質(ex. エクソソーム、循環がん細胞、医薬成分・機能性食品成分など)を、特定したうえで集中して技術開発。基礎データの充実も必要

共通基盤課題: 溶液基礎論、核形成メカニズム解明、相平衡・輸送物性、シミュレーション、その場計測技術、データ科学・ツール整備、etc

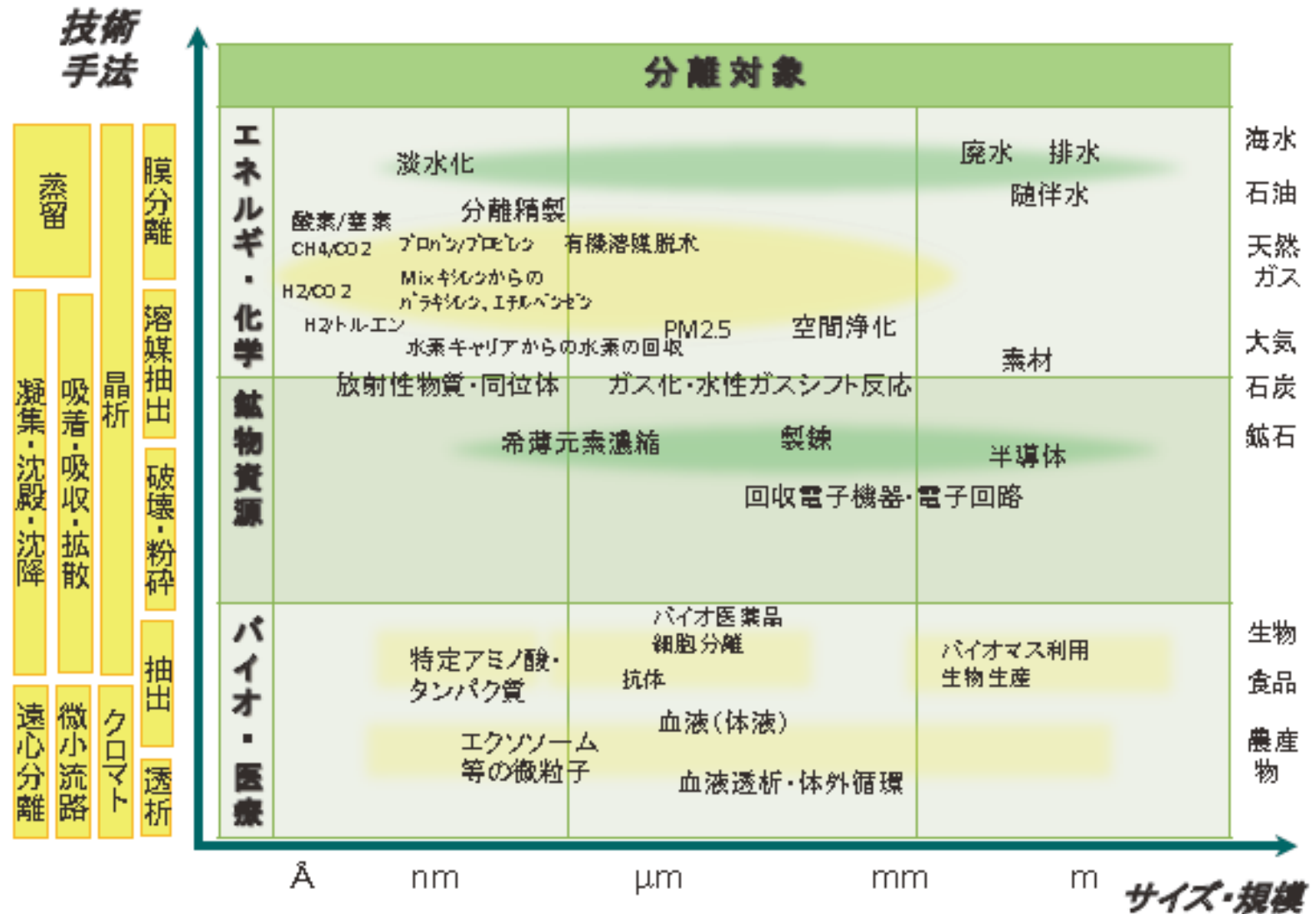


# 分離機能材料・デバイス・システムの 研究開発戦略の視点

- ✓ 分離技術に革新が求められる領域を抽出
- ✓ 求められる機能材料・デバイス技術・システムを検討
- ✓ 既存の分離工学がカバーする範囲や概念を拡張した研究開発戦略を提言



# 分離対象のサイズ・規模と分離方法



# 横断的共通基盤科学技術 の必要性

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

- 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



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・実装をまでをつなぐ

○ 鉍物資源・固体の分離  
現状と課題

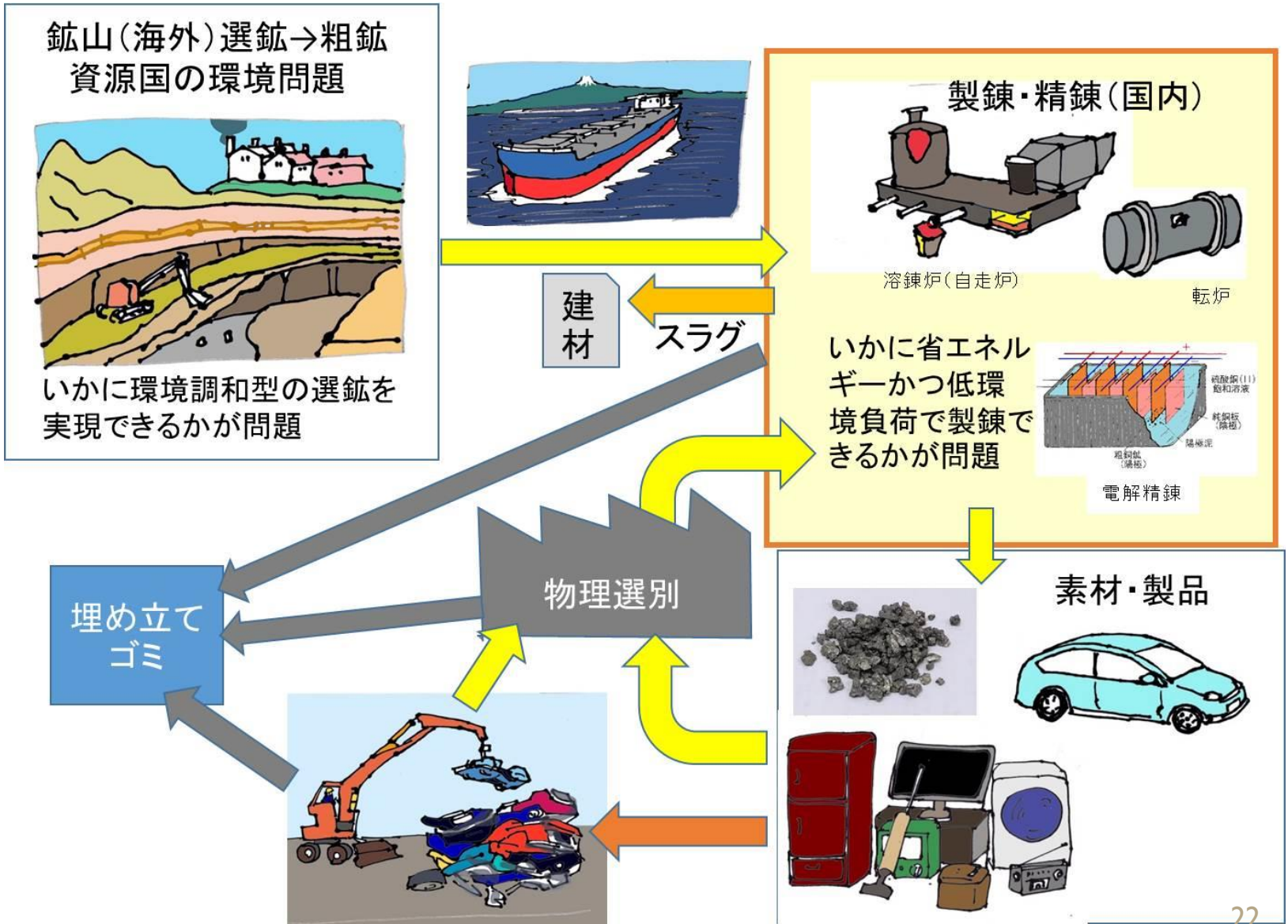
# 現代社会と鉱物資源

- 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。
- 近年は鉱石そのものの品位（鉱石中の金属含有量、比重、量百分率で表すか、貴金属の場合に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。





# 鉍物資源のフロー全体における分離ポイント



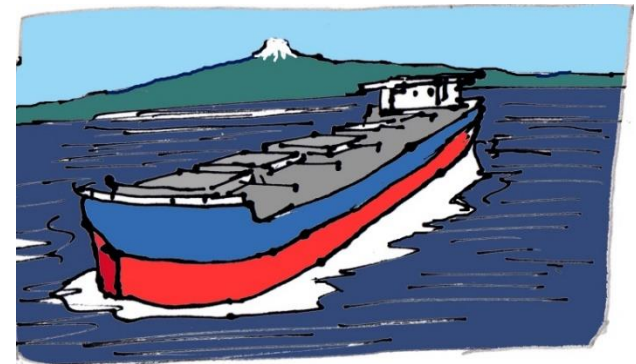
# 鉍物資源分離技術の現状(1)

- 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、鉍山の奥地化や高地化、深部化が進み、鉍石が低品位化することで、採掘・選鉍コストが増大する。
- 低品位化に伴う、環境対策、難処理鉍化（鉍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%を超える鉍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鉍している。



## 鉍物資源分離技術の現状(2)

- 日本は、鉍山現地の選鉍工程で銅品位を20%以上に高めた精鉍を、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鉍物資源分離技術が必要になっている。



- 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。





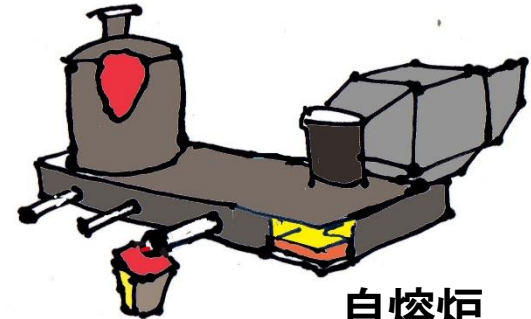
# 鉍物資源分離技術の現状(3)

- 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。



自熔炉

# 製錬技術イノベーション

## 製錬・精錬とは元素分離のこと

分離するためには、それぞれを2相に分けることが必要



### □ 液相と気相

Fe:鉄鉱石 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) をFeと $\text{CO}_2$ (CO)に分ける。

Cu:カルコパイライト( $\text{CuFeS}_2$ )からCuとFeOと $\text{SO}_2$ に分ける。

### □ 固相と気相 (Mg:ピジョン法)

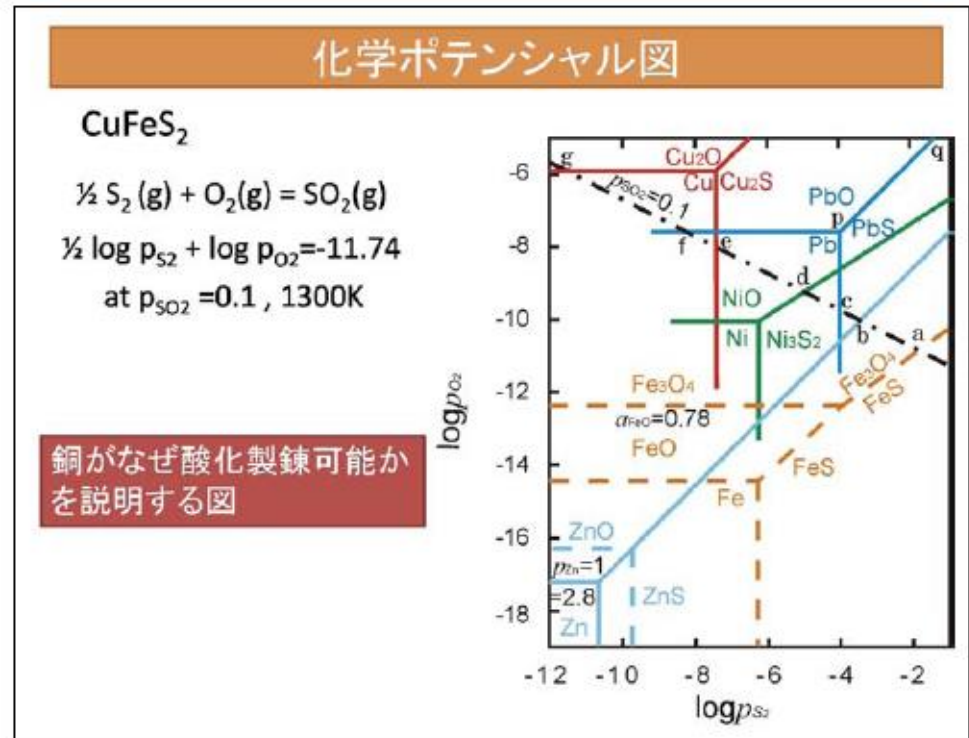
### □ 液相と固相 (NiとFe:液相と固相 (沈殿))

### □ 液相1と液相2 (希土類:溶媒抽出、Fe:メタル・スラグ)

### □ 固相1と固相2 (硫化物と酸化物:浮遊選鉱) ← 選鉱

# 銅製錬と化学ポテンシャル

- 銅製錬に還元剤は要らない。酸化製錬といって、カルコパイライト (CuFeS<sub>2</sub>) に空気を吹きつけるだけで金属の銅ができる。  
その途中で鉄も分離する必要がある。また、銅も分離する必要がある。カルコパイライトに酸素を吹きつけて、酸化物の融体 (スラグ) と硫化物の融体 (マツト) の両方とも高温1,100 度ぐらいで液体にして、金属の銅を作るプロセスである。(貴金属のリサイクルも最後は、銅製錬工程を利用して銅との合金として取り出す。)
- 銅がなぜ**酸化製錬**が可能かを説明する化学ポテンシャル図がある。横軸に硫黄分圧  $p_{S_2}$ 、縦軸に酸素分圧  $p_{O_2}$  のそれぞれ対数をとる。
- 現実のオペレーション線は、金属の銅の安定領域を通るが、金属鉄の安定領域を通らないことが、この図からわかる。
- 硫化物と酸化物、硫化物と金属が分離できることがわかる。
- この図があるのは、過去の製錬技術の蓄積のおかげである。




# これからの製錬研究への期待

- 金属製錬の研究者と無機化学の研究者の相互交流がさらに進み、製錬で培った知識、ノウハウ、学問を多方面に発展し、応用できて欲しい。
  - (1) 放射光を活用したサブミクロンレベルでの現象のその場観察  
(チタン還元の実タイム計測)
  - (2) 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
  - (3) 電解製錬における電力の省力化
  - (4) チタンの新製錬法の確立  
(技術革新でレアメタルをコモンメタルに)
  
- 研究の進展でもたらされる未来は、
  - (1) 技術力の強化による製錬業の永続的な国内存続可能性の向上
  - (2) 時代における画期的な新商品開発力の提供。
  - (3) あらゆる国際産業へのプラスの相乗効果の期待。
  - (4) リサイクル社会（工程内リサイクルと市場からのリサイクルの両方）の継続的な進展による世界的な環境保全への貢献

# リサイクルにおける分離技術

- リサイクルで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**（粉碎等による物理選別）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。

**AG/SAGミル**



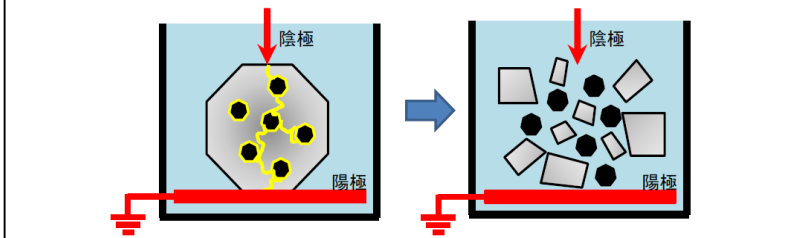
ボールミルよりも筒の長さが短いミル  
 (大型中心に世界で数百の導入例)  
 ボール無し又は少量のボール  
 内壁のリフタで粉碎媒体を持ち上げる

→ボールやロッドミルに比べてソフトな粉碎

- ◎粒子自身の硬さや脆さに比べて異種粒子境界面が弱い試料では弱面(異相境界など)で破壊が起こる
- ◎グレインサイズ、結晶サイズ程度までしか粉碎されず、微粉の発生率が少ない
- ◎コンタミが少なく、破断面が平滑で選別性が良い
- ◎粉碎コストの低減が可能

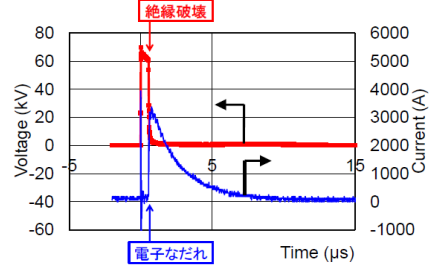
×フィードの硬さなどの粉碎性や粒度分布によって結果が大きく変わるため、粒度調整、オペレーティングが困難

鉱石の粗砕で大幅なコスト削減



陰極  
陽極

圧縮力(1)  
引張力(1/10~100)



絶縁破壊  
電子なだれ

電圧(kV)  
電流(A)

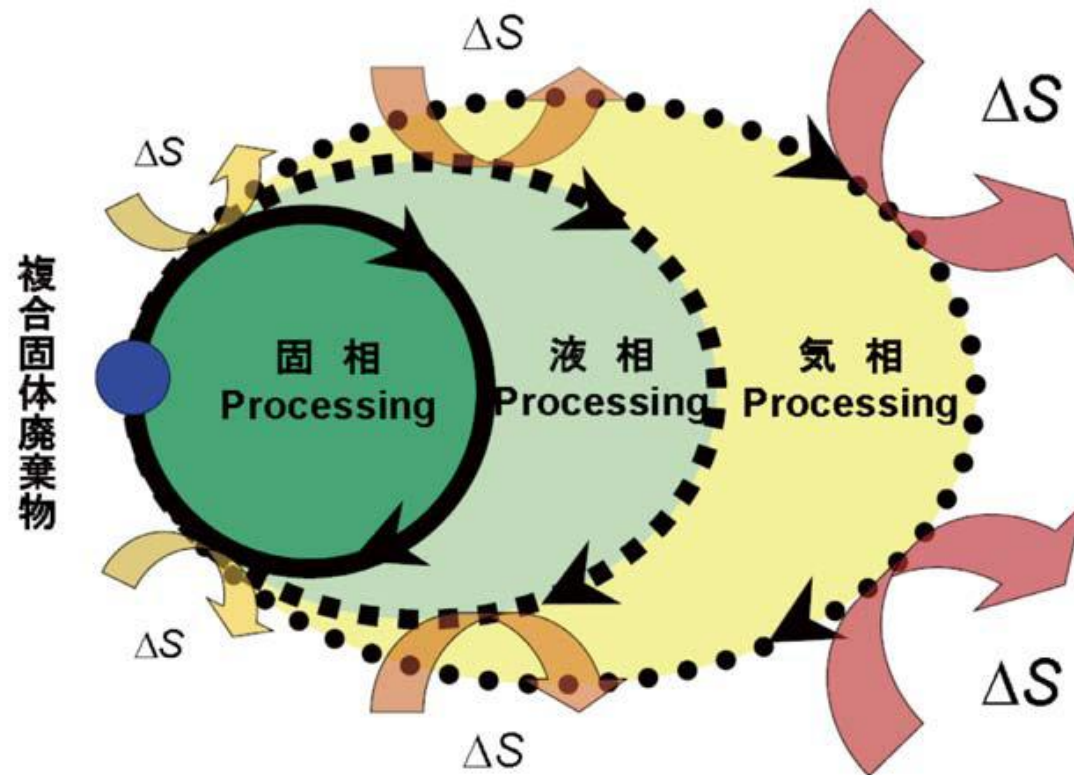
Time (μs)

**電気パルス粉碎説明図**



# 固体処理の基本コンセプト

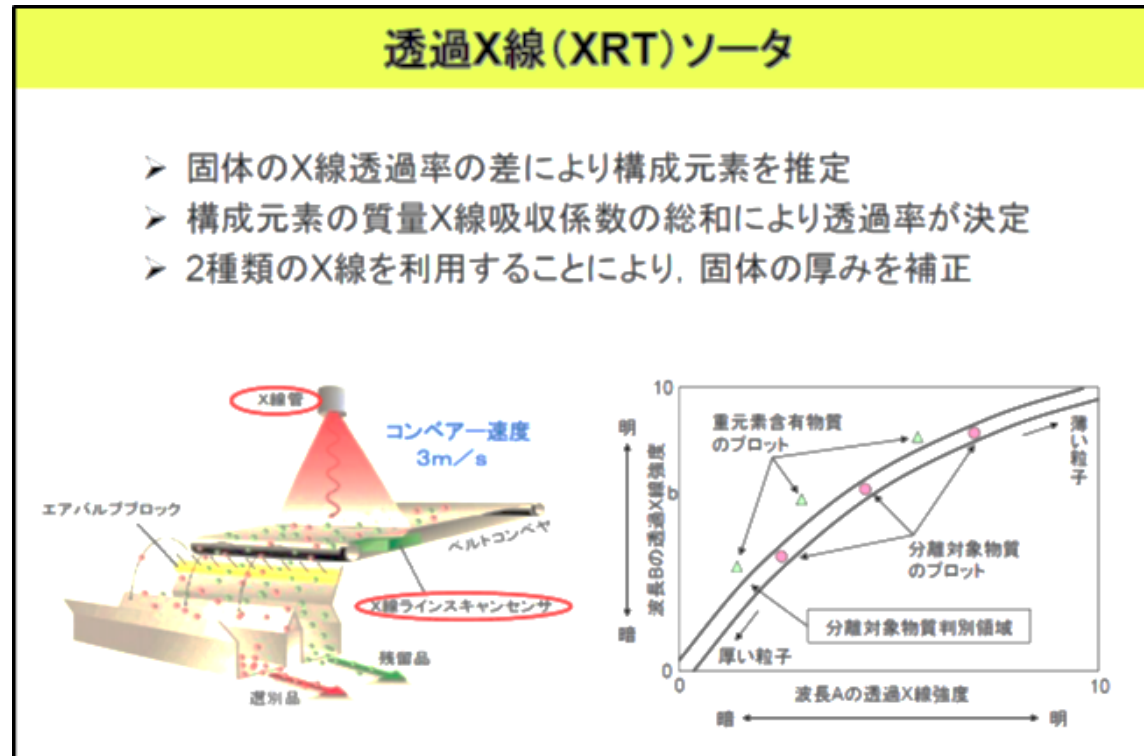
基本的には、固体の複合廃棄物があったときに、固相で回して、もう一度、固相で利用するわけであるから、固相内で回すのか、液相を介すのか、あるいは、気相まで介してしまうのかということになると、なるべく質を落とさずに固相のまままで利用したいというのが一つの発想である。



# 計測しながら分離する センサー援用ソーティング(SBS)

- 物理選別の対象を判別・同定するセンサーベーストソーティング(SBS)では、センサーによる非接触物性測定で、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。

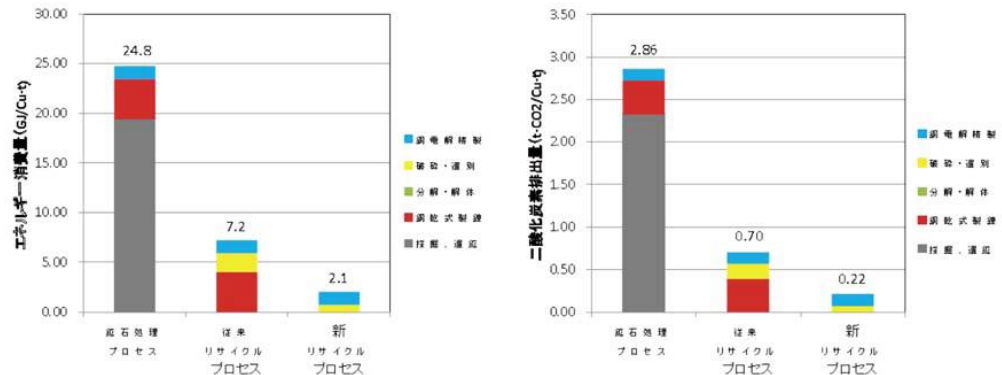
- 図は透過X線(XRT)を利用したソータである。SBSによりアルミ合金を組成に応じて選別できる。従来の処理フローで回収されたアルミ合金は鋳造品(自動車エンジンなど)に用いられているが、SBSを導入すれば、アルミサッシなどの原料である6063アルミ合金を選別・回収でき、回収物を溶解して得た再生塊の組成は6063アルミ合金のJIS規格を十分クリアできる。



# 金属生産・リサイクル

## スマート固相分離の省エネ性

- 金属生産プロセスでは、普通に壊して、普通に分けて熱で溶かして高純度化して、最後に電解精製というのが銅の最終的な産物、99.999%の銅をつくる組み合わせであるが、高精度で固相分離できれば、乾式製錬で高純度化するプロセスを削除することができる可能性がある。
- 図は、LCA（Life-Cycle Assessment）の結果であるが、従来の鉱石のプロセスでは24,8GJ/Cu-tのエネルギーがかかるが、新しいプロセスにすると、従来のリサイクルプロセスの3分の1ぐらいのエネルギーにできる。
- リサイクルでは、解体、破碎、選別、乾式製錬、電解精製というプロセスがあるが、うまく固体で分けることができれば、図の最下段のように二段階で入れかえることができ、エネルギー消費も3分の1ぐらいで済む。
- 産学連携がうまくいけば、大きな省エネ効果が生まれるだろうと考えている。





# 晶析イノベーション

## 高度な選択分離

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

### 晶析（分離操作＋粒子製造）

#### 1：分離・精製—目的成分のみを**分離**

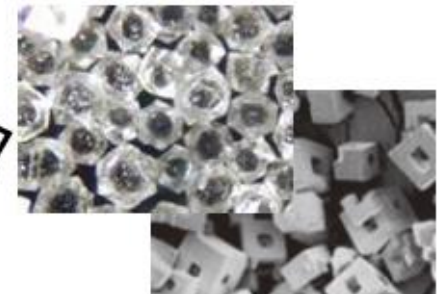
高度分離精製（有機物99.9%以上）  
異性体分離（光学異性体分離、構造異性体分離…）  
結晶多形制御 オイルアウトの阻止

Process Innovation

#### 2：粒子群製造—結晶性の**粒子群**として製造

単一分散結晶群製造（CV値20%）  
超微粒子製造

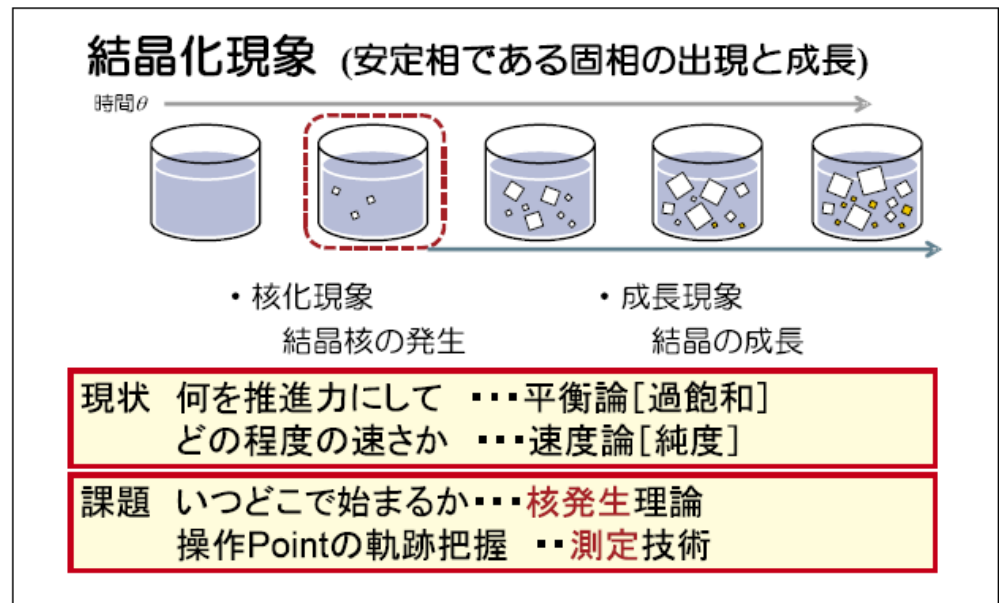
Product Innovation



# 晶析イノベーション

## 結晶化現象の解明がカギ

- 現状での晶析・結晶成長研究は、対象とする結晶化現象が、何を推進力にしているかを議論する平衡論、結晶化現象がどの程度の速さで起きているのかという速度論に関しては進んでいる。
- しかし図のようにある混合物の溶液の中から純粋なものが析出する結晶の核発生がいつどこで始まるかという核発生の理論と、結晶化が進んでいく際の溶液の状態がどこにあるのかという操作ポイントの軌跡についてはまだよくわかっていない。
- 核発生理論と測定技術がボトルネックになっていて、この解明がブレークスルーに通じる。

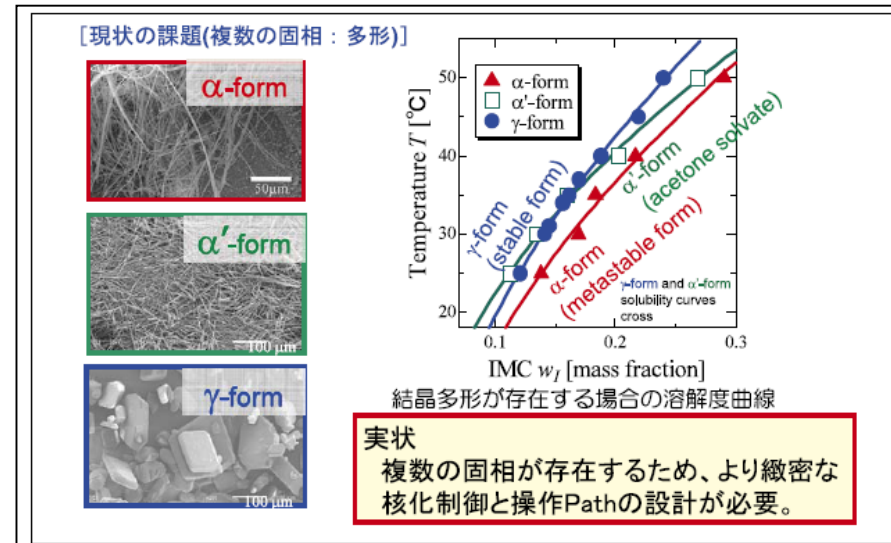
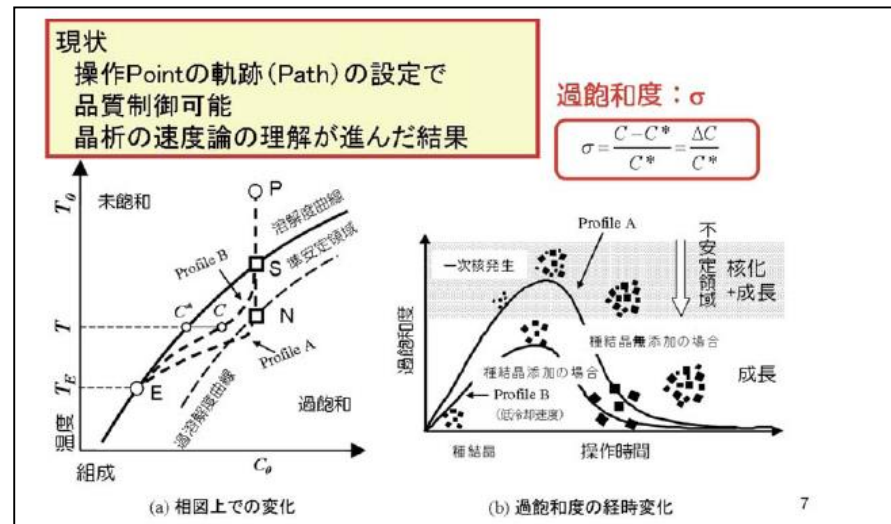


# 晶析イノベーション

## 操作ポイントの軌跡の設定が重要

操作ポイントの軌跡が、今どこにあるのかということが把握できれば、品質制御は可能である。右上図(a)である液をP点から冷却してSで核が発生すれば、その核が溶質成分を消費し始めるので、操作ポイントが相図上で左側に動く。これより結晶の推進力もわかる(右上図(b))。

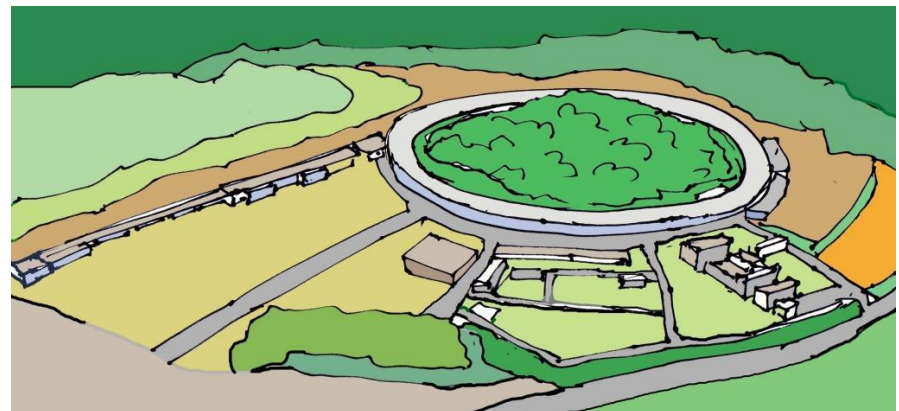
結晶多形(複数の固相が存在)がある場合、右下図のように分子構造は全く同じだが結晶のパッキングの異なる状態が存在する。求める結晶を析出させようとすると相図上で狭い領域を操作ポイントの軌跡を通さなければならない。より緻密にどこで核発生させどこを通すかという設計が重要になる。



○ 固相分離において分析・計測技術に求められるもの

# 鉍物資源分離における 分析・計測技術の課題

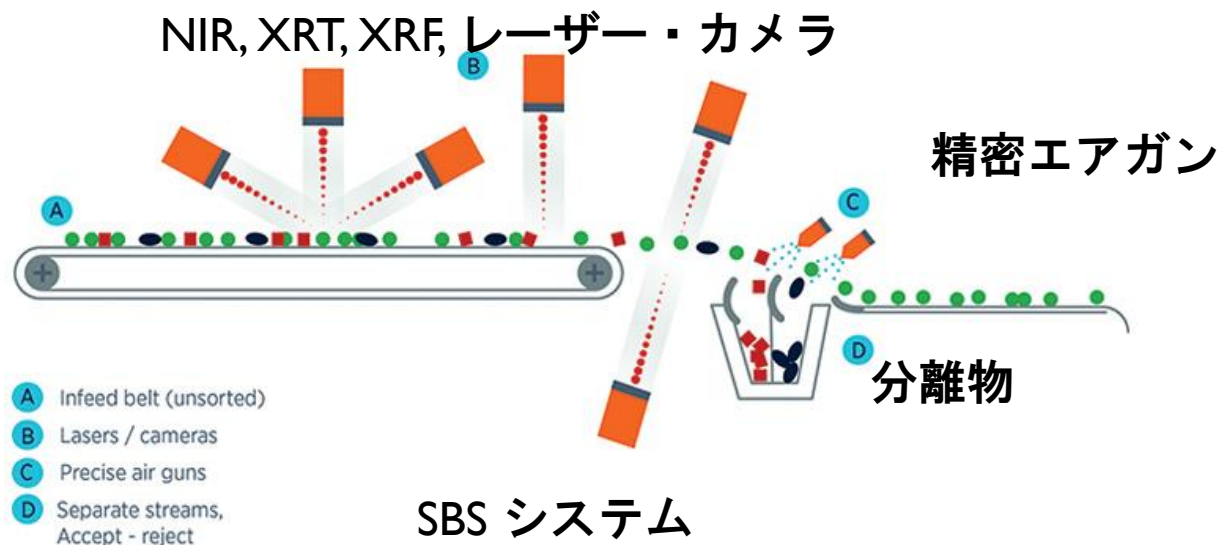
- 製錬産業に代表される鉍物資源・固体の分離は、上述の石油化学工業における分離工程と同様に、成熟した技術分野と見られがちである。
- しかし、近年のナノ計測・評価技術、ナノ加工技術、計算科学・モデリングなどの進展を取り込むことによって、大きく変貌することが期待できる。このような基礎研究から新たな科学技術が生まれる波及効果も期待されよう。
- **高温での固体物質分離プロセスを、放射光によってその場観察する技術**が確立すれば、低品位粗鉍の処理・不純物成分制御のみならず、他の高温プロセス分野への応用が期待され、その波及効果が期待される。





# 資源リサイクルにおける 分析計測技術の課題

SBS(Sensor-based Sorting)においては、分離したいものの比重、磁性、硬度などの物性値、色、形状などの画像情報、NIR(近赤外)、EC(渦電流：金属伝導率の非接触測定)、XRT(X線X線透過率による同定)、XRF(蛍光X線による分析)、LIBS(レーザー誘起破壊分光)などの計測技術が使われる。



# 資源リサイクルにおける分析計測技術の課題SBS に利用される計測(I)

- 物性：比重、磁性、色、形状、硬度、NIR(近赤外)、EC(渦電流：金属伝導率の非接触測定)、XRT(X線X線透過率による同定)、XRF(蛍光X線による分析)、LIBS(レーザー誘起破壊分光)などが使われる。

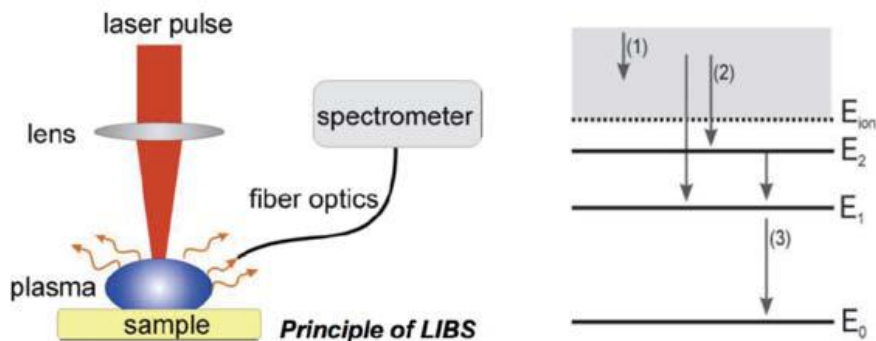


ソーティング技術というのは、基本的にいろいろな電磁波を照射して、反射特性とか、透過特性を見るが、前のスライドの例で使ったのは、透過エックス線と蛍光エックス線ソーター(XRF)である。XRFソーター、7～8年ぐらい前に開発された。空气中で検出器を20センチ試料から離して、およそ3m/sぐらいの速度で動いている状態で、XRFを検知する技術。センサー感度の向上と、バックグラウンドを消去するソフトウェアの高度化によって実現した。

# 資源リサイクルにおける分析計測技術の課題

## SBSに利用される計測(2)

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



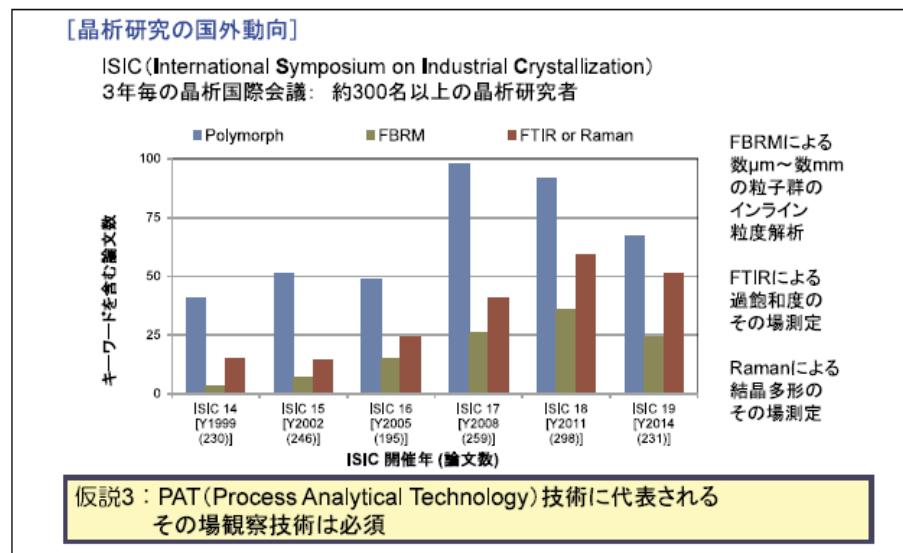
水素からウランまで全元素検知可能 (ppmオーダーにて), 1mmサイズ粒子も測定可



# 晶析における 分析・計測技術の課題(1)

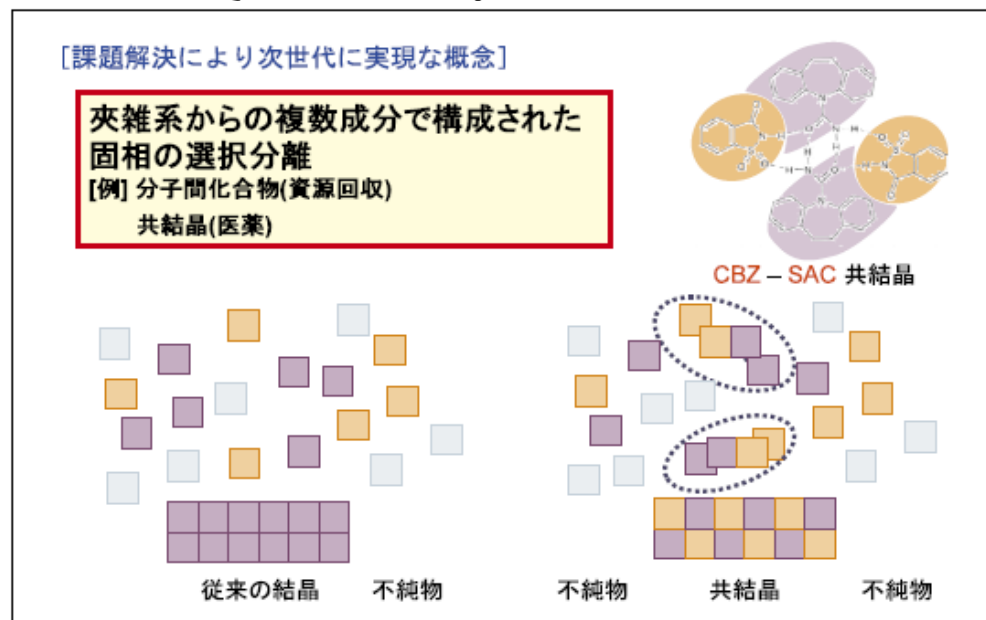
- 図は国際会議で議論されたトピックスの統計を示す。結晶多形に関する議論は右肩上がりになっている。
- FBRM\*（数ミクロンから数ミリメートルの粒子群をそのままインラインで分析する装置）を使った研究が伸びている。
- FTIR\*\*によって過飽和度、溶液の状態をそのまま観察する研究や、ラマン分光によって析出した結晶多形の分析に関する研究が伸びてきている。
- 「測定技術」では、晶析の分野だとPAT+と呼ばれる技術に代表されるその場観察技術が必須となっている。

\*Focused Beam Reflectance Measurement  
 \*\*Fourier Transform Infrared Spectroscopy  
 +Process Analytical Technology



# 晶析における 分析・計測技術の課題(2)

- 結晶多形のような複数の固相系がある場合でも、核化と操作ポイントの軌跡を設計することで対応は可能であるし、夾雑系から複数成分をある組成で析出させるといったニーズにも対応が可能である。
- 研究領域としては、どこで相変化を起こさせるのかという核発生の理論、そしてその後、どのような状態で結晶化が進んでいくかという操作ポイントの軌跡の把握などが、今後ますます重要となると考えられる。



# 横断的共通基盤科学技術 （気体・液体・固体・バイオの横断）の課題

- 学術界において既存の学会・コミュニティ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。

# おわりに

- JST-CRDSで行った科学技術未来戦略VWS報告書「分離工学イノベーション」および、戦略プロポーザル「分離工学イノベーション」に基づいて、固相分離技術における課題および、分析・計測技術に求められる課題をまとめた。
- 気相・液相・固相・生体を問わず分離は分析・計測技術と表裏の関係にある。JAIMA関係各位の貢献に期待する。