

革新的技術戦略

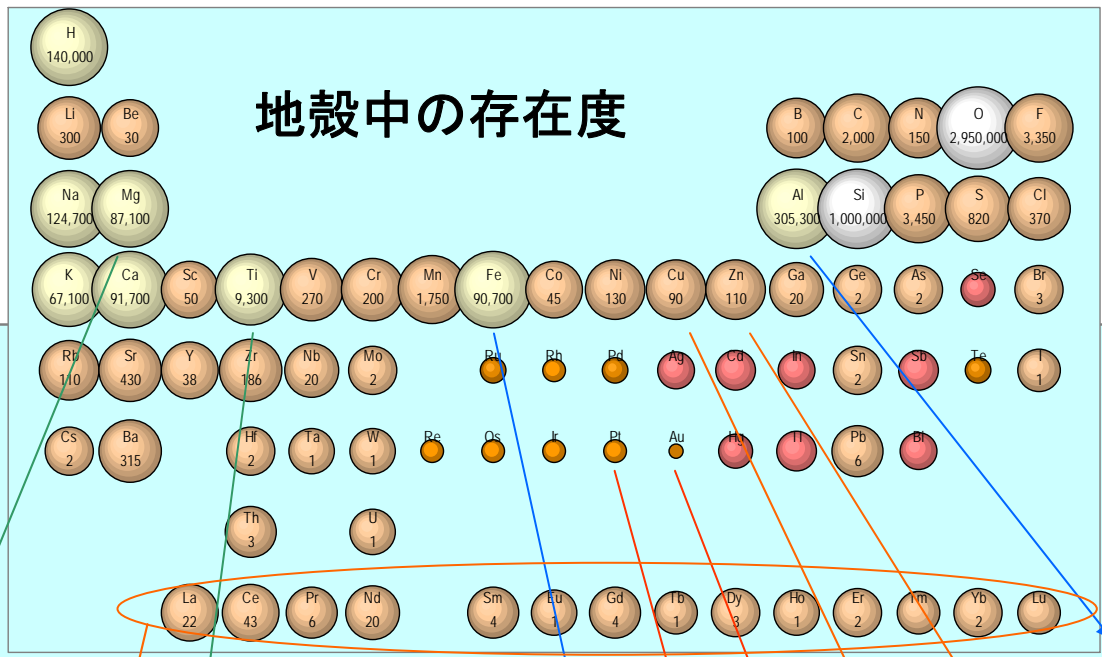
「レアメタル代替材料・回収技術」 元素戦略的視点からのアプローチ

独立行政法人 物質・材料研究機構
理事 馬越 佑吉

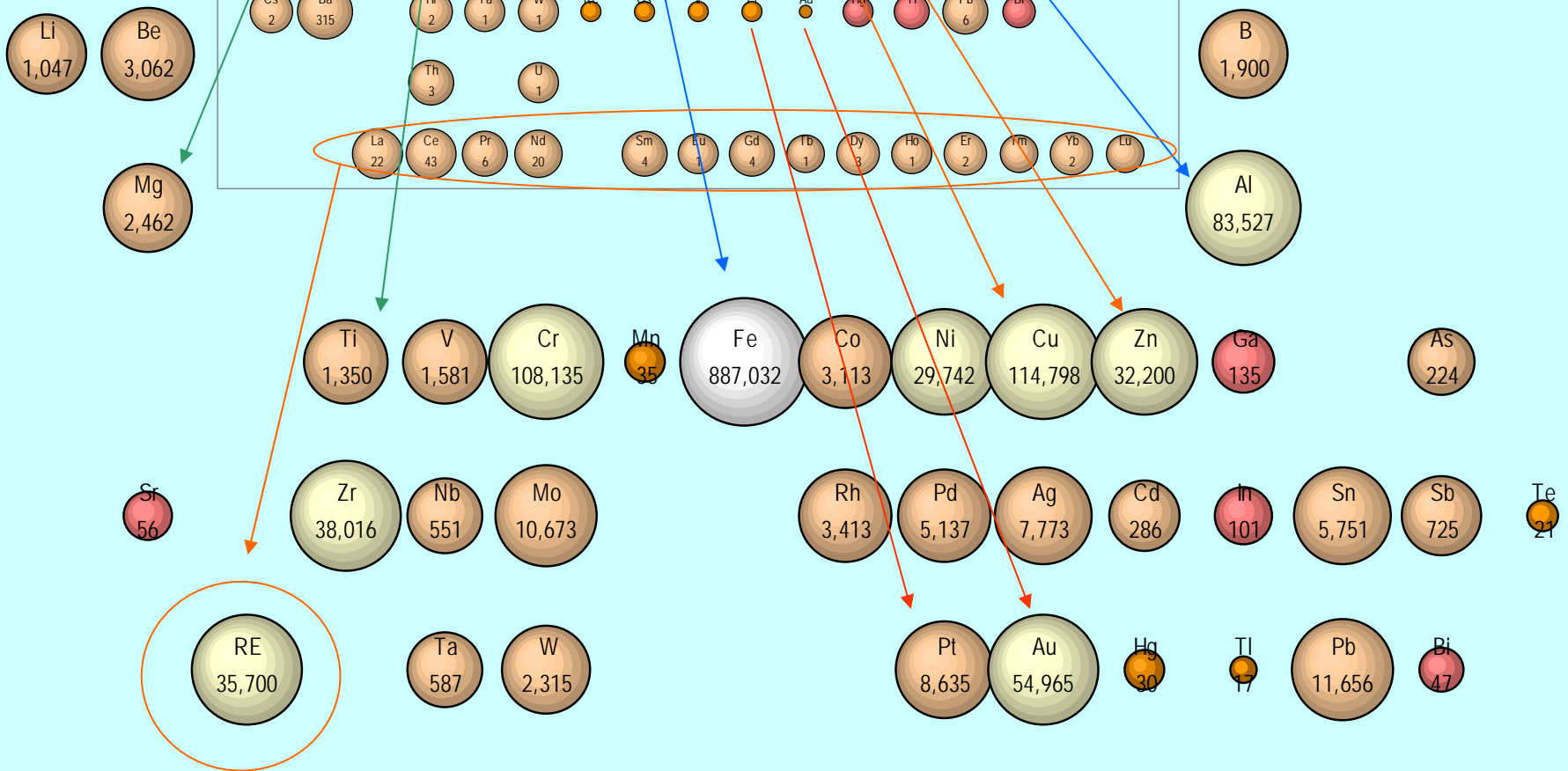
科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会
第8回ナノテクノロジー・材料委員会
平成20年5月28日 16:00～

資源問題

地殻中の存在度



市場規模



「ありのまま」の量と人類の活用能力のアンバランスが資源問題の根源

資源(レアメタル)問題解決に向けて

元素戦略(文科省)

元素の振る舞いを深く理解し、科学的立場から
下記の項目に注目して研究を展開

- * 豊富で無害な元素による代替材料の研究
- * 戦略元素の有効機能の高度活用
- * 元素有効利用のための実用材料設計技術

希少金属代替材料の開発(経産省)

- * 特定の元素に絞り戦略的に使用量削減、代替金属の探索

元素戦略研究の基本要素

科学的要素と
総合化、具現化
のフェイズ

実社会での問題解決のための戦略・社会技術
トータル・デザイン (政策選択、製品選択)

減量戦略

代替戦略

循環戦略

規制戦略

トータル・デザイン (材料設計)

→③ 元素に注目した複合機能の解析と設計

個別イノベーション要素を包括的に結合し、目的の主機能の向上以外にも材料が実際に使用されるときに求められる熱膨張率、弾性率、熱伝導度、硬度などの多面的諸性能も配慮できる総合的設計技術

インターフェイス制御 構造制御

→① 豊富で無害な元素からなる高機能材料で代替

結晶方位、結晶サイズなど構造に依存するもの、さらには、析出物の界面や表面の酸化物層など複数要素のインターフェイスに依存するそれぞれ構造および相互関係を制御することで目的機能を発現させる

成分制御

→② 元素または合金の有効な機能の探索

元素のもつ有用な機能を明らかにし、引き出すことであり、機能発現の必須成分、その量的最小限発現単位を明らかにし、類似成分間の代替の可能性を見出す

リアライズ (社会における
実使用のための技術)
マテリアライズ (新物質を使える
材料にする技術)

イノベーション要素

材料科学領域

構造体

複合物

界面・多結晶

結晶・非晶質

分子

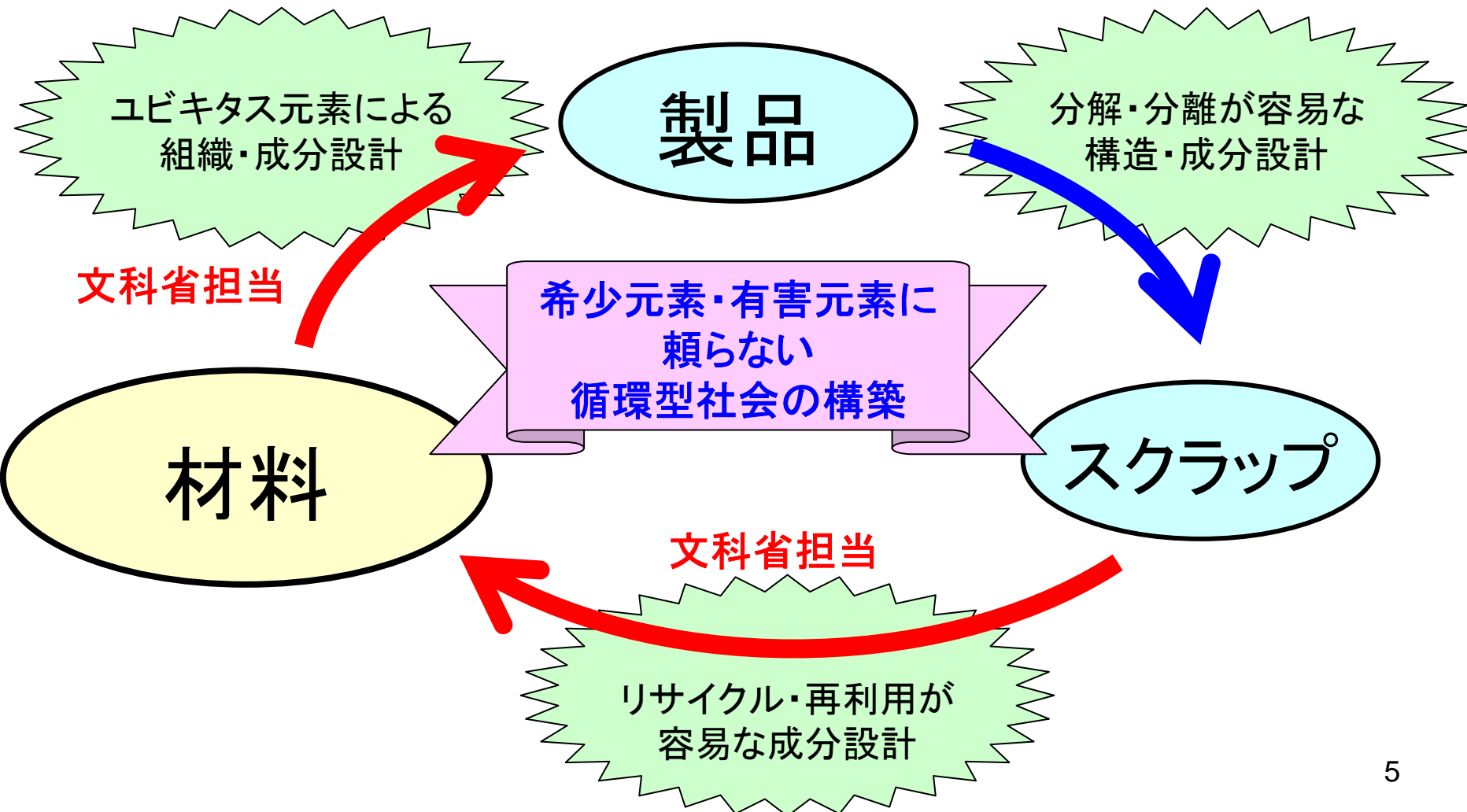
機能の出現・制御要素の階層

参加学協会

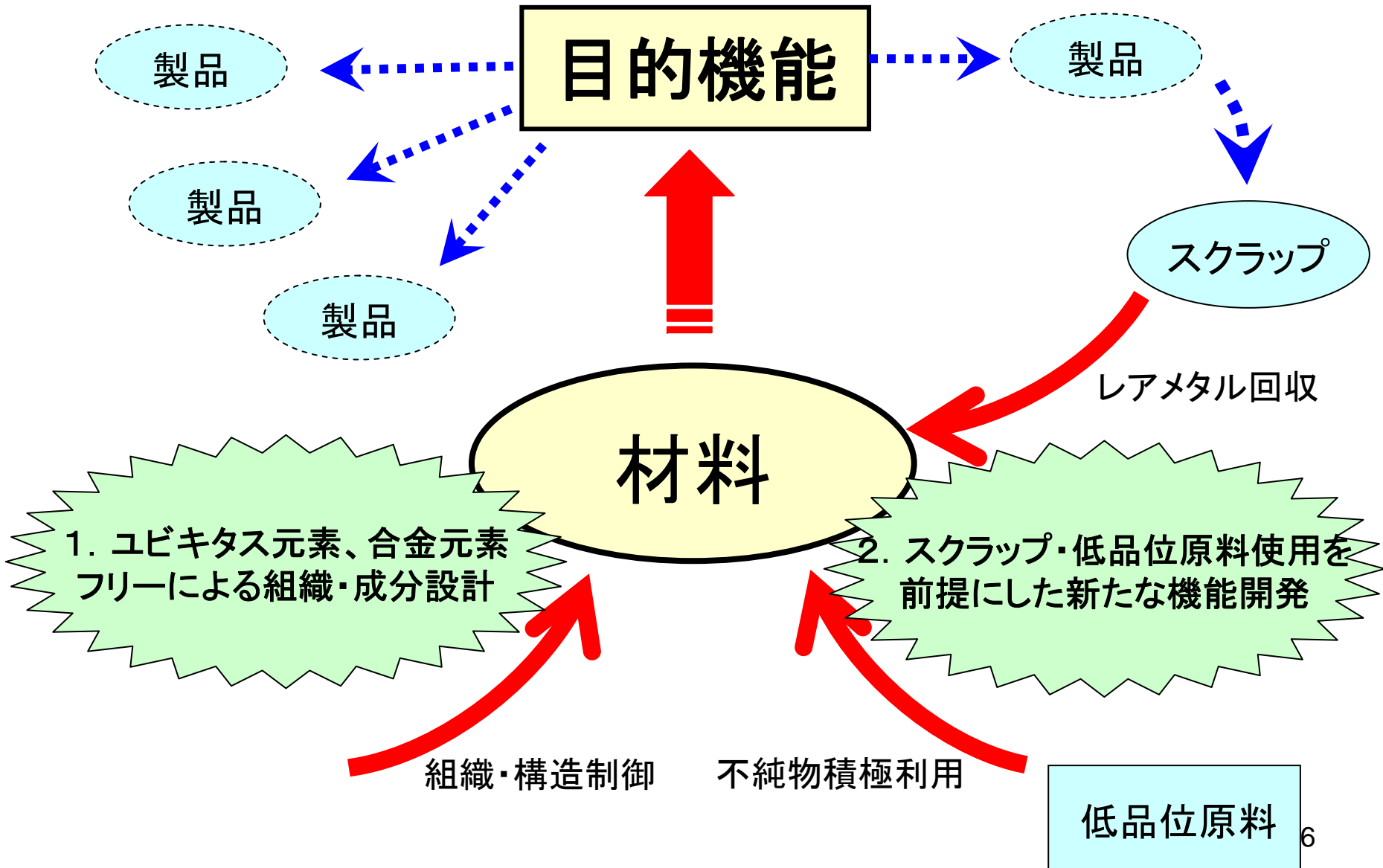
日本金属学会、軽金属学会、資源・素材学会、日本鉄鋼協会、日本セラミックス協会

元素戦略の推進－3省連携

★経済産業省、環境省、文部科学省の連携による革新的技術
「レアメタル代替材料・回収技術」の推進イメージ



文部科学省の課題



課題設定の考え方

1. 合金元素フリー、ユビキタス元素利用による組織・成分設計

— 希少元素を使わない —

- ・希少元素をユビキタス元素や同等の機能を発現する組織構造で代替える技術の開発
- ・希少元素の材料中での存在状態と役割を解明
- ・目的とする材料機能/性能を設定し、これに必要な元素機能や組織を開発

2. スクラップ・低品位原料使用を前提にした新たな機能開発

— 希少元素を再利用する —

- ・スクラップからレアメタルを回収して再利用するための単純な精錬プロセス開発
- ・不純物を含んだ成分を前提にした新たな機能/性能開発
- ・低品位原料から不純物を積極的に利用する技術の開発

**1. 合金元素フリー、ユビキタス元
素利用による組織・成分設計**
— 希少元素を使わない —

使用している元素の本当に果たしている役割は何か

「物質の性質とは何か」からの議論を

機械的性質	→	変形能	→	原子配列の乱れ、格子欠陥
静的材質	→	原子の弾性的挙動	→	原子の結合力
化学的性質	→	電子雲相互作用	→	最外殻電子状態
輸送的性質	→	電子状態チャンネル	→	メゾスコピック
量子的性質	→	電子励起状態	→	電子密度関数制御
エレクトロン、光子、(スピン)				
核子的性質	→		→	クォーク

物性理論が先行した材料設計を

説明から設計・制御へ

多様な
制御 9

全面代替へのアプローチ

機能発現メカニズムの他元素代替

- Case1 原子径、イオン径の同等性
- Case2 電子軌道の同等性 (化学代替)
- Case3 輸送体の同等性
- Case4 欠陥構造の同等性
- Case5 界面構造の同等性
- Case6 隠れた機能の現出(妨害因子の排除)
- Case7 マクロ機能の転換

極小領域機能化へのアプローチ

- Case1 発現のミニマム要素の解明
- Case2 局在現象の利用
表面局在、界面局在
- Case3 ナノ複合による新規機能
- Case4 劣化・阻害因子からの開放

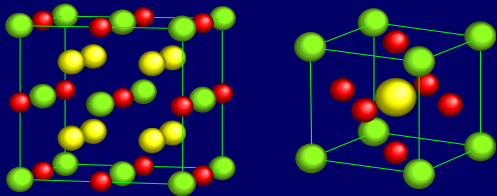
Fe族金属間化合物における元素シナジー効果

- ① 豊富で無害な元素からなる高機能材料で代替
- 全面代替 Case 6,7
- 極小領域機能発現 Case1,4

元素シナジー効果 例: Cu、Mn、Al 単体元素: **非強磁性** → Cu₂MnAl ホイスラー合金: **強磁性**
 電子構造+スピン+格子の関連制御により、Fe族元素本来には無い機能の発現

対応分野 **磁歪材料** (Tb, Dy)Fe₂ ⇒ Ni₂MnSn **磁気冷凍材料** Gd ⇒ La(Fe,Si)₁₃
熱電材料 (BiSb)₂Te₃ ⇒ Fe₂VAI **低熱膨張材料** ZrW₂O₈ ⇒ Mn₃CuN

格子選択と原子配列制御



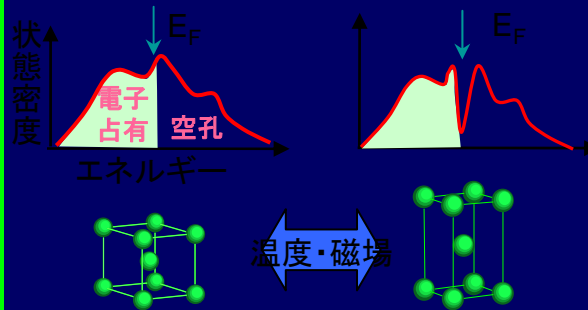
X₂YZ
ホイスラー

X₃YZ
ペロブスカイト

多元化を活用できる結晶系の選択

材料学的アプローチ
 規則・不規則変態制御
 相安定性、欠陥制御

シナジー効果による巨大物性制御

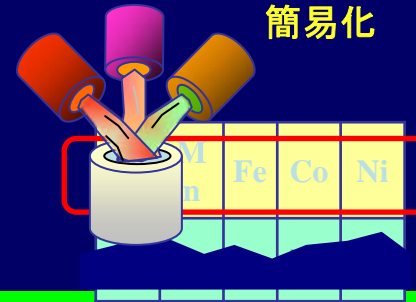


歪発生の例: バンド(電子構造)由来のエネルギーを下げるためE_F近傍のバンド変形 = 格子変形

材料学的アプローチ
 元素、組成最適化
 第一原理計算+分光実験

特異物性物質を機能材料へ

量産性向上 障害除去 プロセス簡易化



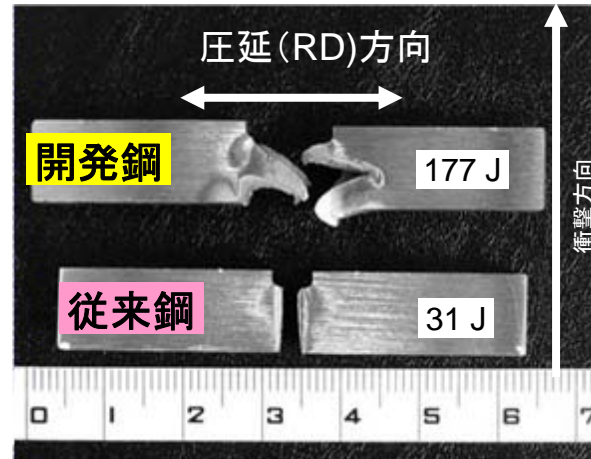
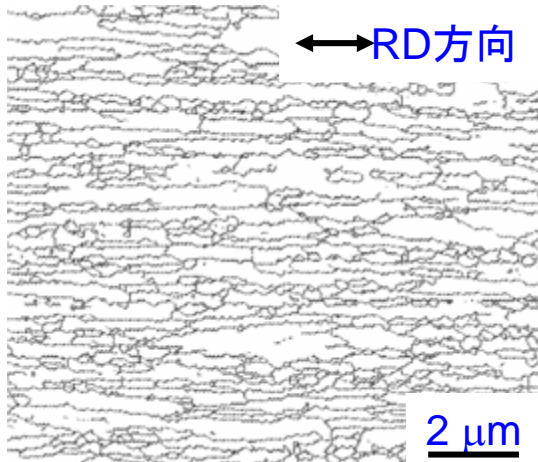
ユビキタス性を活かした材料製造

材料工学アプローチ
 溶解凝固+組織制御
 状態図把握

レアメタル削減かつ衝撃に強い超高強度低合金鋼

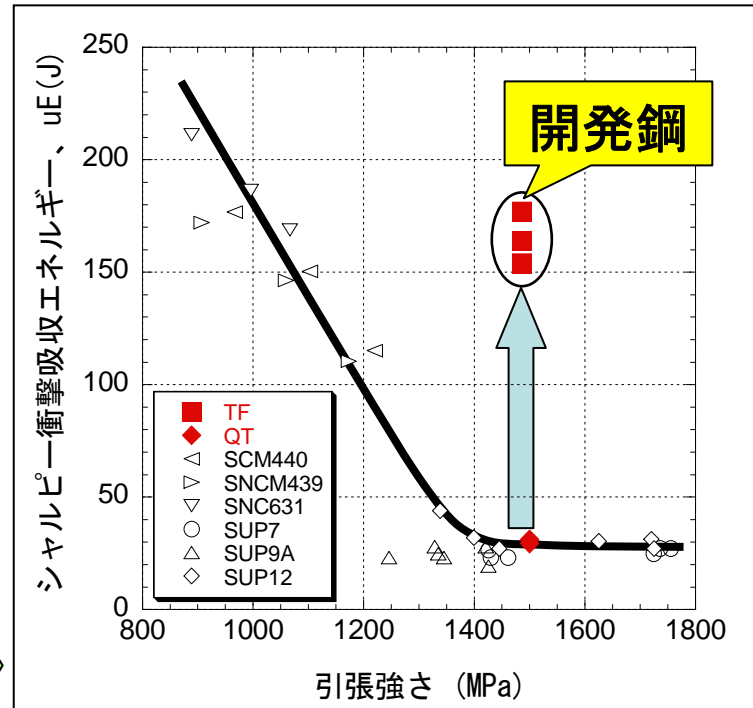
加工熱処理による超微細繊維状結晶粒組織の形成により、特殊な合金元素を使わずに、1500MPa級級鋼の高靱性化に成功 → 特殊鋼の領域にどこまで迫るか

0.6%C-2%Si-1%Cr鋼



短軸平均結晶粒径: $0.4 \mu\text{m}$
 $\langle 110 \rangle // \text{RD}$ 繊維集合組織

木材のように壊れにくい



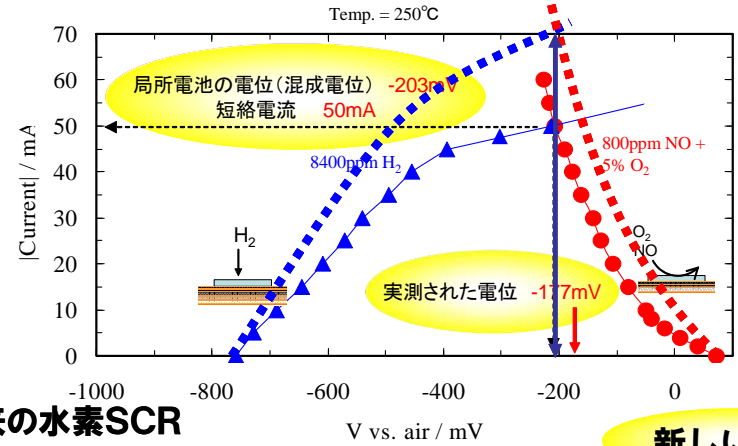
- すでにSCM440など実用機械構造用鋼にも適用が可能。
- Ni, Mo, V, Nb, Mnなどを必要としている特殊鋼の領域にこれからいかに迫っていくか!!

ナノスペース構造設計：ヘテロ界面の革新的機能設計・制御

全面代替、極小領域→元素または合金の有効な機能の探索

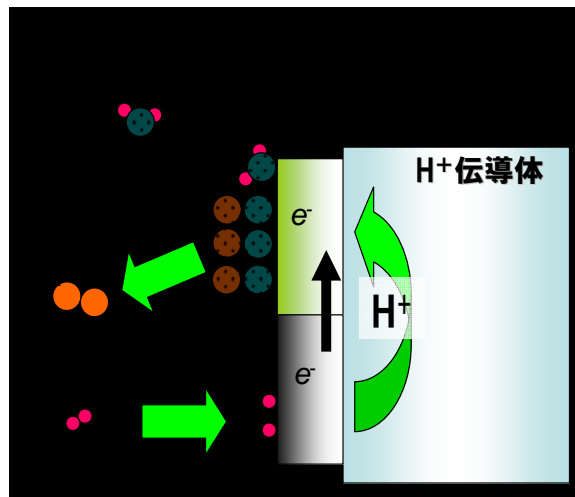
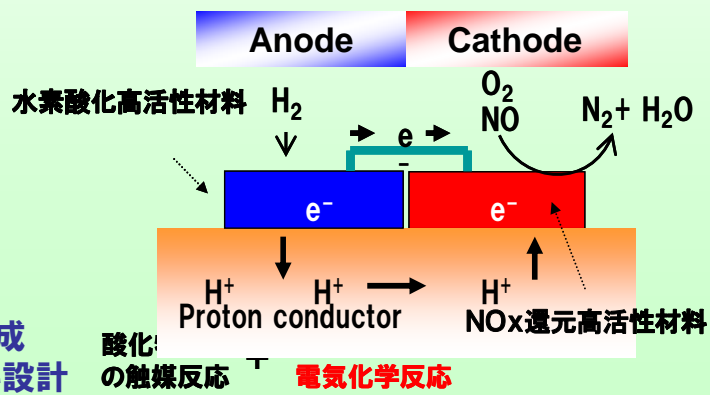
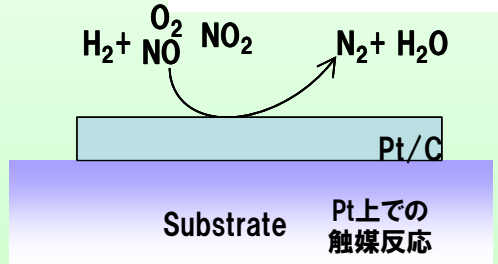
- ヘテロ接触・接合界面におけるイオン欠陥・電子欠陥濃度の特異な変調を利用
- ナノスケールにおける界面・表面近傍のイオン移動と電子移動を利用した革新的な化学機能をマクロ的特性として実現

ナノスケール局所電池を利用したNOx電気化学触媒

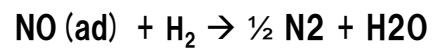
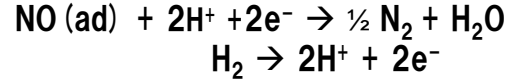


従来の水素SCR

新しい概念



•Red/Ox反応 → ナノ空間で分離



•反応サイト設計

- Ion: 酸点/塩基点
- Electrons (holes): 酸化/還元サイト

•多様な非対称電荷移動反応

← ナノスペース反応場設計

•触媒反応の素過程の解明

- 非白金系触媒の実現
- ナノ構造化による飛躍的高性能の達成
- 空間電荷モデルに基づいた最適材料設計

酸化の触媒反応 | 電気化学反応

**2. スクラップ・低品位原料使用を
前提にした新たな機能開発**
— 希少元素を再利用する —

人工物組成を活用した素材技術

従来

全量溶解して
親銅元素だけ
個別分離



Cu 19%
Al 9%
Fe 8%

Sn 1%
Ni 1%
Cr 0.9%
Pb 0.7%
Zn 0.7%

Ta 0.3%
W 0.2%
Ag 0.2%
Ti 0.2%
Au 0.03%



将来

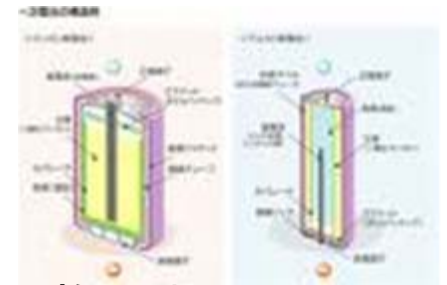
Cu 19%
Al 9%
Fe 8%

Sn 1%
Ni 1%
Cr 0.9%
Pb 0.7%
Zn 0.7%

Ta 0.3%
W 0.2%
Ag 0.2%
Ti 0.2%
Au 0.03%

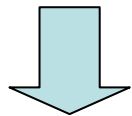
再生・分離しやすい
組成をベースにした
高性能素材の創出

例

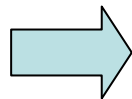


乾電池
Mn Znから

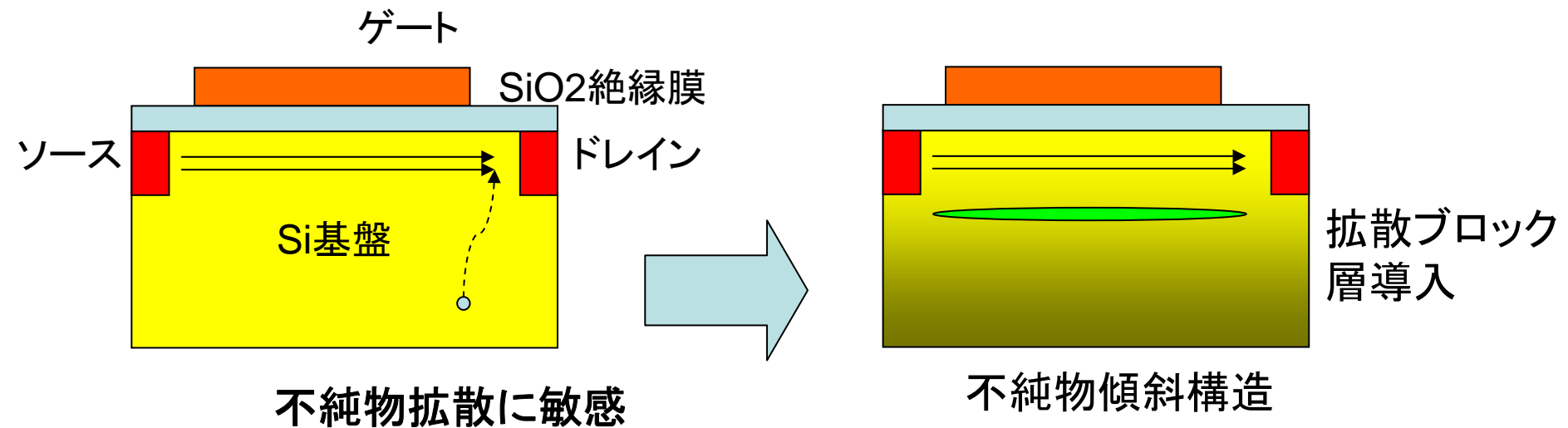
Mn-Zn ferrite



従来の
合金設計で
素材化



不純物にロバストな素材技術



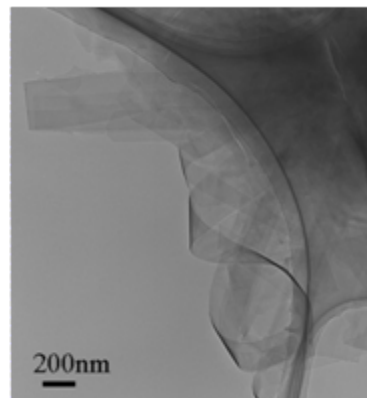
チャンネル部の高純度を確保しつつ
全体の不純物許容度を増す超構造

人工循環物質由来の機能物質

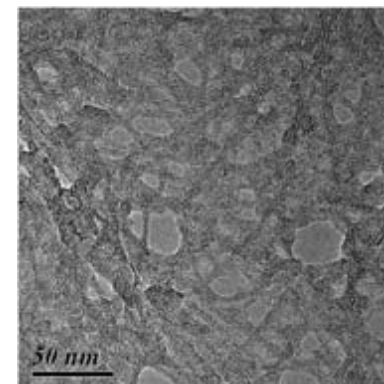
生産に伴う大量の人工複合酸化物の



わが国の物質フロー量
 鉄 1億トン
 セメント 7500万トン
 スラグ 4000万トン
 アルミ 4000万トン
 プラスチック 1500万トン

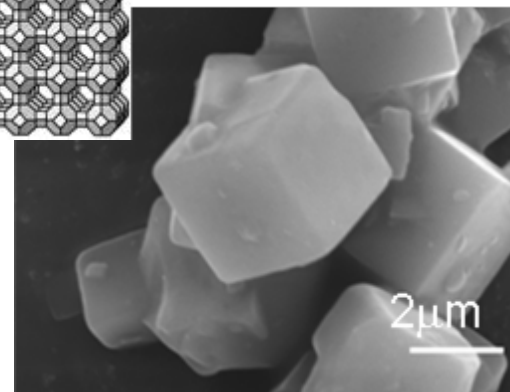
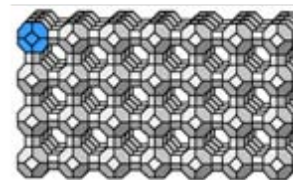


Si-Al-Mg-O-H系ナノシート



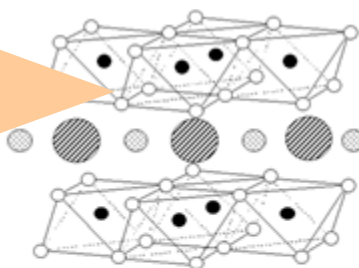
Si-Al-O-H系ナノチューブ

Silica, Lime, Alumina
 複合酸化物



Si-Al-Ca-Na-O-H系ナノポア材料

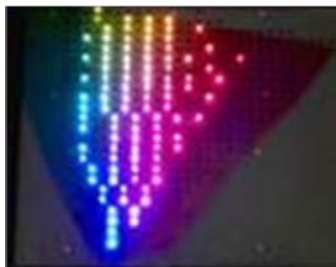
構造制御による機能性物質化



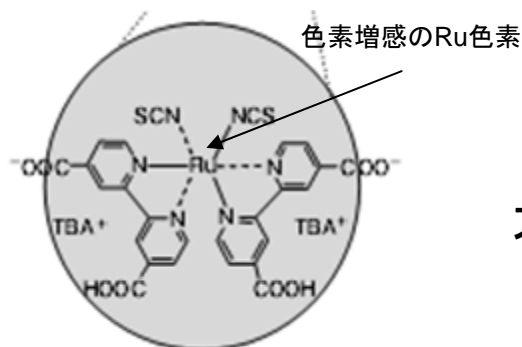
陰イオン吸着材料等の用途 18

極微量添加物質循環技術

赤色蛍光体: Y₂O₃、Gd₂O₃、Eu₂O₃
青色蛍光体: Eu²⁺
緑色蛍光体: La₂O₃、CeO₂、Tb₄O₇



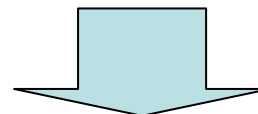
LEDのレアアース、
などは、**極少量**でも大きな効果



有機複合機能体中の
レアメタル元素

大量の資源はいらないが
リサイクルも難しい

そのため、やはり海外資源に依存

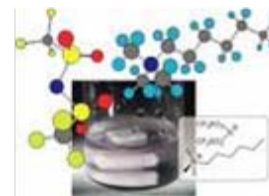


しかも、そのために
新たな難処理廃棄物を
発生させない技術が必要

極微量から、的確に高純度で取り出す技術

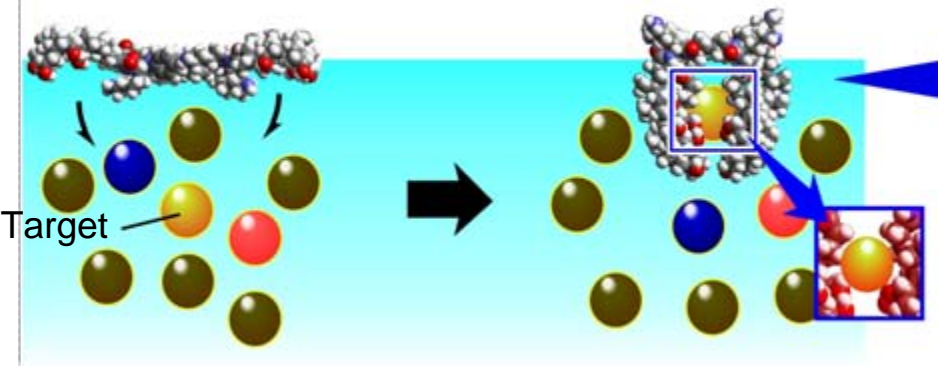
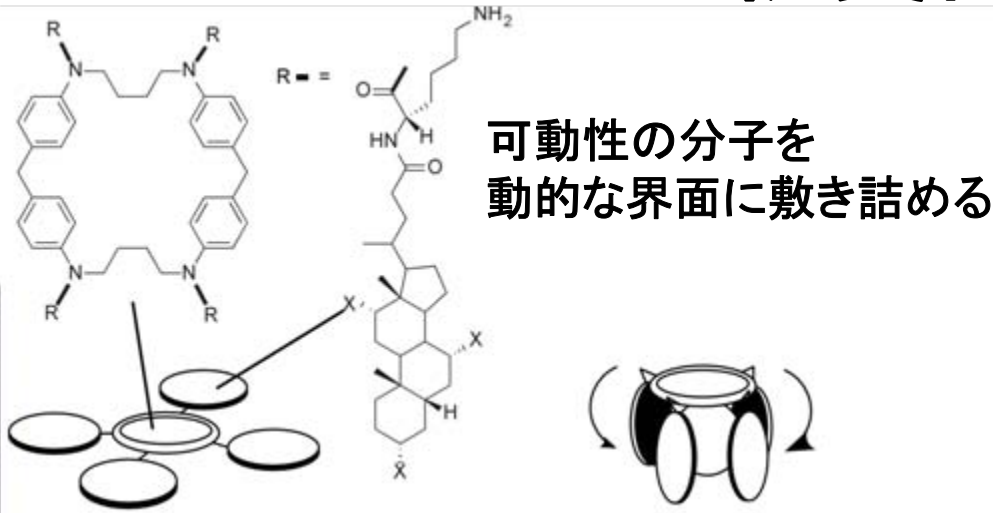


分子認識膜

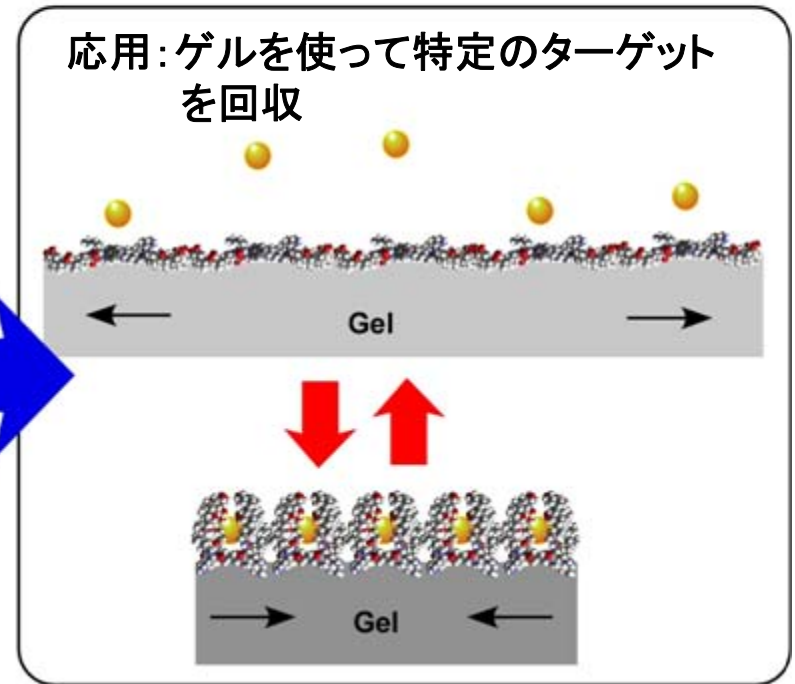


イオン液体

分子マニピュレーションによる選択的物質回収

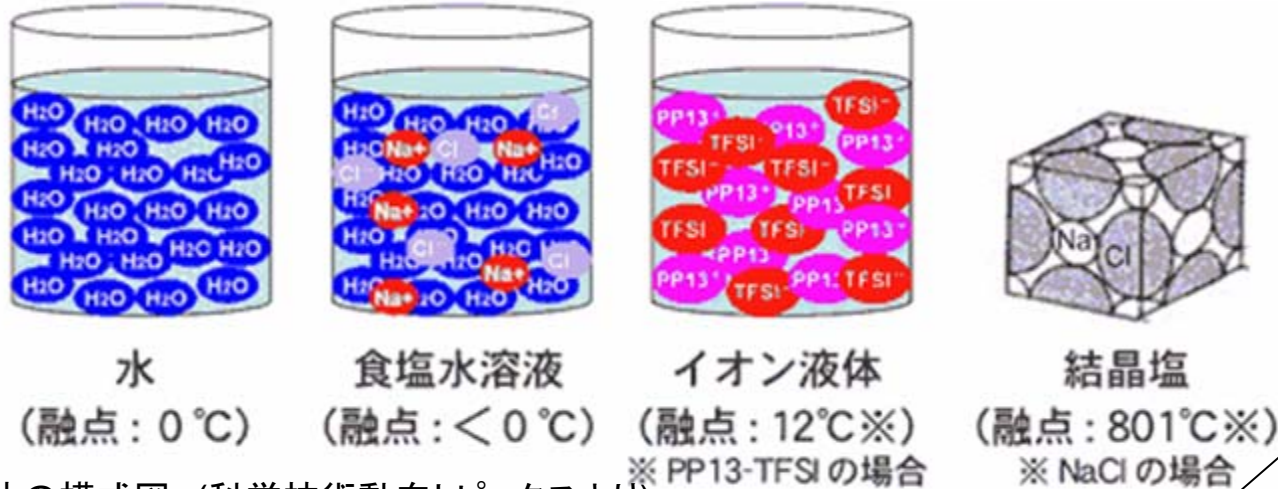


分子認識によって特定のターゲットを捕捉



電解質、太陽電池などの応用研究でも注目

イオン液体による微量元素抽出



複雑な組成中の
微量元素抽出に
最適

イオン液体の模式図 (科学技術動向トピックスより)

イオンのみの構造 → イオン伝導度が高い → **高い感受性**
 イオンの組み合わせで物性調節 → 親/疎水性、極性、粘性 → **優れた選択性**
 水、有機溶媒と分離 → **抽出、逆抽出の容易性**
 蒸気圧が極めて低い → 低環境負荷
 熱的安定性、何年生 → 安全

そもそも化学分析の微量元素濃縮技術として先行
 (「イオン液体研究のはじまりは分析化学か」山口、ぶんせき(2007)11)

革新的技術戦略 「レアメタル代替材料・回収技術」 の実施に向けて

- 文科省、経産省、環境省の連携、役割分担の明確化
- 革新的技術課題として推進する以上、文科省が責任を持てる体制が必要
 - * 募集、審査に深く関与し、その実施を強く推進
- 中間審査等で適切な軌道修正