

最先端・次世代研究開発支援プログラム
事後評価書

研究課題名	ナノ流体制御を利用した革新的レアアース分離に関する研究
研究機関・部局・職名	東京工業大学・原子炉工学研究所・准教授
氏名	塚原 剛彦

【研究目的】

化学的性質が極めて類似しているレアアースは、各イオンの単離が極めて難しく、その分離精製技術の高度化が不可欠である。一般的に溶媒抽出法やクロマト法が用いられているが、いずれも長時間・多段の工程が必要で、レアアースの相互分離が困難である。一方、我々はこれまで、 $10 \sim 100 \text{ nm}$ スケールの拡張ナノ空間では、壁面の静電的な効果が空間全体に波及して、分子クラスター（拡張ナノサイズに近い数百分子程）の特性が顕在化するため、バルク空間とは全く異なるユニークな溶液物性や流動特性（低運動性・高プロトン移動度など）を発現することを見出してきた（図1）。そこで本研究では、この拡張ナノ空間の特異性と表面化学を巧みに組み合わせ、
“拡張ナノ流路に溶液を流すだけで、標的レアアースを溶媒和イオンレベルで選択的に分離できる極限ナノデバイス”を構築すると共に、その分離メカニズムを明らかにすることを目的とする。表面機能の異なる拡張ナノ流路を作製し、流路壁面と溶媒和イオンとの静電相互作用・自由エネルギー・移動度等の僅かな差を顕在化させると共に、これらの差に応じて流れを制御することによって、バルク的操作では不可能な精緻なレアアース分離の技術と方法論を創成する。具体的には、以下の3項目の研究を推進する（図2）。

項目1. ナノ表面機能制御法の確立：

トップダウンとボトムアップナノ加工技術を駆使し、閉鎖空間である拡張ナノ流路の表面に、分子ふるいを可能とするナノ構造物・電荷の異なる自己組織化膜・原子価数調整しうるナノ電極等の物理化学的な機能を、多段階かつ部分的に付与する手法を確立する。また、光ラジカル重合反応等を利用して、拡張ナノ流

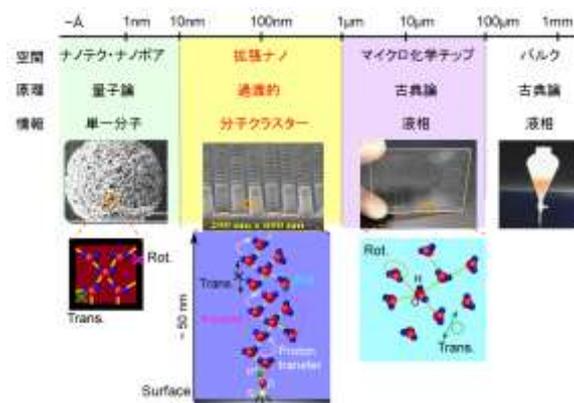


図1 拡張ナノ空間の特異性

路内に金属イオン選択性のある感応性高分子膜を固定化する。これにより、ナノ流路表面の表面電位・機能の自在な制御を実現する。

項目2. ナノ流体制御による分離試験と評価： 拡張ナノ流路内では、金属イオンと壁面間の静電相互作用の強さに応じたイオン分布が形成されるため、電荷分布と流速

分布の重ね合わせで分離の選択性が決まると期待できる。そこで本項では、試料溶液の送液制御および回収ができるナノ流体制御システムを構築すると共に、拡張ナノ管路内にレアアースを含む水溶液を送液して、レアアースの相互分離試験を実施する。誘導プラズマ分析装置(ICP)・ゼータ電位計・蛍光顕微鏡等の各種装置を用いて各イオンの濃度を解析し、分離条件を最適化する。また、拡張ナノ空間の形状・性状・溶液条件と分離能との関係を系統的に評価し、拡張ナノにおける分離の原理を明らかにする。

項目 3. 溶媒和イオンの構造とダイナミクス解析： 拡張ナノ空間は、壁面の電気二重層厚さ(デバイ長)に近く、内部の水物性もバルクとは異なる空間である。したがって、溶媒和イオンそのものの分子構造とダイナミクスおよび溶媒和パラメータも、バルク・マイクロ空間と異なる可能性があるが、未解明のままである。本項では、NMR や赤外(IR)等の各種分光分析装置を駆使し、拡張ナノ空間内における溶媒和金属イオンそのものの挙動を解明する。これらの知見を項目2にフィードバックして、溶媒和イオンの分子挙動と分離機構との関係の解明に繋げる

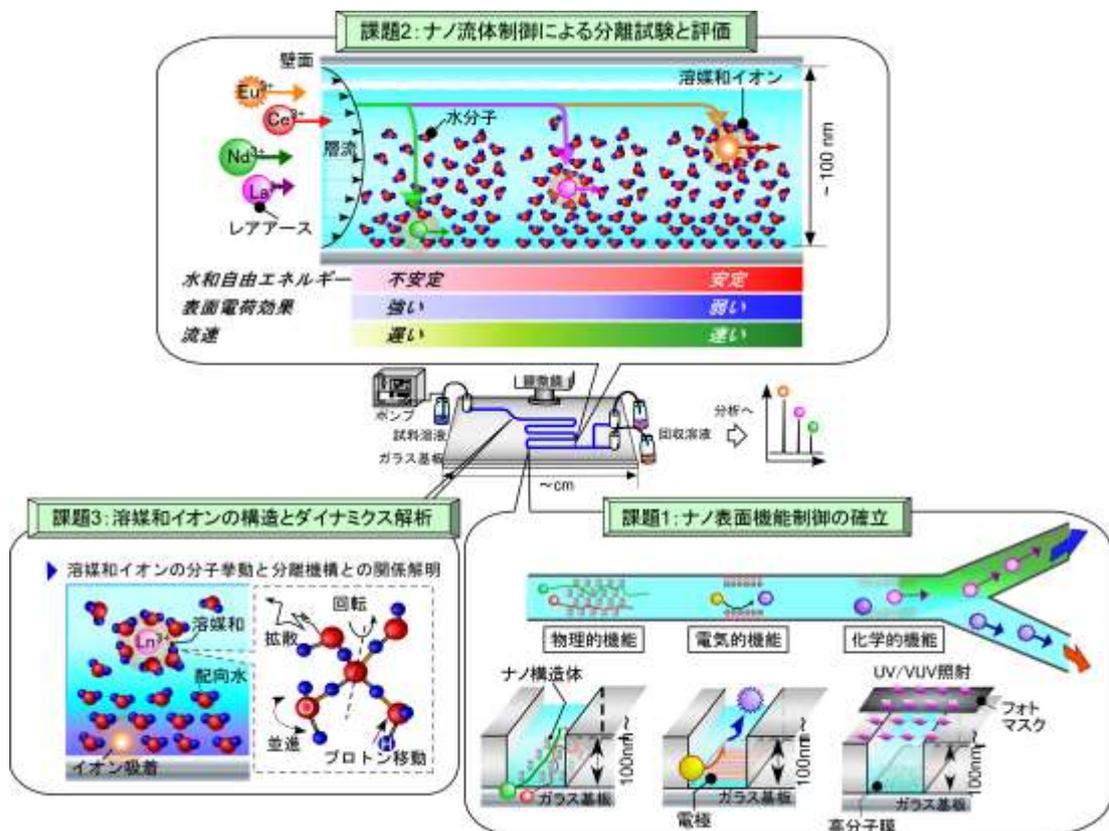


図2 極限ナノデバイスの研究構想図

【総合評価】	
○	特に優れた成果が得られている
	優れた成果が得られている
	一定の成果が得られている
	十分な成果が得られていない

【所見】
① 総合所見
<p>ナノ流路内では、空間サイズ・酸・イオン濃度等の調整によって、レアアースと他の金属イオンあるいはレアアース同士を分離できることを確認し、表面機能の異なる拡張ナノ流路を作製し、流路壁面と溶媒和イオンとの静電相互作用・自由エネルギー・移動度等の僅かな差を顕在化させ、これらの差に応じて流れを制御することによって、バルクの操作では不可能な精緻なレアアース分離の技術と方法論を創成した。</p>

② 目的の達成状況
<p>・所期の目的が <input checked="" type="checkbox"/>全て達成された ・ <input type="checkbox"/>一部達成された ・ <input type="checkbox"/>達成されなかった)</p> <p>ナノ流路表面の表面電位・機能の自在な制御を実現し、拡張ナノ空間の形状・性状・溶液条件と分離能との関係を系統的に評価し、拡張ナノにおける分離の原理を明らかにした。その結果から、溶媒和イオンの分子挙動と分離機構との関係、及び、安定な水和イオン形成は流路壁面との相互作用を小さくするため、圧力送液に伴う水和イオンの流動性、つまり流速を増加させ、結果、分離効率が向上することを解明し、所期の目的を達成した。</p>

③ 研究の成果
<p>・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が <input checked="" type="checkbox"/>ある ・ <input type="checkbox"/>ない)</p> <p>・ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が <input checked="" type="checkbox"/>創出された ・ <input type="checkbox"/>創出されなかった)</p> <p>・当初の目的の他に得られた成果が (<input type="checkbox"/>ある ・ <input checked="" type="checkbox"/>ない)</p> <p>従来の溶媒抽出やクロマト法による分離性能の限界を、溶媒和イオン種と壁面間の静電相互作用の差を制御することにより克服しようとしている点はユニークで、提案者がいう拡張ナノ領域の学問創出という側面への端緒となる研究成果が得られているものとみられ、研究課題の成果には先進性・優位性とブレークスルーと呼べる特筆すべきものがある。</p> <p>当初の目的の他に得られた成果はない。</p>

④ 研究成果の効果
<p>・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が <input checked="" type="checkbox"/>見込まれる ・ <input type="checkbox"/>見込まれない)</p> <p>・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が <input checked="" type="checkbox"/>見込まれる ・ <input type="checkbox"/>見込まれない)</p> <p>ナノ流体制御を使った物質分離の研究としての意義があり、研究が進展して技術的な問題点が解決され、理論的にも整理されれば関連する研究分野の進展に寄与するものと考えられる。拡張ナノ空間の研究開発コンソーシアムを、東大・慶応大・早稲田</p>

大・川崎市と東工大で設立したとされており、こうした展開は評価できる。

都市鉱山への社会応用には、相当のステップが必要という印象であるが、水素貯蔵合金や放射性環境汚染物質制御など、幅広い応用側面が存在すると見られ、研究成果は、社会的・経済的な課題の解決への波及効果が見込まれる。

⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが (行われた ・ 行われなかった)

研究目的の達成に向けて研究計画は適切に実行されており、研究実施体制は適切に組織され、各年度、研究実施上必要な設備を随時導入されており、指摘事項への対応も適切に実施された。さらに、研究成果の発信は適切に行われ、国民との科学・技術対話についても効果的に実施されており、適切な研究マネジメントが実施された。