

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 7 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560911

研究課題名(和文)レアアース回収のためのケイ酸塩系スラグの組成開発

研究課題名(英文)Composition Optimization of Silicate Slag for Rare-earth Recycling

## 研究代表者

武部 博倫 (Takebe, Hiromichi)

愛媛大学・理工学研究科・教授

研究者番号：90236498

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：ケイ酸塩系にリン酸(P205)を添加したリンケイ酸塩系スラグにおいて、溶融プロセスでレアアースとP04四面体とが優先的に結合するための組成条件が $[R2O+R'0]/[P205] = 1$  (モル比)であることを見出した。ここでRはアルカリ金属、R'はアルカリ土類金属である。赤外分光法により、この組成条件でリンケイ酸塩スラグ中に存在する、P04四面体のネットワーク構造を特徴付けた。組成設計したスラグについて超純水中での浸出試験を行い、レアアース及びリン酸成分が選択的に溶出することを化学分析から明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In phospho-silicate slags, the composition condition, at which rare-earth elements are bonded selectively with P04 tetrahedra, is  $[R2O+R'0]/[P205] = 1$  in molar ratio, where R is the alkali metal and R' is the alkaline-earth metal. The structure of P04 networks was characterized by infrared spectroscopy for optimized slag compositions. ICP-MS analysis revealed that rare-earth element and phosphate species were selectively dissolved into ultra-pure water by elution tests.

研究分野：非鉄製錬学

キーワード：ケイ酸塩スラグ リン酸 レアアース回収 光学特性 組成 溶出試験 赤外分光

### 1. 研究開始当初の背景

現在の先端工業製品に不可欠なレアアース(希土類)資源は、中国やベトナムなど一部の地域に偏在しており、今後どのようにして安定的にレアアース資源を確保するかが喫緊かつ重要な未解決課題である。具体的には、従来の鉱山からの資源確保に加えて、廃棄物スラグ等の未利用資源や都市鉱山等二次資源からのリサイクルが必要である。

実際的なリサイクルプロセスとして非鉄熔錬プロセスが考えられるが、レアアースは熱力学的に安定な酸化物を形成しやすいため、その二次原料を多成分ケイ酸塩系スラグ/硫化物マットに単純に加え溶融しただけでは、酸化物スラグにレアアース成分は取り込まれ、またレアアースが原子オーダーで均一に融体中に分散されるため、レアアースの選択的な濃縮は困難である。

本申請者は、スラグと共通に多成分酸化物系で溶融プロセスを経由した酸化物ガラスの研究において、多成分リン酸塩ガラスでは、組成を変化させても必ず、レアアースイオン( $Re^{3+}$ )が酸化物イオン( $O^{2-}$ )を介し  $PO_4$  四面体と選択的に結合すること( $Re-O-P$  結合が形成されること)を見出している[1-3]。これは  $PO_4$  四面体の形式電荷が 5 価であり、配位数 4 の酸化物イオンとの関係で、3 価のレアアースイオンと  $PO_4$  とで安定な構造を形成するためと考えられる。

またガラスの耐水性についての研究成果[4, 5]から、鎖状の  $PO_4$  四面体ネットワーク構造など、優先的に溶出しやすいリン酸塩構造と浸出条件を理解している。

さらに過去の研究より、ケイ酸( $SiO_2$ )とリン酸( $P_2O_5$ )を含むリンケイ酸塩系では、溶融状態で種々の化学組成において相分離を起こすことが知られている。

以上を総括すると、レアアースを含むリンケイ酸塩スラグ系において組成設計を行い、溶融状態で微視的には相分離状態を形成し、レアアースとリン酸を選択的に結合させ、その後の湿式処理によりレアアース・リン酸塩を優先的に溶出・濃縮する可能性があるとの着想に至った。

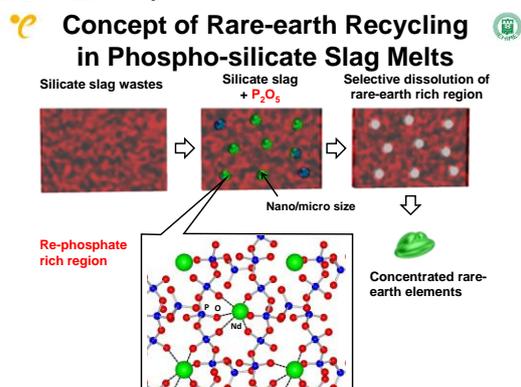


図1 本提案のプロセスを表す概念図

図1には本提案のプロセスを表す概念図を示している。

### 2. 研究の目的

本研究では、少量(1 mol%未満)のレアアースを含む多成分酸化物系ガラス質スラグ(以下スラグと略記)について、レアアースイオンの光学特性からレアアース周囲の化学結合状態を比較・推定することで、レアアースとリン酸が優先的に結合するための組成条件を決定し、そのネットワーク構造の特徴を明らかにする。また組成を最適化したスラグに対して湿式処理を施し、レアアースとリン酸塩を選択的に溶出させることも目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) ガラス質スラグの作製

ガラス質スラグは Hot-thermocouple 法(HTC法)[6]による溶融法で作製した。HTC法とは熱電対に温度測定に加えて、ヒーターと試料担持の双方の機能を持たせ、実体顕微鏡を通して試料状態の観察が可能な方法である。この方法は少量(約 2~5mg)の試料に対し、急速な加熱(約 5分で室温から 1700°Cまで)と冷却(約 1分で 1700°Cから室温まで)が可能であることを特徴としている。

スラグの基礎系としての組成系は、 $R_2O-SiO_2$ 、 $R_2O-P_2O_5$  ( $R=Li, Na, K$ ) 及び  $Na_2O-SiO_2-P_2O_5$  系マトリクスに対し、外割のモル比で 0.3 の  $Nd_2O_3$  を添加したものである。原料には市販の高純度試薬  $SiO_2$ 、 $Li_2CO_3$ 、 $Na_2CO_3$ 、 $K_2CO_3$ 、 $NH_4H_2PO_4$ 、 $NaPO_3$  及び  $Nd_2O_3$  を用いた。

所定のモル比に原料を秤量した後、乳鉢と乳棒で混合した。バッチ量は約 2~5mg であり、混合粉末はエタノールを溶媒に用いて HTC の熱電対に付着させた。800~1700°Cにて 30~60 分間大気中で溶融した後、室温まで急冷することでガラス質スラグ試料を作製した。原料に  $NH_4H_2PO_4$  を含む試料は、加熱過程でアンモニアと水分が発生するため、それらを蒸発させる目的で 250°Cで 10分間保持した後に上述の条件でスラグを作製している。図2に HTC法によるスラグについて、原料混合粉末、溶融状態及び冷却後のスラグ状態の外観を示す。

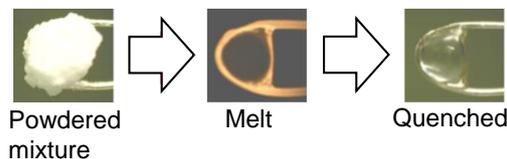


図2 HTC法によるガラス質スラグ試料作製

#### (2) 吸収スペクトル

レアアースイオンの 4f 軌道間電子遷移は Laporte の選択則によれば禁制である。しかし、結晶やガラス中ではレアアースイオンの配位子が非対称な配置をとることにより結晶場の対称性が崩れる場合や、配位子との相互作用によって 4f 軌道間へ他の電子軌道の混

じり込みが起こる場合にこの遷移は一部許容される[7, 8]。酸化ガラスでのレアアースイオンの配位子場は第一配位子の酸化物イオンに加えて、第二配位子の金属イオンからも影響を受け、レアアースイオンの周囲の局所構造に関する情報が吸収スペクトルに現れる。

HTC 法で作製したスラグに対し、直径約 2mm の微小サンプルホルダー (HITACHI 製, 1J01860) 及び微小サンプル透過測定装置 (HITACHI 製, 1J00203) を分光光度計 (HITACHI 製, U-4100) に設置して Nd<sup>3+</sup> の吸収スペクトルを測定した。

### (3) 構造解析

フーリエ変換赤外分光光度計 (SHIMADZU 製, IR Prestige-21) を使い, KBr 錠剤法で Kubelka-Munk 変換に従って IR スペクトルを得た。

### (4) 浸出試験

Nd<sup>3+</sup> の吸収スペクトルから, Nd が PO<sub>4</sub> 四面体に優先的に配位していると推定される代表的な組成と配位していないと考えられる組成を選び、熔融法で Nd 含有スラグを作製した。バッチ量は 12g である。熔融条件は論文 [9] で詳述している。

得られた合成スラグ試料は大気中からの水分の影響を最小限にするために、Ar 雰囲気グローブバッグの中で、アルミナ乳鉢及び乳棒を用いて粒径 150μm 以下に粉砕した。浸出試験としては、テフロン容器を用いて粉砕試料 0.5g を 30°C の超純水 80g (pH6.8~6.9) に 48 時間浸漬させた。試験後の浸出液はメンブランフィルター (孔径 0.45μm, Sartorius stedim) に通して固液分離を行った。また作製したガラス試料中の Nd 濃度は HF 及び HNO<sub>3</sub> を用いて完全に溶解させた試料から求めた。各ガラス試料に対し、ICP-MS (VARIAN 製, 820-MS) を用いて Nd 濃度を 3 回測定し、Nd 浸出率 (Nd leaching ratio) の平均値を算出した。また浸出試験前後の浸出液の pH は、pH メーター (HORIBA 製, D-51) を用いて測定した。図 3 には浸出試験のフローを示している。

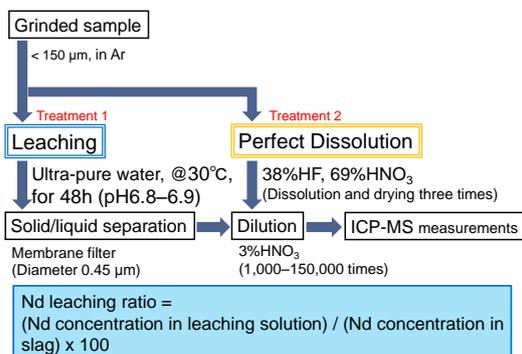


図 3 浸出試験条件

## 4. 研究成果

### (1) Nd<sup>3+</sup> の吸収スペクトル

Nd<sup>3+</sup> の <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> → <sup>4</sup>G<sub>5/2</sub>, <sup>2</sup>G<sub>7/2</sub> 遷移 (以下遷移 A) 及び <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> → <sup>4</sup>F<sub>5/2</sub>, <sup>2</sup>H<sub>9/2</sub> 遷移 (以下遷移 B) についてその組成依存性を調べた。遷移 A のスペクトル形状と吸光度は Nd の第一配位子場の対称性によって変化し、遷移 B の吸光度及び遷移 A, B のピーク波長は Nd と第一配位子である酸化物イオンとの Nd-O 結合の共有結合性に影響を受けることが知られている。

図 4 に 40R<sub>2</sub>O-60SiO<sub>2</sub> 合成スラグ (R=Li, Na, K) について Nd<sup>3+</sup> の吸収スペクトルを示す。ケイ酸塩系スラグではアルカリ (Li, Na, K) の種類により遷移 A, B の形状が変化しており、R の種類に Nd の配位子場が影響を受けることを示唆している。EXAFS 解析[10, 11]から、図 4 にアルカリケイ酸塩スラグにおける Nd 周囲の局所構造モデルを示す。このスラグでは Nd は O を介してアルカリ金属 R と結合し、Nd-O-R 結合を形成すると考えられている。

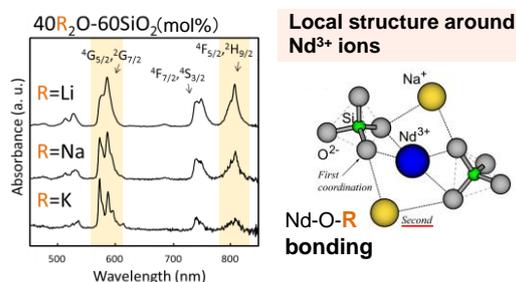


図 4 アルカリケイ酸塩スラグにおける Nd<sup>3+</sup> の吸収スペクトルと局所構造モデル

図 5 に 40R<sub>2</sub>O-60P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 合成スラグ (R=Li, Na, K) について Nd<sup>3+</sup> の吸収スペクトルを示す。アルカリケイ酸塩スラグの場合とは異なり、アルカリリン酸塩スラグでは R の種類によらず、遷移 A, B の吸収帯の形状、ピーク波長及び A と B の吸収断面積の比のいずれについても大きな変化は認められない。これは R の種類により Nd の配位子場の変化が殆どないことを表している。従って、酸化物イオンを介した第二配位子は P であり、主に Nd-O-P 結合を形成しているものと考えられる。EXAFS 解析[11]から、図 5 にアルカリリン酸塩スラグ中の Nd 周囲の局所構造モデルを示した。この場合、アルカリ金属 R は P と比較して相対的に遠くに位置し、Nd の 4f 軌道間電子遷移に殆ど影響を与えない。

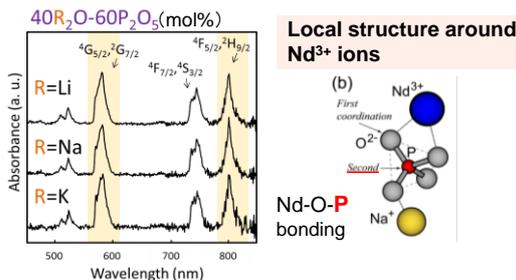


図 5 アルカリリン酸塩スラグにおける Nd<sup>3+</sup> の吸収スペクトルと局所構造モデル

図6にリンケイ酸塩スラグの代表組成として、(c) Nd 含有 10Na<sub>2</sub>O-60SiO<sub>2</sub>-30P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> スラグの吸収スペクトルを示す。図中には比較のために、(a) 40Na<sub>2</sub>O-60SiO<sub>2</sub> 及び (b) 40Na<sub>2</sub>O-60P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> スラグにおける Nd<sup>3+</sup>の吸収スペクトルも示している。リンケイ酸塩スラグにおける遷移 A, B のスペクトル形状、ピーク波長及び吸収断面積比は 40Na<sub>2</sub>O-60P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> スラグのものに概ね一致している。これは 10Na<sub>2</sub>O-60SiO<sub>2</sub>-30P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 及び 40Na<sub>2</sub>O-60P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> スラグにおける Nd 周囲の局所構造が類似していることを示唆している。従って、10Na<sub>2</sub>O-60SiO<sub>2</sub>-30P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> スラグ中においては Nd が PO<sub>4</sub> 四面体に優先的に配位し、Nd-O-P 結合を形成しているものと推定される。

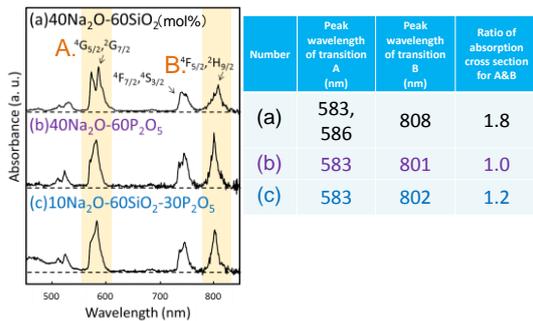


図6 (a)アルカリケイ酸塩、(b)リン酸塩及び(c)リンケイ酸塩スラグにおける Nd<sup>3+</sup>の吸収スペクトルと遷移 A, B 及びピーク波長並びに吸収断面積比

図7に Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 系において、スラグ中の Nd<sup>3+</sup>の吸収スペクトルの形状、遷移 A, B のピーク波長及び吸収断面積比から、Nd が PO<sub>4</sub> 四面体に配位していると判断した組成を赤い点でプロットしている。ここで灰色の点は吸収スペクトルより Nd が PO<sub>4</sub> 四面体に配位していると判断されなかった組成であり、黒い点は熔融温度が 1700°C 以上または透明なスラグが作製不可であった組成である。Na<sub>2</sub>O と P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> のモル比を [Na<sub>2</sub>O]/[P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>] ≡ r と定義すると、Nd が PO<sub>4</sub> 四面体に優先的に配位する組成条件は、Na<sub>2</sub>O-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> スラグ系では r ≤ 2、Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> スラグ系では r ≤ 1 となる。

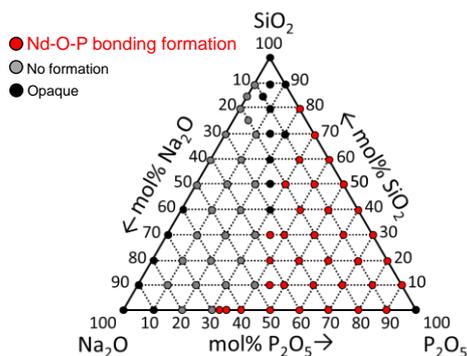


図7 Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> スラグ系で Nd が PO<sub>4</sub> 四面体に優先的に配位する組成条件

## (2) IR スペクトル

図8及び図9にそれぞれ Na<sub>2</sub>O-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 及び

Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 合成スラグの IR スペクトルと、関連するリン酸塩ネットワーク構造の模式図を示す。リン酸塩ネットワーク構造の構成単位である PO<sub>4</sub> 四面体の種類は、PO<sub>4</sub> 四面体1個当たりの架橋酸素の数 i により Q<sup>i</sup> の略号で表される [12]。

図7に示した組成条件と図8及び図9との比較により、Na<sub>2</sub>O-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 及び Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 合成スラグ (ガラス) で Nd が PO<sub>4</sub> 四面体に優先的に配位している組成では、Q<sup>2</sup> ユニットや P-O-P 結合による吸収帯 (1260, 770 cm<sup>-1</sup>) が存在することが知られる。

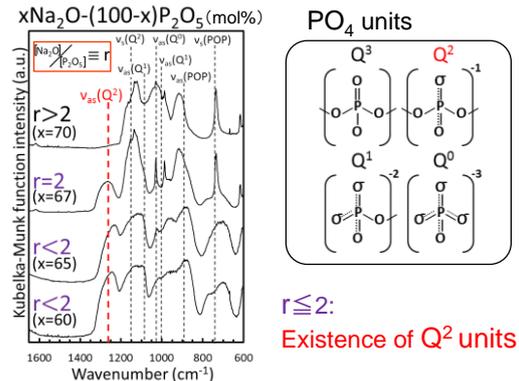


図8 Na<sub>2</sub>O-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> スラグの IR スペクトルと関連する Q<sup>i</sup> (i=0-3)構造

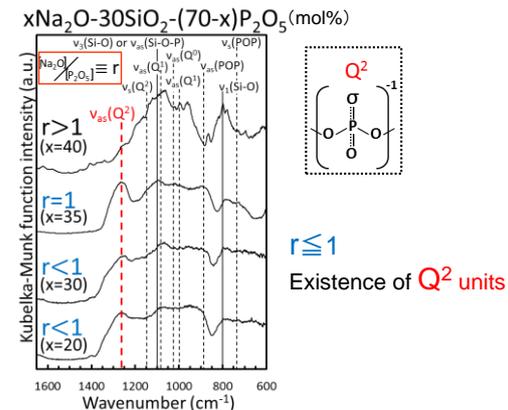


図9 Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> スラグの IR スペクトル

## (3) 浸出試験

4(1)の吸収スペクトルの結果から、Nd が PO<sub>4</sub> 四面体に配位していないスラグとして、(1)14.3Na<sub>2</sub>O-85.7SiO<sub>2</sub> 及び(2)50Na<sub>2</sub>O-40SiO<sub>2</sub>-10P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> スラグ (モル比表示) を、また Nd が PO<sub>4</sub> 四面体に配位しているスラグとして (3)10Na<sub>2</sub>O-60SiO<sub>2</sub>-30P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> スラグを選択した。これらのスラグについて浸出試験を行った結果を図10に示す。

(1), (2)のスラグからは Nd は殆ど溶出されず (浸出率 ~ 1%)、浸出液の pH はアルカリ性を示している。一方、(3) 10Na<sub>2</sub>O-60SiO<sub>2</sub>-30P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> スラグでは、Nd の浸出率は約 89% であり、浸出液の pH は 2.0 の酸性を示していることがわかる。

浸出試験を行った3つの組成のスラグについて、Nd の浸出率と浸出液の pH から考察す

ると、(1)、(2)と(3)ではスラグから 30°C の超純水中へ溶出した元素が異なることが示唆される。図 11 に溶出過程の模式図を示している。

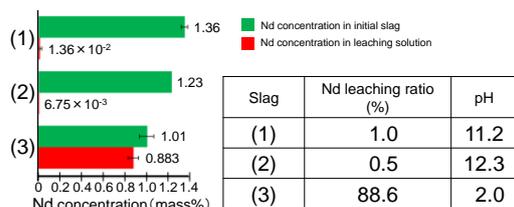


図 10 Nd を含む (1)14.3Na<sub>2</sub>O-85.7SiO<sub>2</sub>, (2)50Na<sub>2</sub>O-10P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-40SiO<sub>2</sub> 及び (3)10Na<sub>2</sub>O-60SiO<sub>2</sub>-30P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> スラグを 30°C の超純水に 48 時間浸した後の Nd の浸出量と浸出率

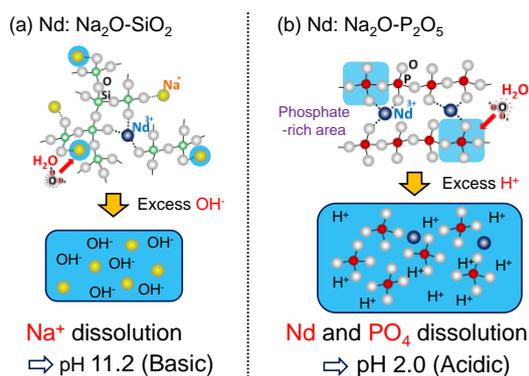


図 11 (1) Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 及び (2) Na<sub>2</sub>O-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> スラグからの各元素の溶出過程の模式図

ケイ酸塩スラグでは、酸化物イオンとの結合力が比較的小さな修飾イオンが水分子との相互作用により溶出される [13]。Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 系スラグでは、Na<sup>+</sup>と浸出液中の H<sup>+</sup>との間にイオン交換が生じて Na<sup>+</sup>が溶出する [13]。従って、浸出液中では OH<sup>-</sup>が過剰となり、pH は塩基性を示したものと考えられる。また陽性元素-酸素間単結合強度 [14] から判断すると、Nd<sup>3+</sup>は Na<sup>+</sup>に比べて酸化物イオンとの結合力が強いいため、Nd<sup>3+</sup>と H<sup>+</sup>とのイオン交換が起こり難く、Nd<sup>3+</sup>は殆ど溶出されなかったものと推定される。

一方、リン酸塩及びリンケイ酸塩スラグで Q<sup>2</sup> ユニットや P-O-P 結合を含む組成では、Q<sup>2</sup> 等の PO<sub>4</sub> 四面体において P 周囲の酸化物イオンの分極が不均一であるため、PO<sub>4</sub> 四面体と水分子は強い相互作用を示す [4, 5]。このため、PO<sub>4</sub> 四面体の鎖状ネットワーク構造 (Q<sup>2</sup>) を有する P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 成分は水中に溶出する [4, 5]。図 10 で 10Na<sub>2</sub>O-60SiO<sub>2</sub>-30P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> スラグにおいて、浸出液の pH が酸性を示した理由は、主に PO<sub>4</sub> 四面体が溶出してリン酸が生成されたためだと推定される [15]。従って、スラグ中で PO<sub>4</sub> 四面体と結合した Nd が、PO<sub>4</sub> 四面体とともに溶出されたものと考えられる。

#### (4) 総括

以上の結果を総括すると本研究で得られた結果は以下のとおりである。

Nd<sup>3+</sup>の吸収スペクトル評価から推定した、

ガラス質スラグにおいて Nd が PO<sub>4</sub> 四面体に優先的に配位する組成条件は、Na<sub>2</sub>O と P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> のモル比を [Na<sub>2</sub>O]/[P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>] ≡ r について、Na<sub>2</sub>O-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 系では r ≤ 2、Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 系では r ≤ 1 である。

IR 分光によるネットワーク構造の解析から、Nd が PO<sub>4</sub> 四面体に優先的に配位する組成では、主として Q<sup>2</sup> ユニット及び P-O-P 結合が存在する。従って、Nd は Q<sup>2</sup> ユニットの PO<sub>4</sub> 四面体が連結したネットワーク構造が存在する条件下で Nd-O-P 結合を形成するものと考えられる。

r ≤ 1 のリンケイ酸塩ガラス質スラグにおいて、超純水による 30°C での浸出試験を行った。ICP-MS を用いて試験後の浸出液の Nd 濃度を測定した結果、同スラグ中の 90% 近くの Nd が溶出した。

本研究での結果を基に、ケイ酸塩スラグに P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> を添加し Q<sup>2</sup> ユニット及び P-O-P 結合が存在する組成条件においては、Nd-O-P 結合を形成させ、Nd をリン酸塩リッチ相に取り込み濃縮し、その後の湿式プロセスで Nd を含むリン酸塩リッチ相を溶出させることが可能である。本条件は、Dy や Eu などのその他のレアアース元素に対し、また Na<sub>2</sub>O-CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系の一般的なガラスカレットに P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> を添加した系においても達成可能であることを確認している。

#### <引用文献>

1. Y. Nageno, H. Takebe, K. Morinaga, "Correlation between Radiative Transition Probabilities of Nd<sup>3+</sup> and Composition in Silicate, Borate, and Phosphate Glasses", J. of Am. Ceram. Soc., **76** [12], 1993, 3081-3086.
2. H. Takebe, T. Murata, K. Morinaga, "Local Structure of Rare-Earth Ions Estimated by Judd-Ofelt Theory", New Glass, **17** [4], 2002, 40-43.
3. M. Kawano, H. Takebe, M. Kuwabara, "Composition Dependence of the Luminescence Properties of Mn<sup>2+</sup>-doped Metaphosphate Glasses", Opt. Mater., **32** [2], 2009, 277-280.
4. H. Takebe, Y. Baba, M. Kuwabara, "Dissolution Behavior of ZnO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Glasses in Water", J. Non-Cryst. Solids, **352**, 2006, 3088-3094.
5. J. Cha, T. Kubo, H. Takebe, M. Kuwabara, "Compositional Dependence of Properties of SnO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Glasses", J. of the Ceram. Soc. Japan, **116** [8], 2008, 915-919.
6. 太田能生, 森永健次, 柳ヶ瀬勉, "Hot-thermocouple 法の高温度化学への応用", 日本金属学会会報, **19** [4], 1980, 239-245.
7. B. R. Judd, "Optical Absorption Intensities of Rare-Earth Ions", Phys. Rev., **127** [3], 1962, 750-761.

8. G. S. Ofelt, "Intensities of Crystal Spectra of Rare-Earth Ions", J. Chem. Phys., **37** [3], 1962, 511-520.
9. 中村洋貴, 齋藤全, 武部博倫, "リンケイ酸塩ガラスにおけるレアアース濃縮のための組成条件", J. of MMIJ, **129** [8, 9], 2013, 591-595.
10. H. Yamaguchi, H. Takebe, "Local Structure of Rare-earth Ions in Alkali Silicate Glasses Studied by Extended X-Ray Absorption Fine Structure", Jpn. J. Appl. Phys. **38**, Suppl. 38-1, 1999, 168-171.
11. T. Murata, Y. Moriyama, K. Morinaga, "Relationship between the Local Structure and Spontaneous Emission Probability of  $\text{Er}^{3+}$  in Silicate, Borate, and Phosphate Glasses", Sci. Tech. of Adv. Mater., **1**, 2000, 139-145.
12. R. K. Brow, "Review: The Structure of Simple Phosphate Glasses", **263/264**, 2000, 1-28.
13. C. W. Sinton, W. C. LaCourse, "Experimental Survey of the Chemical Durability of Commercial Soda-Lime-Silicate Glasses", Mater. Res. Bull., **36**, 2001, 2471-2479.
14. J. E. Stanworth, "Physical Properties of Glass, (Oxford University Press, London, 1950), pp. 9-16.
15. X. Yu, D. E. Day, G. J. Long, R. K. Brow, "Properties and Structure of Sodium-Iron Phosphate Glasses", J. Non-Cryst. Solids, **215**, 1997, 21-31.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① H. Takebe, Y. Suzuki, T. Uemura, "The Effects of  $\text{B}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  on the Structure of Phosphate Glasses", Eur. J. Glass Science and Technology B, 査読有, Vol. 55, (2014), 207-210.
- ② 武部博倫, 齋藤全, "リン酸塩ガラスの特徴的な構造と機能およびその応用", セラミックス, 査読無, Vol. 18, No. 12, (2013), 927-930.
- ③ H. Takebe, T. Kobatake, A. Saitoh, "Dissolution Behavior of  $\text{SnO}-\text{P}_2\text{O}_5$  and  $\text{SnO}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{B}_2\text{O}_3$  Glasses in Water", Eur. J. Glass Science and Technology B, 査読有, Vol. 54, (2013), 182-186.
- ④ 中村洋貴, 齋藤全, 武部博倫, "リンケイ酸塩ガラスにおけるレアアース濃縮のための組成条件", J. of MMIJ, 査読有, Vol. 129, No. 8, 9, (2013), 591-595.

[学会発表] (計7件)

- ① 高橋尚志, 武部博倫, " $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

ガラスの耐アルカリ性に及ぼす  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の添加効果", 第53回セラミックス基礎科学討論会, 2015年1月9日, 京都テルサ(京都)

- ② 岡田明子, 武部博倫, " $\text{CaO}-\text{FeO}_x-\text{SiO}_2$  ガラスにおける Fe の存在状態とガラス状態", 第55回ガラス及びフォトニクス材料討論会, 2014年11月13日, 東京工業大学(東京)
- ③ 武部博倫, 道上聖史, 森安諒, "白金板とスラグ融体の界面相互作用", 資源・素材学会春季大会, 2014年3月27日, 千葉工大(千葉)
- ④ 武部博倫, 福井智也, 森安諒, "マグネシウムクロム質耐火物の微細組織とスラグ融体の界面反応", 資源・素材 2013 (札幌), 2013年9月5日, 北海道大学(北海道)
- ⑤ Shoji Takahashi, H. Takebe, "Effects of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  on the Thermal Properties and Structure of  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  Glasses, 23<sup>rd</sup> International Congress on Glass, 2013年7月2日, Prague, Czech Republic
- ⑥ 武部博倫, 齋藤全, "リン酸塩ガラスの耐水性に及ぼす組成の影響", 第53回ガラス及びフォトニクス材料討論会, 2012年10月25日, 北海道大学(北海道)
- ⑦ 中村洋貴, 武部博倫, "リンケイ酸系模擬スラグにおけるレアアース濃縮のための組成条件", 平成24年度 資源・素材関係学協会合同秋季大会, 2012年9月11日, 秋田大学(秋田)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

愛媛大学 材料プロセス工学研究室

ホームページ <http://mpel.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

武部 博倫 (TAKEBE HIROMICHI)

愛媛大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：90236498

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし