

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420844

研究課題名(和文)放射性物質の回収とリン酸塩ガラス異常現象を利用した長期安定的固定化

研究課題名(英文) Recovery of radioactive substances and long-term stable immobilization using phosphate glass anomaly

研究代表者

大倉 利典 (Okura, Toshinori)

工学院大学・先進工学部・教授

研究者番号：70255610

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ヨウ素、セシウム、ストロンチウムのマグネシウム化合物による効率的な回収について検討し、安定な固化ガラスとして最終処理を行う一連のプロセスの開発を目的とした。ヨウ素については、酸化マグネシウムの小粒径試料で最大2.23 g/gのヨウ素吸着性能を示すことがわかった。セシウム、ストロンチウムに関しては、酸化マグネシウムを用い、リン酸によりpH調整を行うことで、十分な回収性能を示した。P-O-Pよりも水に強いP-O-M結合を生成するカチオン種を添加することで、固化ガラスの耐水性の向上が見込まれると考えられ、Al₂O₃、B₂O₃、Nb₂O₅のような3成分目の酸化物の添加によってこれを確かめた。

研究成果の概要(英文)：Radioactive substances leaked by an accident of the nuclear power plant which occurred in March in 2011. Techniques for recovering the radioactive substances have been required. We studied adsorption methods as a technique of collection, and vitrification methods of iodine, cesium, and strontium for safekeeping. In this study, adsorption of these ions on magnesium compounds was evaluated, and fixation into glass was tried. The resultant adsorbed magnesium compounds could be vitrified into phosphate glasses. Stability of these obtained glasses against immersion into water, dil. HCl aq., and dil. NaOH aq. was also evaluated, and it was found that the stability was drastically improved by addition of Nb₂O₅.

研究分野：無機材料化学

キーワード：放射性物質 ガラス固化 リン酸塩ガラス異常現象 マグネシウム化合物

1. 研究開始当初の背景

2011年3月の東日本大震災により発生した原子力発電所事故により、これまで核燃料サイクルの中では比較的半減期が短いため重要視されてこなかったヨウ素、セシウム、ストロンチウムなどの核種の放射性同位体が大気、海、土壤に飛散した。これにより新たな問題として、これらの核種の処理に関する技術の不足が明らかとなった。問題点は大きく分けて二つの段階からなる。初めの段階は、飛散して希薄な放射性物質を効率よく回収することであり、次の段階はそれを安全に長期間保管することである。この問題のうち保管(固化処理)に関しては、当研究グループでこれまで行われてきた放射性廃棄物のガラス固化技術を応用して核種の安定的な長期保管が可能であると考えられる。そのガラス固化技術につながる形で効率的な回収方法を確立することが必要とされている。

2. 研究の目的

本研究では、ヨウ素、セシウム、ストロンチウムの3種の放射性物質をターゲットとし、ヨウ素吸着性能を有することが知られている酸化マグネシウムに注目した。マグネシウムはリン酸塩ガラスに添加元素として一定の割合で加えると「リン酸異常現象」と呼ばれる密度の低下等を伴う構造の変化が起き、構造内に様々な元素を取り込めることを本研究グループでは明らかにしている。この現象を利用して、ヨウ素やセシウム、ストロンチウムをマグネシウム化合物で吸着、回収し、リン酸塩ガラスを用いた長期安定的なガラス固化体の作製が可能ではないかと考えた。本研究では、ヨウ素、セシウム、ストロンチウムのマグネシウム化合物による効率的な回収について安定同位体を用いて検討し、その後安定な固化ガラスとして最終処理を行う一連のプロセスの開発を目的とした。

3. 研究の方法

(1) ヨウ素をターゲットとしたマグネシウム化合物による回収及びガラス固化処理

マグネシウム化合物によるヨウ素の吸着性能評価として、JIS 活性炭試験法の吸着性能(液相)を利用し、マグネシウム化合物のヨウ素吸着性能評価を行った。ヨウ化カリウム水溶液にヨウ素を溶かして 0.05 mol/L ヨウ素溶液とし、そこへ一定量のマグネシウム化合物を投入・攪拌し、吸着させた。予備実験により求めた吸着平衡時間に達した後、溶液を遠沈管に移し、遠心分離により液相と沈殿物(ヨウ素-マグネシウム化合物)に分離した。その後、分離した液相を 0.10 mol/L チオ硫酸ナトリウム溶液を用い滴定した。滴定

量からヨウ素残留濃度、試料単位質量当たりのヨウ素吸着量を求め、吸着等温線を作成した。また、遠心分離後のヨウ素 マグネシウム化合物の X 線回折(XRD)測定を行い、結晶相の同定を行った。

ガラス固化に用いる母ガラスの作製とガラス固化処理を行った。リン酸、酸化マグネシウムを出発原料とし、 $MgO:P_2O_5 = 40:60$ (モル比)となるようにピーカー内で各出発原料を混合して縮合させ、マントルヒーターを用いて加熱しながら混合・脱水を行った。十分に混合・脱水させた後にアルミナるつぼに移し、電気炉中で1時間仮焼、1250 で1時間熔融させ、ステンレス板に流し出して急冷することで母ガラスを作製した。母ガラスに含有率 5~20 mass%の間でヨウ素-マグネシウム化合物を加え、乳鉢で混合、1250、45分の条件で熔融させ、ステンレス板を用いてプレス急冷し、固化ガラス(以下、ヨウ素固化ガラスと表記する)を作製した。また、吸光度測定を行ったサンプルに関しては、プレス急冷法により板ガラスの作製を行った。ヨウ素固化ガラスについて、XRD 測定、エネルギー分散型 X 線分析(EDX)、および拡散反射スペクトル測定を行った。

(2) セシウム、ストロンチウムをターゲットとしたマグネシウム化合物による回収およびガラス固化処理

セシウム、ストロンチウムの回収および最終処理として、酸化マグネシウムを用いた液相におけるセシウム、ストロンチウムの回収実験およびガラス固化処理を行った。セシウム、ストロンチウムの 10 mM 溶液 100 ml を作製し、リン酸を用いて pH 2.0 に調整した後、酸化マグネシウム(比表面積: 20.5 m²/g)を 1.0 g 投入し、シェイカーにより常温で攪拌した。任意の経時ごとに 1 ml 採取し、ろ過、10 倍希釈の後、イオン交換クロマトグラフィ(IC)測定により各残留濃度を測定した。また、アルカリ条件下での検討、pH 調整の有無、吸着をカルシウム化合物に変えた場合についても検討を行った。

セシウム、ストロンチウムのガラス固化範囲および耐水性の確認のため、 $MgO-Cs_2O-P_2O_5$ 系および $MgO-SrO-P_2O_5$ 系ガラスを $MgO+Cs_2O$ or $SrO:P_2O_5$ のモル組成比 40:60~60:40 で作製した。これらのガラス作製には熔融急冷法を用い、原料を粉碎・混合、300 で仮焼の後、1250 で1時間熔融し、グラファイトボードに流し出してガラス試料を得た。次いで XRD および EDX 分析を行った。

(3) ストロンチウム及びセシウム固化ガラスの化学的耐久性評価

ガラス試料の化学的耐久性を調査するために、耐酸性および耐塩基性試験、またその比較のため耐水性試験を行った。化学的耐久性評価は MCC 試験法に基づき行った。MCC 法は米国エネルギー省の指導の下に設立された MCC (Materials Characterization Center) によって提案された一連の試験法であり、ガラス溶解 / 浸出速度の測定手法として広く用いられている。MCC-1 法は、ガラスからの規格化浸出量 (Normalized elemental mass loss: NL_i) を評価するのに用いられる。作製したガラス ($MgO : SrO : P_2O_5$, $MgO : Cs_2O : P_2O_5$ 比が (20:20:60) と (25:25:50) のもので、それぞれ msp20、msp25、mcp20、mcp25 と略記) をアルミナ鉢で粉碎し、ふるいを用いて 10 ~ 20 メッシュパスになるように粒径を揃えた。1.0 g の試料と浸漬液 50 mL を PFA 容器に入れ、90 ° で 1、3、7、12 日間保持した (MCC 法 静的浸出試験)。その後、5A のろ紙を用いてろ過し、得られたろ液に対してイオンクロマトグラフィー (IC) によって溶出イオンの調査を行った。浸漬液にイオン交換水を用いたものは、得られたろ液をイオン交換水にて 100 倍希釈を行ったものを試料として使用した。浸漬液に水酸化ナトリウム水溶液を用いたものは、0.1 mol/L に調整した酢酸を用いて pH を酸性にし、イオン交換水を用いて 100 倍希釈をしたものを試料とした。標準液として硝酸マグネシウム六水和物、硝酸ストロンチウムおよび硝酸セシウムを水溶液が 10 mmol/L となるように採取し、50 mL メスフラスコを用いてメスアップし水溶液を作製した。島津高速液体クロマトグラフィシステム (Prominence) を用いて、カラムは Hitachi Chemical Gelpack (IC-65) を使用し、溶離液には 5 mmol/L の希硫酸を用いた。試料の表面積および規格化浸出率は以下の式 (1-1) と (1-2) を用いて算出した。

$$SA = \frac{W_0 \times 3}{0.0613 \times d} \quad (1-1)$$

SA: 試料の表面積

W_0 : 試料の初期量 (g)

d : 密度 ($g \cdot cm^{-3}$)

0.0613: 10 ~ 20 メッシュのオープン平均半径 (cm)

浸漬液はイオン交換水、塩酸および水酸化ナトリウム (各 $0.1 \text{ mol} \cdot L^{-1}$) を使用した。浸出試験後の浸出液 (ろ液) については、IC により各元素の濃度を測定し、以下の式によって規格化浸出率 ($g \cdot cm^{-2}$) を求めた。

$$NL_i = (C_i / f_i) / (SA / V) \quad (1-2)$$

NL_i : 規格化浸出率 ($g \cdot cm^{-2}$)

C_i : 浸出液中の i 元素濃度 ($g \cdot cm^{-3}$)

f_i : 反応前ガラス試料中の i 元素重量分率 (-)

SA: ガラス試料表面積 (cm^2)

V: 浸出液体積 (m^3)

Table 1 マグネシウム化合物のヨウ素吸着性能

サンプル	比表面積 (m^2 / g)	ヨウ素吸着性能 (mg / g)	
酸化マグネシウム	UC 95M	8.5	1491
	UC 95HK	6	1761
	UC 95ST	20.5	2230
	UCM 150	180	2199
マグネシウムクリンカー	UBE 98粉	-	-
	UBE 99S粉	-	-
高純度超微粉マグネシア	2000A	7.6	1086
	500A	33.3	2147
水酸化マグネシウム	UD 650	29.30	-
	UD 653	21.90	-

規格化浸出率は各元素の浸出量 (浸出液中の濃度) を実験条件やガラス組成を考慮することで均一化するものであり、各元素の浸出量をガラス表面積あたりのガラス溶解量に換算した値となる。

(4) MgO - P_2O_5 系ガラスの耐水性向上

(2) に述べた方法を用い、母ガラスとして MgO - P_2O_5 系、 MgO - Nb_2O_5 - P_2O_5 系、 MgO - B_2O_3 - P_2O_5 系、および MgO - Al_2O_3 - P_2O_5 系のガラスを用いて、10 mol% の MoO_3 を固化したガラスを作製し耐水性試験を行った。バルク体の試料をイオン交換水 100 mL に 9 日間浸し、浸漬開始から 1、2、4、24、72、144、216 時間後にそれぞれ浸漬液を採取し、紫外可視 (UV-vis) 吸収スペクトル測定を行うことで Mo イオンの浸出量を比較した。

4. 研究成果

(1) マグネシウム化合物のヨウ素吸着性能とガラス固化の結果

ヨウ素吸着性能評価において使用したサンプルの型番、比表面積および JIS 活性炭試験法に準じて求めた各試料の吸着性能を Table 1 に示す。

酸化マグネシウムの小粒径試料で最大 2.23 g/g のヨウ素吸着性能を示すことがわかった。また比表面積が大きいものほど吸着性能が高い傾向にあることがわかった。表中blankとなっているマグネシウムクリンカー試料は粒が粗いため、平衡時間に達する前に攪拌が止まってしまう、ヨウ素吸着性能を評価することができなかった。また、水酸化マグネシウム試料については吸着量が少ないため、JIS 規格に準ずる範囲の吸着等温線を得ることができなかった。これは、吸着性能が表面積に依存することや、酸化マグネシウムが水に対して溶解度が高いのに対し、水酸化マグネシウムは難溶性なため、化学吸着と物理吸着の割合が異なるためと考えられる。

Fig. 1 にヨウ素を吸着した酸化マグネシウムと酸化マグネシウム試料、水酸化マグネシウム試料の XRD パターンを示す。酸化マグネシウム試料を用いてヨウ素溶液中のヨウ素を吸着しても、吸着後のヨウ素-マグネシウム化合物は水酸化マグネシウムの形に変わっていることがわかった。これは、溶液中で溶解度の高い酸化マグネシウム試料が水酸化マグネシウムへと変化し、その過程でヨウ

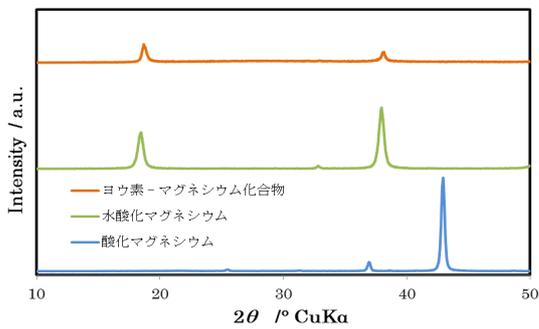


Fig. 1 ヨウ素 マグネシウム化合物および酸化マグネシウム、水酸化マグネシウムの XRD パターン

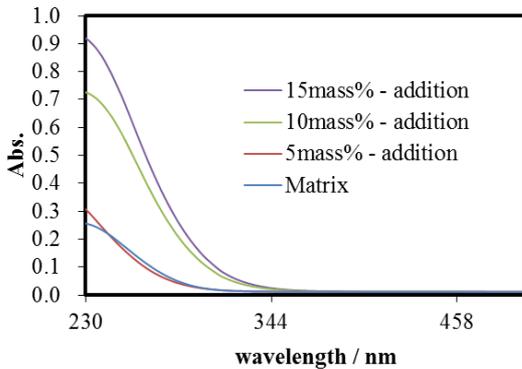


Fig. 2 母ガラスおよびヨウ素固化ガラスの拡散反射スペクトル (吸光度換算)

素を吸着しているためだと考えられる。水酸化マグネシウム試料と比べ、吸着量が明らかに多いのは、溶液中で電離して、ヨウ素と反応する割合が多く、化学吸着の割合が高いためだと考えられる。

作製した固化ガラスは、ヨウ素 マグネシウム化合物の添加量が 15 mass%まで透明であり、X 線的に非晶質となった。添加量 20 mass%では部分的に失透し不均質となった。EDX パターンからはヨウ素元素に相当するピークは見られなかったため、大部分は溶解の過程で蒸発していると考えられる。Fig. 2 に母ガラス(MgO : P₂O₅ = 40 : 60)およびヨウ素固化ガラスの拡散反射スペクトル測定(吸光換算済)の結果を示す。ヨウ素 マグネシウム化合物の添加量の増加とともに紫外域での吸収強度が高くなった。ガラス中でのヨウ化物イオン、および臭化物イオンは通常二つに分離した吸収帯を持つが、相当するピークの分離は見られなかった。そのため、単体の形ではなく、化合物としてガラス中に保持されている可能性が示唆された。

(2) セシウム、ストロンチウムのマグネシウム化合物による回収とガラス固化結果

Fig. 3 にイオン交換クロマトグラフィーを用いて測定した、振とう時間とセシウムまたはストロンチウムの残留濃度の関係(a)およびその時の pH 変化(b)を示す。振とう開始後 20 分程度で、セシウム、ストロンチウムの残留濃度は共に大幅に減少した。また、各ターゲットの濃度減少に応じて pH 変化にも相関

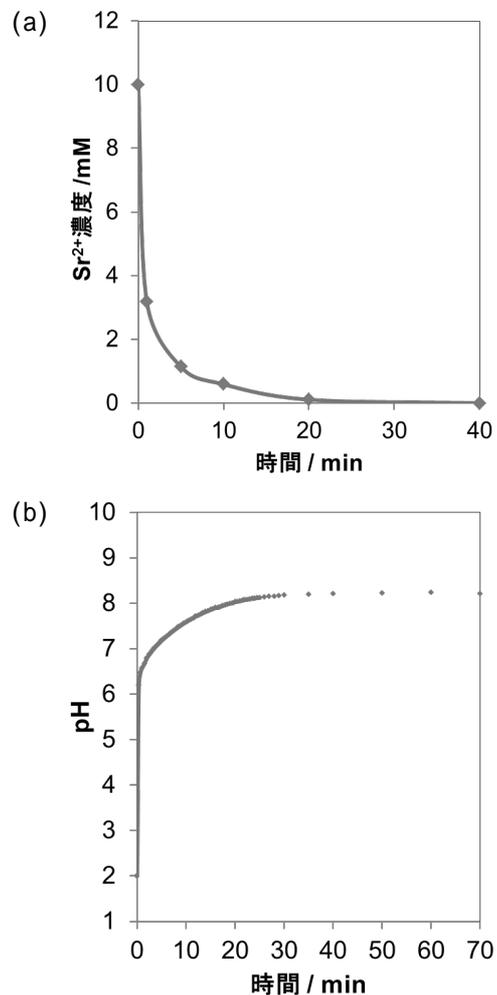


Fig. 3 ストロンチウム浸漬液の振とう時間と残留濃度および pH の関係

- (a)振とう時間と Sr 濃度変化
- (b)振とう時間と pH 変化

性が見られたため、マグネシウムと共に、セシウムまたは、ストロンチウムおよびリン酸が共沈することにより、溶液中の各ターゲットの残留濃度が著しく減少したと考えられる。また、pH 調整無、アルカリ条件下、塩酸を用い pH 調整を行った系、酸化カルシウムを用いた場合には、いずれもこのような急激な濃度減少は見られなかった。沈殿物の XRD パターンから、セシウム溶液を用いた系では CsMgPO₄・6H₂O、酸化マグネシウム、水酸化マグネシウムが混在した形で沈殿していることがわかった。

作製した固化ガラスは、いずれの組成でも無色透明なガラスとなった。いずれの組成でもハローパターンとなり、結晶化することなくガラス化したと考えられる。また、セシウム、固化ガラスにおいて、金属元素の添加とともに密度が増加し、リン酸異常現象と思われる密度低下は見られなかった。しかし、ストロンチウム固化ガラスでは、モル組成比 MgO+ SrO : P₂O₅ = 47 : 53 の試料で密度の低下が見られた。これは、イオンの価数およびイオン半径に依存し、同族の Mg および Sr を含

む3成分系のみ密度の低下が見られたと考えられる。各固化ガラスについて、組成比25:25:50の試料を用いてEDX測定を行った結果、添加量と同等の割合で各元素が検出された。よって、ヨウ素のガラス固化処理とは異なり、仕込み量通りの含有率となることが示唆された。

(3) ストロンチウムおよびセシウム固化ガラスの化学的耐久性評価

MCC法により、イオン交換水、0.1 mol/Lの塩酸および水酸化ナトリウム水溶液を用いた浸漬試験を行った。ストロンチウムおよびセシウム固化ガラスについて、MgO-(Cs₂O or SrO)-P₂O₅比(20:20:60, mcp20, msp20と略記)、(25:25:50, mcp25, msp25と略記)の組成で作製した試料を用いた。Fig. 4にmcp20, mcp25, msp20, msp25のイオン交換水浸漬における規格化浸出率を示す。セシウム固化ガラスでは、セシウムイオンが速やかに溶出し、その後緩やかな溶出(mcp20)あるいは再沈殿・再溶出を示唆するような結果が得られた。マグネシウムイオンはセシウムイオンに比べて溶出量が少なく、初期に溶解した後は濃度変化が見られなかった。つまりガラス成分のうち、セシウムイオンが優先的に溶解していた。一方、ストロンチウム固化ガラスでは、イオン交換水への浸漬日数に比例し、ストロンチウムとセシウムイオンの両方についてリニアかつ同等の浸出率変化であった。また、ストロンチウム含有量が増えると溶出量が減少した。塩酸に浸漬させた場合もほぼ同等の結果であったが、ストロンチウムの溶出がやや増える結果となった。水酸化ナトリウム水溶液に浸漬させた場合、mcpおよびmspともに溶出量が少なく、とくにmcpではマグネシウムイオンの溶出が少なくなり、mspではストロンチウムイオンとマグネシウムイオンの両方の溶出が少なかった。

mspサンプルは、イオンの溶出が穏やかであり、特に浸出液に水酸化ナトリウムを用いたものに関しては、ほとんどイオンの溶出が見られなかったためmcpサンプルよりも化学的耐久性は高いことがわかった。

ガラスの溶解反応は、金属元素架橋構造の水和反応による溶解が支配的であること、および金属元素の含有量が増えることにより金属元素架橋構造が増えることから、マグネシウム、セシウム、ストロンチウム等の金属元素含有量が増えることによってガラスの溶解が促進されると考えられる。しかし、結果としてストロンチウム固化ガラスの耐水性が金属元素の含有量と共に増したのは、ストロンチウム添加量の増加により、P-O-P結合よりも水に強いP-O-Sr結合が増加したため、水和反応が進行しなかったためと考えられる。これらの結果から、固化ガラスの耐水性を向上させるためには、P-O-M結合(M: 金属元素)を生成するカチオン種を添加する必要があると考えられる。さらに、マグネシウ

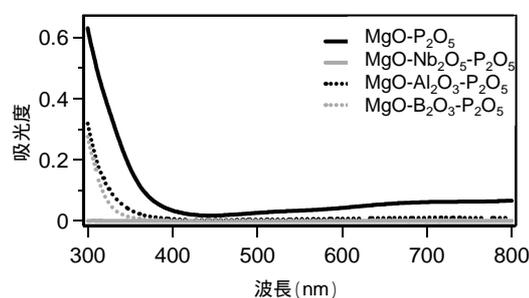


Fig. 5 室温で3週間浸漬させた浸漬液のUV-vis吸収スペクトル

ム、セシウムのみを含むセシウム固化ガラスにストロンチウムを添加することにより、耐水性の向上が見込める。

(4) MgO-P₂O₅系ガラスの耐水性向上

MgO:Nb₂O₅:P₂O₅ = 40:10:50、MgO:P₂O₅:B₂O₃ = 40:50:10、MgO:Al₂O₃:P₂O₅ = 45:5:50(モル比)である母ガラスをそれぞれ作製できた。それらに対して10 mol%のMoO₃を加えてガラス固化させることにも成功し、青色透明かつ均質なサンプルを得た。XRDを用いて結晶性を確認したところ、有意な回折ピークは観察されずハローのみとなったことから、固化ガラスが得られたことが示唆された。なお、青色はMoに由来する。

イオン交換水への浸漬実験を行ったところ、3成分目を添加していないMgO-P₂O₅ガラスを用いた場合には、肉眼で確認できるほどの着色(青色)があった。作製した固化ガラスを浸漬させたイオン交換水(室温で3週間浸漬させたもの)のUV-vis吸収スペクトル測定結果をFig. 5に示した。紫外光領域に溶出したモリブデン酸に由来する吸収が見られたが、Al₂O₃、B₂O₃、Nb₂O₅のような3成分目の酸化物を添加することでこの吸収が顕著に減少した。特にNb₂O₅を加えた場合にはほとんどUV-vis吸収に変化は無く、溶出がほとんど無いことが示唆された。以上のことから、Al₂O₃、B₂O₃、Nb₂O₅のような3成分目の酸化物を添加することで耐水性の向上が可能であることが確認できた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計11件)

1) Norio Wada, Naohiro Horiuchi, Katsuyuki Mukogawa, Kosuke Nozaki, Miho Nakamura, Akiko Nagai, Toshinori Okura, Kimihiro Yamashita, Electrostatic induction power generator using hydroxyapatite ceramic electrets, *Mater. Res. Bull.*, 査読有, 74, 50-56 (2016).

<https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2015.10.007>

2) Toshinori Okura, Naoya Yoshida, Kimihiro Yamashita, Na⁺ superionic conducting silicophosphate glass-ceramics - Review (Invited Review), *Solid*

State Ionics, 査読有, 285, 143-154 (2016)
<https://doi.org/10.1016/j.ssi.2015.08.008>

3) 大倉利典「リン酸塩ガラスによる高レベル放射性廃棄物の固定化(その2)」*PHOSPHORUS LETTER*, 査読無, 86, 7-14 (2016)

4) Kosuke Nozaki, Hiroki Koizumi, Naohiro Horiuchi, Miho Nakamura, Toshinori Okura, Akiko Nagai, Kimihiro Yamashita, Suppression effects of dental glass-ceramics with polarization-induced highly dense surface charges against bacterial adhesion, *Dent. Mater.*, 査読有, 34/ 5, 671-678 (2015)

<http://doi.org/10.4012/dmj.2014-342>

5) Toshinori Okura, Naoya Yoshida, New Iron Phosphate Glasses for High Level Nuclear Waste Immobilization (Review), *J. Soc. Inorg. Mater. Japan*, 査読有, 22, 238-243 (2015)

6) Naohiro Horiuchi, Yu Tsuchiya, Norio Wada, Kosuke Nozaki, Miho Nakamura, Akiko Nagai, Toshinori Okura, Kimihiro Yamashita, Polarization-Assisted Surface Engineering for Low Temperature Degradation-Proof in Yttria-Stabilized Zirconia Ceramics, *J. Asian Ceram. Soc.*, 査読有, 3/ 2, 156-159 (2015)

<https://doi.org/10.1016/j.jascer.2015.02.002>

7) Naoya Yoshida, Yuji Nakamura, Toshinori Okura, Preparation of Photocatalytic Thin Films of Tricalcium Phosphate by Doping Titanium (IV) Ion, *Phosphorus Research Bulletin*, 査読有, 29, 31-35 (2015)

<http://doi.org/10.3363/prb.29.31>

8) Naoya Yoshida, Ryosuke Yokonishi, Takaaki Imai, Yuji Nakamura, Ryo Kadokura, Yujing Tong, Shen Ye, Toshiya Watanabe, Toshinori Okura, Hydrophobic Surface Modification of Stainless Steels, *J. Soc. Inorg. Mater. Japan*, 査読有, 22, 19-23 (2015)

9) 大倉利典, 吉田直哉「リン酸塩ガラスの構造とその特異性」*PHOSPHORUS LETTER*, 査読無, 84, 66-71 (2015)

10) Naoya Yoshida, Ryo Kadokura, Kunio Watanabe, Keiji Awata, Akio Ishida, Toshinori Okura, Evaluation of Iodine-Adsorption on Magnesium Compounds Toward Fixing of Radioactive Iodine, *Key Engineering Materials*, 査読有, 617, 201-204 (2014)

11) Toshinori Okura, Koji Kawada, Naoya Yoshida, Hideki Monma, Kimihiro Yamashita, Synthesis and Na⁺ conduction properties of Nasicon-type glass-ceramics in the system Na₂O-Y₂O₃-R₂O₃-P₂O₅-SiO₂ (R=rare earth) and effect of Y substitution, *Solid State*

Ionics, 査読有, 262, 604-608 (2014)
<https://doi.org/10.1016/j.ssi.2013.10.043>

〔学会発表〕(計80件)

1) T. Okura, “(Invited IAAM Medal Lecture) Synthesis and Na⁺ conduction properties of Narpasio glass-ceramics”, Asian Advanced Materials Congress (ASAMC) 2017, Singapore, (2017/03/13)

2) T. Okura, “(Invited Keynote Lecture) Na⁺- fast ionic conducting silicophosphate glassceramics”, The 16th Australasian BioCeramic Symposium, Brisbane, (2016/12/05)

3) T. Okura, “(Invited Lecture) Na⁺-superionic conducting glass-ceramics of silicophosphates” The 9th International Symposium on Inorganic Phosphate Materials, Tokyo, (2016/09/28)

4) T. Okura, “(Plenary Lecture) New Superionic Conductor Narpasio Glass-Ceramics”, Advanced Ceramics and Applications V, Belgrade, (2016/09/21)

5) T. Okura, “(Invited Speech) Effects of Microstructure on Conductivity of Narpasio Glass-Ceramics”, The Energy, Materials, and Nanotechnology Ceramics Meeting 2015, Orlando, (2015/01/28)

6) T. Okura, “(Invited Speech) New Superionic Conducting Glass-Ceramics of Silicophosphates”, 2014 Energy Materials Nanotechnology (EMN) Summer Meeting, Cancun, (2016/06/10)

他74件

6. 研究組織

(1)研究代表者

大倉 利典 (OKURA TOSHINORI)

工学院大学・先進工学部・教授

研究者番号 : 70255610