

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289267

研究課題名(和文) 複合酸化物の熔融塩中還元による粉末粒子の形状制御

研究課題名(英文) Morphology control of complex oxide reduction in the molten salt

研究代表者

鈴木 亮輔 (SUZUKI, Ryosuke, O.)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：80179275

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：難還元性酸化物MOとCaOとの複合酸化物 Ca_xMyO_z で、かつ結晶異方性がある酸化物を、熔融 CaCl_2 中で還元を行い、特異な結晶外形をもつ金属Mの微粉末を製造した。複合酸化物のみを金属カルシウムにより還元を行ったところ、酸化ニオブを出発原料とするよりも多くの枝状金属ニオブが得られた。 TiS_2 のカルシウム熱還元法および熔融塩電解法により還元を行った。カルシウム熱還元において0.26mass%の金属Tiが、熔融塩電解法において0.015mass%の金属Tiがそれぞれ得られた。粉末表面の酸素汚染が著しい。

研究成果の概要(英文)：The complex oxide consisting of stable oxide MO and CaO with crystalline inhomogeneity was reduced in the molten CaCl_2 to form a specific appearance of metallic crystal. Because the amount of bar-like Nb was preferentially produced from Ca_xMyO_z , the dendritic Nb is formed via the complex oxide, even when starting from Nb_2O_5 . The morphology depends on the sequence of reduction. New production process of metallic Ti is proposed using TiS_2 : When TiS_2 is reduced in CaCl_2 -CaS molten salt, oxygen contamination should be free. As well as CaO in OS process, CaS is electrochemically decomposed to Ca and it reacts with TiS_2 to form metallic Ti. Resultantly it contained only 0.015mass% S. By calciothermic reduction in a canned CaCl_2 molten salt without electrolysis, 0.26mass% S in Ti was achieved from TiS_2 . The residual oxygen in the both reactions were related with the particle surface.

研究分野：材料熱化学

キーワード：酸化物還元 硫化物還元 デンドライト状 特異な結晶成長 熔融塩化カルシウム カルシウム還元

1. 研究開始当初の背景

申請者は研究者生活を始めた 1983 年以來一貫してチタンの安価な還元方法を捜し求め、金属塩化物などを經由せず、難還元性の酸化物 TiO_2 を Mg や Ca 等を用いて、直接還元によって固体金属に還元する方法を研究してきた。 Ti や Ta , Nb は、炭素還元が不可能、もしくは著しく困難である元素であるため、金属塩化物などを一旦製造して、還元しやすい化合物に換え、それらを還元する工業プロセスが採用されている。しかし、連続製造も難しいエネルギー多消費型プロセスを継続運用していくことに限界が生じている。安価な非鉄金属原料を求めるユーザーに対し、製造業界の動きは極めて鈍く、申請者を含め、ごくわずかな研究者のみが直接還元挑戦していたに過ぎなかった。

2000 年に英国の Fray 教授らが「溶融 $CaCl_2$ 中に酸化物の酸素イオンを溶解させる」電解法(FFC 法)を発表して世界を驚かせたが、独自に研究を進めていた申請者らが翌年に溶融 $CaCl_2$ 中の CaO 電解により生成する Ca を用いて TiO_2 を還元し、良好な金属 Ti を製造できると直接還元に基づいた実験結果と新解釈を発表した。アメリカ金属学会 TMS の年間最優秀論文賞日本人初受賞の名誉を得て、一連の研究成果は世界的に注目されてきた。溶融 $CaCl_2$ の持つ不思議な還元作用とその Ti 製錬応用への強い関心は、専門の国際会議がすでに 3 回も開催されたことで明白である。特に $CaCl_2$ の持つ還元作用は難還元性酸化物の還元効果的であり、希土類金属以外の酸化物還元=金属製造に適用できることを申請者らは明示して、この分野をリードしてきた。例えばその中で、 Ta_2O_5 の Ca 還元では、ある条件下でブロッコリ状の球状粉末と棒状粒子の奇妙な形態の結合体が生成することを見出した。工業的にはコンデンサの製造に理想的な粉末であったことから、この技術は興味をもたれているが、残念ながら未だ、その生成機構の一般化は不十分であった。

一方、最近 Nb_2O_5 の $CaCl_2$ 中での還元で、 Ca を多量に用い、強く還元すると球状の Nb が生成するのみであるが、副反応物 CaO との複合酸化物 $CaNb_2O_6$ 等を生成してから順次低級な酸化物を経て金属 Nb へと還元すると、板状や棒状の Nb が生成することを申請者らは見出した。これは CaO を溶解する溶融 $CaCl_2$ 中での Ca 還元、次の二つの還元機構が存在すると思われる。

微細な出発酸化物の外形形状をそのままに、固体状態を保ちつつ酸素を失う還元反応が高速で進むと、出発酸化物の形態構造を持った金属粉末となる。特に短時間の強還元で粉末同士の焼結が抑止された場合に生じる。

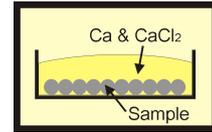
還元副生成物の CaO と出発酸化物が反応して、異方性を有する中間的な複合酸化物 $Ca_xM_yO_z$ を一旦生成し、さらに還元が進む。この複合酸化物の形態や結晶構造を強く反

映した外形を持つ特異な形態(板状や針状、棒状、サイコロ状など)を持つ金属粉末となる。

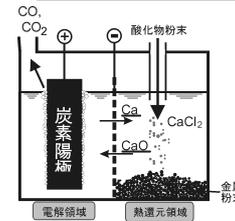
しかしながら、これらの機構を上手に使いこなす還元・粉末製造条件は未だ確立していなかった。

一方、ここ約十年間の溶融 $CaCl_2$ に対する世界的な研究で明快になってきたように、還元方法は少なくとも 3 通りに大別されている。すなわち、

(A) 溶融 $CaCl_2$ に純粋な Ca を直接添加して行う Ca 還元、



(B) 溶融 $CaCl_2$ 中に溶解している CaO を電気分解し、陰極析出の Ca を用いた還元 (OS 法)



(C) 酸化物の酸素イオンを溶融 $CaCl_2$ 中に溶出させる電気化学反応による還元 (FFC 法)

の 3 通りである。(A)と(B)は申請者らの提案で、(C)は Fray 教授らの提案である。(B)と(C)は還元性の強弱(外部からの印加電位差)で選択・制御できる。例えばわが国の国プロとして開発された「溶融 $CaCl_2$ の電解と $TiCl_4$ の還元」(JTS 法)は、(B)から派生した。溶融 $CaCl_2$ を用いた還元技術は大いに進化してきたものの、実用化のペースは遅い。投資コストを短期に回収できる機能性の高い金属粉末の製造は実用化にとっても魅力的であり、研究の必要性があった。

2. 研究の目的

難還元性酸化物 MO と CaO との複合酸化物 $Ca_xM_yO_z$ で、かつ結晶異方性がある酸化物を、溶融 $CaCl_2$ 中で還元を行い、特異な結晶外形をもつ金属 M の微粉末を製造する。微細で非等方的な粉末製造例として、

電解コンデンサの焼結を抑制する効果のある「微細な針状 Ta および Nb の粉末」

触媒用「サイコロ状 V 粉末」を調査する。ともに溶融 $CaCl_2$ 中での反応である、(A) Ca 還元、(B) CaO の電解による還元 (OS 法)、および(C)酸化物電解法(FFC 法)で製造し、三法の反応メカニズムと粉末性状、酸化物系相平衡を実験で検討する。

微細で非等方的な粉末の製造例として、電解コンデンサ用粉末の熱処理中の焼結収縮を抑制する効果がある「針状で微細な Ta および Nb 微粒子」の作製を試みる。触媒用「サイコロ状 V 粒」は等方的な粉末製造の例として検討する。

上記で分類したように既知の、(A) Ca 還元および(B),(C)の 2 種類の電解還元、の 3 方法で製造を試みる。順序としては(A),(B),(C)の順に調査する。高温化学反応として基本となる(A)を確認した後、電気化学反応の関与のある(B)と(C)での反応進行の過程を電気化学の面から調査する。(B)と(C)の相違は主として

印加電圧の相違による荷電体の相違である。 CaNb_2O_6 と $\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ および CaV_2O_4 を出発原料とした場合の還元状況とアルコール洗浄法を調べる。

3. 研究の方法

溶融 CaCl_2 を用いた実験炉を整備し還元実験を準備する。実験は特に Nb および V に集中する。

Nb_2O_5 および合成した CaNb_2O_6 と $\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ を出発原料にとり、(A) CaCl_2 と Ca を混合して還元、(B)(C)溶融 CaCl_2 中の電解による還元、の 3 種類の実験を行い、「針状で微細な Nb 微粒子」の作製を試みる。焼結収縮を抑制するため、(B)(C)では Ca 濃度、通電時間、通電量を制御する。

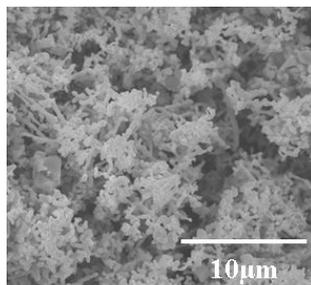
同様に V_2O_5 および V_2O_5 から合成した CaV_2O_4 を出発原料に採用する。 V_2O_5 は大気中では低温で融解後、自然に還元されるので、原料の合成にの結果が必要である。 CaV_2O_4 から等方的な粉末「サイコロ状 V 粒」の製造を検討する。

酸化バナジウムと同様に都市鉱山から算出される硫化バナジウムを原料として塩化物浴中の電解還元を行う。酸化物では得られない形状の金属バナジウムの製造が期待される。

4. 研究成果

600g の CaCl_2 を保持するルツボを挿入できる炉芯管を耐熱性のある SUS316L で製作し、これを発泡性レンガと SiC 発熱体を利用して製作した電気炉に装填した。温度調節系は自作である。真空排気設備は耐食性を考慮したポンプと配管を用いた。特にポンプの油の管理が重要であった。一定の電圧を供給する定電圧装置と、パソコンを用いた測定・記録システムを準備した。原料 Nb_2O_5 と CaO との複合酸化物を大気中で焼成して合成した。

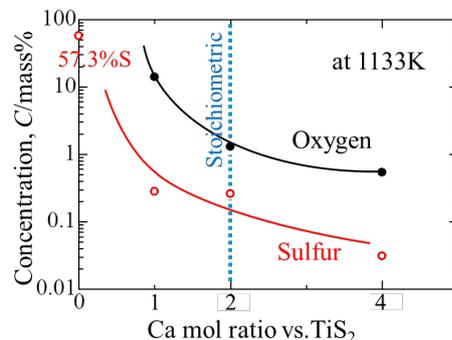
金属 Ca を用いた還元実験は、SUS316L で製作した密閉容器内に酸化物:Ca: CaCl_2 :CaO を所定のモル比で混合して充填した。充填比は Ca の蒸発損と溶損を考慮して定めた。また発熱反応の効果を回避するため、金属 Ca は酸化物と直接接触させず、溶融 CaCl_2 に一旦溶解させてから酸化物に作用させ、副生成物の CaO も溶融 CaCl_2 に溶出しやすいよう配置を工夫した。この結果、安定酸化物の Nb_2O_5 およびその関連物質を出発原料として、特異な枝状の金属ニオブが優先的に生成した。棒状の Nb 粒子が生成した他、箒のように連結した特徴ある粒子を製造することが出来た。枝状の金属ニオブが生成しなかった試料では、金属カルシウムの添



加が少ないために、中間生成物である複合酸化物が生成した。複合酸化物のみを金属カルシウムにより還元を行ったところ、酸化ニオブを出発原料とするよりも多くの枝状金属ニオブが得られた。枝状金属ニオブの生成には還元過程の中間体である複合酸化物が大きく寄与していた。以上の結果より枝状金属ニオブの新規生成プロセスを提唱した。

CaCl_2 中の CaO 電気分解を用いた Ca 製造、還元利用を、同じ電気炉を用いて検討した。MgO ルツボに CaCl_2 を詰め、0.5 ~ 4.0mol%CaO となる溶融塩で申請者が開発し OS 法と呼ばれるようになった電解法（前頁下図）で試した。陽極は炭素棒、陰極はチタンバスケットとした。陰極電流密度が重要な要因であった。OS 法の基本的な操作要因として温度、時間、電気量、電圧、を変化させると共に還元試料量、CaO 濃度、の効果も検討して、比較的緩慢な還元に対し残留酸素濃度とこれらの変数との関係を調べた。

出発原料として TiO_2 に代わり、 TiS_2 を用いた電解還元、および Ca 熱還元により、金属 Ti を製造することに成功した。脱硫は高速で比較的容易であった。得られた Ti は鉄板に孔食が生じたような外観で、硫黄の離脱による著しい収縮を反映していた。



どの粒子も硫黄の他、酸素も含んでいた。

TiS_2 を用いたカルシウム熱還元法および溶融塩電解法により還元を行い、新たな製錬プロセスの詳細な検討を行った。 TiS_2 を出発としたカルシウム熱還元において 0.03mass%S の金属 Ti が、溶融塩電解法において 0.01mass%S の金属 Ti がそれぞれ得られた。酸素混入経路は洗浄時の湿式処理時の抽出に由来したので、凝固塩の湿式除去法の改善によって未反応の TiS_2 の酸化を防止することが必要である。

バナジウムの硫化物の還元を行ったところ、容易に金属バナジウムを得た。硫黄の除去は容易であった。しかしながら数%に達する厳しい酸素汚染が残った。金属粒子は主として、やや四角い、滑らかな表面を持つ再結晶粒から構成されていた。当初のサイコロ状バナジウム金属粒子は高速に焼結して珊瑚床状になった。

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 9 件)

T. Kikuchi, R. Ishida, S. Natsui, T. Kumagai, I. Ogino, N. Sakaguchi, M. Ueda, R.O. Suzuki, "Carbon Nanotube Synthesis via the Calciothermic Reduction of Carbon Dioxide with Iron Additives", 査読有, ECS Solid State Letters, 4 (9), (2015) M19-M22. DOI: 10.1149/2.0031509ssl

R.O. Suzuki, T. Uchiyama, T. Wakamatsu, F. Matsuura, M. Kitamura, K. Otake, S. Natsui, N. Sakaguchi, Tatsuya Kikuchi, "CO₂ Decomposition by ZrO₂ Anode and Molten Salt Electrolysis in CaCl₂-CaO or LiCl-Li₂O," 査読無, Proc. 10th Intern. Conf on Molten Salt Chemistry and Technology (MS10) and 5th Asian Conf. on Molten Salt Chem. and Tech.(AMS5), 10-14 June, 2015, Northeastern University, Shenyang, China, pp.218-223.

R.O. Suzuki, "Oxide reduction using electrolysis in CaCl₂-CaO or LiCl-Li₂O melt," 査読無, Proc. 10th Intern. Conf on Molten Salt Chemistry and Technology (MS10) and 5th Asian Conf. on Molten Salt Chem. and Tech.(AMS5), 10-14 June, 2015, Northeastern University, Shenyang, China, pp.1-4. (Plenary Lecture).

F. Matsuura, T. Wakamatsu, S. Natsui, T. Kikuchi, R.O. Suzuki, "CO Gas Production by Molten Salt Electrolysis from CO₂ Gas", 査読有, ISIJ International, 55 (2) (2015) pp.404-408. DOI: 10.2355/isijinternational.55.404

M. Baba, T. Kikuchi, R.O. Suzuki, "Niobium Powder Synthesized by Calciothermic Reduction of Niobium Hydroxide for Use in Capacitors", 査読有, J. Phys. Chem. Solid., 78 (2015) 101-109. DOI: 10.1016/j.jpics.2014.11.014

T. Wakamatsu, T. Uchiyama, S. Natsui, T. Kikuchi, R.O. Suzuki, "Solubility of Gaseous Carbon Dioxide in Molten LiCl-Li₂O", 査読有, Fluid Phase Equilibria, 385 (2015) 48-53. DOI: 10.1016/j.fluid.2014.10.046

K. Otake, H. Kinoshita, T. Kikuchi, R.O. Suzuki, "CO₂ Gas Decomposition to Carbon by Electro-reduction in Molten Salts", 査読有, Electrochimica Acta, 100 (2013) 293-299. DOI: 10.1016/j.electacta.2013.02.076

I. Ueda, M. Baba, T. Kikuchi, R.O. Suzuki, "Formation of Niobium Powder by Electrolysis in Molten Salt", 査読有, Electrochimica Acta, 100 (2013) 269-274. DOI: 10.1016/j.electacta.2013.01.054

R. Enmei, T. Kikuchi, R.O. Suzuki, "Production of Nb-Ti-Ni alloy in molten CaCl₂", 査読有, Electrochimica Acta, 100 (2013) 257-260. DOI:10.1016/j.electacta.2012.11.044

〔学会発表〕(計 25 件)

“溶融 CaCl₂ を用いた TiS₂ のカルシウム還元”, 鈴木宣好、野口宏海、田中真理子、夏井

俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔, 日本鉄鋼協会第 171 回春季講演大会, 東京理科大学 葛飾キャンパス, 2016 年 3 月 23-25 日

“V₂S₃ を用いた OS 法によるバナジウム製錬”, 松崎隆洋, 菊地竜也, 夏井俊悟, 鈴木亮輔, 平成 27 年度日本鉄鋼協会・日本金属学会 両北海道支部合同冬季講演大会, 2015 年 12 月 17-18 日、北海道大学フロンティア応用科学研究棟

“CaCl₂ 浴中での TiS₂ のカルシウム還元”, 鈴木宣好、野口宏海、田中真理子、夏井俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔, 平成 27 年度日本鉄鋼協会・日本金属学会両北海道支部合同冬季講演大会, 2015 年 12 月 17-18 日、北海道大学フロンティア応用科学研究棟

“酸化物の電解還元時における雰囲気ガス圧力効果”, 北村三佳、野口宏海、羽田大将、夏井俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔, 京大工 宇田哲也, 第 47 回溶融塩化学討論会 2015 年 10 月 28-29 日、神戸大学百年記念会館

“TiS₂ のカルシウム還元”, 鈴木宣好、野口宏海、田中真理子、夏井俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔, 松若大介, 第 47 回溶融塩化学討論会 2015 年 10 月 28-29 日、神戸大学百年記念会館

“CaCl₂-CaO 溶融塩電解による CaTiO₃ の還元における固体電解質アノード”, 羽田大将, 北村三佳, 野口宏海, 夏井俊悟, 菊地竜也, 鈴木亮輔, 第 47 回溶融塩化学討論会 2015 年 10 月 28-29 日、神戸大学百年記念会館

“溶融塩電解を用いた CaTiO₃ の還元における ZrO₂ 固体電解質の利用”, 羽田大将, 北村三佳, 野口宏海, 夏井俊悟, 菊地竜也, 鈴木亮輔, 平成 27 年度日本鉄鋼協会第 170 回秋季講演大会 2015 年 9 月 16-18 日, 九州大学伊都キャンパス

“硫化チタンの溶融塩還元による低酸素チタンの製造”, 鈴木亮輔, 松若大介, 平成 27 年度日本鉄鋼協会第 170 回秋季講演大会 2015 年 9 月 16-18 日, 九州大学伊都キャンパス

“CaCl₂ 浴中を用いた Ca 還元による枝状金属 Nb の生成”, 鈴木宣好、夏井俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔, 平成 27 年度日本金属学会秋季大会, 2015 年 9 月 16-18 日九州大学伊都キャンパス

“CaCl₂ 浴を用いた Ca 還元による枝状金属 Nb の生成”, 鈴木宣好、夏井俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔, 日本鉄鋼協会・日本金属学会両北海道支部合同サマーセッション, 2015 年 7 月 17 日(金) 室蘭工業大学

“Oxide reduction using electrolysis in CaCl₂-CaO or LiCl-Li₂O melt”, R.O. Suzuki (Plenary lecture), 10th Int. Conf. on Molten Salt Chem. and Techn. (MS10) & 5th Asian Conf. on Molten Salts Chem. Techn. (5AMS), 10-14 June 2015, at Northeastern University, Shenyang, China,

“CaCl₂-CaO 溶融塩電解を用いた酸化物還元とアノードガス制御”, 羽田大将、野口宏海、夏井俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔, 電気化学会

第 82 回大会、2015 年 3 月 15-17 日、横浜国立大学

“塩化カルシウム溶融塩を用いた酸化ニオブのカルシウム還元”、鈴木宣好、夏井俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔、日本鉄鋼協会・日本金属学会北海道支部合同平成 26 年度冬季講演大会、2015 年 1 月 29-30 日、室蘭工業大学

“CaCl₂-CaO 溶融塩電解によるチタン酸化物の還元とアノードガス発生”、羽田大将、野口宏海、夏井俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔、電気化学会第 46 回溶融塩化学討論会、2014 年 11 月 13-14 日、かずさアカデミアホール

“CaCl₂-CaO 溶融塩電解による CaTiO₃ の還元とカソード電極形状”、野口宏海、羽田大将、夏井俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔、電気化学会第 46 回溶融塩化学討論会、2014 年 11 月 13-14 日、かずさアカデミアホール

“Production of Pure Ti Powder from CaTiO₃ Using Electrolysis in CaCl₂-CaO Melt”, R.O. Suzuki, The 4th International Round Table on Titanium Production in Molten Salts, 3-7 November 2014, Shanghai University, Shanghai, China (Keynote Lecture)

“カルシウム還元を用いた電解コンデンサ用マイクロポラス合金の作製”、菊地竜也、吉田雅純、夏井俊悟、幅崎浩樹、鈴木亮輔、電気化学会秋季大会、2014 年 9 月 27-28 日、北海道大学(依頼講演)

“溶融塩電解を用いた CaTiO₃ の還元”、羽田大将、野口宏海、夏井俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔、日本鉄鋼協会第 168 回秋季講演大会、2014 年 9 月 24-26 日、名古屋大学

“二酸化炭素のカルシウム還元による CNT 生成”、石田龍馬、菊地竜也、夏井俊悟、坂口紀史、鈴木亮輔、平成 25 年度日本金属学会日本鉄鋼協会両支部合同冬季講演大会、2014 年 1 月 23-24 日、北海道立道民活動センター

“金属チタン製造方法の新提案あれこれ”、鈴木亮輔、軽金属学会東北支部講演会 2013 年 11 月 22 日、東北大学工学部

①“チタニアナノ粒子のカルシウム還元によるポラスチタンの作製”、吉田雅純、菊地竜也、夏井俊悟、幅崎浩樹、鈴木亮輔、表面技術協会 ARS 第 30 回弘前コンファレンス、2013 年 11 月 7-8 日、弘前パークホテル

②“チタニアナノ微粒子の Ca 還元によるポラスチタンの作製”、吉田雅純、菊地竜也、夏井俊悟、幅崎浩樹、鈴木亮輔、日本金属学会 2013 年秋季講演大会、2013 年 9 月 17-19 日、金沢大学角間キャンパス

③“ジルコニアナノ粒子のカルシウム還元挙動”、石田龍馬、菊地竜也、鈴木亮輔、日本金属学会 2013 年秋季講演大会、2013 年 9 月 17-19 日、金沢大学角間キャンパス

④“マイクロ/ナノジルコニア粒子のカルシウム還元”、石田龍馬、菊地竜也、鈴木亮輔、平成 25 年度日本金属学会・日本鉄鋼協会両北海道支部合同サマーセッション、2013 年 7 月 26 日、室蘭工業大学

⑤“酸化物還元原料の CaTiO₃ を鉍石から製造

する技術開発”、鈴木亮輔、日本チタン協会産学連携委員会シンポジウム「チタン製錬技術の革新を目指して」2013 年 5 月 8 日、丸の内パークビル

〔図書〕(計 1 件)

R.O. Suzuki, D. Yamada, S. Osaki, R.F. Descallar-Arriesgado, T. Kikuchi, "Ionic Conduction of Oxygen and Calciothermic Reduction in Molten CaO-CaCl₂", in "Molten Salts Chemistry and Technology", ed. by M. Gaune-Escard, G. M. Haarberg, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, UK, ISBN: 978-1-118-44873-1 (2014) pp.115-122. DOI: 10.1002/9781118448847.ch2a

〔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

<http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/ecopro/>

<http://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/>

ecopro/rosuzuki/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 亮輔 (SUZUKI, Ryosuke)

北海道大学 大学院工学研究院材料科学部門・教授

研究者番号：80179275

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者

菊地竜也 (KIKUCHI, Tatsuya)

北海道大学 大学院工学研究院・准教授

夏井俊悟 (NATSUI, Shungo)

北海道大学 大学院工学研究院・助教

鈴木 宣好 (SUZUKI, Nobuyoshi)

北海道大学 大学院工学院修士課程・学生

馬場 正彦 (BABA, Masahiko)

北海道大学 大学院工学院博士後期課程・学生

若松 貴文 (WAKAMATSU, Takafumi)

北海道大学 大学院工学院修士課程・学生