

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01763

研究課題名(和文) チタン, シリコン金属製造の刷新を目指した超高温溶融塩化カルシウム中の電解法の検討

研究課題名(英文) Innovative production process of Ti and Si by electrolysis in molten CaCl<sub>2</sub> at high temperature

研究代表者

竹中 俊英 (Takenaka, Toshihide)

関西大学・化学生命工学部・教授

研究者番号：60197324

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、溶融塩化カルシウム(CaCl<sub>2</sub>)中でチタン金属(Ti)、シリコン金属(Si)を液体状態で電析させる革新的製造法について検討した。酸化カルシウム(CaO)共存下で酸化チタン(TiO<sub>2</sub>)は溶融CaCl<sub>2</sub>に溶解可能でTiが電析した。CaOとTiO<sub>2</sub>の比は大きな影響を及ぼし、モル比3:2の時にのみTiが電析した。ただし、電析量はわずかで、いわゆるシャトル反応が電析を妨害していることが示唆された。ケイ酸カルシウムも溶融CaCl<sub>2</sub>中に溶解可能で、Siが電析した。CaOとケイ酸(SiO<sub>2</sub>)の比もSi電析に影響を及ぼすものの、条件によって良好なSi電析が行えることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、シリコンについては本研究で提案する手法で効率的に製造可能であることが示された。また、提案する手法でチタンが効率的に製造できない理由についても詳しく検討を行い、今後その課題を克服するための知見を得た。さらに、アルミニウムの新規な製造法の開発につながる成果も得られた。本研究の成果は、低環境負荷のチタンやシリコンの革新的製造法の開発につながるものであり、ゼロカーボン社会の実現に資するものと考えている。

研究成果の概要(英文)：Electrolytic production of Ti metal and Si metal in molten CaCl<sub>2</sub> with their oxides was investigated in this study.

TiO<sub>2</sub> dissolved in molten CaCl<sub>2</sub> with CaO, and Ti metal electrodeposited. The molar ratio of CaO to TiO<sub>2</sub> strongly affected the Ti metal deposition. Ti metal was obtained only in the bath where CaO:TiO<sub>2</sub> = 3:2, but the obtained Ti was a little even under this condition. It was suggested that the so-called shuttle reaction hindered the Ti deposition. Calcium silicate dissolved in molten CaCl<sub>2</sub>, and Si metal was obtained. The influence of the molar ratio of CaO to SiO<sub>2</sub> on the Si deposition was seen, but Si metal electrodeposited effectively under the suitable condition.

研究分野：金属生産工学

キーワード：チタン シリコン アルミニウム 溶融塩電解 CaCl<sub>2</sub> 液体金属

## 1. 研究開始当初の背景

チタン(Ti), シリコン(Si), さらにアルミニウム(Al)が, 高い工業的価値を有することは言うまでもない。しかし, その金属の製造プロセスには, 例えば表1のような課題が指摘されており, 革新的製造プロセスの開発が希求されている。

表1 現在のチタン, シリコン, アルミニウム製造法と課題。

	現行法	指摘されている課題
チタン	Kroll法	低い生産性とそれに伴う高価格
シリコン	ケイ砂の炭素還元(超高温)	高エネルギー消費, 多CO <sub>2</sub> 排出
アルミニウム	Hall-Heroult法	用いるフッ化物の環境負荷と資源供給

研究代表者らは超高温の熔融塩電解浴を用いた金属電析に関して独自の研究を続け, 成果をあげてきた。また行ってきた共同研究から, 液体 Ti と熔融塩化カルシウム(CaCl<sub>2</sub>)が共存可能であるとの情報を得た。このような研究経験から, 超高温の熔融 CaCl<sub>2</sub> 中にチタン酸イオン(Ti<sub>x</sub>O<sub>y</sub><sup>z-</sup>)やケイ酸イオン(Si<sub>x</sub>O<sub>y</sub><sup>z-</sup>)を溶解させて電解することにより, これらの金属を液体状態で電析可能であるのではないかと考えて研究に着手した。また, Al についても同様の手法が適用できるのではないかと考えた。この方法により, これら金属を液体状態で電解製造できれば, 上表のような課題を解決する革新的な素材製造プロセスの開発につながると考え, 本研究を着想した。

## 2. 研究の目的

本研究は, 従来法に代わる Ti(融点:1668°C), Si(融点:1414°C)金属素材の革新的製造プロセスの開発を目指し, これらの金属をその融点以上の温度での熔融塩電解を行うことにより, 液体状態で直接電析させる手法について検討した。この手法の開発に必要な学術的諸課題を解決するための研究を行うとともに, 開発手法が Al 金属の製造にも適用できるかについても検討した。さらに, Ti, Si, Al の電析に関する研究成果を, 以下の視点から比較検討した。

Ti, Si, Al の特性のうち, これらの電析に大きな影響を及ぼす因子として, ①溶質としての溶解度, ②電析電位, ③電解浴中での安定なイオン状態に注目した。①溶解度については上述の通り実験的に検討した。②電析電位については, Si が最も貴で, Ti と Al はやや卑で同程度と考えられる。熔融 CaCl<sub>2</sub> 中では電位を卑にしすぎると Ca 電析が競合する可能性が高く, 電析電位の影響は大きいものと考えられる。③安定なイオン状態については, Ti は熔融 CaCl<sub>2</sub> で複数の安定なイオン状態を持つのに対し, Si, Al の安定なイオン状態は 1 種類と考えられ, このことが金属の電析に及ぼす影響がある。さらに, Ti は安定な酸塩化物を形成する可能性があり, それが Ti 金属の電析に影響を及ぼすことが考えられる。酸塩化物形成の影響を明らかにするため, 本研究では安定な酸塩化物を形成されると言われている La について, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を用いた検討も行うことにした。

## 3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するため, 本研究では以下の大項目について検討した。

- ① 高温の熔融 CaCl<sub>2</sub> 中への Ti や Si 酸化物(酸化物錯体)の溶解度や溶解形態に関する検討
- ② 溶解した金属酸化物の濃度や溶解形態と金属還元挙動の関連に関する検討
- ③ Al や希土類金属(RE)等についての研究との比較検討

研究には, 既存の縦型超高温炉と本経費により購入した横型超高温炉を用い, 1100°C以上の熔融 CaCl<sub>2</sub>を電解浴とした。過去の研究から, Ti 酸化物(TiO<sub>2</sub>)や Si 酸化物(SiO<sub>2</sub>)は単独では熔融 CaCl<sub>2</sub> 中にはあまり溶解せず, CaO を添加すると溶解することが明らかになっており, チタン酸イオン(Ti<sub>x</sub>O<sub>y</sub><sup>z-</sup>)やケイ酸イオン(Si<sub>x</sub>O<sub>y</sub><sup>z-</sup>)として溶解していることが示唆されている。また, この状態での Ti や Si の電気化学的挙動が, CaO と TiO<sub>2</sub> の比, あるいは CaO と SiO<sub>2</sub> の比によって変わることも示されている。このため, 実験ではこれらの比を固定するため, 予めチタン酸カルシウム(Ca<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub>), あるいはケイ酸カルシウム(Ca<sub>x</sub>Si<sub>y</sub>O<sub>z</sub>)を予め合成し, これを溶質として主に用いた。Ti と Si に関する研究成果を参考に, 熔融 CaCl<sub>2</sub> 中にアルミン酸カルシウム(Ca<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>O<sub>z</sub>)を添加した浴で, Al の電析に関する研究も行った。これまでの研究成果から, 本研究では電析電位や電解温度のほか, 添加する CaO と TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> のモル比(以下 R<sub>CaO/TiO2</sub>, R<sub>CaO/SiO2</sub>, R<sub>CaO/Al2O3</sub>)にも焦点を当てて実験を行った。

熔融 CaCl<sub>2</sub> 中での Ti, Si, Al の電気化学的挙動は主にサイクリックボルタンメトリーを用いて調べ, チタン酸カルシウム, ケイ酸カルシウム, のアルミン酸カルシウム溶解度を, サイクリックボルタンメトリーの結果から推定した。サイクリックボルタンメトリーの結果を参考に, 定電位電解法で Ti, Si, Al の電析を試みた。電析物は, XRD, SEM-EDX により評価した。なお, 以下で述べる電位は, サイクリックボルタンメトリーで測定した Mo の溶出電位を基準としたものである。

## 4. 研究成果

### (1)Ti 電析に関する研究

チタン酸カルシウムの添加により、サイクリックボルタンメトリーで観測される還元電流は有意に増加し、Ti の還元反応が起こることが示された。Ti の電気化学的挙動は  $R_{CaO/TiO_2}$  によって大きく変わり、表 2 に示すように、 $R_{CaO/TiO_2} < 1.5$  では 3 段階の還元反応が、 $R_{CaO/TiO_2} \geq 1.5$  では 2 段階の還元反応が起こっていることが示唆された。表 1 に、 $R_{CaO/TiO_2}$  と電位を変えて定電位電解を行って得られた電析物の結果を併せて示す。いろいろな条件で電析物中に Ti 金属が検出されたが、Ca 金属が同時に検出された条件が多く、Ti 金属のみが検出されたのは、 $R_{CaO/TiO_2} = 1.5$  の場合だけであった。また、後述の Si や Al 電析の場合とは異なり、用いた Mo 陰極表面には Ti-Mo 合金層は形成されていなかった。Ca 金属が同時に見られる場合には、Ca 金属が電析または Ca 金属霧として形成され、これが Ti イオンを還元した可能性がある。これらの結果から、Ti 金属は  $R_{CaO/TiO_2} = 1.5$  の場合にのみ電析し、その場合も電析量は非常に少ないことが示唆された。

表 2 Ti 電解における定電位電解条件と電析物およびサイクリックボルタンメトリーから推定される還元段数。(1573K)

		$R_{CaO/TiO_2}$		1.0		1.325		1.5		1.8		2.0	
by PE	$E_{cath}(V)$	-2.1	-1.6	-1.8	-1.7	-1.9	-1.8	-1.9	-1.9	-1.9	-1.8	-1.7	
	Ti metal	○	×	×	○	○	○	○	×	○	×		
	Ca metal	○	×	△	△	×	×	△	×	○	×		
by CV	react. steps	3		3		2		2		2			

○ : detect × : not detect △ : depend on Ti ion concentration in bath.

$R_{CaO/TiO_2} = 1.5$  の場合にのみ電析する結果は、研究代表者らが同程度の温度での熔融フッ化物中で行った研究成果とよく一致した。本研究での O/Cl 比、熔融フッ化物中での O/F 比から、 $R_{CaO/TiO_2} = 1.5$  の場合には  $Ti_2O_6^{4-}$  が形成され、これが Ti 金属の電析に重要であることが示唆される。

図 1 に  $Ca_3Ti_2O_7$  ( $R_{CaO/TiO_2} = 1.5$  相当) 添加量とサイクリックボルタンメトリーで得られた陰極電流の関係を示す。この結果から、 $Ca_3Ti_2O_7$  の熔融  $CaCl_2$  への溶解度は数 mol% であると推定された。しかし、5mol% 程度のかかなり高濃度の Ti イオンが存在する条件でも、わずかな量の Ti 金属しか電析せず、電流効率を求めることはできなかった。

## (2) Si 電析に関する研究

サイクリックボルタンメトリーで観測される還元電流は、ケイ酸カルシウムの添加により有意に増加し、Si の還元反応が起こることが示された。サイクリックボルタンメトリーの結果を見る限り、Si の還元反応は 1 段階でおこり、 $R_{CaO/SiO_2}$  を変えても顕著な差は見られなかった。サイクリックボルタンメトリーの結果から推定されるケイ酸カルシウムの溶解度は数 mol% であった。

Mo を陰極として電解を行ったところ、表面に厚い  $MoSi_2$  層が形成され、電極表面からは Si 金属が検出された。この結果から、ケイ酸カルシウムを添加した熔融  $CaCl_2$  中で電解を行うことで Si 金属を電析できることが示された。

Si 金属をえるため、市販の  $MoSi_2$  材料を陰極として用いたところ、定電位電解によって  $MoSi_2$  陰極上に Si 金属が厚く電着した。図 2 に電析物重量と電解電気量から陰極電流効率と電析電位の関係の一例を示す。電位を卑にするにつれ電流効率は大きくなったが、電位を卑にしすぎると電流効率は急激に悪化した。このような条件下では  $CaSi_2$  が電析物中に見られ、Ca が共析することにより電流効率を悪化させたものと考えられる。これらの結果から、Ca が共析しないできるだけ卑な電位で電解を行うことにより、効率的に Si 電析が可能であることがわかった。また、 $R_{CaO/SiO_2}$  は Si 電析に影響を及ぼすものの、 $R_{CaO/SiO_2} = 1.5$ 、 $R_{CaO/SiO_2} = 2.0$  のいずれの場合でも Si が電析しており、Si 電析への  $R_{CaO/SiO_2}$  の影響は、Ti の場合ほど極端ではないことがわかった。

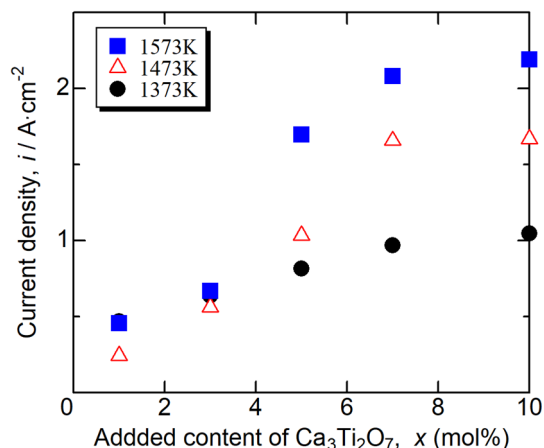


図 1  $Ca_3Ti_2O_7$  添加量と陰極電流の関係。(サイクリックボルタンメトリー: -1.5V)

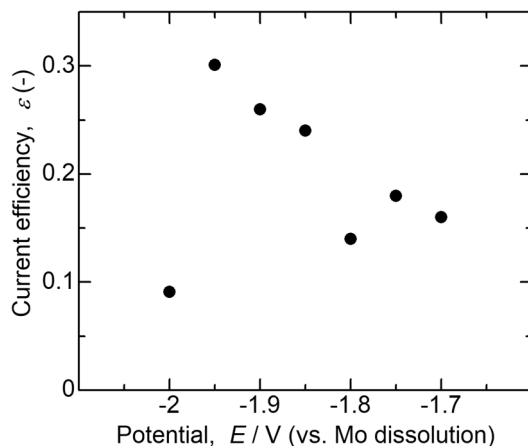


図 2  $Ca_2SiO_4$  添加浴での電解電位と電流効率の関係。(  $Ca_2SiO_4$ : 5mol%, 1673K)

本研究は液体状態の Si 電析させることが目標であるが、現状では完全に液体状態の Si 金属を得るには至っていない。1450°Cで電解を行って得られた電析物の一例を図3に示す。得られた電析物の形状から、部分的には液体状態で電析していることが示唆され、電解条件を最適化することで、液体状態での Si 金属電析も可能であるものと考えられる。

### (3) Al 電析に関する研究

熔融 CaCl<sub>2</sub> 中に市販の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 材料を浸漬したところ、CaO を含まない場合にはほとんど重量減少がなかったのに対して、CaO を含む場合には大きく重量減少した。CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> を熔融 CaCl<sub>2</sub> 中に添加してもサイクリックボルタンメトリーで得られる還元電流はほとんど増加しなかったが、Ca<sub>12</sub>Al<sub>14</sub>O<sub>33</sub> や Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub> を添加した場合には還元電流が大きく増加し、 $R_{CaO/Al_2O_3} > 1$  の条件で Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は溶解するものと考えられる。サイクリックボルタンメトリーの結果から、Ca<sub>12</sub>Al<sub>14</sub>O<sub>33</sub> と Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub> の溶解度は 1300°C で 5mol% 程度であった。

CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> を添加した熔融 CaCl<sub>2</sub> 中で定電位電解を行ったところ、電極表面から Al-Mo 金属間化合物が検出されたが、Ca も検出されたことから、電解によって電析した Ca が電解浴中の微量な Al イオンを還元したものと考えられる。一方、Ca<sub>12</sub>Al<sub>14</sub>O<sub>33</sub> や Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub> を添加した熔融 CaCl<sub>2</sub> 中で定電位電解を行うと、図4に示すような Mo 陰極表面に Al<sub>8</sub>Mo<sub>5</sub>, Al<sub>5</sub>Mo, Al<sub>3</sub>Mo からなる Al-Mo 金属間化合物層が形成された。また、電解条件の調整により、Ca が検出されず、Al 金属が検出された。これらの結果から、Ca<sub>12</sub>Al<sub>14</sub>O<sub>33</sub> や Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub> を添加した熔融 CaCl<sub>2</sub> 中から Al 金属が電析可能であることがわかった。

熔融 CaCl<sub>2</sub> 中での Al 金属電析では、陰極材料の選定が問題であった。前述の通り、Mo を用いた場合は、表面に Al-Mo 金属間化合物層が形成されて、Al 金属としてはほとんど得られなかった。現行の Al 電解で用いられる黒鉛を陰極に用いると、Al<sub>4</sub>C が形成されて電極が崩壊した。そこで、前述の Si 電解の成果を参考に Al<sub>8</sub>Mo<sub>3</sub> を合成して、陰極材料として利用可能であることを明らかにした。ただし、現状では Al<sub>8</sub>Mo<sub>3</sub> 焼結体を電極として用いたため、良好な陰極特性は有しておらず、さらに改良が必要であることがわかった。

### (4) La 電析に関する研究

CaO を含まない熔融 CaCl<sub>2</sub> 中に La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を添加しても、サイクリックボルタンメトリーで得られる還元電流はほとんど増加しなかった。一方、CaO を含む場合には還元電流は La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に伴って増加し、1 段階の還元反応が起こっていることが示唆された。CaO/La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> モル比が 1.5 の場合に還元電流が一番増加したが、この場合でも還元電流の増加は、Ti, Si, Al に比べて非常に小さかった。La は La<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> のような酸塩化物を形成しやすいことが知られており、La<sub>x</sub>O<sub>y</sub><sup>z-</sup> のような酸素との錯イオンで溶解せず、難溶性の酸塩化物が形成されるものと推測される。定電位電解も試みたが、還元電流はほとんど流れず、La 金属の電析、あるいは La-Mo 合金層の形成は見られなかった。

### (5) 金属による電析挙動の比較

前述のように、熔融 CaCl<sub>2</sub> と液体 Ti は共存できることが示されている。しかしながら、高温では CaCl<sub>2</sub> は次第に蒸発するようになることがわかってきた。実際に、簡単な装置で検証したところ、1500°C 以上の温度で長時間保持した場合には質量減少が起こることが確かめられ、電解操作のような長時間の作業に用いる上での制約となることがわかった。熔融 CaCl<sub>2</sub> を電解浴として用いる場合の上限は 1500°C と考えている。

Ti, Si, Al, La について研究代表者らが着目した特性と、研究成果をまとめて表3に示す。

Si については、熔融 CaCl<sub>2</sub> 中で効率的に電解製造できる可能性が示された。Al については、熔融 CaCl<sub>2</sub> 中で電析可能であることが示されたが、電析条件等についてより一層の検討が必要であると考えられる。La については、熔融 CaCl<sub>2</sub> 中に La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が溶解せず、La 金属や La-Mo 合金は得られなかった。これは、La が難溶性の酸塩化物を形成することが原因と考えている。

Ti 金属の電析が難しいことが示された。CaO を含む熔融 CaCl<sub>2</sub> 中には TiO<sub>2</sub> が溶解し、還元電流も流れたものの、Ti 金属の電析はごくわずかで Ti-Mo 合金層も形成されなかった。Ti 電析が困難である理由を、「2.研究の目的」で述べたいくつかの要因に着目して考察した。まず、TiO<sub>2</sub> が溶解することが確かめられた。次に、Ti と Al の電析電位は近接しており、電析電位による影響も小さいものと考えられる。ま

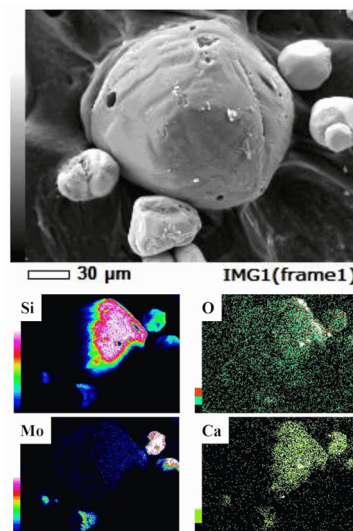


図3 Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 添加浴で得られた電析物。  
(Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>:7mol%, 1723K, -1.9V)

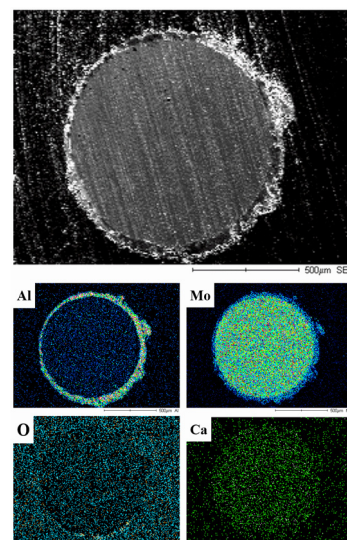


図4 Ca<sub>12</sub>Al<sub>14</sub>O<sub>33</sub> 添加浴で得られた Al-Mo 合金層。  
(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:7mol%, 1573K, -1.8V)

表 3 チタン, シリコン, アルミニウムの特性と本研究の成果.

	注目した特性			実験結果			
	電析 電位	安定なイオン価	酸塩化物 の形成	CaO存在下 での溶解度	金属電析	Mo上への 合金層形成	$R_{CaO/MxOy}$ の影響
Si	貴	4+	×	数mol%	あり	あり	弱い
Ti	↑ 近接 ↓	2+, 3+, 4+	?	数mol%	ごくわずか	なし	強い
Al		3+	×	数mol%	あり	あり	あり
La		3+	○	少量	なし	なし	あり
Ca	卑						

た, 大きな電解電流が流れることや電解に及ぼす  $CaO/TiO_2$  比の影響などを考慮すると, 酸塩化物の形成の影響は小さいものと考えられる. Ti は熔融塩中で複数のイオン価で安定に存在できることが知られており, 部分還元によって中間生成物として Ti の低級イオンが生成し, その溶解度が小さい可能性が考えられた. このことを検証するため,  $Ti_2O_3$  を用いた実験も行ったが,  $TiO_3$  の溶解度が小さいという結果は得られなかった.

一連の検討から, 消去法ではあるが, Ti が熔融塩中で複数のイオン価で安定に存在できることに起因する, いわゆるシャトル反応が Ti 電析が困難である主な原因であると考えている. シャトル反応を抑制するためには, 低級イオンを形成させないことが必要となる. 十分に卑な電位で電解すればシャトル反応は抑制できるが, 熔融  $CaCl_2$  中では Ca 金属の電析が起こるため, 適用は難しい. 電析した Ti 金属を陰極表面に固着させることも有効であり, その意味からも Ti 金属を液体状態で得ることは有効と考えられる. しかし前述のように, 熔融  $CaCl_2$  を用いた Ti の融点以上の温度での電解は困難と考えられる. 従って現状では, 熔融  $CaCl_2$  を用いて Ti 金属を液体状態で効率的に製造することは困難であるとの結論に至っている.

#### (6) 総括

本研究では, Ti, Si の酸化物を電解原料として熔融  $CaCl_2$  中に溶解させ, 電気分解によって Ti や Si 金属を液体状態で得るプロセスについて検討した. その結果, Ti 酸化物は熔融  $CaCl_2$  中に溶解可能であるものの, Ti 金属の電析は困難であることが示され, その原因としてシャトル反応が考えられることを明らかにした. Si 酸化物も熔融  $CaCl_2$  中に溶解可能で, Si 金属を液体状態で電析可能であることを示し, 効率的な電析を行うための条件を明らかにした. Ti や Si 電析の過程で, Al 金属電析についても検討し, CaO を含む熔融  $CaCl_2$  中に Al 酸化物が溶解し, Al 金属が電析可能であることを明らかにした.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Iwai Yuta, Morishige Taiki, Takenaka Toshihide	4. 巻 98
2. 論文標題 Al Electrodeposition in Molten CaCl <sub>2</sub> with Various Calcium Aluminates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 333 ~ 340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/09810.0333ecst	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takenaka T., Okada H., Shimokawa R., Morishige T.	4. 巻 321
2. 論文標題 Influence of bath composition on Ti metal deposition in molten CaCl <sub>2</sub> containing calcium titanate	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MATEC Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 7010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/mateconf/202032107010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takenaka Toshihide, Shimokawa Ryoya, Okada Haruka, Morishige Taiki	4. 巻 86
2. 論文標題 Electrodeposition of Si in Molten CaCl <sub>2</sub> above 1300K	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 29 ~ 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/08614.0029ecst	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Okada Haruka, Murata Maito, Morishige Taiki, Takenaka Toshihide	4. 巻 86
2. 論文標題 Influence of Molar Ratio of CaO to TiO <sub>2</sub> on Ti Electrodeposition in Molten CaCl <sub>2</sub>	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 117 ~ 122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/08614.0117ecst	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 岩井裕太、森重大樹、竹中俊英
2. 発表標題 Ca-Al-O化合物を添加した熔融CaCl <sub>2</sub> 中の液体Al電析
3. 学会等名 第52回熔融塩科学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Iwai Yuta, Morishige Taiki, Takenaka Toshihide
2. 発表標題 Al Electrodeposition in Molten CaCl <sub>2</sub> with Various Calcium Alumina
3. 学会等名 PRIME2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshihide Takenaka, Haruka Okada, Ryoya Shimokawa, Taiki Morishige
2. 発表標題 Influence of bath composition on Ti metal deposition in molten CaCl <sub>2</sub> containing calcium titanate
3. 学会等名 The 14th World Conference on Titanium (Ti-2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryoya Shimokawa, Haruka Okada, Taiki Morishige, Toshihide Takenaka
2. 発表標題 Influence of CaO/SiO <sub>2</sub> ratio on Si electrodeposition in molten CaCl <sub>2</sub>
3. 学会等名 11th international symposium on Molten Salts chemistry and Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩井裕太, 森重大樹, 竹中俊英
2. 発表標題 熔融CaCl <sub>2</sub> へのCa-Al-O化合物の溶解とAl電解還元
3. 学会等名 第51回熔融塩化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 下川諒哉, 森重大樹, 竹中俊英
2. 発表標題 1400 以上での熔融CaCl <sub>2</sub> 中でのSi電析
3. 学会等名 第51回熔融塩化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田晏佳, 村田舞人, 森重大樹, 竹中俊英
2. 発表標題 熔融CaCl <sub>2</sub> -CaO-TiO <sub>2</sub> 浴の組成とTi電析の関係
3. 学会等名 第163回金属学会秋季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 下川諒哉, 岡田晏佳, 森重大樹, 竹中俊英
2. 発表標題 熔融CaCl <sub>2</sub> 中でのCaSiO <sub>3</sub> の溶解とMo陰極へのSi電析
3. 学会等名 第163回金属学会秋季講演大会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Toshihide Takenaka, Ryoya Shimokawa, Haruka Okada, Taiki Morishige
2. 発表標題 Electrodeposition of Si in molten CaCl <sub>2</sub> above 1300K
3. 学会等名 AiMES 2018 ECS and SMEQ Joint International Meeting (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Haruka Okada, Maito Murata, Taiki Morishige, Toshihide Takenaka
2. 発表標題 Influence of Molar Ratio of CaO to TiO <sub>2</sub> on Ti Electrodeposition in Molten CaCl <sub>2</sub>
3. 学会等名 AiMES 2018 ECS and SMEQ Joint International Meeting (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡田晏佳, 村田舞人, 森重大樹, 竹中俊英
2. 発表標題 種々のCaO/TiO <sub>2</sub> 比のチタン酸カルシウムを添加した熔融CaCl <sub>2</sub> 中でのTi還元挙動
3. 学会等名 第50回熔融塩化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 下川諒哉, 岡田晏佳, 森重大樹, 竹中俊英
2. 発表標題 熔融CaCl <sub>2</sub> 中でのCaSiO <sub>3</sub> の溶解とSi電析
3. 学会等名 第50回熔融塩化学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 下川諒哉, 岡田晏佳, 森重大樹, 竹中俊英
2. 発表標題 熔融CaCl <sub>2</sub> 中でのCaO/SiO <sub>2</sub> 比がSi電析に及ぼす影響
3. 学会等名 電気化学学会第86大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋興世, 森重大樹, 竹中俊英
2. 発表標題 Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> を添加した熔融CaCl <sub>2</sub> 中での液体金属Si電析
3. 学会等名 日本金属学会2021年秋期講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋興世, 森重大樹, 竹中俊英
2. 発表標題 1450 でCa <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> を添加した熔融CaCl <sub>2</sub> 中でのSi電析
3. 学会等名 第53回熔融塩化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋興世, 森重大樹, 竹中俊英
2. 発表標題 1450 でCa <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> を添加した熔融CaCl <sub>2</sub> 中でのSi電析
3. 学会等名 資源・素材学会 関西支部第18回「若手研究者・学生のための研究発表会」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋興世, 森重大樹, 竹中俊英
2. 発表標題 CaO/SiO <sub>2</sub> モル比=1.8化合物を添加した熔融CaCl <sub>2</sub> 中でのSi電析
3. 学会等名 鉄鋼プロセス研究会・材料化学研究会令和3年度学生発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋興世, 森重大樹, 竹中俊英
2. 発表標題 CaO/SiO <sub>2</sub> モル比=1.8, 2.2化合物を添加した熔融CaCl <sub>2</sub> 中でのSi電析
3. 学会等名 日本金属学会2022年春季(第170回)講演大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	森重 大樹  (Morishige Taiki)  (30530076)	関西大学・化学生命工学部・准教授   (34416)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------