

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02491

研究課題名(和文)電析マイクロカロリメトリ支援による金属融体界面マルチフィジックスの展開

研究課題名(英文)Development of Multiphysics at High-temperature Melt Interface with Electrodeposition Microcalorimetry

研究代表者

夏井 俊悟 (Shungo, Natsui)

東北大学・多元物質科学研究所・准教授

研究者番号：70706879

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電位制御された高温の金属融体-溶融塩(溶融酸化物含む)界面を対象とし、動的な反応界面現象の理解・制御を深化する新規学理展開のための技術創出を目的としています。電位・電流応答と高速同期された高感度イメージング、数値流体シミュレーションに加え、新たに微小シース熱電対電極による電析マイクロカロリメトリを用いました。具体的には2つの課題、微量元素を含む高温溶融塩中での溶融活性金属電析、微量元素を含む溶鉄-溶融スラグ界面のアノード分極時挙動を対象として、高い解像度での高温融体界面マルチフィジックスモデルを提案します。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金属生産の大部分は、環境負荷が大きい高温融体を反応場とした高温乾式製錬プロセスに依存します。長期的な所用エネルギー削減目標達成と技術優位性保持のためには現実の高温融体反応場の非平衡状態での効率を決定付ける支配因子とは何かを明らかにした、新たな高温場の制御技術へ向けた学理展開が不可欠です。本研究では、製錬反応が進行する電位制御された金属融体界面のイメージングおよび熱挙動の同時計測を実施しました。微小な電極温度変化を追従することで、微量元素を含む系の界面における物質移動について高い解像度で理解を深め、将来的な新規プロセス設計指針を得ることができます。

研究成果の概要(英文)：This research focused on the potential-controlled high-temperature metal melt-molten salt (or molten oxide) interface. We aim to create technology for developing new theories to deepen understanding and control of dynamic reaction interfacial phenomena. In addition to high-sensitivity imaging synchronized with high-speed potential/current response and computational fluid dynamics simulation, we newly used electrodeposition microcalorimetry using a micro-sheathed thermocouple electrode. Specifically, this study developed a high-temperature interface multiphysics model through the two systems: 1) molten active metal electrodeposition in a molten salt containing trace elements, and 2) the behavior of molten iron-molten slag interface containing trace elements during anodic polarization.

研究分野：金属生産および資源生産関連

キーワード：金属融体 マルチフィジックス 電気化学測定 熱移動 流体

1. 研究開始当初の背景

社会基盤を担うベースメタルの生産方式を考えると、そのほとんどが環境負荷の大きい高温融体を反応場とした高温乾式製錬プロセスに依存しており、本分野でのカーボンニュートラルへの取り組みとして第一に重要なのは、長期的な所用エネルギー量削減目標達成であり、そのためには抜本的な従来プロセス変革が必要とされている。また、諸国の経済的躍進の中、我が国独自の技術優位性保持のためには、現実の高温融体反応場の非平衡状態での効率を決定付ける支配因子とは何かを明らかにした、今までは不可能と思われるような高温場の制御技術へ向けた学理展開が不可欠であろう。乾式製錬プロセスにおいては、目的の金属融体は何らかの溶融化合物と接触し、不純物を除去する方向に反応が進行する。鉄鋼製錬では溶融酸化スラグと銑鉄、チタン製錬では溶融塩化チタンと液体マグネシウム、銅製錬では銅の溶融硫化物マットと溶融スラグのように両者は相を成して接する。従来、この複雑界面は平均化・粗視化され、平衡論に基づく熱力学モデルによりプロセス設計がなされてきた。また、熱流体工学をベースとした移動現象解析モデルに物質移動や界面移動を取り入れたマルチフィジックス・シミュレーションが速度論解析に大きく貢献してきた。しかし、実際には反応物の接触形態が完全に制御されない限り融体はこれらのモデル通りに進行しない。反応場への金属融体の分散・懸濁や、相界面に生成する第3相の影響(気泡や液滴、界面流動など)が多くなる。これらは見かけ上極めて複雑な挙動を示すので平均化して評価することが多いが、明示的に分離解明して、流れと界面形状を含んだ総体として定量化できないかと考えた。

2. 研究の目的

化学反応が進行中の金属融体-溶融塩界面の形態を特徴づけるのは極めて困難である。一方、局所的に生じる様々な外乱要素を極力排除した高速・高感度のその場観察によって、その困難さは緩和され、例えば以前の研究(若手研究 18K14036)で溶融 LiCl-CaCl_2 中での定電位電解時に高速に電析($<1.000\text{s}$)する Li-Ca 合金液滴の成長挙動の直接顕微観察を行ったところ、電極界面に生成する合金液滴の非常挙動以外に、電極付近の金属霧が自発的にネットワーク状の流れ構造を作ることが明示された。このような流れのセル形態は、ごく少量の残留水分および酸化イオン(O^{2-})源($0.1\text{mol}\%$ Li_2O or CaO)による汚染に非常に敏感であり、これによる電流効率低下との相関も見出された。このとき液滴の合一過程は非常に高速なので各時刻で安定形状であり、流れ構造が融体界面の界面張力勾配(electro-capillarity 含む)に起因する所謂 Marangoni-Bénard 対流に支配されることが示唆される。高速度 ($<10\text{ms}$)かつ小規模($<100\mu\text{m}$)に進行する界面移動を解析する必要がある。多界面あるいは分散相などが混在する系の数値流体力学シミュレーションとして、界面の取り扱いにおける新たな物理モデルを mesh-free 法を適用するとともに、界面活性剤に相当する挙動を示す系内力チオンや水分量、雰囲気界面流動に対する効果を従来よりも詳細に調査することで、融体界面挙動の制御と理解について新規の知見が得られると考えた。反応系内で固溶体を形成しにくい金属を電極として採用し、極細シース加工を施して超極細熱電対を電極内に装入することで、溶融塩中での電気化学反応の熱挙動を詳細に調べる方法(電析マイクロカロリメトリと呼称)を考案するに至った。

3. 研究の方法

本手法の応用として、現在の金属生産工学で重要な2つの系を設定し課題とした。

(1) 問題 1: 水分含有溶融塩電解における水素化物形成過程の定量

溶融塩化物の電解において、電極付近は非常に敏感であり微量不純物元素に大きな影響を受ける。わずかな水分によって、還元剤としての溶融アルカリ金属は水素化物(ヒドリド)あるいは水酸化物となって汚染されてしまう。ヒドリドは電気伝導性が極めて低く、直接電析しない。そのため電位-電流応答に依る電気化学測定では明示的に追跡できない。本研究で提案する手法により、電析時の吸熱から発熱へのシフトを利用した個別の反応量を定量化する。問題1については、以下のように解析を実行した。実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。真空乾燥機付き電気抵抗炉を用いて、平面を有する石英容器で $2\sim 3\text{ Pa}$ で乾燥させた無水 CaCl_2 ($>95\text{ wt}\%$, $\text{m.p.} = 1055\text{ K}$)、および $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ($99\sim 103\text{ wt}\%$)を用いて所定の水分含有量に調整し、 Ar 雰囲気 ($>99.9995\text{ vol}\%$) で電解実験を実施した。石英保護管を備えた K 型熱電対 (TC) を使用して測温し、各種電極を電気化学測定のためのシールを維持しながら溶融塩に浸漬した。モリブデン (Mo) は、不活性で高温腐食に強く、電着する Ca と同様に溶融塩との反応性が低いいため、作用電極 (WE) の材料として使用した。Fig. 1b に示すように、極細 TC をチューブ状に成形した WE 内部に配置した (内径: 1.57 mm 、 $>99.95\%$ 、Systembrain Co., Ltd.)。挿入された微細 TC は、正確な温度測定のために、 MgO ナノ粉末を使用して絶縁して電気化学反応に寄与する回路から完全に分離

することで、Mo チューブ表面で発生する電気化学反応による温度変化から発生する熱起電力をオシロスコープを用いて記録した。Al₂O₃ 絶縁管を使用して WE 浸漬長さを 5 mm に制御した。対極はグラファイト棒、参照電極は Ag/Ag⁺ とした。電気化学測定システム (HZ-5000、北斗電工) を用いた。また、以前の研究で開発した溶融塩電解中の電極表面観察手法を用いて、電極界面の変化を高速デジタルカメラを使用して 640×480 ピクセルの画像を 2000 fps (500μs 間隔) で取得した (HAS-D71、モノクロ、主応答スペクトル範囲: 500-600 nm、Ditect Co., Ltd.)。電極間電圧と顕微鏡画像は、アナログ信号同期システムを使用して同期した。WE と塩の界面の画像は、画像処理ソフトウェア (PFV Viewer、Photron Co., Ltd.) を使用して解析のために処理した。高耐ノイズ電圧測定モジュール (720254 を搭載した DL350、横河電機株式会社) を備えたスコープコードを使用し、電極と浴中で TC の熱起電力アナログ信号を測定して熱挙動を追跡した。電圧同期と圧力計からの電圧信号出力の測定には、WE-対極電極間を使用した。電圧信号の測定間隔は 100 μs に保持した。TC から発生する微小な熱起電力は、増幅器と 10Hz のローパスフィルタを用いてシャープな波形に変換した。

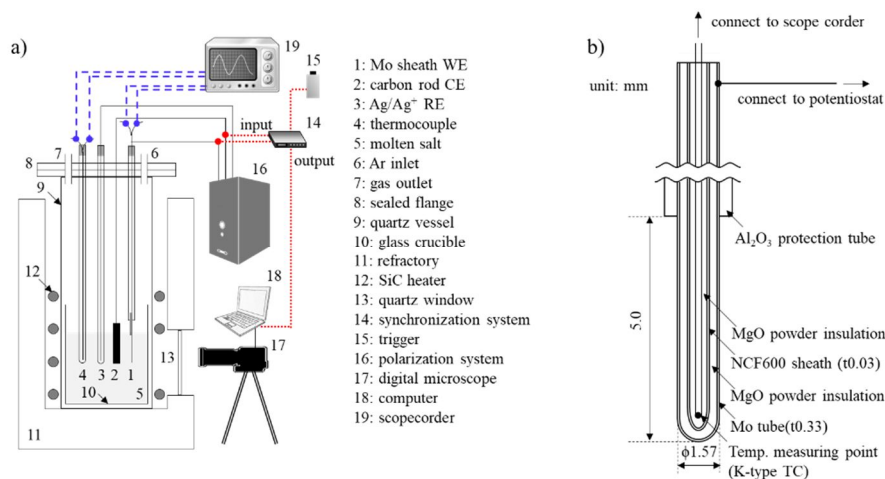


Fig. 1. Schematic of the experimental setup. (a) Experimental apparatus. Black, red, and blue lines denote the wiring related to electrolysis, high-speed imaging, and thermal measurement, respectively. (b) Mo sheath thermocouple electrode.

(2) 問題 2: 溶鉄中トランプ元素の溶融スラグ中への電気化学的移動促進技術の開発

溶鋼中 Cu は酸化除去困難であり、新たな除去方法が渴望されている。電位制御による Cu の溶融スラグへのアノード溶解を考える。含 Cu 溶鉄をアノードとして、溶鉄中に混入した微量の Cu が電気化学的に溶融スラグ中へ移動する過程の電気化学・熱解析の対象とした。ここでは本研究で発展させたポテンシャルに基づく界面張力モデルを用いた数値流体力学シミュレーションにより予測された、電気毛管現象による Cu の界面濃化が主眼となっている。具体的には、銅含有溶融鉄-溶融スラグ界面でのアノード反応挙動解明のため、以下のようなモデル系を設計した。スラグ中への銅の溶解を明確に検出するためなるべく高濃度の Cu とすることとし、計算で求めた Fe-Cu-Cs_{sat} 系状態図 (Factsage8.1, FSstel database) から、10wt% Cu とし、1773K, Ar 雰囲気中に保持することで電解時は均一相とし、冷却過程において Fe-rich 相と Cu-rich liq. 相に相分離させた。すなわち、メタルおよびスラグの各組成を Fe - 10 wt% Cu - 5.0 wt% C (Reagent-grade, Fujifilm Wako Pure Chemical Co.) および 27 wt% CaO - 27 wt% SiO₂ - 45 wt% Al₂O₃ (Reagent-grade, Fujifilm Wako Pure Chemical Co.) + 1.0 wt% CaS (Strem Chemicals inc., 99.9wt%) に調製し、アルミナ坩堝 (株式会社ニッカトー, SSA-S タンマン管, T6, 外径 φ40 mm, 内径 φ34 mm, 長さ 100 mm) に装入した。本組成は、高炉系スラグの組成を想定したものである。アルミナ保護管および坩堝がスラグに溶解しないようにスラグは Al₂O₃ 飽和となる組成とした。一方溶融鉄試料も炭素飽和とすることで、電気化学反応が進行しない状態においてメタル中の化学組成変化なしに炭素棒をリードとして利用することができる。メタル試料の質量は 25 g、スラグ試料の質量は 60 g とした。スラグ中にカーボン対極、Pt/Pt⁺ 参照電極を浸漬した。

4. 研究成果

問題 1 における得られた結果を簡潔に示す。Fig. 2 はグラフィカルに示した結果の一部であり、左には電位-電流応答に加え電解中 WE の微小な温度変化、中央には電解中生成する気泡のトラッキング例、右には理論的に見積もられた電析 Ca の電流効率を示した。カソード反応は Ca, H₂ の競合反応、さらに CaH 生成の影響を受ける。WE-溶融塩界面での熱収支を考慮すると、

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{T\Delta S}{nF}I - q_j - q_p - q_c \quad (1)$$

(entropy change) (Joule heat) (overpotential) (heat exchange)

のように考えられるので、Ca 析出反応の ΔS について熱化学ソフトウェア (FactSage7.0) を使用して、水溶液中の近似値を使用して推定、エンタルピー変化 $\Delta H = T\Delta S + \Delta G > 0$ より CaCl_2 融液中 Ca 析出反応が吸熱反応とした。 H_2O の非存在下で電位がより卑になると電着 Ca 量が増加し、右辺第 1 項が支配的になって電極温度が低下するが、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の量の増加に対応して発熱反応が増加し、電流効率を明らかに減少させることが明らかである。電気化学反応に寄与する総電流量に対する H_2 生成の比率を観察された気泡の体積から直接計算できるが、クーロン効率によって推定される H_2 生成量は 10% 以下であった。そのため、気泡として H_2 が発生するほか、析出した Ca と接触して CaH が生成する確率が高くなることが定量的に示されたと言える。2022 年度にはバスケット型カソード周囲の物質移動促進のための振動印可の影響についても調べており、その最適化について検討した。今後も継続して知見を収集する予定である。

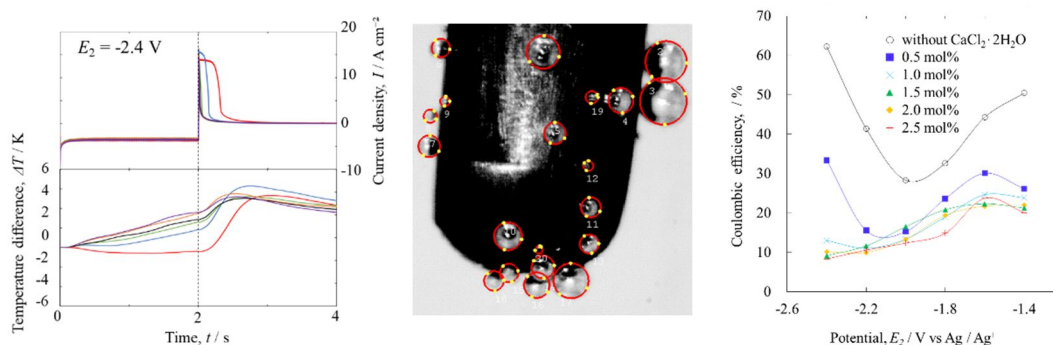
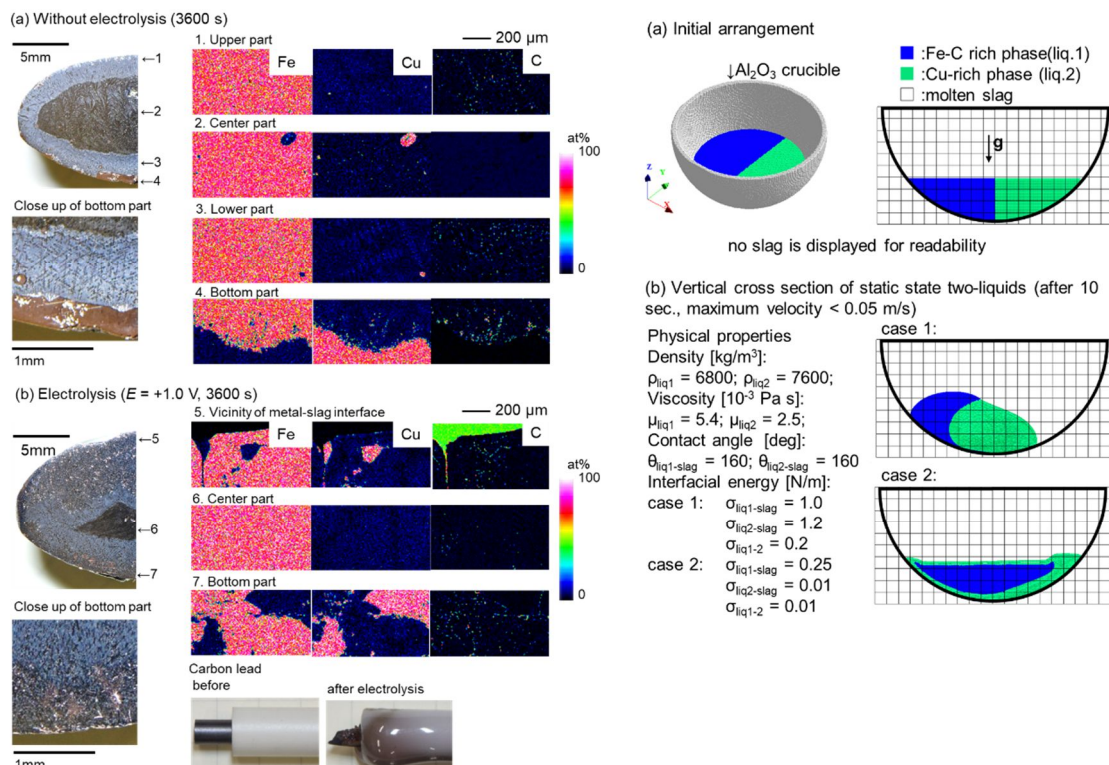


Fig.2. Examples of time changes of current density and temperature difference of Mo sheath thermocouple electrode in molten CaCl_2 with $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ at 1173 K, and change in Coulombic efficiency at each potential estimated by thermal analysis.

(引用元：Natsui, S., Shibuya, R., Suzuki, R. O., Kikuchi, T., Ito, A., Sato, T., ... & Nogami, H. (2022). Quantification of the Impact of Residual H_2O on Cathodic Behavior in Molten CaCl_2 Electrolysis. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 8(1), 532-540.)

問題 2 においては、現象の更なる理解のために今後も継続的な調査を必要とするが、予期していなかった結果を含め、判明した事実を以下に示す。Cu 含有溶鉄を定電位 $E = +2.0 \text{ V vs. Pt}$ で 19076 s で保持したとき、9539 C の電荷を通電出来た一方、スパイク状の通電不良が頻発した。この導通不良は、炭素棒の消耗、メタル-スラグ界面に析出した CO ガスによる絶縁などが理由として考えられた。Fig. 3 に電解なし、あるいは電解後に得られた、凝固後の金属試料・電極の写真、EPMA による各化学種の濃度分布を示す。まず、電解なしの場合 (Fig. 3a)、metal 試料の垂直断面図から、試料外周部のデンドライトが多く存在する組織と中心部のデンドライトが少ない組織、および底部には濃縮した赤褐色の相が見られた。EPMA マップから、下部のデンドライト組織中にわずかに Cu が存在するが、球状の銅濃縮相が鉄母相内部に点在する。凝固過程において、 $\gamma\text{-Fe}$ 中に Cu が濃縮されることが報告されており、凝固過程で同様の現象が生じたと考えられる。Cu-rich 相が炭素を排出しながら凝固するため、Fe-C rich 相界面に炭素が濃化すると考えられる。Cu-rich 相は初期凝固部である底部に集中しており、Fe-C rich 相との比重差約 1.12 より、溶融状態で比重分離が進行したと考えるのが自然である。ICP-AES による濃度分析の結果、Upper part (region 1) では 6.27wt% Cu, center (region 2) では 4.92wt% Cu, lower and bottom part (region 3 + 4) では 22.65wt% Cu であった。一方、+1.0 V vs. Pt, 3600 s 電解後のメタル試料には赤褐色の金属光沢が試料中広範囲にわたって分散して観察された。EPMA 像から、メタル-スラグ界面付近では局所的に高濃度の Cu が検出されたが、中心部では顕著には見られなかった。メタル-スラグ界面付近の形態は、典型的な thermal cracking が存在している。このことから、Cu の溶鉄中濃度勾配を駆動力とした拡散よりも十分迅速に凝固が生じ、メタル-スラグ界面付近に Cu が濃縮された状態で電解が進行したと考えるのが自然である。電解によって carbon lead が明らかに消耗しており、このことは、溶融メタル相中に飽和溶解した炭素がアノード分極によって酸化反応により消費されたことを示す。Cu 含有炭素飽和溶鉄を貴に分極したことにより金属およびスラグの接触形態が変化するのは、以下の様な界面に Cu が濃縮するメカニズムに依るものと推察される。溶融 Fe - Cu - C 系において Fe と Cu の比重の差異により合金下部に Cu-rich 相が沈殿した状態から、メタル-スラグ界面を貴に分極すると、電気毛管現象によって Fe-rich 相-スラグおよび Cu-rich 相-スラグ間界面エネルギーが減少する。拡張係数 S によって界面形態を予測することが出来、Fe および Cu とスラグ間の界面エネルギー、Fe - Cu 間の界面エネルギーは、既往の研究よりそれぞれ 1.0, 1.2, 0.2 N/m と見積もると $S < 0$ である。 $S < 0$ で Fe-C rich 相-slag 界面が存在する

が、 $S > 0$ では存在しない方が安定である。CaO-SiO₂-Al₂O₃系スラグ中においてFeおよびCuを貴に分極することで界面張力はともに低下するが、Cu-rich相-スラグ界面張力は他と比較して急激に低下するので、 $S > 0$ にシフトする。この予測は比重、粘性の流体力学的因子を無視している。そこで、本研究において開発した数値流体シミュレーションを実施した。本法はSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法をベースに、Fowkes theoryに基づいて多界面に拡張した界面張力モデルを導入したものである。なお簡単のため相互溶解を完全に無視した、体積比 1:1 のFe-C rich相とCu-rich相をスラグ中アルミナ容器内に配置した。考え得る各相界面が存在する状態を初期条件として、重力下で時間発展的に運動方程式(Navier-Stokes式)を解き、界面形態を緩和して十分静的となった状態を力学的平衡状態とみなした。Fig. 4に初期配置および計算結果を示す。分極前(case1)では比重差によりCu-rich相が下方に存在するが、拡張係数による予測と同様にFe-C rich相-slag相界面が存在する。その一方、分極した場合(case2)では、Cu-rich相がFe-C rich相を覆うように移動して、Fe-C rich相-slag相界面が消失した。重力および粘性による作用よりも本系では界面張力が支配的因子となって、界面形態が決まる可能性が示唆され、界面濃縮したCu-rich相が反応界面となる。



Left: Fig. 3. Photographs and EPMA maps of vertical cross section of metal samples.

Right: Fig. 4. Multiphase fluid flow simulation results; case1: three liquid phases of Fe-C rich phase, Cu-rich phase, and slag when not polarized; case2: three liquid phases considering changes in interfacial tension physical properties due to electrolysis.

(引用元: Natsui, S., Sato, T., Ito, A., Hayasaka, M., Iwama, T., Mori, K., ... & Nogami, H. (2023). Molten Oxide Electrolysis Using Copper-Containing Carbon-Saturated Molten Iron Anode. Journal of The Electrochemical Society, 170(2), 023501.)

Cuが低濃度の場合は熱力学的には2相分離しないはずである。Cu希薄系についても検討を行い、FeO濃度を高めたスラグを用いると、無電解試料の銅濃度は、仕込組成 0.503 wt% から 0.477 wt% まで減少したのに対して、10Vで1時間定電圧電解を行った場合は、仕込組成 0.507 wt% から 0.452 wt% まで銅濃度が低下した。FeOの還元を差し引いても、アノード分極によりCuの移動が促進されたと考えられる。溶融スラグ-銅含有溶融鉄系の鉄および銅の酸化還元電位について、分子動力学計算(VASP)にて見積もった。すなわち、系の自由エネルギーの成分量の微分から液体金属中Fe, Cuの化学ポテンシャルが得られるので、スラグ中も同様に求め、溶融スラグ-銅含有溶融鉄系の鉄と銅の酸化還元電位を推定した。本条件では酸化鉄を含むスラグへの溶解電位は0.24Vと見積もられ、常温水溶液中での酸化還元電位差(0.96V)よりも両者の電位は近い。さらに、状態図上ではCu濃度が低いので巨視的には二相分離が生じないが、計算上ではCuの3量体などが溶鉄中に存在しており、アノード分極によってこれらが界面濃縮する可能性も示唆された。前述のように、本現象については研究期間内では十分に明らかに出来ていないが、今後も継続的な調査を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Natsui Shungo, Sato Takahiro, Ito Akihisa, Hayasaka Miho, Iwama Takayuki, Mori Kota, Ueda Shigeru, Nogami Hiroshi	4. 巻 170
2. 論文標題 Molten Oxide Electrolysis Using Copper-Containing Carbon-Saturated Molten Iron Anode	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of The Electrochemical Society	6. 最初と最後の頁 023501 ~ 023501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/1945-7111/acb84f	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 Natsui Shungo, Shibuya Ryota, Suzuki Ryosuke O., Kikuchi Tatsuya, Ito Akihisa, Sato Takahiro, Yamamoto Rei, Nogami Hiroshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Quantification of the Impact of Residual H2O on Cathodic Behavior in Molten CaCl2 Electrolysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Sustainable Metallurgy	6. 最初と最後の頁 532 ~ 540
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40831-022-00516-w	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 Natsui Shungo, Tonya Kazui, Nogami Hiroshi, Kikuchi Tatsuya, Suzuki Ryosuke O.	4. 巻 229
2. 論文標題 SPH simulations of binary droplet deformation considering the Fowkes theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Science	6. 最初と最後の頁 116035 ~ 116035
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ces.2020.116035	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 Ohno Ko-ichiro, Natsui Shungo, Sukenaga Sohei, Tonya Kazui, Maeda Takayuki, Kunitomo Kazuya	4. 巻 60
2. 論文標題 Numerical Approach to Comprehend for Effect of Melts Physical Properties on Iron-slag Separation Behaviour in Self-reducing Pellet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 2695 ~ 2704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-218	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 Natsui Shungo, Tonya Kazui, Hirai Azuma, Nogami Hiroshi	4. 巻 414
2. 論文標題 Comprehensive numerical assessment of molten iron-slag trickle flow and gas countercurrent in complex coke bed by Eulerian-Lagrangian approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 128606 ~ 128606
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cej.2021.128606	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 Shibuya Ryota, Natsui Shungo, Nogami Hiroshi, Kikuchi Tatsuya, Suzuki Ryosuke O.	4. 巻 167
2. 論文標題 Characterization of the Cathodic Thermal Behavior of Molten CaCl ₂ and Its Hygroscopic Chloride Mixture During Electrolysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of The Electrochemical Society	6. 最初と最後の頁 102507 ~ 102507
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/1945-7111/ab9961	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13件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 守光太, 夏井俊悟, 桒上洋
2. 発表標題 銅含有溶融鉄-溶融スラグ界面におけるアノード反応による銅のスラグへの移行促進
3. 学会等名 第184回日本鉄鋼協会春季講演大会
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 山本玲維, 夏井俊悟, 桒上洋
2. 発表標題 溶融CaCl ₂ -CaO 中TiO ₂ 電解還元に及ぼすカソード電極への振動・回転印加の影響
3. 学会等名 第54回溶融塩化学討論会 2022年9月30日
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 夏井俊悟
2. 発表標題 溶融酸化物電解による溶融鉄中トランプ元素の電気化学的分離の試み
3. 学会等名 電気化学会北海道支部50周年記念シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 夏井俊悟
2. 発表標題 最近のマルチフィジクスおよびデータ解析の視点による動的な高温融体界面の追跡
3. 学会等名 日本学術振興会第69委員会（招待講演）
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 夏井 俊悟
2. 発表標題 金属製錬における分散相および融体界面の動力学シミュレーション
3. 学会等名 第3回非鉄製錬学WEB討論会 ” 高温融体の挙動のビジュアル化 ”（招待講演）
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 山本 玲維，夏井 俊悟，桒上 洋
2. 発表標題 溶融塩電解を用いたTiO ₂ 還元反応に対するカソード電極への回転印加の影響
3. 学会等名 第183回日本鉄鋼協会春季講演大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 夏井 俊悟, 佐藤丘郭, 伊藤 昭久, 岩間 崇之, 植田 滋, 桒上 洋
2. 発表標題 銅を含む炭素飽和溶融鉄-溶融酸化物界面におけるアノード反応挙動
3. 学会等名 第183回日本鉄鋼協会春季講演大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 佐藤 丘郭, 夏井 俊悟, 桒上 洋
2. 発表標題 溶融酸化物電解による炭素飽和溶融鉄からのCu分離
3. 学会等名 電気化学会第53回溶融塩化学討論会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 佐藤 丘郭, 夏井 俊悟, 桒上 洋
2. 発表標題 電気化学的方法による鉄中Cuの溶融スラグへの酸化除去
3. 学会等名 2021 (令和3) 年度 資源・素材学会 東北支部 総会・春季大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Shungo Natsui, Ryota Shibuya, Hiroshi Nogami, Tatsuya Kikuchi, Ryosuke O. Suzuki
2. 発表標題 Synchronized High-speed Microscopy and Thermo-analytical Measurement for sub-mm/sub-ms-scale Cathodic Behavior in Molten Salt Electrolysis
3. 学会等名 TMS 150th Annual Meeting & Exhibition, Symposium "Advanced Real Time Imaging", Orlando, FL, USA, 3.14-18. 2021. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 夏井 俊悟
2. 発表標題 高温分散相の動力学に基づく学理構築に向けた最近の取り組み
3. 学会等名 住友金属鉱山株式会社若手技術者会議特別講演, web講演会, 2020.9.25. (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤丘郭, 夏井俊悟, 埜上洋
2. 発表標題 溶鉄中トランプエレメントの分離を目指した熔融スラグ電解法
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第181回春季講演大会, 2021年3月17日(水)~19日(金), オンライン開催
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澁谷凌太, 夏井 俊悟, 鈴木亮輔, 菊地竜也, 埜上洋
2. 発表標題 熔融塩化物中のカソード電析物形態に関する熱収支の考察
3. 学会等名 電気化学会第52回熔融塩化学討論会, オンライン, 2020年11月26日(木)、27日(金)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 熔融スラグ電解によるトランプエレメント分離システム	発明者 夏井俊悟, 佐藤丘郭, 伊藤昭久, 埜上洋, 植田滋	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-28310.	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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	植田 滋 (Ueda Shigeru) (80359497)	東北大学・多元物質科学研究所・教授 (11301)	
研究分担者	鈴木 亮輔 (Suzuki Ryosuke) (80179275)	北海道大学・工学研究院・特任教授 (10101)	

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