

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 8 月 24 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04167

研究課題名(和文) 低品位銅精鉱の酸化焙焼とスラグ/マット融体形成・相分離過程

研究課題名(英文) Oxidation Reaction of Copper Concentrate with Low Grade and Phase Separation Process of Slag/matte Melts

研究代表者

武部 博倫 (Takebe, Hiromichi)

愛媛大学・理工学研究科(工学系)・教授

研究者番号：90236498

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：ホットサーモカップル法にて銅精鉱/珪石混合物にAr中で2秒間酸化性ガスを吹き付け急速加熱し、銅精鉱の着火反応、マット及びスラグ融体の形成、マグネタイト相の生成を各種顕微鏡で評価した。銅スラグ融体からジルコニアフィルターを通過させた後カーボン回転板で弾き飛ばし作製した粒状結晶化スラグでは、1 mol/Lの塩酸水溶液に対するAsとPbの溶出量について環境省告示第46号試験(As, Pbの含有量試験)を満足した。雰囲気制御可能な自作の粘度測定装置にて銅スラグ融体の粘度を測定した。マグネシア・クロム耐火物と銅スラグ融体の界面反応を熱力学的反応相の予測と高温反応実験から評価しその決定因子を理解した。

研究成果の概要(英文)：The hot-thermocouple method was applied for evaluations of the oxidation reaction of copper concentrate with silica sand and the phase separation of sulfide matte/oxide slag melts. The processes were monitored by a CCD camera through a microscope recorded by a personal computer. The quenched samples were analyzed by scanning electron microscopy. Copper slag granules cooled in air consisted of magnetite and fayalite phases with As and Pb elements concentrated in the residual SiO<sub>2</sub>-rich aluminosilicate non-crystalline matrix with a satisfaction of JIS K 0058-2 for the elution amounts of Pb and As in 1mol/L HCl aqueous solution. Viscosity of copper slag and synthesized FeO-SiO<sub>2</sub> slag melts were measured by rotating cylinder method. Interfacial reactions of re-bonded magnesia-chrome refractory with FeO-SiO<sub>2</sub> slag melt was studied under controlled oxygen partial pressure of atmosphere by the prediction of thermodynamically-stable phases and high-temperature reaction tests.

研究分野：非鉄製錬学

キーワード：製錬工学 銅乾式製錬 高温融体 相分離 その場観察 微細構造 粘度 耐火物

1. 研究開始当初の背景

(1)グローバルでの資源循環型社会において、2000年以降の世界的な銅精鉱低品位化に伴い[1]、銅生産量を維持・拡大するためには、スラグ発生量や銅スラグロスの増大が解決すべき喫緊の課題となっている。

日本においては Outokumpu 式自熔炉などの熔錬炉と転炉を中心とした銅製錬プロセス[2]が今後も主体であるものと予想される。持続可能な次世代銅乾式製錬プロセスの高度化のためには、以下に示す(1)~(4)の課題を検討することが重要と我々は考えている。

(1) 低品位銅精鉱の酸化反応過程のより良い理解：

銅精鉱の酸化反応過程を理解するために本研究では、ホットサーモカップル法（以下 HTC 法と略記）を用いた銅精鉱の酸化反応過程の直接観察と影響を及ぼす因子の理解についての研究に取り組んでいる[3]。

HTC 法では、Pt-13%Rh/Pt 熱電対の先端に少量 (0.1-0.5mg) の試料を担持し、熱電対にヒーターとしての加熱性能と熱電対としての测温機能を兼ねさせ、実体顕微鏡を通して反応過程での試料の変化を直接観察することが可能である[4]。

(2) 銅スラグ融体の粘度に及ぼす不純物の影響：

銅精鉱の酸化反応により生成した硫化物マット融体と酸化物スラグ融体はセトラや錬鋅炉での相分離プロセスにおいて分離される。銅スラグロスの低減化のためには、スラグ融体中のマット粒子の分離挙動に影響を及ぼすスラグ融体の粘度について、その組成及び温度依存性を理解することが重要である。

(3) 副生成物である銅スラグの有効利用：

銅製錬プロセスでは銅生産量の2倍以上の銅スラグが副生成物として発生しており、その有効利用が囑望されている。水砕された砂粒状銅スラグは環境省告示第19号試験（含有量基準）を満足しないことが未解決課題である。

(4) マグネシア・クロム質耐火物の長寿命化とクロムフリー化：

銅製錬の熔錬炉並びに転炉において腐食性の高い内壁には、マグネシア・クロム質耐火物（以下マグクロ耐火物）が使われている。将来的にクロムフリー耐火物の可能性を検討する基礎として、まずはマグクロ耐火物と銅スラグ融体の界面反応を理解することが必要である。

2. 研究の目的

(1)本研究では銅精鉱と溶剤の珪石との混合物を用い、HTC 法にて酸化反応過程を評価するために、昇温開始前後の短時間（約2秒）のみ酸化性ガスを吹き付けるとともに Ar 雰囲気にて約2秒間で $\geq 1200^{\circ}\text{C}$ までの急速加熱を行った。さらに HTC 法を用いた銅精鉱の酸化反応プロセスに伴う試料の温度並びに

巨視的な形態の変化を実体顕微鏡にて観察・記録するとともに、急冷試料を SEM-EDS を用いて評価した。

(2)マット/スラグ融体相分離プロセスの基礎データとして、雰囲気制御下で銅スラグ融体の粘度を測定する装置を自作し、その組成及び温度依存性の評価を行った。

(3)銅乾式製錬プロセスで発生した水砕銅スラグを再熔融した後、室温までの冷却速度を変化させ、結晶相、微細構造及び巨視的形態を制御するとともに、得られたスラグ試料について、環境省告示第19号試験に基づき、1 mol/L の塩酸水溶液に対する溶出量基準によってヒ素と鉛の溶出量を評価した。

(4)マグクロ耐火物と銅スラグ融体を酸素分圧制御下で反応させ、熱力学的予測相と実験による界面反応相との比較検討を行った。

3. 研究の方法

(1)銅精鉱試料は市販の  $\text{CuFeS}_2$  を主相とする硫化物鉱粉末であり、3.7 mass%の  $\text{SiO}_2$  を不純物として含んでいる。珪石は純度 95.1%の市販の粉末である。これらの原料を  $\text{Fe/SiO}_2=2.0$  (mass ratio)になるように混合し、HTC 法による実験に供した。

図1に HTC セルの模式図を示す。Ar ガスで雰囲気を調整した HTC セルにおいて、Pt-13%Rh/Pt 熱電対に0.3-0.4 mg の粉末試料を担持し、熱電対先端部から1 mm の距離に設置した注射針より酸化性ガス ( $\text{O}_2$  または air)を吹き付けた[3]。

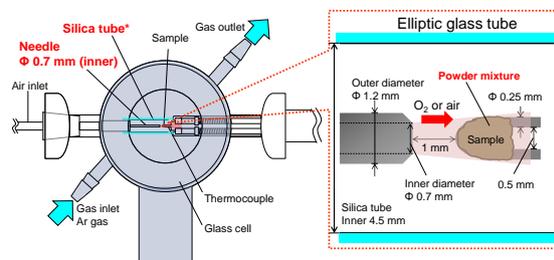


図1 HTCセルの模式図

図2に設定した熱処理パターンを示す。加熱前の1秒間と加熱直後の1秒間の合計2秒間のみ酸化性ガスを吹き付けている。予め HTC 装置の加熱ヒーターのダイヤルを調整し、試料を担持しない状態では、熱電対の温度が2秒後  $1400^{\circ}\text{C}$  に、3秒後  $1500^{\circ}\text{C}$  に到達するように設定した。担持した試料粉末が全く発熱しない場合には、Pt-13%Rh/Pt ヒーターの発熱の一部が試料の加熱に消費され、試料の温度は  $1250^{\circ}\text{C}$  前後まで達することが予備実験よりわかっている。その一例として、銅精鉱と珪石の混合試料 ( $\text{Fe/SiO}_2=2.0$ ) を air 吹き付けで加熱した場合、加熱開始2秒後に  $\geq 1200^{\circ}\text{C}$  に達することがデジタルマルチメーターの表示において確認された(図2(b))。この結果は高温に達した後20秒間保持したときのものである。後述するように、 $\text{O}_2$

ガス吹き付けでは、発熱反応に伴い着火後、試料温度はより急速にかつ高温に達しており、デジタルマルチメーターの表示が追従できていないことが判明した。このため HTC 法を用い、ファイヤライト組成 (66.7FeO-33.3SiO<sub>2</sub> (mol%)) のスラグを予め Ar 中で溶融し、試料の赤熱による加熱色とそのときの熱電対の表示温度との関係を求め、反応試料の加熱色から温度を推定した。

加熱開始 2 秒後、HTC 装置のヒーターへの加熱スイッチをオフにすることで室温まで急冷した。急冷試料は樹脂に埋めた後研磨を施し、SEM-EDS により微細構造の評価と組成分析を行った。

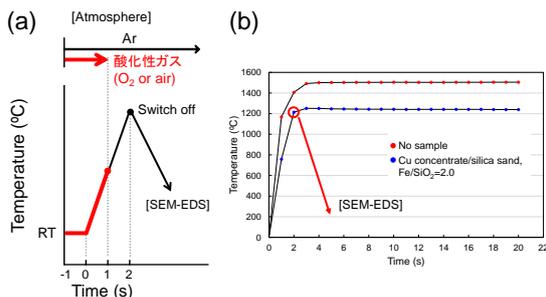


図 2 (a)設定した熱処理パターンと(b)デジタルマルチメーターで計測した温度変化

(2)図 3 に自作した粘度測定装置の模式図を示す。粘度の測定には Pt-Rh 製のスピンドルと鉄製ルツボを用いた。測定雰囲気は Ar であり、自作の酸素センサーにて酸素分圧を測定した。測定温度は 1250 °C である。

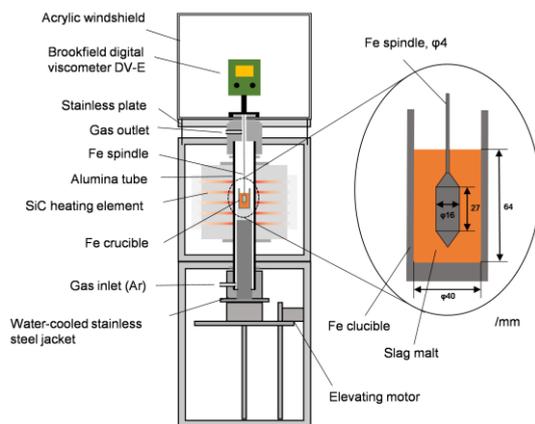


図 3 銅スラグ融体の粘度測定装置の模式図

(3)国内の製鉄所から提供された水砕スラグをアルミナるつぼに入れ、縦型雰囲気制御炉で溶融した。溶融条件は温度 1250 °C, Ar 雰囲気(酸素分圧 10<sup>-6</sup> Pa)にて保持時間 30 min である。溶融後、空冷のもとで耐腐食性の Y-TZP(イットリア添加正方晶ジルコニア多結晶体)製ふるいによるスラグ融体のふるい分けと、その後続く回転するカーボン板でのスラグ融体の弾き飛ばしを行った(図 4)。

作製した砂粒状の銅スラグについて、粉末 X線回折法を用いて結晶相の評価を行った。ヒ素および鉛の溶出特性としては、環境省告示第 19 号試験に基づき含有量試験を行い、ICP-MS を用いて、浸出液中のヒ素と鉛の濃度を求めた。さらに、微細構造の観察および分析については SEM-EDS を用いて評価した。

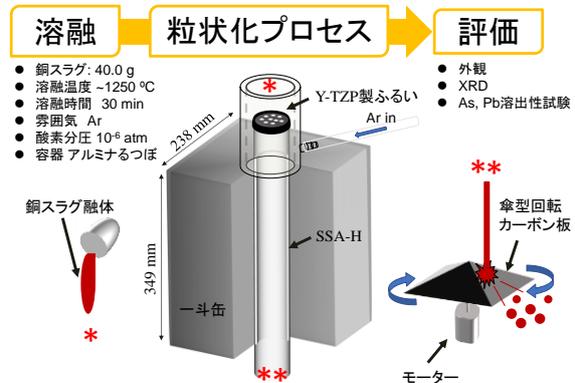


図 4 銅スラグ粒状化空冷プロセスの模式図

(4) 試料は市販のリポンドマグクロ耐火物及び FeO と SiO<sub>2</sub> を主成分とする銅スラグである。反応は Ar 雰囲気にて 1250 °C で 5-120 min 間、酸素分圧 10<sup>-8</sup> atm で行った。微細構造は SEM-EDS で評価した。耐火物成分の MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> または MgO と、蛍光 X線分析で評価した化学組成の銅スラグが、界面にて種々のモル比で反応すると仮定し、各成分の単体酸化物を出発として 1250 °C での熱力学的安定相を FactSage®にて予測した。

#### 4. 研究成果

(1) HTC セル内の雰囲気流量 490-560 mL/min の Ar ガスで制御し、吹き付ける酸化性ガスに O<sub>2</sub> を使い、その流量を 50, 60 及び 70 mL/min と変化させたところ、O<sub>2</sub> ガスの流量に対応して、(I)スラグ融体の生成、未溶解の未反応脈石成分(SiO<sub>2</sub>, 長石類)の残存と低品位マット (< 50%Cu)の生成、(II)白鍍(Cu<sub>2</sub>S, カルコサイト)に近い組成(75-80%Cu)のマット融体の生成と均一スラグ融体の生成及び(III)マグネタイト固相の生成によるスラグ/マット融体の不完全分離が認められた。同様の Ar ガスの流量で酸化性ガスに air を使い、その流量を 200 mL/min とした場合には、パターン(I)のみであった。

図 5 はパターン(II)の Cu<sub>2</sub>S に近い組成のマット融体と均一スラグ融体が生成した場合の実体顕微鏡写真である。O<sub>2</sub> ガスを吹き付けた直後の約 1 s で試料が着火・反応し、速やかに ≥ 1400 °Cまで試料温度が上昇した(図 5 (a))。本研究では、その後 Pt-13%Rh/Pt 熱電対と濡れの良い Cu-S マット融体が熱電対に沿って濡れ拡がり、一方でマット融体と比較して、Pt-13%Rh/Pt 熱電対との濡れに劣る FeO-SiO<sub>2</sub> 系スラグ融体(Fe/SiO<sub>2</sub>=1.5-1.9)が、熱電対間の空き間に維持されていることが観察された(図 5 (b))。このときマグネタイト固相の生成は SEM-EDS によれば

認められていない(図 6)。田辺らは  $\text{CuFeS}_2$  を主相とする銅精鉱の着火温度を調べ、着火温度が 630 K (357 °C)程度で  $\text{O}_2$  中では酸化反応が速やかに進行することを報告している[5]。

HTC 法を用いて  $\text{CuFeS}_2$  を主相とする銅精鉱及び珪石粉末との混合試料について酸化反応を調査したところ、ある領域内では、酸素ガスによる酸化反応は着火した直後に < 1 s の短時間で起こり、(1)式に示すように、白鍍組成のマットの生成まで進行するものと考えられる。

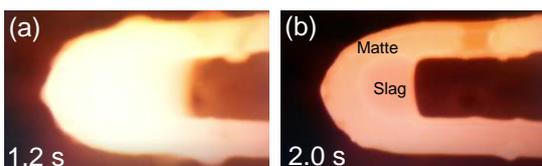
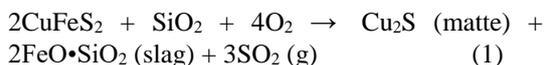


図 5 流量:60 mL/min,時間:2s の条件で  $\text{O}_2$  ガスを吹き付け反応させた銅精鉱と珪石の混合試料 ( $\text{Fe}/\text{SiO}_2=2.0$ )のスナップショット:(a)1.2 s, (b) 2.0 s

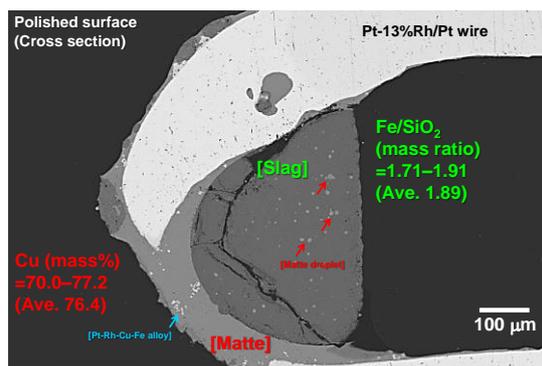


図 6 流量 60 mL/min,時間 2s の条件で  $\text{O}_2$  ガスを吹き付け反応させた銅精鉱と珪石の混合試料 ( $\text{Fe}/\text{SiO}_2=2.0$ )の急冷後の試料研磨面 SEM 像

$\text{CuFeS}_2$  を主相とする銅精鉱と珪石との混合粉末試料について、HTC 法を用いて酸化反応とマット/スラグ融体生成反応の直接観察を試みた。酸化性ガスの選択と流量の制御を行い、実験条件を最適化することで、銅精鉱の酸素ガスによる酸化反応は着火後速やかに進行し、マグネタイト固相が生成することなく、白鍍に近い組成のマット融体と均一スラグ融体が生成することが判明した。

HTC 法を用いた銅精鉱の酸化反応について、今回直接観察で認められた銅精鉱の酸化反応とその実験条件を基に、マグネタイト相の生成を抑制した上でマット融体の Cu 品位を >60 mass% に高めることができれば、銅生産量を維持・拡大した上で銅スラグロスの低減化へ寄与するものと考えられる。今後は銅精鉱低品位化の主要な成分のパイライト ( $\text{FeS}_2$ )及び酸化物脈石、酸化性ガスの種類及び着火温度の影響などを評価解

析することで、銅精鉱の低品位化による銅スラグロスの低減化を検討する予定である。

(2)図 7 に銅スラグ並びに  $\text{FeO-SiO}_2$  系合成スラグ融体について、1250 °C での粘度を文献値[7]とともに示す。 $\text{Fe}/\text{SiO}_2$  (mass ratio)の低下とともに単調に粘度が増加していることが知られる。

銅スラグ融体中の  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  固相や  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等低品位に伴う不純物が粘度に及ぼす影響を明らかにすることが今後の検討課題である。

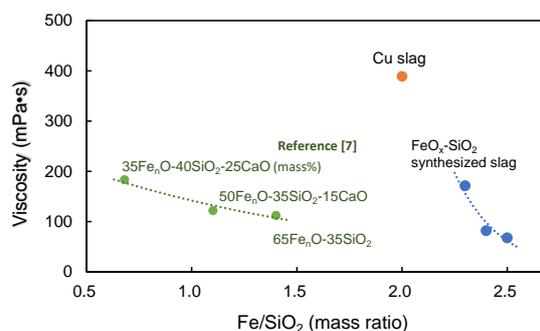


図 7 1250 °C でのスラグ融体粘度の  $\text{Fe}/\text{SiO}_2$  (mass ratio)依存性

(3)図 8 に(a)入手時の水砕スラグと(b)作製した粒状空冷スラグの外観を示す。巨視的なサイズにはばらつきが認められるものの、空冷スラグにおいて、砂粒状に形状を制御できる可能性は確認できた。粒径の制御には、酸化スラグ融体に短時間では濡れにくい特徴を有するカーボン板を、適切な速さで回転させ、スラグ融体を弾き飛ばすことが有効である。また、スラグの表面が酸化して比較的大きな粒径で固まる前に弾き飛ばすためには、適切な遠心力を得られる部分で弾き飛ばすことが重要である。

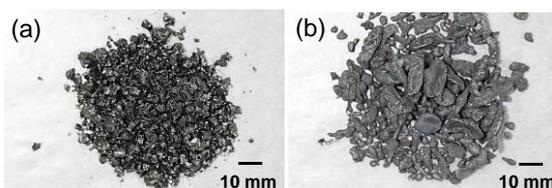


図 8 (a)水砕スラグと(b)空冷粒状化スラグの外観

X 線回折 (XRD)によれば、図 9 に示すように水砕スラグは主に非晶質であり、作製した粒状空冷スラグではファイアライトとマグネタイトの結晶相が認められている。ICP-MS 分析の結果を表 1 に示す。粒状空冷スラグでは環境省告示第 19 号試験が定める基準 ( $\leq 150 \text{ mg/kg}$ )を満たすことが可能であった。

水砕スラグおよび砂粒状スラグについて SEM-EDS 分析を行なった結果、水砕スラグはマトリクス部の非晶質相と、銅製錬プロセスでスラグ側に残った銅ロス粒子によって形成されていることがわかった。一方、粒状銅スラグは、主に

ファイアライト相から構成されており、マグネタイト相の存在も認められた。空冷スラグにおいて残存する非晶質部分からは点分析によりAs, Pb成分が確認されており, As, Sb 溶出量が抑えられたことは, 残存したAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とSiO<sub>2</sub>含有量の多い非晶質部にヒ素と鉛が濃縮したためと考えられる[6]。

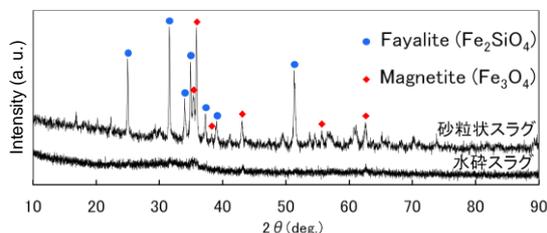


図9 水砕スラグと空冷砂粒状スラグのXRDパターン

表1 環境省告示第19号試験に基づくAsとPbの溶出性試験の結果

含有量試験	水砕	砂粒状・空冷			
		1回目	2回目	3回目	平均
As (mg/kg)	225	18	10	10	13
Pb (mg/kg)	552	20	24	13	19

(4)リボンドマグクロ耐火物は, 粗大MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>粒子(領域1)及び微細なMgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/MgO混在部(領域2)と粗大MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>粒子の周囲の空隙から構成されている(図10)。

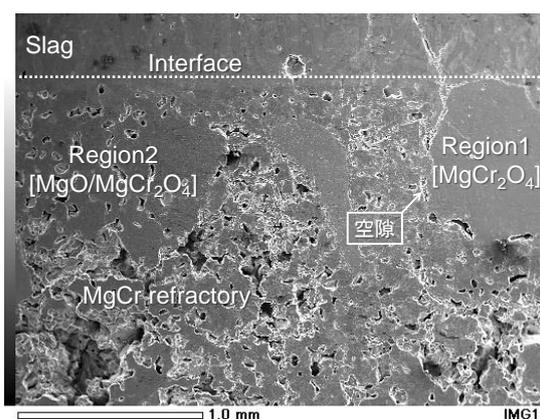


図10 リボンドマグクロ耐火物/銅スラグ界面反応後のSEM像

図11は耐火物片と銅スラグ融体を10<sup>-6</sup> atm, 5 minにて反応させた場合のSEM-EDS像である。浸透性に関与した表面張力/粘度比が, FeO-SiO<sub>2</sub>系銅スラグ融体では大きいことから[8], 耐火物の空隙で銅スラグ融体の浸透

が認められている(図11中(1))。

浸透深さは反応時間とともに増大し, 特にFe成分がより内部まで浸透した。一方, FactSage®の解析より主な熱力学的安定相としてスピネル相の生成が予想された。熱力学的安定相の予測と実験結果は定性的には一致し, 領域1のMgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>粒子表面では<5 μm厚さの緻密なFeを主成分とする複合酸化物層の形成が, 領域2のMgO部ではMgO粒子の溶出とFe成分の浸透によるFe-Mg-Al-O複合酸化物相の形成が認められている。

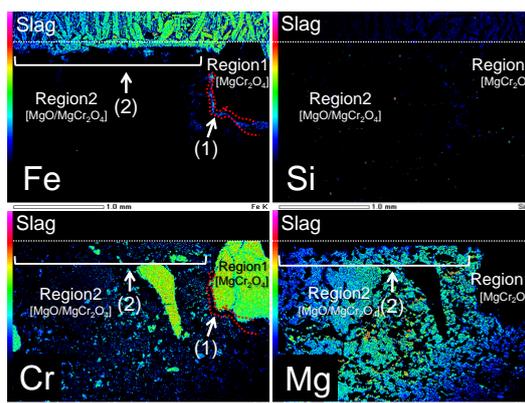


図11 リボンドマグクロ耐火物/銅スラグ反応後界面(図10)のSEM-EDS面分析結果

<参考文献>

1. 片山 弘行, “銅精鉱低品位化に関する世界事情”, 日本学術振興会 素材プロセッシング第69委員会第1分科会〔第55回〕研究会資料, (2014), 1-6.
2. R. Sridhar, J.M. Toguri, S. Simeonov, “Copper Losses and Thermodynamic Considerations in Copper Smelting”, Metallurgical and Materials Transactions B, **28B**, 1997, 191-200.
3. 武部 博倫, 高橋 祐介, “銅精鉱酸化反応のキャラクタリゼーション”, 日本学術振興会 素材プロセッシング第69委員会第4分科会〔第12回〕研究会資料, (2016), 1-6.
4. 太田 能生, 森永 健次, 柳ヶ瀬 勉, “Hot-thermocouple 法の高温化学への応用”, 日本金属学会報, **19** [4], 1980, 239-245.
5. 田辺 晃生, 早崎 公宏, 朝木 善次郎, “銅精鉱粒子の着火温度”, 資源と素材, **117** [2], 2001, 143-147.
6. H. Takebe, S. Tomita, A. Saitoh, M. Kawahara, Y. Sueoka, M. Sakakibara, “Effect of Crystallization on Microstructure and Elution Properties in Copper Slag”, Journal of Sustainable Metallurgy, **3**, 2017, 543-550.
7. F. -Z. Ji, Du Sichen, S. Seetharaman, “Experimental Studies of the Viscosities in the CaO-Fe<sub>n</sub>O-SiO<sub>2</sub> Slags”, Metallurgical and Materials Transactions B, **28B**, 1997, 827-834.
8. Slag Atlas, Ed. Verein Deutscher

Eisenhüttenleute, Verlag Stahleisen M.B.E., Düsseldorf, The Committee for Fundamental Metallurgy, (1981), 199, 237, 238.

#### 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 島田 岳, 武部 博倫, “塊状  $MgCr_2O_4$ ,  $MgO$  及びマグネシア・クロム質耐火物と銅スラグ融体の予測と反応実験”, 耐火物, 査読有, **Vol. 70**, No. 4, (2018), 161-169.
- ② Hiromichi Takebe, Sayuri Tomita, Akira Saitoh, Masayasu Kawahara, Yuri Sueoka, Masayuki Sakakibara, “Effect of Crystallization on Microstructure and Elution Properties in Copper Slag”, Journal of Sustainable Metallurgy, **Vol. 3**, (2017), 543-550.  
DOI: 10.1007/s40831-017-0130-8
- ③ Lukumanul Hakim Arma, Akira Saitoh, Hiromichi Takebe, “Rare-Earth Recovery from Soda Lime Silicate Glass Cullet by  $P_2O_5$  Addition”, Journal of Sustainable Metallurgy, **Vol. 2**, No. 3, (2016), 239-247.  
DOI: 10.1007/s40831-016-0053-9
- ④ Gregory Tricot, Akira Saitoh, Hiromichi Takebe, “Intermediate Length Scale Organisation in Tin Borophosphate Glasses: New Insights from High Field Correlation NMR”, **Vol. 17**, (2015), 29531-29540.  
DOI: 10.1039/c5cp02095f

[学会発表] (計10件)

- ① 武部 博倫, 吉福 秀斗, 島口 一輝, “砂粒状結晶化銅スラグの作製と重金属溶出性評価”, 資源・素材学会 平成 30 年度 (2018 年) 春季大会, 2018 年
- ② 高橋 祐介, 武部 博倫, “ホットサーモカップル法を用いた銅精鉱の酸化溶融反応の直接観察”, 第 14 回「若手研究者・学生のための研究発表会」(資源・素材学会 (関西支部)), 2017 年
- ③ 武部 博倫, 高橋 祐介, “ホットサーモカップル法を用いた銅精鉱の酸化反応過程の直接観察と解析”, 資源・素材 & EARTH 2017 (札幌), 2017 年
- ④ 島田 岳, 武部 博倫, “酸素分圧制御下における塊状  $MgCr_2O_4$  と銅スラグ融体の界面反応”, 資源・素材 & EARTH 2017 (札幌), 2017 年
- ⑤ 高橋 祐介, 武部 博倫, “銅精鉱の急速酸化溶融におけるスラグ/マット組成及び微細構造の評価”, 資源・素材 & EARTH 2017 (札幌), 2017 年
- ⑥ 葛巻 星, 岡野 聡, 武部 博倫, “酸素分圧下における銅スラグ融体の粘度測定”, 資源・素材 & EARTH 2017 (札幌), 2017

年

- ⑦ H. Takebe, Y. Takahashi, “Direct Observation of Oxide Reaction of Copper Ore by Hot-thermocouple Method”, European Metallurgical Conference 2017, 2017 年
- ⑧ 高橋 祐介, 武部 博倫, “銅精鉱の酸化反応解析に対するホットサーモカップル法の適用”, 資源・素材学会 平成 29 年度 (2017 年) 春季大会, 2017 年
- ⑨ H. Takebe, S. Tomita, A. Okada, “Effect of Cooling Rate on Phase and Microstructure in Copper Slag”, Copper 2016, 2016 年
- ⑩ 高橋 祐介, 武部 博倫, “ホットサーモカップル法による銅精鉱の酸化反応過程の評価”, 資源・素材 2016 (盛岡) - 平成 28 年度 資源・素材関係学協会合同秋季大会 -, 2016 年

[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、銅スラグの鉛・ヒ素を封じ込める手法開発—ゆっくり冷やすだけ 路盤材活用も」

<https://www.nikkan.co.jp/artocles/view/00389095>

・愛媛大学 材料プロセス工学研究室

<http://www.mat.ehime-u.ac.jp/labs/mpe>

#### 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

齋藤 全 (SAITOH AKIRA)

愛媛大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：80431328

##### (3)連携研究者

なし

##### (4)研究協力者

なし