



住友金属鉱山共同研究ユニットにおける産学連携

打越 雅仁*

1. はじめに

近年、資源ナショナリズムの高まり、鉱山の奥地化、環境問題など非鉄金属製錬産業を取り巻く環境は厳しさを増し、国際情勢は急激に変化しています。また、鉱石の品位低下や忌避不純物の増加など製錬に直接関わる課題も年々拡大しています。このような状況下で、海外メジャーと対峙し国際競争力を維持していくためには、資源開発や製錬事業における技術革新および優秀な技術者の育成が必要です。

一方で、資源開発や製錬を専門とする学部・講座・教授の数は減少を続け、1993年に比較して約1/3にまで減少してしまいました。このままでは、非鉄金属製錬技術者の枯渇が現実のものとなる恐れが出てきました。加えて企業間取引(BtoB)を主とする業態のため、一般への知名度が低く、就職業界として積極的に選択する学生が少ないことも、優秀な人材確保の障害となっています。

このような状況を大きく転換させるため、東北大学多元物質科学研究所と住友金属鉱山株式会社は、一年をかけて構想を練り、国内非鉄金属製錬業の持続的発展のための共同研究部門を2018年4月に開設することと致しました(図1)。

【目的】

- 日本の非鉄金属製錬業界全体の利益に資する共同研究テーマの推進
- 次世代の非鉄金属製錬業界を担う人材育成
- 非鉄金属製錬業の社会への啓発活動

【共同研究部門概要】

部門名 非鉄金属製錬環境科学研究部門
(住友金属鉱山共同研究ユニット)
設置期間 2018年4月～2023年3月(5年間)



図1 共同研究部門と各機関との連携。(オンラインカラー)

- メンバー 福山博之教授(研究統括・兼任)
村松淳司教授(兼任)
柴田浩幸教授(兼任)
打越雅仁准教授
井手上敦客員教授

2. 主な活動

当部門は、次代を担う人材育成と業界全体の利益に資する共同研究を目的としています。

多元物質科学研究所内の金属資源プロセス研究センター、東北大学大学院環境科学研究科、同工学研究科との密接な連携をはかり、さらに他大学、他企業、各機関など、多くの方々のご協力をいただいて、目的を達成すべく、下記の活動を展開しています。

* 東北大学多元物質科学研究所；准教授(〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)
Industry-Academia Cooperation by Sumitomo Metal Mining Collaborative Research Unit; Masahito Uchikoshi (Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, Sendai)
Keywords: collaborative research, non-ferrous metallurgy, copper smelting, electrorefining, recovery of precious metals
2020年4月21日受理[doi:10.2320/materia.59.466]

【人材育成・非鉄金属製錬業の啓発活動】

- 非鉄金属製錬セミナー(工場見学)
- 特別講義「非鉄金属製錬環境科学特論」

【共同研究テーマ】

- 各種スクラップなどの二次原料，工程内廃棄物を含めた多様な製錬原料に含有する有価金属の効率的分離回収に関する研究
- 非鉄金属製錬操業の先進化に関する研究
- 非鉄金属製錬中間物および廃棄物の有効利用と再資源化に関する研究
- 忌避金属の用途開発に関する研究

本稿では，当研究部門でのこれまでの啓発活動と研究活動について紹介します。

3. 啓 発 活 動

(1) 特別講義「非鉄金属製錬環境科学特論」

非鉄金属製錬業に興味を持ってもらうために，工学研究科マテリアル・開発系と環境科学研究科の協力のもと，大学院生を対象に，集中講義「非鉄金属製錬環境科学特論」(1単位)を開講しております。

2019年度の講義内容および担当講師は，表1に示す通りです。製造現場に近い立場の企業の技術者を講師としてお招きし，広く実操業に関してご講義頂きます。講師陣には非鉄金属製錬を専門とする教授にも加わっていただき，熱力学，電気化学などを復習しながら，現場でどのように使うのか，についての講義を展開します。

一般的な講義に比較して，講義室で学んだ熱力学や電気化学と，実操業における製錬工程の結びつきがイメージしやすいのが，具体例を多く盛り込んだ特別講義の特徴です。

(2) 非鉄金属製錬セミナー(工場見学)

非鉄金属製錬各社のご協力をいただき，大学院生を対象に工場見学を主とする非鉄金属製錬セミナーを，部門発足以来，毎年(計2回)開催しております。

2018年度は独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 JOGMEC の金属資源技術研究所を訪問見学し，三菱マテ



図2 第2回非鉄金属製錬セミナー(別子銅山記念館前)。(オンラインカラー)

リアル株式会社，JOGMEC，JX 金属株式会社，DOWA メタルマイン株式会社から技術者をお招きしてご講演をしていただきました。

2019年度は住友金属鉱山株式会社東予工場と三菱マテリアル株式会社直島製錬所を訪問し，技術者の講演，製錬所の工場見学をさせていただきました(図2)。

参加した学生からは，次の感想が寄せられています。

- 講義で学んだことが，大規模に行われているのを見学して，スケールの大きさを実感した。
- 人事，現場，研究所などの様々な方と接する機会があり，会社の雰囲気も良く分かった。
- 2社を見学して，銅製錬工程，会社の雰囲気など，企業それぞれの違いを感じた。
- 銅製錬を目的とはしているけれど，その過程で発生する有害物質をどう処理するか，このような技術も必要なのだと感じた。
- 自分の後輩にも是非勧めたいセミナーであった。

学生参加者数は，2018年度が16名，2019年度が19名でした。2018年度参加学生のうち，非鉄金属製錬業界への就職者数は1/4にのぼり，鉄鋼製錬業界へは1名が就職しました。その他の業界への就職者にも非鉄金属製錬業に触れる機会を作ることができて，大変良かったと考えております。

4. 研 究 活 動

(1) 共同研究

図3に銅製錬工程の概略と共同研究テーマ(下線で表示)について示します。現在の国内の銅製錬工程は，自溶炉によるマツ熔錬，転炉を用いた造鋸，造銅により得られる粗銅からS，Oを除去する酸化還元精製を行う精製炉を経て陽極銅を铸造し，電解精製により金属不純物を除去して，電解銅を得る工程からなっています。熔錬工程では，独自の三菱連続製銅法も実用化されています⁽¹⁾。

共同研究部門では，各工程における課題，近年懸念が高まっている忌避金属の有効活用について解決を図るため，以下に示す研究テーマを設定し，共同研究を推進しております。

表1 非鉄金属製錬環境科学特論講義内容。

時限	講義内容	講師
1	非鉄金属製錬概論	小俣孝久*
2	選鉱とヒーブリーチング	岡本秀征 [†]
3	乾式製錬	高橋純一 [†]
4	湿式製錬	浅野 聡 [†]
5	製錬事業実例	佐野浩行 [†]
6	非鉄製錬プロセスを利用した金属リサイクルについて	金田 章 [‡]
7	浮遊選鉱基礎理論	村松淳司*
8	熱力学基礎	福山博之*

* 東北大学，[†] 住友金属鉱山株式会社，[‡] パンパシフィック・カップ株式会社，[‡] 三菱マテリアル株式会社

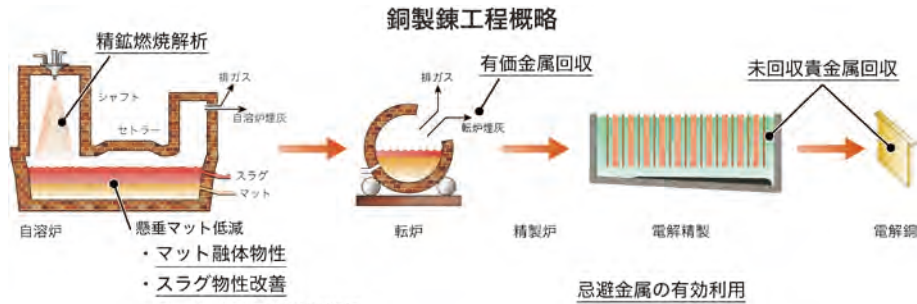


図3 銅製錬工程概略と共同研究テーマ(下線で表示)。(オンラインカラー)

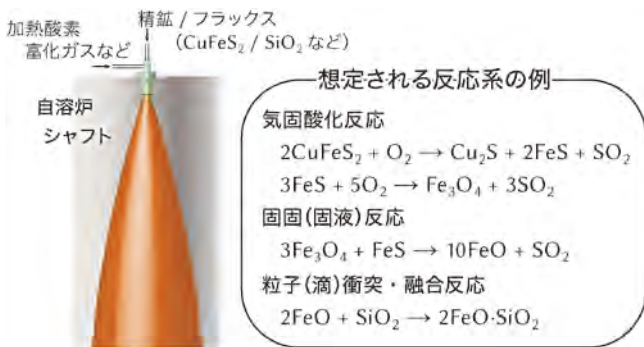


図4 自溶炉シャフト内で想定される反応系の例。(オンラインカラー)

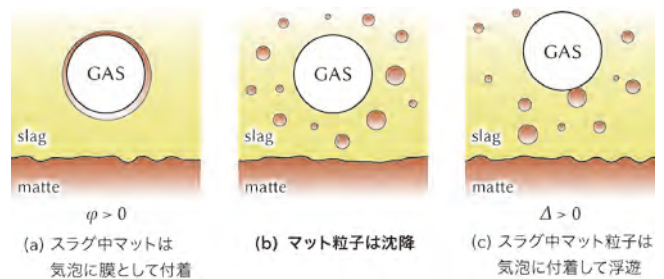


図5 マットの気泡への付着。(オンラインカラー)

【熔錬工程：シャフト内反応機構】

(a) 自溶炉シャフト内の燃焼・衝突機構解析
担当：埜上洋教授 夏井俊悟助教

1949年の Outokumpu 社による自溶炉の操業開始以来、導入した各製錬会社において、多くの改善がなされてきました。さらなる改善のためには、自溶炉シャフト内で起きている反応を明確に理解することが必須です。

精鉱燃焼は、幅広い温度、酸素分圧下で、衝突などの機械的過程を含む不均一反応であり、シャフト内に急峻な温度勾配と濃度勾配、反応物質の循環流を生じる非常に複雑な状態を引き起こします。この状態を確実に記述するためには、高度な燃焼モデル解析が必要です。図4に想定される反応系の例を示しますが、図示した例以外にも諸説あり、精鉱燃焼機構の解明は不十分です。

そこで、ガス気流中での精鉱燃焼試験による観察とシミュレーションを組み合わせた反応解析を行い、自溶炉の反応制御・機器設計の高度化につなげる基礎的知見を得ることを目的として研究を進めます。

【熔錬工程：懸垂マットの低減】

熔錬工程ではセトラー[†]内において、熔融マット粒子がスラグに浮遊する懸垂マットによる銅ロスの課題があります。

[†] セトラー：銅自溶炉において、精鉱がシャフト内で燃焼して生成するスラグ融体とマット融体を比重差により分離する槽(図3参照)。

次の研究テーマは懸垂マットの低減を目標に取り組んでいます。

(b) 非接触法によるマット融体、スラグ融体の熱物性測定
担当：福山博之教授 大塚誠准教授 安達正芳助教

マット熔錬では、発生するSO₂ガスなどの気泡によるマット粒子の沈降阻害やスラグ中への持ち上げなども懸垂マットの生成要因の一つです。マットの気泡への付着に関する研究がなされています⁽²⁾。

$$\phi = \gamma_{\text{slag}} - \gamma_{\text{matte}} - \gamma_{\text{matte/slag}} \quad (1)$$

$$\Delta = \gamma_{\text{slag}} - \gamma_{\text{matte}} + \gamma_{\text{matte/slag}} \quad (2)$$

ϕ を拡張係数、 Δ を浮遊係数とします。 γ_{matte} と γ_{slag} はそれぞれマット、スラグの表面張力、 $\gamma_{\text{matte/slag}}$ はマット/スラグ間の界面張力です。 $\phi > 0$ の時、スラグ中マットは気泡に膜として付着、 $\Delta > 0$ の時、マット粒子は気泡に付着して浮遊します(図5)。式(1)、(2)の定義から、 γ_{slag} 、 $\gamma_{\text{matte/slag}}$ が小さく、 γ_{matte} が大きいほど、マットが気泡に吸着しづらいたことが分かります。

熔融マット、スラグを改質して気泡による懸垂マットの低減を図るためには、より確かな表面張力、界面張力が必要です。従来の静滴法は試料を基板に載せた状態で測定するため、測定結果は基板の影響を受けます。近年開発された超高熱物性計測システム(PROSPECT)⁽³⁾(電磁浮遊)およびガスジェット浮遊により試料を浮遊させた状態で測定を行うため、試料と容器が非接触の状態を実現でき、より確かな表面張力の測定が期待されます。

(c) 鉄ケイ酸塩スラグの物性改善

担当：柴田浩幸教授 助永壮平准教授 川西咲子助教

銅製錬における Fayalite 系スラグ[†]の粘性を耐火物寿命を損なわない範囲で低く制御することで、懸垂マットの沈降を促し、機械的銅ロスの低減を図ります。銅鉱石にはフラックスとして使用できる CaO や MgO が脈石成分^{††}として含まれています。脈石成分を活用することで、効率の良いプロセスの実現を目指します(図 6)。

MgO をフラックス^{†††}として使用するとスラグ粘性が低下するとの報告⁽⁴⁾がありますが、実操業では逆に粘性の上昇が観測されています。粘性に影響を与える要因として、スラグ中の Fe イオンの酸化還元状態を仮定し、酸化還元状態が粘性や見掛けの液相線温度に及ぼす影響を明らかにすることを目的に研究を行っています。

Fe イオンの酸化還元状態の測定には、X 線吸収分光やメスbauer吸収分光などの最新分析法を活用することで、より確実な状態測定を行い、粘性との関係を明らかにします。

(d) マグネタイトによる懸垂マット沈降阻害の改善

担当：柴田浩幸教授 川西咲子助教 助永壮平准教授

自溶炉シャフト内で、酸素ポテンシャルが高い局所的領域で生成すると考えられている Fe₃O₄ は、スラグ/マット界面に留まります。この Fe₃O₄ により懸垂マットの沈降が阻害され、銅ロスの要因の一つとなっています。Fe₃O₄ の生成を抑えることも重要ですが、Fe₃O₄ とマット界面での反応を明らかにすることも重要な課題です。Fe₃O₄ とマット界面では次の反応が予想されていますが、はっきりしたことは分かっていません。

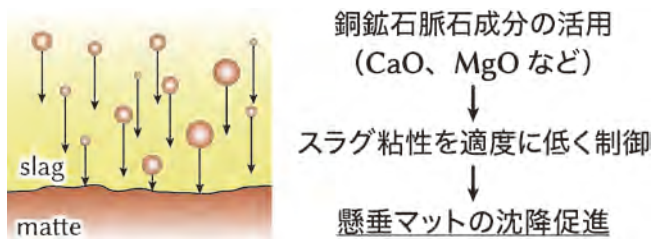


図 6 脈石成分を活用するスラグ粘性制御。(オンラインカラー)



図 7 高温界面その場観察法の概略。(オンラインカラー)

† Fayalite 系スラグ：主に Fe, Si, O (Fe₂SiO₄) からなるスラグ。

†† 脈石成分：鉱床、鉱石中で製錬対象ではない成分。

††† フラックス：乾式製錬において、融解や反応を促進するための添加剤。

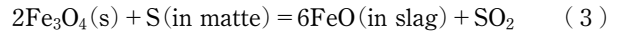


図 7 に示す高温界面その場観察法を用いて、Fe₃O₄ とマット界面での反応を観察し、反応を明らかにします。結果から、銅ロス低減の指針を提案します。

【未回収有価金属回収】

(e) 未回収有価金属の効率的回収

担当：加納純也教授 石原真吾助教 久志本築助教

銅製錬の原料には、銅鉱石の他、主に電化製品のスクラップからなる二次原料も使用されています。電化製品の便利な機能実現のために、多くの有価金属が使われており、二次原料に含まれます。このような有価金属の一部は、自溶炉のスラグ/煙灰、転炉のスラグ/煙灰などに分配するため、これらの副産物も有用な有価金属回収資源です。銅鉱石由来で、未回収が不十分な有価金属もあります。

副産物のうち未回収有価金属が含まれる転炉煙灰に着目して、効率的回収法の研究開発を行っています。選択的溶出実現のために粉碎による煙灰改質を施し、その後種々の溶媒による抽出試験を重ね、回収・再利用のためのプロセスを開発します(図 8)。

(f) 銅電解液からの貴金属回収

担当：村松淳司教授 蟹江澄志教授 打越雅仁准教授

図 9 に示すように、銅電解精製は銅の純度を上げると同時に貴金属をアノードスライム[†]として、電解液の浄液により有価金属を回収する工程です。しかしながら、回収されるべき一部の Ag が電気銅に含まれて出荷されています。銅生産量⁽⁵⁾および2019年度の Ag の平均価格から推算すると、国内では年間 4 億円相当の、世界では 70 億円相当の Ag が電気銅中に含まれて出荷されており、大きな経済的損失です。

電着前の Ag を含む電解液から Ag を回収するために適切な官能基を有するイオン液体を開発します。また、同じ機能を持つイオン交換樹脂による Ag 回収の効果についても研究しています。有効なイオン液体、イオン交換樹脂の開発により、液液抽出、固液抽出の 2 つのアプローチを可能にします。

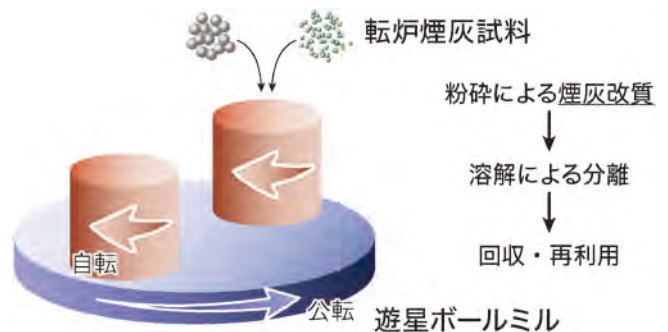
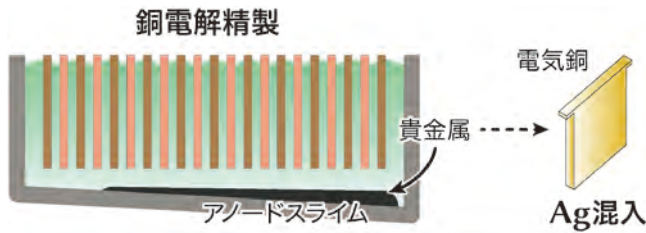


図 8 効率的溶出分離のための粉碎による煙灰改質。(オンラインカラー)

† アノードスライム：銅電解製錬で、アノード溶解しない銅よりも貴な金属が電解槽底部に沈殿したもの。



	銅生産量	電気銅中の銀	電気銅中の銀価格
国内	1,488,000 t	約 7 t	約 4 億円
世界	23,222,000 t	約 116 t	約 70 億円

図9 銅電解精製におけるAgの電気銅への混入。(オンラインカラー)

Cu₃AsO₄ 未報告化合物

バンドギャップ：1~1.5eV(?)

p、n 両極性半導体の可能性

強い光吸収：太陽電池材料

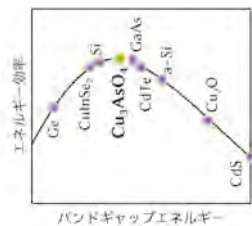


図10 Asを含む機能性材料Cu₃AsO₄の可能性。(オンラインカラー)

【忌避金属の有効利用】

(g) 忌避金属の有効利用に向けた機能性材料開発

担当：小俣孝久教授 鈴木一誓助教

銅鉱石からCuを製錬する際、多くの副産物も抽出されます。副産物の中には、AuやAgのような有価金属もあれば、As、Cd、Hgなどの環境負荷物質もあります。近年、銅鉱石に含まれるCu品位は減少し、忌避金属であるAsの品位は増加を続けています。そこで、Asを必要とする機能性材料を開発し、Asの処理に関する問題の解決を目的に研究を行っています。

図10に示したCu₃AsO₄は、類似化合物からの見積もりや第一原理計算の試算から、バンドギャップエネルギーが1~1.5 eVと推測され、実用化されているSiやGaAsと同等のエネルギー効率を持つと期待されています。光吸収も強いと考えられ、太陽電池材料としての可能性を有しています。

(2) 学会活動

産学連携の推進を図るために、また、上述した研究の成果を発信するために、資源・素材学会を中心に学会での発表を積極的に行っております。これまでに表2、3に示す企画講演を実施しました。また、掲載しておりませんが、資源・素材学会2019年度春季大会でも、金属資源プロセス研究センターと連携して、企画講演「希少金属元素の抽出と利用の最前線」を企画しました。

今後も同様の企画により、研究成果の発信を行う方針です。

表2 学会活動：資源・素材2018(福岡)における企画講演「非鉄金属製錬における産学連携の推進」。

講演題目	講演者
1 非鉄製錬分野における産学連携の過去、現在、未来	中村 崇(福岡県リサイクル総合研究事業化センター)
2 これからの産学連携のあり方と課題	岡部 徹(東京大学)
3 東京大学との産学連携1期目の成果と2期目の展望	結城典夫(JX 金属株式会社)
4 教育をベースとした産学連携の実践と社会人向け WEB 講座の紹介	宇田哲也(京都大学)
5 共同研究部門設立の背景と期待	今村正樹(住友金属鉱山株式会社)
6 共同研究部門発足と今年度の予定	打越雅仁(東北大学)

表3 学会活動：資源・素材2019(京都)における企画講演「非鉄金属製錬業における課題と解決に向けた取り組み」。

講演題目	講演者
1 懸垂銅精鉱小塊の燃焼試験	埜上 洋 ¹ , 西村伊織 ¹ , 夏井俊悟 ¹
2 鉄ケイ酸塩スラグの還元過程における表面張力変化	助永壮平 ¹ , 川西咲子 ¹ , 打越雅仁 ¹ , 石原真吾 ¹ , 夏井俊悟 ¹ , 大野光一郎 ² , 齊藤敬高 ² , 中島邦彦 ² , 柴田浩幸 ¹
3 Cu ₂ S 融体の非接触熱物性測定	安達正芳 ¹ , 後藤宏基 ¹ , 大塚 誠 ¹ , 高橋純一 ³ , 福山博之 ¹
4 粉碎による銅製錬工程からの有価金属回収	石原真吾 ¹ , 打越雅仁 ¹ , 加納純也 ¹
5 陰イオン交換法による銅電解液からの銀の回収	打越雅仁 ¹ , 渡邊寛人 ³ , 浅野 聡 ³
6 アミノ基修飾機能性イオン液体を用いた貴金属元素の高効率かつ高選択的抽出/逆抽出	蟹江澄志 ¹ , 半澤直論 ¹ , 村松淳司 ¹
7 副産物の有効利用に向けた機能材料開発；Enargite型Cu ₃ As(S, O) ₄ の太陽電池材料としてのポテンシャル	鈴木一誓 ¹ , 小俣孝久 ¹ , 大橋直樹 ⁴ , 渡邊寛人 ³ , 浅野 聡 ³

¹ 東北大学, ² 九州大学, ³ 住友金属鉱山株式会社, ⁴ 物質・材料研究機構

5. 運 営

共同研究部門として年間に計画しているイベントは次のようになります。

- ・ 特別講義「非鉄金属製錬環境科学特論」
- ・ 非鉄金属製錬セミナー(工場見学)
- ・ 資源・素材学会企画講演(春秋)
- ・ 企画検討会(秋)
- ・ 成果報告会(春)

特別講義と非鉄金属製錬セミナーは、大学院生向けの啓発活

動です。各非鉄金属製錬企業に講師の派遣，工場見学についてご協力を頂き，できるだけ多くの企業に触れてもらう機会を学生に提供すべく活動しています。資源・素材学会の春の企画講演では，連携している金属資源プロセス研究センターでの成果を中心に，秋の企画講演では，共同研究の成果を中心に据える企画を検討しております。企画検討会では，業界団体，国内非鉄金属製錬企業をお招きして，共同研究テーマの設定や，非鉄金属製錬業の啓発活動などについて，ご意見を伺い，共同研究部門の方針に反映させます。

6. ま と め

共同研究部門の発足以来2年が経過し，本稿で紹介させて頂いた活動を展開してまいりました。関係する業界団体，非鉄金属製錬企業，他大学のお力添え無くしては，このような活動はなし得ませんでした。この場を借りて謝意を表します。

特別講義「非鉄金属製錬環境科学特論」と非鉄金属製錬セミナー(工場見学)は，大学院生が就職先として非鉄金属製錬企業を検討する良いきっかけになっています。

共同研究では，これまでの成果により特許を2件出願しており，今後も国内非鉄金属製錬業に資する成果を発信するために，研究を積極的に展開，推進します。

活動をより充実したものとするために，今後も関係者の皆様との連携を絶やさず，国内非鉄金属製錬業の持続的発展に

貢献すべく，活動を展開していきます。

今後とも，ご指導，ご鞭撻のほど，宜しくお願い致します。

※ 共同研究部門では，ホームページを開設しております。研究部門の計画，活動について随時更新しておりますので，是非ご覧ください。

<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/nonferrous/>

文 献

- (1) 阿座上竹四, 栗倉泰弘: 金属化学入門シリーズ3 金属製錬工学, 日本金属学会, (1999), 45, 151.
- (2) R. Minto and W. G. Davenport: Trans. Inst. Min. Metall. C, **81C**(1972), C36-C42.
- (3) <http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/fukuyama/prospect-2/>
- (4) M. Kucharski, N. Stubina and J. Toguri: Can. Metall. Q., **28** (1989), 7-11.
- (5) 鉱物資源マテリアルフロー2018.



打越雅仁

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

2006年 東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了
略歴

1997年10月- ファインマテリアル株式会社 研究員

2013年4月- ハンガリーミシュコルツ大学 客員研究員

2018年4月- 現職

専門分野: 金属生産工学, 高純度材料学

◎世界最高レベルの高純度鉄，高純度コバルト精製方法を開発，保持。湿式分離の基礎的知見である水溶液中金属錯体状態の解析，実用湿式工程の改善に従事。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★