



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

役に立つのはローテクの組み合わせかもしれない

Combinations of Low Technologies could Provide a Useful Solution for Real Problems

久保裕也
Hironari Kubo

福岡工業大学
工学部 生命環境化学科
准教授

1 はじめに

著者は未利用資源の活用、廃棄物のリサイクル・無害化を目指して研究を進めており、鉄鋼分野では使用済み耐火物、製鋼スラグ、電炉ダストを対象とした高付加価値化・削減技術の開発に力を入れている。東北大学の博士課程在学中は製鋼スラグを研究対象としていたが、修了後に就職したのは鉄鋼業とは縁遠い産業系廃棄物のリサイクルや中間処理を専業とする民間企業であった。本稿では、その経緯や経験に触れながら、現在進めている鉄鋼分野の研究について紹介する。

2 学生時代

著者は、東北大学の鉄冶金の流れを汲む長坂徹也先生（東北大学教授）の研究室に第1期生として配属された。長坂先生は「大きい所をターゲットにしなければ大きな成果は得られない」という思想で、鉄鋼をはじめ、規模の大きい産業に関係する副産物、原料、随伴成分の効率的な利用について、金属製錬をベースに研究されている。鉄鋼業は産業の中でもトップクラスに規模が大きい。例えば、レアメタルであるCr、Mn、Niの鉄鋼合金としての消費量は、輸入量のそれぞれ92%、70%、30%（2012年）を占め¹⁾、二酸化炭素発生量も国内全体の13%（2015年）に達する²⁾。したがって、鉄鋼業で効率を僅かでも向上させることができれば、場合によっては他の産業でドラスティックな変革を起こすのと同程度以上に効果があることを意味する。

博士課程では、製鋼スラグに随伴するリンの資源化に関してハード（技術）、ソフト（評価）両面から研究に取り組んだ。ソフト面の研究成果の1つとして、リンの国内マテリアルフローの調査が挙げられる³⁾。リンは肥料や黄リンなどの直接的な製品に加え、食料や鉄鉱石など様々なものに随伴して社

会を流通している。日本は粗鋼の3/4を高炉によって生産する製鉄大国であり、製鋼スラグに含まれるリンの総量が輸入しているリン鉱石に匹敵することを明らかにした（近年はリン鉱石産出国において、鉱石形態での輸出の規制が強化されているため、製品、半製品としての輸入量が急増している）。製鋼スラグに含まれるリンの資源化が実現すれば、資源のフローが激変するほどの波及効果があり、まさに規模が大きい産業だからこそ成果が大きい研究と言える。ハード面では、製鋼スラグからリンを回収する手法について、相平衡、磁気分離の面から研究したが⁴⁾、これは現在進めている研究の背景になっているため、4章で紹介する。

話を長坂先生に出会う前まで遡ると、著者の鉄鋼に対する関心はさほど高くはなかった。大学受験の時期が京都議定書を採択する第3回気候変動枠組条約締約国会議（COP3）が開催される前後であったため、環境関連の話題が連日新聞やテレビで盛んに報じられていた。時代は環境がキーワードに、環境がダメになったら生活も産業もない。今にして思えば全く具体性がなく恥ずかしい限りではあるが、環境問題の解決に貢献することが漠然とした目標となった。

大学入学後とはとにかく環境に関連する情報には貪欲であった。新聞、テレビは勿論、環境や産業関連の展示会が開催されれば全日程をかけて全てのブースを巡回した。他学科の講義も履修し、特に水質工学、下水道工学、生態修復工学などの土木工学分野には熱心で、学期末試験では本科の学生に伍して満点近くを取るほどであった。大学院に進学する際には、東北大学内の環境に関係する研究室を文理問わず横断的に集めた大学院環境科学研究科が組織され、長坂研究室もそこに組み込まれた。これに伴って学部以上に様々な学科の講義を自由に受講できるようになり、嬉々として卒業要件の2倍以上の単位を取得した。かくして環境に関する話題であれば、どのような内容であってもそれなりに理解できる環境

オタクに成長した（ただし、環境の話題は偏ったものや信憑性が低いものも多いため、当然取捨選択はしている）。これにはさすがに長坂先生からも「Generalistになり過ぎるな、Specialistにならないと役に立たない」と苦言を呈された。時を同じくして研究室に経済学部出身の松八重一代先生（現東北大学教授）が着任された。研究の詳細については御本人の著書を御覧頂くとして⁵⁾、ある工程、産業が変化すると他の産業に対して玉突き的に影響が及び、社会全体の資源や廃棄物の流れが変化する、これを定量化して最適化を目指す研究と理解している。学部、修士を通して環境問題の解決に貢献するとは何かと問い続けた結果、世の中の全てがつながっており、その中の一部を専門として取り組み、成果を出さないとようやく納得した。そして選んだのはやはり分離技術の集合体である金属製錬であり、この分野で資源、廃棄物の効率的な処理を目指すことに落ち着いた。

3 廃棄物処理の現場にて

博士課程では製鋼スラグを対象とした研究にどっぷり浸かったとはいえ、当時は鉄鋼業に就職する気にはなれなかった。原料も工程も基本はシンプルで、環境側面に関心があるのは原料処理、エネルギー効率、スラグ処理に概ね限られる。鉄鋼業は長い歴史があり、各社に自分より遙か先を行く優秀な人材が豊富にいる中に後発で入って役に立つのか。これに対して産業系廃棄物は未利用なもの、今後発生するものを含め無数にあり、研究対象はいくらでもある。Generalist気質が再び顔を出し、鉄鋼を離れ、産業系廃棄物のリサイクルや中間処理を専業とする民間企業に就職した。百聞は一見にしかずとはよく言ったもので、大学に留まっていたでは得られなかった数多くの現場感覚が身に付いたと思う。製品製造やリサイクルのしわ寄せが集中するのが廃棄物であり、廃棄物処理にお金をかける人はいない。現場に求められる要件は明文化できない事も含めてかなり独特であった。それらの中から本稿の内容に関係する2つの経験を以下に述べる。

先端材料、特に電子材料は主成分以外に隠し味のように多数の成分を微量添加することによって高い性能を引き出している。製品サイクルは早く、その製造工程から排出される廃棄物、廃液の組成も刻々変化する。そのため、順調に操業できていた金属回収工程であっても、ある時期から回収金属の品位低下、沈殿不良、性状不明の析出物の生成などの不具合がしばしば起こる。不具合が継続する場合は原因の調査と対応策を検討するわけだが、単に化学的に理想的なプロセスを提案するだけでは解決にならない。工程を長期間にわたって停止するわけにはいかず、工程全体を組み直せばコスト試算の段階で多くの場合却下される。また、工程全体を組み直

したところで完成する頃には、廃棄物の性状が変わっているかもしれないし、受入量が激減しているかもしれない。したがって、微量成分が不具合の原因であれば、イオン交換樹脂や沈殿の工程を1段追加する程度で済ませる場合が多い。このような処理対象の場合、洗練されたガチガチのプロセスでは対応に困る。極端に言えばタンク、ポンプ、ろ過器など簡単に改変できるもの、他の用途にも転用できるもので構成しておくのが望ましい。業界的に処理対象の品目が多いため、焼却、解体、物理選別、酸溶解、沈殿分離、再結晶、化学還元、電気分解、膜分離、イオン交換樹脂、溶媒抽出、揮発分離、生物処理（活性汚泥法、堆肥化）、工程分析など、技術のレパートリーは多様である。社内にある遊休品を最大限活用し、工程で発生する中間産物、処理液、エネルギーなどの有効利用も含めて最適なプロセスを目指す、パズルのような研究開発である。

廃棄物業界には特徴の異なる大小様々な企業が乱立しており、企業間で廃棄物を取引しながら有価成分の回収と適正処理を行っている。勤めていた企業は貴金属の回収、販売を収益の柱の1つに据えていた。貴金属は単価が高いため、含有量がかなり低い廃棄物であっても有価で取引される場合がある。例えば、自社が保有する工程では廃棄物に含まれる貴金属を残存濃度0.5%までしか回収できないが、他社の工程では0.1%まで回収できると仮定する。この場合、設備投資によって0.1%以下まで回収できる工程に改良するか、他社に回収残渣の処理を委託するかは経営判断になる。自社の利益を最大化する。これは民間企業に勤める者としては常に心掛けなければならないことではあるが、環境面、社会全体の効率から考えれば、自社の工程を経由せずに他社の工程で廃棄物から直接貴金属を回収した方が合理的であろう。

このように短期、目先の仕事を多く手掛ける中で、次第に自分の仕事が小さいものを感じてきた。「大きい所をターゲットにしなければ大きな成果は得られない」という言葉もしきりに思い出された。社会全体にとって合理的で、多くの企業に歓迎されるプロセスを提供したいという思いが強くなり、フェアで長期的な仕事ができる大学に戻ることにした。大学に戻ってから取り組んできた鉄鋼分野の研究を次項から概説する。

4 既存技術を組み合わせた電炉ダストの削減プロセス

鉄スクラップを主原料とする電炉製鋼で発生する電炉ダストは、ZnやFeを豊富に含む一方で、Pb、Cl、F、Cdなどの有害成分も含む特別管理廃棄物である。電炉ダストは炭素熱還元揮発によって粗酸化亜鉛とクリンカー（あるいは還元

鉄)に中間処理されているが、得られるクリンカーはFe濃度こそ高いものの、副原料である石炭や重油に起因してSの濃度が高く、Pbも固溶しているため、製鉄、セメントいずれの用途にも適さない⁶⁾。電炉ダストの処理費は電炉メーカーにとって大きな負担となっており、中間処理に委託される処理量自体の削減が望まれている。電炉メーカーで実施されている電炉ダスト処理量の削減方法の1つとして、ダストインジェクションが挙げられる⁷⁾。これは電炉ダストを電炉へ再度吹き込むことによって、その多くをスラグまたは溶鋼に転化させ、Zn濃度の高い2次ダストを得る手法である。しかし、この方法は溶鋼中の不純物濃度や消費電力を増加させるため、電炉ダストの吹き込み量には制限がある。

著者は、図1に示す磁気分離とダストインジェクションを組み合わせたプロセスを提案している⁸⁾。まず磁気分離によって、電炉ダストをFe濃度が高い磁着物とZn濃度が高い非磁着物に分離する。電炉ダストに含まれるFeとZnは複合酸化物の ZnFe_2O_4 を多く形成しているため、磁気分離単独で十分な品位まで相互分離することは原理的にできない。そこで磁着物をダストインジェクションに、非磁着物を既存の中間処理に委託する。磁着物はZnやClなどの不純物量が低減しているため、吹き込み量を増加させることが可能である。中間処理に委託されるダスト量は、分離された磁着物の重量分削減される。さらに非磁着物はクリンカーの発生源であるFeが低減しているため、未分離の電炉ダストを中間処理する場合よりクリンカー発生量が少なくなる。また、非磁着物

中のZn濃度は未分離の電炉ダストより高いため、中間処理における炭材原単位やエネルギー原単位も改善される。したがって、本プロセスは既存の中間処理に委託される電炉ダスト処理量を大幅に削減可能であると共に、多数のメリットが期待される。なお、磁気分離工程で電炉ダストを水に分散させるため、廃液が大量に発生することが懸念される。この点についても検討を行い、廃液排出量を極小化可能な水の循環利用法を見出している。簡単な技術をパズルのように組み合わせることで最適なプロセスを構築する企業経験から生まれたアイデアである。

電炉ダスト処理に関する研究は、新たな炉の開発や、各種薬剤によって成分を化学的に溶解するものが多い⁶⁾。それらに比べれば、本プロセスは既に知られた技術を組み合わせただけで高度な研究とは言えないかもしれない。しかし、電炉ダスト処理量を削減することを一番の目的に据えるのであれば、大型化が難しいプロセスや、高度な操業スキルが要求されるトラブル続きのプロセスに頼らずとも、ローテクで大きな成果が得られる可能性がある。現在は、物質収支やエネルギー消費量の視点で、プロセスの最適化と評価を進めている。

5 選択粉碎および物理選別による鉄鋼系副産物の高度資源化

鉄鋼業では製鋼スラグ、使用済み耐火物が日々大量に発生している。これらは路盤材やセメントなど土木資材としての

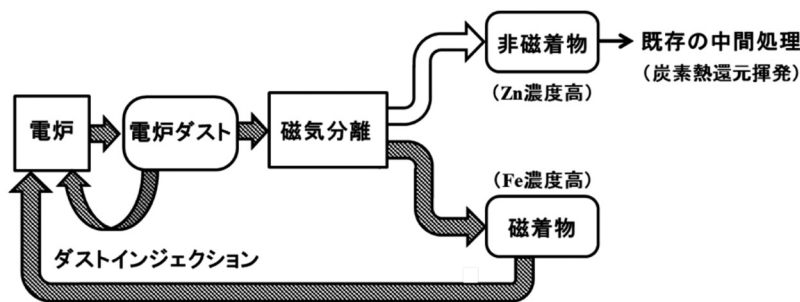


図1 著者が提案している電炉ダストの削減プロセス

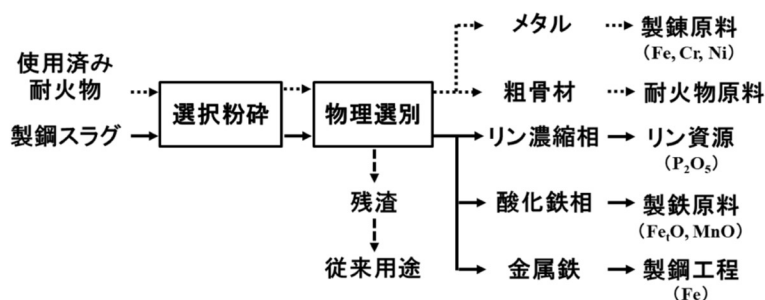


図2 著者が目指している鉄鋼系副産物の資源化プロセス

利用がほとんどで、需要が限られているため、排出量の削減や高付加価値用途の開拓が求められている。著者は選択粉碎と物理選別（主に磁気分離）によって使用済み耐火物と製鋼スラグを高度資源化する図2に示すプロセスを研究している^{9,11)}。使用済み耐火物はスラグや金属と接触した表層のみが劣化しており、それ以外の部分は組成的には健全である。耐火物の材質は多様であるが、特に粗骨材、ステンレスワイヤーは高価であり、これらを劣化部から単体分離できればそのメリットは大きい。一方、製鋼スラグには吹錬時に巻き込まれた金属鉄に加え、Mn、Pが豊富に含まれている。これらの成分は製鋼スラグ中で、リン濃縮相（ $\text{CaO-SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ 系）、酸化鉄相（ $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-MnO-CaO-SiO}_2$ 系）、金属鉄の3相に分配しており、磁性も大きく異なる。これらを相互に分離できれば、製鋼スラグに含まれる成分を土木資材より高付加価値の用途で利用可能である。

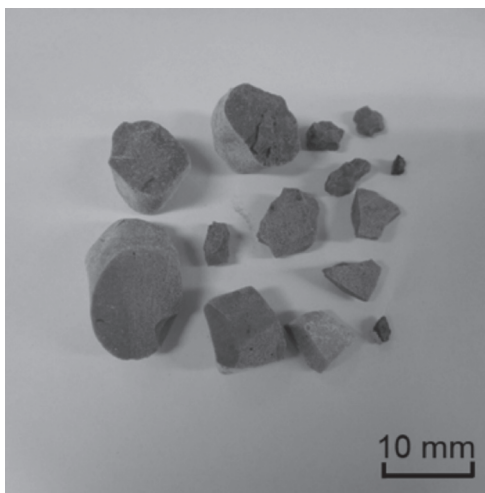


図3 使用済み耐火物から回収した粗骨材の外観

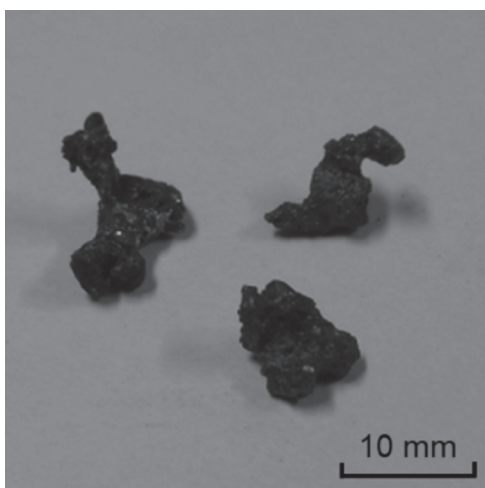


図4 現場製鋼スラグから回収した金属鉄の外観

このプロセスの最大の課題は粉碎工程にある。ジョークラッシャーやボールミルなどの衝撃力や圧縮力を主体とするランダムな粉碎法では、使用済み耐火物や製鋼スラグに含まれる不定形の構成相を粗大なまま単体粒子に分離することは困難である。また、エネルギー効率も数%程度と低く、日々大量に発生する鉄鋼系副産物を微粒子化するにはランニングコストが大きい。

そこで著者は、粉碎対象物内部の異相界面で選択的な破壊を起こすことが可能な電気パルス粉碎法の適用を検討している。水中に沈めた2つの電極間に粉碎対象物を静置して高電圧パルスを加えると、水中では絶縁破壊による衝撃波、粉碎対象物内部の電氣的な弱部である異相界面では溶発によりマイクロ爆発および衝撃波が発生する。つまり、粉碎対象物の内部から外方向に引張力をダイレクトに作用させることが可能な粉碎法であり、理論的には圧縮力を主体とする従来の粉碎法より粉碎効率は10倍以上高いとされている¹²⁾。また、実用上極間距離を大きくする必要があるので、印加電圧こそ100 kV超と高いが、1回のパルス照射で電流が流れる時間は0.2 μs程度と短く、消費エネルギーはさほど大きくはならない。

図3-5に不定形耐火物から分離した粗骨材、現場製鋼スラグから分離した金属鉄、模擬製鋼スラグの粉碎粒子の外観をそれぞれ示す。いずれも異相界面で優先破壊が起こったと推定される粒子が多く生成した。現在は物理選別と組み合わせた最適な粉碎、分離条件の検討を進めている。また、電気パルス粉碎の破壊機構については未解明な点も多いため、破壊に及ぼす粉碎対象の各種物性の影響の調査も進めている。

電気パルス粉碎は粉碎対象物を水没させなければならぬことが欠点として挙げられる。しかし、一般的な粉碎機と異なり、駆動部が少なく、機械的な摩耗もほとんどないため、修繕維持費は小さいと予想される。また、製鉄所内では、数

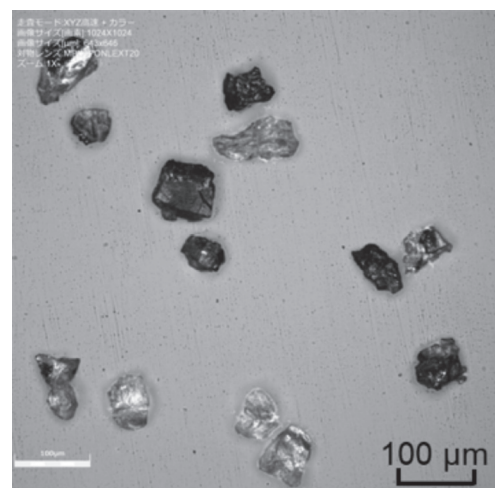


図5 模擬製鋼スラグ粉碎粒子の外観

百度の未利用排熱が多量に存在していることが知られており、それらを乾燥に活用することによってエネルギーの節約が可能になると考える。現行の鉄鋼系副産物処理で採用されている物理選別は、水を使用しない分級、乾式磁選にほぼ限られる。しかし、粉碎時に粉碎対象物が水に濡れてしまうのであれば、湿式の物理選別を避ける必然性がなく、むしろ積極的に活用して従来よりも高度な分離、資源化を目指せるとポジティブに考えている。以上のように様々な要素を勘案すると、本研究のプロセスの可能性は十分にある。

6 おわりに

鉄鋼分野を一度離れた身でありながらスムーズに戻れたのは、月並みだが人の縁のお陰と言う他ない。一番の幸運は恩師の長坂先生がまだ現役で活躍されていることであり、福岡工業大学での研究スタートアップにあたっては、長坂研究室スタッフの皆様より有形無形の支援、機会を数多く頂いた。鉄鋼協会では、「素材産業から見た自動車リサイクル研究会」、「高亜鉛含有ダストの高度資源化研究会」、「スラグ由来の人工リン鉱石フォーラム」、「若手研究者による未来創造・ネットワーク構築フォーラム」、「エコテクノロジー若手研究フォーラム」のメンバーに加えて頂き、この分野で活動する上で欠かせないネットワークを形成することができた。特に若手フォーラムは分野の異なる同世代の研究者も多く、メンバー間で共同研究が次々と生まれる刺激的なコミュニティであった。今年度は新たに「スラグ由来の人工リン鉱石研究会」の主査、「エコメタラジーフォーラム」のメンバーとして活動している。規模が大きいこの鉄鋼分野で歓迎される資源、廃棄物の処理プロセスを提案すると共に、本懐である環境負荷

の低減に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 松八重一代, 長坂徹也: 化学と教育, 65 (2017) 1, 4.
- 2) 国立環境研究所: 日本国温室効果ガスインベントリ報告書2017年, 温室効果ガスインベントリオフィス編, (2015), 49.
- 3) H.Kubo, K.Yokoyama, K.Nakajima, S.Hashimoto and T.Nagasaka: Journal of Environmental Engineering and Management, 18 (2008) 1, 49.
- 4) H.Kubo, K.Matsubae-Yokoyama and T.Nagasaka: ISIJ Int., 50 (2010) 1, 59.
- 5) 松八重一代: ふえらむ, 20 (2015) 7, 336.
- 6) 長坂徹也: 第205・206回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (2011), 83.
- 7) A.Tsubone, T.Momiyama, M.Inoue, R.Chairaksa, K.Matsubae, T.Miki and T.Nagasaka: Iron and Steel Technology, 9 (2012) 7, 184.
- 8) 久保裕也: 資源・素材2014 (熊本) 大会プログラム・要旨集, (2014), C2-8.
- 9) 久保裕也, 小川毅: CAMP-ISIJ, 29 (2016), 574, CD-ROM.
- 10) 久保裕也, 宮原文柳, 江藤寛: CAMP-ISIJ, 28 (2015), 160, CD-ROM.
- 11) 久保裕也, 宮原文柳: CAMP-ISIJ, 28 (2015), 627, CD-ROM.
- 12) 大和田秀二: 資源・素材2013 (札幌) 講演資料, (2013), 443.

(2018年5月2日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

東北大学 大学院工学研究科 准教授

三木 貴博

久保先生は、鉄鋼における環境分野を主戦場として活躍されている、若手研究者の一人であり大変頼もしい存在です。東北大学 長坂徹也先生の最初の博士課程学生として、研究室で中心的な役割をこなしてこられたのを拝見しており、当時から良い意味で目立つ学生で、例えば、長坂先生の代理である会議に参加し、立派に成果報告を行い、ディスカッションに参加していたことを記憶しています。

久保先生の強みは、多面的なものの見方ができるところにあると思います。博士課程後の民間企業での貴重な経験が生きていて、立場によって物の見方や優先順位が変わってくることを、肌で感じる事ができたのは、とてもプラスに作用していると思います。現場感覚を身に付けた上で、社会全体に貢献できる教員として大学に活躍の場を移され、新たな研究のフィールドを切り拓いてきています。久保先生は、製鋼スラグ・電気炉ダストの磁気分離や廃棄物からの貴金属回収等、大きな意味での分離工学についてアプローチを変えながら取り組んでこられたと思います。これまでの経験で、固体分離には粉碎が大きなポイントであることを実感され、現在

は、電気パルスを用いた選択粉碎法に取り組まれています。解決すべき課題も多いかと思いますが、このように良い技術を探し出せるのは、常にアンテナを高くし、先入観にとらわれずに検討することができるからだと感じています。全体を俯瞰できるゼネラリストの面と、ある分野に深く飛び込めるスペシャリストの両面を、これからもバランスよく磨いていただければと思います。

これからの久保先生に期待したいのは、鉄鋼分野を引っ張っていく若手リーダーとしての役割です。ご本人も恐らく強く感じておられるのは、苦しい時期の支援のありがたさかと思います。そして、そのサポートを引き寄せる事ができたのは、久保先生の頑張りも当然ありますが、その頑張りを見ている人がいた、ということに他ならないと思います。これからは少しずつで構わないので、駆け出しの研究者へのサポートをお願いできればと思います。また、本年度から「スラグ由来の人工リン鉱石研究会」の主査を担当され、いろいろとご苦労もあろうかと思いますが、貴重な経験もできることと思います。様々な壁を、久保先生お得意の突き押しで突破され、飛躍されることを祈念いたします。

株式会社クボタ 生産本部 環境管理部 担当課長

辻倉 伸弥

社会を取り巻く環境変化のスピードは近年ますます速くなっており、依然、大量生産、消費、廃棄が課題となる中で、資源循環や環境への影響を最小限にすることは、産業界においてもますます強く求められています。

その様な環境下、鉄鋼・廃棄物関係の研究活動をされている久保裕也先生と初めてお会いしたのは、東北大学 丸岡伸洋先生のご紹介でした。久保先生にお会いした時の第一印象は、とても相撲をされているとは思えないようなスリムな大谷翔平選手のような風貌とともに、一度社会人として産業界に身を置かれた事もあり、高度な専門知識をお持ちのSpecialistとしての側面だけではなく、マーケットも含めた幅広い視野をお持ちのGeneralistでもありました。

新たな社会課題が顕在化する世の中において、それらの課題解決に貢献できる技術開発のためには、基礎的な実験データに基づくアカデミックな研究開発がますます必要となります。それらを追求する企業もありますが、大半の企業は、QCD (Quality Cost Delivery) を中心に経済合理性重視の考え方が主流で、新規の技術、設備の導入では何年で投資を回収できるかが、大きな判断基準となっております。

日本は資源が少ないため資源循環は、大きな課題です。特にリン鉱石は、日本では産出されず全て海外からの輸入になっており、農業分野で肥料等に利用されるリ

ンの供給は今後の重要課題になっていくと予想されます。その課題解決のために、自動車会社は塗装スラッジ等からのリン回収、下水処理場では汚泥からリン回収を検討しています。久保先生は、鉄鋼業界の豊富な副産物である製鋼スラグからリンを回収するという規模の大きなテーマを博士課程の時に研究開発されており、その成果は日本だけではなく世界のリン物質フローに変革を与える可能性が高いテーマであると思います。

また、鉄鋼業界、鋳物業界でも課題となっているスラグと耐火物の混合廃棄物は、スラグと耐火物が融着した状態で排出されるため、単体リサイクル技術をそのまま利用することはできません。現状は、前処理としてエネルギー効率のあまり高くない乾式の粉碎技術を適用し、篩等の処理を行いリサイクルしています。このような混合廃棄物を前処理するため、久保先生が研究されている分離技術(電気パルス粉碎法)を適用した場合は、界面での分離が可能でありかつ投入エネルギーが小さくなります。従来技術の応用、有価物の回収や今後求められる副産物/廃棄物の研究開発において基礎となる可能性を秘めた研究をされていると思います。

Specialistであることは大学の研究者には絶対に必要であると思います。さらに久保先生がもたれているGeneralist感覚もブラッシュアップされ、SpecialistとGeneralistの二刀流の活躍を期待します。