



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

資源循環に関するハイブリッド型研究とその魅力

Attractiveness of the Hybrid-type Research for
Better Resource Logistics

山末英嗣

Eiji Yamasue

立命館大学
理工学部機械工学科
准教授*

1 はじめに

2015年の晩秋頃「躍動」の執筆依頼を受けた。躍動の趣旨を見ると、若手研究者・技術者の研究紹介とある。筆者がまだ若手の範疇に入れてもらえるのかどうかは異論があるかもしれないが、これまでに行ってきた研究を紹介したい。

筆者は、東京工業大学金属工学専攻永田和宏教授（現、名誉教授）・須佐匡裕助教授（現、教授）の下で鉄冶金や金属融体物性に関する研究を進め、その後、京都大学エネルギー科学研究科において石原慶一教授と主に材料科学、環境工学および環境影響評価に関する研究・教育活動に従事してきた。これまでの研究は大きく

1. 自然科学からのアプローチ（材料科学・プロセス工学等）
2. 社会科学からのアプローチ（産業エコロジー学、環境システム工学等）

という2つの軸から成っており、その他「環境教育」や「たたら製鉄」などにも従事しており、「若手」としては比較的広い分野にわたって研究を行ってきたと自負している。そのため「あなたの専門はなんですか？」と問われると答えに窮することが多かったが、近年は居直ってむしろそれを前面に押し出し、ある興味に対してあらゆるアプローチから取り組む、ハイブリッド型の研究を行っています、と答えるようにしている。これがタイトルの所以である。

そもそも筆者が社会科学的アプローチに興味を持ったのは以下のような理由による。すなわち、筆者は学生時代から現在に至るまで、「工学」に関連する部局に所属してきたわけであるが、工学では常に社会実装を問われる。もちろん、工学にも基礎研究分野はあり、常に社会実装のみに目を向ける必要は無いが、根底での意識はやはり求められてきた。そのため、種々の言い訳をしながら「今やっている研究は工学的

に意義がありますよ」と書くようにしてきた。しかし同時に、「役に立ちたいという意識・目的に偽りは無いが、具体的にどの程度役に立てるのかを示せていないのでは？」という疑問を感じるようになり、より定量的なエビデンスに基づいて社会実装に接続しなければならないことを意識するようになった。

2 自然科学的な研究

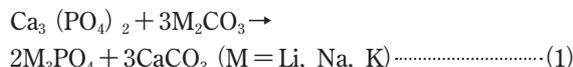
鉄鋼材料に関する「資源」といえば、鉄鉱石や石炭が第一になってくると考えられる。しかし、筆者はこれらについての直接の研究はそれほど行っていない。むしろ鉄鋼とはほど遠いように思われるレアメタルについての研究が多い。しかし、日本において使用されるレアメタルの9割は鉄鋼材料に随伴していることを考えると、鉄鋼産業とレアメタルは切っても切れない関係にある。

しかし、近年筆者が特に興味を持っているのはレアメタルですらない「リン」である。鉄鋼プロセスにおいてリンはほとんどの場合嫌われ者として扱われるが、肥料、自動車、電池、食品添加剤等、リンは我々の生活において欠くことできない元素であり、しかも代替できないという特徴がある。大阪大学名誉教授（現、早稲田大学リンアトラス研究所客員教員）の大竹久夫先生の言葉を借りれば、リンはいまだその重要性が気づかれていない唯一の元素と言って良い。

鉄鋼プロセスに関わらないが、製錬プロセスは鉱石に含まれる元素の濃化プロセスと考えて良い。これは主成分だけでなく、不純物成分についても同様である。リンもその代表であり、多くの研究者が鉄鉱石から鉄を濃縮したあとの残渣、すなわち鉄鋼スラグに濃縮されたリンをどのように利用するかに腐心している。

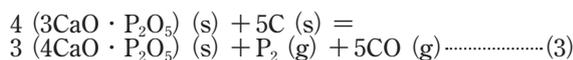
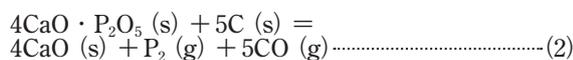
*平成28年4月1日からの所属。執筆当時の所属は京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー・社会環境科学専攻助教

筆者は炭酸アルカリ塩を用いたリン回収法を提案している¹²⁾。詳細は参考論文をご覧ください。鉄鋼スラグの主成分の一つであるリン酸カルシウムに対し、炭酸アルカリ塩を加え、以下のような交換反応を試みた。



すなわちスラグ中のリン酸カルシウムとアルカリ金属炭酸塩の間でイオン交換反応を行う。こうして生成したアルカリ金属リン酸塩と炭酸カルシウムはある溶媒への溶解度の差を利用して前者は液体状、後者は固体としてほぼ完全に分離できる。前者は新しいリン資源として期待されるが、それだけでなく残渣である炭酸カルシウムを高炉に再投入できるというメリットがある。すなわち図1に示すように、スラグに含まれるリンだけでなく、その他の元素の全てを活かしたスラグ全量再利用につながることを期待される。著者らによる実験では、アルカリ種としてリチウムを用いた場合で90~98%のリンを回収できることが確認された。これは従来の鉄鋼スラグ（厳密にはリン酸カルシウムであるが）からのリン回収効率と比べ、突出して高い値と思われる。

上述は鉄鋼スラグからのリンのリサイクルを意識しているが、天然のリン鉱石からリンを得るためには、以下のような反応を考えることが多い（実際にはさらに珪石などを添加する）。



これらの反応におけるリン蒸気圧を熱力学的な観点から理論的に推定することはプロセス設計を考える上で重要であり、多くの研究者がリン酸カルシウムの標準生成ギブズエネルギーの測定を試みている³⁻⁶⁾。しかしながら、それらの報告値には最大で50~100 kJ mol⁻¹程度のばらつきが見られる。

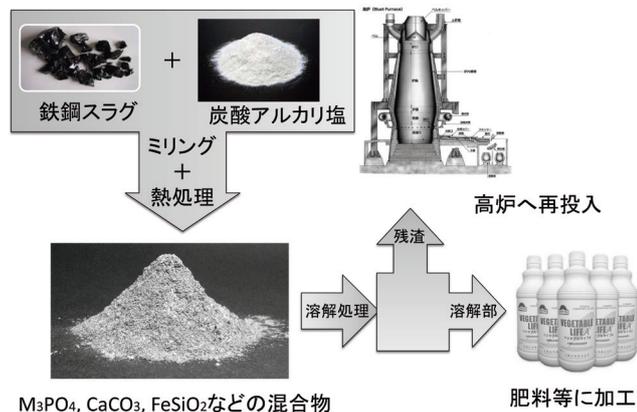


図1 提案している鉄鋼スラグ全部利用型プロセス

その結果、例えば、上述の反応(2)の場合、 $P_{\text{CO}} = 0.1 \text{ atm}$ 、 $T = 1473 \text{ K}$ の条件の下 $4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ の標準生成ギブズエネルギーの報告値のばらつきを考慮してリン蒸気圧を計算すると、その値には7桁もの差が生じてしまう。このばらつきは、 $4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ と CaO （または $4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ と $3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ ）の平衡において発生するリンの蒸気圧が直接測定されておらず、代わりにリン蒸気と平衡させた溶鉄、溶銅、溶銀といった熔融金属中のリンの活量として間接的に測定されていることが原因である可能性があった。

そこで筆者は、蒸気輸送法を用い、リン蒸気圧を重量という形で直接測定する方法を試みた⁷⁾。図2はそのようにして得られた $4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ の標準生成ギブズエネルギーの測定結果である。図からわかるように本研究の測定値は他の報告値に比べ、やや高い値を示した。興味深いのは、本研究で決定した値を高温側に外挿すると、既報値との差は明らかに小さくなる点である。既報の多くは銀、銅、鉄といった熔融金属とリン蒸気とを平衡させているが、リンの熔融金属への溶解反応が十分に平衡に達していなかったことを示唆している。特にその傾向は実験温度が低いほど大きい可能性がある。その結果、既報値はリンの活量が過小評価されたものと考えられる。実はこの研究は、論文としてまとめたのはつい近年であるが、研究自体は筆者が修士課程にて行ったものである。まとめるまでにずいぶん時間がかかってしまったが、20年近く前に行った研究でも物性値という点では普遍的な価値があり、また同時に当時は何の気なく行っていたリンに関する研究が、現在の研究にもつながっていることに深い縁を感じる。

3 社会科学的な研究

さて、上述のような応用研究、あるいはそれに関連する基礎研究は技術や学理の発展、あるいはコストの低下に必要不可欠な要素であるが、それを社会実装するためには資源の

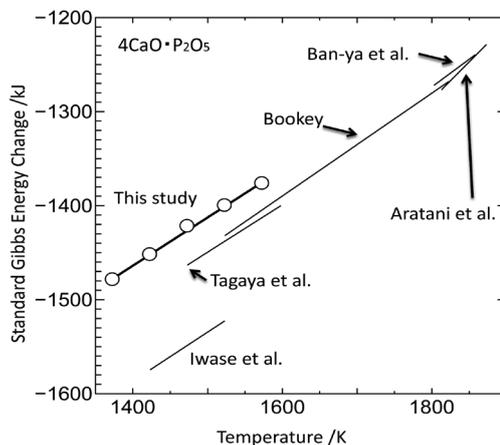


図2 $4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ の標準生成ギブズエネルギー

「量」と「質」の点からの担保も重要である。

リンの資源量に関して、これは筆者の成果ではないが、東北大学の長坂徹也教授、松八重一代准教授のグループが日本におけるリンのマテリアルフロー分析結果を報告している⁸⁾。それによると、2005年において日本が輸入しているリン鉱石に含まれるリン純分(101 kt)は、鉄鋼スラグに含まれているリンの純分(104 kt)とほぼ同量であることがわかっている。すなわち、量的には、日本の鉄鋼業は輸入リン鉱石を代替できるくらいのポテンシャルがあることになる。つまり、鉄鋼スラグはリンという視点から見れば重要な都市鉱山(鉱石)と考えることができる。

次の段階として「では鉄鋼スラグに含まれるリンの質はどの程度か?」という疑問が当然発生する。量的に十分なポテンシャルがあったとして、その品位が非常に低ければその鉱石は使用できない。これまでこの質問には単純にリン濃度の比較することで回答する場合ほとんどであった。この場合、溶銑予備処理脱リンスラグでさえ5% -P₂O₅程度であり、天然リン鉱石の30% -P₂O₅と比較にならないという回答が得られる。しかし、これはフェアな比較ではない。なぜならば天然リン鉱石の数値は選鉱後の値であり、粗鉱品位で比較すると鉱山によっては溶銑予備処理スラグよりも品位が低い場合すらある。それだけでなく天然鉱山と都市鉱山では輸送経路や製錬方法が異なる可能性もあり、リン鉱石の場合、さらに天然鉱石に含まれる重金属、放射性物質の存在を考慮した総合的な品位を検討しなければならない。単純な濃度だけの比較では不十分なのである(図3)。

このような問題に対し、筆者は関与物質総量(Total Material Requirement, TMR)という概念を導入した評価を近年精力的に行っている⁹⁻¹⁵⁾。関与物質総量はある材料やサービスを得るために必要な直接・間接の物質・エネルギー投入だけでなく、その背後にある隠れたフローを考慮するものである。隠れたフローとは採掘活動に伴う尾鉱、脈石、ズリ等が代表であり、誤

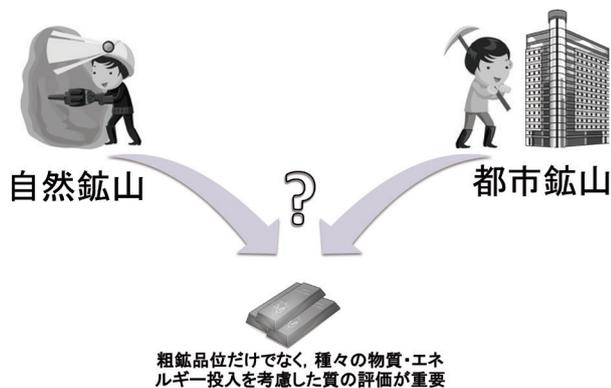


図3 自然鉱山と都市鉱山のどちらを用いるべきか?そのために両鉱山の「質」の評価が重要になる。

解を恐れずに言えば、単位量の材料やサービスに関わる全ての「採掘活動」を合算したものである。粗鋼の場合8~10 kg/kg程度であり、これは1 kgの粗鋼を得るために、鉄鉱石、ライム、石炭、輸送に必要な重油等、全ての物質・エネルギー投入の背後に8~10 kg相当の採掘活動が伴っていることを意味している。この概念は元々ドイツのWuppertal Institute¹⁶⁾で提案されたもので、エコノミーワイド(国レベルでの)な評価が主流であったが、筆者は製品レベル(ボトムアップ型分析)を一貫して進めている。なお、製品レベルでの関与物質総量にそれぞれの消費量に乗じることで最終的には国レベルでの関与物質総量が得られるため、両者は本質的には同じものである。

ただし関与物質総量は天然鉱石から製錬する場合しか考慮されていなかった。筆者はこれをリサイクルまで評価できるようにフレームワークを拡張し⁹⁾(図4)、その成果はドイツの環境省や我が国の中央環境審議会にて内部資料としても採用された。関与物質総量は鉱石品位が低ければ大きくなり、逆もしかりである。したがって、この指標は鉱石品位をベースとして、製錬やリサイクルに必要な物質・エネルギー投入を負の要因として加味できる総合指標と見なすことが可能である。つまり総合的な「質」を評価できる指標と考えることができる。

図5は以上のような概念に従い、天然リン鉱石または鉄鋼

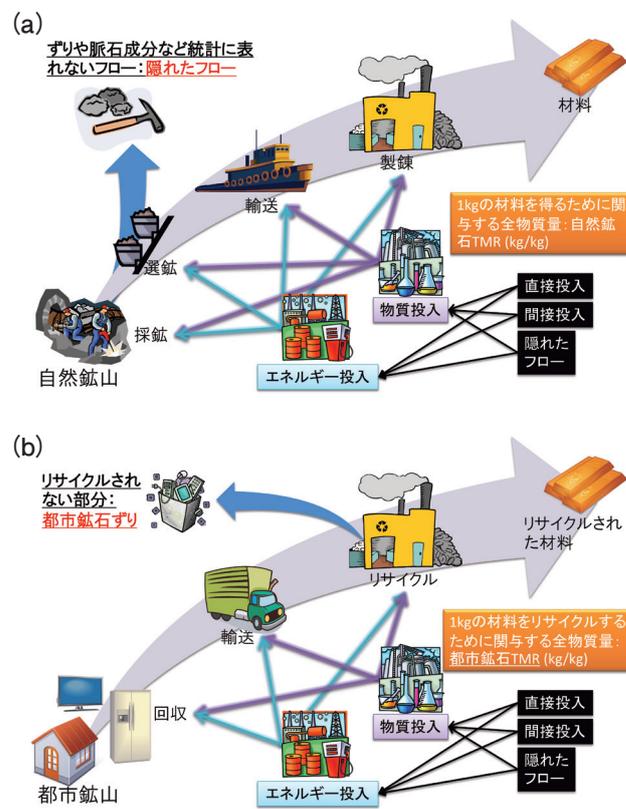


図4 (a) 自然鉱山からある材料を得るための関与物質総量 (b) 都市鉱山からある材料をリサイクルするための関与物質総量

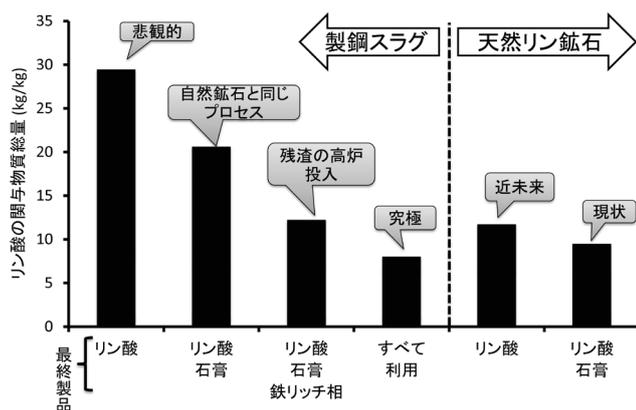


図5 自然鉱石または鉄鋼スラグからリン酸を得る場合の関与物質総量

スラグからリン酸を得る場合の関与物質総量を推定した結果である¹⁴⁾。天然リン鉱石に2種類の結果があるのは、天然リン鉱石は自然起源放射性元素を含まれている場合があり、将来的に副産物としてリン酸石膏の生産制限が起きることを想定している。また、鉄鋼スラグからのリン酸製造は実際にプロセス化されていないため、複数の製造プロセスを想定している。重要なことは、いずれの結果も天然リン鉱石からリン酸を得る場合と比較しうる程度の値という点である。天然リン鉱石の品位は、ズリが少ない比較抵抗品位の場合を想定していることと、現在すでに良質のリン鉱石がほとんど採れなくなっていることを考慮すると、鉄鋼スラグは「質」という点でも十分なポテンシャルを有していることがわかる。

いわゆる実験畑の研究者からは、このような研究の重要性はなかなか理解されない場合が多いように感じる。しかし、筆者の私見としては、マテリアルフロー分析で物質の循環を把握し、種々の指標でそれらを評価することは「社会」の物性値を知ることでもあり、材料の物性値を知ることと同様に重要なことと考えている。

4 転換技術に関する研究の重要性

現在、筆者の研究は、リンを軸として鉄鋼産業だけでなく肥料産業や食糧産業にも広がりつつある。また、逆にこれらの新しい分野を軸に、リンだけでなく窒素循環にも興味を持ち始めている。これらは全く異なる分野であることは間違いないが、サプライチェーンという言葉もあるように見えないリンクがあることも多い。肥料の一つである「ようりん」の製造には鉄鋼スラグが重要な位置を占めている。すなわち、食糧生産も巡り巡って鉄鋼業が関わっているわけである。しかもその影響は決して小さくない。したがって、筆者の行っているハイブリッド型研究は、興味とする対象が社会においてどのような位置づけにあるのかを正しく把握することが重要

である。特に、時代によっては廃棄物だったものが、現在や未来の社会では資源となることも多く、その意味で現在や未来だけでなく、過去の情報にも目を向けなければならない。

そこで重要となってくるのは、当時の社会状況では結果的に目を見なかったが、現在の視点で見ると極めて高い技術がまだまだ埋もれているという事実である。筆者は鉄鋼協会鉄鋼プレゼンス研究調査委員会歴史を変える転換技術研究フォーラム（主査：永田和宏 東京工業大学名誉教授）の幹事を務めさせていただいているが、ここでは正にそのような研究を行っている。その運営や研究会では、当時第一線で活躍されていた研究者・企業人の声を生で聞くことができ、その内容は非常に刺激的なものであり、正に温故知新といってよい。筆者は、最初はお手伝いのつもりで参加していたが、現在は鉄鋼産業の今後の発展を考える上で非常に重要な位置を占める研究会であると確信している。

中堅から若い研究者も最新の研究を進めていることは間違いないが、その一方ですでに確立された技術あるいはその過程で消えていった技術に対しては知識の空洞、知のギャップがあることを認めなければならない。本研究会と筆者が別に運営していた鉄鋼協会若手フォーラムの合同シンポジウムを通じ、上述の松八重先生、元新日鉄の稲角忠弘氏と共同で執筆した失われたリンの有効活用に関する論文¹⁷⁾は正にそのような問題に対する解と成果の一つである。

5 さいごに

筆者は元々金属工学科に所属しており、最初から鉄鋼のことを意識していたわけではない。しかし1995年の春、鉄鋼協会のサポートの下、欧州（イギリス、ドイツ、フランス）の鉄鋼会社を周遊した際、鉄鋼産業のスケールの大きさ、洗練された技術の機能美に魅せられ、同時に（当時は半分趣味として楽しんでた）たたら製鉄で鉄づくりの楽しさを知ることができ、鉄鋼の世界にのめり込んだ。

研究者になってからは、鉄鋼協会のヤングサイエンティストフォーラム（YSF）で知り合った方々と有形無形の共同研究を続けることができた。特に国立環境研究所の中島謙一博士、東京大学の醍醐市朗准教授、東北大学松八重一代准教授とは10年以上、お互いに切磋琢磨することができ、同時にいろいろな形で支えていただいた（図6）。筆者は多くの方々に支えてもらってなんとか生きながらえてきたと自覚しており、その意味で本当に運がいい人間であるが、その中でも特に彼らと出会えたことは一生の宝と考えている。そのような場を与えていただいた鉄鋼協会には心から感謝している。

なお、筆者は2016年4月をもって立命館大学理工学部機械工学科に所属が変更となる。所属は変わるが、今後もこれま



図6 研究仲間（一番左から東大醍醐市朗先生、東北大松八重一代先生、筆者、国立環境研究所中島謙一博士）

で通り多くの研究者と連携し、鉄鋼産業を中心としたハイブリッド型研究を進め、それを実社会に還元できるような研究に努めて行きたいと考えている。今後とも、ご指導・ご鞭撻の程、よろしくお願いたします。

参考文献

- 1) 梶原崇志, 山末英嗣, 奥村英之, 石原慶一 : CAMP-ISIJ, 26 (2013) 1, 73
- 2) 山末英嗣, 丸川雄浄 : 「鉄鋼プロセスにおけるリンの散逸と有効利用技術」日本鉄鋼協会合同シンポジウム資料, (2014年9月24日), 117.
- 3) J.B.Bookey : J.Iron Steel Inst., 172 (1952) 1, 61.
- 4) M.Iwase, H.Fujiwara, E.Ichise, H.Kitaguchi and K.Ashida : Trans.ISS, 11 (1990), 31.
- 5) A.Tagaya, F.Tsukihashi and N.Sano : Trans.ISS, 13 (1992), 59.
- 6) H.Yama-zoe, E.Ichise, H.Fujiwara and M.Iwase : Trans. ISS, 12 (1991), 75.
- 7) E.Yamasue, K.Shimizu and K.Nagata : ISIJ Int., 53 (2013) 10, 1833.
- 8) K.Matsubae, J.Kajiyama, T.Hiraki and T.Nagasaka : Chemosphere, 84 (2011) 6, 767.
- 9) E.Yamasue, R.Minamino, T.Numata, K.Nakajima, S.Murakami, I.Daigo, S.Hashimoto, H.Okumura and K.N.Ishihara : Materials Transactions, 50 (2009) 6, 1536.
- 10) E.Yamasue, R.Minamino, I.Daigo, H.Okumura and K.N.Ishihara : Materials Transactions, 50 (2009) 9, 2165.
- 11) 南埜良太, 山末英嗣, 中島謙一, 村上進亮, 奥村英之, 石原慶一 : 日本LCA学会誌, 6 (2010) 3, 251.
- 12) 谷川寛樹, 山末英嗣, 稲津亮, 前新将 : 土木学会環境システム研究論文集, 38 (2010) 9, 413.
- 13) E.Yamasue, R.Minamino, I.Daigo, H.Tanikawa, H.Okumura, K.N.Ishihara and PH Brunner : Journal of Industrial Ecology, 17 (2013) 4, 555.
- 14) E.Yamasue, K.Matsubae, K.Nakajima, S.Hashimoto and T.Nagasaka : Journal of Industrial Ecology, 17 (2013) 5, 722.
- 15) E.Yamasue, K.Matsubae and K.N.Ishihara : Global Environmental Research, 19 (2015) 1, 97.
- 16) Wuppertal Institute : Materital intensity factors : overview on materials, fuels, transport services and food., (2014), http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/MIT_2014.pdf, (accessed 1 Jan.2016)
- 17) K.Matsubae, E.Yamasue, T.Inazumi, E.Webeck, T.Miki and T.Nagasaka : Science of the Total Environment, 542 (2016), 1162.

(2016年1月12日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

千葉工業大学 名誉教授

雀部 実

かつて評者は若い研究者を念頭に「ふえらむ」に「2足の草鞋を履いて研究を進めることが好ましい」と書いたことがある。表題の「ハイブリッド型研究」という目新しい言葉は「2足の草鞋を履いた研究」を的確に表現したスマートな言葉であると感じた。鉄鋼界での従来の研究テーマは生産の効率化、製品の高性能化のためのものが主流だった。しかしここで取り上げているテーマは持続可能な社会発展をテーマにしたもので従来のテーマとは質が異なっていて、鉄鋼研究分野でのパラダイムシフトが起りつつあることを感じさせるものである。

ベッセマーの昔から、鉄鋼でのリンに関する研究は製鋼工程での脱リンで高品質の鋼を得るといった観点からのものであり、脱リンがいわば製鋼研究での永遠のテーマと言えるようなものだった。しかし現代ではリン鉱石の不足が問題となり始めており、鉄鋼原料から鉄と共にリンを回収するという発想が出るようになった。リン鉱石の不足を予見した鉄鋼研究者はすでにおられた¹⁾が、当

時の社会情勢はリン鉱石の不足に対する危機感が希薄だったので、リンの回収というテーマは大きな広がりを見せなかった。以前であれば高温プロセス分野のテーマであった脱リンが、現在ではまさに環境・エネルギー・社会工学分野の重要なテーマとなりつつある。山末先生がこの中で基礎科学を十分に活用することの重要性を指摘していることは、従来から言われている「タコツボ型研究が多すぎる」という批判からの脱却を示すものでもある。

この研究を鉄鋼協会のヤングサイエンティストフォーラムのメンバーが協力しながらアグレッシブに進めていることは、鉄鋼協会の明るい将来を感じさせるものである。現在のヤングサイエンティストが将来まで、年齢にとらわれずに順次現れるヤングサイエンティストと共に活躍されることを期待する。

- 1) 丸川雄浄, 城田良康, 姉崎正治, 平原弘章: 鉄と鋼, 87 (1981) 323.

JFEスチール(株) 顧問

大橋 延夫

私と山末先生との出会いは約3年前からの本当に最近のことで、ご本人も書かれているように、鉄鋼協会の「歴史を変える転換技術研究フォーラム」の場であった。そこへの参加を求められた時、長い間協会活動から遠ざかっていた後ろめたさと高齢の身でという躊躇があったが、いまや“絶滅危惧種”となった昔を知る者が必要だと口説かれて参画させて戴いている。そこではすでに長い期間を掛けて鉄鋼上流工程を中心に過去の技術革新を振り返り、その現実と理由に関する詳細な討論が行われていた。私の専門は下流工程技術と製品開発であったが、それらも含めた各分野での技術の進化は正に革新と呼ぶにふさわしい歴史的なものであったことを改めて想起させられている。山末先生はこのフォーラムの幹事として素晴らしい補佐活動をして戴いており、我々が経験してきた各種の技術開発の表裏にまたがる情報を熱心に吸収されていて、その真摯な態度にはいつも敬意を表しているところであった。

先生は、自認されているように、社会の実学に近い工学に重点を置く立場から、とくに鉄鋼分野で未開拓であった燐の回収と資源化に注目され、幅広い観点からそ

の技術開発と実用化に熱意をもって取り組んでおられる。作今、レアメタルや貴金属類をはじめとする各種金属の回収が行われるようになったが、普通の元素でありながらその資源枯渇が憂慮されている燐に着目され、鉄鋼という桁違いに量が多い場においてその回収技術の確立を志向しておられるのは貴重なことである。近年大学においては鉄鋼関連の研究や授業が非常に少なくなっており、また協会100周年記念講演で岸輝雄先生が述べられたように、各種の工業分野で鉄鋼に代わる材料の開発と応用が進められている。しかし、資源の豊富さに加え、バランスのよい機械的性質、高低温への適用性、電磁気的特性、多数の品種と形状、加工や熱処理の多様性、溶接の安易さ、高度なりサイクル性、そして低価格などを併せ持った材料は他には見当たらず、その優位性はゆるぎないものと思われる。その中であって、従来は蔭に隠れていたスラグなど廃棄物の価値が再認識され高度な有効利用に結び付けば、更なる付加価値が加わることは論をまたない。先生の基盤となっている化学反応論の恰好な実学対象として取り上げられている課題の大きな進展を心から期待したい。