



若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

変化をチャンスに ～製鋼精錬研究の現場から～

佐々木直人*

Naoto Sasaki

新日本製鐵(株) 技術開発本部
プロセス研究開発センター
製鋼研究開発部 主任研究員

1 製鋼プロセスの研究開発

製鋼工程では、不純物濃度や凝固組織など鋼の「生まれ」を決定づけるため高精度な制御が必要とされる。同時に、全ての鋼が通過するためコストや生産性に大きなインパクトを与える重要な工程でもある。したがって、製鋼工程での課題のブレークスルーは、鋼材の性質や事業所の収益の大幅な向上に直結する。製鋼プロセス研究の面白みは正にそこにあると感じている。

その中でも、筆者は製鋼精錬工程のプロセス改善に携わってきた。精錬分野では特に近年、環境規制や資源高騰などで制約条件が厳しく変化しており、従来の手法では解決は難しい。しかし、だからこそ研究開発に対する期待は大きく、新たな手法や視点でのアプローチが必要となる。

例えば、転炉の生産性向上には高速送酸化が有効だが、ダスト発生量の抑制を考慮しながら送酸ノズルを設計する必要がある。多孔ノズルからの酸素噴流の合体や燃焼など各々の現象について、直近では高精度な予測が可能になっている^{1,2)}。近年、計算機能力は飛躍的に向上しており、精錬分野でも数値流体解析が有効なツールになりつつある。

製鋼スラグの発生量低減も重要なテーマである。新日鐵では、熱収支改善及び反応効率向上を目的に転炉型の溶銑脱りんを開発し、各所に導入してきた(図1)。現在では低塩基度での処理を特徴とする転炉型へのシフトが完了し、スラグ発生量の抑制効果を享受できる段階にある。更なる発展のためには、転炉型予備脱りん自体の反応効率を更に向上させたい。

従来の粉体を吹きこむトーチカー方式に対して、転炉型脱りんはトップスラグ/メタル間の反応が主で、かつ、酸素ポテンシャルが高く、塩基度が低い。そのため反応機構も大きく異なる。したがって、飛躍的な反応効率向上のためには、今一度基礎現象に立ち戻って考える必要がある。

例えば溶銑脱りんでは、Fe-FeO平衡で決まる酸素分圧を

基にすると、メタルに対するスラグへのりん分配比は2000程度が期待される。しかし実際には100程度しか得られない。これは溶銑中の炭素によってスラグ/メタル界面の酸素分圧が引き下げられた結果と考えられる(図2)。この非平衡状態をFe-FeO平衡側に引き上げることができれば極めて少量のスラグでの精錬が可能になる。今後取り組むべき課題の一つと考えている。

2 溶銑脱りん処理の 反応効率改善に関する研究

溶銑脱りんにおける基礎現象を考える上では、スラグ中ふっ

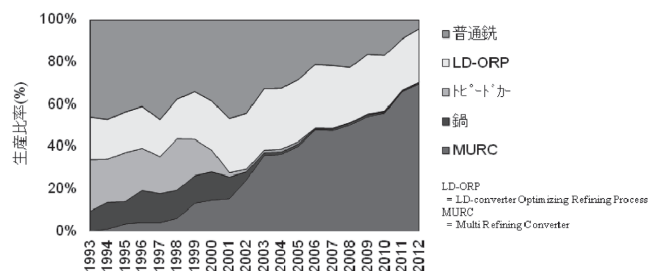


図1 溶銑処理率の推移³⁾(図中LD-ORP、MURCが転炉型)

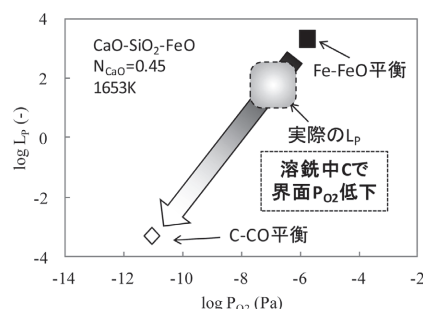


図2 スラグ及び溶銑の平衡酸素分圧 P_{O_2} とスラグ/メタルのりん分配比 L_p

* 現 新日鐵住金(株) 技術開発本部プロセス研究所製鋼研究開発部 主幹研究員

素濃度の制約が、もう一つの大きな変化となる。2001年のふっ素の溶出基準の設定により、効果的な媒溶剤であった蛍石の使用が制限された。従来、均一液相としての取扱で十分議論できていたものが、スラグ中の固相の寄与と、石灰分の溶解とを考慮することが必要となった。これらの基礎現象に注目してスラグ発生量の低減に取り組んだ事例を以下に紹介する。

2.1 脱りん反応に及ぼすスラグ中固相の影響⁴⁾

溶銑脱りんの精錬材CaOは、脱珪によって生成したSiO₂と反応して、珪酸カルシウム $n\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ($n=1\sim3$ など)の固相としてスラグ中に存在する。中でも $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (以下C₂Sと記す)は平衡論的にはりんを高濃度に固溶することが知られている⁵⁾。筆者らは反応中にC₂Sにりんを濃縮することができれば、液相のりんを低濃度に維持でき、全体の反応効率を向上させることが可能ではないかと考えた。

そこで、異なる初期[Si]濃度の溶銑に生石灰と酸化鉄を添加する小型(メタル量600g)の脱りん実験を行った。CaO添加量は一定で、溶銑中Siはほぼ全量がSiO₂になるので、初期[Si]濃度によって生成スラグのCaO/SiO₂比が変化する。初期[Si]濃度と脱りん生石灰効率の関係を図3に示す。酸化鉄がSiの酸化に、CaOがSiO₂の固定に消費されるため、全体的には初期[Si]濃度の増加に伴い、脱りん生石灰効率は減少している。しかし、初期[Si] = 0.15 mass%近傍で極大値を示し、初期[Si] = tr.の高塩基度の水準とほぼ同レベルとなった。

図3のI～IVの点について実験終了後のスラグの鉱物相解析を行った。その結果をそれぞれ図4のI～IVに示す。上段はSEM像であり、下段は組成から推定される鉱物相を示している。脱りん効率が極大を示したIIIの領域では、PはCaOとSiO₂との固溶体として存在し、かつI、II、IVで観察されたfree-CaOなど他のCaO含有相の存在は認められなかった。

反応中に存在していた固相を上記結果から検討し、図5に示した。図3、4のIIIで代表される領域は、C₂S飽和領域と推定される。III以外の領域ではPを固溶しない固相が存在するため液相中のP濃度が高くなる。これに対してIIIの領域では固相中にPが固溶するために液相中のP濃度が低位に保た

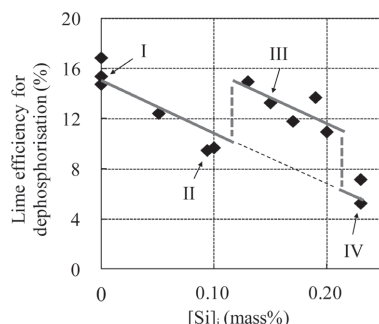


図3 初期[Si]濃度[Si]iと脱りん生石灰効率の関係

れ、結果として高い脱りん効率が得られたと考える。

以上のように、 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2\text{-}3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 系状態図にヒントを得て、反応中のスラグ内の固相に積極的にりんを濃縮することで、脱りん反応効率の向上が可能であることを溶銑脱りん実験で示した。

その後、マルチフェーズフラックスに関する研究会⁶⁾などでスラグ中固相に関する知見が整備され、現在では定量的な議論ができるようになりつつある。

2.2 転炉滓の溶解挙動の調査⁷⁾

転炉型脱りんでは、CaO分の再利用のために転炉滓がリサイクルされている。転炉滓はプリメルト品であるため迅速な溶解が期待されるが、1600℃を超える脱炭吹止温度を経て凝固するため脱りん処理温度域では固相率が高く、さらには未溶解のCaOを含んでいる場合が多い。このため転炉滓の溶解速度はスラグ組成の影響も受けると考え、その依存性を調査した。

図6に、CaO/SiO₂ = 1.0のスラグ中で100rpmの速度で回転させたときの転炉滓の溶解挙動を、石灰の結果⁸⁾とともにプロットした。転炉滓は高い半径減少速度を示し、かつ、CaOペレットとは異なり、溶媒側の物質移動律速では整理できなかった。転炉滓中に液相が生成するためと考えられる。

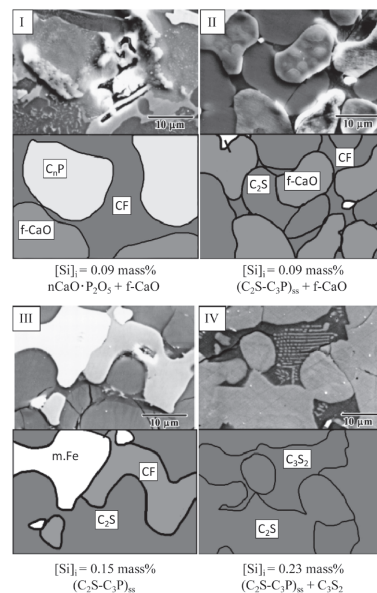


図4 脱りん処理後スラグのEPMA解析結果⁴⁾

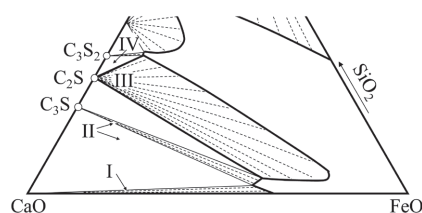


図5 実験温度(1673K)でのCaO-SiO₂-FeO系の等温断面図⁴⁾

高塩基度 ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1.5$) 条件においても同様の調査を行った。この場合、先の低塩基度条件に比べて、著しく溶解速度が低下した (図6)。実験後の試料を観察すると、実験前から半径が殆ど減少していない部分と、選択的に損耗している部分が観測された (図7)。転炉滓は、比較的高融点の高 CaO 濃度相と低融点の高 FeO 濃度相に分離している。特に高 CaO 濃度相では塩基度 1.5 の条件では C_2S の生成による溶解障害が発生したと考えられる。一方で、高 FeO 濃度の低融点相が液相になることにより部分的に剥離し、加えて界面積が増大するためさらに溶解が進行したと考える。このように、プリメルト状態である転炉滓のリサイクルにおいても、高融点相によって溶解が律速されるため、スラグ組成を考慮する必要性がある。現在では転炉滓などプリメルト品の溶解についてシミュレーションモデル¹⁰⁾で精緻な検討が可能になっている。

スラグ中ふっ素濃度の制限は、固相の影響や溶解遅れなど新たな課題を生み出した。しかし、基礎現象に基づいて考えることで、固相の積極利用と言う思想が生まれ、新たな可能性が開けたと考えている。定量的な知見も充実してきたが、実操業では極限まで利用出来ていたとは言えず、精錬材の溶解挙動を含めたスラグ組成の最適ルートの探索、制御手法の開発など、今後も取り組んで行きたい。

3 製鋼精錬分野の活性化に向けて

国内の製鋼精錬分野の研究者は残念ながら過去に比べて少なくなっている。しかし、少ないからこそ緊密な議論ができ

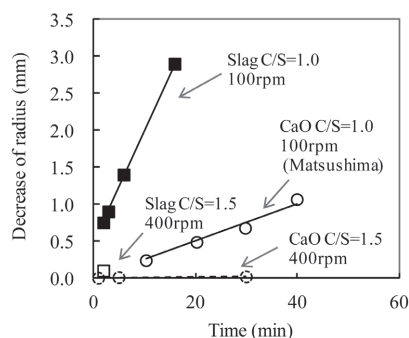


図6 低塩基度条件での生石灰と転炉滓の溶解速度比較⁷⁾

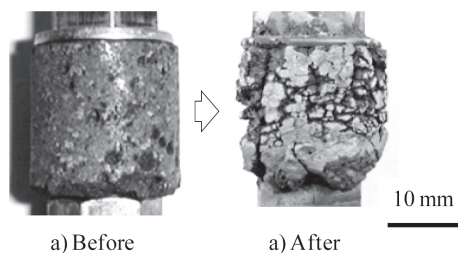


図7 高塩基度 ($\text{C}/\text{S} = 1.5$) 条件での転炉滓の溶解前後の外観⁷⁾



図8 第163回講演大会国際セッション参加の皆さんと
(筆者は右から3番目)

るという利点もある。組織・環境が異なれば視点も異なる。多様な視点を交えた議論が有効なヒントや加速手段になると考える。最近、筆者も国際セッションの企画運営などで内外に人脈を広げ、新たな視点に触れ刺激を受けた。また、精錬フォーラムの活動に参加する機会を得、特に研究グループでの議論では企業側研究者として正確なニーズをお伝えできるよう努力し、多くを学んでいる。産学の連携ではフィードバックも重要な役割と考え、研究会成果のモデルを適用した解析例¹¹⁾を報告するなどしてきたが、これまでの取り組みが十分であったか反省し、今後も継続して努力して行きたい。

参考文献

- 1) N.Asahara, K.Naito, I.Kitagawa, M.Matsuo, M.Kumakura and M.Iwasaki : Steel Research Int., 82 (2011) , 587.
- 2) A.Kaizawa, N.Sasaki, T.Inomoto and Y.Ogawa : Proceedings of 8th International Conference on CFD in Oil & Gas, Metallurgical and Process Industries, SINTEF/NTNU, Trondheim Norway, (2011) , 88.
- 3) 熊倉政宣 : 新日鉄技報, 394 (2011) , 投稿中.
- 4) 佐々木直人, 内藤憲一郎, 出本庸二, 北村信也 : 鉄と鋼, 88 (2002) , 16.
- 5) W.Fix, H.Heyman and R.Heinke : J. Am. Ceram. Soc., 52 (1969) , 347.
- 6) マルチフェーズフラックスを利用した新製錬プロセス技術研究会 : マルチフェーズフラックスを利用した製錬プロセス技術の新展開, 日本鉄鋼協会編, (2009)
- 7) 佐々木直人, 小川雄司 : CAMP-ISIJ, 23 (2010) , 949.
- 8) 松島雅章, 矢動丸成行, 森克己, 河合保治 : 鉄と鋼, 62 (1976) , 182.
- 9) 佐々木直人, 小川雄司 : CAMP-ISIJ, 15 (2002) , 877.
- 10) K.Ito and M.Mori : CAMP-ISIJ, 25 (2012) , 187.
- 11) N.Sasaki, K.Miyamoto and Y.Ogawa : CAMP-ISIJ, 25 (2012) , 195.

(2012年6月15日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

東北大学 多元物質科学研究所 教授

北村 信也

先日、佐々木さんが入社する前、1990年頃の講演大会予稿集を見る機会がありましたが、溶銑予備処理というセッションで10件以上の発表があり、それも最新のデータが企業・大学から公開されていました。私たちの年代は、ここで他社に先んじて優れた成果を発表する事が大きなモチベーションで、講演大会での質疑を通じて刺激も受けたし、大いに鍛えられたものでした。この頃は、他社が真似たら、追いつかれる前にもっと良い技術を開発すれば良いと思っていましたし、事実、そうやって次々と新しい技術が出現していたように思います。その頃に比べると、佐々木さんのような今の研究者は、気の毒なほど刺激が少ない環境にあると言えます。

研究を進めるには刺激が必要です。企業内でも上司や現場から刺激(圧力?)を与えられるとは思いますが、学問的な刺激は、やはり学会で求めなければなりません。鉄鋼協会を活性化させるには、我々の年代ではなく佐々木さんの世代が積極的に活動する事が必要です。私が精錬フォーラムの座長をお引き受けした時、各企業の部長さん達に「幹事は、あなたたちではなく次世代を担う人材にしてください」とお願いしたのは、その意味があったからです。佐々木さんが幹事であるという意味を、是非、良くかみしめて下さい。

佐々木さんも書かれているように日本では製鋼精錬関係の

研究者は企業も大学も大変に少なくなっています。これは、人員整理の問題ではなく、この分野でインパクトのあるプロセス開発がほとんど出なくなったためと解釈するべきで、我々のような先輩研究者の責任であるとも言えます。ただ、世界に目を向ければ、東アジアを中心に優秀な中堅・若手の研究者は多いですし、数は少なくなりましたが欧米でも熱心に研究をしている企業や大学もあります。さらに、この分野は何故か国際学会が目白押しです。企業にいと好き勝手に外国出張する訳にも行かないでしょうけれども、その機会を得たら、日本人とばかり話すのではなく、積極的に海外の研究者と交流して個人的なチャンネルを増やすようにして下さい。

佐々木さんがこれから大きく飛躍することについては、あまり心配していません。昨年、ふえらむに「鉄鋼精錬プロセス工学概論」をいう連載を書きました。佐々木さんには、その最終回で書いた以下のような文章を贈ります。

技術開発において最も重要なことは「直感」である。準備ができた人(「ニーズの的確な把握」と「現象の深い理解」ができて、かつ、柔軟な発想力を磨いた人)に、神様がほほ笑んでくれると「直感」が閃くことになる。ただ、神様はいつも微笑んでくれる訳ではない。しかし準備をしておかない人には神様の後ろ姿しか見えない。

(株)神戸製鋼所 鉄鋼事業部門 技術開発センター製鋼開発室 主任研究員

木村 世意

初めて佐々木さんに会ったのは2年前。精錬フォーラムの幹事会だったと思います。今日に至るまでの、様々な研究会や講演大会の場で受ける印象では、私の方がわずかに年上かなと感じましたが、所属する会社は異なるものの、同僚のつもりでディスカッションさせていただいておりました。従いまして、本稿の執筆を依頼されたときは、自分が「先輩」として、しかも「エール」を贈るなど大変恐れ多いことと感じてしまったのですが、私自身もすでに若手から中堅に「変化」していることに改めて自覚を持つ意味で、執筆を引き受けました。

溶鉄の精錬工程における脱りんや脱硫など不純物除去プロセスを研究対象とすることは、「未利用資源の使用拡充」、「高効率生産」、「地球環境への対応」、「環境調和型鋼材の創出」、「地域との共生」、「ゼロエミッション」と、高温プロセス部会のロードマップに謳われている指針の全てに関わる、広範囲かつ複雑な課題を相手にすることになります。佐々木さんが書かれた本記事や鉄と鋼へ投稿された論文を読んだり、講演大会での発表を聴講したりしても分かりますが、上記指針のいずれも意識して研究に取り組まれています。一企業にとどまらず、日本の鉄鋼産業が置かれた現状を打破していかなければならない中、大変頼もしく感じます。

また、前出の精錬フォーラムでは、大学側の若手研究者と企業側研究者・技術者との間で、お互いのシーズやニーズ等を提案、提起しながら研究の方向性を決めていくのですが、議論が発散しかけても、佐々木さんの発言によって、場が引き締まる事が多々ありました。これまでの研究への取り組みの中で獲得された基礎知見、現場で実際に起こる現象と基礎知見を関連付けさせる応用技術、そして、これらの知見や技術が社会に与える影響にまで、深く精通していることによるのでしょう。学側のシーズを産側のニーズに上手に引き付けています。大学の若手研究者にとっても非常に頼もしい存在ではないかと思います。

溶鉄精錬プロセスを取り巻く環境は、少しずつではなく、一度に多くのことが変化しています。一視点ではなく多視点で、一組織だけではなく別組織も巻きこんで、産側だけでなく学側の研究成果を活用することによって、多くの変化に対応していけるはずで。日本国内では、産学ともに、精錬プロセスに関わる研究者、技術者が減少しつつありますが、押し寄せてくる多くの変化は、この減少に歯止めをかけ、復活させる絶好のチャンスとも言えます。今後も、変化をチャンスとして捉えながら、益々活躍されること期待しております。