



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

高炉プロセスの研究開発を通じて

Through the Research and Development for Blast Furnace Process

柏原佑介

Yusuke Kashihara

JFE スチール (株)

スチール研究所 製鉄研究部

主任研究員

1 はじめに

筆者は2002年に旧NKKに入社以来、高炉プロセスに関する研究開発業務に取り組んでいる。学生時代に高炉に関わる研究に出会い、入社後も高炉技術に関わる研究開発、高炉の操業改善、そして高炉改修等、多くの業務に携わることができた。今回、まず本稿を執筆する機会を与えていただいたことに感謝を申し上げ、これまで取り組んできた高炉プロセスに関する研究開発を通じて学んだことを中心に紹介したい。

2 これまでの取り組みについて

高炉は炉頂から鉱石等の主原料とコークス等の還元材を層状に装入し、炉下部の羽口から熱風の送風と現在では多くの高炉で行われるようになった補助還元材吹込みを行い、溶銑を製造する反応装置である。したがって実際の高炉操業で外部から操作できる部分は、炉頂での装入、羽口からの熱風の送風、そして補助還元材の吹込みだけであるため、高炉の技術開発としては、まずこのような限られた条件下の中で高炉操業を改善する手法を見出すことが必要とされてきた。ここではこれまで主に行ってきた炉頂での装入操作に関する研究開発事例を中心に紹介する。

高炉の炉頂から主原料と還元材を装入する装入装置として、主にベル式とベルレス式がある¹⁾。JFEスチールではベル式に比べて装入位置の自由度が高いベルレス式の装入装置を導入しており、ベルレス式の装入装置を活用した装入物分布制御技術の開発を行っている。また環境問題を踏まえたCO₂削減に対応するため、高炉の低還元材比、低コークス比操業が重要視される中、還元効率の向上と通気性の確保が必須となる。従来から行われている半径方向の層厚分布制御等では、還元効率の向上と通気性の確保の両立は一般的には困難とされている。しかしこれまでの高炉操業で培った技術の

一つである鉱石層内へのコークスの混合装入技術により、還元効率の向上と通気性の改善が同時に達成されることが知られている²⁾。この技術では鉱石層内へコークスを均一に分散させた状態にすることが理想とされている。しかし貯鉱槽から高炉炉頂部そして高炉内に至る搬送中のあらゆる容器内で鉱石とコークスの混合原料が堆積する過程において、粒度・密度が鉱石と異なるコークスは鉱石層から分離・偏析するため³⁾、現状では鉱石層内へコークスを均一に分散させた状態には至っていない。したがって鉱石層内におけるコークスの分布状態をより均一に近づけ、この技術をより高度化させるための装入方法に関する研究開発に取り組んだ。

ベルレス式の装入装置でも垂直2段バンカーを備えた装入装置¹⁾では、炉頂バンカーからの排出挙動におよぼす炉頂バンカー内、特に下部バンカー内における分離・偏析の影響が大きく⁴⁾、従来から行われているようなベルトコンベア上での鉱石と小塊コークスの重ね方の調整をどのように変更しても、炉頂バンカーからの小塊コークスの排出挙動を大きく変更することができないことがわかった⁵⁾。そのため高炉内での鉱石層内における小塊コークスの分布状態を大きく改善することもできない。したがって炉頂バンカーからの小塊コークスの排出挙動を制御するため、小塊コークスの装入方法を大きく変更する新装入法⁶⁾を開発した。図1に垂直2段バンカーを備

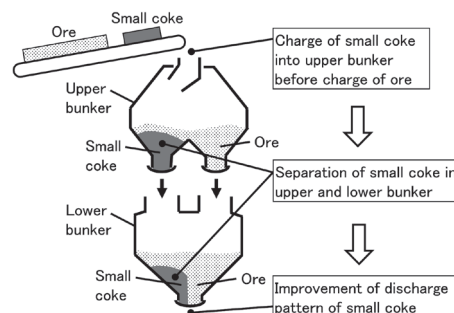


図1 新装入法概念図

えた装入装置における小塊コークスの新装入法の概念図を示す。従来は鉱石と小塊コークスを事前に混合した状態で炉頂バンカーに投入していたため、炉頂バンカー内での搬送過程において小塊コークスの分離・偏析が発生していた。しかし新装入法では、小塊コークスと鉱石を分離した状態で炉頂バンカーに装入することにより、炉頂バンカー内での搬送過程において、小塊コークスの分離・偏析を極力発生させないように工夫した。その結果、炉頂バンカーからの小塊コークスの排出挙動を大きく変更することに成功し、鉱石層内におけるコークスの分布状態を大幅に改善することができた。

次に、炉頂での装入操作に関する技術開発では炉頂での現象を中心に扱うが、高炉内現象について考えることも必要であり、高炉内現象を中心に扱った技術開発にも取り組んだ。まず高炉内において鉱石層内に混合されたコークスの分布状態について、従来は半径方向における混合コークスの分布改善が開発の中心であったが、鉱石層内における高さ方向での混合コークスの配置についても最適化検討を行った。そして鉱石層上部の還元率が低下する部分にコークスを積極的に混合することにより、鉱石層全体の平均還元率が上昇することを見出し、鉱石層上部にコークスを偏在させる装入方法を提案した⁷⁾。

また小塊コークスの高炉での使用量を増加させると、装入コークスの平均粒径低下および炉内反応での未消失による炉下部での低粒径化に伴う通気性悪化の可能性が考えられる。そのため小塊コークスの高炉での使用量については適正值があると考えられている。しかし小塊コークス使用量が高炉操業におよぼす影響については、実炉操業結果のデータ解析から適正值が検討された例はあるものの⁸⁾、詳細な検討はあまり行われていない。そこで筆者らは図2に示すような小塊コークスの高炉内における反応挙動解析に取り組んだ⁹⁾。その結果、小塊コークスの使用量が多く、小塊コークスが高炉内で反応消失できず粒径低下したコークスとして炉下部に残存する場合には、高炉下部の通気性が悪化することを明らかにし、小塊コークスの使用量には適正值が存在することを示した。

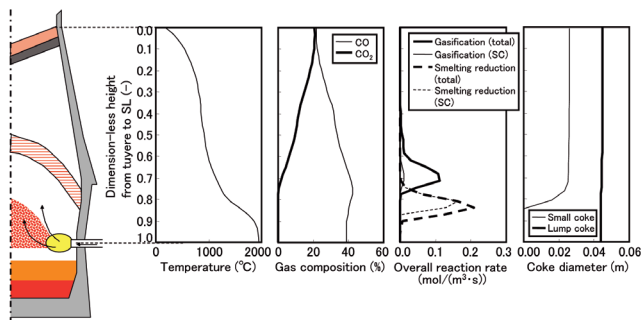


図2 高炉内における温度、ガス組成、総括反応速度、コークス粒径の計算結果

今回紹介した開発技術はいずれも実炉試験により一定の効果が得られている。開発した技術が実操業の改善に即座に役立てることは企業研究者の醍醐味であり、それを経験することができたことは研究開発を続ける中で大きな励みになった。しかし研究開発はスピードを求められ、実際には要求された開発スピードに追い付けなかった場面も多かった。これからは努力を重ね、原理原則をしっかりと捉え、できる限り要求に応えられるように研究開発を行っていききたいと思う。

3 今後の取り組みについて

これまで炉頂での装入操作だけではなく、微粉炭吹込み¹⁰⁾や水素系還元材吹込み¹¹⁾といった補助還元材吹込みに関する研究開発も行ってきたが、それぞれ独立した技術として研究開発を進めていた。しかし例えば、コークスを混合した鉱石層の還元ガスに水素を添加した場合、コークスが混合されていない鉱石層の場合よりも、水素添加による還元率の増加が大きいことがわかった¹²⁾。これは図3に示すように、コークスを混合した鉱石層での水素還元では、水素還元によって生成された水蒸気と鉱石層内に混合されたコークスとのカーボンガス化反応が発生し、再生成された水素により還元速度が促進されると推定されたが、いずれも反応が低温化する組み合わせであったため、反応促進効果がより顕著になったと考えられる。これは鉱石コークス混合装入といった炉頂での装入操作と、水素系還元材吹込みといった羽口からの補助還元材吹込みとの組み合わせにより、従来知見を上回る結果が得られる可能性があることを示す一例である。このように従来開発された技術に今後新たに開発する技術を融合させ、高炉操業の極限を追及するためには、高炉全体を対象として物事を考える必要があると思う。したがって今後は個々の独立した

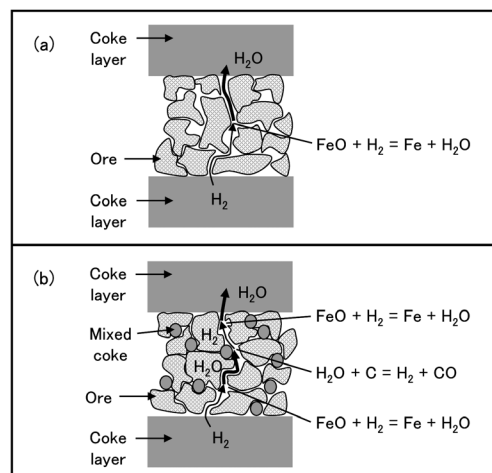


図3 (a) 鉱石層内、(b) 鉱石コークス混合層内における水素による還元挙動の概念図

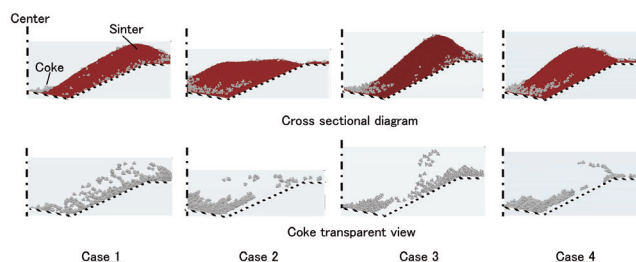


図4 表面形状および混合コークス分布におよぼす装入パターンの影響
(Case1：逆傾動かつ装入範囲が広範、Case2：順傾動かつ装入範囲が広範、Case3：逆傾動かつ装入範囲が狭小、Case4：順傾動かつ装入範囲が狭小)

技術としてではなく、常に高炉全体の変化を意識する広い視点を持って研究開発に取り組んでいきたいと考えている。

また従来ブラックボックスとして考えられてきた高炉内現象は、数学モデルの開発により次第に明らかになってきた経緯があり、数値解析の重要性は非常に高いと考えられる。近年では計算機能力の進歩と解析技術の向上により、高炉内現象をより詳細に再現可能な数値シミュレーションモデルが開発され、高炉内現象の解明だけではなく高炉の操業設計を行う有効なツールにもなっている。特に最近では離散要素法 (DEM) の活用が活発に行われている。DEMは全粒子の運動を追跡する手法であり、高炉内における荷下がり挙動や、炉頂での装入物の堆積挙動を精緻に再現できる手法として注目されているため、最近ではDEMを用いたモデルを開発し、装入物の分布設計に活用する取り組みも行っている (図4)¹³⁾。またこれまで主流だった数値流体力学 (CFD) による解析と、DEMによる解析をカップリングしたDEM-CFDシミュレーションが高炉プロセスの解析にも活用されている¹⁴⁾。高炉内は高温・高圧で直接観察が困難であり、さらに今後は低コークス比操業という条件のより厳しい操業が望まれている。したがってこのような数値解析の有用性は今後より一層向上すると考えられるため、高炉の操業設計への数値シミュレーションの活用についても取り組んでいきたいと考えている。

4 おわりに

本稿を執筆するにあたり、過去に取り組んできた研究開発業務を振り返ることができた。高炉は炉内現象がかなり解明されてきたとはいえ、まだまだ不明点が多く、研究開発においても理論より実践が先行してしまう場合があった。しかし原理原則に反した考え方では必ず失敗していたこともあり、原理原則の大切さを改めて認識できた。

さらにどうしても目の前の課題を解決する業務が中心となり、将来を見据えた研究開発ができていなかったことにも気付

かされた。社内では中堅と呼ばれる世代となり、目の前の課題だけではなく、もっと広い視野を持って研究開発をしていくように努めていかなければいけないと改めて考えさせられた。

また製鉄分野は研究会等を通じて大学の先生方や鉄鋼他社の研究者・技術者と議論する機会が比較的多いと思う。この世代になると必然的にそのような機会も増えてくるため、そのような場で高いレベルで議論し、将来の製鉄技術の発展に貢献できるように、今後も日々努力を続けていきたい。

参考文献

- 1) 内藤誠章, 武田幹治, 松井良行：鉄と鋼, 100 (2014), 2.
- 2) M.Isobe, T.Sugiyama and S.Inada：Proc. Int. Iron and Steel Cong., ISIJ, Tokyo, (1990), 439.
- 3) K.Sunahara, C.Kamijo and T.Inada：55th Ironmaking Conf. Proc., ISS, Warrendale, PA, (1996), 3.
- 4) Y.Kashihara, A.Murao, Y.Sawa, M.Sato and K.Yamamoto：30th Journees Siderurgiques Internationales, FFA, Paris, (2012), 5.4.
- 5) Y.Kashihara, A.Murao, M.Kuwabara, N.Ishiwata and M.Sato：Proc. 20th IAS Steel Conf., IAS, Argentina, (2014), 437, CD-ROM.
- 6) 柏原佑介, 岩井祐樹, 石渡夏生, 大山伸幸, 松野英寿, 堀越裕之, 山本耕司, 桑原稔：鉄と鋼, 102 (2016), 9.
- 7) Y.Kashihara, Y.Morikawa, T.Sato, N.Ishiwata and M.Sato：ISIJ Int., 55 (2015), 1165.
- 8) G.N.Logachov, S.N.Plshnograev, V.A.Gostenin, A.V.Chevychelov and V.P.Gridasov：Metallurgist, 56 (2012), 87.
- 9) Y.Kashihara, Y.Iwai, T.Sato, N.Ishiwata and M.Sato：ISIJ Int., 55 (2015), 1237.
- 10) R.Murai, Y.Kashihara, A.Murao and M.Sato：ISIJ Int., 56 (2016), 770.
- 11) Y.Kashihara, T.Sato, M.Sato, K.Takeda, M.Nagaki and S.Hasegawa：28th Journees Siderurgiques Internationales, FFA, Paris, (2007), 1.3.
- 12) Y.Kashihara, Y.Sawa and M.Sato：ISIJ Int., 52 (2012), 1979.
- 13) 照井光輝, 柏原佑介, 廣澤寿幸, 野内泰平：鉄と鋼, 103 (2017), 86.
- 14) S.Natsui, H.Nogami, S.Ueda, J.Kano, R.Inoue and T.Ariyama：ISIJ Int., 51 (2011), 41.

(2017年2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

| 埜上 洋

柏原氏と初めて会ったのは、石井プロジェクト（エネルギー半減・環境負荷ミニマムを目指した高炉の革新的製錬反応に関する研究プロジェクト）の活動の一環で、名古屋大学での研究会に参加した時であったと記憶しています。当時、柏原氏は桑原先生のご指導の下、炉内現象の多次元再現性とシミュレーションの計算効率の向上とを両立する高炉下部の動力学モデルの構築に取り組んでいました。当時、当方は八木教授の提唱した四流体モデルに基づく高炉シミュレータの開発・展開において、解像度の向上および要素モデルの詳細化を進めていましたが、対象や目的が同じでも取り組みの方法は数多くあるのだと再認識したことを覚えています。

その後、柏原氏は日本鋼管（株）に入社され、現在に至る取り組みは「躍動」の本文に記されています。紹介された数多くの取り組みのうち、鉬石層への小塊コークスの混合に関する取り組みでは、事前の混合の調整では想定した混合状態を実現することが困難であることを見いだすや、バンカーへの分割装入とその制御により排出・装入時に混合を促進して目的の混合状態を達するという、着目点・発想を転換した手法を編み出しています。これには当方の研究分野の一つである伝熱工学において、しばしば挿話として紹介される「引き湯の技術」（温

泉で、風呂にお湯を引いていた源泉の温度が下がってしまった際に、源泉側で温度の低い水を加えて送ること、風呂に供給するお湯の温度を上げたという逸話）を思い出さずにはいられませんでした。このような発想の転換は、後で聞けば「なるほど」と思うだけですが、そのためには十分な経験と洞察に基づく現象観察や考察が必要で、柏原氏が日頃から真摯にかつ幅広い視点で日頃の業務に取り組んでいる事が拝察されます。

柏原氏の入社後、同じ部署への若手の配属が限られた時期があり、グループ内で暫く若手としての立場が続いていたと聞き及んでいましたが、近年はより若い技術者の配属も進んでいる様で、これまでの業務に加えて後進の指導の役割も大きくなり、柏原氏もますます多忙になっていくものと思われます。しかし、その状況の中でも、俯瞰的な視点から柏原氏の目指す様々な操業操作の操業改善に対する相乗効果の発現に向けた取り組みを進めてもらいたいと思います。また、是非これまでも増して産学の議論の場に参加していただき、氏の持つ幅広くまた深い視点で産学連携の相乗効果を発現させ、これまで把握されていなかった原理原則の発見など、製鉄技術の発展へ貢献されることを期待しています。

新日鐵住金（株） 技術開発本部 プロセス研究所 製鉄研究部 上席主幹研究員

| 折本 隆

このお話を戴いたとき、柏原さんとは講演大会やセミナーで面識がある程度なので正直引き受けてよいか戸惑いましたが、高炉プロセスの技術レベルを極限まで向上させたいという同じ目標を持つものとして、少しだけ経験が長いということで2,3述べさせて戴きます。

高炉の技術開発課題として、低還元材比・低コークス比操業、劣質資源多量使用、生産弾力性拡大等がありますが、取り分け柏原さんが取り組まれてきた炉内反応の高効率化による低還元材比操業技術の確立は、CO₂削減の観点から喫緊の課題です。低還元材比操業にはガス利用率を向上させる必要があり、そのためには装入物分布、原燃料条件、羽口先条件などについて検討し、通気性を確保しつつ還元効率を向上していく必要があります。このとき、企業研究者としては、各施策の効果のオーダー感を常に意識し、いわゆる「攻め処」を掴んでおくことが大事です。オフライン試験は高炉内条件とはガス流速等が大きく異なるため、モデル化により実炉条件での検討は欠かせません。この点、柏原さんは原理原則に則った数学モデルにより実炉での効果を定量的に示しています。また、原理原則から考えてどこまで還元材比を下げることができるのか（＝還元材比の極限值）を知っ

ておくことが大切であると考えます。極限値を達成するためにはどのような条件が必要か、あるいは現状の条件ではどこまでが可能なかを知ること、現状から改善の余地が大きい施策や必要な設備等、見えてくるものがあると思います。

また、極限を追求するには高炉全体を対象として考える必要がある、ということは全く同感です。研究者はともすると視野が狭くなりがちです。本文で述べられているように、個々の技術の相乗効果が得られるケースもありますが、逆に個々の最適ポイントとして提示した条件が、操業自由度が小さくなる極限操業においては全てを成り立たせることが出来ないこともあり得ます。こうしたことは、正に高炉全体を考えなければ分からないことです。

以上のことは当たり前のことですが、実際に行うとなるとなかなか難しく、私も常に意識していますが日々もがいています。柏原さんは、装入物分布から炉内反応、水素系還元材吹込みと、高炉を幅広く検討しており、また、実験とシミュレーションの両方からアプローチできる数少ない研究者の一人だと思います。ぜひ高炉極限操業を実現すべく、今後のさらなるご活躍を期待します。