



若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

資源循環型製鉄プロセスの実現に向けて

Process Approach for Sustainable Steelmaking Technology

栗内祐輝

Yuki Kuwauchi

新日鐵住金 (株) 技術開発本部
プロセス研究所 プロセス技術部

熱プロセス技術応用開発室 主任研究員

1 背景—RHFによる 資源循環型製鉄プロセスの実現

昨今の良質鉱石の枯渇と原燃料価格の高騰を受け、我が国の鉄鋼業においては、劣質資源の有効活用と副生物の循環利用をさらに推進していくことが求められている。本稿では、筆者の目指す資源循環型製鉄プロセスの確立に向け、小規模だが重要な役割を果たす設備となりうる RHF (回転炉床式還元炉) を用いたリサイクルプロセス (Fig.1) について紹介する。

新日鐵住金グループでは、国内で計8基の RHF を稼働させ、製鉄所から副生する細粒鉄源 (製鉄ダスト) のリサイクルを実施している^{2,3)}。得られた製品還元鉄と粗酸化亜鉛はそれぞれ製鉄所および亜鉛製錬所で原料として循環利用され、鉄鉱石・亜鉛鉱石の消費削減に貢献している。RHF が注目されている要因の一つとして、フリーボードが大きいという炉体構造上の特徴から使用可能な原料種の制約が少ないことが挙げられる。このため、高炉では使用が困難な高亜鉛細粒鉄源等の劣質原料のリサイクルが可能であり、資源循環型製鉄所確立のために不可欠なプロセスとなっている。今後は、ダスト処理だけでなく様々な副生物を資源化していくことが期待されている。

筆者は2003年から7年間、当社広畑製鉄所の RHF プロセスの技術開発・操業改善に取り組んだ。広畑製鉄所では、

RHF で製造する還元鉄を SMP 炉と呼ばれる冷鉄源溶解炉等の原料として利用しているが、溶解炉の還元能力は限られているため、供給する還元鉄は RHF で十分に高い金属化率まで還元しておかなければならない。RHF の高生産性を維持しつつ、還元反応をいかに促進させるか—この相矛盾する命題に対し、ラボ・実機実験を繰り返して課題解決に取り組み、現場ベースでのプロセス開発・操業改善を進めた。この結果、現在までに広畑製鉄所構内で4基の RHF が稼働し、年間約60万トンの含鉄副生物のリサイクルが可能な体制を構築するに至っている。

2 課題—バラツキに埋もれる新技術

拡張を続けてきた広畑 RHF であるが、今後は製鉄ダストだけでなく様々な廃棄物系原料を活用しうる資源循環型製鉄プロセスとして発展させることが望まれており、さらなる反応促進・劣質原料使用技術の開発が不可欠である。しかし、副生物を再利用するプロセスの宿命として RHF も原料バラツキの影響を大きく受けるため、ラボで見出した改善手法が実機実験の段階でバラツキに埋もれ効果が検証できないことが多くなってきている。バラツキに惑わされず、着実に新技術の検証を進められる手法が求められているのである。

技術検証を困難にしている大きな要因として、RHF での

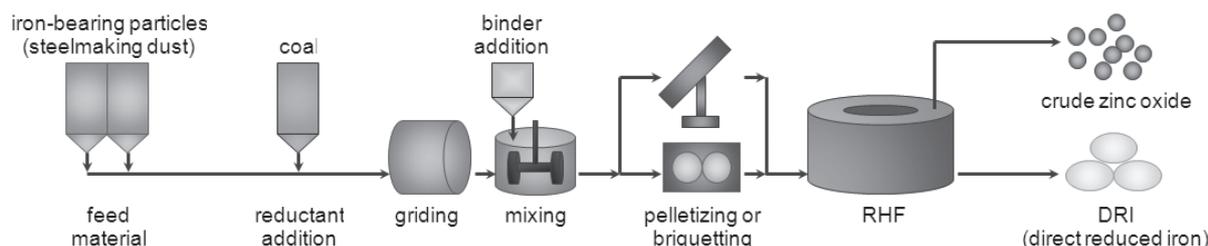


Fig.1 RHF process

炭材内装型塊成化物の反応機構が複雑であることが挙げられる。塊成化物内部では内装した還元材によって酸化鉄の還元が自己完結的に進行するうえ、高炉と比べて炉温の高いRHFでは反応速度も数十倍に達する^{4,5)}。その結果、塊成化物内部に大きな温度・内圧勾配が形成され、反応挙動に影響をおよぼすようになる。この複雑な反応状況にバラツキが加わると、実験や操業観察だけでは現象を見極めることが困難になってくる。

そこで筆者は、反応特性の本質的な理解のためには数値シミュレーションが有効であると考え、計算機上でRHF内ペレットの還元モデルを構築することを志向した。しかし、それまで製造現場に近いところでの開発経験しかなく、モデル化に取り組むにあたって、まず伝熱・物質移動・化学反応等の理論を習得する必要性を痛感した。一から理論を復習するからには環境を変えて集中したいという筆者の思いもあり、様々な方に相談させて頂いた結果、伝統的に金属製錬研究の盛んなカナダ・トロント大学に留学し、修士研究のテーマとしてRHF内ペレットの還元反応のモデリングに取り組む機会を得ることができた。

3 反応の本質的理解へ —ペレット還元モデルの構築⁶⁾

モデル化に際し、塊成化物は完全な球形のペレットであると仮定して内部を仮想的な薄皮層に分割した (Fig.2)。ペレットがRHF炉内に装入されると、まず輻射によって最表層が加熱され、その熱がペレット内部を中心方向へ伝導していく。ある層の温度が一定の必要温度に達すると当該層からガス成分の揮発や還元反応が開始され、反応で生成したガスはペレット内部を外に向かって移動し最終的には炉内へ放出される。

式 (1) ~ (9) に本モデルの支配方程式と化学反応式を示す。

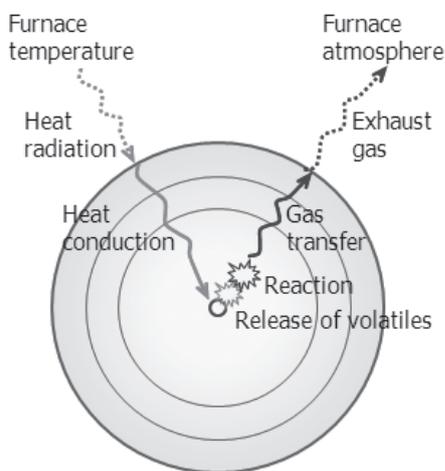
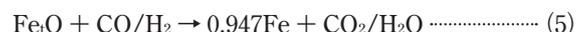
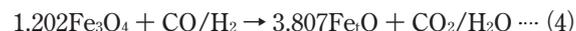


Fig.2 Schematic view of pellet model

式 (1) はペレット内伝導伝熱を表すFourier式であり、式中にペレット内気孔率の関数で表される有効熱伝導率 λ_{eff} を導入することで、急速加熱による内部温度の勾配を表現した。次に、ペレット内で起こる反応として、添加した石炭等からの揮発成分の放出、酸化鉄・酸化亜鉛の還元、炭材のガス化をモデルに取り込んだ (式 (2) ~ (7))。式 (7) のカーボンのガス化が大きな吸熱反応であるため、還元反応に必要なCOやH₂を発生させるのに高い温度が必要となる。最後に、ペレット気孔内部のガス移動は式 (8)、(9) を用いて表した。濃度勾配によるFick式に加え、圧力勾配による修正Hagen-Poiseuille式を用いることで、急速加熱するRHFに特徴的なペレット内部の圧力勾配によって駆動されるガス流れを表現した。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \Delta Q \dots\dots\dots (1)$$



$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D_{eff} \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{1}{4\pi r^2 \phi} \frac{\partial G}{\partial r} + \Delta R \dots\dots\dots (8)$$

$$G = \left(\frac{\pi}{128} \frac{N_n d_c^4 \bar{P}}{\mu} \right) \frac{\partial P_r}{\partial r} \dots\dots\dots (9)$$

$\phi 30\text{mm}$ のペレットの還元反応をモデルで再現した例を Fig.3,4 に示す。Fig.3は還元中のペレット各部の温度推移を示しており、径方向に大きな温度勾配が存在することが判る。この結果から、反応の進行にともなう気孔率の増大でペレット内部の熱伝導率が低下し、還元反応が内部伝熱律速となっていることが理解できる。また、ペレット外縁近傍の内圧の推移を Fig.4 に示す。ペレット内圧は実測が困難であるが、本モデルを用いればその挙動を推測することが可能となる。Fig.4から、内部の圧力は昇温開始直後に急上昇しており、反応初期にガスの揮発反応が急速に進行することを示唆している。

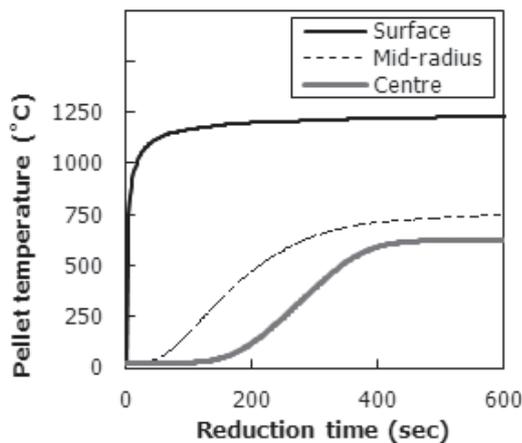


Fig.3 Calculated temperature in pellet

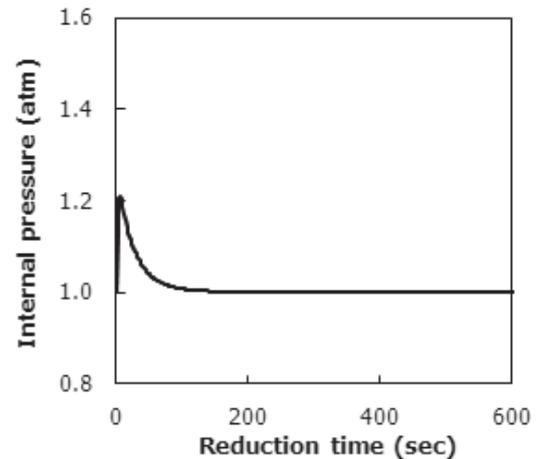


Fig.4 Calculated internal pressure in pellet

これらの計算の結果から、RHF内還元反応におよぼす原料中の揮発成分やペレット気孔率の影響を定量的に把握することが可能となった。例えば、ペレット内部の熱伝達を促進させるためには、極力気孔率を減らしてペレット内の空気層による熱抵抗を緩和するのが望ましい⁷⁾。しかし同時に、緻密にしすぎると、反応で生じたガスによる内圧上昇によってRHF炉内でペレットが爆裂する可能性もある。このような場合、今回構築したモデルを用いることで、爆裂を回避しつつ伝熱を最大化するペレット内部の充填度合いが判り、新規原料の使用を開始する際の指針とできる。今後は、ラボ実験・実操業解析に加えてシミュレーションによって得られる知見も駆使し、RHFプロセスによる資源循環をさらに促進すべく技術開発を進めていきたい。

4 資源循環型製鉄プロセスの実現に向けて—研究者としての意気込み

研究者としての経験はまだ1年にも満たない筆者であるが、今後プロセス開発を進めていくにあたって重要と感じていることを3点記して、本稿を締めくくりたい。

1) 原理・原則：まず、技術的な基盤を自分のなかで確立させること。どんな複雑なプロセスでも基本は要素技術の組み合わせであり、原理を理解できておれば恐れることはないと思う。

2) 議論・発表：多くの専門家とディスカッションすること。筆者はトロント大学在学中に文化的・学術的に様々な背景の人々と議論する機会を得ることができ、自分自身の技術力向上につながったと確信している。また、積極的に発表することで、今やよきライバルとなっている新興国も巻き込みながら、この分野でリーダーシップを取っていくことができると考える。

3) 現場・現物：最後は、実プロセスへの適用である。実験室レベルで得られたよい結果が、実機でもうまくいくとは限らない。理論と実機の溝が生じる原因を追究して新技術を確実に具現化していくこと—これがプロセス開発の最も重要な点であると認識している。

上記3つの柱をもとに、今後とも資源循環型製鉄プロセスの開発に貢献していきたいと考えている。この先、国内のみならず世界中でリサイクルプロセスへの需要が高まると予想されるが、これまで培ってきた知見を生かし、プロセスの世界展開を率先して進められれば本望である。リサイクル関連のプロセスはしばしば「静脈系プロセス」と呼ばれるが、静脈系の開発が製鉄プロセス開発のメインストリームとなる日を信じて、今後とも全力を尽くしていきたい。

参考文献

- 1) T.Harada, O.Tsuge, I.Kobayashi, H.Tanaka and H.Uemura : Kobelco Technology Review, 26 (2005) , 92.
- 2) 織田博史, 茨城哲治, 安部洋一: 新日鉄技報, 384 (2006) , 134.
- 3) 井口雅夫, 山崎強, 松本和孝: 新日鉄技報, 394 (2012) , 98.
- 4) J.Moon and V.Sahajwalla : Metall. Mater. Trans B, 37B (2006) , 215.
- 5) S.Ueda, K.Yanagiya, K.Watanabe, T.Murakami, R.Inoue and T.Ariyama : ISIJ Int., 49 (2009) , 827.
- 6) Y.Kuwauchi and M.Barati : ISIJ Int., 53 (2013) , in press.
- 7) W.K.Lu and D.F.Huang : Miner. Proc. Extr. Metall. Rev., 24 (2003) , 293.

(2013年4月23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 金属フロンティア工学専攻 金属プロセス工学講座 教授

長坂 徹也

大変僥倖ながら、葉内祐輝さんの「躍動」に対してコメントさせていただきます。葉内さんの存在は、彼の師匠である東大・工学系研究科教授で、化学工学会やLCA学会の重鎮でもある平尾雅彦先生を介してでした。ご本人に初めてお目にかかったのは、海外留学先に対する意見を求められ、東京駅の喫茶店で落ち合った時ではなかったかと思えます。その後2010年から2年間、カナダ・トロント大学のMansoor Barati先生の研究室に滞在され、主に本稿で紹介されているRHF法における反応モデル解析を手掛けられました。Barati先生とは、約10年ほど前にカナダ・マクマスター大学のKenneth Coley教授の所でお目にかかったように記憶しています。2012年の5月には、米国鉄鋼協会の定期講演大会がジョージア州・アトランタで開催され、そこで葉内さんと再会することができ、葉内さんの2年間の研究成果を拝聴する機会にも恵まれました。筆者の偏見と米国人の友人（鉄鋼マン）によれば、日本の鉄鋼メーカーから米国に留学された方は、おしなべて「文法的には完璧でも聞くのが疲れる英語」を話される方が多いようですが、葉内さんは大変流暢な「らしい」英語を話され、感銘

を受けながらご講演を聞かせて頂きました。ご帰国後は、筆者が最近鉄鋼協会関係の仕事でお世話になっている新日鐵住金の村上英樹部長を介して、トロント大学でのご研究の成果を活用させて頂くべく、2013年春に発足した製鋼ダスト処理に関する研究会（Ⅱ型）のメンバーに加わって頂きました。これから本格的なお付き合いが始まると思っております。ところで、上記の文中に暗示しましたが、葉内さんから発生する人的ネットワークを描いていくと、近接グループに各界のコアパーソンが並ぶことに気がきます。友達の友達、またその友達、という具合に、人の繋がりを辿って行って、他国の任意の人に到達する仲介者人数は約8人位と言われています。ペーコン数等で知られる人的ネットワークの構造は、最近ではFacebook等で具体されています。このネットワーク構造は一概ではなく、中にはやたらと近接者数（ノードの数）が多い、大規模なハブになっている方がおられます。上記でおわかりのように、葉内さんは既にその役割を担っておられると感じております。まさに「躍動」に相応しい、国際派的ネットワークのハブに相応しい若手技術者です。

(株) 神戸製鋼所 新鉄源本部開発部 担当部長

田中 英年

鉄鋼協会から突然の執筆依頼を受けましたが、私自身は葉内氏と直接の面識も無くどうしたものかと思案していたところ、事務局から送られてきた葉内氏原稿に「広畑RHF」の文字を見つけ、心の中で騒ぐものを感じて今回のコメントをお引き受け致しました。

私事で恐縮ですが、私は1995年からRHFを用いた還元鉄製造技術であるFASTMET開発に従事しており、3年にわたる加古川での実験の後、原料を鉄鉱石からダストに変えて、商業1号機を2000年に当時の新日鐵広畑殿に導入させていただいた思い出がございます。その当時、炭材内装の何たるかも知らず、FASTMETの実用化に奔走しておりましたが、その後この技術の奥深さに魅せられドクターを取らせていただきました。その点では葉内氏の経歴と通じるところがあり、また広畑商業機を4号機まで発展させていただいたお礼もかねて、エールを送りたいと思った次第です。

葉内氏が感じておられるバラツキには原料（成分・粒度）やプロセス（ペレット粒径・炭材量・受熱量）に起因する様々なものがあります。これに対処するために均一相を扱

うシミュレーションに取り組まれたことは一見逆行するようにも思えますが、私には非常に的を射た行動だと思いました。

「研究者としての意気込み」の欄で述べられているように、ポイントは原理・原則であり、葉内氏のおっしゃる通りシミュレーション結果はそれを示唆してくれます。この方向性を信じてバラツキのある実操業に対処することで、現場での試行錯誤が可能となります。そしてその時に役に立つのは自分だけの考えではなく、多くの方々のアドバイスであり、時には耳障りの悪い批判であったりします。葉内氏のおっしゃる3つの柱、すなわち1) 原理・原則、2) 現物・現場、3) 議論・発表（あえて順番を入れ替えました）は、事業活動を円滑に進める手法のPDCAサイクルに通じるものがあると思えました。

酸化鉄と炭材の近接配置による反応促進効果が期待できる炭材内装技術は、最近の高炉装入物への応用に見られるように、まだまだ多くの可能性を秘めています。ダスト原料に限らず鉄鉱石にまでその適用範囲を広げて、あえて「動脈プロセス」に打って出られんことを願ってやみません。