

技術解説

省資源・リサイクル技術開発の進展

Development for Saving Natural Resources and Material Recycling

芳 我 徹 三*
Tetsuzo HAGA加 藤 健 次
Kenji KATOH茨 城 哲 治
Tetsuharu IBARAKI

1. はじめに

本稿では、鉄鋼製造プロセスにおける有用資源の枯渇状況を踏まえ、劣質資源の有用資源化技術として、新日本製鐵におけるコークス炉乾燥炭操業による非微粘結炭多量使用技術 (DAPS, SCOPE)、褐鉄鉱系鉱石の選択造粒技術、回転炉床法 (RHF) によるダスト再資源化技術を取り上げ、基礎研究から実生産プロセス実現に至る技術的障害とその克服過程について記述し将来展望を行う。

これらの技術開発の基礎研究段階での成功への突破口は、いずれもそれぞれの劣質資源が持つ基礎特性を詳細かつ徹底的に調査し、その特性を応用・制御するための加工プロセスを考案することにより改質を可能としたことであり、これにより有用資源化への道が切り拓かれた。また、プロセス要素技術的には、粒度分布をもつ固体資源の分級・造粒・塊成化技術、さらには高温での処理技術に特徴があり、劣質資源にこれらのプロセスを適用する際の設備技術的な困難をも克服することで、安定的な製造プロセスを完成させている。それぞれの技術の詳細は既発表論文を参照して頂くこととし、本稿では、開発者の視点から技術の突破口となった着想に焦点を当てて解説を試みた。

2. コークス製造用石炭資源拡大のための乾燥炭技術

高炉用コークスの原料として使用可能な石炭は粘結炭が中心であるが、世界の石炭資源のうち7割以上は粘結性の低い劣質な石炭であり、良質な石炭は枯渇傾向である。そこで、コークス製造用の原料として、劣質な石炭を多量使用するためのコークス強度向上技術の開発が重要な課題である。わが国では石炭事前処理プロセスの開発が盛んに行われており、世界でも類をみない石炭乾燥技術が実機化されている。

最初に開発された石炭乾燥技術は、CMC (Coal Moisture Control) プロセスである。コークス製造用に使用する石炭は海外から輸入されており、水分を約10%程度含んでい

る。CMCプロセスの発想は、石炭の水分を低下させることにより、コークス炉に装入する際の石炭の嵩密度を上昇させて、コークス強度を向上させるものである。具体的には、回転式の加熱機を用いて石炭の水分を約5~6%の範囲に乾燥する。CMCプロセスは1983年に新日本製鐵大分製鐵所で第1号機が稼働開始された¹⁾。理論的には、石炭水分を5%レベルよりも低下させた方が石炭の装入密度が上昇するので、コークス強度は向上する。しかし、石炭水分を5%未満まで乾燥すると、石炭を乾燥機からコークス炉まで輸送する途中のベルトコンベアーなどやコークス炉周辺での発塵量が大幅に増加するため、コークス炉の安定操業が不可能となる。

そこで、石炭水分をCMCプロセスよりも低下させた条件で発塵問題を解決するとともに、コークス強度を更に向上させる技術が研究された。石炭乾燥時の発塵量増加のメカニズムを調べた結果、水分が高い場合は石炭中の粗粒炭に微粉炭が付着しており、水を結合材として擬似粒子を形成するため、発塵量は少ないことがわかった。

石炭を水分5%未満まで乾燥すると、擬似粒子が崩壊して微粉炭の単粒子化が起こるために発塵量が増加する。このため、石炭の発塵量を増加させないためには、石炭水分を約2%レベルまで乾燥して石炭の擬似粒子を完全に崩壊させた後に、微粉炭を分離して塊成化する必要があることがわかった。さらに、石炭に含まれる微細組織成分と石炭粒度の関係について研究が行われた。石炭の微細組織成分のうち、粘結性の高いビトリニットは柔らかく、粉碎されやすい特性を有している。顕微鏡を用いて石炭の微細組織を調べた結果、微粉炭中には粘結性が高いビトリニットが濃縮されていることがわかった。そこで、微粉炭を塊成化した場合の粘結性を調べた結果、微粉炭を塊成化して嵩密度を上昇させることにより、図1に示すように粘結性が大幅に向上することがわかった²⁾。

これらの基礎研究成果を基に、微粉炭を加圧成型して塊成化することにより微粉炭の粘結性を向上させてコークス強度を向上させるとともに、乾燥炭の発塵を抑制する実機

* 設備・保全技術センター プラントエンジニアリング部 部長 工博 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

プロセスの開発に取り組んだ。このプロセスを確立するためには、多量の石炭を乾燥しながら微粉炭を分級する装置が必要である。そこで、流動層による乾燥分級設備の開発に取り組んだ結果、世界で初めて図2に示す約6 800t/d規模の大型装置によりコークス原料炭を効率良く乾燥・分級する設備が開発された。

このプロセスはDAPS (Dry-cleaned and Agglomerated Precompaction System) と命名され、1992年に新日本製鐵大分製鐵所で実機化された^{2,3)}。コークス強度が同一の条件で非微粘結炭の使用比率を比べると、DAPS プロセスは、湿炭プロセスに対して30%、CMCプロセスに対して20%多く使用できる優位性がある。

以上のように、CMC プロセスおよびDAPS プロセスは石炭資源の有効利用技術を開発することを目的として、石炭粒子の性状およびハンドリング特性を改善しながらコークス品質を向上させる技術開発が行われ、実機化された石炭乾燥設備である。

CMC およびDAPS の開発例と全く違う視点から、石炭の粘結性を改善することより、コークス強度を向上させる技術が研究された。石炭の分子構造は凝集構造であることが知られている。そこで、石炭を急速加熱処理することによって石炭の凝集構造を緩和させて粘結性を向上させるこ

とにより、コークス強度を向上させることが可能ではないのか というアイデアが提案され、この考えに基づいた革新的なプロセス開発が行われた。このプロセスは、スコープ21 (SCOPE21: Super Coke Oven for Productivity and Environmental enhancement toward the 21st century) と呼ばれており、1994～2003年に国家プロジェクトとして、研究開発が行われた⁴⁾。

初期の基盤研究段階では、石炭の急速加熱処理によるコークス強度向上効果の研究が行われた。はじめは石炭処理量200g規模の実験室実験からスタートし、この際に使用した実験装置の規模は直径25mm、高さ1.8mの気流塔加熱機を模擬した実験室試験装置である。この実験装置を用いて試験を行った結果、石炭を約330～380℃の温度域まで約3 000℃/minの昇温速度で急速に加熱処理することにより、石炭の粘結性が向上して、コークス強度が向上することが発見された⁵⁾。石炭の急速加熱により粘結性を向上させる技術は、世界に類を見ない全く新しいコンセプトである。研究開発においては、実機化を視野に入れたスケールアップが最大の難関であった。気流塔加熱機が大きくなると、内部の熱伝導やガス流が変わる。急速加熱の際に均一な石炭温度・挙動を制御するために、実験室試験で年間100回を超える地道な実験を繰り返しながら、数値シミュレーションを行い、最適値を絞り込んでいった⁶⁾。

その後、実機開発のために、新日本製鐵名古屋製鐵所構内に石炭処理量20t/h規模のパイロットプラントが建設され、2002年3月から2003年3月までの期間に操業試験が行われた。この試験により、石炭を急速加熱処理することで、非微粘結炭を50%レベルまで多量に使用しても高強度のコークスを製造できることが確認された⁷⁾。その後、図3に示すようなSCOPE21プロセスの第1号機の新コークス炉が新日本製鐵大分製鐵所に建設され、2008年2月に稼働開始した⁸⁾。将来的に、わが国で開発したSCOPE21プロセスによる新しいコークス炉が順次建設され、鉄鋼業の発展に対して貢献することが大いに期待されている。

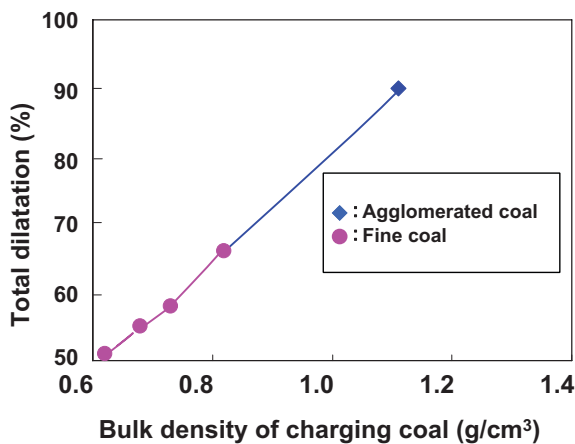


図1 全膨張率と石炭の嵩密度の関係

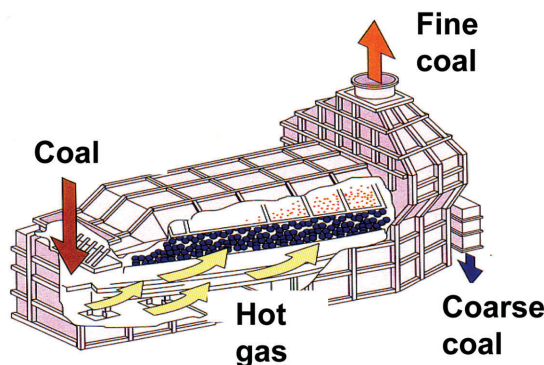


図2 流動層乾燥分級機の概要



図3 大分製鐵所第5コークス炉の外観

3. 難処理性褐鉄鉱系鉱石の選択造粒技術

世界の高品位鉄鉱石資源が枯渇へと向かう中で、埋蔵量の多い褐鉄鉱系鉱石を有効に利用することが鉄鋼業の重要な課題である。褐鉄鉱系鉱石とは、不純物であるアルミナあるいは結晶水を多く含有する粉主体の鉄鉱石であり、鉄鉱石焼結工程（以下焼結工程）における生産性、品質およびエネルギー原単位を悪化させる難処理性鉄鉱石である。

選択造粒技術は、図4に示すように焼結工程で使用する複数の鉄鉱石の中から褐鉄鉱系鉱石を選択し、その微粉のみを造粒して核鉱石化するプロセスである。これにより、焼結工程における液相生成反応へのアルミナの悪影響を解消して、褐鉄鉱系鉱石の有効利用を可能とするものである⁸⁾。

“選択造粒”はプロセスを表現する名称ではあるが、単なる造粒強化技術ではなく、本プロセスにより、褐鉄鉱系鉱石の難処理性の最大要因である液相生成反応を改善することを特徴としている。

褐鉄鉱系鉱石の難処理性には大きく2つの要因がある。まず第1に、褐鉄鉱系鉱石は微粉部分のアルミナ含有量が高く、微粉部分で液相を生成して焼結体を形成するためには、加熱温度を上昇させる必要がある⁹⁾。さらに褐鉄鉱系鉱石の粗粒部分には、加熱過程において結晶水の分解による内部亀裂が発生し、焼結体の強度を低下させる。これらは、いずれも高温領域で生じる課題であり、焼結反応を抜本的に改善する手段を開発する必要がある。

褐鉄鉱系鉱石と赤鉄鉱の粒度区分毎のアルミナ含有量および結晶水含有量を図5に示す。褐鉄鉱系鉱石は、赤鉄鉱に比べてどちらの不純物も含有量が多い。特に、高温で液相を生成する微粉部分では、褐鉄鉱系鉱石の豪州A、豪州Bともに粘土系脈石が多く混入しており、赤鉄鉱よりアルミナが高い。この微粉部分の液相生成反応の差を評価するために、赤外線加熱炉を用いた実験室溶融試験を行った。図6は、赤外線加熱炉を用いて、褐鉄鉱系鉱石と赤鉄鉱にそれぞれ20%の石灰石を加えて加熱溶融した場合の溶融状況の観察結果である。アルミナ含有量が3.2%と高い褐

鉄鉱系鉱石は、アルミナ含有量0.5%の赤鉄鉱と比較して、液相生成温度が約100℃も高く、また、生成する液相の流動性が悪い現象が確認できた¹⁰⁾。これにより、褐鉄鉱系鉱石を原料とした焼結鉱は、赤鉄鉱を原料とした焼結鉱に比べ、結合の不十分な焼結体すなわち脆弱な焼結鉱となりやすいことが想定された。選択造粒技術の発想はこの褐鉄鉱系鉱石の微粉部分に存在するアルミナ成分を造粒して封じ込めることは出来ないだろうか、というのが出発点である。

褐鉄鉱系鉱石の微粉を造粒するには、まず微粉を分離する必要がある。本来、液相生成反応に関与しているのは0.5mm以下程度の極めて微粉の部分であるが、一方で、この部分には粘土系脈石が多量に存在しており、この粒度での分級は、毎時数百トンを扱う焼結プロセスでは実現が困難であった。この分級については数多くの試験が行われたが、結果として3mm分級としてプロセスが実現したのは、以下の理由による。即ち、目的はアルミナの封じ込めであって0.5mmの分級ではないこと、そして、0.5mmから3mm部分を造粒物の核として使えば、0.5mm以下のアルミナの濃縮部分を閉じ込めることが可能であることに行

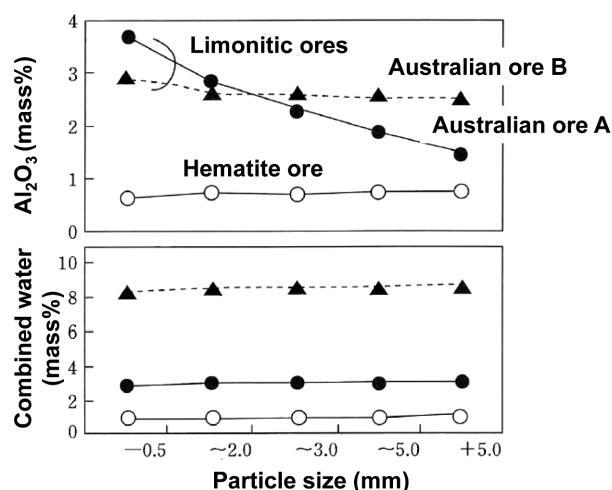


図5 各種鉄鉱石の粒度毎不純物含有量比較

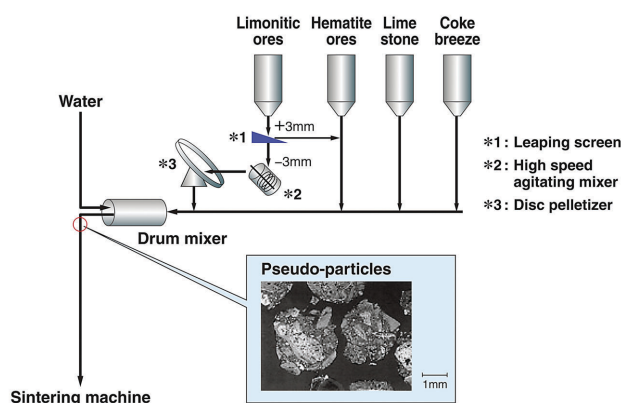


図4 選択造粒プロセスと造粒状況

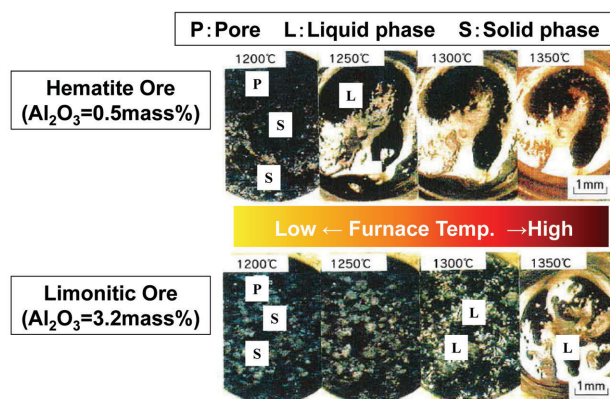


図6 赤外線加熱炉による赤鉄鉱および褐鉄鉱石の溶融観察状況

き着いたからである。3 mm分級であれば、ウレタン網を用いた“波状跳ね上げ式スクリーン（リーピングスクリーン）”を用いることで、粘土質の鉱石を目詰まりさせることなく篩い分けることが出来た。

3 mm以下に篩分けられた褐鉄鉱系鉱石は、微粉部分に可塑性のある粘土系脈石を含有しているため、加水・混練することにより、バインダーなしでも容易に粗粒化が可能であり、さらにペレタイジングで2～5 mm粒径の“核鉱石化”することが出来る。これは、アルミナ成分を封じ込めた強固な造粒物である（以下“選択造粒物”と呼ぶ）。この選択造粒物を、他の赤鉄鉱などのアルミナの低い鉱石等と混合・造粒して形成される“選択造粒物を核とした擬似粒子”と、通常の造粒プロセスで形成された擬似粒子の比較を図7に模式的に示す。

また、前者の擬似粒子をEPMAで観察した結果を図8に示す。選択造粒物中の高アルミナ付着粉層の周りに、低アルミナで石灰石と粉コークス濃度の高い付着粉層が形成された“2層構造の擬似粒子”となっている。

この“2層構造の擬似粒子”は、焼結反応時の液相生成において、次の効果を発現する。すなわち、粉コークス濃度が上昇することによって効果的な昇温が行われると同時に

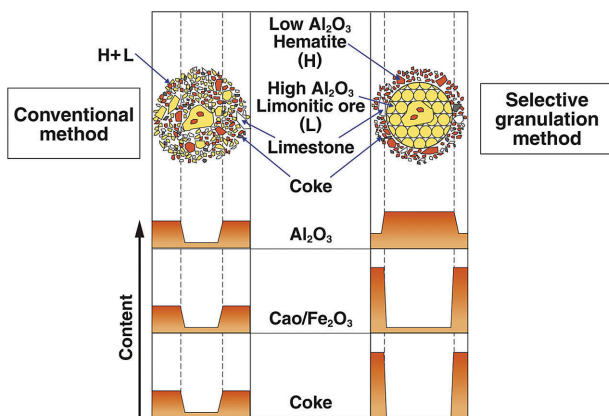


図7 従来の造粒法と選択造粒法の造粒物の比較

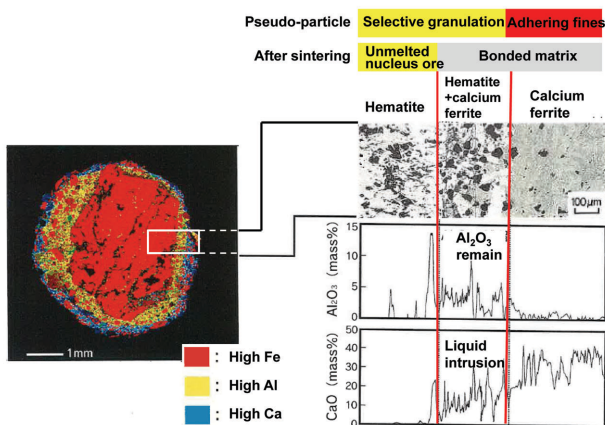


図8 選択造粒法による2層構造の擬似粒子と焼結反応後の組織

に、付着微粉のアルミナ濃度の低下と石灰石濃度の上昇（液相生成温度の低下）によって、従来プロセスに比べて、より低温で流動性の良い多量の液相が生成され、鉱石粒子間や鉱石粒子内の亀裂に浸透して強固な架橋を形成し、焼結体の強度を向上させることが出来る¹¹⁾。

同じく図8には、この“2層構造の擬似粒子”を昇温したときの選択造粒物と、その周りの液相との反応の様子を観察したものを示す。もともとの擬似粒子構造として、内側が選択造粒物中の高アルミナ微粉鉄鉱石部、外側が低アルミナ付着微粉部という“2層構造”であった部分が、焼結組織としても、内側がヘマタイト+カルシウム・フェライト、外側がカルシウム・フェライト組織と、明確に区分することが出来る。アルミナ成分は内側の選択造粒物の表面にとどまっており、外側の液相に悪影響を与えていない。また、CaO分析値で液相を代表すると、液相は外側から内側の選択造粒物に浸透し、焼結体としての結合強度を保っている様子がわかる。

以上のような、褐鉄鉱系鉱石の基礎特性の徹底的な調査から“アルミナ封じ込め”の着想、そして基礎研究からプロセス設計を経て実設備建設に至ったが、大量処理が前提の焼結プロセスにおいて、どこまでマイクロな造粒制御が実現できるかがもう一つの成功の鍵であった。これらの課題を解決し、最終的には無人での連続造粒設備を開発することが出来たわけであるが、実設備への適用結果は他の文献を参照されたい¹²⁾。

この選択造粒技術の開発によって、難処理性ゆえに利用価値の低かった褐鉄鉱系鉄鉱石を、有用資源として利用する技術が確立されたが、世界で採掘される鉄鉱石資源は刻々と変化しており、より難処理性の高い資源の有用資源化技術を開発して行く必要がある。

4. 回転炉床式ダストリサイクル設備の研究開発

鉄鋼生産プロセスから発生するダストやスケールは、酸化鉄、炭素、その他の成分から成り、その発生量も多い。従って、環境問題、省資源・省エネルギーへの期待から製鉄ダストリサイクルへの要望が高まっていた。しかし、従来技術では総発生量の80～90%しか再使用できないという問題があった。その主な理由は、製鉄ダスト類には亜鉛、鉛、アルカリ金属等の高温揮発性元素が含まれているためであった。そこで、経済的なダスト処理を実施するために、新日本製鐵では、高エネルギー効率で処理コストの安価なダストの脱亜鉛プロセスの開発が行われた。

ダスト類の脱亜鉛処理は、酸化亜鉛を高温で還元して蒸発させて、ダスト類から除去するものである。この際の反応は、 $\text{ZnO}, \text{PbO} + \text{C} \rightarrow \text{Zn}, \text{Pb} (\text{蒸気}) + \text{CO}$ であり、また、この処理では、 $\text{FeO} + \text{tC} \rightarrow \text{Fe} + \text{tCO}$ （tは酸素比率で0.95～1.5）の反応も起き還元鉄が得られる。この処理を効率的に行い、還元鉄製造エネルギーを有効活用すれば、処理

エネルギーが無駄にならないため、処理と製造工程一貫での省エネルギーも可能である。この目的の還元処理プロセスには、ロータリーキルン、電気式還元炉(Submerged Arc Furnace: SAF)、回転炉床炉(Rotary Hearth Furnace: RHF)がある。検討の結果、RHF法が最も高エネルギー効率で経済性が高いと判断¹³⁾した。

このRHF法は図9に示すように、ドーナツ状の回転炉を中心とする高温還元プロセスである。

本プロセスは、主として原料準備・造粒工程とRHFでの還元工程、排ガス処理工程からなる。ダスト類は、まず造粒されて、酸化鉄等の酸化物と炭素を含む造粒物に加工され、これを炉内で還元処理することを特徴とする。

図10に示すように、耐火物による天井と側壁の下で、一定速度で回転する炉床に、製鉄ダスト類から製造した炭素と酸化物の造粒物を炉床上に敷き詰め、造粒物を加熱ゾーン内で加熱し、更に還元ゾーン内では酸化鉄、酸化亜鉛等と炭素が反応して還元反応が起きる。

炉内での造粒物の反応を図11に示す。炉内の造粒物は輻射熱で加熱され、造粒物中のFeOとCが盛んに反応して、金属鉄とCOを生成する。輻射熱による高伝熱速度と微粉原料の高反応速度のため、10～20分間で反応が完了する利点があり、炉床面積当たりの生産性が高い。還元処理された造粒物は金属鉄を多く含む還元鉄(Direct Reduced Iron: DRI)となる。



図9 回転炉床設備(RHF)の外観写真

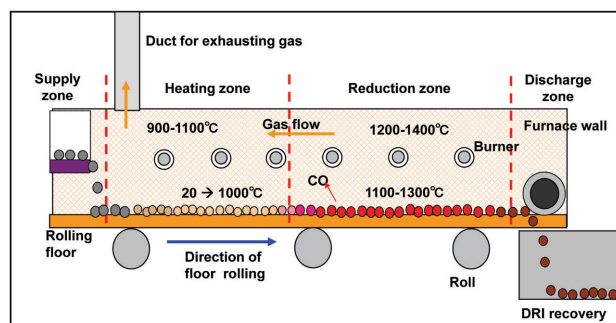


図10 RHFの回転方向の展開図と炉内状態

当初、RHFは還元鉄プラントとして開発されていたが、またダスト処理設備としても注目されていた。技術開発開始当時、世界に製鉄ダスト類のリサイクル用RHF設備が2基あったが、技術的問題があり、いずれも稼働開始後約1年で操業を停止していた。

当時は、安定操業技術が確立しておらず、更に多種多様な製鉄ダスト類の成分・物性に対応し得る造粒技術、高炉や溶解炉等の製鉄プロセスで再利用するための還元技術といったダスト処理の周辺技術が未完成であった。

そこで1996年から調査研究に着手、2000年には新日本製鐵 君津製鐵所と広畑製鐵所で各々約20万トン/年の処理能力を有する商業プラント規模の設備を建設して、実設備を通じてしか開発できない技術課題の開発を進め、2002年に設備、操業技術を確立¹⁴⁾した。

RHFでのダストリサイクルの研究開発を進めるに際し、RHFプロセスを“原料事前処理－造粒－RHF焼成還元－排ガス処理－亜鉛ダスト回収”の一貫プロセスとして捉え、全体系を適正化することが重要として、①成分、物性が不安定な劣質原料の製鉄ダスト類に適合した事前処理・造粒技術の開発、②最終使用工程での適正品質に対応する還元技術とDRI製造技術の開発、および③商業プラントとしての重要課題である安定操業技術の確立、という主要な研究開発課題を設定し、以下の技術開発を進めてきた。

① 造粒技術開発

事前処理の造粒技術では、粒度、水分、成分の変動に対応できるダスト類配合技術と成形条件を開発し、ペレット法、ブリケット法、および押し出し成形法での操業技術を確立した。更に微細粒子の高水分比率スラッジの処理では、連続式脱水機と押し出し成形機の組合せの事前処理方法を開発し、乾燥工程なしで炉内に装入し、急速な加熱によっても爆裂しない造粒技術を世界で初めて開発した。

② 還元技術開発

DRIを使用する製鉄所の還元炉または精錬炉は、高炉、スクラップ溶解炉、電炉等である。これらの使用炉毎に、必要とされるDRI品質が異なる。即ち、高炉向けでは高強度還元鉄、また溶解炉、電炉向けでは高還元率の還元鉄の製造技術が必要である。

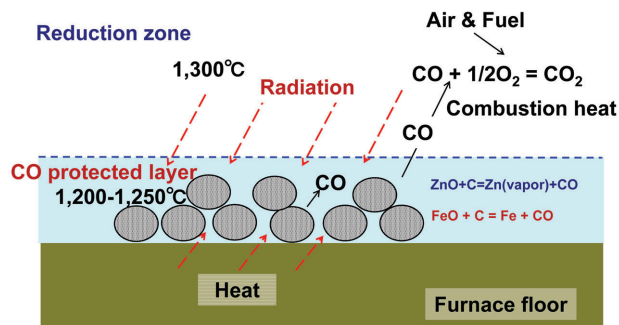


図11 ペレットの反応概要図

②- 1 高炉向け 高強度 DRI 製造技術

DRIを高炉で使用すると、還元材消費量を削減でき、省エネルギー、CO₂排出量抑制ができる。ところが高炉では高強度のDRIが必要とされるため、還元生成した金属鉄粒のネットワークを形成することで高強度DRIを製造して、世界で初めて高炉に直接装入できるDRIを製造できた。

②- 2 溶解炉・電炉向け 高還元率 DRI 製造技術

溶解炉や電炉では、高還元率のDRIが求められる。実験室では高還元率が得られるが、商業プラントでは炉内CO₂が還元反応に悪影響するため、高還元率達成は困難であった。そこで、広畑製鐵所No.1プラントで最適還元条件を研究し、耐火物改善等による高温化と温度制御性向上、化学組成適正化による反応向上等の技術改善により、商業プラントで初の85%以上の鉄金属化率を達成できた。

③ 安定操業技術開発

長時間安定して操業できることが、特にダスト処理の商業プラントに不可欠である。そのためには、種々の安定操業技術の開発が必要であり、炉床管理、排ガス処理系内部への付着物対策、耐火物技術改善策などを実施した。特に難易性の高かった技術改善項目は以下の3項目であった。

RHFでは、反応中に原料が高付着性物質に変化して造粒物の炉床耐火物へ付着する問題があった。還元過程で原料の低融点化成分域を回避し、また付着しやすい粉発生率を減らすために造粒技術を改善した。ダスト中不純物の操業への悪影響の防止も重要な技術項目であった。RHFでは原料中アルカリが蒸発し耐火物へ浸潤する結果、耐火物の表面剥離が生じる問題があった。そこで、アルカリ浸潤防止の成分系を採用して、高温操業可能な耐火物を開発した。また、亜鉛、鉛、アルカリ、ハロゲン等の揮発性元素は炉内で蒸発し、排ガス処理装置内の壁に付着する。そこで付着防止策として、原料配合を調整して付着物の高融点化することと、排ガス冷却構造に工夫をすることで、付着物除去を容易化した。

以上、各々の技術開発成果を体系化、総合化することで、世界で初めて一貫製鉄所におけるダストのリサイクル処理を商業的、かつ継続的に実施する技術を確立した。

これらの製鉄ダストリサイクルを経済的に実現するには、RHFを用いたダストリサイクルの処理システムを構築することも重要である。そこで、製鉄ダスト類を粒径、鉄・炭素含有率、亜鉛含有率、アルカリ含有率、含水率等で区分し、製鉄所の特性に合わせた、処理コストを最小化するダスト類のリサイクルシステムを構築した。

粗鋼年産1100万トン規模の新日本製鐵 君津製鐵所では、高炉でDRIを使用するために、高強度DRIを製造する方法を開発した。亜鉛含有ダスト処理に3基のRHFを稼働させて、年間約60万トンの処理を実施している。DRIの還元化エネルギーを有効利用できた結果、高炉還元剤比が低減でき、省エネルギーも実現できた。

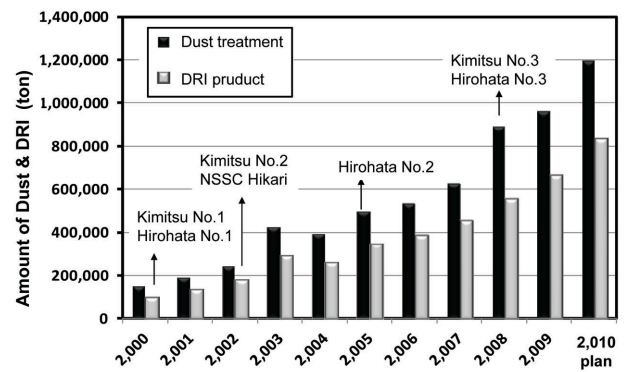


図12 新日本製鐵におけるRHFでのダスト処理量の推移

表1 RHFダストリサイクル設備による省資源・省エネルギー効果

		Unit	Result of 2009fy	Final target
Reduction merit	Dust treatment	10,000t/y	95	120
	Iron ore	10,000t/y	66	81
	Coal	10,000t/y	7.4	9.0
	Zinc concentrate	10,000t/y	2.5	3.4
	Energy saving	Tera J/y	2,200	2,622
	CO ₂ reduction	10,000t/y	17	20

新日本製鐵 広畑製鐵所では、自所ならびに他製鉄所で発生した製鉄ダスト類をRHFで集中リサイクルする体制を構築した。広畑製鐵所は冷鉄源から鉄源を生産する製鉄所であり、他所からの製鉄ダスト類をリサイクルしても、高炉の亜鉛濃縮が起きないため、集中リサイクルが可能である。高還元率を実現するとともに、RHFと溶解炉間を高温DRIで直結する設備も開発し、RHFと溶解炉一貫での低エネルギー操業を行っている。

新日本製鐵では、2010年までに6基のRHFプラントを建設して、図12に示すように年間120万トンの処理能力として、全社の製鉄ダスト類の全量リサイクル体制を構築した。2009年においては、表1に示すように、100万トン弱のダスト処理を行い、大きな省資源、省エネルギー効果をあげている。

5. まとめ

劣質資源の有効資源化技術としては、上述した技術以外にも、コークス炉における廃プラスチック、廃タイヤのケミカルリサイクル技術^{15,16)}、微粉鉄鉱石資源の高分子分散剤による造粒強化技術¹⁷⁾などがあり、いずれも資源の基礎特性の徹底追及を礎とした開発成果である。これらの実生産プロセス実現に向けた着想や克服過程が、今後の省資源・リサイクル技術開発の一助となることを期待している。

参考文献

- 1) Wakuri, S. et al. : AIME 45th Ironmaking Conference. 1986, p.303
- 2) Nakashima, Y. et al. : 2nd Int. Cokemaking Congress. 1992, p.518
- 3) Tanaka, S. et al. : AIME 56th Ironmaking Conference. 1997, p.139
- 4) 西岡邦彦 ほか:鉄と鋼. 90 (9) , 614 (2004)
- 5) 加藤健次:石炭利用の最新技術と展望. 初版, 東京, シーエムシー出版, 2009, 193p
- 6) 松浦慎 ほか:鉄と鋼. 89 (5) , 565 (2003)
- 7) 窪田征弘 ほか:鉄と鋼. 90 (9) , 686 (2004)
- 8) 芳我徹三 ほか:鉄と鋼. 70, S16 (1984)
- 9) 芳我徹三 ほか:鉄と鋼. 82 (12) , 981 (1996)
- 10) 芳我徹三 ほか:鉄と鋼. 83 (4) , 233 (1997)
- 11) Haga, T. et al. : 4th ECIC. Paris, 2000, p.118
- 12) 柴田大介 ほか:CAMP-ISIJ. 10, 804 (1997)
- 13) 織田博史 ほか:新日鉄技報. (376), 28 (2002)
- 14) 茨城哲治:ふえらむ. 15 (10), 611 (2010)
- 15) 加藤健次 ほか:新日鉄技報. (384), 69 (2006)
- 16) 岡西和也:日本エネルギー学会誌. 72 (11), 1087 (1993)
- 17) 岡田務 ほか:鉄と鋼. 92 (12), 735 (2006)



芳我徹三 Tetsuzo HAGA
設備・保全技術センター
プラントエンジニアリング部 部長 工博
千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511



茨城哲治 Tetsuharu IBARAKI
製鉄技術部 部長 博士（環境科学）



加藤健次 Kenji KATOH
設備・保全技術センター
プラントエンジニアリング部 部長
博士（環境科学）