

(解説)



還元鉄製造技術を活用したグリーン社会への貢献

王 昌麟*¹

Utilizing Reduced-Iron Manufacturing Technology to Contribute to Green Society

Shourin OH

要旨

世界で温室効果ガスの削減取り組みが加速している。鉄鋼業は、温室効果ガスの一種である二酸化炭素を産業界で最も排出する業界の一つであり、脱炭素化が強く望まれている。今の鉄鋼生産の中心は高炉であるが、コークスや石炭を主な熱源や還元剤とすることが二酸化炭素排出量の多くなる原因である。当社では、脱炭素化に向け、還元鉄の高炉への多配合などにより高炉の還元剤比率を下げるといった二酸化炭素削減に向けた取り組みを着実に進めている。さらに、還元鉄製造技術や原料ペレットプラント操業、エンジニアリング事業で培ったノウハウや基盤技術を組み合わせ、鉄鋼業のカーボンニュートラル化に貢献していく。

Abstract

Efforts to reduce greenhouse gases are accelerating worldwide. The steel industry is one of the sectors that emit the greatest amount of carbon dioxide, a type of greenhouse gas, making its decarbonization highly desirable. Currently, the primary method of steel production is through blast furnaces, which rely on coke and coal as the main heat source and reducing agent, resulting in significant carbon dioxide emissions. Kobe Steel, in pursuit of decarbonization, is steadily implementing initiatives to reduce carbon dioxide emissions by lowering the ratio of reductant and incorporating more direct-reduced iron in the blast furnaces. Furthermore, by combining the company's expertise and fundamental technologies developed through reduced-iron manufacturing, raw material pellet plant operation, and engineering projects, Kobe Steel aims at contributing to the carbon neutrality of the steel industry.

検索用キーワード

SDGs, カーボンニュートラル, CO₂削減, MIDREX, HBI, DRI, 水素, 還元鉄, ペレット

まえがき = 世界の温室効果ガス（以下、GHGという）削減の取り組みが加速する中、日本でも2050年度のカーボンニュートラル（以下、CNという）が宣言された。産業の中でもGHG排出量の多い鉄鋼業を営む当社は、重要課題の一つとして「グリーン社会への貢献」を設定し、2050年の製鉄プロセスのCN化達成を目標に取り組みを進めている。

鉄づくりは、石や砂の形状をした「鉄鉱石」に含まれる酸化鉄から酸素を取り除く（還元反応）ことから始まり、このための装置として、一般的には高炉が用いられる（当社加古川製鉄所においても稼働中）。高炉は、低コストかつ大規模生産が可能な装置であり、製鉄所の心臓とも呼ばれるが、現在はコークス・石炭を主な熱源・還元剤とするため、原理的にGHGの一つである二酸化炭素（以下、CO₂という）が発生する。これにより、鉄鋼業は最大のGHG排出産業の一つとなっており、排出量全体のおよそ7~11%を占める¹⁾ため、脱炭素化が強く望まれている。CN製鉄の実現には、高炉の還元剤比を下げつつCO₂回収技術を用いるか、別のCNなプロセスに置き換える必要がある。いっぽうで、鉄鉱石の品位低下など、従来からの課題もあるなど、鉄づくりにおい

ては様々な挑戦的な課題を解決する必要がある。

当社は、製鉄事業のみならず、還元鉄プラントや鉄鉱石ペレットプラントのプラントエンジニアリング事業も展開しており、お客様のニーズに合わせ、MIDREX^{®注1)}、FASTMET^{®注2)}、ITmk3^{®注3)}、KOBELCOペレタイジングシステムなど、様々な還元鉄プロセスやペレタイジングプロセスを商品化している。鉄石の性状や炉内温度、ガス組成が異なる還元鉄プロセスの炉内反応を評価し改善につなげるため、様々な技術を当社は培ってきた。ここでは、還元鉄を含む当社製鉄プロセスに関する取り組みを支える技術について概説するとともに、これらの技術を用いた当社ならではのCN製鉄の実現に向けた取り組みについて紹介する。

1. 当社製鉄プロセスの特徴と技術課題

当社は、鉄鉱石から鉄鉄、鋼塊を経て鋼材から最終製品まで製造する一貫製鉄所を運営しており、CO₂削減努

脚注1) MIDREX[®]は当社の商標である。

脚注2) FASTMET[®]は当社の商標である。

脚注3) ITmk3[®]は当社の商標である。

*1 技術開発本部 材料研究所

力を続けている。具体的には、高炉操業で培った炉内通気制御技術を活用した高炉への還元鉄投入（本号「KOBELCOグループのグリーン社会への貢献を支えるコア技術」p.4参照）や、自社ペレットプラントなどにおける原料の被還元性の向上によるCO₂削減に取り組んでいる。

またいっぽうで、高炉と比較してCO₂排出量が少ないMIDREXプロセスのエンジニアリング事業も展開しており、製鉄のCO₂削減に寄与している。

MIDREXプロセスは、これまで電炉用鉄源向けの還元鉄プラントとして生産量を伸ばしている。還元鉄生産の中で60%のシェアを誇る安定したプロセスで、さらなるCO₂削減に向け、天然ガスと水素を任意の割合で混合して運転できるMIDREX FlexTM注4)と、水素100%で操業するMIDREX H₂TM注5)も展開している。

高炉やMIDREXプロセスは、鉄鉱石から酸素を取り除く還元反応を起こすプロセスである。ここで、化学反応を取り扱う場合、化合物や圧力、温度が決まれば、反応の最終状態（平衡状態）は一意に決まるため、平衡状態に到達するプロセスでは、反応経路や速度を考慮する必要はない。しかし製鉄プロセスでは、平衡状態に到達する前に製品を回収するケースが多いため、品質は、反応経路や速度の影響を受ける。

高炉プロセスやMIDREXなどの還元鉄プロセス、ペレットプラントを有する当社では、様々な成分や性状を持つ原料を、還元溶融条件に合わせて設計することも含めたプロセス最適化を行ってきた。このために、上述の反応経路や速度の解析技術、また反応経路や速度に影響する原料性状を評価し解析する技術を開発してきた。以下2章では、マイクロマクロ的な原料や還元鉄性状の分析解析技術を、3章ではプロセス解析制御技術に関して述べる。

2. マイクロマクロ的な原料－製品性状の分析解析技術

2.1 原料－製品の鉱物相や性状の評価技術

原料の鉄鉱石形状は塊状、粉状など様々あり、塊状の鉱石はそのまま炉に投入される場合もあるが、粉状鉱石の直接炉内投入は、ガス通気性を悪化させ操業が不安定になる。このため、副原料も含めた焼成などの工程を経て、塊状にする前処理（塊成化）が行われている。この焼成時に、副原料と鉄鉱石の一部が反応し、複合的な酸化物（複合酸化物）が生成する。これらの生成量や組成などは、強度や還元溶融工程に影響を与えるため、量や組成のコントロールが大きな課題であり、これを評価するための技術を開発してきた。

特徴的な技術として、試料全体の複合酸化物を自動で同定する装置（鉱物粒子解析装置：MLA）を導入した。この装置は、画面全体の微小要素ごとにEDXスペクトルを取得しデータベースとの照合を経て鉱物相を特定す

るもので、画像中の鉱物を種類ごとに図示することが可能である（図1）。この解析と実験とを組み合わせることで、最適な原料配合レシピを迅速調査することが可能となった。例えば、この装置によるデータ収集解析の結果として、高炉装入原料である焼結鉱の原料配合レシピ設計最適化による大幅なコストダウンなどの成果を得ている。

また、還元溶融時には、原鉱石粒の大きさや、微量成分の種類・量の影響を受けることが分かっているため、反応途中の成分や性状の分析も行っている。図2はMIDREXプロセスの製品である還元鉄（以下、DRIという）を対象に、鉄鉱石ペレット銘柄を変え、条件を揃えて還元させた場合の未反応部の性状やその成分をマイクロマクロ的に調査したものであり、原料によって還元後の酸化鉄の存在の仕方が違うことを示している。反応途中のDRIにも同様の解析を行うことで、銘柄ごとの反応経路を明らかにしている。この情報は、MIDREXプロセスの還元シャフト炉内の反応評価や、後述する反応解析時のモデルやパラメータ設定の際に役立てている。

2.2 非破壊構造評価技術（X線CT）

焼結鉱・ペレットの物理的な性状（粒子の大きさ、空隙の繋がりなど）も反応に大きく影響を与える。この内部構造を調査する方法として断面観察が一般的であるが、断面観察では二次元的な情報しか得られず、粒子や

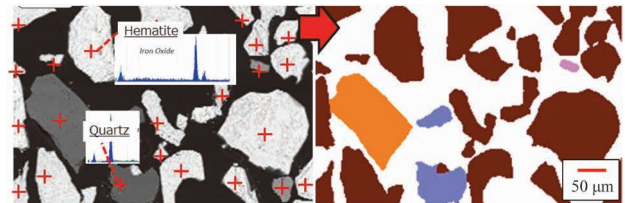


図1 MLA解析例
Fig.1 Example of MLA analysis

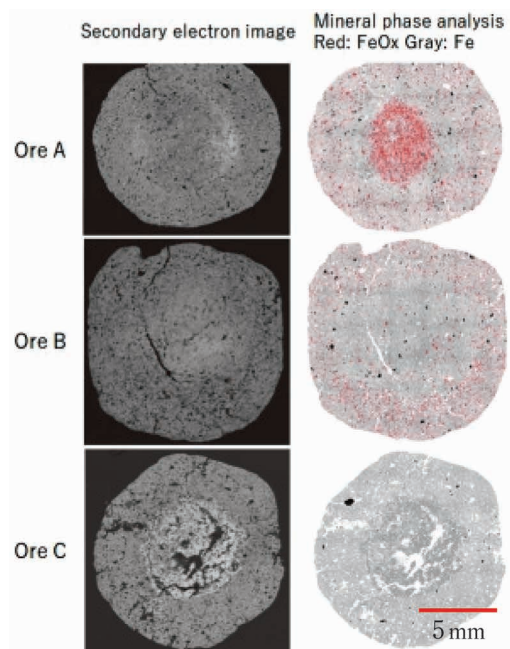


図2 MLAによるDRIの解析例
Fig.2 Examples of DRI analysis by MLA

脚注4) MIDREX FlexTMは当社の商標である。

脚注5) MIDREX H₂TMは当社の商標である。

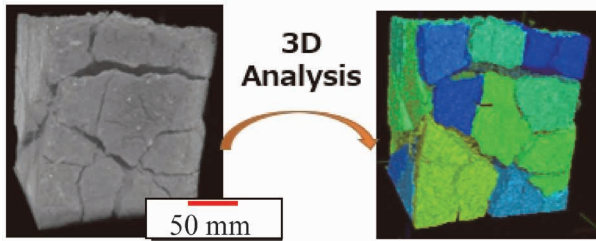


図3 X線CT解析事例
Fig.3 Example of X-ray CT analysis

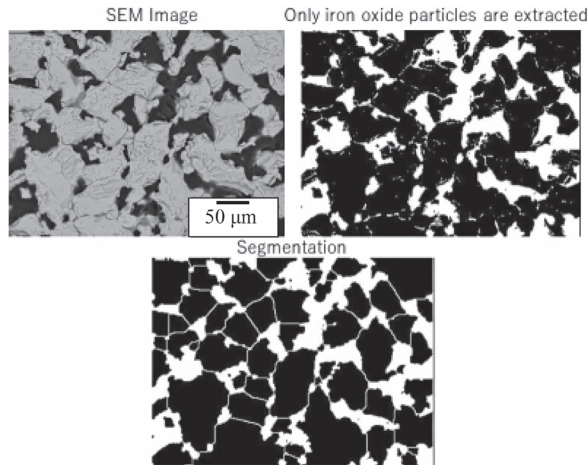


図4 酸化鉄ペレットの画像解析例
Fig.4 Examples of image analysis of iron oxide pellets

空隙の三次元的な構造はわからない。そのため、非破壊で三次元的に塊の構造を評価できる、X線CTによる解析を行っている。その一例として、焼結鉱やコークスなどを、亀裂を境界とした領域に分割する処理を行ったものを図3に示す。このように、三次元的な画像を得た後に、後述の画像解析技術を用いて、粒子径や気孔径の分布など、物理的な性状を定量的に把握し、各種操業のボトルネック改善に役立てている。

2.3 画像解析技術

ここでは、前述の評価で得た画像や、それを重ね合わせて得た三次元的な情報を定量評価する画像解析技術の一例を紹介する。画像解析技術は、画像中の色調差や形状差などを用いて特徴的な粒子群に分類し、それらの位置関係や構造を数値的に解析するもので、例えば、ペレット中の酸化鉄、不純物、空隙などの粒の大きさやその分布を評価できる。この技術をペレットの解析に用いた事例を図4に示す。図4左上はSEMで取得した画像で、この画像中の白い部分が酸化鉄であり、この部分だけを黒く塗りつぶし抜き出すことで図4右上の画像になる。ここで、酸化鉄粒子は焼結し、繋がっているものの、局所的には粒の大きい（太い）部分と小さい（細い）部分が存在する。例えば、還元速度には粒の大きい部分が含まれる割合が影響する。これを評価する場合、一般的な画像解析では、ある一つの繋がった画素群は一つの粒子とみなされるため、画像を単純に解析するだけでは、粒子の大小に関する情報は得られない。そこで、粒子のくびれ部分を境界の始点として、解析上別々の粒子に分離するような手法（詳細は割愛）で画像を処理することにより、図4下の画像を生成し、この画像に対して画像解

析を行うことで、粒の大小を評価している。このような方法を用いて、酸化鉄や空隙などを同時に解析し、銘柄ごとに原料の物理的な特徴を定量評価しており、これと豊富な実機データとを照らし合わせることで、原料性状と製品品質を結び付けている。このデータを基に、原料の物理性状から実プラントでの製品品質を予想することが可能となっている。

3. プロセス解析制御技術

3.1 原料の塊成化工程における性状制御技術

塊成化工程の一つであるペレット製造では、粉状の鉱石を必要に応じ副原料と混合し、転動することなどにより団子状にしたのち、焼成する。この工程では、鉱石のもつ水分量の影響で、焼成時に急激に蒸発し破裂するなどの課題が発生する。これらの課題に対応するため、原料性状に応じた技術開発²⁾を行っている。また、焼成後ペレットの高炉での被還元性を改善するための副原料（ドロマイト）添加や粒径制御³⁾にも取り組んでいる。ほかにも高硫黄含有鉱石の使用に向けた排ガス中SO_xの低減など様々な技術を開発してきた⁴⁾。今後も、ペレット性状制御技術や、2章で述べた原料評価技術と併せて、低品位化が予想される鉄鉱石を使いこなすための技術を継続して開発していく。

また、当社はペレット製造ノウハウを持つのみならず、ペレット製造設備（ペレットプラント）のエンジニアリング事業も行っている。当社ペレットプラントは転動しながら加熱するグレートキルン方式であり、すべてのペレットがほぼ均一に加熱され温度などの調整も容易である。このため、均一で高品質な製品ペレットを得られることが特徴である³⁾。さらに、お客様のニーズや鉱石性状に合わせた最適な提案ができるような体制も構築している。種々装置によるサンプルテストにより、指標となるペレット品質を確保しているか確認しながら、プロセス設計を行っている⁵⁾。

3.2 反応評価解析技術

MIDREXプロセスは、固体のペレットをシャフト炉に投入し、天然ガス由来の一酸化炭素と水素によりガス還元する。ここでの生産量は、シャフト炉の容積とペレットの炉内滞留時間により決まるため、滞留時間を短くすること、すなわち還元反応を速めることが生産性の向上に繋がる。原料ペレット性状により還元反応挙動は異なるため、これを把握し、これに応じて操業の改善につなげる目的で、図5のような試験装置により反応率の経時変化を評価している。この試験装置では、MIDREX炉内ガスや温度の経時変化をほぼ再現しながら、オンラインで重量測定することにより、反応の経時変化を測定できる。このような装置を用い、例えば100% H₂条件下で起こる反応率データも収集して、適正な実機操業条件の設定に活用している。

さらに、原料銘柄によって反応率が変化するメカニズムを理解するため、また後述する実炉内反応の総合的な数値計算を行うために、反応速度解析も行っている。一例として、MIDREX還元反応について、ガス温度や組

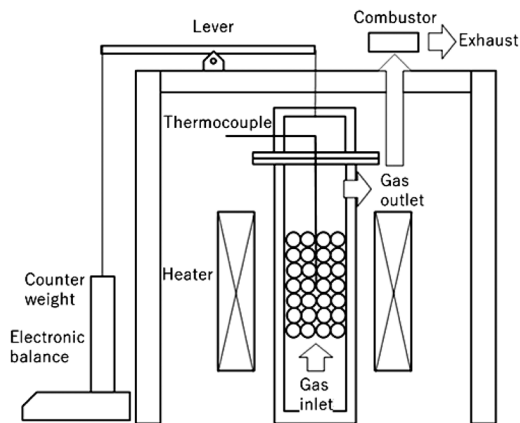


図5 MIDREX 基礎試験装置
Fig.5 MIDREX basic test furnace

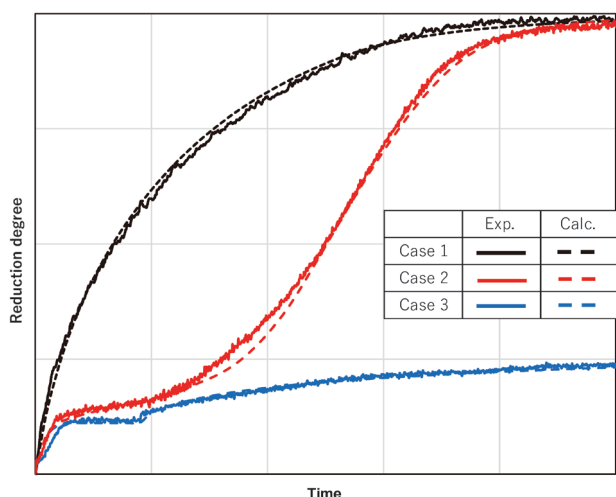


図6 反応速度解析例
Fig.6 Example of reaction rate analysis

成による実験の還元曲線変化と反応速度解析による計算との比較を図6に示す。解析モデルや反応式などの詳細は省くが、2章1節で述べた原料評価技術も活用し、反応途中で起こる現象を確認しながら、現象に応じて適切な反応モデルやパラメータを設定している。温度やガス組成の広い範囲で、実炉のようなガス組成や温度が徐々に変化する複雑な条件においても、実験結果の再現に成功している。

3.3 実炉内反応の総合的な解析技術

実炉における品質と生産性の両立や改善のためには、炉内反応状況の理解が必須であり、その一つのツールとして、炉内の総合的な数値計算技術も開発している。実炉では、ある瞬間の反応により起こるガスや温度変化は、拡散や対流、伝熱などにより、次の瞬間のガス組成や温度などを変化させ、反応に影響する。この対流や伝熱などの影響を評価し、実炉全体の炉内反応を解析するために、前節で述べた反応解析技術と熱・流体解析技術との組み合わせが必要となる。詳細な解析方法の説明は省くが、例えばMIDREXプロセスのシャフト炉内状況の再現のために、CFD (Computational Fluid Dynamics) 計算による炉内の熱や流体流れと化学反応解析を連成した解析を行っている。この解析結果と実炉データの比較、前節で述べた反応解析技術を用いた検証を繰り返し

て各種パラメータを適正化しており、実炉の還元や浸炭等の反応率と、温度等の実測値を高い精度で再現できるようになった（本号「グリーン社会実現に向けた生産プロセスと製品を支える熱・流体制御技術」p.65参照）。この炉内総合解析シミュレーション技術は、各種プラントでの反応に関する課題の抽出や、反応を適正化するための操業条件の提示に活用している。

4. 製鉄プロセスのCN化に向けた当社の取り組み

現在の製鉄法の主流は高炉法であり、これは低コストかつ高いエネルギー効率で大規模に製鉄が可能で、高度に洗練されたプロセスである。しかしながら、すでに述べたとおり、現行では還元剤として石炭などの炭素源が用いられるため、GHGの一つであるCO₂が原理的に発生する。鉄鋼業で発生するCO₂の大部分は還元工程に由来するため、当社は高炉還元剤比低減のための還元鉄投入や原料被還元性向上の取り組みを行っている。そのうえで、将来のCN達成のためにはCO₂回収技術（二酸化炭素回収・有効利用・貯留：CCUS）を導入するなど、いくつかの方法が考えられる。ここでは、MIDREXプロセスを用いたKOBELCOグループのCO₂低減ソリューションについて述べる。

MIDREXプロセスは、3章2節で述べた通り、天然ガスを改質した一酸化炭素と水素を還元剤としているが、還元ガスの全量を水素ガスに置き換え（MIDREX H₂プロセス）、再エネ電力やグリーン水素を活用することで、ほぼCO₂排出量ゼロでの稼働が可能である。

技術的には、MIDREXプロセスのガスを水素100%に置換することで、炉内の吸熱反応の割合が従来よりも増え、温度バランスが変化するなど、いくつかの課題がある。しかしこの課題は、これまでのMIDREXプラント操業データやノウハウと、上述した様々な基盤技術を用いた将来の実機の炉内状況の予想とを組み合わせることで、解決できている。具体的には、ラボ試験と、炉内総合解析シミュレーション計算により、シャフト炉のデザインについて大幅な変更をしなくても、100%水素を適用してDRIを生産することが可能なことを検証した^{6), 7)}。

また、MIDREX H₂プロセスと電気炉とを組み合わせることで、使用電力のCO₂負荷によって削減量は異なるが、現状の高炉-転炉プロセスで粗鋼を製造する場合と比べ、CO₂排出量を80%以上削減することが可能である⁶⁾。

水素社会への転換は、地域の事情に応じて進行すると思われる、その多様なニーズに対応できるプロセスとして、天然ガスと水素操業の切り替えが可能なMIDREX Flexプロセスも保有している。現時点で当社グループは、スウェーデンのH2グリーンSteel社からMIDREX H₂プロセスを、ドイツThyssenkrupp社からMIDREX Flexプロセスを受注しており、今後これらプラント操業データからフィードバックを受け、基盤技術並びに操業ノウハウをさらに更新し、CNな鉄源やそれを製造可能なプラントを市場に提供していく。

むすび=当社は、国内の一貫製鉄所で唯一、自社ペレットプラントを持つのみならず、実績のあるMIDREXプロセスなどの還元鉄製造プラントを市場に供給している。このような背景から、原料のミクロ的な解析技術、原料一粒に着目した実験技術や化学反応の速度解析技術、さらに、それらミクロ的な反応とマクロ的な反応を統合した、実炉内の総合解析シミュレーション技術という、原料から還元鉄までを一貫して評価・最適化できる技術を培ってきた。この技術群を背景に、水素社会への転換や変化する原料品位など地域の事情に応じて柔軟に対応できることが当社ならではの強みである。この強みを活かし、現在の高炉法に比べCO₂を大幅に削減する方法の一つとして、MIDREX H₂やMIDREX Flexプロセ

スの普及、並びにそこで製造される低炭素鉄源の市場への提供により、当社は製鉄プロセスのCN化に挑戦するとともに、鉄鋼業全体のCN化に寄与していく。

参 考 文 献

- 1) <https://www.globalefficiencyintel.com/new-blog/2021/global-steel-industrys-ghg-emissions>, (参照2023-06-26)
- 2) 加藤嗣憲ほか. 材料とプロセス. 2020, Vol.33, p.23.
- 3) 笠井昭人ほか. 材料とプロセス. 2017, Vol.30, p.3.
- 4) 加藤嗣憲ほか. R&D神戸製鋼所技報. 2019, Vol.69, No.2, p.9-12.
- 5) 山口晋一ほか. R&D神戸製鋼所技報. 2010, Vol.60, No.1, p.12-21.
- 6) ビンセント シェヴリエほか. R&D神戸製鋼所技報. 2020, Vol.70, No.1, p.81-87.
- 7) 道下晴康ほか. ふえらむ. 2022, Vol.27, No.8, p.542-551.