

資源の高度利用・環境保全のためのプロセス研究

Process Engineering Research for Advanced Resource Utilization and Environmental Conservation



教授 村上 太一
Professor
Taichi Murakami



助教 東 料太
Assistant Professor
Ryota Higashi

当研究室では、鉄鋼をはじめとする波及効果の大きな基幹金属(鉄鋼や非鉄金属)素材を対象に、高温プロセスを用いた製錬のカーボンニュートラル化などに関する研究を推進している。例えば、水素製鉄用原料の炉内での劣化メカニズムの解明とその抑制手法の開発、製鉄プロセスの排出ガスを回収・改質し、固体炭素として再利用する新奇炭素循環製鉄法の開発、高炉装入原料の塊成化手法である焼結プロセスにおける低炭素操業法の開発や品質改善などを実施している。また、ポーラス金属の製造技術などの材料プロセッシングに関する研究も行っている。

The laboratory has investigated carbon neutralization of smelting processes using high-temperature processes for key metallic materials with large ripple effects (e.g., iron and steel) and nonferrous metals (Fig. 1). For example, our lab seeks to understand the degradation mechanism of raw materials for hydrogen ironmaking and to develop its suppression method, advance the carbon recycling ironmaking process that recovers and reforms exhaust gas to solid carbon, develop low-carbon operation methods, and improve quality in the sintering process, which agglomerate the raw materials for a blast furnace. Our lab also focuses on materials processing, such as production technology for porous metals.

水素富化高炉条件における鉄鉱石ペレットの還元粉化機構

鉄鋼業におけるCO₂排出削減は重要な課題であり、高炉製鉄では炭素を還元材として用いるため排出削減が困難である。このため、炭素の代替として水素を還元材に用いる技術が注目されているが、水素利用の拡大に伴い、新たな操業上の問題が指摘されている。

その一つが、鉄鉱石ペレットの低温還元粉化である。Fig. 1に示すように、500°C条件では、水素を含む還元ガス下において、同一還元率でもCO還元条件より粉化が顕著となる。この挙動は高炉内のガス流動性に影響を及ぼす可能性がある。Fig.2に示されるように、CO還元では反応が表面から内部へ進行するのにに対し、水素還元ではペレット全体で均一に還元が進行する。この還元様式の差は亀裂形成機構に反映される。Fig.3(a)に示すCO還元では、還元度差に起因する引張応力によりマクロクラックが形成され、中間粒子の生成につながる。一方、Fig.3(b)に示す水素還元では、微細亀裂の連結によって微粉生成が促進される。

以上より、水素利用はCO₂削減に有効である一方、原料粉化挙

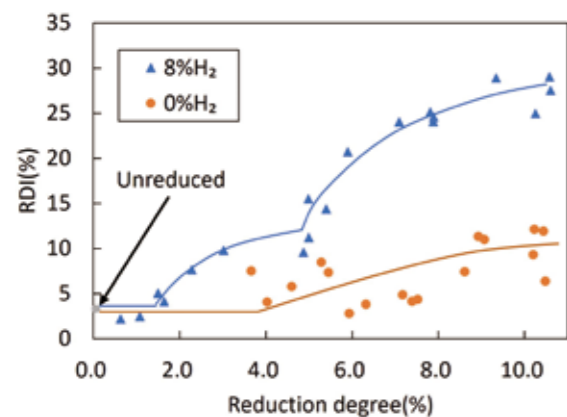


Fig. 1 Changes in the RDI value of the basic pellet with reduction degree at 500°C.

Reduction Disintegration Mechanism of Iron Ore Pellets under Hydrogen-Enriched Blast Furnace Conditions

Reducing CO₂ emissions in the iron and steel industry is an important challenge, and in blast furnace ironmaking, emission reduction is difficult because carbon is used as the reducing agent. Therefore, the use of hydrogen as an alternative reducing agent to carbon has attracted considerable attention. However, the expansion of hydrogen utilization has been reported to introduce new operational issues.

One such issue is the low-temperature reduction disintegration of iron ore pellets. As shown in Fig. 1, under a condition of 500 °C, reduction disintegration becomes more pronounced under hydrogen-containing reducing gas than under CO reduction, even at the same reduction degree. This behavior may adversely affect gas permeability in the blast furnace. As shown in Fig. 2, reduction under CO proceeds from the pellet surface toward the interior, whereas under hydrogen reduction,

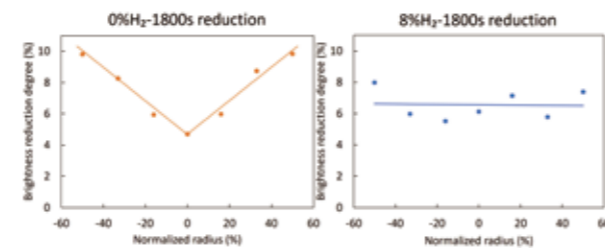


Fig. 2 Distribution of optical reduction degree of the basic pellet by 0% H₂ and 8% H₂ reduction at 500°C for 1800 s.

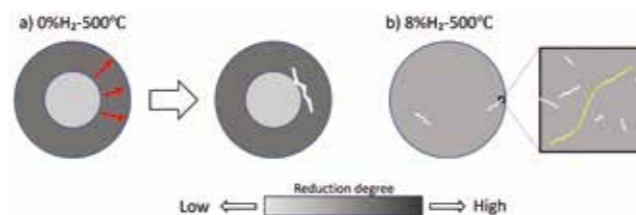


Fig. 3 Conceptual images of microcrack initiation mechanism a)0% H₂, b)8% H₂.

動を変化させることが示された。本研究は、水素富化高炉の安定操業に向けた原料設計および操業条件最適化に資する基礎的知見を提供している。

新規炭素循環製鉄プロセス (CRIP-D) の開発

鉄鋼業は、CO₂排出実質ゼロの達成という大きな課題を抱えており、その解決策の一つとして鉄鉱石の還元材に水素を利用する製鉄プロセスが検討されている。しかし、水素製鉄の実現には多くの技術的課題が残されている。さらに、炭素は鋼の製造に不可欠な元素であり、その使用を完全に排除することは困難である。このため、CO₂の分離回収および有効利用を前提とした炭素循環型製鉄プロセスの開発が求められている。

本研究では、排ガスから回収した炭素と鉄鉱石からなるコンポジットを原料とする新たな炭素循環製鉄プロセス (CRIP-D) を提案している (Fig. 1)。本プロセスでは、排ガス中のCO-CO₂-H₂-H₂O混合ガスに水素を添加し、繊維状多孔質鉄を触媒として水性ガス逆シフト反応を進行させることでCOリッチガスを生成し、固体炭素として回収する。回収炭素は還元材および浸炭材として製鉄製造に再利用される。

Fig.2に示す等速昇温還元試験の結果、不活性雰囲気下では約600°C付近から還元が進行するのに対し、水素還元雰囲気下では約400°C付近から還元率が上昇した。これは、還元初期において雰囲気ガスが還元反応に寄与することを示している。さらに、Fig.3に示す外観観察より、水素還元雰囲気下では1300°Cで試料の溶融が確認され、不活性雰囲気下では溶融が生じなかった。以上より、DCICを水素還元雰囲気下で昇温することで、低温かつ迅速な製鉄プロセスの実現が期待される。

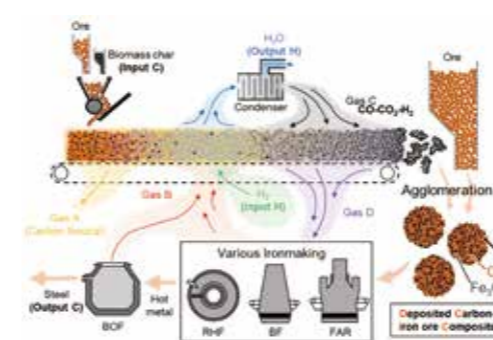


Fig. 4 Conceptual diagram of Carbon Recycling Ironmaking Process using Deposited carbon-iron ore composite (CRIP-D).

the reaction proceeds uniformly throughout the pellet. This difference in reduction mode is reflected in the crack formation mechanism. Under CO reduction, shown in Fig. 3(a), macroscopic cracks are generated due to tensile stress arising from the difference in reduction degree, leading to the formation of intermediate-sized particles. In contrast, under hydrogen reduction, shown in Fig. 3(b), the linkage of numerous microcracks promotes the generation of fine particles.

These results indicate that while hydrogen utilization is effective for reducing CO₂ emissions, it also alters the reduction disintegration behavior of raw materials. This study provides fundamental insights that contribute to raw material design and optimization of operating conditions for stable operation of hydrogen-enriched blast furnaces.

Development of a New Carbon Recycling Ironmaking Process using Deposited Carbon-Iron Ore Composite (CRIP-D)

The iron and steel industry faces the major challenge of achieving net-zero CO₂ emissions. One promising approach to address this issue is the use of hydrogen as a reducing agent for iron ore. However, the realization of hydrogen-based ironmaking still involves many technical challenges. In addition, carbon is an indispensable element for steel production through the refining of molten iron-carbon alloys, making it difficult to completely eliminate its use. Consequently, the development of carbon recycling ironmaking processes that assume CO₂ capture, separation, and utilization is strongly required.

In this study, a novel carbon recycling ironmaking process (CRIP-D), shown in Fig. 1, is proposed. This process employs a composite consisting of carbon recovered from exhaust gas and iron ore as the raw material. In the CRIP-D process, CO-CO₂-H₂-H₂O mixed gas discharged from ironmaking processes is collected, and hydrogen is added to promote the reverse water-gas shift reaction using fibrous porous iron as a catalyst, thereby producing CO-rich gas. After dehydration, solid carbon is deposited on the same porous iron and recovered. The recovered carbon is reused as a reducing agent and a carburizing agent for hot metal production.

The results of constant heating rate reduction experiments shown in Fig. 2 indicate that reduction proceeds from around 600 °C under an inert atmosphere whereas under a hydrogen reduction atmosphere, the reduction degree begins to increase from approximately 400 °C. This suggests that the gaseous atmosphere contributes to the reduction reaction at the initial stage. Furthermore, as shown by the appearance observations in Fig. 3, melting of the sample was confirmed at 1300 °C under a hydrogen reduction atmosphere while no melting occurred under an inert atmosphere. These results indicate that heating DCIC under a hydrogen reduction atmosphere is expected to enable a rapid ironmaking process at lower temperatures.

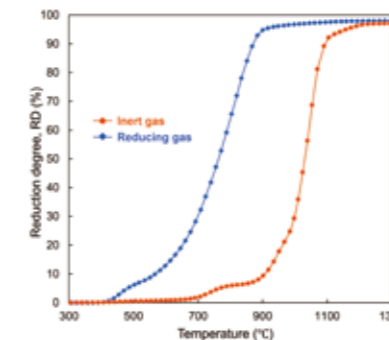


Fig. 5 Changes in reduction degree of deposited carbon-iron oxide composite (DCIC) in inert gas atmosphere and hydrogen-reducing atmosphere with temperature.

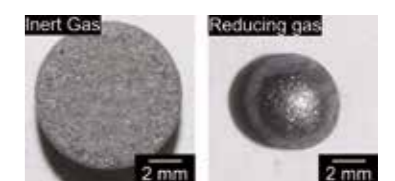


Fig. 6 Appearance of DCIC reduced by heating up to 1300°C in inert gas atmosphere and hydrogen-reducing atmosphere.