

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 葛西 栄輝
Professor
Eiki Kasai



准教授 村上 太一
Associate Professor
Taichi Murakami



助教 丸岡 大佑
Assistant Professor
Daisuke Maruoka



Group Photo

本研究室では、社会的インパクトが大きい基幹素材の製造やリサイクルプロセスに貢献できる、高効率化と低環境負荷化を同時達成可能な革新的技術原理の探索を行っている。特に高温反応が関与する製鉄プロセス (Fig.1) において、基礎から実機レベルに至る幅広い研究テーマを実施している。例えば、高炉に対する高品質な原料の検討や、製鉄プロセスからの CO₂ 排出量削減、排熱の有効利用等の研究、さらに、繊維状および多孔質金属の形態制御、固相変態を利用した蓄熱体や自己治癒セラミックス等の研究開発も行っている。

Our laboratory aims to develop innovative technological principles that will lead to the simultaneous achievements of higher efficiency and lower environmental load in manufacturing and recycling processes related to base materials. This will give significant impacts on future societies. Our laboratory has conducted a wide range of studies from fundamental to practical levels of the ironmaking process (Fig.1) including preparation of high-quality blast-furnace burdens, reduction of CO₂ emissions, and utilization of waste heat. Furthermore, this laboratory hosts research and development on controlling the morphology of fibrous and/or porous metals, heat storage process using the solid-phase transformation, and self-healing ceramics.

水素利用製鉄に適した塊成鉄製造原理の創成

高炉では粗鉄 (銑鉄) を製造するため、石炭を乾留して製造されるコークスを主な還元材および熱源として用いており、必然的に二酸化炭素 (CO₂) ガスが発生する。還元材を部分的に水素で代替することができれば生成ガスは水蒸気となり、その分 CO₂ 排出量の削減が可能になる。水素は石炭乾留時に副次的に生成されるため、製鉄所内で一貫した利用も可能である。現在、我が国では主に粉状鉄鉱石を塊成化して高炉に装入している。これまで多くの研究者らによって塊成鉄の還元しやすさ (被還元性) や鉄物組成、気孔構造などに関する知見が蓄積され、高炉操業条件に合わせた塊成鉄製造が行われている。還元材に水素を用いた場合、総括還元反応は吸熱となるため、水素濃度増加による高炉内上部部の低温化が懸念される。そのため、水素還元に適した塊成鉄組織および気孔構造の検討が重要となる。

本研究グループでは、水素濃度の異なる条件で塊成鉄の被還元性を調査し、水素還元に適した鉄物相や気孔構造などの特性を明らかにしてきた。本年は、高水素雰囲気および高圧力条件における各種塊成鉄の還元挙動について検討した。

Fig.2 に高水素雰囲気中で還元した鉄鉱石焼結試料の断面組織写真を示す。点線より右側は還元鉄が観察される領域であり、高圧力 (3 気圧) で還元した試料 (b) の領域は大気圧の場合 (a) よりも大きい。

Principles from the production of iron-ore agglomerates that are suitable for the hydrogen ironmaking process

Blast-furnace ironmaking mainly utilizes coke, which is produced through the carbonization of coal, as a reduction agent and heat source. Hence, this method inevitably emits a large amount of CO₂. Such emissions can be reduced if coke can be replaced with hydrogen, however. This is because hydrogen's exhaust gas is water vapor. Hydrogen is available in an integrated steelmaking plant, as it is a byproduct of the coke-making process. The main iron burdens of Japanese blast furnaces are iron-ore agglomerates. Researchers have conducted a number of studies on these agglomerates' reducibility and their mineral-pore structures, and the resulting accumulated knowledge has been applied to the production processes of these agglomerates. When hydrogen is used in iron-ore reduction, the overall reduction reaction becomes endothermic. This leads to a decrease in temperature in the upper part of blast furnace. Thus, it is necessary to further examine the mineral-pore structures of the agglomerates that are suitable for hydrogen ironmaking.

The research group has also studied the reducibility of agglomerates at various hydrogen concentrations and have thus clarified which mineral-pore structures are suitable for hydrogen reduction. This year, it also investigated the reduction behaviors of agglomerates at high hydrogen levels and high pressure.

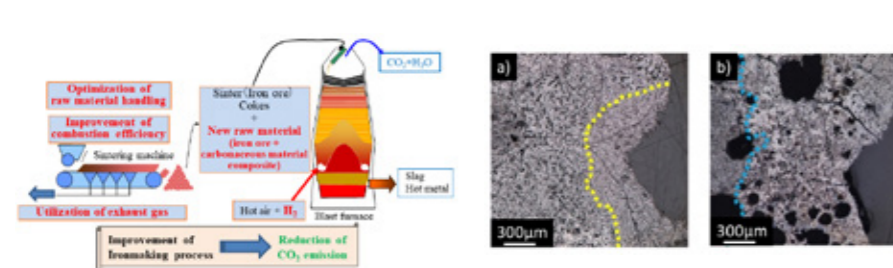


Fig.1 Strategy to reduce CO₂ emissions from the ironmaking processes.

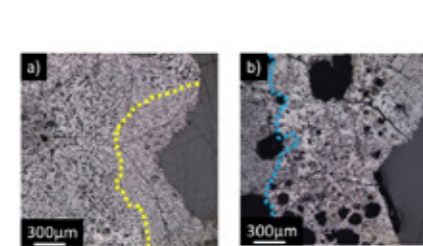


Fig.2 Microstructures of iron ore sinter reduced with high hydrogen concentration under: a) atmospheric pressure and b) 3 atm.

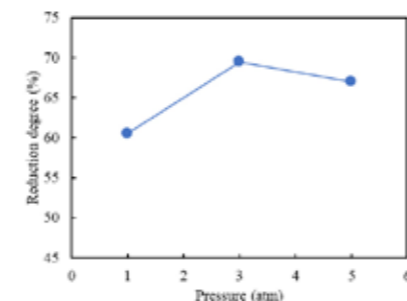


Fig.3 Changes in reduction degree of the iron ore sinter sample with total pressure under a high hydrogen condition.

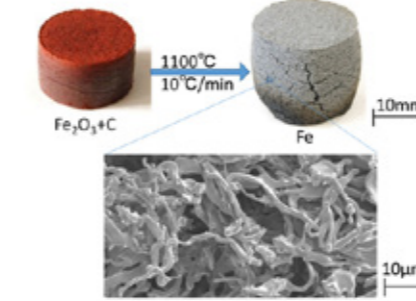


Fig.4 Appearance of the composite fabricated by carbonaceous material and iron oxide before and after reduction and SEM image of the iron whisker.

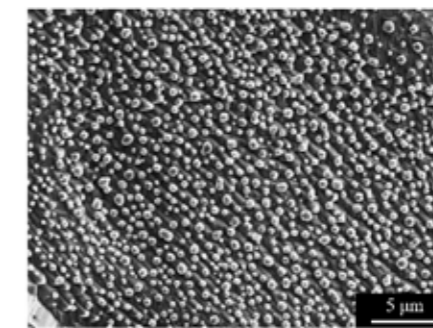


Fig.5 SEM image of wustite samples with NiO addition after reduction for 3 minutes.

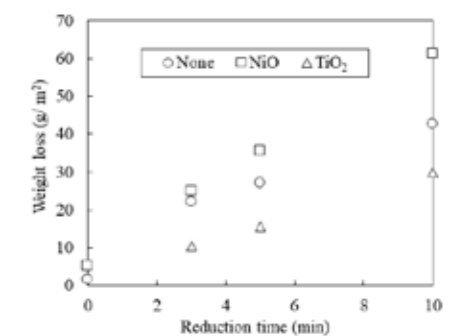


Fig.6 Comparison of changes in weight loss of samples with different additives.

Fig.3 に各焼結試料の重量変化率から算出した還元率に対する圧力の影響を示す。3 気圧で実験した試料の還元率は大気圧に比べて大きい一方で、5 気圧まで全圧を上昇させても顕著な差は見られない。結果として、高水素雰囲気および高圧力条件によって還元が促進されるものの、ある圧力でピークを示すことが明らかになった。

微量元素添加による繊維状多孔質鉄の形態制御

多孔質金属は軽量、高比表面積、高制振性などの特徴を有しているため、衝撃吸収材や電極材料などへ応用されている。鉄鋼系材料は原料が安価であり、鉄鋼系構造材料との接合性に優れるといった利点があるが、安価な製造プロセスは開発されていない。本研究グループでは、特定条件下の還元過程における鉄鉱石ペレット等の異常膨張現象に着目し、酸化鉄の還元を利用することで、高い気孔率を持つ金属鉄材料の作製に成功している (Fig.4)。これまでに酸化カリウム (K₂O) や酸化ニッケル (NiO) などが酸化鉄と共存することで、繊維状鉄組織の形態が大きく異なることを明らかにしている。添加元素の影響を明らかにできれば多孔質鉄の形態制御に寄与するが、還元材を用いた実験では詳細な検討が困難であった。そこで本年は各元素を微量添加した酸化鉄を出発材料とし、それを部分的に還元させた試料 (ウスタイト) をガスによって還元することで、繊維状鉄組織の形態に及ぼす添加元素の影響について調査した。

Fig.5 に NiO 添加試料における 3 min 還元後の SEM 写真を示す。NiO 添加試料では、繊維状鉄の代わりにアスペクト比が約 1 の微細な粒状鉄組織が大量に存在している。一方、酸化チタン (TiO₂) 添加試料では金属鉄の生成が僅かに認められる程度だった。各試料の還元時間に対する重量減少量の変化を Fig.6 に示す。添加した元素によって、単位時間当たりの重量減少量が異なる。傾きは酸化鉄の還元速度を示しており、添加材が大きな影響を及ぼすことが分かる。

Figure 2 shows a comparison of the microstructures of iron-ore sinter after reduction with a high hydrogen concentration at (1) atmospheric pressure and (2) 3 atm. Reduced iron is shown on the right (dashed line). The area that is reduced under high pressure (3 atm) is larger than that under atmospheric pressure. Figure 3 shows the changes in reduction at total pressure and high hydrogen. The degree of reduction in the 3-atm sample is larger than the one at atmospheric pressure. However, the degree of reduction is not significantly different at 5 atm. Thus, increasing the hydrogen concentration and total pressure (reaching a peak at a certain pressure) promotes the reduction of iron-ore agglomerate.

Controlling the morphology of fibrous and porous iron through the addition of minor elements

Porous iron is lightweight, has a large specific surface area, and possesses vibration-damping properties. Therefore, it has been widely applied (e.g., in shock absorbers and electrodes). Porous iron materials are made from inexpensive raw materials and possess good weld-bonding with steel. However, no practical fabrication process has been developed. Our research group has successfully produced high-porosity iron materials via the reduction of iron oxides by applying the abnormal swelling of iron-ore pellets during reduction (Fig.4). A small amount of potassium oxide, nickel oxide, or other substance changes the material's morphology. This year, the group studied the effect that additives have on the morphology of reduced iron via studies of iron-oxide samples comprising wustite (FeO) and minor elements.

Figure 5 is a SEM image of the sample with added NiO after reduction for 3 minutes. The result is the presence of fine iron particles with an aspect ratio of approximately 1 instead of fibrous iron. On the other hand, the sample with added TiO₂ did have a few iron fibers. Figure 6 is a comparison of the weight loss shown in the samples with various additives. The weight loss per unit time differed for each of the samples. The gradient shows the rate of iron-oxide reduction; the minor elements seemed to have a significant influence.