

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リサイクルプロセスに対して、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目的としている。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テーマについて研究を推進している。例えば、高炉製鉄に適した原料予備処理法の検討や、製鉄プロセスからの CO₂ 排出削減、排熱の有効利用等の研究を行っている。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に関する研究開発も行っている。

The laboratory aims to develop innovative technological principles leading to simultaneous achievements of higher process efficiency and lower environmental load in the manufacturing and recycling processes of base materials, which will give significant impacts on our future society. The laboratory investigates a wide range of research from fundamental to practical levels of the ironmaking process (Fig.1); for example, preparation of high-quality burdens of the blast furnace, reduction of CO₂ emissions, and utilization of waste heat. Further, the research and development of the morphology control of fibrous and/or porous metals, heat storage materials using solid phase transformation, and self-healing ceramics are performed.

褐炭を用いた炭材内装鉱の還元機構

高炉では粗鉄 (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いる。原料炭の急激な価格変動と枯渇化は、鉄鋼業にとって深刻な問題である。そのため、低品位 (固定炭素割合が低い) 資源の有効利用が期待されている。中でも褐炭 (Brown Coal, BC) は埋蔵量が極めて多く安価であり、安定供給が期待できる。しかし水分を多く含むため、事前処理を経ない褐炭は還元材としての利用が試みられてこなかった。我々の研究グループでは、褐炭と似た性質を有する未炭化バイオマスと鉄鉱石を用いた炭材内装鉱を調製し、金属鉄への還元成功している。炭材内装鉱とは、Fig.2 に示すように鉱石と炭材の近接配置により低温高速還元を実現する複合原料である。本年は、褐炭を用いて調製した炭材内装鉱の還元実験を通して、その還元メカニズムを明らかにすることを目的とした。

Fig.3 に褐炭 1、2 (BC1、BC2) および原料炭の1つである非微粘結炭 (NC) の 1200°C 到達時還元率に対する Total-C/O (試料中炭素と酸化鉄中酸素のモル比) の影響を示す。還元率とは酸化鉄中の酸素が除去された割合と定義されている。BC1、2とも Total-C/O の増加と共に還元率が上昇している。また同じ Total-C/O では BC の方が NC よりも還元率が高い。別途測定した CO および CO₂ ガス発

Reduction Mechanism of Carbon-Iron Ore Composite Prepared Using Brown Coal

Blast furnace ironmaking mainly utilizes coke, which is made of coal through its carbonization, as a reduction agent and heat source. Drastic price fluctuations and depletion of coking coal are serious issues in the iron and steel industry. Therefore, utilization of a low-grade (fixed carbon ratio is low) source is expected. Brown coal (BC) in particular shows a huge amount of reserves and low price, and thus stable supply can be expected. However, BC contains a large amount of water, and therefore attempts have not been made to utilize it as a reducing agent without pre-treatment. Our research group has succeeded in reduction to metallic iron using carbon-iron ore composite consisting of iron ore and biomass char having similar characteristics with BC. Carbon-iron ore composite is an agglomerated material to achieve rapid reduction at low temperature by proximity arrangement of iron ore and carbonaceous material particles (see Fig.2). In 2019, the carbon-iron ore composite reduction mechanism using BC was investigated through a reduction experiment.

Figure 3 shows changes in reduction degree reached at 1200°C with Total-C/O (Molar ratio of carbon in sample and oxygen in iron oxide) for carbon-iron ore composites using brown coal 1 (BC1), 2 (BC2), and non-coking coal (NC). Reduction degree is defined as the ratio of oxygen removed from iron oxide. Both the BC1 and BC2 samples show that reduction degree increases with increasing Total-C/O. Both samples show a higher reduction degree than the NC sample at the same Total-C/O. The amount

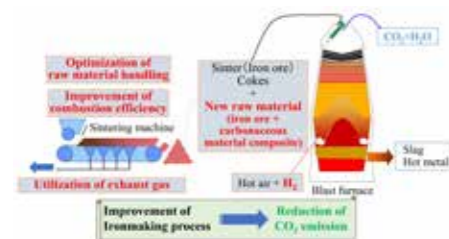


Fig.1 Strategy to reduce CO₂ emissions from the ironmaking processes.

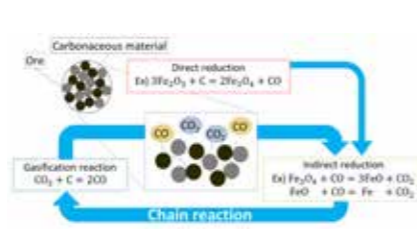


Fig.2 Schematic illustration of concept of carbon-iron ore composites.

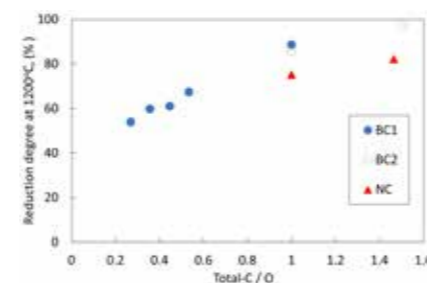


Fig.3 Changes in reduction degree at 1200°C with Total-C/O for carbon-iron ore composites using brown coal 1 (BC1), 2 (BC2) and non-coking coal (NC).

生量は NC と比較して有意な差がみられなかったことから、褐炭を使用した試料では水素還元が起こっていると示唆される。今後は鉄鉱石の還元率に対する揮発成分の影響を定量的に調査する予定である。

充填層内鉄鉱石焼結過程で発生する微小粒子状物質に対する硫黄の影響

PM 2.5 は空気力学的直径 2.5 μm 以下の微小粒子状物質 (PM) として知られている。とりわけ、中国では PM 2.5 の排出が深刻な問題になっており、その主要固定排出源の1つが製鉄所である。中でも鉄鉱石を塊成化させ焼結鉱を製造する焼結プロセスからの発生量は工業由来の排出量全体の 2.6% を占める。日本国内でも年間約 1 億トンの焼結鉱を製造しており、PM 2.5 の発生挙動及び低減に関する検討は重要である。そのためには焼結工程における原料の賦存状態を考慮した基礎的検討が望ましい。主要な凝結材であるコークスには一定量の硫黄が含まれているが、PM 2.5 の発生過程に対する硫黄の影響は検討されていない。そこで本年は焼結プロセスを模擬した装置を用いて PM 2.5 の発生状況を再現し、その発生挙動に対する硫黄の影響について調査した。

PM 2.5 のサンプリングには Fig.4 に示すカスケードインパクトを用いた。カスケードインパクトに導入された排ガス中の粒子は慣性でフィルタに衝突して捕集される。本実験では PM 2.5 を +2.5 μm から -0.25 μm の四段階に分けて捕集した。Fig.5 に -0.25 μm の段階で捕集した粒子の電子顕微鏡画像および元素分析結果を示す。粒子は球状を呈しており、Fe を多く含む粒子と、S、Na および K を含む粒子が認められる。前者は鉄石由来のヘマタイト (Fe₂O₃) を主体とした粒子であると考えられ、後者はアルカリ金属元素と S との硫酸塩が生成されていると考えられる。硫酸塩で形成された粒子のほとんどは -0.25 μm であり、PM 2.5 の中でも小さい粒径となる傾向を示している。今後は鉄鉱石焼結プロセス中の PM 2.5 発生挙動に対する塩素の影響について検討する予定である。

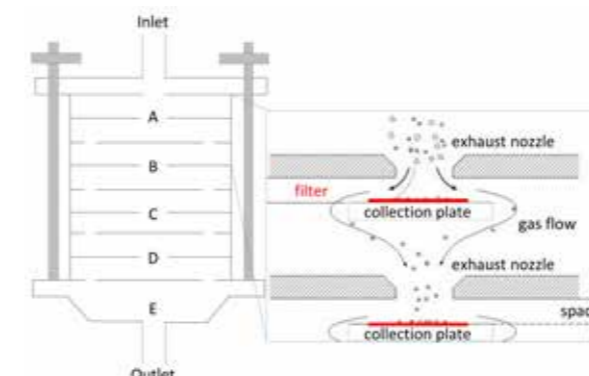


Fig.4 Schematic illustrations of cascade impactor and mechanism of collection of fine particulate matter.

of CO and CO₂ gas from BC samples measured by another method showed no significant difference from the NC sample, therefore hydrogen reduction would occur in the carbon-iron composite including BC. Future work involves a quantitative examination of the influence of volatile matter on the reduction degree of iron ore.

Influence of Sulfur on Fine Particulate Matter Formed During Iron Ore Sintering Packed Bed

PM 2.5 is known as particulate matter (PM) having a mass median aerodynamic diameter less than 2.5 μm and has become a serious issue in China. Chinese steelworks are known as one of the major fixed exhaust sources of PM. In particular, the iron ore sintering process (in which iron ore is agglomerated to fabricate sinter) occupies approximately 2.6% of the total value of the Chinese industrial sector. Japan also produces approximately 100 million t/year, and therefore it is important to investigate PM 2.5 formation and suppression mechanisms. Fundamental research is expected to consider the existing state of raw materials in the sintering process. Although coke is a major agglomeration agent that contains a certain level of sulfur, the influence of sulfur on the PM 2.5 formation process has not been investigated. In 2019, the PM 2.5 formation condition was reproduced using an apparatus to simulate the sintering process, and the influence of sulfur on its formation behavior was investigated.

A cascade impactor was used for the sampling of PM 2.5 as shown in Fig.4. Particles in exhaust gas introduced into cascade impactor collide with the filter by inertial force and are captured. In this experiment, PM 2.5 was collected by dividing four stages ranging from +2.5 to -0.25 μm. Figure 5 shows electron microscope images and elemental analysis of particles collected on the stage of -0.25 μm. The particles show spherical shape and contain Fe and S and Na and K, respectively. It is considered that the former is a hematite (Fe₂O₃) particle originated from iron ore and the latter is sulfuric salt consisting of alkali metallic element and sulfur. Most of the particles containing sulfuric salt are obtained in the stage of -0.25 μm, and these have a tendency to be fine particulate matter in PM 2.5. Influence of chlorine on PM 2.5 forming behavior in the iron ore sintering process will be examined in future.

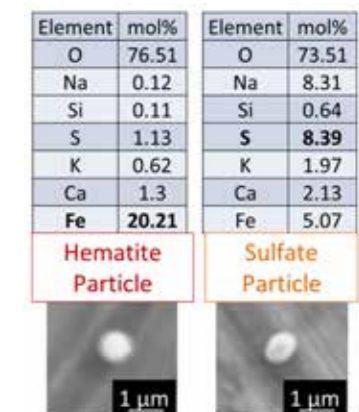


Fig.5 Images of electron microscope and elemental analysis of particles collected on stage of -0.25 μm