

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

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、低品位化、劣質化する製鉄原料への対応技術や、製鉄プロセスのカーボンニュートラル化、微小粒子状物質 (PM2.5) 排出削減等に関する研究を行っている。さらに、多孔質鉄材料の製造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 have significant effects on our future society. The laboratory investigates a wide range of research from fundamental to practical levels of the ironmaking process (Fig.1), such as efficient utilization of low-grade iron ore resources, carbon-neutral ironmaking technologies, and reduction of PM2.5 emissions. Further, the research and development relating the fabrication of porous iron materials and self-healing ceramics are performed.

高炉内融着帯における金属鉄への浸炭促進技術

二酸化炭素排出量抑制への社会的要求を背景に、鉄鋼業における炭素系エネルギー資源の高効率利用が求められている。高炉製鉄法においては、コークスや微粉炭などの炭材は、熱源や還元材としてだけでなく還元で生成した鉄の浸炭のための炭素源としても用いられる。浸炭は鉄の融点を下げスラグと分離させるため、高炉内で重要な現象である。鉄の浸炭では、固体炭素の直接接点による浸炭の方がCOガスによる浸炭よりも浸炭速度が大きいことが知られている。さらに、鉄と浸炭材の直接接点にはスラグの存在が重要とされる。本年は、鉄への浸炭に対する鉄鉱石種および共存するスラグの影響について調査した。

Fig.2 に異なる鉄鉱石を用いた試料の浸炭実験後の外観写真を示す。脈石が比較的多く含まれている鉄鉱石を用いた試料 (High gangue) では、液相となった金属鉄が凝固して生成した粒状金属鉄が認められ、低脈石成分の試料 (Low gangue) よりも浸炭が進行している。High gangue 試料断面の光学顕微鏡観察より、金属鉄と炭材との直接接点が多く見られた。Fig.3 に各スラグ組成を有する試料の浸炭実験後の外観写真を示す。H0 から H15 の数字はスラグ相の割合を示し、スラグ相割合の多い試料の方が粒状金属鉄を多く生成する。また Fig.4 に示す結果から、鉄中の炭素濃度はスラグの SiO₂ および Al₂O₃ 相の割合に比例している。したがって、スラグの割合に

Technology to promote carburization of metallic iron in cohesive zone in blast furnace

Because reduction of carbon dioxide emissions has been required against the current social background, efficient utilization of carbon-based energy resources is needed in the steel industry. In the blast furnaces ironmaking, carbon materials such as coke and pulverized coal are used not only as a heat source and reducing agent, but also as a carbon source for carburizing the reduced iron. Carburizing is an important phenomenon in the blast furnace ironmaking, because it decreases the melting point of reduced iron and separates it from the slag. It was reported that carburization through direct contact with solid carbon is more preferential than that with CO gas. Furthermore, the presence of slag is important for the direct contact between reduced iron and carburizing material. In 2021, the effects of iron ore type and coexistence of slag on carburization behavior were investigated.

Fig.2 shows the appearance of samples made from different iron ores after carburization experiments. The metallic iron in the liquid phase solidifies to form spherical metallic iron particles in high-gangue sample. Carburization proceeds in the sample using iron ores containing relatively high-gangue minerals (high gangue) than in the sample that with low-gangue minerals (low gangue). From the cross-sectional observation of the high-gangue sample using an optical microscope, a high degree of direct contact between the metallic iron and the carbon materials was observed. Fig.3 shows the appearance of the samples with various slag phase contents after the carburization experiment, where the numbers H0 to H15 indicate the slag

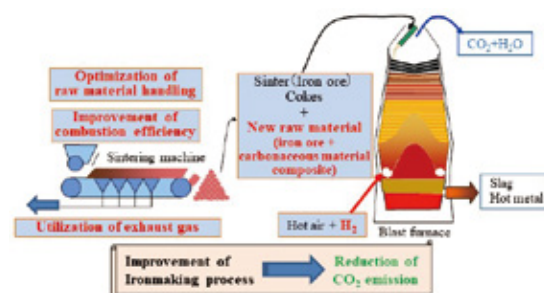


Fig.1 Strategy to reduce CO₂ emissions from the ironmaking processes.

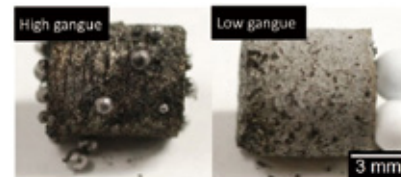


Fig.2 Appearances of the composite using High gangue and low gangue iron ores after carburizing experiment.

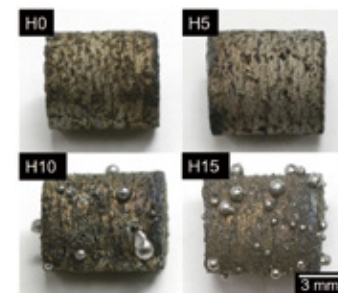


Fig.3 Appearances of the composite (H0, H5, H10 and H15) after carburizing experiment.

対して浸炭が進行し、特に SiO₂ および Al₂O₃ 相の割合に相関があることを明らかにした。

鉄系凝結材の利用による鉄鉱石塊成化プロセスの二酸化炭素排出削減

高炉装入原料である焼結鉄を製造する焼結プロセスでは、凝結材である粉コークスの燃焼に由来する二酸化炭素が大量に排出される。そこで、鉄スクラップをはじめとするリサイクル原料の酸化熱を用いて鉄鉱石を塊成化する手法が提案されている。これらのリサイクル原料は鉄系凝結材と呼ばれているが、使用時の課題として、焼結時の通気性悪化が挙げられる。粉コークスと異なり、鉄系凝結材では酸化反応後も残存し、さらに体積膨張するため通気性悪化を促進させる。加えて、コークスの燃焼により、焼結層中の酸素濃度 (酸素分圧) は大気中よりも低くなるのが予想され、鉄系凝結材の酸化挙動に影響を与える。そのため金属鉄の酸化挙動に対する雰囲気の影響を把握することが重要である。そこで本年は、金属鉄の酸化反応に対する酸素分圧の影響について検討した。

Fig.5 に 1200°C において各雰囲気中で酸化させた金属鉄試料の酸化率を示す。大気中雰囲気 (21% O₂-N₂) で酸化させた試料の酸化率は放物線的に増加する。一方、低酸素雰囲気 (0.01% O₂-N₂) では酸化率は直線的に増加しており、金属鉄表面への酸素の供給が律速していることを示唆する。また N₂ ガスを二酸化炭素に置き換えた雰囲気 (0.01% O₂-CO₂) では、0.01% O₂-N₂ より酸化が促進される。これは CO₂ の分解反応に伴う酸化物 / ガス界面における酸素供給量の増加によるものと考えられる。Fig.6 に 1200°C で酸化中の試料表面のその場観察画像を示す。大気中雰囲気で酸化した試料では、試料表面全体に均一な酸化物層が形成される。一方、低酸素雰囲気で酸化した試料では一部酸化の進行が遅い領域が残存し、凹凸状の酸化層が形成されている。

以上のことから、鉄系凝結材の使用に際して基礎的な知見を得ることができた。

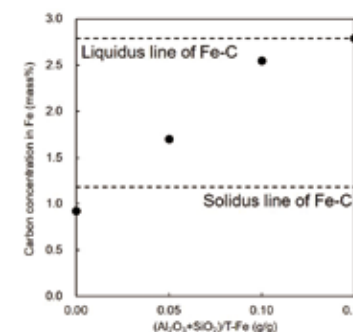


Fig.4 Relation between carbon concentration in metallic iron of the composite after carburizing experiment and gangue content ratio.

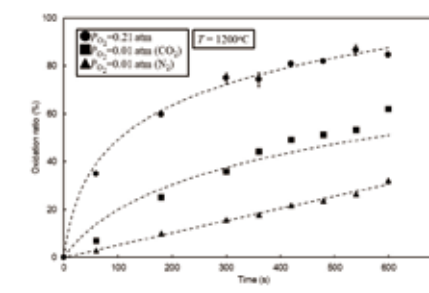


Fig.5 Changes in oxidation ratio of samples with time oxidized at 1200°C.

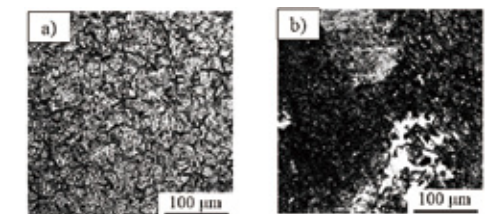


Fig.6 Sample surfaces oxidized under a) 21%O₂-N₂ and b) 0.01%O₂-N₂ at 1200°C.

phase content. The sample with a higher slag phase ratio produces metallic iron particles that are more spherical. Furthermore, the carbon concentration in the iron is proportional to the SiO₂ and Al₂O₃ phase contents as shown in Fig.4. Therefore, it is clear that the carburization progresses faster relative to the percentage of slag, especially SiO₂ and Al₂O₃ phases.

Reduction of carbon dioxide emission for iron ore agglomeration process by using iron-bearing materials

In the sintering process to produce sintered ore, a large amount of carbon dioxide is emitted by the combustion of coke. Therefore, a method to agglomerate iron ore that uses the oxidation heat of iron-bearing materials such as iron scrap has been proposed. One of the issues in their usage is the degradation of air permeability during sintering. Unlike coke, the iron-bearing materials remain after the oxidation reaction and they expand, which accelerates the degradation of air permeability. In addition, the oxygen concentration (oxygen partial pressure) in the sintering bed is expected to be lower than that in the air due to the combustion of coke, which affects the oxidation behavior of the iron-bearing materials. Therefore, it is important to understand the effect of atmosphere on the oxidation behavior of metallic iron. In 2021, the effect of partial oxygen pressure on the oxidation of metallic iron was investigated.

Fig.5 shows the oxidation rates of metallic iron samples oxidized at 1200°C in various atmospheres. The oxidation rate of the samples oxidized in the air atmosphere (21%O₂-N₂) increases parabolically. On the other hand, the oxidation rate linearly increases in a low-oxygen atmosphere (0.01% O₂-N₂), suggesting the supply of oxygen to the metallic iron surface controls the rate. The oxidation rate of the sample oxidized in the low-oxygen with carbon dioxide condition (0.01% O₂-CO₂) is more accelerated than it is at 0.01% O₂-N₂. This result indicates that oxygen supply is increased in the oxide/gas interface by the CO₂ decomposition reaction. Figure 6 shows in situ images of the sample surface during oxidation with different partial oxygen pressure at 1200°C. The oxide layer is uniformly formed on the sample surface oxidized in air. On the other hand, oxidation progress is slow in a part of the sample oxidized in a low-oxygen atmosphere, resulting in the formation of an uneven oxide layer.

Finally, basic knowledge on the utilization of iron-bearing materials is obtained.