

二酸化炭素分離回収に関する研究	
題目	鉄鋼スラグを用いたカーボンリサイクルの研究
著者	早稲田大学 中垣隆雄

1. 研究概要

2019 年度に経済産業省において、CO₂を資源化するカーボンリサイクルの技術ロードマップが策定された。鉄鋼業では、2030 年頃の早期普及を目標に製鉄所の副生成物である鉄鋼スラグを用いたカーボンリサイクルの実現が掲げられた。鉄鋼スラグを用いて CO₂を鉱物化し骨材等で利用する本プロセスは、低炭素製鉄プロセスの実現後も削減困難な石灰石熱分解に起因する CO₂排出量の削減に加えて、利益創出も可能である。また、水素利用を必要とする他の技術に先駆け、水素に依存しない早期確立技術としてカーボンリサイクルを先導することも期待できる。CO₂ 鉱物化は鉄鋼生産後に副生されるスラグと排ガスを利用した気固反応であるため、現行の製鉄プロセスに影響がなく実現可能性が高い（図 1）。

しかし、課題としてスラグの CO₂ 鉱物化速度が遅いことが挙げられる。そこで本研究では、CO₂ 鉱物化速度向上を目的に、プロセス設計に取り組んだ。また、現行の製鉄所の CO₂削減技術と比較するため、正味 CO₂削減量のライフサイクル評価をした。

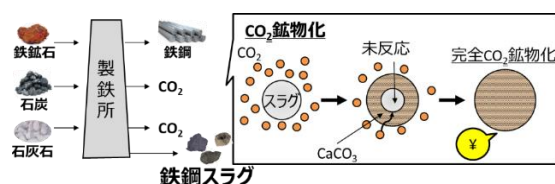


図 1 製鉄所と CO₂ 鉱物化の簡略図

2. 研究成果と今後の研究展開

(1) CO₂ 鉱物化速度向上を目的としたプロセス設計

溶融状態から超徐冷したスラグの CO₂ 鉱物化特性を予測したところ、凝固速度の低下に伴い、結晶化度の増加、拡散係数が大きいケイ酸カルシウム含有量の増加および結晶粒サイズの増大により、CO₂ 鉱物化量・速度が向上した。ケイ酸カルシウムが生成可能な凝固速度で冷却した場合、現行の自然冷却のスラグに対して CO₂ 鉱物化速度が約 10⁴ 倍程度速くなると予測された。そこで、伝熱解析による凝固速度模擬により高炉スラグのケイ酸カルシウム生成に要する凝固時間を算出し、凝固スラグの超徐冷率の評価を可能とした。次に、蓋つき容器を用いた超徐冷システムの設計のため、冷却条件に対する超徐冷率をシミュレーションで求めた（図 2）。追加のエネルギーが不要な超徐冷率増加方法として、0.1 m 程度までの

スラグ厚さの増大が有効であった。一方、スラグ厚さが増大すれば、完全凝固時間も増加してシステム効率が低下するため、超徐冷率とシステム効率はトレードオフの関係となる。また、容器初期温度が高いほど超徐冷率は増加するが、追加の熱エネルギーも必要となるため、その削減を目的に、スラグ回収後の容器残留熱の利用を検討した。スラグ厚さ 0.1 m、容器初期温度 650 °C の場合、追加の熱が不要な操作で超徐冷率 87% のスラグの連続生成が可能であった。

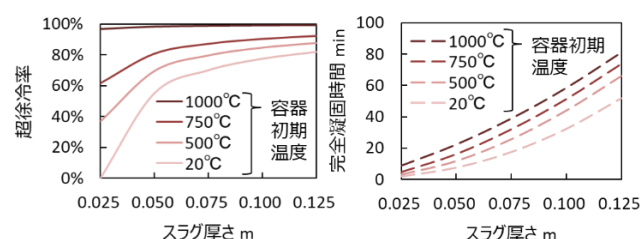


図 2 冷却条件に対する超徐冷のシミュレーション結果

(2) 正味 CO₂ 削減量のライフサイクル評価

高炉スラグ微粉末（Ground Granulated Blast furnace Slag, 以下 GGBS）は、セメント業で利用されている普通ポルトランドセメント代替による有効利用に加えて、セメント業の焼成由来の CO₂ 排出量削減に貢献している。そのため、超徐冷した高炉スラグ（Slow Cooled Blast furnace Slag, 以下 SBS）を用いたカーボンリサイクルプロセスの正味 CO₂ 削減量をライフサイクル評価した（図 3）。現行の GGBS プロセスの正味 CO₂ 削減量と比較したところ、SBS プロセスは GGBS プロセスに対して 32.6 kg/t-cement の CO₂ 削減となることが分かった。

次に、投入エネルギーの電力化、CCS 適用およびエネルギー転換部門の再生可能エネルギー適用を将来のシナリオとして想定し、感度分析を実施した。その結果、将来のシナリオでは前述の正味 CO₂ 削減量が 352.3

kg/t-cement と 10 倍以上に拡大した。したがって、GGBS から SBS へのプロセス転換は、今後の正味 CO₂ ゼロ化に大きく貢献する可能性が示唆された。

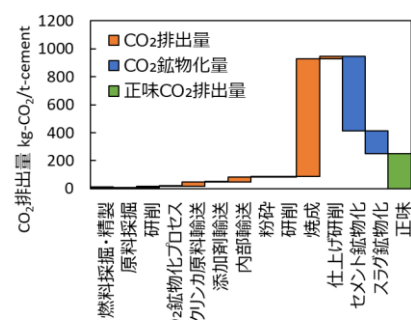


図 3 SBS プロセスの評価結果