

修士論文概要書

Master's Thesis Summary

Date of submission: 01/17/2023

専攻名 (専門分野) Department	総合機械工学専攻	氏名 Name	阿久津 洸	指導 教員 Advisor	中垣 隆雄
研究指導名 Research guidance	エクセルギー工学	学籍番号 Student ID number	CD 5221B004-1		
研究題目 Title	鉄鋼スラグの CO ₂ 鉱物化速度向上に関する研究 ～超徐冷電気炉スラグの実装型 CO ₂ 鉱物化プロセス設計～				

1. 緒言

国内における 2050 年カーボンニュートラル達成に向けて、CO₂ を資源化するカーボンリサイクルが注目され、2030 年までの短期目標として、大規模 CO₂ 排出源である鉄鋼業において副生する鉄鋼スラグの約 10% を炭酸塩化することが掲げられている。鉄鋼スラグの CO₂ 鉱物化は、水素不要な単純な気固接触反応により骨材等の高付加価値製品を製造することから早期普及が見込める。一方で、鉄鋼スラグの CO₂ 鉱物化速度が遅いことが技術課題として挙げられる。本研究では、CO₂ 鉱物化速度の向上を目的とし、①熔融スラグの超徐冷、②凝固スラグの研削、③気固接触による CO₂ 鉱物化の 3 つの工程からなる超徐冷スラグの CO₂ 鉱物化プロセス (図 1) を設計している。本研究では、鉄鋼スラグのうち、電気炉スラグを対象とし、技術実装に向けて工程①および③のプロセス設計を実施した。

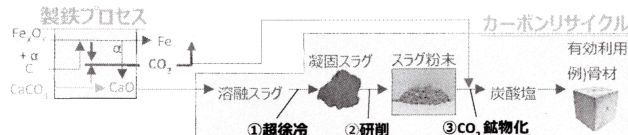


図 1 超徐冷スラグの CO₂ 鉱物化プロセス

2. 電気炉スラグの超徐冷工程の設計

昨年度までに本研究では、熔融スラグの熱物性値および Time-Temperature-Transformation (TTT) 線図が推算可能な Deep Neural Network (DNN) および熱履歴および TTT 線図から結晶構造を判別し、熱物性値を更新することでスラグ凝固時の伝熱計算が可能な凝固伝熱モデルが構築された。本年度は、電気炉スラグ模擬材を対象に炉冷、2°C/min の 2 つの冷却条件の凝固試験を実施し、得られる凝固速度・温度に対する生成鉱物相の予測・分析値の比較および CO₂ 鉱物化特性の評価を通して、鉱物化の速度向上を見込める超徐冷工程の条件を探索した。

核生成遅延時間が非常に小さい電気炉スラグでは、図 2 に示すように冷却条件・スラグ位置ごとで凝固開始温度に差異が生じないことから、冷却条件・スラグ位置ごとで生成鉱物相の定性・定量値に差異は生じなかった。一方で、CO₂ 拡散係数が大きい Ca₂SiO₄ (C₂S) の結晶構造が冷却速度に依存せずスラグ位置ごとで異なり、ひけ果が生成する中央部では γ -C₂S、上部の雰囲気界面では β -C₂S が生成することが分かった。また、生成鉱物相の定性・定量値の分析値とシャイル・ガリバーモデルによる予測値は概ね一致することから、電気炉スラグの生成鉱物相は同モデルにより予測可能と判断した (図 3)。

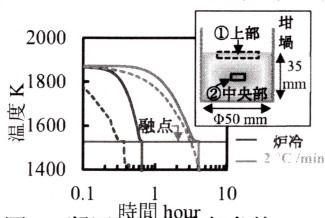


図 2 凝固試験の冷却条件・スラグ位置ごとの伝熱解析結果

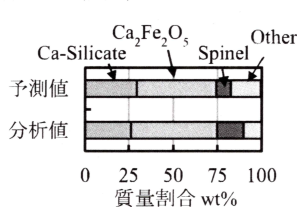


図 3 電気炉スラグの生成鉱物相の分析・予測

CO₂ 鉱物化試験を実施し、冷却条件・スラグ位置ごとの CO₂ 鉱物化特性を、未反応核モデルより実験的に算出される CO₂ 拡散係数として評価した。結果を図 4 に示す。図 5 のように凝固

時間の増加に伴う結晶サイズの増大が確認された一方で、冷却速度が大きい炉冷試験においても結晶化および ML 抑制のための結晶サイズ増大に十分な徐冷環境であったことから、冷却速度の低下に伴う CO₂ 拡散係数の向上は見られなかった。一方で、 γ -C₂S 含有量の増加に伴う CO₂ 拡散係数の向上が確認され、生成する C₂S の結晶構造が電気炉スラグの CO₂ 鉱物化速度向上のための支配的な要因であることが示唆された。

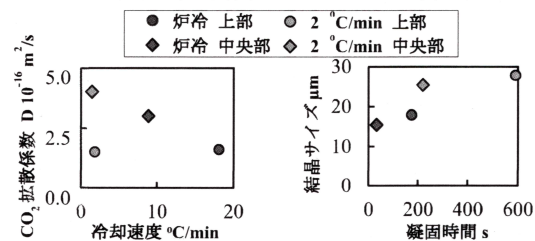


図 4 CO₂ 拡散係数の評価結果

図 5 凝固時間に対する結晶サイズ

CO₂ 鉱物化速度向上を目的とした超徐冷工程を探索すべく、 γ -C₂S の生成条件を調査した。凝固後の密度差により β -C₂S から γ -C₂S への相転移に伴う体積膨張の有無に差異が生じると考えられることから、 γ 相生成のための容器条件等を検討した。

3. 実装型 CO₂ 鉱物化反応器の設計

製鉄所への導入を想定する加湿フード付きコンベア反応器の設計のため、スラグ粉体を積層させた条件下での CO₂ 鉱物化挙動をシミュレーションする数値計算モデルの構築を実施した。粉体積層条件下の CO₂ 鉱物化モデルを図 6 に示す。本モデルでは、粉体積層高さ方向の CO₂ の輸送は拡散のみとし、サブグリッドスケールにおいて単粒子内での CO₂ 拡散・反応を考慮した。

また、CO₂ 鉱物化の進行に伴う粒子膨張に起因する粉体積層内の粒子間の空隙構造・比表面積の変化も考慮した。

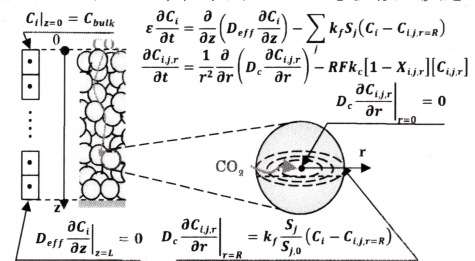


図 6 数値計算のモデル図

粉体積層条件下の CO₂ 鉱物化モデルにより、CaSiO₃ 積層時の CO₂ 鉱物化挙動を予測した。実験値と比較した結果を図 7 に示す。粉体積層高さ 3 mm の予測結果は、実験値を概ね模擬したのに対し、粉体積層高さが増加した場合に、CO₂ 鉱物化速度を過小評価することが分かった。本モデルにより粉体積層条件下の CO₂ 鉱物化における律速条件等の整理を実施し、予測の高度化を目指した。

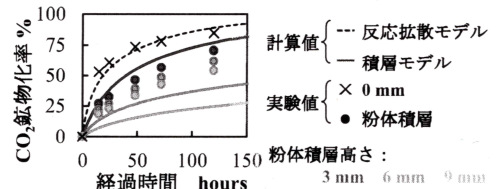


図 7 粉体積層時の CO₂ 鉱物化の予測・実験値