

2025年1月提出

学籍番号 54230017-4

研究科	環境・エネルギー	氏名	齊藤颯汰	指導 教員	中垣隆雄
研究指導	エクセルギー工学				
研究 題目	鉄鋼スラグのCO ₂ 鉱物化速度向上に関する研究 -電気炉スラグ含有の有価鉱物相の収率向上策の提案-				

1. 緒言

国際的な対策が急務となっている地球温暖化について、主要因となる温室効果ガスの90%以上を占めるCO₂の排出量削減が求められる。日本では2050年までに温室効果ガスの正味排出量をゼロとするカーボンニュートラルの実現目標、産業としての成長およびCO₂排出量の削減が期待できる14の分野についての具体的な実行計画としてグリーン成長戦略を設定した。重要分野の一つとして、CO₂を資源として捉えて分離・回収し、鉱物固定化・人工光合成法・メタネーション等の方法で大気中への排出を抑制することで、CO₂削減と同時にコンクリート・化学品・燃料など多様な製品製造による利益創出が可能なカーボンリサイクル技術が注目されている。経済産業省により策定されたカーボンリサイクル技術ロードマップにおいて、製鉄プロセスで副生する鉄鋼スラグや廃コンクリートなどの産業副産物を用いてCO₂を自発的に進行する気固接触により鉱物化し、骨材等の有価物として利用可能な炭酸塩鉱物を製造するカーボンリサイクル技術は、水素利用を必要としないことから、カーボンリサイクルを先導する技術として早期での普及実現が掲げられている。

2022年度において国内のCO₂総排出量に対する産業部門の排出量は約39%を占め、産業内における鉄鋼業の排出量は約39%となり産業種別で最大となっている^[1]。図1に示す通り、鉄鋼スラグを用いたカーボンリサイクルは、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由来のCO₂排出を削減可能であることから、国内のCO₂排出量削減に対する量的寄与が大きい技術として期待される。一方、現時点での技術課題としてCO₂鉱物化速度が遅いことがあり、その向上が求められている。

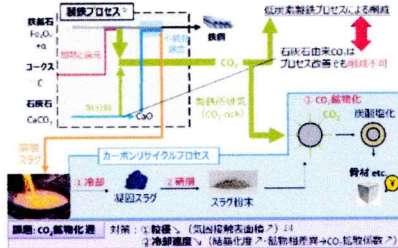


図1. 鉄鋼スラグのCO₂ 鉱物化フロー

鉄スクラップから鋼鉄を生成するプロセスである電気炉製鋼法において生成される電気炉スラグは、鉄スクラップを原料とすることから多くの元素を含有しており、再利用方法が限定的である。従って、電気炉スラグを用いたカーボンリサイクルプロセスは、他スラグを用いた場合に比べ付加価値の向上という観点で優位性がある。本研究では、電気炉スラグに含まれる有価物の収率向上方法について検討した。

2. 電気炉スラグにおける生成鉱物相についての調査

図2に示すように、昨年度までに本研究室にて実施した電気炉スラグ模擬材の熱処理試験において、既にコンクリート混和剤として実用化されCO₂排出量削減に貢献可能な有価物であるγ-Ca₂SiO₄(γ-C₂S)がスラグ中央部に生成したことを掴んでいる。これを踏まえ、電気炉スラグにおけるγ-C₂Sの収率向上について調査した。

図3に示すように、電気炉スラグ模擬材について、異なる雰囲気下で熱処理を実施したサンプルの汎用X線回折を実施したところ、大気雰囲気下で実施したサンプルの上部についてのみC₂Sの結晶構造が異なり、他サンプルに比べγ-C₂Sに対しβ-C₂Sが多く生成していることが確認された。溶融スラグ中に溶解するガスの主成分がN₂、H₂、CO₂、COであり^[3]、凝固試験において電気炉スラグ模擬材は最初に上部が凝固することから、γ-C₂Sの収率増

加は大気中に含まれるO₂を避けた環境に起因することが推測された。また、スラグ凝固にO₂が関与するとした場合の電気炉スラグ模擬材の生成鉱物相予測を熱力学平衡計算ソフト FactSageを用いて実施したところ、凝固点付近でC₂Sおよびその周辺物質の結晶構造が異なっていた。



図2 電気炉スラグ模擬材

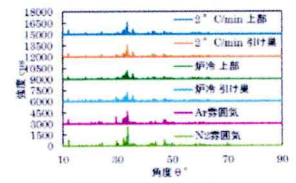


図3 電気炉スラグ模擬材のXRD分析結果

3. 体積変化を考慮した凝固伝熱モデルの構築

2022年度までに本研究室では、溶融スラグの熱物性値およびTime-Temperature-Transformation (TTT) 線図を機械学習により取得可能なDeep Neural Network (DNN)^[2]、および熱物性値・TTT線図を用いて伝熱計算によりスラグポット内温度分布、凝固・融解の判定および結晶・アモルファスを判定する凝固伝熱モデル^[3]が構築された。ただし、スラグが冷却・凝固する過程で体積が変化することや、電気炉スラグ模擬材において中央部に生成した引け巣が体積変化に起因するものであると推測されたことから、今年度は体積変化を考慮した凝固伝熱モデルを構築した。

図4に示すように、各タイムステップにおいて、スラグ容器中各コントロールボリューム(CV)に含まれる溶融スラグの密度変化の分だけ隣接するCVからの流入があるとし、上側にあるスラグCVについては、下側にあるすべてのCVの密度変化を受けることを考慮したうえで、同様に流入を適用した。

図5および6に体積変化考慮および従来モデルによる凝固伝熱モデルを用いた温度履歴を推算した結果を示す。同図より、従来と最大で21.67 Kの温度推算値の差異が生じた。また、体積変化の縮小は最上部凝固後に生じるため、内部で引け巣が生成する条件を満たしている。このことから、スラグ内圧の低下による凝固収縮の影響が生じている可能性がある。

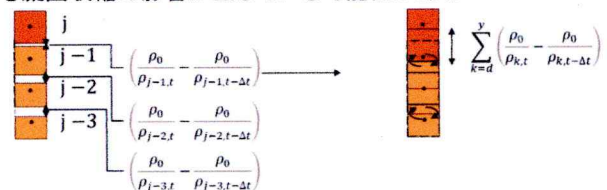


図4. 体積変化考慮凝固伝熱モデルのモデル図

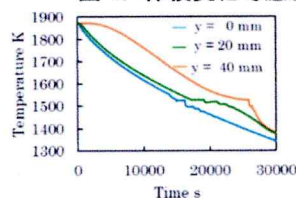


図5 体積変化考慮凝固伝熱モデルによる温度履歴推算結果

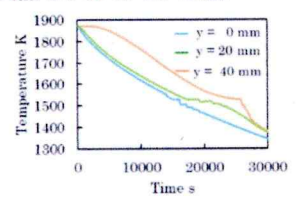


図6 従来の凝固伝熱モデルによる温度履歴推算結果

[1] 国立環境研究所, 日本の温室効果ガス排出量データ (1990~2020年度) 概観報
 [2] 2019年度 博士論文 Corey A. Myers
 [3] 2021年度 修士論文 龍川純