

修士論文概要書

Summary of Master's Thesis

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	片岡 亮馬	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	5221B029-8		
研究題目 Title	修正 Rist モデルを適用した酸素高炉による炭素循環製鉄の解析				

1. 緒言

鉄鋼業は日本全体で排出される温室効果ガスのうち 14% の割合を占める最大の排出源であり、2050 年カーボンニュートラルの達成に向けて低炭素製鉄プロセスの開発が重要課題となっている。日本鉄鋼連盟の長期温暖化対策ビジョンでは水素製鉄や COURSE50 などの技術が取り上げられているが、本研究ではその中でも高炉ガスと外部水素から還元材を合成して再度高炉に吹き込む炭素循環製鉄を対象として解析を実施した。炭素循環製鉄の構想には、従来高炉において羽口から吹き込む空気を純酸素に転換した酸素高炉が適している。酸素高炉では羽口先酸素濃度の上昇によって還元材吹き込み量の拡大が可能となるほか、高炉ガス中の窒素がなくなることによってガス分離プロセスを介さずに還元材合成ができるなどの利点がある。本研究では酸素高炉および還元材合成プロセスを Aspen Plus によってモデリングし、メタン、メタノール、DME の 3 種類を合成還元材としたケースで一貫製鉄所全体の CO₂ 排出量とエクセルギー有効率を算出し、それらの有効性を比較検討した。

2. 修正 Rist モデルの酸素高炉への適用

還元材吹き込み量を変えたときの高炉の原料投入量を算出するため、炉下部の部分熱物質収支モデルである Rist モデルを用いた。

Rist モデルでは図 1 のように還元材パラメータに対応した高炉操業線の傾きと切片からコークス比と送風原単位が算出できる。昨年度までは Rist による原著を小野が和訳した文献^[1]を参考に計算していたが、Bailera によって原著の誤りの修正および計算法の拡張がなされ^[2]、本年度はその修正、拡張事項を計算モデルに反映した。溶銑とスラグの顕熱は原著の近似式に誤りがあったため、NIST の物性値に基づく式に変更した。コークス中の水素は原著の計算法では考慮されておらず、対応する項を熱収支式、物質収支式に追加して計算アルゴリズムの再構築を行った。

修正 Rist モデルで得られた原料投入量をもとに、図 2 に示す酸素高炉モデルのプロセスフローダイヤグラム(PFD)を用いて高炉に関する全ての入出力フローをシミュレーションした。炉下部での各反応

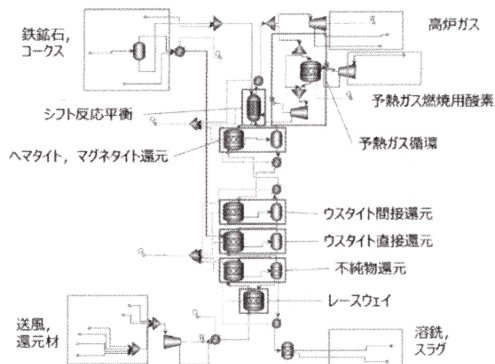


図 2 酸素高炉モデルの PFD

は修正 Rist モデルで得られた転化率を指定し、炉上部では鉄鉱石のウスタイトまでの還元と炉内ガスのシフト反応平衡を指定した。従来高炉と比較して、酸素高炉では炉内ガス量の減少による炉上部での固体原料予熱不足が懸念されるため、対策として炉頂ガスの一部を燃焼させて再度炉内に吹き込む予熱ガス循環を追加した。

3. 還元材合成プロセスのモデリング

メタン、メタノール、DME それぞれの合成プロセスモデルを Aspen Plus 上に構築し、水素投入量および所要動力を算出した。代表としてメタノール合成モデルの PFD を図 3 に示す。それぞれのモデルの合成反応器のスペックはパイロットプラントを参照して決定した。水素投入量は高炉ガス中の CO、CO₂ と量論比となるように指定した。いずれのモデルにおいても還元材精製時のオフガスは合成反応器にリサイクルした。

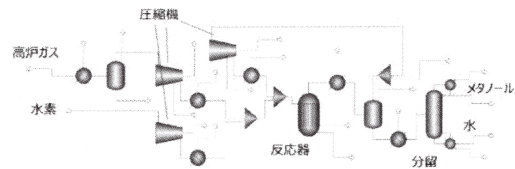


図 3 メタノール合成モデルの PFD

4. 解析結果

メタン、メタノール、DME それぞれについて、羽口先温度(TFT)制約および羽口先酸素過剰率(ExO₂)制約からなる操業可能範囲を図 4 のように求めた。操業可能範囲の 4 つの頂点のうち、カーボンリサイクル(CR)による CO₂ 削減効果が最も高いと考えられる諸元 B について、一貫製鉄所全体の炭素収支および

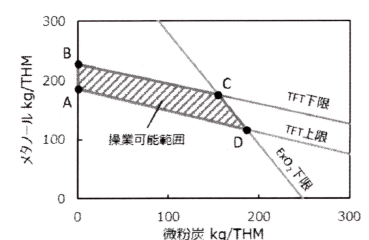


図 4 微粉炭—メタノール吹き込み操業可能範囲

CO₂ 排出量を図 5 のように算出した。CR 無しのケースの CO₂ 排出量はメタン、メタノール、DME でそれぞれ 1.90、2.16、2.01 t/THM となり、メタノールと DME では現行製鉄所の 1.95 t/THM から悪化した。一方、CR 有りのケースではそれぞれ 1.48、1.84、1.53 t/THM と、いずれの還元材でも 6~24% 程度の CO₂ 削減効果が確認された。エクセルギー有効率に関しては CR 無しでそれぞれ 44.9、45.8、44.8% と現行製鉄所の 46.1% より低い値となった。CR 有りで水電解および合成プロセスでのエクセルギー損失の影響でそれぞれ 31.7、35.1、32.7% まで減少した。

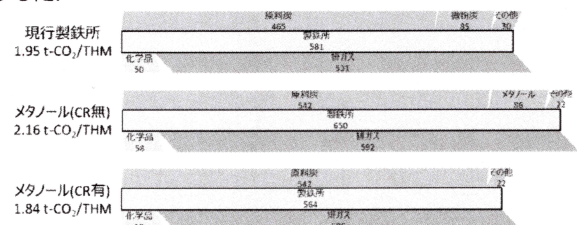


図 5 メタノール諸元 B の炭素収支および CO₂ 排出量

[1] 小野陽一, Rist 操業線図(III), 鉄と鋼, Vol. 79, No. 10, p. 711-715, 1993

[2] M. Bailera, et al., Revisiting the Rist diagram for predicting operating conditions in blast furnaces with multiple injections, Open Research Europe, 1:141, 2021