



高炉内ホールドアップとガス透過率の関係，並びに 材料評価から得られる特殊鋼の安定生産に向けた充 填層小型化モデルの研究

メタデータ	言語: eng 出版者: 公開日: 2021-06-23 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: シアハーン, アンドレイ ステファン メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15118/00010399

氏 名 SIAHAAN ANDREY STEPHAN(シアハン アンドレイ ステファン)

学位論文題目 Study on the relationship of particle hold-up and gas permeability in blast furnace by using miniaturized packed bed model to maintain stable production of special steel from the view point of material assessment
(高炉内ホールドアップとガス透過率の関係、並びに材料評価から得られる特殊鋼の安定生産に向けた充填層小型化モデルの研究)

論文審査委員 主査 教授 河合 秀樹
教授 藤木 裕行
教授 寺本 孝司

論文内容の要旨

「高炉」や「転炉」は製鉄プロセスの要であり、高炉においては鉄の熔融と還元を同時に処理し、短時間に銑鉄を大量生産できる優れた装置である。しかし高炉で消費されるエネルギーは全プロセスの70%であると言われ、また発生するCO₂の発生量も膨大であるなど大きな問題も発生している。一方、特殊合金鋼を生産する転炉でも、回収スクラップによるリサイクル率の大幅なアップや、スラグからの有用成分の効率的な回収など、より複雑なプロセス制御が要求されており、少量高品質化と省エネルギー化を狙ったプロセス革新は、激変する製鉄業界にあって期待度が高い。

高炉等の充填粒子内においては、微粒子によるガス流路の閉塞トラブル「bridge(棚吊り)」が最も多く、安定操業に大きな支障を来している。充填粒子間の空気の透過性と微粒子による閉塞過程については、従前より充填粒子と微粒子の粒径比が関与する可能性を示唆してきたが、その検証には膨大な実験を必要とした。本研究では、DEM-CFD(粒子-流体連成解析法)による三次元コンピューターシミュレーションを新たに導入し、閉塞の起点と予想されていた「粒径比0.11前後」についてケーススタディを徹底的に検証して、そのメカニズムを明らかにした。また空気流動と微粒子の落下現象がオリフィス部で拮抗する複雑な現象をシンプルな実験装置によりモデル化し、実験と数値シミュレーションが整合することも明らかにした。これより、閉塞の起因を粒子群の複雑な流動化の中から見出したことは大きく、より確度の高いシミュレーション技術を進めることができ、小型炉のプロセス検討に向けて大きな前進に繋がったと言える。

一方、転炉では、最近注目度の高い「二相ステンレス鋼(SUS821L1)」の生産プロセスを取り上げ、その熔融段階での改良を最終材料の強度評価から提案する方法を試みた。二相ステ

ンレス鋼は異なる性質の二相が同時に存在するため熔融段階での温度制御は複雑であり、更には一度スラグ化した酸化クロムを回収して再還元化する必要もあって、粒子やガス流の反応制御も難しい。本論文では材料強度の評価実験として準静的から衝撃の範囲までの引張試験を実施し、一例として低温領域(273K~233K)の準静的引張で、マルテンサイト変態による加工硬化挙動が顕著に発生することを捉えた。これより、新素材でも Ni 当量から材料物性を制御できる可能性を示唆した。

以上本論文は熔融炉における粒子挙動や流体の特徴的な流れを把握し、また特殊合金鋼の生産プロセスの処方箋を最終材料の特性から導くなど、前工程のプロセスオペレーションに関して新展開法を提供した功績は大きい。

ABSTRACT

"Blast furnaces" and "converters" are the key technology of the iron-making process. In blast furnaces, iron is melted and reduced at the same time, and it is an excellent device that can mass-produce pig iron in a short time. However, enormous amount of the energy consumed by the blast furnace about 70% of the total process, and generated CO₂ become major problems. Moreover, in the converters for special alloy production, proper control is required due to complicated process and significant increase in the recycling rate of recovered scrap and useful components from slag. Thus, process innovation of energy saving is highly expected in the rapidly changing steel industry.

Among the filled particles in a blast furnace, the most serious problem is "bridge", which is blocking the flow channel and hinder the gas permeability due to the fine particles accumulation that disturb the stable operation. From the previous study, the fine to packed bed particle size ratio is related to the start of the blockage. However, a huge amount of experiment was required to verify it.

In this study, three-dimensional computer simulation using DEM-CFD (Particle and Fluid Dynamics), already verified the previous study of "particle size ratio around 0.11" as the starting point of occlusion. Moreover, this study also modeled a phenomenon in which air flow and falling particles antagonize at the orifice by using a simple experimental device, where the experiment and numerical simulation are consistent. The blockage mechanism was understood even in the complicated fluidization of the particle swarm, which led to a great progress toward the process study of designing a small furnace.

Also, in the converter, this study took up the production process of "duplex stainless steel (SUS821L1)", which increase in demand recently. Duplex stainless steel has two phases with different properties thus required complicated temperature control at the melting stage. Moreover, it is necessary

to recover and reduce chromium oxide from the slag, which makes more difficult control.

In this study, a tensile test from quasi-static to impact range is carried out as an evaluation of material strength. As an example, work hardening behavior due to martensitic transformation is remarkable in quasi-static tensile in the low temperature region (273K to 233K), which suggests that the material properties may be able to control from Ni equivalents.

This paper provided a new development method for the process operation to understand the particle behavior and the gas flow characteristic in the melting furnace, and deriving the method of the production process of special alloy steel from the characteristics of the final material.

論文審査結果の要旨

製鐵産業を支える「高炉」は前工程の要であり、鉄の熔融と還元を同時に処理し、短時間で高純度の銑鉄を大量生産できる優れた装置である。しかし操業エネルギーの60%以上が高炉で消費され、またそれに伴って発生するCO₂量も膨大である。グローバル競争下の製鐵業界にあって、生産コストの軽減化と省エネルギー化、そして環境対策は重要な課題である。

これに伴い、ステンレス鋼など少量で高付加価値の特殊鋼を、小型炉で前工程から、あるいは転炉の改造によって、より一元生産する試みも検討されている。本論文では特殊鋼の中でも注目される「二相ステンレス鋼」について、将来の「小型高炉や転炉内の粒子や混相流の流体挙動と、それが最終製品の材料特性に与える影響」を把握することを目的に、それぞれのキーポイントに焦点を当てて基本特性を調べた。

二相ステンレス鋼はオーステナイト相とフェライト相の二相が同時に存在するため、両相の特徴を享受できる反面、生産工程での温度制御は複雑であり、またクロムなどの添加物粒子の配合も高炉や転炉の熔融段階で調整する必要があり、その炉内流動挙動は基本から把握する必要がある。一方、最終製品の材料特性も、二相のミクロ分布と加工時の材料特性、更には溶接時の強度特性を把握する必要があるが、いずれもあまりよくわかっていない。

本論文では、粒子-流体の挙動が同時に解析できる「DEM-CFD三次元コンピューターシミュレーション」を新たに導入し、高炉内充填粒子の閉塞起点を調べた。また狭路部(オリフィス)モデルを使って気流と粒子落下の拮抗する複雑な現象をよりシンプル化させて解析することにより、複雑な炉内粒子挙動を、より高精度で予測できるシミュレーション技術を確立した。これは、小型炉のプロセス研究に向けた

膨大な実験を大幅に節減でき、小型炉など新たな生産プロセスの構築に大きな前進をもたらしたと言える。その成果はISIJ-Internationalに2報の論文として投稿され掲載されている。一方、二相ステンレス鋼(SUS821L1)の材料強度の評価実験に関しては、準静的から衝撃までの引張試験を行い、低温領域でマルテンサイト変態に起因する加工硬化挙動の特徴を明確に捉えた。

以上、本論文は、一貫生産に向けた小型高炉の設計法、並びに特殊鋼の基礎的な材料特性などが示され、今後の特殊鋼生産プロセスの方向性に少なからず寄与する指針が提示されたことから、工学博士の学位を授与できる水準にあると判断される。