

## 審査の結果の要旨

氏名 岡山 敦

本論文は、製鋼プロセスにおける溶鋼注入時の鋼のガス吸収挙動を取り扱った研究に関するものであり、水モデル、溶鋼実験、数値計算を組み合わせた手法により、注入現象に関する理解を深めるとともに、溶鋼注入プロセスにおける鋼のガス吸収挙動に及ぼす種々の支配因子を定量的に明らかにすることを目的としている。

第1章は序論である。鋼の精錬中の窒素濃度の変化、特に出鋼時の吸窒挙動、解析に適用可能な混合律速モデル、物質移動および化学反応速度定数に関する既往知見をレビューするとともに、これまで調査、解析されていない課題やその背景についてまとめ、本研究の目的を述べている。

第2章では、水モデル実験を行い、注入時のガス吸収挙動、注入時のガス吸収挙動に及ぼす雰囲気ガス濃度の影響、注入に伴う滝壺形成とガス吸収挙動解析、の3項目について検討を行っている。

注入時のガス吸収挙動については、転炉から取鍋への溶鋼出鋼時に生じる取鍋内での窒素吸収挙動を模擬し、予め溶存酸素濃度を低下させた低酸素水を、上容器（転炉を模擬）から、下容器（取鍋を模擬）に注入し、その際の溶存酸素濃度の経時変化を連続測定し解析を行っている。注入に伴うガス吸収挙動を明らかにし、その挙動は、注入に伴うエネルギーに基づいて報告された容量係数の推定式および上容器からの低酸素水による希釈を考慮した推定式を用いて再現できることを確認している。この結果、注入位置が高く、ノズル径が大きい条件ほどガス吸収速度は大きくなるが、注入速度を増大させることでガス吸収量が低減することを示している。

注入時のガス吸収挙動に及ぼす雰囲気ガス濃度の影響については、前述の水モデル実験装置を用いて、雰囲気ガスの濃度を任意に調整した状態で、注入による溶存酸素濃度の経時変化を連続測定することで検討を行い、雰囲気中のガス濃度の低減により注入に伴うガス吸収量が低減し、吸ガス容量係数と希釈を考慮した推定式により現象を再現できることを示している。また、注入時には容器外からの気相流入が生じており、滝壺へも供給されていることが判明し、

この時の滝壺部および自由表面でのガス濃度を測定することにより、滝壺部、自由表面におけるガス濃度の経時変化を推定できる関係式を構築している。

注入に伴う滝壺形成とガス吸収挙動解析にあたっては、計算流体力学 (CFD) を使った気液界面積の算出を試み、その妥当性を確認するため、注入に伴って滝壺に巻き込まれるガス体積を実験的に評価したところ、流体のボイド率 $F$ を 0.5 に設定することで実験結果を概ね整理できることが確認された。また、滝壺での気泡を介したガス吸収時の物質移動係数  $k_{m,B}$  と底吹き実験から算出した物質移動係数  $k_{m,B}$  の両者を攪拌動力密度 $\epsilon$ で説明し、水-空気系と溶鋼-空気系での CFD 結果の比較により、滝壺部では断続的に比較的大きい気泡が生成していることを示している。

第 3 章では、溶鋼への窒素ガス吹込み時の窒素吸収挙動の解析を、実験を通して行った。気泡界面および自由表面からの窒素吸収速度を評価した。実験装置およびガス吹込み条件を種々変更して攪拌動力密度 $\epsilon$ を変えるとともに、物質移動と化学反応の混合律速モデルを使った解析を試みている。CFD を用いた解析により、底吹き実験における気泡表面の面積  $A_B$  および自由表面の面積  $A_F$  を求め、底吹き実験結果を物質移動、化学反応の混合律速モデルで解析し、気泡表面と自由表面の物質移動係数  $k_{m,B}$  および  $k_{m,F}$  を算出している。 $k_{m,B}$ 、 $k_{m,F}$  はそれぞれ攪拌動力密度 $\epsilon$ の 0.60 乗、0.63 乗で整理でき、その結果は既往研究から考えられる範囲内であることを確認している。

第 4 章では、高周波誘導炉から捨て型もしくは取鍋に溶鋼を出鋼する際に、受鋼容器内の溶鋼を連続採取する溶鋼実験を行い、出鋼時の吸窒挙動を明らかにした。水モデルおよび溶鋼実験、数値解析結果をもとに、出鋼時の吸窒挙動を解析可能な混合律速モデルを構築するとともに、物質移動係数  $k_{m,B}$  を攪拌動力密度 $\epsilon$ の関数として定式化し、出鋼時の窒素濃度推移を再現できることを確認している。この手法を用いて 100 トン規模の転炉からの出鋼中の窒素濃度推移を推定し、吸窒抑制には出鋼末期に脱酸剤を添加することが有効である一方、滝壺部分の窒素分圧を低減することで Al 脱酸鋼の吸窒量を 0.0005 mass% 以下に低減するには、窒素分圧を 0.19 atm まで低減する必要性が示された。

第 5 章は結論であり、第 1 章から第 4 章を総括するとともに、本研究の工学的意義について述べている。

以上のように、本研究では出鋼中の窒素挙動に及ぼす種々の支配因子の影響を明らかにするとともに、低窒素鋼溶製に対する指針を示しており、マテリアル工学分野における貢献も大きい。

よって本論文は博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。