

学 位 論 文 題 名

ステンレス鋼精錬工程の効率化 及び高純度化技術に関する研究

学位論文内容の要旨

ステンレス鋼は高耐食性材料として、化学プラント材等の産業用機械器具や電気機械器具、厨房・台所器具、自動車用部品、建設用材料等の用途に広く用いられている鋼材であり、今後もステンレス鋼の需要は世界的にも増大することが予測されている。

ステンレス鋼精錬の効率化は生産コストの低減のみならず、環境問題の観点からも極めて重要な課題である。ステンレス鋼の精錬方法は、鉄よりも酸素との親和力が高いクロムを多量に含有し、さらにクロムにより溶鋼中[C]の活量が低下するといった平衡論的特徴があるにもかかわらず、クロムの酸化損失を抑制した脱炭精錬を行う必要があるといった冶金的困難さがある。さらに、ステンレス鋼の吹酸脱炭精錬は数多くの操業要因が絡み合った複雑な系であるため、吹酸脱炭中のクロム酸化を抑制し優先脱炭を確保するためには、極めて高精度な精錬制御技術確立する必要がある。

また、溶鋼の極低炭素化に代表される高純度のニーズは、ステンレス鋼のみならず、一般の炭素鋼（普通鋼）においても高く、例えば自動車用鋼板等に代表される薄板製品の場合には、加工性が重要であり、C、N、O、P、S等の低減が要求されている。中でもC、Nの低減が必須であり、これらの元素含有量が低ければ低いほど加工性が向上し、TiやNbといった合金の添加量を少なくすることが可能となる。

このような背景の下、最近では自動車用鋼板等の需要増加に伴う極低炭素鋼溶製の効率化に関する技術開発が盛んに行われているが、RHに代用される脱ガス炉における環流量増大や槽内大量Ar吹き込みなどの脱炭速度向上策はいずれも大量の溶鉄の飛散（スプラッシュ）を誘発し、槽内地金付着などの操業上の問題点がある。

このような背景の下、本研究では、ステンレス鋼精錬プロセスの更なる効率化、及び、ステンレス鋼を含めた溶鋼の高純度鋼溶製技術のより一層の向上を達成するための指針を見いだすことを目的として行った。本論文は4章から構成され、それぞれの概略は以下のとおりである。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的を明らかにした。

第2章では、主にステンレス鋼の転炉精錬技術に関する研究結果を、第3章では、減圧下での二次精錬技術において、ステンレス鋼のみならず一般の普通鋼を含めた高純度化精錬技術に関する研究結果をまとめた。

第2章の第1節は、ステンレス鋼の転炉精錬反応における総合反応モデル化に関する研究であり、供給される酸素の脱炭とクロム酸化バランスに関して反応サイトを上吹き火点、底吹き火点に加え、バルク反応を考慮した新たな精錬指標の導出を行った。さらに、この新精錬指標を適用

し炉内の物質バランス、熱バランスを考慮した精錬制御モデルを構築し、吹錬過程における溶鋼成分や温度のみならず、スラグ組成の高精度な予測を可能とした。

第2章第2節は火点発光分光スペクトル分析を利用した転炉吹錬中の $[Cr]$ 濃度のオンライン分析に関する研究であり、従来の $[Mn]$ オンライン分析技術に対して測光系の改良や、データ処理・解析法の改良により、高 $[Cr]$ 濃度域においても $[Cr]$ オンライン分析技術の高精度化を達成し、吹錬中の $[Cr]$ 濃度をリアルタイムでモニタリング可能な技術を確立した。

第2章第3節は Cr_2O_3 含有スラグの溶鉄中炭素によるクロム還元速度に関する研究であり、70kg 規模の実験により、種々のスラグ組成変更によるクロム還元速度に対する Cr_2O_3 含有スラグの融体化効果を検証し、 Al_2O_3 の適量添加によりクロム還元速度の向上と耐火物溶損抑制効果両立の可能性を見出した。さらに計算熱力学プログラム：SOLGASMIX による解析にて実験結果の定量評価を行った。

第2章第4節はスラグ存在下における浴内混合評価に関する研究結果であり、水-油系の水モデル実験により上層として粘性の異なるシリコンオイルやn-ペンタンを添加し、それぞれの場合において吹き込みガス流量や上層厚みの浴内混合挙動に対する影響を調査した。

第3章はいずれも減圧下取鍋精錬による溶鋼の高純度化精錬技術に関する研究である。

第3章第1節はステンレス鋼のVOD脱炭精錬の反応機構及び底吹き条件の最適化に関する研究であり、脱炭反応モデル解析による脱炭領域別各反応サイトの寄与割合の特定し、吹酸停止後の脱ガス期においては表面脱炭が主体であることを明らかにした。さらに、実機試験結果の解析や水モデル実験によるスラグ排除の効果を検証した。

第3章第2節では、ステンレス鋼のVOD精錬反応について、従来のモデルで検討されている脱炭反応に加え、さらに脱窒反応を考慮し、溶鋼側、ガス側の物質移動と化学反応の混合律速を考慮した反応モデルを作成し、極低炭かつ極低窒素ステンレス鋼の溶製方法を検討した。

第3章第3節はガスの吸収及び放出現象を利用した自由表面での気液反応速度の評価に関する研究であり、水モデルによる酸素-水系、小型溶解炉による窒素-溶鋼系での実験により、減圧下精錬での脱ガス反応の主要反応サイトである自由表面の反応速度に対する諸因子の影響を評価するとともに、底部から吹き込まれたガス気泡の表面での広がり領域で定義される気泡活性面の重要性を示唆した。さらに、気泡活性面積、ガス流量、雰囲気圧力、ガス吹き込み深さ等を考慮した、新たな表面反応速度の定量的な評価指標を導出した。

第3章第4節は、表面反応を最大限に活用可能な脱ガス方式として、底吹き攪拌と大径浸漬槽を組み合わせた、新形状脱ガス炉(RED A)の開発に関する研究であり、気泡活性面の広域形成が可能なRED Aでは極めて少量の吹き込みガス流量にて短時間にて $[C] \leq 10\text{ppm}$ の極低炭素鋼の溶製が可能であることを実機レベルにて検証した。さらに実機試験結果を基に、RED Aにおける脱炭反応の支配因子を検討し、脱炭初期においては溶鋼の環流比と真空排気速度が支配的であり、脱炭末期においては環流比と表面脱炭が主な支配因子であることを明らかにした。

第4章では今回の研究を総括するとともに、今後の研究課題について言及した。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	井 口	学
副 査	教 授	石 井	邦 宜
副 査	教 授	篠 原	邦 夫
副 査	教 授	荒 井	正 彦
副 査	助教授	木 内	弘 道

学 位 論 文 題 名

ステンレス鋼精錬工程の効率化 及び高純度化技術に関する研究

ステンレス鋼は高耐食性材料として、化学プラント材等の産業用機械器具や電気機械器具、厨房・台所器具、自動車用部品、建設用材料等の用途に広く用いられている鋼材であり、今後もステンレス鋼の需要は世界的にも増大することが予測されている。

ステンレス鋼精錬の効率化は生産コストの低減のみならず、環境問題の観点からも極めて重要な課題である。ステンレス鋼の精錬方法は、鉄よりも酸素との親和力が高いクロムを多量に含有し、さらにクロムにより溶鋼中[C]の活量が低下するといった平衡論的特徴があるにもかかわらず、クロムの酸化損失を抑制した脱炭精錬を行う必要があるといった冶金的困難さがある。さらに、ステンレス鋼の吹酸脱炭精錬は数多くの操業要因が絡み合った複雑な系であるため、吹酸脱炭中のクロム酸化を抑制し優先脱炭を確保するためには、極めて高精度な精錬制御技術を確立する必要がある。

また、溶鋼の極低炭素化に代表される高純化のニーズは、ステンレス鋼のみならず、一般の炭素鋼(普通鋼)においても高く、例えば自動車用鋼板等に代表される薄板製品の場合には、加工性が重要であり、C, N, O, P, S等の低減が要求されている。中でもC, Nの低減が必須であり、これらの元素含有量が低ければ低いほど加工性が向上し、TiやNbといった合金の添加量を少なくすることが可能となる。

このような背景の下、最近では自動車用鋼板等の需要増加に伴う極低炭素鋼溶製の効率化に関する技術開発が盛んに行われているが、RHやVODに代表される脱ガス炉における環流量増大や槽内大量Ar吹き込みなどの脱炭速度向上策はいずれも大量の溶鉄の飛散(スプラッシュ)を誘発し、槽内地金付着などの操業上の問題点がある。

そこで本研究では、ステンレス鋼精錬プロセスの更なる効率化、及び、ステンレス鋼を含めた溶鋼の高純度鋼溶製技術のより一層の向上を達成するための指針を見いだすことを目的として行った。本論文は4章から構成され、それぞれの概略は以下のとおりである。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的を明らかにしている。

第2章では、主にステンレス鋼の転炉精錬技術に関する研究結果を、第3章では、減圧下での二次精錬技術において、ステンレス鋼のみならず一般の普通鋼を含めた高純度化精錬技術に関する研究結果をまとめている。第2章の第1節は、ステンレス鋼の転炉精錬反応における総合反応モデル化に関する研究であり、供給される酸素の脱炭とクロム酸化バランスに関して反応サイトを上吹き火点、底吹き火点に加え、バルク反応を考慮した新たな精錬指標の導出を行っている。さらに、この新精錬指標を適用し炉内の物質バランス、熱バランスを考慮した精錬制御モデルを構築し、吹錬過程における溶鋼成分や温度のみならず、スラグ組成の高精度な予測を可能としている。

第2章第2節は火点発光分光スペクトル分析を利用した転炉吹錬中の $[Cr]$ 濃度のオンライン分析に関する研究であり、従来の $[Mn]$ オンライン分析技術に対して測光系の改良や、データ処理・解析法の改良により、高 $[Cr]$ 濃度域においても $[Cr]$ オンライン分析技術の高精度化を達成し、吹錬中の $[Cr]$ 濃度をリアルタイムでモニタリング可能な技術を確立している。

第2章第3節は Cr_2O_3 含有スラグの溶鉄中炭素によるクロム還元速度に関する研究であり、70kg規模の実験により、種々のスラグ組成変更によるクロム還元速度に対する Cr_2O_3 含有スラグの融体化効果を検証し、 Al_2O_3 の適量添加によりクロム還元速度の向上と耐火物溶損抑制効果両立の可能性を見出した。さらに計算熱力学プログラム：SOLGASMIXによる解析にて実験結果の定量評価を行っている。

第2章第4節はスラグ存在下における浴内混合評価に関する研究結果であり、水-油系の水モデル実験により上層として粘性の異なるシリコンオイルやn-ペンタンを添加し、それぞれの場合において吹き込みガス流量や上層厚みの浴内混合挙動に対する影響を調査している。

第3章はいずれも減圧下取鍋精錬による溶鋼の高純度化精錬技術に関する研究である。第3章第1節はステンレス鋼のVOD脱炭精錬の反応機構及び底吹き条件の最適化に関する研究であり、脱炭反応モデル解析による脱炭領域別各反応サイトの寄与割合の特定し、吹酸停止後の脱ガス期においては表面脱炭が主体であることを明らかにした。さらに、実機試験結果の解析や水モデル実験によるスラグ排除の効果を検証している。

第3章第2節では、ステンレス鋼のVOD精錬反応について、従来のモデルで検討されている脱炭反応に加え、脱窒反応を考慮し、溶鋼側、ガス側の物質移動と化学反応の混合律速を考慮した反応モデルを作成し、極低炭かつ極低窒素ステンレス鋼の溶製方法を検討している。

第3章第3節はガスの吸収及び放出現象を利用した自由表面での気液反応速度の評価に関する研究であり、水モデルによる酸素-水系、小型溶解炉による窒素-溶鋼系での実験により、減圧下精錬での脱ガス反応の主要反応サイトである自由表面の反応速度に対する諸因子の影響を評価するとともに、底部から吹き込まれたガス気泡の表面での広がり領域で定義される気泡活性面の重要性を示唆した。さらに、気泡活性面積、ガス流量、雰囲気圧力、ガス吹き込み深さ等を考慮した、新たな表面反応速度の定量的な評価指標を導出している。

第3章第4節は、表面反応を最大限に活用可能な脱ガス方式として、底吹き攪拌と大径浸漬槽を組み合わせた、新形状脱ガス炉(RED A)の開発に関する研究であり、気泡活性面の広域形成が可能なRED Aでは極めて少量の吹き込みガス流量で短時間に $[C] \leq 10\text{ppm}$ の極低炭素の溶製が可能なことを実機レベルで検証した。さらに実機試験結果を基に、RED Aにおける脱炭反応の支配因子を検討し、脱炭初期においては溶鋼の環流比と真空排気速度が支配的であり、脱炭末期においては環流比と表面脱炭が主な支配因子であることを明らかにしている。

第4章では今回の研究を総括するとともに、今後の研究課題について言及している。

これを要するに著者は、ステンレス鋼のみならず普通鋼を含めた高純度化精錬に関する反応

モデルの構築，計測技術の開発を行うとともに，この成果を基にして新しい精錬プロセスの開発を成し遂げたものであり，鉄鋼精錬工学のみならず、材料工学分野に対しても貢献するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。

以上