

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 樋口 善彦

溶鋼処理プロセスでは、(1)鋼の極低炭素化、(2)溶鋼加熱、(3)鋼中介在物の組成制御、(4)再酸化による介在物生成の抑制、が重要な課題である。これらはいずれも溶鋼と雰囲気、スラグ、介在物との間の複雑な異相間反応が関与したものである。これらの反応を制御することは、鋼材品質の改善、生産コストの低減に直接つながる。

本論文は、溶鋼処理プロセスを制御するための反応モデルを述べたものである。各処理プロセスで生じる溶鋼と異相との反応に関わる反応モデルを流動条件を考慮しつつ構築し、これらの反応を定量的に評価することにより最適な操業条件を設定する方法を見いだしたもので全7章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景、溶鋼処理プロセスの反応モデルに関する従来の知見および本研究の目的を述べている。溶鋼処理プロセスの反応モデルについては従来から提案されているが、反応を支配する因子の特定が十分でなく、各因子の影響も定量化されているとは言い難い。本論文においては、種々の支配因子の影響を明確化し、反応モデルを構築した。そのモデルを用いて、反応を精度よく制御することに主眼を置いたことを示している。

第2章では、極低炭素鋼の生産という観点から、RH (Ruhlstahl-Heraus) と呼ばれる溶鋼環流型の真空脱ガス装置を用いた真空脱炭プロセスを対象に検討を行った。その結果、処理初期の非定常状態における環流速度は従来の知見よりも小さいことを確認した。また、溶鋼側物質移動、気相側物質移動および化学反応を律速過程と仮定すると脱炭反応速度が説明できないことから、脱炭挙動を内部脱炭に着目した解析を行い、溶鋼中炭素濃度、酸素濃度および真空度が脱炭速度に及ぼす影響を定式化した。環流速度と真空槽内脱炭挙動に関するこれらの解析に基づいて処理全期の脱炭反応を記述する反応モデルを構築した。このモデルにより真空脱炭時の成分挙動を精度よく予測できることを明らかにした。モデルは真空脱ガス装置の排気能力の影響を定量的に評価でき、排気設備の設計指針を与えることが可能となった。

第3章では、取鍋内溶鋼をガス攪拌しつつ酸素ガスを上吹きする溶鋼加熱プロセスにおいて、上吹きした酸素と溶鋼中 Al, Si, Mn との反応を検討し、上吹き酸素ガスの吹き付け条件と取鍋内溶鋼の攪拌条件を考慮した反応モデルを構築した。その結果、上吹き酸素ガスのジェットが形成する溶鋼表面のへこみ深さの増加、あるいは、攪拌ガス流量の増加により Al 燃焼効率が向上すること

を明らかにし、最適な操業条件の提示を可能とした。Alよりも酸素との親和力の小さいSi, Mnの酸化反応がAlが共存する状態で進行する理由は、反応帯におけるAl濃度が局部的に著しく低下することで説明できることを明らかにした。さらに、この反応モデルを用いると酸素ガス上吹き後の溶鋼中成分を高い精度で予測可能であることを確認した。

第4章では、耐水素誘起割れ鋼に要求される介在物の無害化処理を対象に溶鋼へCaを添加する実験を行い、介在物組成に及ぼす添加方法や溶鋼条件の影響を検討した。Caの添加の後、溶鋼中Caの蒸発反応、溶鋼中Caと介在物との反応、溶鋼中Sと介在物などの反応が進行する。これらを考慮した反応モデルを構築した結果、Alを用いた事前脱酸により塊状のAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>であった介在物は溶鋼へのCa添加によって、その組成がCaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>あるいはCaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaSへ変化することを示した。実験結果と反応モデルを比較し、蒸発反応の律速過程は気相側物質移動ではないこと、溶鋼と介在物との反応は介在物内物質移動律速であることを、推定した。反応モデルは溶鋼量ならびにCa添加方法、溶鋼成分に関わらず介在物組成を精度よく予測でき、Ca添加処理プロセスの制御が可能であることを明らかにした。

第5章では、鑄造中において溶鋼中Alがスラグあるいは雰囲気中の酸素源と反応してAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系介在物を生成するという溶鋼の再酸化反応を対象に検討を行った。再酸化反応速度に及ぼす流動および雰囲気、スラグ条件の影響を調査し、これらを考慮可能な反応モデルを構築した。その結果、物質移動係数は表面流速と関連づけられ、この関係を用いて鑄造待ちおよび鑄造中の取鍋内での再酸化挙動を明らかにした。さらに、溶鋼流動と雰囲気中酸素による再酸化反応を考慮したタンディッシュ内溶鋼を対象とした反応モデルを構築し、鑄造全期にわたる溶鋼中成分変化および再酸化反応に及ぼす影響を要因別に定量化可能であることを示した。その結果、再酸化量を抑制するためには、まず取鍋内溶鋼上のスラグ中(FeO)+(MnO)を低減することがもっとも有効であることを明らかにした。

第6章では、各溶鋼処理プロセスに適用した反応モデルをまとめ、その意義について述べた。本研究で対象とした反応はいずれも異相間の反応であり、物質移動速度および化学反応速度に基づくモデリングとともに、溶鋼内での循環や混合を考慮した流動モデルとの結合が重要である。反応モデルの意義としてはプロセス特性の把握と操業因子の最適条件の提示による操業指針を与えること、設備改造の際の設計指針を与えること、などの工業的な意義があげられる。さらに、真空脱炭プロセスと酸素による溶鋼加熱プロセスについて、現状の精錬性能を超えた新たなプロセスの提案を行い、反応モデルが新しいプロセスの探査にも有効であることを示した。

第7章は、本論文の総括である。

以上を要するに、本論文は、溶鋼処理プロセスの溶鋼と異相との反応を流動を考慮して検討することで反応プロセスの制御手法を確立したものであり、金属精錬工学の発展に寄与するところが大きい。よって本論文は博士(工学)学位請求論文として合格と認められる。