

氏 名	峠 竹 弥
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 62 年 7 月 8 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 39 年 3 月 東北大学工学部金属工学科卒業
学 位 論 文 題 目	AOD 法および VOD 法によるステンレス鋼製造プロセスの制御に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 萬谷 志郎      東北大学教授 大森 康男 東北大学教授 徳田 昌則

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 I 章 緒 言

日本のステンレス鋼生産量は、1959年当時はわずか10万トン程度であったが、広幅ゼンジミア圧延機を中心とする近代的生産方式の相次ぐ導入や折から開発されたVOD法（Vacuum Oxygen Decarburization Process, 西独Witten社開発, 1967）やAOD法（Argon Oxygen Decarburization Process, 米国Union Carbide社開発, 1968）等の製鋼プロセスを導入することにより飛躍的に増大した。1970年には米国を抜いて世界一になり、1976年には年産200万トンを越えるにいたった。

しかし、VOD、AOD法とも、ステンレス鋼溶製の革新的な技術であり、従来の脱炭限界を突き破るものであるが、脱炭反応機構を十分に解明して開発されたものでなく、また溶鋼中の炭素濃度、および溶鋼温度の推移が操業上非常に重要であるにもかかわらず正確に予知して操業を制御しているとは言い難い。

そこで、ステンレス鋼の脱炭反応挙動を実験室規模で研究し、その知見をもとにして操作量や外乱の変化に対する脱炭プロセスの挙動を予知できる数学モデルを導出しVOD、AOD法の精錬特性およびプロセス制御の諸要因を明らかにする研究を行った。またステンレス鋼の主要な脱酸反応である珪素脱酸平衡、それにおよぼす耐火物材質やスラグ塩基度の影響について研究した。

## 第Ⅱ章 ステンレス鋼の脱炭反応挙動および脱窒反応挙動に関する実験的研究

ステンレス鋼の脱炭反応機構を把握し、脱炭プロセスの数学モデル導出の資料とするため真空誘導炉で種々の酸化性ガス、酸化鉄による脱炭実験、大気誘導炉でArガスを吹込みスラグ中の $\text{Cr}_2\text{O}_3$ によるAr脱炭、脱窒実験を行い以下のことを明らかにした。

1) 初濃度0.2～0.3% $\underline{C}$ のステンレス溶鋼に $\text{O}_2$ あるいは $\text{Ar}-\text{O}_2$ のような酸素ポテンシャルの高いガスを吹つけ、または吹込んで脱炭する場合にはいったんFe、Crの酸化物が生成し、これらの酸化物が酸素供給の媒体となって脱炭が進行する。

2) 酸化物層が形成されてからはこの酸化物層から溶鋼への酸素の供給過程、とくに溶鋼側の $\underline{O}$ の物質移動が脱炭反応を律速する。 $\underline{C} < 0.08\%$ の低炭素域では溶鋼側の $\underline{C}$ 物質移動律速である。

3) 溶鋼表面あるいは溶鋼中への酸化性ガスの上吹き、吹込みなど供給方法によってCrの酸化の程度に顕著な差異が認められたが、脱炭反応機構は本質的には同じもので酸化物を介して脱炭反応は進行する。

4)  $\text{CO}_2$ のような酸素ポテンシャルの低いガスを溶鋼表面へ吹きつけた場合、脱炭反応は広い流量範囲でガス側の物質移動律速である。

5) クロムを含むステンレス鋼の場合も、Ar脱窒反応速度は $\underline{N}$ に関する2次式で表されガス/溶鋼界面における窒素分子の生成反応が律速と考えられた。

## 第Ⅲ章 ステンレス鋼の脱酸挙動

ステンレス鋼の脱酸には、珪素が広く使用されている。AOD、VOD法などの炉外精錬ではAr攪拌によりスラグ/メタル攪拌が十分になされ、珪素脱酸能におよぼすスラグの影響は大きいものと考えられるが明らかでない。そこで、ステンレス鋼の珪素脱酸の基礎実験を行い、珪素脱酸能に及ぼす耐火物材質、スラグ塩基度の影響を $a_{\text{SiO}_2}$ で評価し次の結果を得た。

1) ステンレス組成における珪素脱酸平衡の実験式を求めた。

2)  $\text{CaO}$ 、 $\text{CaO}-\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}-\text{CaF}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{ZrO}_2$ 等の各種坩堝を用いて珪素の脱酸力を比較した。 $\text{CaO}$ 系坩堝は、 $a_{\text{SiO}_2} = 0.002 \sim 0.02$ と、珪素の脱酸力を著しく増加させる。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 坩堝は、 $a_{\text{SiO}_2} = 0.12 \sim 0.55$ とその影響は比較的小さい。 $\text{MgO}$ 、 $\text{ZrO}_2$ 坩堝はそれぞれ、 $a_{\text{SiO}_2} = 0.02 \sim 0.1$ 、 $0.03 \sim 0.09$ でありこれらの中間に位置した。

3) ステンレス鋼における珪素脱酸平衡におよぼす $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 飽和系スラグの影響については、 $a_{\text{SiO}_2}$ と% $\text{CaO}$ /% $\text{SiO}_2$ の関係で示した。塩基度が大きくなるほど $a_{\text{SiO}_2}$ は小さくなり、3.0以上ではほぼ一定で $a_{\text{SiO}_2} = 0.03 \sim 0.04$ となった。

## 第Ⅳ章 AOD法における脱炭工程の数学モデルとプロセス解析

AOD炉内の反応を、第Ⅱ章において明らかにした脱炭、脱窒反応機構に基づいて以下のようにモデル化し数式表現を行った。

1) モデル： 複数の羽口から吹込まれた精錬ガスは気泡を生成し、 $\text{O}_2$ は直ちにC、Si、Mn、

Cr を酸化する。酸化物は気泡とともに浮上しその過程で、Mn, Cr の酸化物は  $C, Si$  によって還元される。未還元酸化物はスラグ相へ移る。O<sub>2</sub> の稀釈ガスとして N<sub>2</sub> を使用する場合は吸窒反応、Ar ガスを使用する場合は脱窒反応が進行する。数式表現にあたって、次の項目を考慮した。

a) ガス吹込み時の羽口近傍における反応

CO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, SiO<sub>2</sub> の生成。

生成速度：吹精の O<sub>2</sub> 量を各元素の反応界面への物質移動速度に応じて分配。

b) 気泡浮上過程の反応

Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO の  $C, Si$  による還元および吸窒または脱窒。

還元速度：溶鋼側の  $Q$  (低炭素域では  $C$ ) の物質移動律速、競合反応指数導入。

吸窒速度： $Q, S$  の影響を考慮した総括物質移動係数を用いた 1 次式。

脱窒速度：萬谷らの脱窒速度定数を用いた 2 次式。

c) 溶鋼重量、組成および溶滓重量、組成の経時変化

スラグ相へ移行した Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と Fe の置換反応による FeO の生成。

溶鋼側、溶滓側物質収支より溶鋼組成および溶滓組成変化を、反応熱、投入材の溶解熱、AOD 炉からの熱損失を考慮した熱収支より温度変化を求める。

2) 導出した数学モデル①の AOD 実機操作による検証：4 個のパラメータ (羽口近傍における Si, Mn, Cr の酸化および吹込み O<sub>2</sub> の効率に対して) を導入することによって、吹錬条件、炉体形状の異なる実機操作をシミュレートできた。図 1 は、その一例で、実測値と計算値はよい一致を示した。

3) 実プロセスと等価となった数学モデルにより AOD 操作の解析を行い標準操作モデルを作り実機でテストし良好な結果を得た。AOD 操作において重要な溶鋼温度制御に必要な冷材投入操作の管理、ガス比の選択、およびその切り替え時期、終点の温度、 $C$  を制御できる事がわかった。

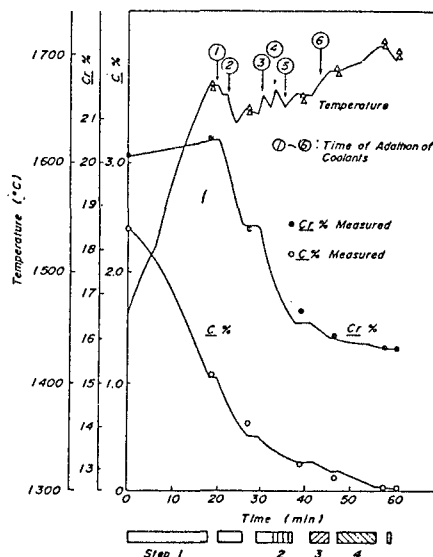


図 1 5 本羽口 AOD 操作の実測値と計算値の比較 (浴深 149 cm)

## 第 V 章 AOD 法における脱炭操作のプロセス予測制御数学モデルの開発とその応用

AOD 脱炭期の静的制御モデルの開発を目的としてモデルを簡易化することにより実操作に適用可能な短時間の計算処理で吹錬過程の経時変化および冷材投入条件の予測可能なモデル②を導出した。

また数学モデル①、②を応用して技術開発した例について述べた。

1) 脱炭速度は、高炭素領域では、 $Q$ の物質移動律速，低炭素領域では、 $C$ の物質移動律速とし、Si, Mnの酸化速度はそれぞれの溶鋼中の濃度に比例するとして求めた。これらの物質移動係数と反応界面積の積を表わすパラメータを導入した。次に、吹込み酸素量からC, Si, Mnの酸化に要した酸素量を差し引き、見掛けのCr酸化量を計算し、AOD実機データのスラグ中のCr/Fe比に合うようにしてCr, Feの酸化速度を求めた。

2) 本章で求めた数学モデル②は、実機のプロセス制御系の中で、操業ガイダンスに使用されており、米、英、西独、カナダで特許として権利化された。

3) 数学モデルの応用範囲は広く、 $O_2$ 上吹き併用AOD操業の予測および解析、またAr脱炭挙動の解析に応用し、これらの操業の実用化、改善に寄与した。

## 第VI章 VOD法における脱炭反応の数学モデルとプロセス解析

反応効率のよいVOD精錬を目的として、精錬容器形状の検討、VOD脱炭数学モデルの導出とそれによる脱炭挙動のシミュレーションおよび操業モデルの設定、実機操業結果による数学モデルの検証について論じた。その結果、次の事が明らかになった。

1) 容器形状については、溶鋼深さと径の比 $H/D$ は1.0が反応特性、攪拌特性、および容器からの熱損失の観点から最適である。

2) VOD脱炭反応挙動をあらわす数学モデルを導出した。 $O_2$ ジェットが溶鋼表面に衝突して形成するクレータ部において酸化したFeが、脱炭反応および溶鋼へのOのキャリアーとして重要であり、またスラグ/溶鋼界面での脱炭の割合が非常に大きい。

3)  $H/D=1.0$ の精錬容器を製作し、実機試験を行った。クレータ部の液側物質移動式中に導入したパラメータは試験溶解の3ヒートとも同一値であった。

4) 数学モデルにより、操業改善の基礎資料が得られた。

## 第VII章 結 言

VOD法やAOD法の基本反応であるステンレス鋼の脱炭反応に注目し、ステンレス鋼の脱炭反応挙動、脱炭反応挙動に関する実験室的研究を行った。得られた知見をもとに、AOD法およびVOD法の脱炭プロセスの数学モデルを導出した。また、ステンレス鋼の珪素の脱酸平衡、およびその脱酸能に対する耐火物やスラグ塩基度の影響に関する基礎的な研究を行った。数学モデルはAOD操業の静的プロセス制御に使用され、脱炭効率、クロム歩留の向上、煉瓦原単位の減少等に寄与している。また、AOD法、VOD法のプロセス特性解析に使用され、特に新鋼種の精錬操業モデルの立案や操業改善に有効に活用されている。さらに珪素脱酸挙動に関する研究は、珪素脱酸操業の指針となった。

## 審査結果の要旨

AOD法(Argon Oxygen Decarburization Process)およびVOD法(Vacuum Oxygen Decarburization Process)は、1960年代後半に開発された新しいステンレス鋼製造法であり、生産性、経済性および製造鋼種品質などが優れていることより、その後急速に発展してきた。本研究はステンレス鋼精錬に関する脱炭および脱ガス反応について、実験室的基礎研究より始め、AOD法およびVOD法の実操業における最適なプロセス制御法を確立した成果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は緒言であり、本研究の目的と意義について述べている。

第2章では、熔融高クロム合金の減圧下における脱炭、Ar吹込み条件下のスラグ中 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ による脱炭、および脱窒素反応について、化学平衡および速度論の立場より、実験室規模の基礎研究を行い、それぞれの反応機構を明らかにしている。

第3章では、ステンレス鋼の珪素脱酸について、化学平衡の立場より、実験室的規模で、溶鋼中酸素および非金属介在物と生成スラグ組成および耐火材質の関係を明らかにし、ステンレス鋼中の酸素を低減せしめる最適条件を求めている。

第4章では、容量60 tonのAOD法実炉について、第2章で得られた知見を基礎概念とし、物質収支と熱収支を組合せ、送風羽口近傍におけるSi、Mn、Crの酸化量と酸素利用率の4事項を未知数として実績値より決定する数学モデルを開発した。数学モデルより計算した結果は実機操業成績とよく一致し、本モデルにより吹錬中における冷材投入管理、送風管理および吹錬終点における溶鋼温度と炭素を十分制御できることが実証された。これらはAOD法制御技術上極めて有意義な結果である。

第5章では、AOD法実操業の静的プロセス制御を目標に、第4章で導出した数学モデルの計算時間を著しく短縮した簡易モデルを開発した。簡易モデルを操業ガイダンスに利用して、脱炭効率とクロム歩留の向上、煉瓦原単位の低下、新鋼種吹錬の立案や操業改善など優れた成果が得られている。

第6章では、VOD法の精錬容器の適性形状につき検討した結果、およびVOD法について前述と同様な数学モデルを開発してこれを実操業に活用するに至った経緯を述べている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、熔融鉄クロム合金の減圧下およびAr送気下における脱炭反応に関する実験室的な基礎研究より始め、AOD法およびVOD法の実操業における静的プロセス制御法を確立したもので、金属工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。