

学 位 論 文 題 名

浸漬ノズル内アルゴンガスの流動特性に関する基礎的研究

(Basic study on characteristics of argon gas flow in immersion nozzle)

学位論文内容の要旨

現在の標準的な鉄鋼プロセスは高炉、トビードカーなどの溶銑予備処理設備、転炉、RHなどの二次精錬装置、タンディッシュ、連続鑄造鑄型、および圧延設備からなっている。本プロセスの主要な役割は高炉で溶銑を作り、溶銑中に含まれる不純物（C, P, S 等）や非金属介在物（アルミナ等）を除去して清浄な鋼を製造し、連続的に鑄造して製品として世の中に送り出すことである。不純物は主として溶銑予備処理設備から二次精錬までのプロセスで、非金属介在物は主としてタンディッシュで除去されて連続鑄造鑄型へ送られる。ところが、せっかく所定の濃度に減少させた非金属介在物が、タンディッシュと連続鑄造鑄型をつなぐ浸漬ノズルを降下する際に浸漬ノズルの内壁に付着し、浸漬ノズルの断面形状と断面積を変化させ、浸漬ノズルの下端に設置した二つの吐出孔から流出する溶鋼流量を不均一にする。これを偏流というが、偏流が生じると鑄型内の溶鋼表面、すなわちメニスカスにおける溶鋼流速が局所的に非常に大きくなり、メニスカスの上に設置したモールドパウダーの巻き込みを生じさせる。巻き込まれたモールドパウダーは微細な滴となって鑄型内の溶鋼中に分散し、溶鋼の清浄度の悪化をもたらす。これを防止するために、浸漬ノズルには溶鋼流量調節用のスライディングゲートの上側からアルゴンガスが導入されている。アルゴンガスがカーテン状に浸漬ノズルのスライディングゲート下側の内壁を覆えば、非金属介在物の浸漬ノズル内壁への付着を阻止し、偏流の発生は阻止できるが、もし、多くの小さな気泡に分裂し溶鋼中にアルゴンガスの小気泡が混入すれば、かえってピンホール欠陥となって、溶鋼の清浄度を悪くし、多大な経済的損失をもたらす。ただし、現在のところ浸漬ノズル内のアルゴンガスの挙動についてはよく分かっていない。

そこで、本研究では浸漬ノズル内のアルゴンガス気泡の動的挙動を明らかにすることを目的として、溶鋼とアルゴンガスのモデルに水と空気を用いた実験、いわゆる水モデル実験と呼ばれる実験を行った。

本論文の構成は以下のようになっている。

第1章では、近年の清浄鋼製造への取り組みと、現在の課題について述べるとともに、第2章から第5章までの研究の位置づけについて記述している。

第2章では、浸漬ノズルに設けられている溶鋼流量制御用のスライディングゲートを円筒オリフィスでモデル化し、これを通過する複数あるいは単一のアルゴンガス気泡がどのような変形を受けるかを明らかにした。すなわち、複数の気泡が通過する場合に対しては、オリフィス前後の流動様式の変化を分類し、流動様式線図を作成するとともに、アルゴン気泡の分裂の起こる条件を求めた。また、単一気泡が通過する場合には、気泡がオリフィスでトラップされて停留する条件を求め、実験式を提案した。

オリフィスを通過する際にアルゴンガス気泡が非常に小さな多くの気泡に分裂すれば鑄型内の溶鋼中に分散する。大きな気泡は浮力によって上昇し、メニスカスに達すると、モールドパウダーによって捕捉されるが、非常に小さな気泡は浮上できず、凝固する鋼中に取り込まれてピンホール欠陥

のもととなる。そこで第 3 章ではオリフィスが気泡の分裂個数に与える影響と、分裂した気泡が濡れ性の悪いノズル内壁へ付着する条件を調べ、実験式を提案した。

浸漬ノズル内の圧力によっては、浸漬ノズル内に導入されたアルゴンガスがスライディングゲートの狭い放射状の隙間から外部へ出る場合や、逆に外部の空気が吸引されることが起こりうる。ただし、隙間の面が滑らかでない場合のアルゴンガスや空気の流量と圧力損失との関係はよく知られていない。そこで第 4 章では、隙間の上下壁面に撥水剤を塗布して粗くした放射状流路を通過するアルゴンガスの流量係数を求め、実操業に役立つ基礎資料を提供した。

多孔質のレンガを用いたアルゴンガスの導入の場合、多孔質内の流動が複雑でアルゴンガスが多孔質レンガの全表面から浸漬ノズル内へ均等に噴出されているとは必ずしも言えない。また、実機では浸漬ノズル内壁と溶鋼の濡れ性が悪いために、多孔質レンガの表面で気泡が合体し大きな気泡になっている可能性や、溶鋼の流動によるせん断力によって分裂し多孔質レンガ全面を覆うことなく表面から離脱している可能性もある。そこで、より簡便なアルゴンガス導入方式として、スライディングゲート上部から単一孔を用いて導入する方法について検討した。すなわち、吹き込みガス流量、孔の内径、および浸漬ノズル内溶鋼の空塔速度がノズルからの気泡生成頻度、ならびに気泡の合体に及ぼす影響を調べた。

最後に第 6 章では、結論として、清浄な鉄鋼を製造する上での浸漬ノズル内のアルゴンガスシールドを安定的に供給する操業条件について基礎となる知見をまとめた。

学位論文審査の要旨

主 査	特任教授	井 口	学
副 査	教 授	岩 井	一 彦
副 査	准教授	大 参	達 也

学 位 論 文 題 名

浸漬ノズル内アルゴンガスの流動特性に関する基礎的研究

(Basic study on characteristics of argon gas flow in immersion nozzle)

現在の標準的な鉄鋼プロセスは高炉、トビードカーなどの溶銑予備処理設備、転炉、RHなどの二次精錬装置、タンディッシュ、連続鑄造鑄型、および圧延設備からなっている。本プロセスの主要な役割は高炉で溶銑を作り、溶銑中に含まれる不純物(C, P, S等)や非金属介在物(アルミナ等)を除去して清浄な鋼を製造し、連続的に鑄造して製品として世の中に送り出すことである。不純物は主として溶銑予備処理設備から二次精錬までのプロセスで、非金属介在物は主としてタンディッシュで除去されて連続鑄造鑄型へ送られる。ところが、せっかく所定の濃度に減少させた非金属介在物が、タンディッシュと連続鑄造鑄型をつなぐ浸漬ノズルを降下する際に浸漬ノズルの内壁に付着し、浸漬ノズルの断面形状と断面積を変化させ、浸漬ノズルの下端に設置した二つの吐出孔から流出する溶鋼流量を不均一にする。これを偏流というが、偏流が生じると鑄型内の溶鋼表面、すなわちメニスカスにおける溶鋼流速が局所的に非常に大きくなり、メニスカスの上に設置したモールドパウダーの巻き込みを生じさせる。巻き込まれたモールドパウダーは微細な滴となって鑄型内の溶鋼中に分散し、溶鋼の清浄度の悪化をもたらす。これを防止するために、浸漬ノズルには溶鋼流量調節用のスライディングゲートの上側からアルゴンガスが導入されている。アルゴンガスがカーテン状に浸漬ノズルのスライディングゲート下側の内壁を覆えば、非金属介在物の浸漬ノズル内壁への付着を阻止し、偏流の発生は阻止できるが、もし、多くの小さな気泡に分裂し溶鋼中にアルゴンガスの小気泡が混入すれば、かえってピンホール欠陥となって、溶鋼の清浄度を悪くし、多大な経済的損失をもたらす。ただし、現在のところ浸漬ノズル内のアルゴンガスの挙動についてはよく分かっていない。

そこで、本研究では浸漬ノズル内のアルゴンガス気泡の動的挙動を明らかにすることを目的として、溶鋼とアルゴンガスのモデルに水と空気を用いた実験、いわゆる水モデル実験と呼ばれる実験を行った。

本論文の構成は以下のようになっている。

第1章では、近年の清浄鋼製造への取り組みと、現在の課題について述べるとともに、第2章から第5章までの研究の位置づけについて記述している。

第2章では、浸漬ノズルに設けられている溶鋼流量制御用のスライディングゲートを円筒オリフィスでモデル化し、これを通過する複数あるいは単一のアルゴンガス気泡がどのような変形を受けるかを明らかにした。すなわち、複数の気泡が通過する場合に対しては、オリフィス前後の流動様式の変化を分類し、流動様式線図を作成するとともに、アルゴン気泡の分裂の起こる条件を求めた。また、単一気泡が通過する場合には、気泡がオリフィスでトラップされて停留する条件を求め、実験

式を提案した。

オリフィスを通過する際にアルゴンガス気泡が非常に小さな多くの気泡に分裂すれば鑄型内の溶鋼中に分散し、凝固する鋼中に取り込まれてピンホール欠陥のもととなる。そこで第3章ではオリフィスが気泡の分裂個数に与える影響と、分裂した気泡が濡れ性の悪いノズル内壁へ付着する条件を調べ、実験式を提案した。

浸漬ノズル内の圧力によっては、浸漬ノズル内に導入されたアルゴンガスがスライディングゲートの狭い放射状の隙間から外部へ出る場合や、逆に外部の空気が吸引されることが起こりうる。ただし、隙間の面が滑らかでない場合のアルゴンガスや空気の流量と圧力損失との関係はよく知られていない。そこで第4章では、隙間の上下壁面に撥水剤を塗布して粗くした放射状流路を通過するアルゴンガスの流量係数を求め、実操業に役立つ基礎資料を提供した。

第5章では、簡便なアルゴンガス導入方式として、スライディングゲート上部から単一孔を用いて導入する方法について検討した。すなわち、吹き込みガス流量、孔の内径、および浸漬ノズル内溶鋼の空塔速度がノズルからの気泡生成頻度、ならびに気泡の合体に及ぼす影響を調べ、多くの知見を得た。

最後に第6章では、結論として、清浄な鋼を製造する上での浸漬ノズル内のアルゴンガスシールドを安定的に供給する操業条件について基礎となる知見をまとめた。

これを要するに、著者は、清浄鋼製造の妨げとなる連続鑄造鑄型内メニスカス上モールドパウダーの巻き込みに深く関係しているスライディングゲート近傍におけるアルゴン気泡の挙動について多くの実験的成果を得た。この成果は清浄鋼製造、ひいては鉄鋼業の省エネルギー化に対して寄与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があるものと認める。