インペラを用いた新規攪拌方式による 低密度粒子分散促進法の開発

学位論文内容の要旨

攪拌操作は、古くから用いられている重要な操作であり、現在では多岐にわたる産業において利用されている。攪拌操作の目的や方法は様々あり、対象とする系によって最適な攪拌方法を選択しなければならない。

鉄鋼業においても攪拌操作は、転炉での底吹き攪拌のみならず、溶銑予備処理、真空脱ガスや連続鑄造にいたるまで幅広い技術分野で用いられている。現在、鉄鋼精錬プロセスでは、ガス吹き込み攪拌が主流となっているが、近年の極低硫化鋼の要望に応えるため、より強い攪拌力を持ち、短時間で低硫化が可能な機械式攪拌が見直されてきている。

従来の機械式攪拌プロセスでは、回転軸を浴中心に設置する中心攪拌が主流であったが、この方法では低密度粒子の浴内への均一分散は困難であり、新たな攪拌方式が求められている。これまでに筆者は、新規攪拌方式の検討を行い、偏心攪拌、浸漬円柱攪拌において効果的な攪拌が達成できることを見出した。偏心攪拌とは、インペラの回転軸を浴中心から偏心させる攪拌方式であり、浸漬円柱攪拌とは、中心攪拌をしつつ浴表面にわずかに円柱を浸漬させる攪拌方式である。偏心攪拌や浸漬円柱攪拌を行うと、中心攪拌に比べ低密度粒子が浴内に非常に効率よく分散することがわかった。

本学位論文では、水モデルに着目し、まず偏心攪拌、浸漬円柱攪拌に関して内部流動や低密度粒子の分散挙動などの基礎的な事柄に対する詳細な調査を行い、つづいて新規攪拌方式の開発を行った結果について述べている。以下に本学位論文の各章の概要を示す。

第1章 緒論

一般的な攪拌操作と鉄鋼業における攪拌操作の重要性と筆者が行った新規攪拌方式の概要について述べるとともに、本学位論文の構成を示した。

第2章 中心攪拌における渦深さ

機械式攪拌に関する研究の第一歩として、中心攪拌における渦の到達深さについて調査した。浴表面に散布した低密度粒子は、形成する渦の表面に沿って降下し、インペラに衝突した際に浴内へ分散する。つまり、粒子を効率良く巻き込むためには、渦の到達深さを正確に把握する必要がある。

る。本章では、従来の研究者が考慮していなかった浴深の影響について着目し、既存の実験式に修正を加えた実験式を提案した。

第3章 様々な渦の形成条件

インペラを浴中心軸からずらした偏心攪拌を行うことで、これまでに見られなかった傾斜渦や湾曲渦を確認した。これら浴内に現れる様々な渦の形状や形成条件について調査し、各渦の形成条件を明確にした。また、低密度粒子を浴表面に散布した場合における渦形成条件の変化も明確にした。

第4章 渦の形成時間とインペラへの到達時間

実機での脱硫の処理時間に影響を及ぼす渦の形成時間とインペラへの到達時間について調査した。形成時間はインペラの回転を開始してから渦が形成され始めるまでの時間である。中心攪拌、偏心攪拌それぞれに関して実験式を提案するとともに、低密度粒子を用いた場合での実験式を提案した。浴内の循環時間を用いることで、結果を整理できた。

第5章 低密度粒子の分散挙動

浴表面に大きさと密度の異なる低密度粒子を散布し、粒子がインペラの回転力によってどの程度浴内へ分散するかについて、粒子分散挙動を表す指標である粒子到達距離、粒子分散率、粒子分散率の和を用いて整理した。また、粒子密度の影響、攪拌方式の影響、攪拌条件の影響についても明らかにした。

第6章 円柱を浸漬させた偏心攪拌での低密度粒子の分散挙動

これまでに調査してきた偏心攪拌と浸漬円柱攪拌との組み合わせた新規攪拌方式を提案した。第5章と同様に、粒子到達距離、粒子分散率、粒子分散率の和を用いて粒子分散挙動を整理し、本攪拌方式が他の方式に比べて優れていることを明らかにした。

第7章 PIV を用いた浴内流動の解析

本攪拌方式が優れていることの理由を明確にするために、粒子画像流速計 (Particle Image Velocimetry: PIV) を用いて各攪拌方式での浴内流動の変化を調査した。中心攪拌ではインペラ回転軸を軸とした回転流が見られるのに対し、偏心攪拌では傾斜渦を軸とする回転流が見られた。円柱を浸漬させた偏心攪拌では、渦管の先端がインペラ回転軸の中心から羽根先端に向かってずれているのが確認された。このことが粒子分散に大きな役割を演じていることが明らかとなった。

第8章 結論

本章では、第2～7章の成果を要約するとともに、実用化に向けての課題と展望について述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 井 口 学

副 査 教 授 荒 井 正 彦

副 査 教 授 秋 山 友 宏

学 位 論 文 題 名

インペラを用いた新規攪拌方式による 低密度粒子分散促進法の開発

攪拌操作は、古くから用いられている重要な操作であり、現在では多岐にわたる産業において利用されている。特に鉄鋼業における攪拌操作は、転炉での底吹き攪拌のみならず、溶銑予備処理、真空脱ガスや連続鋳造にいたるまで幅広い技術分野で用いられている。現在、溶銑予備処理プロセスでは、ガス吹き込み攪拌が主流となっているが、近年の極低硫化鋼の要望に応えるため、より強い攪拌力をもち、短時間で低硫化が可能な機械式攪拌が見直されてきている。

従来の機械式攪拌の攪拌方式は、回転軸を浴中心に設置する中心攪拌が主流であったが、この方法では低密度粒子の浴内への均一分散は困難であり、新たな攪拌方式が求められている。これまでの研究によって、偏心攪拌、浸漬円柱攪拌において中心攪拌に比べ効果的な攪拌を達成できることが報告されている。偏心攪拌とは、インペラの回転軸を浴中心から偏心させる攪拌方式であり、浸漬円柱攪拌とは、中心攪拌をしつつ浴表面にわずかに円柱を浸漬させる攪拌方式である。しかしながら、これら両攪拌方式に関して十分な研究が行われていない。

本研究は、溶銑予備処理への利用を視野に置き、既存の攪拌方式では困難な低密度粒子の液中への高効率分散のための新規攪拌方式を確立することを目的とした。このために、まず既存の二つの方式に着目し、これまでの研究で明らかにされていない事項について詳細な調査を行い、その両方式の特性の全体像を明らかにすると共に、その結果を基に新規攪拌方式を提案する。以下に本学位論文の各章の概要を示す。

第1章 緒論

一般的な攪拌操作と鉄鋼業における攪拌操作の重要性と既存の機械式攪拌方式の概要について述べるとともに、本学位論文の構成を示した。

第2章 中心攪拌において浴中心に形成する渦の到達深さ

中心攪拌において低密度粒子の分散挙動に大きな影響を及ぼす浴中心に形成する渦の到達深さについて調査した。浴表面に散布した低密度粒子は、形成する渦の表面に沿って降下し、インペラに衝突した際に浴内へ分散する。つまり、粒子を効率良く巻き込むためには、渦の到達深さを正確に把握する必要がある。本章では、従来の研究者が考慮していなかった浴深の影響について着目し、既存の実験式に修正を加えた実験式を提案した。

第3章 偏心攪拌において浴内に形成する様々な渦の形成条件

インペラを浴中心軸からずらした偏心攪拌において、容器内径やインペラ直径などのパラメータが渦形成に与える影響を調査した結果を述べる。湾曲渦や軸心渦の形成を確認するとともに、これら浴内に現れる様々な渦の形状や形成条件について調査し、各渦の形成条件を明確にした。また、低密度粒子を浴表面に散布することに起因する渦形成条件の変化も明確にした。

第4章 渦の形成時間とインペラへの到達時間

実機での脱硫の処理時間に影響を及ぼす渦の形成時間とインペラへの到達時間について調査した。形成時間は、インペラの回転を開始してから渦が形成され始めるまでの時間であり、到達時間はインペラの回転を開始してから渦管の先端がインペラに到達するまでの時間である。中心攪拌、偏心攪拌それぞれについて両時間に対する実験式を提案するとともに、低密度粒子を用いた場合での実験式を提案した。

第5章 低密度粒子の浴内への分散挙動

浴表面に大きさと密度の異なる低密度粒子を散布し、粒子がインペラの回転力によってどの程度浴内へ分散するかについて、粒子分散挙動を表す指標である粒子到達距離、粒子局所分散率および粒子分散率を用いて整理した。また、粒子密度の影響、攪拌方式の影響、攪拌条件の影響についても明らかにした。

第6章 円柱を浸漬させた偏心攪拌での低密度粒子の浴内への分散挙動

第5章までに詳細を明らかにした偏心攪拌と浸漬円柱攪拌を組み合わせた新規攪拌方式を提案した。第5章と同様に、粒子到達距離、粒子局所分散率および粒子分散率を用いて粒子分散挙動を整理し、本攪拌方式が他の方式に比べて優れていることを明らかにした。

第7章 PIVを用いた浴内流動の解析

第6章で提案した新規攪拌方式が優れた攪拌効果を有する要因を解明するために、粒子画像流速計 (Particle Image Velocimetry: PIV) を用いて各攪拌方式での浴内流動を調査した。中心攪拌、偏心攪拌および円柱を浸漬させた偏心攪拌について、浴の縦断面および横断面での PIV 測定を行い、浴内流動の変化を確認した。

第8章 結論

本章では、第2～7章の成果を要約するとともに、実用化に向けての課題と展望について述べた。これを要するに、著者は新規攪拌方式である円柱を浸漬させた偏心攪拌を行うことで、溶銑予備処理での攪拌効率が向上し、既存の方式に比べ省エネルギー化を達成できることを見出しており、材料科学に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 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。