

学位論文題名

金属溶解用アルゴン熱プラズマの分光学的キャラクタリゼーション

学位論文内容の要旨

プラズマを用いた難還元金属の製錬、高融点金属の溶解と精製、タンディッシュでの溶鋼加熱、プラズマ溶接など、熱プラズマは金属のプロセス工学に広く応用されている。その場合、プラズマ電極の消耗や熔融金属の蒸発により、しばしば金属原子がプラズマに混入する。そのため、プラズマ電流や電圧が変化し、操業条件が不安定になり制御が困難となる。この解決には、プラズマ特性に及ぼす金属蒸気の影響や金属蒸気の発生メカニズムを解明することが重要である。

これらの基礎として本研究では、金属溶解用アルゴンアークプラズマの各種原子とイオンの温度と密度を分光学的に測定し、キャラクタリゼーションを行った。

本論文は以下の8章で構成されている。

第1章は緒論であり、材料工学分野における熱プラズマ応用技術の背景と今後の課題および課題解決への具体的手法について述べた。

第2章では、金属溶解用アルゴンアークプラズマを発光分光計測する際に、最も重要な物理量である遷移確率を精度よく決定する方法について述べた。

スペクトル線強度を計測する発光分光測定法は、プラズマの温度、密度などの決定に有効であるが、その精度は発光粒子の遷移確率の値に大きく左右される欠点がある。しかし、報告されている遷移確率の値は誤差が大きい。本研究では、Arアークプラズマ陽光柱の変動を極力抑制したうえ、多重検出器を用いて短時間で広波長範囲を走査し、Arスペクトル線の強度を測定した。遷移確率の出発値にWieseらのデータを用い、ボルツマンプロット法を適用して出発値を補正し、Arの遷移確率の最確値を決定した。本方法は、従来の方法に比べより多くのスペクトル線の最確値を同時に決定するという点でより誤差が少ない。求めたAr原子の遷移確率値は、①広い温度範囲にわたり、②プラズマ作動ガス圧力の変動に関わらず、そして、③金属蒸気の有無および量に関わらず、実用上十分な精度で適用可能であることを明らかにした。

第3章では、金属蒸気が混入したAr熱プラズマの形状、電流－電圧特性および温度特性について述べた。

ここで、熱プラズマは金属プロセッシングの応用状況を想定して、移行式アークプラズマ溶解炉を用い、蒸気圧が無視できる黒鉛、蒸気圧が異なる純FeとFe-Mn合金について加熱溶解実験を行った。その結果、プラズマ電流－電圧特性は溶解試料によって異なり、同じ電流値で比較した場合、プラズマの電圧は黒鉛試料より金属試料の方が、また、純FeよりFe-Mn合金の方が低い。

純FeおよびFe-Mn合金の溶解において、①FeおよびMn原子の温度とAr原子の温度は異なっており局所的熱平衡は成立しない、②純Feでは金属蒸気が熔融金属表

面付近にしか存在しないためプラズマの電気抵抗は黒鉛の場合より低い、③溶融金属では陽極点にくぼみが生じ、プラズマ電流が集中するためArプラズマの温度は黒鉛の場合より高くなる、④Fe-Mn合金では、Mn蒸気がMnプラズマ形成し、Arプラズマとの同軸2層構造のプラズマとなるためプラズマ全体の電流密度が低下し、Ar原子の温度は低下する、などのことが明らかになった。

第4章では、原子の電離反応について、原子と生成イオンの温度と密度の相違の点から論じ、熱プラズマ中金属蒸気の組成を決定する方法について述べた。

ボルツマンプロット法で求めた金属イオンの温度は、金属原子より約2000K、Ar原子より約3000K低い。これは、原子がイオンと電子に解離する際、生成したイオンが運動エネルギーを失って温度低下することを示している。

ボルツマン分布に基づいて実測した熱プラズマ中のMn原子とMnイオンの密度を、サハの電離方程式で計算したMnイオン密度と比較した。陽極点付近を除いて、プラズマ中のMn蒸気の密度は電離反応の平衡計算とほぼ一致し、局所的部分熱平衡が成立している。陽極点付近では高温のため、Arの解離に由来する電子の密度が高く、Mnイオンの電離平衡定数が低めに算出されるからである。

以上から、多成分系のプラズマでは、各化学種ごとの電離反応についていわゆる局所的部分熱平衡を仮定し、原子温度を用いて平衡計算すれば、ほぼ組成を求めうるということが明らかとなった。

第5章では、金属を熱プラズマで加熱したとき発生する金属蒸気圧絶対値の決定方法とその空間分布、および強制蒸発機構が存在する事実について述べた。

溶湯から発生する金属蒸気の分圧を分光学的に測定する場合、これまでの方法ではある点の推定蒸気圧を基準とした相対値しか得られなかった。本研究では既知の温度分布を用いて、空間中の蒸気圧分布と電子密度分布を電離平衡に基づいて繰り返し計算し、測定したスペクトル線強度に合うように各点の絶対蒸気圧を決定する方法を考案した。この方法により溶融金属表面直上の金属蒸気圧分布を求めたところ、①Fe-Mn合金に比べ、純Feの場合は金属蒸気圧が低く、金属蒸気存在範囲も狭い、②蒸気圧の分布から見て、金属蒸気の吹き出し点が陽極点から離れたところに存在する、③吹き出し点の蒸気圧は溶融金属の平衡蒸気圧より高い、ことが明らかとなった。これらから、プラズマ溶解では溶融金属が優先的に蒸発する強制蒸発機構が作用していると推察される。

第6章では、プラズマ中の金属蒸気の分布と溶融金属ボタン内対流の関係を検討し、Ar熱プラズマ溶解における金属蒸気発生メカニズムについて述べた。

プラズマの電磁力により生じる中心に向かう対流および表面張力差やプラズマ気流の摩擦力により生じる周辺に向う対流、の2つの対流が溶融池内に存在する。両対流の衝突点は、金属の優先蒸発場所とほぼ同じ位置にある。これらから、溶融金属の強制蒸発は、陽極領域で活性化したガスが多量に吸収され、より低温の対流衝突領域で溶湯から脱離する際に生ずるものと推測された。

第7章では、本研究の結果を基に、熱プラズマによるタンディッシュ内溶鋼加熱技術の改善策について述べた。

連続 casting のタンディッシュでは、溶鋼温度の低下を抑制し铸片品質の向上をはかるためプラズマ加熱が有効である。しかし、金属蒸気の混入によってプラズマの電気抵抗が低下し、負荷電圧を上昇できないため高出力が得られない。これらの対策として、プラズマガスに2原子ガスである窒素などを添加する方法、プラズマガス流量を増加させる方法、および、溶鋼表面に少量のスラグを添加してスラグ膜を生成する方法、などを提案した。

第8章は本論文の総括である。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 石 井 邦 宜
副 査 教 授 工 藤 昌 行
副 査 教 授 高 橋 平七郎
副 査 教 授 粥 川 尚 之

学 位 論 文 題 名

金属溶解用アルゴン熱プラズマの分光学的キャラクタリゼーション

本論文は、熱プラズマを応用した材料プロセス技術を開発するための基礎として、金属溶解用アルゴンアークプラズマの各種粒子の温度と密度を分光学的測定を用いて研究したものであり、主要な成果は以下のように要約される。

- ① プラズマを発光分光計測する際、その精度を左右する最も重要な物理量である遷移確率を、金属溶解の場に即して測定した。得られたAr、Fe、Mnの遷移確率の精度は高く、十分な実用性が認められた。
- ② 純鉄およびFe-5%Mn合金を溶解し溶融金属表面近傍のAr、Fe、MnおよびMnイオンの空間温度分布を測定した。さらに、 $Ar > 金属原子 > 金属イオン$ の順で温度が高く、Arアーク熱プラズマにおいて局部的熱平衡が成立しないことを明らかにした。
- ③ Fe-5%Mn合金についてMn原子およびMnイオンの密度分布を求め、原子と解離イオンの間に原子温度を基準にした局部的部分熱平衡が成り立つことを明らかにした。これにより、プラズマに混入した蒸発金属の原子／イオン組成がSahaの電離平衡に基づいて計算可能であることを示した。
- ④ 金属の熱プラズマ溶解に際して優先蒸発場所が存在することを見出した。そして、陽極点におけるArの過剰溶解、Arの蒸発点への対流移動、Ar脱離熱の金属原子への付与、からなる強制蒸発機構を明らかにした。

これを要するに、著者は、発光分光学的手法および金属学的手法を合わせて、金属溶解用アルゴンアーク熱プラズマの基礎的性質を明らかにしたものであり、材料プロセスの進歩に寄与するところ大である。

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。