

して嵩密度分布や温度分布に関係なく不規則に乾留が進行していることが確認された。また軟化層が水蒸気や発生ガスに対して不透過層ではなく、炭層内で発生する水蒸気やガスの 90~95% と見積もられる量が軟化層を破って炉壁側と炉上部に流出していると推測され、これが乾留の進行に大きく影響していると考察された。この発表に対しては、水蒸気の炉外への排出が石炭層の昇温速度や嵩密度および温度分布とどのような関係にあるか議論された。

(討 6) 乾留現象に及ぼす水蒸気流れの影響

(東北大学工学部 青木秀之ほか)

コークス炉内で発生する水蒸気の流れが乾留効率に及ぼす影響を、内径 41 mm, 長さ 90 mm の小型乾留炉を解析対象として数値実験により検討された。この結果、炭層内で発生する水蒸気を加熱面と逆方向に抽気する方が、加熱面側に流出させるより乾留効率は数% 向上すると試算され、コークス品質面でも有利であると示唆された。この発表に対して、石炭が有する水分量の乾留速度に及ぼす影響が議論された。

(討 7) 乾留過程の発生水蒸気流れ挙動解析と抽気技術の検討

(住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 井上恵三ほか)

乾留初期に発生する水蒸気の乾留進行に及ぼす影響について、基礎試験炉で炉壁側に流出させる方法と炉壁と逆方向(炭中側)に抽出する方法(STEX 法)が検討され、STEX 法が乾留の促進・均一化と品質向上に有効であると確認された。そさて実炉テストおよび新たに開発された 2 次元ガス流れモデルでも炭中を介して水蒸気を炉上部に抽気する STEX 法は乾留促進に効果があると認められた。本発表は実用化面での関心が高く、水蒸気抽気による炉内のコークス温度分布への影響、抽出孔周辺の乾留遅れの有無、抽気孔設計の考え方が議論された。

(討 8) コークス性状へ及ぼす炭化室内熱的特性の影響

((株)神戸製鋼所鉄鋼研究所 岩切治久ほか)

乾留温度のコークス品質への影響を基礎的に調査し、反応性は高いが冷間強度を確保するには、コークス温度として 800°C 程度の中温で良いとされた。その結果を踏まえ、ステンレス製壁の炭化室を有する試験炉テストおよび伝熱解析を行い、高温乾留と同等の昇温速度で 800°C の中温乾留を実現するには炭化室壁の熱伝導度を高くするか壁厚を薄くすることが有効であると示唆された。中温乾留に関する意欲的な本発表には関心も高く、反応性を支配する因子としての黒鉛化度の中温乾留時における変化、気孔率に及ぼす昇温速度の影響が議論された。

(討 9) 加圧下における中低温乾留挙動

(NKK 鉄鋼研究所 板垣省三ほか)

中低温乾留コークス製造の技術開発を目指し、まず伝

熱シミュレーションで生産性が評価され、窯幅を狭くし石炭嵩密度を高くすれば、生産性を低下することなく中低温乾留が可能と試算された。そこで加圧下での乾留温度とコークス品質挙動について基礎的に検討された。その結果、乾留温度として 700°C 程度の中低温乾留でも、乾留初期に機械的な荷重を加えることでコークス気孔率が低下し、雰囲気圧力を乾留全期に加えることでコークス歩留り向上とコークスの異方性組織が発達し、通常コークス並みの品質が得られるとされた。本発表も新プロセスとして関心が高く、具体的プロセスイメージ(加熱方法、ガスシール方法など)に対して討論が集中した。

以上の講演終了後、下記の課題で総合討論が行われ、制限時間を大幅に超えて真剣な議論が戦わされた。

- 1) コークスケーキの形成と収縮特性
- 2) 乾留中のガス発生組成とガス流れ挙動
- 3) 中低温乾留時の伝熱・品質挙動

最後に、今回の討論会にはコークス部門では近年まれにみる多くの方々が参加され、次世代コークス技術への明るい展望を抱かせる活発な討論の場となった。関係者のご協力に深く感謝するしだいである。

## 連铸における電磁気力利用の技術とその基礎研究

座長 名古屋大学工学部 浅井 滋生  
副座長 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所  
竹内 栄一

鋼の連続铸造プロセスにおいては生産量、連铸化比率が飽和状態に達しつつある中で、より高い品質、生産性を求めてたゆまぬ努力が払われている。その中において電磁気力の適用は、従来プロセスを改善する目的だけでなく、次世代の铸造技術開発に向け新たな可能性を追求するうえでの強力な手法として、大きな期待がかけられている。

本討論会の目的は、こうした連続铸造プロセスへの電磁力適用技術の現状と将来の可能性を、基礎研究や実施例の報告を通じて明らかにしようとするものである。本討論会においては連铸プロセスでの電磁力利用に関して、より包括的な理解と議論が得られるようにとの目的から、各大学、各企業に複数の報告を募り、電磁気力の機能別に、(Ⅰ)電磁攪拌、(Ⅱ)直流磁界による流動制御、(Ⅲ)初期凝固制御、および(Ⅳ)タンディッシュでの温度および流動制御への適用の 4 セッションに分類し、発表、討論を行った。

### I 電磁攪拌

(討 10) 铸型内電磁攪拌による溶鋼流動と铸片品質

(新日本製鉄(株)大分製鉄所 鈴木 眞ほか)

垂直曲げ連铸機に設置した铸型内電磁攪拌装置を用い、メニスカス近傍に水平旋回流を形成させることによって、表層介在物低減および縦割れ防止効果を得た。これらは、電磁流体解析によって予測される铸型内流動パターンから、凝固前面に濃化した溶質や介在物の洗浄効果として理解されるものである。この発表に対し、同効果を得るための最適流速に関して議論がなされた。

(討11) 移動磁界の铸型内溶鋼流動制御性能

(NKK 福山製鉄所 久保田淳ほか)

高速铸造においてメニスカスでの流速を適正に保つために、ノズル吐出孔のレベルに設けたリアモーターを使って、その位置の流速を加速、減速することによってメニスカス流速の平均値を一定に制御できると共に、流速の変動幅を抑えることができることを報告し、この速度変動減少のメカニズムについて議論がなされた。

(討12) 磁場スクリーン法による铸型内電磁攪拌の適正化

(NKK 鉄鋼研究所 森健太郎ほか)

小断面ビレットにおいては、等軸晶率増加(内質向上)のために铸型内電磁攪拌のパワーを上げると、メニスカスが乱れパウダー巻込みなどの欠陥を引き起こす。メニスカスの乱れを抑えつつ铸型プール内部で十分な流動を得るために铸型トップ部に磁場スクリーン設置が効果的であることを報告した。スクリーンの位置を、メニスカス・レベル変動に対し電氣的に追従させる技術も現在検討されている。

(討13) 電磁攪拌を利用した鋼の低温铸造

((株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 森 秀夫ほか)

高炭素溶鋼を铸造する際に、タンディッシュ出口部に設けた容器にて電磁攪拌し溶鋼過熱度を奪うことによって安定した低温铸造が可能となった。これによって铸片結晶粒が微細化すると共に、偏析が軽減される。この抜熱の攪拌速度依存性について議論がなされた。また、電磁攪拌によって容器からの溶湯排出速度を減速することも同時に可能であることを示した。

(電磁攪拌技術に関するコメント)

(東京大学工学部 梅田高照)

電磁攪拌技術の連铸プロセスにおける役割は、従来、等軸晶率増大が主であったがこれはブルームを除いて行われなくなりつつあり、代わって最近では铸型内の流動制御、特に初期凝固の均一化や表層介在物減少効果が中心になりつつある。今後は、これら冶金現象に及ぼす電磁流動の影響の理論解明が望まれるとの指摘がなされた。

## II 直流磁界による流動制御

(討14) 連続铸造機における介在物挙動に及ぼす電磁ブレーキの効果

(住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 高谷幸司)

流動、伝熱、電磁場と介在物の運動方程式、および介在物濃度の移流方程式とを連成し、铸型内で溶鋼が凝固する際の介在物の凝固シェルへの捕捉挙動を解析し、铸型内電磁ブレーキによる流動パターンの変化によって介在物分布が変化することを明らかにした。また、介在物分布は幅方向均一磁界の適用によって大きく向上することを報告した。

(討15) 静磁場垂直印加による連铸铸型内溶鋼流動制御

(NKK 鉄鋼研究所 鈴木幹雄ほか)

従来の局所型の電磁ブレーキによる铸型内電磁ブレーキには、浸漬ノズル直下に強い下降流が存在する。新たに铸造方向に平行な磁束をもった電磁ブレーキの効果について基礎実験、数値解析にて検討した結果、この電磁ブレーキの適用によって浸漬ノズルからの溶鋼吐出角度を制御することが可能なことを見出し報告した。これに対し、吐出流の方位安定性について討議が行われた。

(討16) 直流磁界による溶鋼の混合抑制効果

(新日本製鉄(株)八幡技術研究部 田中宏幸ほか)

幅方向に均一な磁界を有する電磁ブレーキを铸型内に組み込むことにより、ブレーキ下方の流れについてはブラグ・フロー化、ブレーキ上方については加速や減速が制御可能なことを大型水銀モデルと数値計算によって明らかにした。さらにこれを利用し、铸型内の溶質の混合を抑制することが可能なことを、実湯铸造によって示した。その他、介在物挙動の変化について議論がなされた。

(討17) 静磁場による流動制御の水銀モデル実験と理論計算

(川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 奈良正功ほか)

铸型幅方向に2段に設けた静磁場による铸型内溶鋼流動の変化を水銀モデルと数値計算によって解析した。測定には磁場の影響を受けにくい熱線流速計を使用し、同時に水銀内の電位を測定して精度を上げた。溶鋼の铸造結果より、介在物減少の効果を確認し報告した。この報告に対して、磁場印加時の速度変動成分の変化に関して討議があった。

(電磁ブレーキ技術に関するコメント)

(東京大学工学部 大島修造)

铸型内電磁ブレーキ技術はプール内溶鋼の流れを制御することによって、介在物の浮上を促進させたり、偏流を抑えてメニスカス乱れに起因するパウダー巻込みを防止する目的で開発され、その最適な適用条件について検討がなされている。最近ではより新しい使い方として、浸漬ノズルからの吐出流角度を調整したり、幅方向に均一な磁界を組み込んでプール内で溶質の混合抑制を可能にする技術が開発されている。今後、介在物や気泡の挙動をより厳密に制御していくためには、ゼーベック効果やハルトマン効果などミクロ的視点からの予測精度の向上に加え、混相流の磁場依存性についても研究を重ねる必要があるとの指針が示された。

Ⅲ 初期凝固制御

(討18) 連铸のメニスカス挙動に及ぼす印加磁界の影響  
(名古屋大学工学部 佐々健介ほか)

交流磁界による铸片表面性状の改善効果について、Ga を用いたメニスカス挙動の基礎実験、およびその連続铸造モデル実験により解析した。その結果、印加された磁気圧によって、铸型と凝固シェルとの間に軟接触(間欠接触)状態が形成され、この状態が長く続くことによって初期凝固が緩やかにおこり、表面性状が改善されることを見出した。この発表に対し、間欠接触の測定方法、電磁場による加熱の影響などが議論された。

(討19) 交流電磁場による固定铸型連铸初期凝固制御  
(新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 藤 健彦ほか)

初期凝固制御の重要な因子であるメニスカスとコイルとの相対位置、および印加電磁場周波数の影響をモデル実験、理論計算の両面から解析した。メニスカス形状安定化のための最適コイル位置が存在することが判明したが、周波数に関しても鋼铸型を前提とした場合には適正領域があることを報告した。これに対して、メニスカスの乱れに影響を及ぼす電磁流動の周波数依存性が討議された。

(討20) 高周波磁界による铸型内初期凝固制御  
(NKK 鉄鋼研究所 中田正之ほか)

耐火物-鋼铸型-溶湯の3重点部での凝固の電磁気圧による制御効果について、AI および溶鋼铸造実験によってその効果を実証すると共に、理論解析によって機構を明らかにした。電磁気圧によって溶湯が耐火物/铸型から引き離されると共にジュール加熱によって凝固シェルのプロフィールが変化したことにより、良好な初期凝固組織が得られることを報告した。この効果に対し周方向の均一性、耐火物材質の影響などが議論された。

(討21) 高周波磁場下における溶鋼のメニスカス形状  
(株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 中田 等ほか)

磁場を印加した場合の2次元スラブのメニスカス形状の変化について理論解析を行い、周波数が一定値以上になるとメニスカスの盛り上がり高さも大きな増加が望めなくなることを、コイル高さを低くすることによってメニスカス形状は矩形となることを報告した。これに対し、初期凝固にとってメニスカス曲率はいかにあるべきかが討議された。

(討22) 電磁界铸型による連铸铸片表面性状の改善  
(株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 森下雅史ほか)

コールド・クルーシブル型の矩形铸型を用い、初期凝固部に高周波磁界を印加しつづを連続铸造した。铸片表面に形成されたマークは、電磁場を作用させなかった場合に比べ、大きく改善された。また、铸型内溶湯温度も磁場印加によって上昇したが、これも磁気圧による軟接触と共に初期凝固制御に関与していると思われる。この報告に対して凝固開始位置、スリット起因の表面

マーク深さ、铸型の変形について議論がなされた。

(討23) コールド・クルーシブルを利用した Ti 合金の連続铸造

(住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 田中 努ほか)

コールド・クルーシブルに Ti スクラップを供給しつつ、同時にアロイングを行って、溶融、攪拌、凝固を連続的に行い外径 45φ の表面性状良好なビレットを得た。現在の消耗電極式二重溶解法との競合が将来予測される。この報告に対して、投入スクラップのサイズやビレット形状のスケール・アップに関する議論がなされた。(電磁力を利用した初期凝固制御に関するコメント)

(川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 藤井徹也)

新しい技術を生み出す可能性の高い分野である。メニスカス形状や軟接触の安定性こそが最も重要な要素と思われる。熱発生初期凝固に与える影響も決して無視できない。周波数を決定する際の铸型構造、コイル配置などの設備開発が今後の大切な課題である。もちろん、初期凝固メカニズムの解明も並行して成されねばならない。モールド・フラックスや、铸型振動条件の最適化も併せて検討すべきであるとのコメントを受けた。

Ⅳ タンディッシュでの温度および流動制御への適用

(討24) タンディッシュ誘導加熱における流動現象と冶金的效果

(新日本製鉄(株)室蘭製鉄所 山中 敦ほか)

この技術は本来、低温铸造を目的としている。そのなかで、誘導加熱によってタンディッシュ内に発生する流れは、電磁力(ピンチ力)に比べ熱対流が支配的であることが、電磁流体解析、温水モデル実験によって確認されたが、このタンディッシュ内流動によって介在物の浮上が促進され、铸片清浄度が向上する効果が得られていることを報告した。

(討25) セラミック抵抗体を用いたタンディッシュ内溶鋼加熱装置の開発

(愛知製鋼(株)第一生産技術部 水谷洋一ほか)

铸造時の溶鋼温度の最適化を目指して、発熱セラミックス体を溶鋼に浸漬、加熱するプロセスを開発した。この方式においては、セラミックス体の発熱暴走の問題点があったが、発熱体形状、材質、電極との接合剤について改善を行い実機試験にて良好な結果(10°C 昇温)が得られており、今後、発熱量増大を検討していく。

(討26) 直流型タンディッシュプラズマヒーターの適用  
(NKK 京浜製鉄所 近藤裕計ほか)

連铸継目部の温度降下を補償する目的で、タンディッシュ内に直流移行型プラズマ・トーチを設置、操業の安定化が計られている。また、この技術を用いて高 Mn 高 C 材を低温铸造したが、中心偏析改善のためには最適な铸造温度が存在することが明らかになった。

(討27) 高出力プラズマトーチの開発  
(株)神戸製鋼所加古川製鉄所 入谷英樹ほか)

(討 26) と同様の目的でタンディッシュ内に交流プラズマを設置し、高出力化のための試験を行った。プラズマ作動ガス (Ar) の流量を増大させる、プラズマ・トーチの構造の最適化を行うなどしてアーク電圧を 15% 程度増加させることが可能になった。

(討28) 容器内低融点金属流れの静磁場による整流化および渦抑制

(川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 竹内秀次ほか)

タンディッシュの出口近傍では容器内に非定常な流れや渦が発生、溶鋼清浄度が低下する恐れがある。水銀実験装置を用い、オープン・チャンネル流れの速度均一化や、吐出孔直上の渦防止が静磁場の印加によって可能になること、渦抑制に関しては磁場の方位性が強く影響していることを報告した。これに対して、容器の電氣的境界条件の影響が議論された。

(タンディッシュへの電磁力適用に関するコメント)

(大阪大学溶接工学研究所 半尾誠夫)

誘導加熱は全体の加熱が可能。これに対して、設備費の面でメリットを有するセラミック抵抗加熱、プラズマ加熱は加熱が局所的となる恐れがあり攪拌が必要。より高い制御性、安くて簡素な設備について検討が残されている。プラズマ精錬の可能性や、大きな電流にて誘導された流れの利用など、今後検討が必要となるであろうことが指摘された。

以上、講演が終了した後、企業側をして、松永氏(新日鉄)、丸川氏(住金)、中西氏(川鉄)から以下のコメントが寄せられた。

「従来電磁力は連続铸造技術の発展のサポート的役割を果たしてきた。現在、連铸プロセスが技術的に飽和したかのように見える中で、新シーズとしての電磁力利用技術が育ちつつある。今後は、これらが次世代の連铸技術発展の牽引者の役割を果たすものと期待される。また、連铸プロセスだけでなく、他のプロセスへの適用も盛んに試みられるであろう。」

最後に、本討論会の実行に際しましては大学、企業からの発表者、コメンテーターの皆様に加え、非常に多数の方にほぼ全日にわたる活発な議論に参加いただきました。ここに改めて本討論会の成功にご協力いただきました皆様方に深く感謝いたします。

## 化学分析の最近の進歩

座長 金属材料技術研究所 大河内 春 乃  
副座長 NKK 中央研究所 岩 田 英 夫

技術革新の時代において、化学分析に課せられる課題も多岐にわたり、かつ困難な問題も多くなっている。ま

た、ISO との関連で JIS 法の国際化対応もせまられている。これらの状況に対応するために近年の化学分析も大きく進展した。一方、化学反応を熟知している鉄鋼及び金属の化学分析技術者や研究者が年々少なくなり、技術の伝承が危ぶまれている。21 世紀へ向けて化学分析の重要性と将来性について広く語りかけていかなければならない。そこで、本討論会では、他分野で活躍されている先生方もお招きし、最先端の化学分析について討論し、未来の鉄鋼等材料及びプロセス技術の開発に向けて寄与することを目的とした。以下にその要旨を示す。

(討29) 黒鉛炉原子吸光法による鉄鋼中の微量モリブデン、バナジウム及びチタンの定量

(金属材料技術研究所 小林 剛ほか)

鉄と比較して蒸気圧が低くかつ炭化物形成元素の Mo, V, Ti の同一試料溶液からの直接定量を検討した。熱的に理想的な STPF 法の適用により共存元素の干渉を抑制し、高効率原子化を達成した。硫酸アンモニウムをマトリックス修飾剤とし、パイロコーティング黒鉛管を用い、検出限界 0.21(Mo), 0.9(V), 1.0(Ti)  $\mu\text{g/g}$  が得られた。

(討30) マトリックス修飾剤添加フレームレス原子吸光分析法による鉄鉱石中のすずの定量

(新日本製鉄(株)先端技術研究所 鈴木節雄)

鉄鉱石を融解して得た酸溶液の直接測定の際の干渉抑制と感度向上を目的に、24 種類の有機酸と金属塩のマトリックス修飾剤の基礎検討を行った。アスコルビン酸溶液が良好な結果を与えた。グラフアイト内を EPMA で観察し、高感度を示す機構を考察した。繰返し精度は 0.05  $\mu\text{g/l}$  で相対標準偏差 4.5% ( $n=50$ ) であった。

(討31) 連続水素化物発生-ICP 発光分析法及び ICP 質量分析法による鉄鋼中の As, Bi, Sb の定量

((株)コベルコ科研 今北 毅ほか)

結晶粒界に析出し、機械的性質に影響する As, Bi, Sb の検討を行った。As の感度減少防止にチオ尿素、アスコルビン酸、及びよう化カリウムを添加した。As, Bi, Sb の検出限界 ( $\mu\text{g/l}$ ) は ICP-AES でそれぞれ、0.5, 0.8, 0.5, ICP-MS で 0.03, 0.02, 0.03 であった。Bi 定量の場合、Ni 10% 以上含有する試料では標準添加法を適用する

(討32) 抽出並びに共沈分離法を用いる高純度金属中の微量元素の定量

(東北大学金属材料研究所 高田九二雄ほか)

高純度金属の純度評価等の目的で各種分離定量法を研究した。マトリックスの Fe の 4-メチル-2-ペンタノン抽出除去により、Al, Ba, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Mg, Mn, Ni, Pb, Ti, Zn を ICP-AES, または AAS で定量した。クベロン分離 ICP-AES により Fe 中 Hf, Mo, Nb, Sn, Ta, V, Zr を定量し、水酸化ベリリウム-共沈分離-吸光光度法により Cr 中の微量 P を定量した。