



鉄鋼業への電磁力適用の現状と今後

Prospecting the Electromagnetic Processing Technologies in the Steel Industry

竹内栄一
Eiichi Takeuchi
藤 健彦
Takehiko Toh

新日本製鐵 (株) 技術開発本部
広畑技術研究部

新日本製鐵 (株) 技術開発本部
鉄鋼研究所 製鋼研究部

1 はじめに

電磁力の鉄鋼業への適用の歴史は古く、例えば溶解プロセスにおける電気エネルギー利用時には、熱エネルギーだけでなく、電磁力によって生じる攪拌のメリットを暗黙の内に享受していたことが窺い知れる。鋼製造の高速化、連続化の時代を迎えると、特に製鋼分野において反応促進や凝固欠陥防止のための溶鋼流動制御が不可欠となり、二次精錬炉や連続ストランドでの溶鋼の駆動・攪拌を行うにあたり、移動磁界の適用技術が急速に進んだ。このように、電磁力利用技術は、当初、高生産化のための製造補助手段として発展してきたが、近年ではより一層の生産性向上は言うまでもなく、品質の高度化、さらには新材料創出に向けて高度な電磁力利用の期待が高まり、企業独自の開発に加えて、産官学による体系的、かつ新たな技術的切り口での取り組みが展開されている。

本稿では、鉄鋼業全体における最近の電磁力の主要適用例を概括するとともに、今後の姿を展望してみたい。

また、熔融層に掛かる荷重を磁場により軽減しつつ焼結させ、通気性を上げて、生産性や歩留りを向上させる試みも行われている²⁾。図3に原理確認のための実験装置を示すが、ここでは電磁石により焼結完了層をサスペンドし、燃焼熔融層の通気性を向上して、生産性を向上できることが確認されている。

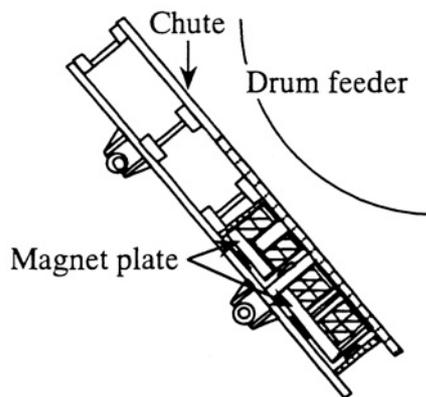


図1 永久磁石を使用した焼結用電磁ブレーキフィーダー

2 鉄鋼業における電磁力利用技術

2.1 製鉄/焼結分野における適用例

焼結プロセスにおいて、生産性や歩留りを向上させるための焼結技術の一つとして、焼結ベッドへの原料供給時にシュート背後から静磁場を印加し、ベッドの装入嵩密度や原料偏析を制御する技術が実用化されている¹⁾。図1に装置概要を示すが、Nd-Fe-B系の永久磁石がシュート背面に設置され、ドラムフィーダーより装入する原料に約0.1Tの静磁場を作用させることができる。これにより (1) 原料の落下速度が減少しベッド装入嵩密度が低下して通気性が改善されるとともに、(2) 配合された着磁性の良いミルスケール、返鉱等がベッド上部に偏在し、融液流動性が改善されて歩留りが向上することが確認されている (図2(a)、(b))。

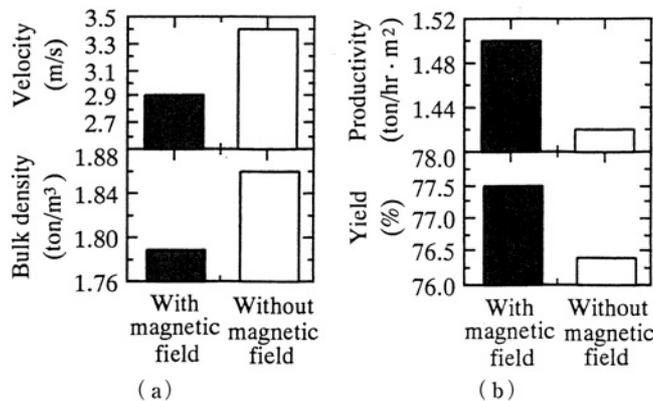


図2 焼結プロセスの生産性と品質に及ぼす磁場の影響
(a) 落下速度と嵩密度
(b) 焼結の生産性と歩留り

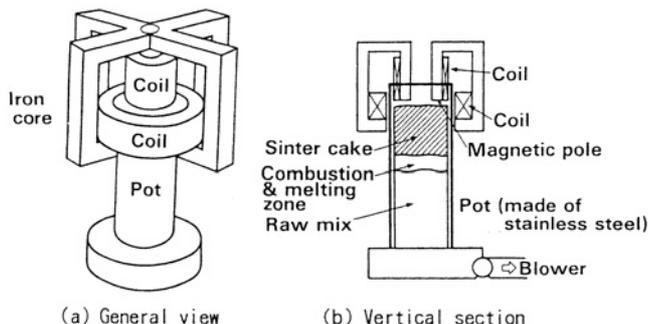


図3 磁場による荷重制御機能を有する焼結実験装置

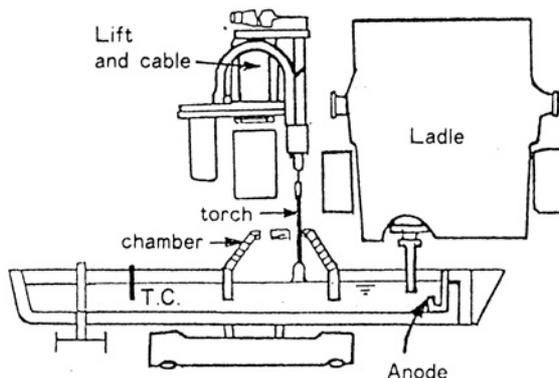


図4 プラズマ加熱タンディッシュ

2.2 製鋼/連続 casting 分野における適用例

2.2.1 タンディッシュ内溶鋼加熱と流動制御

鋼材に要求される品質の高度化に伴い、タンディッシュには温度と清浄度をより積極的に制御することが要求されている。銑片の割れや偏析欠陥の防止、また凝固組織微細化には低温 casting が好ましいが、所定の長さにわたって安定に作業するには溶鋼温度の制御技術が必要である。図4、5はそれぞれ工業化されているプラズマ加熱タンディッシュ³⁾、誘導加熱タンディッシュ⁴⁾の一例である。前者では1MW級の直流アークプラズマトーチを、後者では、注入された溶鋼が通過する堰の孔に沿って誘導電流を形成させるように電磁コイルが配置されている。これらの装置によって、レードル交換時の温度低下を最大で25℃程度補償している。また図6に誘導加熱タンディッシュにおける清浄度の変化を示したが、特にトップ部の向上が顕著である。これは、堰孔部において誘導加熱と同時にローレンツ力が発生、斥力によって介在物は孔壁に付着除去されるとともに、プール内攪拌が促進されて浮上除去が進むためである。

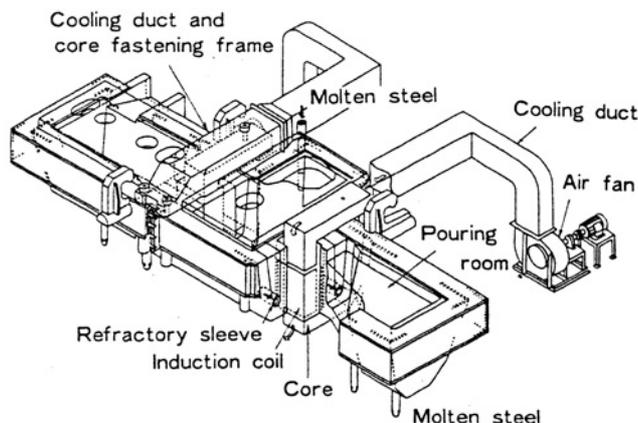


図5 電磁誘導加熱タンディッシュ

この攪拌機能を更に強化させたプロセスに、遠心分離タンディッシュがある⁵⁾ (図7)。注入部にリニアモータを配し、平均で1m/秒の回転流速を与えることによって、レードルから注入される溶鋼の流動パターンを変え、特にレードル交換部での大型介在物の除去を促進している。

2.2.2 鑄型内への電磁力適用

(1) 鑄型内電磁攪拌

ビレットやブルームなどの小断面鑄型内での電磁攪拌は銑片表面欠陥防止だけでなく、凝固組織微細化するおちポリシティーや偏析低減の面から重要な役割を果たしている。前者についてはメニスカス温度の均一化に加え、表層介在物および気泡の低減に効果がある。後者に関しては、鑄型内での攪拌により溶鋼スーパーヒートを低下させ、等軸晶生成を促進している。小断面鑄型での電磁攪拌では回転磁界型が用いられている。一方、小断面故に過剰な攪拌はメニスカスを乱し、パウダー casting の場合はその巻き込みを助長することになる。

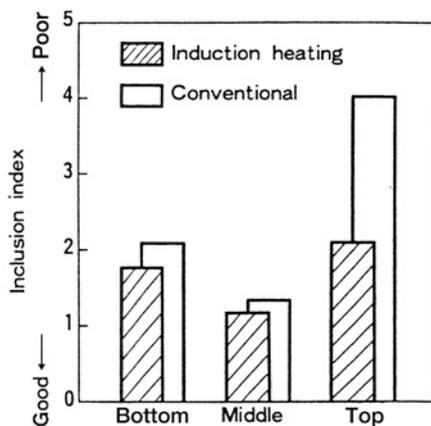


図6 電磁誘導加熱によるブルーム内清浄度の向上

図8は上下2段の電磁攪拌コイルを有する装置で、必要に応じてメニスカスの溶鋼流速の制御を可能にしている⁶⁾。

スラブ連続 casting 機においてはリニアモータの利用が一般的である。厚い冷却銅板など鑄型構造の点から周波数は10Hz以下に設定される。スラブ casting における鑄型内電磁攪拌の目的は銑片表面気泡、および介在物の低減である⁷⁾。図9に示すように、メニスカス位置に設置されたリニアモータにより溶鋼は水平方向に回転駆動される。流速は最大で0.5m/秒程度で

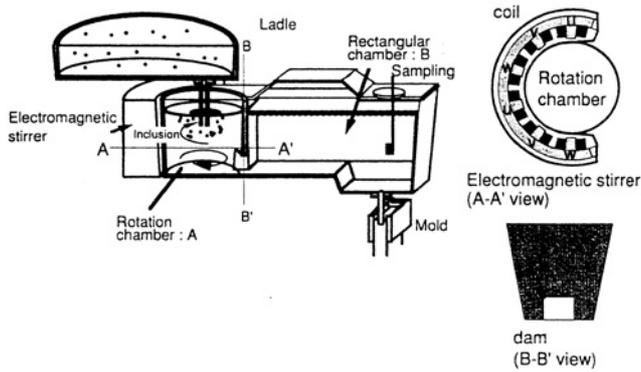


図7 遠心分離タンディッシュ

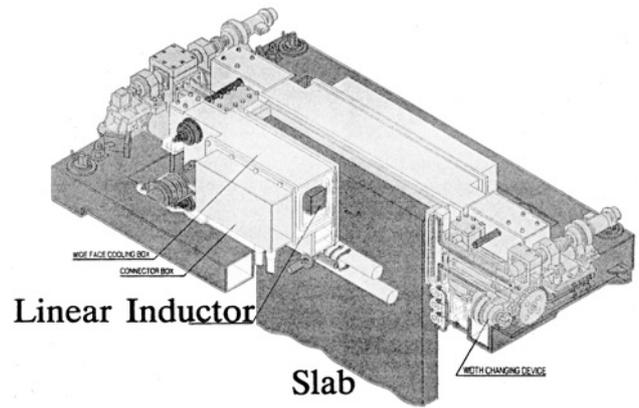


図9 スラブ用鋳型内電磁攪拌装置

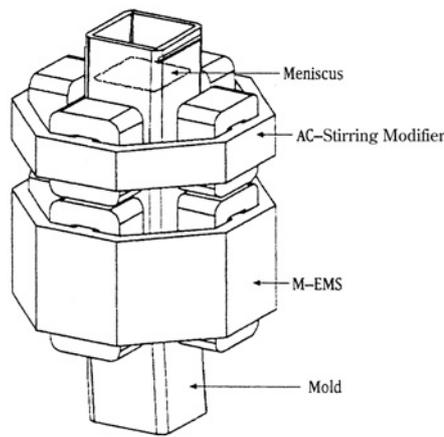


図8 2段コイル型ビレット用鋳型内電磁攪拌装置

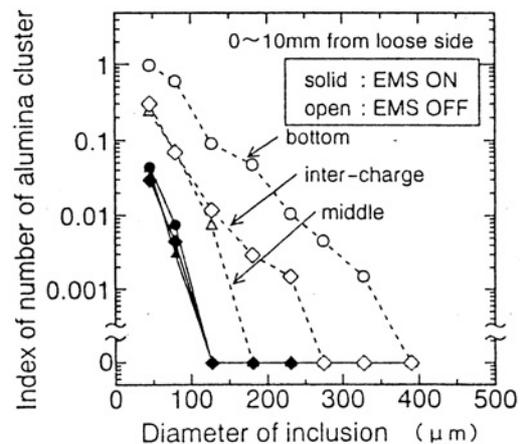


図10 鋳型内電磁攪拌による鋳片清浄度の向上

ある。旋回流動によってメニスカスの温度が均一化されるとともに、鋳片表皮下での気泡・介在物の捕捉サイトであるオシレーションマークのフックが衰退する⁷⁾。また、溶鋼駆動によって増加する凝固界面近傍の流速勾配も凝固シェルにより捕捉される気泡・介在物の数、サイズ分布の改善に寄与している(図10)⁸⁾。この流動は凝固前面に形成される溶質濃度分布にも影響を与える。これを利用してCO気泡の生成を抑制し、弱脱酸鋼の連鋳化が可能になっている⁷⁾。

一方、リニアモータを浸漬ノズル吐出孔位置に設置し、ノズルからの吐出流を加速、減速して、鋳型内溶鋼流動を制御する技術がある。これによりメニスカスへの熱供給を促進し、鋳片表皮下組織におけるフック生成を抑制したり、逆にメニスカスでの流れを抑えてパウダー巻き込みを防止できる⁹⁾と報告されている。

(2) 鋳型内電磁ブレーキ

鋳型内電磁ブレーキ技術は、当初、高速鋳造時に発生するメニスカスの乱れやストランドプール深部へのノズル吐出流の侵入深さを低減するために開発された。初期の鋳型内電磁ブレーキはノズル吐出孔付近に局部的に静磁場を配置したものであった¹⁰⁾。流動を鋳型内に分散させることはできたも

の、制御性の点で課題を残した。これに続いて開発された幅方向に均一な直流磁場を有するタイプの鋳型内電磁ブレーキ(図11)はこの課題を解決し¹¹⁾、さらに鋳型内の溶鋼の流れを磁場位置で分断することによって、異鋼種連々鋳時の成分混合領域の最短化を可能にした¹²⁾。ノズルからの注入流のプール上下への流動を制動する目的で、吐出孔を挟むように2段の直流磁場を具備するタイプも開発されている(図12)¹³⁾。

(3) 電磁鋳造(電磁初期凝固制御)

連続鋳造の鋳型内潤滑は、鋳型オシレーションによる鋳型-凝固シェル間へのパウダー流入が支配しているが、近年の高速化や高品質、さらに省エネルギー化のための鋳片表面無手入れ化のため、初期凝固の新しい制御技術が求められている。鋼の電磁鋳造は図13に示すようにメニスカス部位にソレノイド状の磁気コイルを設置し、交流磁場によってピンチ力を作用させてパウダー流入ギャップを拡大、消費量を増大して、潤滑を改善するものである。さらにオシレーションマークの消失(図14)により鋳片表層直下の清浄度も大きく向上する¹⁴⁾。現在、パルス状に電磁力を印加する方法が開発され、制御機能の向上によりビレットのみならず¹⁵⁾、スラブ¹⁶⁾の電磁鋳造が可能になっている。

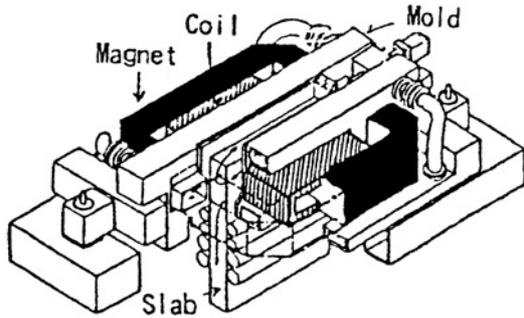


図11 均一磁場を印加できる鋳型内電磁ブレーキ装置

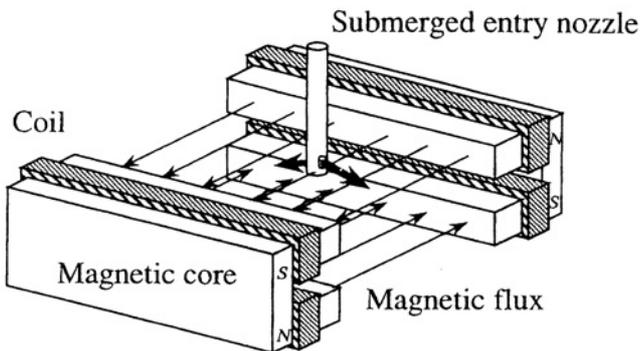


図12 上下に2段の静磁場を有する鋳型内電磁ブレーキ

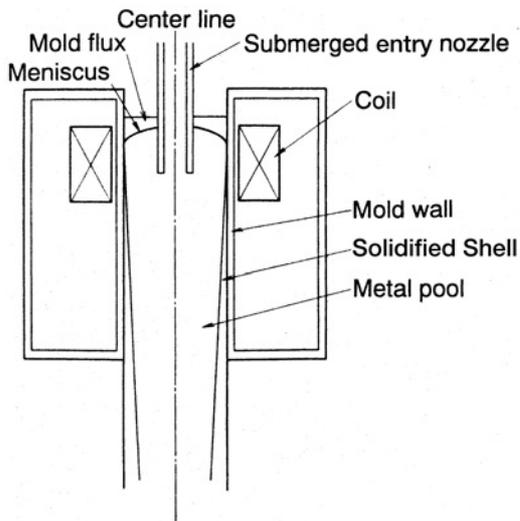


図13 電磁鋳造用鋳型

2.2.3 スtrand内電磁攪拌

鋼の連続鋳造プロセスで用いられている電磁攪拌装置には図15に示すように種々のタイプがあるが¹⁷⁾、ビレット・ブルームでは回転磁界型磁界、スラブではリニアモータが主流である。2次冷却帯での電磁攪拌の主目的は、凝固組織の等軸晶化による中心偏析防止を始めとする鋳片内部品質の改善である。図16に示すように電磁攪拌推力の増加、すなわち

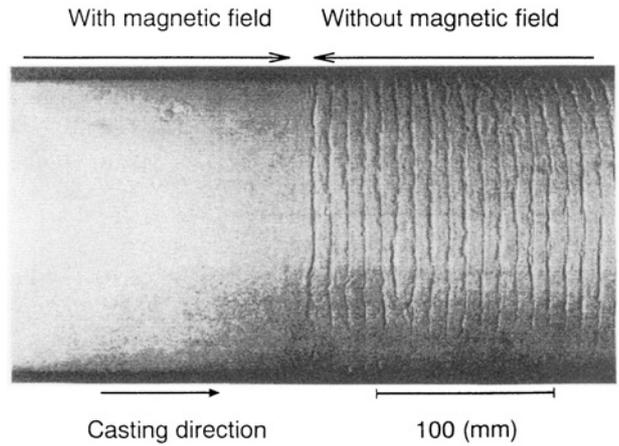


図14 電磁力によるブルーム鋳片表面性状の変化 (オシレーションマークの消失)

Motor type	Direction (application)	Stirring motion (3phase 1 → 2 → 3)	
		Symmetrical	Opposed
Rotary	Circular (billet-bloom)		
Linear	Vertical (bloom-slab)		
Linear	Horizontal (slab)		
Tubular (internal)	Vertical (billet-bloom)		
Tubular (external)	Horizontal (slab)		

図15 連鋳プロセスで使用される種々のタイプの電磁攪拌装置

攪拌流速の増加により鋳片内等軸晶率は上昇する。攪拌方向の切り替えなどの攪拌モードの最適化も効果がある¹⁸⁾。さらに、strand内での電磁攪拌装置の設置位置も等軸晶率に影響することが知られており、前述の鋳型内電磁攪拌との併用効果も報告されている。組織制御とは別に、strandプール攪拌によって生じる鋳片短辺での上昇流を利用し、ノズル吐出流の下降を抑制して、吐出流とともにプール内に持ち込まれる介在物や気泡のプール深部 (鋳片内部) への侵入を阻止する技術も工業化されている¹⁹⁾。

ここで使用される周波数は電磁攪拌装置の設置位置、すなわち凝固シェル厚などにより異なるが10~20Hzが一般的である。

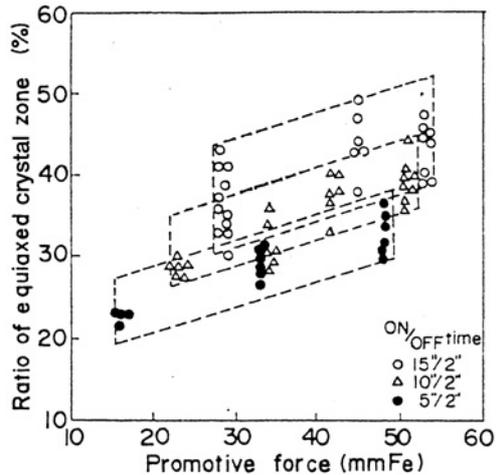


図16 電磁攪拌による鋳片組織の等軸晶率の増加

2.3 メッキラインにおける電磁力適用例

溶融メッキラインでは、ストリップを溶融亜鉛合金に浸漬する前に加熱し、鋼板表面に均一に溶融合金を付着させた後、メッキ被膜層を形成させる。溶融亜鉛合金はストリップに凝固付着するのではなく、溶融状態で付着後、ガスジェットにてワイピングした後、凝固することによって均一なメッキ層が得られる。従来、ストリップの加熱は焼鈍炉にて還元雰囲気で行われるのが一般的であるが、設備が大掛かりになるだけでなく、操業条件の変動、例えば通板速度への対応が困難であるなどの課題がある。これらに対処すべく、電磁誘導によるストリップの加熱制御技術が実用化されている²⁰⁾。図17にその変圧器型電磁加熱装置の概要を示したが、電源容量1.2MVA、周波数22~30Hzにて加熱能力は450℃(最大ライン速度100m/min)である。このプロセスでは電圧誘起のためのトランスタイプの電磁コイルが用いられる。ここでは加熱側の電極に溶融亜鉛浴自体が用いられているのが特徴である。もう一方の電極としてはロールが用いられているが、常温で接するため接触不良によるトラブルは発生しない。図18に板幅方向の温度分布を示したが、ばらつきは10℃以内と、均一である。また通板速度変動に伴う温度制御性も優れている。またコンパクトな装置であることも大きな特徴である²¹⁾。

3 電磁力適用のポテンシャルと今後の展望

3.1 製鋼品質の予測制御

鋼の清浄度が極めて高くなった現在、製鋼起因の品質欠陥は、何らかの非定常的に発生する異常要因が関与しているのがほとんどである。鋳造中の溶鋼や鋳片の品質を迅速に知ることによって、製造中の鋳片の品質を制御したり、欠陥部を

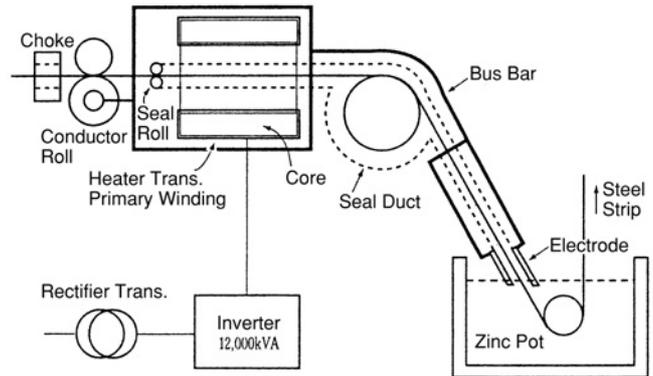


図17 溶融メッキプロセスにおけるストリップ電磁加熱装置

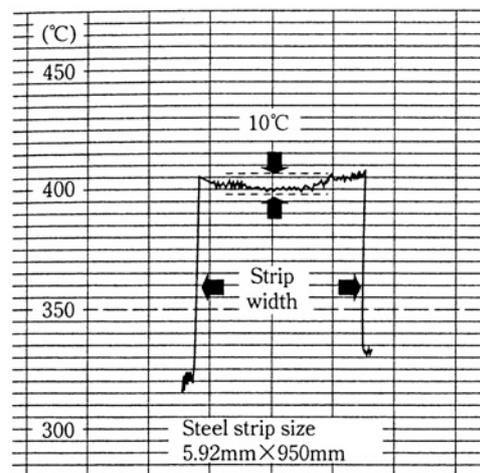


図18 加熱後のストリップ表面の温度分布

選択的に排除することが、清浄度の平均値を向上させるのに比べ効率的である。(1) 現在の連続鋳造プロセスにおいては、先に述べたように種々の電磁力アクチュエーターが配備されていること、(2) 数値シミュレーションの精度や計算機能力の飛躍的な能力向上に伴い数値シミュレーションの計算精度や速度が大幅に進歩したこと、さらに(3) 迅速で高精度の清浄度測定技術を組み合わせることによって、製鋼品質の予測制御が可能になっている²²⁾。

図19はこの技術のシステム構成を示している。レードルスラグの溶鋼中への混濁を検知すると共に、タンディッシュ内、鋳型内、ストランド内の挙動を数値予測し、鋳型内電磁攪拌、プレーキによってこれを制御する。図20は迅速に溶鋼の清浄度を検知するために新たに開発された、コールドクルーシブルを利用した方法で、電磁斥力によって溶鋼表面に介在物を集積させて、この部位の介在物組成を蛍光X線法で測定したり、あるいはこのようにして処理したサンプルの表層のみを電解法により介在物を短時間で抽出するものである。この技術によって計算結果は逐次補正されて、その予測精度を維持することができる。

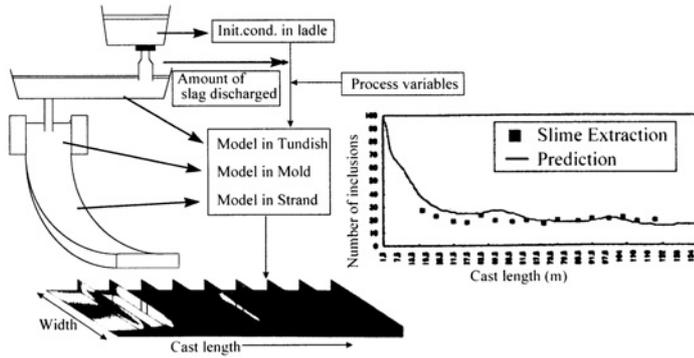


図19 連続プロセスの铸片品質予測制御システム

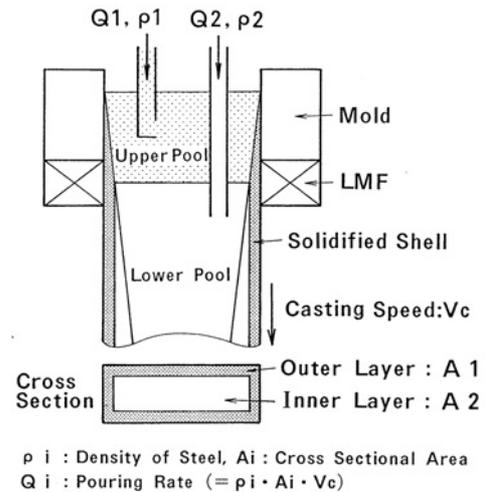


図21 直流磁界によるクラッド铸片の連続铸造プロセス原理

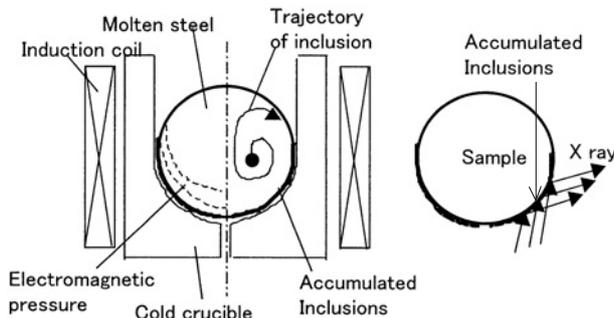


図20 コールドクルーシブルを利用した鋼中清浄度の迅速分析法

3.2 新しい鉄鋼材料の創出

組成の異なる2種類の鋼から構成されるクラッド鋼材は新しい機能材料の一つとして期待されている。ここでは電磁力を利用し、異なる成分の溶鋼から直接クラッド铸片を連続铸造する方法²³⁾を紹介する。図21に示すように、ストランドプールの上部和下部にそれぞれ別の溶鋼を注入する際、その中間位置に設置した電磁ブレーキによって両溶鋼の混合を抑制する。図22に数値シミュレーション結果を示す。上部と下部の溶鋼はそれぞれ表層と内層に分離されて凝固し、クラッド铸片が製造される。製造された表層ステンレス鋼、内層普通鋼からなるステンレスクラッド铸片の断面を図23に示す。これを圧延し、優れた耐食性と加工性を併せ持つ材料が得られている。

一方、鋼を強磁場中で圧延することによって組織を制御しようとする試みが行われている。図24は実験装置を示しているが、圧延後オーステナイト域で保持中に磁場を8T作用させた場合、磁場の方向に向かってフェライト相が配向している(図25(a))。磁場無しで保持したサンプルは均一な組織を呈しており(図25(b))、磁場の組織形成に及ぼす効果が確認されている。この他にも加工、変態と磁場印加を組み合わせることによって、組織が微細化することも観察されており、磁場を利用した組織制御プロセスの可能性が示されている²⁴⁾。

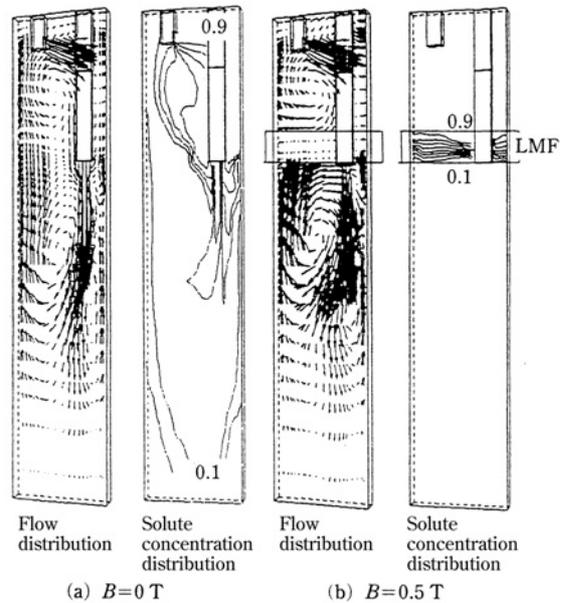


図22 電磁ブレーキによるストランド内の溶鋼混合抑制(計算結果)

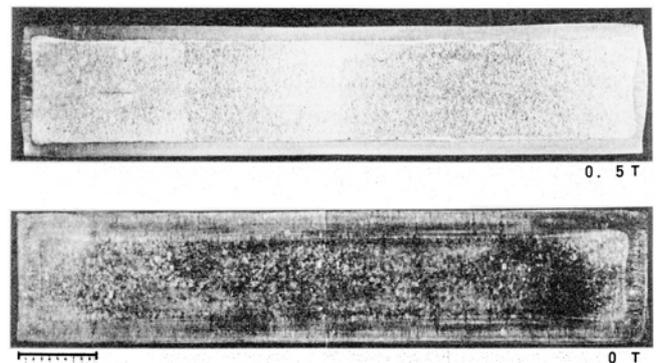


図23 铸造されたステンレスクラッド铸片のC断面組織

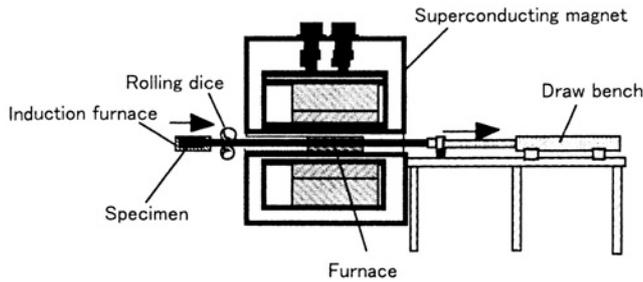
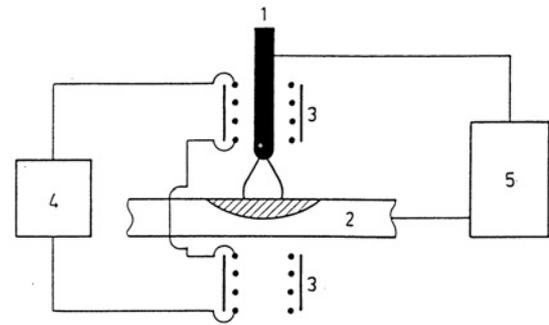


図24 超伝導磁石内に設置された圧延/熱処理実験装置



Schematic representation of the experimental setup. 1 - tungsten electrode; 2 - workpiece; 3 - Helmholtz coils; 4 - current source for Helmholtz coils; 5 - welding power supply.

図26 磁気攪拌TIG溶接の原理

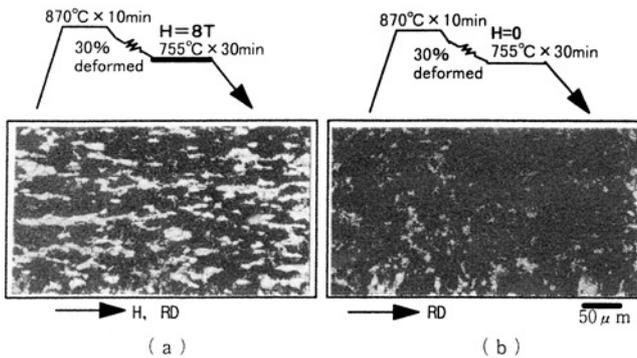


図25 強磁場による偏向組織の形成

(a) 8Tの磁場印加、(b) 磁場無印加

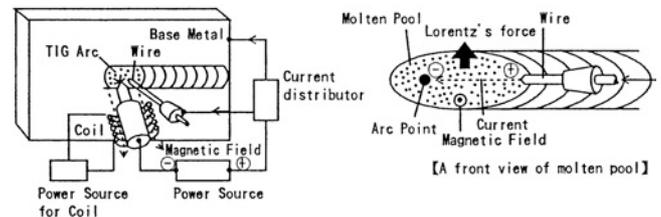


図27 磁気浮揚溶接の原理

3.3 鉄鋼材料の利用加工技術/新しい溶接技術

鉄鋼素材の可能性をより多く引き出すために、ユーザー技術領域での利用加工技術の開発が重要になっている。電磁力利用技術についても幾つかの例があるが、ここでは新しい溶接技術を紹介する。

厚板や形鋼の溶接部内部欠陥の防止をはじめ、溶接後の強度劣化防止のための溶接部位の組織微細化、あるいはビード形状の改善を目的に、電磁力を利用した溶接技術が開発されている。図26は磁気攪拌TIG溶接法の原理を示したものである²⁵⁾。トーチ先端部に設置された電磁コイルにより交流磁界を発生させ、溶接電流との相互作用により溶融プールを周期的に巡回反転攪拌することによって、溶接時の凝固組織を微細化することに成功している。一方、大型構造物の組み立て時に不可欠となる横向き溶接では、重力による溶融金属の垂れ下がりによって発生する溶接欠陥が高効率化を阻害している。溶接電流と外部より印加する直流磁界により生ずる電磁力を利用し、この垂れ下がり防止する技術が開発されている(図27)²⁶⁾。図28にその効果を示すが、溶融金属中に発生する上向き電磁力によって、ビードや溶け込みは上下に対称な形状に改善されている。

4 おわりに

鉄鋼業における電磁力適用は、主として連続鋳造の分野を

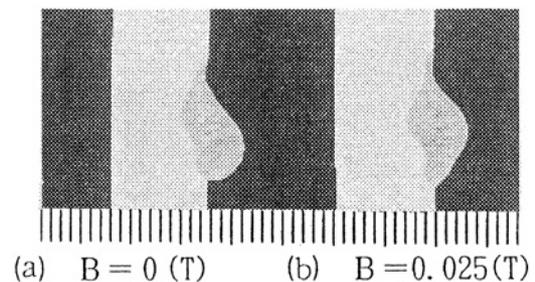


図28 磁気浮揚溶接によるビード形状の改善

中心に大きく発展してきた。これは連続プロセスでは、多量の鋼に関する処理が、比較的コンパクトな装置で可能となるためであり、他の実施例である焼結プロセスでの原料装入制御や溶融メッキプロセスでの加熱制御も連続プロセスがゆえに実用化された好例である。

これらのプロセスで利用される電磁力の機能は、加熱、攪拌や制動であり、反応促進、高純度化を含む分布制御、組織制御などに活用されている。

今後、電磁力利用技術にさらなる展開を図るには、より大きな空間をカバーしたり、強磁場を印加できる装置など、パワーエレクトロニクスの視点からの開発に加え、それぞれの材料やプロセスメタラジーと融合した巧妙な適用の研究が必要である。

現在、我が国のこの分野の研究開発ポテンシャルは、産官学が一体となった「電磁気冶金部会」「材料電磁プロセッシング部会」「高度電磁力利用マテリアルプロセッシング研究会」など一連の研究会活動、および国家プロジェクト「電磁力利用によるエネルギー使用合理化金属製造プロセス開発」

を通して今や国際的にも高いレベルにあり、更なる電磁力利用技術を展開する上で大きな役割を果たすものと期待される。

また、電磁力を利用したプロセッシングに留まらず、モーターやトランスなどの極限性能追求のための新しい鉄鋼素材開発や製品設計技術の開発など、分野拡大による一層の貢献も強く望まれる。

謝辞

新日本製鐵(株)技術開発本部・製鉄研究部の細谷陽三氏、同じく接合研究センターの深見俊介氏からの有益なコメントに対し、感謝致します。

参考文献

- 1) 大山伸幸, 主代晃一, 井川勝利, 小野力生, 滝平憲治, 藤井紀之: CAMP-ISIJ, 11(1998), 226.
- 2) T.Inazumi, M.Fujimoto, S.Sato and K.Sato: ISIJ Int., 35(1995), 372.
- 3) K.Matsumoto, Y.Hoshijima, K.Ishikura, K.Umezawa, Y.Nuri and Y.Ohori: Proc.6th IISC, ISIJ, Nagoya, (1990), 222.
- 4) I. Suzuki, S. Noguchi, Y.Kashiwabara, T.Horie and M.Saito: Steelmaking Conference Proceedings, ISS, Toronto, 71(1988), 125.
- 5) 三木祐司, 柴田浩光, 別所永康, 岸本廉夫, 反町健一, 廣田哲仁: 鉄と鋼, 86(2000), 239.
- 6) J.Limoges and L.Bitelman: Iron and Steelmaker, Nov.(1997), 49.
- 7) 竹内栄一, 藤井博務, 大橋徹郎, 丹野仁, 高尾滋良, 古垣一成, 喜多村治雄: 鉄と鋼, 69(1983), 85.
- 8) J.Fukuda, Y.Ohtani, A.Kiyose and K.Tsutsumi: Proc. 3rd European Conf. on Continuous Casting, UNESID, Spain, (1998), 437.
- 9) 久保田淳, 久保典子, 鈴木真, 石井俊夫, 西町龍三, 荒牧則親: 鉄と鋼, 86(2000), 271.
- 10) J.Nagai, K.Suzuki, S.Kojima and S.Kollberg: Iron Steel Engineer, 61(1984), 41.
- 11) 石井孝宣, 今野直樹, 岡崎照夫, 上原彰夫, 竹内栄一, 原田寛, 菊池俊男, 渡辺久仁雄: CAMP-ISIJ, 9(1996), 206.
- 12) 原田寛, 竹内栄一, 瀬々昌文, 石井孝宣: 鉄と鋼, 86(2000), 76.
- 13) 井戸川聡, 戸澤宏一, 竹内秀次, 反町健一, 杉澤元達, 蓮沼純一: CAMP-ISIJ, 9(1996), 618.
- 14) T.Toh, E.Takeuchi, M.Hojo, H.Kawai and S.Matsumura: ISIJ Int., 37(1997), 1112.
- 15) 谷雅弘, 田中純, 竹内栄一, 藤崎敬介, 山崎伯公, 磯部浩一: CAMP-ISIJ, 13(2000), 815.
- 16) 谷雅弘, 原田寛, 藤健彦, 松宮徹, 宮沢憲一, 山崎伯公: CAMP-ISIJ, 14(2001), 163.
- 17) H.S.Marr: Iron and Steel International, Feb.(1979), 29.
- 18) 氏家義太郎, 前出弘文, 伊藤幸良, 荻林成章, 関博, 和田要, 伊藤裕雄: 鉄と鋼, 67(1981), 1297.
- 19) 若木明德, 白井登喜也, 磯野貴宏, 大貫一雄, 藤健彦: CAMP-ISIJ, 14(2001), 168.
- 20) 大原哲矢, 小田島寿男, 相曾俊春, 福山勝, 勝山憲夫, 溝口良平, 大澤孝明, 曾根健介: CAMP-ISIJ, 4(1991), 1639.
- 21) 田村光司, 関野裕, 井家仁, 八尾祐吾, 福山勝, 小野田正巳, 大原哲矢, 松浦啓克, 林静男, 伊藤容之: エレクトロヒート, 86(1996), 34.
- 22) 藤健彦, 井本健夫, 今野雄介, 近藤裕之, 山村英明, 若生昌光, 竹内栄一, 伊藤彰: CAMP-ISIJ, 14(2001), 13.
- 23) E.Takeuchi, M.Zeze, H.Tanaka, H.Harada and S.Mizoguchi: Ironmaking and Steelmaking, 24(1997), 257.
- 24) 丸田慶一, 下斗米道夫: CAMP-ISIJ, 13(2000), 1148.
- 25) M.Malinowski-Brodnicka, G. den Ouden and W.J.P.Vink: Welding Research Supplement, Feb.(1990), 52.
- 26) 真鍋幸男, 広本悦己, 小林泰幸, 和田宏一, 寄高秀樹: 溶接学会全国講演大会講演概要, 59(1969), 8.

(2001年11月15日受付)