

新日本製鐵式スラブ用モールド内電磁攪拌装置“M-EMS”

Nippon Steel In-Mold Electro-Magnetic Stirrer "M-EMS" for Slab Caster

橘 高 節 生^{*(1)}
Setsuo KITTAKA

渡 邊 久 仁 雄^{*(1)}
Kunio WATANABE

神 吉 豊 彦^{*(2)}
Toyohiko KANKI

三 浦 康 彰^{*(1)}
Yasuaki MIURA

抄 録

日本の自動車、家電、建築、造船などの産業は、製鉄会社に対し高品質な板材の安定供給を要求してきている。このニーズを満足するにはスラブの表面を削り取らなければならなかった。このような問題に 대응する技術として、新日本製鐵はスラブの表面品質を向上することができるスラブ用モールド電磁攪拌装置“M-EMS”を開発した。この設備の特長と構造及び効果を紹介した。

Abstract

Japanese industries have been severely requesting steel manufacturers to stably provide high quality steel sheet/plates. In order to satisfy the customers' need, slab surface has to be scarfed. As the technique to solve such problem, Nippon Steel developed In-Mold Electro-Magnetic Stirrer "M-EMS" for slab caster which can improve surface quality of slab. In this paper, the features and effects of this system are outlined.

1. 緒 言

日本の自動車、家電、建築、造船などの産業は、加工特性の優れた高品質な板材の安定供給を要求してきている。このニーズを満足するため、日本の製鉄会社はスラブ連続铸造設備用にさまざまな電磁攪拌装置を開発、導入し、多大な努力を労してきた。従来、スラブ表層の清浄化対策は、主に(1)溶鋼の汚染防止と(2)ノズル流を利用したモールド内溶鋼流動制御であった。また縦割れに関しては、パウダー特性の制御など凝固シェル外側からの対策であった。

新日本製鐵は、最終目的は溶鋼の清浄性向上ではなくスラブ表層の清浄性向上であることから、非金属介在物などが凝固界面に捕捉される段階へ直接対策をうつことを考えた。また、もともと不安定性を抱えるノズル流を利用するのではなく、それとは独立した制御系でモールド内の溶鋼流動制御を行うことを考えた。縦割れに関しても、原因は初期凝固シェル厚みの偏差による初期凝固シェルのひずみであることから、モールド内の溶鋼温度分布を均一にし、凝固遅れをなくすることを考えた。このため、新日本製鐵は、モールド内において凝固中の鋳片内溶鋼部分を電磁気力によって流動させるモールド内電磁攪拌装置(In-Mold Electro-Magnetic Stirrer : M-EMS)の開発を始め、1980年に最初のスラブ用M-EMSを広島製鐵所に導入した。

その後、多くの試みと実験を繰り返した結果、M-EMSによるモールド内での溶鋼攪拌がスラブの表面品質を著しく向上させ、こ

れにより大幅な歩留り向上を達成することを確認した。また、攪拌により初期凝固シェル厚が均一となり、縦割れによるブレークアウトが減少し、安定操業を達成した。この結果、現在、新日本製鐵のほとんど全てのスラブ連铸機に搭載されている^{1,2)}。

本報では、新日本製鐵にて開発したスラブ用M-EMSによる歩留まり向上効果と設備の特長について述べる。

2. スラブ用M-EMSの原理と主仕様

2.1 スラブ用M-EMSの原理

図1にスラブ用M-EMSの攪拌原理を示す。モールド内の鋳片後方に設置したリニアインダクタがモールド全幅をカバーする平行移動磁界を発生し、この平行移動磁界がモールド内メニスカス近傍の溶鋼を水平方向に回転駆動させる³⁾。これは、永久磁石による磁界中をコイルに流れる電流が横切ると、フレミングの左手の法則によりコイルに力が発生することを利用するリニアモーターの原理と同じである。

2.2 モールド内溶鋼攪拌流による洗浄効果

以下に、モールド内溶鋼攪拌流の洗浄効果により鋳片が清浄化する過程を示す。

- (1)図2に示すように、移動磁界により発生した溶鋼攪拌流が、柱状晶の間に捕捉された非金属介在物を洗い出し、初期凝固シェルに捕捉されることを防止する。
- (2)洗い出された非金属介在物は中心部で衝突、凝集して巨大化し、

^{*(1)} プラント事業部 製鉄プラントエンジニアリング第二部 連铸・圧延グループ マネージャー
北九州市戸畑区中原46-59 ☎804-8505 ☎093-872-6986

^{*(2)} プラント事業部 製鉄プラントエンジニアリング第二部 制御システムグループ マネージャー(日鉄プラント設計株式会社 鉄鋼電気計装グループ 課長)

表1 M-EMS主仕様

General technical data

Casting radius		Curved/ vertical/ vertical-bend
Slab size	Thickness	150-400mm
	Width	600-1,600/ 900-2,360mm
Mold length		800mm-1,090mm
Casting speed		0.5-2.5m/min
Coil type		Linear induction motor type
Coil length		Pole pitch 420-972m/ number of pole 2/4
Capacity		300-600kVA
Thrust		Approx. $7.9 \times 10^3 \text{kN/m}^2$ (as measured along 15mm inside from the mold surface)
Coil weight		Approx. $2,500 \text{kg} \times 2/\text{st}$ (slab size 250mm $\times$ 1,680mm)
Cooling system for coil		Internally cooling by water
Sealing system for connector box		Puring by N_2 gas or dry air

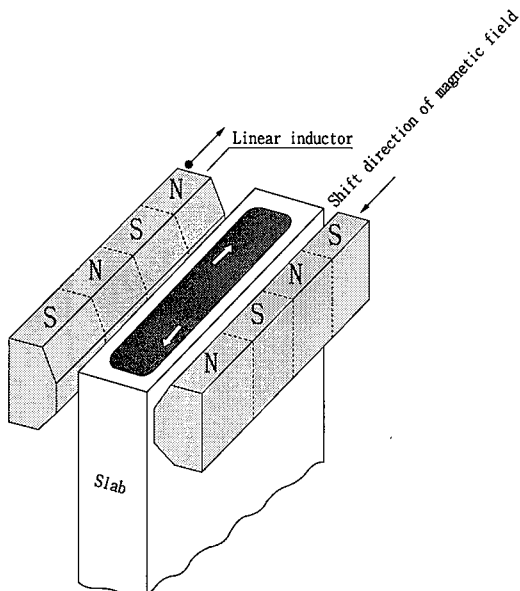


図1 スラブ用M-EMSの攪拌原理

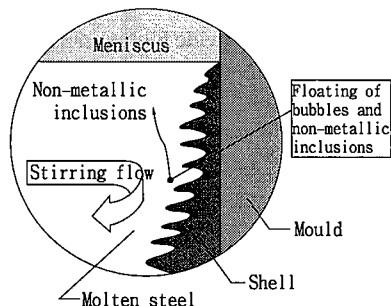


図2 鋳型内の溶鋼流動

浮上しやすくなる。

(3)メニスカスまで浮上した非金属介在物はパウダーに捕捉されることで鋳片から取り除かれる。

また、この攪拌流は、モールド内の溶鋼温度分布を均一にし、凝固シェル厚みの偏差を減少させることで凝固遅れによる初期凝固シェルのひずみを軽減させ、鋳片の縦割れを防止する効果も持っている。

2.3 スラブ用M-EMSの主仕様

図3にスラブ用M-EMSの代表的な構造を示す。また、表1にスラブ用M-EMSの主仕様を示す。

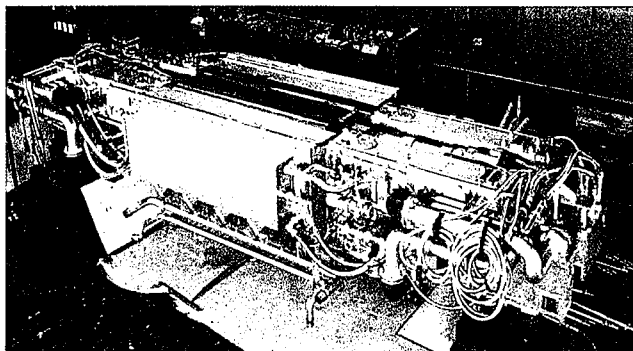


図3 M-EMS

3. M-EMSの鋳片品質に及ぼす影響

M-EMSの攪拌流がメニスカス部で起こす現象と品質効果及びコストメリットとの相関を図4に示す。またM-EMS適用による鋳片品質に対する効果を個別に述べる。

3.1 ピンホールの低減効果

図5にM-EMSによるピンホール低減効果を示す。M-EMSを適用した場合、ピンホール密度指数が大幅に減少する。特に、表層化でのピンホール減少効果が顕著である。

3.2 非金属介在物の低減効果

図6にM-EMSによる鋳片表皮下(表面から10mmまで)のアルミナクラスター介在物の低減効果を示す。M-EMSを適用した場合、鋳片表面に100 μm 以上の巨大非金属介在物が捕捉されなくなる⁵⁾。

通常、ボトム部、トップ部、継ぎ目部はタンディッシュ内溶鋼レベルが下がりタンディッシュ内での非金属介在物浮上効果が減少するため、タンディッシュからモールドに持ち込まれる非金属介在物量が増加する。さらに、定常部に比べ铸造速度が低下するため、ノズル流によるシェル洗い効果が減少する。これらより、ボトム部、トップ部、継ぎ目部は、鋳片表面非金属介在物欠陥が発生しやすい。

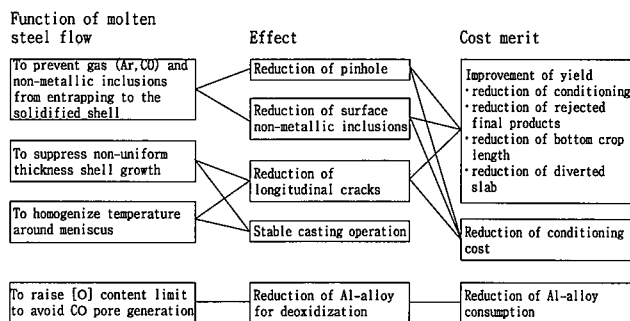


図4 M-EMSの品質効果とコストメリットの相関

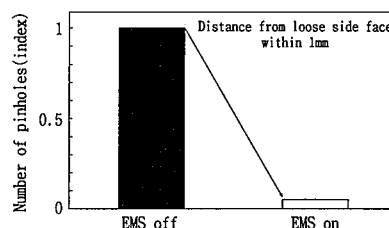


図5 M-EMSによるピンホール低減効果

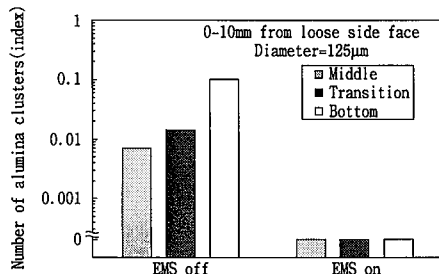


図6 M-EMSによる表面介在物の低減効果

しかし、図6に示すように、M-EMSを適用した場合、ボトム部、継ぎ目部に対しても铸片ミドル部と同程度の非金属介在物個数にまで抑えることができる。この現象は、铸片の清浄性がモールド内に注入される溶鋼の清浄度よりもモールド内での溶鋼流動に強く支配されることを示している。M-EMSはノズル吐出流による不安定な流動に依存せず、メニスカス部を強制的に一定流速で回転攪拌するため、常に清浄度のばらつきが少ない铸片を確保することができる。この結果、ボトム片、継ぎ目片の切り捨て長さ（格落ち、スクラップ化など）を短縮することが可能である。

3.3 铸片表面縦割れの低減効果

メニスカス周辺の溶鋼はよどみやすいため、铸片幅方向の溶鋼温度不均一に起因するシェル厚不均一成長により縦割れが発生しやすい。特に中炭素鋼(C=0.1~0.15%)は不均一冷却による縦割れが発生しやすい。

M-EMSを適用した場合は、凝固遅れの箇所が少なく、シェル厚が均一となり、図7に示すように铸片縦割れ発生数を減少することが可能である¹⁾。

3.4 安定操業

図8にブレイクアウト時のモールドの表面異常を検出するブレイクアウト予知アラームの発生頻度を示す⁶⁾。M-EMSを適用した場合は、ブレイクアウト予知アラームの発生頻度が激減し、铸造を安定化することができる。これは、M-EMSによる凝固シェル界面の溶鋼流れにより初期凝固状態が安定したこと、ノズルからのモールド内溶鋼偏流の影響が軽減されたこと、ディッケルの発生が抑制されたことによるものである。

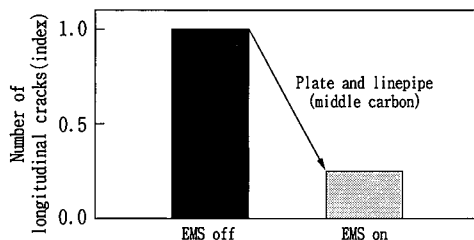


図7 M-EMSによる縦割れ低減効果

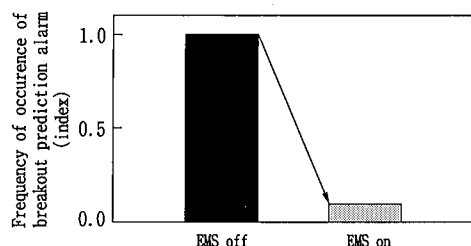


図8 M-EMSによる操業安定効果

3.5 最終製品におけるM-EMSの効果

3.5.1 自動車鋼板向け極低炭素鋼

極低炭素鋼のなかでも自動車用外板向けについては、軽量化のため薄くかつ高強度の鋼板が必要である。また、流線型のデザインを実現するため加工性に優れた鋼板が必要である。M-EMSは、このようなニーズを満たす表面清浄の優れた铸片を高歩留まりにて铸造可能である。

図9に示すようにM-EMSは、表層のピンホール、非金属介在物を減少させ、製鋼でのホットスカーフや手入れなど製精対象材を40%削減可能である。また、製品におけるスリバーきず起因の不合格材が50%削減可能である。また、ボトム切り捨て長さが短縮可能となり製品歩留まりが向上する(図10参照)。更に突発の铸造異常による格落ちでの自動車外板充当不可範囲を減少できる(図11参照)¹⁾。

3.5.2 厚板、鋼管向け高級鋼

厚板、鋼管向け高級鋼は、非定常部における铸造速度変動に起因したスラブ表面温度変動に伴うコーナー部ひび割れ等の表面きずや、非定常状態に伴う非金属介在物が増加し問題である。

M-EMSを適用することにより、通常の铸型冷却水温のきめ細かな管理やフロントパウダー特性の改善等の諸対策によらず安定的に縦割れ発生率を低レベルに抑えることが可能である⁴⁾。また、M-EMSによる初期凝固制御効果により、铸片表面縦割れ発生率を大幅に低減でき、表2に示すように非定常部铸片についてもクロップ切

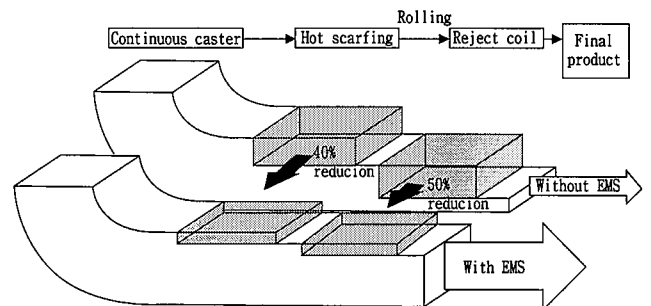


図9 M-EMSによる歩留まり向上効果

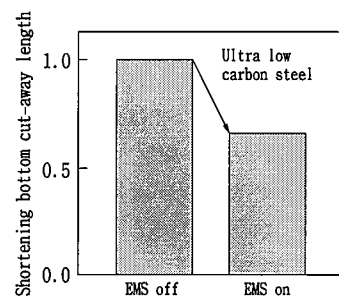


図10 ボトム切り捨て長短縮効果

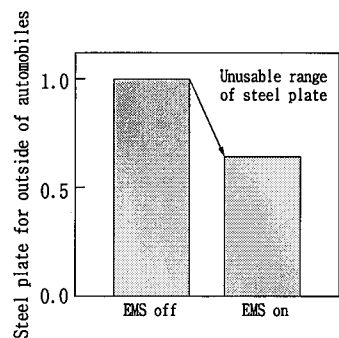


図11 充当不可範囲の減少効果

表2 厚板におけるクラック切り捨て長さの短縮

部位	クランプ切り捨て長さ
最ボトム	一般材1.0m 厳格材1.5m →0.6mに短縮
鋼板挿入	段注±2m程度 →±1m程度に短縮(成分混合部切り捨て)
最トップ	1.0m →0.6mに短縮

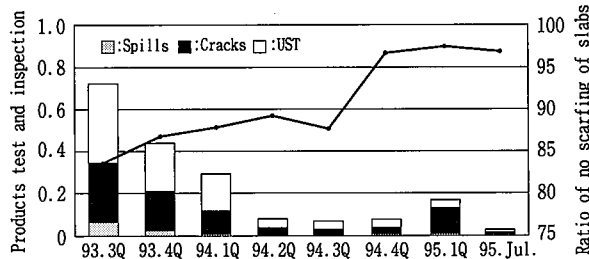


図12 製鋼起因の製品検査成績の推移

り捨て長さを大幅に削減可能である。同時に鋳片ノーマシンスカーフ率も図12のように大幅に向上し、99%レベルに達している。

4. MEMSの設備の特徴

4.1 EMSコイル構造

EMSコイルを鋳型内の限られたスペースに設置し、かつ溶鋼に強力な攪拌力を発生させるために、EMSコイル本体構造は以下のような特徴を有している。

4.1.1 M-EMSのコイル巻き線方式

通常、誘導電動機、リニアモーター等に用いられる巻き線方式ではコイルエンドが長くなり、EMSコイル全体が高くなるため鋳型内に収納することが困難である。このため、EMSコイルでは図13に示すようにコイルエンドのスペースが小さいリング巻きを採用している。このリング巻きの採用によりEMSの取り付け位置(高さ)をメニスカスに近づけることが可能となり、効率よくメニスカス部溶鋼を攪拌することができる。

4.1.2 コイル構造、冷却方式

強力な攪拌力を得るために、コイルは高い電気装荷(アンペアコンダクタ)が必要である。M-EMSでは高い電気装荷を得るためコイルの素線(導体部)を銅管とし、銅管内に冷却水を通水しコイルのジュール熱を抜熱する直接水冷方式を採用し、冷却能力を向上させている。充電部である銅管が冷却水と直接接するが、コイルへの冷却水配管の一部に絶縁ナイロンチューブを用い、大地間と絶縁を確保している。更にコイルをコンパクトにするため、図14に示すように四角形断面の銅管を用いている。これにより、鉄心のスロット内

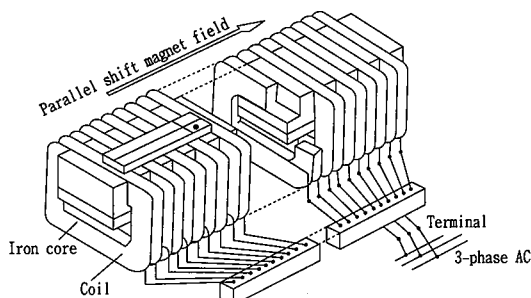


図13 M-EMSコイル巻き線方式

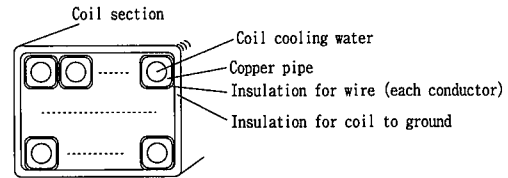


図14 コイル断面形状

に無駄な隙間なくコイルを高密度に充填することができ、高電気装荷を達成している。

4.2 電源、制御装置の最適構成

図15にM-EMSの電源制御装置の構成を示す。EMSコイルで生じた磁束はモールド鋼板を通過してモールド内溶鋼に作用する。この磁束は銅板に生ずるうず電流により減衰する。減衰度合いは周波数が高いほど大きくなるため、EMSによる推力のピークは数Hzの低周波領域にある。このため、電源装置は低周波数領域での運転が可能となるようインバータを採用している。操作盤で設定される周波数および電流に基づき、インバータの周波数制御、電流制御が独立に行われる。最大推力を与える周波数、必要な攪拌強度に応じた電流を設定することで最適なEMS運転を行うことができる。

4.3 M-EMSの銅板構造

M-EMSモールドを設計する際は銅板の設計が非常に重要である。モールド銅板は、(1)銅板による電磁力の減衰を極小にし、(2)モールド本来の溶鋼を冷却する機能を保持し、(3)寿命を通常モールドと同等に確保できるよう設計しなければならない。

通常モールドでは、鋳片の銅板への焼き付き防止、銅板寿命の向上、銅板再使用回数の増加を狙い、銅板表面温度が高くないように熱伝導率の大きな材質を使用している。一方、溶鋼の攪拌推力を発生させるEMSコイルからの磁束密度は、鋳片とコイル間にある銅板内にて発生する渦電流によって減衰する。通常の熱伝導率の大きな銅板材質では電気伝導度が大きく、磁束密度の減衰も大きくなる。銅板による磁束密度の減衰を小さくするためには、電気伝導度のより小さい材質を採用し、銅板内に発生する渦電流を小さくする必要がある。

銅板の電気伝導度、銅板温度、及び溶鋼の攪拌推力の関係を図16に示す。限られたスペースに設置されるコイルにおいて、十分な溶鋼攪拌力を得るためには、本図に示すように銅板材質は電気伝導度IACSが60%以下のものを使用する必要があることが分かる。一方、銅板での磁束密度の減衰を減少させるために電気伝導度の低い材質を使用すると、通常モールドと同一の銅板厚みの場合は銅板表面温度が高くなりすぎ、鋳片の焼き付きによるブレイクアウトの多発や、銅板寿命の低下といった問題が発生する。

銅板表面温度を下げるためには銅板厚を薄くすることが必要であるが、あまりにも薄くしすぎると銅板の剛性が低下し鋳造中の銅板変形量が大きくなり、鋳片品質の悪化やブレイクアウト発生等の問

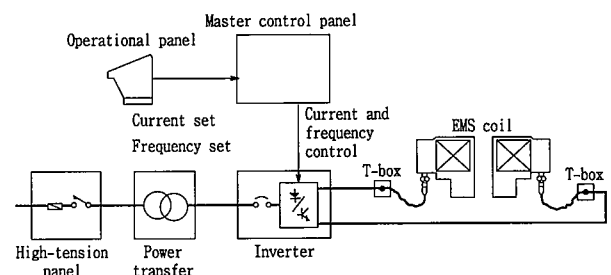


図15 EMS電減、制御装置システム構成

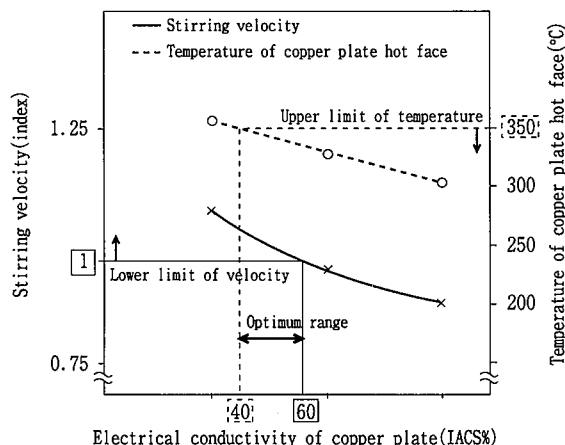


図16 銅板電気伝導度、温度と攪拌流速の関係

題が生じる。銅板表面温度を鋳片との焼き付きが発生せずかつ銅板寿命の低下を引き起こさない基準温度の350℃以下にするためには、IACS40%以上の銅板材質が必要なが分かる。新日本製鐵ではFEMを用い銅板の二次元温度、変形連成解析を行い銅板設計を行っている。銅板変形解析から銅板厚み及び温度条件での銅板変形を抑制する最適な銅板取り付けボルトピッチが求められる。図17に銅板変形解析結果を示す。本図より銅板取り付けボルトピッチが大きいと銅板の変形が過大になり、ボルトピッチを短縮することにより適正な変形量に抑えられることが分かる。

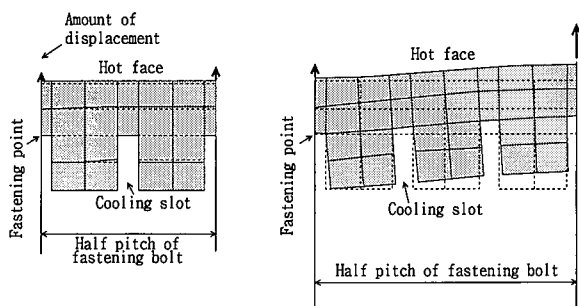
以上に述べた銅板の設計手法により、効果的な溶鋼攪拌を実現し、かつ、通常モールドと同様な銅板寿命を確保し、ブレイクアウト事故等の発生率の増加も防止している。

3.4 M-EMSモールドの構造

高推力発生及びメニスカス部の攪拌のために、平行移動磁界を発生させるコイルを長辺冷却箱内に入り込ませ、鋳片に対して近接設置する構造としている。このため、長辺冷却箱の上部にコイルを収納する収納室を設置し、モールド冷却水の排水室を収納室下方に設置している。この構造をとることで、モールド外形は通常モールドの外形サイズと同サイズであり、既存設備の改造の際においても、スペース制約を考慮する必要がない。また、幅可変装置や電磁ブレーキ装置との干渉もない。図18にM-EMSの構造を示す。

3.4.1 モールドからの容易なコイル着脱

コイルは、冷却箱の背面にフランジで取り合い、ボルトで締結している。このため、銅板改削時やモールドメンテナンス時のコイル取り外しも容易である。また、コイル簡易脱着装置を用いれば、モールド一体組の状態でもコイル交換が可能である。これにより、ブレイクアウトやオーバーフロー時のモールド交換においてもコイル



(a) Short bolt pitch

(b) Long bolt pitch

図17 銅板二次元温度、変形連成解析

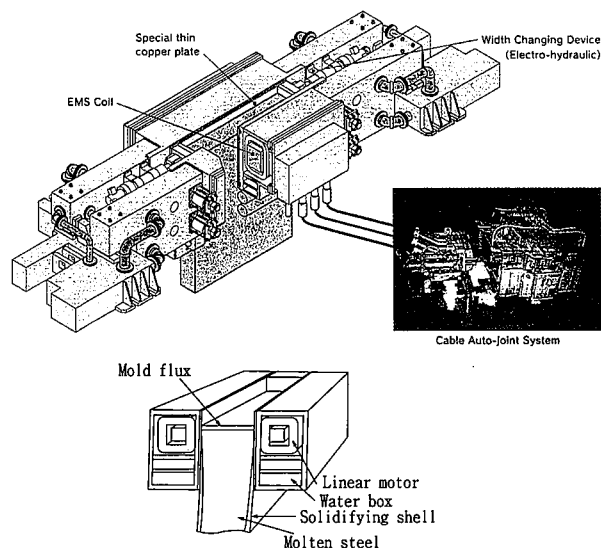


図18 M-EMSの構造

のみを予備モールドに交換できるため、モールド保有数に対してコイル保有数を削減できる。

3.4.2 簡易電気ケーブル脱着装置(ケーブルオートジョイント装置)

M-EMSはモールド交換時にコイル配線ケーブルの脱着作業が必要となる。新日本製鐵はケーブルオートジョイント装置によって、モールド交換時に自動でのケーブル脱着を可能とする。これにより普通モールドと同程度の時間にてモールド交換が可能である。

5. 結言

新日本製鐵スラブ用M-EMSには以下の特徴がある。

5.1 M-EMSによる品質効果

M-EMSの回転攪拌流によりスラブのピンホール、表面非金属介在物、表面縦割れを大幅に減少できる。また、回転攪拌にてモールド内の溶鋼温度分布やシェル厚を均一にできブレイクアウト等の製造トラブルを回避できる。

5.2 M-EMSによる歩留まり向上

M-EMSにより自動車用外板では、製鋼でのホットスカーフや手入れなど精整対象材を40%削減し、製品におけるスリバーキズ起因の不合格が50%削減可能である。また、厚板ではほぼノーマシンスカーフ化が達成できる。

5.3 M-EMS設備の特徴

M-EMSには下記の特徴がある。

- ・省スペースに設置可能なコンパクトで高効率なコイル構造
- ・攪拌流を容易に制御可能な電源制御装置
- ・コイルをメニスカス部に接近可能なモールド冷却箱構造
- ・高い攪拌推力を確保できる銅板構造
- ・容易なコイルの着脱構造
- ・コイル配線ケーブルの自動着脱構造

参考文献

- 1) Fukuda, J., Ohtani, Y., Kiyose, A., Kawase, T., Tsutsumi, K.: 3rd European Conference on Continuous Casting, 1998, p.437
- 2) Kittaka, S., Shukuri, K., Yamada, Y., Sawada, K., Soeda, Y.: Nippon Steel Technical Report. (55), 27 (1992)
- 3) Okazawa, K., Tou, T., Takeuchi, E., Umezu, K., Fujisaki, K.: CAMP-ISIJ.

7, 12 (1994)

CAMP-ISIJ. 7, 1195 (1994)

4) Ohtani, Y., Fukuda, J., Iwata, S., Ishiwata, N., Funato, K.: CAMP-ISIJ. 7, 1194 (1994)

6) Fukuda, J., Kawase, T., Ohtani, Y., Iwata, S., Tsutsumi, K., Okumura H., Watanabe, K.: CAMP-ISIJ. 7, 1193 (1994)

5) Kiyose, K., Miyazawa, K., Goto, H., Fukuda, J., Ohtani Y., Nakashima, J.: