

# 特殊鋼ブルームにおける 鑄片表面品質向上技術 ～鑄型内電磁攪拌装置の特徴～

Improvement Technology of Bloom Surface Quality  
in Continuous Cast Bloom in Special Steel  
～Technical features of M-EMS～

三浦 康彰 Yasuaki MIURA

製鉄プラント事業部  
製鉄プラントエンジニアリング第二部  
商品技術室 連鑄・圧延技術グループ  
グループ長

吉村 泰史 Yasushi YOSHIMURA

NSプラント設計㈱  
制御システムエンジニアリング部  
電気チーム

前川 浩規 Hiroki MAEGAWA

製鉄プラント事業部  
製鉄プラントエンジニアリング第二部  
商品技術室 連鑄・圧延技術グループ

菅谷 唯 Yui SUGAYA

製鉄プラント事業部  
製鉄プラントエンジニアリング第二部  
商品技術室 連鑄・圧延技術グループ

## 抄 録

現在、主にブルーム連続鑄造機によって製造されている特殊鋼は、日本の製造業における競争力の根幹を支える重要な素材となっている。特殊鋼の高品質性、高生産性を確保する上で、鑄片内に残留する気泡および介在物の低減に関する品質課題の解決が必要となる。当社ではこの課題の解決策として、鑄型内電磁攪拌装置(In-Mold Electro-Magnetic Stirrer : M-EMS)を提案している。M-EMSによる鑄型内溶鋼湯面の均一攪拌は、鑄片品質の向上だけでなく、鑄型直下における溶鋼漏れトラブルの低減による生産性向上に対しても非常に有効な技術である。

本稿は、この設備の効果と構造及び特徴を紹介する。

## Abstract

Recently, special steel, mainly produced through bloom casters, is indispensable material that maintains the leading technologies of Japanese manufacturing industry. In this field, the quality issues such as the reduction of bubbles and inclusions trapped in cast strand must be solved in order to achieve higher productivity and quality. We, Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., Ltd., has developed In-Mold Electro-Magnetic Stirrer "M-EMS" for those purposes and applied to a great number of casting machine. M-EMS that provides uniform stirring of liquid steel surface in mold can contribute not only to quality improvement, but also to productivity upgrading by reducing operational troubles such as steel leakage just below mold.

In this paper, the features and effects of this system are discussed.

# 1 緒言

特殊鋼は、自動車等での性能・安全性を支える重要部品(クランクシャフト、軸受など)の材料として最適であるだけでなく、最終製品や部品の製造工程におけるコスト低減の鍵を握る加工性も左右し、日本の製造業における競争力の根幹を支える重要な素材である。

従来、特殊鋼はインゴットで製造されていたが、最近ではブルーム連続鑄造設備(BL/CC)による大量生産が可能となっている。図1に特殊鋼の高品質性、高生産性の達成のための要因と、課題に対する当社保有技術を示す。図より、課題の一つとして、鑄片内に残留する気泡および介在物起因の欠陥低減がある。溶鋼中のアルミナがノズル壁に付着して閉塞を起ささないよう吹き込まれるアルゴンガスや溶鋼中のガス等によって気泡が生じ、凝固シェルに捕捉されることで鑄片表層に気泡系欠陥(ピンホール、ブローホール)を誘発する。また、溶鋼中のアルミナ等の非金属介在物も、凝固シェルに捕捉されることで介在物系欠陥に繋がる。

さらに、高生産化のために高速鑄造を行うことで、未凝固分の長さ増大に伴う中心偏析の悪化や、浸漬ノズルの吐出流速上昇によるモールドパウダーや介在物の巻き込みによる表面欠陥の発生などの抑制が要求される。

このように高品質性・高生産性を確保する上で、鑄片内に残留する気泡および介在物の低減は解決すべき必須の課題となっている。当社ではその具現化技術として、鑄型内電磁攪拌装置(In-Mold Electro-Magnetic Stirrer : M-EMS)が適用されている。図2に連続鑄造機でのM-EMSの設置位置と設置による効果を、図3にM-EMSの構造と特徴を示す。

上記課題に対する従来方式のストランド電磁攪拌(Strand Electro-Magnetic Stirling : S-EMS)では、凝固中のシェル前方の溶質が溶鋼流動により洗浄されて現れる負偏析(ホワイトバンド)の制約から攪拌強度が制限され、一定以上の偏析改善は困難であった。一方でM-EMSは、凝固速度の大きい領域で攪拌を実施することで、偏析改善の効果も合わせて得られる。

当社のM-EMSには、①高い攪拌効果を得るための鑄型(モールド)と攪拌コイルの一体設計(3.1章)、②高出力、高耐久性の攪拌コイルの使用(3.1章)、③特殊鋼鑄造実績に基づく最適な仕様の設定(3.2章)、④高効率、強攪拌を可能にするための、銅板・バックプレートへの非磁性、低電気伝導度材料選定(3.3章)、といった特徴がある。

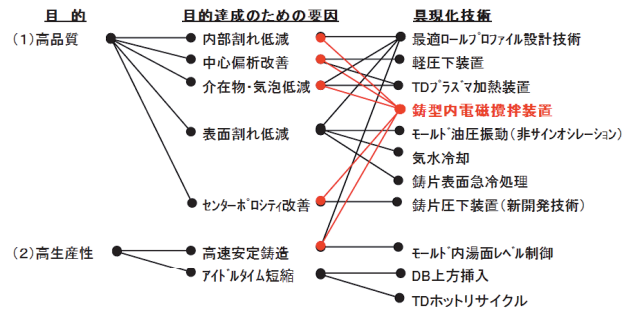


図1 連続鑄造における課題と当社保有技術  
Fig. 1 NSENGI technology of continuous casting machine for special steel

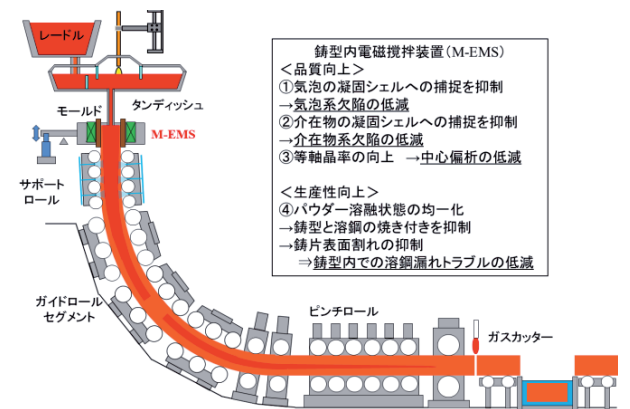


図2 連続鑄造設備とM-EMSの効果  
Fig. 2 Continuous casting machine and effect of the M-EMS

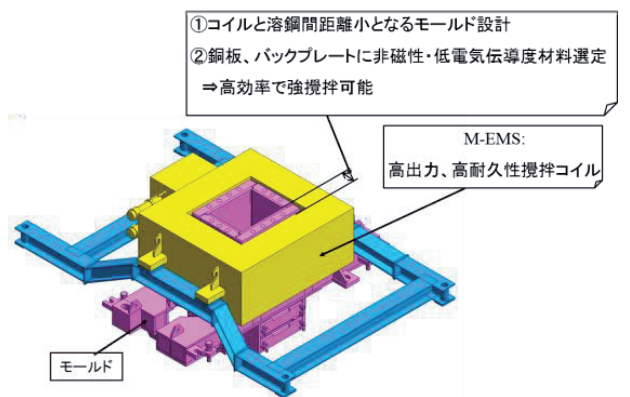


図3 M-EMSの構造と特徴  
Fig. 3 The structure and the characteristics of the M-EMS

## 2 鋳型内電磁攪拌装置(M-EMS)の原理および効果

### 2.1 M-EMS の原理

M-EMSはBL/CC鋳型内に設置され、回転磁界を発生させる装置であり、回転磁界により生じる誘導電流との相互作用で溶鋼に水平方向の攪拌力を与え、攪拌を行う。

M-EMS設備は、連鋳機のモールド部に取り付けられるEMS本体と、電源制御装置及び冷却水装置から成る。M-EMSは鋳片を取り囲むように配置されたコイルによってモールド内に磁界(図4①方向)を発生させる。磁界によって導電体である溶鋼中に渦電流(図4②方向)が誘導されるため、フレミングの左手の法則により、渦電流と磁界との間に電磁力：ローレンツ力(図4③方向)が発生する。M-EMSはこの磁界を回転させることで回転方向と同じ方向に電磁力が加わり、モールド内の溶鋼に攪拌流を発生させる。

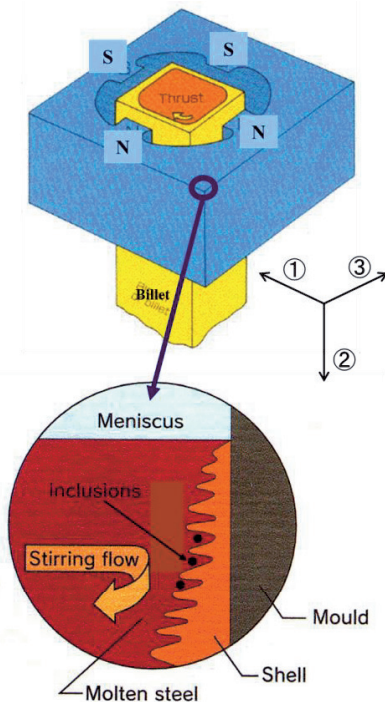
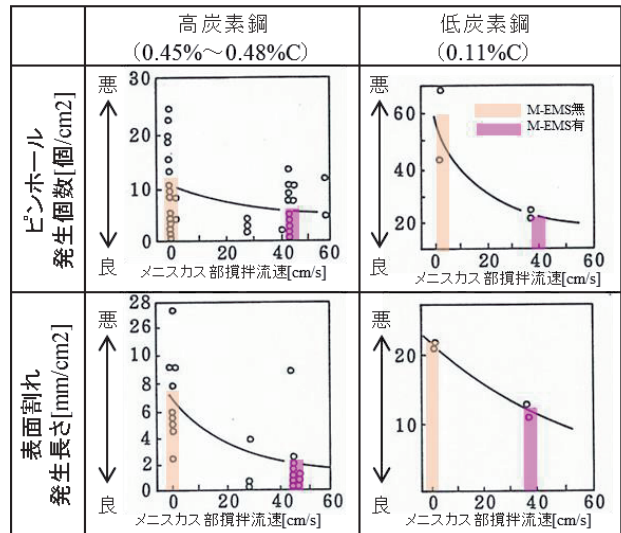


図4 M-EMSの攪拌原理  
Fig. 4 Principle of molten steel stirring of M-EMS

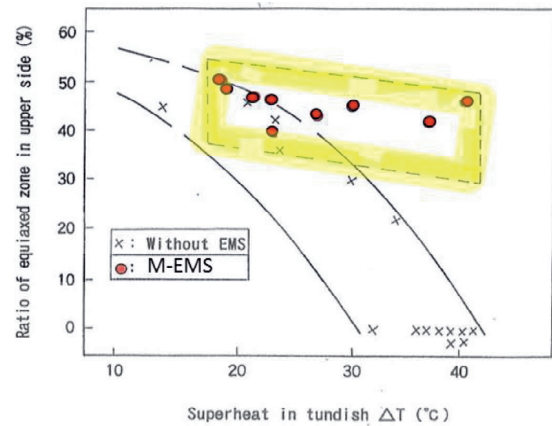
### 2.2 鋳片品質の向上

M-EMSによる品質向上効果を図5に示す。

M-EMSの攪拌流が凝固シェル内面に付着した気泡や介在物粒子を洗浄することで、気泡や介在物が



(a) ピンホール・表面割れの低減効果  
(a) Effects of pinhole and surface crack reduction



(b) 等軸晶率の向上効果  
(b) Effects of equiaxed crystal ratio increase

図5 M-EMSによる品質向上  
Fig. 5 Improved quality with M-EMS

溶鋼湯面まで浮上し、鋳片表層部にピンホールや介在物性欠陥の無い健全な凝固組織を得ることができる。

また、攪拌流によって柱状晶先端部は剪断され溶鋼内に分散し、微細な等軸晶粒の生成を促す。それにより等軸晶率が向上することで溶鋼流動が起りにくくなり、中心偏析やセンターポロシティが低減される。

中心偏析は攪拌強度が強くなるほど改善されることが知られている。一方、メニスカスが不安定となりモールドパウダーを巻き込むことで、介在物等を悪化させる場合がある。そこでM-EMSでは鋳片品質改善効果の低下を招かないように溶鋼流動を制御し、攪拌を適正化している。



### 2.3 生産性の向上

鑄造中にモールドに投入するパウダーの溶融が均一に行われず、パウダーの流れ込みが途切れたために溶鋼がモールドに焼付いた場合や、凝固シェルに発生した表面割れの部分から溶鋼が流れ出した場合に、鑄造停止に繋がる重大な溶鋼漏れトラブル(ブレークアウト)を引き起こすことがある。

M-EMSによる攪拌は、メニスカス近傍の溶鋼温度のばらつきを低減する効果がある。これにより、パウダー溶融と流入厚みが均一化し、安定したモールド内の潤滑が確保されるため、モールドと溶鋼の焼き付き抑制が可能となる。加えて、局所的な凝固遅れの発生を防止し、周方向の凝固シェル厚みの均一化が促進されるため、シェル厚みの不均一に起因する鑄片表面割れの抑制効果もある。

M-EMSによって、焼き付きや表面割れを抑制することで、生産性の低下を防ぎ、操業を安定的に行うことができる。また鑄片品質が向上することから、鑄片手入れ費用の削減や最終製品合格率の向上といった効果も得られ、良品歩留の大幅な向上にも貢献できる。

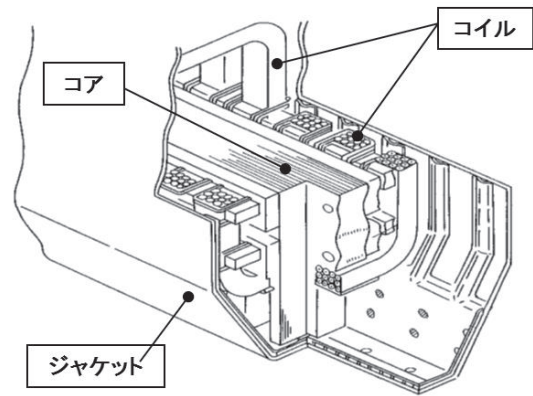
## 3

### 鑄型内電磁攪拌装置(M-EMS)の特徴

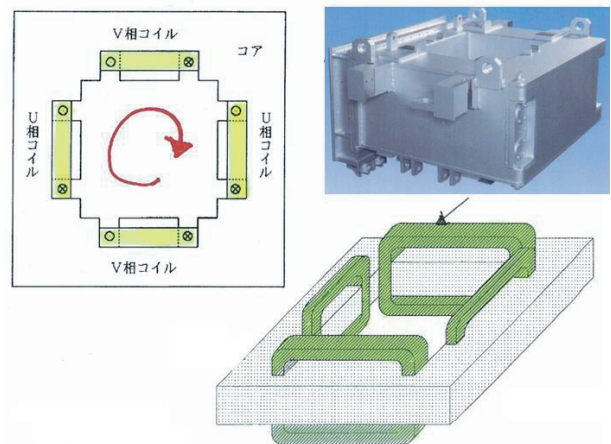
#### 3.1 M-EMS コイル構造

M-EMSの攪拌力を発生させるために用いるコイル構造の一例を図6に示す。他社が用いている胴巻き方式のコイルでは、漏れ磁束が大きく周辺構造物の非磁性化が必要となる。コイルの外側に銅板を設置し漏れ磁束を防止することはできるが、銅板の発熱に対する冷却機能を付与する必要があり、それにより電力が無駄になる。また誘導電動機、リニアモーター等に用いられるリニア方式(一方向移動式磁界方式)と呼ばれるモールドを挟んで両長辺銅板背後にコイルを対向配置する方式では、モールドの中心軸対象に均一な回転流れを確保することが困難となり、鑄片シェル厚の不均一が発生することで割れが発生するという問題がある。

そこで、当社のM-EMSでは鑄片周囲を取り囲む形でコイル鉄心を配置し、中心に軸対象に回転磁界を発生させるロータリー方式(回転移動磁界方式)



(a) リニア方式(従来式)  
(a) The linear method(The conventional method)



(b) ロータリー方式(M-EMS方式)  
(b) The rotary method(M-EMS method)

図6 M-EMSのコイル構造  
Fig. 6 The structure of coil of M-EMS

を採用している。また、コイルの巻線方式は非常にシンプルでコンパクトに仕上がる新突極集中巻方式を採用している。本巻線方式は、磁極断面が大きく取れるため、中心部の磁束密度が小さくなる。また、有効磁束を生ずる方向にコイルが直接巻かれているため、漏れ磁束が少なく、溶鋼を効率的に攪拌することができる。加えて、周囲への磁気による悪影響(誘導による加熱、ノイズ等)が小さく、巻線が全てヨーク内部(ヨークとモールドの間)に収まるためコンパクトであり、狭雑なモールド部に取り付けることが可能となる。

#### 3.2 M-EMS 設置位置

2.2項にて述べたM-EMSの鑄片品質の向上効果を最大限に得るためには、初期凝固が開始する溶鋼のメニスカス近傍にM-EMSコイルを設置するこ

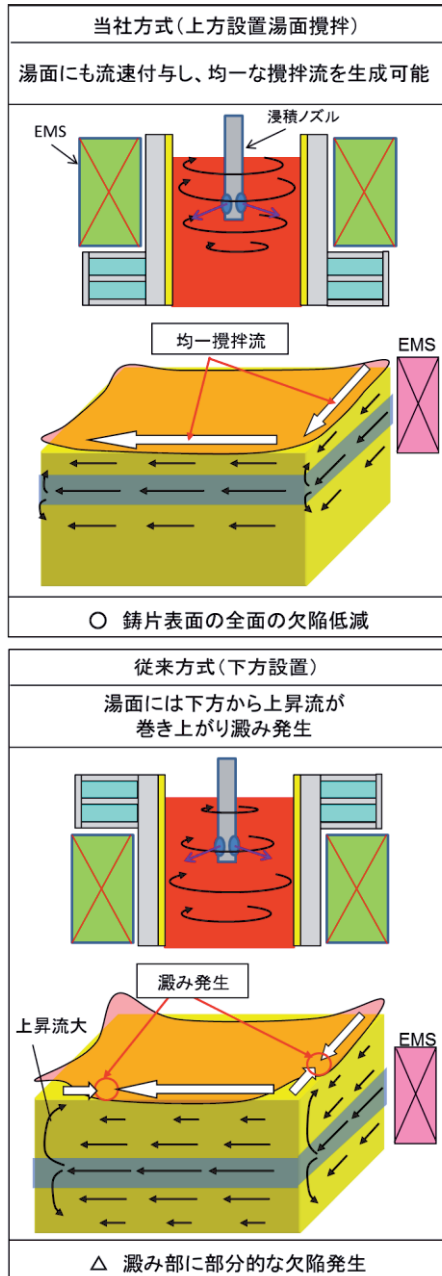


図7 M-EMS 設置位置の最適化  
Fig. 7 Optimization of installation position of M-EMS

とが重要となる。図7に示すように、モールド中央付近にM-EMSコイルを設置する従来方式(M-EMS 下方設置)では、メニスカス近傍に不均一回転流が発生する。また浸漬ノズルからの吐出流とM-EMS流との干渉による下方流が発生し、凝固が開始する溶鋼湯面に均一な攪拌流を付与できないため、部分的に気泡や介在物が除去されない。しかし、当社のM-EMS方式(M-EMS 上方設置)では溶鋼湯面を均一に攪拌するため、浸漬ノズルからの吐出流とM-EMS流との干渉による下方流を無く

し、介在物の巻き込みを改善する。また、メニスカスの安定的な攪拌により、初期凝固シェルに捕捉される介在物の除去が可能となり、鑄片表面全面にわたって欠陥の無い鑄片を得ることができる。

しかし、メニスカス近傍にコイルを設置することは、モールドとコイルを一体化する必要があり、モールド交換の際に、コイルとモールドを一体で交換することになる。そのため連続鑄造機のストランド数に加えモールド予備分の予備コイルが必要となり、設置コストがかさむことや、モールドとコイルを一体で振動させるためのモールド振動装置能力が必要になるといった課題がある。

図8に示すように当社のM-EMSでは、コンパクトなコイルをモールドから分離し、架構に支持されたサポートフレームに設置することで、モールド交換時、コイルのみを上方へ容易に着脱可能としている。またこれにより、コイルを振動させる必要がなく、モールド振動能力の低減が可能となり、コイルの台数もストランド数にプラス1台程度の予備品で賄うことができる。

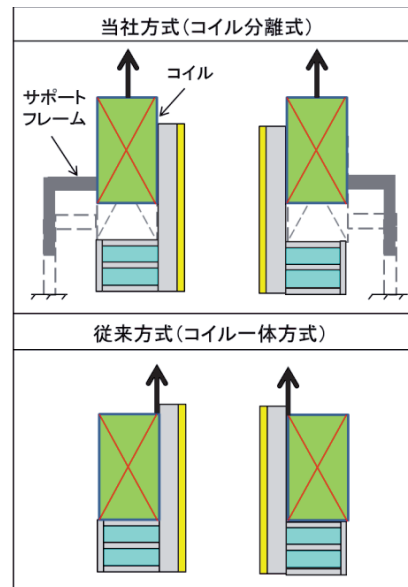


図8 M-EMS の整備性  
Fig. 8 Maintenance aspect of M-EMS

### 3.3 M-EMS 銅板設計

M-EMSを設計する際は、銅板の設計が非常に重要となる。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。

通常のモールドでは、鑄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、銅板表面温度が高ならないように熱伝導率の大きい材質を使用している。一方、溶鋼の攪拌推力を発生させるコイルからの磁束密度は、鑄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。しかし、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ること、鑄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。銅板厚を薄くすることで銅板表面温度を下げるためことは可能だが、薄くしすぎると、銅板の剛性が低下し鑄造中の銅板変形量が大きくなり、鑄片品質の悪化やブレイクアウト発生等の問題が生じる。

当社の M-EMS では FEM による銅板の温度・変形連成解析を用いて、銅板設計を行っている。図 9 に銅板変形解析結果を示す。M-EMS では、銅板を組立型の鑄型構造にし、銅板熱解析を用いた最適な冷却スリット銅板にすることで、モールド内の鑄片凝固シェルの変形を防止することができる。また最適な材質による効率的な攪拌を行い、且つ最適水路のスリットによる銅板の均一冷却を行うことで、初期凝固部の凝固シェルの安定成長および表面割れやブレイクアウトを防止する。

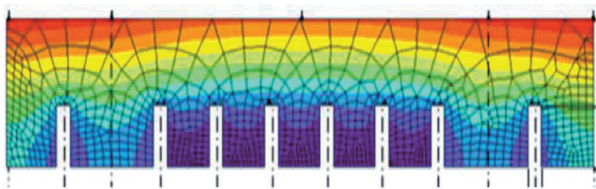


図 9 銅板の熱解析  
Fig. 9 Thermal analysis of copper plate

## 4 結言

当社の鑄型内電磁攪拌装置(M-EMS)によるモールド内溶鋼湯面の均一攪拌は、気泡や介在物に起因する表面欠陥の低減、中心偏析の低減といった鑄片品質の向上だけでなく、モールド直下での溶鋼漏れトラブルの低減といった生産性向上にも非常に有効な技術である。

また、最適な効果を得るために、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、容易なコイルの着脱構造、高攪拌推力を確保できる銅板構造といった特徴がある。

### 参考文献

- 1) 今田芳郎, 藤井伊佐夫, 杉本卓也: ブルーム連続鑄造機鑄型内電磁攪拌装置(M-EMS)の活用による品質および生産性向上: 愛鋼技報, p. 16-21(1992)
- 2) 前川浩規: 特殊鋼鑄造における気泡対策: 気泡・ボイドの発生メカニズムと未然防止, (株)技術情報協会, p. 313-316(2014)
- 3) 橋高節生, 渡邊久仁雄, 神吉豊吉, 三浦康彰: 新日本製鐵式スラブ用モールド内電磁攪拌装置“M-EMS”: 新日鉄技報(第376号), p. 63-68(2002)