

新日本製鐵式スラブ用ストランド電磁攪拌装置S-EMS

Nippon Steel Strand Electro-Magnetic Stirrer "S-EMS" for Slab Caster

橋 高 節 生^{*(1)}
Setsuo KITTAKA

福岡屋 俊 郎^{*(1)}
Toshiro FUKUOKAYA

丸 木 保 雄^{*(2)}
Yasuo MARUKI

神 吉 豊 彦^{*(3)}
Toyohiko KANKI

抄 録

造船、建築、家電、電力などの産業は、高品質な鋼材を安定して供給することを要求してきている。これらの顧客の要求に応えるため、新日本製鐵はスラブの内部品質を改善するストランド電磁攪拌装置“S-EMS”を株式会社安川電機と開発し、数多くのスラブ連続機に導入してきた。本報は、新日本製鐵のスラブ用S-EMSの効果及び特徴を紹介した。

Abstract

Japanese industries have been severely requesting steel manufacturers to stably provide high quality steel sheet/plates. As the technique to cope with these demands, Nippon Steel developed Strand Electro-Magnetic Stirrer "S-EMS" for slab caster which can improve internal quality of slab with Yaskawa Electric Corporation. In this paper, the features and effects of this system are outlined.

1. 緒 言

造船、建築、家電、電力などの産業では、商品の高機能化、高品質化のニーズから、素材の厚板には良好な溶接加工特性、ステンレス鋼薄板では優れた表面品質、電磁鋼薄板では優れた表面品質、磁気特性を鋼材メーカーに要求し続けてきた。現在、これらの産業はその生産活動拠点を海外に拡げている。特に巨大な市場を抱える中国を中心に世界各地でこの要求は高まりを見せており、中国、南米等では鋼材ユーザーの海外生産体制に適應して日本と同品質の鋼の量産化に向かっている。

新日本製鐵は、これらの鋼種、ミルのニーズに対応して、二次冷却帯において鑄片内部の溶鋼を非接触にて電磁気力で流動攪拌させるストランド電磁攪拌装置(Strand Electro-Magnetic Stirrer : S-EMS)の開発に(株)安川電機といち早く着手した。そして、1973年に最初のスラブ用S-EMSを君津製鐵所に導入、その他の製鐵所でもその後適用鋼種を拡大し、S-EMSによるスラブ内部品質の向上、生産性向上効果を確認した。

本報は、新日本製鐵式スラブ用S-EMSの品質向上及び生産性向上効果と設備の特徴について述べる。

2. スラブ用 S-EMSの原理と主仕様

2.1 スラブ用 S-EMSの原理

図1にスラブ用S-EMSの攪拌原理を示す。連続鑄造設備の上部二

次冷却帯で鑄片を挟んで長辺側の両面に対で設置されるリニアインダクタは平行移動磁界を発生する。この平行移動磁界により鑄片内部の溶鋼を水平方向に回転流動させる。これは、導体中を磁束が移動すると磁束の移動方向と同じ向きに導体に力が発生することを利用したリニアモーターの原理を応用したものである。

2.2 スラブ用S-EMSの主仕様

図2にスラブ用S-EMSの代表的なコイルの外観を示す。また、表1にスラブ用S-EMSの主仕様を示す。

3. S-EMSの鑄片品質及び生産性向上

S-EMSの内部品質向上効果とその原理の考え方、S-EMS適用鋼種の製品品質効果、及び生産性向上効果について以下に述べる。

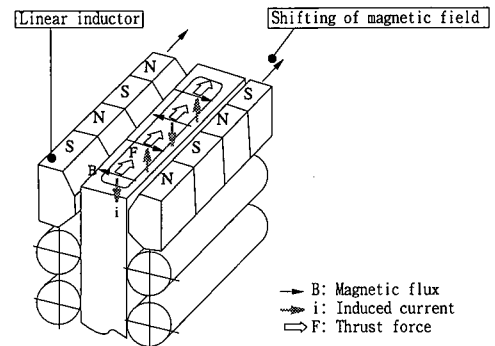


図1 スラブ用S-EMSの攪拌原理

*⁽¹⁾ プラント事業部 製鐵プラントエンジニアリング第二部 連鑄・圧延グループ マネジャー
北九州市戸畑区中原46-59 ☎804-8505 ☎(093)-872-6986

*⁽²⁾ 技術開発本部 環境・プロセス研究開発センター プラントエンジ

ニアリング部 連鑄グループ マネジャー

*⁽³⁾ プラント事業部 製鐵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)

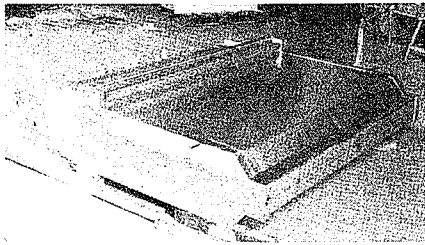


図2 スラブ用S-EMSコイルの外観

表1 スラブ用S-EMS仕仕様

General technical data	
Casting radius	Curved/ vertical/ vertical-bend
Slab size	Typical thickness; Approx. 140-300mm (No restriction from width)
Coil type	Linear induction motor type
Typical capacity	Approx. 800-1,300kVA/ 400-500kW for typical slab size (250mm×2,000mm)
Coil weight	Approx. 4,000kg/ set for typical slab size (250mm×2,000mm)
Cooling system for coil	Internally cooling by water
Sealing system for connector box	Purging by N ₂ gas or dry air

3.1 鑄片内部品質の向上

鑄片内部の溶鋼攪拌流による内部品質向上の原理は下記の通りである。

S-EMSによる溶鋼攪拌流は、凝固過程で発生する樹枝状結晶(以下デンドライト)を分離・浮遊させ凝固核を発生させる。また、攪拌流は凝固界面部の溶鋼温度を高め、デンドライトの再溶解を促すことで低温鑄造効果が得られ、等軸晶率、センターポロシティ改善に寄与するものと考えられる¹⁾。溶鋼攪拌は、攪拌流によりデンドライト間の濃化溶鋼を分散させる働きがあり、攪拌流により溶鋼内部の成分均一化を促し、中心偏析を低減する。更に、結晶の等軸晶化とともに、溶鋼攪拌による凝固シェル内溶鋼温度が均等分布化して凝固シェル厚の均一化を促し、凝固シェル内の歪を軽減するため鑄片内部割れを抑制する。

3.2 最終製品におけるS-EMSの効果

S-EMS適用の効果が認められる電磁鋼板、厚板、ステンレス鋼の三つの鋼種についてその効果を述べる。

3.2.1 電磁鋼板

電磁鋼板は、鑄片内部の凝固組織が不均一な場合にリジングと呼ばれる製品での表面欠陥を生じる。このリジングは圧延方向に平行に発生するしわ状欠陥であり、表面美観を損なうばかりでなく、電磁鋼板を積層した場合に占積率を低下させモーターや変圧器の特性劣化をもたらす。そこで、S-EMSを適用し、溶鋼を攪拌することで等軸晶の形成を促し均一で微細な凝固組織の確保が行われる。

図3は等軸晶率の評価方法を示したものであり、等軸晶率の定義は鑄片厚みに対し等軸晶化された部位の厚みの割合を示す。また、図4にS-EMS適用によるスーパーヒート(溶鋼過熱度)と等軸晶率の

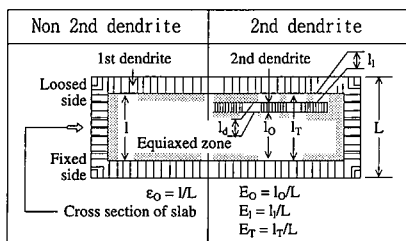


図3 等軸晶率の評価方法²⁾

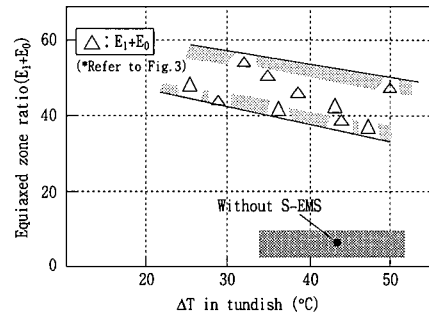


図4 S-EMS適用によるスーパーヒート(溶鋼過熱度)と等軸晶率の関係²⁾

関係を示す。30~40℃のスーパーヒートにおいてモールド近傍に設置されたS-EMS適用で十分な等軸晶率の達成が可能であり、S-EMSにより表面品質が優れ高機能な電磁鋼板の安定した製造が可能になる²⁾。

3.2.2 厚板向け高級鋼

厚板向け高級鋼は、造船向けやパイプライン向けなど溶接部強度確保のために厳しい中心偏析の管理が必要である。図5にS-EMSの有無と等軸晶率及び中心偏析評点の関係を示す。図6に厚板における中心偏析評価手法の一つであるサルファーバンド評点とHAZ(Heat Affected Zone)の熱応力割れとの関係を示す。S-EMS適用により中心偏析評点は大きく向上し、中心偏析の低減により溶接性向上にも有効であることが分かる³⁾。また、これら品質向上により下工程における均熱炉の均熱時間短縮が可能となり生産性が向上する。

3.2.3 ステンレス鋼板

SUS430(高Cr鋼)は電磁鋼板と同様に等軸晶割合とリジング発生率の間に高い相関があり、リジング発生を抑制するために50%以上の等軸晶率確保が有効であることが知られており、S-EMSによってその達成が可能となる¹⁾。図7に、S-EMS適用有無におけるSUS430での鑄片凝固組織写真を示す⁴⁾。また、図8にスーパーヒートと等軸晶率の関係におけるS-EMSの適用効果を示す。S-EMSにより操業鑄込み温度条件の制約が大幅に緩和されることが分かる⁴⁾。

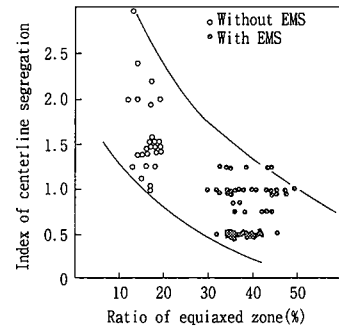


図5 S-EMSの有無と等軸晶率及び中心偏析評点の関係³⁾

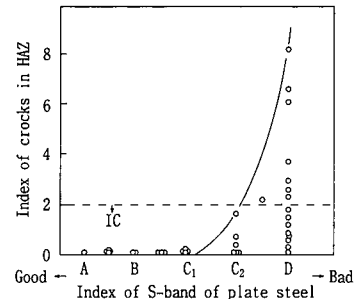


図6 厚板サルファーバンド評点とHAZ(Heat Affected Zone)の熱応力割れとの関係³⁾

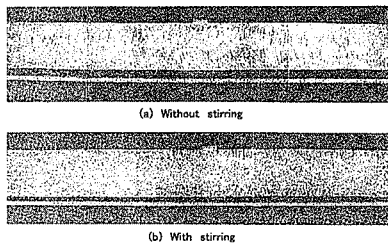


図7 S-EMS適用有無におけるSUS430の铸片凝固組織⁴⁾

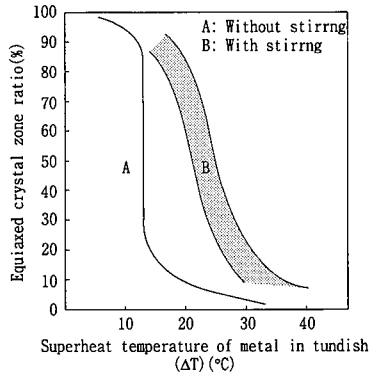


図8 S-EMS適用有無におけるスーパーヒートと等軸晶率の関係⁴⁾

3.3 生産性向上

以上に述べた品質向上効果により許容铸込み温度範囲が拡大し、操業裕度が大きく向上する。また、等軸晶率と中心偏析の改善が可能であり、その品質改善にともない高速铸造化や製品板厚における圧減比低減が可能となり生産性が向上する。例えば、等軸晶率向上により約10%の生産性向上が可能である。また、品質向上により圧減比を10%減少させることで圧延工程の仕様ダウンも可能となる。

4. S-EMS設備の特徴

4.1 コイル配置と攪拌方式

図9にS-EMSコイル単体及びガイドロールセグメントへの取付け状態を、また、図10にS-EMSにより誘起される溶鋼攪拌流模式図を示す³⁾。

溶鋼攪拌流による铸片内部品質向上には溶鋼の十分な攪拌が必要であり、小さなエネルギーで強い溶鋼攪拌流を得るために、铸片に近接させかつ铸片を挟んだコイル配置を採用している。またS-EMS設置位置は、S-EMSの攪拌流により誘起される上流方向への溶鋼流れとタンディッシュからモールドに注入される高温の溶鋼流が干渉

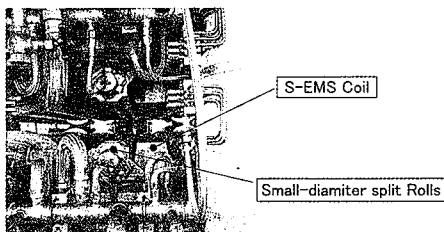


図9 S-EMSコイルの取付状態

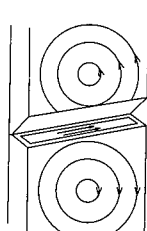


図10 S-EMSにより誘起される溶鋼攪拌流模式図

表2 S-EMSコイル配置と攪拌の特長

	Nippon Steel S-EMS	Other type S-EMS
Composition layout		
Thrust force	Large: 10 (facing to slab directly)	Small: 1 (base) (behind guide rolls)
Flow pattern	Intermittent (forward and reverse)	Continuous
Affecting area	Narrow	Wide

しにくい場所に設置され、また豊富な操業経験により確認された攪拌方法の採用により、モールドへの注入流とS-EMSの攪拌流の干渉を抑えつつS-EMSコイル設置位置をモールドに近づけることが可能となり、高い等軸晶率が得られる。

表2に、S-EMSコイル配置と攪拌の特徴を示す。

4.2 EMSコイル構造

S-EMSコイルをガイドロール間の限られたスペースに設置し、かつ未凝固溶鋼に強力な攪拌力を発生させるためにS-EMSコイル本体構造は以下のような特徴を有している。

4.2.1 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ガイドロール間に収納することが困難である。このため、EMSコイルでは図11に示すようにコイルエンドのスペースが小さい“リング巻き深溝スロット”を採用している。このリング巻き深溝スロットの採用と後述の“小径ロール”採用によりガイドロールのロールピッチを拡げることなく、S-EMSコイルをストランド铸片に近接させることが可能となり、効率よく溶鋼を強攪拌することができる。

4.2.2 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。S-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接続部に絶縁チューブを用い、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、コイルとコアの一体真空加圧含浸方式を採用し、鉄心のスロット内に無駄なくコイルを高密度に充填することで、コンパクトなコイルで高電気装荷を達成している。

4.2.3 高耐久性ジャケット

S-EMSコイルは高温、高多湿な劣悪な環境である铸片近傍に設置されるため、铸片の輻射熱や水蒸気からコイルを保護するジャケットには高い耐久性と信頼性が要求される。したがって、ジャケットは剛性を有するステンレス板材で構成され、铸片近接部分及びS-EMSコイル自身により誘導発熱する部位は内部水冷構造を採用している。更に、水質管理のために、ステンレス鋼配管を採用した独立

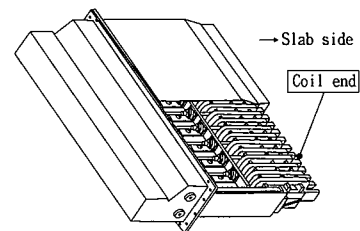


図11 スラブ用S-EMSコイルの内部構造

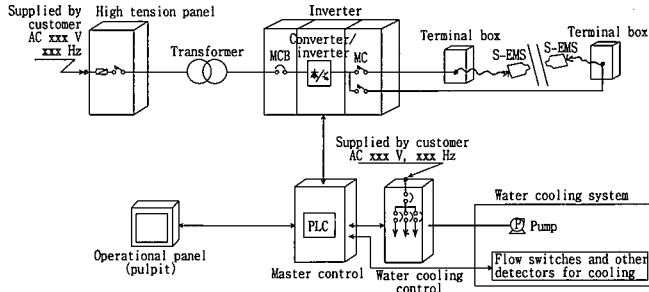


図12 S-EMSの電源制御システム

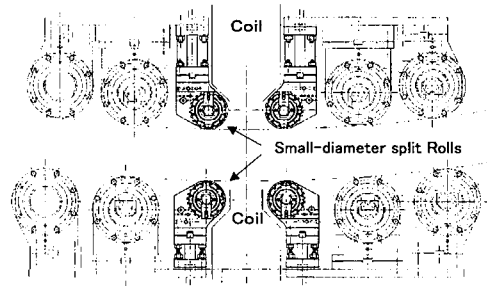


図13 小径分割ロールの構造

のジャケット冷却水系統にて十分な防錆対策を施している。

4.3 電源・制御装置の最適構成

S-EMSコイルが溶鋼に付与する推力が最も効果的で理想的な運転状態を実現するために、S-EMS電源制御装置は以下のような構成としている。

4.3.1 電源装置の特徴

図12にS-EMSの電源制御装置の構成を示す。S-EMSコイルの移動磁場は、凝固シェル内の溶鋼に誘導電流を誘起し推力を発生させる。この推力は、溶鋼内の磁束の二乗及び移動磁束の速さに比例する。溶鋼内磁束はシェル及び溶鋼内に生ずるうず電流により減衰し、その減衰度合いは周波数が高いほど大きくなる。一方、移動磁束の速さは周波数に比例して大きくなるため、S-EMSによる推力の周波数特性にはピークが存在し、そのピークは数Hz～数10Hzの低周波領域にある。電源装置は低周波領域での制御性に優れたコンパクトなインバータ方式を採用している。

4.3.2 簡単な操作性と高い信頼性、安全性

S-EMSは簡単な操作で最適な運転を行うことができる。また、電源制御装置は最新のハードウェア、ソフトウェア技術を用いた高信頼性のシステムで構築されており、設備の信頼性、安全性が十分に追求されたシステムである。

- (1) 操作者は必要な攪拌強度に応じた周波数と電流を操作盤から容易に設定することができ、S-EMSは設定された周波数及び電流に基づき、インバータの周波数制御、電流制御を独立に行うことが可能である。また、自動モードでは、連続鋳造機の鋳造開始以降カウントされる鋳造長信号により、S-EMSの容易なオン/オフ制御が可能である。
- (2) インバータの基本素子はIGBTトランジスタで構成され、波形制御はPWM方式、コントロール部は完全デジタル制御方式を採用しており、万一のインバータ異常や故障に対してオペレーターにアラームメッセージを発生し素子を破損することなく停止させる機能を有している。
- (3) コイル冷却水流量異常検出、コイル各部温度異常検出、コイル地落検出、電源装置故障検出等を行い、必要に応じてS-EMS運転を自動停止させ、設備の破損防止及び操業者や整備者の十分な安全を確保するシステムとしている。

4.4 S-EMSのセグメント構造

4.4.1 最適ロールピッチ構造

S-EMSコイルを铸片に近接して溶鋼を効率良く攪拌し、かつ最適なロールプロフィールを確保するため、小径ロール間にコイルを設置する構造としている。図13に小径ロールの構造を示す。小径ロールは十分な剛性を確保するため分割ロール方式を採用し、ロール外冷により高熱負荷強度を確保している。

4.4.2 攪拌に効率的な構造

S-EMSコイルによって生じる漏洩磁束量は周囲構造体の材質に左右され、強磁性体材料(普通鋼など)の場合は増加する。漏洩磁束の増加は溶鋼攪拌推力の減少と共に周囲構造体の加熱をもたらす。これらを防止するため、コイル周辺部は非磁性部材を採用している。

4.4.3 良好な整備性

S-EMS セグメントは、通常のガイドロールセグメントと同等の整備性を有している。またセグメントフレームを分解することなく、コイルとセグメントフレームの接点をフレーム背面から着脱可能な構造としている。更にEMSコイルへの給電はケーブル方式を採用し、着脱が容易でかつ防塵防水に優れた構造としている。新日本製鐵式スラブ用S-EMSはコンパクトな構造のため主要なスラブ連続鋳造機メーカーのガイドロールセグメントへの適用が可能であり、ユーザーの現有スラブ連続鋳造機への搭載改造が容易である。

5. おわりに

新日本製鐵式スラブ用S-EMSには以下の特徴がある。

5.1 S-EMSによる品質向上

S-EMSは、特に電磁鋼、ステンレス鋼、厚板用鋼種の連続鋳造において、溶鋼攪拌流によりスラブの中心偏析抑制、等軸晶率拡大など内部品質を向上させる。

5.2 S-EMSによる生産性向上

S-EMSは、品質改善効果により許容鋳込み温度範囲が拡大する。また、等軸晶率と中心偏析を改善することで高速鋳造による生産性向上が可能である。

5.3 S-EMS設備の特徴

S-EMSには下記の特徴がある。

- ・省スペースで高効率、かつ耐久性に優れたコイル構造
- ・小電力で高攪拌推力が可能なコイルとガイドロールセグメントフレーム構造
- ・最適なロールプロフィールに適用した小径ロール構造
- ・コイル着脱が容易なセグメント構造
- ・コンパクトで攪拌流制御性に優れた電源制御システム

参考文献

- 1) Takeuchi, H., Mori, H., Ikehara, Y., Komano, T., Yanai, T.: Tetsu-to-Hagané. 66(6), 38 (1980)
- 2) Okimori, M., Tsuchida, M., Inaoka, K.: Tetsu-to-Hagané. 80, T25 (1994)
- 3) Ujiiie, Y., Maeda, H., Itoh, Y., Ogibayashi, S., Seki, H., Wada, K., Itoh, Y.: Tetsu-to-Hagané. 67(8), 257 (1981)
- 4) Takeda, M., Komano, T., Yanai, T., Hino, T.: Nippon Steel Technical Report. (13), 36 (1979)