

# 連続鑄造設備用鑄片コーナー 加熱装置の開発

## ～高効率誘導加熱方式の検討～

Development of Induction Heating Device for Corner of  
Bloom in Continuous Casting machine  
～Consideration of high efficiency induction heating system～

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

蒲池 直樹 Naoki KAMACHI

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

田窪 将也 Masaya TAKUBO

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。特殊鋼の品質課題の1つとして鑄片表面コーナー割れの低減がある。当社ではこの課題の解決策として、鑄片コーナー加熱装置を開発した。本装置により矯正前の鑄片表面コーナー部を加熱し、脆化温度域を回避して矯正することで表面コーナー割れを抑制でき、下工程における鑄片の手直しやスクラップ化を防止できる。本稿は、この設備の特徴及び効果を紹介する。

### Abstract

Recently, special steel, mainly produced through bloom casters, is indispensable material that maintains the leading technologies of Japanese manufacturing industry. One of the biggest problems in casting of special steel is surface crack in corner. We, Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., Ltd., has developed induction heating device for corner of bloom. This device can raise the temperature at corner of bloom during straightening, reduce the corner crack of bloom, and consequently, minimize the cost for scarfing of surface cracks in later process.

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

## 1 緒言

特殊鋼は、自動車等の性能・安全性を支える重要部品(クランクシャフト、軸受など)の材料として必須であるだけでなく、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をも左右し、日本の製造業の競争力の根本を支える重要な素材である。日本の特殊鋼メーカーは、自動車メーカーと共

同で開発を行い、素材に要求される高度な品質の作り込みによって、加工費用削減、軽量化等を実現してきた。新日鉄住金エンジニアリングは、特殊鋼メーカーの高品質化に対する強いニーズに対し、特殊鋼メーカーと協力しながらブルームやビレットの革新的な技術を開発・実機化してきた。

図1に特殊鋼の高品質化達成のための品質課題と、対応する当社保有技術を示す。課題の一つに鑄

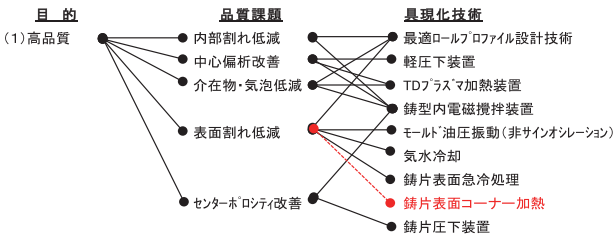


図1 特殊鋼向け連続鋳造機におけるNSENGI保有技術  
Fig. 1 NSENGI technology of continuous casting machine for special steel

片表面割れの低減がある。湾曲型及び垂直曲げ型連続鋳造機においては矯正帯にて円弧状の鋳片を直線状に矯正する必要があるが、鋳片コーナー部は矯正帯に至るまでに温度が著しく低下し、粒界にフェライトがフィルム状に析出し脆化する。このため、鋳片が矯正される際に、鋳片L側(湾曲内側)に引っ張り歪みが発生することでコーナー割れが生じてしまう。このような割れが発生すると下工程での鋳片表面の手入れ作業や鋳片のスクラップ化が必要となり、生産コストUPにつながる。鋳片を矯正する際のL側コーナー部の割れを抑制する手法として矯正前に鋳片を加熱し、昇温することで脆化温度域での矯正を回避する方法がある。当社では鋳片L側コーナー部の加熱技術として高効率で構造がシンプルな誘導加熱装置を開発した。本稿では、当社で新たに開発した鋳片コーナー加熱用誘導加熱装置の概要及び開発内容について述べる。

## 2 連続鋳造プロセスにおける鋳片コーナー加熱技術の概要

### 2.1 コーナー割れ発生メカニズム

湾曲型及び垂直曲げ型連続鋳造機においては、矯正帯における鋳片コーナー部の温度が脆化温度域である600~900℃程度<sup>1)</sup>となるため、L側コーナー部において、矯正による引っ張り歪みが増加することで、割れ感受性が高い鋼種ではコーナー割れが生じる。対策として矯正前に加熱装置を設置し、矯正時のL側コーナー部温度を上昇させることが挙げられる。これによりL側コーナー部の温度を脆化温度域の上方に回避することが可能であり、コーナー割れを抑制する事ができる。

### 2.2 コーナー加熱装置の主要開発課題

連続鋳造設備のライン内にコーナー加熱装置を設置する際の要求特性および開発課題を図2に示す。図に示すように連続鋳造ライン上に加熱装置を設置する上では投資およびランニングコスト低減、メンテナンス性、コンパクト化が求められるため加熱装置の実機化には、①構造のシンプル化および②高効率化の達成が必要となる。

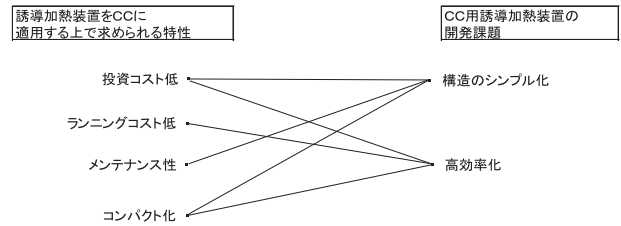


図2 コーナー加熱装置の要求特性および開発課題  
Fig. 2 Demand and corresponding targets for development of induction heating device

## 3 連続鋳造中鋳片コーナー加熱用誘導加熱装置の開発

### 3.1 加熱装置の仕様検討

#### (1) 誘導加熱方式

従来の加熱方式および今回採用した加熱方式の比較を図3に示す。これまで鉄鋼プロセスにおける鋼材のコーナー部の加熱には図に示すようなC型インダクター式の誘導加熱コイルが活用されてきた。本方式は鋳片コーナー部を挟むようにC型鉄心を配置し、鉄心を介してループ状に発生させた磁束がコーナー内部を通過する方式なため加熱時の磁束の漏洩を低減することが可能である。しかし本方式は鉄心を用いるため設備コストが高額となる上にハード構造が複雑となり、メンテナンス性が悪くなるというデメリットがある。

そこで今回鉄心を用いないシンプルな構造であるヘアピンコイル方式を採用し、加熱必要部位である鋳片L側のコーナー部のみを加熱する構造とした。

#### (2) コイルの巻き方<sup>2)</sup>

今回採用したコイルの巻き方および温度シミュレーション結果(後述するシミュレーションモデルで計算)を図4に示す。図に示すようにコイルを鋳片L側コーナー部の上面およびサイド面に複数本設置し、鋳片L側の2つのコーナーを一筆書き状

	【従来検討方式】C型インダクター式	【今回採用方式】ヘアピンコイル式
構造		
	<ol style="list-style-type: none"> <li>鋳片コーナー部を挟むようにC型の鉄心を構成。</li> <li>磁束は鉄心を介して鋳片コーナー内部を通過し、ループ状に発生。</li> <li>二次電流は鋳片の長手方向に発生。</li> <li>鉄心及び加熱コイルと鋳片の間は断熱ボードを設置。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>鉄心を使わずにコイルを直接、鋳片側面に配置。</li> <li>コイルの周りに磁束が発生し、鋳片にはその磁束と逆向きの磁束が鋳片側面(表面層)に発生する。</li> <li>二次電流は鋳片コーナー付近表面を流れる。</li> <li>加熱コイルはチューブ状耐熱材で覆い、鋳片との間は断熱ボードを設置。</li> </ol>
特徴	<ol style="list-style-type: none"> <li>鉄心にコイルを巻き付けた構造。メンテ費用大。 :△</li> <li>鉄心があるため高コスト。 :× ただし効率は良い。</li> <li>厚板のエッジヒーターとして実績あり :△</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>加熱コイル部の構造が非常にシンプル。メンテ容易。 :○</li> <li>鉄心不要のため低コスト。 :○ ただし、鋳片に近接設置し効率アップ要。</li> <li>薄板の加熱用として実績有り :△</li> </ol>

図3 加熱方式の比較  
Fig. 3 Comparison of heating method

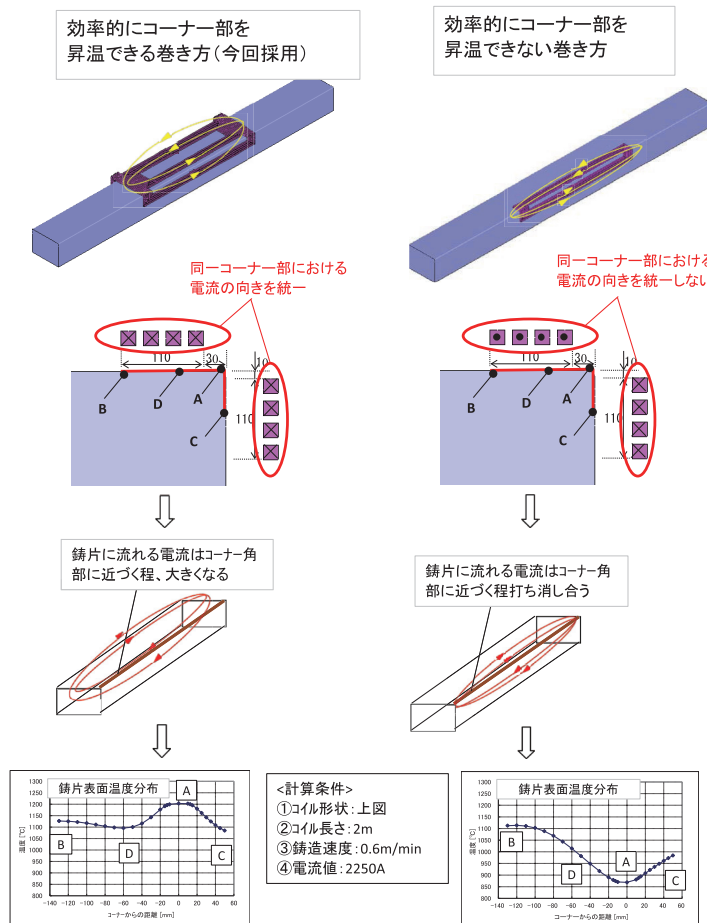


図4 コーナー加熱装置のコイルの巻き方  
Fig. 4 Wiring method of induction heating device for corner of bloom

に交互に通過する巻き方とすることで、同一コーナー部における電流の向きを統一し、コーナー部を効率的に昇温可能な巻き方としている。図4に示すように片側コーナーのみで一筆書き状に巻くとL面とサイド面のコイルを流れる電流が対向し、コーナー角部の磁束が打ち消されるため、コーナー部を効率的に昇温させることができない。

(3) コイル配置

1) シミュレーションモデルの検討

コイル配置の検討に先立ち、シミュレーションモデルの構築を行った。シミュレーションモデルを図5に示す。鑄片および加熱コイルを3次元でモデル化し、鑄片を一定の速度で移動させながら加熱コイルの下を通過させることで入熱を行うモデルとした。入熱量の計算は電磁場と温度場を時々刻々繰り返し計算するモデルとし、物性は都度温度依存性を考慮させ計算することとした。

なお、コイル入側の鑄片温度には凝固計算により事前に計算した断面温度分布を用いた。

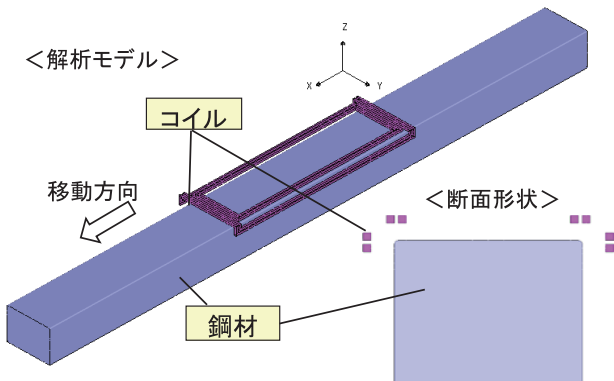


図5 加熱温度シミュレーションモデル  
Fig. 5 Simulation model of heating temperature for corner of bloom

2) オフライン加熱テストによるシミュレーションモデルの妥当性確認

上記解析モデルの妥当性を確認するために図6に示すようにオフラインで鑄片のダミーワークを加熱し昇温状況を確認するテストを実施した。試験条件を表1に示す。ダミーワークを鑄片と同等の速度で動かし加熱コイルの下を通過させることで昇温させ、同じ条件で実施した温度シミュレーション結果との比較を行った。なおキュリー点以上の非磁性領域での加熱である実鑄片の加熱条件を模擬するためにダミーワークの材質は常温で非磁性であるオース

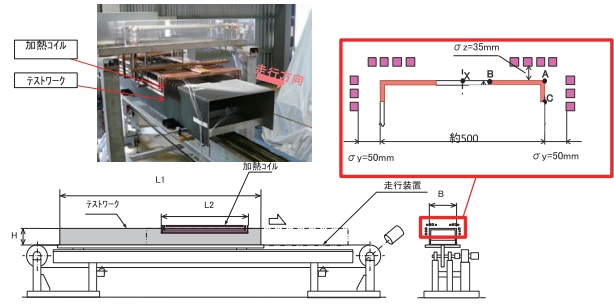


図6 オフライン加熱テストの概要  
Fig. 6 Outline of heating device for offline test

表1 オフラインテスト条件  
Table 1 Offline test condition

テストワーク材質	オーステナイト系ステンレス鋼(SUS310S)	
テストワーク厚み	5mm	
テストワーク移動速度	0.6および1.0m/min	
加熱コイル長さ	1.5m	
投入電力	約70kW	
テストワーク -コイル間隙間	上下方向	35mm
	幅方向	50mm

テナイト系ステンレスとした。テストの結果を図7に示す。ダミーワークの温度計測は熱電対を用いて実施した。図に示すようにシミュレーションと実測の差は最大でも30℃程度であり、シミュレーションモデルで鑄片の昇温量を推定可能であることを確認した。

3) コイル配置検討

オフラインで妥当性を確認したシミュレーションモデルを用いて加熱対象範囲である鑄片L側の50mm×50mmを効率的に加熱可能なコイル配置の検討を行った。加熱コイルの断面方向配置の当初の案および改善案を図8に示す。加熱対象範囲を効率的に昇温する上で、コーナー角部を集中的に昇温させ、コーナー角部からの熱伝導により加熱範囲を昇温させるコイル配置が有効であったため、①コイルピッチ短縮および②コイル設置部のコーナー角側へのシフトを実施した。この結果当初の案の88%程度の入熱量で加熱対象範囲を目標温度まで昇温可能となった。

3.2 加熱装置の性能検証(オンライン加熱テストによる温度上昇確認)

実際にオンラインに加熱装置を設置し、鑄片を加熱するテストを行った。テスト装置の概要<sup>3)</sup>を図9に、試験条件を表2に示す。コイルは門型のフレームに吊り下げられ支持される構造とし、そりのある

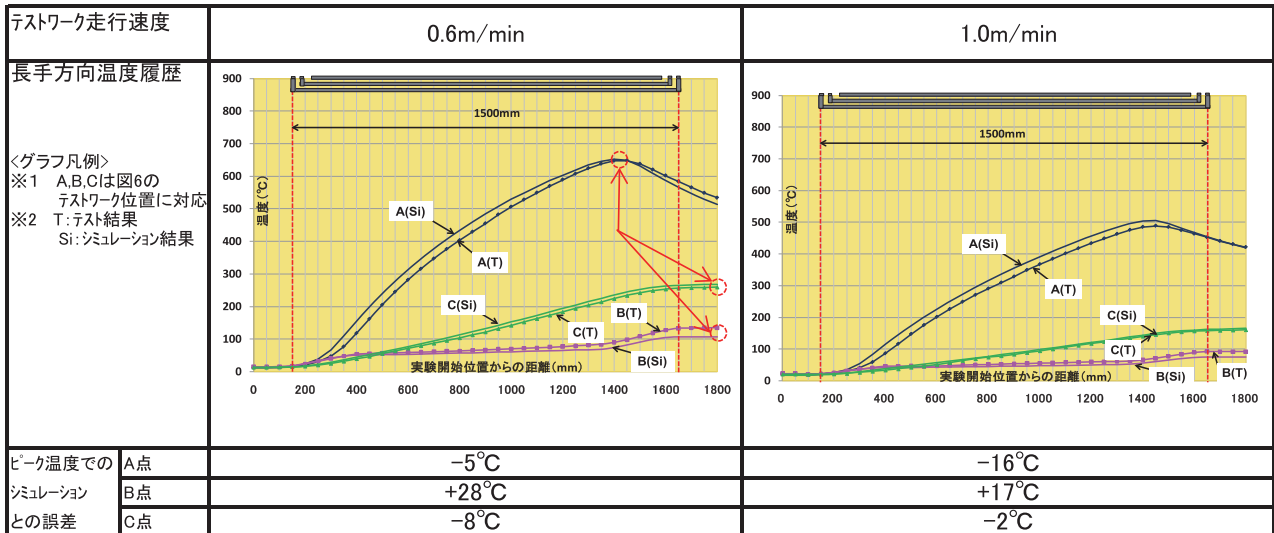


図7 オフライン加熱テスト結果  
Fig. 7 Temperature at corner of test work in offline heating test

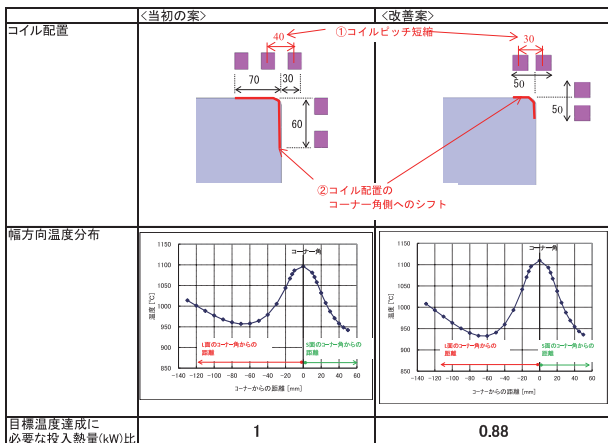


図8 コイル断面配置の改善  
Fig. 8 Improvement of coil layout in cross section

表2 オンラインテスト条件  
Table 2 Online test condition

鋳片材質	合金鋼
鋳造速度	0.6m/min
加熱コイル長さ	2m
投入電力	約300kW
鋳片-コイル間隙間	上下方向 35mm
	幅方向 50mm

非定常部鋳片を考慮しフレーム全体を昇降できる機構を設けた。コイルと鋳片の間には耐熱ボードを設置しコイルの防熱を実施している。加熱有りおよび無し鋳片の加熱装置出側位置における幅方向温度分布の比較を図10に示す。図に示すように加熱装置の出側位置に走査型放射温度計を設置し鋳片L面の温度分布の計測を行った。図に示すように加熱を実施することでコーナーから50mm位置で50°C程度昇



図9 オンライン加熱テスト装置の概要  
Fig. 9 Outline of heating device for online test

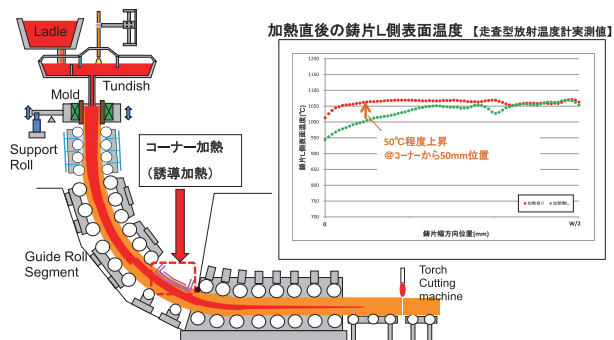


図10 オンラインテストにおける昇温状況確認結果  
Fig. 10 Temperature at corner of bloom in online heating test

温し、目標温度以上への昇温を確認できた。なお、図10において加熱有り時の方が加熱無し時に比べ、コーナー部近傍の幅方向温度勾配が大きく相対的にコーナー部の温度低下が激しくなっているように見えるが、これはコーナー部の鑄片表面スケール層が厚く、下部地鉄の温度が正確に測定できていないためと推測している。本加熱装置のヒートバランスを表3に示す。加熱効率( $\eta(\%) = Q_s/Q_p \times 100$ ,  $Q_s$ : 鑄片への投入熱量,  $Q_p$ : 高周波電源への投入電力)は約50%となった。今回コイルの巻き方やコイル配置を最適化したことで鉄心を用いない方式でもC型インダクタタイプと同等の加熱効率を達成できた。

表3 加熱装置におけるヒートバランス  
Table 3 Heat balance of heating device

		単位:%
電源投入熱量		100
	加熱ハード損失(コイル、電源、フィーダー等)	49.4
	鑄造片への入熱量	50.6

## 4 結言

今回コーナー割れが発生する鑄片L側コーナー部をシンプルな構造で高効率に昇温可能な誘導加熱装置を開発した。オンラインに本装置を設置し、矯正時のコーナー部温度を上昇させることで特殊鋼の主要品質課題の1つであるコーナー割れの改善が可能となる。

### 参考文献

- 1) 鈴木 洋夫、西村 哲他：900~600℃温度域における鋼の脆化特性：鉄と鋼第67年、p. 140-149(1981)
- 2) 特許第5723660号、発明の名称：連続鑄造設備の鑄片加熱装置及び鑄片加熱方法
- 3) 特開2014-237168号、発明の名称：鑄片加熱装置及び鑄片加熱方法