
薄スラブキャスターの開発

Development of Thin Slab Caster

戸澤 宏一(Hirokazu Tozawa) 森脇 三郎(Saburou Moriwaki) 安川 登(Noboru Yasukawa) 藤井 徹也(Tetsuya Fujii) 越川 隆雄(Takao Koshikawa) 木村 智明(Tomoaki Kimura)

要旨：

薄スラブの連続鋳造技術の確立を目的として、双ベルト式の垂直型連鋳機の研究開発を行った。主な開発項目は、ベルトの支持と全面均一冷却が可能な高速水膜冷却法および従来連鋳法と同様な浸漬ノズルの使用を可能とする上広がりの鋳型である。本方式を採用したKHキャスターにより、厚み30mm、幅800～1000mmの鋳片40tを最高10～12.5m/minで安定に鋳造する技術を確立した。鋳片は表面、内部とも良好な品質であり、厚み精度も優れている。高速鋳造やベルトコーティングなどにより、無加熱直送圧延が可能な高温鋳片が得られた。鋳造中に連続的に巻き取った鋳片を仕上げ圧延機に直送し、無加熱で圧延した結果良好な熱間圧延コイルが得られ、その材質も従来工程材と同等であった。

Synopsis：

Thin slab caster of the vertical twin belt type has been developed to realize an innovative continuous casting technique. Key techniques required for the development are follows: (1) The use of a high speed water film to uniformly cool and support the belt, (2) progressive reduction in mold thickness along casting direction to enable us to apply conventional-type pouring systems. A commercial size caster termed KH was installed to establish stable casting techniques and to see the qualities of the product. Casting experiments of more than 100 heats made it clear that thin slabs of 30 mm in thickness and 800 to 1000 mm in width with good surface quality were able to be stably cast over 40 t per charge at the maximum casting speed of 10 to 12.5 m/mm. The thin slabs were directly hot rolled without reheating; the resultant hot coil showed a good appearance and good mechanical properties comparable to those of conventional products.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

Development of Thin Slab Caster



戸澤 宏一
Hirokazu Tozawa
鉄鋼研究所 プロセス
研究部製鋼研究室 主
任研究員(部長)



森脇 三郎
Saburou Moriwaki
千葉製鉄所 製鋼部製
鋼技術室 主査(課長)



安川 登
Noboru Yasukawa
千葉製鉄所 設備技術
部機械技術室 主査(課
長)



藤井 徹也
Tetsuya Fujii
鉄鋼研究所 プロセス
研究部水島製鋼研究室
室長(部長補)・工博



越川 隆雄
Takao Koshikawa
千葉製鉄所 工程部長



木村 智明
Tomoaki Kimura
(株)日立製作所 日立
工場機械設計部 専門
副技師長

1 緒 言

鋼の連続铸造は、消費エネルギーの削減、製造工程の短縮および鋼材歩留まりの向上に極めて有効なプロセスであり、高能率生産を支える代表的な技術になっている。最近では、連続铸造で得られる高温の铸片を加熱炉に直接装入する技術¹⁻³⁾や、加熱炉への装入を省略して高温の铸片を熱間圧延工程に直接供給する、いわゆる直送圧延技術⁴⁻⁶⁾が確立されつつある。

一方、铸造工程と圧延工程の直結化と同期化を図りプロセスの省略を一層進展させる次世代铸造技術として、近年、薄スラブ連続铸造機やストリップキャスターの研究開発が活発に行われている⁷⁻¹²⁾。薄スラブ連続铸造は熱間粗圧延工程を省略する技術であり、ストリップキャストは熱間仕上げ圧延工程あるいはさらに冷間圧延工程をも省略する技術である。

ストリップキャスターでは、铸片厚さが製品厚みに近く圧延工程での圧下率が小さいため、内部、表面ともに優れた品質の铸片が要求される。また、現状の生産量に見合う生産性を確保するために

要旨

薄スラブの連続铸造技術の確立を目的として、双ベルト式の垂直型連続铸造機の研究開発を行った。主な開発項目は、ベルトの支持と全面均一冷却が可能な高速水膜冷却法および従来連続铸造法と同様な浸漬ノズルの使用を可能とする上広りの铸型である。本方式を採用したKHキャスターにより、厚み30mm、幅800~1000mmの铸片40tを最高10~12.5m/minで安定に铸造する技術を確立した。铸片は表面、内部とも良好な品質であり、厚み精度も優れている。高速铸造やベルトコーティングなどにより、無加熱直送圧延が可能な高温铸片が得られた。铸造中に連続的に巻き取った铸片を仕上げ圧延機に直送し、無加熱で圧延した結果良好な熱間圧延コイルが得られ、その材質も従来工程材と同等であった。

Synopsis:

Thin slab caster of the vertical twin belt type has been developed to realize an innovative continuous casting technique. Key techniques required for the development are as follows: (1) The use of a high speed water film to uniformly cool and to support the belt, (2) progressive reduction in mold thickness along casting direction to enable us to apply conventional-type pouring systems.

A commercial size caster termed KH was installed to establish stable casting techniques and to see the qualities of the product. Casting experiments of more than 100 heats made it clear that thin slabs of 30 mm in thickness and 800 to 1 000 mm in width with good surface quality were able to be stably cast over 40 t per charge at the maximum casting speed of 10 to 12.5 m/min.

The thin slabs were directly hot rolled without reheating; the resultant hot coil showed a good appearance and good mechanical properties comparable to those of conventional products.

は、技術的に解決すべき問題が多い。したがって現状では、ストリップキャスターは主にステンレス鋼や難圧延材などの製造を目的として開発が進められている。

一方、普通鋼の大量生産プロセスとして薄スラブ連続铸造機の開発が活発に進められているが、薄スラブ連続铸造機においても、従来連続铸造プロセスと同一の生産量を得るには铸造速度を従来連続铸造機の数倍から数十倍にする必要がある。このため、固定式铸型では铸型と铸片間の摩擦による铸片凝固シェルの破断が生じやすく¹³⁾、移動式モールドを採用したものが多い。その方式は、多数の樋状のブロックを接続した単ブロック方式¹⁴⁾、アルミの铸造で実用化されている Alusuisse Caster II¹⁵⁾ のような双ブロック方式^{16,17)}、あるいは非鉄金属で多く使用されている Hazelett 連続铸造機^{18,19)} と類似の傾斜型双ベルト方式²⁰⁻²⁴⁾、垂直型の双ベルト方式^{24,25)} 等がある。一方、固定式铸型を採用した例としては、漏斗状の特殊形状铸型による方式²⁶⁾ と、従来の連続铸造と同様な矩形断面铸型を用いる方式²⁷⁾ がある。

薄スラブ連続铸造機においても、従来連続铸造機と同様に良好な表面性状

* 平成元年3月24日原稿受付

を有する鋳片を得ることが必要不可欠なため、溶鋼の均一静寂注湯技術の確立が開発上の最重要課題である。当社と株式会社日立製作所は、この点を解決するために、従来連鋳機で技術的に確立された浸漬ノズル方式による注湯方法が使用可能な、垂直型の上広がり鋳型を用いる双ベルト式薄スラブ連鋳機 (KH キャスター) の共同研究開発に着手した。KH キャスターでは、キャスターの出側で鋳片をコイル状に巻き取り、このコイルを仕上げ圧延機に無加熱で供給して熱間圧延を実施できる。本報では、KH キャスターの特徴、設備概要、操業結果、鋳片品質および無加熱直送圧延板の品質について述べる。また、本プロセスの特徴の1つである高速水膜冷却法に関して、鋳片冷却特性について述べる。

2 KH キャスターの特徴²⁸⁾

従来連鋳法と同等以上の鋳片品質、とくに表面品質を得るために、KH キャスターでは、従来連鋳法と同様な浸漬ノズルを用い、溶鋼の断気注入と均一静寂注湯が達成できるように垂直型の上広がり鋳型を採用した。以後、本注湯方式を「上広がり鋳型注湯法」と称する。本方式は垂直型の鋳型のため、介在物や気泡の浮上に対して有利であり、これらの集積帯が形成されない利点がある。

鋳型の長辺面は、鋳片の引抜き速度と同調して移動するベルト構造として、高速鋳造を可能にした。ベルトの冷却は均一全面冷却を実現できるように、鋳片と接する領域でのベルトには機械的支持部分をなくしてベルトの背面に水膜を形成するように冷却水を流し、水膜の圧力でベルトを支持する方式を取った。本冷却方式を以後「高速水膜冷却法」と称する。

2.1 上広がり鋳型注湯法

上広がり鋳型注湯法は、鋳片厚み方向での鋳型の幅を上部は広く、下部に進むにつれ狭くし、目的の鋳片厚さになるまで板厚を薄くする方式である。Fig. 1 に鋳型構成の模式図を示す。本方式により浸漬ノズルの使用が可能になった。さらに、メニスカスの面積が従来連鋳機と同程度広いために、注入溶鋼の流量変動の湯面変動に及ぼす影響が小さくなり湯面のレベル制御が容易になる。

鋳型の短辺は固定方式で、双ベルト間にはさまれてセットされる。鋳片の厚みが増える上広がり部分は耐火物を内張りして断熱構造とし、短辺面上での凝固シェルの成長を防止した。これにより、円弧形状の長辺凝固シェルの成長を無理なく平板状に矯正することが可能になる。上広がり部では、まずベルト面からの冷却による長辺

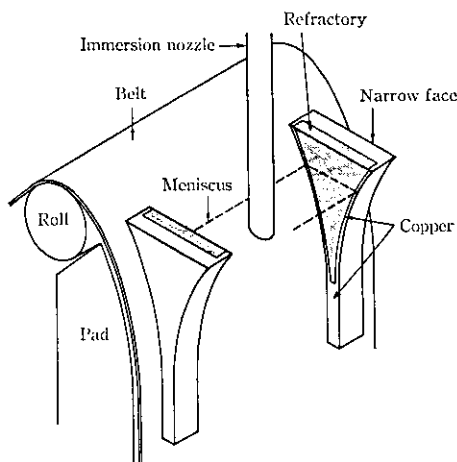


Fig. 1 Schematic drawing of mold construction

シェルのみが成長し、その後耐火物下部の銅板部において、短辺からのシェルの成長が開始する。すなわち、本方式では長辺面と短辺面で凝固の開始点が異なっている。

2.2 高速水膜冷却法

Fig. 2 にベルトの支持・冷却方法の模式図を示す。ベルトの背面に多数の給水孔と排水孔を有する冷却パッドを配し、ベルトとパッドの間に高速で流れる水膜を形成する。これによりベルトの冷却を行うとともに、水膜の圧力によりベルトをパッド面より浮上させて支持する。本水膜冷却法の要点は、ベルトを介して溶鋼静圧と水膜の圧力とがある一定の水膜厚みで常につり合うようにし、かつ、冷却に必要な水膜内流速を確保することである。この条件を満たすように、給水孔径と排水孔径ならびに冷却水の流量を定めた。水膜内流速は、ベルトの温度上昇が許容値以下に抑えられるよう設計し、水膜の厚さはベルトの変動量や変形量を吸収でき、かつ、冷却水の流量が適切な範囲となるように定めた。

本方式の特徴は、

- (1) 水膜流によるベルトおよび鋳片凝固シェル全面の均一冷却
- (2) 水膜の圧力によるベルトおよび鋳片全面の均一な支持
- (3) 冷却パッドとベルト間の水膜による液体潤滑
- (4) 水膜流による高い冷却能力

である。

これにより、ベルトの摩耗と熱変形を防止し、かつ局所的なバルジングのない均一な厚みの鋳片を製造することが可能になった。

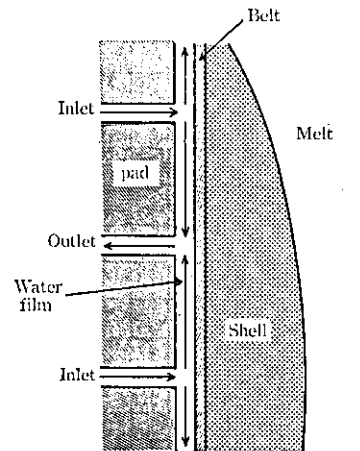


Fig. 2 Schematic view of cooling method with water film

3 研究開発の経緯

Fig. 3 に KH キャスターの研究開発の過程を示す。300 t の圧下力を有する熱間圧延機と直結して、200 kg の誘導式溶解炉を備えた小型の水平型薄スラブ連鋳機 (KCC)²⁹⁻³²⁾ を建設し、薄スラブ鋳片の直送圧延による圧延材の材質特性を調査した³⁴⁾。その結果は次のとおりである。

- (1) 熱間圧延の圧下率の増加とともに降伏強度、引張強度、伸びとも増加する。
- (2) 厚さ 30 mm の薄スラブでは 75~85% 以上の熱延圧下率で従来材と同等の材質が得られる。

また、上広がり鋳型および高速水膜冷却法の基本的特性を確認するために、5 t の溶鋼が利用可能なプロトタイプの垂直型薄スラブ連鋳機を建設し、鋳造試験および要素技術開発を行った。Table 1

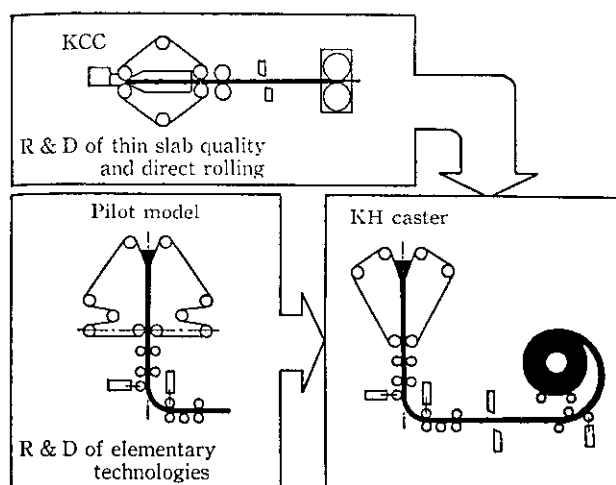


Fig. 3 Step of R & D of KH caster

Table 1 Specifications of pilot model caster

Ladle capacity	5 t
Tundish capacity	2 t
Slab size	
Thickness	30 mm
Width	500-600 mm
Mold length	1.65 m
Casting speed	max. 5.3 m/min

に本連铸機の主仕様を示す。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 短辺の形状と材質の最適化により上広がり铸型注湯法は可能である。
 - (2) ベルトと短辺との摺動部における湯差しは短辺形状、冷却パッドの適正化により防止できる。
 - (3) ベルトの熱変形は水膜冷却パッドの改善により減少し、铸片の板厚偏差は小さい。
 - (4) 铸片表面は平滑で、かつ、中心偏析と介在物の集積がない。
- これらの結果に基づき大型実証機である KH キャスターを建設して商業生産規模の実験を開始した。

4 KH キャスターの設備概要と操業³⁵⁾

プロトタイプの薄スラブ連铸機における実験結果により、KH キャスターが鋼の薄スラブ連铸に適用できることを確認した。そこで、広幅铸片を高速で大量に铸造可能な工業的規模の設備、KH キャスターを千葉製鉄所第2製鋼工場に設置し、設備の耐久性を確認するとともに、コイル状に巻き取った铸片を無加熱で仕上げ圧延機に供給し、熱間圧延実験を行った。

4.1 設備概要

Fig. 4 に本設備の概要を示す。また、Table 2 に機械主仕様を、Table 3 に铸型主仕様を示す。取鍋容量は 160 t である。铸型は全体をカセット化して迅速交換ができる構造にした。ベルトの交換は、铸型長辺をその両面間で2分割し、環状に溶接されたベルトを側面から着脱することにより行う。铸片はテーブル上に展開する以外に、铸造中にコイラーにより高温で巻き取ることが可能である。さらに、長時間铸造時には複数個のコイルを連続的に巻き取ることが可能なように、キャスターとコイラー間に走間シャーを、コイラ

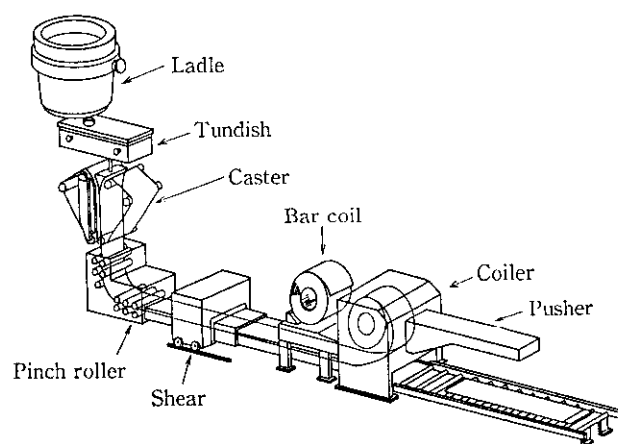


Fig. 4 Schematic drawing of KH caster

Table 2 Machine specifications of KH caster

Ladle capacity	160 t
Tundish capacity	12 t
Casting floor	FL+6 300 mm
Level of pass line	FL- 200 mm
Mold length	3.7 m
Casting speed	max. 15 m/min
Bending radius	1.2 m
Shear	Flying shear
Coiler	
Inner dia.	780 mm
Outer dia.	2 350 mm
Coil weight	max. 20 t

Table 3 Mold specifications of KH caster

Mold size	
Thickness	30 mm
Width	700-1 300 mm (width change by hydrostatic cylinder)
Wide face	
Material	Steel belt with dried coating substance
Thickness	1.2-1.6 mm
Width	1 600 mm
Narrow face	
Material	Refractory plate

ーの背後にはブッシャーを設置した。このように铸片をコイル状に巻き取ることにより、表面積が減少して熱放散を削減でき直送圧延が有利になるとともに、設備のライン長も短くできる。また铸造中の铸片の放熱を防止するため、テーブル、走間シャー、コイラーには保温カバーを設けた。

铸片の厚みは、巻き取りの容易さ、圧延板の材質、铸片と製品の板厚精度、熱間圧延のミル段数などの条件から 30 mm とした。

4.2 操業方法

タンディッシュから铸型への注湯は浸漬ノズルを用いて行った。铸型内の湯面のレベル制御は従来連铸と同一の方法とし、メニスカスレベルを検出してタンディッシュのスライディングノズル開度を調節した。また、メニスカス面は Ar ガスシールを実施した。铸型の長辺面が铸片の引抜き速度と同期して移動するため、ダミーバー

としては鋳型の長辺面をなすベルトによって駆動される長さ数十 cm の簡単な構造にした。鋳造速度は最大 10~12.5 m/min であり、鋳片は鋳型内で完全に凝固するためにパルジングは全く認められない。また、ベルトには連続的にコーティングを実施し、ベルトへの熱負荷軽減および鋳片の表面品質の向上、さらに、鋳片温度の上昇を図っている。

4.3 操業結果

1987 年 9 月の操業開始以来、現在までに約 140 回の実験を行った。800 mm 幅と 1000 mm 幅の鋳片 40~50 t (最大鋳造長約 230 m) を安定に鋳造できる技術を確認し、以下の結果を得た。

4.3.1 ベルト熱変形

高速水膜冷却法により、ベルトの温度上昇が抑制され、ベルト熱変形はほとんど認められなかった。ベルトの稼働面に無機質系のコーティング剤を塗布すると、ベルトへの熱負荷が減少し熱変形がなくなり、長時間鋳造に耐えることが確認できた。

4.3.2 鋳片厚み分布

Fig. 5 に幅方向の鋳片厚み分布を示す。図中の破線は、水膜の圧

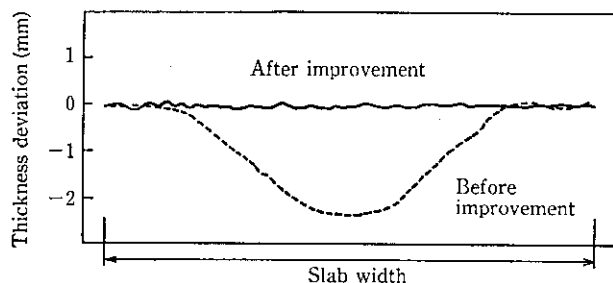


Fig. 5 Thickness deviation of cast slab in slab width



Photo 1 Appearance of thin slab coil just after coiling

力が溶鋼静圧よりも大きいために圧力バランスが崩れ、ベルトが鋳片側に張り出し鋳片の幅中央部が薄くなった場合の例である。給・排水孔径を改善することと適切な水量コントロールによって、水膜の圧力を溶鋼静圧とバランスさせることおよびベルト熱変形の防止により、図中の実線で示すように均一な鋳片厚みが得られた。

4.3.3 鋳片温度

高速鋳造とベルトコーティングの実施、鋳片保温設備の強化などにより、巻き取り中の鋳片表面温度として 1000°C 以上が得られる。その結果、無加熱でも従来連鋳機による工程材と同等の圧延温度が確保できた。Photo 1 にブッシャーにより押し出された直後のコイル状に巻き取られた鋳片の外観写真を示す。

5 鋳片品質および直送圧延材の品質⁸⁶⁾

5.1 鋳片表面品質

Photo 2 に鋳片の外観写真を示す。鋳片の長辺はベルトと同期して引き抜かれるため、従来連鋳材に見られるオシレーションマークがない良好な表面である。ベルトのコーティングを実施しない場合、中炭素鋼などの凝固収縮量の大きい鋼種では、鋳片表面には亀甲状の凹凸が見られ、縦割れ、横割れ等の表面欠陥が発生しやすい。しかしベルトにコーティングをして緩冷却化を図ることにより、鋳片表面の凹凸は大幅に減少し、割れ等の表面欠陥が防止できた。

5.2 鋳片内部品質

Photo 3 に鋳片の凝固組織を示す。鋳片は 30 mm と薄いために、横断面全域にわたって凝固組織は微細であり、方向性の強いデンドライト状の組織が鋳片厚み中央近傍まで伸びている。また内部割れなどの異常は認められない。

Fig. 6 に鋳片厚み方向の P および Mn のマクロアナライザーによるライン分析 (ビーム径 50 μ m, 分析幅 0.5 mm) 結果を示すが、従来の連鋳鋳片に見られるような中心偏析は全く認められない。これは鋳片の厚みが薄いために凝固速度が速いこと、鋳片が面支持されていてパルジングがないためにデンドライト樹間の濃化溶鋼の中心部への吸い出しがないこと、および最終凝固までに濃化される溶鋼が少ないためと考えられる。

Fig. 7 に鋳片横断面の介在物の分布を示す。水平型薄スラブ連鋳機 (KCC) では上面側への介在物の集積が認められるが、KH キャスターは垂直型であるため、このような介在物の集積がないことがわかる。

5.3 無加熱直送圧延結果

Table 4 に示す条件で鋳造しコイラーにて巻き取った鋳片を、保

Photo 2 Appearance of thin slab coil

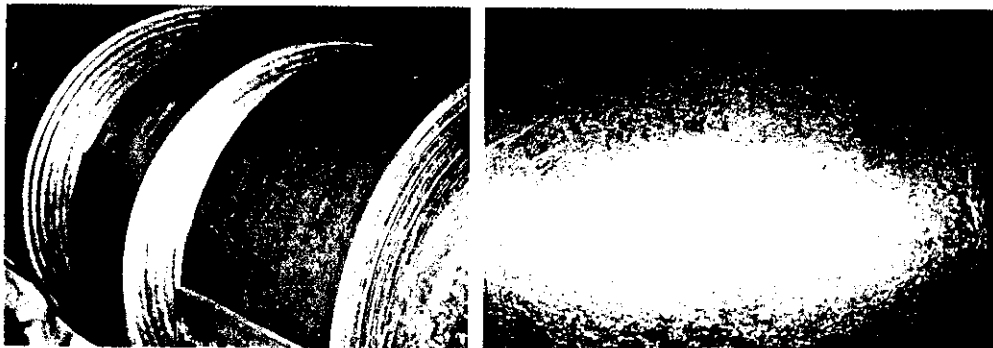


Photo 3 Solidification structure of thin slab (cross section, AISI 304)

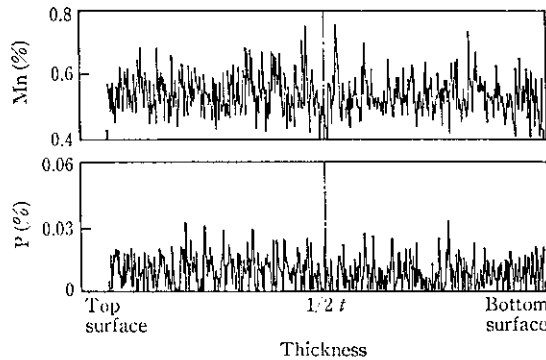
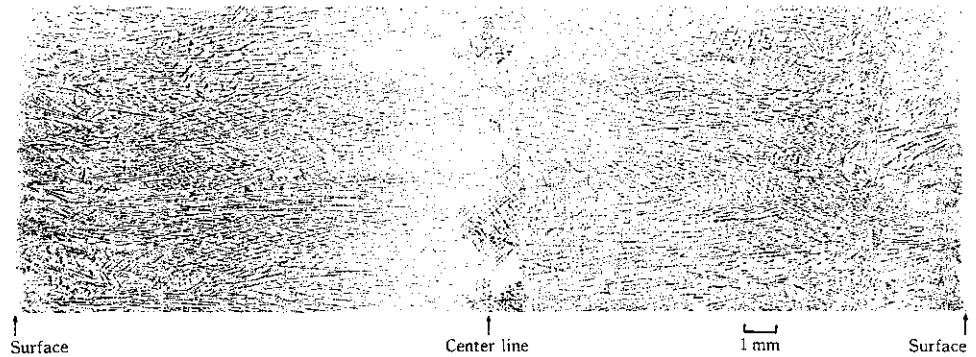


Fig. 6 Concentration distribution across slab thickness

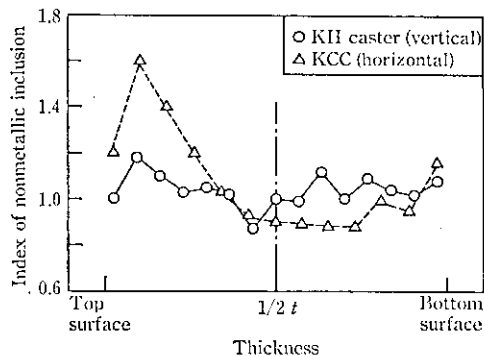


Fig. 7 Distribution of nonmetallic inclusion through slab thickness

Table 4 Casting conditions

Steel grade	low carbon Al-killed
Casting speed	10 m/min
Slab thickness	30 mm
Coil weight	12 t

温ボックスに装入し、トレーラーにて千葉製鉄所第2熱間圧延工場まで搬送した。これを熱間仕上げ圧延機の入側に設置されたコイルボックスに装入し、巻き出し、無加熱で圧延を行った。工程材とはほぼ同一の条件で、7パスで厚さ3.2 mmまで圧延した。圧延後のコイル外観をPhoto 4に示すが、工程材と同様の良好なコイルが得られた。圧延板の材質をTable 5に示すが、従来工程材と比較してほぼ同等の特性が得られた。

またSUS 304を同様な条件(幅は1 m)で铸造し、铸片表面の手入れ状況が製品の表面性状に及ぼす影響を調査した。すなわち铸片を冷却して、その一方の表面をグラインダー研削し、他方の表面を無手入れのままとした。铸片を再加熱して熱間仕上げ圧延後、工

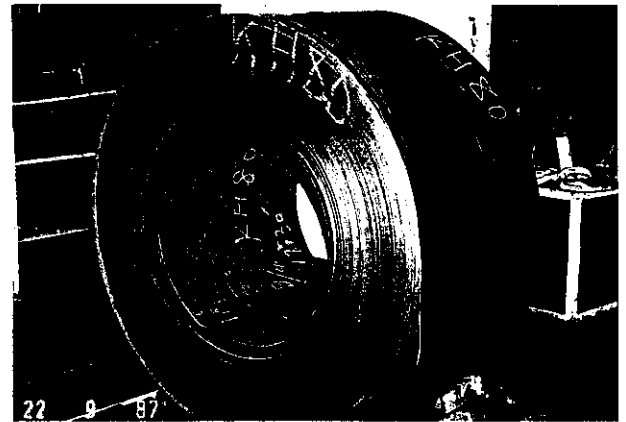


Photo 4 Appearance of hot coil

Table 5 Mechanical properties of hot-rolled coil (thickness 3.2 mm)

Yield strength	20.0 kgf/mm ²
Yield elongation	0.83%
Tensile strength	32.8 kgf/mm ²
Elongation	44.6%

程材と同様に焼鈍、酸洗、冷間圧延を実施し、厚さ1 mmの冷間圧延板を得た。その機械的性質は従来工程材と同等で、無手入れの面においても光沢、白色度などの表面性状は良好であった。

6 高速水膜冷却法の铸片冷却特性³⁷⁾

6.1 高速水膜冷却法の抜熱量

铸片の冷却特性は鋼種、溶鋼静圧、ベルトのコーティング条件などにより変化し、定常状態における铸片からの抜熱速度は、ベルトと冷却水間の熱流束 q' として、(1)式から、 $\theta_{w,out}$ 、 $\theta_{w,in}$ を測定することにより求められる。

$$q' = (\theta_{w,out} - \theta_{w,in}) Q C_w \rho_w / A \quad \dots \dots \dots (1)$$

$\theta_{w,out}$: 冷却水排水温度

$\theta_{w,in}$: 冷却水給水温度

Q : 冷却水流量

C_w : 冷却水比熱

ρ_w : 冷却水比重

A : 冷却面積

低炭素鋼($C < 0.08\%$)と中炭素鋼の q' を(1)式より求め、ベルトコーティングの有無別にFig. 8に示す。この q' は、铸型上方

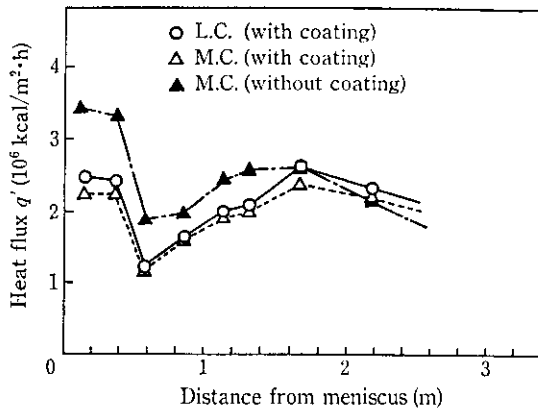


Fig. 8 Heat flux between belt and cooling water in the casting of low carbon and middle carbon steels

部から下方部に進むに従い減少し、いったん増加した後再び減少する傾向にある。これは凝固の進行過程で、鋳片凝固シェルとベルト間に生ずるエアギャップによる熱抵抗の増大効果と、溶鋼静圧の増大とともに鋳片凝固シェルとベルト間の接触状態が良好となる熱抵抗の減少効果の2つの効果によるものと考えられる。

Fig. 8 に示すように、ベルトコーティングはベルトへの入熱量をほぼ30%低減し、ベルトの熱負荷の減少効果に優れ、また、鋳片の緩冷却の観点からも効果が大きいことが判明した。

抜熱量に及ぼす鋼種の影響については、中炭素鋼に比べ低炭素鋼の方が5%程度抜熱量が高い。これは低炭素鋼の鋳片表面が中炭素鋼のそれよりも平滑なため、鋳片とベルトの接触状況が良く伝熱抵抗が小さいためと考えられる。

6.2 鋳片冷却計算方法

鋳型内における鋳片およびベルトの温度は、以下に示す鋳片厚さ方向に関する1次元定常熱伝導の式を解くことにより求められる。

$$\text{鋳片内: } \rho_s C_s u \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$\text{ベルト内: } \rho_m C_m u \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_m \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{(初期条件)} \quad z=0 & : 0 \leq x \leq 0.5d_s \quad \text{で} \quad \theta = \theta_s^0 \\ & -d_m \leq x \leq 0 \quad \text{で} \quad \theta = \theta_m^0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(境界条件)} \quad x=0 & : q = -\lambda_s \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \\ x=0.5d_s & : \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \\ x=-d_m & : q' = -\lambda_m \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

ここで、

ρ : 密度	x : 鋳片厚さ方向座標
C : 比熱	z : 鋳片鋳込み方向座標
u : 鋳造速度	d : 厚み
θ : 温度	q : 鋳片～ベルト間熱流束
λ : 熱伝導率	q' : ベルト～冷却水間熱流束

添字は、 s が鋳片(溶鋼)、 m が鋳型(ベルト)を示す。

ここで、鋳片に関しては比熱 C_s および熱伝導率 λ_s を温度の関数とするが、ベルトは温度範囲が狭いことから比熱 C_m および熱伝導率 λ_m は一定として、(2)、(3) 式を差分近似し温度計算を行った。

また、ベルトと冷却水間の熱流束 q' は、

$$q' = \alpha_w \cdot (\theta'_m - \theta_w) \quad (4)$$

α_w : ベルト～冷却水間熱伝達率

θ'_m : ベルト裏面(冷却水側)温度

θ_w : 平均冷却水温度

で表わされる。(4) 式中の α_w は、遷移域における平板冷却式(Colburn の式) とよく一致することが確認されており、次式を用いた。

$$\alpha_w = 0.023 R_o^{0.8} P_r^{1/3} (\lambda_w / 2\delta) \quad (5)$$

R_o : レイノルズ数

P_r : プラントル数

λ_w : 冷却水熱伝導率

δ : 冷却水水膜厚み

鋳片とベルト間の熱流束 q は、

$$q = \alpha_g \cdot (\theta_s - \theta_m) \quad (6)$$

α_g : 鋳片～ベルト間熱伝達率

θ_s : 鋳片表面温度

θ_m : ベルト表面温度

で表わされる。ここで α_g は未知量であるが、 α_g を仮定して、(2)、(3) および (4) 式より算出した q' が、実測値を用いて (1) 式から得られた値と一致するように繰り返し計算を行い α_g を求めた。

6.3 鋳片とベルト間の伝熱状況

Fig. 9 にベルトコーティングを実施した場合の低炭素鋼と中炭素鋼について、前記手法で求めたベルトと鋳片間の熱伝達率 α_g を実線で示す。また同図に、この α_g より算出したベルトと冷却水間の熱流束 q' を破線で示す。これは、○、△印で示す実測値とはほぼ一致しており、算出した熱伝達率 α_g の精度は高いものと考えられる。

鋳型各部での α_g の変化は、前述した鋳片とベルト間の熱抵抗の変化を反映していて、凝固が十分に進んだ下方部では α_g が一定値となり、鋳片とベルトの接触状態が安定していることがわかる。

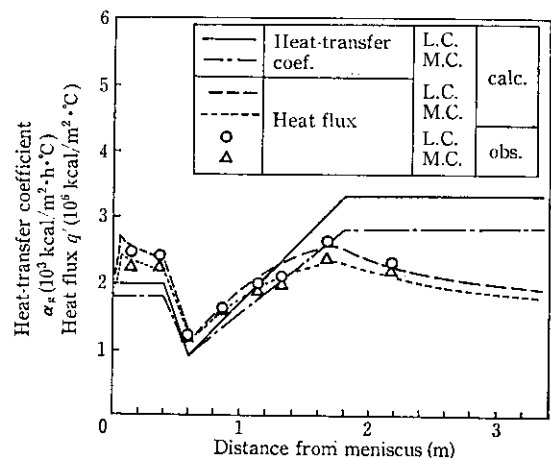


Fig. 9 Heat-transfer coefficient and heat flux between shell and belt in the casting of low carbon and middle carbon steels

6.4 鋳片温度計算結果

Fig. 10 に低炭素鋼における鋳片中心部と表面の温度計算結果例と、鋳片表面温度測定結果を示す。また同図に、本計算から得られ

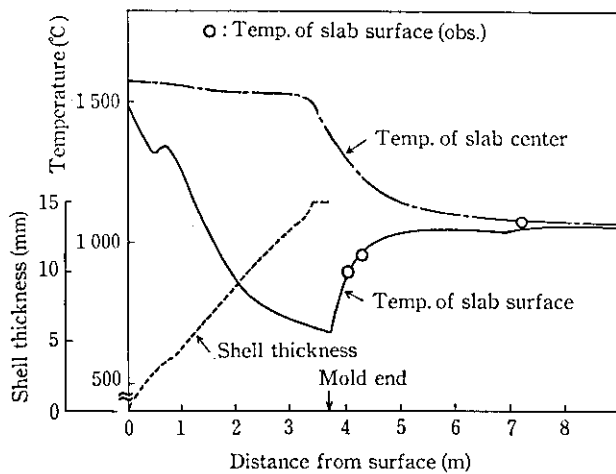


Fig. 10 Calculation results of slab temperature of low carbon steel (0.054%C, casting speed $V_R=9$ m/min)

る凝固シェル厚みを点線にて示す。铸片表面温度の計算値と実測値はよく一致しており、復熱後で 1000°C 以上となっている。また本計算から求まる凝固完了時間から凝固速度定数 k を算出すると $24.4 \text{ mm/min}^{1/2}$ である。铸造中の铸型内溶鋼に FeS を添加した铸片のサルファープリントからシェル厚みを求めて k 値を算出すると $24.7 \text{ mm/min}^{1/2}$ であり、両者はよく一致している。

7 結 言

薄スラブ連続铸機の開発を目的として、200 kg, 5 000 kg の溶鋼を用いる小型実験を実施後、商業規模実験のために独自技術による高速水膜冷却法と垂直型の上広がり铸型を用いる双ベルト式キャスターを建設し、研究開発を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 厚み 30 mm, 幅 800~1 000 mm の铸片を、最高 10~12.5 m/min の铸造速度で 40~50 t/charge を安定に铸造できる技術を確認した。
- (2) 本キャスターでは上広がり铸型注湯法を採用したことによって、浸漬ノズルの使用と安定した湯面レベル制御が可能になり、良好な表面品質の铸片が得られた。
- (3) 高速水膜冷却法の開発により、高い冷却能を有する全面均一冷却が達成され、ベルトの熱変形がなく铸片の厚み精度に優れた铸造が可能になった。
- (4) 高速铸造、ベルトのコーティングの実施、铸片保温設備の強化などにより高温铸片が得られ、無加熱直送圧延が可能になった。
- (5) 無加熱直送圧延材の材質は従来工程材とほぼ同等のレベルが得られた。

今後の研究課題は、工業化のための長時間連続操業に耐え得る各設備要素の耐久性の向上と、高級冷延鋼板に対応可能な高品質铸片の铸造技術の確立である。

参 考 文 献

- 1) 神永昭三, 植松正博, 栗山富士男: 鉄と鋼, 69 (1983) 13, S1141
- 2) 野口 計, 品川裕明, 俵 正憲, 山上哲也: 鉄と鋼, 74 (1988) 7, 1248
- 3) 多賀雅之, 小林隆衛, 木村智彦, 山下幹夫, 野下泉平: 鉄と鋼, 70 (1984) 4, S180
- 4) 蜂谷整生, 中島浩衛, 山口武和: 鉄と鋼, 68 (1982) 4, S209
- 5) 鈴木功夫, 古崎 宣, 武田久之, 吉田正志, 竹田秀俊, 伊藤 慶: 鉄と鋼, 68 (1982) 11, S1012
- 6) 内堀秀男, 谷口 勲, 手嶋俊雄, 沖本一生, 政岡俊雄: 鉄と鋼, 74 (1988) 7, 1235
- 7) F. R. Mollard: *J. Metals*, 34 (1982) 1, 57
- 8) G. J. Mcmanus: *Iron Age*, (1984) April 2, 52
- 9) J. Isenberg-O'Loughlin and W. P. Jacob: *33 Metal Producing*, March, (1985), 43
- 10) G. J. Mcmanus: *Iron Age*, August 2 (1985), 31
- 11) R. Steffen and R. Thielmann: *Stahl u. Eisen*, 106 (1986) 11, 631
- 12) T. Nozaki and H. Nakato: *Steel Technology International 1988*, ed. by Peter H. Scholes, (1988), 238, [Sterling Publications Limited, London]
- 13) 鈴木幹雄, 北川 融, 沖本一生, 内田繁孝, 白山 章: 材料とプロセス, 1 (1988) 1, 181
- 14) H. S. Marr and V. Ludlow: *Revue de Métallurgie-CIT*, (1987) Avril, 299
- 15) T. W. Clyne: *J. Metal Science*, 16 (1982), 441
- 16) 中田正三, 高杉英登, 小松政美, 土田 裕, 深瀬久彦, 松井邦雄: 材料とプロセス, 1 (1988) 1, 294
- 17) 高杉英登, 中田正三, 木村成人, 長谷部信久, 土田 浩, 高橋修造: 材料とプロセス, 1 (1988) 1, 295
- 18) R. W. Hazelett: *Iron and Steel Engineer*, 18 (1966) 6, 105
- 19) C. J. Petry and S. W. Platek: *Light Met.*, 1983 (1983), 931-950
- 20) 岡崎 卓, 小出優和, 井上雄次, 高木 勉, 浅里孝志: 鉄と鋼, 72 (1986) 4, S140
- 21) 岡崎 卓, 吉原正裕, 村上敏彦, 福島佳春, 杉谷泰夫, 辻田公三郎: 鉄と鋼, 72 (1986) 4, S141
- 22) 高輪武志, 高木 勉, 大橋保威, 岡崎 卓, 吉原正裕, 小出優和: 鉄と鋼, 75 (1989) 2, 275
- 23) M. Yoshihara: *Casting of Near Net Shape Products*, ed. by Y. Sahai, J. E. Battles, R. S. Carbonara and C. E. Mobley, The Metallurgical Society, (1988), 99
- 24) M. R. Moore, S. S. Daniel, and M. R. Ozgu: *Casting of Near Net Shape Products*, ed. by Y. Sahai, J. E. Battles, R. S. Carbonara, and C. E. Mobley, The Metallurgical Society, (1988), 441
- 25) 和田 要, 萩林成章, 塩 紀代美: 材料とプロセス, 1 (1988) 1, 185
- 26) E. Höffken, P. Kappes, H. Lax: *Stahl und Eisen*, 106 (1986) 23, 1253
- 27) K. Brückner: *Stahl und Eisen*, 108 (1988) 22, 1029
- 28) 越川隆雄, 安川 登, 別所永康, 野崎 努, 木村智明, 児玉英世: 材料とプロセス, 1 (1988) 1, 291
- 29) 糸山誓司, 中戸 参, 野崎 努, 垣生泰弘: 鉄と鋼, 71 (1985) 4, S272
- 30) 糸山誓司, 中戸 参, 野崎 努, 垣生泰弘, 別所永康: 鉄と鋼, 71 (1985) 11, A249
- 31) 糸山誓司, 別所永康, 藤井徹也, 野崎 努: 72 (1986) 12, S987
- 32) S. Itoyama, H. Nakato, T. Nozaki, Y. Habu, and T. Emi: *Proceedings of the 69th Steelmaking Conference, the 5th IISC Congress*, Iron Steel Society, Penn., (1986), 833
- 33) S. Itoyama, N. Bessho, T. Fujii, T. Nozaki, and T. Kusaba: *Transactions ISIJ*, 28 (1988) 8, 555
- 34) 佐伯真事, 岡田 進, 角山浩三, 真鍋昌彦, 糸山誓司: 材料とプロセス, 1 (1988), 1682
- 35) 江本寛治, 山田博右, 森脇三郎, 中西恭二, 秦 和宜, 木村智明: 材料とプロセス, 1 (1988) 1, 292
- 36) 藤井徹也, 戸澤宏一, 久我正昭, 武智敏貞, 北野嘉久, 田村 望: 材料とプロセス, 1 (1988) 1, 293
- 37) 木村智明, 吉田尚志, 西野 忠, 田村 望: 日本機械学会日立地方講演会講演論文集, (1988), 160