

(技術資料)

条鋼のダイレクト圧延技術

Direct Rolling Technology of Steel Bars



浅野文樹*
Fumiki ASANO



川口浩志**
Hiroshi KAWAGUCHI

In the direct rolling process, the energy for billet reheating can be substantially reduced because there is no ascending heat process. Kobe Steel is working on the development of direct rolling technology that sends the high temperature billet directly to the rolling mill using high-speed casting and a secondary dynamic cooling control system of a continuous casting machine. This report introduces the profitability of the direct rolling system based on actual tests at production facilities of the end user.

まえがき = 普通鋼を製造する電気炉業界では、電気炉操業方法の改善などを行い省エネルギー対策を図ってきた。近年、世界規模でCO₂削減が重視されはじめ、連続鋳造（以下、連鋳という）設備から圧延設備に至る製造プロセス自体を見直す動きが活発化し、連鋳ビレットを高温状態のまま圧延設備に供給するダイレクト圧延が再び脚光を浴びている。本技術は、連鋳ビレットを圧延温度まで昇温するためのエネルギーを大幅に削減することが期待できる製造プロセスである。

ダイレクト圧延自体は、これらの設備にかかわる技術者の古くからの夢であり、その実現に向けさまざまな技術開発がなされてきた。しかしながら、国内の普通鋼電気炉業界においては、一部の電気炉メーカを除き今なお実現できていない。それは工場建設当時はダイレクト圧延の発想が無く、連鋳設備と圧延設備とが隔離された工場レイアウトになっているために搬送中の温度低下が大きく、連鋳ビレットを高温状態のまま圧延設備に供給できないことが最大の理由である¹⁾。

この要求に応えるべく当社は、「V60-MOULD 鋳造速度高速化技術」および「二次冷却帯におけるビレット温度制御技術」を発展させ、昇温設備工程を経由することなく、連鋳ビレットを高温状態のまま圧延設備に安定供給できるダイレクト圧延技術の確立に取り組んでいる。

本稿では、当社が納入した「ダイレクト圧延設備」および「二次冷却帯ダイナミック制御技術」を紹介し、ダイレクト圧延設備技術確立への取組みと今後の展開について報告する。

1. 製造プロセス

普通鋼の製造プロセスは以下に分類することができる。

1) ビレットの状態でいったん保管し、加熱炉で昇温し

て圧延設備に供給する「加熱炉圧延プロセス」

2) 高温ビレットの状態では加熱炉に装入し、圧延設備に供給する「ホットチャージ圧延(HCR)プロセス」

3) 高温ビレットを圧延設備に直接供給する「ダイレクト圧延(HDR)プロセス」

各プロセスの概念を図1(a),(b),(c)に示す。ダイレクト圧延プロセスでは、連鋳と圧延の間に昇温設備を持たないシンプルな構成を実現できるため、操業コストのみならず設備維持コストも削減することが可能であ

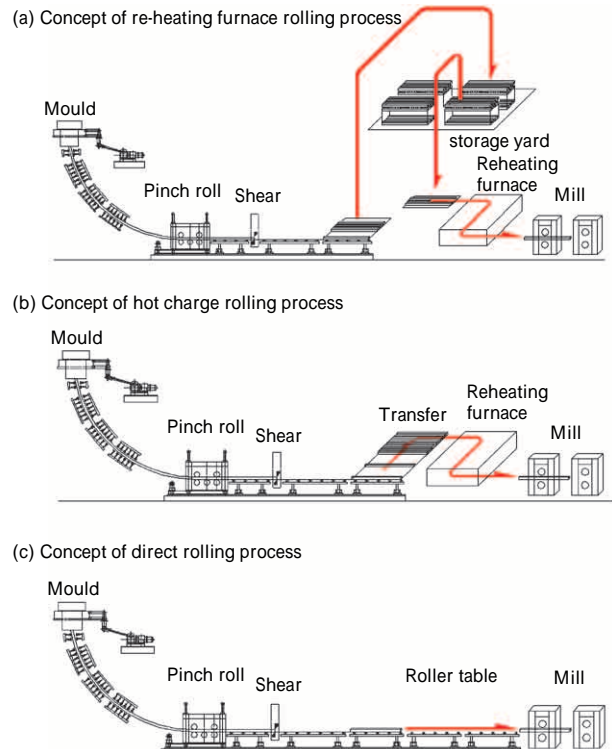


図1 各プロセスの概念図
Fig. 1 Conceptual drawing of each process

*機械エンジニアリングカンパニー 産業機械事業部 重機械部 **神鋼テクノ株式会社

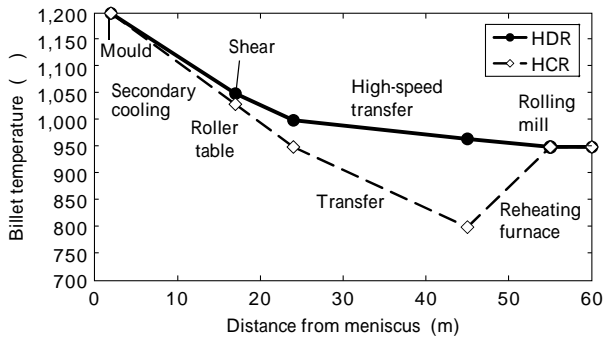


図2 ホットチャージ圧延およびダイレクト圧延におけるビレット温度履歴比較
Fig. 2 Comparison of billet temperature history in HCR and HDR

る。また、工場を新設する場合には、建設コスト自体を削減することができる。

図2に、ホットチャージ圧延およびダイレクト圧延におけるビレット温度履歴の比較を示す。ホットチャージ圧延を実施している普通鋼電気炉メーカーでは、工場レイアウトにより差はあるものの、連铸ビレットを約150昇温した後、圧延設備に供給している。都市ガスを燃料としてホットチャージ圧延を実施している国内電気炉メーカーの操業を例に、ダイレクト圧延を実施した場合の省エネルギー効果を以下に試算する。

加熱炉内上昇温度 $T: 150 (^\circ\text{C})$

都市ガスの発熱量 $J: 46,046 \text{ kJ/m}^3$

加熱炉熱効率 : 30%

鉄の比熱 $c: 0.461 \text{ kJ/kg}$

都市ガス消費量:

$$(T \times c \times 1,000) / J = (150 \times 0.461) / 0.3 / 46,046 = 5 \text{ m}^3$$

ダイレクト圧延では、ホットチャージ圧延に比較して、ビレット1トンあたり約 5.0 m^3 の都市ガス使用量を削減することができる。これは、普通鋼製造エネルギー全体の約3.3%に相当する。また、加熱炉圧延プロセスと比較すると、約 30 m^3 の都市ガス使用量を削減することが可能となる。

2. ダイレクト圧延設備納入実績

2.1 設備概要

ダイレクト圧延設備では、連続して高温ビレットを供給し続けなければならない。些細なトラブルによる一時的な設備停止であっても、高温ビレットの供給が途絶えると工場全体の生産に支障を来す。そのため、設備には高い信頼性が求められる。

図3に、当社が2004年に納入したダイレクト圧延設備のレイアウトを示す。ビレットサイズ $120 \times 120 \text{ mm}$ 、4ストランドを有する連铸設備、圧延設備および高速搬送設備で構成される。生産能力は、30,000トン/月である。

2.2 設計コンセプト

ダイレクト圧延を行うためには、連铸設備から供給されるビレット温度を高める必要がある。そのための方法としては、まず二次冷却帯での冷却を必要最小限に抑えることが考えられる。

図4に、鑄造速度 2.5 m/min で比水量を変化させ、二次冷却帯通過温度を通常の $1,050$ としたケースおよび

ビレット品質から設定される許容温度 $1,100$ まで高めたケースの温度シミュレーション結果を示す。

ビレットが所定長さに切断され搬送開始となるとき温度を比較すると15程度の差しかなく、またビレットを所定長さまで切断する間の温度低下が大きいことがわかる。したがって、圧延設備に供給するビレット温度を高めるためには、連铸設備の鑄造速度を高速化し、切断タイムサイクルを短縮することが効果的である。

図5に、ダイレクト圧延設備における設計コンセプトを示す。当該設備においては、No.1圧延機入側でのビレット温度 950 が圧延設備の設計条件となる。

ビレット温度シミュレーションを実施した結果、連铸設備の鑄造速度を 3.0 m/min 以上にする事で圧延温度 950 を達成できることがわかった。しかしながら、連铸設備の鑄造速度は、上流側工程である電気炉操業の出鋼サイクルに影響を受けて調整されるため、鑄造速度が 3.0 m/min 以下に低下するケースも想定しておく必要がある。ダイレクト圧延操業に融通性を持たせるため、圧延設備の上流側にビレット温度を 50 昇温する能力を備えたインダクションヒータ(誘導加熱装置)を設置し、鑄造速度が 2.5 m/min まで低下してもダイレクト圧延操業を継続できるように考慮した。

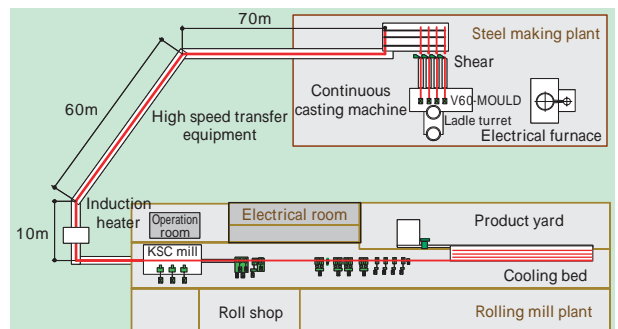


図3 ダイレクト圧延設備レイアウト
Fig. 3 Layout of direct rolling plant

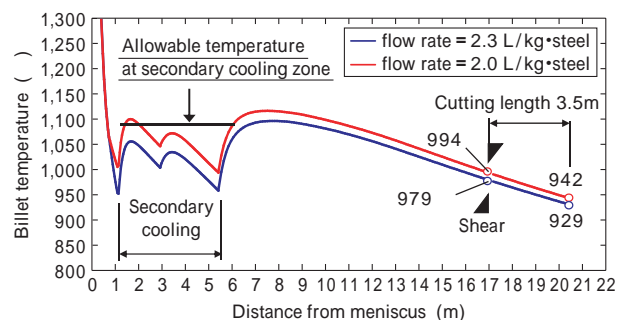


図4 鑄造速度 2.5 m/min 時のビレット温度シミュレーション結果
Fig. 4 Simulation of billet temperature at casting speed 2.5 m/min

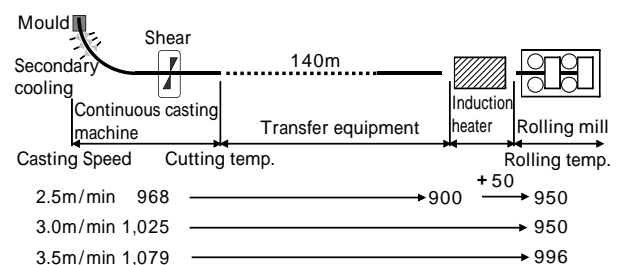


図5 ビレット温度シミュレーション結果
Fig. 5 Simulation of billet temperature

2.3 導入技術

表 1 に、ダイレクト圧延を達成するために導入した技術を示す。

2.3.1 高速鋳造鋳型 (V60-MOULD)

鋳造速度を高速化するとピレットを所定長さに切断するサイクルタイムを短縮することができるため、高温状態を維持したピレットを下流側設備に供給することが可能となる。一方、鋳型内での凝固殻の厚さが薄くなる高速鋳造においては、鋳型内での不均一凝固を招き、溶鋼が凝固殻を破って外部に飛散するブレイクアウトを起こしやすい。高速鋳造を達成するには、鋳型内での均一冷却技術が特に重要である。鋳造速度 4.0m/min を越えて安定操業を実施している普通鋼電気炉メーカーがわずかであることから要求技術水準の高さがうかがえる。そこで、鋳型内の銅チューブに設けた特殊ターバにより、高速鋳造時においても均一な冷却効果を発揮できる当社製 V60-MOULD を導入し、鋳造速度の高速化を図ることとした。

図 6 は、金添加した鋳片を放射線処理し、金と鋼の放射化率の差を利用して鋳型内凝固厚さを分析したものである。V60-MOULD では、鋳型と初期凝固殻が良好に接触することで凝固殻が均一に生成されるため、高速鋳造時においても凝固殻に熱応力が発生しにくく、安定操業を達成することが可能である。

表 1 ダイレクト圧延設備導入技術
Table 1 Technology for direct rolling

New technology for direct rolling	Purpose
High speed casting mould (V60-MOULD)	Stability operation when high speed casting
Secondary cooling cascade control	Control of billet temperature
Shear arranged on straight line	Equalization of cutting temperature
High speed transfer equipment	Prevention of temperature decrease

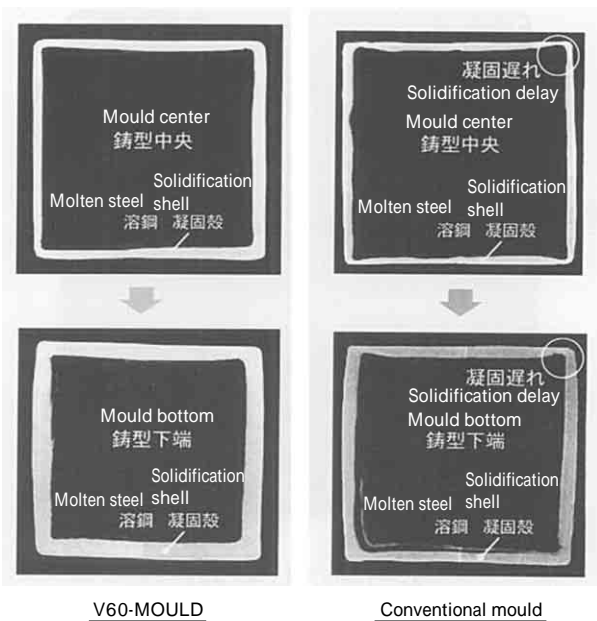


図 6 V60-MOULD と従来モールドの鋳型内凝固殻厚さの比較
Fig. 6 Comparison of solidification shell thickness between V60-MOULD and conventional mould

2.3.2 二次冷却制御設備

鋳型から抽出されたピレットは、鋳型下方に連なる二次冷却帯でのスプレー直接冷却により凝固を促進させる。二次冷却帯での冷却水過少は凝固殻の生成不良を招き、内部品質を悪化させる。逆に、冷却水過剰はピレット温度を低下させ、ダイレクト圧延操業を困難にさせる。二次冷却帯でのピレット温度は鋳造速度に大きく依存し、次いで、溶鋼中の炭素含有量、溶鋼温度の順に影響を受けることが温度シミュレーションで明らかになった。そこで、鋼種ごとに鋳造速度と二次冷却水量の関係を整理し、最適水量を噴射するシステムとした。このシステムでは、鋳造速度と二次冷却水量の関係を 10 種類のパターンに細分化し、鋼種および電気炉出鋼温度に基づいて最適と考える冷却パターンを選択することにより実行される。これにより、鋳造速度の低速域から高速域までの広範囲でピレット温度のコントロールが可能になった。

2.3.3 切断機

図 7 に、連鋳設備の切断機配列を示す。連鋳設備の切断機は、切断面の幅広がりを防止するために対角線方向 (45 度傾斜方向) に切断するダイアゴナルカットが一般的である。そのため、切断機自体が 45 度方向に傾けられている。ストランド間隔の狭いピレット連鋳設備では、隣接する切断機との干渉を避けるために、千鳥に配置するのが一般的である。

今回採用した同一線上配置切断機を図 8 に示す。切断機自体の傾きを 30 度にする事で隣接する切断機との干渉を回避し、切断機を横一線上に配置することを可能とした。その結果、全ストランドで鋳型から切断機まで

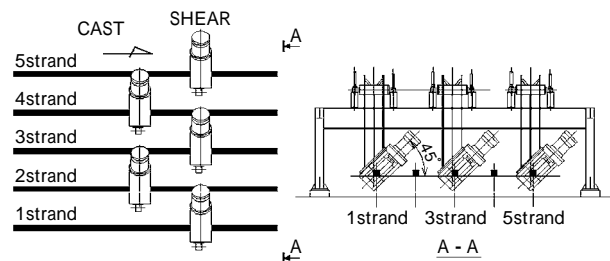


図 7 千鳥配置の切断機
Fig. 7 Shear of alternate arrangement



図 8 同一線上配置の切断機
Fig. 8 Shear arranged on straight line

の距離を同一にでき、切断されたビレットにおいてストランド毎の温度のばらつきを防止することが可能になった。

2.3.4 高速搬送設備

連続設備から圧延設備までの約140mでは、搬送速度の高速化を追求した。搬送ロールの回転を早くするだけではビレットとロールの接触面でスリップが発生し、搬送不良を招く。また、コーナ部への高速突入は、ロール軸受に大きな衝撃を与え機器損傷を招く。

この問題を解消するため、スタート地点、直線部、コーナ部で、インバータ制御でロール回転速度を最適化することによってスリップ防止と衝撃緩和を図り、過去最速の搬送速度4m/secを達成した。また、連続設備でビレットを切断した後、平均120秒後には圧延設備に供給でき、搬送中のビレット温度の低下を50以下にすることが可能になった。

2.4 実機検証

2.4.1 ビレット温度検証

ビレット温度シミュレーションと実測値の比較を図9に示す。また、図10に圧延装入温度のばらつきを示す。連続設備のピンチロールスタンドおよび切断機でのビレット実測温度は、シミュレーションとほぼ一致する。一方、圧延設備入側ではビレット実測温度平均値とは一致するものの、実測値に幅がある結果となった。これは、切断後のビレットが圧延設備に到達する時間のばらつきによるものと推定される。

2.4.2 ダイレクト圧延時の圧延トルク

図11に、ダイレクト圧延時の圧延トルクの検証結果を示す。圧延温度950において、設計値どおりの70%程度のトルク負荷率に収まっていることが確認できた。

当社が納入したダイレクト圧延設備は、前記導入技術

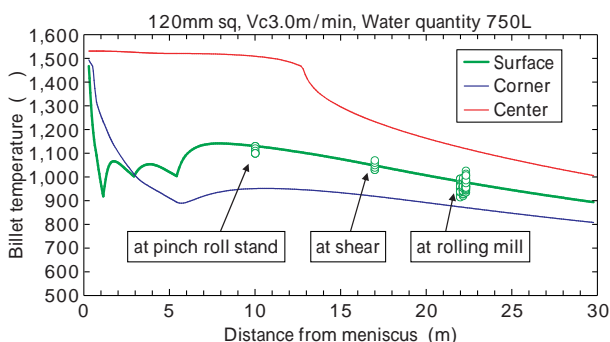


図9 ビレット温度シミュレーションと実測値の比較

Fig. 9 Comparison between simulation and measurement of billet temperature

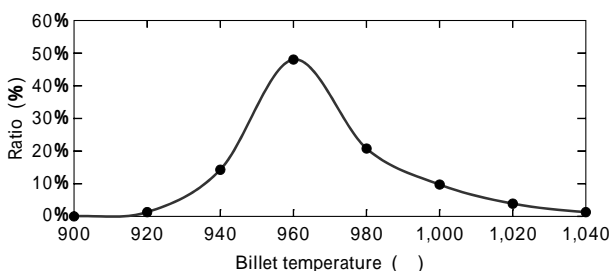


図10 圧延装入温度のばらつき

Fig.10 Difference of billet temperature in front of rolling mill train

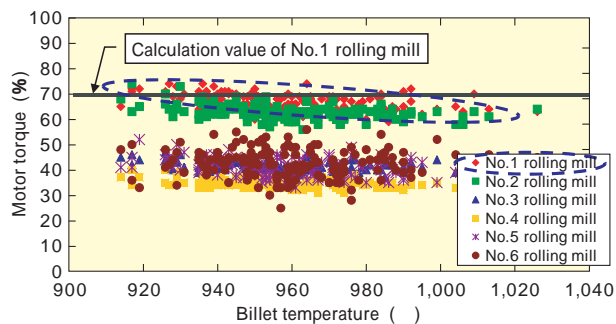


図11 圧延トルク実測値

Fig.11 Motor torque measurement at rolling mill

によって稼働率95%を達成した。一方、実機検証では、「圧延設備に供給するビレット温度の安定化」が今後の課題となった。

この課題を達成するためには、従来はオペレータの経験で手動選択している二次冷却パターンを、操業条件の変動にかかわらず一定温度のビレットを圧延設備に供給できる完全自動化システムにする必要がある。

3. 二次冷却ダイナミック制御

3.1 ダイナミック制御

鑄型に注入される溶鋼温度をストランドごとに連続測温し、二次冷却水量計算に反映することができればビレット温度の制御精度を向上できる。注入流を放射温度計により計測することは可能であるが、その信頼性から実用化に至っていない。当社は、鑄型注入温度を実測して二次冷却水量計算に反映させる手法ではなく、ビレット表面温度を実測し、二次冷却水量をダイナミックに変化させることでビレット温度を任意に制御するシステムの開発を目指すことにした。

図12に、ダイナミック制御テスト機のシステムを示す。放射温度計で実測されたビレット温度(PV)と設定温度(SV)の差 T より自動的に比例ゲイン(P)を変更し、短時間で設定温度に到達できる制御を目指した。

また、制御周期を短縮するために、放射温度計は二次冷却帯出側近傍に設置した。この放射温度計に対しては、耐久性を向上させるために、水冷ジャケット構造の箱に収納し、また、測定精度を向上させるため、エアバージョを行ってビレットから立ち上る蒸気を吹飛ばす対策を施した。

実際の生産機に組込むことから高い信頼性が求められ、特に、検出温度異常時のフェイルセーフ機能を充実させる必要がある。ここでは、ダイナミック制御と従来の鑄造速度カスケード制御を並行して走らせ、ダイナミック制御継続不可判定時には鑄造速度カスケード制御へと瞬時に切替えることを可能なシステムとした。

3.2 実機テスト結果

カスケード制御とダイナミック制御のビレット温度比較を図13に示す。既設カスケード制御では、取鍋チャージ変更ごとにビレット温度の傾向が変化している。鑄造速度はチャージ変更前後では大きくは変わらないことから、溶鋼温度の影響を受けているものと考えられる。一方、ダイナミック制御開始後は、設定温度に対して ± 10

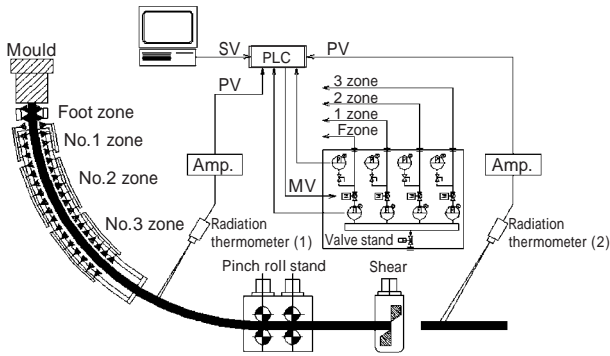


図 12 二次冷却ダイナミック制御システム
Fig.12 Secondary cooling dynamic control system

程度で推移していることがわかる。

なお、このダイナミック制御は、連鑄設備から抽出するビレット温度の安定化を図るものであり、実際の圧延装入温度を連鑄設備側にフィードバックするシステムにはなっていない。ストランドごとの鑄造速度のばらつきによりビレット切断順序が時間とともに変化するため、ビレットごとの圧延設備入側での待機時間が一定でなく、ビレット温度が設定値に収束しないことを懸念したためである。待機中の温度低下に起因する圧延装入温度のばらつきを防止するには、鑄造速度を高速化してストランド数を削減する方法が有効な手段であり、さらには1ストランドの連鑄設備と圧延設備とを、ビレットを切断することなく直結化することが理想の姿となる。

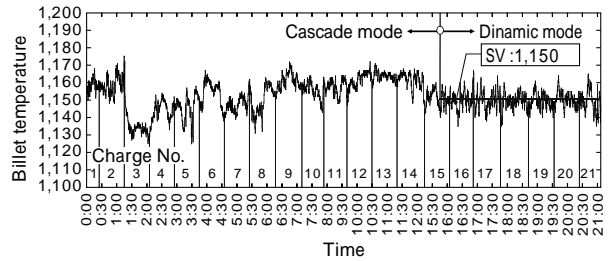


図13 カスケード制御とダイナミック制御のビレット温度比較
Fig.13 Comparison of billet temperature in cascade control and dynamic control

むすび=ダイレクト圧延プロセスにより加熱炉を使用しない無加熱操作を実現した。当該プロセスにおいてはビレット温度の安定化が重要であり、連鑄設備における二次冷却ダイナミック制御の完成度を高めるため実機テストを重ねている。また、当該技術は従来の連鑄操作の安定化にも貢献する。今後、連鑄圧延完全直結設備の実現を目指して、必須となる高速鑄造技術に磨きをかける所存である。

参 考 文 献

- 1) (社)日本鉄鋼協会：わが国における鋼の連鑄鑄造技術史 (1996) pp.416-419.