

新高速連続鋳造設備鋼用ロータリキャスト

High-Speed Continuous Casting Plant ROTARY CASTER for Steel Billets

山本美佐夫* Misao Yamamoto
 香取英俊* Hidetoshi Katori
 木村智明** Tomoaki Kimura
 遠藤宗宏** Munehiro Endō
 矢葺隆** Takashi Yabuki
 新山英輔*** Eisuke Niiyama

鉄鋼業では連続鋳造と圧延設備を直結し、溶湯から一挙に圧延製品を製造することが永年にわたる悲願となっている。しかし、現状の連続鋳造機では鋳造速度が極めて遅いため、圧延機との生産能力のマッチングができないばかりでなく、圧延中鋼片の温度が低下することから、直結圧延方式が実現されることはなかった。

以上述べた背景から、ロータリキャストと呼ばれる同期回転式連続鋳造方式の鋼材に対する適用を進め、高速鋳造の実現を図った。実機は160/190mm×130mm断面用のロータリキャストと、垂直及び水平の2台の圧延機とを直結した配置に構成し、圧延機の実産能力に匹敵する速度6 m/minの鋳造及びインライン圧延に成功した。これにより、仕上圧延機との直結方式の実現に大きく前進することができた。

1 緒言

従来、熱間圧延システムでは、素材を圧延に必要な温度(約1,200°C)に再加熱炉によって加熱している。これは、溶鋼から素材を製造する連続鋳造と熱間圧延の両工程間での熱損失が大きく、溶鋼の顕熱を十分に活用できないことにより必要とされている工程である。すなわち、図1に示すように従来連続鋳造機の鋳造速度は著しく遅いため、圧延能力に匹敵する生産を行なうには、3~4台の連続鋳造機を並列に配置する必要があった。このため、鋳造後の鋳片を切断及びこれらを集合して圧延機に搬送する工程が必要となり、鋳造直後は高温であった鋳片の温度も500~900°Cに低下し、このままでは圧延できぬため、前述したように再加熱が必要である。この再加熱には鋼材1 t 当たり20~35万kcalの膨大なエネルギーが使用されるので、これを不要とする鋳造・圧延(直接圧延)システムの確立が、最近の省エネルギーに対する要請が強まる情勢下でますます急を要するものとなってきている。

すなわち、圧延機並みの生産能力をもつ連続鋳造機が完成できれば、連続鋳造機と圧延機を直結する直接圧延システムが実現できる。これにより、再加熱炉不要による省エネルギーはもちろん、切断されない連続鋳片の直接圧延により大幅な歩どまり向上が可能となり、現状鋼材製造システムに大きな革新をもたらすことができるからである。

以上のような背景から、直接圧延システムを実現する上で最大の欠陥となっている鋳造速度の改善を図る新しい連続鋳造機の実用化を図った。このために導入した鋳造方式は、高速鋳造の可能性をもつロータリキャストであるが、これにより、実用鋳造断面寸法で圧延機の実産能力に匹敵する高速鋳造を達成することに成功した。

2 ロータリキャスト開発の経緯

ロータリキャストは非鉄(銅、アルミニウム)の分野では既に実用化されている¹⁾。これを鋼材に適用するには、熱伝導率が非鉄材に比較して極めて小さく冷却しにくいこと、また融点が高いので鋳型の寿命を実用的なものにできるかなどの問題が生ずる。以上のような問題点をも考慮し、ロータリキャスト方式による高速鋳造の可能性を追求するため、日立製

作所は自社工場に120/140mm×100mm断面用のロータリキャスト試作機を設置し鋳造試験を行なった。本試作試験機により1回当たりの鋳造量は約1 t 程度の範囲ではあるが、最大10 m/minまでの高速鋳造が可能であることを確認した。

このロータリキャスト方式が、財団法人機械システム振興協会の新機械普及促進事業(中小規模全自動高速連続鋳造圧延システム)に選定され、実用化される運びとなった。

上記の設備は大三製鋼株式会社亀戸工場に昭和54年3月に設置され、実用化上の各種問題点を解決して、同年5月から

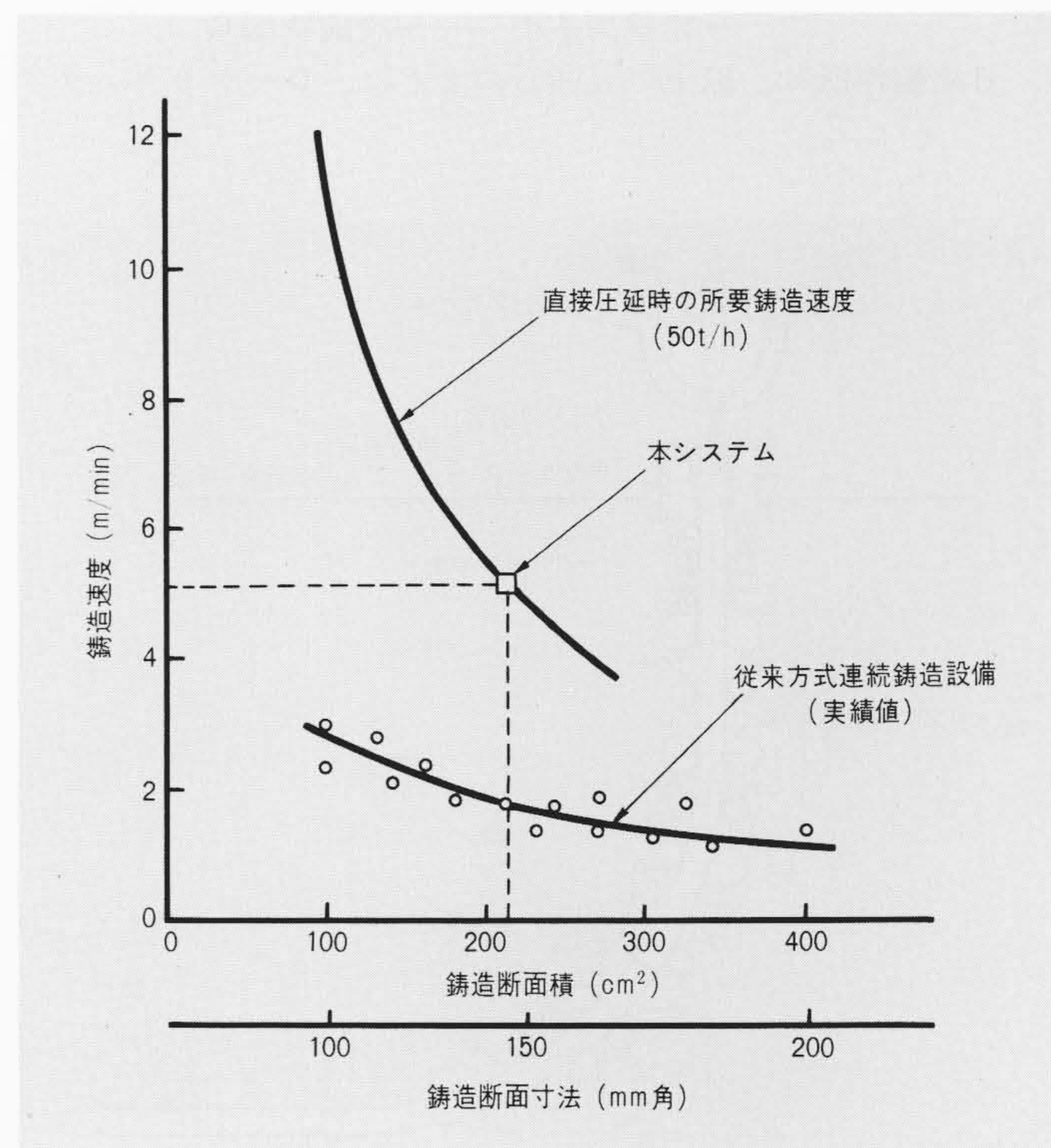


図1 連続鋳造速度の比較 圧延機の実産能力に対し従来の連続鋳造機は1/3~1/4、ロータリキャストは圧延機能力に匹敵する速度を目標とする。

* 大三製鋼株式会社 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所日立研究所 工学博士

順調な操業に入った。

本論文では、上記操業で確認できたロータリキャストの鑄造特性、これに直結された垂直及び水平の2台の圧延機によるインライン圧延特性、品質などについて述べる。

3 従来連続鑄造機とロータリキャストの比較

従来の連続鑄造機は、図2(a)に示すように定置された鑄型から凝固開始以降の不安定な凝固殻を、溶鋼の静圧により生ずる摩擦抵抗に抗して引き抜かねばならないため、ブレークアウトと呼ばれる凝固殻の破断事故をひき起こしやすい特性をもっていた。また、鑄型出側では溶鋼の静圧に耐える凝固厚み(10mm以上)をもつ必要がある。したがって、高速化時にはこの所要厚みの確保のために鑄型長さを速度に比例して長く設定することになる。しかし、前述の静圧による摩擦抵抗は鑄型長さの二乗に比例して増加するので、ますますブレークアウトをひき起こす危険性が大きくなる。

以上の理由から、従来連続鑄造機の鑄造速度は2m/min前後に制限されていた。

これに対し図2(b)に示すロータリキャスト方式の鑄型は、鑄込まれた溶湯と同期して回転する鑄造輪とベルトで構成されるので、鑄型内での凝固殻は相対滑りを生ぜず冷却できる。一方、鑄型長さは鑄造輪径を適正に選定することにより十分長くとれる。

したがって、ロータリキャスト方式は高速鑄造を図る上で有利であり、かつ低ヘッドで鑄造を行なうものであるため、これが実用化できれば以下に示すような効果が期待できる。

- (1) 高速鑄造
 - 直接圧延 → 省エネルギー・省資源
 - 1ストランド化 → 保守性向上・スペース減少
- (2) 同期式鑄造 → 鑄型振動不要 → 表面品質向上
- (3) 低ヘッド鑄造
 - 鑄片ふくらみ小 → 品質向上
 - 建屋高さ小 → 設備費低減

日立製作所は、以上の見通しのもとに、ロータリキャスト

の試験機を試作し実用化上の基本的な問題の解決を図った。引き続きこの試作機での経験を基に、ロータリキャスト及び直接圧延方式の可能性を検討する目的で、ロータリキャストに直結配置した垂直及び水平の2台の圧延機から構成する実用化設備の製作を行なった。

4 実用化ロータリキャストと直接圧延システムの構成

本システムの全体配置及び主仕様を図3に示す。鑄造輪とベルトで構成される鑄型断面は160/190mm×130mm、鑄型相当長さは従来連続鑄造方式の約3倍の1.9mである。この鑄型にとりべからタンディシュを経由して、溶湯が連続的に注湯される。鑄型と同期運動しながら冷却・造形される角状鑄片の凝固殻厚みは、鑄型出側で約15mmとなる。この内部が未凝固状態の鑄片を約1mの区間にわたって徐々に曲げ直し、水平に引き出す矯正装置、スプレー冷却帯が鑄型以降に配置される。その後、均熱用の断熱帯に鑄片を導き、圧延のための均熱を行なう。鑄片内部中心までの凝固は、ここまでの区間で終了する。均熱された鑄片は、引き続き垂直及び水平の圧延機により130角までの所望の寸法にサイジングされる。圧延後の鋼片はダイヤゴナル油圧切断機により、所定の寸法にせん断・パイリングされる。以上述べた注湯からパイリングまでのすべての作業は、図4に示す全自動運転システムにより行なわれる。

なお、本設備に対する溶湯の供給は、25t電気炉1基により行なわれる。ロータリキャストの鑄造速度は、建屋の制限から公称最大5.2m/min(最高6m/minまで可能)、本速度時インライン圧延により、130角にサイジングした場合の圧延機出側での速度は、6.9m/minである。

なお、今回の計画ではロータリキャストに2台の圧延機を直結しただけであるが、高速鑄造の実現により将来は仕上圧延機までの完全連結を図り、溶湯から一挙に圧延製品を生産する設備の計画を進める予定である。

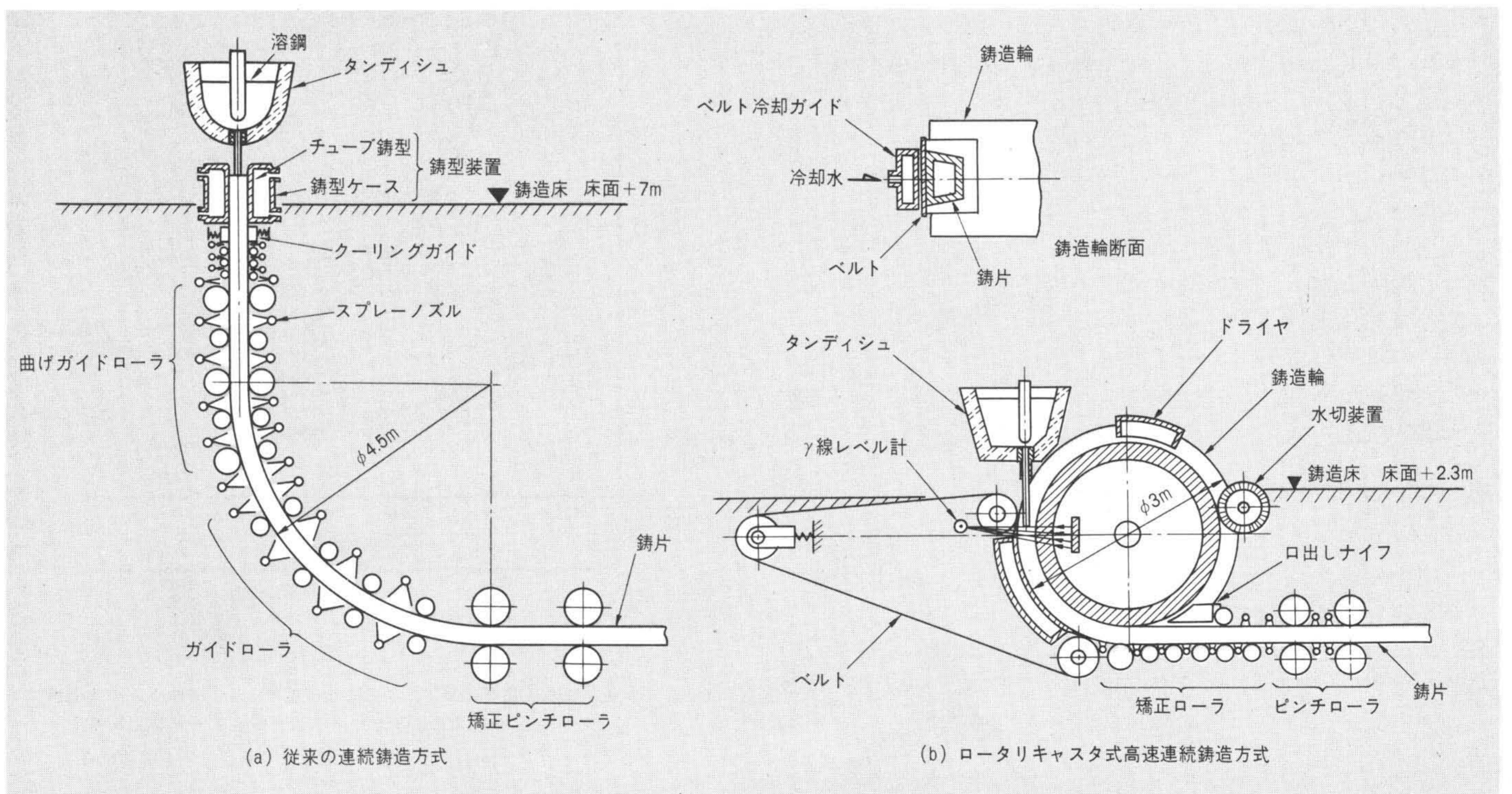
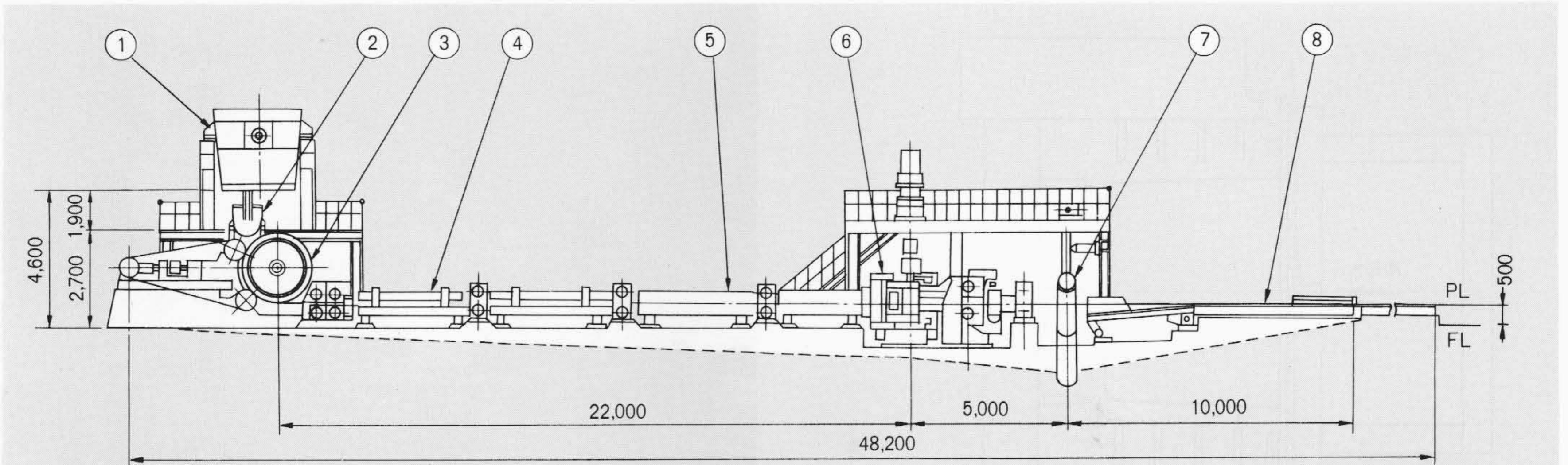


図2 連続鑄造方式の構造比較図 ロータリキャストは同期鑄造方式で、かつ設備高さが従来の約1/3となっている。



注：略語説明 PL(Pass Line), FL(床面)

No.	名称
1	とりべ
2	タンディシュ
3	鋳造装置
4	冷却ガイド装置
5	均熱装置
6	直接圧延装置
7	せん断装置
8	搬出装置

主 仕 様	鋳造装置		圧延装置及びせん断装置	
	鋼種	普通鋼	成品断面	130厚×(130~160)mm幅
鋳造断面	130厚×160/190mm(台形)	圧延速度	最大6.9m/min	
鋳造速度	最大5.2m/min	ロール直径	垂直ロール	450mm
鋳型相当長さ	1.9m		水平ロール	350mm
鋳造輪直径	3,000mm	圧延能力	50t/h	
鋳造輪材質	Ag CuB	成品長さ	1,400~2,000mm	
ベルトサイズ	2.6厚×280mm幅	せん断方式	ダイアゴナル式	
ベルト材質	SPCC	せん断力	最大180t	

図3 鋼用ロータリキャスト及び直接圧延システムの全体配置図 ロータリキャストと圧延装置が直結され、圧延前に鋳片は均熱される。

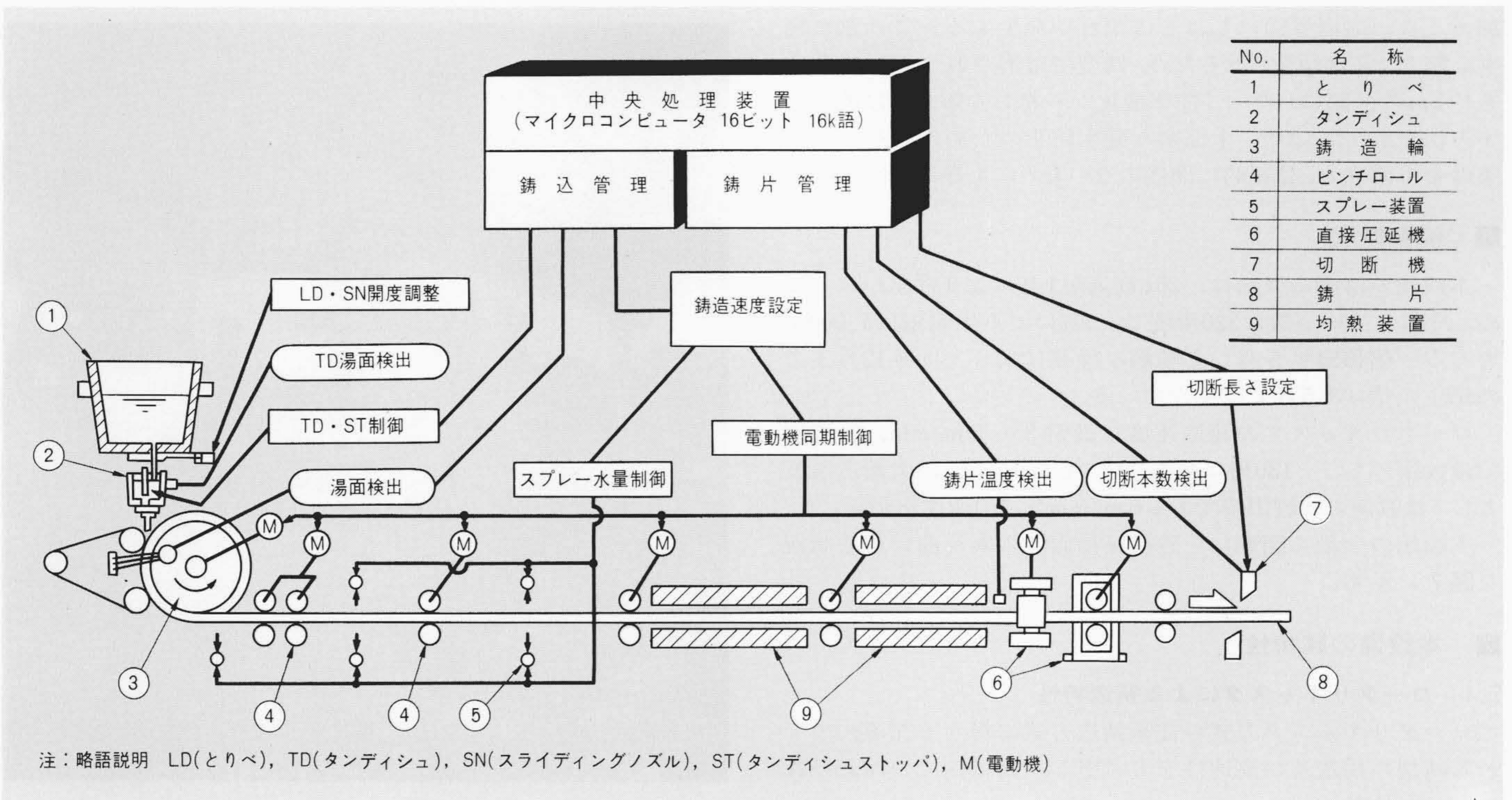
5 ロータリキャストの基本的問題点

ロータリキャストの実用化に当たって生じた基本的問題としては、鋳型の寿命及び鋳型出側での未凝固鋳片の曲げ直しがあげられるが、以下、これらの解決状況について述べる。

5.1 鋳型の冷却と寿命

融点が1,520℃と高温な鋼材を鋳造するロータリキャストの

鋳型は、鋳造輪は銅材、ベルトは2.6mm厚の低炭素帯鋼で構成される。これらが1回転ごとに溶湯による加熱、及び鋳型出側での冷却により繰り返す熱応力を受けるので、熱疲労による寿命が問題となる。このため、各々の構成部材に対する基礎的な熱疲労寿命試験を行ない、加熱時の温度上昇を低く抑えることが、寿命延長に対し最も効果があることを明らかにした。したがって、鋳型の冷却には図5に示すように高速



注：略語説明 LD(とりべ), TD(タンディシュ), SN(スライディングノズル), ST(タンディシュストップ), M(電動機)

図4 ロータリ式連続鋳造-直接圧延システムの自動制御系統図 湯面検出器からの信号で、鋳造輪、直接圧延機などの速度を調整し、湯面を一定に制御する。

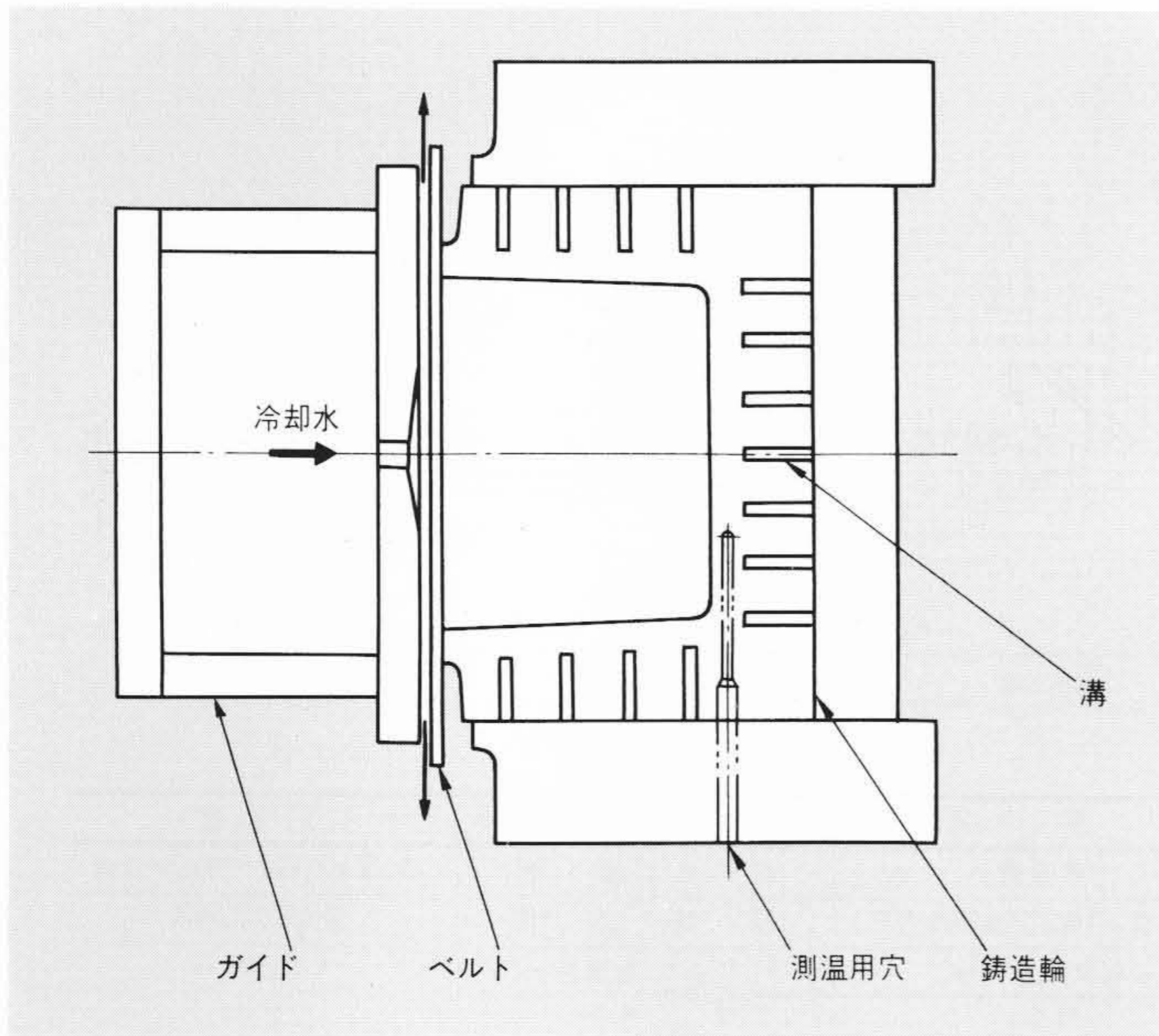


図5 鑄型の冷却構造説明図 鑄造輪とベルトは、高速流水により冷却される。

流水冷却方式を採用し、冷却性能及び効率の向上を図った。すなわち、鑄造輪には内部に多数の溝を、またベルトに対してはこれの外側に狭い間隙を得るためのガイドを設け、各々の溝及び隙間に高速で冷却水を流すものである。

以上の対策により、溶湯と接触時の表面での最大温度上昇を、鑄造輪で170℃、ベルトで240℃程度に低く抑えることができた。これにより、鑄造輪及びベルトの寿命を実用的なものにすることに成功した。

5.2 未凝固鑄片の曲げ直し

鋼材は非鉄材に比較して、熱伝導率が小さく冷却されにくいので、高速鑄造時には鑄型出側でも、鑄片の内部はほとんどが未凝固状態となっている。このような鑄片に曲げ加工を加えると、凝固界面にしばしば割れが発生する。この割れ発生を防止、又は減少させるため、鑄型で造形された鑄片の曲率を約1mの区間にわたって曲率変化が一様になるように曲げ直す方法をとった。また、上部割れ発生防止のために有利な操業条件をも確立し、品質的に問題のないものにすることができた。

6 操業概況

本設備の溶鋼の供給は、25t電気炉1基により行なわれるため、月間チャージ数は220程度で、これによる生産量は5,000tである。昭和54年5月から順調な操業に入り、同年12月までの総生産量は3.5万tに及んでいる。

ロータリキャストの鑄造速度は通常3～5m/min、圧延機では大半のものを130角にサイジングした。なお、最大鑄造速度としては設備の許容限界である6m/minまでの速度を記録した。

本設備の全景を図6に、鑄造輪出側での鑄片曲げ直し状況を図7に示す。

7 本設備の諸特性

7.1 ロータリキャストによる鑄造特性

ロータリキャスト方式の従来鑄造方式に対する相違、すなわち鑄型の構造及び高速性をも考慮し、鑄型内での冷却特性について検討を行なった。

ロータリキャスト鑄型での冷却特性を検討するため、図5

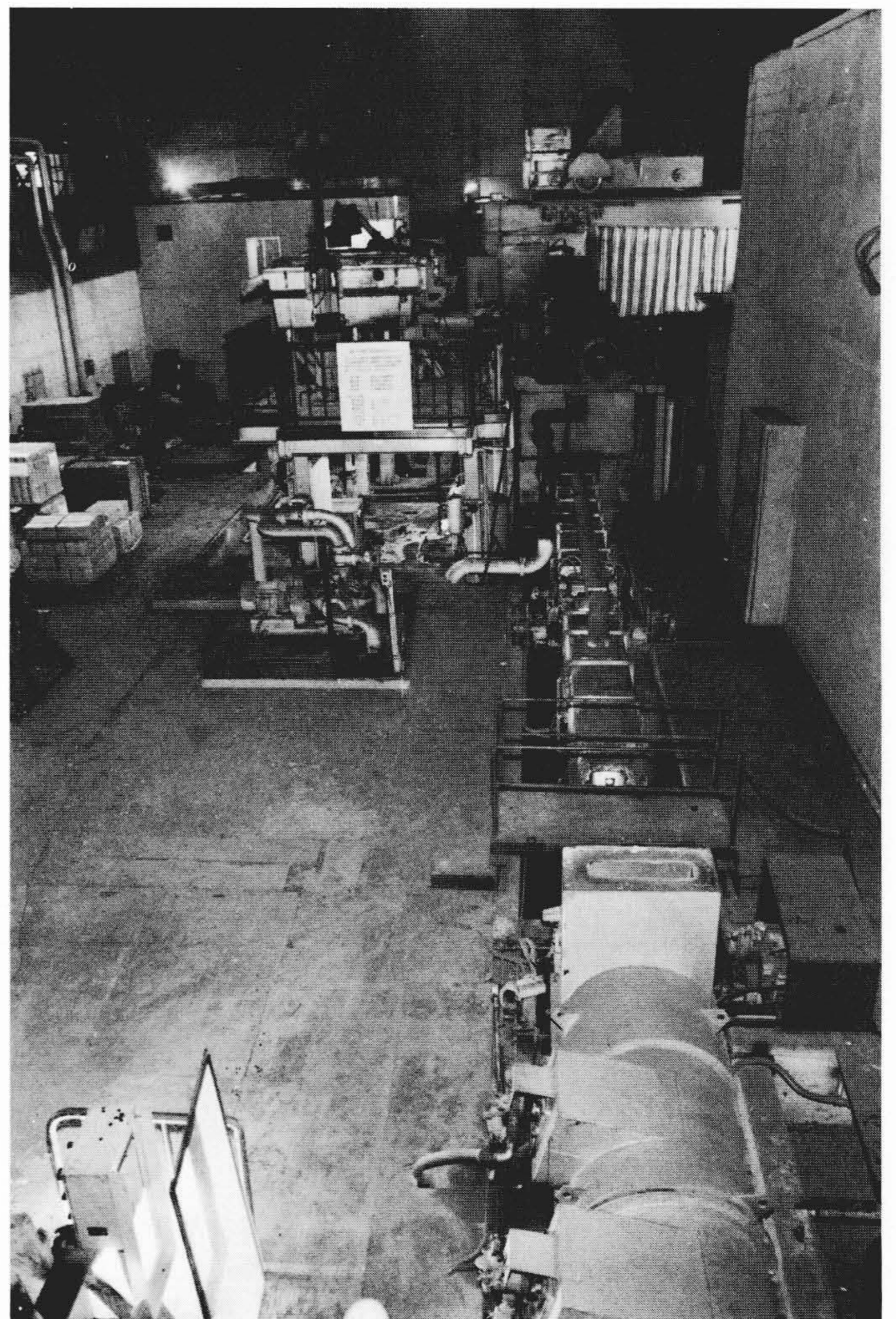


図6 ロータリキャスト式高速連続鑄造設備全景 均熱炉側から見た鑄造装置を示す。

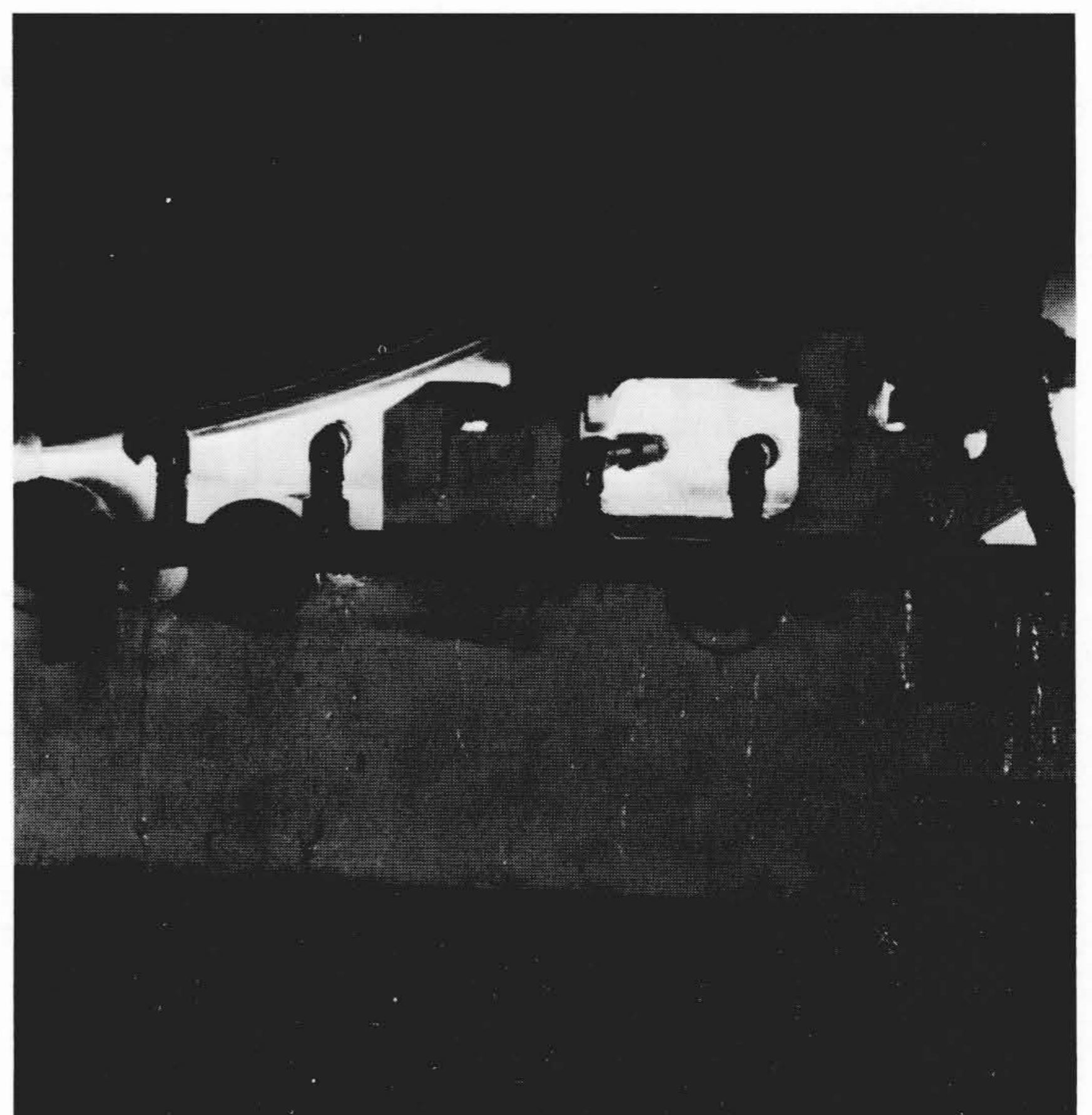


図7 鑄造輪出口部の鑄片 鑄片は鑄造輪から口出しナイフで滑らかに曲げ直され、かつ引き出される。

に示すように铸造輪の一部に熱電対を埋め込み温度変化を測定した。また、溝付铸型に対する温度計算プログラム²⁾を開発し、上記温度測定値との対比から铸造輪に対する熱負荷 q (kcal/m²・h)を時間 t (s)の関係で求めた結果を次の(1)式に示す。

$$q = (2.31 - 0.257\sqrt{t}) \times 10^6 \dots\dots\dots(1)$$

また、铸型内での凝固厚さ S (mm)を、上記熱負荷の関係式を用いて、伝熱計算により時間 τ (min)の関係で求め(2)式を得た。

$$S = 25\sqrt{\tau} \dots\dots\dots(2)$$

(2)式での凝固速度係数 $25\text{mm} \cdot \text{min}^{-1/2}$ は通常ピレット用連続铸造機の铸型での係数 $22\text{mm} \cdot \text{min}^{-1/2}$ に対しかなり大きな値となっている。これはロータリキャスト方式が高速铸造のため、薄い凝固殻が大きな溶鋼静圧で铸型壁面に押し付けられ、均質な冷却が行なわれるためである。

なお、ベルトと铸造輪の熱貫流率が同一となるように、すなわち冷却が両側とも等しく行なわれるように設計を行なった²⁾。この結果、铸型からの溶湯強制排出試験による凝固殻厚み測定でも、両側の厚みはほぼ同一に成長していることが確認できた。

7.2 インライン圧延特性

連続铸造铸片をインラインで圧延する場合には、铸片の均熱及び圧延時の铸片温度が問題となる。

(1) 均熱特性

図8に、铸造から均熱・圧延までの铸片の表面、及び中心での温度変化の計算値と実測値の一例を示す。

圧延機前方に設けられた均熱用断熱炉の長さは約6mであるが、これにより铸片の温度はほぼ一様に均熱される。均熱された铸片の温度は約1,150℃で、直接圧延を行なうための温度条件を十分に満たしている。

(2) インライン圧延負荷

インライン圧延機では図9(a)に示すように、はじめの垂直圧延機により幅方向の圧延を行ない、次の水平圧延機は幅方向圧延により生じた厚み方向のふくらみを成形する役目として使用した。

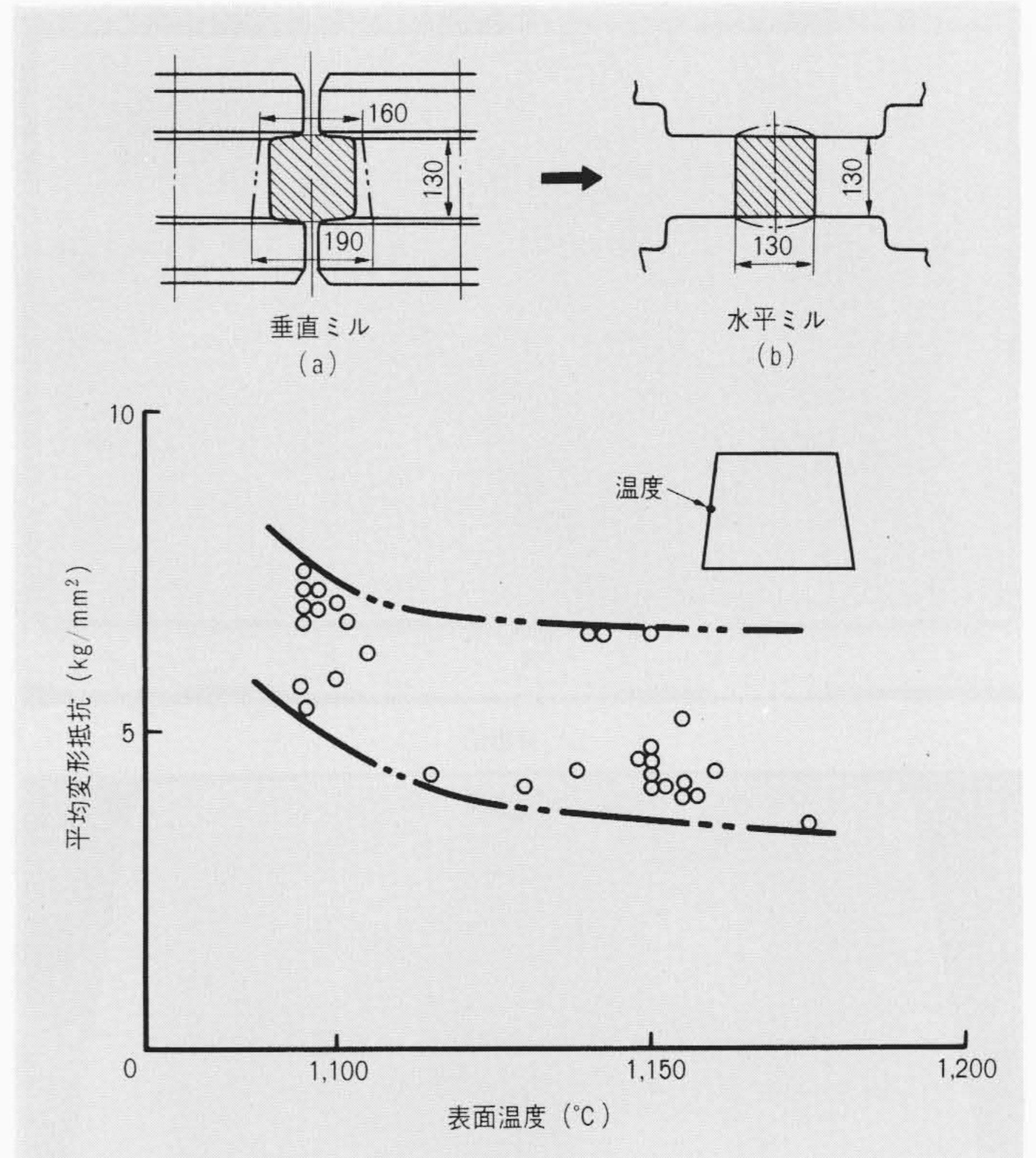


図9 垂直ミル圧延時の平均変形抵抗 高温になると変形抵抗は減少し、外表面温度1,150℃のとき4~6.5kg/mm²である。

したがって、インライン圧延の主役となる垂直圧延機での変形抵抗の検討を行なった。同図(b)に同上圧延での平均変形抵抗を、圧延前铸片表面温度の関係から求めた結果を示す。

8 製品品質

本システムで得られた製品品質を検討するために、ロータリキャストでの铸片、インライン圧延後のピレット鋼片、更にこれを再加熱圧延した後の最終製品である平鋼材の特性について調査を行なった。

8.1 ロータリキャストによる铸片品質

ロータリキャスト方式は前述したように同期回転式铸造機のため、これにより生産された铸片表面には従来の連続铸造機に見られるオッシレーションマークがなく、平滑な特性をもっている。一方、内部品質に対しては、図10に示すように铸片の横、及び縦断面の資料を採取し検討を行なった。铸片曲げ直し時には、铸造輪側表面で4.3%の大きな伸びひずみを受けるが、最も脆性状態にある凝固界面近傍にも、前述した対策により割れ発生がほとんど認められない。また、溶鋼ヘッドが約1.5mと低いにもかかわらず、中心の引け巣は微小で従来連続铸造铸片のものと同程度である。

8.2 インライン圧延及び最終製品品質

インライン圧延機により、铸片はほとんどのものが130角まで圧延されるが、品質的には圧延による割れ発生はなく、むしろ中心引け巣の圧着などの面で有利なものとなる。

上記インライン圧延後のピレット鋼片は、再加熱後平鋼材に圧延される。内部組織は圧延により均質なものとなり、図11に示すようにこの機械特性も従来の連続铸造铸片で得たものと同程度のものが得られた。

以上述べたように、ロータリキャスト方式による高速連続铸造により得られた铸片、及びこれを最終製品まで圧延した

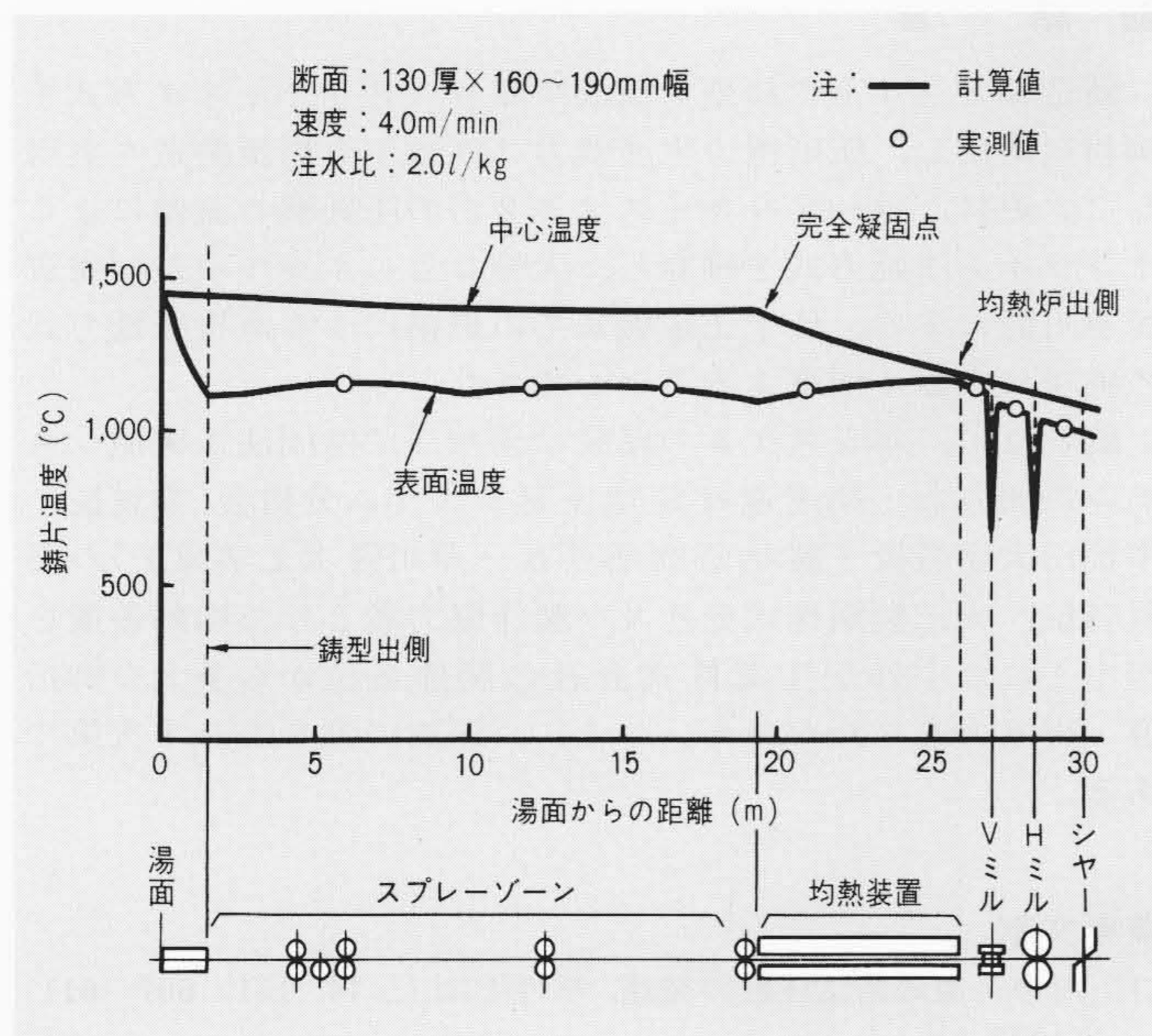
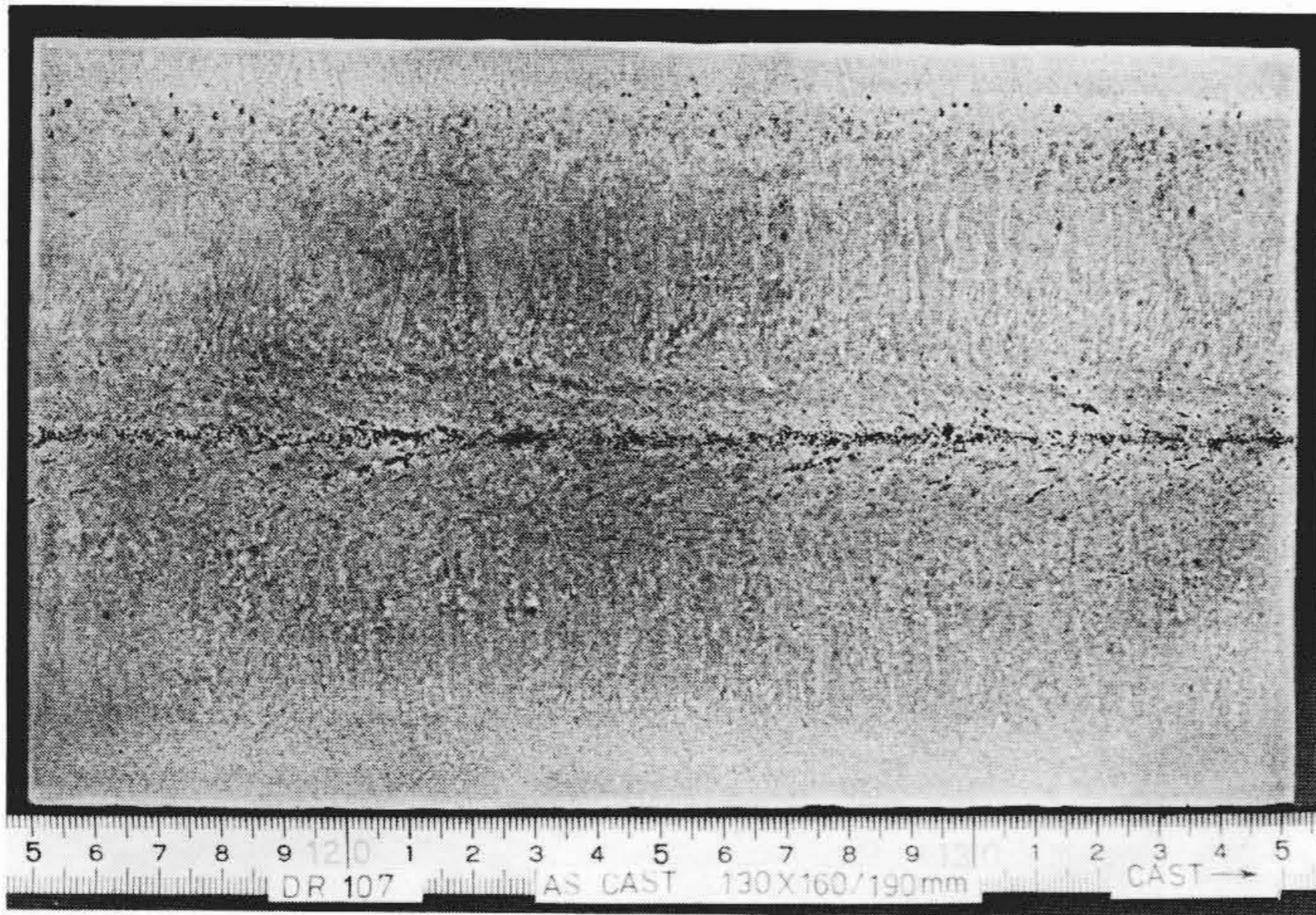
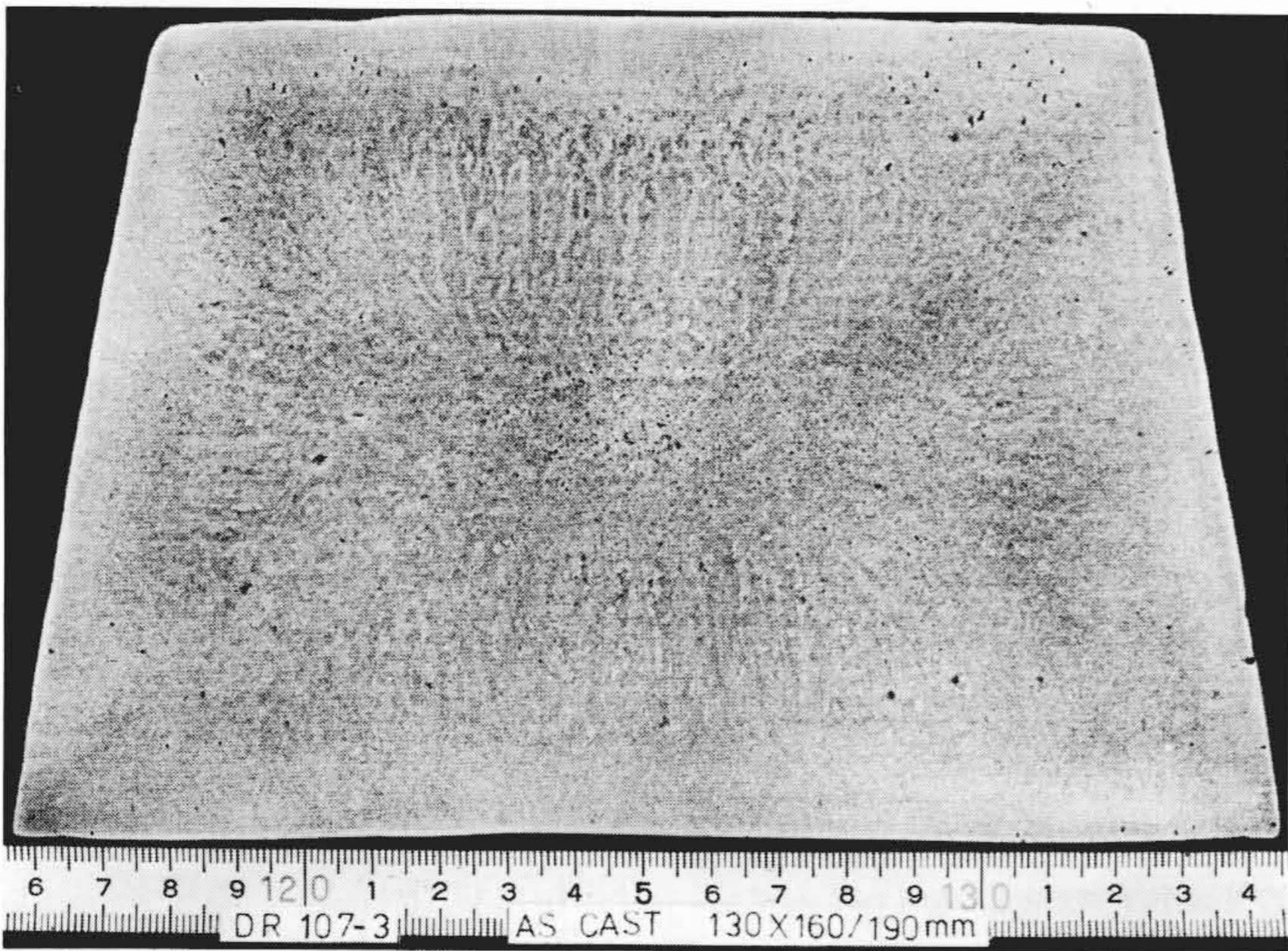


図8 铸片の温度変化の一例 均熱装置で均熱された铸片の平均温度は、垂直ミル入側で約1,150℃となり、直接圧延を行なうための温度条件を十分に満たしている。



(a) 縦断面



(b) 横断面

図10 ロータリキャスト鋼片の縦・横断面マクロ写真 変形が少なく、かつ中心部の引け巣は微小で、内部割れもない良質の鋼片が得られる。

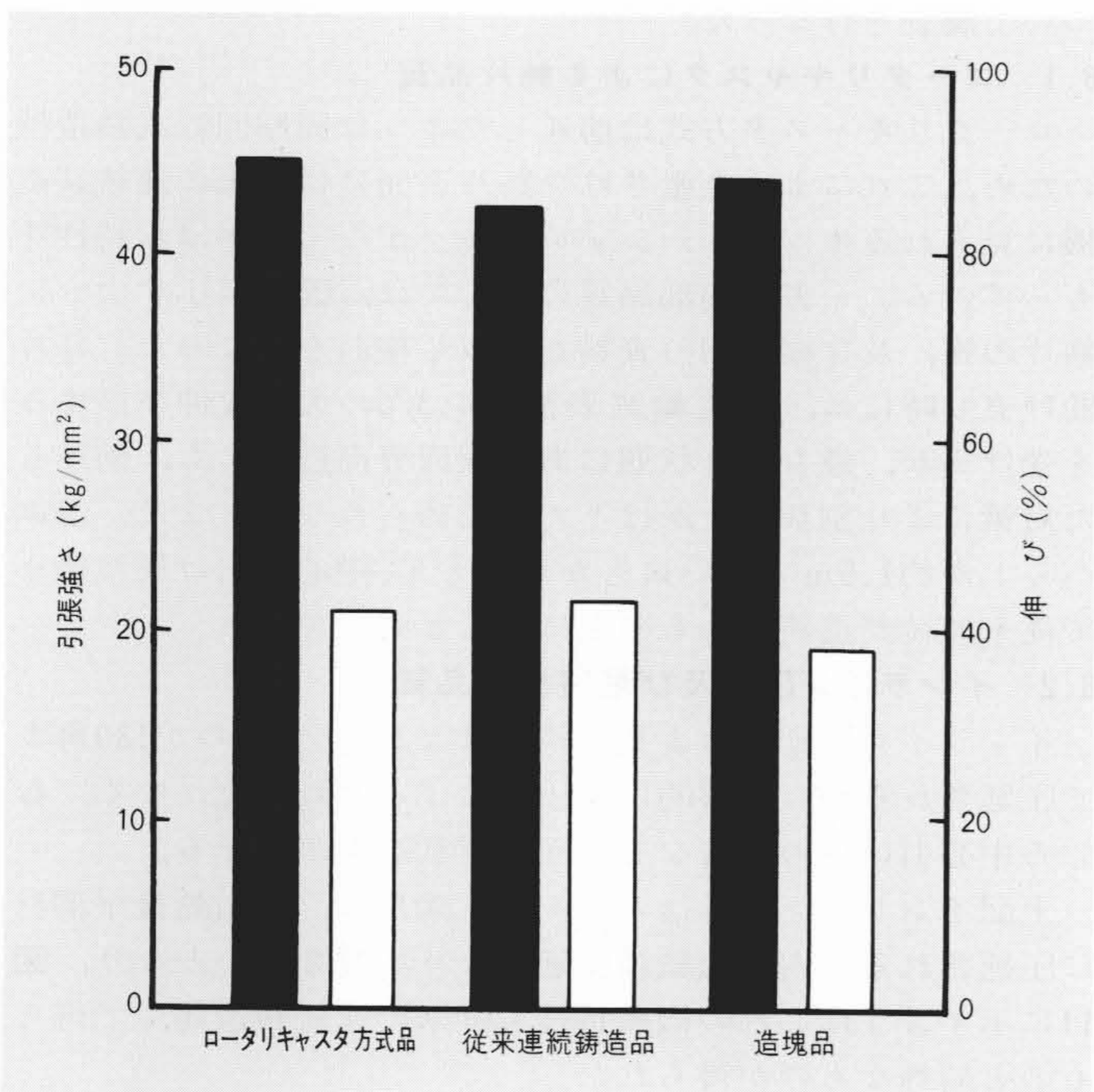


図11 最終製品の機械的性質 ロータリキャスト式連続製造鋼片から得られた平鋼の機械的性質は、従来連続製造鋼片と同等なものが得られる。

表1 鑄造方式の比較 ロータリキャスト方式は高速鑄造のため、直接圧延システムを可能にし、かつ鑄造機自身で小ストランド、小スペースの特長をもっている。

項目	方式	従来方式	ロータリキャスト方式	ロータリキャストの効果
鑄型方式		一体構造	鑄造輪とベルトの組合せ	1. 高速鑄造により直接圧延可能 省エネルギー： 20~35万kcal/鋼材1t 歩どまり： 2~3%向上 2. 設備スペース高さ減少 3. 保守、操作性向上 4. ランニングコスト減少 5. 鑄片表面品質向上
鑄型の運動		上下振動	鑄片と同期回転	
鑄造速度		1.7m/min	5.2m/min	
ストランド数		3	1	
設備高さ (タンディッシュ上面まで)		9m	4.5m	
溶鋼ヘッド		7.3m	1.5m	
設備床面積		800m ²	210m ²	

後の品質は、従来の連続鑄造機によるものと同等で、かつ表面品質の面ではむしろ優れていることが確認できた。

9 ロータリキャスト及び直接圧延の利点

本計画により得られた結果を基に、ロータリキャストと従来の連続鑄造方式の各諸元について対比を行なった結果を表1に示す。

ロータリキャストは同期式鑄造方式のため高速鑄造が可能で、圧延機の生産能力に匹敵する生産を1台の鑄造機で行なうことができる。また、圧延前の均熱された鑄片の温度は1,150℃程度の高温のものが得られ、直接圧延に対する温度条件を十分満たしていることが確認できた。

更に、1ストランド化及び低ヘッド形の効果により設備スペースを大幅に減少し、かつ保守性・操作性の改善に大きく寄与できる。

なお、ロータリキャストと仕上圧延機までの直結を行ない、溶鋼から直接圧延製品を生産する直接圧延方式が実現できれば、再加熱炉を不要とし20~35万kcal/鋼材1tの省エネルギーが、また2~3%の歩どまり向上が得られるなどの顕著な効果が予想されるので、これの早期実現を図りたいと考える次第である。

10 結 言

鑄造輪とベルトで鑄型を構成するロータリキャスト方式を鋼材に適用し、圧延機の実産能力に匹敵する高速鑄造を実現した。更に、ロータリキャストと2台の圧延機の直結によるインライン圧延方式を確立し、大幅な省エネルギー及び省資源を可能にする、仕上圧延機までの直結による直接圧延方式の実現に大きく前進することができた。

終わりに、本システムの完成に当たって財団法人機械システム振興協会・高速連続鑄造圧延システム分科会(委員長・早稲田大学教授・鑄物研究所所長・草川隆次工学博士)の委員各位、大三製鋼株式会社及び製作協力者として均熱装置を担当された中外炉工業株式会社の関係各位から多大な御指導・御協力をいただいた。ここに、深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 田中：連続鑄造圧延の発達、塑性と加工、14、151、607~611 (1973-8)
- 2) 木村、外：溶鋼の冷却における鑄型の温度及び凝固現象の解析、日本機械学会日立地方講演会論文集 (昭49-10)