

UDC 621.746.047

連続鋳造設備の最近の進歩

児 玉 正 範*

General Review of Recent Progress in Continuous Casting Equipment

Masanori KODAMA

1. 緒 言

Henry BESSEMER により提唱された連続鋳造法¹⁾は、1950年代に工業化され、その後設備および操業の両面にわたる改善が加えられて、1960年代には大型の転炉と結合された大量生産が可能となるに至った。とくに我が国においてはその後の発展は目覚ましく、1973年末における連続鋳機設置基数は条鋼用 64 基、スラブ用 26 基、年間連続生産能力は約 2500 万 t、粗鋼生産量に占める連続鋳鋼比率は約 20% であつたのに対し、1979 年末では条鋼用 112 基、スラブ用 37 基、年間能力は 5800 万 t、連続鋳鋼比率は 52% と大幅に増大している²⁾。さらに今後大型のスラブおよびブルーム連続鋳機が建設される趨勢にあり、近い将来連続鋳鋼比率は 80% に到達するものと予想されている³⁾。これはとくに 1973 年のオイルショック以降、連続鋳造法が製鉄所合理化の 1 つの柱として推進された結果といえよう。

連続鋳造法はそれ自体が高歩留り、省エネルギープロセスであるが、最近では熱片の状態で次工程の加熱炉に装入するホットチャージが実施されており、一段と省エネルギー効果を増している。鋳片の品質向上に対する積極的な研究開発が進められた結果、ほとんどの高級鋼は連続鋳造法により製造が可能となつた。さらに生産性の大幅な向上により、従来コスト的に連続化が困難とされていたリムド鋼についても、その代替鋼の鋳造が可能となつてきた。

このように連続鋳技術はその揺籃期を過ぎ、造塊-分塊法に替つて鋼片製造の主流技術となつたが、今後さらに高連続鋳鋼比率を達成するには、従来のように造塊-分塊法と互に補完する場合と異なり、より安定操業の達成や圧延機との連続化など多くの課題を残しているといえる。本報告は連続鋳機の設備について最近の動向と進歩をまとめたものである。

2. 連続鋳設備の最近の動向

2-1 歴 史

図 1 に現存する代表的な連続鋳機の型式を示す。1950年代に工業化された連続鋳機は垂直型(図 1-a)であり、その後 1960 年代に設備費の低減と鋳片搬出の合理化をねらつて凝固後の鋳片を曲げ矯正して抽出する垂直曲げ型(図 1-b)が開発され Dillinger Hütten Werke (西独)などに設置された。しかしこの型式では連続鋳機を高生産用に大型化する場合、溶鋼静圧の増大による品質上の問題点や設備費が増大する欠点を有していたので、これらの欠点を補う目的で湾曲型(図 1-d)が開発され、1960 年代後半以降の主流となつた。さらに機高を低くするために湾曲多点曲げ型(図 1-e)も考案され実用化されているが⁴⁾、その設置数は少ない。これらの湾曲型連続鋳機は、曲率の内面側に非金属介在物が集積する欠点があり、高纯净鋼の製造を主眼として垂直に鋳造後、未凝固鋳片を曲げ矯正して抽出する型式の連続鋳機(図 1-c)が U. S. Steel 社(米国)、VÖEST 社(オーストリア)、Olsson 社(スイス)その他で設計された。また、水平連続鋳(図 1-f)の研究も継続して行われているがいまだ一般に普及するには至っていない。このように連続鋳機の型式は設備費の低減、生産性の向上、非金属介在物の集積防止を中心として変遷してきているが、現状では使用条件や適用鋼種に応じて最適な型式が選定されている。

矩形断面以外の連続鋳機については、丸棒⁵⁾⁶⁾、中空丸棒⁷⁾、多角形⁸⁾、ビームブランク⁹⁾などが試みられたが、これらのうちで工業化されているのは丸棒とビームブランクである。丸棒の連続鋳は西独の Mannesmann 社で通常の丸型連続鋳法¹⁰⁾、仏の ANZIN 社ほかで SCEC 社により考案された回転連続鋳法⁵⁾、また西独の Eschweiler 社ではモールド内容鋼を水平攪拌する Magnetogyra¹¹⁾が実用化された。

昭和 56 年 1 月 6 日受付 (Received Jan. 6, 1981) (依頼技術資料)

* 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp., 1 Mizushimakawasakidori Kurashiki 712)

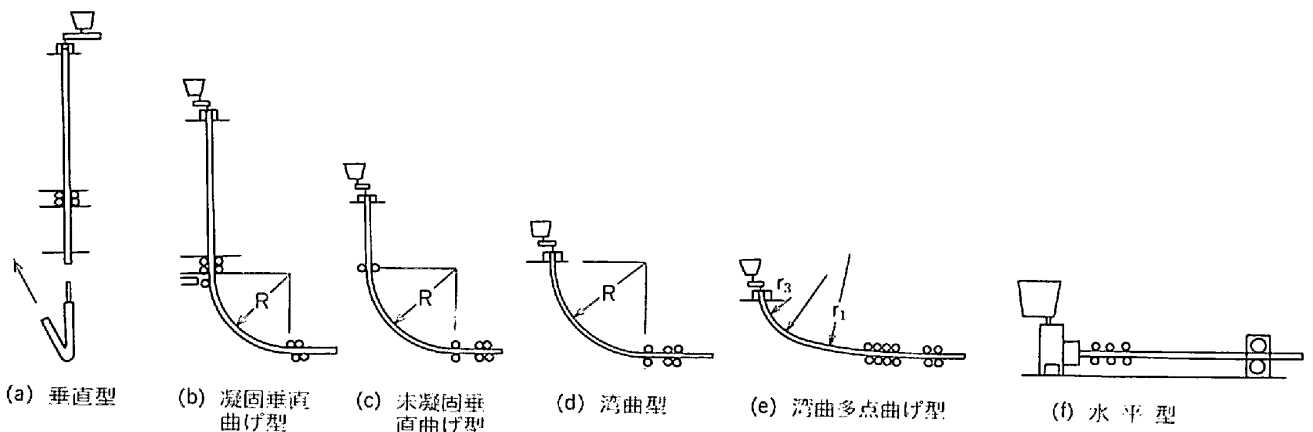


図 1 現存する各種連続鋳機の型式

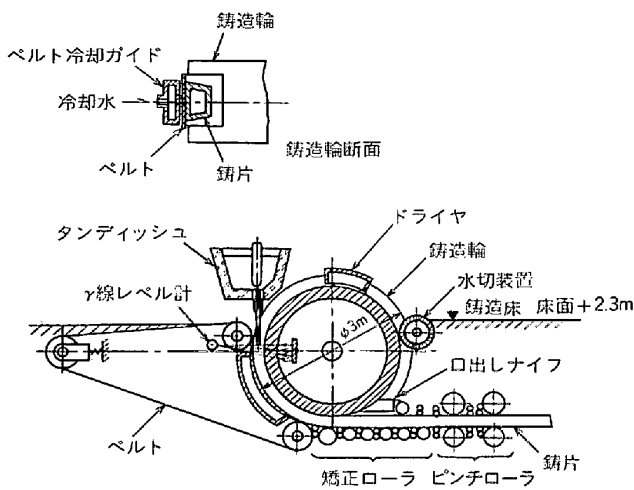


図 2 ロータリキャスト式高速連続鋳造方式²⁾

ビームブランク連続は BISRA (英), と Algoma 社 (カナダ) の共同開発により 1968 年に工業化された⁹⁾.

2.2 ビレット連続機

ビレット連続機は電炉メーカーを主体として棒鋼製品の製造を中心に発達してきた。設備はなるべく簡素にして設備費を低減することと、保守を簡便にすることを主眼に設計されている。ここでは 2~3 のトピックスを紹介するにとどめる。

図 2 に (株) 日立製作所により開発されたロータリーキャストの構造図を示す¹²⁾。モールドは鋳込まれた溶鋼と同期して回転する鋳造輪とベルトで構成されるのでモールド内で凝固殻は相対的な滑りを生ぜずに冷却される。従つて鋳造輪径を適正に選定することにより従来型の連続機と比較して、より高速の鋳造が可能となる。本方式の実用機では 3~5 m/min の速度で鋳造された 160/190×130 mm の鋳片は直接圧延装置により 130 mm 角までの必要な寸法にサイジングされている。さらに仕上げ圧延までの直結が実現されれば一段と省エネルギーおよび歩留りの向上が達成されるものと期待される。従来型の連続機においても鋳造速度の増大やプレークアウト



写真 1 MS モールド¹³⁾

の防止は重要な課題であり、モールド直下をフットローラに替えて写真 1 に示すように¹³⁾、面状の板で支持する方式も開発されている。国光製鋼(株)に設置されたビレット連続機は¹⁴⁾、従来のビレット連続機に比較して大幅な据付面積の減少と保守の省力化を図るために各ユニットを多ストランド共通にブロック化されている。

2.3 ブルームおよびスラブ連続機

表 1 および表 2 に 1972 年以降、我が国において建設された代表的なブルームおよびスラブ連続機の一覧を示す。これらの表から下記の諸点があるとしてあげられる。

(1) 従来湾曲型が主流であつたのに対し、垂直および垂直曲げ型が増加している。

表 1 1972 年以降に建設されたまたは建設中の代表的なスラブ連鋳機

会社名	事業所名	建設年月	取鍋容量 (t)	型式	ストランド数	最大モールド断面 (mm)	備 考
神川住川新鋼	加古川水島	'73. 1	245	湾 曲	2	200×1850	カーピリニア型 分割ロール多点矯正
		'73. 10	275	湾 曲	2	305×1900	
住川新鋼	鹿島千葉	'74. 5	280	湾 曲	2	220×1800	VÖEST 製分割ロール 圧縮鋳造
		'74. 9	180	湾 曲	2	260×1700	
新日鉄	大分	'76. 3	340	湾 曲	2	300×2200	湾 曲
		'76. 8	340	湾 曲	2	湾 曲	
鋼管	京 浜	'76. 11	280	湾 曲	2	234×2250	湾 曲
		'76. 11	280	湾 曲	2	204×1850	
川鉄管	水島	'76. 11	275	湾 曲	2	310×2500	分割ロール, 軽圧下 分割ロール
		'79. 3	280	湾 曲	2	254×1950	
新日鉄	八幡	'79. 4	300	湾 曲	2	250×2100	湾 曲
		'79. 7	280	湾 曲	1	300×1700	
新日鉄	鹿島	'79. 7	280	湾 曲	1	300×1700	SH-CCM, ツインキャスト 分割ロール
		'80. 4	300	湾 曲	2	270×2300	
新日鉄	名古屋	'80. 11	250	湾 曲	2	245×1630	多点矯正
		'81. 1 予定	170	湾 曲	2	250×1300	
川鉄管	千葉	'81. 3	230	湾 曲	2	260×1900	分割ロール ブルーム, スラブ兼用型
		'81. 10	160	湾 曲	1スト/2マシン	350×1800	

表 2 1972 年以降に建設されたまたは建設中の代表的なブルーム連鋳機

会社名	事業所名	建設年月	取鍋容量 (t)	型式	ストランド数	最大モールド断面 (mm)	備 考
川鉄管	水島	'73. 10	200	湾 曲	4	400×560	ビームブランク兼用 回転鋳造, 53/12停止
		'74. 3	80	湾 曲	4	φ210	
神鋼	尼崎	'74. 3	45	湾 曲	2	240×240	湾 曲
		'74. 3	45	湾 曲	2	湾 曲	
住新日鉄	小倉	'76. 3	70	湾 曲	4	300×400	PPM 方式シームレス素材鋳造
		'77. 7	150	湾 曲	4	340×340	
住新日鉄	和歌山	'79. 1	160	湾 曲	4	370×600	湾 曲
		'79. 5	280	湾 曲	4	400×520	
住新日鉄	和歌山	'80. 6	80	湾 曲	1	400×600	湾 曲
		'80. 12 予定	245	湾 曲	4	380×600	
神鋼	加古川	'81. 1	80	湾 曲	2	300×400	湾 曲
		'81. 5	305	湾 曲	4	258×410	

(2) スラブ, ブルームとも鋳造断面が大形化している。

(3) 条鋼用についてビームブランクや丸ビレットなどの異形断面連鋳機の稼働や P. P. M (Press Piercing Mill) 方式による継目無鋼管の製造など 1 ヒートによる製品圧延が可能となっている。

2.3.1 垂直曲げ型の増加

垣生ら¹⁵⁾は溶鋼プール内の非金属介在物の浸入深さ H_p を下記の(1)式で示した。

$$\log H_p = 0.462 \log \left(\frac{V_0}{V_s - V_c} \right) \cdot \left(\frac{H \sin \theta}{2} \right) \cdot \left(\frac{W}{900} \right)^{1.3} - 0.397 \dots \dots \dots (1)$$

- ここに V_s : 介在物の浮上速度
- V_c : 鋳造速度
- V_0 : ノズル出口の流速
- θ : 浸漬ノズルの吐出角度
- W : スラブ幅

拜田¹⁶⁾らは(1)式を用いて各位置における介在物分布を求め、次いで曲率の内面側に捕捉される介在物濃度を求めてこれを介在物が捕捉されない領域から最大浸入深

さ H_p まで積分することにより介在物捕捉量 η_{total} を求めた。

$$\eta_{total} = \frac{2\beta V_s}{k \cdot V_c^{1/2} \cdot R} \cdot H_p^2 \cdot (0.0508 H_p^{5/2} - 0.333^{3/2} H_p + 0.6\xi^{5/2}) \dots \dots \dots (2)$$

ここに β : 鋳型内に流入する介在物量に比例するパラメータ

ξ : 介在物の不捕捉長さ

$$\xi = \left(\frac{k \cdot R}{2V_c^{1/2}} \right)^{2/3} \dots \dots \dots (3)$$

- V_s : 介在物浮上速度
- k : 凝固速度定数
- V_c : 鋳造速度
- R : 湾曲半径

(1)および(2)式から各鋳造速度に応じて介在物を軽減するために必要な垂直部長さおよび介在物の分布を求めることができる。図3に(2)式より求めた垂直部長さの介在物集積に与える影響を示すが、数mの垂直部を有することにより介在物集積量を大幅に減少できることがわかる。

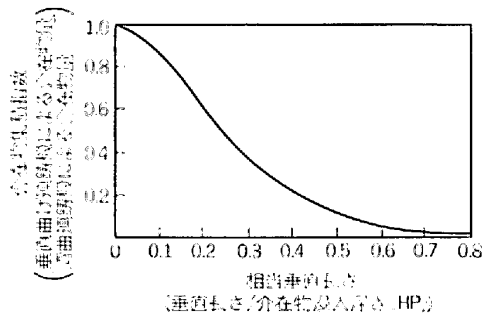


図 3 垂直部長さと介在物集積量の関係¹⁶⁾

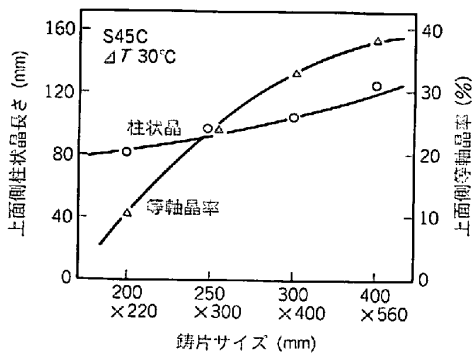


図 4 柱状晶長さおよび等軸晶率と鋳片サイズの関係¹⁸⁾

今後鋳片品質の高級化指向により垂直曲げ型はさらに普及するものと予想される。

2.3.2 鋳造断面の大形化

条鋼用素材のうち形鋼・線材・一般棒鋼については比較的早くから連鋳化が達成されていたが、継目無鋼管および機械構造用鋼についてはその連鋳化が遅れていた。しかし 1973 年に川鉄・水島に 300×400 mm の大断面ブルーム連鋳機が建設され¹⁷⁾、鋳造断面の大形化が介在

物の少ない清浄鋼の製造や、図 4 に示すように¹⁸⁾等軸晶の生成および中心偏析の軽減に有利であることが実証されて、新日鉄・八幡¹⁹⁾、日本鋼管・京浜²⁰⁾、住金・和歌山²¹⁾と次々に大断面ブルーム連鋳の増設が続いた。これらの連鋳機により製造された大断面ブルームは、新日鉄・八幡を除いていつたん中間素材である丸ビレットに圧延されたのち継目無鋼管ミルに供給されており、加熱丸ビレット圧延を前提とした大断面ブルーム連鋳機による継目無鋼管の製造が定着したといえる。また大断面ブルーム連鋳の採用は圧延比の不足から連鋳化が不可能であった棒鋼製品のサイズ拡大にも寄与している²²⁾。

スラブ連鋳においては川鉄・水島の 310×2500 mm²³⁾、米国 National Steel 社 Great Lakes 工場の 240×2640 mm²⁴⁾が代表的な大断面サイズであるが、前者は厚板圧延機に大単重スラブを供給することを、後者は連鋳機の生産性向上を図るために幅倍尺鋳造を行い、スラブを幅切断後ホットストリップミルに供給することを目的としたものである。

2.3.3 異形断面の連鋳機

1973 年に稼動した川鉄・水島のビームブランク連鋳機の鋳造断面と連鋳機の概略断面を図 5 に示す²⁵⁾。ビームブランク連鋳はその後東京製鉄(株)の高知工場に導入され²⁶⁾、さらに数社建設中といわれる。また継目無鋼管用素材である丸ビレットの連鋳は、日本鋼管・京浜で SCEC 法により行われて良好な成績をあげてきたが、1978 年水江工場の閉鎖により休止した²⁷⁾。

継目無鋼管製造時の穿孔については、マンネスマン穿孔にかわり、プレス方式により角鋳片を直接中空素管に穿孔する PPM 方式が開発された²⁸⁾。新日鉄・八幡に設置された大断面ブルーム連鋳機は PPM 方式を採用した

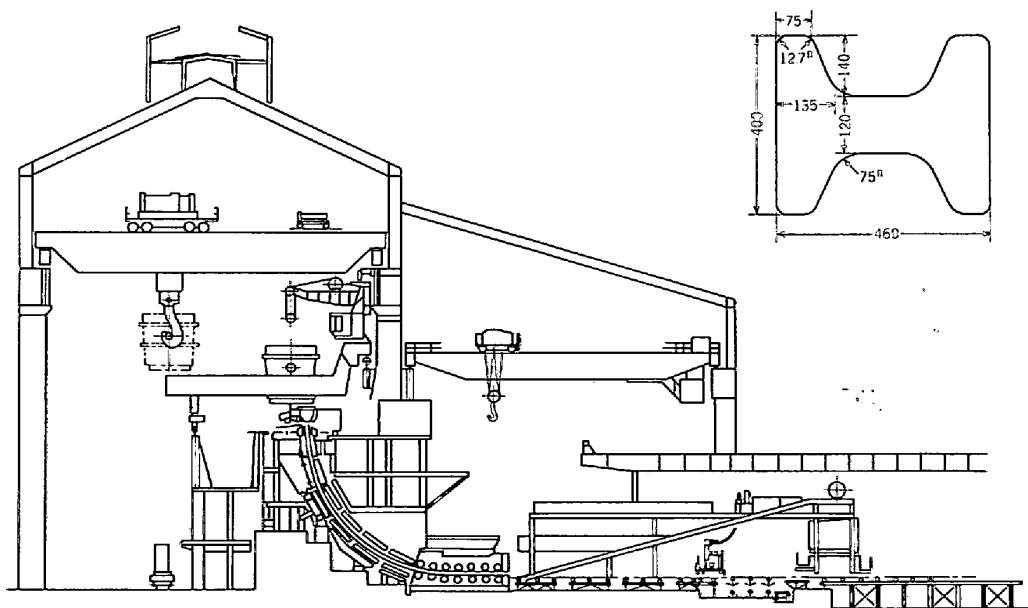


図 5 川鉄水島 No. 3 連鋳機の鋳造断面と全体の概略断面²⁵⁾

造管機に素材を供給するものであり²⁹⁾、丸ビレットへの圧延工程を省略した効果が大きい。

3. 生産性の向上と鋳片品質の改善を達成した設備改善

近年連鋳機の生産性向上は著しく、スラブ連鋳で 26 万 t/M 以上³⁰⁾、ブルーム連鋳機でも 10 万 t/M 以上の³¹⁾高生産を達成するに至っている。高生産性の達成には稼働率の向上とともに鋳造速度の増大などの鋳造中の生産性向上が必須であるが、そのためには高速鋳造下でも良好な鋳片品質を確保する技術の確立が重要である。以下に高生産性の達成や鋳片品質の向上を可能とした各種の技術改善について設備面を中心に述べる。

3.1 高稼働率の達成

高稼働率の達成には連々鋳数の増大が重要であるが、連々鋳を中断せざるを得ない理由としては、溶製炉と連鋳間のマッチング不良やトラブルの発生を除くと、タンディッシュ耐火物や浸漬ノズルの寿命、溶鋼成分あるいは鋳造断面が異なることがその主なものである。一般にタンディッシュの耐用ヒート数は浸漬ノズルのそれより長いので図 6 に示すような装置³²⁾を採用してノズルを交換すれば、ノズル寿命による制約から解放される。異鋼種間の連々鋳は前後のヒート間でモールド内に各種の方法により隔壁を挿入する操業技術のくふうにより達成された³³⁾。鋳造断面の異なる場合について、スラブ連鋳では鋳造中に幅を変更する各種の技術が開発されている。幅変更技術は鋳造をいつたん中断してモールド幅を変更後再び鋳造を再開する方法³⁴⁾³⁵⁾(段継ぎ法)と鋳造を継続したままでモールドの短辺を徐々に移動させる方法³⁶⁾³⁷⁾(テーパースラブ法)に分類される。後者はホットストリップミルに十分な幅圧延能力があればスクラップの発生がなく、また鋳造中断による設備への悪影響がないのでより優れた方法といえるが、各工場の既存条件により両者が選定されている。図 7 に大森ら³⁷⁾の鋳込み中幅変更技術についてモールドの構造図と幅変更方法を示すが、定常鋳込み中と幅変更中は異なる短辺テーパにセットするために上下のスクリュウ間にはクラッチが設けられている。鋳込み準備時間はダミーバーの上方挿入³⁸⁾により大幅に短縮されて 40 分以下となつたが鋳込み中

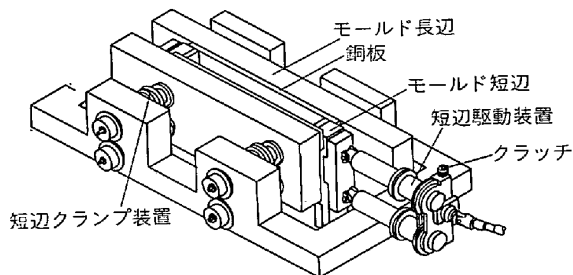
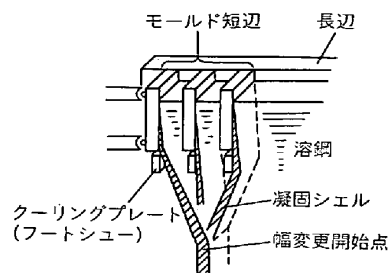


図 7 幅可変モールドの構造と幅変更方法³⁷⁾

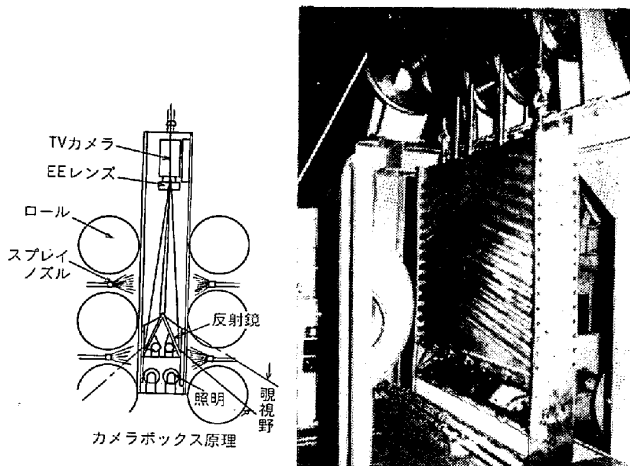
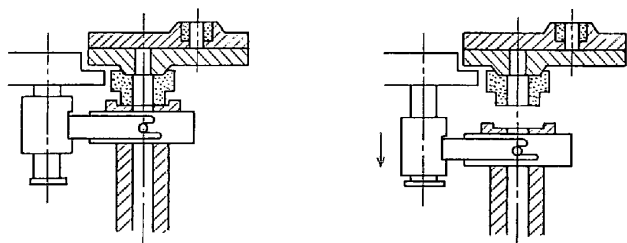


図 8 スプレーチェック装置³⁹⁾

の幅変更や異鋼種連々の普及により、その効果は少なくなつている。

各種のチェック作業も自動化機器の開発により負荷が軽減し作業時間が短縮されている。その主なものは図 8 に示す 2 次冷却用スプレーノズルのチェック装置³⁹⁾⁴⁰⁾、モールド短辺テーパ自動制御装置⁴¹⁾、モールド振動の監視装置⁴²⁾、ロールギャップ⁴³⁾⁴⁴⁾およびパスラインの計測装置⁴⁵⁾、ロールの回転チェック装置⁴⁶⁾などである。鋳造断面の変更に際してもモールドとローラーエプロンを一体フレームに組み込んで一括交換する構造の採用⁴⁷⁾や計測⁴⁷⁾制御技術を応用して遠隔ロールギャップ設定により所要時間の短縮が図られている。

連鋳設備で最も整備を必要とするのはモールドとロール群である。各種のモールド銅板表面コーティング技術の進歩は従来 200~300 ヒートであつたモールドのめつき寿命を 800~1000 ヒートに延長し、ロールも表面肉盛りや新材質の選定などにより寿命延長が達成されてい



(1) 鋳造中断 (2) ノズル取替
図 6 浸漬ノズル交換装置³²⁾

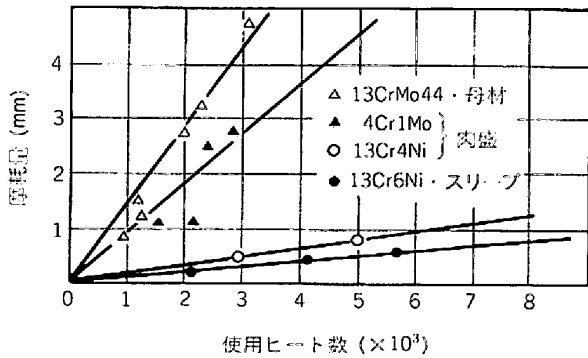
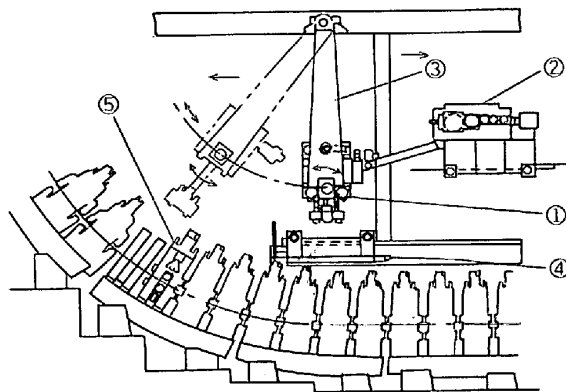


図 9 各種の肉盛り材料とロール摩耗の関係⁴⁰⁾



- ① クランプ装置 ② プッシュカー ③ スイングアーム
- ④ 移動台車 ⑤ ロールユニット

図 10 ロールユニット交換装置⁴⁹⁾

る。図 9 に各種の肉盛り材料をロールに溶接し耐摩耗性を調査した結果を示す⁴⁰⁾。Cr-Ni 系のステンレス鋼を選定することにより低合金鋼と比較して約 10 倍の耐摩耗性が向上している。また肉盛り法では使用条件が苛酷な場合、溶着金属の耐クラック性に難点があり、母材までクラックが進展して破断に至ることがあるので、ロール本体の材質改善も行われている。12%Cr-Mo-V 系のステンレス鋼を鍛造や遠心鑄造して使用する例や⁴⁸⁾、13Cr-6Ni 系の材質で継目無鋼管製造時の中間素材である中空円筒を作つて、ロールに適用した例⁴⁰⁾などが報告されている。

ロール構造として分割ロールを採用すると曲げ応力は小さくなり、折損や曲がりに対する条件が著しく緩和されるので上記の耐摩耗性に重視した材料を選定すればロール寿命は大幅に向上する。

ロール群は通常ユニット化されているが、これを迅速に交換するくふうも行われている。図 10 にロールユニットの迅速交換装置の 1 例⁴⁹⁾を示すが、30~40 min で交換可能といわれる。上述のように連々鑄技術の発達や鑄造準備時間および各種のチェック作業時間の短縮さらにモールドやロールの寿命延長などにより連鑄の稼働率は大幅に向上し、鑄造時間率が 90% を越える連鑄機も出現している⁵⁰⁾。

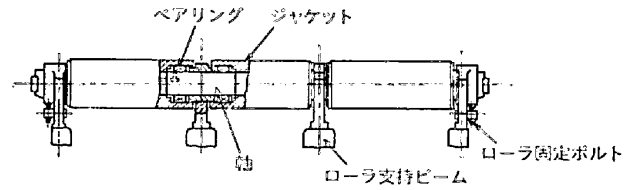
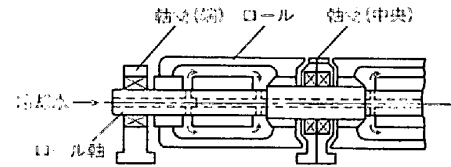
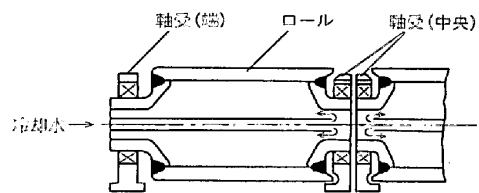


図 11 IHI-VÖEST 社製の分割ロール⁵⁹⁾



(a) 軸受端型分割ロール



(b) 軸受型分割ロール

図 12 内部水冷が可能な分割ロール⁴⁰⁾

3.2 高速鑄造技術

鑄造速度の高速化に伴い介在物集積量の増大や内部割れ発生などの問題が生じやすい。内部割れの発生機構および凝固前面近傍の許容歪みについては多くの調査研究がなされており、内部割れ発生的主要原因をバルジングによるとする調査例が多い^{51)~53)}。そのほかにロール圧下力が不適当な場合の圧下割れ⁵¹⁾⁵⁴⁾⁵⁵⁾および曲げ矯正時の変形による割れ⁵⁵⁾⁵⁶⁾、ロールの不整合による割れ⁵¹⁾などが報告されている。バルジングの定量的解析は有限要素法を用いた各種の弾塑性計算が行われているが⁵⁷⁾⁵⁸⁾、簡便のために弾性梁の歪み式を用いると最大バルジング量 δ_{max} は下の(4)式で示される。

$$\delta_{max} = K \cdot P \frac{l^4}{\bar{E} \cdot d^3} \dots \dots \dots (4)$$

- ここに K : 定数 \bar{E} : 平均ヤング率
- P : 溶鋼静圧 d : 凝固殻厚み
- l : ロールピッチ

従つて冷却を強化して凝固殻の厚み(d)と平均ヤング率(\bar{E})の増大を図ることや設備的にはロールピッチ(l)を縮小することが有効で、そのために 1 本ロールに替えて分割ロールを採用する例が多くなつている。

図 11 に VÖEST 社製の分割ロールを⁵⁹⁾、図 12 に内部水冷の可能な分割ロールの構造⁴⁰⁾を示す。

また未凝固鑄片の曲げあるいは矯正を行う際、多点で行うことにより、1 回当たりの歪みを減少させることも多く行われている。多点矯正と分割ロールを大幅に採用した川鉄・水島の第 5 連鑄機では、鑄片の強冷却を併せ

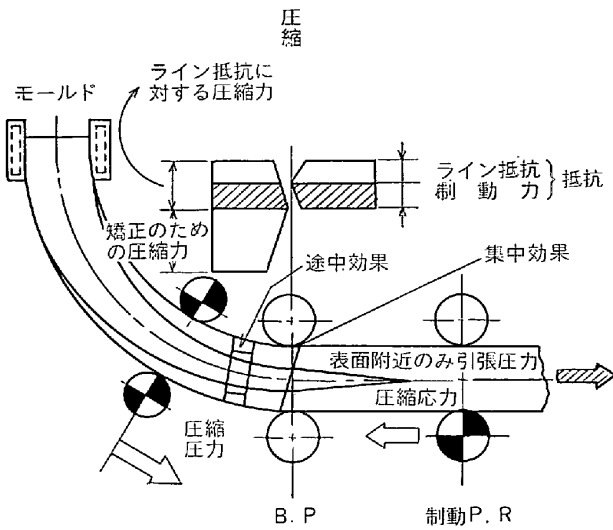


図 13 圧縮鋳造矯正時応力概念図⁶³⁾

て実施することにより厚板用スラブを最高鋳造速度 1.8 m/min で鋳造しても内部割れの発生は認められていない⁶⁰⁾。

H. SCHREWE および G. VOGT⁶¹⁾ は Multi-Roller-Drive と称して 2 次冷却帯に駆動ロールを配置し、鋳片の引き抜きあるいは矯正時に発生する引張力を軽減、さらには積極的に圧縮力となるようにロールを介して押し込む方法（圧縮鋳造）を提唱した。内容に若干の差異はあるが U. S. Steel 社⁶²⁾や新日鉄・大分でも同様な方法が採用されている。図 13 に新日鉄・大分の圧縮鋳造の概念を示すが⁶³⁾、250 mm 厚の厚板用スラブを 1.2~1.8 m/min の高速で連鋳している。これらの分割ロールによる小ロールピッチと圧縮鋳造は今後組み合わせられて活用されると予想される。

神戸製鋼所で稼動しているウォーキングバー方式は⁶⁴⁾、従来の鋳片をロールで支持し、スプレーにより冷却する構造に替えて、内部を水冷した 2 群の支持バー群により鋳片を交互に支持冷却しながら相対滑りなしで引き抜く構造であり、高速鋳造にも適していると考えられる。

高速鋳造において内部割れの防止を図るには上記のような設備構成の考慮のほかに、ロールギャップやパスラインの精度を確保するために設計上の細かい配慮やロール精度の計測装置が必要である。すなわちロールユニットでは厚み設定機構に各種のバックラッシュ防止を考慮し、フレームの高剛性化とともにロールユニット間の熱伸びを考慮して連続性を確保すること、駆動ロールの圧下防止をくふうすることなどが重要である。図 14 にロールギャップとパスラインを同時に測定する装置⁴⁵⁾を示し、さらにロール軸受の回転不良をチェックする装置も開発されている⁴⁶⁾。前述したロール寿命の延長や設計上の改造およびこれらの計測装置の活用により精度の高いロール管理が可能となった。

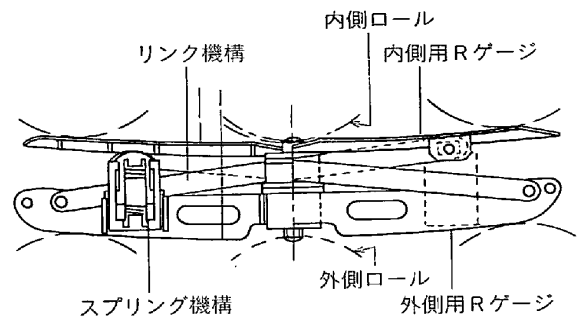


図 14 連続鋳造機におけるロール間隔およびアライメントの同時測定装置⁴⁵⁾

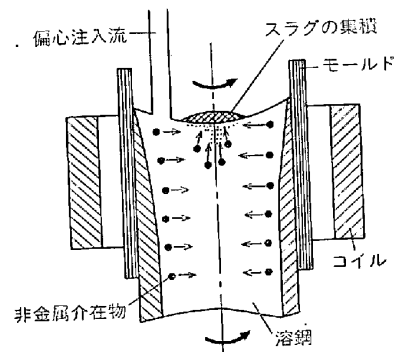


図 15 モールド内溶鋼電磁攪拌 (Magnetogyr process) の概念図¹¹⁾

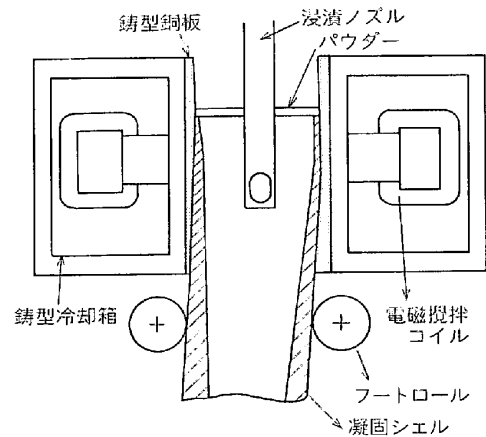


図 16 凝型内電磁攪拌装置の概要⁶⁷⁾

3.3 電磁攪拌技術

連鋳鋳片は均質な品質を利点として有しているが中心偏析を伴う欠点もある。さらに造塊材と比較して一般には圧延比が少なく、凝固組織の影響を受けやすいので凝固組織の改善も望まれる。そこで電磁力を利用して溶鋼を攪拌し、中心偏析や凝固組織の改善を図る技術が発達してきた。

3.3.1 モールド内電磁攪拌

図 15 に Magnetogyr Process¹¹⁾ の概念図を示す。IRSID と ARBED グループが開発したものでモールド内溶鋼を 100 r.p.m 前後で回転させ表面近傍における気泡発生の抑制や介在物の遠心分離を図り、かつ、中

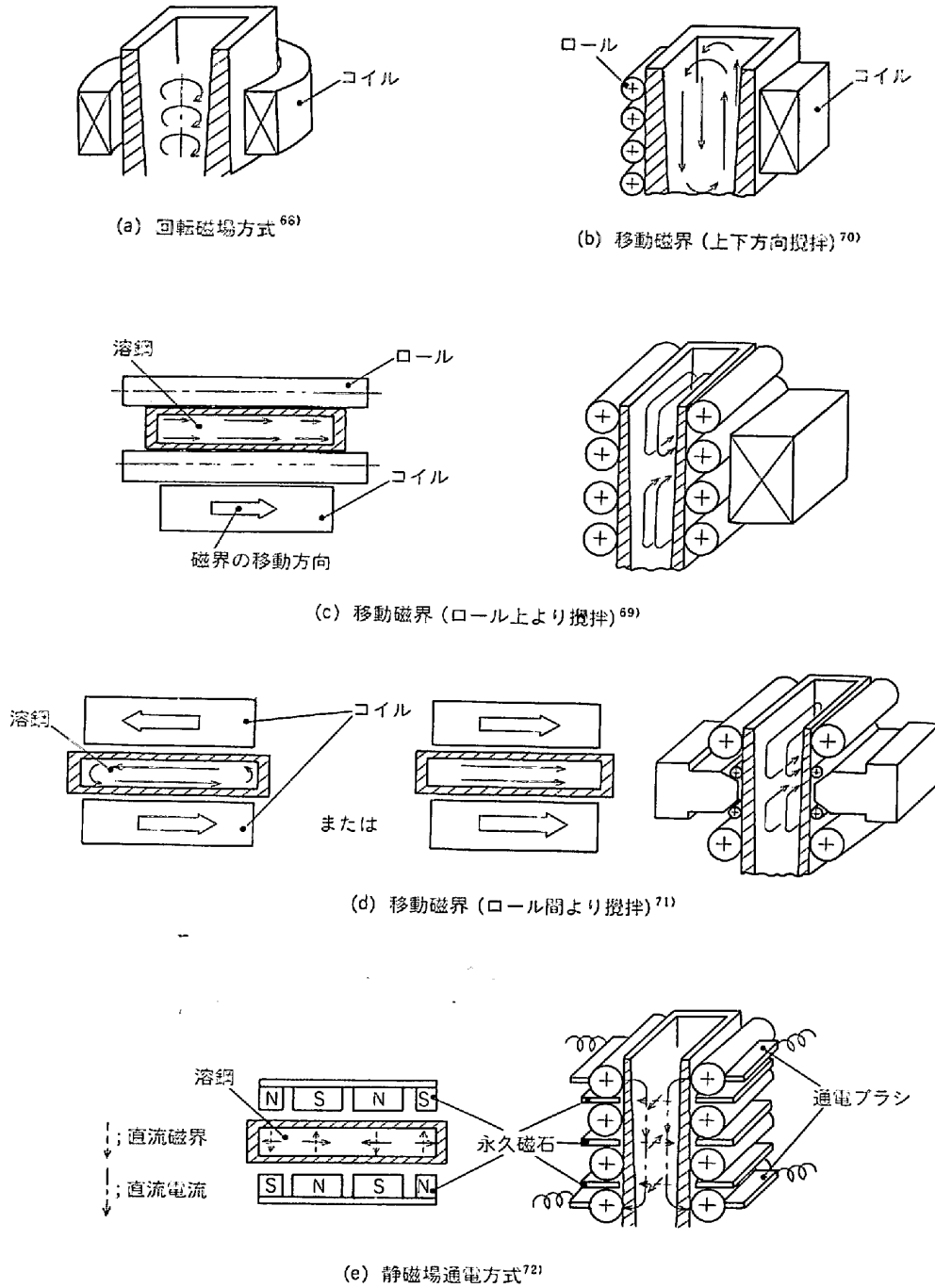


図 17 2 次冷却帯に設置される各種の電磁攪拌方法

心偏析の軽減にも有効といわれている。神戸・神戸でもモールド攪拌をテストし同様の結果を報告して⁶⁵⁾⁶⁶⁾いる。

図 16 に新日鉄・広畑より発表されたスラブにおけるモールド内電磁攪拌装置⁶⁷⁾を示す。水平に溶鋼を攪拌し、低炭素弱酸鋼について表面気泡の発生を抑制できるとしている。

3.3.2 ストランド電磁攪拌

図 17 に 2 次冷却帯に設置される各種の電磁攪拌方法を示す。ブルームやビレットに適用される回転磁界による方法⁶⁸⁾、リニアモーターを使用しロール上部⁶⁹⁾より、

あるいは铸片に近接して攪拌する方法⁷⁰⁾⁷¹⁾、および静磁場を設け溶鋼に電流を通じて攪拌する方法⁷²⁾などが行われている。

電磁攪拌を行うことにより図 18⁷³⁾に示すように铸片の等軸晶は増大し凝固組織は改善される。固液界面近くが流動するとホワイトバンドと呼ばれる負偏析が生成するので、その発生を抑制したり、安定してより広い等軸晶域を確保するためにモールド内電磁攪拌とストランド電磁攪拌を組み合わせたり⁷⁴⁾、ストランド電磁攪拌を多段に設置することも行われている⁷⁵⁾。図 19 に神戸製鋼所より報告された各種の攪拌方式のマクロ組織に与える

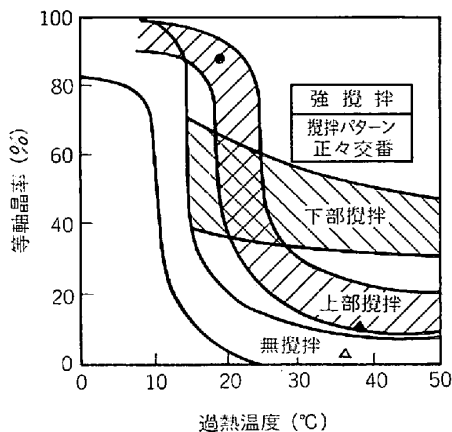


図 18 等軸晶率におよぼす電磁攪拌条件の影響⁷³⁾

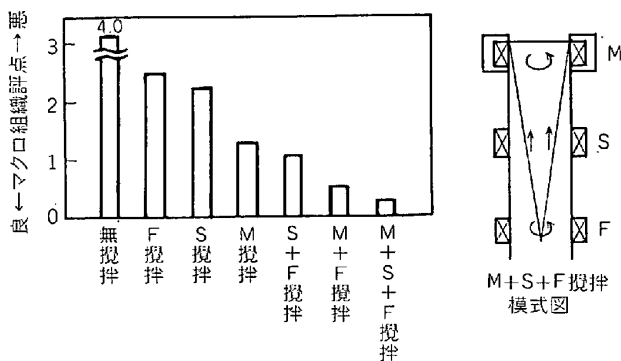


図 19 電磁攪拌方法による中心偏析の比較⁷⁶⁾

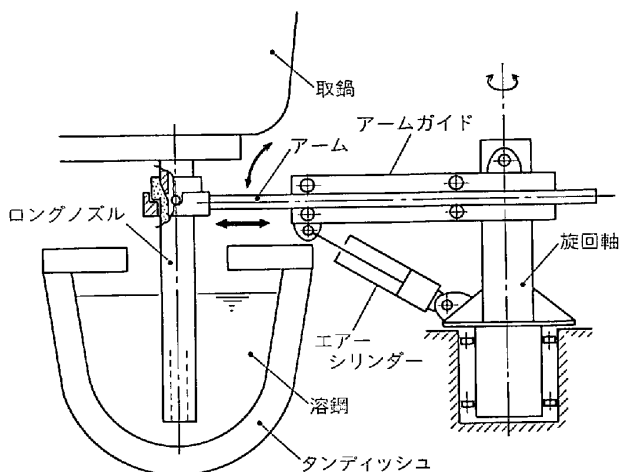


図 20 ロングノズル着脱装置

影響を示す⁷⁶⁾。

等軸晶域の増大は凝固前面近傍の割れ感受性を低下させるので内部割れの抑制にも効果がある。このように電磁攪拌は今後ますます活用されるものと予想される。

3.4 非金属介在物の減少

非金属介在物の減少は連鋳プロセスのみでなく、鋼の溶製を含めた全プロセスを通して取り組むべき課題である。特に最近の取鍋精錬技術の進歩は著しく、清浄鋼の製造に大きく寄与している。連鋳においては前述の垂直

曲げ型連鋳機の採用は介在物の浮上分離に有効である。

タンディッシュでは堰形状や配置のくふうのほかに、70tを越える大容量のものが採用され始め⁷⁷⁾、取鍋とタンディッシュ間は図 20 に示すようにロングノズルを使用して無酸化鋳造を行うことが一般化してきている。

連々鋳においては取鍋スラグがタンディッシュ内に流出して溶鋼を汚染するので、これを防止するために取鍋スラグの流出自動検知法⁷⁸⁾、残鋼のある状態で取鍋注入を停止して次ヒートの取鍋に注入する方法⁷⁹⁾、取鍋とタンディッシュ間に新たに中間鍋を設置することも行われている⁸⁰⁾。

3.5 鋳片表面の改善技術

モールドの Cu が鋳片に浸潤して発生する粒界脆化割れを防止するためにモールド表面を Ni などでコーティングする各種の技術が発達してきている。従来の Cr めつきに替えて原ら⁸¹⁾は Ni-P 系合金無電解化学めつきを採用し、田口ら⁸²⁾は Ni を比較的厚目 (5mm 程度) にめつきし、鈴木ら⁸³⁾は Ni に数% の Fe を共析させた Ni-Fe めつき施工することによりモールド寿命を飛躍的に延長できたと報告している。

横割れの発生に対しても鋳片温度をダイナミックに制御して Al-N などの析出を抑制し割れの発生を防止する技術が確立されている⁸⁰⁾⁸⁵⁾。

2次冷却用スプレー方法についても従来のスプレーノズルに替えて気水の2流体ノズルの開発が進められている⁸⁶⁾⁸⁷⁾、これらは従来のノズルに比較して広域面積をスプレーし、かつ広範囲の流量制御が可能であるので鋳片の冷却-復熱量が減少して表面欠陥の発生防止に有効といわれている。

4. 圧延との連続化

4.1 ホットチャージにおける品質保証

大量にホットチャージを行う際、製鉄所全体にわたる物流の合理化や情報処理の迅速化、無欠陥鋳片の製造および鋳片品質保証体制の確立などが重要である。

そこで鋳片の欠陥を迅速にチェックする装置や高温鋳片のマーキング装置、鋳片をトーチ切断する際に発生するスラグの除去装置などが必要となる。

熱片の表面検査設備としては光学的な方法によるものが主流であり、各所で使用されている⁸⁸⁾。この方法は縦割れなどの比較的大きな疵の検出は可能であるが微細な疵の判定には難点がある。そこで表層部を誘導加熱して疵部のホットスポットを検知する方法⁸⁹⁾や渦流による検出も試みられている⁹⁰⁾⁹¹⁾が、いまだ工程設備として採用しているとの報告はない。

また熱片で内部欠陥を検出するために超音波を利用した方法も行われている⁹²⁾が、トーチ切断前後の高温で実用に供されるレベルに至っていない。

このように熱間で疵を検出することはホットチャージ

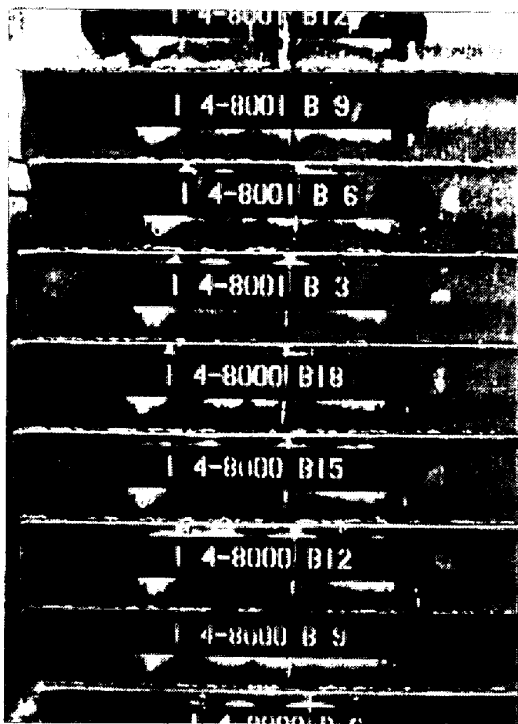


写真 2 ステンシルを使用したスプレーマーキングされたスラブ⁹⁴⁾

を行ううえで品質保証の観点からその必要性は大きい。未だ満足すべきレベルに達せず今後の開発に期待するところが大きい。

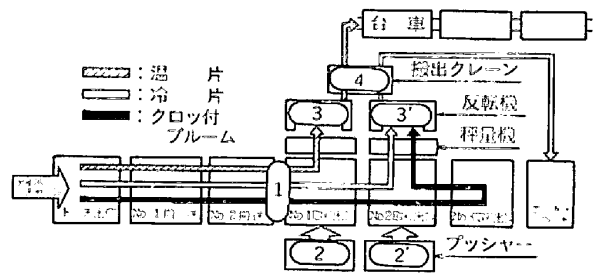
熱片へのマーキングは既に各所で実用化されており、印字を打刻する方法⁹³⁾、刻字された薄鉄片を銃でセットする方法、ステンシル⁹⁴⁾やドット⁸⁵⁾とを用いて高温スプレーする方法などがある。写真 2 にステンシルを用いてスプレーマーキングした铸件を示すが、遠くからでも鮮明に文字の判読が可能である。

トーチスラグは铸件に固着したままで圧延すると製品疵となつて残存する場合が多い。これを圧延前に除去する装置が開発されており、大別すると溶剤除去⁷⁸⁾と機械的に剪断除去⁹⁵⁾する方法に分けられる。

4-2 連続化

電気炉-ピレット連铸-棒鋼圧延機の組み合わせや大断面ブルームとピレット圧延機間では生産性の点からも連続化が容易であり、同期ホットチャージが行われている例が多い。図 21 に住金、和歌山のブルーム連铸機におけるブルーム搬出径路を示す⁹⁶⁾。圧延との同期操業を容易にするために連铸の搬出精整にオンラインでのロット判定仕分け機能が組み込まれている。

一方スラブにおいてはホットチャージは実施されているものの同期化連続操業を行っていない例はない。これは連铸機および圧延機の双方に各種の制約条件(例えばスラブ幅、圧延傾位など)があるため、今後の連続化推進のためにはこれらの制約条件の緩和を図らねばならない。



制御点	内 容
1	搬出経路の決定と各取り出しテーブルへの送およびセンタリング停止
2, 2'	押し込みロット判定によるプッシャー駆動
3, 3'	積み出しロット判定による反転機反転駆動
4	積み込み位置指示と実績自動収集

図 21 住金和歌山のブルーム搬出径路⁹⁶⁾

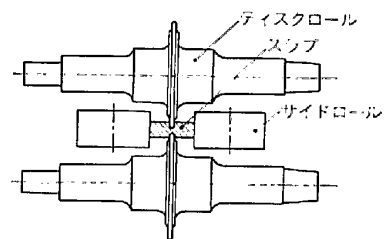
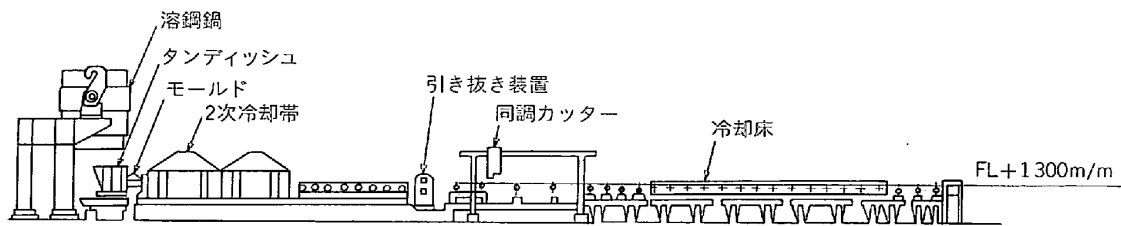


図 22 ディスクロールによるスラブ切断¹⁰⁰⁾

すなわちモールドチャンスフリーやロールチャンスフリーの実現が必要である。U. S. Steel 社 Gary 工場の連铸機はピンチロール後に加熱炉と水平、垂直の圧延用ロール群を有して、230×1400 mm または 235×1900 mm の铸造断面から最小 150×810 mm までのスラブを製造しており⁹⁷⁾、モールドチャンスフリーを大幅に実現している。従来この種の設備は高価でコスト的なメリットがないとされてきたが、最近のエネルギーコストの高騰や連続化に対する強い要請から連铸と圧延機間にこのようなサイジングを行う方法が見直される機運にあり、新日鉄、大分ではサイジングミルを設置して4基の連铸機と熱延工場を結ぶことが計画されている⁹⁸⁾。また新日鉄、堺では铸件をホットストリップミルに直送出来るように、連铸機が熱延工場の入側に設置されている⁹⁹⁾。

熱延および冷延用スラブは狭幅が多く、連铸機の実産性が低い難点がある。倍尺スラブを铸造してトーチにより同期熱間切断を行うことが考えられるが現状では不可能である。そこで図 22 に示すようにディスクロールを使用して圧下切断する方法が提唱されている¹⁰⁰⁾¹⁰¹⁾。本方法は切断ロスがなく、温度降下が少ないなどの利点が多いが、铸件の曲がりや切断時のバリ発生の問題もあり、今後の発展が期待される。

铸込み中の幅変更技術はモールドチャンスフリーへの端緒を開いたものといえるが、圧延機においても大幅な幅圧下やクラウン制御技術が発展しつつある。ちなみに川鉄、水島では1種類のビームブランクから28シリーズの製品が圧延されており¹⁰²⁾、これは圧延技術の進歩に

図 23 日本鋼管・福山の水平連鑄機¹⁰⁵⁾

よりチャンスフリーがより実現された1例といえる。このように連鑄および圧延技術の発展により、より合理的な連続化への検討が進むものと予想される。

5. 特殊な連鑄機

前述した同期式回転連鑄機はモールドと鑄片間に相対滑りがないので高速鑄造に適しており、今後、この特性を効かして、スラブや薄板連鑄への発展が多いに期待される。

水平連鑄機はソ連¹⁰³⁾、英国¹⁰⁴⁾や我が国でも試みられている。図 23 に日本鋼管、福山に設置された取鍋容量 40 t の水平ピレット連鑄機を示す¹⁰⁵⁾が、75~150 mm 角と 120~210 mm 丸のピレット製造ができ、既に工業的規模の生産が可能となつている。住友金属においても継目無鋼管用丸ピレットを対象として取鍋容量 10 t の試験機を設置している¹⁰⁶⁾。いずれも

- (1) 連設費が安価である。
- (2) タンディッシュとモールドが直接に接続されているため鑄片の清浄性が高い。
- (3) モールド内に溶鋼静圧があり、均一凝固するのでピレットの寸法精度がよい。
- (4) バルジングも少なく、均一凝固により中心偏析が少ない。

などの特徴を有している¹⁰⁷⁾。水平連鑄機の場合、タンディッシュとモールドの接続にその特徴があり、両社とも窒化ポロンを添加した高級耐火物を使用している。今後の発展はこの耐火物の進歩に依存するところが大きい。

これらの特殊連鑄機の将来については、その特性を活かしてスラブなどに適用され、従来型の連鑄機に置き換わるとする意見¹⁰⁷⁾と従来型の連鑄機と同一分野での競合という形態よりむしろその特徴を発揮できる分野—例えば設備の簡易性の面から小規模設備分野、鑄片品質の高清浄性の面から高級鋼分野、あるいは良好な真円度の点から丸ピレット分野—を担当することになるとする意見¹⁰⁸⁾に分れている。

薄板連鑄機は例えば Hazellet 法¹⁰⁹⁾など古くから研究されているが、いまだ工業化に至つた例はない。しかし小泉¹¹⁰⁾らは溶湯からの直接圧延をシミュレートした急冷薄鑄片 (5 mm 厚) と 40.80 mm の方向性珪素鋼板用

偏平鑄片を調査し、薄板連鑄の有望性を認めている。薄板連鑄が開発されれば省エネルギー、省プロセスの効果は大きくその発展が期待される。

6. 結 言

連続鑄造法はその前後工程を含めた技術の進歩によって鑄造工程の主流技術となつた。今後連鑄および圧延技術の進歩に伴つて両工程間の連続化はより一層進展すると予想され、そのために連鑄から圧延間を通して既存の各設備および機器についてその機能の見直しと合理的な再編を検討してゆかねばならない。その際、連鑄機の本体設備に関し、最も問題となるのはモールドからピンチロールまでの設備の信頼性および整備性の向上であり、特にモールドやロールおよび軸受などについてその状態の常時監視や寿命延長あるいは迅速交換など開発すべき課題は多い。

また省エネルギーの要請からできるだけ高温の鑄片を供給できるような設備の検討も必要となる。さらにホットチャージにとどまらず、2次冷却帯や搬送中に逸散する放散熱の回収にも取組まねばならない。

これまで連続鑄造は、その生産性を向上させることにより造塊法を駆逐する形で発展してきたが、さらに連鑄鋼比率の増大を図るには、小ロット材への対応など新たな課題にも対処しなくてはならない。

当面は従来型連鑄機の増設が続くものと予想されるがその間、より製品に近い形状の鑄造を目指してビームブランクや丸鑄片の連鑄も増え、さらに同期式連鑄機、水平連鑄機や薄板連鑄機の進歩も予想される。従来型の大量生産機とこれらの連鑄機は各々の特徴を活かしてその役割を分担することになる。従つて既存の連鑄機について、計測技術の活用や設備の改善により安定化を図るとともに、新しい連鑄機の完成に向けて努力を続けねばならない。

文 献

- 1) H. BESSEMER: Stahl u. Eisen, 11 (1981), p. 921
- 2) 鉄鋼統計要覧: (1874), (1980) [日本鉄鋼連盟]
- 3) 古茂田敬一, 江見俊彦, 篠崎義信: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 737
- 4) H. SCHREWE: Stahl u. Eisen, 87 (1967),

- p. 1372
- 5) J. BASILIS, G. JEGO: *Publ Met Soc*, 184 (1977), p. 201
 - 6) 牛島清人: 鉄と鋼, 87 (1962), p. 747
 - 7) U. PETERSON, K. G. SPEITH, A. BUNGEROTH: *Stahl u. Eisen*, 86 (1966) 6, p. 333
 - 8) 牛島清人: 鉄と鋼, 47 (1961), p. 115
 - 9) H. H. MARR, B. W. H. MARSDEN, R. I. MARSHALL: *JISI*, (1966), p. 1186
 - 10) H. SCHREWE, and J. GLASER: *Continuous Casting of Steel* (1977), [The Metal Society]
 - 11) R. ALBERNY, L. ANGEL, J. P. BIRAT: *Steel-making Proceedings*, 61 (1978), p. 37
 - 12) 山本美佐夫, 香取英俊, 木村智明, 遠藤宗宏, 矢葺 隆, 新山英輔: 日立評論, 62 (1980), p. 433
 - 13) CONCAST's News: "MSMold" for higher casting speeds and flower breakout rates
 - 14) 土田 浩, 深井利行: *IHI 技報*, 20 (1980), p. 24
 - 15) 垣生泰弘, 吉井 裕, 江見俊彦, 飯田義治, 上田典弘: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 1803
 - 16) 拜田 治, 垣生泰弘, 江見俊彦, 浜上和久, 上田典弘: 鉄と鋼, 66 (1980), S 142
 - 17) 小助川卓, 児玉正範, 千野達吉, 小出英勝: 鉄と鋼, 60 (1974), S 427
 - 18) 児玉正範, 上杉浩之, 上田徹雄, 岡野 忍, 新庄 豊: 鉄と鋼, 66 (1980), A 37
 - 19) 西脇 実, 木村弘之, 船津勝海, 前田正浩: 鉄と鋼, 64 (1978), S 204
 - 20) 玉置稔大, 楯 昌久, 榎井 明, 小森重喜, 山上諄, 中島広久: 鉄と鋼, 66 (1980), S 740
 - 21) 梨和 甫, 吉田圭治, 森 明義, 山口隆志, 多目健一: 鉄と鋼, 65 (1979) S 760
 - 22) 中川康弘, 中井一吉, 浜口 陽, 片山 進, 新庄豊, 佐山泰弘: 鉄と鋼, 65 (1978), S 237
 - 23) 大森 尚, 前田瑞夫, 大岡秀志, 小島信司: 鉄と鋼, 63 (1977), S 564
 - 24) J. A. ADAMS: *Iron Steel Eng.*, 55 (1978), May p. 31
 - 25) 大西正之, 上田徹雄, 新庄 豊, 溝田久和, 八百升, 藤村俊生: 川崎製鉄技報, 12 (1980) 3, p. 10
 - 26) 日本経済新聞: (1979), 4-20
 - 27) 楯 昌久: 第 69 回西山記念技術講座, p. 140
 - 28) G. BALZI: *Iron Steel Eng.*, 54(1977), Dec, p. 26
 - 29) 打田安成, 武居博道, 海内一仁, 梅村育寛, 古賀成典, 金子信義: 鉄と鋼, 66 (1980), S 246
 - 30) 新日鉄. 八幡: 第 77 回製鋼部会
 - 31) 例えは, 鉄鋼新聞: (1980), 10.30
 - 32) 飯田義治, 江本寛治, 児玉正範, 前田瑞夫, 中井一吉, 大宮 茂: 鉄と鋼, 65 (1979), S 648
 - 33) 例えは, 梨和 甫, 吉田圭治, 森 明義, 友野宏, 木村和成: 鉄と鋼, 66 (1980), A 41
 - 34) 村上 正, 副島善蔵, 橋本真輔, 芝本真吾, 浜野豊三良, 丹野 仁: 鉄と鋼, 63 (1977), S 88
 - 35) 福島克治, 上田典弘, 越川隆雄: 鉄と鋼, 64 (1978), S 618
 - 36) 竹村洋三, 高橋良太, 詫摩三朗, 竹内恒夫: 鉄と鋼, 64 (1978), S 127
 - 37) 大森 尚, 大西正之, 小島信司: 鉄と鋼, 63 (1977), S 90
 - 38) 例えは, 吉川忠男: 日立造船技報, 34 (1973) 2, p. 31
 - 39) 池内祥晴, 榎本良敏, 山田恒夫, 岸本哲司, 森川英二: 鉄と鋼, 65 (1979), S 119
 - 40) 市原 晃, 久保田和雄, 丹野栄一, 石亀公夫, 佐藤貞夫: 川崎製鉄技報, 12 (1980) 3, p. 127
 - 41) 武 英雄, 日名英司, 前田瑞夫, 江本寛治, 高柴信元, 山崎順次郎: 鉄と鋼, 66 (1980), S 184
 - 42) 川原田 昭, 反町建一, 小助川 卓, 高橋 暁, 糸山哲司, 丸山英雄, 垣生泰弘, 矢部 直: 鉄と鋼, 65 (1979), S 750
 - 43) 佐藤武良, 秋葉豊知: 住友重機械技報, 21(1937), p. 41
 - 44) H. SCHREWE, K. WÖNNENBERG: *AIME*, 61 (1978), p. 248
 - 45) 特開昭 51-120935
 - 46) 丹野栄一, 徳繁次郎, 村上礼三, 伊藤俊之: 鉄と鋼, 66 (1980), S 850
 - 47) 大日方達一: 鉄と鋼, 66 (1974), p. 741
 - 48) 太田定雄, 豊田裕至, 林 康代, 仁賀博一: 神戸製鋼技報, 29 (1979) 3, p. 42
 - 49) 河原 実, 安西 章, 家 勝治, 原田新一: 神戸製鋼技報, 29 (1979) 3, p. 30
 - 50) 日経産業新聞: (1979), 9-17
 - 51) 古茂田敬一: 第 27 回西山記念技術講座
 - 52) H. Vom ENDE, G. VOGT: *JISI*, 210 (1972), p. 889
 - 53) 井上俊朗, 小舞忠信, 新美英俊, 斉藤豊一, 秋田靖博: 鉄と鋼, 60 (1974), A 103
 - 54) 石黒守幸, 宮原 忍, 菅原功夫, 半明正之, 内田繁孝: 鉄と鋼, 62 (1976), S 481
 - 55) 川鉄・水島: 第 51 回製鋼部会
 - 56) 堀 珊吉, 打田安成, 山本利樹, 三隅秀幸: 鉄と鋼, 61 (1975), S 58
 - 57) 反町建一, 江見俊彦: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 1297
 - 58) 成田貴一, 森 隆資, 綾田研三, 宮崎 純, 藤巻正憲: 鉄と鋼, 63 (1977), S 613
 - 59) O. M. PUHRINGER, H. RASCHKE: *Publ Met Soc*, 184(1977), p. 83
 - 60) 児玉正範, 小島信司, 中井一吉, 反町建一, 今井卓雄, 垣生泰弘, 野崎 努: 鉄と鋼, 64 (1978), A 123
 - 61) H. SCHREWE, G. VOGT: *Open Hearth Proceedings*, (1970)
 - 62) J. H. RICHARDS: *Iron Steel Eng.*, 48 (1971), Aug, p. 52
 - 63) 中川 一, 島 孝次, 堀 珊吉, 椿 春治, 山内

- 信一, 打田安成: 鉄と鋼, 64 (1978), A 131
- 64) 野崎輝彦, 高谷 戊, 南野清一: 神戸製鋼技報, 24 (1973) April, p. 2
- 65) 成田貴一, 野崎輝彦, 森 隆資, 綾田研三, 大西稔泰, 鈴木康夫: 鉄と鋼, 66 (1980), S 791
- 66) 大西稔泰, 江波戸紘一, 高木 弥, 塩飽 潔, 太田安彦, 花園 猛, 鉄と鋼, 66 (1980), S 792
- 67) 竹内栄一, 藤井博務, 大橋徹郎, 木村一茂, 高島靖, 山広実留: 鉄と鋼, 66 (1980), S 797
- 68) 岩田 斉, 山田勝彦, 藤田照夫, 林 享三, 鉄と鋼, 61 (1975), S 129
- 69) S. KOLLBERG: Iron Steel Eng. 57 (1980), March, p. 46
- 70) 成田貴一, 野崎輝彦, 森 隆資, 綾田研三, 宮下隆夫, 本城 孟: 鉄と鋼, 65 (1979), S 707
- 71) 例えば, 実公昭 50-111
- 72) 白岩俊男, 杉谷泰夫, 小林純夫, 石村 進: 鉄と鋼, 64 (1978), S 647
- 73) 竹内英麿, 池原康允, 武田雅男, 駒野忠昭, 柳井隆司, 松村省吾: 鉄と鋼, 64 (1978), S 649
- 74) 大西稔泰, 高木 彌, 柿原与志人, 若杉 勇, 鈴木康夫, 森 隆資, 綾田研三: 鉄と鋼, 66 (1980), S 795
- 75) 足立隆彦, 川見 明, 田中哲三, 萩原利明: 鉄と鋼, 66 (1980), S 205
- 76) 喜多村実, 小島勢一, 大西稔泰, 成田貴一, 森隆資: 鉄と鋼, 66 (1980), S 789
- 77) 脇田淳一, 溝口庄三, 吉田基樹, 石飛精助: 鉄と鋼, 66 (1980), S 865
- 78) 飯田義治, 前田瑞夫, 江本寛治, 山崎順次郎, 下戸研一, 平田賢二, 上田正美, 高橋 暁: 川崎製鉄技報, 12 (1980), 3, p. 110
- 79) 若杉専三, 阪本英一, 水野良親, 小谷野敬之, 山鹿素雄, 宮下芳雄: 日本鋼管技報, 70 (1976), p. 41
- 80) 井上俊明, 田中英樹, 製鉄研究, 294 (1978), p. 1
- 81) 原 千里, 橋尾守規, 木村智彦, 小出優和: 鉄と鋼, 63 (1977), S 550
- 82) 田口喜代美, 小谷野敬之, 石川 勝, 内田繁孝, 川和高穂, 宮原 忍: 鉄と鋼, 63 (1977), S 549
- 83) 鈴木康治, 得丸豊久, 平井洋一, 有吉政弘: 鉄と鋼, 65 (1979), S 654
- 84) 飯田義治, 児玉正範, 鈴木康治, 山崎順次郎, 小島信司: 川崎製鉄技報, 11 (1979), 3, p. 121
- 85) 大西稔泰: 第 69 回西山記念技術講座, p. 35
- 86) P. BENOIT, Ph. PITHOIS: Publ Met Soc., 184 (1977), p. 92
- 87) 新日鉄・大分: 第 77 回製鋼部会
- 88) 例えば, 日本鋼管・京浜: 第 73 回製鋼部会
- 89) 田麿就則, 大橋徹郎, 福山 勝, 江頭武二: 鉄と鋼, 66 (1980), S 844
- 90) K. G. BERGSTRAND: Iron Steel Eng., 57 (1980), June, p. 59
- 91) 白岩俊男, 広島龍夫, 坂本隆秀, 大垣一郎: 鉄と鋼, 66 (1980), S 985
- 92) 工藤和也, 木村弘之, 村瀬昭次, 草野昭彦, 村田誠, 下笠知治, 大村 博: 鉄と鋼, 66 (1980), S 846
- 93) 例えば, F. R. SPEICHER JR.: Iron Steel Eng., 41 (1946), Nov, p. 115
- 94) 土田 剛, 佐藤明宗: 川崎製鉄技報, 11 (1979), 2, p. 127
- 95) 楯 昌久, 小森重喜, 山上 諄, 田中 久, 小倉康嗣, 長谷部信久: 鉄と鋼, 66 (1980), S 852
- 96) 浦本太郎: 鉄鋼の IE, 16 (1980), 3, p. 54
- 97) J. F. B. WOOD: Iron Steel Eng., 48 (1971), Dec, p. 47
- 98) 日経産業新聞: (1980), 12-5
- 99) 鉄鋼新聞: (1980), 12-4
- 100) スウェーデン特許出願公開 780 4765-2
- 101) 鈴木康夫, 長田修次, 安田一美, 甲谷知勝, 平川紀夫, 儀間真一: 鉄と鋼, 66 (1980), S 986
- 102) 田中輝昭, 永広尚志, 山下政志, 人見 潔, 阿久根俊幸, 草場 隆: 川崎製鉄技報, 10 (1978) 4, p. 69
- 103) 例えば, V. I. SLADKOSHTES: Stahl, (1977) 4, p. 31
- 104) J. MARSCH and D. TOOTHILL: Publ Met Soc., 184 (1977), p. 221
- 105) 三好俊吉, 阪本英一, 伊藤雅治, 本田 旭, 安斉孝儀, 石川 勝: 鉄と鋼, 65 (1979), S 756
- 106) 石原和雄, 阪根武良, 福島佳春, 小玉 宏, 小泉孝, 杉谷泰夫, 中井 建: 鉄と鋼, 66 (1980), S 746
- 107) 木村智明: 第 69 回西山記念技術講座, p. 353
- 108) 伊藤雅治: 鉄鋼界, S 55. 10, p. 58
- 109) R. W. HAZELLETT: Iron Steel Eng., 52 (1975), June, p. 254
- 110) 小泉真人, 菊池 勁, 板東誠志郎: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1123