

連続鑄造技術の進歩と連鑄材の品質



伊藤 幸良*

Current Status of Continuous Casting Technology and Quality

Yukiyoshi ITOH

1. ま え が き

連続鑄造法は鋼塊法に比較して、(1)高歩留り、(2)省エネルギー、(3)材質の均一性、(4)納期短縮、などのメリットを有するため、鋼の連鑄化が積極的に進められてきた。とりわけ、1973年の石油危機に端を発した省エネルギーの要請は連鑄化に拍車をかけた。図1¹⁾に主要国の鋼の連鑄比率の推移を示したが、我が国の連鑄化は他を圧し、1984年にはついに90%を超え、鉄鋼の国際競争力の強さの主要因となつている。また、図2²⁾に示すように鋼材の平均歩留りも連鑄化とともに上昇し続け、1984年は91.3%と極めて高い値に到達した。この鋼材歩留りの上昇は10年間で約6%であり、優に大型一貫製鉄所一つを節約したことになる。

本報告では薄板用スラブ連鑄法を主な対象として、このような高い連鑄比率を達成した技術の発展と連鑄材の品質の特徴を概説し、将来の技術方向を展望する。

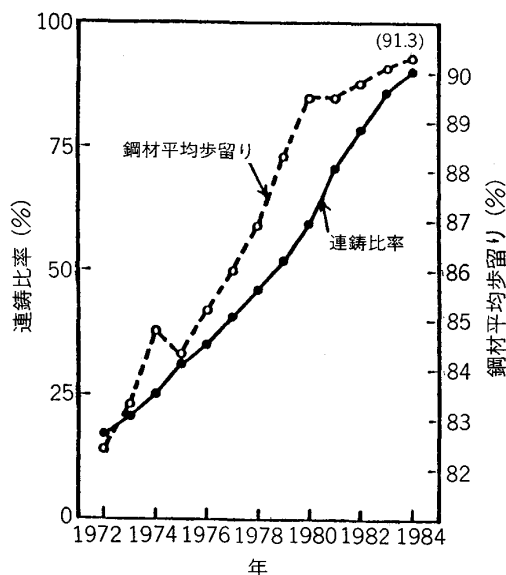


図2 我が国の連鑄比率および鋼材歩留りの推移

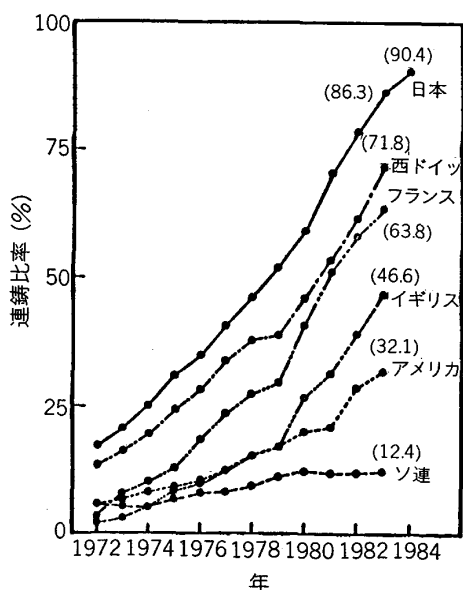


図1 各国の連鑄比率の推移

2. 量産鋼の連鑄化

導入当初の連鑄法は生産性が低いため、歩留向上メリットの大きいステンレス鋼で最初に企業化され、次いで電炉業界に普及した。転炉量産鋼に連鑄法が本格的に採用されるようになったのは石油危機以降である。転炉鋼の連鑄化を可能とし全体の連鑄比率を90%以上にした技術ポイントは、(1)大型転炉の生産性にマッチングする高生産性連鑄技術の確立および(2)量産鋼の大半を占めるリムド鋼を品質面およびコスト面を満足させつつ連鑄化する技術の確立であつた。

2.1 生産性向上技術

連鑄機の実生産性は表1に示すように鑄造速度と鑄造時間率の積で表示できる。

高速鑄造では鑄片シェルが薄く強度不足によるブレークアウトが懸念されるため、鑄型直下のガイド方式が重要で、ロール保持に代わつてクーリングプレート、クーリンググリッドなどの面保持³⁾が多く採用され、さらに

昭和60年10月本会中国・四国支部学術講演会にて講演 昭和61年2月5日受付 (Received Feb. 5, 1985) (依頼解説)

* 新日本製鉄(株)製鋼研究センター部長研究員 工博 (Steelmaking Technology Lab., Nippon Steel Corp., 1-1-1 Edamitsu Yahata-higashi-ku Kitakyushu 805)

表 1 連鑄生産性向上技術

高 速 鑄 造	1. 鑄型直下のサポート技術 2. 高速鑄造用 powder 3. 品質劣化防止技術
鑄造時間率向上	1. 多連鑄技術 2. 準備時間の短縮 3. 鑄造事故の減少 4. 故障復旧時間の短縮 5. 設備診断技術

(生産性=鑄造速度×鑄造時間率)

ウォーキングバー⁴⁾を装備する例もある。また、高速鑄造下ではパウダーの熔融、消費不足により鑄片-シェル間のスティッキングが発生し、拘束性ブレイクアウトを誘発する可能性がある。このスティッキングを抑制するためには 0.3 kg/m² 以上のパウダー消費の確保が必要とされ、LiO₂ を添加した低軟化点、低粘性のパウダーの使用⁵⁾ や非サイン波オシレーションの採用⁶⁾ により最高 2.5 m/min の高速鑄造を達成している。一方、高速鑄造は介在物、内部割れなどの品質欠陥を助長する傾向にあり、これら品質劣化防止対策の強化も必要となる。

鑄造時間率の向上については、各種鑄造用耐火物、鑄造中鑄型幅変更、異鋼種連連鑄などの技術開発による多連鑄技術確立の寄与が大きい。さらに生産現場におけるきめ細かい操業管理による事故、故障の減少などが必要である。各社が鑄造時間率向上に積極的に取り組んでおり、90% を超える鑄造時間率を達成している例もある⁴⁷⁾。

2.2 リムド相当鋼の連鑄化

リムド鋼の連鑄については過去にいくつかの試みがなされたが^{7)~9)}、ブローホール性欠陥などの品質上および鑄型内溶鋼の突沸のような操業上の制約から工業化されていない。むしろリムド鋼相当の軟質材をコスト上昇なしに、いかに製造するかが技術課題となつている。

この分野での草分け的な技術となつたのは米国 US Steel 社のリバンド鋼 (Riband 鋼)¹⁰⁾ である。Riband 鋼の基本特許では表 2 に示す組成の鋼を連続鑄造することが第 1 の請求範囲になつている。この技術のポイントは低 C 領域においては比較的微量の Si によつて凝固時のブローホール生成を抑制できる事実の発見にある。Riband 鋼の出願は 1965 年であるが、その基礎理論ともいべき論文が同年 TURKDOGAN によつて発表されている¹¹⁾。Riband 鋼の技術は我が国に導入され、連鑄による冷延鋼板および表面処理鋼板用リムド相当鋼の製造に適用され、一時期転炉量産鋼の連鑄化に貢献した。

しかし、Riband 鋼のような Si 脱酸鋼は Mn シリケート系介在物のため熱延鋼板への適用は困難であり、ま

表 2 Riband 鋼の成分範囲 (%)

C	0.01-0.08
Mn	0.20-0.60
Si	0.03-0.08
Al	<0.015

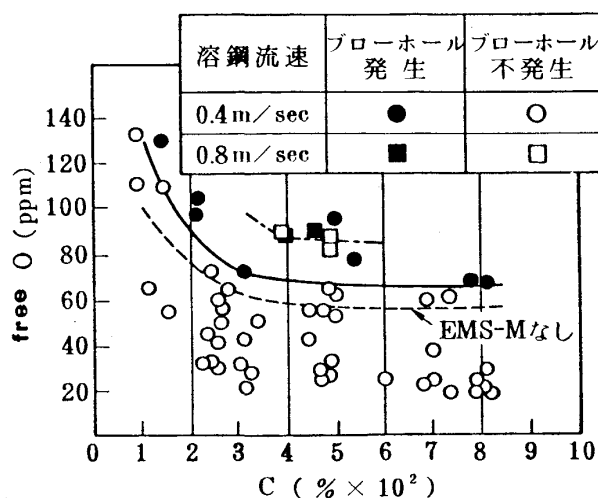


図 3 ブローホール発生限界組成におよぼす EMS-M の効果

た鋼中 Si による冷延製品のテンパーカラーや Si あるいは Al による亜鉛めつき密着性などの問題が明らかとなり、Si フリーで最小限の Al によつて脱酸する鋼種の開発が望まれるようになった。新日鉄大分製鉄所では、このような背景から転炉吹錬-RH 処理-連続鑄造-スラブ精整にわたる一連の技術により、0.006% Al という低 Al で脱酸された汎用リムド相当鋼を開発し、安定した製造をおこなつている¹²⁾。

さらに、新日鉄広畑製鉄所において鑄型内電磁攪拌法 (EMS-M) を活用し鑄型内溶鋼に流動を与えることにより、弱脱酸鋼のブローホール発生を抑える検討がなされた¹³⁾。図 3 はブローホール発生限界組成におよぼす EMS-M の効果を示したもので、ブローホールが発生しなくなる限界鋼中 Free O レベルは、EMS-M なし (図中点線) に比べて溶鋼流速 0.4 m/s (実線) で約 10 ppm、0.8 m/s (一点鎖線) で約 30 ppm 上昇しており、EMS-M により弱脱酸鋼の連鑄が可能となつている。同所では Sol. Al 0.004% 以下でリムド相当鋼の連鑄を達成した。

3. 連鑄材の品質

3.1 連鑄材の品質の特徴

連続鑄造法 (CC) と鋼塊法 (IC) では凝固圧延条件に相違があり、その結果として図 4 に示すように連鑄材は鋼塊材に比べていくつかの品質上の特徴をもつている。

連鑄材の品質の特徴の第一は、鑄造断面が小さく、強制冷却をうけるために鑄塊の凝固速度、冷却速度が大きく、鋼塊に見られる頭部濃厚偏析や底部沈澱品帯負偏析のようなマクロ偏析がなく、成分分布が均一であるということである。このような鑄片から製造される薄鋼板の化学成分はコイル内変動、チャージ内変動が極めて少なく均質である。富田ら¹⁴⁾は連鑄法によつて製造された中

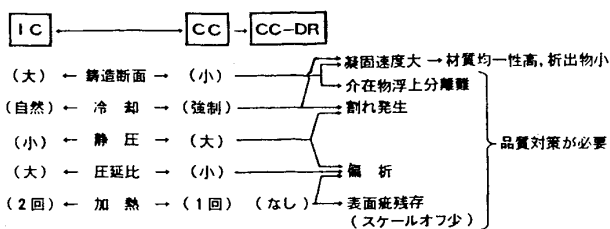


図 4 連铸材の品質の特徴

炭素 Si-Al キルド鋼熱延鋼板の成分分布を調査し、その均質性を認めるとともに、圧延工程において鋼塊材に比べて耳延び、内延びの少ない良形状の鋼板が得られると述べている。

連铸材の均質性に関してはブルームについての報告が多く¹⁵⁾、たとえば棒鋼のジョミニー試験によつて連铸材は軸心部においても、ジョミニーカーブのチャージ内ばらつきが極めて小さいことが報告されている¹⁶⁾。

リムド鋼に代わる軟質連铸材は、リミング・アクションによるリム層の形成がないために鋼板の幅方向の均質性が高い。図 5 にリムド鋼塊材および連铸材のぶりきの幅方向の硬度分布の比較例を示した。図中、T, M, B は鋼塊の頭部、中央部、底部相当位置を示す。連铸材の硬度は極めて狭い範囲に安定しており、均質性の面での連铸材の優位性が明瞭である。

連铸材の品質の第二の特徴は、凝固速度が大きいことにより、MnS およびその他の析出物が小さく分布することである。SCHWERDTFEGER は 50 kg および 1 t 鋼塊の各位置における固相線温度の冷却速度を実測し、その位置における MnS の大きさ (r) との関係进行调查し、MnS は冷却速度の上昇とともに小さくなり、両者の間に (1) 式が成立することを明らかにした¹⁷⁾。

$$r(\mu\text{m}) = 2.08(-dT/dt)\bar{T}_{solidus}^{0.38} \dots\dots\dots (1)$$

一般に、MnS および析出物が小さいことは製品の材質上望ましいことであるが、例外として快削鋼の切削性におよぼす MnS の影響がある。図 6 は鋼塊材および連铸材から製造された 80 mmφ 棒鋼の 1/2 r 部における MnS のサイズと铸型厚との関係を示したもので¹⁸⁾、両者間には良い相関があり铸型厚が薄くなるにつれて

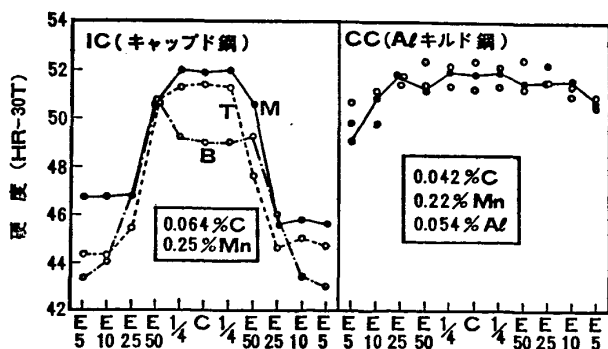


図 5 ぶりき(T2)の幅方向硬度分布

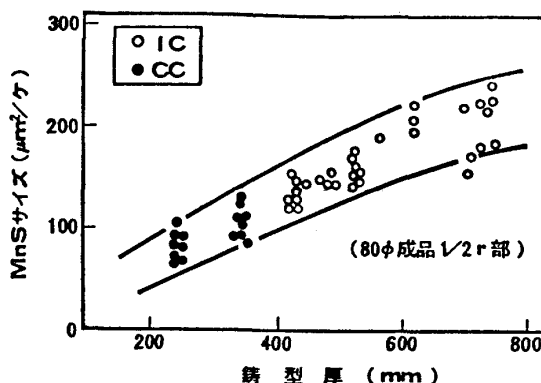


図 6 快削鋼の MnS サイズにおよぼす铸型厚の影響

MnS も小さくなつている。連铸材の MnS サイズは鋼塊材に比して小さく、ドリル寿命や旋削面粗さのような切削性に対して不利である。しかし、連铸材は圧延比が小さいため MnS の延伸が少なく、切削性は鋼塊材と同等であるとの報告例¹⁹⁾もある。

3.2 連铸材の欠陥とその防止技術

連铸法は凝固、圧延条件が鋼塊法と異なるため、前節で述べた品質の特徴に加えて、図 4 に示したように介在物、割れ、偏析 (中心偏析)、表面疵などの欠陥が発生しやすく、鋼塊法以上の品質対策が必要である。鋼塊法においても、最終製品の品質は基本的には鋼塊性状によつて決まり、「良いも悪いも鋼塊しだい (Everything gets back to ingot)」²⁰⁾といわれるが、鋼塊法が連铸法になりさらに連铸-圧延直結法 (CC-DR) になると、ますます铸塊の品質対策が重要となつてくる。

表 3 に連铸材の欠陥を示したが、これら諸欠陥の防止対策については本誌連続铸造特集号²¹⁾ および第 40・41 回西山記念技術講座で詳細に取り上げているので、本報告では最近の動向を簡単に述べるにとどめる。

非金属介在物の低減については、転炉、取鍋、タンデュー、連铸機にわたる広範な対策がとられている。これら介在物低減対策をまとめて表 4 に示した。

転炉においてはスラグの取鍋への流出防止が重要で、スラグボールをはじめ各種のスラグカット技術が採用されているが、スラグ流出を完全に抑えることは困難であり、取鍋へ流出したスラグを生石灰投入などにより改質する方法が併用されることが多い。最近、流出スラグを

表 3 連铸材の欠陥

表面欠陥	ひび割れ 横割れ 縦割れ 非金属介在物 (アルミナクラスター、ノロかみ) 気泡
内部欠陥	中心偏析 内部割れ 非金属介在物

表 4 介在物低減対策

工 程	対 策
転 炉	<ol style="list-style-type: none"> 1. 鋼中酸素低減 終点成分規制 低温出鋼 2. スラッグカット
取 鍋	<ol style="list-style-type: none"> 1. スラッグ除去 2. スラッグ改質 3. フラックスインジェクション 4. 真空脱ガス
タンディッシュ	<ol style="list-style-type: none"> 1. 大容量タンディッシュ 2. 再酸化防止 ロングノズル 密閉タンディッシュ 3. 堰 4. Ar パブリング 5. セラミックフィルター
連 鋳 機	<ol style="list-style-type: none"> 1. レベルコントロール 2. 鋳造速度規制 3. CCパウダー 4. 垂直曲げ連鋳機 5. 電磁ブレーキ 6. 鋳型電磁攪拌

真空吸引方式(VSC)によつて積極的に除去する技術が開発されており、日本鋼管(株)福山製鉄所の例²²⁾では、VSC適用によりぶりきの磁粉操傷欠陥発生率が連鋳継ぎ目部を含めて全長にわたつて極めて低位に安定している。

取鍋ではフラックスインジェクション、真空脱ガス処理などの二次精錬による鋼の清浄化対策が広く採用されている。

タンディッシュにおいては、溶鋼再酸化防止および介在物の浮上分離のための諸対策が普及しているが、近年耐火物性フィルターによつて介在物を吸着分離する方法が各社で試みられている。フィルターによる介在物除去技術は従来からアルミニウム業界では広く採用されており、DI 缶用アルミニウム薄板の製造には不可欠であるといわれている。市橋ら²³⁾は小径多孔の耐火物フィルターによる鋼中介在物の付着分離の実験を報告している。その後、実連鋳機へのフィルターの適用試験が多く、フィルターとしてはセラミックフォームタイプ²⁴⁾²⁵⁾、セラミック多孔堰タイプ²⁶⁾およびカルシウム質フィルター²⁷⁾などが報告されている。セラミックフィルターの場合にはセラミック表面への介在物の吸着、カルシウム質フィルターの場合にはカルシウム層への介在物の浸透によつて介在物が分離されているようである。

連鋳機では、機内での介在物の浮上をはかるため、垂直曲げ型の連鋳機の採用や、鋳造速度の規制がおこなわれ、パウダーの巻込み防止のためにレベルコントロールやパウダーの改質がはかられている。さらに、注入流による介在物の侵入深さを減少するためのノズル形状の改善、電磁ブレーキの適用などがおこなわれている。川崎製鉄(株)水島製鉄所では電磁ブレーキの適用により、スラブ上面側の介在物集積量が半減し、垂直型連鋳機と同程度になると報告している²⁸⁾。

連鋳スラブの表面割れにはスタークラック、横割れ、縦割れがある。スタークラックは鋳型内面の Ni または

Ni 合金めつきによつて解決されている。

横割れはスラブの矯正時にオンレーションマークの谷部に沿つて発生することが多く、その防止策として矯正点における鋳片表面温度が脆性領域²⁹⁾を避けるように二次冷却をコントロールする方法が採用されている。また、高サイクルのオンレーションによつてマークの深さを減らすことも横割れ防止に有効である。

縦割れは鋳型内で発生し二次冷却帯で拡大すると考えられ、縦割れ防止法としては、鋳型テーパの最適化、パウダーの改善、鋳型下の気水冷却による均一緩冷却などが採用されている。鋳型表面にスリットをつけ、鋳型の抜熱を減少させることによつて縦割れを低減している例³⁰⁾もある。

スラブの内部割れはバルジングのロールによる矯正、スラブの未凝固矯正などによつて発生するため、ロールピッチの縮小、多点矯正、圧縮鋳造などの防止策がとられている。

連鋳片特有の中心偏析は、バルジングや凝固収縮による凝固末期のデンドライト間残溶鋼の流動が成因と考えられ、鋳造組織の微細等軸晶化をはじめとした溶鋼流動阻止がはかられている。鋳造組織の等軸晶化のためには各種の電磁攪拌法³¹⁾³²⁾が採用され、中心偏析の改善に効果をあげている。しかし、一部の高級厚板用スラブではこの対策では不十分であり、残溶鋼の流動を積極的に抑えるため、凝固完了点近傍へ小径分割ロールを設置してバルジングを抑制する方法³³⁾や凝固収縮分に見合った圧下をおこなう軽圧下鋳造³⁴⁾が採用されている。

薄板用スラブ連鋳に関してみると、現在鋳片の欠陥は大幅に改善されているが、最終需要家の品質要求が厳しくなつてきていることもあつて、非金属介在物については今後もその低減努力が必要である。

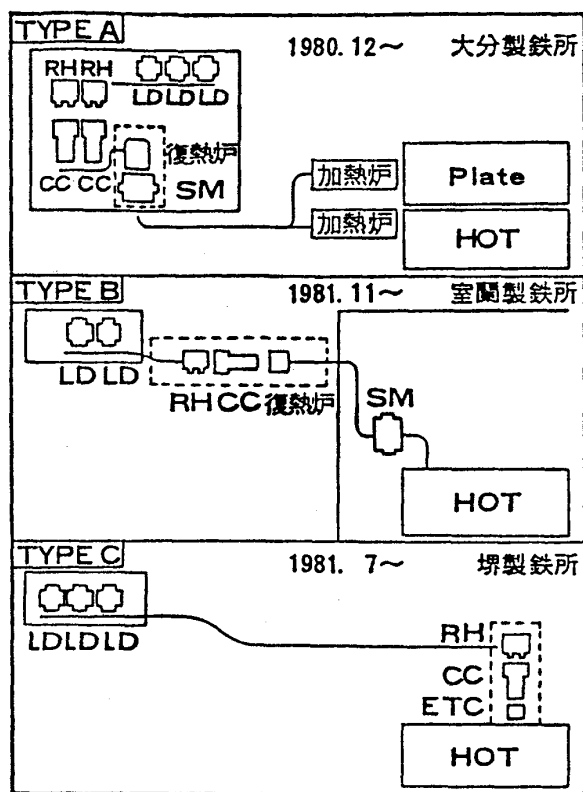
4. 薄板用連鋳法の将来

鋼の連続鋳造法はその高い連鋳比率からもうかがえるようにほぼ完成期にあるといえる。薄板用スラブ連鋳技術の今後の方向は、省エネルギーの徹底の観点からの連鋳-圧延直結法の普及と、さらに進んで熱間圧延工程の簡略化ないしは省略化をねらつた Near net shape 連鋳法の開発であろう。

4.1 連鋳-圧延直結法

連鋳片を高温のまま加熱炉へ装入する熱片装入技術は広く普及しており、さらに省エネルギーの向上をはかるべく連鋳-圧延直結技術(CC-DR)が開発されている。

新日本製鉄では図7に示すように、三製鉄所の工場レイアウトに対応する三つのタイプの CC-DR 法を開発し、省エネルギーの効果をあげるとともに連鋳機端からコイルまでの工期の大幅な短縮を達成している³⁵⁾。このような CC-DR 法を支える技術は表5のとおりであり、とりわけ、無欠陥鋳片製造技術および高温鋳片製造



SM : Sizing Mill
ETC : Edge Temperature Compensator

図 7 新日鉄における連鋳-圧延直結プロセス例

表 5 製鋼-圧延直結プロセスを支える主要技術構成

無欠陥鋳片製造技術	1. 湯面レベル制御 2. 気水噴霧冷却 3. 緩冷却 CPC (Compression Casting)
高温鋳片製造技術	1. 未凝固復熱法 2. クレーターエンド制御 3. 機内保温, 機外保温 4. 端部温度補償装置
鋳片幅変更技術	1. 高速幅可変鋳型 2. サイジングミル
連熱工程における圧延機の温度確保技術	1. 圧延ラインでの熱放散減少技術 2. 幅方向端部の温度確保技術
生産工程管理技術	1. 品質保証システム 2. 品質保証用機器

技術がポイントとなっている。

日本鋼管(株)福山製鉄所においても CC-DR 法をねらった 5号連鋳機が昭和 59 年 9月に稼動し、高温鋳片を得るために最高 2.5 m/min の高速鋳造をおこなっている³⁶⁾。

CC-DR 法においては高温出片が必須であり、当然機内での鋳片のバルジングが発生しやすい。このバルジング防止の技術策として溶鋼静圧を小さくできる低機高のローヘッド連鋳機が有効である。ローヘッド連鋳機についてはすでに、西独 Mannesmann 社³⁷⁾および住友金属鹿島製鉄所³⁸⁾の報告例がある。最近、新日本製鉄では CC-DR をねらった円弧半径 3m の超ローヘッド連鋳機の開発に成功したと報告している³⁹⁾。

CC-DR 法は省エネルギーのために今後ますます普及するであろうし、その手段の一つとしてローヘッド連鋳機の採用も進むものと考えられる。

4.2 Near net shape 連鋳法

近年、鋼の連続鋳造法における省エネルギーの極限追究をめざして、Near net shape 連鋳法の開発が盛んであり、薄板用についても各国で積極的に研究が開始されている。とりわけ、米国と我が国において薄スラブ連鋳法およびストリップ連鋳法の研究が活発である。鋼の連鋳法の元祖といわれる H. BESSEMER の提唱した方法⁴⁰⁾が、双ロール法によるストリップ連鋳法であつたことは興味深い。

図 8 は我が国で公開されたアモルファスを除いた薄板用 Near net shape 連鋳法の特許数の推移を示したもので、昭和 58 年以降件数が急増しており、研究開発の活発化がうかがえる。日本鉄鋼協会昭和 60 年秋季講演大会討論会において、各社から薄板用 Near net shape 連鋳法の開発状況が報告された⁴¹⁾。鋳片厚 10~40 mm の薄スラブ連鋳法として双ベルト法が川崎製鉄および住友金属から、ストリップ連鋳法として双ロール法が新日本製鉄、川崎製鉄、神戸製鋼および日本鋼管から、Melt drag 法の一つとみられる異径双ロール法が日本金属工業から発表された。我が国におけるストリップ連鋳法の開発は双ロール法に集中しているようである。これら発

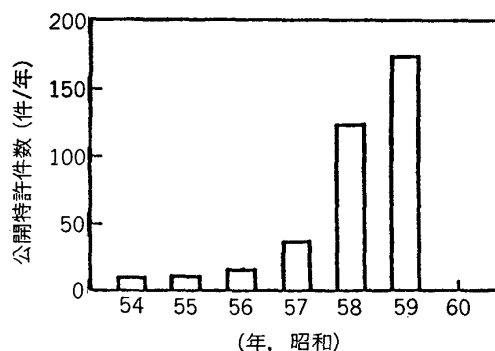


図 8 我が国における薄スラブ連鋳法およびストリップ連鋳法の特許出願状況

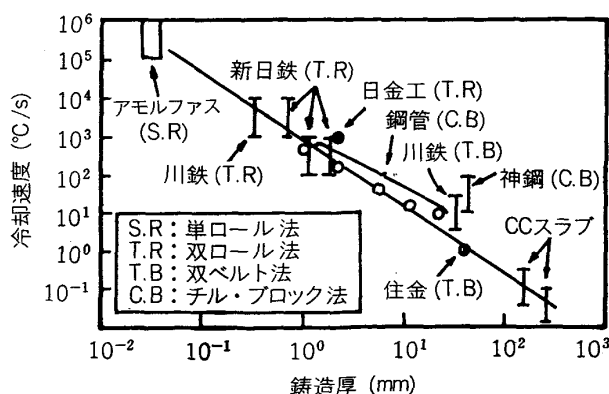


図 9 鋳造厚と冷却速度との関係

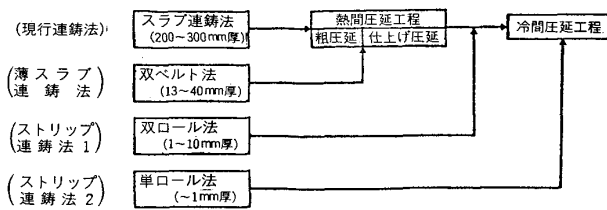


図 10 Near net shape 連鑄法による工程省略

表資料から鑄片の冷却速度を評価し、鑄造厚との関係を図 9 に示した⁴²⁾。冷却速度 (G) は鑄造法の種類によらず鑄造厚 (d) によつて一義的に決まつており、両者の間には (2) 式の関係が成立する。鑄造厚 1 mm 以下では 10^3 C/s 以上の冷却速度となり、鋼種によつては急冷による材質上の効果も期待される。

$$G = 803 d^{-1.76} \dots \dots \dots (2)$$

米国における薄板用 Near net shape 連鑄法の開発状況については、ここ一、二年の雑誌、新聞で頻りに報じられている^{43)~46)}。これらの情報によると、米国エネルギー省の資金援助をうけて、US Steel 社および Bethlehem Steel 社が Hazelett 方式の双ベルト法により 13~40 mm 厚×1 830 mm 幅の薄スラブ連鑄法の開発を開始し、Westinghouse Electric 社および Armco 社が単ロール法による 0.8~3 mm 厚のストリップ連鑄法の開発を始めたようである。一方、Allegheny Ludlum Steel 社は単ロール法による 18Cr-8Ni ステンレス鋼の鑄造試験に成功し、一、二年中には商業生産に入ると報じ、大手ミニミルの Nucor 社は Hazelett 連鑄機を導入し 38 mm 厚×1 320 mm 幅の薄スラブ連鑄法の開発をおこなう計画を発表している。米国のストリップ連鑄法の開発は我が国と異なり単ロール法指向である。

薄板用 Near net shape 連鑄法の開発の現状を参考に、これらを分類し工程省略との関連を整理すると図 10 のとおりで、双ベルト法を主とする薄スラブ連鑄法は熱延の粗圧延省略を、双ロール法によるストリップ連鑄法は熱延の仕上げ圧延工程の省略をねらつており、より薄手指向の単ロール法は冷延の一部簡略化までもねらつたものといえる。

いずれにしても、薄板用 Near net shape 連鑄法の開発は今後ますます加速されるであろう。

5. む す び

薄板用スラブ連鑄法を主な対象として、我が国の 90 % を超える連鑄比率を可能にした量産鋼の連鑄化技術すなわち、生産性向上技術および量産鋼の大半を占めていたリムド鋼に相当する軟質材の連鑄技術について述べた。ついで、連鑄材の材質上の特徴に触れ、さらに連鑄材特有の品質欠陥およびその防止策の最近の技術を概説した。最後に、薄板用連鑄法の将来の技術発展の方向として、連鑄-圧延直結法および Near net shape 連鑄法

について述べた。

本小文は、日本鉄鋼協会中国・四国支部学術講演会における講演内容に若干の筆を加えたものである。

文 献

- 1) 鉄鋼統計要覧 (日本鉄鋼連盟編) (1984) 24
- 2) 日刊工業新聞 (1985 年 7 月 16 日)
- 3) 堀 珊吉: 第 40・41 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1976), p. 59
- 4) 野崎輝彦, 高谷 成, 南野清一: 神戸製鋼技報, 24 (1974) 2, p. 101
- 5) 宮脇芳治, 半明正之, 内田繁孝, 寺岡卓治, 白谷勇介, 石田寿秋: 鉄と鋼, 70 (1984), S143
- 6) 鈴木幹雄, 北川 融, 内田繁孝, 政岡俊雄, 小澤宏一, 森 孝志: 鉄と鋼, 71 (1985), S1026
- 7) G. M. ITSKOVICH and V. B. GANKIN: Stal in Eng. (1961), p. 407
- 8) M. TENENBAUM, C. F. SCHRADER and L. MAIR: JISI, 191 (1959), p. 20
- 9) I. EARNSHAM, J. M. YOUNG and B. G. BOLDVIN: Elec. Fur. Conf. Proc., 24 (1966), p. 41
- 10) 米国特許 No. 3412781 (1968 年 11 月)
- 11) E. T. TURKDOGAN: Trans. AIME, 233(1965), p. 2100
- 12) 河野拓夫, 長澤元夫, 椿原 治, 細野和典, 江坂一彬, 石飛精助: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 1241
- 13) 竹内栄一, 藤井博務, 大橋徹郎, 丹野 仁, 高尾滋良, 古垣一成, 喜多村治雄: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 1615
- 14) 富田昭津, 副島利行, 小山伸二, 平田靖彦: 神戸製鋼技報, 24 (1974) 4, p. 40
- 15) 伊藤幸良: 第 69・70 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1980), p. 259
- 16) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 60 回特殊鋼部会 (1979 年 11 月) 新日本製鉄(株) (私信)
- 17) K. SCHWERDTFEGER: Arch. Eisenhüttenwes., 43 (1972), p. 201
- 18) 大谷三郎 (私信)
- 19) 上杉浩之, 荒木正和, 山本義治, 西村 隆, 和田芳信, 岡野 忍, 峰 公雄, 新庄 豊, 大森尚: 鉄と鋼, 68 (1982), A85
- 20) 前田元三: (私信)
- 21) 鉄と鋼, 67 (1981) 8
- 22) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 91 回製鋼部会 (1985 年 7 月) 日本鋼管(株) (私信)
- 23) 市橋弘行, 川島康弘, 池田隆果: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 705
- 24) 中尾隆二, 竹内英麿, 鈴木康夫, 森重博明, 有吉春樹, 小舞忠信: 鉄と鋼, 71 (1985), S991
- 25) 山田桂三, 渡部十四雄, 福田和郎, 河原木武志, 田代時夫: 鉄と鋼, 71 (1985), S992
- 26) 田口喜代美, 半明正之, 山上 諄, 鈴木克紀, 松尾和彦, 山田末広: 鉄と鋼, 71 (1985), S993
- 27) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 91 回製鋼部会 (1985 年 7 月) 日新製鋼(株) (私信)
- 28) 永井 潤, 児玉正範, 新良正典, 村田賢治, 鈴木健一郎, 中西恭二: 鉄と鋼, 69 (1983), S911
- 29) 鈴木洋夫, 西村 哲, 山口重裕: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 2038
- 30) 中井 健, 坂下 勉, 川崎守夫, 丸川雄浄, 奥田美夫: 鉄と鋼, 71 (1985), S150
- 31) 児玉正範: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 1043

- 32) 副島利行, 吉井賢太, 河合健治, 中峠 宏, 横山秀樹, 石倉俊之: 鉄と鋼, 71 (1985), S 1032
- 33) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 89 回製鋼部会 (1984 年 11 月) 新日本製鉄(株) (私信)
- 34) 楯 昌久, 石黒守幸, 小森重喜, 村上勝彦, 福田有: 日本鋼管技報, 79 (1978), p. 1
- 35) 竹村洋三, 溝口庄三, 椿原 治, 桑原達郎, 斉藤実: 製鉄研究 (1982) 310, p. 251
- 36) 小谷野敬之, 内田繁孝, 瀬良泰三, 政岡俊雄, 森孝志, 鈴木幹雄: 鉄と鋼, 71 (1985), S 157
- 37) K. WÜNNENBERG and K. FRENKEN: Stahl Eisen, 95 (1975), p. 733
- 38) 杉谷泰夫, 橋尾守規, 川崎守夫, 木村智彦, 坂下勉: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 1145
- 39) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 92 回製鋼部会 (1985 年 11 月) 新日本製鉄(株) (私信)
- 40) H. BESSEMER: Stahl Eisen, 11 (1891), p. 921
- 41) 鉄と鋼, 71 (1985), A 197, A 200, A 204, A 209, A 213, A 217, A 221, A 225, A 229, A 233, A 237, A 241, A 245, A 249, A 253
- 42) 笠間昭夫 (私信)
- 43) Metal Bulletin (1984 年 9 月 21 日), (1985 年 6 月 11 日)
- 44) Steel Times International (1984) Dec.
- 45) 33Metal Producing (1985) Mar.
- 46) American Metal Market (1985 年 6 月 6 日), (1985 年 9 月 23 日)
- 47) 田口喜代美, 白谷勇介, 半明正之, 石川 勝, 政岡俊雄: 鉄と鋼, 67 (1981), S 168