

# 連続铸造技術の動向と今後の展望

## Trends in Continuous Casting Technology and Future Prospects

奥村 裕彦<sup>(1)</sup>  
Hirohiko OKUMURA

### 抄 録

わが国の連続铸造比率は、1970年代に連続铸造法の基本的な設備・操業技術が確立され、わずか10年の間に6%から60%まで連続铸造比率が向上した。1980年代以降は、鋼材に対する要求品質の高度化に併せて品質向上対策が進められるとともに、生産性向上、省力化が進展し、わが国の連続铸造比率は95%を越え、新日本製鐵ではほぼ100%連続铸造化され、一部の極厚製品や大単重製品を残すのみとなった。本報では、導入から現在までの連続铸造技術向上の歩みを概説するとともに、この10年で急速に進歩、普及した技術として、タンディッシュ溶鋼加熱、鑄型内溶鋼流動制御、軽圧下技術、直送圧延に触れ、最後に、今後の展望として、社会経済環境が大きく変わろうとしている現在の課題であるさらなる生産性向上とNNSCC(Near Net Shape Continuous Casting)に言及した。

### Abstract

During only 10 years after the establishment of the basic equipment and operating technology for continuous casting in the 1970s, the continuous casting ratio in Japan was increased from 6 to 60%. Since the 1980s, various measures for quality improvement have been taken to meet increasingly severe quality requirements for steel products and remarkable achievements have been made in the improvement of productivity and energy saving. The continuous casting ratio in Japan has exceeded 95%. Nippon Steel's continuous casting technology has advanced to where nearly 100% of the firm's crude steel, except only a small percentage of steel for extra-thick and heavy products, is now continuously cast. This paper outlines the advances achieved in continuous casting since its introduction to Japan up to now and describes the technologies which have made rapid progress and found wide application in the last ten years, such as in-tundish molten steel heating, in-mold molten steel flow control, soft reduction, and hot direct rolling. Finally, the future outlook of continuous casting is discussed, touching on the future prospects for further improvement of productivity and the NNSCC (Near Net Shape Continuous Casting) technology being now developed to meet the rapidly changing social and economic environments.

### 1. はじめに

連続铸造(以下、連铸と記す)法の原理は1847年のH. Bessemer(英国)の試験連铸機にまでさかのぼるが、鋼への適用は1947年のJunghans(旧西ドイツ)の試験連铸機が最初である。彼の一連の発明は下端開放の水冷却鑄型、鑄型振動法、鑄型潤滑剤の使用、浸漬ノズル適用等、現代連铸法の要素技術の骨格的部分から構成されていた。

その後、主にドイツ、オーストリアを中心とする欧州で試験機の開発が進められたが、わが国では住友金属工業(株)がConcastグループに参画して1955年に日本における一号機を設置したのが最初である。その後の10年間は生産性、経済性面で当時主流の造塊～分塊圧延法を越えることはなく、連铸法が顕著に普及することはなかった。しかし、1970年代以降になると、連铸法は図1に示すような種々の技術開発に支えられて飛躍的に普及していった。

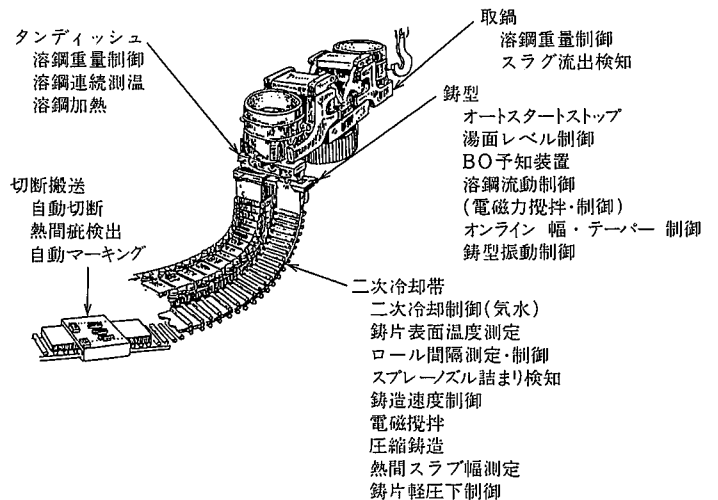


図1 連铸法を支える要素技術

<sup>(1)</sup> 技術本部 製鋼技術部 掛長

連続製造法は、表1に示すように、造塊～分塊圧延法と比較して、生産性、歩留、省エネルギー、省力化、品質向上等の面で格段の優位性を持っている。このことから、経済の高度成長期における鉄鋼需要に応えるとともに、二度にわたる石油エネルギー危機を克服するのに有効な技術として、わが国を初めとして世界的に急速に導入され、普及していった。

わが国の連続製造法の足跡を振り返ると大略10年毎の四つの時期に分別することができる。

第一期（1960年代）— 工業的連続製造法の確立期

- ・ビレット、ブルーム連続機を中心に実用化され、連続の基本技術が蓄積された。

第二期（1970年代）— 大型化・発展期（図2参照）

- ・スラブ連続機が相次いで導入され、適用鋼種も飛躍的に拡大した。1970年に5.6%だった連続比率は1979年には52%に伸びており、全連続製鉄所として建設された新日本製鉄大分製鉄所はこの“大型化・発展期”の象徴と言える。

第三期（1980年代）— 技術成熟期（図2参照）

- ・高級鋼製造のための技術が次々に確立され、ほとんど全ての鋼種に連続製造法が適用可能となり、80年代後半には連続比率はついに95%に到達した。

第四期（1990年代）— 新連続製造法の揺籃期

- ・薄スラブ連続、ストリップ連続等の熱間圧延工程を省略する新連続製造法が盛んに開発されており、薄スラブ連続法ではホットコイルの商業生産がNucor社（米国）、Arvedi社（伊）で開始された。

表1 連続製造法と造塊～分塊圧延法の比較

	連続製造法	造塊～分塊圧延法
1.生産性（溶鋼～スラブ）	30分～60分	1～2日
2.歩留（溶鋼～スラブ）	96～99%	80～90%
3.省エネルギー	1/2～1/4	ベース
4.省力化	6～10人/シフト	20～30人/シフト
5.建屋面積の減少	1/3以下	ベース
6.その他	造塊～分塊圧延法に対して鋼材の均質化と品質向上が図られると同時に、過酷な労働負荷が大幅減少	

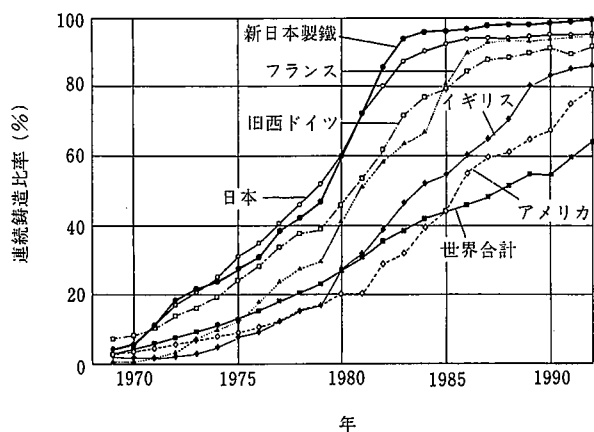


図2 連続製造比率の推移

2. 連続製造法発展の技術的背景

次に、このような発展を遂げてきた連続製造法の技術的背景について、高生産性、省エネルギー、鋼種拡大、高品質化の四つの観点から述べる。

2.1 高生産性

連続製造法は当初、電気炉普通鋼にいち早く採り入れられた。この理由は、連続製造法の生産性が電気炉の生産性に比較的適応していたこと、並びに製品歩留の向上及び品質改善効果が著しいことによるものであった。

一方、転炉鋼については、第二期の70年代に入って一挙に開花した。これを可能にした要素技術には、連々鑄による稼働率向上、高速製造技術、鑄造準備時間や事故休止時間の短縮、浸漬ノズルの長寿命化等の耐火物技術の進歩、鑄造中の鑄片幅の変更及び異鋼種連々鑄技術の確立等々、操業、設備、資材など各分野の様々な技術が挙げられる。

2.2 省エネルギー

1973年と1978年の二度にわたる石油危機は、わが国の連続製造技術の発展に決定的な影響を及ぼした。第一次石油危機は、折しも、連続比率が20%という発展初期にあたり、省エネルギー化の強い社会的要請を背景に、連続製造法が最も効果的なプロセスであるとして、適用鋼種の拡大に拍車がかかった。更に、連続鑄片を熱間圧延工場の加熱炉へ直接装入するHCR(Hot Charged Rolling)を可能にするための鑄片表面品質向上技術を急速に発展させることとなった。

第二次石油危機時には連続比率は50%に達していたが、HCRを一層発展させた連続～熱延間のHDR(Hot Direct Rolling)が新日本製鉄堺製鉄所で開発、実用化され、世界でも例を見ない省エネルギーを実現した。

このHCR、HDRの進展は、鑄片表面疵生成原因の科学的解明、連続パウダーの改善、鑄型内湯面制御技術、圧縮鑄造技術、稠密ロールの採用、気水冷却法、及び鑄片断熱・加熱技術等による高温無欠陥鑄片製造技術の開発によるところが大きい。

2.3 鋼種拡大

第二期の1970年代は、連続比率拡大の歴史そのものと言える。当初の連続化は、厚板を主体にキルド鋼から始まった。その後、鋼種拡大を進めていく上で薄板用のリムド鋼への適用が大きな課題となったが、この時期にリムド相当鋼としてSi-Mn脱酸鋼による連続製造法が冷延材へ適用され、一気に連続化が進展したことは特筆すべきことであった。更に、鑄型内へのAr吹込みによるAlキルド鋼の連続化が取り組まれたのもこの第二期の後半であり、表面処理鋼板等の高級薄板材へも連続製造法が拡大されるようになってきた。

第三期の1980年代は、残された高級鋼の連続化に力が傾注された。代表的な例としては、厚板では原子炉容器用、極低温・酸性環境用が挙げられ、高純化及び軽圧下技術の確立により連続化された。薄板では、シャドウマスク、ほうろう用鋼板等の弱脱酸鋼が鑄型内電磁攪拌等により連続化が進められた。又、ブルーム系では自動車用ばね、溶接棒用等の線材がシールドタンディッシュによる無酸化鑄造、タンディッシュ内溶鋼加熱、鑄型内電磁攪拌等により連続化が進展した。

2.4 高品質化

第二期（1970年代）から第三期（1980年代）にかけては、高品質化の歴史でもある。量産鋼でも、年を追う毎に市場の品質要求レベ

ルが厳格化するとともに、その使用環境もますます厳しくなり、品質の高度化なしには連続鋳率の向上も望み得なくなった。

このような視点に立って開発された技術には、この時期にめざましく発達した溶鋼処理技術をはじめ、介在物対策として、取鍋スラグ対策、耐火物の高級化、タンディッシュの断気化・多重堰化・溶鋼加熱、鋳型内溶鋼への電磁気力適用、鋳片表面割れ対策としては、鋳型冷却の適正化、鋳型内潤滑剤（パウダー）の改善、二次冷却帯における鋳片表面温度制御技術の確立、中心偏析対策としては、電磁攪拌技術、低温鋳造技術が先行し、近年では高級鋼に対して軽圧下技術適用等が挙げられる。

又、第三期には介在物や気泡浮上を促進する目的で、垂直曲げ（未凝固曲げ）型のマシンプロフィールが薄板用連続鋳機に導入され始めている。

### 3. マシンプロフィールの変遷

図3に、連続鋳機の種々のプロフィールを示す。

連続鋳機のプロフィールは、実用化された初期の1950～1960年代は構造上単純な垂直型が多く建設されたが、垂直型は、生産性を高めようとすると設備高さが非常に大きくなること、未凝固溶鋼の静圧が大きくなり鋳片バルジングを抑制することが困難なこと等の欠点を持っていた。

このため、1963年頃から生産性向上と設備のコンパクト化を目的として湾曲型連続鋳機が開発され始め、1960年代なかばから実機生産設備が欧州で稼働を開始した。わが国においても、1960年頃から設置が始まり、1970年以降、相次いで建設された連続鋳機はブルーム用、スラブ用とも大半がこの湾曲型である。

この湾曲型の次に1980年以降、脚光を浴びるようになったのが、垂直曲げ型連続鋳機である。垂直曲げ型としては、完全凝固後に垂直

から水平に鋳片を曲げる型式のものが垂直型と相前後して現れたが、ここで言う垂直曲げ型は、鋳型内湯面から垂直部が2～3m設けられており、その後、鋳片内部が未凝固の状態で湾曲させる型式である。

この垂直曲げ（未凝固曲げ）型は、垂直型の利点である介在物や気泡の良好な浮上性を確保しつつ、湾曲型の高生産性を同時に可能としたものであり、現在では、高潔浄性を要求される自動車用鋼板や飲料用素材等に使用される高級鋼板製造に必須の設備となりつつある。

一方、これらの垂直方向から鋳造する連続鋳機に対して、水平方向に鋳造する連続鋳機も1980年代に入ってビレット、ブルームを対象として、欧米の電炉メーカーを中心に開発、導入されてきた。わが国でもほぼ同時に開発、導入が始まり、規模の大きなものとしては1983年にNKK 京浜製鉄所で、1989年に新日本製鐵光製鐵所（図4参照）で稼働している。

水平連続鋳機は、その名の通り、タンディッシュ、鋳型、引抜きロール等が全て水平に配置され、建屋高さを従来の1/2～1/3に抑えることが可能となる。その結果、垂直方向に鋳造を開始する連続鋳機に比べ未凝固溶鋼の静圧が非常に小さくなることから、設備全体が大幅に簡素化され、建設コストが従来の1/3程度に抑えられる。又、タンディッシュに鋳型が直結しているためパウダーレス鋳造が可能となる。水平連続鋳機は溶鋼静圧が極めて小さいために注水冷却が不要なこと、湾曲型や垂直曲げ型に必要な鋳片曲げや曲げ戻しが不要なことが、鋳片品質上極めて有利な点となっている。

設備・操業技術上の最も大きな課題は、鋳型の最上流に設置されているブレイキング（セラミック製）で健全な初期凝固をいかに形成するかにある。光製鐵所においては、ACサーボモーター、バックラッシュレス減速機、高速マイクロプロセッサ等の採用により、

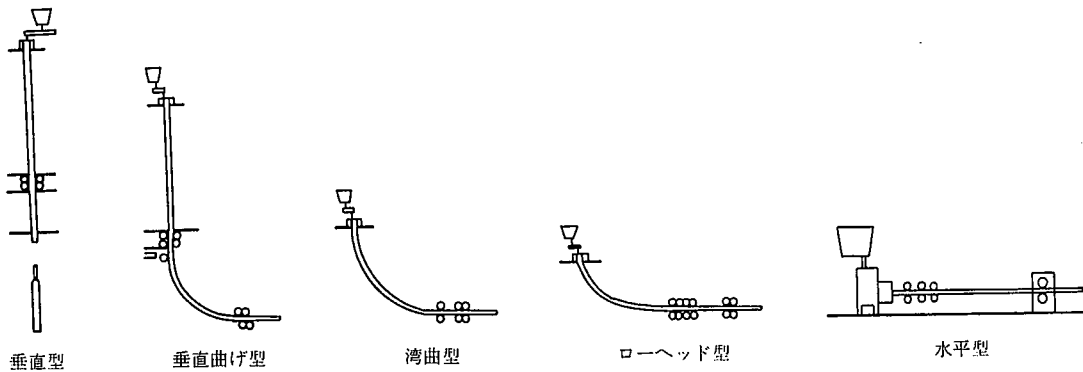


図3 連続鋳造機のマシンプロフィール

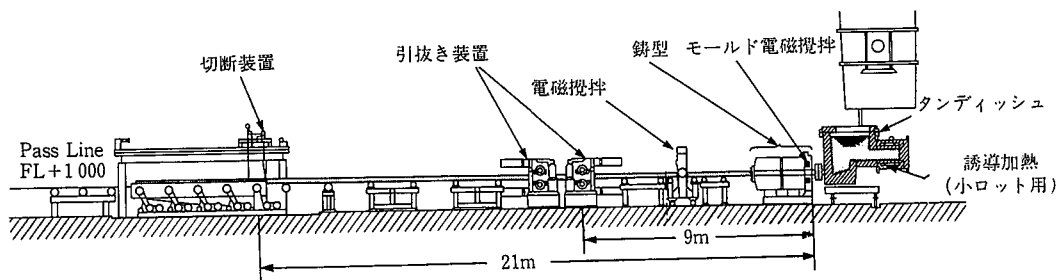


図4 光製鐵所の水平連続鋳造機

引抜き→停止→押し戻し→停止の鋳造サイクルを±0.1mmの精度で最適なパターンに制御し、水平連続鋳造特有のコールド・シャット・クラック、ホットテアを解決し、良好な品質のステンレス鋼鋳片を製造可能とした。

#### 4. 最近の主な技術動向

現在は第三期（1980年代）の技術成熟期を経て、第四期の新連続法の揺籃期に入ったところである。第三期以降に発展・完成された主要な技術を表2に示す。

ここでは、最近10年の間に特にめざましい進展を見せたタンディッシュにおける溶鋼加熱技術、鋳型内の溶鋼流動制御技術及び鋳片圧下技術などについて眺めてみたい。

##### 4.1 タンディッシュ溶鋼加熱技術

連続鋳造において、溶鋼温度は品質面、操業面において極めて重要な管理因子である。常に一定の範囲内に制御されることが望ましいが、実際の鋳造におけるタンディッシュ内の溶鋼温度は、精錬工程でのばらつきや鋳造中の経時的な温度低下（特に鋳造開始時、連々鋳の取鍋交換時、鋳造終了時の非定常部）のために一鍋毎に約15～25℃の温度変化が生じる。

このような温度低下部位に溶鋼加熱技術を適用すると、鋳造全体を通して温度変化を5～10℃の範囲に抑え、鋳造非定常部位の温度低下による品質悪化や浸漬ノズル閉塞等の操業トラブルを大幅に低減することが可能である（図5参照）。

このタンディッシュにおける溶鋼加熱技術には、誘導加熱方式とプラズマ加熱方式の二つがあり、新日本製鐵では、八幡、室蘭の製鐵所に誘導加熱方式が、広畑、名古屋の製鐵所にプラズマ加熱方式（図6参照）が実用化されており、今後一層の実機化が進むであろう（詳細は第21頁参照）。

##### 4.2 鋳型内溶鋼流動制御技術

鋳型内の溶鋼流動制御は、水冷銅板の後面に配置されたコイルによる電磁気力を用いて鋳型内の溶鋼を攪拌あるいはその流動を制御することによって行われる。

この鋳型内溶鋼流動制御の考え方は、当初、初期凝固殻の健全化

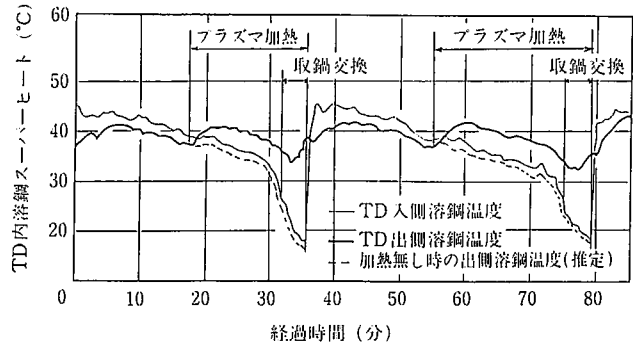


図5 タンディッシュ溶鋼加熱の効果

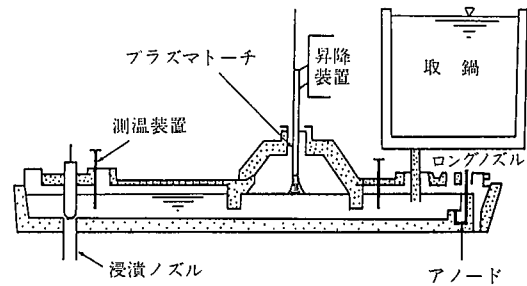


図6 タンディッシュ溶鋼加熱(プラズマ方式) 新日鉄・広畑

を図るために、新日本製鐵広畑製鐵所のスラブ連続鋳造で鋳型内溶鋼攪拌技術の開発から始まった。鋳型内溶鋼を攪拌することによって得られる効果は、鋳片表層下の介在物や気泡が減少するとともに初期凝固殻の厚みが均一化し、鋳片表層の偏析も小さくなるため、縦割れを代表とする鋳片表面割れが大幅に改善される。又、従来、連続鋳では製造困難とされていた一部の弱脱酸鋼も鋳型内電磁攪拌の適用で連続化が可能となった。この鋳型内溶鋼攪拌技術は、ブルームにも適用され、表面品質の改善、等軸晶率の向上によるマクロ偏析の改善などにその効果を拡大した。現在、新日本製鐵では、スラブ連続鋳は広畑、大分、ブルーム連続鋳は室蘭、君津、光で稼働中である。

一方、最近では、生産性向上のため2.0m/min以上の高速鋳造が指向され、鋳型内の溶鋼流速が非常に大きくなってきているが、この高速鋳造時の操業安定化、品質確保を図るために、鋳型内の溶鋼流動状態を常に最適に制御する考え方が主流となってきている。

高速鋳造化が進むと、当然のことながら鋳型内に流入する単位時間当たりの溶鋼量が増大し、わずかな流動の乱れでも鋳型内の凝固殻生成が不安定になりやすく、又、介在物の浮上もしにくくなり、鋳型～鋳片間潤滑用のパウダーを鋳片内に巻き込むなどのトラブルを惹起しやすくなる。

このような現象を防止するために、浸漬ノズルから鋳型内へ流入する溶鋼流に制動をかけることによって鋳型内の溶鋼流動を安定化させる種々の方式（静止磁場、移動磁場、局所磁場、均一磁場）の開発が進められている（詳細は第27頁参照）。

##### 4.3 鋳片軽圧下技術

鋳片軽圧下技術は、中心偏析、ポロシティ（収縮孔）の改善技術として1980年代に開発、実機化が進められた。従来、中心偏析に関しては、スラブ、ブルームともに低温鋳造と電磁攪拌技術がそのキーテクノロジーであり、マクロ偏析の改善に効果を発揮してきたが、要求品質の厳格化に伴い、従来無害とされてきたセミマクロ偏析やマイクロポロシティまでが製品特性を左右するようになってき

表2 1980年代以降の主要な連続鋳造技術

	キーワード	技術内容
タンディッシュ周辺	取鍋スラグ二次酸化 溶鋼温度制御 耐火物コスト	取鍋スラグ流出検地装置 安全シールドタンディッシュ 誘導加熱、プラズマ加熱 タンディッシュ熱間回転
鋳型周辺	表面処理 鋳型冷却 鋳型振動 溶鋼流動制御 ブレークアウト	メッキ技術 (特殊材質、多層メッキ) 電子型冷却スリット ハイサイクル、 非サインカーブ波形 電磁気力による攪拌・制御 ニューロコンピュータによる BO 予知装置
二次冷却帯	均一冷却 高温出片 高速鋳造 中心偏析	気水スプレー技術、 スプレー詰まり検知 スプレーエッジ幅切り、 未凝固復熱 ロール冷却 CPC (圧縮鋳造)、分割ロール 鋳片圧下 (軽圧下、強圧下)

た。

この対策として、スラブ連鋳では“鋳片軽圧下法”と呼ばれるほぼ凝固収縮量に見合う量を圧下補償し、凝固収縮に伴う溶鋼流動を抑えることによってセミマイクロ偏析、マイクロポロシティはもとよりマイクロ偏析までも改善する鋳造技術が確立されてきた。

一方、ブルーム連鋳においても高級棒線材等の中心偏析・マイクロポロシティ対策として軽圧下法が1980年代後半から本格的に適用され始めた。ブルームはスラブに比較して最終未凝固部の幅が小さく、圧下効率の高いクラウンロールやディスクロールによる圧下が有効であり、鋳片断面寸法ごとにロール形状の最適化が図られ、八幡、室蘭、君津の各製鉄所で実用化されている。

#### 4.4 高温鋳片製造技術

前述したように、HDRは、高温無欠陥鋳片を製造する技術がプロセスとしての最低必要条件であるが、実際に省エネルギー、工程省略による合理化、製造工期短縮等の効果を受用するには、転炉～連鋳間のマッチング、連鋳～熱延間のマッチングが分単位で正確に実行されることが重要である。品質面では、加熱炉を経由せずに圧延されるためにスケールオフ量が半減し、鋳片表層下の欠陥をいかに少なくするかが重要であり、溶鋼清浄度向上のための二次精錬最適化、タンディッシュ～鋳型間の空気酸化防止、鋳型内湯面レベル制御精度の向上、パウダー物性の改善などの総合的な技術向上が図られた。

こうした技術開発により、スラブ系では、高温かつ無欠陥な鋳片の製造技術体系がほぼ確立され、連鋳～熱延間の直結化(CC-HDR)が可能となり、1981年に新日本製鉄堺製鉄所、1985年にNKK福山製鉄所、1987年には新日本製鉄八幡製鉄所において稼働している。

一方、ブルーム系では、大断面ブルームと分塊圧延の組合せによるHCR技術が定着しているものの、最近、一部の製鉄所においてはより一層の省エネルギー効果と製品歩留り向上を目的として、小断面のビレット連鋳による棒線材のアズキャスト化(分塊圧延省略)が進められており、新日本製鉄室蘭製鉄所においても、1991年より稼働開始し、品質上の課題はほぼ解決された。

ビレット材のアズキャスト化の課題は、断面サイズの小型化により高速鋳造となり、介在物、偏析ともその制御が難しくなる点にある。又、表面疵についても、スラブのHDRと同様に、分塊圧延からアズキャストに変わることにより従来は無害であった微小な割れや、スケールオフされていた表層欠陥が顕在化しやすいので、初期凝固健全化のためのパウダー物性改善、湯面レベル制御精度の向上、溶鋼流動制御適用などの開発試験が盛んに行われている。

## 5. 今後の展望

これまで述べてきたように、飛躍的發展を遂げたスラブ、ブルームの連鋳技術は成熟しつつあり、一方、鉄鋼業を取り巻く厳しい環境下での設備の老朽化や技術の陳腐化を防止していく必要がある。特に、NIES諸国からの輸入鋼材、米国を中心に発展しつつあるミニミルの鋼材との国際価格競争力を維持していくことが重要な課題と言えよう。

連鋳工程においては、従来タイプの連鋳設備の徹底した生産性向上のための高速鋳造化や自動化、機械化を徹底して進めるとともに、圧延工程負荷軽減のためのNNSCC(Near Net Shape Continuous Casting)を開発していくことが次世代の柱となろう。

#### 5.1 既設の連鋳機の高速鋳造化

現在、1970年代に相次いで建設されたわが国のスラブ連鋳機は老朽更新の時期を迎えており、リブレースや大幅な改造計画が実施されつつある。新日本製鉄の主要な連鋳設備もこの数年の間にマシンプロフィールの垂直曲げ型化、制御システムの更新が次々に実施されてきている。これらの更新される連鋳機は、表2に挙げられているような技術が盛り込まれると同時に、生産性の抜本的向上を図ろうとしていることが特徴と言えよう。

1970年代の大型スラブ連鋳機は、鋳造速度は一般的に1.2～1.8m/minであり、鋳造能力は20万t/(月・2ストランド)程度であったが、潤滑用パウダーの改善、鋳型振動技術の向上、マシンプロフィールの最適化(多点曲げ・矯正、垂直曲げ型)、鋳型内溶鋼流動制御の導入などにより、現在計画されている最新鋭連鋳機は2.5m/min以上で設計され、30万t/(月・2ストランド)超が指向されるようになってきている。

#### 5.2 自動化、機械化

連鋳工程の自動化、機械化については、取鍋～タンディッシュ周辺では取鍋スラグ流出判定、溶鋼連続测温、溶鋼重量制御、タンディッシュ熱間連続使用、鋳型周辺ではオート・スタート・ストップ技術、パウダー自動投入装置、ブ레이크アウト予知技術が開発、実機化されてきた。又、二次冷却帯以降では、タンデム鋳造に伴う二次冷却制御・ロール間隔制御の細分化、鋳片切断の自動採片システム、切断トーチの信頼性向上による無人切断化等が確立されてきた。

これら各部位における要素技術が確立された結果、従来2ストランドマシンでは6～8人/シフトが一般的であったが、最近の改造計画や新設連鋳機では4～5人/シフトで設計されている。今後も更に、設備信頼性の向上及びプロコンシステムへのAI導入等を図り、一層の自動化、機械化が進むことが期待されている。

#### 5.3 NNSCCの開発実機化に向けて

NNSCCについては、ビームブランクやホロービレットなど、ブルーム系の技術が先行し、一部、実機で稼働しているが、スラブ系では、熱間圧延の粗圧延機を省略する薄スラブ連鋳(厚み40～60mm)が米国、ヨーロッパの電炉メーカーを中心に動き始めたところである。

ストリップ連鋳については、10t規模の試験設備が1980年代に相次いで作られ、要素技術がほぼ確立されてきた。新日本製鉄光製鉄所においても、約1.2m幅のステンレス鋼鋳造試験を進め、品質、経済性ともに工業化の目処が得られつつある(詳細は第42頁参照)。

これらの新しい鋳造法が現在の連鋳機と競合、拡大していくためには、介在物、凝固組織、形状等の品質上の改善、生産能力向上等々、解決を要する技術課題が多いが、21世紀の鋳造技術として、今後の開発、発展が期待される。