



水平連続鑄造法の現状と将来

野 崎 努*・糸 山 誓 司*²

Horizontal Continuous Casting Processes—State of the Arts and Future Trend

Tsutomu NOZAKI and Seiji ITOYAMA

1. 結 言

日本においては、堅型連鑄機の設置は飽和に近くなり、1983年の粗鋼生産量の実績は100 200 kt、連鑄比率は普通鋼で91.5%、特殊鋼で70.8%と欧米に比較して、かなり高い水準に達している¹⁾。しかし、各社の連鑄機の導入は早いものでは1960年初頭から行われ、機械本体も多分に古くなり、近い将来には改造や大幅な修復を必要としている。

第1, 2次石油危機を契機として、省エネルギーの意識が製鋼プロセスに強く反映されるようになってきた。省エネルギーおよび省力を考える時、次代の連鑄機として建屋構造、圧延その他から、水平型連鑄機が注目されてきている。また、より製品に近い形状の連鑄機（たとえばシートバーや急冷薄帯など）の開発も活発化しつつある²⁾。

ここでは、水平連鑄技術開発の最近の動向および技術の発展性に関して述べる。水平連鑄機は通常の堅型連鑄機と同様にまず非鉄部門から発展してきたが、この解説では鉄鋼を中心にかつピレット連鑄の状況を主体に述べる。

2. 水平連鑄開発の流れ

現在までに開発された鋼の水平連鑄機開発の流れはFig. 1のようにまとめることができる。1960年代アメリカのGeneral Motors (GM) 社がパイロット・プラント実験を開始し、1977年にこのGMの基本特許を西ドイツのTechnica Guss社が導入した。同社は種々の改良を加え、現在、ヨーロッパやアメリカで12基が稼働している³⁾。

今一つの流れとして1968年から1975年にかけて、イギリスのDavy-Loewy社は独自のプラントで研究を重ね、1976年日本鋼管(株)との間に実用規模プロセスの共同開発に着手し⁴⁾、1982年同社福山製鉄所において工

業化を完了した。

固定鑄型方式による水平連鑄機はこのほか多種類あるが基本原理はGM社とDavy-Loewy社に類似である。

3. 水平連鑄の原理

水平連鑄機の全体構成についてはFig. 2のように整理でき⁵⁾、ここでは固定鑄型方式の各部位について以下に概説する。

3.1 タンディッシュ

容量は、実用機で2.5t(日本鋼管)から10t(Mannesmann)⁶⁾規模であり、テストあるいはパイロット・プラント用機では0.3~1.5t程度である。日本鋼管ではタンディッシュでの溶鋼の平均滞留時間が、介在物浮上分離および鑄型への適切な溶鋼流動の確保の観点から、3min以上になるようにタンディッシュ構造を考慮している⁷⁾。

介在物対策上、取鍋とタンディッシュ間の空気酸化防止手段もBöhler⁸⁾、住友金属⁹⁾、日本鋼管¹⁰⁾で実施されている。

タンディッシュ内溶鋼の保温対策としては、湯面をパウダーで被覆する方法¹¹⁾、あるいは溶鋼温度を直接制御するため、インダクション・コイル⁶⁾やコアレス・インダクタを備える方法¹²⁾が採用されている。タンディッシュ内での湯面低下時の溶鋼静圧を一定に確保するため、タンディッシュ内Ar圧力を調整し、鑄込み全域で良好な材質を得ようとしている¹²⁾。

3.2 タンディッシュと鑄型の接続方法

タンディッシュと鑄型の接続は鑄片引き抜きを順調に行わせる上できわめて重要な部位であり、その接続法も種々の手法が提案されている。Fig. 3 a, bに2例を示すが¹³⁾、aでは接続耐火物が平面状であるのに対し、bでは鑄型口にテーパ状に差し込まれている。いずれの鑄型でも、連続して凝固鑄片の引き抜きを行うと、凝固殻の弱い部分から破断を生じ、鑄型出口でブレイク・アウ

昭和59年12月4日受付 (Received Dec. 4, 1984) (依頼解説)

* 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 理博 (Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 260)

*² 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

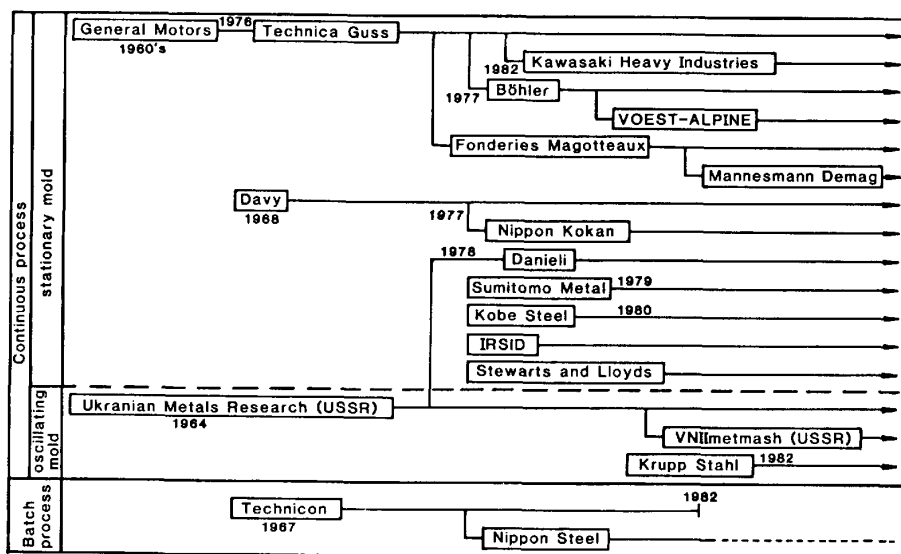


Fig. 1. Schematic flow of development of horizontal continuous casters.

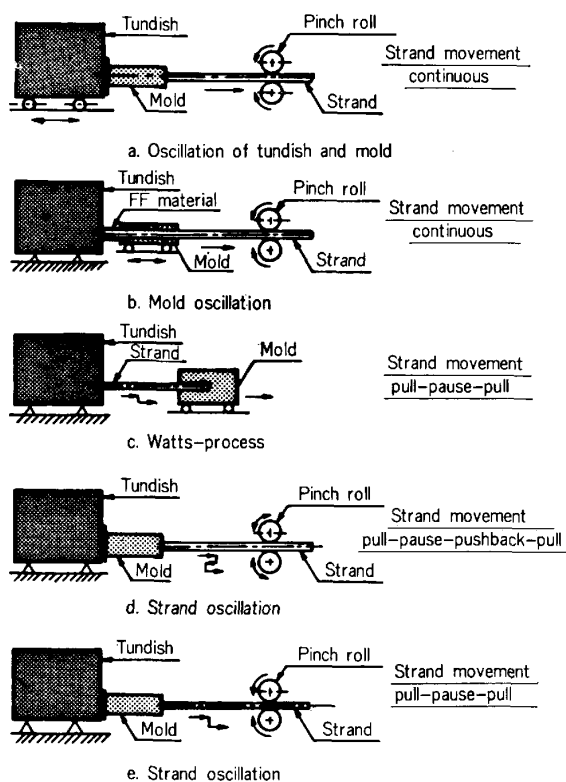


Fig. 2. Types of development of horizontal continuous casting⁵⁾.

トとなる。

したがって、水平連鋳の場合、間歇引き抜きが必要なことが力説される。間歇引き抜き法では、鋳型内での凝固殻形成は後節で述べるブレイク・リングから正常に生成し、安定した操作が可能となる。最近では間歇引き抜き法だけではなく、引抜き方向とは逆方向に軽い圧縮力を加え（押戻機構）、凝固殻の安定引き抜きをより容易にする方法が採られている。

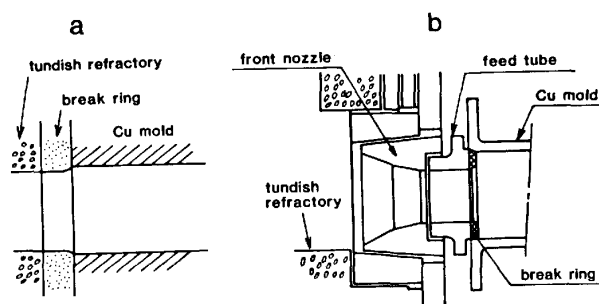


Fig. 3. Joining methods between tundish and mold¹³⁾.

3.3 ブレイク・リング

鋳型とタンディッシュを接続し、かつ、安定した引き抜きと通常の堅型連鋳機の溶鋼自由表面（メニスカス）の役割を分担させ、一定の箇所から凝固殻を生成させるためにブレイク・リングが用いられる。

ブレイク・リングに要求される材質特性は、(1)高温強度、(2)低膨張率、(3)耐スポーリング性、(4)耐溶損性、(5)寸法精度、などが挙げられる。

従来、ブレイク・リングの材質として、BN が多く用いられている¹³⁾¹⁴⁾。BN は値段が高いため、日本鋼管¹⁵⁾では、炭素鋼用として Si_3N_4 に少量の BN を含んだ複合材を使用し、価格と性能の点で BN より優れた結果を得て、工業生産に使用している。さらに、ステンレス鋼用のブレイク・リングに関して SIALON 組成 ($Si_{6-z}Al_2O_{2N_{8-z}}$) の各種の材質について検討している。

Fig. 4 に示すように、SIALON 組成で $Z=1$ の材質に少量の BN を添加したセラミックスが、耐溶損性と耐熱的スポーリング特性のバランスの上から良好であると報告している¹⁶⁾。

ブレイク・リングの熱伝導率が BN の 1/3 から 1/4

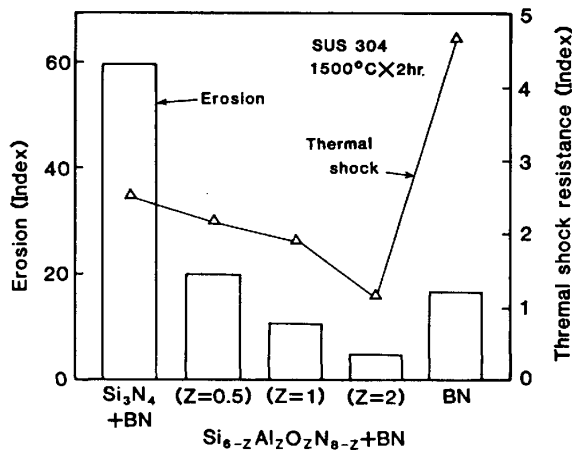


Fig. 4. Erosion and thermal shock resistance test of break ring material¹⁶⁾.

(5~10 kcal/m·h·°C) の値をもつ Si₃N₄-AlN-BN を使用し、かつ、鋳型とブレーク・リングの接続段差を少なくして、引き抜きマーク深さを浅くする工夫もある¹⁷⁾。

ブレーク・リングの溶損速度に関しては余り報告はないが、Si₃N₄-5~15%BN 系で 0.7 mm/h と述べられている¹⁸⁾。ブレーク・リングの仕上げは美麗鋳片を得るために重要な因子と思われ、溶鋼が食い込まないように±0.005 mm の精度を報告している¹⁹⁾。

3.4 鋳型

一般に鋳型の構造はチューブ状で、材質は高温耐力に優れている析出硬化型合金銅が採用されている。水平連鋳の鋳型はタンディッシュと接合し、一体化構造となるため、フランジ付の形状となっている。Technica Guss 系列の水平連鋳機では、1 次冷却を二つに分割して、溶鋼の入口から約 200 mm 長さが Be 析出硬化型銅を用い、引き続き約 900 mm 長さの鋳型銅板の鋳片接触部には黒鉛スリーブを付け、潤滑の役目を持たせている。

連鋳パウダーを用いない水平連鋳では、生成する鋳片と鋳型間の潤滑が問題になる。一般に、強制潤滑はなく、内面コーティング処理を施し、鋳型と鋳片間の摩擦抵抗を小さくしている。その例として、ふつ化黒鉛 (CF)_n を 15% 分散させた Ni めつきにより自己潤滑性を持たせ、摩擦係数が 0.1~0.2 程度に軽減し、引き抜き力も鋳込初期を除いて、安定した鋳造を可能としている²⁰⁾。

めつき以外の方法では、グラファイト系固体潤滑剤 (銅粉 25%, リチウム・シリケート 25%, 残りグラファイト) を鋳造前に鋳型に 100 μm 程度塗布し、炭素鋼の 115 mm φ を 200 m, 約 80 min 鋳造している²¹⁾。また、鋳型内面に MoS₂ を焼き付けて自己潤滑作用により、摩擦係数を 0.2 に低下でき、耐摩耗性も高温になるほど良好で 110 mm の丸棒および角ビレットを延べ 180 m, 鋳型を手入れ無しで鋳造している²²⁾。

最近ではステンレス鋼や合金鋼でも適切な鋳型テーパ

を選定し、特殊な鋳型コーティング処理を行わなくても炭素鋼なみの鋳造が可能となつてきている¹⁵⁾。

前述したように水平連鋳では、鋳型で最初に生成する凝固殻を一定の場所で形成し、引き抜くことが要求される。この様子を直接観察できないが、鋳型内の凝固挙動を監視しようという試みがされている。熱電対法によるブレーク・リング近傍の鋳型壁内测温によつて、接続部への溶鋼差し込みに起因する凝固殻の拘束を監視している。この考えの源は、General Motors から出ており、住友金属、Danieli でも採用されている。

鋳型测温の結果より²³⁾、鋳造ノズルとの接合部が最も高温となり、最大温度は鋳型稼働面において 420~480 °C である。このような高温条件でも鋳型が耐えるように、銅板の材質、冷却方法などの改善を行い、現状では使用後における鋳型対角寸法の変形量を ±0.1 mm に制御している。

熱電対法とは別に、差動トランスを鋳型に取り付け、水圧、引き抜きサイクルおよび鋳型壁内温度との間に相関関係があることを見出し、鋳型内鋳片の監視方法として有望であることを述べている²⁴⁾。

鋳型内抜熱はタンディッシュの溶鋼静圧による影響が大きく、特に凝固初期のブレーク・リング近傍では、凝固殻のバルジングによる鋳型との接触状態が良くなる。そのため、従来のスラブ連鋳機と比較して、Fig. 5 に見られるように抜熱速度が大きくなつている¹⁸⁾。また抜熱量も従来のビレット連鋳機の約 50%, スラブ連鋳機と比較して約 80% 大きくなつている¹⁸⁾。抜熱の良好さにより、凝固速度定数は 26~30 mm·min^{-1/2} とスラブ連鋳機の 23 mm·min^{-1/2} に比べ、13~30% 高くなつている。

3.5 鋳片引抜方法

DC モータ、油圧サーボ式などピンチ・ロール駆動方式は異なるが、ロールによる鋳片引き抜きにおいては、

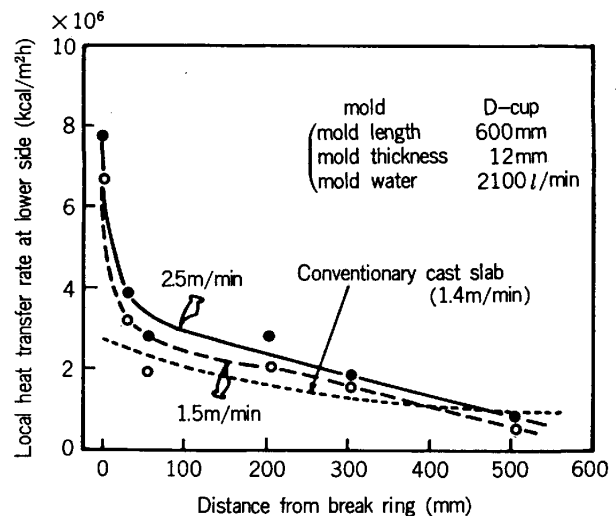


Fig. 5. Profile of local heat transfer rate in mold measured by thermo-couple¹⁸⁾.

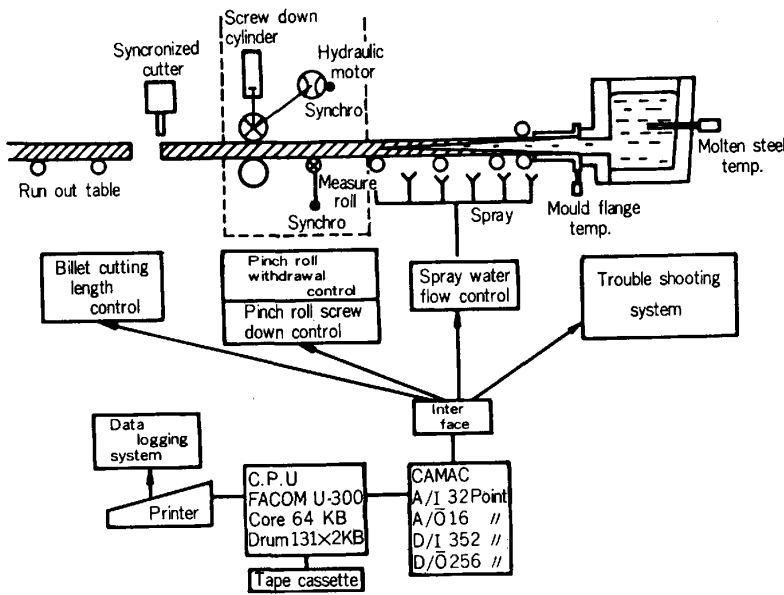


Fig. 6. Controlling system for operation of horizontal casting¹³⁾.

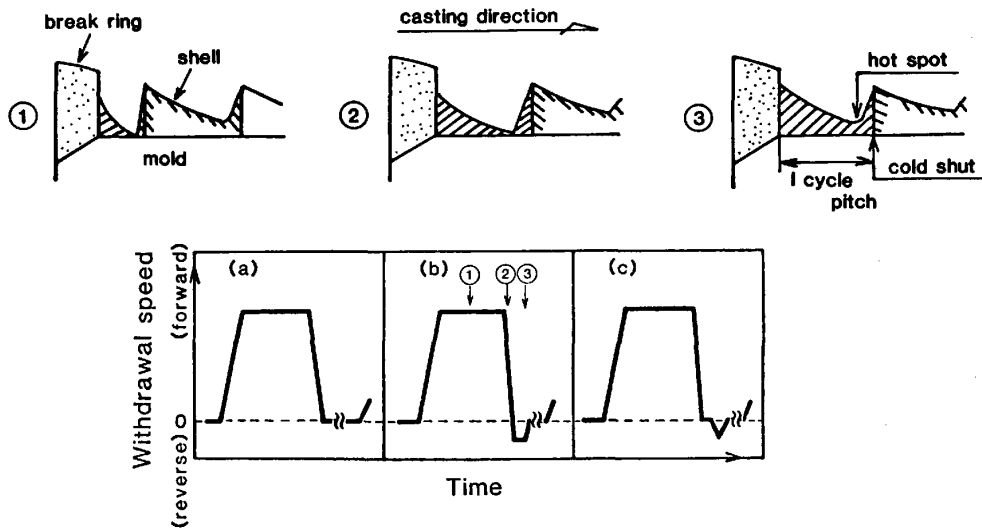


Fig. 7. Examples of withdrawal pattern.

Mannesmann Demag 方式⁶⁾を除いてはほぼ同一である。Mannesmann-Demag 方式は面クランプを採用し、鋳片との接触面積が大きいため、従来のロール方式に見られるような鋳片の凹みができない。また間歇引抜制御時間は 0.01 s と精度が良い。

他の方式では、ピニオン・ラックによる駆動車輪方式²⁵⁾²⁶⁾がある。日本鋼管では Fig. 6 に示すように、鋳片引き抜きの制御をシステム化している。この方法では、鋳片引き抜きは上下駆動方式のピンチ・ロールにより行い、駆動には油圧サーボ方式を用いている。この駆動系によつて引き抜き、押し戻しサイクルの制御を行い、かつ溶鋼流入から鋳片切断までの作業を全自動で行っている¹³⁾²⁷⁾。

Fig. 7 に、間歇引き抜きパターン²⁸⁾の代表例を示す。引き抜きパターンは大別して 2 方式に分類できる。一つは

Go-Stop 方式すなわち Danieli, 住友金属, 神戸製鋼に見られるように引き抜いた後、一時停止 (Fig. 7a) で鋳片凝固を待つ方式である。今一つは Pull-Push Back-Pause 方式 (Fig. 7b²⁸⁾, c⁸⁾) であり、Push Back を行うことで、引抜停止の 1 サイクルで形成される初期凝固殻の収縮量分だけ押し戻すことによつて、より強固な凝固殻を得る。Push Back 方式の採用はホット・スポット部分 (初期凝固殻の一番薄い部分, Fig. 7 ③参照) および cold shut⁷⁾ (witness mark²⁹⁾, pull mark³⁰⁾ と呼ばれる) 部分で生成しやすい鋳片の割れを未然に防ぐことにある。

HAISSIG⁵⁾ によれば、Push Back をどれほどの距離戻すか、および停止時間をいかほど取るかがブレークアウト防止に重要であることを Fig. 8 で指摘している。加えて、ギア方式での Pull-Push Back は数カ月の操業で

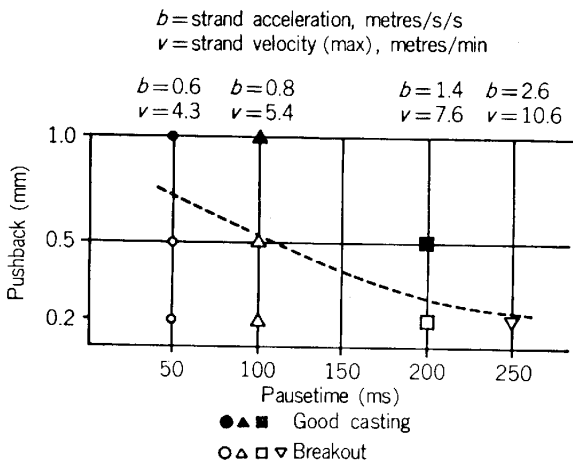


Fig. 8. Influence of pushback and pause time on break-out occurrence⁵⁾.

ガタが発生し、このようになると表面性状悪化およびブレイク・アウトにつながるとしている。それゆえ、最近ではギア方式は漸次油圧方式に切り替えられている。

3.6 鋳片引抜速度と鋳片寸法の関係

各種の水平連鋳機で製造している鋳片サイズとそれらを鋳造する際の引抜速度を対応させ、まとめると Fig. 9 が得られる。固定鋳型による Push Back 採用の间歇引き抜きの場合、図中の実線で囲まれる範囲となり、鋳片サイズの径化により、引抜速度は減少する。Push Back 機構がない場合には実線より下方の破線範囲となり、さらに引抜速度が減少する。Mannesmann も同様の傾向を見出している²⁸⁾。

一方、後述する鋳型を振動させるソ連 VNII metmash や Krupp 方式は、固定鋳型の Push Back 间歇引き抜きよりも低速で鋳造が行われている。

3.7 鋳片性状

3.7.1 表面性状

间歇引き抜き、あるいはブレイク・リングの使用は鋳片凝固が多少であれ不連続になる。このため不連続位置が良く結合しないと剝離や割れになる欠点がある。いわゆる cold shut 割れに対し、各水平連鋳法では種々の工夫がなされ、炭素鋼では防止できたとされているが¹⁶⁾、ステンレス鋼や高合金鋼ではいまだ完全解決したとは言えない。この軽減防止として、引き抜きマークを浅くし、割れ感受性を小さくすべく、①高サイクル引き抜き⁷⁾、②ブレイク・リングと鋳型段差の減少¹⁷⁾、③ブレイク・リング材質の最適化¹⁷⁾、④鋳型電磁攪拌³¹⁾、⑤溶鋼過熱度の上昇⁵⁾ (Fig. 10 参照) などの対策が取られている。

最近では、炭素鋼およびステンレス鋼を対象に、cold shut の開口を阻止し、圧着効果を狙って鋳型出口で熱間ショット・ブラスト (HSB) を行い、高サイクルと共に Fig. 11 に示す効果を得ている³²⁾。

3.7.2 非金属介在物分布

水平連鋳鋳片の介在物調査から、清浄性は従来の堅型連鋳機製と比較しても遜色ないレベルにある。介在物集積傾向は上面表層下 5~10 mm 付近にピークが認められる。取鍋とタンディッシュ間のシール ($O_2 < 0.1\%$) で介在物の集積を防止できるとしている³³⁾。

3.7.3 中心偏析

著しい偏析は認められず、炭素鋼や低合金鋼ではわずかに負偏析となる。しかも、ロール支持方式の湾曲型連鋳機に比べ、EMS の設置は水平連鋳機の方が任意の位置に容易に取り付けられるので、EMS 印加最適位置での攪拌により、中心偏析の改善はいつそう効果的である³⁴⁾。

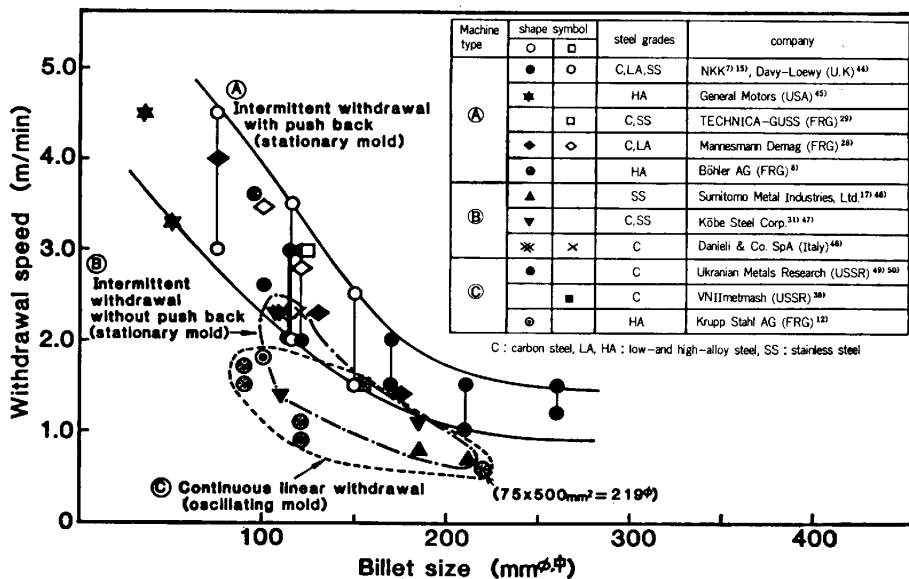


Fig. 9. Relation between billet size and withdrawal speed.

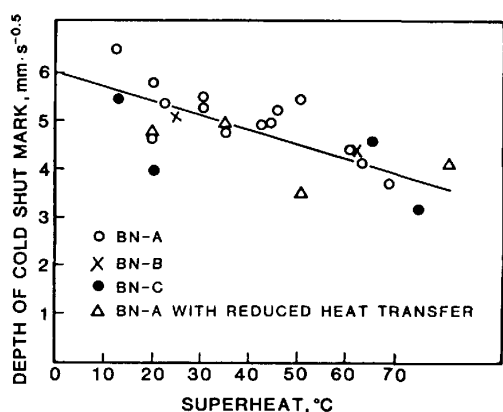


Fig. 10. Effect of superheat on depth of cold shut mark⁵⁾.

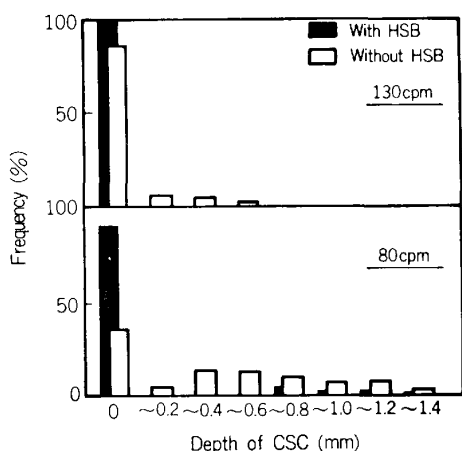


Fig. 11. Effect of hot shot blasting (HSB) on depth of cold shut crack (CSC)³²⁾.

3.7.4 成品品質

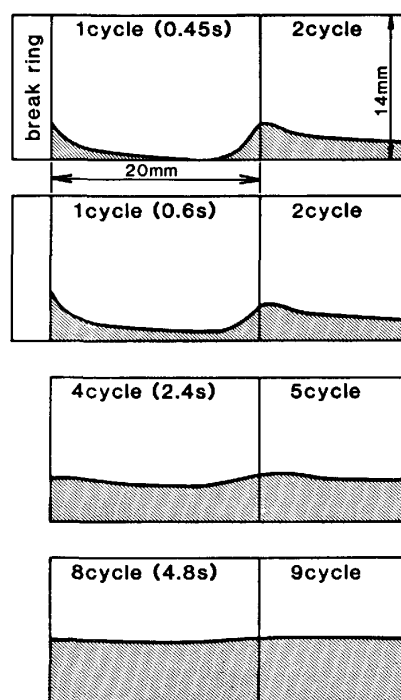
水平連鋳材を成品にした場合の品質結果を総合すると、成品品質は炭素鋼や低合金鋼に関して、ほぼ満足のいくレベルに達してきている。

反面、高合金鋼については、cold shut mark 起因の異常組織に基づく欠陥発生があり表面手入れにより除去して圧延加工を行つているが、今後、この点の改善が水平連鋳発展の鍵を握るものと思われる。

4. 水平連鋳の凝固理論

1976年、SZEKELYら³⁵⁾は、一端を閉じた水平鋳型を用いる連続鋳造方式、すなわち WATTS プロセスに関して、数学モデルにより解析した。彼らの解析によると、凝固進展によつて、パイプ状凝固殻断面が増加し、溶湯の供給が困難となるため最大鋳込み長さが存在する。この鋳込み長さは、溶湯部から凝固殻間への熱伝達係数、凝固殻表面でのスプレー熱伝達係数および供給される溶湯により持たされるマッシー・ゾーンの割合に著しく影響され、鋳片幅の約 300~500 倍になると推算している。

現在の主流を占める水平連鋳の凝固理論解析は 1981 年以降に多い。JAQUEMARら³⁶⁾は、間歇引抜き鋳造の熱伝



$t=0.45$ s end of first pull cycle.
 $t=0.6$ s first pull/push cycle completed.
 $t=4.8$ s strand is leaving the copper section of the mould.

Fig. 12. Calculated solidification progress³⁶⁾.

達を伝導と対流によるとして、凝固前面に沿つた移動境界を加味し質量の連続性、エネルギー収支、力学的平衡を含む差分式で表した。その結果、初期段階の凝固速度は堅型連鋳に比べ高い値となるが、時間経過に伴いこの差は少なくなる。凝固開始直後では、Fig. 12 に示されるように、ブレイクリングおよび先にできた凝固鋳片との接合部での凝固が促進し、凝固厚さの不均一が著しいが、文献で良く見るような鋸歯状の凝固殻は粗い近似計算の場合に見られる。しかし、鋳片が鋳型内部から 2 次冷却帯に入ると、この凝固殻の不均一性は無視できるようになり、ブリッジングは水平連鋳では起きないと結論している。

SCHNEIDERら³⁷⁾は、純金属の間歇引抜き連鋳で、凝固界面と鋳型壁面でのエネルギー収支を境界条件下で解析し、静止ブレイク・リングと移動凝固殻からの凝固殻生成条件を調査した。

杉谷ら¹⁷⁾は鋳型、ブレイク・リングおよび供給ノズルを含めた 2 次元の初期凝固伝熱差分解析を鋳片の間歇引き抜きを考慮して行つた。凝固組織の不連続性を示す引き抜きマーク深さとブレイク・リング材質、接続段差および引き抜きサイクル数の関係が、彼らの鋳造したピレットの実測データと良く一致したと報告している。

5. 振動鋳型・連続引き抜き式水平連鋳の出現

今まで述べてきた水平連鋳機は、Table 1 に示すよう

Table 1. Summary of characteristics of various horizontal continuous casters.

Company	Break ring (B/R) material	Mold			Withdrawal pattern*2 (machine*3)	Maximum billet size (mm) round square	
		Material	Coating	Condition*1			
General Motors ⁴⁵⁾	BN	Cu-Be	Graphite	S	IP	90	
Technica-Guss plant ¹⁴⁾	BN	Cu-Be	Graphite	S	IP (HR, DC)	205	200
Böhler ⁸⁾	BN	Cu	Graphite	S	IP (HR)	200	200
VOEST-ALPINE ⁵¹⁾	BN	Cu	Graphite	S	IP (DC)	260	160
Mannesmann Demag ⁶⁾	BN comp.	Cu	Graphite	S	IP (HJ)	220	220
Kawasaki Heavy Industries ⁵²⁾	BN	Cu	Graphite	S	IP	96	120
Davy Loewy ¹¹⁾ 53)	Si ₃ N ₄	Cu	MoS ₂	S	IP (HR)	150	95
Nippon Kokan ⁷⁾ 19)	SIALON	Cu-Cr-Zr	Lubricant prior to casting	S	IP (HR)	330	250
Ukrainian Metals Research ⁵⁴⁾	Graphite	Cu		O	C	200	200
Danieli ⁴⁸⁾	Graphite	Cu		S	IP (DC)	200	200
Sumitomo Metal ⁹⁾ 17) 20) 55)	Si ₃ N ₄ -AlN-BN	Cu	Ni+ (CF) _n	S	I (HR)	328	180
Kobe Steel ²²⁾ 56)	BN comp.	Cu	MoS ₂	S	I (DC)	150	150
IRSID ⁵³⁾	Si ₃ N ₄	Cu	MoS ₂				85
Stewarts und Lloyds ⁵³⁾	B/R free			S			150
Krupp Stahl ¹²⁾	BN	Cu		O	C		100
VNII metmash (UUSR) ³⁸⁾	B/R free	Cu		O	C		400
Technicon ⁵⁷⁾		Cu		O	C	140	203

*1 S: stationary, O: oscillating,

*2 IP: intermittent withdrawal with push back, I: intermittent withdrawal without push back, C: continuous linear withdrawal,

*3 DC: DC motor-driven pinch rolls, HR: hydraulic driven pinch rolls, HJ: hydraulic clamping jaws

にブレーク・リングおよび間歇引き抜きがその特徴となっている。間歇および押し戻しは機械的に負荷が大きく、またブレーク・リングはその大型化の困難性から、大断面鋳片の铸造を難しくしている。この点を改良する目的で最近、鋳型を振動させ連続引き抜きを計つたり、あるいはブレーク・リングを使用しない鋳造が試みられている。

5.1 ソ連方式³⁸⁾

ソ連 VNII metmash 研究所が開発した新型の水平連鋳機は Fig. 13 に示されるように、タンディッシュに相当するレシーバと鋳型が結合した状態にある。鋳型を左右に振動させ側端より相反する方向に鋳片を連続的に引き出す方式である。現在、鋳片サイズ 120 φ から 150 × 500 mm² を鋳造速度 1 m/min 以下で鋳造している。本方式はブレーク・リングがないため、鋳片のサイズ、形状に制限なく鋳造でき、スラブのような大断面鋳片の可能性を秘めている。反面、ブレーク・リングがないことによる初期凝固殻の生成と分離が一定の位置で安定に行われているかどうか、および鋳片表面性状・内部性状など不明な点も多々あり、詳細な調査が望まれる。また、CONCAST 社による同様の考え方も特許が公開されている³⁹⁾。

5.2 Krupp 方式¹²⁾ 40)

Krupp Industrietechnik GmbH によつて開発された振動鋳型・連続引き抜き式水平連鋳機はまず銅合金での鋳造 (60~176 mm φ) を行い、最近高合金鋼の鋳造実験を開始した。

Fig. 14 には、本連鋳機の概略図を示す。振動ストロ

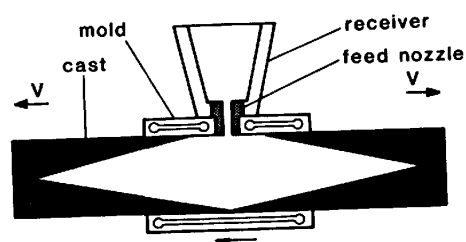


Fig. 13. Schematic drawing of USSR type machine³⁸⁾.

ーク 0.5~5 mm, 振動数最大 7 Hz の振動テーブル上に 1 t のタンディッシュに結合する長さ 500 mm の銅鋳型が固定されている。鋳片サイズは 100 mm φ で BN 製ブレーク・リングを使用している。最大引抜き速度は 3 m/min である。

Krupp 方式の引き抜きパターンと従来の押し戻し間歇引き抜きパターンの比較を Fig. 15 に示す。従来方式では複雑なピンチ・ロール駆動のため、高サイクル鋳造の引抜き制御、鋳片単重増およびメタラジカル長さの増大に対しては、より剛性のある引抜き装置が要求される。一方、Krupp 方式では、非常に単純な正弦波形式の鋳型オシレーションであり、鋳片を引き抜く駆動系は一定速度の連続引き抜きを行うのみでよい点が、従来型水平連鋳機と大きく異なる。

6. 水平連鋳の今後の発展

アメリカおよび欧州の一貫製鉄所は設備投資時期を誤まり、かつ設備投資に対し消極的であつたため、粗鋼生

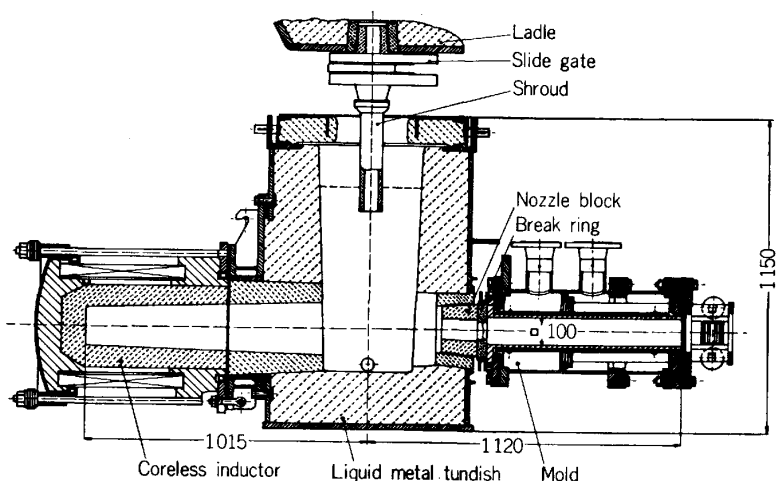


Fig. 14. Sectional view of tundish-mold arrangement developed by Krupp⁴⁰⁾.

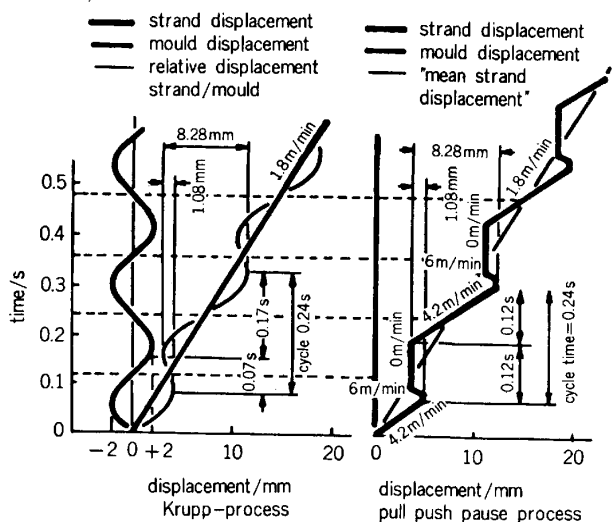


Fig. 15. Strand and mold movement with different horizontal casting processes¹²⁾.

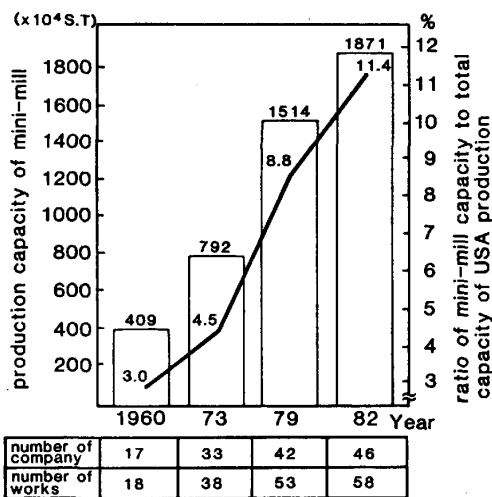


Fig. 16. Annual variations of production capacity of mini-mill in USA⁴¹⁾.

産量の伸び悩みや低減となつた。そのため一貫製鉄所を代表する高炉-転炉-連鑄プロセスの大型設備を必要とする製鋼法に比較して、小回りの効くミニミルが活発となつてきている⁴¹⁾。アメリカの例で見ると Fig. 16 に見られるように、1960 年にはミニミル企業が 17 社あり、その生産能力が 4 090 kt/年であつたが、22 年を経過した 1982 年では企業数が 46 社、生産能力は 18 710 kt/年と 4 倍強の成長をみた。アメリカの粗鋼生産能力に占めるミニミルの構成比で見ると、22 年間で 3.0% から 11.4% へと増加した。

現在、日本においては、高炉-転炉-連鑄法が主流を占め、粗鋼生産量で転炉法による粗鋼生産割合は 1983 年 71.8% となつており、連鑄法による割合は全粗鋼の 88.0% と欧米諸国に比べ、圧倒的優位性を示している。しかし、最近数年の日本における電気炉生産粗鋼量は毎年微増であるが、上昇しており、1983 年統計では 28.2% の 28 304 kt/年の生産実績を示している。電気炉法が増加するに伴い、小回りが効くミニミル指向が台頭

し、次工程との連続化、同期化を考える場合、建屋および設備の簡略化が期待できる水平連鑄が注目されるであろう。

また、通常の湾曲型連鑄機では、必ず矯正が必要となり、特殊元素を含有する鋼種では熱間機械強度に耐えず矯正による表面、内面割れが出現する。完全垂直は多額の設備費を要す。この点水平連鑄機では、鑄片の矯正割れがなく、このほか鑄型とタンディッシュが一体であり、この間での溶鋼再酸化防止により非金属介在物の増加が防げる。さらに静鉄圧が小さく、中心偏析や内部割れが起こりにくいなどの利点があり、水平連鑄は魅力的なプロセスと考えられる。

6.1 ビレット用水平連鑄

現在のところ、ソ連方式を除いてはブレーク・リングを必要とするため、そのセラミック・サイズの規制で、330 mm φ以下の鑄片サイズに限定されている。しかし、前述したように、ブレーク・リング用セラミックスの開発により、大型化も可能になつていくであろう。

ブレード・リングによつて生成する cold shut mark も 鑄造直後の EMS 適用, Hot Shot Blast, サイクルや ストロークの適正化によつて, 炭素鋼ではほぼ解決でき ている。

西ドイツの Boschgotthardshütte 社では, ステンレス 鋼を除いては熱片鑄片をトーチで切断後, 直ちに復熱炉 に装入し, 所定温度に達した後, 圧延に直結させるプロ セスを 1984 年春に完成させ, 順調な稼働を行つてい る。この例からわかるように, 水平連鑄の操業技術もか なり発展してきたと見るべきであり, ミニミルあるいは 大型一貫製鉄所における小ロットの注文対応に利用でき る段階まできた感が強い。

日本においては, 90% 以上の連鑄比率がすでに達成 されており, ブルーム・ビレット連鑄機が新規に設置さ れる機会は少ないと思われる。既存の連鑄機が今後リプ レースされてゆく過程においては, 水平連鑄機が設置さ れてゆく可能性が考えられる。

しかし, 欧米の連鑄の未発達のところには十分考慮の余地 が残されている。加えて, 次節で述べるように, 水平連 鑄がブルーム, ビレットの鑄造に留まらず, 薄スラブ鑄 片まで鑄造できるようになれば, その発展は計り知れな い域にまで達するであろう。

6.2 薄板連鑄

本論文では詳細について触れなかつたが, 薄物連鑄も 注目の的である。最近, とくにアメリカにおける薄物連 鑄 (Thin Slab Caster) の開発が活発化していることが 報じられている⁴²⁾⁴³⁾。アメリカ鉄鋼産業の今までの衰退 を, 薄物連鑄の開発によつて一気に巻返しを計ろうとす る意識が感ぜられる。アメリカ政府エネルギー省(DOE) がここ数年間に 3000 万ドルを投入して, インチサイ ズの薄物連鑄機を開発し, 実現させようとしている。 このプロジェクトは U. S. Steel 社の研究センターと Bethlehem Steel 社の Horner 研究所が協同で開発にあ たる。その他 Mannesmann 社も開発に乗り出しており, 他方 Battelle 研究所の活躍もあり, 今後いつそう, 薄 物用連鑄機の開発競争も激しくなることであろう。

日本でも, 鉄鋼協会が主催して急速凝固部会が発足 し, 活動の基盤作りができ, 今後の研究開発の活躍が期 待される。

7. 結 言

粗鋼生産量の停滞と日本における連鑄比率の飽和か ら, 高炉-転炉-連鑄法を見直す気運が出てきている。ま た, 日本での連鑄機設置は 1960 年から行われており, 既に 20 年を経過した連鑄機も現れはじめた。このよ うな背景のもとで, 水平連鑄が注目されてきたように思わ れる。そこで, 水平連鑄機の原理を述べ, 現状と将来に ついて概観した。

最後に, 本解説をまとめるに際し, 垣生泰弘博士に有

意義な助言を数々いただいた。記して感謝する。

文 献

- 1) 鉄鋼界報: 昭和 59 年 6 月 1 日
- 2) 川上公成: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 1357
- 3) H. A. KRALL and H. HUBER: MPT-Metal. Plant and Tech. (1983) May, p. 44
- 4) D. TOOTHILL: Solid. Tech. Conf. at Warwick University, Metal Soc. (1980) Sep.
- 5) M. HAISSIG: Iron & Steel Eng. (1984) June, p. 65
- 6) P. VOSS-SPILKER and W. REICHEL: Metal. Plant and Tech. (1983) Jan., p. 40
- 7) 宮下芳雄, 宮本 明, 伊藤雅治, 田口喜代美, 小谷野敬之, 本田 明: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 1387
- 8) M. HASSIG, H. DÖREN and S. WILMES: Stahl Eisen, 101 (1981), p. 91
- 9) 梅田洋一, 杉谷泰夫, 石村 進, 三浦 実, 中井 健: 鉄と鋼, 65 (1979), S244
- 10) 鶴 雅広, 水岡誠史, 広瀬 猛, 田口喜代美, 武田州平, 宮下芳雄: 鉄と鋼, 68 (1982), S282
- 11) J. MARSH and D. TOOTHILL: Int. Conf. Cont. Cast. Metal Society (1976) June, p. 221
- 12) R. HEINKE, R. HENTRICH, M. BUCH and E. ROLLER: Proc. the Sixth Japan-Germany Seminar, Tokyo, Japan (1984), p. 261
- 13) 木村智明: 第 69-70 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1980), p. 351
- 14) H. A. KRALL and H. HUBER: Stahl Eisen, 103 (1983), p. 1059
- 15) 鶴 雅広, 小森重喜, 田口喜代美, 柳橋泰雄, 熊谷 忍, 本田 旭: 鉄と鋼, 70 (1984), S227
- 16) 田中駿一, 川和高穂, 田口喜代美, 本田 旭, 角南英八郎, 小森重喜: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 861
- 17) 日本鉄鋼協会基礎共同研究会: 第12回連続鑄造における力学的挙動部会 (1984 年 2 月)住友金属工業(株)(私信)
- 18) 宮下芳雄, 宮原 忍, 田口喜代美, 広瀬 猛, 石川 勝, 水岡誠史: 学振 19 委-No. 10258 (昭和 55 年 5 月)
- 19) J. MARSH: Steel Times (1971) June
- 20) 梅田洋一, 杉谷泰夫, 三浦 実, 中井 健: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 1377
- 21) 山田武海, 関口英男, 武田州平, 広瀬 猛, 川邑 正男: 鉄と鋼, 67 (1981), S854
- 22) 安中弘行, 宮崎 純, 森 隆資, 辻 邦夫, 成田 貴一: 鉄と鋼, 68 (1982), S279
- 23) 田口喜代美, 石川 勝, 水岡誠史, 上野 康, 本田 旭: 鉄と鋼, 66 (1980), S200
- 24) 武田州平, 宮下芳雄, 広瀬 猛, 水岡誠史, 鶴 雅広: 鉄と鋼, 68 (1982), S917
- 25) 杉谷泰夫: 日本金属学会会報, 18 (1979), p. 834
- 26) 梅田洋一, 杉谷泰夫, 石村 進, 三浦 実, 中井 健: 鉄と鋼, 65 (1979), S243
- 27) M. ISHIKAWA, A. HONDA and T. ANZAI: Trans. ISIJ, 20 (1980), p. 570
- 28) P. VOSS-SPILKER: Tech. Mitt., 76 (1983), p. 504
- 29) H. A. KRALL: Proc. Int. Conf. Cast. (1982), p. E3.1

- 30) H. DÖREN, M. HAISSIG and P. STADLER: *Cont. Casting* (1982), p. E2.1
- 31) 宮崎 純, 綾田研三, 永尾卓己, 中田 等, 塩見司, 森 隆資: 鉄と鋼, 69 (1983), S886
- 32) 鶴 雅広, 小森重喜, 田口喜代美, 武田州平, 土田 裕, 角南英八郎: 鉄と鋼, 70 (1984), S228
- 33) 梅田洋一, 杉谷泰夫, 中井 健, 石原和雄, 阪根武良: 凝固現象協議会資料, 19 委-10284, (1980.9)
- 34) T. KOYANO and M. ITO: *Cont. Casting* (1982), p. 27-1
- 35) V. STANEK and J. SZEKELY: *Metall. Trans.*, 7B (1976), p. 619
- 36) Ch. JAQUEMAR, H. BARTOSCH and K. SCHWAHA: *Vöest-Alpine Cont. Cast. Conf.* (1981) No. 24
- 37) W. SCHNEIDER: *Arch. Eisenhüttenwes.*, 54 (1983), p. 487
- 38) METEC '84 (1984) June
- 39) Concast 特許 [特許出願公開 昭 59-130652]
- 40) R. HEINKE, R. HENTRICH, M. BUCH and E. ROLLER: *Stahl Eisen*, 104 (1984), p. 590
- 41) 鉄鋼界報: 昭和 58 年 6 月 21 日
- 42) *Iron Age* (1984) Apr. 2
- 43) *Business Week* (1984) Sep.
- 44) D. TOOTHILL and J. MARSH: *Cont. Casting* (1982), p. E1.1
- 45) D. J. HARVEY, G. L. VANEMEN and F. J. WEBBERE: *Continuous Casting Small Cross Section* (1981), p. 157
- 46) 阪根武良, 福島佳春, 清遠日出男, 梅田洋一, 杉谷泰夫, 中井 健: 鉄と鋼, 69 (1983), S885
- 47) 綾田研三, 宮崎 純, 藤本孝彦, 中田 等, 森隆資, 成田貴一: 鉄と鋼, 68 (1982), S280
- 48) P. MATTEAZZI: *Iron and Steel International* (1982) Aug., p. 199
- 49) V. T. SLADKOSHTEEV, O. A. SHATAGIN, M. A. KURITSKIY, I. A. YAKUNIN and A. S. EREMEENKO: *Stal'* (1964), p. 795
- 50) ヴエ. テ. スラドコシュテエフ, オ. ア. シャタギン, エス. エフ. ハレムスキー, イ. ア. ヤクニン, エリ. テ. クツエンコ, エリ. イ. ベリヤコフ, ア. エス. エレメンコ, ヴエ. ヴエ. サチコ: “鋼の晶出の物理化学的及び熱物理的プロセス 第3部 鋼の連続鑄造の諸問題” (日ソ通信社訳) (昭和 43 年 6 月), p. 37
- 51) G. HOLLEIS and H. SCHUBERT: *Vöest-Alpine Continuous Casting Conference* (1981) No. 22
- 52) 川崎重工業(株): *Catalogue*, No. 3X1047, Mar., 1983⑤
- 53) R. THIELMANN and R. STEFFEN: *Stahl Eisen*, 100 (1980), p. 400
- 54) V. T. SLADKOSHTEEV, A. I. MANOKHIV and O. A. SHATAGIN: *Stal'* (1977), p. 311
- 55) 石原和雄, 阪根武良, 福島佳喜, 小玉 宏, 小泉孝, 杉谷泰夫, 中井 健: 鉄と鋼, 66 (1980), S746
- 56) 宮崎 純, 中田 等, 安中弘行, 綾田研三, 大手彰, 森 隆資, 成田貴一: 鉄と鋼, 68 (1982), S278
- 57) H. E. ALLEN, L. WATTS and R. HADDEN: *Publ. Met. Soc.* (1977) 184, p. 215