

# 鋼板用ニアネットシェイプ連続铸造の現状

渡部 忠男\*

Overview of Near-net-shape Continuous Casting for Steel Sheet

Tadao WATANABE

**Synopsis** : Current status and technologies on the near-net-shape continuous casting for steel sheet are reviewed. Thin slab continuous casting and compact rolling process is economically acceptable and has become pretty popular for the last 10 years. High quality applications will be the key to further expansion of this process. The twin-roll strip continuous casting process for austenitic stainless steels has been commercialized recently. The key process parameters determining the casting regularity and the product quality have been assessed. However it will take some time to expand the strip casting process, because it remains to be seen if the technology is economically feasible.

**Key words**: continuous casting; near net shape casting; thin slab casting; strip casting; solidification.

## 1. 緒言

ニアネットシェイプ連続铸造とは最終製品により近い形状の铸片を連続的に铸造することを意味する。この最大関心事は、工程省略とより簡素な製造設備によって設備費と製造コストを下げられることにある。一方、製品により近い形状の铸片をつくるということは、铸造の困難性を克服するための新技術とより厳格な品質造り込みのための技術が必要となる。

本報では、ニアネットシェイプ連続铸造のなかで最近進展がめざましい薄鋼板用の薄スラブ連続铸造（以下、TSC: Thin Slab Casting）とストリップ連続铸造（以下、SC: Strip Casting）について、開発技術と商用生産の現状を概観する。

## 2. ニアネットシェイプ連続铸造の位置づけ

日本国内での普通鋼薄鋼板は、Fig. 1のAに示すプロセスで製造され、厚み200 mmから300 mmの連続铸造スラブを素材としている<sup>1)</sup>。この従来型プロセスは年産200~500万トンという高い生産能力を有する反面、大規模で高額な熱間圧延設備を必要とする。

これに対して、薄鋼板にやや近い铸片、具体的には厚さ40~100 mm程度の薄いスラブを連続铸造して、これを安価なコンパクト熱間圧延設備で薄鋼板を製造しようとするのがFig. 1のBまたはB'プロセスである。このプロセスでは従来型プロセスAに比べて初期設備投資が半分以下と小さいため、年産60~150万トン程度の小規模薄鋼板事業が展開できる道を開いた。また、Fig. 2に示すように、この

プロセスの薄鋼板製造コストは従来法に比べて、少なくとも10%は削減できると言われている<sup>2)</sup>。

Fig. 1のCは薄鋼板により近い铸片、具体的には厚さ1~5 mmの極薄铸片をSCによってつくり、10~30%程度のインライン熱間圧延を経て薄鋼板を製造するプロセスである。このプロセスはプロセスBに比べて、更なる初期設備投資削減と省エネルギーを主体とした製造コストの削減が可能となる(Fig. 2)。加えて、大幅な納期短縮も期待できる。ステンレス鋼を対象とした場合でみると、年産30~50万トン規模の生産能力が想定されている。

## 3. 薄スラブ連続铸造法の開発と普及

### 3.1 1980年代の開発競争

厚さ数mmの薄鋼板をつくるのに、どうして200 mm以上の厚いスラブを使う必要があるのか、という素朴な疑問に本格的に取り組み出したのは従来型スラブ用連続铸造法が技術的にほぼ確立した1980年代に入ってからである<sup>3)</sup>。従来型の連続铸造法に比べてTSC法が直面した主要技術課題は次の二つである。

(1) いかにして薄い铸型空隙に溶鋼を注入するかという給湯技術。

(2) スラブが薄い分、铸造速度を増大させて生産性を確保するための高速铸造技術。

スラブ厚みを従来法の1/2~1/4にして、铸造速度を2~4倍(3~6 m/min)にするためのアプローチとして二つの方法があった<sup>4)</sup>。一つは、従来法と一線を画して铸型と凝固シェルに相対速度がない同期铸型方式による方法である。もう一つは、従来法の固定铸型振動方式を極限まで追求す

平成13年9月18日受付 平成13年11月22日受理 (Received on Sep. 18, 2001; Accepted on Nov. 22, 2001)

\* 住友金属工業(株) 総合技術研究所 (Corporate Research & Development Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16-1 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki-ken 314-0255)

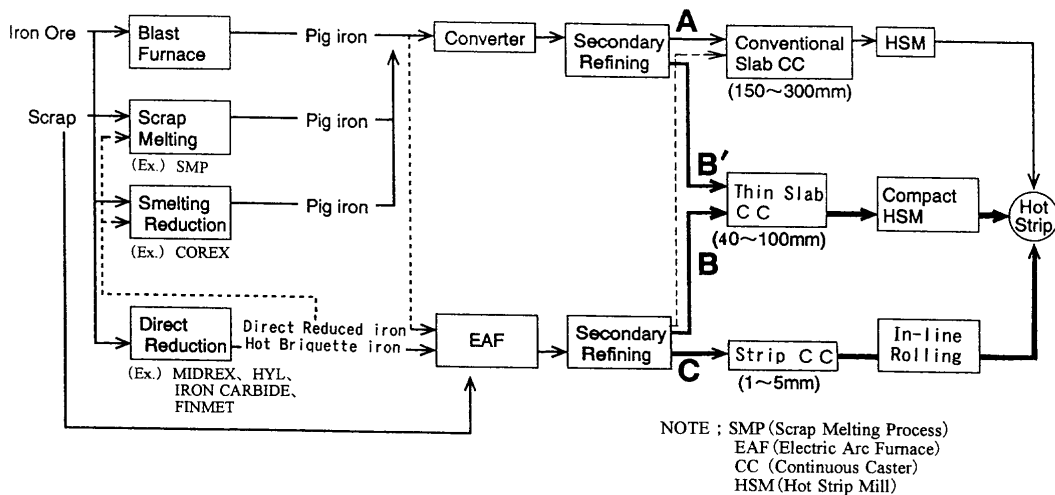


Fig. 1. Various production processes for hot strip.<sup>1)</sup>

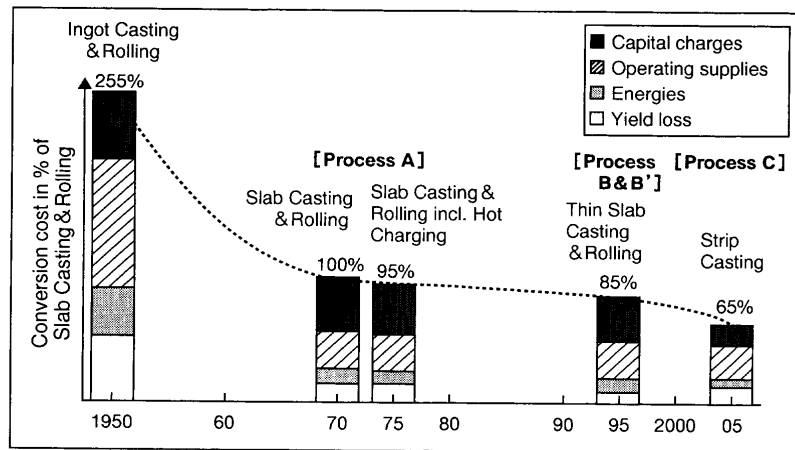


Fig. 2. Comparison of conversion costs from liquid steel to hot rolled coil.<sup>2)</sup>

の方法である。おおまかにみると、日本とアメリカは第一の方法、欧州は第二の方法で開発競争がなされた。

### 3.2 同期鑄型方式連続鑄造法の開発

鑄型と凝固シェルが同期して移動する同期鑄型方式で、商用規模のパイロットプラントまで開発が進んだのはベルトを用いた方法のみである。鉄鋼会社主導のもと、炭素鋼を対象に以下の三つのアプローチで進められた。

(1) 傾斜双ベルト方式：1982年、日本で溶鋼50トン規模で開発に着手<sup>5)</sup>。また、1986年、米国で溶鋼32トン規模で同方式の開発に着手<sup>6)</sup>。

(2) 垂直上広がり双ベルト方式：1987年、日本で溶鋼160トン規模で試験開始<sup>7)</sup>。

(3) 垂直平行双ベルト方式：1989年、日本で溶鋼70トン規模で開発を進めた<sup>8)</sup>。

これらは、スラブ厚み30~75mmで鑄造速度6~10m/minを達成して、いずれも実用化の可能性を提示した。しかし、従来法に対する優位性を発揮することができず商用生産には至らなかった。

### 3.3 固定鑄型方式連続鑄造の限界追求

欧州では日本と異なり、鉄鋼会社ではなく重工設備会社主導で開発が進められた。

(1) 1985年、ドイツのSMS社は鑄型内で凝固シェルを変形させて鑄造するという画期的着想から漏斗状鑄型を考案して、炭素鋼を対象に18トン溶鋼の鑄造試験を開始した<sup>9,10)</sup>。鑄型は幅中央部が上方に向かって広がった漏斗状になっており、鑄型下端で厚み40~50mmの矩形になっている。浸漬ノズルは鑄型の広がった部分に入れることにより給湯の困難性を克服した。

(2) 1987年、ドイツのMDH社は鑄型形状を垂直曲げ型として、厚みが60~70mmの矩形鑄型を用いた鑄造試験を開始した<sup>11,12)</sup>。浸漬ノズルは超扁平薄肉化で対応した。また、鑄造途中の鑄片に圧下と軽圧延を加えることを特徴とした。

(3) 1988年、オーストリアのVAI社は厚みが80mmの矩形垂直鑄型を用いてステンレス鋼の鑄造試験に着手した<sup>13,14)</sup>。

(4) 1889年、ドイツのThyssen Stahl社は他2社と共同

Table 1. Main specifications of the first commercial thin slab hot-rolling facilities in different technologies.

Technology*	C S P <sup>2 1)</sup>	I S P <sup>2 2)</sup>	Q S P <sup>2 3), 2 4)</sup>	D S P C <sup>2 5)</sup>
Operator	Nucor Steel	Arvedi A.T.	North Star BHP Steel	Algoma Steel
Location (country)	Crawfordsvill (USA)	Cremona (Italy)	Delta (USA)	Sault-Sainte-Marie (Canada)
Start up	July 1 9 8 9	Jan. 1 9 9 2	Nov. 1 9 9 6	Aug. 1 9 9 7
Steel grades	Caron steel	Carbon steel Stainless steel	carbon steel	carbon steel
CASTER				
Builder**	S M S	M D H	S M I / S H I	D A N I E L I
Type	Vertical-Bending	Bow	Vertical-Bending	Vertical-Bending
Strand	1	1	1	2
Slab dimensions (m m)	50 x 950-1375	60 x 650-1330	90 x 900-1565	90 x 800-1640
Mold shape	Vertical funnel	Vertical-multibending	Vertical Straight	Vertical Funnel
Mold length (m m)	1 1 0 0	1 0 0 0	9 5 0	1 2 0 0
Tundish capacity (T)	1 7	2 0	2 7	5 0
Bending radius (m)	3 . 0	5 . 2	3 . 5	5 . 0
Machine length (m)	5 . 8		1 5 . 7	
Max casting speed (m / m i n)	5 . 5	5 . 0	5 . 0	5 . 0
Liquid core reduction	no	yes	no	yes
Rolling before slab cutting	no	yes (4 Hi mill x 3)	no	no
HOT STRIP ROLLING				
furnace	Tunnel	Induction heater	Tunnel	Tunnel
Roughing mill	0	0	2	1
Coil box	no	yes	no	no
Finishing mill	5	5 (← 4)	6	6
Strip gauge (m m)	1.8-12.7	Carbon Steel:1.2-12.0 Stainless:2.0-20.0	1.4-15.0	1.0-16.0
Remarks	World's first thin slab caster.		World record in monthly production per single strand, 131KT/M	Caster with 2 strands.

\* CSP: Compact Strip Production、ISP: Inline Strip Production、QSP: Quality Strip Production、DSPC: Direct Strip Production Complex

\*\* SMS: SMS Schloemann-Siemag、MDH: Mannesmann Demag Huttentechnik、SMI: Sumitomo Metal Industries、SHI: Sumitomo Heavy Industries、Danieli: Danieli Centro Met.

で、漏斗状鑄型から出てきた鑄片を直ちに1段または2段のロールで強圧下して一挙に薄スラブを得るプロセスの開発に着手した<sup>15,16)</sup>。

(5) 1992年、イタリアのDanieli社は溶鋼80トン規模のパイロットプラントで本格開発に入った。鑄型は漏斗状鑄型に類似した構造であるが、鑄型下端でも矩形になっておらず鑄型に続くセグメントロールで矩形化することを特徴としている<sup>17)</sup>。

(6) 欧州以外では住友金属が1989年に厚み90~120mmのスラブを対象に溶鋼50トン規模のパイロットプラントによる高速鑄造試験に着手した<sup>18)</sup>。鑄型形状はVAI社と同じ矩形垂直型であるが、鑄型長さが900~950mmと短いことが特徴である。

### 3.4 薄スラブ連続鑄造機による実生産の現状

上記3.3で述べた6つの開発プロジェクトのうち、(4)を除く5つの方式が実生産プロセスへと発展した。各方式の商用TSCの第1号機とそれに関連する熱延設備の概要をTable 1に示す。尚、VAI社の商用機はスラブ厚みが100~150mmと厚く、鑄造速度が1.8~3.0m/minと低いため本表から割愛した。

世界最初の商用TSC機はSMS社が開発して、1989年に

米国のNucor Steelに設置された<sup>19,20)</sup>。鑄造から熱間圧延までの生産プロセスの概念図をFig. 3, (A)に示す<sup>21)</sup>。連続鑄造機-トンネル炉-仕上げ圧延機から成り、全長約300mのうちおよそ半分の長さはトンネル炉が占めている。連続鑄造機は垂直部で完全凝固させることを基本思想としているため機高は約10mと高い。

これに対して、商用2号機は1992年にMDH社が開発してイタリアのArvedi社に設置された。このプロセスはFig. 3, (B)に示すように、連続鑄造機-未凝固溶鋼を有した鑄片の圧下(以下、LCR: Liquid Core Reduction)-凝固後未切断鑄片の圧延-コイルボックス-仕上げ圧延機から成る<sup>22)</sup>。このプロセスは連続鑄造機を出た後の未切断鑄片を鑄造速度に同期した低速圧延をするところに最大の特徴がある。また、コイルボックスを用いているため全長は約180mと短い。

その後、これら二つのプロセスが原型となり、例えば、鑄造スラブが70~100mmと相対的に厚い場合は、Fig. 3, (C)に示すようにトンネル炉と仕上げ圧延機の間1~2段の粗圧延機とコイルボックスが加わるようなプロセスもみられる<sup>25,26)</sup>。

これらのTSC-コンパクト圧延プロセスは、2001年には

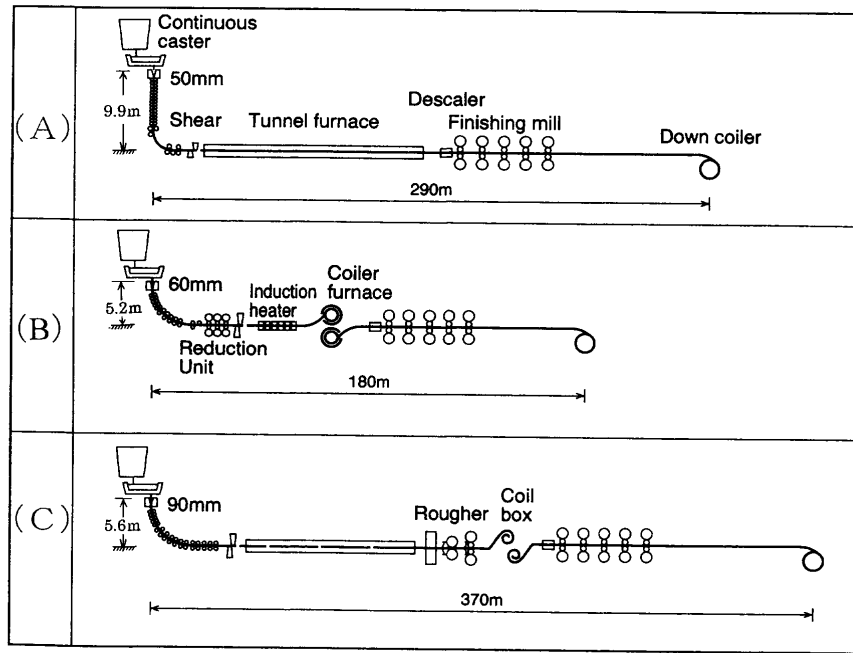


Fig. 3. Comparison of the thin slab continuous casting-compact hot rolling processes ((A) CSP process, (B) ISP process, (C) QSP process).

Table 2. Commercial thin and medium thick slab casting plants (Status: September 2001).

No	Start up	Company / Plant	Country	No. of strand	Dimensions at mold exit (mm)	Caster Builder *	Remarks
1	1989.7	Nucor/crawfordsville # 1	USA	1	50x 950-1375	SMS	
2	1992.1	Arvedi/Cremona	Italy	1	60x 650-1330	MDH	
3	1992.9	Nucor/Hickman # 1	USA	1	54x1220-1560	SMS	
4	1994.4	Nucor/crawfordsville # 2	USA	1	50,60x950-1325	SMS	
5	1994.5	Nucor/Hickman # 2	USA	1	54x1295-1560	SMS	
6	1995.2	HLYSA/Monterrey # 1	Mexico	1	50 x860-1375	SMS	
7	1995.4	Gallatin/Warsaw	USA	1	50 x1000-1560	SMS	
8	1995.4	Aramco/Mansfield	USA	1	132x635-1283	VAI	Stainless
9	1995.12	Steel Dynamics/Butler # 1	USA	1	90x990-1625	SMS	
10	1996.10	ACB/Bilbao	Spain	1	53x905-1560	SMS	
11	1996.10	POSCO/Kwangyang # 1	S.Korea	1+ 1	70, 85x900-1350	MDH	
12	1996.10	ACME/Riverdale	USA	1	55x1220-1560	SMS	
13	1996.10	Nucor/Berkeley # 1	USA	1	53x900-1680	SMS	
14	1996.10	Tuscaloosa/Tuscaloosa	USA	1	130x914-2591	SMS	plate
15	1996.11	North Star BHP/Delta	USA	1	90 x900-1565	SMI/SHI	
16	1997.2	TRICO/Decatur # 1, # 2	USA	1+ 1	90x914-1650	SMI/SHI	
17	1997.5	IPSCO/Montpelier	USA	1	152x1830-3050	MDH	plate
18	1997.8	Algoma/Sault	Canada	2	90x800-1640	Danieli	
19	1997.11	Nova Hut/Ostrava	Czech	1	125x740-1575 150x600-712Twin	VAI	
20	1998.4	ISPAT/Dolvi # 1	India	1	50x900-1560	SMS	
21	1998.5	Saldanha/Saldanha Bay	S.Africa	1	90x900-1560	MDH	
22	1998.7	Steel Dynamics/Butler # 2	USA	1	90x990-1625	SMS	
23	1998.10	HLYSA/Monterrey # 2	Mexico	1	50x790-1350	SMS	
24	1999.2	Mega Steel/Klang # 1, # 2	Malaysia	1+ 1	50x790-1575	SMS	
25	1999.4	TKS/Bruckhausen	Germany	2	63x900-1600	SMS	
26	1999.6	SSM/Rayong	Thailand	1	100x1000-1550	SMI/SHI	
27	1999.8	Zhujiang/Guangzhou	China	1	50x1000-1300	SMS	
28	1999.12	Handan/Hebei	China	1	73x900-1680	SMS	
29	1999.12	Corus/Ijmuiden	Netherlands	1	90x900-1560	MDH	
30	1999.12	ANSDK/Alexandria	Egypt	1	52x900-1600	SMS	
31	2000.7	Nucor/Berkeley # 2	USA	1	53x1220-1680	SMS	
32	2000.9	Nucor/Hertford	USA	1	102,125,150 x1800-3200	Danieli	plate
33	2000.12	Anshan/Anshan	China	1	100,135x900-1620	VAI	
34	2000	ISPAT/Dolvi # 2	India	1	50x900-1560	SMS	
35	2001.1	IPSCO/Mobile	USA	1	126,152x1524-3125	VAI	plate
36	2001.1	Baotou/Baotou	China	2	60 x980-1560	SMS	
37	2001.7	AST/Terni	Italy	1	60,70x1000-1560	SMS	Stainless

\*VAI : Voest-Alpine Industrieanlagenbau

世界で30基以上が稼働しており、普及の段階に入っている(Table 2)。このプロセスは1989年以降、電気炉溶鋼を用いたミニミルに導入されてきたが、1996年には転炉溶鋼を使用した高炉メーカーで初導入された<sup>27)</sup>。その後、規模が大きい高炉メーカーでも導入の動きが始まった<sup>28,29)</sup>。TSC機は1ストランドから成るものが大部分であるが、取鍋溶鋼が200トンを超える大規模工場では2つのストランドから成るものも見受けられる。以上はすべて薄鋼板を製品とする場合の動向であるが、同じ技術思想で厚み102~152mmの広幅スラブから厚鋼板を製造するプロセスも見受けられる<sup>30)</sup>。

一方、以上のような世界動向に対して、日本ではTSC-コンパクト圧延プロセスは1基も稼働していない。本プロセスに対する日本の消極性は、従来型スラブ用連続鑄造機をすでに多数保有して高度に順応していることと、鋼板品質に非常に敏感な国内市場を抱えていることによると思われる。

### 3.5 薄スラブ連続鑄造技術の現状

TSC法が有する技術要素は従来型スラブ用連続鑄造法におけるものと大きくは変わらない。ただし、鑄片手入れを想定しない直結プロセスという意味ではより厳しい表面品質が要求される。本法の実用化には以下の応用技術が重要な役割を担った<sup>31)</sup>。

#### 3.5.1 給湯技術

本報では薄スラブの厚みを40~100mmと定義しているが、商用化されたTSC機の仕様をみると厚みが40~70mmの薄スラブと80~100mmの中厚スラブに分類することもできる。前者は現在稼働しているTSCの約7割を占め、浸漬ノズル給湯に有利な漏斗状鑄型を採用している。後者は矩形鑄型の採用が多い。

いずれの場合も従来型スラブ用連続鑄造に比較して浸漬ノズル内径が小さいため、アルミニウムで脱酸された鋼を鑄造する場合には $Al_2O_3$ による浸漬ノズル閉塞が起りやすい。従来法のようにアルゴンガスをノズル内に吹き込むと、TSCは鑄造速度が非常に大きいため、アルゴンは鑄片に捕捉されてピンホール欠陥となりやすい。このため、現状のTSCでは $Al_2O_3$ 生成を抑制するために溶鋼をCa処理して鑄造を行うことが多い。

#### 3.5.2 高速鑄造技術

低炭Alキルド鋼についてみると、従来型スラブ用連続鑄造の最高鑄造速度が2.5m/min程度であるのに対して<sup>32)</sup>、TSC商用機の同鋼種最高鑄造速度は倍速の5~6m/minである。パイロットTSC機では8.0m/minで鑄造して熱延コイルを製造した実績がある<sup>33)</sup>。一方、凝固シェルの破断強度からの研究結果では8.5m/minまでは鑄造可能との推測がある<sup>34)</sup>。

安定した倍速鑄造を可能にするためには、操業ではブレークアウト、鑄片品質では表面縦割れを防止する必要がある。

ある。これらはいずれも鑄型内で凝固が開始し始めるメナスカス近傍がポイントになる。具体的には、この部位での鑄型内溶鋼流動、鑄型内溶鋼湯面変動、鑄型内抜熱量の制御が重要となる。流動に関しては、浸漬ノズル吐出口形状の工夫や電磁ブレーキの付与が行われている。また、湯面変動はその変動量が10mm以内に制御することが必要で、高精度な制御モデルが実用化している。加えて、鑄型振動テーブルをステッピングシリンダで直接支持してかつ振動テーブルと鑄型間に板バネを入れて共振させることを狙った直動式鑄型振動装置が開発されて、鑄型横振れが減少して高速鑄造の安定化に寄与した<sup>35)</sup>。これら技術を基本として最終的に高速鑄造の鍵を握るのはパウダーである。とくに、縦割れ感受性が大きい亜包晶鋼(炭素濃度0.09~0.15mass%)は、これまでのTSCでは矩形鑄型の場合でも最高鑄造速度が3m/min程度であった。しかし、鑄型・鑄片間の熱伝導が凝固速度を支配するごく初期の凝固シェルを緩冷却化できるパウダーが開発されて、当該鋼種でも縦割れを発生させることなく5m/minの鑄造が可能になったとの報告がある<sup>36)</sup>。

尚、漏斗状鑄型を用いた場合は凝固シェルが鑄型内で矩形変形させる必要があるため、割れ感受性が大きい亜包晶鋼の鑄造には不利である<sup>37)</sup>。さらに凝固シェルの変形抵抗から鑄造可能最低速度が存在するという制約がある。

#### 3.5.3 鑄片圧下技術

連続鑄造機出口での鑄片厚みが薄いほど熱間圧延設備はコンパクトになり設備費低減が期待できる。そのため、連続鑄造機内でのLCRや未切断鑄片の凝固直後圧延技術が開発されて、厚み1.2mm未満の極薄熱延鋼板の製造が可能になっている<sup>27,38,39)</sup>。

LCRは大きな設備を必要としないため、圧下量20mm程度で商用機に広く適用されている。試験的には圧下量40mmまで問題なく行った実績がある<sup>40)</sup>。一方、未切断鑄片の凝固後低速圧延は、これまで2基の商用機で採用されて稼働中だがその後の進展はみられない。鑄片表面温度が下がった場合に低速圧延をすると圧延割れが生じやすいことや低速圧延機のメンテナンス問題を内包しているためと思われる。また、最近の中厚スラブではFig. 3, (C)に示すように切断後の鑄片を粗圧延する方向が一般化している。

### 3.6 薄スラブ連続鑄造法の課題

TSC法-コンパクト圧延プロセスのコスト優位性は証明され、従来法では製造が困難であった極薄熱延鋼板を製造できることなどもあり、現在は普及の段階に入ったと言える。しかし、今後この趨勢が続くか否かは「TSC-コンパクト熱延」プロセスで得られる薄鋼板品質が「従来型スラブ用連続鑄造-従来型大規模熱延」プロセスで得られる品質と同等または凌駕するものになりうるか否かにかかっている。炭素鋼でみると、現状は自動車用外装材や保安部材、強加工部材や家電用部材などのいわゆる高級鋼へのコンス

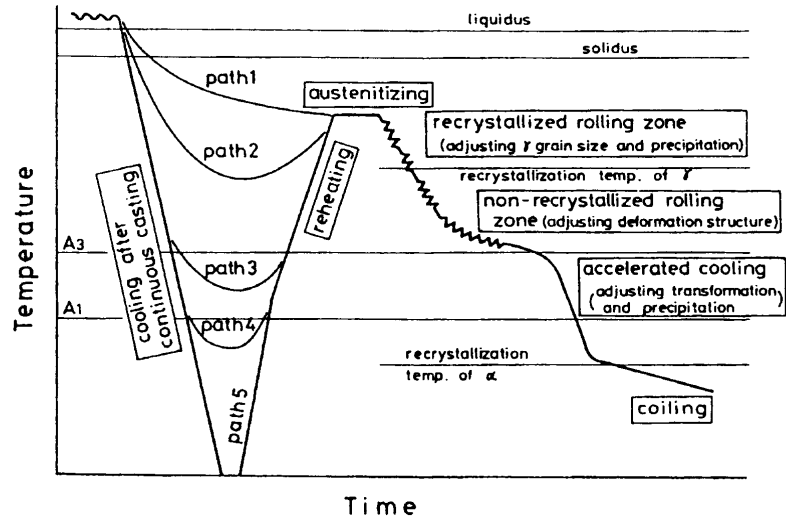


Fig. 4. Schematic schedule of controlled rolling of steels from continuous casting through reheating, rolling and accelerated cooling to coiling.<sup>43)</sup>

タントな適用は実現しておらず、主として低・中級鋼に適用されている。一方、ステンレス鋼でみると、これまでは従来型連続鋳造スラブと同等の品質を得るためにスラブ厚みは100~150mmと厚めにして、3m/min未満の低速鋳造にとどまっていた<sup>41)</sup>。しかし、最近ではスラブ厚み60~70mmで鋳造速度5m/minの条件で同等の品質を得るまでに進展している<sup>42)</sup>。

TSC法は従来型スラブ用連続鋳造法の倍速鋳造であり、そのために起こりやすい銑片割れの問題は初期凝固制御技術の進展で克服しつつある。しかし、TSCは以下に述べる二つの課題を残している。

(1) アルミニウム脱酸鋼に対して、銑型への給湯ノズル閉塞を避けるための溶鋼Ca処理必須の問題。この問題を克服しないと、例えば極低碳素鋼を本法に取り込むことが難しい。また、Ca処理不要になった場合には高速鋳造であるがゆえに懸念される介在物増加の問題。

(2) 次工程圧延との直結を前提としているため、銑片は圧延までの途中でA<sub>3</sub>変態点以下には冷却されない(Fig. 4, path 2)。このため、銑片は粗大なオーステナイト組織のまま圧延されることになり鋼板の結晶粒微細化は期待できない。したがって、本法の適用鋼種を拡大していくためには何らかの工夫が必要になる<sup>29,43-48)</sup>。

今後、この二つの課題が克服できれば高級鋼適用の突破口になりうる。この分野での日本の鉄鋼研究者と技術者の出番は残っている。

## 4. ストリップ連続鋳造法の開発と進展

### 4.1 開発競争

1980年代に入ってからSC法はステンレス鋼を主対象に開発が進められた<sup>49,51)</sup>。その理由として、オーステナイト

系ステンレス鋼は炭素鋼などの他の鋼種よりも表面性状が良いストリップ銑片が得られやすいことと、ステンレス鋼で多い小ロット生産に適していることが挙げられる<sup>51)</sup>。これに加えて、SC法の鋳造時間生産性とステンレス鋼の精錬時間生産性がほぼ同程度であることや、ステンレス鋼板分野に多いスラブ物流問題解決の道を開く可能性があることも理由として考えられる。一方、炭素鋼については、やや遅れて1990年代に入ってから建材用低炭シリコン脱酸鋼や電磁用高珪素鋼など、脱酸剤としてアルミニウムを用いない鋼を対象にして開発が進められた<sup>52-54)</sup>。

1980年代、世界各地で各種形式のSC法が実験室規模で試みられた。その後、日本、欧州、米国、豪州、韓国では溶鋼10トン以上規模のパイロットキャスターにまで進展した<sup>54-56)</sup>。それらをまとめてTable 3に示す。表の中で、(1)が1997年に商用SCの1号機として日本で稼働した。TSCの商用1号機に比べると約10年遅れて商用化したことになる。その後、(4)が1999年にドイツで商用稼働に発展し<sup>66)</sup>、(7)が2002年に米国で商用稼働予定となっている<sup>68)</sup>。

### 4.2 ストリップ連続鋳造機による実生産の現状

SC機はまだ実用化がスタートしたばかりであり、実生産プロセスとしての実力は定まっていない。商用機として稼働した2基は、いずれもステンレス鋼を対象とした垂直双ロール方式である。商用SCプラントの一例をFig. 5に示す<sup>66)</sup>。ラインの全長は50~80m程度で、TSC法に比べてさらにコンパクトである。2002年稼働予定の炭素鋼を主対象とした商用SC機も同方式であり、量産商用機としては垂直双ロール方式に収斂したと言える。

三つの商用SC機仕様と下流工程を比較してTable 4に示す。コストと生産能力に直接関与する双ロール径には大きな違いがある。一方、鋳造ストリップを熱延鋼板にするためには、寸法精度と結晶粒の視点からインライン熱間圧延

Table 3. Main specifications of the principal pilot strip casters larger than 10 tons in casting weight.

Process	Steel grade	Company*	Start year	Casting weight (tons)	Roll diameter x width (mm)	Remarks
Vertical twin roll	Stainless steel	(1) Nippon Steel/MHI <sup>5 7)</sup>	1989	10	1200 $\phi$ x 800, 1330	• Width: 800 $\rightarrow$ 1330mm in 1992. • Industrialization in 1997
		(2) Pacific Metals/Hitachi Zosen <sup>5 8)</sup>	1990	10	1200 $\phi$ x 1050	• Stopped.
		(3) Nihon Yakin/MHI <sup>5 9)</sup>	1990	10	800 $\phi$ x 600	• stopped.
		(4) MYOSOTIS <sup>6 0, 6 1)</sup>	1991	92	1500 $\phi$ x 865	• VAI joined in 1995. • Industrialization in 1999
		(5) POSCO <sup>6 2)</sup>	1995	10, 50	1250 $\phi$ x 1300	• Width: 350 $\rightarrow$ 1300mm in 1995
	Carbon steel	(6) AST/CSM/VAI <sup>5 2, 5 3)</sup>	1991	20, 60	1500 $\phi$ x 800, 1130	• Width: 800 $\rightarrow$ 1130mm in 1999.
		(7) BHP/IHI <sup>5 4)</sup>	1995	60	500 $\phi$ x 1345	• Industrialization is planned for early 2002.
Horizontal single roll	Stainless steel	(8) Allegheny/VAI <sup>6 3)</sup>	1992	18	1000 $\phi$ x 660, 1320	• Stopped.
Single belt	Carbon steel	(9) MEFOS/MDH <sup>6 4, 6 5)</sup>	1993	10	Belt width 450, 890	• Cast thickness 10mm. • Width: 450 $\rightarrow$ 890mm in 1997.

\* MHI: Mitsubishi Heavy Industries, AST: Accai Speciali Terni, CSM: Centro Sviluppo Materiali, IHI: Ishikawajima Harima Heavy Industries

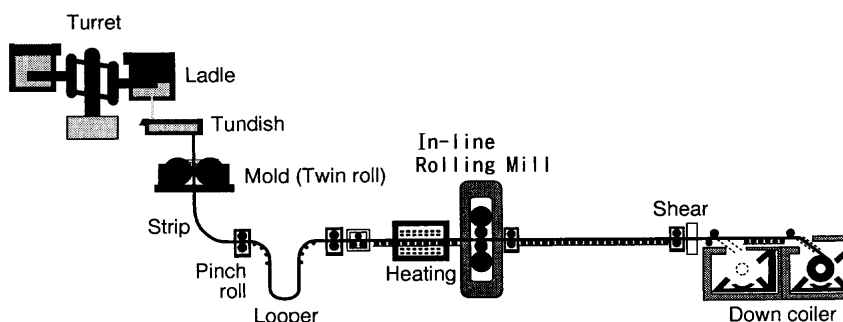
Fig. 5. An example of the production plant with strip caster (Krefeld, Germany).<sup>66)</sup>

Table 4. Machine specifications and caster capability of commercial strip casters.

Company	Nippon Steel	Eurostrip		Castrip
Works	Hikari (Japan) <sup>5 0, 6 7)</sup>	Krefeld (Germany) <sup>6 6)</sup>		Crawfordsvill (USA) <sup>6 8)</sup>
		Pre-industrial	Industrial	
Hot run	1997.10	1999.12	2001.5	(2002)
Heat capacity (tons)	60	90		110
Steel grade	Austenitic stainless steel	Austenitic stainless steel		Low carbon steel Ferric stainless steel
Casting rolls diameter (mm)	1200	1500		500
Cast strip	thickness (mm)	2.0-5.0		0.7-2.1
	width (mm)	760-1330		Initially 1345
Casting speed (m/min)	30-80	35-70		60-150
In-line rolling	reduction (%)	yes	no	Single 4-high hot reduction mill
		yes	—	10-30
Nominal caster capacity (ktons/a)	420	100	400	300-750 (500)

を必須としている点は共通である。

#### 4.3 ストリップ連続鋳造技術の現状

垂直双ロール方式SC法は従来型スラブ用連続鋳造法とは大きく異なる技術要素を有している。SC法は鋳型に相当するロール間に溶鋼プールを形成して鋳造するため、ロール側面に湯漏れを防ぐサイド堰が必要である。ロールとの接触で生成した凝固シェルはロールと同速度で移動しながら成長して、ロール最近接位置（キス点）で他方のシェルと圧着され、1~5mm厚さのストリップ鋳片としてロールを離脱する。凝固が完了するまでの時間は0.2~0.8秒程度で従来型連続鋳造法に比べて極端に短い。ストリップ鋳片の厚みはロールと鋼が接している時間に比例するが、湯面レベル変動などで微妙に変化するもので、一定の厚みに保つための制御が重要となる。

固定鋳型と潤滑パウダーを用いる従来型スラブ用連続鋳造法と異なり、SC法は以下の特徴を有する。

(1) 長辺面はロール冷却、短辺面はサイド堰断熱という二つの異なる凝固特性が溶鋼プール内に共存する。

(2) 長辺面凝固シェルは水冷ロールとの直接接触によって生成するため、凝固時の冷却速度が大きい。

(3) 凝固進行の揺らぎがストリップ鋳片の厚み変動に大きく影響する。

##### 4.3.1 サイド堰機能の安定化技術

サイド堰には湯漏れを起こさないことと凝固シェルを生成させないという二つの機能が求められる。ロールが熱変形しても湯漏れが起こらないようにするため、サイド堰はロール端部に油圧またはバネで押しつけられている。このため、サイド堰はロールと接している部分で摩耗が起こりやすい。一方でサイド堰は表面に凝固シェルを生成させないために断熱性が求められる。そこで、ロール端部との接触部分にセラミックス部材をはめ込んだ耐火物-セラミックス複合材堰が開発された<sup>52,69)</sup>。さらに耐火物の背面に電気ヒータを埋め込んだサイド堰も一般化している。また、ロールへのサイド堰押しつけ圧と堰の位置を制御する技術も実用化している<sup>50)</sup>。電磁気力を利用してサイド堰の溶鋼保持力を増す方法も実用化に近い段階にある<sup>70)</sup>。

##### 4.3.2 均一凝固技術

従来型スラブ用連続鋳造における鋳型内初期凝固シェルの冷却速度は10K/s以下であるのに比べて、SC法では鋳片表層で $10^3$  K/sのオーダー、厚みの中心部でも $10^2$  K/sのオーダーで非常に大きい<sup>71,72)</sup>。また、最大局所熱流束で見ると、鋳造速度5m/minのTSC条件で3~4MW/m<sup>2</sup>程度であるのに比べ、SCでは7~14MW/m<sup>2</sup>と大きい<sup>73)</sup>。

一般に、凝固時の冷却速度が大きくなるにつれて凝固シェル厚みの不均一が発生しやすくなり鋳片の割れ感受性が大きくなる。そこで、熱流束を低減するために水冷銅または銅合金製のロール表面に微細な凹凸付与やNiめっき、耐火物溶射などの表面加工は必須の技術となっている。ま

た、鋳片幅方向に均一な厚みを得るためにはロール熱変形の考慮が重要であり<sup>74)</sup>、ロール幅中央部の直径をわずかに小さくする逆クラウン型ロールの使用も一般化している<sup>75)</sup>。

鋳造条件からみると、浸漬ノズルからの給湯の安定性を前提として、溶鋼プール表面を十分に断気することによってスカム生成を抑制することや、湯面変動を少なくとも $\pm 1.5$ mm以内に制御する技術も凝固均一化に大きく寄与する。さらに、鋳造速度を増加させるとメニスカス形状が変化する結果、凝固開始位置が遅れて凝固均一化効果を生み出すことも知られている<sup>76)</sup>。

現在では、これら技術を組み合わせることで鋳片の割れ感受性を小さくすることに成功している。

##### 4.3.3 鋳片厚み制御技術

ストリップ鋳片の厚み変動を抑制するために種々の制御システムが開発されている。鋳造中のロールキス点間隔は一般には油圧サーボシステムで制御され、ロール反力の変動に対してはロール回転速度（鋳造速度）により調整されることが多い<sup>77)</sup>。

ロールの鋳片圧下力は、大きすぎると鋳片表面横割れや中心部負偏析をひき起こしやすい。また、小さすぎると鋳片中心部に引け巣（ポロシティー）ができやすくなるため、鋳片品質確保の視点からもロール圧下力をダイナミックに適正化する技術が重要となる。

#### 4.4 ストリップ連続鋳造法の課題

SC法はステンレス鋼での実用化が開始されたばかりであり、実生産プロセスとして経済性を有するか否かの実力は定まっていない。熱延鋼板および冷延鋼板としての製品特性もオーステナイト系ステンレス鋼以外は十分に明らかになったとは言えない。例えば、高炭素鋼（炭素濃度 $\geq 0.40$  mass%）の本法適用事例は見当たらない。

本法は凝固開始時の冷却速度が大きく、凝固時間1秒以内で勝負がつく瞬間世界との格闘でもある。そのため、従来型連続鋳造やTSCに比べて制御技術と制御システムの役割が非常に大きい。本法を拡大していくためには以下の基本課題の克服が必要である。

- (1) 双ロールやサイド堰など、設備の熱負荷信頼性
- (2) 均一凝固の安定性

ここで、(1)は鋳造の安定性と本法の製造コストそのものに直結する重要な課題である。(2)は、わずかな凝固不均一の揺らぎが生じてストリップ鋳片品質に与える影響が敏感なため、従来法による熱延鋼板に比べて表面品質が不安定になりやすく、場合によっては鋼板手入れが必要になる。したがって今後、本法をアルミニウム脱酸鋼へ適用拡大を図っていくような場合には、給湯中の不安定な流動の揺らぎを抑制するためにも浸漬ノズル閉塞問題は避けて通れない技術課題となる可能性が大きい。これらの課題に加えて、今後本法の経済性を追求していくなかで、ストリップ鋳片の幅変更をいかに効率よく行うかといった問題への



対応も求められてくるように思われる。

一方、凝固開始時の冷却速度が大きいということは凝固組織微細化や介在物微細化には有利であり、本法は従来型連続铸造やTSCとは一線を画した新材質創製の方向に展開する可能性も残っている。

## 5. 結言

最近進展がめざましい鋼板用ニアネットシェイブ連続铸造の現状と課題について述べた。

(1) TSC-コンパクト圧延プロセスは低・中級薄鋼板を対象に普及の段階に入っている。今後、本法が高級薄鋼板を安定して製造できる技術生み出すか否かが次の拡大の鍵を握っている。

(2) SC法はオーステナイト系ステンレス鋼を対象に商用機が稼働し始めた段階であり、品質に対する市場評価とプロセスとしての経済性は定まっていない。本法はエネルギー削減や環境負荷低減の視点から薄鋼板製造の究極プロセスとしての魅力にかわりはないものの、まだ多くの技術開発の余地を残している。本法が普及の段階に至るためにはしばらく時間を要するよう思われる。

## 文 献

- 1) T.Watanabe, S.Hiraki, M.Kawamoto and Y.Tozaki: Proc. of 3rd Pacific Rim Int. Conf. on Advanced Materials and Processing, TMS, PA, (1998), 1031.
- 2) VAI: *Steel Times*, **228** (2000), 256.
- 3) 杉谷泰夫: 第153・154回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1994), 225.
- 4) 王寺睦満: 第153・154回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1994), 1.
- 5) Y.Sugitani, M.Nakamura, Y.Shirai, T.Okazaki and M.Yoshihara: *Tetsu-to-Hagané*, **71** (1985), A253.
- 6) M.D.Millett: Proc. of 69th Steelmaking Conference, Vol. 69, ISS, Washington, (1986), 837.
- 7) H.Tozawa, S.Moriwaki, N.Yasukawa, T.Fujii, T.Koshikawa and T.Kimura: *Kawasaki Steel Gihō*, **21** (1989), 175.
- 8) H.Fujioka, K.Taii, H.Nakajima, K.Hirata, S.Kashio and N.Kanai: *SEAIQ*, **25** (1996) 4, 41.
- 9) E.Hoffken, P.Kappes and H.Lax: *Stahl Eisen*, **106** (1986), 1253.
- 10) G.Flemming, P.Kappes, W.Rohde and L.Vogtmann: *Stahl Eisen*, **108** (1988), 99.
- 11) H.J. Ehrenberg, L.Parschat, F.P.Pleschiutschnigg, C.Praßer and W.Rahmfeld: *Stahl Eisen*, **109** (1989), 453.
- 12) G.Gosio, L.Manini, C.Maffini, F.P.Pleschiutschnigg, B.Kruger and P.Meyer: Proc. of 1st European Conf. on Continuous Casting, Associazione Italiana di Metallurgia, Milano, (1991), 2.
- 13) S.Selldin, T.Thoren, A.Flick, K.Engel and G.Holleis: *Iron Steelmaker*, **17** (1990) Apr., 22.
- 14) R.Laki, J.Egerstad, S.Selldin, A.Flick, A.Kropf and K.Schwaha: Proc. of 2nd European Conf. on Continuous Casting, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, (1994), 367.
- 15) E.Hoffken: *Stahl Eisen*, **113** (1993) 2, 49.
- 16) M.Espenhahn, R.Bertram, G.Flemming, D.Krüger, G.Pietzko and H.Streubel: Proc. of 2nd European Conf. on Continuous Casting, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, (1994), 1.
- 17) C.Mantvani, A.Carboni, E.Dormini and R.Borsi: Proc. of 2nd European Conf. on Continuous Casting, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, (1994), 374.
- 18) T.Nakai, T.Kanazawa, K.Nakajima, T.Yamada, K.Marukawa, K.Yoshida, T.Tanaka and Y.Inoue: *CAMP-ISIJ*, **4** (1991), 1283.
- 19) F.K.Iverson and K.Busse: *Stahl Eisen*, **111** (1991), 37.
- 20) M.Kolakowski: Proc. of 1st European Conf. on Continuous Casting, Associazione Italiana di Metallurgia, Milano, (1991), 2.
- 21) G.Flemming, F.Hofmann, W.Rohde and D.Rosenthal: *Stahl Eisen*, **113** (1993) 2, 37.
- 22) G.Gosio, M.Morando, A.Guindani and L.Manini: Proc. of Int. Symp. Near-Net-Shape Casting in the Minimills, Vancouver, (1995), 285.
- 23) K.Abe, K.Tsujita, K.Shiozaki, T.Araki and K.Ozaki: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 815.
- 24) C.T.Miller, D.Onions, D.Kovach and D.Knights: Proc. of 83rd Steel-making Conference, ISS, Pittsburgh, (2000), 3.
- 25) R.Borsi and M.Rotti: *Steel Times Int.*, **22** (1998) 2, 22.
- 26) M.Mizuno, K.Tsujita, T.Kanazawa and Y.Minamimura: *Steel Times*, **226** (1998), 168.
- 27) G.E.Kuebler: *Metalproducing*, **33** (1997) Apr., 46.
- 28) R.Lupke, W.May, G.Radusch and W.Rasim: *Stahl Eisen*, **120** (2000), 23.
- 29) R.Barrett: *Met. Bull. Mon.*, (2000) Jul., 49.
- 30) *Steel Times Int.*, **25** (2001) 3, 17.
- 31) Y.Tozaki: *Tekkohkai*, **47** (1997) Apr., 18.
- 32) M.Suzuki, M.Suzuki and M.Nakada: *ISIJ Int.*, **41** (2001), 670.
- 33) H.Kikuchi, M.Hanao, M.Kawamoto, T.Murakami, M.Oka, K.Hanazaki and M.Ikeda: Proc. of 83rd Steelmaking Conference, ISS, Pittsburgh, (2000), 23.
- 34) M.Suzuki, M.Suzuki, C.Yu and T.Emi: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **37** (1997), 375.
- 35) E.Becker, R.Heine and M.Walter: Proc. of 3rd European Continuous Casting Conf., UNESID, Madrid, (1998), 901.
- 36) M.Hanao, M.Kawamoto, M.Hara, K.Hanazaki, T.Murakami and H.Kikuchi: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 21.
- 37) K.Wünnenberg and K.Schwerdtfeger: *Iron Steelmaker*, **22** (1995) Apr., 25.
- 38) L.A.L.Lezama and J.M.M.Baca: *Iron Steelmaker*, **25** (1998) Feb., 25.
- 39) MDH: *Steel Times*, **225** (1997), 227.
- 40) A.Yamanaka, S.Kumakura, K.Okamura, T.Kanazawa, T.Murakami, M.Oka, I.Takeuchi and T.Watanabe: *Ironmaking Steelmaking*, **26** (1999), 457.
- 41) R.J.O' Malley: *Steel Times Int.*, **22** (1998), 13.
- 42) G.Brascugli, A.Mascanzoni, F.Quix and J.Schwellenbach: *Stahl Eisen*, **121** (2001) 3, 63.
- 43) I.Tamura: *Tetsu-to-Hagané*, **74** (1988), 1426.
- 44) H.Takechi, K.Kawasaki and T.Suzuki: *Bull. Jpn. Inst. Met.*, **29** (1990), 413.
- 45) H.Yada: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 734.
- 46) E.Essadiqi, L.E.Collins and G.E.Ruddle: Proc. of the Int. Symp. on Near-Net-Shape Casting in the Minimills, CIM, Ottawa, (1995), 341.
- 47) W.Bleck and J.J.Esser: Paper presented at ECSC Steel Research Conf., (1995).
- 48) H.Bruns and R.Kasper: *Steel Res.*, **68** (1997), 158.
- 49) 竹内英磨: 第153・154回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1994), 260.
- 50) H.Tsakamoto, K.Yamamoto and H.Takatani: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **42** (2001), 426.
- 51) K.Shibuya and M.Ozawa: *ISIJ Int.*, **31** (1991), 661.
- 52) R.Tonelli, L.Saltini, R.Capotosti and A.Contaretti: Proc. of 2nd European Conf. on Continuous Casting, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, (1994), 428.
- 53) G.Hohenbichler, R.Capotosti and P.Tolve: Proc. of Bessemer Centenary Conf., Sheffield, (1998), Session IV, Paper 4.
- 54) W.Blejde, R.Mahapatra and H.Hukase: *Iron Steelmaker*, **27** (2000) Apr., 29.
- 55) A.W.Cramb: Proc. of Int. Symp. Near-Net-Shape Casting in the Minimills, CIM, Ottawa, (1995), 355.
- 56) A.Ferretti: Proc. of 3rd European Conf. on Continuous Casting, UNESID, Madrid, (1998), 237.
- 57) T.Arai, M.Yamada, Z.Kirihara, K.Nakajima, H.Takeuchi, Y.Yamagami, K.Yanagi, K.Yamamoto and K.Sasaki: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 254.
- 58) K.Yamada, T.Watabe, T.Nishimae, M.Tsukigadou, H.Sakaguchi, T.Hurukawa, G.Suzuki and T.Kato: *CAMP-ISIJ*, **5** (1992), 1021.

- 59) H.Sasaki, K.Nakatani, K.Amano, T.Touge, T.Maruyama and M.Matsui: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1139.
- 60) H.Legrand, L.Vendeville, J.M.Damasse, R.W.Simon, D.Senk and C.Mollers: *Rev. Métall., Cah. Inf. Tech.*, **94** (1997), 769.
- 61) J.M.Damasse, D.Themines and L.Vendeville: *Rev. Métall., Cah. Inf. Tech.*, **97** (2000), 43.
- 62) Y.K.Shin, T.Kang, T.Reynolds and L.Wright: *Ironmaking Steelmaking*, **22** (1995), 35.
- 63) B.Lindorfer, H.Bumberger, C.Fürst, G.L.Houze, D.B.Love and T.M.Browne: Proc. of 2nd European Conf. on Continuous Casting, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, (1994), 451.
- 64) T.Evertz, K.H.Hower, J.Kroos, M.Dubke and U.Urlau: *Stahl Eisen*, **118** (1998) 5, 53.
- 65) K.H.Spitzer, R.Schholz, J.Kroos, K.H.Hower, R.Nyström, E.Burström, W.Reichelt and M.Dubke: *Stahl Eisen*, **121** (2001) 5, 73.
- 66) M.Walter, W.Mankau, H.J.Figge, D.Themines, R.Tonelli and G.Eckerstorfer: *Stahl Eisen*, **121** (2001) 5, 83.
- 67) H.Hosoda: Paper presented at 1st Annual Meeting of ISSF, Seoul, (1997).
- 68) R.Wechsler: *Steel Times*, **229** (2001), 23.
- 69) S.Kajiwara, H.Sakaguchi, M.Mohri, J.Yano and K.Onishi: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 29.
- 70) K.E.Blazek, W.F.Praeg, J.G.Rachford, Y.H.Wang and M.Mohri: *Iron Steelmaker*, **25** (1998) Feb., 39.
- 71) T.Mizoguchi and K.Miyazawa: *Tetsu-to-Hagané*, **81** (1995), 58.
- 72) D.Senk, M.Espenhahn, W.Schmitz, K.H.Tacke, A.R.Büchner, R.Kopp and H.Pfeifer: *Stahl Eisen*, **118** (1998) 5, 61.
- 73) R.Capotosti, A.Spaccarotella and P.Tolve: Proc. of 4th Continuous Casting Conf., Vol. 1, (1996), 42.
- 74) N.Zapuskalov and M.Vereschagin: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 1107.
- 75) C.G.Kang, Y.D.Kim and Y.J.Kung: Proc. of Thermec '97, TMS, PA, (1997), 2193.
- 76) T.Mizoguchi, K.Miyazawa and Y.Ueshima: *Tetsu-to-Hagané*, **81** (1995), 637.
- 77) K.Yanagi, K.Yamamoto, H.Takatani, K.Sasaki, Y.Wakiyama, H.Takeuchi, H.Nakashima, S.Tanaka, M.Yamada and Y.Yamakami: Proc. of 2nd European Continuous Casting Conf., Verlag Stahleisen, Düsseldorf, (1994), 423.