



アラカルト

日本におけるスラグカット技術の進歩

Development of Slag Cut Technologies in Japan

沖森麻佑巳

(株) 日鉄テクノリサーチ 顧問

Mayumi Okimori

1 緒言

転炉精錬ではCaO、SiO₂、MnO、FeOなどを含む高塩基性(C/S=4程度)のスラグが生成する。スラグはFeOを含むため酸化能力を有し、転炉や取鍋の耐火物と反応してその溶損を速めるばかりか、AlやMn、Si合金鉄と反応して、合金鉄の添加歩留を下げ、スラグとの反応で生成したAl₂O₃を主体とする介在物は、圧延後の製品において表面や内部の欠陥疵を誘起する。以上のようなスラグに起因する諸課題を克服するために、転炉～取鍋、取鍋～タンディッシュ、タンディッシュ～鑄型の各プロセス間でスラグ流出を防止する技術(スラグカット技術)の開発が進められてきた。本記事では、日本におけるスラグカット技術の変遷をトレースし、より一層強力なスラグカット技術について展望する。

2 渦の発生によるスラグ巻き込み

2.1 転炉の出鋼孔と渦の発生

1856年にヘンリー・ベッセマーが発明した底吹きベッセマー転炉は梨型炉で、出鋼時に炉が回転してスラグと溶鋼は混合し、懸濁した状態で取鍋の中に流出せざるを得なかった。その後、1957年に日本に導入された純酸素上吹きLD転炉法は当初ベッセマー型であったが、1960年に転炉の肩部に出鋼孔を取り付けるアイデア¹⁾が採用されて以降、溶鋼とスラグが混合して取鍋に大量に流出することはなくなった。新たな課題は図1のモデル図に示すように出鋼孔周辺で発生する出鋼流による渦(Vortex)が溶鋼上に浮いているスラグを巻き込み、さらに末期に取鍋にスラグが流出する現象²⁾であった。

2.2 取鍋のスライディングノズルと渦の発生

取鍋では、従来はストッパーを設置して取鍋ノズルから溶

鋼を鑄型に注湯する方式が採用されていた。しかし、注湯中にストッパーと取鍋ノズルとの間で芯がずれると溶鋼流出トラブルが発生した。対応策として2枚の耐火物を摺り合わせるスライディングノズル(以降SNと記述)が1969年に導入された³⁾。ところが後述のようにストッパーではスラグの流出が防止されていたが、逆にSNでは図1のように渦が発生し、溶鋼面に浮いているスラグが渦に巻き込まれて流出することが新たな問題になった。

2.3 渦発生の機構

現場操業の経験から、転炉や取鍋の内部で溶鋼メニスカス位置が高い時点でも図1のように流出する溶鋼が渦を発生させることが明らかになった。この現象は容器の径の大きさ、ノズルの径の大きさと位置によって渦の発生が異なることに起因することが、図2に示す水モデル試験で明らかになった。特にノズルの位置が容器の中央で、かつノズル径が大きい場合に溶鋼のヘッドが高い段階でも渦が発生することが実証された⁴⁾。この課題を解決するためには溶鋼に混合するスラグを分離するスラグカット技術の開発が必要であり、現場で様々な視点で新しい方法が試行されることになった。

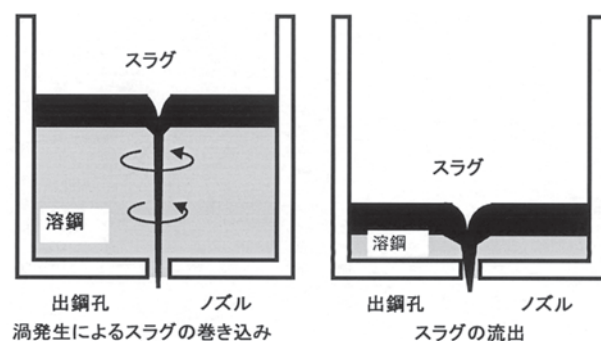


図1 渦発生によるスラグの巻き込みと流出の模式図

3 スラグカット技術の構成と変遷

3.1 技術の構成

日本ではLD転炉の導入後、溶鋼成分の的中、合金歩留まりの安定化、介在物の減少等を目的とした、下記 (1)～(4) のスラグカット技術の開発が進められた⁵⁾。

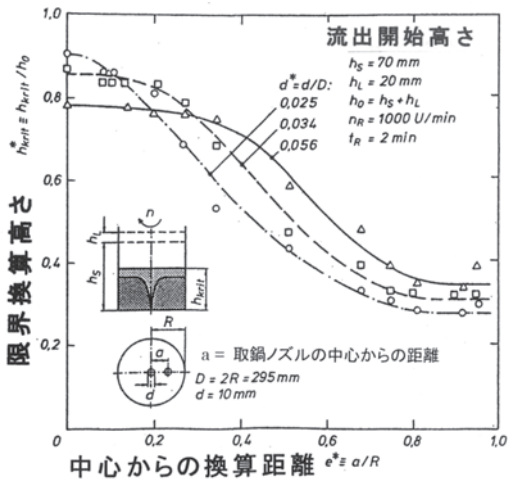
- (1) 分離：LD転炉への出鋼孔設置によって溶鋼とスラグを分離して出鋼する技術。
- (2) 栓止と固化：出鋼孔の出口側（転炉外部）と入口側（転炉内部）において、孔内に栓を入れて栓止してスラグの流出を防止する技術や転炉内でスラグを固化して渦による巻き込みが起きないようにする技術。
- (3) 検知：スラグが溶鋼内に混入することによって生じる物理特性の変化を検知する技術。本技術では出鋼孔の周辺

に設置したコイルによる電磁気的変化や放射温度計による放射率変化の計測、赤外線計とCCDによる画像処理などが可能となり、得られた情報信号がスラグの流出を防止する様々な装置を制御した。

- (4) 排出：サイフォンや真空を活用してスラグをそのまま排出する技術。

3.2 技術の変遷

種々のスラグカット技術の変遷を図3に示す。1960～1970年代は主にスラグ固化、スラグボール、転炉や取鍋のスライディングノズル、サイフォン、放射温度計測などが試みられ、1980年代では転炉でのエア・ジェット法、取鍋での振動検知方法、取鍋やタンディッシュでは真空吸引法の実機化が進められた。1990年代は電磁式スラグ流出検知とエアジェット法の組み合わせが転炉と取鍋で広く採用され、2000年代は赤外線検知CCDの適用が進められた。



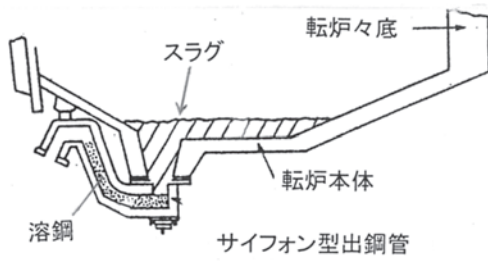


図4A 出鋼孔のサイフォン化⁷⁾

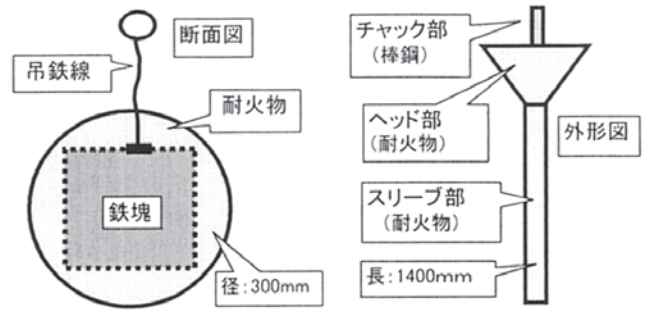


図4B スラグボール及びダーツ

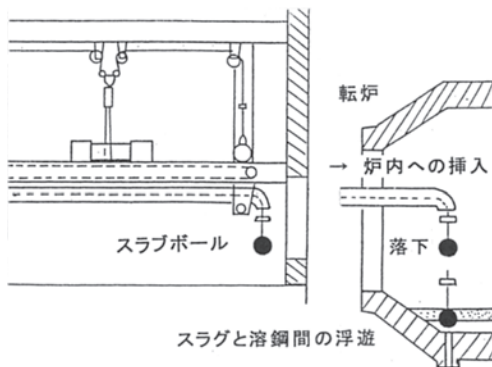


図4C スラグボール投入法^{10,11)}

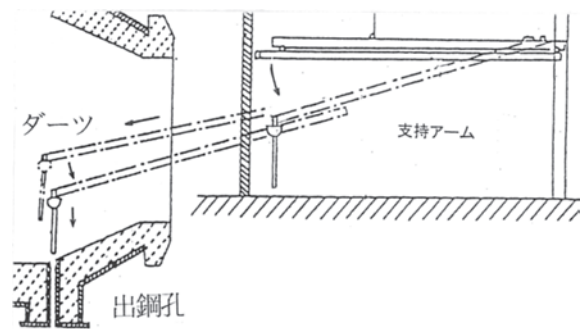


図4D ダーツ装入法¹²⁾

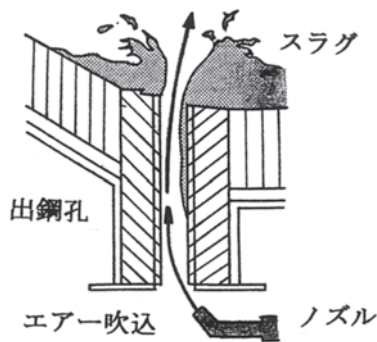


図4E エアージェット法¹⁵⁾

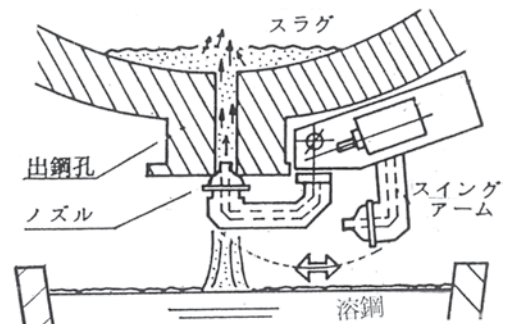


図4F PSS法¹⁷⁾

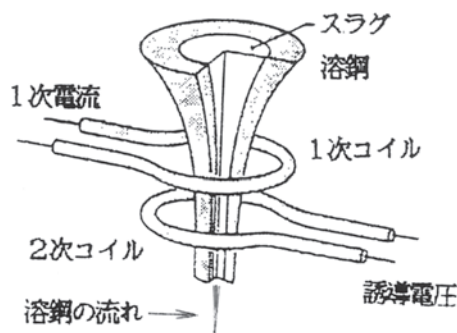


図4G 電磁力によるスラグ流出検知法²¹⁾

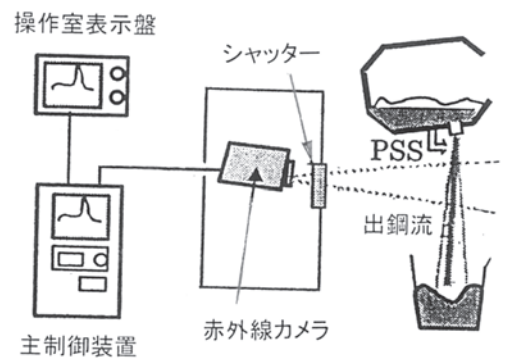


図4H 赤外線法とPSS法の複合法²³⁾

図4 転炉におけるスラグ流出防止技術

鋼の比重差によりスラグ流出を防止する技術である。取鍋内スラグ厚みは、従来の125mmから本方式によるスラグカットで30mm以下に減少し(図5)、復リンは皆無になった(図6)。しかし、耐火物と高いメンテナンスコストのために有効な技術としては普及しなかった。なお、スラグ厚みは、鉄製のパイプをスラグと溶鋼中に装入し、パイプに付着したスラグの長さを測定し決定された。

- (3) 出鋼時の生石灰投入⁹⁾：出鋼作業時に出鋼孔の直上のスラグにブロッキング用生石灰を投射機によって投げ入れてスラグを固めて、スラグが渦に巻き込まれるのを防止

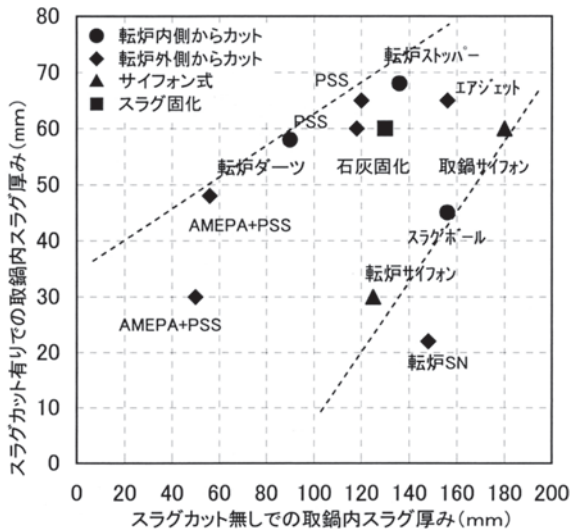


図5 各種スラグカット技術によるスラグ厚み減少効果^{7-18,20)}

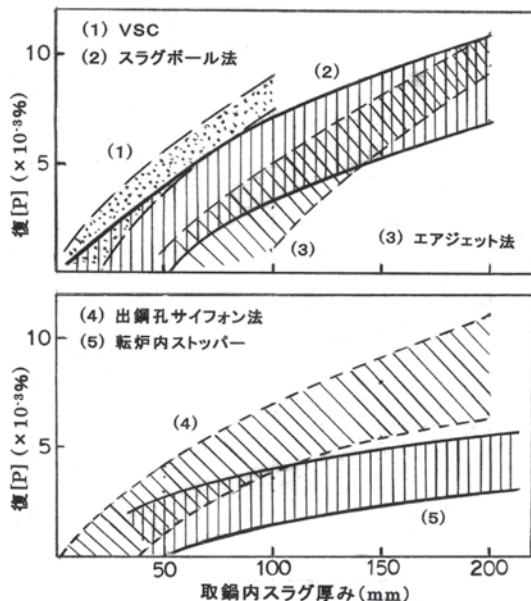


図6 各種スラグカット技術による復リンの防止効果^{7,11,13,15,33)}

する技術である。スラグカットの効果はスラグの厚みが50～70mmにまで薄くなり(図5)、復リン量は0.003%であった。ブロッキング法は大型炉では投入装置も大型化せざるを得ず、実機化は進まなかった。

- (4) スラグボール法、ダーツ法、ストッパー法：出鋼完了直前にスラグが流出しないよう、転炉の内部から出鋼孔に栓をする技術である。スラグボールは図4-Bのように中心部に鉄芯があり周囲は耐火物で被覆され比重はスラグよりやや大きめに調整してあり、鉄線が付いている。ボールを図4-Cのように出鋼末期に出鋼孔の真上に配置すると鉄線が溶けてボールは落下する^{10,11)}。溶鋼上に浮かんでいるボールは、発生した渦に巻き込まれて、孔に入り込むスラグを排除する。効果としてスラグ厚みは約150mmから40mm(図5)まで減少し、復リンが防止された(図6)。ダーツは図4-Bのようにヘッドと先端スリーブ部から構成されている。図4-Dのようにヘッド上の鉄芯を片持梁で保持して出鋼の末期にダーツのスリーブ部を出鋼孔の中に差し込んで装入する¹²⁾。効果としてスラグの厚みは90mmから57mm(図5)に減少し、Alのロス量は0.1kg/t減少(図7)した。ボール法に対して本方式では強制的にスリーブが孔に入るのでもスラグ排除が確実に実行でき、ボール法はダーツ法に置き換わってきている。ダーツは毎回消耗するが、非消耗型のストッパーそのものを出鋼孔の上に押し込んでスラグを排除する方式¹³⁾も試みられ、復リン防止に効果(図6)を発揮したが、大型炉では装置が巨大化するので広く採用されなかった。

- (5) 出鋼孔でのSN：取鍋で実機化されたSNを転炉に応用した技術¹⁴⁾。スラグの厚みの減少効果は大きく148mmが21mmまで減少(図5)した。一方、小型の50トン転炉でもその重量は2トン以上で、一層大きな転炉には操作性の問題とコスト増により実機には採用されなかった。

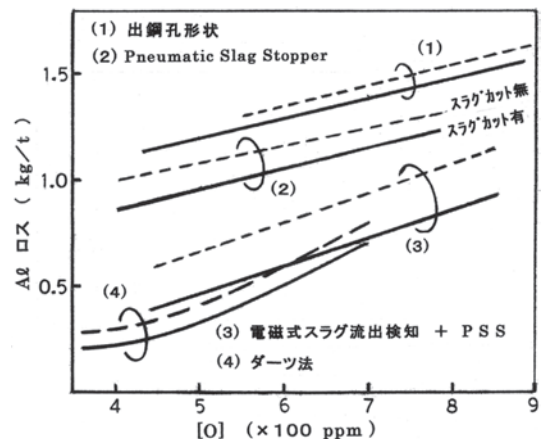


図7 各種スラグカット技術によるAlロス低減効果^{6,12,19,21)}

次に出鋼孔に対して、転炉の外部からスラグ流出防止に対処する技術を(6)から(11)までに述べる。

- (6) **エア・ジェット法**：スラグの流出開始時点を作業者が目視で確認し、出鋼孔の外側でアームの先端に取り付けられたノズルから出鋼孔の内側に高圧エアーを吹き込んでスラグカットする技術¹⁵⁾で、図4Eのような機構である。本技術では、従来のスラグ厚み157mmは65mmまで減少し(図5)、復リン防止、Al合金歩留まり向上が得られた(図6、7)。しかしノズルの先端に溶鋼やスラグが付着して効果が減ずるという課題があったため対策が進められた。
- (7) **ガス吹き込み法**：PSS (Pneumatic Slag Stopper) 法¹⁶⁾は上記のエア・ジェット法と同じ原理で、図4Fのようにアーム先端に取り付けたノズルを出鋼孔までスウィングさせて、窒素ガスを出鋼孔の内部に吹き込む方式である。本方式では、スラグ厚みが120mmから60mmに半減し(図5)、Alロスは0.1kg/t減少した(図7)。
- (8) **電磁式スラグ流出検知とPSSの適用**：電磁式スラグ流出検知法は、図4-Gのように出鋼孔の周辺に1次コイルと2次コイルを配置して、1次コイルに電流を流して磁界を発生させ、出鋼流からスラグに変化したときの透磁率変化を2次コイルの誘導電圧変化によって検知し、スラグ流出を確認する技術¹⁷⁻²¹⁾である。この方式によればオペレーターによる判定に対して約1秒早くスラグを検知することが可能で、流出スラグを検知した電磁信号を入手してPSS法のノズルからの窒素吹き込みを実行する。取鍋内のスラグ厚みは56.9mmが49mmまで約8mm減少した(図5)。成分のリンに関しては、 $\Delta [P]$ (上限 $[P]$ - 実績 $[P]$) が0.0069 % から0.0078 % になり、復リンが約0.0010 % 減少し、Alロスは約0.2kg/t減少した(図7)¹⁹⁾。電磁気作用を基にした本法は再現性が高く、現場で広く採用が進んだ。
- (9) **放射温度計と転炉復起システム**：高温の溶鋼とスラグの放射率の違いを利用してスラグの流出を検出する技術である。転炉の周辺に設置された放射温度計によって、スラグが流出した信号を取り込んで自動的に転炉を復起するシステム²²⁾が開発され、本方式ではスラグ厚みは93mmから74mmまで約20mm減少した。しかし、本法は溶鋼にスラグが懸濁混在する状態変化をシャープに決定することができなかった。
- (10) **赤外線による温度検出とPSS**：CCD赤外線センサーでスラグの流出を検知してPSSに連動する技術である。本方式は図4-Hに示すように出鋼流のスラグ比率を画像処理で算出し、比率が閾値以上になった瞬間にPSSを作動させると同時に転炉を復起させる技術が開

発された^{23,24)}。本法で適用前のスラグ厚み27.6mmは16.2mmにまで減少し、従来の電磁式よりも早い検知が可能になり、Alロスは0.035 % から0.025 % と低減した。

4.2 取鍋における主要技術

取鍋のスラグは、CC工程のタンディッシュを経由して鋳型に流出し、凝固した鋳片の清浄度を下げするため、高級薄板の製造にはスラグの流出防止が大きな課題である。本課題の解決策として取鍋からタンディッシュへスラグが流出することを防止する技術開発が進められた。

- (1) **取鍋ストッパー**：取鍋でSNを採用する前に注入量を制御していたストッパーを積極的にスラグ流出防止技術として活用する試みがなされた。ストッパー径、ストッパーとノズルのクリアランス、取鍋内の溶鋼ヘッドの組み合わせ条件によって取鍋の注入終了時点を決定でき、スラグのタンディッシュへの流出を防止できた²⁵⁾。しかし、実操業においてはコストと効果評価から本方式は採用されなかった。
- (2) **フローティングバルブ**：転炉のスラグボールに相当するバルブを取鍋ノズルの真上にセットして効果を出すことが試みられたが、バルブの取鍋内への装入が困難なことや転炉と違ってスラグが固化しているためバルブがスラグ内に差し込まれない等の欠点があり、実用化には至らなかった²⁶⁾。
- (3) **取鍋～タンディッシュ間ノズルの振動測定**：取鍋～タンディッシュ間で空気酸化を防止するロングノズルの中を溶鋼が流れている状態からスラグが混入するとノズルの振動状況が変化することを検知して、取鍋SNを閉じる技術である^{27,28)}。しかし、ロングノズル周辺の諸設備の振動などの外乱が避けられなかったため測定精度が劣り、現場での採用は進まなかった。
- (4) **電磁力によるスラグ流出検知**：前述の転炉における方式と同様に図8のように、取鍋のノズルの周りに1次コイルと2次コイルを設置し、溶鋼からスラグへの移り変わりにおける電磁場変化を検知してSNを迅速に閉じてスラグ流出防止を図る技術である^{29,30)}。本方式ではオペレーターの目視よりも約1.6秒早めにスラグが検知でき、図8のように連々鋳での取鍋からタンディッシュ内へのスラグ流出は抑制され、鋳片の清浄度が向上した。
- (5) **スラグのサイフォン吸引方式**：1975年に取鍋のスラグをサイフォンでの吸引する方式が試みられたが、石灰の多用によって硬化したLDスラグをサイフォンで吸引するには軟化剤が必要であり、実用化には至らなかった。一方、別の方式として図9のように真空装置でスラグを吸引するVSC (Vacuum Slag Cleaner) が1983年頃に稼動

し、取鍋やタンディシュからスラグを良好に排出することが可能となった³¹⁾。図9のようにタンディシュ内のスラグは完全に除去できたが³²⁾、本装置は巨大で真空装置の整備も必要であり、吸引したスラグの冷却に使用する水に起因した爆発トラブルも発生し、様々な現場で試みがあったものの実用化には至らなかった。

5 まとめ

以上のようにスラグカット技術は、機械的要素から電磁気力的要素を取り込みながら進展してきた。スラグカットによって、取鍋内やタンディシュ内でのスラグ厚みが減少し、復リン減少、Alなどの成分歩留まり向上、清浄度向上、耐火物溶損減少等が促進された。品質の高級化に対して、厚板や

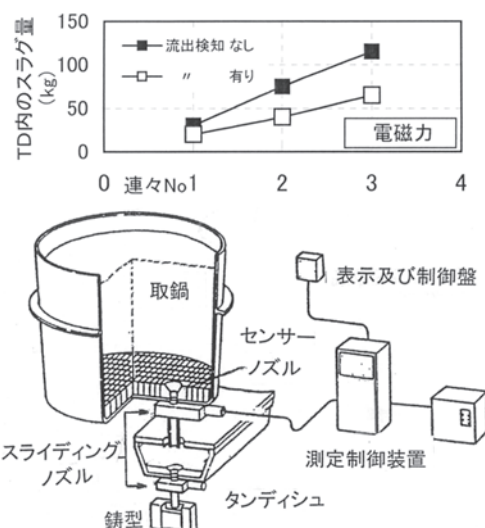


図8 電磁力による取鍋中のスラグカットの設備配置と連々鋳におけるTD内スラグ厚の変化²⁹⁾

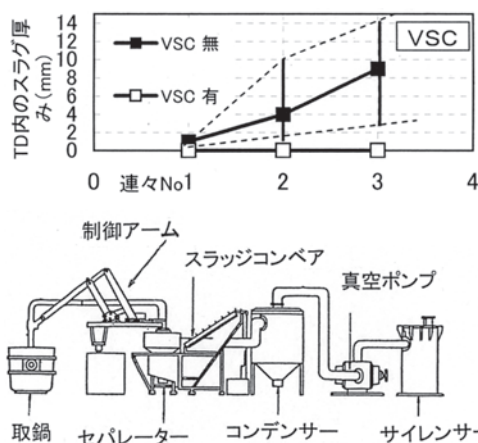


図9 真空吸引VSC法の設備配置と連々鋳におけるTD内スラグ厚の変化^{31,32)}

鋼管材等での低P鋼製造や薄板での高純鋼製造にはスラグカットは不可欠な技術となった。今後とも、安定したスラグカットを実現するためには、出鋼孔やノズルの形状を常に一定に保持する耐火物補修技術の充実や、実機では把握しにくい出鋼孔やノズルからのスラグの流出挙動をコンピュータシミュレーションによる予測技術^{33,34)}などを駆使して明らかにし、より正確かつシャープなスラグカット技術の開発が望まれる。

参考文献

- 1) わが国における酸素製鋼法の歴史, 日本鉄鋼協会編, (1982), 116.
- 2) Heinz Sperl : Stahl und Eisen, 108 (1988) Nr2, 68.
- 3) わが国における酸素製鋼法の歴史, 日本鉄鋼協会編, (1982), 325.
- 4) H.H.Jewasinski and D.Sucker : Stahl und Eisen, 107 (1987) Nr23, 30.
- 5) 沖森麻佑巳 : 日本金属学会, 要りあ, 38 (1999), 728.
- 6) 桜井栄司, 内尾政人, 水岡誠歴, 田中久 : CAMP-ISIJ, 4 (1991), 1304.
- 7) 大森尚, 三崎規生, 玉田滋基, 中井一吉, 寺田孝男, 小高幹男 : 川崎製鉄技報, 15 (1983), 166.
- 8) 大森尚, 山田博右, 藤山寿郎, 柴山卓真, 中西恭二, 斉藤健三 : 鉄と鋼, 1981, S 227.
- 9) 沢村信幸, 原田俊雄, 伊藤修二, 池田辰雄 : 鉄と鋼, 1977, S 131.
- 10) 王寺睦満, 村瀬昭次, 沖森真弓, 木村弘之, 長通知, 鹿子木公春 : 鉄と鋼, (1977), S 130.
- 11) 第66回 日本鉄鋼協会 製鋼部会 (昭52年3月) : 新日鉄, 八幡製鉄所.
- 12) 堤啓, 三木裕貴, 吉野省三, 家田幸治, 永幡勉, 深川信 : CAMP-ISIJ, 7 (1994), 235.
- 13) 第85回 日本鉄鋼協会 製鋼部会 (昭58年7月) : 日新製鋼, 呉製鉄所.
- 14) 坂本正博, 高橋稔昌, 山口豊明, 徳永庸夫 : 鉄と鋼, (1975), S 122.
- 15) 第77回 日本鉄鋼協会 製鋼部会 (昭55年11月) : 新日鉄, 君津製鉄所.
- 16) 高橋岳彦, 柏孝幸, 鍋島祐樹, 野村寛, 奥山悟郎 : CAMP-ISIJ, 11 (1998), 152.
- 17) 第97回 日本鉄鋼協会 製鋼部会 (昭62年9月) : 神戸製鋼, 加古川製鉄所.
- 18) 田中秀栄, 亀水晶, 小平悟史, 小松喜美, 水岡誠史 : CAMP-ISIJ, 7 (1993), 1065.
- 19) 須田守, 水藤政人, 蓮沼純一, 大宮茂, 浅野孝志, 岡本浩

- 志：CAMP-ISIJ, 5 (1992), 218.
- 20) 佐々木英彰, 石井博美, 田中勉, 石川厚, 荒井雅之：CAMP-ISIJ, 11 (1998), 145.
- 21) 第109回 日本鉄鋼協会 製鋼部会 (平5年9月)：NKK, 福山製鉄所.
- 22) 第70回 日本鉄鋼協会 製鋼部会 (昭53年7月)：川鉄, 水島製鉄所.
- 23) 森田幸代, 川畑涼, 田中秀栄, 小平悟史, 納雅夫, 川島章治：CAMP-ISIJ, 15 (2002), 141.
- 24) 久永知慶, 渡辺敦, 鷺尾勝, 八幡稔文：CAMP-ISIJ, 17 (2004), 158.
- 25) 真沢正人, 山口悟, 稲岡数磨, 吉村秀男, 中村勇氣男：CAMP-ISIJ, 3 (1990), 1209.
- 26) 妙中隆之, 横井真一, 溝口良平, 伊藤良, 原田武, 藤井博務, 綾部綴：鉄と鋼, (1986), S 259.
- 27) 秦弘毅, 河合浩之, 小菅俊洋, 山田信夫：CAMP-ISIJ, 7 (1994), 316.
- 28) 伊藤俊之, 越川隆雄, 高橋暁, 今井卓雄：鉄と鋼, (1981), S 847.
- 29) 堀川健一, 斉藤忠, 江波戸紘一, 木村雅保, 谷川完武, 東洵, 細谷誠一：CAMP-ISIJ, 3 (1990), 1212.
- 30) 中山傑, 中坪修一, 鹿嶋忠幸：CAMP-ISIJ, 3 (1990), 1211.
- 31) 宮脇芳治, 半明正之, 白谷勇介, 松田安弘, 小松喜美：鉄と鋼, (1984), 1697.
- 32) 第84回 日本鉄鋼協会 製鋼部会 (昭58年8月)：NKK, 福山製鉄所.
- 33) 高橋功一, 関春彦, 石井俊夫, 村井剛, 久保田淳：CAMP-ISIJ, 20 (2007), 201.
- 34) Karim Badr and Marcus Kirschen, et al.：Stahl und Eisen, 129 (2009) Nr11, 59 ~ 66.

(2011年4月20日受付)