

連続铸造用閉塞防止ノズル(AI ノズル)の開発

塚口友一^{*1)} 加藤 徹¹⁾ 渡邊信輔^{**}
 大賀信太郎²⁾ 田中敏宏^{***}

1. 概 要

連続铸造において、アルミナ系介在物による浸漬ノズルの閉塞は、操業を阻害するとともに鋼品質の低下を招く重大な問題である。従来、浸漬ノズル閉塞に関して、詳細な検討や⁽¹⁾⁽²⁾、種々の対策が行われてきた⁽³⁾。住友金属工業㈱は、アルミナ-グラファイト製の浸漬ノズルと溶鋼との間に電場を印加することでノズル閉塞が軽減されることを見出し⁽⁴⁾、大阪大学と共同でその機構解明に取り組んだ⁽⁵⁾⁽⁶⁾。さらに、㈱住友金属小倉のブルーム連続機および住友金属工業㈱鋼板建材カンパニー鹿島製鉄所のスラブ連続機における適用試験を進め、通電条件を最適化した。その結果、明確な閉塞抑制効果が確認された⁽⁷⁾⁽⁸⁾。その開発技術を、AI ノズル(Anti-clogging Immersion Nozzle)と称する。

2. 小型実験による検討

小型の黒鉛タンマン炉を使用して2 kgのAl脱酸溶鋼中にアルミナ-グラファイト製の耐火物棒を周速度10 cm/sで回転させながら所定時間浸漬し(図1)、表面への介在物付着状況を評価した。実験では、耐火物棒には定電圧あるいは定電流制御が可能な直流電源を接続し、対極には耐火物で被覆した鉄ワイヤを用いて、数Aの電流を耐火物・溶鋼間に流した(表1)。最大2時間の実験中、安定して通電することができた。

実験後の耐火物棒の表面には、いずれの条件でもAl₂O₃を

主体とする介在物が付着した。付着量は、耐火物棒を陽極にした場合には、通電しない場合と同等もしくはやや増加し、耐火物棒を陰極にした場合には、明らかに減少した(図2)。

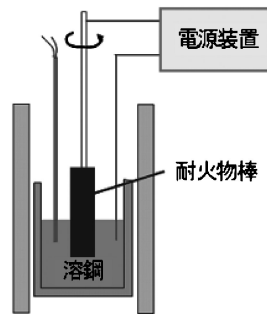


図1 耐火物浸漬実験装置概要。

表1 実験条件。

溶鋼量	2 kg
鋼種	Al キルド S25C
耐火物材質	アルミナ-グラファイト
耐火物棒直径	φ20 mm
タンマン炉内雰囲気	Ar パージ
出力電流	最大 5A
実験時間	90~120 min

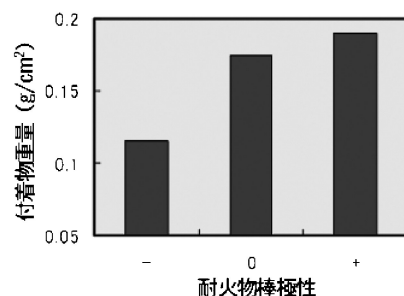


図2 介在物付着に対する通電の影響。

* 住友金属工業株式会社：1)総合技術研究所主任研究員
 2)鋼板建材カンパニー スタッフ

** 株式会社住友金属小倉参事補

*** 大阪大学教授；大学院工学研究科

Development of Anti-clogging Immersion Nozzle (AI Nozzle) Technology for Continuous Casting of Steel; Yuichi Tsukaguchi*, Toru Kato*, Shinsuke Watanabe**, Shintaro Ooga*, Toshihiro Tanaka*** (*1)Corporate R&D Labs., Sumitomo Metal Industries, Ltd. **Sumitomo Metals [Kokura], Ltd. *2)Steel Sheet, Plate & Structural Sheet Company, Sumitomo Metal Industries, Ltd. ***Graduate School of Engineering, Osaka University)
 2010年10月27日受理

3. 通電に伴う電気化学反応

アルミナ-グラファイト製浸漬ノズルの表面には、酸化防止剤としてSiO₂系低融点ガラスが塗布されており、溶鋼と耐火物との間にスラグ層の介在が想定される。そこで、溶融スラグを介した溶鋼・浸漬ノズル間の電気化学反応を調べる実験を行った。

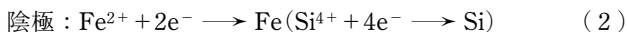
アルミナ-グラファイト基板の上面にCaO-SiO₂-Al₂O₃系スラグを塗布した後、基板上に炭素鋼試料を設置した。炭素鋼試料にはTi₂O₃電極を、アルミナ-グラファイト基板にはMo線を接続して、観察窓を付設した黒鉛タンマン炉内Ar-10%H₂雰囲気中にて1550℃まで昇温した。基板の炭素鋼試料が溶融した後、直流電源装置を用いて10Vの電圧を印加した。

アルミナ-グラファイト基板を陽極にして電場を印加した場合、COガスの発生に起因すると推定されるスラグ層のフォーミングが発生し、溶鋼が基板上において振動する現象が観察された。

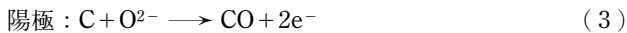
一方、アルミナ-グラファイト基板を陰極とした場合には、外観の変化は認められなかった。降温後の試料をSEM観察した結果、スラグ層内のアルミナ-グラファイト基板界面近傍にFeあるいはFe-Si合金の析出相を確認した。

上記の観察結果より、スラグ層を介して溶鋼・アルミナ-グラファイト間に電場を印加した際の反応を、以下のように推定する。

【溶鋼が陽極、アルミナ-グラファイトが陰極の場合】



【溶鋼が陰極、アルミナ-グラファイトが陽極の場合】



陰極: 未解明

アルミナ-グラファイトを陰極にした場合に付着が減少する理由のひとつは、式(3)反応により生じたCOガスが溶鋼中Alを酸化する反応(3CO+2Al→Al₂O₃+3C)を防止できることだと考える。

4. 電場印加時の溶鋼・浸漬ノズル間の濡れ性の変化

溶鋼とスラグの界面で電気化学反応が進行する際、左記間に、いわゆる反応濡れ現象が生じると予測できる。そこで、電場印加時の鋼・スラグ間の濡れ性変化を調査した。ここでは実験の容易さから、溶鋼を固体鉄で代替して実験した。

固体鉄上にCaO-SiO₂-Al₂O₃系スラグを置き、黒鉛タンマン炉内で1450℃まで加熱してスラグを溶融させ、その上部より黒鉛電極を差し込んだ(図3)。

溶融スラグを陰極、固体鉄を陽極として電場を印加すると、図4に示すように、スラグ・固体鉄間の接触角が低下した。実験後の黒鉛電極上には、Fe粒が析出していることを確認している。

上記の結果から、界面で電気化学反応が生じることによって、鋼と溶融スラグの濡れ性が向上することが明らかとなった。溶鋼と浸漬ノズル(表面スラグ層)の濡れ性が向上すると、結果的に溶鋼中介在物の浸漬ノズルへの付着が抑制される。これが、もうひとつの付着低減機構であると考えられる。

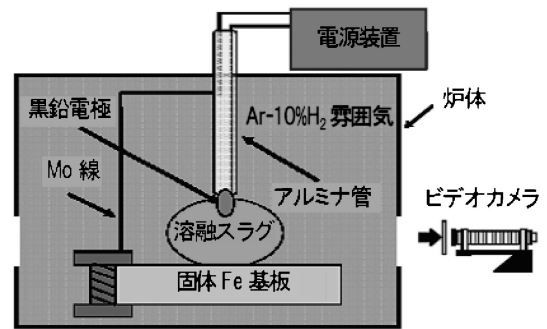


図3 電場印加時の接触角変化観察装置概要。

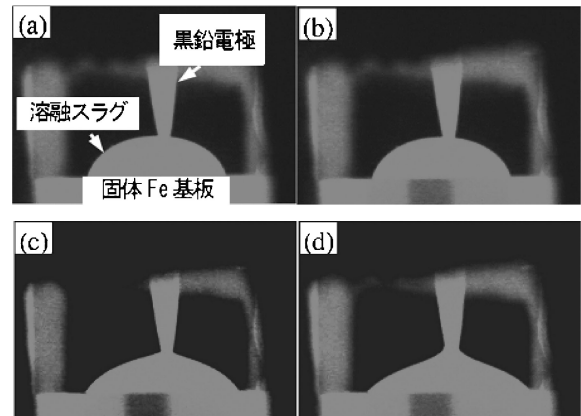


図4 スラグ・固体鉄間接触角に対する電場印加の影響。(a) 溶融直後、(b) 15 min 保持後、(c) 6 V 印加、(d) 10 V 印加

5. 実機連続铸造試験

住友金属小倉のブルーム連続機および鹿島製鉄所のスラブ連続機において、表2に示す条件で铸造試験を行った。図5に示すように、タンディッシュ内に浸漬した対極を介して一方のストランドに通電し、他のストランドとの差を評価した。

図6に、小倉のブルーム連続機において、連続して約110 tonの溶鋼を铸造した浸漬ノズルの、高さ中央部(上端から30 cm 前後)の内面(縦断面)を示す。通電したストランドでは、介在物付着が明らかに軽減していることに加え、アルミキルド鋼铸造時の典型的な付着物である綿状の白っぽいアルミナがほとんど見られず、概ね平滑で一様な稼働面となっている。

図7には、鹿島のスラブ連続機において、連続して約900 tonの溶鋼を铸造した浸漬ノズル内面の付着厚を比較して示す。図7より、通電の介在物付着抑制効果が明らかである。

このように、通電によって、铸造条件(鋼種やスリーブット)によらず、浸漬ノズル内の付着物を明確に低減できた。また同様の付着抑制効果は、浸漬ノズル外面の溶鋼浸漬部においても確認された。

浸漬ノズルへの介在物付着の減少は、铸片内に持ち込まれる介在物の増大を招くことが懸念されたので、小倉においてブルームならびに製品中の介在物量を調査したが、通電の悪影響は見出されなかった。一方、鹿島のスラブ連続機においては、铸造中の铸型内湯面レベル変動の抑制や、スラブ表面部のピンホール低減、さらには製品である亜鉛メッキ鋼板の表面欠陥が約4割減少する効果を確認した⁽⁸⁾。これらの改善効果は、ノズル閉塞に起因する铸型内流動の乱れが抑制された結果と考えられる。

表2 鑄造試験条件.

	小倉ブルーム連鑄機	鹿島スラブ連鑄機
鑄型サイズ	0.3×0.4 (m)	0.27×1.1~1.6 (m)
スループット	0.5~0.8 (ton/min)	4~5 (ton/min)
鋼種	Alキルド炭素鋼	Alキルド極低炭素鋼
浸漬ノズル材質	アルミナ-グラファイト	
浸漬ノズル極性	陰極	
出力電流	50~100 (A)	

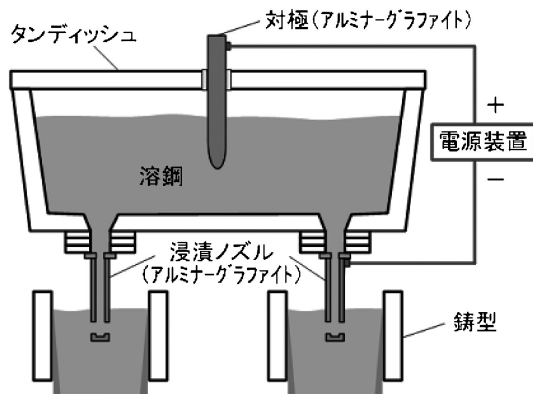


図5 実機鑄造試験方法概要.

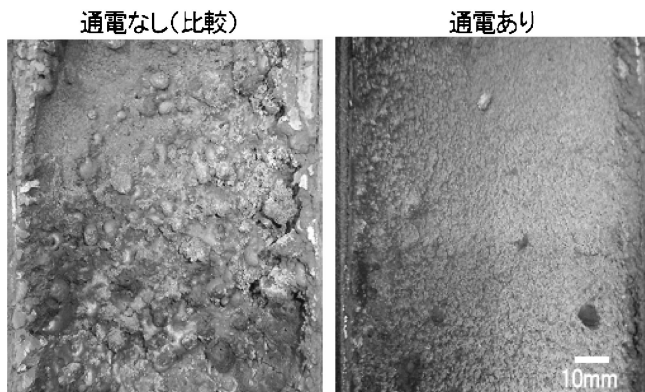


図6 鑄造後浸漬ノズル内面(小倉ブルーム連鑄機).

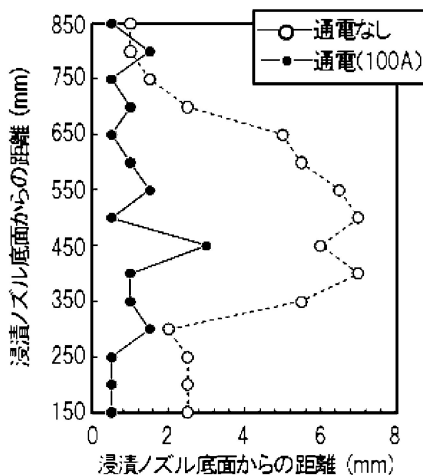


図7 鑄造後浸漬ノズル内面付着厚(鹿島スラブ連鑄機).

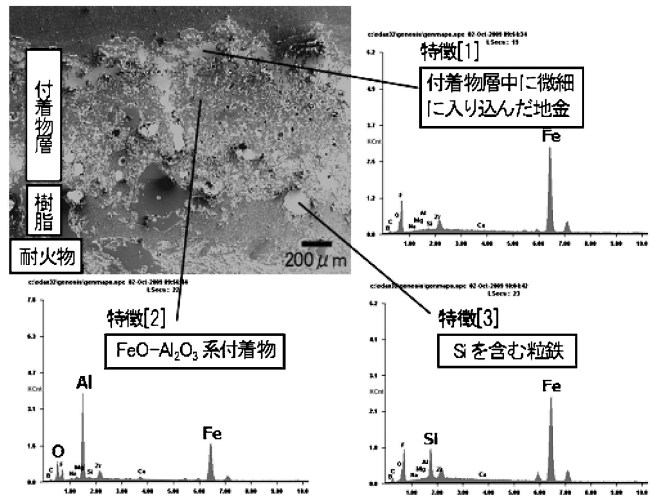


図8 鑄造後浸漬ノズル内面 SEM 観察結果. (小倉ブルーム連鑄機).

6. 鑄造後ノズルの SEM 観察

鑄造後浸漬ノズル内面を SEM 観察した(図8). 図8に見られる樹脂層は, サンプル切り出し時に剥離した付着物層と耐火物との間隙に充填されたものである. 通電時に特徴的な現象は, [1]地金(Fe)が付着物層中に微細に入り込む, [2]付着物(アルミナ)中の FeO 濃度が高い, [3]Siを含む粒鉄が付着物層と耐火物との界面近傍にある, の3点である. これらはそれぞれ, [1]溶鋼・付着物間の濡れ性向上(反応濡れ現象), [2]式(1)反応による溶鋼のイオン化, [3]式(3)反応による粒鉄の析出, を裏付ける現象である. 同様の現象は, 小倉および鹿島において, 連鑄機によらず確認されている.

7. 開発の成果

上記のように, 溶鋼・浸漬ノズル間に電場を印加する新しいアルミナ介在物付着防止技術を開発し, 小倉および鹿島における連鑄機において浸漬ノズルの閉塞抑制効果を確認した. 通電に起因する鑄片ならびに製品品質の悪化は見られず, 高スループットのスラブ連鑄機においては, むしろ鑄型内流動安定化がもたらす品質改善効果が明確に現れた.

8. 特許

本開発に関連して出願した主な公開特許は, 以下である. 特許第 3747848 号, 特許第 3896908 号, 特開 2004-291034 号, 特開 2004-330256 号, 特開 2005-66689 号, 特開 2005-169477 号, 特開 2005-177811 号, 特開 2005-199339 号, 特開 2005-205474 号, 特開 WO2008/090649 号.

文献

- (1) 向井楠宏他: 鉄と鋼, **85**(1999), 307-313.
- (2) 笹井勝浩他: 鉄と鋼, **79**(1993), 1067-1074.
- (3) 塚本 昇他: 品川技報, **44**(2001), 27-38.
- (4) 加藤 徹他: Camp-ISIJ, **22**(2009), 125.
- (5) 吉川 健他: Camp-ISIJ, **22**(2009), 126.
- (6) 吉川 健他: Camp-ISIJ, **23**(2010), 38.
- (7) 塚口友一他: Camp-ISIJ, **23**(2010), 37.
- (8) 佐藤康弘他: Camp-ISIJ, **23**(2010), 908.