



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

製鋼研究を通じて学んだこと

Learning from My Experiences on the Research of Steelmaking

田口謙治
Kenji Taguchi

新日鐵住金(株)
技術開発本部プロセス研究所
製鋼研究部 主幹研究員

1 はじめに

私にとって、製鋼分野との関わりは15年以上で、それは学生時代まで遡る。もともと私は、学生時代には大阪大学(マテリアル系)に在籍し、碓井先生(現大阪大学名誉教授)および小野先生(現大阪大学准教授)のご指導のもと、熱力学、反応速度論に基づく鉄鋼研究(主に精錬分野)の魅力に惹かれ、最終的には、「鉄鋼を中心とした金属資源循環プロセスの要素技術に関する基礎的研究」にて学位をいただいた。また、博士後期課程修了後、学協会を通じたご縁もあって、2006年に旧住友金属工業(株)に入社し、そのまま製鋼プロセスに関わる研究開発(鑄造分野)を担当した。以降一貫して製鋼研究開発に携わり、現在に至っている。その間、いくつかの失敗を経験しながらも、新たな知見を見出したときの喜びを糧として、今後も、製鋼分野の発展に寄与する研究開発に従事したいと思っている。

今回、本稿を執筆する機会を与えていただいたことにまず感謝を申し上げ、私がこれまで取り組んだ製鋼研究を通じて学び、感じたことを中心に紹介したい。

2 製鋼研究から学び、感じたこと

私は、主に高効率化をキーワードとし、これまで精錬および連続鑄造に関わる要素技術の研究に従事してきた。これまでの取組研究事例として、精錬分野では、

- 1) 鉄スクラップからのトランプエレメント(Cu, Sn)除去に関する研究¹⁾
 - 2) 排出スラグの極小化を目的とした炭酸ガスによる溶銑脱Siに関する研究²⁾
 - 3) 高纯净度鋼の溶製に関わる脱酸・脱硫制御に関する研究^{3,4)}
- である。また、鑄造分野では、
- 4) 難鑄造性鋼種の浸漬ノズルの閉塞防止技術に関する研究⁵⁾

5) 連続鑄造鑄片の表面割れ防止技術に関する研究⁶⁾

6) 連続鑄造鑄片内部のポロシティ欠陥抑制技術に関する研究⁷⁾に取り組んできた。

まず、学生時代に取り組んだ精錬研究を通じて、原理・原則に基づく思考を習慣的に実践することを強く指導された。特に、熱力学に関わる研究では、時には、得られた実験データが熱力学的に矛盾する場合もあり、その都度、実験方法、装置選定の段階での自身の検討不足を認識させられた。一方、熱力学的に矛盾なく説明できる成果が得られたときには大きな満足感が得られると同時に、いかに論理的に考え、客観的にとらえながら研究を遂行することの大切さも実感した。

企業で研究を行っていく中でも、この習慣の重要性を感じる。企業の研究開発においては、特に限られた時間で解を導くことを要求されることが多く、同時に、さまざまな箇所への横展開も要求される。その目的達成に向けては、たとえ遠回りに思えても対象とする課題について現象を普遍化する、あるいはメカニズムを解明することが重要だと感じている。すなわち、現象を普遍的に理解できれば、設備・鋼種等が多様である製造現場に対しても、おのずと個々を取るべき最善策を提案できるはずである。さらに、今後ますます世界の鉄鋼メーカーとの競争が激化していく中で、高品質なものを低コストで製造するためのプロセス開発のスピードアップも要求されるであろうし、また、難課題であるほど、メカニズムが不確かであることが多い。こうしたことを踏まえても、物理化学現象を論理的に理解することが重要で、最終目標達成の近道の一つだと私は考えている。これまで研究を遂行する中で、こうしたことを強く感じる研究課題はいくつかあったが、ここではその一例として、連続鑄造時の浸漬ノズル閉塞現象の解明を取り上げ、以下に紹介したい。

3 難 casting REM 添加鋼の浸漬ノズルの閉塞現象解明

3.1 研究の背景と目的

鋼の連続 casting プロセスにおいて、タンディッシュから鑄型へ溶鋼を供給する浸漬ノズルが閉塞すると、生産性、品質双方とも大きな弊害を招く。そのため、浸漬ノズルの閉塞防止技術に対するニーズは大きく、Ca処理による介在物の無害化⁸⁾、ノズル材質の適正化^{9,10)}、あるいは電気的作用の利用¹¹⁾ などさまざまな技術がこれまでに提案されてきた。それら技術の多くが、汎用鋼のAlキルド鋼を対象としたもので、生産性を追求し、連々末期でもノズル閉塞を防止し、安定した casting 性を維持することを目的としている。一方、REM や Zr, Ti を含む鋼などではノズル閉塞が極端に生じやすく¹²⁻¹⁵⁾、必ずしも既存の防止技術を適用しても、単 casting すら達成できない場合もある。それゆえ、抜本的なノズル閉塞防止策に対するニーズも高く、鋼種ごとのノズル閉塞性を普遍化できれば、その解を見出せる可能性があると考えた。そこで、難 casting 性 REM 添加鋼を対象としたノズル閉塞メカニズムの解明に取り組むこととした。

この取組において、まず現象の仮説を推定し、それらの検証実験を案画することとした。REM を含む鋼のノズル閉塞性に及ぼす支配因子として、[因子①] ノズル耐火物と溶鋼間の界面反応性、および [因子②] ノズル内の流動性の2点に着眼した。熱力学的な観点から、REM は Al と比べても卑な金属であるため、ノズル耐火物を構成する Al_2O_3 や SiO_2 と REM が容易に反応すると考えた。それゆえ、溶鋼中 REM が耐火物を還元し、ノズル界面に REM を含む酸化物(反応物)が生じ、ノズル閉塞を助長していると推定した(因子①)。一方、ノズル内の閉塞部は上ノズルやスライディングノズル、あるいは吐出孔など構造に起因した流動影響が生じやすい箇所である場合が多く、それら箇所に優先的に介在物の付着、堆積が生じると推定した(因子②)。そこで、これら推定仮説を検証する2つの実験を実施し、REM を含む鋼の浸漬ノズル閉塞メカニズムを解明することとした。

3.2 仮説検証実験の案画とその検証結果

ノズル耐火物と溶鋼間の反応性(因子①)を評価するために、るつぼ型実験を実施した。Ar 雰囲気電気炉内で、0.05 mass % REM を含む鋼を Al_2O_3 または MgO るつぼ内で溶解させ、1873 K にて 20 min 程度保持した。保持後、試料をそのまま冷却して、凝固させ、るつぼと鋼の界面を観察した。2種類のるつぼ材質を選定した理由は、 Al_2O_3 が汎用的なノズル耐火物の構成成分の一つであり、また、MgO は Al_2O_3 に比べて熱力学的に安定な酸化物で、推定因子①の REM との反応

の影響を評価できると考えたからである。光学顕微鏡による鋼とるつぼの界面写真を図1に示す。図1(a)に示す鋼と Al_2O_3 の界面には付着介在物が顕著に存在し、一方、図1(b)に示す鋼と MgO の界面には付着介在物がほとんど存在しないことを見出した。これは、REM によって Al_2O_3 が容易に還元された結果、その生成物が界面に存在したのに対し、一方、REM 酸化物と同程度の熱力学的安定性を有する MgO の場合には、REM による MgO の還元が生じなかったことを示唆している。したがって、少なくとも、REM を含む鋼においては、溶鋼と耐火物中 Al_2O_3 の反応を無視できないこと(1つ目の仮説)が裏付けられた。

次に、ノズル内の流動性(因子②)を評価するために、1ton 規模の溶鋼を用いたノズル通過性評価実験を案画し、その実験装置を図2に示す。取鍋内の溶鋼 1ton (基本組成は Fe-0.10mass % C-0.22mass % Si-0.40mass % Mn-0.005 % Al-0.01 % REM) をタンディッシュに給湯し、タンディッシュからその底部に設けられた単孔型のアルミナグラファイト製ノズルを介して、溶鋼を排出した。いずれの実験においてもタンディッシュ内の溶鋼過熱度(タンディッシュ内溶鋼温度-溶鋼の液相線温度)は 60K 以上とし、低熱起因の閉塞が生じない条件とした。ここで、ノズル内の流動影響を調査するた

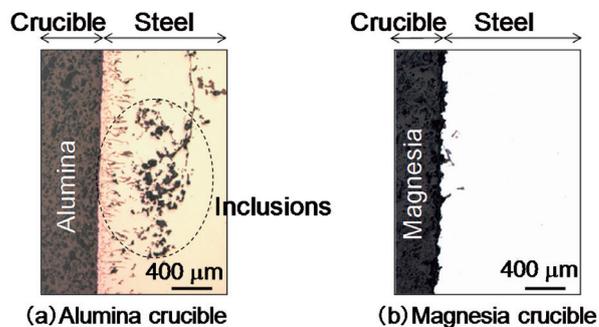


図1 REM を含む鋼と Al_2O_3 または MgO のるつぼ界面近傍の光学顕微鏡写真⁵⁾

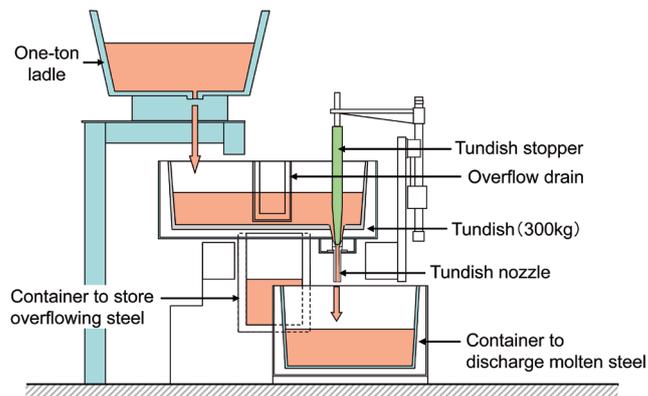


図2 1ton 規模の溶鋼を用いたノズル通過性評価実験装置

めに、図3に示すオリフィスのないストレート型ノズルとオリフィスを設けた段差型ノズルの2種類を準備し、そのいずれかを用いた。図3 (a) に示すストレート型ノズルの場合には、閉塞に至ることなく、実験を完遂できた。一方、図3 (b) に示す段差型ノズルの場合には、ノズルを通過した溶鋼量が高々100 kg程度で閉塞に至った。この閉塞したノズルの観察結果を図4に示す。これは、上ノズルと下ノズルの接合部のオリフィス部 (内径14mmに絞られた位置) に相当し、大きな流速変化を伴う箇所に数10 μm程度の介在物が優先的に付着していることを明らかにした。さらに、それら介在物が互いに繋がった3次元構造であることがわかった。一方、段差型ノズルを用い、REMを含まない成分系 (いわゆる、Alキルド鋼) を対象に同様の実験を実施したが、閉塞に至ることなく、注湯できた。したがって、難铸造性REM添加鋼でのみ、特にノズル構造に起因した流動影響を強く受け、ノズル閉塞が助長されることを明らかにし、2つ目の仮説も概ね正しいと判断した。

3.3 ノズル閉塞メカニズムと今後の展開

以上の検証実験結果から、図5に示すREM添加鋼のノズル閉塞メカニズムを導いた。まず、ノズル材質、優先付着領

域 (乱れ・淀み域) に依存して、REM系介在物がノズル表面に初期付着する。ノズル表面に初期付着した介在物を起点として、ノズル内を通過する介在物が捕捉され、介在物の付着層が形成・成長する。また、付着層内介在物はクラスター構造を有する。クラスター化した介在物の間隙を溶鋼が通過する際、流動抵抗が増大し、さらに付着層の成長に伴って溶鋼が通過できるノズル有効径が縮小してしまう。その結果、ノズル内の溶鋼流量が急激に減少し、ノズル閉塞に至る。

約2.5ton規模のREM添加鋼の連続铸造試験の実施によっても、本研究で導いた閉塞メカニズムの妥当性を確認し、溶鋼流量調整部に相当するスライディングノズルの材質や構造の影響を受けていることを明らかにした。そこで、ノズル材質、構造の再検討によって、現在までにラボ铸造試験では閉塞防止効果が得られることを確認し¹⁶⁾、実機試験に繋がる成果まで導いている。

4 おわりに

本稿を執筆し、研究を始めたばかりの頃を思い出した。特に、企業で研究を始めた当時、職場には年齢の近い先輩がおらず、熟練研究者のもつノウハウをいかにして習得しようか

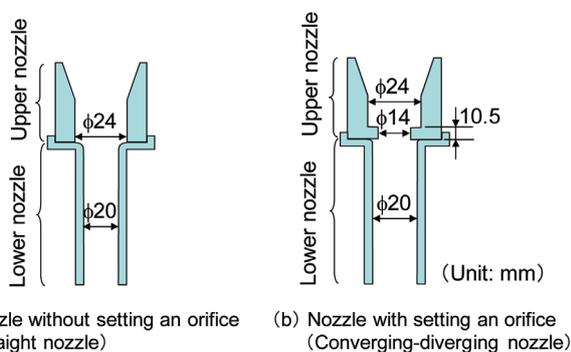


図3 ノズル通過性評価実験で用いた2種類のタンディッシュノズル

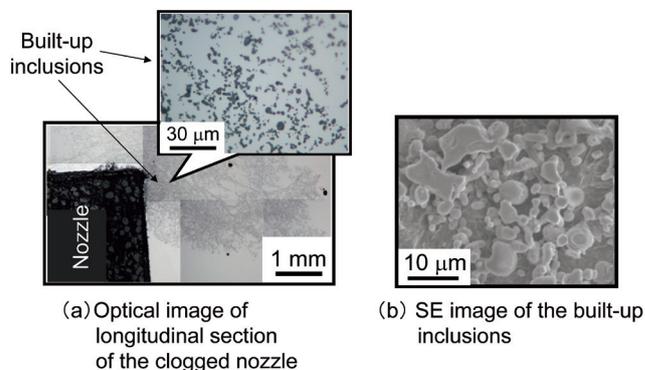


図4 閉塞したノズル内に観察された付着介在物の形態⁵⁾

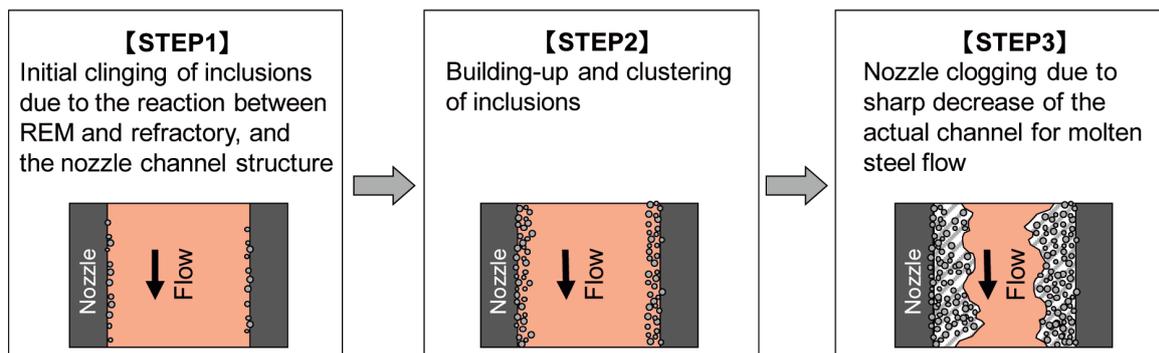


図5 REMを含む鋼の連続铸造における浸漬ノズルの閉塞メカニズム⁵⁾

と奮闘していた。当然ではあるが、完全にそれらすべてを習得することは困難で、ひとつ、ふたつでも自分のものとして吸収し、それらにさらに磨きをかけようとしていた。また、論理的にものを考える、客観的にものを見る、チャレンジする、長期的展望をもって立ち向かうことを入社当時の幹部から教えられたこともあらためて思い出した。本稿で紹介した研究課題においても、論理的・客観的に現象を理解することを考えて取り組んだが、今後もそれらの姿勢を大切にしていきたい。

また、入社当時と比べ、現在、職場の年齢層も大きく変わり、毎年のように新入社員が配属され、かなり若手が増えた。中堅研究者として、担当分野を先導することに加え、若手の育成という責任の重さも感じている。悪戦苦闘しながら、部下の育成に臨んでいる側面もあるが、10年後、20年後の製鋼分野(技術・人材)のさらなる発展に貢献できるよう、新たな技術革新に向かって、失敗を恐れず、これからもさまざまなことに挑戦していきたい。

一方、現在、日本鉄鋼協会 高温プロセス部会「固液共存体の挙動制御によるマクロ偏析低減研究会(主査:北海道大学 大野先生)」の企業委員として参加している。連続铸造プロセスにおける中心偏析は、企業側のニーズの高い課題の一つでありながら、現在でもなお抜本的な解決が難しい課題でもある。ここで取り上げたノズル閉塞の場合と同様、必ずしも中心偏析の生成メカニズムが明確になっていないからと考える。この研究会でも、特に学側の先生方の研究成果・ノウハウを情報共有させていただきながら、メカニズムの更なる理解、あるいはその対策を導こうと、皆で議論している。こうした難課題に対しては、産学が一丸となった取り組みも重要で、企業委員として製造現場の正確な情報を発信し、マクロ偏析の抜本的な解決に貢献できるよう、引き続き努力していく。

参考文献

- 1) H.Ono-Nakazato, K.Taguchi, Y.Seike and T.Usui : ISIJ Int., 43 (2003), 1691.
- 2) K.Taguchi, H.Ono-Nakazato, T.Usui and K.Marukawa : Metall.Mater.Trans.B, 34B (2003), 861.
- 3) K.Taguchi, H.Ono-Nakazato, D.Nakai, T.Usui and K.Marukawa : ISIJ Int., 43 (2003), 1705.
- 4) K.Taguchi, H.Ono-Nakazato, T.Usui, K.Marukawa, K.Katogi and H.Kosaka : ISIJ Int., 45 (2005), 1572.
- 5) K.Taguchi and N.Yoshida : Proc.of 4th Int.Con. on Process Development in Iron and Steelmaking (SCANMET IV), swerea MEFOS, Luleå, (2012), 249.
- 6) 田口謙治, 加藤徹 : 材料とプロセス, 28 (2015), 686, CD-ROM.
- 7) 太田晃三, 熊倉誠治, 佐藤康弘, 田島直樹, 加茂孝浩, 佐藤芳世, 山中章裕, 平城正, 白井善久, 田口謙治 : 第4回ものづくり日本大賞~世界の明日をつくる、日本のものづくり~, 経済産業省, 東京, (2012), 24.
- 8) 荻林成章 : 耐火物, 46 (1994), 166.
- 9) 樋口陽子, 真目薫, 川島康弘 : 材料とプロセス, 8 (1995), 158.
- 10) 淡路谷浩, 鈴木幹雄, 渡辺圭児, 堤康一, 岸本康夫, 久保田淳 : 鉄と鋼, 98 (2012), 10.
- 11) 加藤徹, 塚口友一, 川本正幸, 武藤章史, 太田晃三 : 材料とプロセス, 22 (2009), 125, CD-ROM.
- 12) A.Katsumata and H.Todoroki : Trans.ISS, 29 (2002), 51.
- 13) A.Memarpour, V.Brabie and P.G.Jönsson : Ironmaking Steelmaking, 38 (2011), 229.
- 14) N.Kojola, S.Ekerto, M.Andersson and P.G.Jönsson : Ironmaking Steelmaking, 38 (2011), 1.
- 15) S.Basu, S.K.Choudhary and N.U.Girase : ISIJ Int., 44 (2004), 1653.
- 16) 田口謙治 : 材料とプロセス, 27 (2014), CD-ROM.

(2016年7月20日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 教授

安田 秀幸

鉄 鋼の凝固・铸造に関する研究を行っている仲間から、田口さんにエールを送らせていただきます。田口さんが執筆された記事を拝読し、「なるほど」と納得させられました。学会などで田口さんの発表を聴講する機会があり、そのたびに論理だった分かりやすい発表構成と原理・原則を意識された研究結果の説明に感心されていまして。この記事を読んで、その背後にある研究者としての矜持を少し理解できた気がします。

製鋼プロセスは、鉄鋼材料の融点付近の高温において、介在物を構成する微量元素も含めると多成分系・多相系を対象としており、化学反応・相変態(凝固)のみならず、流動(運動量と物質の輸送)も無視できない、ミクロスケールからメートルスケールの現象を取り扱います。望まれる温度、空間・時間スケールで現象を把握することが難しいなかで、ともすれば経験に基づいた「技術」が先行し、「技術」の要求に応えるべき「科学」が遅れをとっている場面もあると思います。

このような実験的制約のなか、田口さんがなされた難铸造性のREM添加鋼の浸漬ノズルの閉塞に関する研究では刹那の成果を追うことなく、ノズルへの介在物の集積現象をその閉塞機構に立ち戻って考察し、界面反応と

流動の因子に分けた仮説の構築と実験による仮説の検証により、REM添加鋼のノズル閉塞メカニズムを導いています。検証に基づいた機構の解明は意義の大きい成果であり、「なんとなく」、「そんな感じ」ではなく、確固たる成果に基づいた対策を提供すると考えます。このような取り扱いが容易でない現象に対して、具体的な現象の把握、素過程への抽象化と仮説の構築、実験にもとづく検証といった知的生産のサイクルを通して、製鋼プロセスの課題を解決されている姿には大いに刺激を受けます。

田口さんが書かれた記事にあるとおり、連続铸造铸片の表面割れ、内部ポロシティ、中心偏析など解決すべき課題が製鋼プロセスにはまだまだ残されています。一方、ブレードスルーには新しい切り口により従来の理解を越える研究が求められる課題でもあります。これらの課題に対しても田口さんの研究姿勢であるメカニズムの科学的理解・現象の普遍化から、「科学」と「技術」をつないだ製鋼プロセスの革新を期待しております。また、大学に身を置いている小生の立場から、学会など産学が協同する場でのリーダーとしての役割や人材育成でもご貢献いただきたいと願っております。これからの活躍に大いに期待しております。

日本冶金工業(株) 技術研究部 部長

轟 秀和

既 に企業研究員として躍動されている田口氏との出会いは、田口氏が博士課程在籍中のときに遡る。当時、2004年頃であったと記憶しているが、筆者は学振製鋼第19委員会にて推奨平衡値の改訂委員会に参画していた。その中で、田口氏の恩師である小野先生も同じ特殊鋼グループにいらっした。そのグループメンバーから、「学振推奨値にある溶鉄中Siの活量係数に及ぼすMoの影響を示す e_{Si}^{Mo} が非常にプラスに大きな値であり、実態とそぐわない。実験的に求められないか？」といった意見が常々議論の中心となっていた。小野先生が「実験的に求めてみましょう。」とのお返えがあり、会合の度にデータが蓄積されたのを記憶している。

この実験¹⁾を行ったのが田口氏であったという事実は、田口氏が企業に入社した後に知ったことである。まさに、学位論文の一部を構成しているものと思っていたが、そうではなく、「余裕があったので取り組んだ。」という話をお聞きして、まさに驚嘆したことを今でも良く覚えている。確かに、田口氏の躍動記事を拝読して、ご自身の参考文献に入っていないことから理解できる。

この逸話から考えると、記事中に記載された、①原理・原則に基づく思考、②限られた時間での解答、③普遍化、このキーワードの礎は博士課程でほとんど完成していた

ものと確信する。企業で研究していると良く感じることであるが、生産現場で起きている事象は、様々な要素が重なり、交差し、絡まっていることが多い。まず、解きほぐす所から始まると考えている。記事中のREM添加鋼の浸漬ノズル閉塞機構解明は、まさにその一例とも言えて共感するものがある。筆者も同様のことをいつも考えるが、原理・原則に基づく仮説とその実証、そして普遍化は、常に意識すべきである。その中でも、全ての現象は科学的に普遍化されなければ、解が得られていないことと思っている。そこは、限られた時間を無視しても突き進んでいただきたい。

現在では、高温プロセス部会でのマクロ偏析低減研究会に、同じ企業研究者として参加している。偏析低減はとても重要な課題であり、なかなか企業から情報を発信し難いことに、もどかしさを感じていることと思う。今後とも、研究結果を普遍化しノウハウを含まないサイエンスとして、一緒に議論していきたいものである。そして、企業研究のプレゼンス向上に向けて、ともに努力していきましょう。

1) H.Ono-Nakazato, K.Taguchi, R.Maruo and T.Usui : Silicon Deoxidation Equilibrium of Molten Fe-Mo Alloy, ISIJ Int., 47 (2007), 365.