

鋼の連続铸造と耐火物

Continuous Casting of Steel and Refractories

Key-words : Slide plate, Ladle shroud, Submerged entry nozzle, Steel quality

飯田 正和

Masakazu IIDA (Shinagawa Refractories Co., Ltd.)

1. 鋼の連続铸造

溶鋼は、各種精錬工程により不純物が除去され、また必要な成分が添加され、用途に応じた組成に調整される。その溶鋼を冷やして固めるプロセスが铸造である。铸造は、その名が示す通り铸型（モールド）に铸込む成形法で、ほとんどの鋼製品は連続铸造というプロセスで铸造される。

図1に連続铸造の概要を示す。連続铸造は、スラブと呼ばれる板状の鋼片やブルームと呼ばれる棒状の鋼

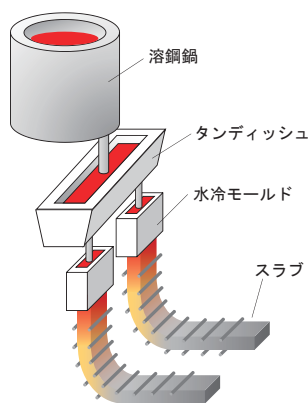


図1 鋼の連続铸造の概要。

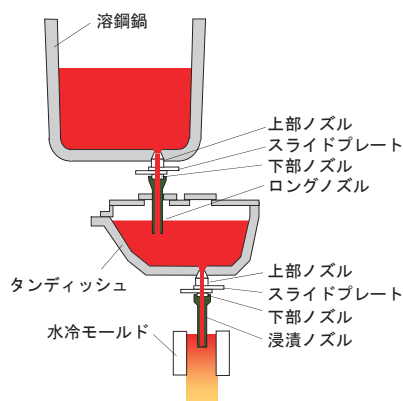


図2 連続铸造に使用される耐火物（一例）。

片を作る工程で、溶鋼鍋の溶鋼は、タンディッシュと呼ばれる容器に貯留されてからモールドに注ぎ込まれる。溶鋼鍋が空になると同じ種類の鋼を貯めた別の溶鋼鍋に切り替わり、途切れることなく連続的に铸造が継続する。

モールドは周囲が水冷されている銅製の短い筒である。溶鋼は連続的にモールド上部に注ぎ込まれモールドとの接触面付近に凝固シェルを形成、内部が溶融している状態で下部から引き抜かれる。引き抜かれた鋼片はミスト等による二次冷却により中央部まで完全に凝固する。連続铸造で得られたスラブやブルームは圧延工程でさらに薄く、細く引き延ばされて、それぞれ鋼板や棒鋼といった鉄鋼製品になる。

2. 連続铸造に使用される耐火物

図2に連続铸造に使用される代表的な耐火物の一例を示す。この中で、耐火物が溶融金属の容器として使用されるものはタンディッシュのみである。上ノズル、スライドプレート、下ノズル、ロングノズル、浸漬ノズルは清浄度の高い鋼を高生産性で铸造するための機能を有しており、機能性耐火物や機能材と呼ばれる場合がある。

3. タンディッシュ

タンディッシュは複数のモールドに溶鋼を分配したり、溶鋼の流れを整えたり、比重の軽い非金属の異物（介在物）の浮上分離を図ったりする機能を持つ。耐火物としては $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 質のれんがや流し込み材が用いられ、溶鋼と接する表面には吹き付けやコテ塗で MgO 質のコーティングが施され表面で凝固した鋼を剥がしやすくしている。連続铸造において鋼の種類を変更するときは、鋼同士が混ざらないように铸造を中断しタンディッシュを交換する。交換されたタンディッシュは表面に凝固・付着している鋼を剥がして次の铸造に備えるが、コーティング層から剥がれるので耐火物の損傷を抑制しながら迅速に剥がすことができる。

したがって、タンディッシュの耐火物が溶鋼やスラグと反応して溶解することはほとんどなく、铸造～凝固鋼剥離に伴い繰り返される加熱冷却によるき裂の発生と進展で損傷する。そのため、タンディッシュの耐火物は加熱冷却のサイクルによって生じる体積変化の小さいものが適する。また、コーティング層とタンディッシュが焼き付いて強固に接着すると、鋼の剥離に伴われて耐火物が損傷するため、タンディッシュ耐火物との反応性が低いコーティング材が好ましい。

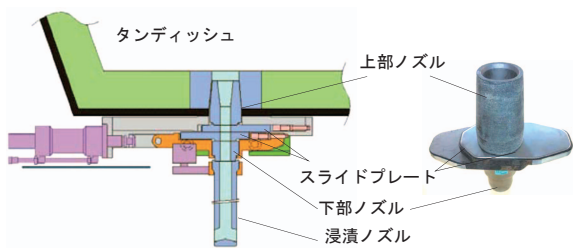


図3 スライドプレートシステムの概要。

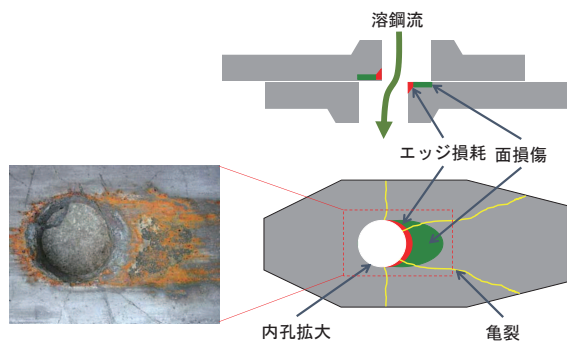


図4 スライドプレートの損傷。

4. スライドプレート

4.1 スライドプレートシステム

鋼の casting において、生産性を高めるためには高速で引き抜く必要があるが、速すぎると凝固シェルの形成が不十分となり、シェルが裂けて溶鋼が流れ出す。そのため、引き抜き速度を高い精度で制御する必要がある。それに伴い、モールドへの溶鋼の供給速度も高い精度での制御が求められる。それを可能にする機構のひとつにスライドプレートシステムがあり、溶鋼鍋にもタンディッシュにも適用されている。図3にスライドプレートシステムの一例を示す。スライドプレートは、溶鋼が通過する内孔を有する板状耐火物で、これを2~3枚組み合わせることで1枚を摺動させ内孔の重なり度合いを調節することで溶鋼の流量を制御する。タンディッシュや溶鋼鍋とは上部ノズルを介して、浸漬ノズルやロングノズルとは下部ノズルを介して接続する。3枚セットの場合、中央のプレートが摺動する。

これらの部材には Al_2O_3 質、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ 質の耐火物が使用されるのが一般的である。ここではスライドプレートの耐火物について述べる。

4.2 スライドプレートの損傷

スライドプレートの損傷は図4に示すように、き裂、エッジ損耗、内孔拡大、面損傷がある^{1), 2)}。

き裂は、内孔の溶鋼の通過により発生する熱応力に起因して生じる。き裂を低減するために、熱膨張率や弾性率を低くして発生する熱応力を低減させることが

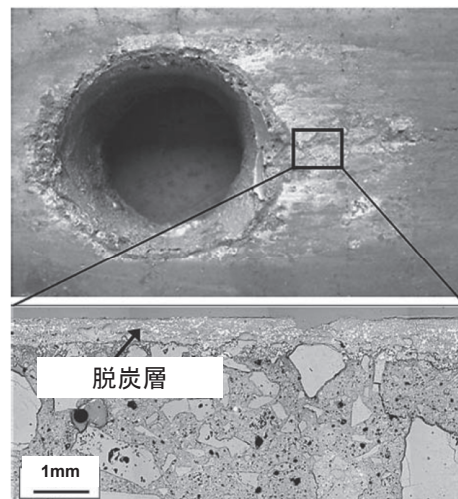


図5 スライドプレートの面損傷の外観と切断面。

有効である。さらに、 SiO_2 や ZrO_2 を適量添加して、熱応力に対する耐性を向上させている³⁾。プレート耐火物は周囲を鉄製のフープで取り囲まれている。このフープは加熱して赤熱させた鉄のリングを耐火物周囲にはめ込み、冷却により鉄が収縮、耐火物内に圧縮応力を生じさせることでき裂の発生や進展を低減させる。そのため、フープの長さはプレート周囲の長さとの関係で厳密に決められている。

内孔拡大は、耐火物と溶鋼が反応、耐火物が溶損して生じるもので、Ca 添加鋼や高酸素で清浄度の低い鋼で顕著である。Ca は溶鋼内の非金属 inclusion や S の除去を目的に添加される。沸点が低く蒸気圧が高い元素であり、 casting 中に蒸発し酸素と結びついて CaO を形成、プレート耐火物と CaO の共融反応により耐火物の溶損が生じる。また、高酸素で清浄度の低い鋼は casting 中に酸化物を形成し、耐火物と共融反応が生じる。

上述のようにプレートは流量制御装置で、内孔をずらして casting する「絞り注入」が主体であり、それに起因してエッジ損傷や面損傷が進む。エッジ損傷は微視的な熱応力破壊であり、熱膨張率や弾性率の低減、破壊仕事の増大が有効である。絞り注入では内孔と摺動面の2面から加熱されるため、プレートの中でも最も厳しい熱応力を受ける。

面損傷部は絞り注入において溶鋼と接している摺動面で生じる。面損傷の外観と切断面を図5に示す。表面には脱炭層が形成されている。この脱炭層は耐火物成分である Al_2O_3 と C が反応して Al ガスと CO ガスが生じ、溶鋼に溶解することで生じる^{4), 5)}。スライドプレートは、隙間から溶鋼が流出するとその機能を果たせないため、溶融物の容器と異なり、数 mm の損傷で寿命となって交換される。

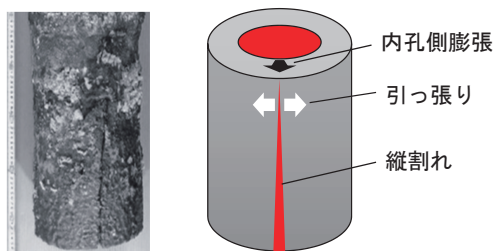


図6 ロングノズルの縦割れ.

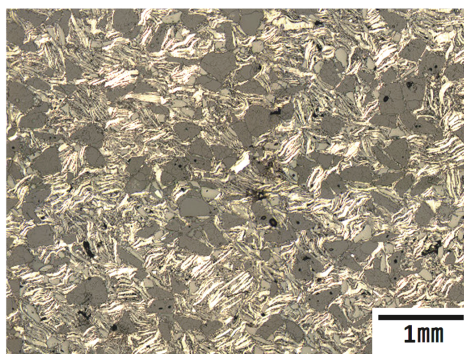


図7 AG材質の微構造.

5. ロングノズル

ロングノズルの機能は、溶鋼の汚染防止である。溶鋼は大気に接触すると酸化したり吸窒したりして清浄度が低下する。そのため、溶鋼鋼とタンディッシュの間にロングノズルが用いられる。

ロングノズルの主な損傷は縦割れである⁶⁾。内孔を溶鋼が通過し内側が膨張、外周側に引っ張りが作用し縦割れを生じる(図6)。そのため、 Al_2O_3 と低熱膨張で高熱伝導性の黒鉛(Graphite)の複合物がロングノズルに用いられ、AGと呼ばれる。AG材質の微構造を図7に示す。輝度の低い粒状物質が Al_2O_3 でその間に占めている輝度の高い物質が黒鉛である。

6. 浸漬ノズル

6.1 浸漬ノズルの形状

浸漬ノズルの機能で最も重要なものは、モールド内の溶鋼流動の制御で、多くの場合溶鋼を吐出する孔は底面ではなく側面に設けられている。図8にモールド内流動の例を示す。図8でモールドフラックスとは酸化物主体の粉体で、溶鋼との接触面側は溶融している。これには溶鋼の保温や非金属介在物の捕獲、溶融層のモールド-溶鋼境界部への流入による潤滑性付与等の機能がある。

さて、浸漬ノズルの吐出孔から排出された溶鋼はモールドにぶつかって流れの方向を変える。このとき、下

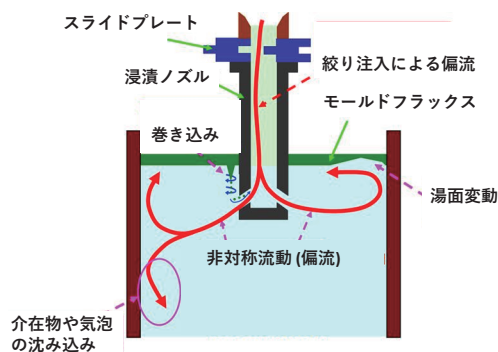


図8 モールド内における溶鋼の流動.

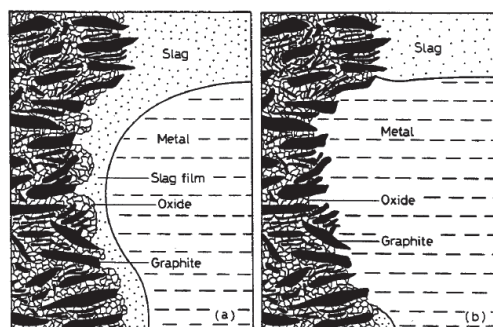


図9 ZG材質の局部溶損⁹⁾.

向きの流れが強すぎると非金属介在物を浮上分離できない。また、溶鋼表面の流れが不十分となり表面に熱が十分供給されず、モールドフラックス下部に適切な溶融層が形成されない。一方、上向きの流れが強すぎると溶鋼表面の振幅が大きくなり、生産性を高めることができない。これらのことから、吐出孔の形状が最適化されている^{7), 8)}。

6.2 浸漬ノズルの損傷

浸漬ノズルもロングノズル同様、熱応力による割れが生じるため、材質はAGである。しかし、モールドフラックスに接触する範囲は ZrO_2 -Graphite(ZG)が配材される。モールドフラックスは適切な溶融正常を得るためアルカリやフッ素を多量に配合している場合が多く浸食力が強い。そのため、耐食性に優れるZGが適用されるが、局部的な損耗が生じている。この部分の損耗は、界面張力が強く影響している。

図9に局部溶損の様子を示す⁹⁾。ZG材質中、酸化物である ZrO_2 は溶融フラックスに濡れ溶鋼には濡れない。そのため、フラックスは重力(浮力)に逆って耐火物表面を濡らしながら降下する((a)期)。ここで溶融フラックスに接触している酸化物はスラグに溶解し、接触部の耐火物表面に占める黒鉛の割合が多くなる。黒鉛は酸化物であるフラックスに濡れないのでフラックスははじかれて上昇し、耐火物表面は溶鋼と

接触する ((b)期)。溶鋼は炭素を溶解するので、今度は耐火物表面の黒鉛が溶鋼に溶解し耐火物表面には酸化物が露出し、再度フラックスが降下する。このようにして局部損傷が進行する。

7. 非金属介在物と耐火物の閉塞

連続 casting において問題となる非金属介在物は Al_2O_3 である。溶鋼の精錬において酸素の除去は、Al 粉末を投入して攪拌、 Al_2O_3 を生成させて浮上分離して行う。 Al_2O_3 の粒径が大きいと浮力によって短時間に浮上するが、細かいと溶鋼に懸濁する。この Al_2O_3 が耐火物表面に付着し、ノズルやプレートを開塞する場合がある。閉塞すると、本来の機能を果たせないことから閉塞防止技術が適用されている¹⁰⁾。

閉塞防止の代表的な技術は耐火物表面からのガス吹きである。上部ノズルやスライドプレートの内孔にポーラス耐火物を設置、溶鋼を汚染しないアルゴンガスを吹き込むことで懸濁している介在物を気泡に付着させたり、内孔表面付近に気泡群を通過させることで耐火物と介在物の接触確率を下げたりする効果がある。

これに対して、内管表面に低融点層を形成させる難付着性の材質を配置する技術もある。表面に適度な溶融物を含む緻密層があると平滑になり介在物が付着し難くなる。また、緻密層は溶鋼と濡れやすいため付着が低減するとも考えられている。図 10 に示すように、溶鋼と耐火物が濡れ易いと溶鋼は耐火物表面を常に覆おうとするため、非金属介在物が耐火物表面に接近しても両者は接触し難くなる。

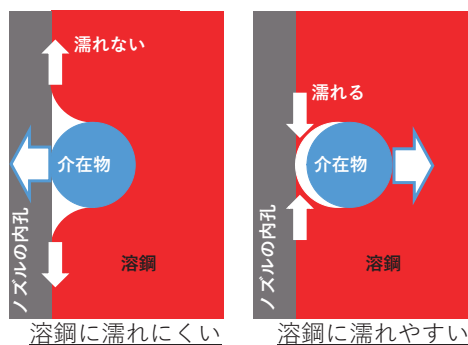


図 10 溶鋼－ノズル表面の濡れと介在物付着。

8. おわりに

casting は、溶鋼を冷却固化させる工程であり、製鉄から始まる各種精錬処理を経てきた鋼を高い生産性で casting するための多くの制御がなされる。そこに使用される耐火物は、介在物や気泡の巻き込み等による鋼の汚染防止、流量制御等、さまざまな機能を果たしている。本稿で紹介したのは一例であり、別の制御方法が採用される場合も多いことを付記しておく。

現在、鉄鋼製品の更なる軽量化、高強度化、易加工性化等の品質向上を目的とした成分や組織の制御技術が研究されている。それらの工業的な規模での実施にあたってさまざまなプロセスが開発され、耐火物にもさらなる高機能化が要求されると予想される。それに応え、また耐火物側から新たな製鉄プロセスを提案するために、材質や組織、構造の製造方法等、多くの研究開発の余地がある。

文 献

- 1) 森井浩明, 南 晴彦, 足立真司, 品川技報, 55, 53-58 (2012).
- 2) 仁田脇莊一郎, 赤峰経一郎, 原田 力, 原田正博, 耐火物, 49, 687-688 (1997).
- 3) 山本芳範, 井上隆裕, 駿河俊博, 吉富丈記, 浅野敬輔, 耐火物, 59, 537-543 (2007).
- 4) 坂口雅行, 宮川三郎, 新谷宏隆, 小口征男, 耐火物, 45, 697-701 (1993).
- 5) 林 煒, 溝淵文彦, 濱本直秀, 森脇宏治, 品川技報, 57, 11-24 (2014).
- 6) 余多分智博, 山内智玲, 耐火物, 66, 456-463 (2014).
- 7) 新妻宏泰, 森脇宏治, 西尾奏恵, 品川技報, 60, 90-99 (2017).
- 8) 溝部有人, 立川孝一, 栗栖譲二, 植木正憲, 耐火物, 69, 58-69 (2017).
- 9) 向井楠宏, 表面, 30, 349-359 (1992).
- 10) 萩林成章, 耐火物, 46, 166-178 (1994).

筆者紹介



飯田 正和 (いいだ まさかず)

研究者として製鉄用耐火物の研究に従事、材料開発や高炉炉床現象の研究を実施。その後、研究部長として製鋼用、工業炉用、連続 casting 用の各耐火物やモールドフラックスの開発を推進。現在は技術研究所長として耐火物の研究開発全般をマネジメントしている。

[連絡先] 〒705-8577 岡山県備前市伊部 707 品川リファクトリーズ(株)技術研究所
E-mail: m_iida@shinagawa-ref.com