

## 連続鑄造用耐火物

(1980年代～現在)

Key-words：鉄鋼、連続鑄造、ロングノズル、スライドプレート、浸漬ノズル

溶鋼を連続的に鋼片に固める連続鑄造法においては、溶鋼を注入するノズルやその流量を制御するスライドプレートに主に  $Al_2O_3-C$  質の耐火物が使用される。連続鑄造用耐火物はその安定性が鑄造工程の生産性に直結するうえ鋼製品の品質に大きく影響するため、連続鑄造技術の発展と共に材料的にも機能的にも進歩してきた。ロングノズルや浸漬ノズルといった断気鑄造用ノズルでは耐熱衝撃性が重視され、鱗状黒鉛を 25～30% 配合されたアルミナ・黒鉛材料を CIP 成形し、還元焼成によってカーボンボンド化した製品が使用される。スライドプレートでは面精度が重要であり、微細カーボンを用いた低カーボン組成の  $Al_2O_3-C$  材料を金型プレス成形し、還元焼成による Si の SiC 化等で高強度化させた材料がピッチ含浸処理して使用される。連続鑄造用耐火物では  $ZrO_2$  成分も重要であり、浸漬ノズルは溶損部位が  $ZrO_2-C$  材料で補強され、プレートでは未安定化  $ZrO_2$  の相転移による低膨張原料が使用される。

注1 鉄という金属は純度 100% の状態では身の回りに使われていません。鋼とは鉄に 0.02%～1.7% の炭素を加えた合金で、私達が普段の生活で触れている鉄鋼製品とは「鋼」を指しています。

鉄鋼製品<sup>注1)</sup>のほとんどは溶けた鉄（溶鋼）を冷やして固めた鋼片を圧延した鋼材から製造される。1960年代までは溶鋼を鑄型に流し込んだ後、自然冷却して固めた鋼塊を再び加熱して分塊圧延機で伸ばして鋼片をつくる造塊法が行われていた。1970年代になると溶鋼から直接鋼片をつくる連続鑄造法が広まり、1983年には適用率が90%を超え、現在では99%を超えている。

連続鑄造では溶鋼を注入するノズルや流量制御を行うプレートを耐火物で製造する必要がある。これらは一般的な築炉用耐火物とは異なり、単体で使用され、鑄込み時の溶鋼の流れ方や流量を制御するため機能性耐火物とも呼ばれる。連続鑄造用耐火物は連続鑄造技術の発展と共に材料的にも構造的にも変化しており、現在のような製品が定着したのは1980年代からである。

## 1. 連続鑄造の概要

連続鑄造の概要を図1に示す。精錬工程を経て成分を調整した溶鋼は取鍋で運ばれてきたあと、タンディッシュと呼ばれる容器に貯留されてから水冷鑄型（モールド）に注ぎ込まれる。取鍋が空になると別の取鍋に切り替わり、鑄造を続ける。モールドは周囲が水冷された銅製の短い筒である。モールドの上方から注ぎ込まれた溶鋼はモールドとの接触面で凝固殻を形成し、内部が溶融した状態のままモールドの下部から引き抜かれる。凝固殻がモールドに焼き付くのを防止するため、モールドパウダーと呼ばれる低融点のフラックス粉体もモールドの上部から投入され、その溶融物がモールドと凝固殻との間に流れ込んで潤滑剤の役目を果たす。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

注2 連続鑄造工程では溶鋼を連続的に厚みのある鋼片に固めます。鋼板用にはスラブ、形鋼用にはブルーム、線材用にはビレットとよばれる中間素材が製造されます。

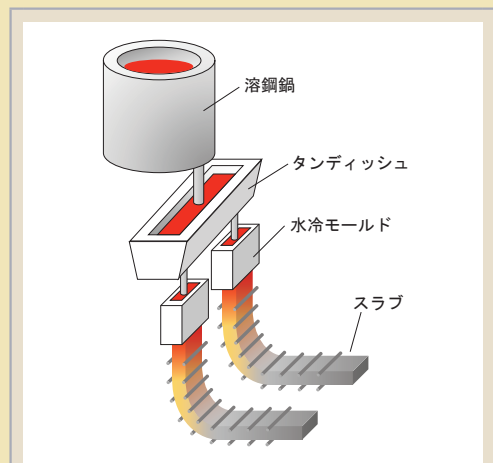


図1 鋼の連続鑄造の概要

取鍋で運ばれてきた溶鋼は中間容器であるタンディッシュに注入された後、水冷鑄型（モールド）に注ぎ込まれる。モールド内の溶鋼はモールドとの接触面側が凝固し、内部が溶融した状態で連続的に下方に引き抜かれ、ミスト等による二次冷却を経てスラブ等の鋼片となる。

で完全に凝固する。連続鑄造で得られた鋼片は形状によってスラブ、ブルーム、ビレット<sup>注2)</sup>と呼ばれ、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鋼材になる。

## 2. 連続鑄造に使用される耐火物

連続鑄造における耐火物の使用例を図2に示す。タンディッシュは溶鋼を複数のモールドに分配する中間容器であると同時に、溶鋼の流れを整え比重の軽い非金属の異物（介在物）の浮上分離を行う機能を持つ。耐火物としてはアルミナ・シリカ質の耐火れんがや流し込み材が本体部に使用され、溶鋼との界面にはマグネシア質コーティング材が吹き付けやコテ塗りで施工される。コーティング材は成分的に

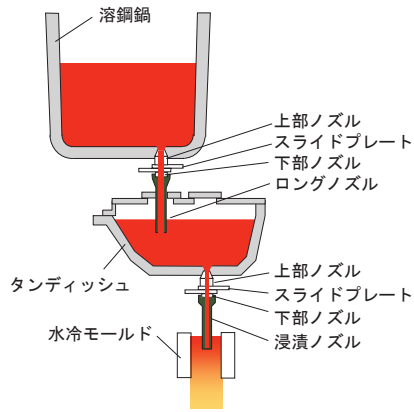


図2 連続 casting 用耐火物の使用例

鑄造の過程で溶鋼が大気に接触しないように、溶鋼鍋からタンディッシュの間はロングノズルを、タンディッシュから水冷モールドの間は浸漬ノズルを用いて溶鋼が注入される。その流量は、溶鋼が通過する内孔を有するスライドプレートを2～3枚重ね合わせ、内孔の重なり具合を調整することで制御される。

溶鋼を汚染しないことに加え、タンディッシュ整備の際に表面で凝固した地金を剥がしやすくする役目がある。スライドプレートは溶鋼が通過する内孔を有する板状の耐火物で、これを2枚または3枚組み合わせて1枚を摺動させ、内孔の重なり度合いを調節することでそこを通過する溶鋼の流量を制御する。スライドプレートは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され、これら一式をスライディング・ノズル (SN) 方式と呼ぶ場合がある。流量制御にはSN方式以外にストッパー・ノズル方式がある。タンディッシュの上部ノズルではポラス材料を用いてArガスの吹き込みが行われる場合が多い。これはAl脱酸<sup>注3)</sup>した溶鋼を連続鑄造する際に、脱酸剤の再酸化で生じ溶鋼中に懸濁したアルミナ介在物が上部ノズルや浸漬ノズルの内孔部に堆積して閉塞することを防止するためである。溶鋼は大気に接触すると酸化や吸窒によって清浄度が低下する。そこで断気鑄造を行うために、溶鋼取鍋からタンディッシュ間はロングノズル (または注入管) が使用され、タンディッシュからモールドの間には浸漬ノズルが使用される。

図3に示すように、浸漬ノズルから吐出された溶鋼はモールドに衝突して流れの方向を変える。このとき下向きの流れが強すぎると非金属介在物等が浮上分離できない。逆に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、鑄込みが不安定になる。そのため浸漬ノズルの形状は水モデル実験や流体計算を用いて適切なモールド内溶鋼流動が得られるように設計される。

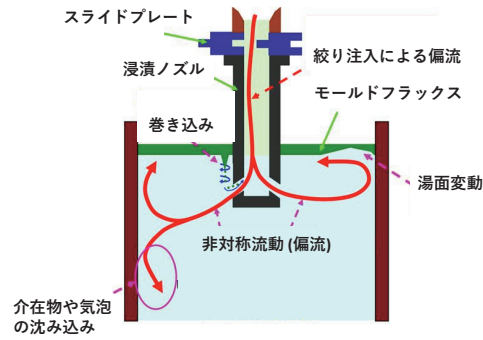


図3 浸漬ノズルとモールド内溶鋼流動

浸漬ノズルから吐出された溶鋼はモールドに衝突して流れの方向を変える。衝突後の下向きの流れが強すぎると介在物や気泡が浮上分離できない。逆に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、鑄込みが不安定になる。そのため浸漬ノズルの構造は水モデル実験や流体計算を用いて設計される。



図4 連続 casting 用機能性耐火物

左: 写真手前側の2孔または単孔のノズルが浸漬ノズル、奥側の長尺品がロングノズル。

右: 写真手前側にある内孔を有する板状の製品がスライドプレート、奥側の製品が上部・下部ノズル。

### 3. 連続 casting 用機能性耐火物の材料特性

連続 casting 用の機能性耐火物の製品外観を図4に、その品質例を表1に示す。溶鋼精錬炉ではマグネシア系の塩基性耐火物が広く使用されるのに対し、連続 casting 用耐火物の多くはアルミナ系耐火材料である。これはアルミナの方が熱膨張率が小さく、耐熱衝撃性に優れた材料特性が得られるためである。溶融シリカはさらに熱膨張率が小さいため、1970年代にはスリップキャスト法で製造された溶融シリカ質浸漬ノズルが広く使用されていた。しかしシリカは溶鋼中のMn成分によって溶損されるため、CIP (Cold Isostatic Press) 成形で製造されるアルミナ・黒鉛質材料への切り替えが進んだ。この材料は鱗状黒鉛が25～30 mass%程度配合され熱伝導率が高く、溶鋼通過時の熱衝撃によっても亀裂が生じないため、ロングノズルや浸漬ノズルで使用される。ただし製品が1つの材料で構成される場合は稀で、部位毎に適した数種の材料を組み合わせた一体物としてCIP成形される。特に浸漬ノズルがモールドパウダーによって溶損される部分は高耐食性のジルコニア・

注3 溶鋼中の酸素濃度を低減するため、金属Alを加えて鋼中の溶解酸素をアルミナ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 系の非金属介在物とし、スラグ中に吸収除去する操作。

表 1 連続鑄造用耐火物の品質例

要求される特性の違いから、組成的にも製造方法的にも異なるさまざまな材料を組み合わせられて製品化されている。

耐火物製品	スライドプレート (取鍋用, TD用)	ガス吹き上ノズル (TD用)	ロングノズル		浸漬ノズル	
		ポラス部	本体部	浸漬部	本体部	PL部
製造方法	プレス成形 還元焼成 ピッチ含浸	プレス成形 酸化焼成	CIP成形 還元焼成		CIP成形 還元焼成	
化学組成 /mass%						
SiO <sub>2</sub>	3	6	25	—	26	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	75	82	46	68	50	—
ZrO <sub>2</sub>	9	10	—	—	—	86
Free C	7	—	C+SiC 29	C+SiC 32	C+SiC 25	9
見掛気孔率/％	4.0	23.1	13.4	14.7	13.6	15.6
かさ比重	3.33	2.90	2.30	2.54	2.33	3.98
曲げ強度/MPa	20	—	7.9	8.3	8.0	9.0
圧縮強度/MPa	275	48	—	—	—	—

TD：タンディッシュ、CIP：Cold Isostatic Press、PL：パウダーライン

黒鉛質材料で補強される。成形用のバインダーにはフェノール樹脂が使用され、造粒後にゴム枠に充填してCIP成形され、還元焼成により揮発分を除去したカーボンボンド品として製品化される。

スライドプレートではAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>-C質材料が広く使用される。浸漬ノズル等のアルミナ・黒鉛質材料と比べて低カーボン組成であり、耐摩耗性と強度がより重視された材料である。この製品においても耐熱衝撃性は重要であるが、鉄ケースを被せて製品化されるため熱衝撃で亀裂が発生しても亀裂から外気を吸気しなければ鑄造に支障はない。またカーボン原料は溶鋼に溶解するため、摺動面の精度が求められるスライドプレートでは添加量に限界がある。さらに、スライドプレートは面圧を負荷した状態で摺動させるため、機械的な動作で座屈しないための高い強度が必要である。そのためプレート用Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>-C質材料は、還元焼成によって添加SiからSiCを生成させて高強度化し、さらにピッチ含浸によって溶鋼の焼き付き防止と亀裂からの吸気防止を強化

した設計となっている。また、未安定化ジルコニアの相転移を生かした低膨張原料も骨材に使用される点で特徴がある。

#### 4. 現在・将来展望

連続鑄造用耐火物は、その安定性が鑄造工程の生産性に直結するだけでなく、鋼製品の品質に大きな影響を与える機能性セラミックス製品である。高速鑄造化や鋼片の欠陥低減といったこれまでの連続鑄造技術の発展には耐火物の高性能化が不可欠であった。今後もさらに信頼性と機能性を高めた連続鑄造用耐火物の開発が期待されている。

##### 参考文献・資料

飯田正和, 鋼の連続鑄造と耐火物, セラミックス, 54 [3], 147-150 (2019).  
耐火物技術協会編, 耐火物手帳改訂12版, (2015).

[連絡先] 小形 昌徳 (おがた まさのり)  
品川リファクトリーズ(株)技術研究所  
〒705-8577 岡山県備前市伊部 707