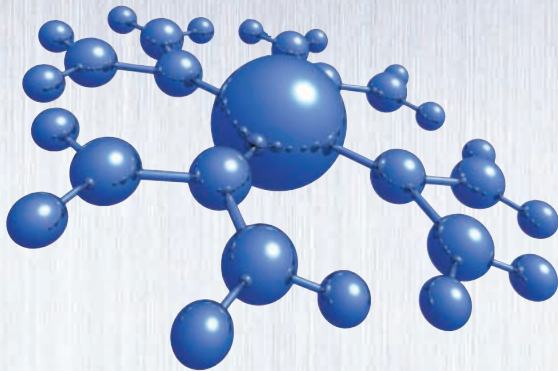


鋼を生み出す

その3 連続鋳造の役割と挑戦

粘りのある強靱な“鋼”をつくる製鋼プロセスでは、転炉の一次精錬で脱炭を行い、真空脱ガスによる二次精錬で脱炭、脱水素・窒素を行い、「連続鋳造」で溶鋼を固める。シリーズ3回目の今号では、鋼材の品質に影響を及ぼす不純物をさらに除去する重要な役割を担う「連続鋳造」のメカニズムとその技術的ポイントを紹介する。



連続鋳造の役割

精錬が終わった鋼は、合金を添加して成分を調整後、「鋳造プロセス」に送られる。ここで鋼は固められて「鋼片」となり、鋼板、棒線、H形鋼などの鋼材の半製品となる。1960年代までは、鋳型に溶鋼を流し込み、自然に冷やして固めた鋼の塊を再び加熱して、分塊圧延機で伸ばし「鋼片」をつくっていたが、1970年代になると、溶鋼から直接鋼片をつくる連続鋳造機の適用が拡大していった。

連続鋳造工程では、溶鋼を最上部の鋳型に注ぎ、側面が凝固したものを鋳型の底から引き出していく(図1)。分塊工程の省略による生産性向上と、溶鋼の熱を効率的に活用できる省エネルギー効果から、1983年には適用率が90%を超え、現在ではほぼ100%になった。

連続鋳造プロセスの重要な役割は、鋼中の介在物をさらに除去することだ。酸化物などの固体の介在物は、鋼材の強度、加工性、耐疲労性(繰り返し加わる負荷によって起こる破壊への耐久性)などの低下、また表面疵の原因となるため、連続鋳造工程では溶鋼が固まるまでに、できるだけ浮かせて除去する。さらに溶鋼中の成分が再び酸化したり、耐火物から欠落したり溶け出した物質や、タンディッシュ(注釈)の保温用・酸化防止用のパウダー(融点の低い熔融酸化物を主成分とする)から、新たな介在物を巻き込んだりするため、それらも浮かして除去しなければならない(図2)。

連続鋳造機の仕組み 図1

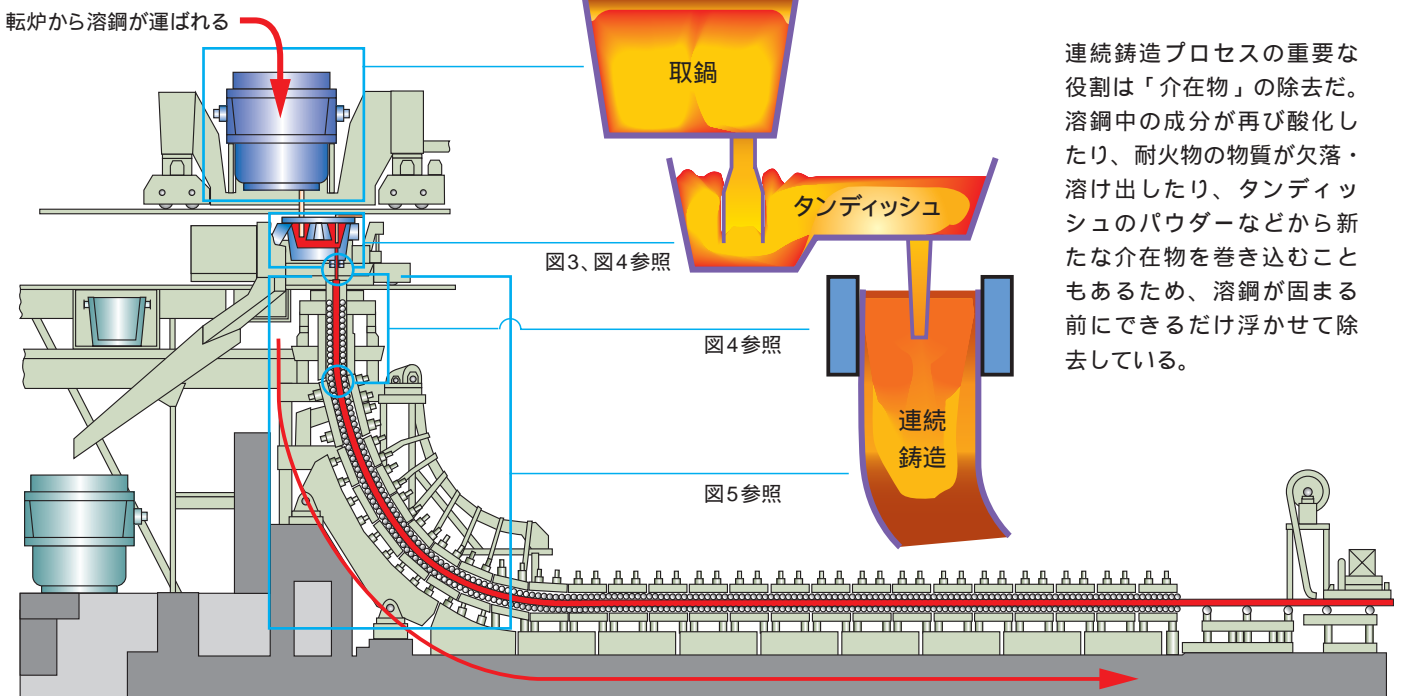


図2

連続鋳造プロセスの重要な役割は「介在物」の除去だ。溶鋼中の成分が再び酸化したり、耐火物の物質が欠落・溶け出したり、タンディッシュのパウダーなどから新たな介在物を巻き込むこともあるため、溶鋼が固まる前にできるだけ浮かせて除去している。

転炉から運ばれた溶鋼を鋳型に注ぎ、鋼中の介在物を除去しながら、側面が凝固したものを鋳型の底から引き出していく。

注釈/タンディッシュ：連続鋳造機で取鍋から鋳型に注がれる溶鋼を途中で一時受け止め、介在物をさらに取り除く受け皿。

介在物を浮かせて除去する

溶鋼中の介在物を徹底して除去するため、さまざまな工夫がされている。まず1つ目の例がタンディッシュに設けられたいくつかの堰だ。これで溶鋼の留まる時間を長くし介在物を浮きやすくしている。名古屋製鉄所の「H型タンディッシュ」はその一例だ(図3)。

2つ目が「電磁ブレーキ(Level Magnetic Flow, LMF)」。タンディッシュから浸漬ノズルを通し、左右2つの吐出口から溶鋼が鑄型に注がれるときに、溶鋼の流れが鑄型の深い所まで届かず、浅い所に戻るよう電磁ブレーキ(静磁場)をかけている。溶鋼の下降流速を落とすことで、鑄型の浅い部分から溶鋼の流れを上に戻し、介在物を浮きやすくしている。

3つ目は、「鑄型内電磁攪拌(In-mold electromagnetic stirrer, EMS)」。鋼片の表面下に介在物がとらわれて製品欠陥となることを防ぐため、逆に磁界を移動させて流れをつくる。これで鑄型内に溶鋼の流れができ、介在物が最初に固まる表層に留まることがなくなり、鋼片の表面をきれいにするができる。(図4)。

介在物の除去のために、鑄造機の形状にも工夫が施されている。当初垂直型だった鑄造機は、建物の高さ制限に柔軟に対応するため、溶鋼の凝固に合わせて徐々に水平になる湾曲型鑄造機に変わった。しかし湾曲型では、浮こうとする介在物が湾曲部の内側に引っかかり、介在物が鋼片の表面にもとらわれてしまうので、その後、介在物をより多

く浮かせるために、最初の部分に「垂直部」を設けた。溶鋼が固まる前の上部が垂直であれば介在物が浮上し、鑄型の湯面にまで戻り、流れていく鋼の表面に残りにくい。今日では、この「垂直曲げ型(パーチカルベンディング)」が主流だ(図5)。

湯面に浮上した介在物は、連続鑄造パウダー(溶融酸化物を主体とする)に取り込まれて除去される。パウダーは、介在物除去以外にも、溶鋼を大気から遮断して保温・酸化防止をすること、そして銅製の鑄型と溶鋼の潤滑剤としての役割も果たす。パウダーは、溶鋼に巻き込まれにくく、かつ潤滑性能が良くなるように新たな技術開発が進んでいる。

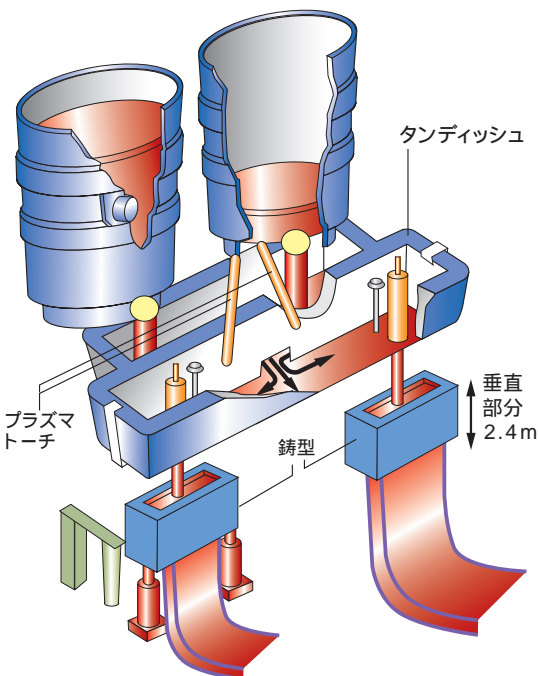
連続鑄造は、同じ断面サイズであれば鋼片を無限に量産できるという特長を持っていた。その後、鑄造しながら鑄型の幅を変更して、中断することなく断面サイズの異なった鋼片をつくる技術が開発されている。

「微小な介在物」への挑戦

しかし、これまで見てきたような鑄造技術だけでは取りきれない介在物がある。10~50 μm の微小で浮きにくい介在物だ。現在、品質要求が厳しい鋼板における介在物の許容範囲は、超深絞り鋼板で100 μm 以下、スチールコードで15 μm 以下となっている(表1)。鋼中に残った微小な介在物への対策は、鋼材の品質向上に欠かせない。

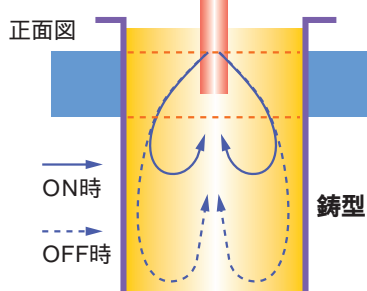
まず100 μm 以上の介在物は、浮上させて除去したり、電磁攪拌を行い表層下に留まらないようにする。しかし、それよりも小さい10~50 μm 程度の介在物は、鑄片内に残っ

H型タンディッシュの仕組み 図3



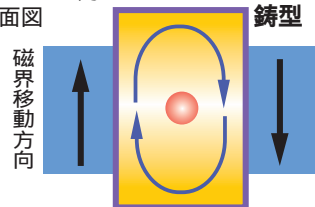
介在物を徹底して除去するため、タンディッシュに複数の堰(せき)を設けて溶鋼の留まる時間を長くし、介在物を浮きやすくしている。(図は名古屋製鉄所)

LMFの原理(Level Magnetic Flow) 図4



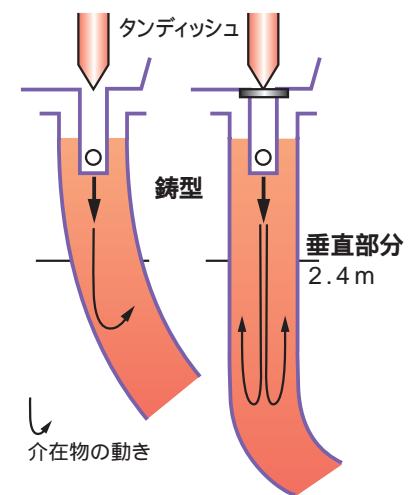
溶鋼を鑄型に注ぐときに電磁ブレーキをかけ、溶鋼の下降流速を落とし、介在物を浮きやすくしている。

EMSの原理(In-mold electromagnetic stirrer) 上面図



磁界を移動させて鑄型内に溶鋼の流れをつくり、最初に固まる表層に介在物が留まらないようにし、鋼片表面をきれいにする。

連続鑄造機の形状比較 図5



湾曲型

溶鋼の凝固に合わせて徐々に水平になる「湾曲型」。介在物が湾曲部に引っかかるという欠点があった。

垂直曲げ型

現在の主流。溶鋼が固まる前に介在物をより多く浮かせるために、最初の部分に「垂直部」を設けている。

てしまうことがある。それが固い介在物の場合は、割れの原因になるなど材質に影響を及ぼす。

そこで新日鉄では、微小な介在物の性質を変えて、品質への影響を減少させる独自技術により、鋼材の品質を高めている。例えば、介在物対策への要求が厳しく、高い清浄度が求められるスチールコードでは、脱酸する条件をコントロールして介在物の融点を下げ、加工性の良い酸化物に変えたり、スラグ成分の高度なコントロールによって介在物の性質を変化させる（スラグ処理）。このようにして、浮くことができない微小な介在物を制御して、伸線時に破断しない鋼材をつくり出している。

「割れ」への挑戦

連続鋳造の2つ目の課題は「割れ」への対応だ。1970年代に連続鋳造の対象鋼種を拡大する上で、連続鋳造の最大の課題は「表面割れ」と「内部割れ」だった。

連続鋳造で、溶鋼は温度低下に伴って徐々に固まる。凝固の過程で、特定の温度下で、伸びや曲げに弱いもろい性質になり（脆化）、そこに引張応力が加わると割れてしまうことがある（図6）。応力の発生源は、曲げ、矯正変形（鋳片が湾曲部から水平部に移る際の変形）、パルジング変形（注釈）、熱応力などだ。

特に「表面割れ」は、1,050 前後（領域の脆化）と700 前後（領域の脆化）の2つの温度域で起こりやすい。1,050 前後では、わずかに残った硫黄や磷が、鉄の結

晶同士の境界（粒界）に偏析（特定の成分が部分的に偏る現象）して、低融点の硫化物や燐化物をフィルム状に形成することによって起こる。700 前後では、炭化物、窒化物が鉄（炭素濃度0%では912 ~ 1,394 の鉄）の粒界に析出（固体から異種の固体が出てくる現象）し、粒界割れを引き起こすことで生じる。さらに、鉄から鉄（炭素濃度0%では910 以下の鉄）に変わるとき（変態）、鉄の粒界に沿って鉄がフィルム状に析出し、鉄は鉄に比べて弱いため、そこに歪みが集中して破断しやすくなる。特に、上記の炭窒化物の粒界析出が重なると割れが激しい。

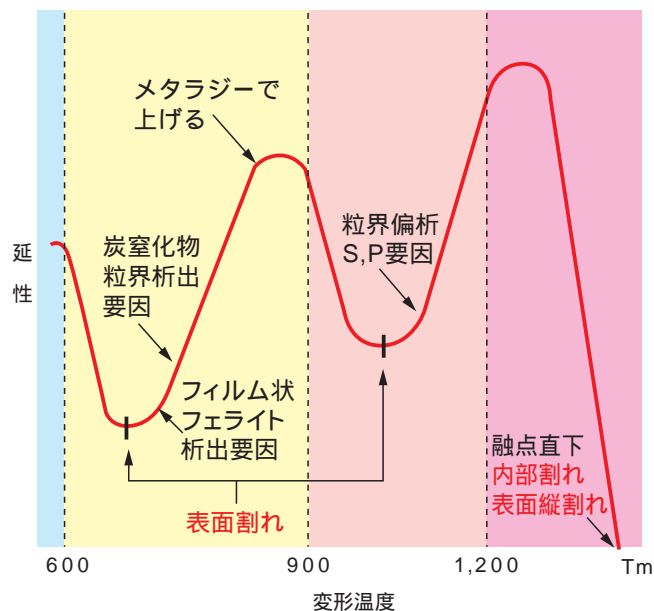
「表面割れ」への対策には、冶金的対策と設備的対策がある。冶金的対策では、領域の脆化に対して、マンガン/硫黄の比を一定以上にしたり、燐濃度を徹底的に下げたり、冷却条件を選んで燐の化合物の形状をフィルム状から粒状へと変化させる。領域の脆化に対しては、炭窒化物の析出量をコントロールしたり、変態を繰り返すことで炭窒化物が粒内に位置するようにする（炭窒化物が粒界に位置すると脆化するため）など、温度や成分を制御する方法がとられる。この方法によって伸びに強い鋼本来の特性を回復させる。それでも性質が戻らない場合には、鋼の温度を特性が低下しない温度（約900）で維持して、鋳片が矯正変形域を通過するようにする。

設備的対策としては、矯正変形域の鋳片を上・下流から圧縮し、矯正したときに割れの原因となる上部の凝固殻（上面凝固殻）への引張力を軽減している。下面凝固殻に

要求される介在物の大きさ

分類	用途	製品ニーズ	目標介在物レベル(上限)
薄鋼材	DI缶	a. 製缶時の割れ防止	d < 40 μm
	超深絞り用鋼板	a. r < 2.0 ~ 3.0 b. 高張力化、極薄化	d < 100 μm
	リム材	a. フックラックの抑制	d < 100 μm(アルミナ系)
	ディスク材	a. 孔揚げ加工	d < 20 μm(MnS系)
	リードフレーム材	a. 打抜き加工時の割れ防止	d < 5 μm
	シャドーマスク材	a. エッチングむら解消 プレス加工時の割れ防止	d < 5 μm
厚鋼材	ラインパイプ材	a. 耐HIC性の確保 b. 応力付加+ NACE条件のスペック化	介在物形態制御 の高精度
棒鋼	軸受け鋼	a. 転動疲労寿命の向上	d < 15 μm [O] < 10ppm
線材	タイヤコード	a. 高強度化 b. 伸線時の断線防止	d < 15 μm [O] < 10ppm
	ばね鋼	a. 高強度化と疲労寿命の向上	

表1 温度変化によって脆化する領域 図6



溶鋼は、温度低下に伴い徐々に凝固していく。その過程において特定の温度下でもろくなり、そこに力加わると割れてしまうことがある。

注釈/パルジング変形：溶鋼の静圧でロール間の鋳片が脆れるようにたわむ現象。それによってロール直下の凝固殻の内側（溶鋼側）に大きな引張力が生まれる。

かかる圧縮力は大きくなるが、割れの要因にはならないため、下流にはブレーキをかけ、上流からは鍍片を押し込むといった鑄造法が採用されている（圧縮鑄造）

一方、融点直下（1,400～1,500）の脆化（領域の脆化）は、「内部割れ」や「表面縦割れ」の要因となる。その脆化の原因は、固まりつつある鋼が、強度のない樹枝状晶間の液膜部分で引き裂かれることによる。不純物が多く、固まり始まる温度（液相線温度）と完全に固まる温度（固相線温度）との温度差が大きいほど脆化しやすい（図7）。

「内部割れ」を防ぐには、冶金的側面からは不純物を低減すると同時に、設備面ではロール数を増やしてピッチを短くし、溶鋼の「バルジング変形」を小さくする。また、上述の矯正変形時の圧縮鑄造も効果的だ。

さらに、凝固直後の鉄（炭素濃度0%では1,394以上の固体鉄）から鉄への変態で鋼の体積が収縮し、それが原因となって“弱い部分”が鑄型から浮いて引っ張られて、「表面縦割れ」を起こすことがある。それを防ぐには、鑄型での冷却速度の制御はもちろん、一連のメカニズムの出発点となる“弱い部分”をつくらないために、凝固速度を左右する鑄型と鋼の間にある潤滑・保温用のパウダーを、均一に流し込むことが重要だ。

「表面割れ」や「内部割れ」は、“弱い部分に歪みが集中して割れる”現象だ。新日鉄ではこうした課題に対して、優れた鋼の性質を最大限に引き出す成分コントロールと、設備開発の両輪で連続鑄造時の「割れ」を克服してきた。

「中心偏析」への挑戦

もう一つの課題は偏析、特に「中心偏析」だ。鋼が固まる時に、硫黄や燐などの不純物は固体には液体ほど溶け込まないため、硫黄は1：30、リンでは1：8の割合で分配される、というメカニズムによるものだ。そのため、最後に固まる液体中の不純物が最も濃くなる（「マイクロ偏析」）。「中心偏析」は、一つには固まった部分の体積が収縮する（凝固収縮）ことによって生じた隙間に吸い込まれるように、不純物の濃い液体が移動して生じる。温度が下がりにくく最後に固まる中心部には、こうして移動してきた不純物が集積される。この「中心偏析」は、鋼材のもろさの原因となる。

「中心偏析」を防ぐには、凝固収縮や熱収縮によって生まれた隙間に、液体が移動しないようにしなくてはならない。その方法が「軽圧下（ソフトリダクション）」だ。溶鋼が固まる体積収縮分を、少しだけ圧下をかけてつぶし、液体が移動する隙間をなくす。圧下力を強めることによってロールが曲がらないように、強度の高いロールを使用するとともに本数を増やし、徐々に収縮していく鋼の体積変化に追従させる。こうした対策によって、鋼中に残った溶鋼部分の動きを止めて「中心偏析」を防ぎ、静かに固まらせることができる。凝固完了点近傍のバルジング変形によっても、不純物の濃い液体が移動して「中心偏析」が生じる。そのため、ロール間隔を短くしてバルジング変形も小さくしている。

また、鋼が固まるときの偏析によって介在物の成分も変わる。それが顕著なのが中心偏析部の硫化物だ。凝固の過程で偏析した硫黄により、化学反応に変化が生じて化合物の成分が変わり、意図しない硫化物が出てきてしまうことがある。たとえ溶鋼全体の成分をうまく制御しても、「中心偏析」が著しいとこうした現象が起きてしまう。この現象は偏析部分が大きいほど起こりやすい。

「中心偏析」への対応も含めた鋼中の成分設計は、優れた鋼をつくる精錬や連続鑄造の技術的ポイントとなる。

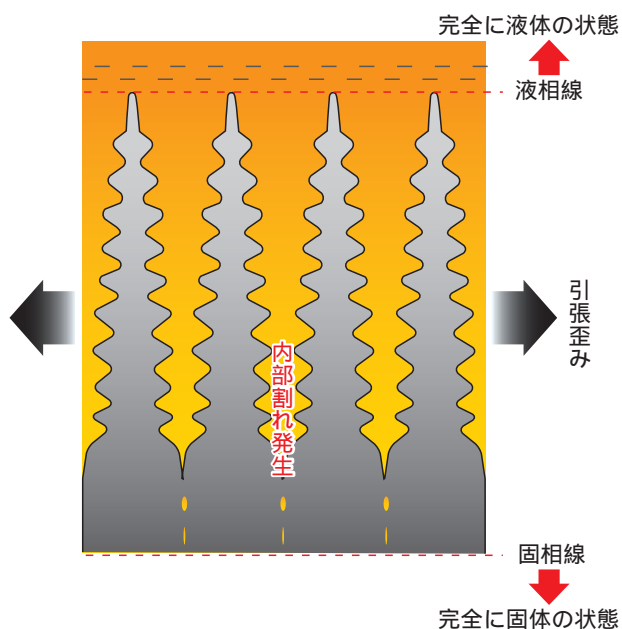
次号ではこうした高度な鋼のつくり込みを支える、新日鉄の誇る「解析技術」に焦点を当てる。



監修 新日本製鉄(株) フェロー 松宮 徹（まつみや とおる）

溶鋼の「固液界面」の模式図

図7



融点直下の脆化は「内部割れ」や「表面縦割れ」の要因となる。脆化の原因は、固まりつつある鋼が強度のない「液膜部分」で引き裂かれることによる。不純物が多く、固まり始まる温度と完全に固まる温度の温度差が大きいほど脆化しやすい。

プロフィール
 1949年生まれ、京都府出身。
 1973年入社。2001年よりフェロー。
 1980年：日本塑性加工学会 会田技術奨励賞
 1985年：日本鉄鋼協会 依論文賞
 1991年：日本金属学会 功績賞（金属加工部門）
 1999年：(社)日本鉄鋼協会 西山記念賞
 2002年：文部科学大臣賞 研究功績者表彰