

解説

受賞技術-27

超高清浄度軸受鋼の高生産性プロセスの開発

Development of High Productivity Process of
Ultra-high-cleanliness Bearing Steel

山陽特殊製鋼(株)
生産企画管理部 生産企画室
室長

杉本晋一郎
Shinichiro Sugimoto

山陽特殊製鋼(株)
取締役常務執行役員

大井茂博
Shigehiro Oi

1 はじめに

軸受鋼は、自動車、新幹線、産業機械等の回転軸や直動軸を有する製品に欠かせない軸受の素材として使用され、大変過酷な環境下で長期間使用されるため、高い信頼性が要求される鋼である。

軸受用鋼中には、鋼の溶製過程で生成する非金属介在物と称される微小異物が不可避免的に残留している。比較的清浄な潤滑環境のもとで使用される軸受の寿命は、この非金属介在物に影響を受ける。それらが寿命に及ぼす影響のさらなる明確化を狙い、特殊鋼メーカー各社も参画した独立行政法人(現・国立研究開発法人)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発プロジェクト」において取組みが行われた。その取組みにおいて、高炭素クロム軸受鋼SUS2の焼入焼戻材製のスラスト試験片を用い、高精度UTにより予め座標と大きさを非破壊で特定した試験片内部の非金属介在物、もしくは鋼中に低頻度で存在する大型の欠陥を模擬してスラスト試験片上に付与したドリル穴を対象とした転がり疲れ試験(最大ヘルツ接触応力4.0~5.3 GPa)が実施された¹⁾。その結果に関し、破壊力学におけるき裂伝ば速度支配因子として知られる応力拡大係数 ΔK を用いて寿命との関係が整理された。このときの ΔK ($\Delta K_{II}'$ と表記)には下式で定義されたものが用いられた。

$$\Delta K_{II}' = 2\tau_0 \sqrt{\pi a}$$

式において、 τ_0 はモードII(せん断型)でのき裂伝ばを前提として水平せん断応力振幅が用いられ、また、伝ばに伴い刻々と変化するき裂長さ(2a)に代わり、UTで推定した初期の介在物径の半分、もしくはドリル穴径の半分のaとして計算されている。図1のグラフにおいて、負荷応力一定の条件下としてみれば、 $\Delta K_{II}'$ が小さい側、すなわち介在物の小径側

で寿命が向上し、なおかつ寿命向上の余地も大きい。昨今では、「平均的な寿命の向上よりもむしろ、短寿命での剥離を可能な限り抑制したい」という顧客ニーズも出ており、その観点からも介在物の小径化が下限寿命(最悪寿命)を改善するための有効策であることは見出されている。

このように、軸受鋼の製造に際し、鋼中の非金属介在物を極限まで小径化することが求められ、また、当然ながらその個数を減らすことが必要とされる。そして、この高品質を維持しながら、生産性を高めることは、非常に困難であるが、今後も国際競争力を維持・向上するためには、この相反する課題を解決することが必須となる。

当社は、年間約100万トンの特殊鋼を製造販売しており、その内の35%前後(2015~18年度)が軸受鋼である。ここ数年は、年間国内軸受鋼生産高100万トンの内の37~40%を占めており、世界一の軸受鋼メーカーとして「高信頼性鋼の山陽」のスローガンのもと、「世界一清浄度の高い軸受鋼をランニング操業で造り込む」ことを目指し、技術開発を行ってきた。

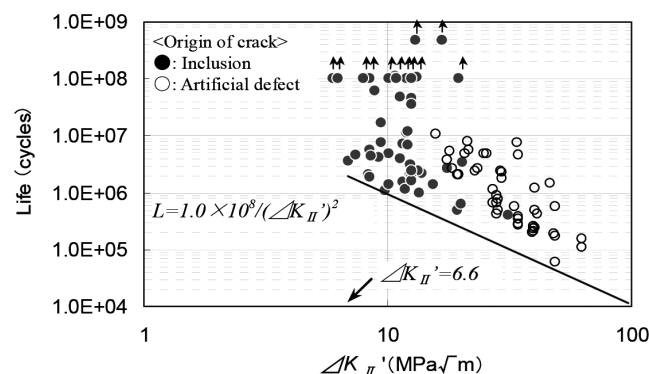


図1 SUS2鋼中の非金属介在物および人工欠陥の大きさから算出した $\Delta K_{II}'$ と転がり疲れ寿命との関係¹⁾

2 当社の目指したもの

当社の目指したものは、世界一清浄度の高い軸受鋼を通常操業で造り込むことであった。冒頭でも述べたように、軸受鋼等の鋼中には不可避免的に非金属介在物が存在し、その非金属介在物が軸受鋼の寿命を大きく左右する。つまり、当社の目指したものを具体的に言い換えると、軸受鋼中の非金属介在物を如何に小さく、また如何に極少数化した軸受鋼を、どのようにして高生産性を維持しながら造り込むかである。

3 当社の製造工程と超高清浄度鋼造り込み技術開発

3.1 当社の鋼の造り込みについて

当社は、金属スクラップを原料とし、電気炉（EF）で溶解・精錬（酸化精錬）し、取鍋精錬炉（LF）、RH真空脱ガス炉で還元精錬した鋼を連続鋳造法（CC）にて固め、ブルームを製造している。それぞれの工程において超高清浄度鋼の造り込みとともに、高生産性を目指した造り込みを技術開発し、実現してきた。

3.2 超高清浄度鋼の造り込み技術

工程毎に技術開発を行ってきた超高清浄度鋼の造り込み技術について述べる。

3.2.1 電気炉～取鍋への出鋼時の汚染防止技術

電気炉から取鍋へ出鋼される溶鋼は、取鍋内面の煉瓦の継ぎ目（目地）等で凝固する。この凝固した未精錬溶鋼が、精錬末期で溶解し、取鍋内の溶鋼を汚染するため、取鍋の予熱方法および使用方法を開発し、精錬初期にそれらを溶解し、確実に精錬を行うことで無害化できた²⁾。

3.2.2 精錬工程における非金属介在物除去技術

3.2.2.1 取鍋精錬炉における[S]制御

取鍋精錬炉では、不純物元素[S]の除去（脱硫）を行う。この際、取鍋精錬炉での脱硫の進み具合が精錬そのものの指標となるため、従来、溶鋼中の[S]レベルを一定の基準値以下とすることを取鍋精錬炉の完了条件としていた。

ところが、次工程であるRH処理では[S]が高い方が非金属介在物の除去に対し有利に作用するとの結論を得たため、一定量を確保する様にし、後工程での非金属介在物の浮上分離を促進させるようにした³⁾。

3.2.2.2 取鍋精錬炉における非金属介在物組成制御

取鍋精錬初期の脱酸、脱硫により溶鋼中に生成する Al_2O_3 は取鍋精錬終了時には酸化物として安定した領域である $MgO-Al_2O_3$ 系および $CaO-Al_2O_3$ 系へと形態変化することが、計算結果、実績共に確認された。この形態変化した $CaO-Al_2O_3$ 系液相介在物は、溶鋼との濡れ性が良いため、次工程であるRH処理では除去され難いことから、取鍋精錬処理中の CaO 、 CaF_2 の使用量や投入タイミングの最適化を図り、RH処理での凝集・浮上分離に有利な造り込みを実施した⁴⁾。

3.2.2.3 RH脱ガス工程における溶鋼汚染防止技術

RH脱ガス工程においては、真空脱ガス槽へ溶鋼を吸い上げ、循環させるための浸漬管を取鍋内へ漬ける際、取鍋内溶鋼表面のスラグを真空槽内へ吸い上げ、溶鋼中にスラグが懸濁し、溶鋼が汚染されることを防ぐことが極めて重要である。

そのために、浸漬管底部にタライ型容器を付けた後、取鍋内へ漬けることにより、取鍋内表面のスラグを真空槽内へ吸い込むことなく、溶鋼だけを吸い上げ、環流させることに成功した⁵⁾。

3.2.3 連続鋳造工程における溶鋼汚染防止技術

溶鋼を固めるに際しては、前述したように、高生産性を目指し、安定した品質の鋼を造り込むため、連続鋳造設備を用

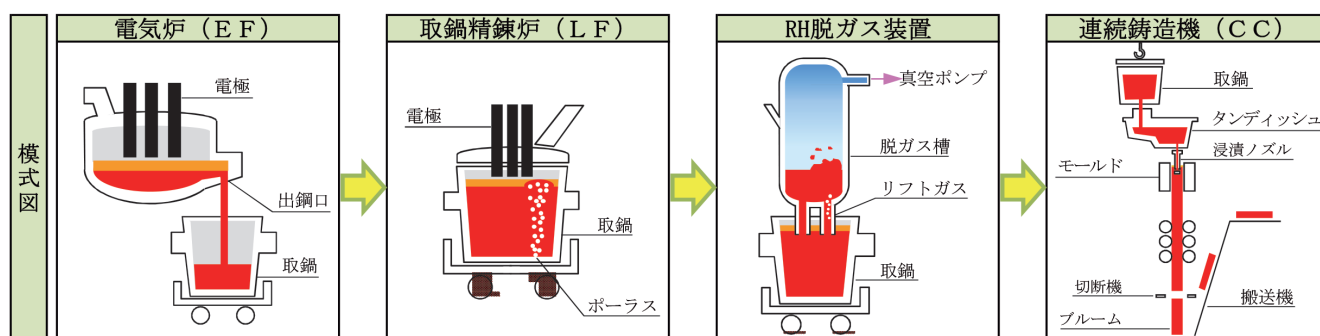


図2 当社の製造工程図

いて連続的に鑄込みを行う方法を採用している。

3.2.3.1 タンディッシュ内への汚染溶鋼注入防止技術

取鍋からタンディッシュ内へ溶鋼を供給する際、取鍋底部のノズル部分を酸素カッティングにより開孔させるため、酸素で汚染され、酸化物を含んだ溶鋼がタンディッシュ内に供給されることになり、タンディッシュ内の溶鋼を著しく汚染させる。この取鍋底部のノズル開孔時のタンディッシュ内汚染を避けるために、別に設置した容器上で、酸素カッティングによる開孔を行うことで、タンディッシュ内への汚染溶鋼の供給を皆無にした⁶⁾。

3.2.3.2 タンディッシュ内へのスラグ流入防止技術

取鍋内の溶鋼がタンディッシュへと鑄込まれ、次の取鍋と交換する前には、鑄込中の取鍋内溶鋼が少なくなる。その際、溶鋼の渦が取鍋内に発生し、溶鋼上のスラグが溶鋼中に巻き込まれてタンディッシュ内に流出し、溶鋼を汚染する。そこで、渦発生のタイミングを求める式を導出し、渦発生の直前に、当該取鍋の鑄造を終了させることとした。これにより、溶鋼の鑄造歩留を著しく悪化させることなく、スラグによるタンディッシュ内溶鋼の汚染を防ぐことができた⁷⁾。

4 超高清浄度鋼造り込み技術取組みの成果および高生産性ラインへの適用

4.1 超高清浄度について

我々が、軸受鋼に求めた高い清浄度は、鋼中の非金属介在物を極限まで小さく、また、少なくすることであった。今まで述べてきた軸受鋼を製造する各工程での取組みを実践してきた結果としての軸受鋼における清浄度変化について、2010年以前と2015、2016年度の軸受鋼中の非金属介在物に焦点を当て以下に示す。

4.1.1 軸受鋼の品質諸指標値について

表1に、2010年以前と2015、2016年度の軸受鋼中の酸素値、極値、10MHz超音波による介在物検出結果について示す。

2010年以前の軸受鋼中の酸素値は4.52ppmで標準偏差 σ

が0.61ppmであったが、各工程における技術開発を実践してきた結果2015、16年度では3.91ppmとなり、標準偏差 σ も0.53ppmと小さくなった。ここで、軸受鋼中の酸素値は、10 μ m以下の小さな非金属介在物量が支配的になっており、酸素値が低下するということは、10 μ m以下の非金属介在物の量が大幅に減少していることを表す。

2010年以前の軸受鋼の極値判定結果は40.1 μ mであり、標準偏差 σ が22.7 μ mであったが、各工程における技術開発を実践してきた結果2015、2016年度では20.6 μ mとなり、標準偏差 σ も6.8 μ mと非常に小さくなった。

このことより、軸受鋼中に存在している非金属介在物の大きさがかなり小さくなっていることが明らかとなった。なお、図3に、30視野の非金属介在物マイクロ写真例を示す。

2010年以前の軸受鋼の10MHz超音波検査で検出された介在物個数は1.58個/10kgであったが、各工程における技術開発を実践してきた結果2015、2016年度では0.43個/10kgとなり、10MHz超音波検査で検出される非金属介在物の個数も激減している。10MHz超音波で検出される10kg当たりの非金属介在物の個数は100 μ m以上の非金属介在物が対象となるため、100 μ m以上の大きな非金属介在物も激減していることが証明された。

これまで各製造工程で行ってきた改善取組みをランニング操業に適用し、軸受鋼を造り込んだ結果、2014年以降は、極値統計法による最大非金属介在物径予測値（極値）は安定的に30 μ m以下となり、改善成果を確実に実操業に適用できた。

4.2 高生産性について

更に、今回の超高清浄度鋼造り込み技術開発で得た成果を、高生産性を有した実操業に適用する取組みを実行した。

今まで述べてきた取組みの成果を最大限発揮させ、高生産性で軸受鋼を製造するためには、いかに連々鑄数（連続鑄造回数）を継続させるかが大きな課題となってくる。取鍋を交換しながら、連続的に鑄造を継続する連々鑄数を伸ばすことは、鑄込開始部および鑄込終了部に発生する屑割合を最小化し、鑄造歩留を向上させるとともに、連続鑄造時に使用するタンディッシュの使用基数も最少とすることができる。そのため、2つの技術的課題があった。

表1 軸受鋼の品質諸指標値

品質諸指標値	2010年以前		2015～2016年度		介在物サイズの目安
	平均値, $\bar{x}$	標準偏差, σ	平均値, $\bar{x}$	標準偏差, σ	
酸素値 (ppm)	4.52	0.61	3.91	0.53	< 10 μ mの介在物影響が支配的
極値 (μ m)	40.1	22.7	20.6	6.8	10～100 μ m程度の介在物
10MHzUT (個/10kg)	1.58	—	0.43	—	≥ 100 μ mの介在物

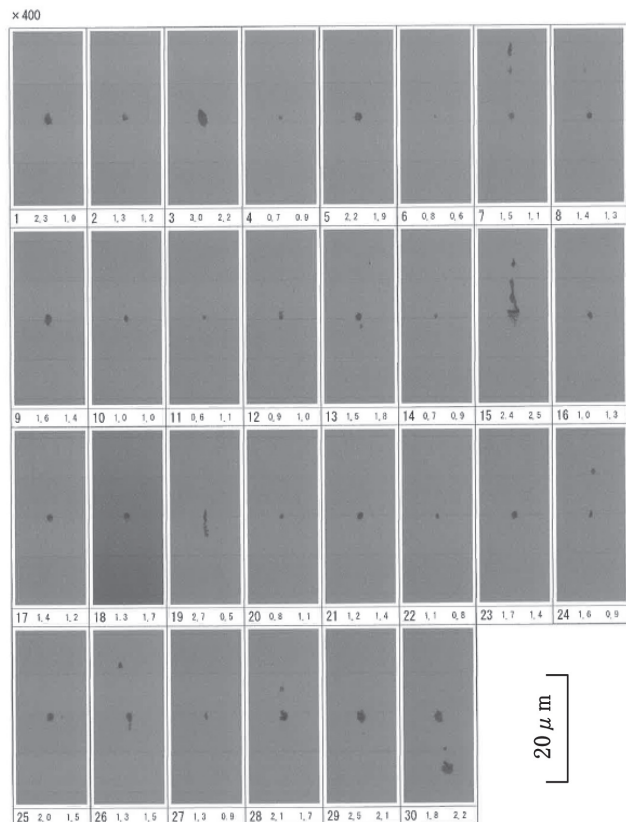


図3 極値統計法にて確認した30視野のマイクロ写真例

4.2.1 浸漬ノズル内管への酸化物堆積による閉塞の防止

連続鋳造時に溶鋼が通過する浸漬ノズル内面への酸化物堆積による浸漬ノズルの閉塞を防止するために溶鋼中の非金属介在物である酸化物を極小化し、さらに極少数化する必要があった。このことは、今まで述べてきた各工程での超高清浄度化への取り組みによる鋼中の非金属介在物の極小化および極少数化技術そのものに他ならない。

4.2.2 浸漬ノズルの高耐用化

モールド内溶鋼面（上部）にはモールドパウダーが投入される。モールドパウダーは、モールドと溶鋼間の潤滑、溶鋼の再酸化防止、保温、非金属介在物捕捉等の重要な役割を果たしているが、溶鋼と接触すると溶融状態となりスラグ組成を呈し、浸漬ノズルを浸潤・溶損していく。最悪の場合、過度の浸潤・溶損により、溶融モールドパウダーが浸漬ノズルを貫通し、ノズル内部を通過する溶鋼内に巻き込まれ、重大な品質異常に至るため、連々鋳数を伸ばすには、浸漬ノズルの高耐用化が必要であった。

4.2.2.1 浸漬ノズルの浸漬深さの変更

溶鋼中への浸漬ノズルの浸漬深さを連続鋳造中に変化させ（数種類）、浸漬ノズル表面全体を最大限に利用することで、溶損部を局所集中させないことが可能となり、連々鋳数を伸ばすことが出来た⁸⁾。

4.2.2.2 モールドパウダーの高粘度化

モールドパウダーを高粘度化することにより、モールドパウダーと浸漬ノズルとの濡れ性を低下させ、浸漬ノズルへの浸潤量を減少させた。このことにより、浸漬ノズルの溶損速度が著しく減少し（従来2.0mm/Hr→高粘度化1.2mm/Hr）、浸漬ノズルの、1つの浸漬深さ当たりの連々鋳数を伸ばすことが出来た。

5 おわりに

製造工程ごとに行った取組みを技術的に確立し、標準化したことにより、2015年2月には世界一の記録となる、「単一タンディッシュ・浸漬ノズル交換なしで100連々鋳」を達成し、「超高清浄度軸受鋼の高生産性プロセスの開発」を実証した。

以上で述べた技術開発成果に対し、第63回（2016年度）大河内記念生産賞を受賞することができた。

引き続き、超高清浄度化の取組みを行い、究極の高品質（高信頼性）、高生産性を目指していく。

参考文献

- 1) 常陰典正, 平岡和彦: 金属材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発プロジェクト第2回シンポジウム講演予稿集, 金属系材料研究開発センター編集・発行, (2012), 119.
- 2) 特許第4027749号「清浄度の高い鋼を溶製するための精錬容器の調整方法」
- 3) 特許第3742013号「溶鋼中の硫黄含有量調整による高清浄度鋼の溶製方法」
- 4) 吉岡孝宜, 大場康英, 河村崇紀, 中畑憲一郎: CAMP-ISIJ, 28 (2015), 663, CD-ROM.
- 5) 特開2002-38213「真空脱ガス装置による高清浄度鋼の溶製方法」
- 6) 特許第3913586号「汚染源をタンディッシュに注入することなく注湯する連続鋳造方法」
- 7) 特許第4289476号「高清浄度鋼の鋳造方法」
- 8) 特許第3866068号「高清浄度鋼の連続鋳造方法」

(2019年10月4日受付)