

# 第63回 大河内記念生産賞受賞 超高清浄度軸受鋼の高生産性プロセスの開発

The 63rd Okochi Memorial Production Prize  
Development of High Productivity Process of Ultra-High-Cleanliness Bearing Steel

杉本 晋一郎\*1 大井 茂博\*2

Shinichiro SUGIMOTO and Shigehiro OI

## 1. はじめに

当社は、公益財団法人大河内記念会より、「超高清浄度軸受鋼の高生産性プロセスの開発」に対して、第63回（平成28年度）大河内記念生産賞を受賞した。本賞は、故大河内正敏博士の功績を記念し、大河内記念会が生産工学、生産技術、生産システムの研究ならびに実施等に関するわが国の業績で、学術の進歩と産業の発展に大きく貢献した顕著な業績に対して表彰を行う伝統と権威のある賞である。以下にその受賞技術について紹介する。

## 2. 開発の背景

軸受鋼は、自動車や新幹線等、動くもの全てに使われているベアリング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。

そのため、軸受鋼には高い清浄度が要求され、鋼中の非金属介在物を極限まで少なく、また、小さくする必要がある。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、今後も日本の製造業が国際競争力を維持・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。

当社の目指したものは、軸受鋼中の非金属介在物を如何に極小化/極少数化し、どのようにして高生産性を維持・向上しながら造り込むかであった。



図1 軸受鋼の使用例

当社は、年間100万トンの特殊鋼を製造販売しており、その内の36%（2015年度）が軸受鋼である。ここ数年、年間国内軸受鋼生産高100万トンの内、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、技術開発を行ってきた。

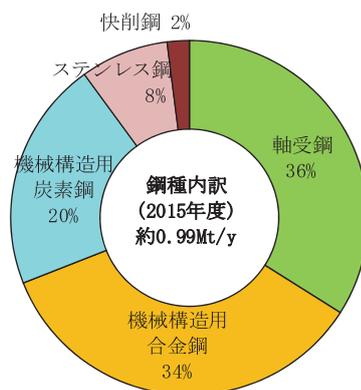


図2 当社の生産販売鋼種内訳

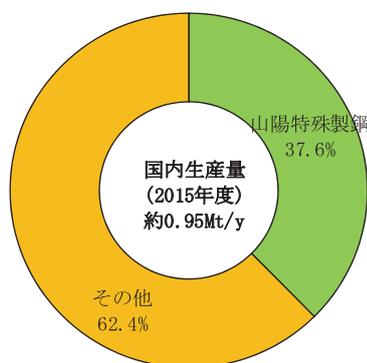


図3 国内軸受鋼の生産量および当社シェア

\*1 生産企画管理部 生産企画室長

\*2 取締役常務執行役員

### 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溶鋼を連続鋳造法（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。その継ぎ目（目地）等で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。<sup>1)</sup>

##### 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、[S]は表面活性元素であり、次工程であるRH処理では[S]が高い方が非金属介在物の凝集・合体・浮上にとって「有利である」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。<sup>2)</sup>

###### 3.2.2.2 取鍋精錬炉における非金属介在物組成制御

取鍋精錬炉初期の脱酸、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 $MgO \cdot Al_2O_3$ 系および $CaO \cdot Al_2O_3$ 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（図5）。この形態変化した $CaO \cdot Al_2O_3$ 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処理での酸化物を固相 $MgO \cdot Al_2O_3$ 系主体とし、RH処理での凝集・浮上分離に有利な造り込みを実施した。<sup>3)</sup>

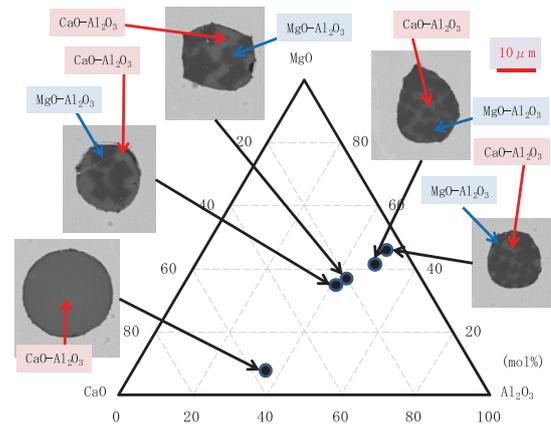


図5 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO介在物の組成別写真

###### 3.2.2.3 RH工程における溶鋼汚染防止技術

RH工程における真空脱ガス処理で、汚染防止の観点から最も大切なことは、浸漬管（真空脱ガス槽へ溶鋼を吸い上げ、循環させるための耐火物）を取鍋内溶鋼に漬ける際、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。<sup>4)</sup>

###### 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、前述したように、高生産性を目標

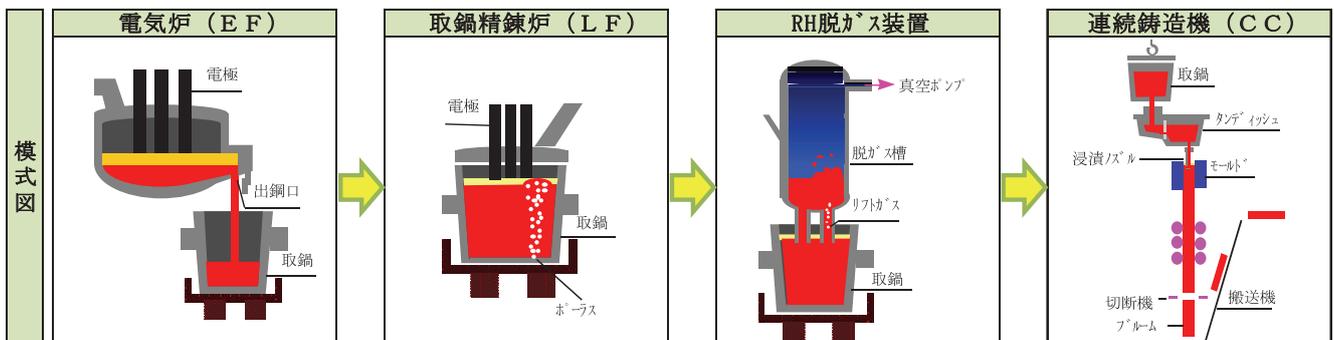


図4 当社の製造工程図

し、安定した品質の鋼を造り込むため、連続鋳造法を採用している。

連続鋳造とは、取鋼を順次取り換えながら、取鋼内の溶鋼をタンディッシュに注入し、タンディッシュから浸漬ノズルを通して、モールド（鋳型）内へ溶鋼を供給し続ける方法である。

### 3.2.3.1 タンディッシュ内への汚染溶鋼注入防止技術

取鋼からタンディッシュ内へ溶鋼を供給する際、取鋼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、酸素で汚染された溶鋼が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。<sup>5)</sup>

### 3.2.3.2 タンディッシュ内へのスラグ流入防止技術

取鋼内の溶鋼がタンディッシュへと鋳込まれ、次の取鋼と交換する前には、鋳込中の取鋼内溶鋼が少なくなる。その際、取鋼内溶鋼に渦が発生し、溶鋼上のスラグが渦に巻き込まれ、タンディッシュ内に流出し、溶鋼を汚染する。そこで、渦発生タイミングを求める式を導出し、渦発生直前に、当該取鋼の注入を終了させることとした。これにより、溶鋼の鋳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。<sup>6)</sup>

## 4. 超高純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 超高純度について

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少なく、また、小さ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 軸受鋼中の酸素値について

図6には、2010年以前と2015、2016年度の軸受鋼中の酸素値について示す。

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。軸受鋼中の酸素値は、10μm以下の小さな酸化物系介在物に起因するものが支配的になっており、酸素値が低下するということは、これらの非金属介在物の量が大幅に減少していることを表す。

図7には、2010年以前と2015、2016年度の軸受鋼の

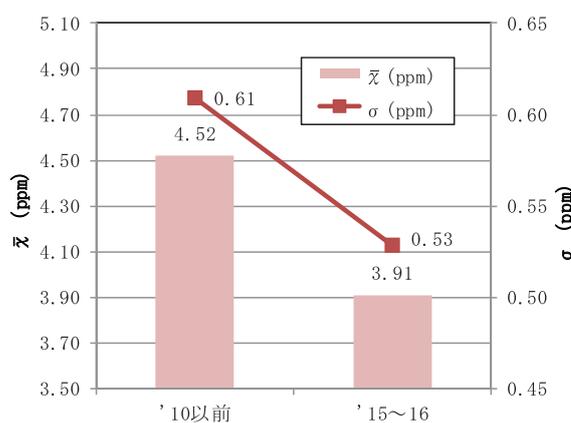


図6 酸素値比較（改善結果）

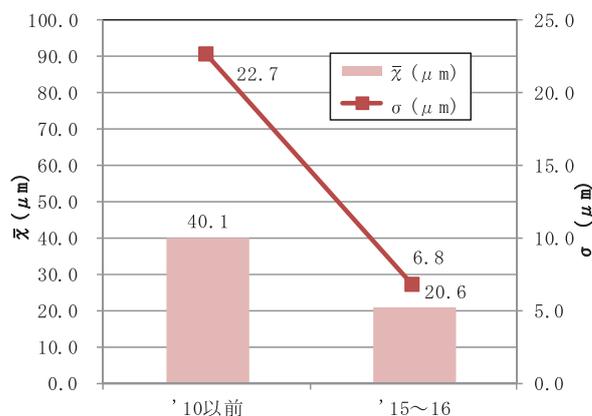


図7 極値比較（改善結果）

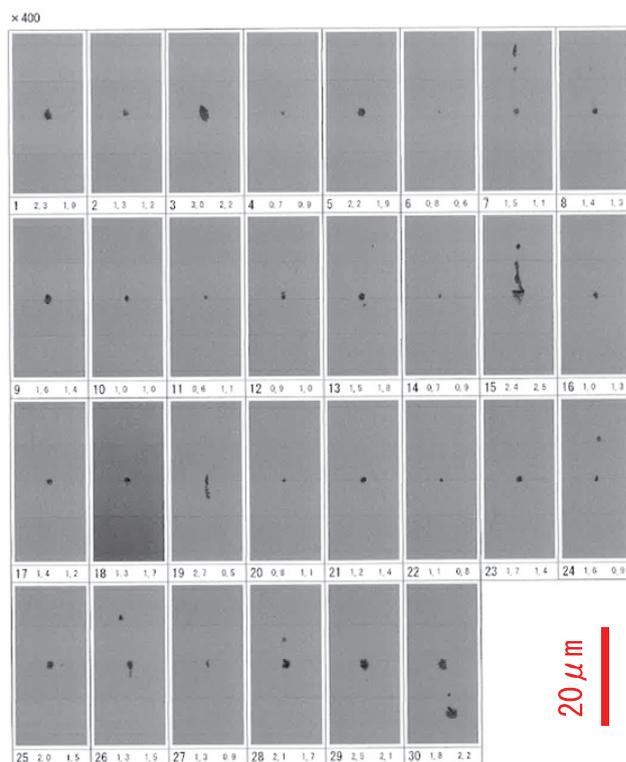


図8 極値統計法にて確認した30視野中の最大非金属介在物マイクロ写真例

極値判定結果について示す。

2010年以前の軸受鋼の極値判定結果は $40.1\mu\text{m}$ であり、標準偏差 $\sigma$ が $22.7\mu\text{m}$ 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 $20.6\mu\text{m}$ となり、標準偏差 $\sigma$ も $6.8\mu\text{m}$ 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8に、30視野中の最大非金属介在物ミクロ写真例を示す。

図9には2010年以前と2015、2016年度の軸受鋼の10MHz超音波検査による介在物検出結果について示す。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。当社10MHz超音波で検出されるのは、 $100\mu\text{m}$ 以上の非金属介在物であり、このことより、 $100\mu\text{m}$ 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実行し、軸受鋼を造り込んだ結果、2014年度以降は、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

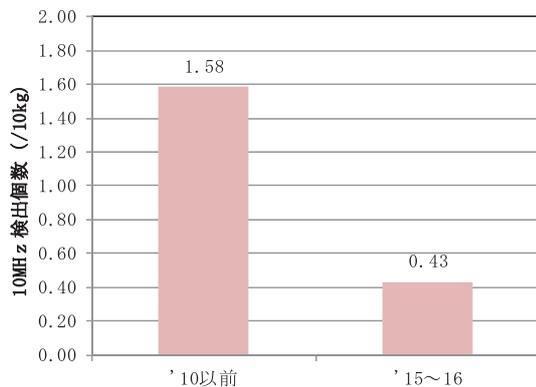


図9 10MHz超音波探傷検出個数比較（改善結果）

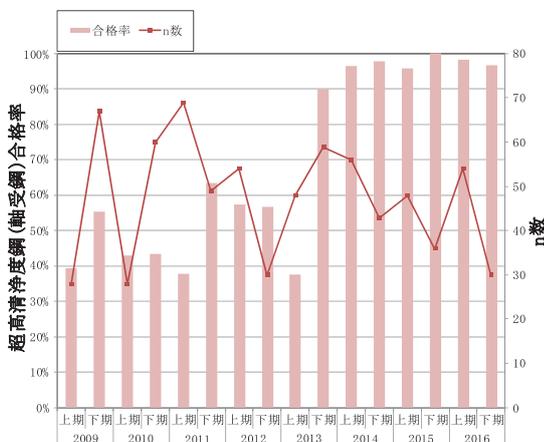


図10 極値統計法による軸受鋼の合格率の推移（合格： $\leq 30\mu\text{m}$ ）

$\mu\text{m}$ 以下となり（図10）、改善取組みを確実に実操業に適用できていることが確認された。

## 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、高生産性を維持しつつ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。取鋼を交換しながら、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。そのためには、2つの技術的課題があった。

### 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

連続鑄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内面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・溶損させていく。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、連々鑄数を伸ばすには、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

溶鋼への浸漬ノズルの浸漬深さを連続鑄造中に変化させ（数段階）、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、連々鑄数を伸ばすことが出来た。<sup>7)</sup>

#### 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 $2.0\text{mm}/\text{Hr}$  → 高粘度化後 $1.2\text{mm}/\text{Hr}$ ）、浸漬ノズルの、1つの浸漬深さ当たりの連々鑄数を伸ばすことが出来た。

## 5. まとめ

製造工程ごとに行った取組みを技術的に確立し、実操業化したことにより、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連々鑄」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。

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。

本技術紹介は、公益財団法人 大河内記念会発行の第63回大河内賞 受賞業績報告書を引用して編集いたしました。

### 参考文献

- 1) 特許第4027749号 (2004)
- 2) 特許第3742013号 (2003)
- 3) 吉岡孝宜、大場康英、河村崇紀、中畑憲一郎:CAMP-ISIJ, 28 (2015), 663.
- 4) 特開2002-38213 (2002)
- 5) 特許第3913586号 (2003)
- 6) 特許第4289476号 (2003)
- 7) 特許第3866068号 (2003)