

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol.34(2002)No.1

新機能線材・棒鋼小特集号

新プロセス・設備導入による軸受鋼の高品質化

Quality Enhancement of Steel for Bearing Use by New Manufacturing Process

川縁 正信 (Kawaberi, M.) 田岡 啓造 (Taoka, K.) 武田 了 (Takeda, R.)

要旨：

川崎製鉄は、1984 年より連続鋳造法での軸受鋼の生産を開始した。その後、優れた品質の軸受鋼を製造するためにさまざまな新技術を応用した新設備を導入してきた。その主なものとして、製鋼工場では連続鍛圧設備、ビレット圧延工場ではオンライン焼鈍設備、ピーリング設備、渦流探傷設備および全断面超音波探傷装置を導入した。また、線材・棒鋼工場では 4 ロール圧延設備、および線材と棒鋼の熱処理炉を導入した。これらの設備と開発した技術を製品仕様の要求に応じて適切に組み合わせることにより、軸受鋼の高品質化が達成された。さらに、熱処理材、圧延まま材ともに広いサイズ範囲(4.2～250mm ϕ)での軸受鋼の提供が可能となった。

Synopsis：

Kawasaki Steel has produced steels for bearing use by using a continuous caster since 1984. In order to manufacture an excellent bearing steel, advanced facilities with a newly developed technology have been installed. These are, a continuous forging machine in the steelmaking shop, a direct annealing furnace, a peeling machine, an eddy current flaw detector and an ultrasonic cross-sectional flaw detector in the billet rolling mill, 4-roll rolling lines and annealing furnaces for bars and rods in the rod and bar rolling mill. Kawasaki Steel is able to supply high quality steels of both in as-rolled and annealed conditions, having a wide range of diameter (4.2～250mm ϕ) of bars and rods for bearing use by applying appropriate combination of the equipment with the improved manufacturing technology. From these efforts exerted to the improvement of manufacturing process, the quality of steels for bearing use have been remarkably enhanced.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Quality Enhancement of Steel for Bearing Use by New Manufacturing Process



川縁 正信
Masanobu Kawaberi
水島製鉄所
商品技術部条鋼室
主査(課長)



田岡 啓造
Keizou Taoka
水島製鉄所
商品技術部条鋼室長



武田 了
Ryo Takeda
プラントエンジニアリ
ング事業部 圧延技術
部 主査(課長補)

要旨

川崎製鉄は、1984 年より連続鋳造法での軸受鋼の生産を開始した。その後、優れた品質の軸受鋼を製造するためにさまざまな新技術を採用した新設備を導入してきた。その主なものとして、製鋼工場では連続鍛圧設備、ビレット圧延工場ではオンライン焼鈍設備、ピーリング設備、渦流探傷設備および全断面超音波探傷装置を導入した。また、線材・棒鋼工場では 4 ロール圧延設備、および線材と棒鋼の熱処理炉を導入した。これらの設備と開発した技術を製品仕様の要求に応じて適切に組み合わせることにより、軸受鋼の高品質化が達成された。さらに、熱処理材、圧延まま材ともに広いサイズ範囲 (4.2~250 mmφ) での軸受鋼の提供が可能となった。

Synopsis:

Kawasaki Steel has produced steels for bearing use by using a continuous caster since 1984. In order to manufacture an excellent bearing steel, advanced facilities with a newly developed technology have been installed. These are, a continuous forging machine in the steelmaking shop, a direct annealing furnace, a peeling machine, an eddy current flaw detector and an ultrasonic cross-sectional flaw detector in the billet rolling mill, 4-roll rolling lines and annealing furnaces for bars and rods in the rod and bar rolling mill. Kawasaki Steel is able to supply high quality steels of both in as-rolled and annealed conditions, having a wide range of diameter (4.2~250 mmφ) of bars and rods for bearing use by applying appropriate combination of the equipment with the improved manufacturing technology. From these efforts exerted to the improvement of manufacturing process, the quality of steels for bearing use have been remarkably enhanced.

1 緒 言

当社は、1984 年より連続鋳造法で軸受鋼の生産を開始した。その後、優れた品質の軸受鋼を製造するためにさまざまな新技術を採用した新鋭設備を導入してきた。主なものとしては、製鋼工場では、連続鍛圧設備^{1,2)}、ビレット圧延工場では、オンライン焼鈍設備³⁾、ピーリング設備、渦流探傷設備⁴⁾ および全断面超音波探傷設備の導入である。また、線材・棒鋼工場では、4 ロール圧延設備⁵⁾ および線材と棒鋼の熱処理炉を導入した。これらの設備で開発した技術を要求品質仕様にに応じて組み合わせて適用することにより、熱処理材、圧延まま材とも広いサイズ範囲 (4.2~250 mmφ) で高品質、高付加価値の軸受鋼が製造可能となった。

本報では、当社の軸受鋼製造設備とその製造技術について述べる。

2 軸受鋼製造プロセスと製造可能範囲

Fig. 1 に当社の軸受鋼製造プロセスの概略を示す。当社の軸受鋼は、高炉銑を用い転炉で溶製する。軸受鋼で最も重要な品質である

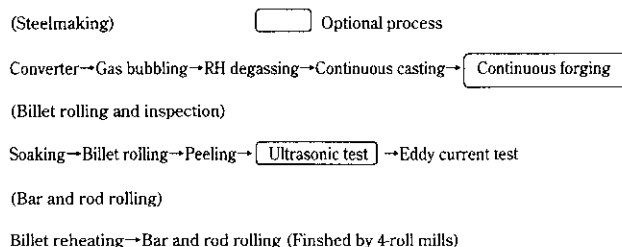


Fig. 1 Outline of main process of steel for bearing use

清浄度向上のため、介在物吸着能力の高いフラックスを出鋼時に添加する。そのフラックスをガスバブリング工程で溶解後、脱ガス処理時の攪拌により非金属介在物をスラグに効率的に吸着させ、清浄度の高い軸受鋼を溶製する。その後、連続鋳造により鋳片を製造している。

この連続鋳造機には、当社が独自に開発した連続鍛圧機を導入している。中心偏析が転動寿命に著しく影響する鋼球用軸受鋼や、凝固収縮により発生するザク欠陥が問題になる大形ベアリング用太径軸受丸棒には、この連続鍛圧法が適用される。

製鋼工場で製造された連続鋳造鋳片は、鋼片工場で圧延し、丸棒では 90~250 mmφ に圧延され、表面および内部の品質が検査され

* 平成13年12月27日原稿受付

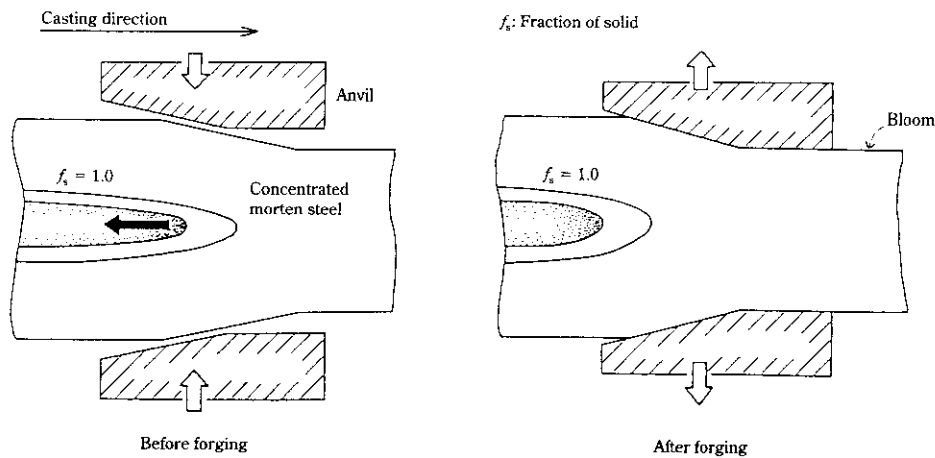


Fig. 2 Concept of continuous forging process

る。前述したように、連続鍛圧を適用することにより径が250 mmφの大きな丸棒でも、内部品質が良好な軸受用丸棒が製造可能である。また、90 mmφより径が小さな丸棒、および線材は、鋼片工場で170 mmφで重さが2 tのピレットに圧延され、さらに線材・棒鋼工場にて所定の径に圧延される。

近年、軸受鋼は、内部品質だけではなく、表面疵の低減、脱炭深さの低減などの要求が厳しくなっている。当社では、丸棒および線材に圧延する前のピレット段階でピーリング加工およびピーリング加工後、高感度の渦流探傷機で表面疵を検出し、疵部はグラインダー手入れを行っている。また、線材用ピレットでは、全断面超音波探傷を行っている。このように、中間製品のピレットでピーリング加工、表面疵探傷および全断面超音波探傷を行うことにより、高品質の軸受鋼が製造可能である。

鋼片工場では、圧延設備に直結した焼鈍炉が設置されている。そのため、圧延後の丸棒を常温まで冷却せずに圧延直後の鋼材の温度を有効に利用した軸受鋼の焼鈍が可能である。

丸棒および線材の圧延では、それぞれの仕上げ圧延機に川崎製鉄と住友重機工業(株)で共同開発した4ロールミルを設置した。この設備により、4.2 mmφから85 mmφまでの線材および丸棒の高い寸法精度・サイズフリー圧延技術を構築することができた。これにより、5.5 mmφ未満の小径線材の圧延も可能になっただけでなく、中間サイズの精密圧延も可能となった。両者ともお客様での軸受鋼の引抜き省略およびそれにともなった熱処理が省略され、お客様に好評を得ている。

当社には、軸受線材の表面処理設備、引抜き設備および引抜き後の渦流探傷設備が導入されており、表面疵を保証した引抜き軸受線材も製造することができる。さらに、棒鋼用と線材用の雰囲気調整を行うことができる焼鈍炉も保有している。

以上のように、当社では、4.2~250 mmφの広いサイズ範囲で高品質の軸受鋼が製造可能である。

3 開発製造技術とその特徴

3.1 連続鍛圧延技術

従来の連続鍛造鑄片の中心偏析および中心部空隙の軽減技術としては、低温鍛造⁷⁾(タンディッシュ溶鋼過熱度の低下)、凝固中での電磁攪拌^{7a)}および低速鍛造などがある。しかし、いずれの方法でも軽減効果は認められるものの、中心偏析、空隙欠陥の解消という面

では十分といえなかった。そこで、当社は1990年に連続鍛圧法を開発し、水島製鉄所第3ブルーム連続鍛造機に導入した。

連続鍛圧法は、Fig. 2に示すように、連続鍛造鑄片を凝固末期に金型により大圧下し、鑄片中心部の濃化溶鋼を未凝固側(反鑄込み方向)に排出し凝固完了点を強制的に形成する方法である。したがって、従来の中心偏析改善方法では、濃化溶鋼を排出しないため、それによって生じた個々の偏析部の面積を小さくするだけであったが、この連続鍛圧法では鑄片の無偏析化が可能となった。⁹⁾

中心部に発生する空隙も、溶鋼の凝固時の収縮によって発生するため、中心偏析と同様に従来の技術では、個々の大きさを小さくはできても皆無にはできなかったが、この連続鍛造圧法では未凝固溶鋼を排出してしまうため皆無化が可能となった。

この連続鍛圧法の優れた中心偏析改善効果により高品質のベアリング鋼球用軸受線材と、空隙の皆無化により大形ベアリングレース用の太丸棒鋼(250 mmφ)が、連続鍛造鑄片から製造可能となった。

3.1.1 鋼球用線材の連続鍛造化

ベアリングの鋼球用線材は、線材の中心偏析が鋼球表面(転走面)に現れる。表面に現れた中心偏析はベアリングの転動寿命に悪影響を及ぼす。その原因の1つは、中心偏析部の焼き入れ後の硬度が他の部分より高くなることにある。

そのため、従来、ベアリング鋼球用線材には、連続鍛造材は適用できず、中心偏析がより軽微な小型鋼塊による造塊材が適用されてきた。連続鍛圧法は、中心偏析の解消により中心部の硬度上昇を防止できる。そこで、連続鍛造材の鋼球への適用を目的として、Table 1に示す化学組成の鋼に連続鍛圧法を適用し、その製品での転動疲労寿命試験を行いその効果を確認した。

試験片は、連続鍛圧を実施した鑄片を圧延により65 mmφの丸棒にし、Fig. 3に示す方法で、鋼材の中心偏析が試験片表面に線状に現れるように切り出した。その後、ベアリング用途で行われる通常の熱処理を施し、ラッピング研磨を行った。従来材と連続鍛圧法を適用した丸棒中心部を5 mmφのドリルで研削し、その切り粉のチェック分析結果をTable 2に示す。従来材には中心偏析による成分濃化が認められる。一方、連続鍛圧材は、わずかに負偏析になって

Table 1 Ladle analysis of high carbon chromium steel for ball bearing use

Steel grade	(mass%)					
	C	Si	Mn	P	S	Cr
JIS SUJ2	0.99	0.26	0.40	0.017	0.003	1.34

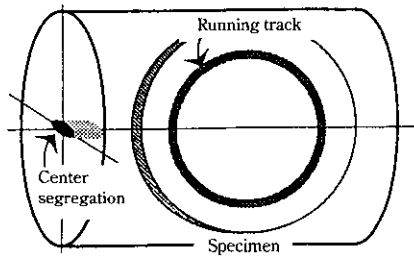


Fig. 3 Sampling position of test piece

Table 2 Chemical analysis of center portion of bars (5 mmφ drill)

	(mass%)					
	C	Si	Mn	P	S	Cr
Continuous forging	0.91	0.25	0.39	0.012	0.002	1.28
Conventional	1.05	0.26	0.41	0.019	0.004	1.36

Table 3 Conditions of rolling-contact fatigue life test

Item	Value
Size of contacting ball	9.525 mmφ
Hertz maximum contact stress	5 260 N/mm ²
Rotating speed	1 800 rpm
Lubricating oil	#68 Turbine oil

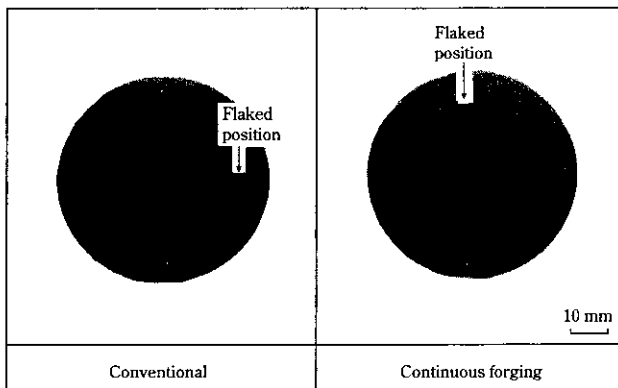


Photo 1 Macrostructure of test specimen after rolling-contact fatigue life test

おり、Cの中心偏析度 (C/C_0 , C_0 は、とりべ分析値) は、0.92であった。

これを、Table 3に示す条件で点接触型疲労寿命試験を行った。転動疲労試験後の試験片のマクロ組織をPhoto 1に、試験片の硬度分布をFig. 4に示す。また、転動疲労寿命および丸棒中心偏析線近傍での剥離発生率をFig. 5および6にそれぞれ示す。ここで、転動疲労寿命は、転動疲労寿命試験で供試個数のうち10%疲労剥離が発生するL10寿命で評価した。

Fig. 4に示すように連続鍛圧材には、従来材に認められるような中心部の硬度上昇は認められず、中心部の硬度は、他の部分とほぼ同じであった。また、転動寿命(L10)は、従来材のそれに比べ2倍程度向上した。¹⁰⁾ これは、Fig. 6に示すように中心偏析上での転動剥離比率が減少したためである。

以上のように連続鍛圧法の適用により、中心偏析起因の転動疲労剥離発生比率を減少できるため、高寿命のベアリング鋼球用線材が

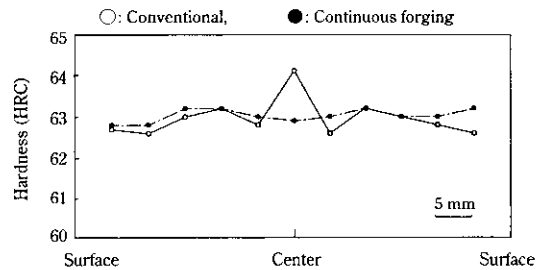


Fig. 4 Hardness distribution of specimen at rolling-contact fatigue life test

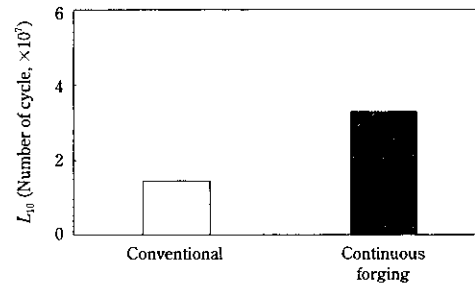
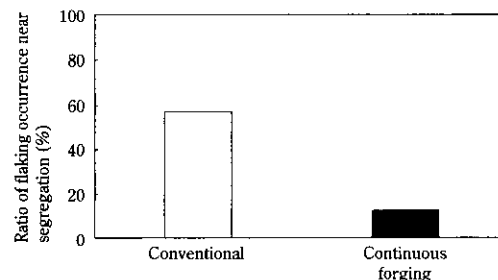
Fig. 5 Rolling-contact fatigue life (L_{10})

Fig. 6 Ratio of flaking occurrence near at center segregation line

連続鍛造で製造可能となった。¹⁰⁾

3.1.2 太径軸受鋼の連続鍛造化

铸件中心部の空隙は、連铸铸件の凝固収縮により生じるため、従来の技術では、その大きさを小さくはできるが、皆無にすることは不可能であった。

一方、圧延鋼材の高温化、圧延速度の低下などにより、圧延による空隙の圧着効果は認められるものの、太径丸棒では、鍛練成形比を大きくとれないため十分な圧着効果が得られない。そのため、太径丸棒のうち加工中および加工後の最終製品で中心部の空隙が問題になるものに対しては、圧延での鍛練成形比を大きくするに、通常の連铸铸件より大きい断面の造塊製鋼塊から製造する必要がある。たとえば、大型ベアリング用太径丸棒(適用成分例をTable 4に示す。)は、中心部の空隙が鍛造によりベアリングレースの内面(転送面)に現れ、低疲労寿命の原因となる場合がある。

Photo 2に連続鍛圧法を適用して製造した場合と、連続鍛圧法を適用しなかった連続鍛造材から製造した場合のベアリングレース用

Table 4 Ladle analysis of high carbon chromium steel for lace bearing use

	(mass%)					
Steel grade	C	Si	Mn	P	S	Cr
JIS SUJ3	0.96	0.64	1.09	0.015	0.004	1.10

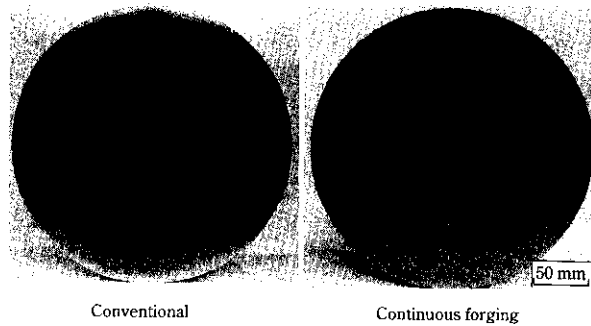


Photo 2 Macrostructure of large diameter bar (250 mmφ)

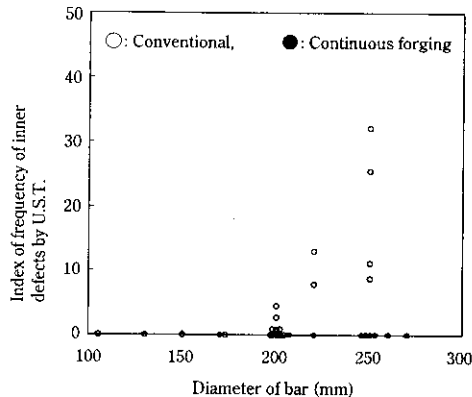


Fig. 7 Effect of bars diameter on inner defects by continuous forging process (Size of cast bloom: 400 × 560 mm)

Table 5 Conditions of ultrasonic test (UST) of inner defects for large diameter bars

Item	Value
Frequency	5 MHz
Size of probe	20 mmφ
Sensitivity	STV-G V 15 - 1.4 = 70%
Disregard level	< 30%

SUJ3, 250 mmφ (鍛練成形比, 4.6) のマクロ組織を示す。また、超音波探傷による丸棒中心部の空隙欠陥残存指数を Fig. 7 に示す。超音波探傷は、Table 5 に示す条件で行った。連続鍛圧法の実施により、中心偏析が解消できるだけでなく、鑄片凝固段階で中心部の空隙を圧着できたことがわかる。したがって、鍛練成形比の小さい太径丸棒でも鑄片空隙欠陥が解消でき、太径丸棒への連鑄材の適用が可能となった。

3.2 中間製品（ビレット）検査技術

軸受鋼は、従来から指摘されているように品質要求の厳しい高級鋼である。近年では、お客様での加工および検査工程の省略などの要求が強くなってきたため、最終製品の品質に及ぼす鋼材の品質向上は、ますます重要度を増してきている。素材品質を向上させるためには、丸棒、線材などの最終供給鋼材の検査を充実するだけでは不十分であり、ビレット（中間製品）での検査の充実を図ることが重要である。

当社は、線材、棒鋼向けのビレットは従来 150 mm 角であったが、上述の軸受鋼などの品質の厳しいものに対しては、170 mmφ に断面の形状を変更した。そのため、1997 年に線材・棒鋼工場加熱炉を角ビレットと丸ビレットを併用できるように改造した。また、

従来シームレスパイプ用丸ビレットの検査ラインにも全断面超音波探傷機などを設置し、高品質線材・棒鋼用素材も検査できるように改造した。

従来、連続鑄造片の表面疵、表皮下介在物、脱炭などは、鋼片圧延段階でのホットスカーフで溶剤除去していた。そのため、鑄片コーナー部と面部の溶剤量のバラツキにより連鑄鑄片の欠陥部や脱炭部を均一に除去できなかった。断面形状を変えて丸ビレットとし、ピーリング加工を行うことによりビレットの表面疵、表皮下介在物、脱炭層を均一に除去できるようになった。

ピーリング後、あらたに導入した自動渦流探傷装置により、表面疵検査を行い、疵があれば、疵部をグラインダー除去する。従来の角ビレットの表面疵探傷は、磁粉探傷を用いて目視検査していたが、コーナー部の欠陥が検出しにくい傾向があった。上記プロセスでの品質造り込みと表面疵自動探傷により、線材・棒鋼製品の疵は大幅に減少した。⁴⁾

また、丸ビレット用の全断面超音波探傷装置を導入し、ビレット内部の空隙や介在物欠陥などを検出できるようにした。以前からも角ビレットに対して自動超音波探傷機を導入していたが、ビレットコーナー部の欠陥に関しては、欠陥の存在位置を明確に計測することができず、適切な手入れ除去を行うことができなかった。

以上のように当社では、角ビレットから丸ビレットに変更し、ピーリング設備、渦流探傷設備および全断面超音波探傷装置を導入することにより高品質の軸受鋼を製造することが可能となった。

3.3 4 ロールミル圧延技術

川崎製鉄の線材・棒鋼工場は、Fig. 8 に示すように棒鋼圧延ラインに線材圧延ラインを増設したコンバインドミルである。棒鋼用 4 ロールミルは、棒鋼ラインの従来の最終仕上げミル 2 台を撤去した後に新たに設置し、線材用ミルは従来の最終仕上げスタンドである最終仕上げミルの後方に増設した。

4 ロールミルの活用により、4.2 mmφ の細径線材が圧延可能になっただけでなく、高寸法精度でのフリーサイズ圧延が可能となった。

丸棒への適用例 (Fig. 9) では、寸法公差を 0.10~0.15 mm 以下にすることによりお客様での引抜き加工が省略可能となった。ピーリング加工の目的は、寸法の高精度化および表面疵、脱炭層の除去であるが、高い寸法圧延技術、圧延前の再加熱条件の適正化、ビレットの造り込み技術、および丸棒での表面探傷技術を組み合わせることにより、ピーリング加工材と同等レベルの品質が達成できている。

軸受線材は、炭素含有率が高いため伸線後の加工硬化によりそのままでの鍛造加工が不可能である。そのため、伸線加工後に焼鈍処理を行うのが一般的であるが、4 ロールミルにより線材を鍛造加工前のサイズに圧延して供給することにより 需要家での伸線加工の省略だけではなく、熱処理、表面処理なども省略可能となった。Fig. 10 に 4 ロールミルを用いた場合の 2 次加工工程の変化例を示す。

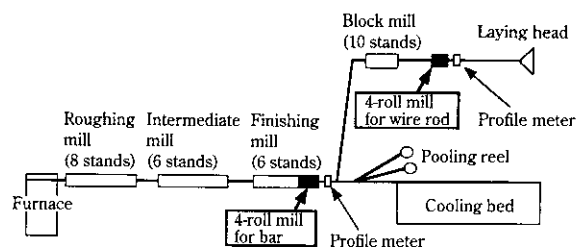


Fig. 8 Mill layout of bar and wire rod mill at Mizushima Works

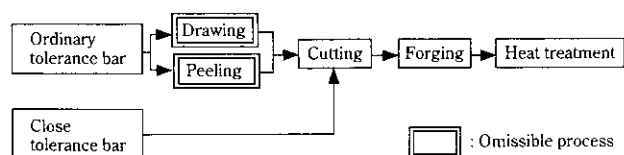


Fig. 9 Example of process applying to close tolerance bar

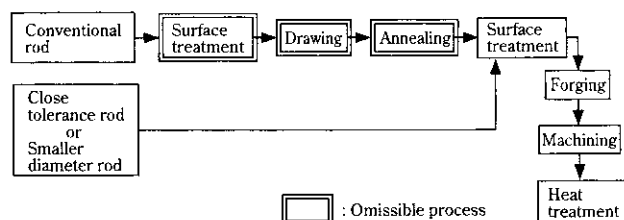


Fig. 10 Example of process applying to close tolerance or smaller diameter rod

4 結 言

当社は、1984 年より連続鍛造で軸受鋼の生産を開始し、その後、製鋼工場では、連続鍛圧設備、ビレット圧延工場では、オンライン焼鈍設備、ピーリング設備、渦流探傷設備および全断面超音波探傷

機を導入した。また、線材・棒鋼工場では、4 ロール圧延設備、線材と棒鋼の熱処理炉を導入した。これらの設備で開発した技術を要求品質仕様にに応じて適切に組み合わせることにより、次のような高品質の軸受鋼を製造できるようになった。

- (1) 連続鍛造において連続鍛圧法を適用することにより、中心偏析のない高転動疲労寿命の鋼球用軸受線材と中心空隙のない 250 mmφ までの太径丸棒が連続鍛造法で製造可能となった。
- (2) 上記軸受線材を 4 ロールミル圧延技術と組み合わせることにより 4.2 mmφ までの細径線材が製造可能となった。この細径化によりお客様での引抜き、熱処理および表面処理が省略できた。
- (3) 丸棒では、4 ロールミルによる高寸法精度圧延技術を適用することにより、寸法公差を 0.15~0.10 mm 以下にすることが可能となり、お客様でのピーリング加工や引抜き加工が省略できた。
- (4) 中間製品（ビレット）においては、角ビレットから丸ビレットへの変更、ピーリング設備、渦流探傷設備および全断面超音波探傷設備の導入によって、内部および表面品質の改善を行った。その結果、最終製品の品質が大幅に向上し、表面、内部ともに高品質の軸受鋼が製造可能となった。

お客様の要求品質仕様にに応じて、当社の製造技術を適切に組み合わせることにより、4.2 mmφ から 250 mmφ の広いサイズ範囲で熱処理材または圧延まで高品質の軸受鋼が提供できるようになった。

参 考 文 献

- 1) 馬田 一，数土文夫，松川敏胤：川崎製鉄技報，**26**(1994)1，13-18
- 2) 川縁正信，山本義治，朝生一夫：川崎製鉄技報，**26**(1994)1，26-32
- 3) 山中栄輔，三宅亮一：材料とプロセス，**32**(1993)，222
- 4) 大谷義則，福高善己，中島 力：川崎製鉄技報，**34**(2002)，17-20
- 5) 小川隆生，武田 了，川縁正信，丹下武志：川崎製鉄技報，**32**(2000)1，54-59
- 6) 水藤政人，川縁正信，蓮沼純一，新庄 豊：鉄と鋼，**71**(1985)，S210
- 7) 山崎久生，新庄 豊，木下勝雄，中西恭二，水藤政人，川縁正信，大西正之：鉄と鋼，**71**(1985)，S208
- 8) T. Fujimura, H. Yamasaki, T. Kayano, and M. Kawaberi: Steel Making Proc. Conf., 70(1987), 213
- 9) 小島信司，溝田久和，櫛田宏一：川鉄製鉄技報，**26**(1994)1，1-6
- 10) 安本 聡，星野俊幸，松崎明博，天野慶一，川縁正信，田畑倅久：材料とプロセス，**3**(1994)，357
- 11) 川縁正信，山本義治，朝生一夫，朝比奈健，鍋島誠司：材料とプロセス，**3**(1994)367