

連続鋳造設備の高信頼性技術

High Reliability Technology of a Continuous Casting Machine

瀬良 泰三	SERA Taizo	JFE スチール	西日本製鉄所(福山地区)	設備部設備技術室	主任部員(副部长)
佐藤 裕二	SATO Yuji	JFE スチール	東日本製鉄所(千葉地区)	設備部保全技術室	主任部員(課長)
岡本 謙	OKAMOTO Ken	JFE スチール	東日本製鉄所(千葉地区)	設備部保全技術室	主任部員(副課長)
中島 聡	NAKAJIMA Satoshi	JFE スチール	西日本製鉄所(倉敷地区)	設備部開発・設計室	主任部員(副課長)

要旨

連続鋳造設備は、製鉄所の生産能力を決定づける最重要プロセスである。その中でもセグメントロール、軸受は高温、高荷重、極低速回転という過酷な環境下で使用されていることから、連続鋳造設備におけるトラブルの大半を占めている。JFE スチールでは、セグメントを構成する各機械要素について、実際の設備使用環境に即した理論を構築するとともに、技術開発を行い、設備の信頼性向上、長寿命化を達成した。軸受、ロール、潤滑環境に関する長寿命化技術について報告する。

Abstract:

Continuous casting machines primarily processes determin the production capacity at steel works. Most of troubles in a continuous casting machine are occupied by segment rolls and bearings which are used under high temperature, high load, and too severe environment at very low speed of rotation. JFE Steel has established a theory that accords with the actual usage of machine elements which constitute a segment. And the improvement of reliability and longer life of equipments are achieved by developed technologies. Technology for longer operating life of a bearing, a roll, and lubrication environment and described.

1. はじめに

昨今の鉄鋼需要の増大にともない、設備の生産性向上への要求は高まる一方である。その中でも、連続鋳造設備は製鉄所の生産能力を決定づける最重要プロセスの一つであり、設備強化、構成機械要素の長寿命化に向けて技術開発が進められてきた。今回、世界トップクラスの稼働率を実現した連続設備の高信頼性技術について報告する。

2. 連続鋳造設備におけるセグメントの現状

連続鋳造設備は、Fig. 1 に示すように、レードルターレットやタンディッシュカーなどの鋳込設備、スラブを凝固させるための鋳型、未凝固スラブをサポートするガイドロール、スラブを切断するカッターなどの設備から構成されている。また、ガイドロールは複数本がセグメントと呼ばれるユニットを構成し、ユニット単位でメンテナンスが行われている。

Fig. 2 に過去 10 年間の設備別故障時間比率を示す。セグメント軸受、ロールが故障の 50% を占めており、連続鋳造設備においては、セグメントの強化、信頼性向上が不

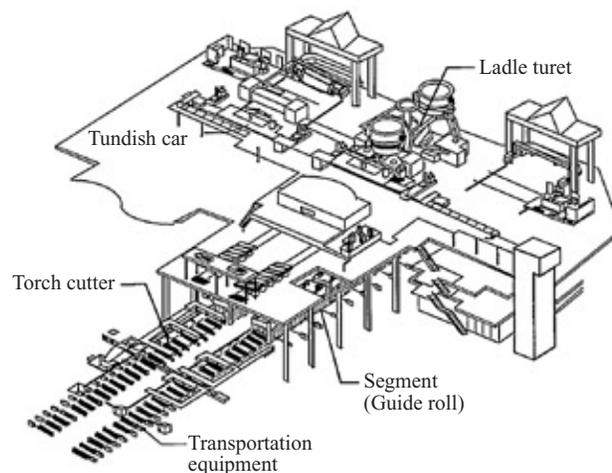


Fig.1 Outline of continuous casting machine

可欠である。また、セグメントは、ロール、軸受、シールなど、多数の機械要素から構成され、取替周期(セグメント寿命)は、構成機械要素の最弱部が律速している。現状では、軸受寿命、ロール亀裂が、セグメント寿命を律速している。さらに、構成部品の内一つでも破損するとユニット単位での取り替えとなり、取替時間も数時間を要することから構成機械要素の高信頼性技術の開発が必要となる。

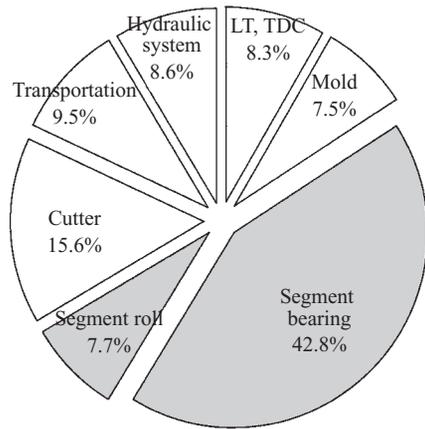


Fig. 2 Actual trouble occurrence classified by plant equipment

3. セグメント軸受の強硬化

連続鋳造設備のセグメント軸受には負荷容量や調芯性の点から、一般的に自動調芯ころ軸受が使用されている。しかしながら、Fig. 3に示すように、自動調芯ころ軸受は接触中心に対して不均一な面圧分布になると、ころと外輪、ころと内輪の間に作用する摩擦モーメントのバランスが崩れスキュー現象が現れる。スキューが始まると接触部で滑り、保持器や案内鏝との接触によるモーメントが作用し、その状態でバランスを回復して安定する。また、面圧分布が均等でもころと内外輪軌道との周速差により、2ヶ所の等速点を除いて常時相対滑り（差動滑り）状態となっている。これらの挙動上の問題は、自動調芯ころ軸受の構造上不可避である。

スキューモーメントや差動滑りを機構的に回避するには、円筒ころ軸受や円錐ころ軸受のような完全線接触型への変更が必要である。特に、スラスト荷重を受けるロールの位置決め固定側に使用する場合は、スラスト荷重をころと案内鏝の滑り接触部だけでなく、軌道面ところの面間でのセリでも負担できる分だけ円錐ころの方が有利である。また、ロール撓みへの追従機構を実現するには軸受外部に球面座が必要であり、複列円錐ころ軸受¹⁾を開発した。

一方、円筒ころ軸受は、接触角を持たないために、ラジアル荷重とスラスト荷重を別個の部位で負担でき、接触面に複合荷重が作用しないという点で、寿命上有利な軸受で

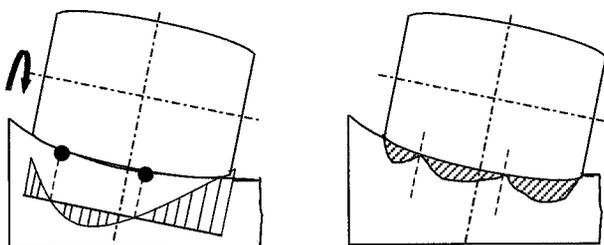


Fig. 3 Roller behavior of spherical roller bearing

Table 1 Bearing outline and load capacity ratio

Model	Spherical roller bearing	Cylindrical roller bearing	Double row tapered roller bearing with spherical sheet
Bearing outline			

ある。また、ころ全長に渡って均一な面圧分布を得られやすく、同じ転動耐体荷重でも低面圧化する上で有利である。さらに、ころに特殊クラウンを施すことで、ころと軌道面間で調芯性を確保している。Table 1に軸受概略図を示す。

4. 潤滑改善による軸受長寿命化技術

前述の自動調芯ころ軸受の差動滑りによるスキューモーメントの駆動力は、油膜が介在した中での接触面での摩擦力であり、十分な潤滑がなされている限り摩擦という実害となって現れにくい。Fig. 4の油膜パラメータ Λ と転がり疲れ寿命の関係に、主要な鉄鋼設備用軸受の潤滑条件をプロットすると、連続鋳造ロール軸受は $\Lambda \approx 0.05$ という境界潤滑状態にある。これは、軸受の使用条件が極低速回転、高荷重、高温の悪環境であることに起因しており、油膜が形成されず金属接触を生じるために差動滑りの影響が顕著となり、早期に損傷に至るものと考えられる。

連続鋳造ロール軸受の潤滑には、一般に、鉱油ベースの耐熱グリースが使用されている。グリースの潤滑油膜に関しては、多くの研究結果²⁻⁴⁾が示されているが、グリースの油膜形成特性を軸受損傷と結びつけて議論されている例は少ない。

そこで、Table 2に示す耐熱グリースについて、連続鋳造ロール軸受の使用条件を想定したラボテストを実施し、潤滑油膜厚と軸受摩擦の両面から境界潤滑領域における潤

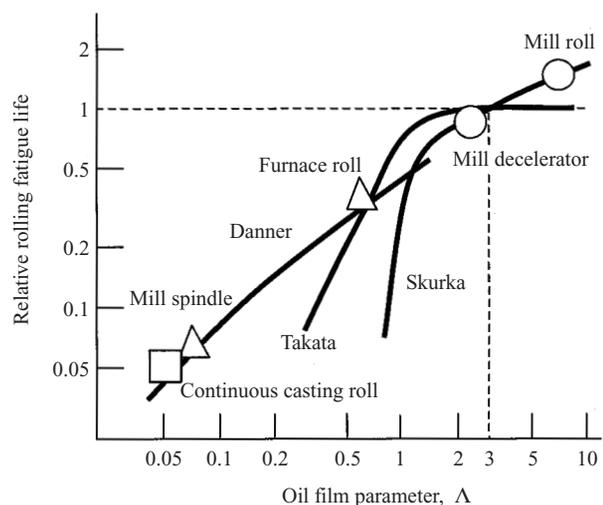


Fig. 4 Lubricating condition of roller bearing for steel plants

Table 2 Test greases

Sample	Thickner type	Penetration grade	Base oil		EP Additive
			Type	Kinematic viscosity at 40°C	
Commercial	Al Complex	No. 1	Mineral	approximately 100 mm ² /s	With EP
Commercial	Di-Urea	No. 0	Mineral	approximately 400 mm ² /s	Without EP
Commercial	Di-Urea	No. 0, No. 1	Mineral	approximately 400 mm ² /s	Without EP
Commercial	Di-Urea	No. 1	Mineral	approximately 100 mm ² /s	Without EP
New developed	Di-Urea	No. 0	Mineral	approximately 400 mm ² /s	Without EP

滑性能を評価⁵⁾した。まず、グリースの潤滑油膜厚を、Fig. 5に装置概略を示す超薄膜光干渉法⁴⁾で測定した。本測定法ではナノオーダーでの膜厚評価が可能であり、Fig. 6に示される膜厚の速度依存性⁶⁾を得た。これより、連続鋳造ロール軸受の回転速度に相当する7~17 mm/s間の平均膜厚を、低速時のグリース潤滑油膜厚とした。また、軸受摩耗の評価として実機軸受の二山摩耗形状を再現可能な軸受摩耗試験を行い、試験後の外輪負荷圏の摩耗形状から軸受摩耗量を求めた。Fig. 7に示す実験結果より、低速

時のグリース潤滑油膜厚と軸受摩耗量の間には、膜厚が増大するほど摩耗が低減するという明確な相関が得られた。

新グリースの開発では、本知見より、潤滑油膜厚を最大限化するべく組成を最適化した。最適化のポイントは、(1) 高粘度鉱油とウレア増ちょう剤をベースに、(2) 鎖長の異なる脂肪酸と芳香族の配合バランスを中心としたウレアの分子構造選定と、(3) 分子極性により金属との親和性

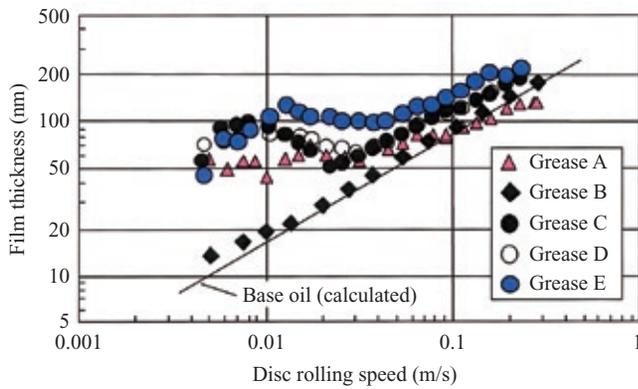


Fig. 6 Results of film thickness measurement

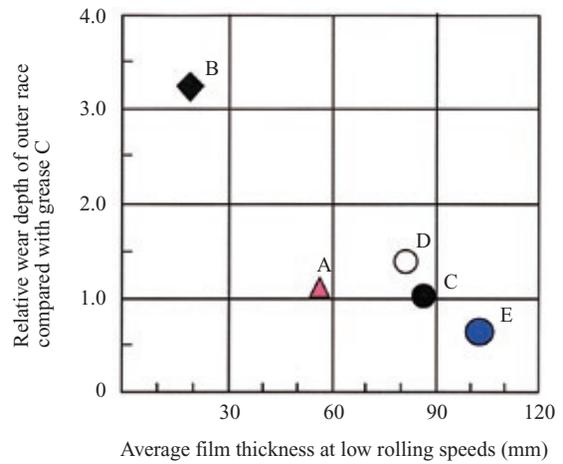


Fig. 7 Relationship between film thickness and bearing wear

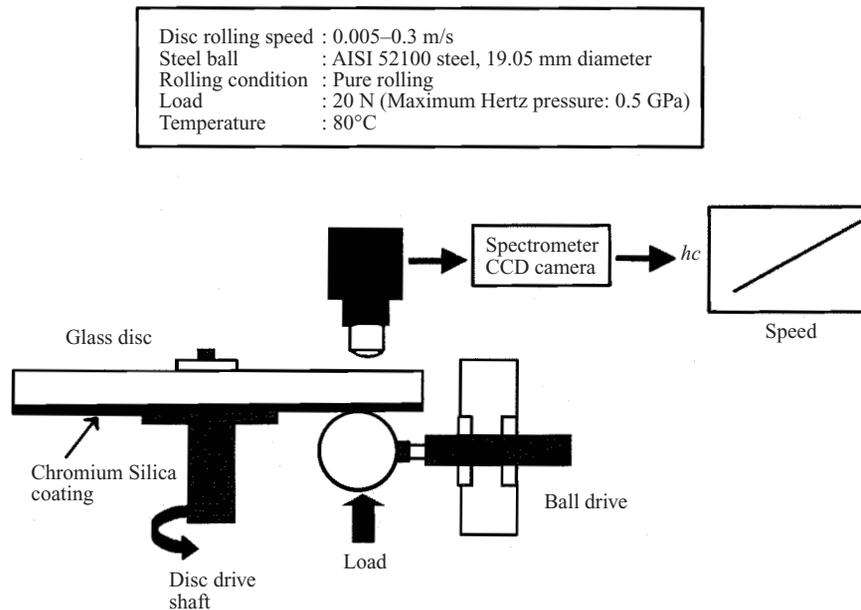


Fig. 5 Schematic diagram of thin film optical method

を向上させて金属界面へのグリース成分の導入および膜形成を促進する添加剤の適用である。

本開発グリースは、現在、西日本製鉄所（倉敷地区）の全連続鋳造設備で使用されセグメント長寿命化に寄与するとともに、他設備の境界潤滑部位の潤滑にも適用が広がっている。

5. 使用環境改善による軸受長寿命化

連続鋳造設備はその製品スピードが1.0~3.0 m/minと極低速であること、高荷重の稼働条件に加えて高温環境下にさらされることから、4章で述べたように、セグメント軸受の軸受ごとと内外輪の接触部は金属接触を生じる境界潤滑状態にある。したがって、流体潤滑に比べて寿命が大幅に低下するが、それに加えて軸受内への水、異物混入によってさらに軸受損傷が加速される。

そこで、Fig. 8に示すようなグリスエアーシステム¹⁷⁾を開発した。本システムは、二重に配置したシール間に清浄空気を供給し、弱正圧に保持するもので、シール間の排気エアーによりシール冷却を行い、軸受内負圧発生時には清浄空気を吸い込むことによって外部からの水や異物混入を防止するとともに、エアーによるゴムの冷却効果によりゴム硬度上昇を抑えられ、軸受寿命延長に寄与する。

エアーによる水、異物混入防止という観点からは、オイルエアーシステムによる潤滑方法⁸⁾もあげられる。オイルエアーシステムは、圧送される空気流れに潤滑油を滴下することにより、Fig. 9のように、管内壁面に沿って、連続して少量の潤滑油を給油点まで搬送する給油方法である。

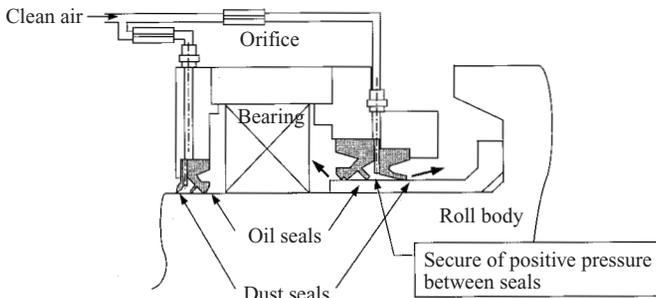


Fig. 8 Outline of grease-air system

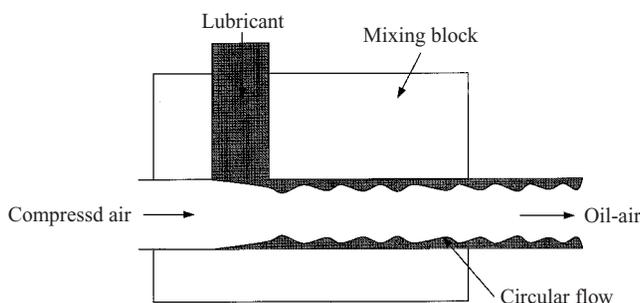


Fig. 9 Flow of oil-air system

オイルエアーシステムは、グリスエアーシステムと同様、軸受内の正圧化による水、異物浸入防止が図れるばかりでなく、油脂による環境汚染を防止できるという効果もある。

オイルエアーシステムは、東日本製鉄所（千葉地区）第4連続鋳造設備へ採用され、評価の結果、水、異物に対する混入防止効果が認められ、定期取替時の軸受の状態は極めて良好であった。

このように、オイルエアーシステムはグリース潤滑に比べて利点も多く、水、異物混入問題の多い重要設備には今後とも採用が増加すると思われる。

6. 連続鋳造ロールの強靱化技術

連続鋳造ロールは、水蒸気酸化と熱亀裂の両者が複合した損傷を受けて取替寿命に至るが、急激に進展する熱き裂を抑制することは最も重要な設備管理項目であり、多くの研究^{9,10)}がなされてきた。

JFE スチールでは、使用後のロールから採取した実体試料の破壊解析を始めとして、市販材、試作材の熱き裂試験結果の解析まで、系統的継続的な研究¹¹⁾を進め、耐熱き裂性の強化原理を見出し、新たな肉盛溶接金属を開発した。

6.1 耐熱き裂性強化原理の探索

熱疲れと材料特性に関する研究では多くの実験式が提案⁹⁾され、実験結果の解析^{9,11)}も見られる。しかし、それらの式に示されている強化因子は、高強度化と高延性化を求めているもの⁹⁾もあり、実験結果の解析・評価に適用できても、設計指針とするには満足できるものではなかった。また、実験結果を用いて各提案式で解析しても、高い相関関係が得られなかった。

そこで、従来の実験式を導き出した実験方法の特徴を検討し、急熱・急冷試験方法¹²⁾と比較した。

さらに、熱き裂経路と金属組織の関係を供試材の綿密な組織観察によって分類し、回帰計算によって求めた実験式を提案した。提案式を以下に示す。

$$P_{H/C} = \sigma_y \cdot \lambda / a \times 10^{-2} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $P_{H/C}$ ：熱き裂抵抗係数

σ_y ：0.2%耐力 (MPa)

λ ：熱伝導率 (W/mK)

a ：線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 室温~500 $^{\circ}\text{C}$)

この提案式は、金属組織によって制御できる要素で構成されていることから、金属設計の立場から見て、実務的に有用な耐熱き裂性強化原理を示しているものと考えられる。

6.2 肉盛溶接金属の設計

一般に、溶接金属は凝固の際に結晶粒が伸長型になるこ

Table 3 Benchmark composition of overlay weld metals

Brad name	Chemical composition (mass%)	Welding method	Remarks
KBS 240	0.06C-12.5Cr-3.99Ni	Submerged ark welding	Conventional weld metal
Super KBS-I	0.19C-13.3Cr-0.2Ni-Co-Mo-V-Cu		Developed weld metal-1
Super KBS-II	0.19C-12.9Cr-0.1Ni-Co-Mo-V-Nb-W-Cu		Developed weld metal-2

とが知られており、13Cr 鋼は δ フェライト (δ) が初晶凝固し熱き裂はその凝固組織に沿って進展する。

これに対し、耐力を強化するため炭素含有量の増加によって δ 生成を抑制し、 δ から γ への変態時に析出する MC 炭化物が γ 生成核となり、 γ 粒の微細化と析出強化の役割を担うようにした。熱伝導率を高め、線膨張係数を低下させるには残留オーステナイト (γ_R) の減少を図る必要があるため、炭素含有量の上限¹³⁾を規制した。

従来の溶接金属 KBS 240、耐食・耐熱き裂性を高めた Super KBS-I、さらに耐熱き裂性を高めた Super KBS-II の化学成分例を Table 3 に示す。

6.3 開発金属の組織と性質

6.3.1 金属組織

Super KBS-II の凝固組織を Photo 1 に示す。腐食液には村上試薬を適用し炭化物を顕在化させた。組織写真に見られるように、旧 γ 粒界とその中心に炭化物が観察され、 γ 粒の粒状・微細化が生じている。 γ 粒が微細化されると、マルテンサイト変態によって、微細なマルテンサイト・ブロックとその中に短くランダム方向をもつラスが形成され、耐熱き裂性の向上に貢献する。

6.3.2 性質

従来材と開発材の物理的性質と機械的性質の例を Table 4 に示す。KBS 240 に比較して、Super KBS-I は、 γ_R の抑制効果により、線膨張係数の低下と熱伝導率の向上が

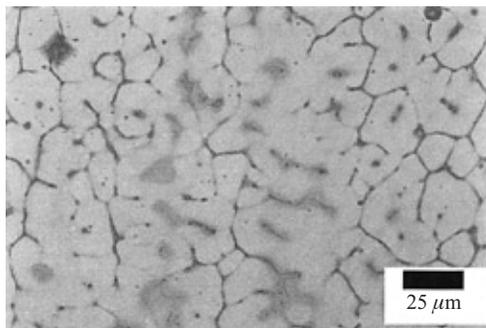


Photo 1 Typical microstructure of Super KBS-II

Table 4 Properties of overlay weld metal

Brad name	a^* ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	λ (W/mK)	0.2% PS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)
KBS 240	14.1	19.6	579	793	19.0
Super KBS-I	13.1	22.1	932	1 078	14.0
Super KBS-II	13.2	22.2	960	1 113	10.8

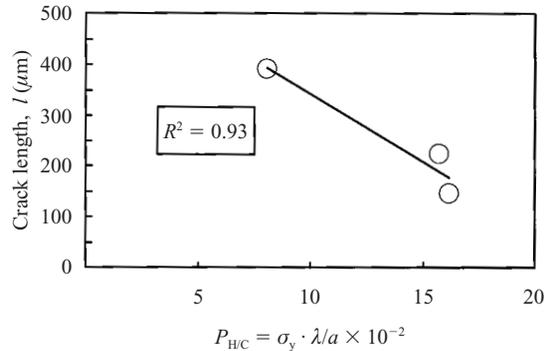


Fig. 10 Relationship of crack length and parameter, $P_{H/C}$

図られている。Super KBS-II は、炭化物の増加により固溶炭素が減少し、同等の線膨張係数、熱伝導率が得られ、析出強化によって耐力が向上している。

6.4 開発金属の評価

それぞれの溶接金属から $\Phi 15.5$ t の試験片を 3 個採取して、高周波誘導急熱急冷ヒートチェック試験¹¹⁾に供した。試験結果を Fig. 10 に示す。縦軸は各試験片の最大き裂長さの平均値とし横軸は熱き裂抵抗係数とした。

図から明らかなように、Super KBS-II は提案式と高い相関関係を持って、耐熱亀裂性が強化されており、設計原理の正当性を裏付ける結果が得られた。

6.5 まとめ

新たに開発した Super KBS-II は、熱き裂が寿命を支配する矯正部から水平部のロールに適用されており、水平部では 500 万トン以上通過した時点でも優れた性能が確認されている。

7. おわりに

セグメントは、多数の機械要素から構成されていることから、長寿命化には各要素の信頼性向上技術が必要となる。

今回紹介した技術は、実際の使用条件、環境に即したものであり、理論のみならず、実際の設備においてもその有用性を確認し、セグメント長寿命化を達成するとともに、生産設備の安定稼動に大きく寄与している。

参考文献

- 1) 植島好紀, 岡本謙, 伊崎健太. 製鉄設備における転がり軸受の長寿命化技術. 川崎製鉄技報. vol.33, no.1, 2001, p.10-14.
- 2) Nakajima, S.; Izaki, K.; Takemura, K.; Kimura, Y.; Cann, P.M. NLGI

- Spokesman. vol. 68, no. 8, 2004, p. 8.
- 3) Cann, P.M.; Hurley, S. NLGI Spokesman. vol. 66, no. 1, 2002, p. 6
 - 4) 董大明, 遠藤敏明, 木村浩. トライボロジー会議予稿集. 東京, 2005-05, p. 227.
 - 5) Hurley, S.; Cann, P.M. NLGI Spokesman. vol. 63, no. 4, 1999, p. 12.
 - 6) Hamrock, B. J. Fundamentals of Fluid Film Lubrication. McGraw-Hill International Editions, 1994.
 - 7) 加藤治. 製鉄設備における流体機器の長寿命化. 月刊トライボロジ, no. 160, 2000, p. 20-21.
 - 8) 村元. 千葉 4CC SEG ロール軸受オイルエア化. 日本鉄鋼協会生産技術部門第 54 回設備技術部会資料. 設備 54- 検 -6, 1996.
 - 9) 村井康生, 夏目省吾, 西山繁樹. 連鋳ロール用肉盛溶接材料の開発. 神戸製鋼技報. vol. 40, no. 3, 1990, p. 101-104.
 - 10) 加藤治, 大貫輝, 蓮香要, 中島浩衛, 押見正一, 境卓也. 連鋳機ピンチロールの損耗調査. 鉄と鋼, '81-S1075, p. 425.
 - 11) 高木十三雄, 上田実彦, 田中和彦, 藤井忠臣. 連鋳鋳造設備用ロール材料の耐熱性の改良. 鉄と鋼, '84-S1361, p. 309.
 - 12) 佐藤裕二, 山村恭, 瀧本高史. 連続鋳造用ロールの長寿命化技術. 川崎製鉄技報. vol. 33, no. 1, 2001, p. 31-36.
 - 13) 佐藤裕二, 西尾要, 二階堂英幸, 仲田卓史, 安田功一, 山下孝子. 13Cr-Co 系肉盛溶接金属の組織と性質に及ぼす炭素含有量の影響. 材料とプロセス. CAMP-ISIJ. vol. 16, 2003, p. 1452.



瀬良 泰三



佐藤 裕二



岡本 謙



中島 聡