



わが国の軸受鋼の進歩発展について

上 杉 年 一*

Recent Development of Bearing Steel in Japan

Toshikazu UESUGI

1. はじめに

このたびはからずも栄えある渡辺義介賞を受賞いたし誠に身に余る光栄と存じております。

顧みますと私は昭和24年に特殊鋼業界に職を奉じて以来今日まで、一貫して特殊鋼、なかでも軸受鋼の研究と製造に携わつてまいりました。特殊鋼のなかでもっとも高度な品質が要求される軸受鋼は、戦後間もなく本格的に国産化が始まりましたが、当時はスエーデンSKF社に代表される輸入品に品質面で太刀打ちできず、幾多の製造技術の開発が重ねられ、今日世界をリードする立場に至つたことを思い返せば誠に感慨深いものがあります。

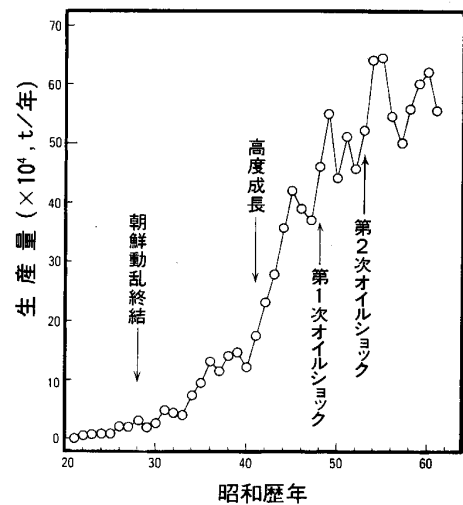
この機会に、我が国の軸受鋼の製造技術ならびに品質の進歩発展について振り返つてみたいと思ひ本日の演題とさせていただきます。

2. 軸受鋼の変遷

まず軸受鋼の生産と品質の変遷について概括してみたいと思います。

軸受鋼の基本成分は1% C-1.5% Crです。この組成はすでに19世紀終わり頃に開発されており、以来ほとんど変わっていないという点では完成された鋼といふことができます。しかし、ここ20年間の品質面の発展あるいは生産性の進歩はまことに著しいものがあります。

最初に我が国の軸受鋼の生産量の推移からみてみます。図1から、昭和20年代は戦後の復興と朝鮮動乱により順次増加し、昭和30年代後半から40年代にかけてモータリゼーションと高度成長の波につれて急激にのびたあと、50年代に入つてオイルショック、円高の影響を受けながらも安定してのびていることが読みとれます。なお、最近の我が国の軸受鋼の生産量年産60万t



出所：鉄鋼統計月報

図1 軸受鋼熱間圧延鋼材生産量の推移

は自由圏の生産量のほぼ40%にあたり、もちろん単一国の生産量としては世界最大であります。

つぎに品質ですが、ベアリングは自動車をはじめあらゆる機械の軸類の回転運動を支持していますので、たとえば新幹線の車軸に代表されるように、破損してはならないという宿命を負っています。このため常に高度の信頼性をもち、長持ちする材料が求められております。

品質の推移の例として、図2に軸受鋼中の酸素量の低減の様子を示しました。酸素量に着目する理由は、鋼中の酸素、すなわち酸化物系介在物は、ベアリング作動時にマトリックスの中で応力集中源となりますので寿命に対してきわめて有害で、たとえば酸素量が30 ppmから15 ppmまで下りますとベアリングの寿命は平均して5倍程度改善されます。脱ガスの導入により酸素量は急激に下がっていますが、昭和40年代の後半に10 ppm

昭和63年3月本会講演会における渡辺義介賞受賞記念特別講演 昭和63年5月10日受付 (Received May 10, 1988)

* 山陽特殊製鋼(株)代表取締役社長 工博 (President, Sanyo Special Steel Co., Ltd., 3007 Nakashima Shikama-ku Himeji 672)

Key words : development of bearing steel ; bearing steel ; oxygen content ; rolling contact fatigue life ; continuous casting ; eccentric bottom tapping ; productivity.

をきる値が得られるようになり、この時点で世界一の高寿命と認められるようになりました。軸受鋼の品質改善はまさに酸素量の低減が最も重要であつたわけです。

このような生産量の増加と品質向上の裏には表1に示すような技術改善がなされています。電気炉の容量は年を経るごとに大型化し、特に UHP 電気炉によるいわゆる高電力迅速溶解技術は生産性を飛躍的に高めました。この溶解技術は欧米の先進国から注目され、西独、フランス、スウェーデン、カナダなどに技術援助を行いました。一方昭和 39 年から導入した脱ガス設備は、生産性の向上に役立つのはもちろんですが、品質面で画期的な向上をもたらしました。それまで軸受鋼にとって最高の品質が得られるとされていた酸性平炉鋼を凌駕するには、鋼中の酸素を減じ酸化物系介在物を減らすことだという考えのもとに、当初取鍋脱ガス設備を導入、その後 RH

脱ガス設備に切り換えました。もちろん酸素量は脱ガス操業技術だけで下がるものではなく、炉外精錬、耐火物の材質、鑄込方法などによつても影響されます。

昭和 57 年に設置した〔90 t UHP 電気炉-偏心炉底出鋼-LF-RH 脱ガス-連続鑄造〕の一連の設備はこれら技術改善の集大成であり、真空溶解鋼に匹敵する極低酸素鋼を安定量産化することを可能にした生産方式であります。

この間、軸受鋼の継目無鋼管化はベアリング産業の発展に寄与し、熱処理炉の連続化と大容量化も品質の安定に貢献した技術改善の一つとして見逃せないものです。

3. 軸受鋼品質の進歩発展

3.1 ベアリング寿命のメカニズム

ベアリングを長時間作動させますと、正常な作動条件でも遂には内・外輪とボールなどの転動体が接触している転走面にはく離が発生し、スムーズな回転ができなくなつて、転がり軸受としての機能を失うこととなります。はく離は一種の疲労破壊現象で、接触部の面圧によつてき裂が発生し、はく離にいたるわけです。写真1は転走面に生じたはく離の一例です。

ところで表面直下の最大せん断応力面にかたい鋭角な異物があると、そこに応力が集中して疲労破壊を早めま

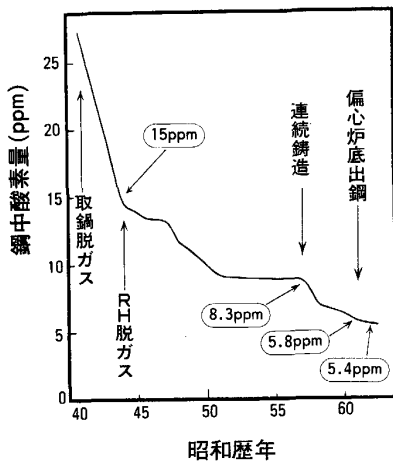


図 2 鋼中酸素量の歴年変化(山陽特殊製鋼(株)例)

表 1 設備改善の推移

昭和歴年	製 鋼	脱 ガ ス	造 塊	加 工	熱 処 理
30	15t 電気炉		下注造塊		バッチ炉
	30t 電気炉			熱管押し出し	連続炉 (700t/基)
40	60t 電気炉	LD			(1500t/基)
		RH	鋼塊大型化	アッセルミル鋼管	(大型化)
50	UHP				(3000 t/基)
	スクラップ予熱			コールドビルガー鋼管	(10000 t/基)
60	LF		連続鑄造		
	90t 電気炉				
	EBT				

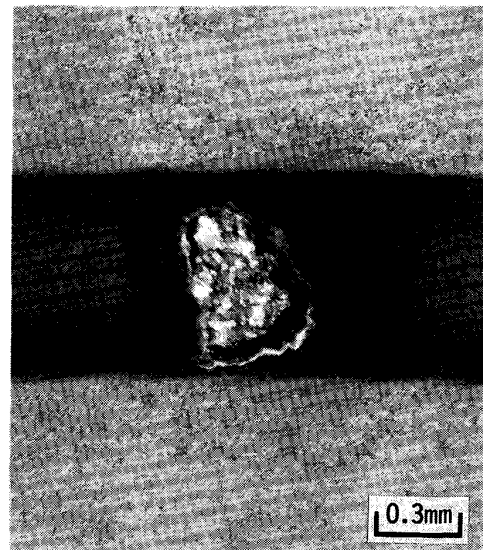
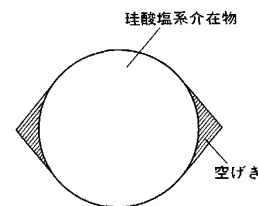


写真 1 転走面に生じたはく離



出所 横堀武夫：材料強度学(1966)
図 3 酸化物系介在物の両端に生じる空げき

す。図3は酸化物系介在物の周辺にポイドが生ずることを示す模式図です。酸化物系介在物は圧延など熱間加工によつても延伸せず、マトリックスとの間にポイドが生じ応力集中源となり疲労はく離に非常に有害です。したがつて短時間に疲労はく離を起こさせないためには、酸化物系介在物をできるだけ少なくすることが最も重要なわけです。

3.2 酸素量と寿命との相関

早期に結果を得るため我々はスラスト型といわれる寿命試験機を用いています。図4はその試験機で得られた実験結果です。転がり疲労はばらつきの大い現象ですので、普通このように同一面圧で何個かのテストをしてB₁₀寿命(総試験片の数のうち10%の試験片が破損した時の応力くり返し数)で評価します。たとえばこの図のB₁₀寿命は4.7×10⁷であり、10⁸回以上は実験に長時間を要するため中止したことを示しています。以後寿

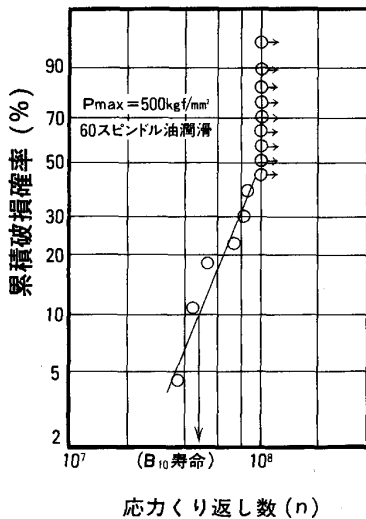


図4 転がり疲労試験結果

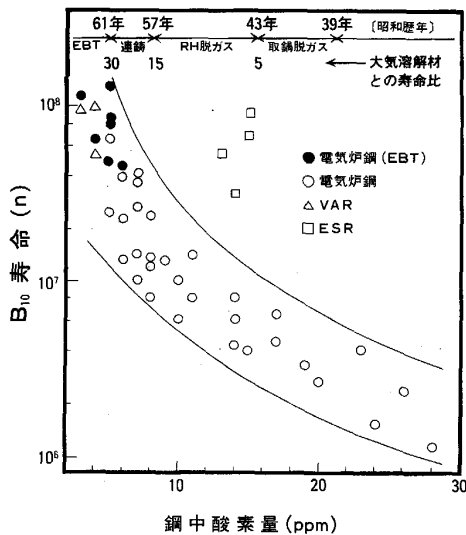


図5 鋼中酸素量と寿命との関係

命といえば通常このB₁₀寿命のことをいいます。

図5は鋼中の酸素量とB₁₀寿命との関係を示したものです。昭和39年に脱ガスが導入されまして、酸素量が約30ppmから15ppmに下がったことにより寿命が約5倍になっております。その後だいに酸素量が減少し、10ppmをきるようになって寿命は約15倍に改善されました。さらに連続製造によつて後述のように酸素量は5ppm程度にまで下がり、今や非脱ガス鋼当時の約30倍の寿命が得られるようになっております。特に最近EBT(偏心炉底出鋼)にしたことにより、同一の酸素レベルでも介在物の形態が変わつたため寿命が高度に安定するようになってきております。この値はVAR材やESR材と同等の寿命です。ESR材は酸素量が多い割には寿命が良好ですが、これは介在物が微細に分散しているためと考えられ、酸素量だけでなく介在物の形態も問題であることを物語っています。

いずれにいたしましても、大量生産システムでVARやESRなど高コストの特殊溶解鋼に匹敵する鋼が量産されるようになったわけです。

3.3 酸素量の水準

図6に最近の連続製造材と鋼塊材の酸素量のヒストグラムを示しました。いずれも低い値が得られています。

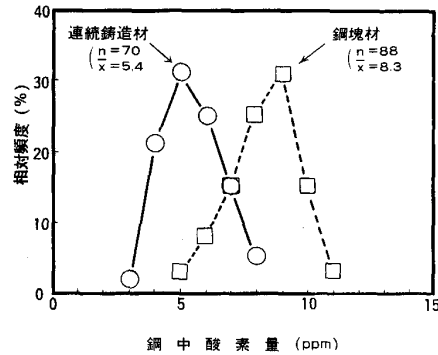


図6 連続製造材と鋼塊材との酸素量比較

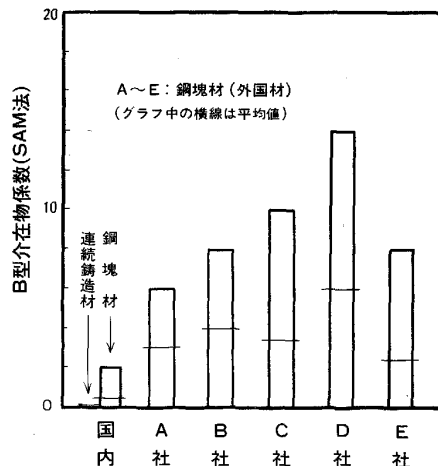


図7 清浄度の外国材との比較

表 2 冷間加工による寿命の向上
(ピルガー減面率 70%)

鋼 番	酸素量 (ppm)	B ₁₀ 寿 命(× 10 ⁶)		冷間加工 前後の 寿命比
		冷間加工前	冷間加工後	
No. 1	14	10.0	40.0	4.0
No. 2	10	7.0	28.0	4.0
No. 3	6	41.0	61.5	1.5
No. 4	6	60.0	90.0	1.5

特に連続铸造材は鋼塊材に比べ断気铸造が容易なこと、耐火物との接触が少なく汚染を最小限にできることから酸素量はより低い値が得られればらつきも少なくなるので軸受鋼のように高い信頼性を求められる鋼には有利な製鋼法といえます。

3.4 非金属介在物の水準

低酸素・高纯净度の軸受鋼の介在物の評価には、最近 ASTM に規定された、B 系と D 系のみの評点を求める SAM 法が適切な方法として、従来法に代わりさかんに用いられるようになってきました。

図 7 は、国内外の軸受鋼を SAM 法で比較したものです。我が国の軸受鋼の品質が諸外国材にくらべ、いかにすぐれたものであるかをうかがうことができます。

3.5 寿命におよぼす冷間加工の影響

非金属介在物は熱間・冷間加工によつて変形、分散します。一般に継目無鋼管は鋼塊からの断面減少率が大きいので介在物が分散しますが、さらに冷間圧延(コールド・ピルガー)を行うと非金属介在物がいつそう微細化し、表 2 のとおり寿命が向上することが認められます。

軸受鋼の品質は以上のような変遷を経て進歩発展してきました。くり返しますと、現在高信頼性の、最長の寿命を持つ軸受鋼は、電気炉、炉外精錬炉、脱ガス処理などで十分な精錬を行い、連続铸造によつて低酸素鋼を得た後、鍛圧比を大きく熱間加工して、さらに冷間圧延によつて介在物を分散させた材料ということが出来ます。

4. 溶解技術の進歩発展

4.1 脱ガス法の導入

我が国では昭和 39 年に脱ガス軸受鋼の生産が開始されました。図 8 に示すとおり、取鍋を真空槽内にセットし、溶鋼を不活性ガスで攪拌させながら、到達真空度 0.5 torr 程度まで減圧して脱ガスする取鍋脱ガス法です。この方法は塩基度の高いスラグも同時に攪拌されますので鋼の清浄度向上の点から不十分で、昭和 43 年に図 9 に示す RH 法を導入いたしました。この方法は、脱ガス中スラグのまき込みもなく、到達真空度 0.1 torr と容易に高真空度が得られ、取鍋脱ガス法にくらべ低酸素の鋼が得られやすいので軸受鋼の脱ガスプロセスとしては最も適した方法といえます。

4.2 炉容の拡大と UHP 化

昭和 40 年代に入つて提唱されだした電気炉迅速溶解

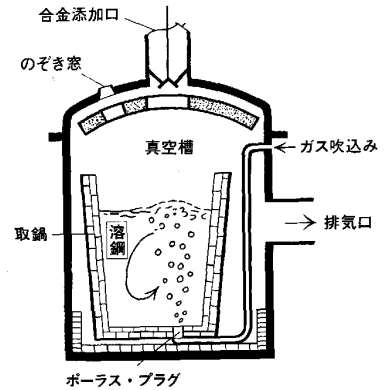


図 8 取鍋脱ガス法

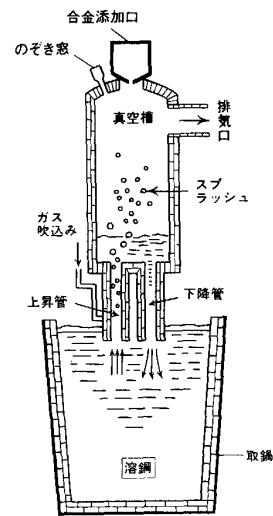


図 9 RH 脱ガス法

操業 UHP (Ultra High Power) は、従来の電気炉操業の考え方から脱却した新しい方法であり、これにより電気炉の生産性は長足の進歩を遂げることになりました。

UHP 操業の最大の特徴は、炉容に対する投入電力量が従来の 2~3 倍と高いことです。昭和 40 年代の高度成長にともない、軸受鋼の製造にも高生産性が求められ、製鋼時間の短縮を目的としてトランス容量と炉容の大型化が進み、いわゆる UHP 化の普及があつて、さらに現在では Super-UHP 時代を迎えています。

この間電気炉の炉容は、30 t → 60 t → 90 t → 150 t と拡大し、生産性すなわち製鋼時間当たりの鋼塊生産量は、図 10 に示すとおり、昭和 40 年代当時 15 t/h あつたものが現在では 125 t/h、すなわち過去 20 年間で約 8 倍にのびております。

参考までに、電気炉の電力・電極・耐火物(炉壁)原単位の推移を図 11 に示しました。コストミニマムを追求する動きは今後とも続くことでしょう。

4.3 取鍋精錬炉(LF)の導入

炉容の拡大と UHP 化にともない、溶解期、酸化期、還元期の三つのステップの中で、精錬律速である還元期

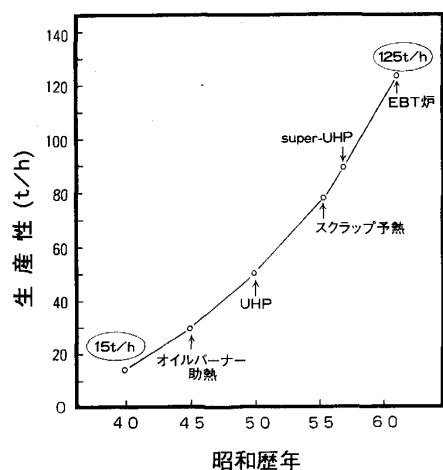


図 10 電気炉の生産性の推移

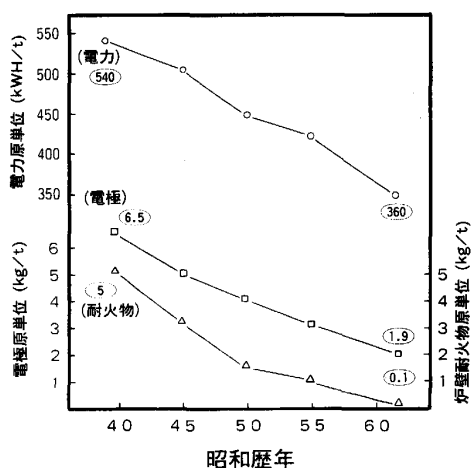


図 11 各種原単位推移

に大容量のトランスを使用することは不合理となってきました。そこで大容量のトランスは溶解期と酸化期に最大限活用し、還元期は出鋼後取鍋で行うよう取鍋精錬炉が導入されました。また LF 操業は昇温機能があるため目標温度・ casting 時刻の制御が可能で、連続铸造機とのマッチングには欠かせないものです。品質面でも強還元性スラグの生成とガス攪拌によって、脱酸、脱硫が容易になるとともに、溶鋼成分一点狙いの精度が向上いたしました。

4.4 偏心炉底出鋼の導入

電気炉の出鋼方式は通常炉体を傾動させ出鋼樋を通じて取鍋に溶鋼を受けますが、最近図 12 に示す EBT 方式 (Eccentric Bottom Tapping-偏心炉底出鋼) が開発されました。EBT 方式の採用により、出鋼時間の短縮による生産性の向上が得られましたが、それにもましてスラグフリー出鋼が可能となり、酸化性スラグをカットして LF 還元精錬を容易にし、高纯净度鋼をより安定的に製造できる品質面の効果が大です。

EBT に改造前と改造後の軸受鋼中の酸素量と非金属

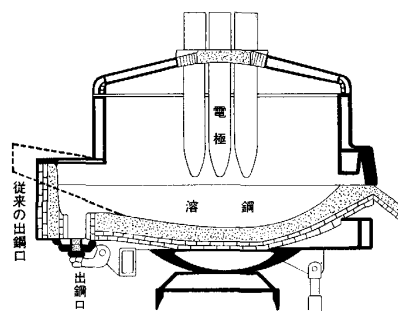


図 12 EBT の概略図

表 3 出鋼方式による酸素含有量と非金属介在物評価

	n	平均酸素量 (ppm)	非金属介在物評価							
			A		B		C		D	
			T	H	T	H	T	H	T	H
TST (傾動樋式出鋼)	55	5.8	1.34	0.10	0.72	0	0	0	0.98	0.37
EBT (偏心炉底出鋼)	70	5.4	1.35	0.12	0.17	0	0	0	0.90	0.04

T: Thin H: Heavy

(ASTM-A 法による)

介在物の成績を表 3 に示しました。酸素量は 0.4 ppm 減少し、非金属介在物は ASTM 法で B 系の Thin と D 系の Heavy が大きく改善されていることがわかります。

5. 造塊技術の進歩発展

5.1 下注造塊法の進歩

昭和 20 年代に上注法から下注造塊法に変わったのは一つの転機ですが、以後連続铸造化されるまでの 30 年間のあいだに下注造塊法もさまざまな進歩をとげました。当初は溶鋼表面の酸化を防止するための酸化防止被覆剤の研究が主流でした。昭和 40 年代に入りますと、せつかく脱ガスにより低酸化化したものをふたたび大気にふれさせないように、大気を不活性ガスに置換する雰囲気铸造など周辺技術の進歩がありました。さらに鑄型配列の改善ならびに定盤れんが材質の改善などによつても纯净度が大幅に改善されました。

5.2 連続铸造の導入

昭和 50 年代後半には軸受鋼も連続铸造の時代に入りました。山陽特殊製鋼(株)においても昭和 57 年に大断面垂直型の連続铸造機を導入いたしました。

連続铸造においては、タンディッシュ内での介在物の浮上分離と、铸造時の溶鋼の再酸化防止が重要です。図 13 にタンディッシュの模式図を示しました。堰を設けた大容量水冷タンディッシュを用い、タンディッシュ内酸素濃度をほぼ 0 に保ち、かつ不活性ガス量を極力少なくするため、タンディッシュ本体、タンディッシュカバーおよび测温口等は完全密閉して空気の侵入を防いでいます。また汚染を防止するために耐火物の材質も重要です。

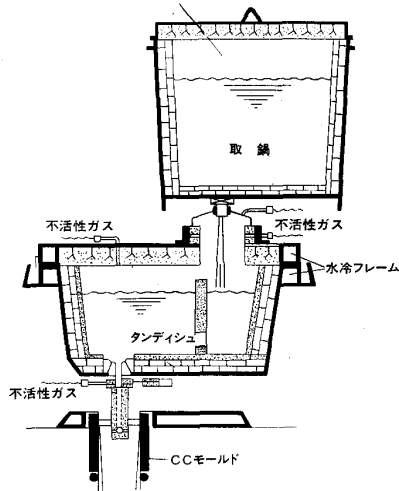


図 13 タンディッシュの概略図

表 4 タンディッシュ用耐火物組成 (%)

	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SiC	C	ZrO ₂
堰	—	30	65	—	1	—	—	—
ボード	78	5	10	3	1	—	—	—
スライディング	—	5	95	—	—	—	—	—
プレート	—	—	—	—	—	—	—	—
浸漬ノズル	—	11	47	—	—	9	28	2

表 5 1タンディッシュ・1ノズル当たりの最高連続鋳 (山陽特殊製鋼(株)例)

年 月 日	昭和 60 年 6 月 23 日 ~ 27 日
総 鋳 造 時 間 (h)	94.45
連 続 鋳 ヒ ー ト 数 (n)	68
プ ル ー ム t 数 (t)	10 150
歩 留 り (プ ル ー ム / 溶 鋼 %)	99.6

表 4 に主な耐火物の組成を示しました。

アルミキルド鋼の連続鋳造技術で最も問題となるのは Al₂O₃ 付着による浸漬ノズルの閉塞です。閉塞を防ぐには、連続鋳造機に清浄な溶鋼を供給することが必要であります。

(1) 取鍋精錬炉による、強還元性スラグ下での十分な精錬

(2) RH 脱ガス槽内の付着スプラッシュによる汚染の防止

(3) 完全無酸化雰囲気下での鋳造

などの諸対策をした結果、浸漬ノズルの閉塞は完全に解消し、表 5 に示す軸受鋼連続鋳の記録をつくることができました。

さまざまな溶解技術と造塊技術の進歩発展が、ついには、Single ppm の酸素量の高清浄度軸受鋼の量産を可能にしたわけです。ベアリングの寿命は 25 年前の非脱ガス鋼にくらべ約 30 倍となり、今では生産量も品質も世界をリードするにいたりました。

6. 今後の課題

1) 高信頼性

時代は軽薄短小化の流れの中にあり、いつその高性能化が求められております。ベアリングの寿命は B₁₀ 寿命 (10% 破損確率) ではなく、最初の一個がはく離するまでの寿命、すなわち 100% の寿命保証、いかにすれば信頼性の向上が求められています。このため酸素量の減少と低位安定は今後とも続けなければなりません。さらに低酸素下での非金属介在物の組成、形態、分布の研究をすすめなければなりません。

2) 特殊使用環境

社会の高度化にともない、ベアリングも耐食性や耐熱性などの必要な特殊環境下で使用されることがふえてきています。これらの用途の軸受用鋼として従来 AISI 440 C (1% C-17% Cr), M-50 (0.8% C-4% Cr-4% Mo-1% V) などが用いられてきましたが、より安く加工性の良好な、また当然寿命の優れた、それぞれの目的や用途に応じた軸受鋼の開発が必要であり研究が重ねられています。最近セラミックス軸受が出てきましたが、新素材のベアリングも課題の一つです。

3) 転動体への連続鋳造材の適用

昭和 57 年以來、軸受鋼の連続鋳造化が急速に進みましたが、まだボールやローラーなど転動体用の棒鋼、線材にはこの連続鋳造材が適用されていません。連鋳材の中心部偏析の減少とともに、今後急速に適用が進むと思われれます。

以上、我が国の軸受鋼の進歩発展の経緯を概括的に申し述べました。今後の課題を含め、さらなる進歩発展を願つて講演を終わらせていただきたいと存じます。