

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol.28 (1996) No.1

高品質線棒素材の精錬・ casting 技術の進歩

Improvement of Refining and Casting Technique for High Grade Wire and Bar Products

藤村 俊生(Toshio Fujimura) 櫛田 宏一(Koichi Kushida) 本郷 晴(Haruo Hongo)

要旨：

高級線棒用製品向けブルーム、ビレットに要求される特性は極めて厳しく、高度で安定した製造技術が必要である。水島製鉄所においては 1968 年より形鋼、シームレス、線棒用素材の連铸化を積極的に推進して素材の均質化と安定化をはかってきた。また機械構造用鋼、硬鋼線、タイヤコード素材の清浄化や内部品質改善を目的として大断面サイズモールドを導入するとともに無手入れ圧延技術を確立し、1986 年には製鋼～圧延連続同期操業化を図り、直行率 90%を達成した。同時に、精錬工程に対しても技術革新を進め大量溶銑予備処理、上底吹転炉と RH 脱ガスをベースにした高纯净鋼製造技術を確立した。さらに連続铸造における連続鍛圧技術を確立することにより長年の深刻な課題であったブルームの中心偏析に起因する主要な問題を解決し安定した高級線棒用素材の製造体制を確立した。

Synopsis：

Stable and advanced production techniques are required to meet the severe prerequisite for blooms and billets rolled into high grade wire and bar products. To improve steel product quality, application of CC process for materials of shapes, seamless pipe, wire and bar products has been promoted since 1968 at Mizushima Works. By taking the advantages of the surface defects free casting techniques and large section blooms and as the result of Synchronized operations of the steelmaking shop and billet mill, in 1986, 90% of blooms for those products, including machine structure, high carbon wire and steel tire code, was hot charged. At the same time, a clean steelmaking process was developed on the basis of mass hot-metal pretreatment, top and bottom bowing converters and enhanced RH degassing. With the subsequent development of continuous forging process during casting, which eliminates central segregation problems, a reliable and stable process for high grade wire and bar products was established.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

Improvement of Refining and Casting Technique for High Grade Wire and Bar Products



藤村 俊生
Toshio Fujimura
水島製鉄所 製鋼部製
鋼技術室 主査(課長)



櫛田 宏一
Koichi Kushida
水島製鉄所 製鋼部製
鋼技術室 主査(課長
補)



本郷 晴
Haruo Hongo
水島製鉄所 管理部条
鋼管理室 主査(掛長)

要旨

高級線棒用製品向けブルーム、ビレットに要求される特性は極めて厳しく、高度で安定した製造技術が必要である。水島製鉄所においては1968年より形鋼、シームレス、線棒用素材の連鑄化を積極的に推進して素材の均質化と安定化をはかってきた。また機械構造用鋼、硬鋼線、タイヤコード素材の清浄化や内部品質改善を目的として大断面サイズモールドを導入するとともに無手入れ圧延技術を確立し、1986年には製鋼～圧延連続同期操業化を図り、直行率90%を達成した。同時に、精錬工程に対しても技術革新を進め大量溶銑予備処理、上底吹転炉とRH脱ガスをベースにした高品質鋼製造技術を確立した。さらに連続鑄造における連続鍛圧技術を確立することにより長年の深刻な課題であったブルームの中心偏析に起因する主要な問題を解決し安定した高級線棒用素材の製造体制を確立した。

Synopsis:

Stable and advanced production techniques are required to meet the severe prerequisite for blooms and billets rolled into high grade wire and bar products. To improve steel product quality, application of CC process for materials of shapes, seamless pipe, wire and bar products has been promoted since 1968 at Mizushima Works. By taking the advantages of the surface defects free casting techniques and large section blooms and as the result of synchronized operations of the steelmaking shop and billet mill, in 1986, 90% of blooms for those products, including machine structure, high carbon wire and steel tire code, was hot charged. At the same time, a clean steelmaking process was developed on the basis of mass hot-metal pretreatment, top and bottom blowing converters and enhanced RH degassing. With the subsequent development of continuous forging process during casting, which eliminates central segregation problems, a reliable and stable process for high grade wire and bar products was established.

1 緒 言

高級線棒用製品向けブルーム、ビレットに要求される特性は極めて厳しく、清浄性に優れた健全な鑄片を製造する必要がある。水島製鉄所においては転炉プロセスにより高品質鋼を溶製するため上底吹転炉の開発や予備処理溶銑を用いた高炭素鋼キャッチカーボン技術の確立に加えて大環流RH脱ガスを軸にした高品質鋼製造技術を確立した。また、連続鑄造工程においては表面欠陥防止技術の確立や連続鍛圧技術の開発を行い表面内部品質の大きな改善を得た。本報告においてはこれらの技術開発について述べる。

2 高品質線棒用素材の製造プロセスの発展

Table 1に当水島製鉄所における線棒系素材関連の製造設備仕様をFig. 1に線棒用素材の連鑄化と関連製造技術の開発状況を示した^{1,2)}。

1968年の第1連鑄機の稼動開始より70年前半には機械構造用鋼、コールドヘッダー用鋼、PC鋼線、タイヤコード用素材の連鑄化を完

了させ、従来の造塊法に比較して安定した品質を得ることができるようになった。また1978年に第3連鑄機の大断面サイズモールド(400×560 mm)の適用を開始するとともに³⁾、電磁攪拌、多孔ノズル、取鍋タンディッシュ間ロングノズルの適用などの技術により内部品質、清浄性の向上を得た。また、モールドへのFeNiめっきの適用⁴⁾、ロール冷却軸受けの改善、2次冷却技術の改善など設備技術の改善と内部割れ防止技術やタンディッシュ交換技術の確立により生産性を大幅に向上させた。

1980年代前半には高級線棒用素材、シームレス高級用素材も含めて条系素材の連鑄化比率を90%まで向上させるとともに、表面欠陥防止技術の確立により1984年には条系素材における連鑄圧延の連続化同期化操業を達成した⁵⁾。これにより、品質の向上と大幅なリードタイムの短縮を得た。

また、製品特性の厳格化に対応して高炭素鋼に対する低硫、低磷化が必要となり溶銑脱硫技術の確立、転炉ダイナミックコントロール技術の確立、高炭素鋼吹錬技術の開発を行った。低磷、高炭素鋼の溶製時に生成する酸化ポテンシャルの高いスラグの生成を抑止するため、上吹転炉を上底吹転炉(LD-KGC)に改造するとともに1985年にはトビードでの大量溶銑予備処理法を確立した⁶⁾。さらに転炉キャッチC技術⁷⁾を確立し溶鋼の清浄性を著しく改善した⁸⁾。

また、タイヤコード素材や軸受け鋼など厳しい清浄性が要求され

* 平成8年3月14日原稿受付

Table 1 Main specifications of principal facilities

Facility	Item	Specification
Blast furnace	No.2 BF (m³)	2857, Desiliconization at runners
	No.3 BF (m³)	4359, Desiliconization at runners
	No.4 BF (m³)	4826, Desiliconization at runners
PTC	Numbers of Injection stations	4
	Max. injection rate (kg/min)	600
	Injection type	Post mixing type
	Flux	Sinter dust, Lime, Spar, Soda ash
Converter	Type	LD-KGC
	Capacity(t) × units	180 × 3
	Top oxygen blowing rate (Nm³/min·t)	2.0~2.5
	Bottom inert gas blowing rate (Nm³/min·t)	0~0.2
	Bottom inert gas	Ar, N₂, CO
	Bottom tuyers	Multihole tube × 8
No.1 RH	Vacuum capacity at 0.5 torr (kg/h)	400
	Circulation rate (t/min)	80
	KTB(Top oxygen blowing rate) (Nm³/h)	1200
No.3 RH	Vacuum capacity at 0.5 torr (kg/h)	500
	Circulation rate (t/min)	140
	KTB (Top oxygen blowing rate) (Nm³/h)	2000
Ar bubbling	Numbers of stations	3
Flux injection	Numbers of stations	1
No.1 CC	Machine type	Curved bloom caster
	Number of strands	6
	Mold size (mm)	200 × 220, 270 × 340
	Casting radius (m)	12.5
No.3 CC	Machine type	Curved bloom & beam blank caster
	Number of strands	4
	Mold size (mm)	300 × 400, 400 × 560, 140 × 400 × 560
	Casting radius (m)	12.5, 22.5

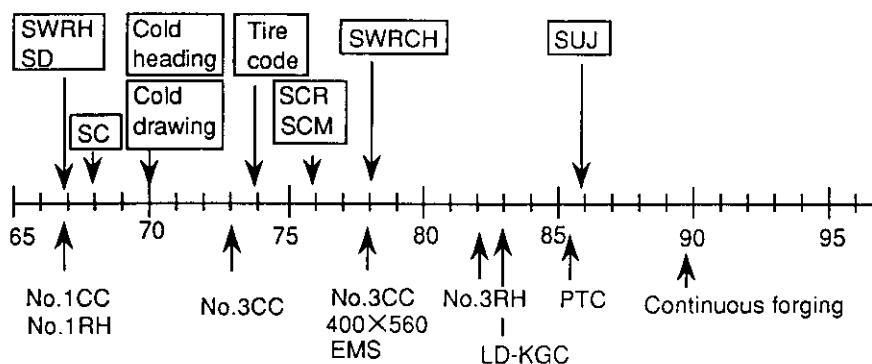


Fig. 1 History of applications of continuous casting for wire and bar and related steel-making facilities at Mizushima Works

る素材については転炉での溶鋼清浄化に加えて、2次精錬工程での非金属介在物形態制御と徹底した低酸素化を行い、安定した極低酸素鋼溶製プロセスを確立した。

さらに1990年には連続鍛圧プロセスを商用化することにより長年

の課題であった連铸鑄片中心偏析をコントロールできるようになり中心偏析起因の問題解消はもとより中心部切削性の改善など需要家における熱処理省略やコスト削減への寄与が得られてきた。また、連続鍛圧プロセス適用時には比較的高温で鑄造することが可能であ

り、従来高炭素鋼の中心偏析対策として一般的であった低温鋳造を行う必要がないことから清浄性もさらに向上した。

以上のように、溶銑予備処理、転炉キャッチカーボン技術、極低酸素化技術の確立など精錬プロセスの革新と高品質鋳片製造技術や連続鍛圧プロセスを確立することにより高品質線棒用素材の安定した製造が可能となった。

3 溶鋼清浄化技術

溶鋼の清浄性を得るためには溶製初期の段階において非金属介在物の生成を抑制するとともに溶製終期の2次精錬工程において徹底した浮上分離を図ることが重要である。

非金属介在物の生成を抑制するためには転炉精錬工程において溶鋼とスラグ中の酸素ポテンシャルを低減することが重要であるが、脱炭を阻害することなくこれを行うのは容易ではない。特にタイヤコードや軸受け鋼向け素材のような高炭素鋼において終点炭素の高い状態で脱炭を安定して行うことは困難でありプロセスは安定していなかった。このため上底吹転炉 (LD-KGC)、ダイナミックコントロール技術および溶銑予備処理技術を確認して転炉の吹錬制御性を大幅に向上させた。これにより低炭高炭素鋼を安定して最終目標成分に近い炭素濃度で出鋼するキャッチカーボン技術を確認した (Fig. 2)^{6,7)}。その結果、溶鋼およびスラグ中の酸素ポテンシャルを極めて低くすることが可能となった。また溶鋼中窒素濃度の低減や出鋼温度の低減によりプロセスの安定化が得られた。

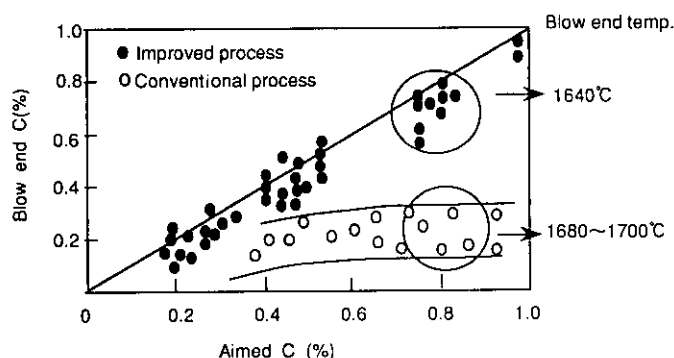


Fig. 2 Effect of improved process on blow end carbon

Fig. 3 には 1 例として軸受け鋼の製造プロセスを示した⁸⁾。溶銑予備処理において徹底脱炭した後、上底吹転炉により終点炭素濃度を $C = 0.9\%$ に制御するとともにスラグストッパーを用いて取鍋内へのスラグ流出を最小化している。更に取鍋内への Flux 添加と Ar ガス強攪拌を実施した後、大環流量 RH 脱ガスにより徹底した非金属介在物の浮上分離を行っている。

Fig. 4 には $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系 3 元系状態図 (1500°C) における低熔点領域と SiO_2 の推定等活量線を示した。 SiO_2 活量は下記の式より推定した。

$$3\text{SiO}_2 + 4\text{Al} = 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Si} \quad (1)$$

$$K = \frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}^2 \cdot a_{\text{Si}}^3}{a_{\text{SiO}_2}^3 \cdot a_{\text{Al}}^4} \quad (2)$$

$$\log K = 37670/T - 6.94 \quad (3)$$

非金属介在物の大半を占める Al_2O_3 系介在物の浮上分離を促進するためにはこの低熔点領域内の高塩基度側で、かつ SiO_2 による Al の再酸化を抑制する領域 ($a_{\text{SiO}_2} < 0.004$) を選定する必要があるが、非常に狭い領域となる。このため系に CaF_2 を加えてスラグの融点と粘性を下げ脱炭反応を効果的に行うこととした (Fig. 5)。

また前述のように RH 脱ガスを大環流量化することでさらに溶鋼の清浄性を改善した (Fig. 6)。

連鋳工程においては徹底したシールを実施するとともに大断面モールド ($400 \times 560 \text{ mm}$) と連続鍛圧プロセスの適用による高温注入により高品質鋳片を安定して製造可能となった。

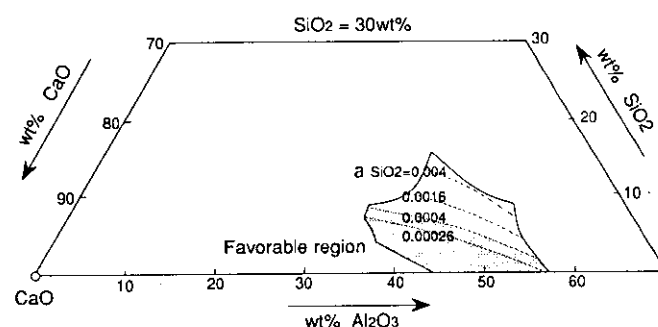


Fig. 4 Iso-activity curves for SiO_2 in the $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ system at 1500°C

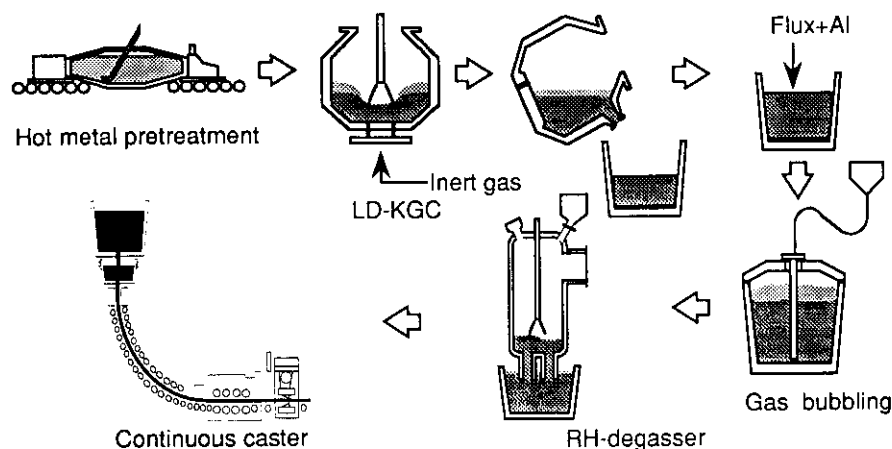


Fig. 3 Steelmaking process for bearing steel (SUJ)

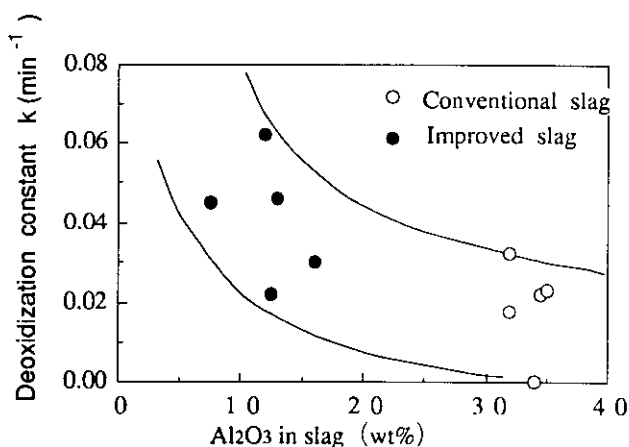


Fig. 5 Improvement of deoxidization constant K during RH degassing

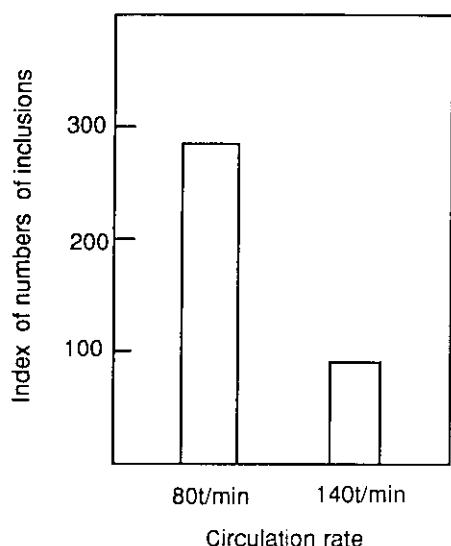


Fig. 6 Effect of RH circulation rate on steel cleanliness

4 高品質鋳片製造技術

4.1 表面欠陥防止技術

縦割れを防止するにはモールドパウダーを適正化し、不均一流入

を抑制することが重要である⁹⁾。またブレイクアウトの防止や操業の安定化を得るためには粘度と溶融速度のバランスを適正化し、モールドパウダー溶融層厚を十分確保する必要がある。またモールドを長期間使用すると、冷却水中の析出物によりモールド内不均一加熱が発生し縦割れの原因となることがある。このため当所においては冷却水を純水化した。またモールドの Fe-Ni めっき技術の開発の効果もあり、1500 ch 以上の高いモールド寿命を得ている。

横割れひび割れの防止をはかるにはまず起点となる微細な割れを防止する必要がある。モールド直下での弱冷化が有効である。このため当所においては比較的粘度の低いモールドパウダーと頭部弱冷型の冷却を採用している¹⁰⁾。

一方、頭部における弱冷は内部割れ感受性の高い高炭素鋼 ($C > 0.3\%$) では不利であることから表層直下内部割れの誘発を防止するためモールド〜モールド直下でのアライメントとギャップの管理を厳格に実施している。モールドの Fe-Ni めっきや前述のモールド冷却水の純水化はモールド形状を安定して良好に保つためにも有効である。

矯正点での表面温度低下の防止には過度の低速鋳造の防止に加えて2次冷却の一層の緩冷却化が必要である。当所3CCの下部ゾーンの鋳片サポートロールの冷却は外部冷却によって行っていたことから2次冷却の緩冷却化には限界があった。このためロール冷却用のミストスプレーを設置しロールを保護しつつ緩冷却化を進めた (Fig. 7)。その結果ほとんどの鋼種の横割れひび割れを防止できた。また、タンディッシュ交換継ぎ目などの非定常鋳片の表面横割れひび割れも大幅に改善された。

4.2 内部割れ防止技術

ブルーム鋳片に観察される内部割れには、バルジング、熱応力および未凝固鋳片の矯正によるものがある¹⁰⁾。

300×400 mm サイズの中炭素鋼について、バルジングによる鋳片表層近くの内部割れとモールド直下ロールギャップ不整合および鋼中サルファー含有量の関係を Fig. 8 に示す。ロールギャップ不整合を抑制するとともに鋼中サルファー含有量を低減することで鋳込み速度増大時に生ずる内部割れを防止することができる。鋳片中間部に生ずるバルジング起因の内部割れは2次冷却の強化により防止できるが、強化しすぎると冷却帯出口で復熱による熱応力内部割れが生じ易く鋼種により最適なパターンを選ぶ必要がある。前述のように高炭素鋼については表面品質向上を優先して2次冷却を緩冷却化するとともに適正鋳造速度を選択することで表面欠陥および内部割れを防止している。

未凝固鋳片の矯正による内部割れを防止するためには鋳造速度 V_c

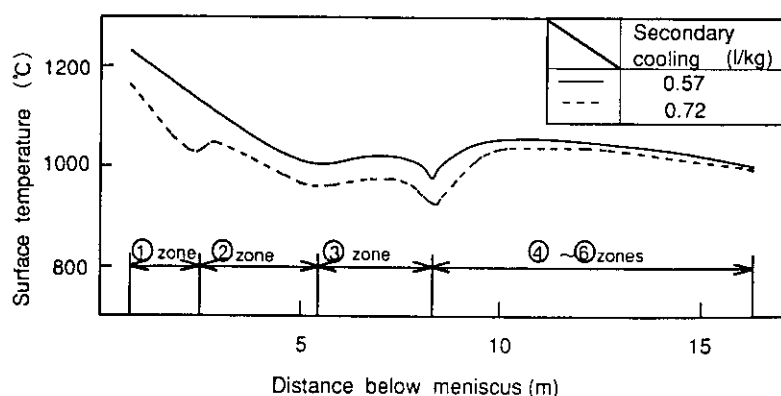


Fig. 7 Calculated bloom surface temperature for two cooling patterns

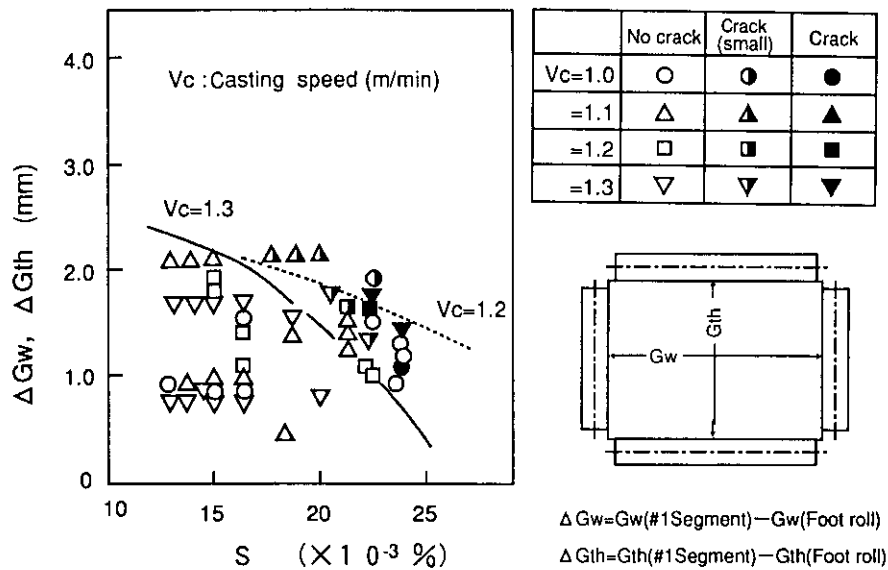
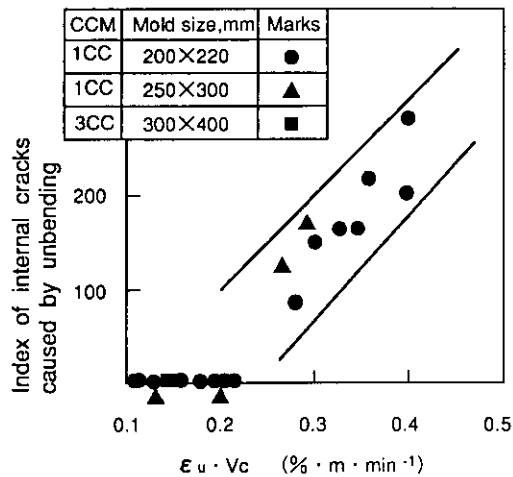


Fig. 8 Influence of miss-alignment and sulfur content on internal crack

Fig. 9 Influence of $\epsilon_u \cdot V_c$ on internal crack caused by unbending

と矯正歪 ϵ を限界値以下に管理する必要があり Fig. 9 に示すように $V_c \cdot \epsilon$ を 0.2 (%m/min) 以下とするように各連鋳機毎に定めている。

4.3 ザク、中心偏析防止技術

ザク、中心偏析の改善のために、3 CC に連続鍛圧設備を設置し大きな効果を得た¹¹⁻¹⁶⁾。

連続鍛圧は Fig. 10 に示すように連鋳鋳片をその凝固末期に大圧下し、最終凝固部を強制的に形成することにより、静的な凝固では不可能であった中心偏析の制御を行うものである。圧下は、テーパ付きの金型を一定周期で往復運動させて行っている。設備の仕様を Table 2 に示すが、電動モーターによって駆動されるクランク軸の回転により、4 ストランドを位相を変えて順次圧下する構造である。さらに圧下量の設定は位置決めシリンダーにより、ストランド毎に設定可能な構造とした。このような方式により設備本体は非常にコンパクトになり既存の連鋳機への設置が容易となった。またモーター、減速機が 1 台ですむことからエネルギー効率のよい圧下が可能となった。

連続鍛圧法を適用した鋳片のマクロ組織を Photo 1 に示す。鋳片の圧下条件を変えて連続鍛圧した高炭素鋼 ($C = 0.81\%$) 鋳片の L

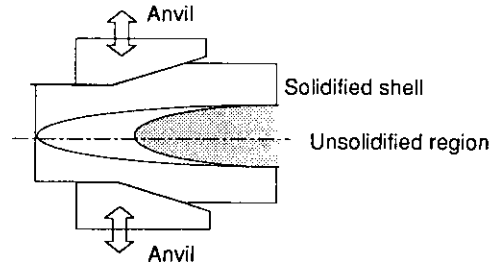


Fig. 10 Concept of continuous forging process

Table 2 Main specifications of continuous forging facilities

Bloom size (mm)		400 × 560
Number of strand		4
Casting speed (m/min)		0.4 ~ 0.6
Forging	Machine type	Electric motor driven crank mechanism
	Distance from meniscus (m)	26
	Amount of reduction (mm)	Max.150

断面マクロ組織である。圧下により従来材で見られる V 状の偏析線は軽減され、センターポロシティは解消されている。また鋳片の中心部の組織は連続鍛圧により著しく微細化、均質化されている。さらに圧下条件を制御することにより中心部の偏析度をコントロールすることが可能であることがわかった。

Fig. 11 にドリル分析による鋳片の中心部のカーボン偏析率 (C/C_0 , C_0 :母液鋼の分析値) と圧下量/未凝固厚の関係を示すが、適切な圧下制御によりブルームの中心部の成分コントロールが可能なが示されている。

これらの効果は鋳造温度 (タンディッシュ内溶鋼過熱温度) が高い状態で得られており本プロセスの適用により、従来中心偏析対策として一般的に行われていた低温鋳造が不要となり鋳片の清浄性も

Sample	Conventional	Continuous forging			
		A	B	C	D
Unsolidified thickness (mm)	—	28	44	80	104
Solid fraction	—	0.92	0.87	0.75	0.65
Segregation (C/C ₀)	1.18	0.94	0.91	0.85	0.76

Steel grade; C 0.81, Si 0.19, Mn 0.81(%)

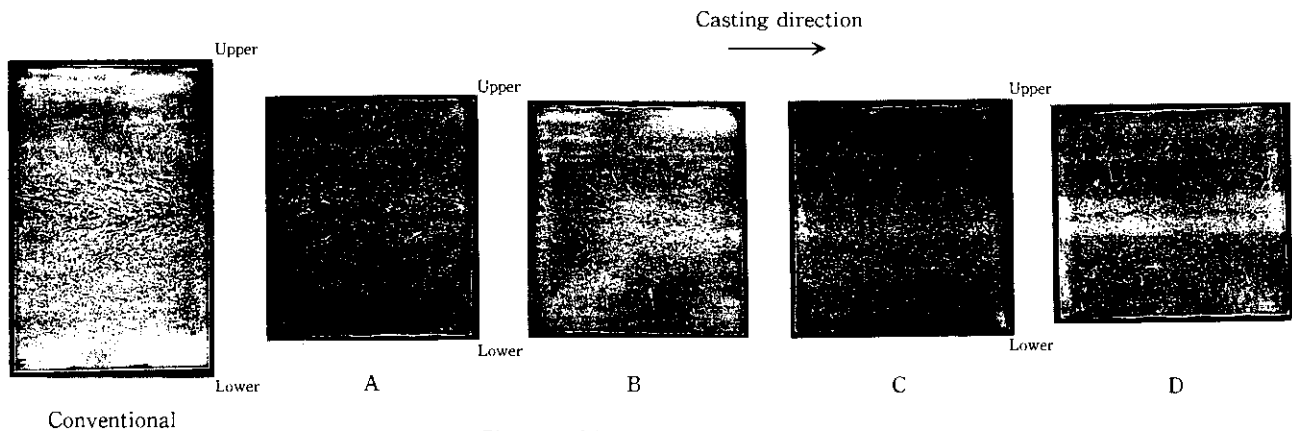
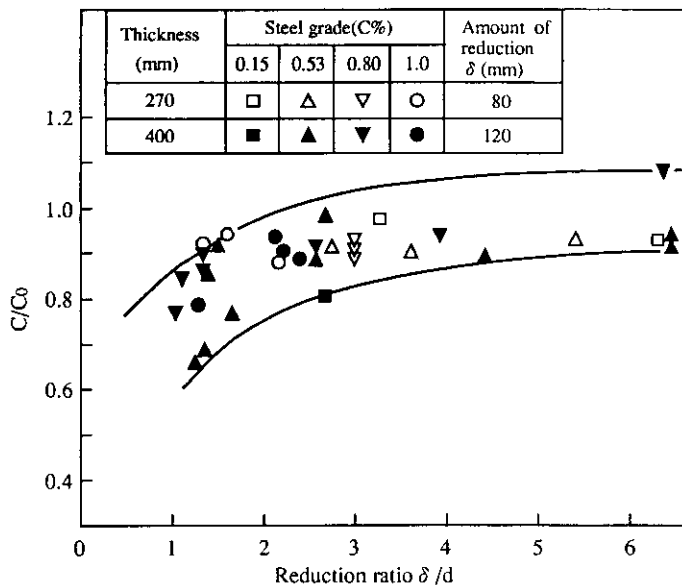


Photo 1 Macro structure of forged blooms

Fig. 11 Effect of reduction (δ/d) on centerline segregation (δ ; amount of reduction, d ; thickness of unsolidified region)

大きく改善された。

4.4 連続鍛圧による製品特性の向上

連続鍛圧は中心偏析の軽減、ザクの解消に大きな効果があるが、以下に連続鍛圧を用いた製品特性の向上についてのべる。太径丸棒に残存するザクは、用途により、その後の加工途上もしくは加工後の製品において欠陥となることが多い。このため、製品で超音波探

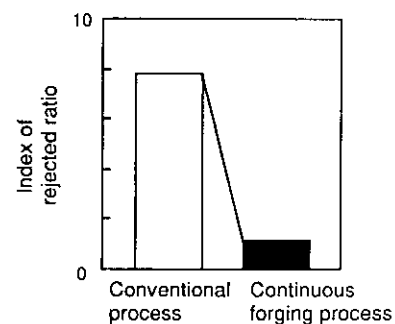


Fig. 12 Improvement of inside scabs on 9% Cr seamless tube

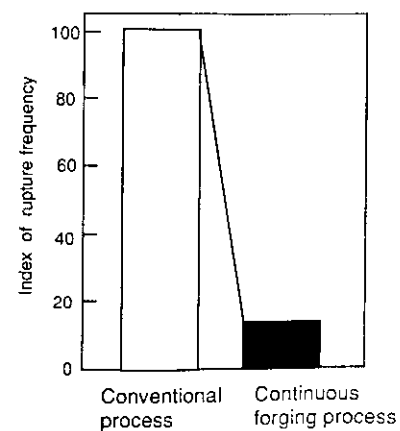


Fig. 13 Improvement of rupture frequency at drawing process by continuous forging process

傷を実施しているが、不良品として格落ちすることがあった。従来はこの問題を解決するため、圧延で鍛錬成形比の大きい造塊鋼塊から製造する必要があった。たとえば、シームレスパイプ用9%クロム鋼がその例である。Fig. 12 にシームレスパイプ用9%クロム鋼の造管成績を示した。素材のザクが解消された結果、内面かぶれの発生率は著しく改善された。また、軸受け用素材において連続鍛圧を実施することにより中心偏析を軽減でき、その製品特性である転動疲労寿命は大幅に向上した。さらに高炭素線材用素材の断線率も連続鍛圧によって中心部の成分を負偏析側に制御することにより大幅に向上した。Fig. 13 に線材における断線率を示すが、従来材に比べ、約 1/10 に減少している。

5 結 言

大量溶銑予備処理、上底吹き転炉におけるキャッチカーボン技術、極低酸素化技術の確立などの精錬プロセスの改善により高い清浄度を有する素材の製造体制を確立した。さらに連鑄における連続鍛圧プロセスなど鑄片品質向上および造り込み技術により優れた特性を有する高品質線棒素材の製造体制を確立した。今後さらに需要家における工程省略などコストダウンに寄与することを目的としてプロセスの改善、製品特性の向上を進めていく。

参 考 文 献

- 1) 飯田義治, 岡野 忍, 新庄 豊, 児玉正範, 上田徹雄, 上杉浩之: 川崎製鉄技報, 12(1980)3, 428
- 2) 大井 浩, 浅川貞男, 福永修正, 田村寿恒, 中川康弘: 川崎製鉄技報, 10(1978)1, 70
- 3) 飯田義治, 大西正文, 上田徹雄, 岡野 忍, 新庄 豊: 鉄と鋼, 67(1981)8, 1269
- 4) 市原 晃, 久保田和雄, 丹野栄一, 石亀公夫, 佐藤貞夫: 川崎製鉄技報, 12(1980)3, 531
- 5) 得丸豊久, 中西輝行, 児玉正範, 山崎順次郎, 大杉賢三: 鉄と鋼, 72(1986), A 211
- 6) 水藤正人, 相沢完二, 有吉政弘, 永井亮次, 西川 廣, 大宮 茂: 川崎製鉄技報, 22(1990)3, 143
- 7) 飯田義治, 江本寛治, 小川正勝, 増田康男, 大西正文, 山田博右: 川崎製鉄技報, 15(1983)2, 126
- 8) 名村夏樹, 反町健一, 前田瑞夫, 新庄 豊: 鉄と鋼, 72(1986), S 1008
- 9) 桜谷敏和, 江見俊彦, 武 英雄, 江本寛治, 越川隆雄: 川崎製鉄技報, 12(1980)3, 441
- 10) 江本寛治, 児玉正範, 深井 真, 野崎 努, 吉門照幸: 川崎製鉄技報, 9(1977)3, 121
- 11) T. Fujimura, S. Takada, T. Mastukawa, H. Mizota, and S. Kozima: 75 th Steelmaking conference proceedings, AIME, Tronto, 1995, 907
- 12) 鍋島誠司, 中戸 参, 藤井徹也, 櫛田宏一, 溝田久和, 藤田利夫: 鉄と鋼, 79(1992)4, 479
- 13) 小島信司, 溝田久和, 櫛田宏一: 川崎製鉄技報, 26(1994)1, 1
- 14) 馬田 一, 数主文夫, 松川敏胤: 川崎製鉄技報, 26(1994)1, 13
- 15) 藤村俊生, 櫛田宏一, 溝田久和, 松川敏胤, 小島信司, 山崎久生: 材料とプロセス, 2(1989)4, 1166
- 16) 小島信司, 今井卓雄, 溝田久和, 藤村俊生, 松川敏胤: 鉄と鋼, 78(1992)12, 1794