

日本鉄鋼業における独自技術の開発と現在-20

CO₂削減に貢献する圧延技術の発展

Development of Rolling Technology That Contributes to Reduction of Carbon Dioxide

辻本 敏
Satoshi Tsujimoto
大同特殊鋼(株) 鋼材技術部長

1 はじめに

産業革命以降の化石燃料使用量増加に伴い大気中のCO₂が増加し、現在地球規模での温暖化防止が叫ばれている。

我が国では、石油危機以降の省エネ努力により、製造業は世界最高水準のエネルギー効率を達成しているが、2005年2月発効の京都議定書目標達成計画において、2008～2012年度の平均CO₂排出量を、1990年対比6%削減という目標値が掲げられた。

これに対し、日本鉄鋼連盟でも、日本鉄鋼業は2010年度におけるエネルギー使用量を1990年度対比10%削減する目標が掲げられ、棒・線圧延においても、各社共に省エネに取り組む、着実に効果をあげてはいるものの(図1)、未だ高エネルギー消費産業であり、更なる改善が求められている。

CO₂排出原単位の定義は、「CO₂排出量/ユーザー製品生産量」である。このうち、CO₂排出量の低減については、我々メーカー側での投入エネルギーを極小化することが肝要であり、後者の製品生産量を極大化については、メーカーのみならず、ユーザーをも含んだ一貫歩留の向上が求められる。

棒・線圧延におけるCO₂削減の技術としては、リジェネ

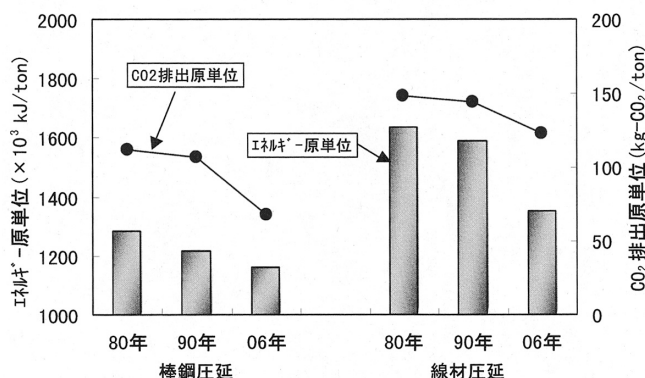


図1 棒・線圧延におけるエネルギーとCO₂排出原単位推移

バーナー導入や、重油からLNGへの燃料転換等の省エネルギー設備・操業の導入による投入エネルギーの削減や、V添加非調質鋼に代表される材料開発による工程省略・短縮等¹⁾に、各社共に改善を行ってきた。更に、圧延技術の発展により、ユーザーサイドでの歩留向上、工程省略を実現、CO₂削減に効果を発揮している(表1)。本稿では、製品生産量の極大化としてフレキシブル圧延技術を、またCO₂排出量の極小化として制御圧延による工程短縮・省略技術について述べる。

2 フレキシブル圧延によるCO₂削減効果

2.1 フレキシブル圧延技術の変遷

'80年代に入り、自動車メーカーを中心に、切削加工の省略や材料歩留向上による製造コストの低減を図るため、ネットシェイプ、ニアネットシェイプの冷間もしくは温間鍛造といった精密鍛造工法が積極的に採用された。このプロセスの素材として、ピーリング材代替となる精密圧延材が要求され、精密圧延技術開発競争が始まった。'80年代中盤から後半にかけて、ユーザーの工程省略のニーズに応えるべく、サイジングミルが開発され、精密圧延が可能となった。更に、精密圧延ニーズと合わせて、ユーザーでの製造コスト低減(歩留向上)のために、中間サイズにおける精密圧延材が要求される方向に拡大してきた。

表1 棒・線圧延におけるCO₂排出原単位低減技術の例

	目 的	代表例
メーカ	CO ₂ 排出量極小化	省エネ設備導入・操業 リジエバーナー レキューレーター エネルギー転換
	工程省略・短縮	熱処理省略鋼の開発 制御圧延による軟質化
ユーザ	製品生産量極大化	歩留向上 フレキシブル圧延による ニアネットシェイプ化
	加工工程削減	

その中、精密圧延を可能にしたサイジングミルのロール隙を調整し、超精密・セミ精密圧延が同一孔型でどこまで可能であるか、というサイズフリー圧延の概念が生まれ、2ロール法・3ロール法・4ロール法と各社独自に開発した。こうして、自動車産業の工程省略ニーズに端を発した「精密圧延技術」は、「フリーサイズ圧延」および「マルチサイクル・小ロット圧延」を加えた「フレキシブル圧延技術」として進歩・発展した。その変遷は、棒鋼圧延の精密圧延から始まり、更に精密圧延+サイズフリーと発展し、線材圧延におけるフレキシブル圧延として確立するのである（表2）。

2.2 棒鋼圧延における精密圧延・フリーサイズ圧延の発展

前述した様に、フレキシブル圧延技術は、棒鋼における精密圧延材の要求がスタートであり、その後フリーサイズ圧延へと発展していくのであるが、それ以前の圧延法では、圧延可能なサイズが制限され、また作業効率も悪かった。基本的な方法は、各サイズ専用の孔型が配置されたロールを数種類保有し、そのロールの組み合わせ（系列）を替えることで、サイズの造り分けを行うというものである。そのため、ロールの組替え作業が必要である、多数のロール在庫が必要となる等の理由により、保有できる孔型数には制限があり、圧延可能なサイズはせいぜい1mm飛びで、中間サイズについては需要の多い一部サイズのみ孔型を保有する程度であった。

これに対し、サイジングミルでは、1つの孔型を、順にサイズアップして改削（例 $\phi 31 \rightarrow \phi 32 \rightarrow \phi 33$ ）していくことで、孔型の統一が可能となり、またロール隙間を調整することでフリーサイズ圧延を実現した（表3、図2）。棒鋼圧延におけるサイジングミルの例として、2ロールサイジングミル及びKocks式圧延機を2.2.1及び2.2.2項にて紹介する。

2.2.1 2ロール圧延法

2ロールサイジングミル（バーSM）³⁾は、水平・垂直・水平または垂直・水平・垂直の3スタンドを同一コモンベース上に載置し、固定したコンバインドハウジング型である。

压下・アキシャル調整機能を有し、剛性を高めるため、比較的径大ロールを使用したシングルカリバーロールを採用している。さらに、スタンド間を極力近づけ、材料の捻転を防止することによって、ガイドレス圧延を実現した。

各スタンド間は、1モータにより共通駆動されており、パスシーケンスは、〇—〇〇〇方式（入側材料形状、丸で、丸孔型3パス成形）で減面率に見合った速度比選択が可能となっている。

2ロールサイジングミルの外観を写真1に、フリーサイズレンジの圧延例を図3に示す。

2.2.2 3ロール圧延法

3ロール圧延法は、コックス（Kocks）式またはプロペルチ（Properzi）式圧延機として、タークスヘッドあるいは3

表3 従来圧延法と2ロールサイジングミル圧延法の比較

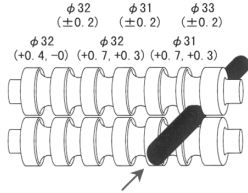
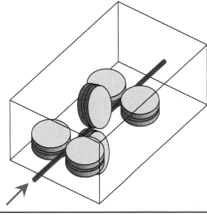
	従来圧延法	2ロールサイジングミル圧延法
圧延イメージ		
孔型配置	1本のロールにサイズ毎の専用孔型を複数配置。ロールを組替える事でサイズ造り分け ⇒ロール在庫増	1本のロールに1個の孔型を配置。順に改削してサイズUP （例： $\phi 31 \rightarrow \phi 32 \rightarrow \phi 33$ ） ⇒ロール在庫Min
圧延シーケンス 寸法精度	丸孔型1パスで成型 ⇒压下調整代が小さく寸法精度低い	丸孔型3パスで成型 ⇒压下調整代が大きく精密圧延可能
サイジング レンジ	寸法調整可能範囲約0.1mm 保有孔型：1mm飛び	寸法調整可能範囲約1mm ⇒フリーサイズ圧延

表2 棒・線圧延でのフレキシブル圧延技術・サイジングミル導入の変遷²⁾

工程	フレキシブル圧延技術		82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	
棒鋼圧延	多サイクル圧延		1サイクル/M				2サイクル/M				3サイクル/M									
	精密圧延	2ロール法	てきすん（20-R×3Hス）										AGC							
			←サイジングガイド法																	
		3ロール法	仕上7" ロックPSB（30-R×3Hス）										PSB＋中間列7" ロック（30-R×7～10Hス）							
													仕上7" ロックSFB（30-R×5Hス）							
	フリーサイズ圧延	2ロール法											RSB（30-R×4～5Hス）→							
			てきすん（20-R×3Hス）										てきすんCSMシステム							
													→ 系列圧延							
													RSB							
		3ロール法																		
										KS（40-R×2Hス）										
線材圧延	精密・フリーサイズ圧延	2ロール法											→ 系列圧延							
													ロット てきすん （20-R×2Hス×2システム）							
		4ロール法																		
													ロット KS							

ロールストレッチレデューサーを参考に開発され、国内では、主にコックス型3ロールサイジングミルが導入されている。

その構造は、3本のディスク状のロールが120°の角度をもってコンパクトに組み込まれており、この圧延機をサイジングとしては、3～5台を交互に天地を逆にして配置し、1式のプロック圧延機を形成するのが一般的である。3ロール圧延機には、3本のロール隙を調整するタイプと非調整型のタイプがある。調整式は寸法微調整、フリーサイズをしや

すく、現在では主流となっている。その代表例として、RSB^{4,5)}：Reducing Sizing Blockの構造図を、図4に示す。

2.3 線材圧延におけるフレキシブル圧延

サイジングミル開発以前の線材圧延では、棒鋼同様、基本的に各サイズの専用カリバーであり、圧延可能サイズは保有するロール数で決定されていた(図5)。 $\phi 20$ mm未満では0.5 mm飛びが一般的であり、中間サイズを使用するユー

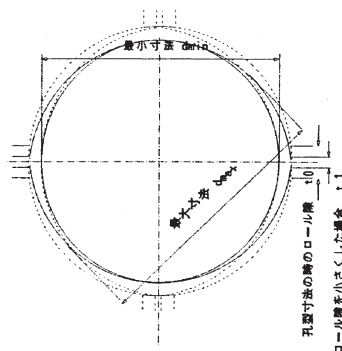


図2 2ロールサイジングミル ロール調整量と偏径差

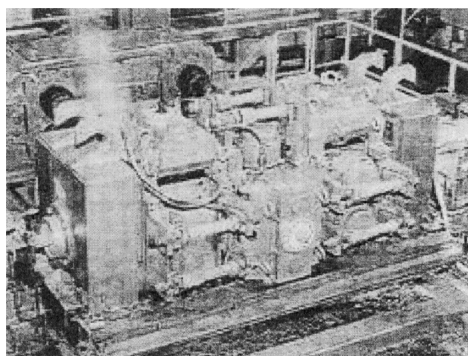
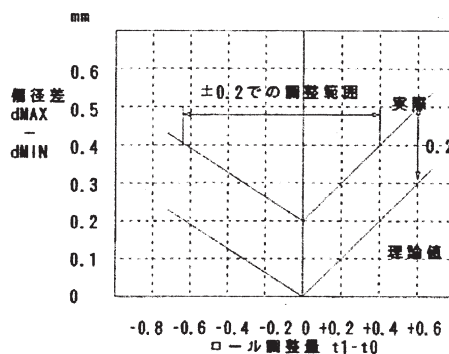


写真1 2ロールサイジングミル外観

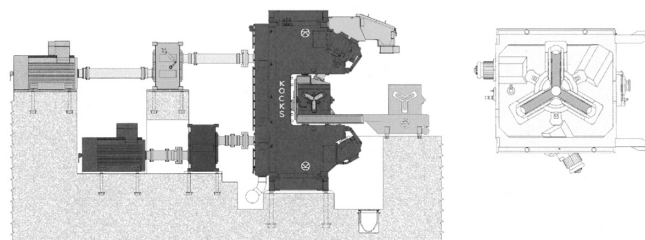


図4 3ロール式サイジングミル (RSB) 構造

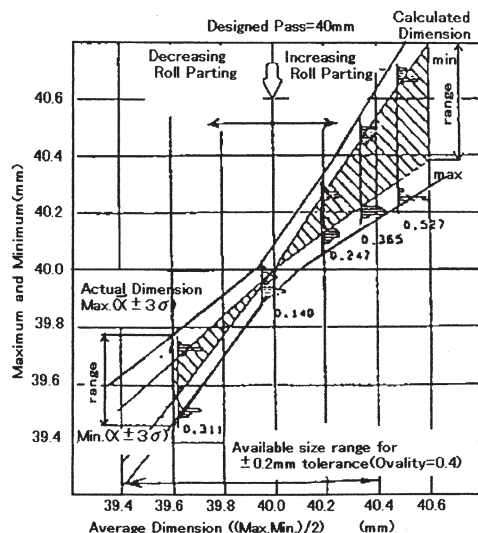


図3 パーSMフリーサイズ圧延実績

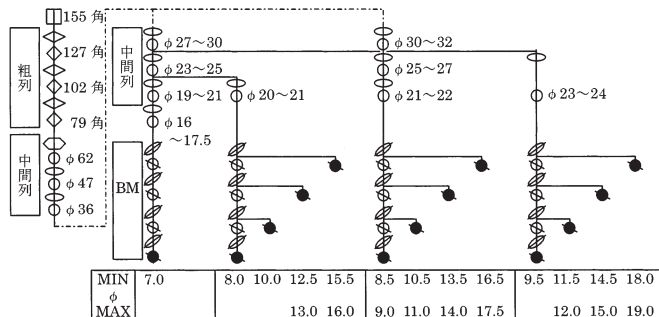


図5 サイジングミル開発以前の線材圧延ローリングスケジュール例

ザーは、近いサイズのものを線引き加工する事でサイズ調整を行っていた。

一方、フレキシブル圧延が確立された現在では、0.25 mm 毎にサイジングミルのカリバー(孔型)を保有しており(図6)、更に調整により0.1 mm 未満での造り込みが可能である。これによりユーザー要求サイズそのものを供給可能となる。

例として、ユーザー要求がφ 12.2の場合、従来の圧延ではφ 12.5からの線引き加工が必要であったが、フリーサイズ圧延では要求サイズそのものを供給できるため、線引き工程省略となり、エネルギー削減の効果(80 kg-CO₂/t程度)が発揮されている。

線材圧延におけるサイジングミルの例として、CSM 及びRSM を2.3.1及び2.3.2項にて紹介する。

2.3.1 CSM法によるフリーサイズ圧延

CSM⁶⁾ (Compact Sizing Mill) の外観と特徴を写真2と表4に示す。

棒鋼では3ロール式圧延機が主流であるが、線材ではその高速圧延が故に、油膜ベアリングを使用した、Veeブロックミルタイプと同様な2ロールキャンチレバータイプが主流である。CSMは2スタンドで1ユニットを構成し、これを2ユ

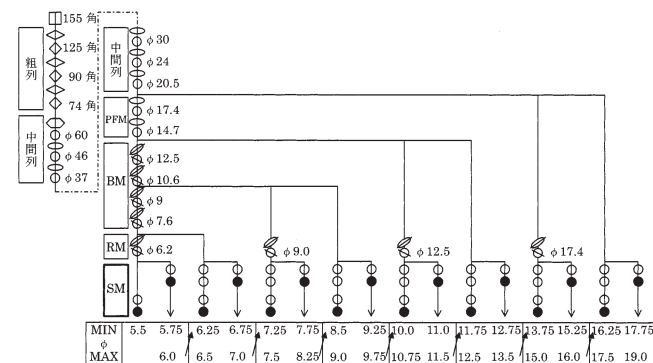


図6 フレキシブル圧延確立後の線材圧延ローリングスケジュール例

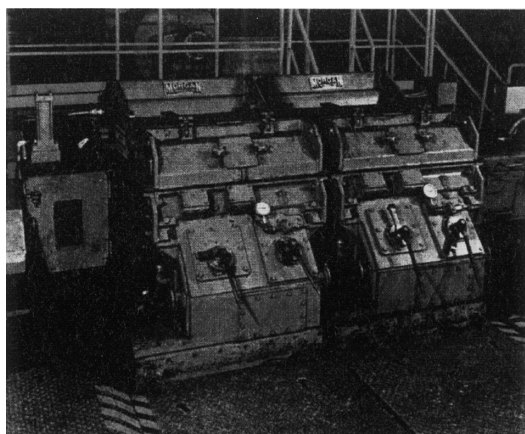


写真2 CSM外観

ニットタンデムに配置している。ロール径とスタンド間距離は、共に150 mmであり、スタンド間距離を接近させることによりガイドレス圧延を可能とした。また、ロールギャップ調整式にすることによりサイズフリー圧延も可能としている。精密圧延材の一例を図7に、フリーサイズ圧延の圧延例を図8に示す。

表4 CSM仕様

Item	Specification
Name	150CSM
Type	2 roll H-V cantilever
Roll dimension	Φ 150 x 45 L
Rolling speed	Max. 120m/s
Pass design	Round-Round (Guide less)
Distance between stands	150mm
Motor capacity	1500kw 550/1200rpm
Rolling size	Φ 5.5~Φ 19

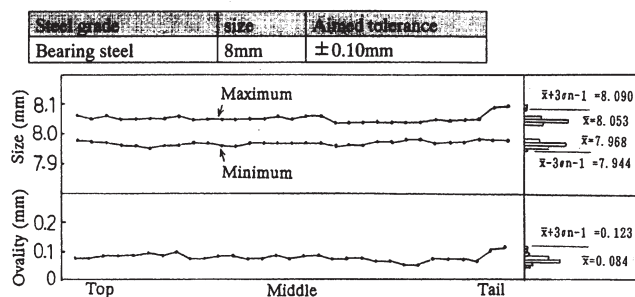


図7 CSM精密圧延実績

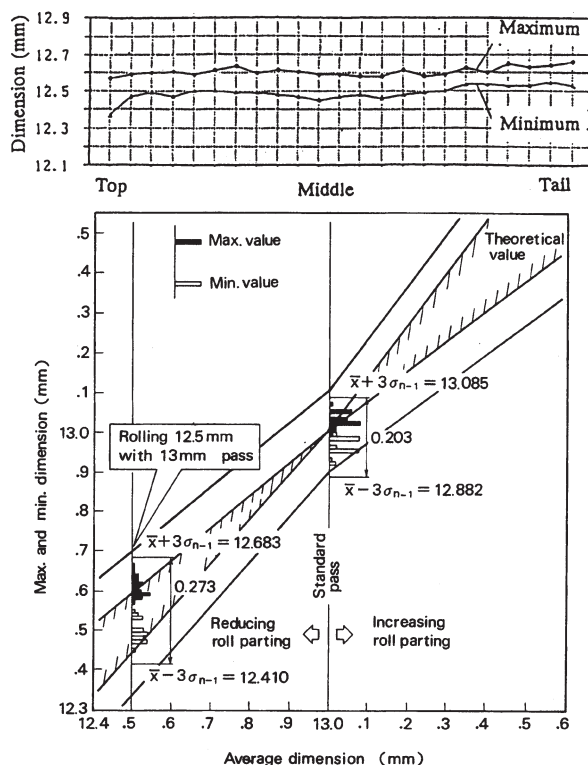


図8 CSMフリーサイズ圧延実績

各スタンド間の速度差は、多段式減速機により数段の変速が可能であり、この減面率の組み合わせ及びパスシーケンスによりブロックミルの2パスリダクション範囲をカバーし、ブロックミルの孔型1系列化を達成している。

図9に1系列化を達成したミルレイアウトを示す。このミルは太サイズ用のサイジングミルもタンデム配置され、全サイズにわたり1系列で精圧・フリーサイズ圧延が行われていると共にダブルアウトレット法も採用されており、フレキシブルな圧延が可能となっている。

2.3.2 RSM法によるフリーサイズ圧延

RSM^{7,8)} (Reducing Sizing Mill) の外観を写真3に示す。
形式は、CSMと基本的に変わらないが、前段の#1ユニットは、減面率範囲が21～41%/2パスのガイド圧延、後段の#2ユニットは、同8～21%のスキンパス圧延である。よって、CSMの様な2パス仕上はなく、全サイズ4パス仕上となる。低減面率による異常組織（低歪誘起起因による表層直下の異常粗粒の発生）を回避すべくCSMの減面率がMIN 14%に対し、#1ユニットの高減面率での累積歪を活用し、#2ユニットの最小減面率を8%としたことで精密圧延に対しては優位であるが、ガイド圧延によりフリーサイズ圧延には、難点がある。#1ユニットはUHD (Ultra Heavy Duty)仕様であり、制御圧延効果も組み合わせている。CSMとRSMを比較し表5に示す。各社目的に応じてそれぞれ採用

されている。

3 製品プロセスの改善によるCO₂削減効果

3.1 制御圧延による工程省略・短縮

製品プロセスにおいて、低エネルギー操業となり得る改善、またはプロセスそのものを省略する事は、CO₂削減に直結する技術であり、圧延における代表技術として、制御圧延による熱処理工程の省略・短縮が挙げられる。

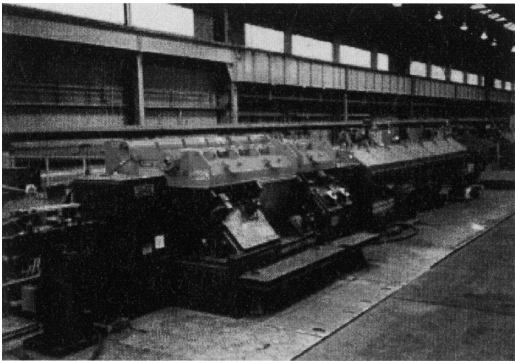


写真3 RSM外観

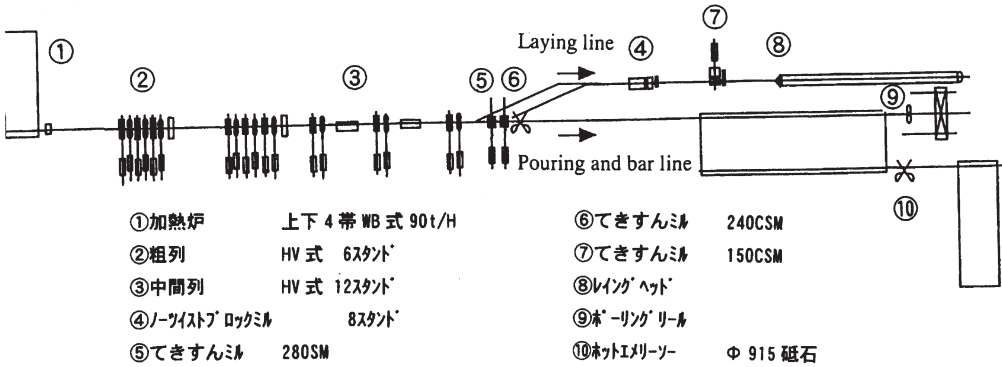


図9 ミルレイアウト（一系列化）

表5 CSM及びRSMの特徴比較

区分		CSM法	RSM法
基本スケジュール (2ユニット)			
パス スケ ジュ ール	駆動・変速方法	1 モーター駆動 4 段変速, 変速比選択	
	使用 方法	1ユニット1セットまたは2ユニット 1セットの組合せ使用	2ユニット4パス1セット単位 での使用
	長 所	広圧下域圧延 (BM1系列) ガイドレス可能	精密圧延向き
	短 所	2パス仕上材は減面率偏差吸収 余地少ないので多段変速必要	1パス目はガイド必要 フリーサイズ対応には多ユニット必要

3.2 焼ならし・焼なましの省略

制御圧延の代表的な例として、焼ならし省略がある。従来、構造用炭素鋼および合金鋼の圧延のままの状態は、一般に組織が粗く、硬さも不均一であって、切断、切削、冷間加工性、および靱性改善のため、焼ならし処理が施されていた。これに制御圧延を適用し、圧延終了時のオーステナイト粒を焼ならし処理による結晶粒度にあうように、圧延中および圧延後の冷却速度をコントロールすることによって、直接得ることが可能となった⁹⁾。

熱間線材圧延において焼入れ性の高い強靱鋼は圧延のままでは硬いペーナイト組織となるため一般的には2次加工工程で軟化焼なましを実施している。これに制御圧延・制御冷却を適用することで軟化焼なましを省略することが可能となった。

圧延材を軟化させるためには制御圧延によるオーステナイト結晶粒微細化(図10)と、圧延後冷却速度を遅くすることが必要である。制御圧延は微細で均一なオーステナイト粒を得る上で重要であり、オーステナイト粒微細化によりフェライト・パーライト変態が促進され、柔らかいフェライト・パーライト量が多くなることから圧延材の引張り強さが低くできるとともに、結晶粒微細化により過冷組織の出現臨界冷却速度を上昇することができる。図11に圧延温度の影響を示す¹¹⁾。圧延仕上げ温度を下げることで、軟質化への効果が大きい。また、図12に圧延温度と冷却速度の影響を示すが、冷却速度を0.25℃/s以下にすることで焼なまし省略可能な棒鋼が製造できる^{12, 13)}。

3.3 軸受鋼 制御圧延による球状化焼なまし時間短縮

軸受鋼は1% C - 1 ~ 1.5% Cr からの組成を基本とした鋼種であり、その使用にあたっては固有の熱処理が必要となる。軸受鋼は単純な焼入れ焼戻し処理により高い硬さとマル

テンサイト中に炭化物が微細に分散した組織が得られることから、ベアリングに必要とされる、高接触圧でわずかな滑りを伴う転動負荷や衝撃負荷に耐える性質と寸法の安定性を得ることができる。しかし焼入れ焼戻し処理後の硬さ、組織に対しては焼入れ前の炭化物の形態が極めて大きな影響を及ぼすことから、焼入れ前の炭化物の形態を厳密にコントロールすることが最終の軸受製品の特性に対して重要な問題となっている。当節では圧延での組織制御(擬似球状化組織)による球状化焼なまし(以下SAと称する)の在炉時間短縮(以下時短と称する)によるCO₂排出量低減効果について述べる。

3.3.1 軸受鋼時短SAの考え方

軸受鋼は連続 casting によるブルームや、インゴット造塊時の凝固において、巨大共晶炭化物(巨炭)が存在しており、分塊圧延時にソーキングを行い、巨炭の拡散を行う。分塊圧延後の鋼片段階では、初析セメンタイト+層状パーライト組織を形成している。この鋼片を母材とし、線材圧延時に以下のプロセスにより、SA時間の短縮を行う(図13、写真4)。

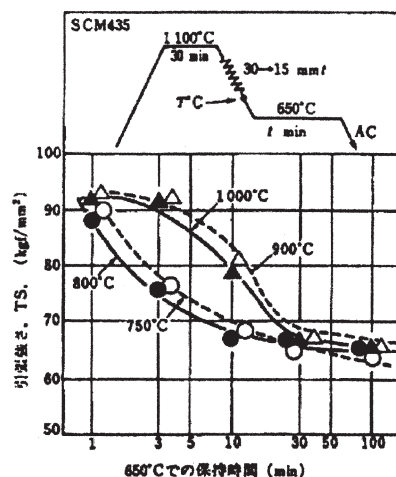


図11 圧延後のTSへの仕上げ温度と650℃保持時間の影響

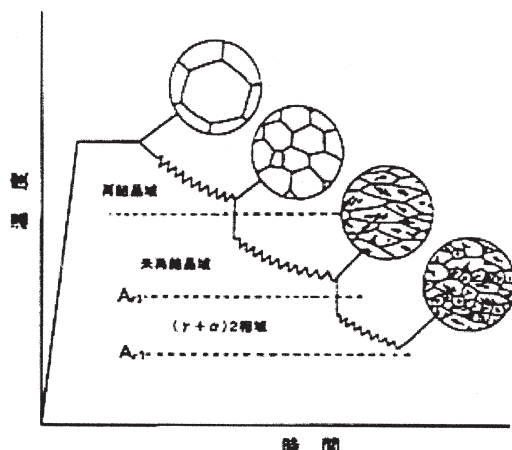


図10 制御圧延の3段階と粒組織¹⁰⁾

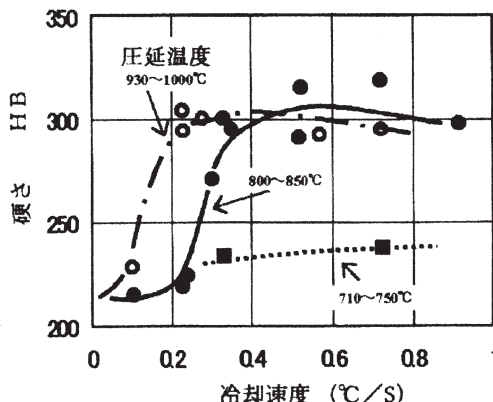


図12 SCM440棒鋼の圧延後硬さへの圧延温度、冷却速度の影響

- ①線材圧延時の温度をAcm点(880℃)以下に保ち、 $\gamma + \theta$ (セメンタイト)域2相圧延とすることで、初析セメンタイトを分断
- ②冷却時に、炭化物が核となり球状セメンタイトを形成(擬似球状化組織)
- ③通常圧延材対比、SA時の初析セメンタイト分断の時間短縮(昇熱・均熱期)＋歪蓄積効果による炭化物球状化促進(徐冷期)

3.3.2 軸受鋼制御圧延条件

圧延時の管理項目・基準は、前述したように温度をAcm点(880℃)以下に保ち、 $\gamma + \theta$ 域2相圧延とすることである。実際の圧延における圧延材の評価としては、硬度測定が一般的である。圧延時の温度と硬度の相関を図14に示す。

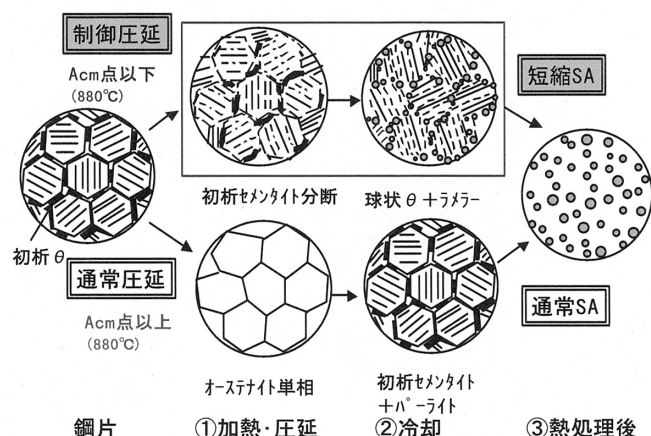


図13 軸受鋼制御圧延の考え方

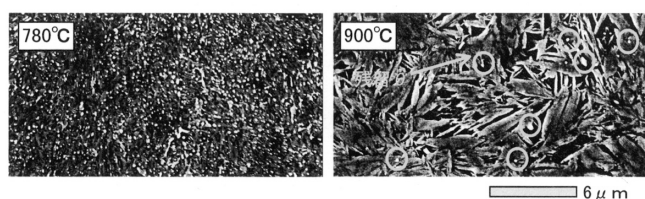


写真4 圧延過程における炭化物の残存状況(30sキープ後水冷)

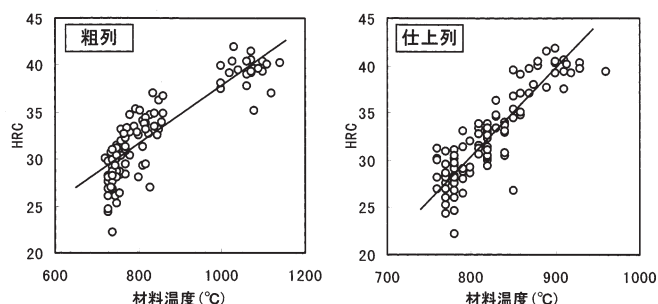


図14 圧延温度と圧延まま硬さ
材料温度は表層温度を示す。
実際の管理には内部との温度差の補正が必要

硬度を下げる(よりSA時間短縮する)ためには、より低温加熱・圧延が望ましいが、実際の操業では温度低下による圧延ロールへの噛み込み性低下、過冷による割れ、また圧延速度(加工熱)や水冷装置の有無等を考慮した上、各圧延設備毎に温度管理を行う必要がある。

3.3.3 SA時間短縮ヒートパターンの考え方と効果

セメンタイト分断に必要なエネルギーは擬似球状化状態に依存し、通常圧延での全面ラメラ組織(HRC40程度)では最も大きなエネルギーが必要となる。言い換えれば、時短SAで、目標SA組織を実現するためには、熱処理前組織(前述の圧延まま組織)での擬似球状化状態が大きく影響する。図15は、 $\phi 7$ mmの軸受鋼における、圧延まま硬さ(擬似球状化状態)とSA後硬さの相関を調査した結果である。擬似球状化が促進されている程、より短時間のSAで目標硬さを得られることがわかる。

図16に、代表的な軸受鋼のSAカーブと時短SAカーブの例を示す。どのパラメータをどれだけ短縮できるかは、SA前の擬似球状化状態や目標とするSA後の品質規格にもよるが、概ね40%程度の時間短縮が可能である。軸受鋼SAの一般的なエネルギー原単位(LNG+電力)は 2400×10^3 kJ/tであり、時短SAでは 510×10^3 kJ/tの低減が見込める。これはCO₂排出量に換算すると、約30 kg-CO₂/tの低減となる。

4 最後に

本稿にて紹介した技術以外にも、棒・線圧延の分野は、めざましい技術進歩を遂げてきた。それらは、多様化・高度化するユーザーニーズに対応し、原価低減するための進歩であったかもしれない。しかし、その影響の大小はあれど、こ

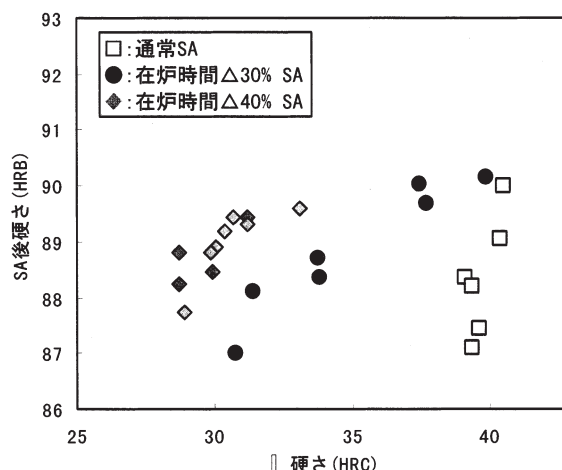


図15 圧延ままSA後硬さの関係($\phi 7$ mm)

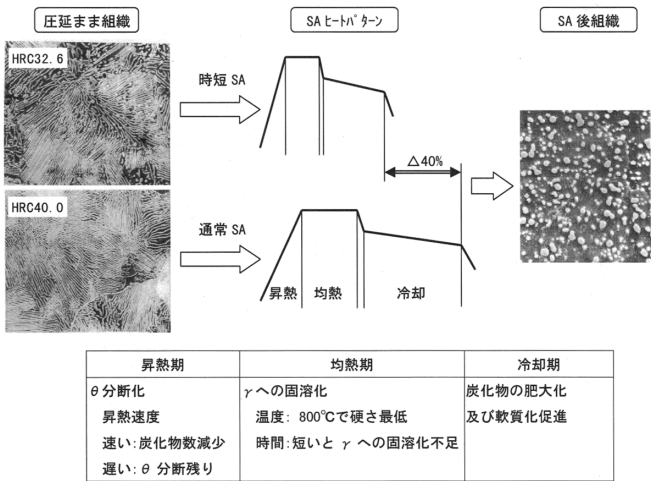


図16 代表的な軸受鋼SAと時短SAの例

これらの技術は、CO₂排出量削減を通して、環境を良化する効果を含んでいるものである。今後も、より環境改善を含む棒・線圧延技術の開発とスピード化を期待したい。

参考文献

1) 森達也，長瀬忠広，秦野敦臣：電気製鋼，69 (1998)，79.
2) 森達也：第169・170回西山記念技術講座，日本鉄鋼協

会編，東京，(1998)，165.
3) 佐々木健，長瀬忠広，春名孝行：材料とプロセス，8 (1995)，410.
4) W.-Jurgen Ammerling：Steel World，2 (1997)，1.
5) W.-Jurgen Ammerling：材料とプロセス，8 (1995)，418.
6) 森達也，佐々木健，長瀬忠広，山口桂一郎：鉄と鋼，81 (1995)，T53.
7) S. Mark Shore：Steel World，(1993)，2.
8) S. Mark Shore：材料とプロセス，11 (1998)，288.
9) 森達也，長瀬忠広，秦野敦臣：電気製鋼，69 (1998)，81-82.
10) 稲守宏夫，市田豊：棒鋼・線材圧延，日本鉄鋼協会，(2001)
11) 西田和彦，中里福和，稲葉真一，大谷泰夫：住友金属，36 (1986)，7，205.
12) 大庭哲哉，八塚隆，田辺孝治，高橋武志，笹本康雄，秋元純：CAMP-ISIJ，1 (1988)，837.
13) 内藤賢一郎，森俊道，田辺孝治，大庭哲哉，新保康広：CAMP-ISIJ，1 (1988)，839.

(2007年1月19日受付)