

(解説)

高強度鉄筋棒鋼製造のための高生産性圧延設備

High Production Capacity Steel Bar Mill of High Strength Steel Bars for Concrete Reinforcement



黒田直行*
Naoyuki KURODA



吉川宗雄*
Muneo YOSHIKAWA

Ultra high strength steel rebars have recently been developed for super high-rise reinforced concrete construction buildings. The rebars have mechanical properties exceeding those conventionally required by JIS. This paper introduces the rolling temperature in high productivity rolling equipment of ultra high strength bars, a necessary equipment specification and a way of updating from the existing facilities.

まえばき = 従来、高層建築といえば鉄骨造や鉄骨鉄筋コンクリート (SRC) 造が一般的であったが、鉄骨造と比べ地震や風に対して揺れが少なく、断熱性も高く、さらにコストダウンが図れる P 鉄筋コンクリート (RC) 造が検討されるようになった。しかし、RC 造の高層化では、耐震性や安全性を確保するために柱や梁の断面積が大きくなり、居住性を損なう上に建物の自重が増大することが問題となった。

そこで、旧建設省により、1988 年から 5 年をかけ、超高層化技術の開発と普及を目的とした「鉄筋コンクリート造建造物の超軽量・超高層化技術開発」という総合技術開発プロジェクト (以下、ニュー RC 総プロという) が進められた。さらに、高強度材料を使用した建築設計について、ゼネコン各社が共同で構造実験を行い、各種計算式の適合性を検証し、構造設計のガイドラインが策定された。

超高強度コンクリートと太径の超高強度鉄筋の製造技術の開発が進み、地震国の日本においても高さ 200m 級の超高層鉄筋コンクリート造建造物が建設されている。

こうした中、当社は超高強度鉄筋生産にかかわる圧延設備の納入に携わってきたのでその概要を紹介する。

1. 超高強度鉄筋

1.1 要求機械特性

鉄筋コンクリート用棒鋼 (以下、鉄筋バーという) は、JIS G3112 において異形棒鋼に対して降伏点 490MPa 級 (記号 SD490) までの 5 種類が規定されている。しかし、超軽量・超高層化 RC 造建造物に要求される超高強度鉄筋については JIS 規定の適用範囲外であったため、ニュー RC 総プロにおいてその機械的性質がつぎのように定められた。

1) 強度のばらつきが少ないよう、降伏強度の上下範囲

が狭いこと

- 2) 降伏後の変形能力が大きくなるよう、降伏比 (= 降伏強度 / 引張強度) が小さいこと
 - 3) 脆性破壊がないよう確実に降伏し、大きな降伏伸びを有すること (降伏伸び: 降伏後から硬化領域に入るまでのひずみ領域)
 - 4) RC 部材寸法が大きくなるよう、曲げ性能が高いこと (曲げ性能: 内側半径 = 公称直径 × 2, 曲げ角度: 90° でその外側に亀裂が生じないこと)
- 要求機械特性 1) ~ 3) 項を図 1 に模式化した。

	USD685A	USD685B
Tensile strength TS (MPa)	YP / 0.85	YP / 0.80
Yield point YP (MPa)	685 ~ 785	685 ~ 755
Yield ratio YP/TS	0.85	0.80
Break elongation (%)	10	10

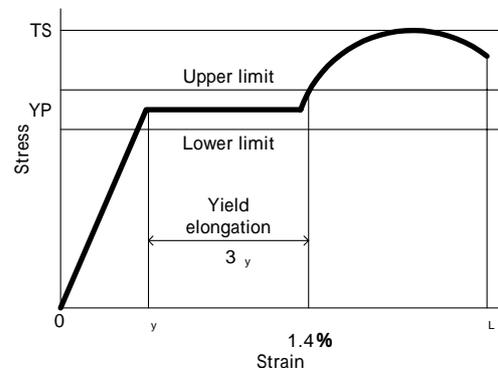


図 1 応力 - ひずみ曲線に見る高強度鉄筋のニュー RC 総プロ要求仕様

Fig. 1 Schematic stress-strain curve on quality requirements of bars in New RC project

*機械エンジニアリングカンパニー 産業機械事業部 重機械部

1.2 製造方法

前節の要求特性を満足する鉄筋バーを製造する方法として、以下のことが知られている。

- 1) 明瞭な降伏棚ひずみを確保するためには、フェライト+パーライト組織が必要となる。
- 2) 引張強度を高めるには、C量を増加しパーライト量を増加させるのが一般的であるが、延性・降伏棚ひずみ量を減少させる。高強度鉄筋の要件を満たすには、C量を極力抑えて、微細化フェライト量を増加させ延性を上げる必要がある。
- 3) 粒界を強化し、強度・延性両方に寄与するSi, V, Nbなどの合金元素を添加する。また、Nbの添加は再結晶の抑制に寄与することが知られている^{1),2)}。
- 4) 延性を高めるためには結晶粒の微細化が重要であり、再結晶を抑制するため、圧延温度、特に仕上げ温度を低くした制御圧延を行う必要がある。

高強度鉄筋の鋼組成については鉄鋼各社で研究開発され、その加熱温度や仕上げ温度と共に特許公開されている³⁾。

上記製造手法を実現するために圧延設備として配慮しなければならないのは、圧延中の材料温度コントロールが可能となるレイアウトや温度制御装置、さらにその圧延に適した圧延機と駆動装置を設計することである。

2. 圧延設備上の配慮

2.1 圧延温度挙動および制御

圧延中の材料の温度は、圧延加工熱・圧延ロールへの熱伝達・スタンド間での放熱によって変化する。

例として、全連続式圧延設備でD22とD38(Dは異形棒鋼/Deformed bar, 数字は概算直径mm)を時間あたり140tの能力で生産する場合の圧延温度挙動を図2に示す。圧延パス回数が多く、仕上げ圧延速度の速いD22では、素材であるピレット温度(加熱炉抽出温度)950に対して仕上げ温度は1,010まで上昇している。一方、圧延パス回数が少なく、仕上げ圧延速度の遅いD38では、ピレット温度950に対して仕上げ温度は950となっている。

結晶粒を微細化するためには、再結晶を抑制する温度で仕上げ圧延することが不可欠である。一方、今日の中小形普通鋼圧延設備のほとんどは、圧延材が複数の圧延スタンドで連続的に圧延される全連続式圧延設備となっている⁴⁾。この方式は大量生産に適しているが、圧延途中で圧延材を停止して温度調整をするなどの旧来の温度コントロール手法を実施できない。

この方式において、仕上げ温度を下げるためには、まずピレット温度を下げるのが考えられる。ピレット温度を850とした場合の圧延温度挙動を図3に示す。仕上げ圧延速度の遅いD38では、仕上げ温度が900となり、結晶粒の微細化が可能となる。一方、細径のD22では、ピレット温度を下げて仕上げ圧延速度が速く、圧延加工熱により温度が上昇するため、ピレット温度を下げて仕上げ温度は高くなってしまふ。仕上げ圧延速度を下げることも考えられるが生産性の低下を招いてしまふ。

よって、細径材の仕上げ温度を下げるためには、中間

列と仕上げ列の間に水冷装置を設置することが有効である。

図2,3と同じ条件で、仕上げ圧延の前に約10mの中間水冷区間を設置した場合のD22の圧延温度挙動を図4に示す。水冷によって材料の温度が約150下がり、生産性を低下させることなく仕上げ温度を900以下にすることができる。

前述のように、太径圧延ではピレット温度を下げて圧延することで対応できる。ただし、添加成分固溶化のための加熱温度や粗列の再結晶温度圧延の効用についての報告²⁾もあり、製鋼の成分設計によっては太径の仕上げ圧延前水冷も検討する必要がある。

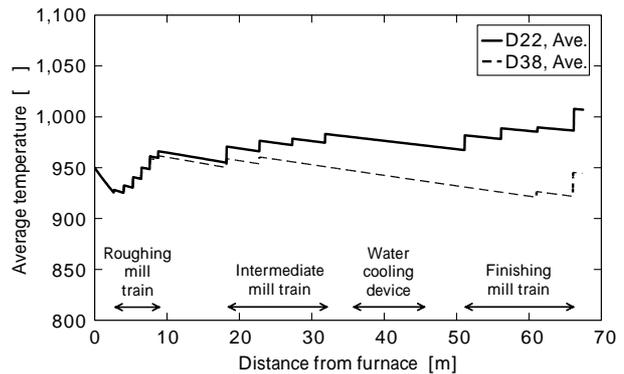


図2 D22及びD38の圧延温度挙動(ピレット温度950 水冷装置:不使用)

Fig. 2 Temperature curve of D22 and D35 under rolling (Discharged temp. from furnace: 950, Water cooling device: Non-using)

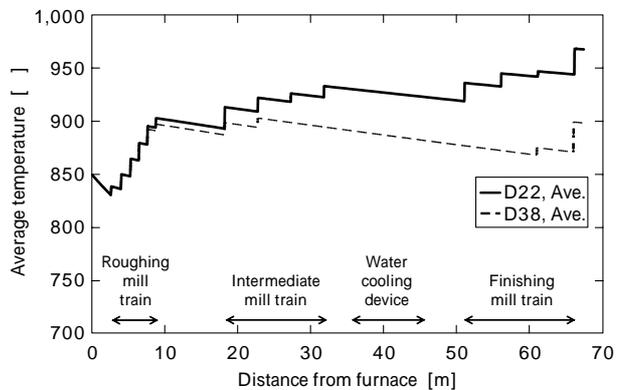


図3 D22及びD38の圧延温度挙動(ピレット温度850 水冷装置:不使用)

Fig. 3 Temperature curve of D22 and D35 under rolling (Discharged temp. from furnace: 850, Water cooling device: Non-using)

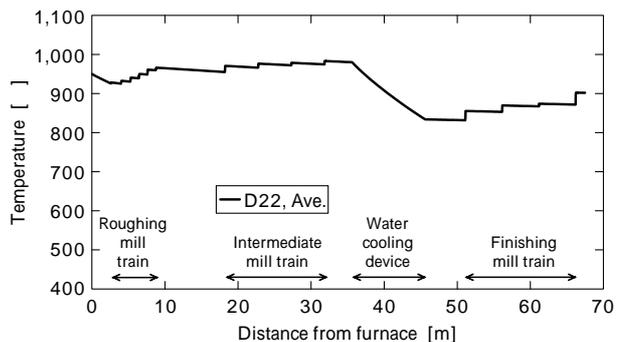


図4 D22の圧延温度挙動(ピレット温度950 水冷装置:全域使用)

Fig. 4 Temperature curve of D22 under rolling (Discharged temp. from furnace: 950, Water cooling device: All-using)

2.2 高負荷圧延

全連続式圧延設備では、ピレット温度と仕上速度によって圧延温度が決定されるので、通常の鉄筋バーの圧延操業においては、ピレット温度だけを管理し、駆動系が過負荷にならないようにしている。しかし高強度鉄筋圧延では、結晶粒微細化のため低温圧延が必要である。ピレット温度を下げて圧延した場合の駆動系の負荷増例を次に示す。

D38 について、仕上圧延前水冷不使用で所望の仕上り温度を得るため、ピレット温度を 850 まで下げた場合と通常の 950 とした場合の圧延トルクの比を図 5 に示す。

この場合には、粗圧延機では 30% 増、中間圧延機では 25% 増、仕上圧延機では 20% 増の圧延トルクが必要となる。実際には圧延機本体は、許容荷重やトルクの幅が広いので更新せずに済む場合もあるが、駆動装置（スピンドル、減速機、ミルモータ）の増強は必須となる。

また、図 5 には参考として圧延温度挙動の差も併記している。前述したように材料の温度は圧延加工熱の影響を受けるため、圧延パス回数が進むと圧延温度の差は小さくなる。つまり、仕上り温度を 50 下げるためにはピレット温度を 100 下げる必要があることを示している。

既存設備を増強するにあたって、休止期間を最短に効率よく進めるためには、綿密なエンジニアリングと工事計画が要求される。その一例は次章で紹介する。

2.3 ピレットの大断面化

太径サイズ（D41、D51）のニーズが増加するなか、品質の向上を図るためには、十分な圧延比（鋼片断面積を製品断面積で割った値）を確保しなければならない。

従来では、ピレット断面寸法 130mm 角程度が一般的であり、太径生産設備でも 150mm 角程度であった。一方、圧延比は一般的に 8 以上なければ製品に鑄造組織が残り、十分な強度が確保できないといわれている。

高強度鉄筋の品質を安定・向上させるためには、現状よりさらに大きな圧延比が必要となり、ピレットの大断面化が要求される。

既存設備においてピレットを大断面化するには、粗列の上流に圧延機を増設することで対応できる。しかし、既設設備レイアウトスペースを増設するためには、そのスペースに収まるコンパクトな粗圧延機が要求される。

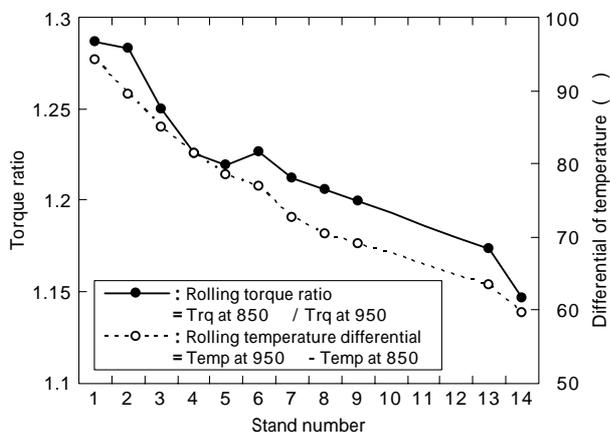


図 5 圧延温度と圧延トルクの関係

Fig. 5 Relation between rolling temperature and rolling torque

そこで当社はこれらのニーズにマッチした新型コンパクトミルを開発した。その新型コンパクトミルについて次章で紹介する。

3. 既存設備の高強度鉄筋生産仕様への更新例および設備の特徴

3.1 既存設備の更新例

鉄筋バーの 97% 以上が普通鋼電炉設備で生産されるが、既存設備の撤去・基礎工事・新規設備の設置を行うにあたっては、通常数カ月間の休止期間を必要とし、生産計画許容されるものではない。このため、操業休止を最小限にとどめて既存設備を更新することが求められる。また、工場敷地に制約があるなか、既存設備内に有効なスペースを見つけ、これを活用しながら設備配置と工事手順を検討することも必要となる。

このような条件のもとで既存設備を高強度鉄筋の生産設備にライン全体を更新する工事方法について以下に説明する。

3.1.1 圧延ライン

既存圧延ラインの操業を続けながら改造工事を行った例を図 6 に示す。

半連続式などの旧式圧延設備では、粗列の各スタンド間や粗列と中間列との間に十分な間隔があり、スタンド間隔の短いコンパクトミルである KOBELCO Compact Solid Mill (以下、KCS ミルという) を設置するのに十分なスペースである (図中の Original line)。

1st stage: 上記空きスペースに KCS ミルを設置。

2nd stage: KCS ミル立上げ後、不要となった既存ミルを撤去し、次のスタンドを設置。

3rd stage ~: 以降、順次新規に設置したスタンドを立上げ、次のスタンドを設置。

鉄筋バー設備で一般的な 16 スタンド程度の圧延設備であれば、このような工事を 4 ~ 5 回繰り返すことによって圧延ラインの更新を完了させることができる。

また、操業休止期間を最小限にするため、基礎構築やライン上以外の据付工事は、十分な安全対策を施した上で操業と並行して行う。特に、下記のような配慮を行った。

- 1) 仮設部材で誘導装置や作業床を支持する。
- 2) 工事と干渉する配管・配線は迂回させる。
- 3) 新設備の基礎は、仮設支持した機器より低いレベルに収まるように設計する。

3.1.2 冷却床・切断設備

高強度鉄筋生産設備への更新時に、製品の曲り・製品断面品質向上のため、冷却床・切断設備も同時に更新する需要もある。しかし冷却床は事前に基礎工事を施工することが困難であり、休止期間の制約からも、基礎流用を基本とした機器設計を行い、一回の切替工事で新設備に入替える方式を取る。

また、有効な空きスペースへコールドシャなどの切断設備を配置できない場合は、定修期間中に事前工事として可能な限り掘削・杭打ちなどの工事を行い、既存設備を仮受けして基礎を立上げていくことも検討する必要がある。

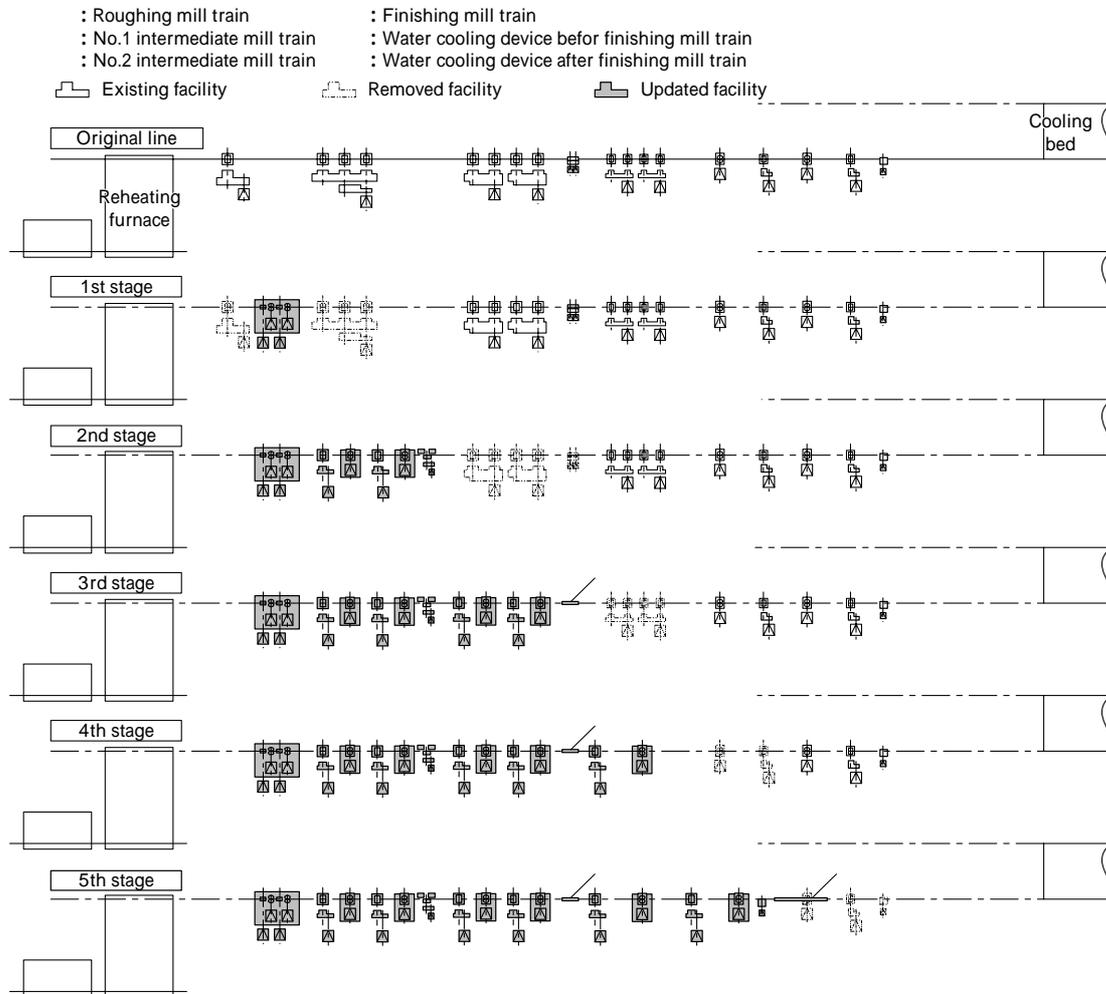


図6 操業を続けながら行った改造工事

Fig. 6 Schematic drawings of revamping construction without stopping operation

3.2 New KCS ミル

KCS ミルは、半連続式粗列圧延機の HV 連続圧延化と粗列での圧延温度低下防止を目的に、1983 年に開発した粗列用コンパクトミルである。4 ~ 6 台のスタンドを一台の台車に搭載して間隔を短縮している。しかし、本格的に太径サイズを生産する設備では、サイズ替えの時に粗列のカリバ交換が必要となり、台車の一括引出しよりも作業時間が短縮できるスタンドの個別引出しが求められてきた。

New KCS ミルの特長を以下に示す。

- 1) 各スタンドを個別の車輪付きフレームに搭載し、個別にシフト・クランプする装置を設けた。
- 2) ピレットの大断面化ニーズに合わせ、2 スタンドから 6 スタンドまでスタンド台数を自由に選択できるようにした。また、圧延機のサイズも大小の組合せができるようにした。
- 3) 既納の複数スタンド台車一括型 KCS ミルも個別引出しタイプに更新可能とするために、圧延機は上下のチョックを 4 本のスクリーシャフトで結んだハウジングレスミルにした。

図 7 に New KCS ミルの外観を、表 1 に主仕様を示す。

3.3 水冷装置

水冷装置は、圧延材を冷却水で積極的に冷却する設備であり、水量の調整や水冷区間の選択によって目標温度

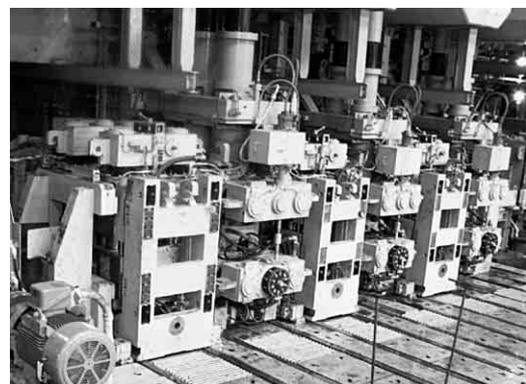


図7 新 KCS ミル (New KOBELCO Compact Solid Mill)
Fig. 7 New KCS Mill (New KOBELCO Compact Solid Mill)

表 1 New KCS ミル主仕様
Table 1 Main specification of New KCS Mill

TYPE	New KCS400	New KCS450	New KCS500
Mill layout	H-V alternate		
Mill type	Housing-less mill with isolated wagon		
Basic distance between each stands	1,100mm	1,250mm	1,500mm
Maximum flange diameter of roll	480mm	550mm	650mm
Work roll diameter (Grooveless)	400-360mm	450-405mm	500-450mm
Roll barrel length	350mm	400mm	450mm
Number of caliber	2 (max.)	1	1

まで冷却する。

日本国内の鉄筋バー設備には、2次スケールの抑制による製品肌向上を目的として仕上圧延後に水冷装置を設置したものが数例見られ、これらは製品の鋼組織が変化しない程度の冷却能力であった。

しかし、制御圧延を目的とする場合は、仕上圧延前に冷却能力の大きな中間水冷装置を設置する。

冷却能力の大きな水冷装置としては、特殊鋼棒鋼圧延設備で開発・納入してきた浸漬式水冷装置の適用が効果的である。浸漬式水冷装置は、圧延材を誘導するパイプ内が常に冷却水で満たされる構造となっている。図8にその概略構造を示す。誘導パイプの両端側から内側へ向けて給水し、中央部で排水することで、冷却の妨げとなる気泡を混入させずに大量の冷却水を流すことが可能な構造である。

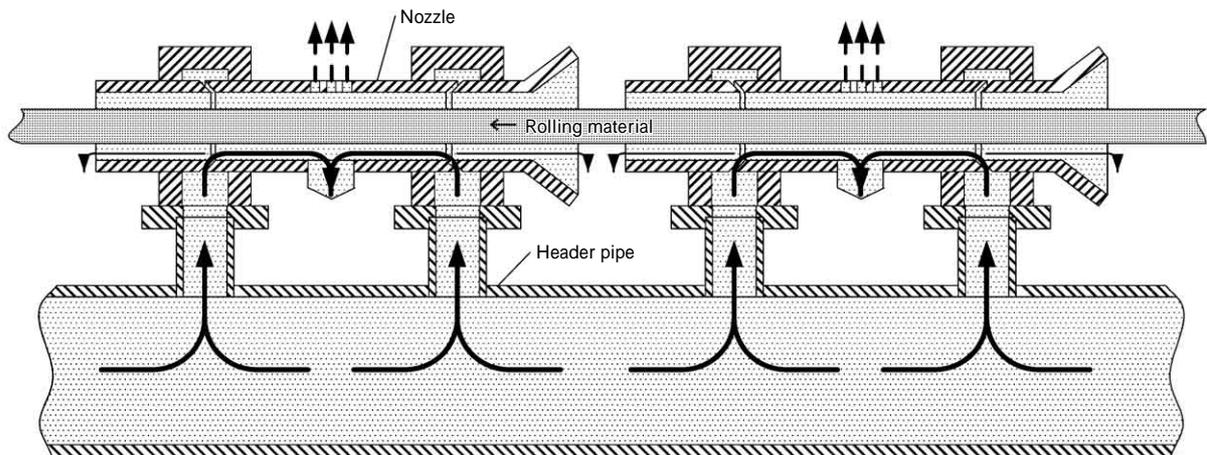


図8 水冷ノズル（浸漬タイプ）

Fig. 8 Water cooling nozzle (Full filled-up type)

むすび=首都圏を始めとする大都市圏において、眺望が良く充実した館内施設を持つ超高層マンションが競うように建築されているが、その多くが鉄筋コンクリート造となっている。

また今後、超高強度鉄筋の需要が増加していくことが考えられる。一方では、省エネ・省力・省スペースなどコスト削減の要求がますます強くなると推察する。

我々設備メーカーとしては、さらに高度化するニーズに応えるため、設備技術を研鑽していく所存である。

参考文献

- 1) 西村益美ほか：高強度鉄筋コンクリート用棒鋼（USD685）.
- 2) 川上平次郎ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.35, No.2（1986）p.45.
- 3) 公開特許：平 09-324215.
- 4) 落合和夫：神鋼テクノ技報，Vol.15, No.29（2003）.