

厚鋼板の直接焼入冷却方法の開発

技術報告

大友朗紀*・高塚公郎*²・高橋出雲男*³・大番屋嘉一*³
秋山憲昭*³・小林洋一郎*³・福満英勝*³

Development of Direct Quenching Method for Steel Plates

Akinori OHTOMO, Kōrō TAKATUKA, Ituo TAKAHASHI, Yoshikazu OHBANYA,
Noriaki AKIYAMA, Yōichirō KOBAYASI and Hidekatu FUKUMITU

Synopsis :

Experimental studies have been made of the direct quenching method for steel plates, which demonstrate that slit jet cooling followed by pipe laminar cooling is most suitable for the upper surface of a steel plate, while slit jet cooling followed by spray cooling is useful for the bottom surface.

A new water cooling equipment for direct quenching, designed without upper rollers, has been developed and added to the existing controlled cooling facility at Kobe Steel's Kakogawa Works. Production of SM58Q-grade steel plates made from Si-Mn-V steel of low carbon equivalent (0.37%) shows that the new water cooling equipment is highly effective for making high-strength steel plates with good flatness and mechanical properties.

Key words : cooling ; high strength low alloy steel ; plate ; direct quenching ; laminar cooling ; spray cooling ; heat treatment.

1. 緒 言

厚鋼板の製造プロセスにおいて、制御冷却や直接焼入れによる強制水冷技術は、制御圧延技術と同様に、強度やじん性の向上と溶接性を改善する上で非常に有効なオンライン加工熱処理技術である。

強制水冷は薄鋼板の熱延ランアウトテーブル上の冷却に古くから適用されている。また、厚鋼板の製造プロセスにおいては、浸漬法による強制水冷が直接焼入型鋼板の製造法として圧延後の鋼板に適用された例¹⁾があるが、適用鋼種が限定されていることや不均一冷却による鋼板の反り発生などの理由により、広く普及するに至らなかった。最近になつて、制御圧延と強制水冷の組合せによる厚鋼板の製造技術が見直され、材質面²⁾では適用製品の拡大を、また、設備面では鋼板の反り発生防止の均一冷却³⁾⁴⁾を目的として、強制水冷技術の開発が推進された。この結果、1980年代になり、厚板工場の仕上圧延機後方にオンライン強制水冷設備^{5)~13)}が実用化され始めた。

これらの冷却設備は、材質制御の観点から制御冷却設備と直接焼入設備に分類され、また、設備技術の観点から無拘束型設備と拘束型設備に分類される。現在、直接焼入れを実施している大部分の設備はローラーケエンチ装置と同様の拘束型設備に属し、冷却設備部分では鋼板を搬送するテーブルローラー以外に鋼板を拘束するピンチローラーを鋼板上方に設けている。鋼板はこれらのローラー間を移送され、冷却される。これは、直接焼入れのような強冷却を実施する場合、鋼板の上下面および幅方向を均一に冷却することがより難しくなるからである。すなわち、冷却速度がより小さい制御冷却と比較して、直接焼入れではわずかな冷却能力差や冷却時間差が大きな温度差を生じさせ、鋼板を変形させてしまうからである。

加古川製鉄所厚板工場では、無拘束型の制御冷却設備を1983年4月に設置し⁷⁾¹³⁾、造船用鋼板を主体に製造している¹⁴⁾。1985年12月にこの既存設備を増強し、強制冷却から直接焼入れまで可能な無拘束型の冷却設備を開発した。本報では、直接焼入設備に必要な冷却方法

昭和61年4月本会講演大会にて発表 昭和61年10月3日受付 (Received Oct. 3, 1986)

* (株)神戸製鋼所機械研究所 (Mechanical Engineering Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakinohama-cho Chuo-ku Kobe 651)

*² (株)神戸製鋼所機械研究所 工博 (Mechanical Engineering Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd.)

*³ (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd.)

の検討結果および実機設備の概要と操業結果について報告する。

2. 直接焼入設備に対する基本的な考え方

加古川製鉄所厚板工場圧延ラインの概略図を Fig. 1 に示す。強制水冷設備は仕上圧延機と熱間矯正機の間設置されている。この理由は、圧延完了から水冷開始までの時間を短縮し、圧延終了直後の水冷を可能とするためである。次に、既存の冷却設備では、上部パイプミナ冷却、下部スプレー冷却を採用し、二重構造とすることにより⁷⁸⁾ 制御可能な冷却速度範囲を広くしているが、その最大冷却速度はオフラインのローラクエンチ装置のそれよりも低い。したがって、直接焼入れを可能とするため、さらに冷却能力の強化が必要であった。

増強設備に対する基本的な考え方は、ローラクエンチ装置と同程度の冷却能力を有し、良好な平坦度を確保するために均一冷却を可能とする無拘束型の冷却設備を開発し、既存設備の仕上圧延機側に設置し、直接焼入設備とすることである。

直接焼入設備の検討における考え方を Fig. 2 に示す。製品に要求される事柄は高強度、高じん性、板内の均一な機械的性質および良好な形状である。これらを保証するため、冷却設備で要求される管理項目は、冷却開始温度、冷却停止温度、冷却速度、均一冷却および冷却中の温度履歴である。さらに、これら管理項目を支配する主な因子は、鋼板の移送速度、冷却時間、水量、鋼板の上下面への水量配分、冷却方法とそのノズル配列などである。

冷却能力を強化し、鋼板を無拘束状態で冷却する直接焼入設備を開発する上で最も重要な因子は冷却方法とそのノズル配列である。しかし、それら因子が材質に及ぼす影響は明らかになっていない。したがって、この点を中心に冷却方法とその適正化について検討した。

3. 冷却方法の基礎検討

3.1 実験方法

冷却実験装置の概略図を Fig. 3 に示す。本装置は第一と第二冷却ゾーンにより構成され、第一冷却ゾーンは

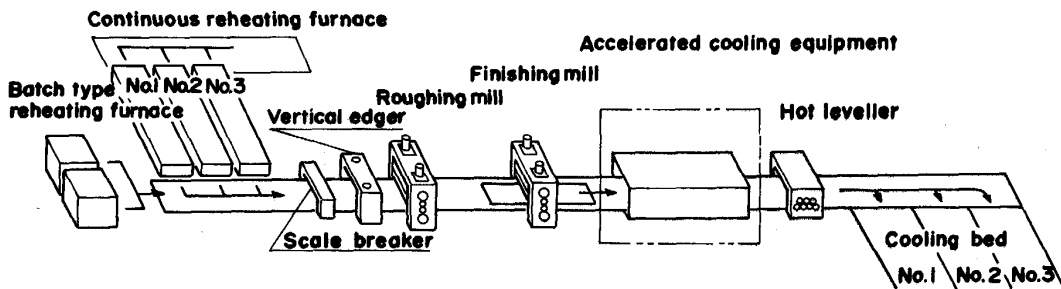


Fig. 1. Schematic view of plate mill at Kakogawa Works.

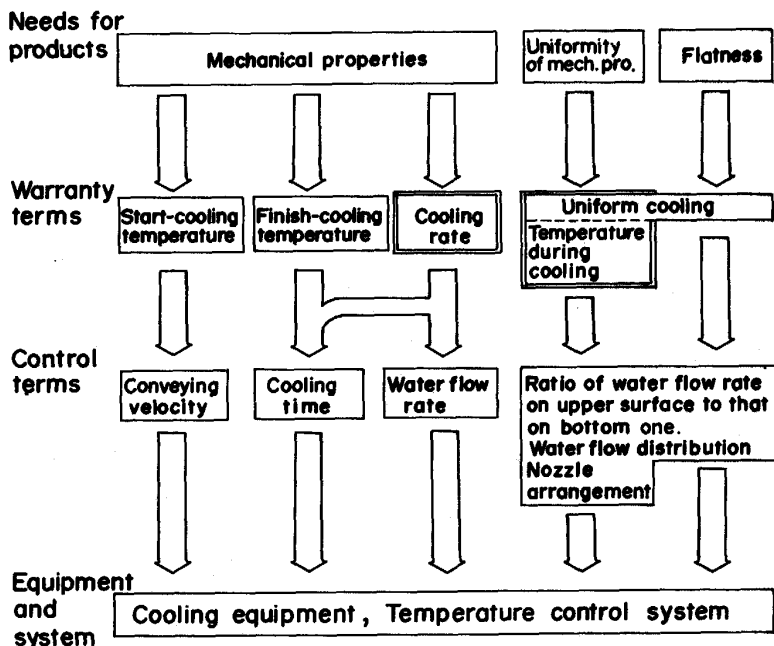


Fig. 2. Schematic diagram to determine a water cooling equipment.

上部,下部ともにスリットジェットノズル,第二冷却ゾーンには上部パイピラミナノズル,下部スプレーノズルが使用されている. この二つの冷却ゾーンは片方または両方の組合せが実験目的に応じて選択可能となっている. また,第一と第二冷却ゾーンの間には,スリットジェットノズルからの冷却水が飛散するのを防止するため,水切りローラーが設置されている. さらに,パイピラミナノズルを用いる実験では,鋼板上面に溜る冷却水の状態を模擬するため,冷却中の被冷却鋼板の縁にフレームを設けた. なお,スリットジェットノズルを用いた冷却ゾーンにおける水量密度は水切り上ロールの有無に伴う整合性ある冷却長の設定が困難であることなどのため,ノズルの単位幅あたりの水量として示した.

実験に用いた被冷却鋼板は,サイズが25×500×700 mmの比較的焼入性が低いSi-Mn-V鋼である. また,

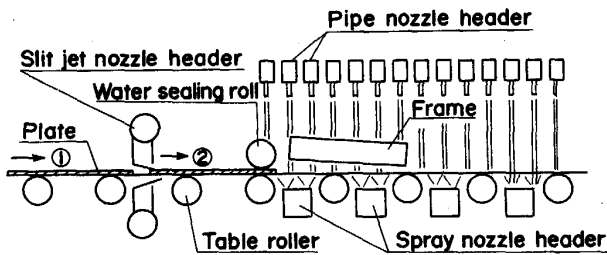
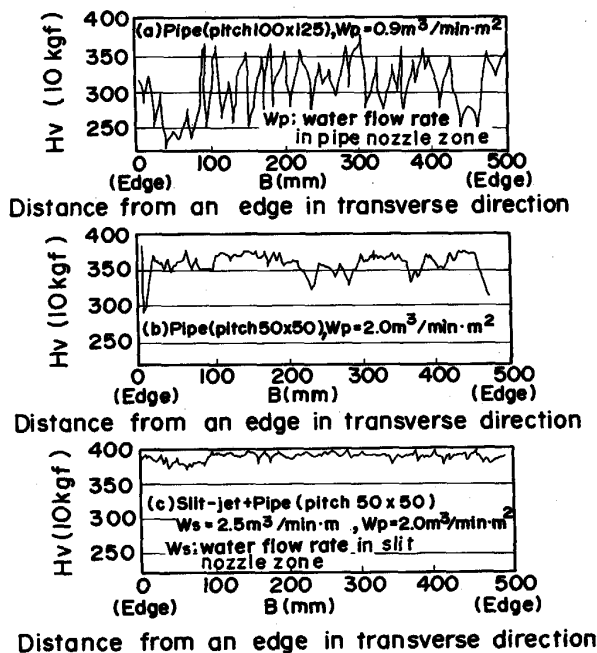


Fig. 3. Outline of experimental apparatus in water cooling test.



$T_{start} = 900^{\circ}C$ $T_{finish} = 30^{\circ}C$ $V = 0.25$ m/s $h = 25$ mm

Fig. 4. Vicker's hardness distribution of plates as DQ at 2 mm deep from surface.

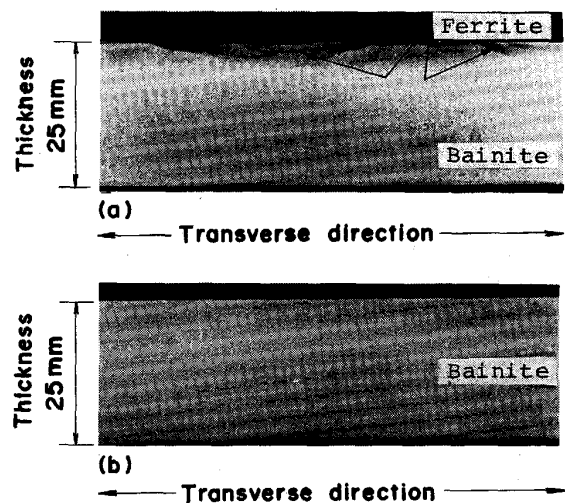
試験片の幅方向および長手方向の中央で表面から約2 mmの位置にシース熱電対を埋め込み,温度を測定した.

3.2 実験結果と考察

3.2.1 冷却方法の検討

約900°Cから焼入れした鋼板の表面から2 mmの位置における幅方向のピッカース硬度分布をFig. 4に示す. Fig. 4(a)と(b)はパイピラミナノズルのみを用いて冷却した場合の結果であり,(c)はスリットジェット冷却後にパイピラミナノズルを用いて冷却した場合の結果である. パイピラミナノズルのみを用いた冷却では,硬度分布に大きな変動があり,ノズルピッチが100×125 mmと粗い場合には,50×50 mmと細かい場合と比べて,その変動が顕著となっている. 一方,スリットジェットノズルとパイピラミナノズルを組み合わせた冷却では,ピッカース硬度は370以上で,かつ,その分布はほぼ均一である.

Fig. 4(a)と(c)に対応する鋼板の板厚断面のマクロ組織をPhoto. 1に示す. 硬度分布に大きな変動のあった鋼板では,大部分が下部ベイナイト組織となっているが,表面近傍に針状フェライト組織が見られる. 一方,高硬度でその分布の安定していた鋼板では,針状フェライト組織は見られない. したがって,この針状フェライト組織の存在が硬度を低下させていると考えられる. さらに,このような金属組織上の差異が生じた理由は,冷却方法の違いにより冷却中の鋼板の温度履歴が異なつたためと考えられる.



(a) Upper surface; Pipe laminar cooling
Bottom surface; Spray cooling

(b) Upper surface; Slit jet cooling followed by pipe laminar cooling

Bottom surface; Slit jet cooling followed by spray cooling

Photo. 1. Macrostructure of plates as water quenched.

パイラミナ冷却の特徴の一つは、ラミナ流が鋼板と衝突するノズル直下近傍の領域とそれ以外の領域の冷却能力に大きな差があることである。さらに、高温域ほどその差は大きく、かつ、ノズル直下近傍の強冷却領域の面積は小さい。したがって、パイラミナ冷却では、鋼板の移動にともないノズル配列の影響により、鋼板の表面近傍では急冷と復熱にともなう大きな温度変動がくり返される。一方、スリットジェット冷却をパイラミナ冷却の直前に適用し、パイラミナ冷却域に到達するときの鋼板の表面温度を 300°C 付近まで低下させると、パイラミナ冷却域では、浸漬冷却の例¹⁵⁾ から推定されるように、ノズル直下近傍以外の領域の冷却能力は大

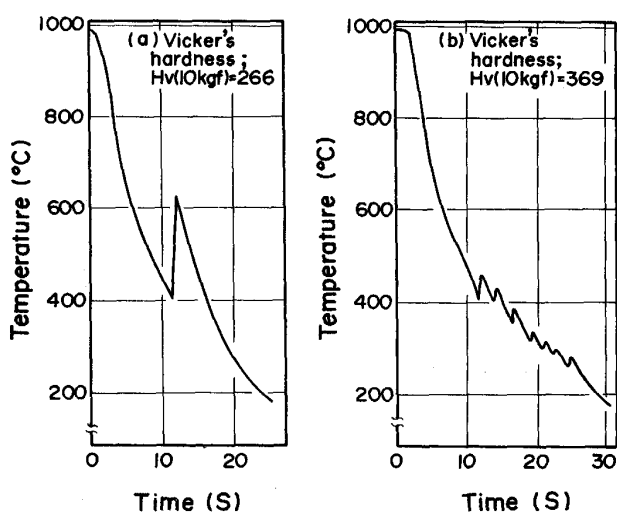


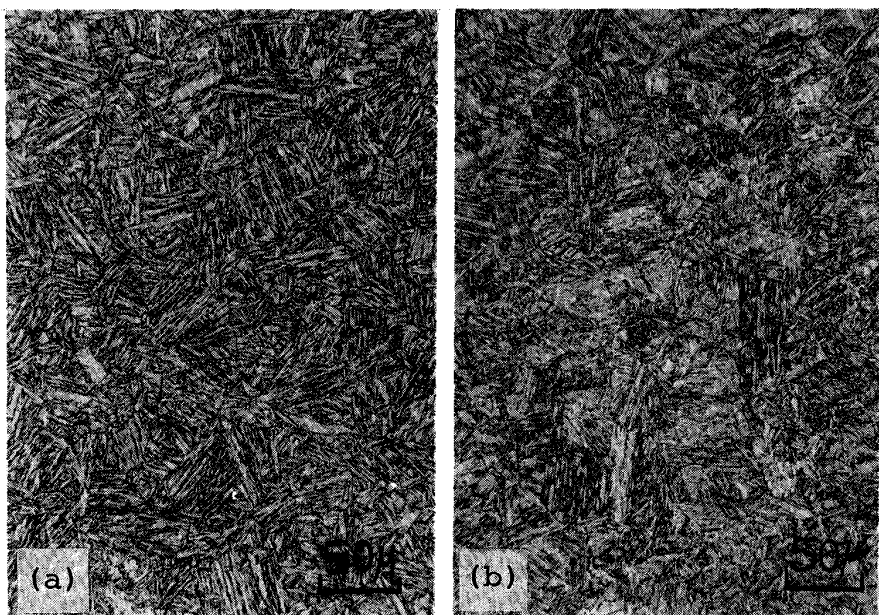
Fig. 5. Typical cooling curve obtained by dilatometer and Vicker's hardness of Si-Mn-V steel test pieces as cooled.

きくなり、ノズル直下近傍のそれに近づく。さらに、ノズル直下近傍の強冷却領域の面積も拡大し¹⁶⁾、この冷却域の連続化も生じるようになる。この結果、鋼板表面の近傍における急冷と復熱にともなう温度変動は軽減することになる。

鋼板の温度履歴とマクロ組織、硬度との関連を検討するため、フォーマスタ試験装置を用いた実験を行った。Fig. 5は先の Si-Mn-V 鋼を供試材としてフォーマスタ試験により得た代表的な冷却曲線とビッカース硬度を示す。これらの冷却曲線より求まる冷却開始温度と 200°C 間の平均冷却速度は約 $30^{\circ}\text{C}/\text{s}$ であり、冷却実験におけるそれとほぼ同等である。Fig. 5(a)の場合のビッカース硬度は 266 であり、Fig. 5(b)の場合のそれは 369 である。これらの値は Fig. 4(a) に示した硬度分布における最大値と最小値に近い。

次に、Fig. 5 に示した試験片のミクロ組織を Photo. 2 に示す。Photo. 2(a) は針状フェライト組織を示し、Photo. 1(a) の表面近傍の組織と類似している。Photo. 2(b) は主に下部ベイナイト組織を示し、Photo. 1(a) の表面近傍部以外の部分と類似している。これらの結果より、見かけの平均冷却速度が同じでも、温度履歴の違いが異なった金属組織を生じさせ、硬度差を生じさせることがわかる。

以上の結果から、直接焼入設備として、鋼板上面の冷却にはスリットジェット冷却とパイラミナ冷却とを組み合わせた冷却方法が有効である。一方、鋼板下面側では Photo. 2 に示したように主に下部ベイナイト組織が得られていることから、鋼板下面の冷却には、スリット



(a) Shown in Fig. 5(a)
(b) Shown in Fig. 5(b)

Photo. 2. Microstructure of Si-Mn-V steel test pieces as cooled.

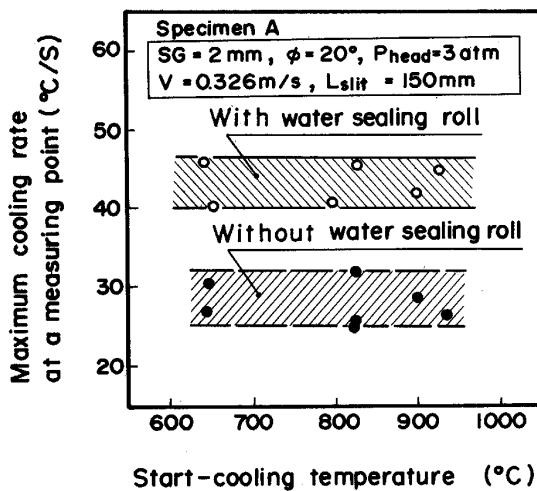


Fig. 6. Effect of start-cooling temperature and water sealing roll on cooling rate of plate.

ジェット冷却とこれまでの多くの冷却設備に使用されているスプレー冷却とを組み合わせた冷却方法が基本的に使用可能であると考えられる。したがって、既存設備の前にスリットジェット冷却を主体としたわずかな冷却設備の増設により直接焼入設備とすることが可能となる。

3.2.2 スリットジェット冷却方法の検討

スリットジェット冷却による冷却効果を最大にするため、スリットジェットノズルのみを用いた冷却実験を実施した。

第一に、水切りロールを設けた場合と設けない場合の冷却能力について検討した。水切りロールの有無をパラメーターとして、冷却開始温度と最大冷却速度との関係を Fig. 6 に示す。ここで最大冷却速度とは表面から 3.6 mm の測温位置で得られた冷却曲線においてその冷却曲線の最大勾配を意味する。なお、図中ではスリットジェットノズルのギャップを SG (Slit Gap) で示した。水切りロールを設けた場合の最大冷却速度は水切りロールが設けられていない場合のそのほぼ 1.5 倍である。水切りロールがない場合には、鋼板に衝突した後の大部分の冷却水は設備の後方に飛散し鋼板の冷却にほとんど寄与しないが、水切りロールがある場合には、冷却水は水切りロールにより遮断され、水切りロールとスリットジェットノズル間に溜り、かつ、激しく攪拌し、鋼板の冷却に大きく寄与する。

このように、スリットジェット冷却を採用する場合、水切りロールは冷却効果を増加させ、さらにスリットジェットノズルからの冷却水が飛散するのを防止し、次の冷却ゾーンにおける不均一冷却の原因を除去する。また、鋼板下面側ではテーブルローラーが水切りローラー

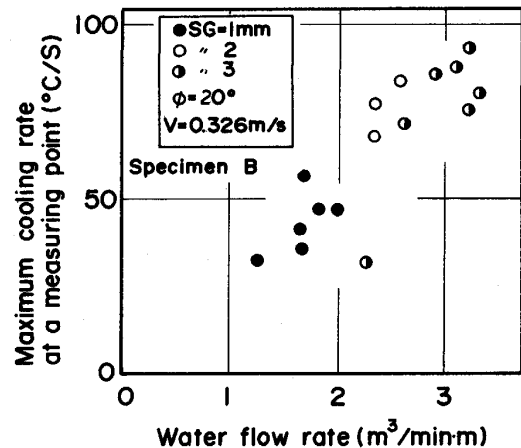


Fig. 7. Change in maximum cooling rate with water flow rate at various slit gaps.

を兼ねていることから、これと対に上側の水切りローラーを設け、鋼板の上下面で冷却水の流れに対称性を持たせることは均一冷却の点からも意義がある。

第二に、スリットジェットノズルの使用条件としてノズル背圧及び水量密度の適正值につき検討した。検討にあたっては類似の装置として、ローラークエンチ装置¹⁷⁾の条件を参考とした。

スリットギャップ SG をパラメーターとして、スリットジェットノズルからの水量密度と表面から 2.5 mm 位置の最大冷却速度との関係を Fig. 7 に示す。最大冷却速度は水量密度の増加に伴い大きくなるが、スリットギャップが 2 および 3 mm のデータから判断して、水量密度が約 2.5 m³/min·m 以上になると最大冷却速度の向上率は減少するようである。水量密度が 2.5 m³/min·m の場合、スリットジェットノズルにおけるヘッダー部の圧力は、スリットギャップが 2 mm のとき 3.5 kgf/cm²-G、3 mm のとき 1.6 kgf/cm²-G である。これらの結果より、ローラークエンチ装置で使用しているような高い噴射圧力は必ずしも必要としないことがわかる。しかし、水量密度が 2.5 m³/min·m 以下においてスリットギャップが 2 と 3 mm の値を比較すると、同じ水量密度においてスリットギャップが 3 mm の場合の最大冷却速度は 2 mm の場合のそれより非常に小さい。これは、スリットジェット冷却において水量密度だけでなく、圧力に対しても配慮することが必要であることを示している。著者らは現段階において、1.6 kgf/cm²-G 以上の圧力があればよいと判断している。

第三に、スリットジェット冷却の均一冷却について検討した。操業設備のスリットジェットノズルの長さは 4.6 m であり、使用水量も多量となる。この場合に幅全

体にわたって均一な冷却を実施するため、スリットジェットノズルヘッダーの構造と鋼板に衝突した後の冷却水による均一冷却について検討した。

スリットジェットノズルヘッダーの構造に関しては、ヘッダーへの給水口を2箇所とし、給水配管とヘッダーとの接続部に多孔板を設け、給水の動圧を小さくしてヘッダー内の圧力を均一にし、かつ、ヘッダーとノズル部との接続部にスリット状オリフィスを設け、ノズルの噴射圧力の均一化をはかった。Fig. 8は幅100mmの受水口をもつ容器を用い、50mm間隔で測定したスリット

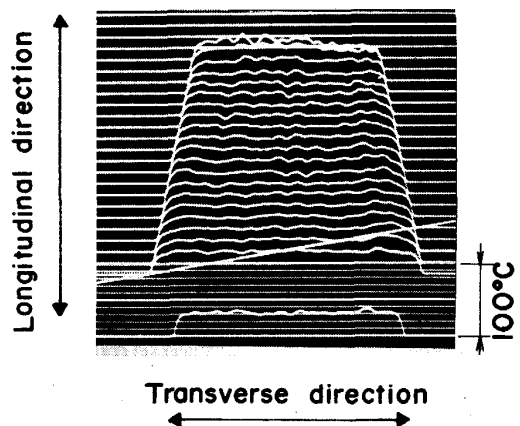


Plate size : 25×3 240×13 500 mm
 Starting cooling temperature : 930°C
 Finishing cooling temperature : 683°C
 Amount of water : 30 m³/min

Photo. 3. Temperature distribution of plate after cooling by slit jet nozzle.

トジェットノズルからの水量分布を示す。縦軸は測定した水量を幅1m当たり、単位時間当たりに換算した水量密度である。水量の幅方向のばらつきは10%以内である。

鋼板に衝突した後の冷却水による均一冷却に関しては、スリットジェットノズルと水切りロールとの間にガイド板と称する板を設けた。このガイド板により、スリットジェットノズルから噴出された流れとその後水切りロールにより遮断されて溜る冷却水とをほぼ完全に上下に分離できる。すなわち、ガイド板の被冷却鋼板側はスリットジェットノズルから噴出された直後の冷却水で満たされ、鋼板上面のガイド板の反対側は滞留水が板幅方向へ流出する。

実機ラインに設置したスリットジェットノズルヘッダーを用いて、熱間圧延後の鋼板を冷却し、熱間矯正機の直前に移送後測定した表面温度分布をPhoto. 3に示す。圧延ラインのセンター位置の斜め上方から測定を行っており、鋼板の長手方向に所定ピッチで幅方向の温度分布が示されている。同図の最下位置に示した幅方向の温度分布はその中の一例であるが、板端部を除き、温度の高低差が10°C以内の冷却が実施されたことを示している。

4. 実機設備と直接焼入型鋼板の操業結果

冷却設備の概略図をFig. 9に示す。また、Table 1に主な仕様を示す。増設部分の冷却方法は前段に上下部

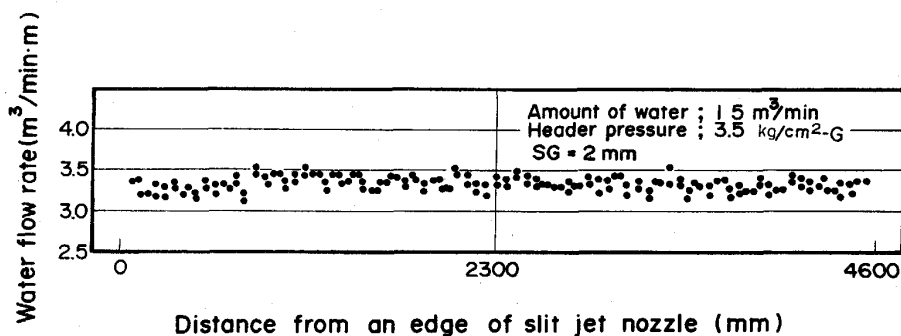


Fig. 8. Water flow distribution across a nozzle.

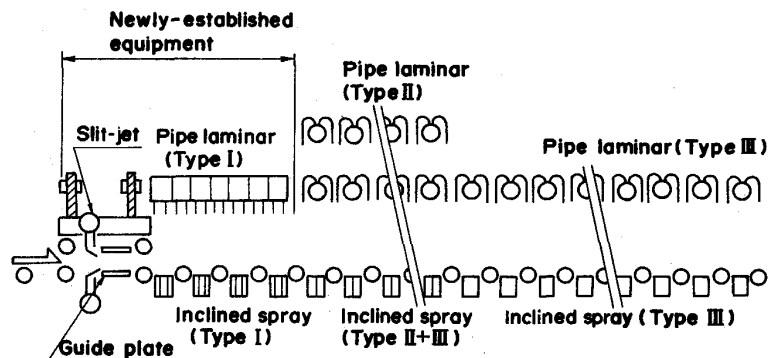


Fig. 9. Outline of Kakogawa water cooling equipment.

スリットジェット冷却, 後段に上部パイプミナ冷却, 下部スプレー冷却であり, その冷却長はおおの 0.805 m, 3.75 m である。

本設備の制御可能な平均冷却速度の範囲を Fig. 10 に示す。ここで, 平均冷却速度は熱伝導方程式を数値計算して得られた冷却曲線の 800~500°C 間における平均値である。計算における境界条件は操業結果より決定し, 物性値は日本鉄鋼協会¹⁸⁾の値を用いた。同図にはローラクエンチ装置のデータ¹⁹⁾も示しているが, その冷却能力と同等の冷却速度が得られた。Table 2 は冷却装置のモードと使用ゾーンおよび適用製品の代表例を示

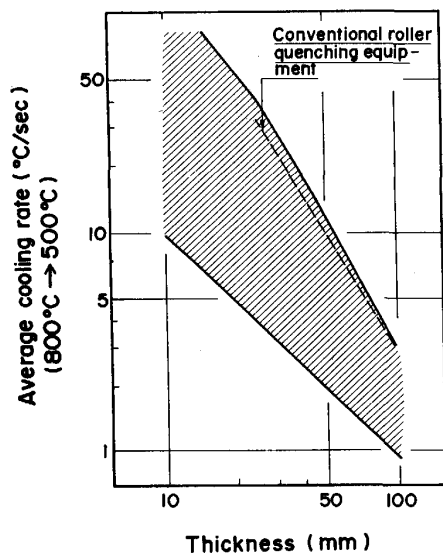


Fig. 10. Applicable cooling rate of Kakogawa water cooling equipment.

す。既存設備の適用領域である二重丸部分から, より広い範囲の冷却条件に本設備が適用できるようになった。

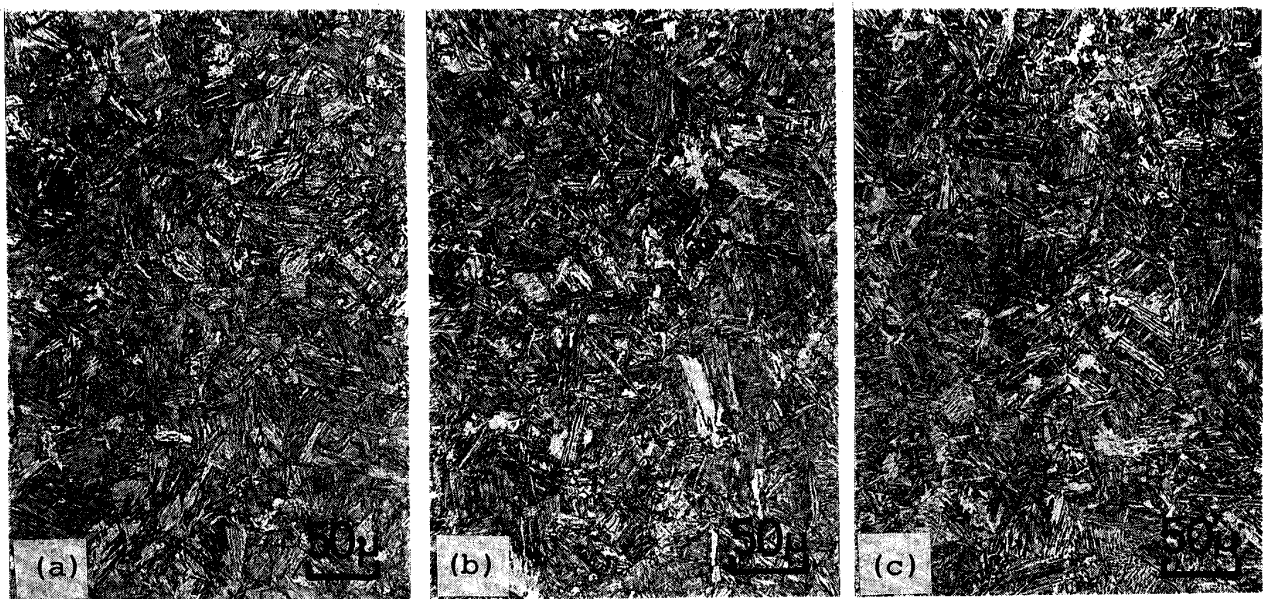
次に, 本設備では水量設定の精度向上をはかった。鋼板の上下面に等しい冷却能力をもたせることは強制水冷による鋼板の歪み発生を防止する上で最も重要である。特に, 鋼板上面に溜った冷却水の冷却能力を考慮する必要がある。この滞溜水の冷却能力が鋼板の表面温度に強く依存するため¹⁵⁾, 冷却中の鋼板の表面温度を考慮して冷却水量を制御することが必要となる。高い水量密度を必要とする直接焼入れの場合, より正確な水量制御が

Table 1. Specification of Kakogawa water cooling equipment.

Item	Specification
Dimension of machine	4 650×44 350 mm
Dimension of product to be processed	9-300×4 650×42 000 mm
Amount of water	Maximum 220 m ³ /min
Cooling method	Continuous or simultaneous cooling type
Nozzle type	Top : Slit jet and pipe laminar (3 types) Bottom : Slit jet and inclined spray (3 types)
Number of cooling banks	9

Table 2. Applicable cooling modes.

Cooling mode	Slit jet	Nozzles			Example of product
		Pipe laminar & inclined spray			
		Type I	Type II	Type III	
Direct quenching	○	○	○	HT-60, 80, 100	
Controlled cooling	Heavy cooling	○	◎		HT-50, 60
	Light cooling			◎	



(a) 2 mm deep from surface

(b) 1/4 thickness

(c) 1/2 thickness

Photo. 4. Microstructures of Si-Mn-V steel plate as direct quenched.

要求される。したがって、本設備では、水量制御ゾーン数を上下部とも鋼板搬送方向に9ゾーンとし、各ゾーンの流量制御弁と三方弁をエア作動型よりも応答性に優れた制御精度のよい油圧作動型とした。この結果、作動遅れはほとんどなくなり、水量設定の変更は4s以内となり、水量設定の精度は±1%以内である。

増設設備を用いて、SM 58Q 相当の直接焼入型鋼板を製造した結果を報告する。供試鋼には炭素当量 C_{eq} が 0.37% の Si-Mn-V 鋼を用い、約 880°C から直接焼入後 650°C で焼もどしを行った。

Photo. 4 は板厚方向の表面近傍、1/4 板厚及び 1/2 板厚の各位置におけるミクロ組織を示す。これらの金属組織はマルテンサイトと下部ベイナイトの混合組織であり、針状フェライト組織は認められない。このとき、表面から 2 mm の位置における板幅方向のピッカース硬度は約 370 で安定し、板厚中央部の硬度も約 330 である。

また、引張強さ及び 0.2% 耐力を測定した結果、鋼板の長手方向及び幅方向とも引張強さの規格値 569 MPa 以上 716 MPa 以下及び 0.2% 耐力の 451 MPa 以上を満足し、伸びも良好であった。

次に、直接焼入前後における鋼板の反り量についてサイズが 12~75 mm×2 500~3 850 mm×7 000~22 000 mm の鋼板を対象に調査した結果、水冷により生じた鋼板の反り量は小さく、これらすべての鋼板は焼もどし工程後良好な形状の製品となつている。

以上のように、炭素当量 C_{eq} が 0.37% と低い成分系の鋼板を供試鋼として、SM 58Q 相当の機械的性質を有し良好な形状の鋼板が製造された。

5. 結 言

既存設備を増強し、制御冷却から直接焼入れまで可能な無拘束タイプの冷却設備を開発した。本設備における制御可能な冷却能力範囲は広く、この結果、多岐にわたる鋼板に対し冷却設備の適用が可能となつた。炭素当量

が従来よりも低い 0.37% の Si-Mn-V 鋼を供試鋼として SM 58Q 相当の直接焼入型鋼板を製造した結果、鋼板の材質および平坦度は規格を満足するものであつた。今後、本設備を用いることにより、より優れた新しい高張力厚鋼板が開発され、需要家ニーズに応えうるものと確信している。

文 献

- 1) 宮野樺太男, 小山内真二, 進藤弓弦: 日本製鋼所技報 (1964), p. 11
- 2) たとえば, 大内千秋, 大北智良, 山本定弘: 鉄と鋼, **67** (1981), p. 969
- 3) 国岡計夫, 神尾 寛, 杉山峻一, 滝川信敬, 菅 克之: 鉄と鋼, **68** (1982), S510
- 4) 大友朗紀, 安永繁信, 中尾正和, 田中 毅, 秋山憲昭, 小林 章, 大番屋嘉一: 鉄と鋼, **69** (1983), S1150
- 5) 芳賀行雄, 平部謙二, 有方和義, 松尾敏憲, 神尾 寛, 伏見直哉: 鉄と鋼, **67** (1981), S1329
- 6) 梅野正紀, 岩永 健, 酒井和夫, 福田敬爾, 宮脇広機, 石川 浩: 鉄と鋼, **68** (1982), S515
- 7) 滝沢謙三郎, 丹野 仁, 田中 毅, 福満英勝, 大番屋嘉一, 中尾正和, 大友朗紀: 鉄と鋼, **69** (1983), S1149
- 8) 平井信恒, 江端貞夫, 手塚 栄, 田中康浩, 志賀千晃, 垂井 稔: 鉄と鋼, **70** (1984), S373
- 9) 宮脇広機, 中川理洋, 山本政尚, 浪花敏夫, 川合 等, 大野琢美: 鉄と鋼, **70** (1984), S1144
- 10) J. LECLERC, C. ARNAUD, B. DUQUAIRE and M. JEANNEAU: International Conference on Steel Rolling, (1980年9月29日~10月4日), p. 1321
- 11) 平井信恒, 吉原正典, 楠原祐司, 江端貞夫, 榎並禎一, 垂井 稔: 鉄と鋼, **70** (1984), S374
- 12) 別所 清, 善永 悠, 渡辺征一, 中村晶明, 鈴木秀一: 鉄と鋼, **70** (1984), p. 1407
- 13) 高橋出雲男, 大番屋嘉一, 高塚公郎, 大友朗紀, 秋山憲昭: 神戸製鋼技報, **35** (1985) 4, p. 87
- 14) 梶 晴男, 高嶋修嗣, 秋山憲昭, 田中 毅: 神戸製鋼技報, **33** (1983) 4, p. 4
- 15) 三塚正志, 福田敬爾: 鉄と鋼, **63** (1977), p. 1008
- 16) 大友朗紀, 山口喜弘, 水田篤男, 大砂 寛, 柚垣英則: 鉄と鋼, **64** (1978), S707
- 17) 鋼材の強制冷却 (日本鉄鋼協会編) (1978), p. 178
- 18) 連続鋼片加熱炉における伝熱実験と計算方法 (日本鉄鋼協会編) (1971), p. 80
- 19) 文献 17), p. 225