

論文

高温ビレットの噴霧冷却技術

三塚正志*・森瀬兵治*²・小椋徹也*³・中村 修*⁴

Air-atomized Fog-jet Cooling of Hot Billets

Masashi MITSUTSUKA, Heiji MORISE, Tetsuya OGURA, and Osamu NAKAMURA

Synopsis:

In order to save the cooling time of billets on cooling bed, a fog-jet cooling process has been investigated. The main results obtained are as follows:

(1) To realize homogeneous and regulating cooling of billets, the most favorable cooling process consists of on-corner arrangement of billets and air-atomized fog-jet cooling

(2) From the standpoints of depressing the cracking and deforming of billets by forced-cooling and to save required time for cooling, the following two step cooling process is suitable: the natural cooling for high temperature zone (the initial to about 500°C) and the fog-jet cooling for low temperature zone (under about 500°C).

(3) In the cases of 123 mm square billets containing from 0.2 to 0.8 wt% carbon they are naturally cooled from about 1 000°C down to about 550°C (billet core temperature), and then fog-cooled under impinged water flux equal or lower than 20 and 40 l/m²·min at top and bottom, respectively, and are scarcely unfavorably affected in their structures and mechanical properties.

In addition, the following items have been studied: influence of billets arrangement on cooling time, fog-cooling conditions of decreasing bending of billets, influence of carbon content on cooling curves during natural cooling, influence of scale on billet surfaces on cooling curves during fog-cooling, deflection of as-rolled hot billets, selection of fog nozzle free from clogging, and an example of basic design of a billet cooling bed with fog-cooling facilities.

1. 緒 言

熱間圧延や連続鋳造で製造されたビレット (以下 BT と略記) は、冷却床で所定温度まで冷却された後[†]、次工程へ送られる。冷却床の冷却能力が強化されれば、単位面積当たりの冷却処理量が増大するから、生産性の向上や冷却床の小形化が可能になる。このような理由から、BT の強制冷却は、従来から広く行われており、種々の方法が実用化されている¹⁾。これらの強制冷却法は、次のように分類される。

- ①自然冷却の強化法：建屋内換気の強化、冷却床での自然対流の強化
- ②空気噴射冷却法：BT への空気流の噴射、
- ③水噴射冷却法：BT への水スプレーの噴射、
- ④浸漬冷却法：水槽中への BT の浸漬、

一方、BT の強制冷却に要求される条件は、次のとおりである。

- (i) 必要かつ十分な冷却能力を有する。
 - (ii) 強制冷却によつて、BT に割れや曲がりが発生させない。
 - (iii) 冷却設備が長期間安定して稼動する。
 - (iv) 冷却設備の設備費と運転費が安価である。
- 冷却法①と②は、条件(ii)を満たすが条件(i)を満足し難い。冷却法③と④は、条件(i)を満たすが条件(ii)と(iii)を満足しないことが多い。

条件(ii)は、BT の周囲および長手方向の冷却を均一化することおよび冷却能力の制御によつて、条件(iii)は、ノズルの閉塞防止によつてほぼ達成されるはずである。

以上のような理由から、著者らは、冷却法②と③の長所を組み合わせる冷却法すなわち噴霧冷却によつて、条件(i)、(ii)および(iii)を同時に満足する BT 冷却技術を研究した。本報には実験室で行つた実験研究結果を、続報²⁾には前記結果に基づいて設計・製作した実設備の設計の考え方や稼動状況を報告する。

† 省エネルギーや省工程のため、冷却工程が除かれることもある。

昭和 57 年 9 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 2 月 21 日受付 (Received Feb. 21, 1983)

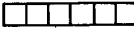

* 新日本製鉄(株)第三技術研究所 工博 (R & D Laboratories-III, Nippon Steel Corp., 1-1-1 Edamitsu Yawatahigashi-ku Kitakyushu 805)

*² 新日本製鉄(株)第三技術研究所 (R & D Laboratories-III, Nippon Steel Corp.)

*³ 新日本製鉄(株)釜石製鉄所(現:新日本製鉄(株)室蘭製鉄所) (Kamaishi Works, Now Muroran Works Nippon Steel Corp.)

*⁴ 新日本製鉄(株)釜石製鉄所 (Kamaishi Works, Nippon Steel Corp.)

Table 1. Merits and demerits of billet arrangements on billet cooling bed.

Arrangement of billets	Features
Contact arrangement 	Merits: ① Cooling bed is simple in structure. ② Number of billets arranged per area is large. ③ Bending of a billet in horizontal direction is small. Demerits: ① Some sprayed water remains locally on top surface of billets, and the phenomenon causes billets bend. ② Cooling surfaces are limited to two sides(top and bottom).
On-corner arrangement 	Merits: ① Four surfaces (all surfaces) are cooled. ② Billets are able to be uniformly cooled in axial and sectional directions. Demerits: ① Cooling bed is complicated in structure. ② Number of billets arranged per area is small. ③ Billets have a possibility of complicated deformations.

2. ビレット冷却に対する考え方

2.1 経済性の考え方

BT 強制冷却の目的は、冷却所要時間を短縮することである。したがって、冷却設備の計画に際しては、設備の設置によるメリットとデメリットを定量的に比較しなければならない。主なメリット項目は、

新設工場：冷却床面積の減少，物流の単純化（冷却床要員の減），

既設工場：生産量の増，

であり、主なデメリット項目は、

新設工場：BT への悪影響^{†2}，運転費の増大（要員の増），

既設工場：BT への悪影響^{†2}，設備費・運転費の増（要員の増），

である。

2.2 ビレット配置の考え方

BT 冷却床の多くは、固定ビーム方式、可動ビーム方式または可動チェーン方式である。これらの冷却床では、BT は、全数密着かグループごと密着の状態でも水平に配置されている。したがって、水冷に際しては、上記状態の BT の上下面へ冷却水を噴射する方法が採用される（浸漬冷却を除く）。この場合、BT から冷却水への熱伝達は主に上下 2 面で行われ、両側面はほぼ断熱状態になっている。また、最側端の BT は 3 面冷却になるため、大きく曲がることが多い。

冷却の立場からは、BT の 4 面が均等に冷却されることが理想である。この条件は、BT の菱形配置によつて満足されるはずである。冷却の観点からみた BT の密着配置と菱形配置の特徴を Table 1 に示す。

^{†2} BT の割れや変形、BT の錆発生。

2.3 噴霧冷却適用の考え方

前節に記述したように、BT の水滴噴射冷却では、水滴を BT の 4 面へ均等に噴射することが理想的である。また、水冷設備の長期間安定稼動のためには、ノズル閉塞の防止が必要である。上記の両条件は、BT を菱形に配置し BT の 4 面を均等に冷却すること、および著者の 1 人が開発した閉塞の少ない直交型気水ノズル²⁾を用いる噴霧冷却によつて満足されるはずである。上下面のノズルから対向して垂直方向へ噴射される噴霧流の衝突レベルにおいては、水滴は水平方向へも激しく流動する。したがって、この衝突レベルに BT を菱形で配置するならば、水滴は BT の 4 面へほぼ均等に衝突するから、BT の 4 面はほぼ均等に冷却されるはずである。

3. 噴霧冷却実験

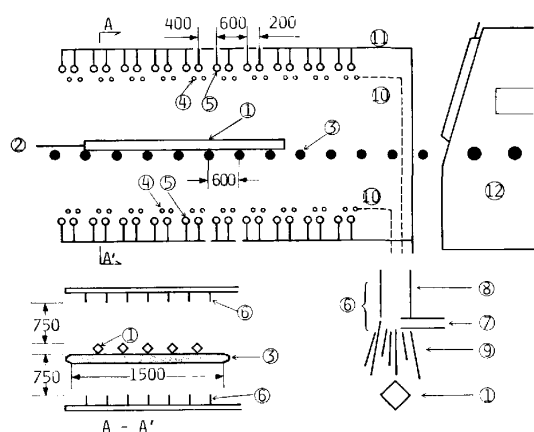
3.1 予備実験

BT 冷却の理想的方式と考えられる「菱形配置+噴霧冷却」の特性を定量的に把握するため、高温 BT を自然冷却、空気噴射冷却および噴霧冷却する実験を行った。

3.1.1 実験方法

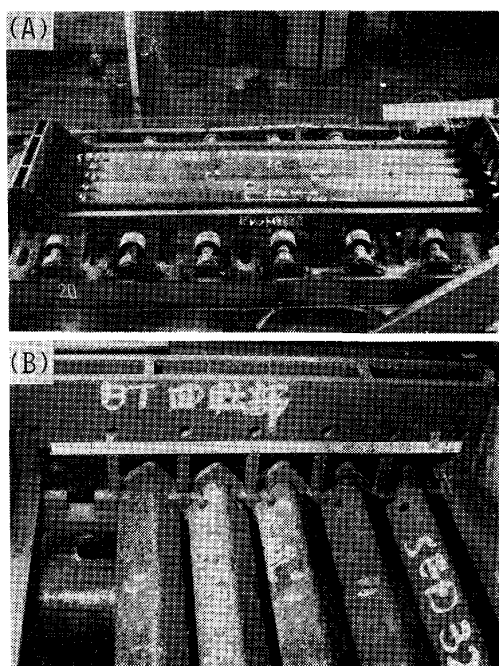
試料は 113 mm φ × 800 mm の BT で、密着配置には 4 本の BT を、菱形配置には 3 本の BT（中心間隔 160 mm）を用いた。試料が短いので長手方向の端面に雲母板を取り付け（1 mm 厚 × 3 枚）、端面からの放熱を軽減した。

試料を、上下面から対向して垂直方向に噴射される噴霧流の衝突位置にセットし、噴霧流によつて約 1000°C から常温まで連続的に冷却する（ノズル-試料間距離：約 500 mm）。噴霧流は、直交型気水ノズル²⁾（水管内径：4 mm，空管内径：16.1 mm）から噴出され、空気の噴出速度は約 40 m/s である。なお、噴霧冷却の水



① Billet (123φ × 4000l), ② Thermocouple, ③ Roller(200f)
④ Water header, ⑤ Air header, ⑥ Nozzle, ⑦ Water pipe (ID: 4, OD: 6), ⑧ Air pipe (ID: 16.1), ⑨ Fog stream, ⑩ Water supply, ⑪ Air supply, ⑫ Electric furnace.
Unit: mm

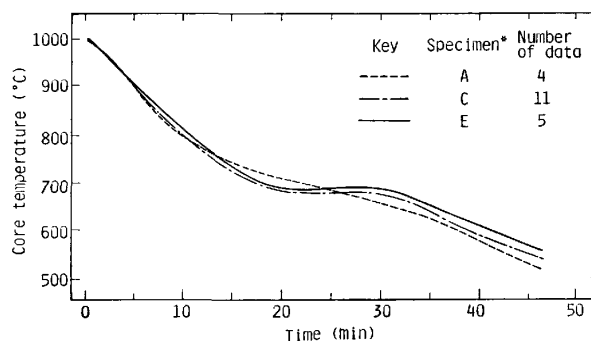
Fig. 2. Experimental apparatus for fog cooling of hot billets.



(A) General view of specimens
(B) Specimen setting on frame
Specimen size: 123mm φ × 4000mm

Photo. 1. Specimens used for fog cooling tests of hot billets.

実機で計画されている BT の C 含有量範囲は 0.1~0.8 wt% と広いから、生産される鋼種の重要度を考慮し、試料には Table 3 に示す 5 鋼種を選んだ。実機で計画されている BT 断面寸法 (冷間状態の値, 以下同じ) は 121 mm φ だが、この実験の実施時に製造されていた 123 mm φ BT を試料に用いた。試料を転回しながら冷却するため、試料の両端部を 71 mm φ に加工し、175 mm 間隔で固定枠にセットした (Photo. 1 参照)。試料



* Five billets 123mm square and 4m long were arranged on their corners with spacing between them of 175mm.

Fig. 3. Cooling curves of billets during natural cooling.

の断面中央に熱電対をセットした。

3.2.3 実験方法

5~6本の試料を固定枠ごと約1000°Cに加熱した後、ローラテーブル上で所定温度まで自然冷却し、引き続いて常温まで噴霧冷却する。試料全面の冷却を均一化するため、試料を往復運動させ、かつ90sごとに90度転回させた。噴射水量は、上面が3.3~33, 下面が5~67 l/m²·minであり、空気の噴出速度は約40 m/sである。

3.2.4 実験結果

(1) 自然冷却

自然冷却された試料の冷却曲線を Fig. 3 に示す。この図から、次のことがわかる。

- (i) 冷却速度は、試料の組成に影響される。
- (ii) 1000°C から 550°C までの冷却所要時間は、試料の C 量に比例して増大し、その値は、下記のとおりである。

0.23 wt% (試料 A) : 42'30''

0.61 wt% (試料 C) : 44'30''

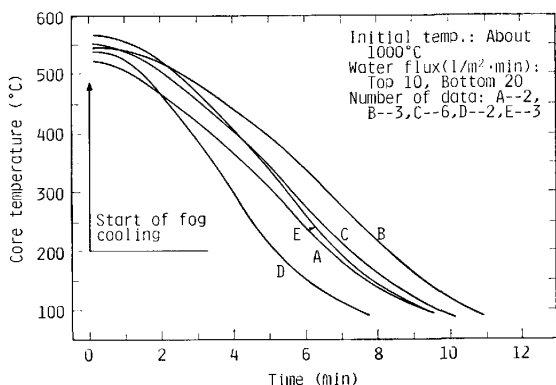
0.83 wt% (試料 E) : 46'30''

- (iii) したがって、圧延の温度条件が同じ場合、水冷ゾーンに入る BT 温度は鋼種によって相違する。

各試料とほぼ同じ組成の CCT 図にそれぞれの試料の冷却曲線を記入すると、C 量の増大につれて、変態域の温度幅が狭くなり、かつ変態温度が低下することがわかる。ここで各試料の変態熱放出量を同じと仮定すれば、変態温度の低い高 C 試料の冷却所要時間が、変態温度の高い低 C 試料のそれより長くなるはずである。この説明により (i)~(iii) の現象を理解することができる。

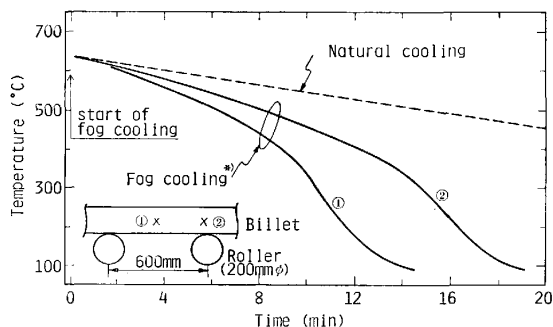
(2) 噴霧冷却

約 1000°C から所定温度まで自然冷却され、引き続いて噴霧冷却された試料の冷却曲線を Fig. 4 (平均値) と



Note : Five billets 123mm square and 4m long were arranged on their corners with spacing between them of 175mm. These billets were natural-cooled from about 1000°C down to about 550°C (core temp.), then fog-cooled.

Fig. 4. Cooling curves of billets during fog cooling.



*) Water flux (l/m²·min) : Top...17, Bottom...33

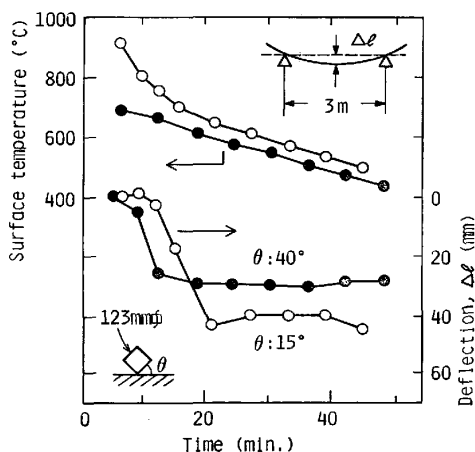
Fig. 5. Cooling curves of billets which are at rest on the roller table.

Fig. 5 に示す。これらの図から、次のことがわかる。

- (i) 試料の冷却速度は鋼種によって相違する。
- (ii) 約 550°C から 150°C までの冷却所要時間は、噴射水量が上面 : 10, 下面 20 l/m²·min の場合、10 min 以内である。
- (iii) 試料の冷却速度は、約 400°C 以下で急増する。
- (iv) ローラテーブル上に静止している試料を冷却する場合、ローラに乗っている部分の冷却は、それ以外の部分より大幅に遅れる。

冷却後の試料の表面性状の観察結果によると、試料への厚いスケールの付着量(面積比)は、試料Dが最大で試料Bが最小であった。表面温度 500~600°C の鋼材を水滴噴射冷却する場合、熱伝達量はスケール付着量に比例するから³⁾⁴⁾、試料Dの冷却速度が試料Bより大きくなるのは当然である。したがって、(i)の現象は試料表面のスケールの付着状態に影響されているものと考えられる。また、スケールの付着している鋼材を水滴噴射冷却する場合、(iii)の現象は当然である^{3)~5)}。

(3) ビレットの曲がり



Note : A hot-rolled billet 123mm square and about 5m long was arranged on its corner with spacing between fulcrums of 3m, naturally cooled down to about 500°C.

Fig. 6. Deflections of hot billets during natural cooling.

噴霧冷却されている試料の曲がり、上下水量比に影響され、その関係は、下記のとおりである。

上下水量比 (下/上)	曲がり状況
1.0~1.5	若干上反り
1.8~2.0	ほとんど曲がりなし

(4) ビレットのたわみ

冷却床のビーム配置およびビレット転回の必要性を検討するため、圧延直後の高温試料を Fig. 6 に示すように配置し、自然冷却過程における試料のたわみ量を測定した。この図から、下記のことわかる。

- (i) 試料温度が約 600°C 以上では、たわみ量は時間の経過につれて増大する。
- (ii) 菱形配置試料 (θ : 40°) のたわみ量は、他の配置試料 (θ : 15°) のそれより少ない。

4. ビレットの材質・性状調査

実機の基本仕様によると、BT は 1000°C から約 550°C まで自然冷却され、引き続いて 150°C (断面平均) 以下まで噴霧冷却される。この噴霧冷却において、BT は均一に弱冷されるはずだから、この水冷が BT の材質や性状へ悪影響を及ぼすとは考えられない。しかし、実機計画では従来水冷処理されていない高C材 BT も水冷対象に含まれているので、最終成品(主に線材)の安全性確認のため、噴霧冷却された BT の組織、機械的性質および性状を調査した。

4.1 試験方法

(1) 供試材の冷却法

供試 BT の寸法は 123 mm φ × 4 000 mm l であり、その組成は Table 3 と同じである。試料を電気炉で 1000

Table 3. Chemical composition of specimens. (wt%)

Specimen		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
Symbol	JIS								
A (□)	SS41	0.23	0.03	0.44	0.008	0.020	0.05	—	—
B (●)	SWRH42A	0.44	0.24	0.50	0.010	0.020	0.05	0.022	0.027
C (■)	SWRH62B	0.61	0.26	0.77	0.016	0.019	0.04	0.018	0.036
D (△)	SWRH62A	0.63	0.23	0.43	0.014	0.020	0.04	0.020	0.028
E (○)	SWRS82B	0.83	0.26	0.79	0.021	0.024	0.05	0.016	0.027

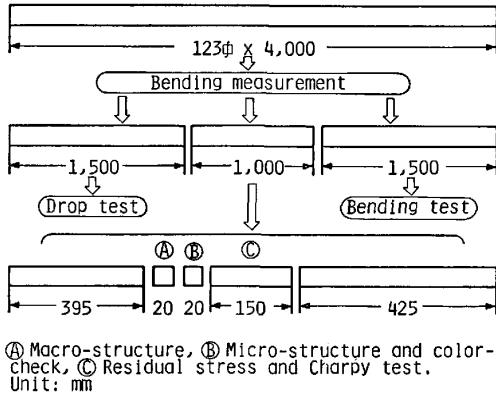


Fig. 7. Position of samples used for tests in a fog-cooled billet.

°C に加熱した後 510~580°C まで自然冷却し、引き続いて常温まで噴霧冷却した (水量: 上面 10 および 20 l/m²·min, 下面=上面×2)。試料を Fig. 7 のように切断し各種試験に供した。なお、組成の異なる 5~6 本の試料を固定枠にセットして冷却したため、試料の水冷却開始温度は大きくばらついた。

(2) 残留応力の測定

1000mm 試料の中央部を 150mm に切断し、この応力解放による長さの変化をストレインゲージで測定することによつて、残留応力を求めた (標点間隔: 100mm)。

(3) 曲げ試験

曲げ試験は、200t アムスラー曲げ試験機で行われた (試料長さ: 1500mm, 支点間隔: 1000mm)。

(4) 落重試験

落重試験は、JIS-E1101 普通ルールに準じて行われた (試料長さ: 1500mm, 支点間隔: 914mm, おもり: 907kg, 落下の高さ: 7m)。

(5) シャルピー試験

シャルピー試験片は試料の長手方向に採取され、試験は、シャルピー衝撃試験機を用いて常温で行われた (試験片: JIS 4号Vノッチ)。

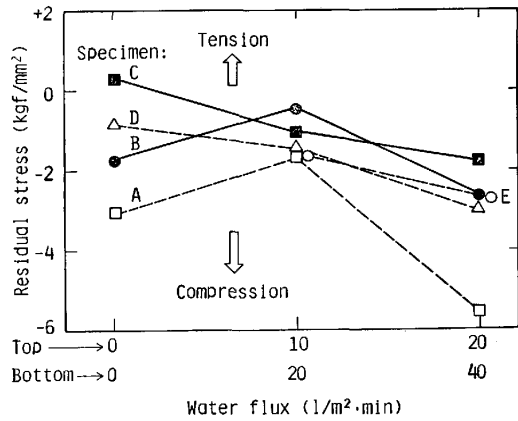
4.2 試験結果

(1) ビレットの曲がり

Table 4. The amount of bending of fog-cooled specimens.

Specimen	Natural cooling	Water flux (l/m ² ·min)	
		Top : 10	20
A	4.0 (1)	4.0 (2)	12.0 (2)
B	3.0 (1)	6.1 (7)	7.2 (10)
C	7.0 (3)	4.6 (15)	7.0 (12)
D	8.0 (1)	4.0 (2)	10.5 (2)
E	— (0)	7.7 (3)	5.5 (2)
Average	6.0 (6)	5.2 (29)	7.6 (28)

Note: Specimen: 123mm square×4m long. Amount of bending: mm per 4m long. Cooling method: Same as manner in Fig. 3. Parentheses: Number of specimens.



Note: ① Numbers of data are same as those in Table 4. ② Residual stress is average value.

Fig. 8. Influence of water flux on residual stress of fog-cooled billets.

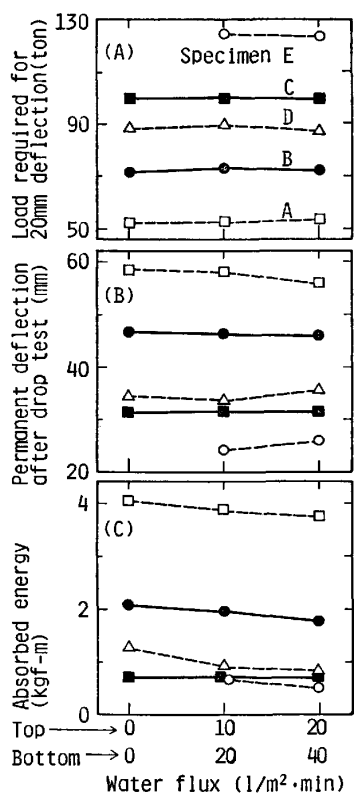
上下水量比 (下/上): 2.0 で噴霧冷却された試料の曲がり状況を Table 4 に示す。被水冷試料の曲がり量は、非水冷試料のそれとほぼ同じであり、その最大値は 15mm/4ml である。

(2) 残留応力

Fig. 8 に示すように、試料表層部の残留応力の多くは圧縮であり、その値は水量に比例して増大し、最大値は 9kgf/mm² である。被水冷試料の残留応力は、非水冷試料のそれより大きい、次工程の再加熱によつて消滅するから、この残留応力が最終成品へ悪影響を及ぼすとは考えられない。

(3) 曲げ試験

Fig. 9 に示すように、20mm たわみ時の荷重は、C 量に比例して増大するが、噴霧冷却の影響は認められない。20mm たわみ時の最大荷重は 125t (支点間隔: 1000mm)、次工程の線材加熱炉のプッシャ押圧は約 160t、そして試料の最大曲がり量は 15mm/4ml だけ



Note: ① Test conditions

(A) Bending test (Fulcrums: 1000mm apart)

(B) Drop test (Fulcrums: 914mm apart, weight: 907kg×7m high)

(C) Charpy test (Specimen: JIS No. 4)

② Values in the vertical axis are average. Numbers of data are same as those in Table 4.

Fig. 9. Influence of water flux on mechanical properties of fog-cooled billets.

ら、炉に装入されたBTは、プッシャによつて直状にされるはずである。

(4) 落重試験

落重試験では全試料(62本)が破断しなかつた。それゆえ、BTは、クレーン作業中に落下しても、破断しないものと考えられる。なお、落重試験後の永久たわみ量は、噴霧冷却の影響をほとんど受けない(Fig. 9 参照)。

(5) シャルピー試験

吸収エネルギーの値は、水量の増大につれて若干低下するが、この低下量はばらつきの範囲内と考えられる(Fig. 9 参照)。この事実は、噴霧冷却によつて、BTに焼入組織がほとんど生成していないことを示している。

(6) 組織調査

試料断面のマクロ組織およびマイクロ組織に噴霧冷却に起因すると考えられる異常は認められない。断面のカラーチェックでは、62試料中7試料に割れが認められた。しかし、これらの割れは、水量や鋼種に対応していないから、噴霧冷却によつて発生したものとは考えられない。

5. 考 察

2章のBT冷却の考え方、および3、4章の実験結果を用いて、BT噴霧冷却の可能性および実用化を検討する。

5.1 ビレット噴霧冷却の可能性

BTの強制冷却に適用される冷却法の基本的条件は、BTに悪影響(割れと曲がり)を及ぼさないことである。下記の条件(1)~(3)が満足されれば、4.2節の結果から判断し、噴霧冷却をBTの強制冷却に適用することは十分に可能である。

(1) 冷却床の構造

従来型冷却床の使用経験および今回の実験結果を用いて、冷却床の構造を検討した。その結果によると、冷却床には、BTのすり疵防止のためにウォーキングビーム方式を、BTのたわみ防止のために転回搬送方式を、BTの全面均一冷却のために菱形配置を採用すべきである。低温ゾーン(噴霧冷却ゾーン)でのBT回転は不要だが、冷却床構造の単純化のため、このゾーンでもBTを転回させることが望ましい。

(2) 直交型気水ノズルの採用

冷却床に設置する水冷設備については、全鋼種を水冷処理するため噴射水量の広い可変範囲が、設備の安定稼働のためノズル閉塞の防止が、そして低運転費のため冷媒用電力費の低減が必要である。これらの条件を同時に満足させるためには、噴霧冷却設備に著者の一人が開発した直交型気水ノズル²⁾を採用することが望ましい。

(3) ビレット曲がり防止対策の確立

BTの曲がりは種々の原因で発生することが予測される。BTの曲がりの原因として、(i)上下面または左右面の冷却能力の差、(ii)局所急冷、(iii)空冷ゾーンと水冷ゾーン境界での不均一冷却、(iv)排気流の悪影響などが考えられる。(i)と(ii)は実験によつて解決された。(iii)は機械的方法またはエアカーテンで両ゾーンを仕切ることによつて、(iv)は排気ダクトの適切な配置および吸引量調整によつて解決されるはずである。

5.2 全鋼種水冷処理の可能性

CCT図に自然冷却された試料(123mmφ)の冷却曲線を記入すると、 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態はC:0.2wt%クラスで約650°C、C:0.8wt%クラスで約680°Cで終了する(Fig. 3 参照)。偏析などの異常があつたとしても、 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態は約600°C以上で終了するものと考えられる。試料断面の観察結果によると、噴霧冷却材の結晶組織は自然冷却材のそれと同じであり、かつ何らの異常も認められていない。また、噴霧冷却材の機械的性質も自然冷却

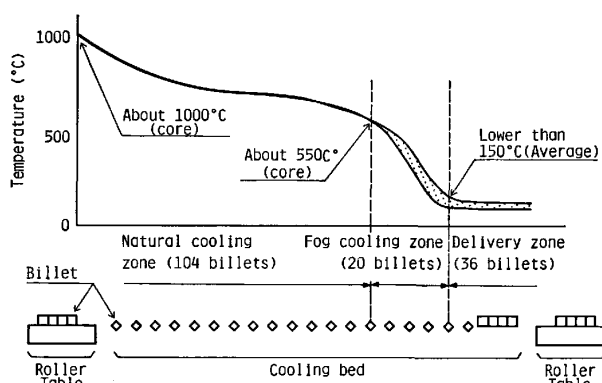


Fig. 10. A outline of the billet cooling bed in Kamaishi works which was designed by this work.

材のそれとほぼ同じである。一方、噴霧冷却材の残留応力は、次工程の再加熱によつて消滅するはずである。

以上の検討結果から、今回の実験に使用した鋼種については、 1000°C から約 550°C までの高温域を自然冷却し、それ以下の低温域を噴霧冷却することにより、BT の材質・品質は悪影響を受けないものと考えられる。

5.3 冷却床および冷却設備の基本仕様

今回の実機化計画では、既設工場内に冷却床が建設されるため、冷却床長さが約 33m と限定されている。これに対し、最大生産量の場合、 $121\text{ mm } \phi$ の BT が 90 s ごとに 4 本冷却床へ装入されるが、この状態で長時間操業されることはない。それゆえ、平均的操業状態 (BT 装入間隔: 103 s) を基準にして、冷却床および冷却設備が設計された (Fig. 10 参照)。BT は、 1000°C で冷却床に装入され、約 550°C まで自然冷却され (44.5 min)、引き続き噴霧冷却される (8.5 min)。なお、実験に使用した BT は $123\text{ mm } \phi$ だが、実機のそれは $12\text{ mm } \phi$ だから、この冷却設備は、冷却能力の点では若干安全側に設計されている。

6. 結 言

熱間圧延されたビレット (BT) の冷却時間短縮用冷却に噴霧冷却を適用する研究を行い、次の結果を得た。

(1) 空気流で微粒化された水噴霧流を上下面から対向して噴射し、噴霧流の衝突レベルに BT を菱形状態で装入すると、BT の 4 面がほぼ均等に冷却される。

(2) BT の材質・品質への悪影響を防止し、かつ経済的に BT を強制冷却するには、初期温度から $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ までの高温域を自然冷却し、それ以下の低温域を噴霧冷却するのが最適である。

(3) BT を噴霧冷却する場合、BT の菱形配置は、冷却所要時間の点で、密着配置より有利である。

(4) 今回の実験では、冷却途中および冷却後の BT 曲がり量は、上下水量比 (下/上): 2.0 で最小となる。

(5) C 量 $0.2\sim 0.8\text{ wt}\%$ の BT を約 1000°C から約 550°C まで自然冷却し、引き続き 100°C 以下まで噴霧冷却する場合、BT の組織および機械的性質は悪影響を受けない。

(6) 以上の結果から、低 C 鋼から高 C 鋼 (C 量: $0.8\text{ wt}\%$) までの BT を、約 550°C から常温まで噴霧冷却することは、材質・品質上も設備上も可能である。

(7) 「菱形配置+転回搬送」式ビレット冷却床およびこの冷却床に設置する噴霧冷却設備の基本仕様を確立した。

最後に、本研究を実施するに際し、有意義な助言をいただいた新日鉄(株)第三技術研究所府川幸平氏 (現広島工大)、福田敬爾氏、設備技術本部末永頭二氏、また実験作業を担当していただいた第三技術研究所および釜石製鉄所の関係者に深く感謝致します。

文 献

- 1) 鉄鋼製造法 (日本鉄鋼協会編) (1977), p. 284 [丸善]
- 2) 三塚正志, 福田敬爾: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 674
- 3) 三塚正志, 福田敬爾: 同上, 65 (1979), p. 606
- 4) 三塚正志, 福田敬爾: 同上, 69 (1983), p. 262
- 5) 三塚正志: 同上, 69 (1983), p. 268
- 6) 日本鉄鋼協会: データシートシリーズ 3 (高温引張試験) (1973) [日本鉄鋼協会]
- 7) 中村 修, 田浦幹彦, 三塚正志, 森瀬兵治, 末永頭二, 君島 潔: 鉄と鋼, 69 (1983) 16, p. 2010