

(解説)

ブルーム連続铸造機 3 基における高品質鋼の効率的生産体制の確立

Effective Bloom Production System Using Three Continuous Casting Machines to Produce High Quality Steel



酒井宏明*1
Hiroaki SAKAI



吉田康将*1
Yasumasa YOSHIDA



井上 建*1
Takeshi INOUE



福崎良雄*1
Yoshio FUKUZAKI



隅田一毅*2
Kazuki SUMIDA

Kobe Steel commissioned the No.5 continuous bloom caster at the Kobe Works in September 2006. Kobe Steel has three bloom casters, two at the Kobe Works and one at the Kakogawa Works, to produce high quality bar and wire products. Depending on the quantities ordered, and by using a combination of technologies and techniques, several different grades of steel can be manufactured, and the same quality steel can be produced from every continuous caster. In response to customer requests the most suitable caster can be selected according to the steel grade and the order quantity. This report considers the selection of the bloom caster, and the steelmaking process, in addition to the quantity and any special steel grades required.

まえがき＝高級特殊鋼は、自動車の重要保安部品用などの素材として一品一様の要求特性があり、厳格な製品品質が求められることから、高度な製造技術が必要とされている。一方、東アジア圏を中心とした新興国の経済成長を背景に、海外メーカーとの差別化をより顕著にさせるとともに、歩留り向上を主としたコスト低減を図っていく必要がある。

当社では、2006年9月に神戸製鉄所にNo.5連続铸造機（以下、5CC という）を新設し、加古川製鉄所を含めて線材条鋼向けブルーム連続铸造機（以下、連铸機という）3基体制とした。ユーザの納期に対応できるように溶製

鋼種の互換性を進める一方で、ロットの大きさや連铸機の品質特性に応じて最適な造り分けを検討し、3基の連铸機で高効率な生産を行うことが可能となった。本稿では、当社におけるブルーム連铸機での造り分けについて整理するとともに、品質改善事例について報告する。

1. 当社ブルーム連铸機の設備概要

当社では、線材条鋼向けのブルーム連铸機を加古川製鉄所に1基と神戸製鉄所に2基有している。それらの設備仕様を表1に示す。稼動時期の最も早い加古川製鉄所のNo.2連続铸造機（以下、BCC という）は、大断面の

表1 ブルーム連铸機の設備仕様
Table 1 Specifications of bloom casters

Item		BCC	3CC	5CC
Main Specifications	Start	1980.12	1981.1	2006.9
	Works	KAKOGAWA	KOBE	KOBE
	Ton/heat	250	90	90
	Machine type	Bending	Vertical curvilinear	Vertical bending
	Number of strands	4	2	2
	Bloom size	380 × 600mm	300 × 430mm	300 × 430mm
	Casting speed (max)	0.9m/min	1.2m/min	1.2m/min
Mold	Length	900mm	1,200mm	900mm
	Oscilation	6mm (± 3mm)	4mm (± 2mm)	3mm (± 1.5mm)
	Oscilation frequency (max.)	180cpm	240cpm	300cpm
	EMS	2 phase	2 phase	3 phase
Machine profile	Vertical length	—	4.7m	3.0m
	Bending radius	15m	10m	10m
	Machine length	34.4m	32.3m	32.4m
Secondary cooling	Zone length	13.9m	5.7m	6.5m
	Number of zone	6	5	6
	Type	Spray & mist	Spray & mist	Spray & mist
Third cooling	Type	Water bath	Mist	Air
	Location	Off line	On line	On line

*1 鉄鋼事業部門 神戸製鉄所 製鋼部 *2 鉄鋼事業部門 加古川製鉄所 製鋼部

鋳型サイズを持つブルーム連鋳機として主に大ロット材を溶製している。また、比較的低い速度で鋳造を行い、矯正時において脆化域を回避させるように長い2次冷却帯と15mの曲げ半径を有している。ほぼ同時期に稼動した神戸製鉄所のNo.3連続鋳造機（以下、3CCという）は、小ロットを対象とした高速鋳造型の垂直曲げ連鋳機である。垂直長さを十分に持つとともに、矯正時において脆化域を高温側で回避できるように2次冷却帯を緩冷却化している¹⁾。2006年に稼動した5CCは、3CCと同様に小ロットを溶製しているが、さらに緩冷却を実現すべく鋳型や垂直部を短くするとともに、ショートストローク・ハイサイクル鋳型振動を導入している²⁾。

2. ブルーム連鋳機における主な鋳造鋼種の振分け

図1～図3に3基のブルーム連鋳機の設備概要を示す。いずれの連鋳機に対しても当社機械事業部門と鉄鋼事業部門が設計を行い、設計ノウハウと操業ノウハウを構築してきたものである。その中で前述したロットの大きさや保有する設備の特性を生かして鋳造鋼種の振分けを行ってきた。主な鋳造鋼種の振分けを図4に示す。また、2010年度上半期における鋳造実績を図5に示す。

2.1 BCCで溶製する主な鋼種

軸受鋼やばね鋼・硬鋼線のように、一品一様ではなく

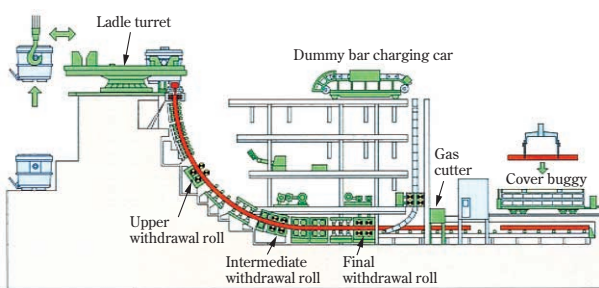


図1 BCCの設備概要

Fig. 1 Schematic diagram of No.2 bloom caster (BCC) at Kakogawa Works

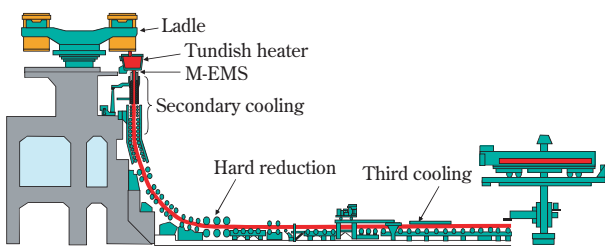


図2 3CCの設備概要

Fig. 2 Schematic diagram of No.3 bloom caster at Kobe Works

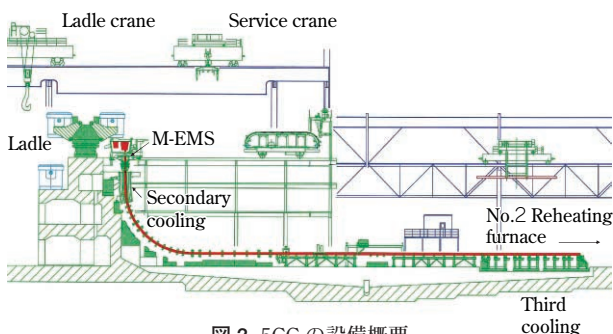


図3 5CCの設備概要

Fig. 3 Schematic diagram of No.5 bloom caster at Kobe Works

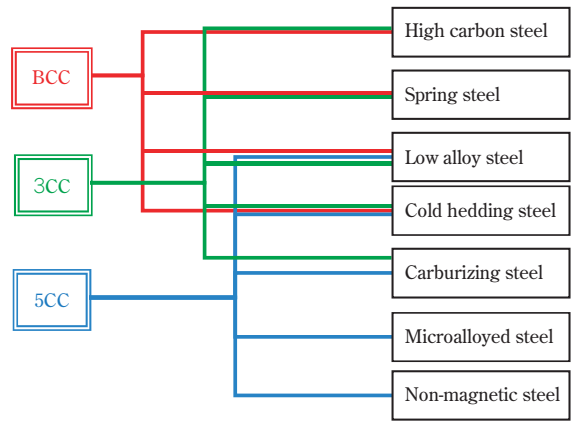


図4 各連鋳機別の主な鋳造鋼種

Fig. 4 Main steel grades produced by each bloom caster

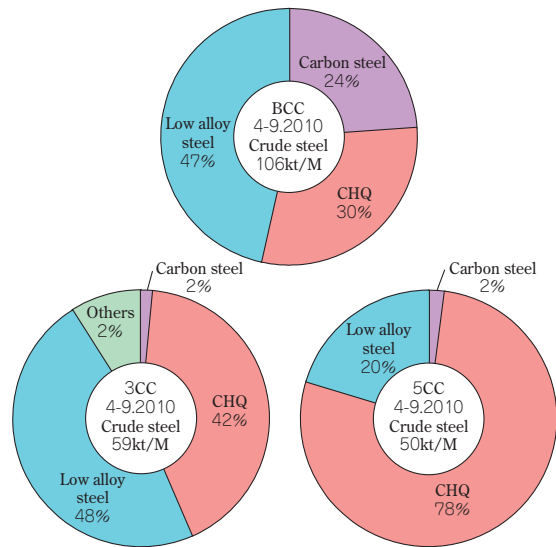


図5 連鋳機別の鋳造実績

Fig. 5 Product mix of each bloom caster

ユーザごとの要求特性の少ない鋼種は主にBCCで製造している。鋳造断面積が大きいことによって圧延比が大きく取れることから、とくに高炭素鋼では、製品での縞状偏析の微細化に対して有利であると考えられる。

2.2 3CCで溶製する主な鋼種

特殊なユーザニーズがある軸受鋼やばね鋼の一部、肌焼鋼は主に3CCで製造している。大圧下設備を保有し、偏析改善を重視した鋳造を行うとともに、表面疵を重視した高速鋳造も行うことによって幅広い鋼種の製造を行っている。

2.3 5CCで溶製する主な鋼種

5CCでは、ロットが小さく製品表面品質に対する要求が厳しい冷圧用線材（以下、CHQという）や非調質鋼を主に製造している。図5に示すように約8割はCHQであり、低・中炭素鋼に特化するとともに、鋳造ボトム等の非定常部に対して安定した温度制御が可能な3次冷却方法を行っている。

3. ブルーム連鋳における品質改善

3.1 近年の主な品質改善

表2に各連鋳機の立上げ当初からの設備改善による品質改善経緯を示す。ブルーム連鋳機3基体制のもとで、

表2 ブルーム連铸機における铸片品質改善のための設備仕様

Table 2 Transition of bloom casters for quality improvement of steel

Year	'82	'84	'86	'88	'90	'92	'94	'96	'98	'00	'02	'04	'06	'08	'10
BCC	● Start up ('80)														
	● Secondary mist cooling														
	● Third cooling														
3CC	● Start up ('81)														
	● Secondary mist cooling														
	● Modification of tundish (Γ type)														
	● Prediction system of breakout														
	● Precise level control in mold														
	● High cycle mold oscillation														
	● Tundish induction heater														
	● Hard reduction														
	● Third cooling														
	● Automatic detecting system of ladle slag														
	● Automatic control of gas flow rate to insert nozzle														
	● Reconstruction of secondary cooling zone														
	● Roll cooling														
	● Improved control of third cooling-1														
	● Improved secondary cooling nozzle														
● Improved control of third cooling-2															
5CC	● Start up														
	● Improved control of third cooling														

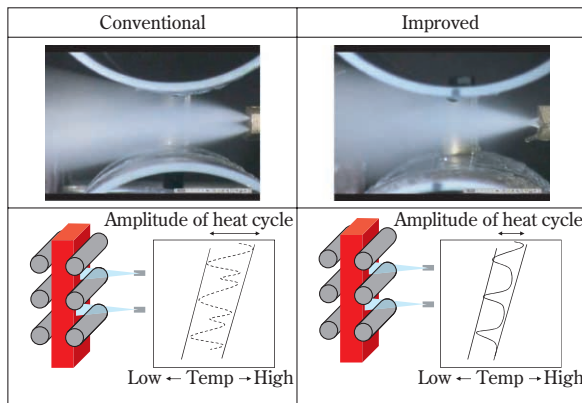


図6 2次冷却ノズルの改善

Fig. 6 Improvement of cooling by wide-angle spray nozzle

铸造鋼種の互換性を進めるとともに、相互に品質改善技術の横展開を進めていった。BCCにおいては、2004年にロールピッチ短縮を行い、2次冷却帯の緩冷却化と内部割れ防止を両立させている。また3CCにおいては、2007年に2次冷却帯に図6に示す広角ノズルを適用し、2次冷却帯内での铸片表面の温度振幅を低減することによって表面欠陥の低減を図った。また、3CCで保有する3次冷却（ミスト冷却）にも広角ノズルを導入した。こうした設備改善を進めるとともに、割れ感受性の高い鋼種に対しては操業条件の適正化を進めていった。その結果、2006年度比で表面欠陥指数は1/2以下に改善した（図7）。

3.2 割れ感受性の高い鋼種の品質改善

割れ感受性の高い鋼種では図8に示すような粒界割れや縦割れが鋼片にて発生しやすい。いずれの割れにおいても、欠陥周囲の脱炭が軽微である上に、铸片サンプルを採取しても铸造欠陥を確認することが出来なかった。また、縦割れ欠陥は3CCで溶製したMn、V系非調質鋼でのみ確認された。一方で粒界割れ欠陥は、5CCで溶製したNb添加SCM420鋼で多く確認された。したがって、これらの欠陥は铸造中に発生したのではなく、それぞ

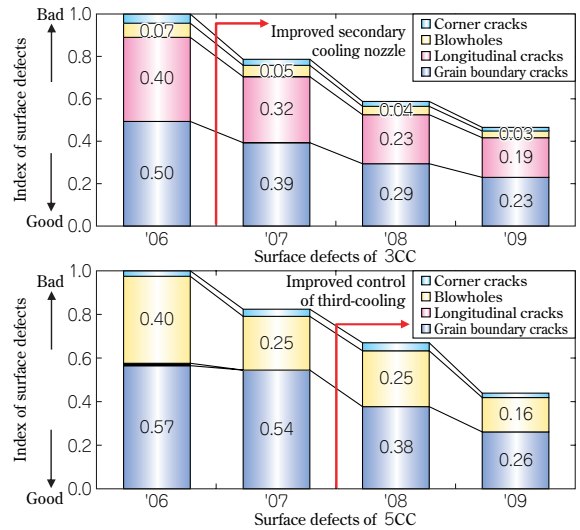


図7 ブルーム連铸機における表面欠陥指数の推移

Fig. 7 Improvement of surface defects of each bloom caster

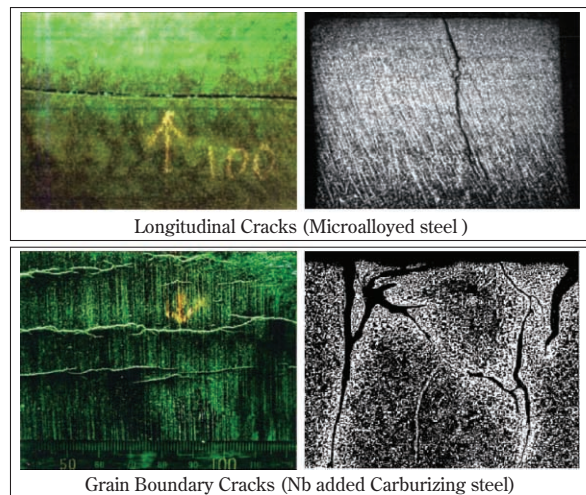


図8 割れ感受性の高い鋼種の表面欠陥

Fig. 8 Surface cracks of crack sensitivity steel

れつぎのような原因で発生したと推定される。

- (1)縦割れは、その欠陥形状より、皮下引張応力が原因と考えられ、3次冷却での冷却が過剰となり加熱炉装入時に発生したものである。
- (2)粒界割れは γ 粒に沿って割れが進展していることから、3次冷却後の組織変態が不十分であり、铸造 γ 粒が未変態のまま残ることによって分塊圧延時に割れが進展した。

以上のことから、合金添加元素による変態挙動の変化を調査するため、後述するフォーマスター試験を行った。

3.3 合金添加元素による変態への影響

3.3.1 3次冷却の考え方

铸片切断後の铸造組織は粗大な γ 粒単相となっており、組織を変態させずに分塊圧延する場合、割れの発生もしくは铸造時の割れが進展しやすいことが知られている。このことから、铸片切断後～加熱炉装入までの間に铸片表面近傍をA1変態点以下まで冷却する方法（＝3次冷却）が用いられている。図9にS45CにおけるCCT線図³⁾と分塊圧延時における铸片組織を示す。3CCにおいてはミスト冷却によって3次冷却を行っており、表面

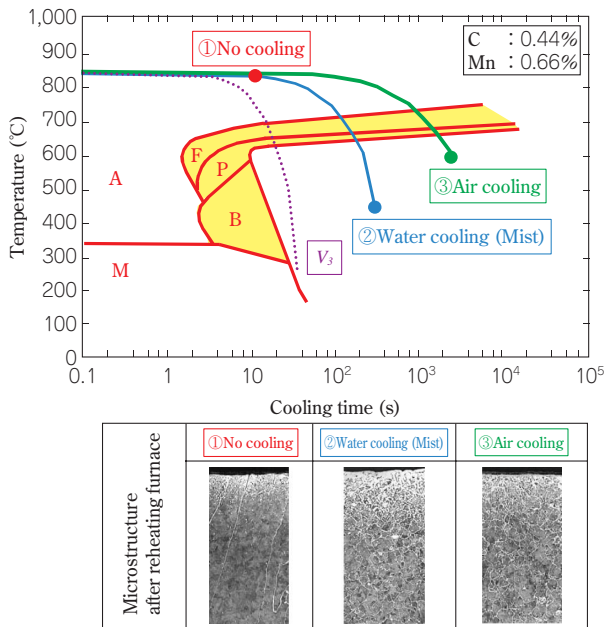


図9 S45Cにおける CCT 線図³⁾と加熱炉抽出後の結晶粒度
 Fig. 9 CCT diagram of S45C steel and microstructure after reheating furnace

冷却速度は80°C/minである。また、5CCの3次冷却では空冷を行い、表面冷却速度は5°C/minである。CCT線図より、いずれの冷却条件においても铸造組織はフェライト+パーライト組織となることが分かる。また加熱炉抽出後の铸片組織は、3次冷却を行わなかった铸片組織と比較し、いずれの冷却条件においても緻密なγ粒となっていた。これは、3次冷却されて一度γ→フェライト+パーライトとなった後に再加熱すると、微細なフェライト+パーライト組織よりγ粒が生成されることから、铸造時のγ粒(旧γ粒)とは全く別の微細なγ粒が生成されたと考えられる。

3.3.2 非調質鋼における CCT 線図

MnやMoなどの焼入れ性の高い合金元素を添加するとベイナイト領域が拡大し、臨界冷却速度が遅くなるのが一般的に知られている⁴⁾。合金添加元素による変態の影響を定量的に評価したものとしては、次式が報告されている⁵⁾。

$$\log V_3 = 6.36 - (0.43C\% + 0.49Mn\% + 0.78Ni\% + 0.27Cr\% + 0.38Mo\% + 2(Mo\%)^{1/2} + 0.0019Pa) \dots \dots \dots (1)$$

V_3 : ベイナイトが生成しない冷却速度 (°C/h)
 Pa : オーステナイト化パラメータ

Mo, Niを添加しないMn鋼では、図10に示すように V_3 とミスト冷却での冷却速度とがほぼ等しい状態となる。このことから、わずかな冷却速度の違いによってベイナイト生成の有無が分かれるのに加え、冷却速度が速くなると変態完了温度も低くなって皮下まで変態しにくくなる。したがって、ミスト冷却においては冷却水量を下げ冷却速度を遅くすることが必要となる。また空冷では、600°Cまで冷却すればフェライト+パーライト変態が完了し、安定した組織を得ることができる。

3.3.3 一般肌焼鋼における CCT 線図

Mo添加肌焼鋼では、図11に示すように臨界冷却速度

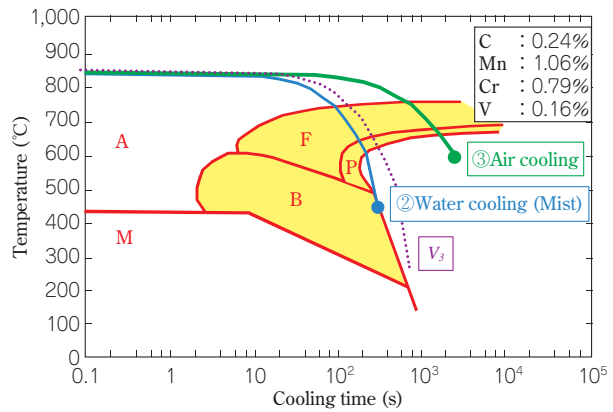


図10 Mn非調質鋼における CCT 線図³⁾
 Fig.10 CCT diagram of microalloyed steel

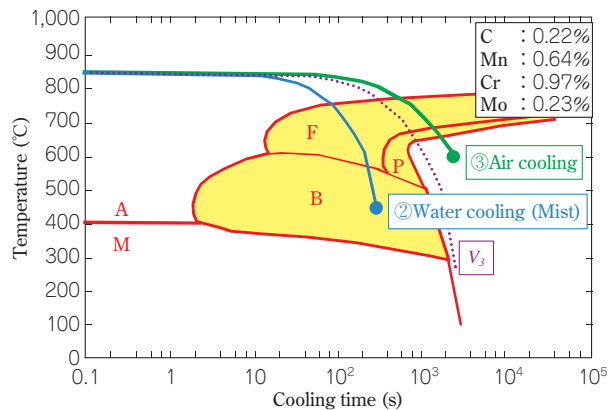


図11 肌焼鋼における CCT 線図³⁾
 Fig.11 CCT diagram of carburizing steel

がさらに下がり、ミスト冷却と空冷で組織が完全に異なる結果となる。ミスト冷却の場合は3次冷却後にフェライト+ベイナイト組織となる一方で、空冷の場合はフェライト+パーライト組織となる。これらいずれの条件においても変態完了温度が著しく低下することがないため、加熱炉抽出後の結晶粒に大きな違いは確認されなかった。このことは鋼片における欠陥指数とも一致した結果となった。

3.3.4 Nb添加肌焼鋼における CCT 線図

臨界冷却速度へのNbの影響は明らかになっていないことから、フォーマスター試験による評価を行った。铸造後のサンプルを切出し、1,300°Cまで加熱した後、5°C/minと80°C/minの2水準で冷却を行って評価した。結果を表3に示す。5°C/minで冷却したNb添加肌焼鋼の場合、SCM420と比べてフェライト変態開始温度が50°C低下するとともに、パーライト変態せず450°Cでベイナイト変態することが分かった。また80°C/minで冷却した場合はフェライト変態せず、560°Cにてベイナイト変態した。この結果をもとに作成したCCT線図を図12に示す。図11のSCM420に比べMo添加量が増加したことも影響するが、フェライト変態開始点(Fs)およびベイナイト変態開始点(Bs)が大きく右側にシフトしており、変態開始温度も低下することが分かる。また、空冷の冷却速度では600°Cにおいて铸造γ粒が残存しており、再加熱時にフェライト+γ組織となって割れやすい組織であることも確認された。このことから、Nb添加

表3 SCM420+Nb(0.03%)における変態温度

Table 3 Transformation temperatures of SCM420 + Nb(0.03%) measured by Formaster

Steel grade	Heating temperature (°C)	Cooling rate (°C/min)	Transformation temperature (°C)							
			Ferrite		Pearlite		Bainite		Martensite	
			Start	Finish	Start	Finish	Start	Finish	Start	Finish
SCM420*1	-	5	770	680	650					
		80	750			580	320			
SCM420*2 + Nb (0.03%)	1,300	5	720			450	450			
		80				560	360			

*1 From reference³⁾
(C=0.22%, Mn=0.64%, Cr=0.97%, Mo=0.23%, Nb=tr.)
*2 Measured by Formaster
(C=0.22%, Mn=0.85%, Cr=1.20%, Mo=0.30%, Nb=0.03%)

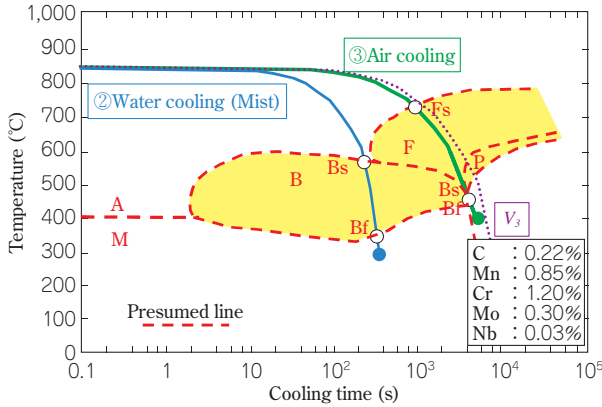


図12 Nb 添加肌焼鋼における CCT 線図
Fig.12 CCT diagram of Nb added carburizing steel

SCM420 鋼は空冷時間を延長させる必要があること、またミスト冷却の場合は、ベイナイト単相となることから安定して組織変態することが確認された。

3.3.5 各ブルーム連鋳機における3次冷却の最適化および鋼種別対応

前項の結果を整理したものを表4に示す。ミスト冷却においては、Mn 非調質鋼のように臨界冷却速度と冷却速度が近くなる場合、冷却速度を遅くすることによって変態を安定化させ、温度むらの影響を受けにくくすることができる。一方、空冷においては、Nb 添加鋼や高 Mo 鋼のようにパーライト変態しにくいものについては、3次冷却時間を延長することによって変態を完了させることが可能である。

表4 各鋼種における最適な冷却方法

Table 4 Optimum cooling method for various steels

Steel grade	Carbon steel	Microalloyed steel	Carburizing steel	Nb added Carburizing steel
	S45C	KNCH10*1	SCM420	SCM420+Nb
V_2^{*2}	high	→	→	low
Water cooling	Structure	F + P	F + P + (B)	F + B
	Start temperature B or P	660°C	610°C (450°C)	580°C
	Favorability*3	○	△→○	○
	More stable	-	decrease cooling rate	-
	Improvement	-	reduce water flow rate	-
Air cooling	Structure	F + P	F + P	F + (B)
	Start temperature B or P	680°C	680°C	450°C
	Favorability*3	○	○	△→○
	More stable	-	-	extend cooling time
	Improvement	-	-	extend cooling time

*1 KNCH10 ; KOBELCO BLAND *3 ○ Good
*2 Critical cooling rate to attain a fully annealed structure △ Possible × Impossible
 $\log V_2 = 6.36 - (0.43C\% + 0.49Mn\% + 0.78Ni\% + 0.27Cr\% + 0.38Mo\% + 2(Mo\%)^{1/2} + 0.0019Pa)$

むすび＝当社における高級特殊鋼の生産能力を強化するため、2006年9月に5CCを稼働させ、ブルーム連鋳3基体制とした。鋳造鋼種の互換を進める中で品質改善技術の共有化を図るとともに、特殊成分系鋼種の最適生産体制を確立した。とくに連鋳機ごとの3次冷却方法の違いを活用することにより、今後ますます多様化する特殊鋼に最適に対応することが可能である。今後も技術レベルの向上を図り、品質の向上とお客様満足度向上に努めていく所存である。

参考文献

- 1) 福崎良雄：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50, No.1 (2000), p.17.
- 2) 酒井宏明：R&D 神戸製鋼技報，Vol.56, No.3 (2006), pp.9-13.
- 3) 大和久重雄：S 曲線新版，日刊工業新聞社，(1967), 296p.
- 4) 須藤 一ほか：金属組織学，丸善，(1972), 293p.
- 5) D. V. DOANE & J. S. KIRKALDY：Hardenability Concepts with Applications to Steel, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., (1978), pp.163-178.