

極厚大単重鋼板の製造技術の概要

Features of Manufacturing Ultra-heavy Steel Plates

楠原 祐司*
Yuji Kusuhara

黒田 健三*
Kenzo Kuroda

関根 稔弘**
Toshihiro Sekine

難波 明彦***
Akihiko Nanba

岡野 忍****
Shinobu Okano

Synopsis:

Heavy steel plates are increasingly demanded by many industrial sectors, and the quality requirements for reliability are getting more stringent. In order to meet these requirements, Kawasaki Steel Corp. has developed manufacturing techniques for ultra-wide and heavy steel plates up to 5300mm in width and 95 tons in unit product weight through the establishment of techniques for removing phosphorus, sulfur, and hydrogen, as well as the study of optimum shape of mold for large ingot.

1. 緒 言

極厚鋼板の需要は、近年の圧力容器使用分野の飛躍的な拡大に伴って、ますます増大しつつある。しかも圧力容器は、製作コストおよび運転コストの低減を目的として大型化の傾向にあり、機器の信頼性を高めるため、使用鋼材に対する品質要求もよりいっそう厳しくなっている。極厚鋼板の品質は、素材の品質水準によって大半が決まるので、素材の製造工程は特に重要である。本報では、極厚鋼板用大型鋼塊の溶製法を中心に、極厚大単重鋼板の製造に関する当社の現状を紹介する。

2. 極厚大単重鋼板の製造工程概要

Fig. 1に、当社水島製鉄所における極厚大単重鋼板の製造プロセスと使用設備を示す。本報では、主として板厚が100mm以上で、製品単重も20t以

上の厚鋼板を極厚大単重鋼板と称する。大型鋼塊の溶製については次章で詳しく述べるが、当所では、LD転炉→RH真空脱ガス工程とLD転炉→LRF(Ladle Refining Furnace)工程および電炉→LRF工程(以下EF→LRF工程と記す)があり、LD→RH工程は主としてA516鋼等に代表される炭素鋼に、LD→LRFおよびEF→LRF工程は、A387鋼等に代表される低合金鋼に適用されている¹⁾。鋼塊から圧延素材(スラブ)を製造するプロセスは製品の超音波探傷試験(UST)基準、鋼塊重量および、圧下比により分塊圧延法、鍛造法のいずれかが選択される。

3. 大型鋼塊の製造

3-1 脱磷, 脱硫

極低硫鋼については、徹底した溶銑脱硫により、S含有量を0.002%以下とすることができる。また

* 水島製鉄所管理部厚板管理課課長

** 水島製鉄所製鋼部第1製鋼課課長

[昭和55年1月4日原稿受付]

** 水島製鉄所管理部厚板管理課課長

**** 技術研究所水島研究室主任研究員

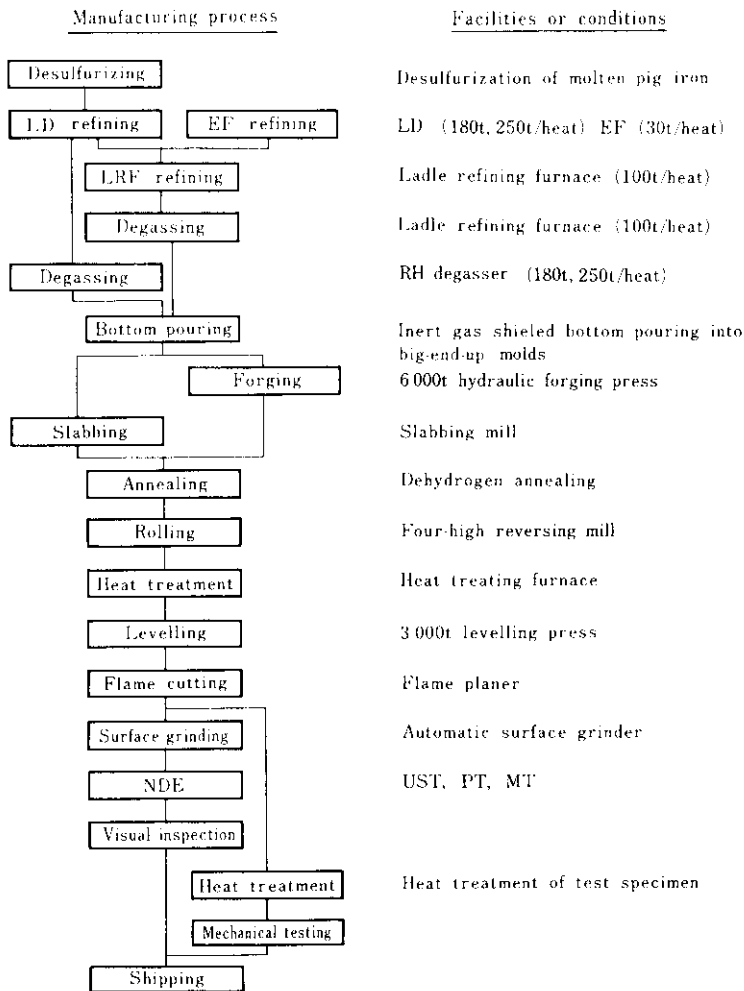


Fig.1 Manufacturing process and facilities for heavy plates at Mizushima Works

極低磷鋼については、EF-LRF工程、LD-LRF工程、またはLD転炉2回吹錬法により、高合金鋼でもP含有量を0.005%以下にできる。2回吹錬法とは、Fig. 2に示すように、1回目の吹錬で脱磷処理を行った後出鋼し、Pに富んだスラグを分離した後再びLD転炉へ装入し、2回目の吹錬を行う溶製方法である。

このほか焼もどし脆化対策として、Sn, As, Sb等の微量不純物の低減も重要である。LDプロセスでは、これら不純物の少ない溶銑を用いた全溶銑吹錬により、これらの不純物を安定して低減できる。一方EFプロセスでは、十分管理した工場内発生スクラップを使用することにより、上記不純物の低い含有量を保証することが可能である。

3・2 低水素鋼の溶製

3・2・1 転炉吹錬の水素対策

吹止時の水素低減のための主な対策はつぎの3点である。

- (1) 水分を吸収しやすい焼石灰の石灰石への置換
- (2) 付着水分の多いミルスケール、鉄鉱石の使用規制

LD転炉への焼石灰投入量と吹止水素の関係は、Fig. 3に示すように正の相関が認められる。これはスラグ塩基度の上昇による水素吸収能の増大とCaOの水分吸収の二つの因子によると考えられる。

つぎに、出鋼後の取鍋内水素含有量増加を防止するため、以下の対策が実施される。

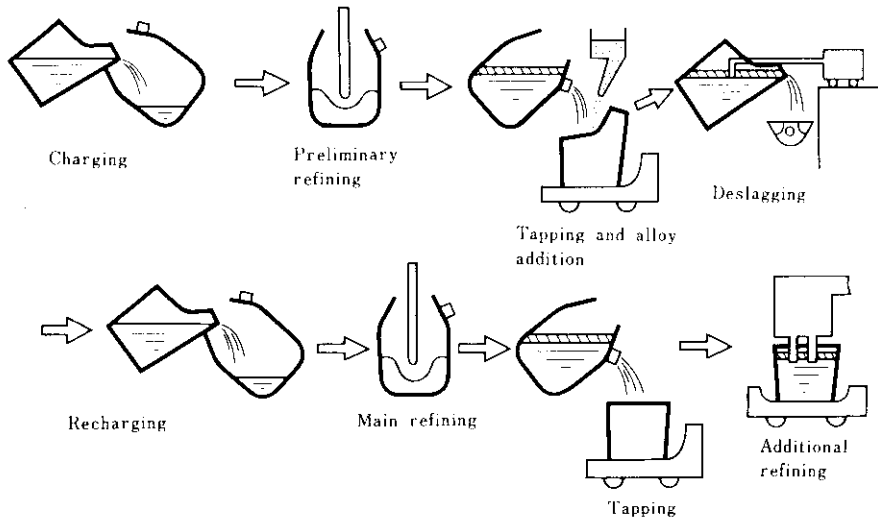


Fig. 2 An outline of the double slag refining in a LD converter

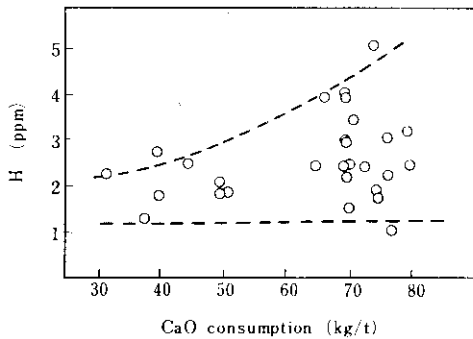


Fig. 3 Effect of CaO consumption in LD converter on hydrogen content in molten steel at blow end

- (1) 合金鉄の乾燥
 - (2) 取鍋へのスラグ流出の防止——スラグ中の水素の溶鋼への移行防止
 - (3) 強脱酸時期の変更(LD炉下→RHまたはLRF)——出鋼中の大気からの水素吸収の防止
- これらの方法を採用することにより Fig. 4 に示すような水素低減効果が得られる。

3・2・2 取鍋での脱水素処理法

- (1) LRFにおける脱水素処理

Fig. 5 にその模式図を示すようにLRFにおいては、真空脱ガス中に電磁誘導攪拌とArガス底吹きを併用するAIS法(Argon gas and Induction Stirring)の実施により、短時間で効率よく脱ガスが進行し、Fig. 6 に示すように、脱水素率が大幅に改善される。

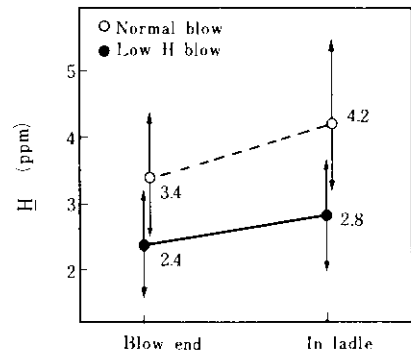


Fig. 4 Effectiveness of low hydrogen LD blowing

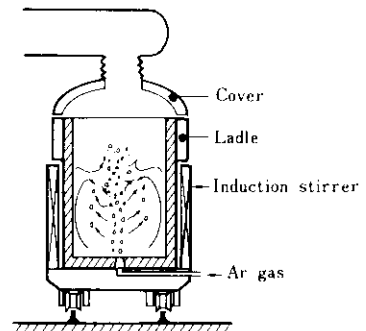


Fig. 5 AIS (Argon gas and Induction Stirring) degassing process

幅に改善される。低水素仕様の精錬終了時の水素含有量は約0.7ppmまで低減する。

- (2) RH脱ガスにおける低水素処理

RH式真空脱ガス法においては、環流管径の増加、

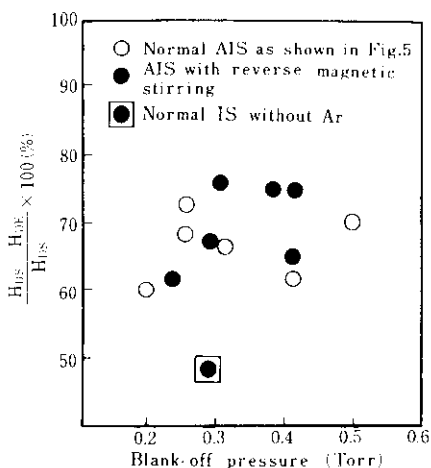


Fig. 6 Ratio of dehydrogenation by AIS degassing process

環流ガス量の増加および槽内容鋼量の増大を図ることにより環流量が大幅に増加し、非金属介在物低減効果と脱水素の両面に寄与した。200t ヒートで30minのRH処理により、LRFでの処理とほぼ同等の0.7~0.8ppmまで水素含有量を低減できる。

3.3 造塊

鋼塊の優れた内部品質の確保のためには、注入中の介在物増加原因を除き、かつ注入および凝固中の介在物の浮上除去を促進することと、凝固過程における偏析およびザクの生成傾向の小さい鋳型（詳細は後述する）を使用することが特に重要である²⁻⁴⁾。

鋼塊 casting 時の諸技術については、すでに高級厚鋼板の製造技術として確立しており、その重要管理項目を **Table 1** に示す。 casting 温度、湯上り速度、湯面被覆材粘度は、介在物対策のほかに鋼塊表面割れおよび表皮下欠陥対策としても重要である。**Fig. 7** にその影響を例示する。また、Ar シール無酸化下注造塊法の徹底により、**Table 2** に示すように、清浄度の著しい改善効果が得られる。当社ではこの無酸化下注造塊の有利性を高く評価し、100t 以上の大型鋼塊も含めてすべての高級鋼の casting に適用している。

つぎに、注入中の水素吸収防止も極厚鋼板にお

Table 2 Effect of sulfur content and bottom pouring condition on cleanliness of SA533B Cl.1 steel plates from 60t big-end-up ingots

Plate thickness		240mm	250mm	
Pouring temperature and shielding gas		1580°C Not shielded	1595°C Inert gas	
Cleanliness (%)	Type	Position*		
	d _A	TCQ		0.02
		TCM		0.02
		BCQ		0.02
		BCM		0.01
	d _B + d _C	TCQ		0.02
TCM			0.03	
BCQ			0.05	
BCM			0.06	

* T: Top, B: Bottom, C: Center of width, Q: ¼t, M: ½t

Table 1 Controlling items in pouring process

Controlling item	Method	Procedure
Optimum pouring temperature	Arc heating	(1600 ⁺⁵ ₀)°C bottom pouring
Optimum pouring speed	(1) Selection of refractory (2) Nozzle placement	(1) Pouring speed : 150~200mm/min (2) 3 nozzles
Prevention of molten steel oxydation	(1) Inert gas sealed bottom pouring (2) High viscosity flux	(1) Oxygen content in mold : max.0.1% (2) Flux viscosity : 400P at 1250°C
Prevention of hydrogen absorption	(1) Preheating of refractory and flux (2) Inert gas shielded bottom pouring	Preheating temperature : 150°C
Depression of segregation and center porosity	Big-end-up mold	Top discard of ingot : min. 20%

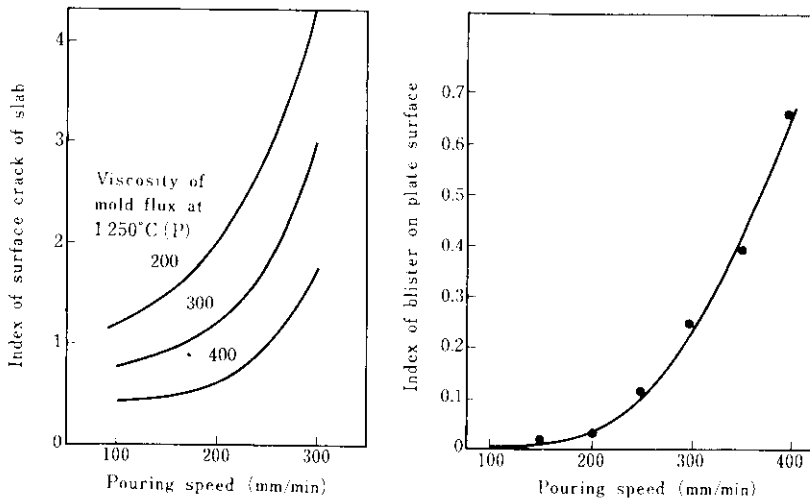


Fig. 7 Effect of bottom pouring speed on surface quality of low alloy steel ingots

いて特に重視される。精錬段階で達成された低水素レベルがそのまま維持されれば、多くの場合次工程での脱水素処理は不要となる。 casting中の水素吸収防止対策として casting型、耐火物、表面被覆材の casting前の乾燥、および上記の無酸化下注造塊による大気しゃ断を徹底して実施することにより、水素吸収量は約0.2 (0.0~0.4) ppmに抑えることができる。

4. 大型鋼塊の内部性状

4.1 鑄型形状と鋼塊内部性状の関係

鋼塊には、ザク、C偏析および逆V偏析等の欠陥が不可避免的に発生するが、それらの欠陥の程度は鑄型形状によって変化する。5 t程度の小型鋼塊については、鑄型形状と鋼塊内質との関係が明らかにされている^{5,6)}が、極厚鋼板製造に用いられる大型偏平鋼塊についての調査結果⁷⁾は少ない。このため、高さ、厚み、幅およびテーパの異なる20~90tの偏平鋼塊9本(C: 0.16~0.19%, Si: 0.28~0.44%, Mn: 1.35~1.50%, P: 0.011~0.019%, S: 0.002~0.004%)を破断し、鋼塊軸心部のザク、C偏析および逆V偏析と鑄型形状との関係を調査した⁸⁾。

鋼塊内のザクは逆V偏析線部と軸心部に生じやすい。極厚鋼板の場合には鋼塊から製品までの圧下量が少ないため、逆V偏析線部のザクは圧着し

ても、軸心部のザクは最後まで未圧着で残留しやすい。この軸心部のザクを定量的に評価するため、鋼塊幅中央部から厚さ200mmの試片を切り出し、全面的超音波探傷を行った。鋼塊軸心部の超音波感度と、ザク欠陥がない鋼塊表層部の超音波感度との差(dB)をもってザク指数とし、押湯部を除く全高さにわたるザク指数の平均値を求めた。この平均ザク指数(LSI)と鑄型形状との関係を調査し、25%有意水準で次の回帰式が得られた。ここでH、Dはそれぞれ、鋼塊の高さ、厚み(m)である。

$$LSI = 5.9 + 1.05 \frac{H}{D} \dots\dots\dots (1)$$

鋼塊幅方向中央縦断面に現われる逆V偏析線の本数は、鋼塊底部では少なく、頭部が多い。したがって、鋼塊本体高さ方向の逆V偏析線本数の平均値、 N_A を求め、これと鑄型形状との関係を調べ、5%有意水準で次の重回帰式が得られた。ここで T_p は鑄型長辺面のテーパ(%)である。

$$N_A = 8.0 - 0.68 T_p + 11D - 3.2 \frac{H}{D} \dots\dots (2)$$

鋼塊本体内の最大偏析比、 C_{max}/C_0 については、同様にして、25%有意水準で次式が得られた。

$$\frac{C_{max}}{C_0} = 0.8 - 0.033 T_p + 0.67D \dots\dots (3)$$

鋼塊重量および鑄型テーパを一定にした場合、これらの欠陥が鋼塊幅および厚みによってどう変わるかを定性的にFig. 8に示した。極厚鋼板でのザクによる欠陥防止のために許容されるLSI値は製

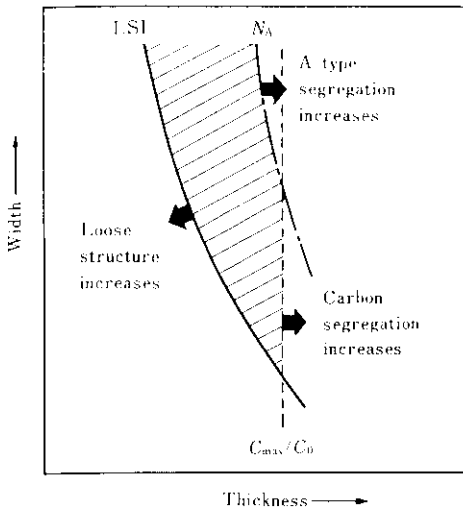


Fig. 8 Schema showing the influence of mold dimension on the internal quality of ingot

品板厚および加工方法によって変わるが、鋼塊の幅および厚みはこれを満足させる範囲になければならない。すなわち、図中のLSI線より上側の範囲に選ぶ必要がある。一方、 N_A および C_{max}/C_0 は鑄型テーパによっても変わるので、これを適度に選ぶことによって、図中の斜線で示したように、ザク、逆V偏析およびC偏析の管理目標に適する鋼塊幅および厚みの範囲が求まる。

4.2 極厚鋼板用新型鑄型

偏平大型鋼塊の内部性状と鑄型形状との関係を定量化することができたので、これをもとに製品寸法・製造工程上の制約条件等も加味して25 tから115tまでの極厚鋼板用偏平鑄型を新たに製作し

た。このうち40~45 t用新・旧型鑄型に鑄込んだ0.19% C鋼の鋼塊軸心部におけるC偏析率をFig. 9に示す。鋼塊頭部の偏析は予想どおり減少し、逆V偏析・ザクも軽減しており、極厚鋼板用鋼塊として十分満足できるものであった。このようにして精錬・造塊を含めて極厚大単重鋼板用偏平鋼塊の製造技術が確立し、従来の大型鋼塊の使用も含め、最大95 tまでの製品要求に応じられるようになった。

5. スラブの製造

5.1 工程選択

スラブ製造工程は、鍛造工程または分塊圧延工程のいずれかを選択する。現在の工程選択基準はUST基準、製品単重、製品厚、スラブ厚により決定され、それぞれのUST基準においてザク性欠陥が検出されない条件を選んで設定されている。

5.2 残留水素量の管理

水素性欠陥は製品板厚 t の $1/8$, $1/4$, および $3/4$ の位置に発生する傾向があるが、これは鋼塊のザク分布と対応しており、ザクに析出した水素分子によるものと考えられる。圧下比が大きくなるに従い $1/4 t$, $3/4 t$ 位置の欠陥がまず消失し、最後に $1/8 t$ 部の欠陥も消失することから、極厚鋼板の場合、中心部ザクの圧着が十分達成されるプロセスを採用したうえ、さらに板厚中心の残留水素量をも管理することが必要である。

厚板向スラブの製造工程においては、スラブの

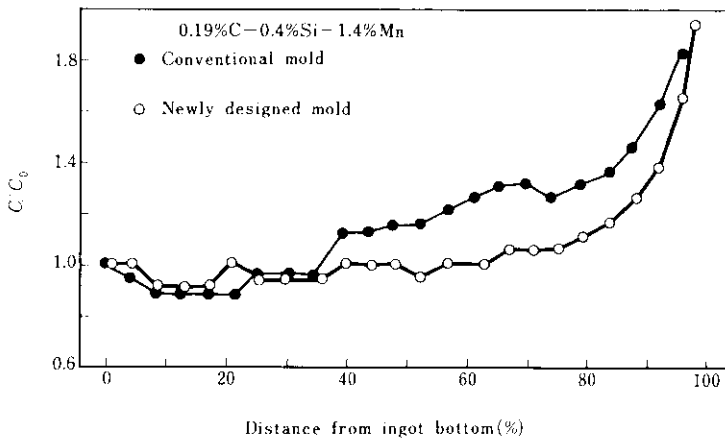


Fig. 9 Macrosegregation of carbon along the vertical axis of ingots

徐冷による脱水素の後、必要に応じてスラブの脱水素焼鈍を実施する。この処理は、スラブを、徐冷完了後 200°C 以下に下げることなく熱処理炉に移し、650°C で所要時間保持することにより完了する。

熱処理の要否は、UST 基準、スラブ厚、製品厚、スラブ製造工程によって決定し、焼鈍時間は、各品質要求に応じたスラブの残留水素限界許容量に基づいて決定する。

この水素濃度管理水準はオーダーごとに製鋼命令作成時点で指定され製鋼段階からの一貫管理により効果的に機能しており、昭和53年末に施行して以来、水素性欠陥の発生は皆無となった。

5-3 偏析管理

偏析には、V 偏析、逆 V 偏析、負偏析等があるが、いずれも、鋳型特性、鋼種の影響が大きい。

したがって、偏析特性の優れた鋳型の使用、およびその特性に応じた鋼塊頭部、底部の切捨て基準が特に重要である。

6. 超広幅極厚大単重鋼板の製造

圧力容器用鋼材が、厚肉化、大単重化の傾向にあることは既に述べたが、このうち後者の大単重化は、厚肉化による製品重量の増大のほかに、溶

接工数の削減と使用中検査の簡略化のための、製品幅および長さの拡大をも意味している。これまで製品長さについては、各ミルメーカーとも、現状の能力で十分容器製作者側の要求を満たしていると考えられるが、製品幅については、圧延設備能力上の制約から、現状で十分とは言い難い。このような背景から、製品幅 5 000mm を超えるような超広幅の極厚鋼板の要求が高まりつつある。当社では、これらの要求に呼応し、従来の第1厚板工場⁹⁾では製品最大幅 4 500mm、製品最大単重 50 t であった能力を最大厚 400mm、最大幅 5 300mm、最大単重 95 t に一挙に拡大し、昭和53年 8 月から、第2厚板工場で 5 m を超える世界最大級の超広幅大単重極厚鋼板の製造を開始した。Table 3 に圧延設備の概要を、Photo. 1 に圧延直後の超広幅大単重鋼板を示す。

これまでに水島製鉄所で製造し出荷された超広幅極厚大単重鋼板は 1 000t を超える。それらの代表例を Table 4 に示す。これらの鋼板を用いた結果、圧力容器に限らず、製作時の溶接工数が大幅に削減された。Photo. 2 に超広幅極厚鋼板を圧力容器の胴板に熱間加工している状況を示す。このような超広幅大単重極厚鋼板の品質特性は、通常の極厚鋼板と比べて何ら遜色なく、いずれも優れた内部品質と安定した機械的性質を示した。

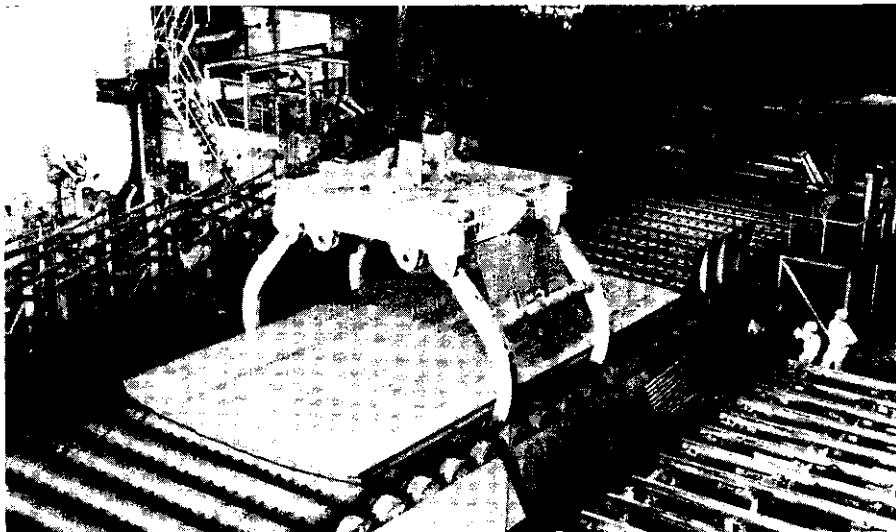


Photo. 1 View of an ultra-wide and-heavy plate

Table 3 Outline of plate rolling facilities for heavy plates at Mizushima Works

Facilities	Specifications
Reheating furnace	Type : One way top firing Space : 4 950w × 6 550l × 2 900h (mm) Fuel : LPG + BF gas Slab size : 300~800mm thick 1 400~4 000mm wide 2 500~6 000mm long Max. 110t in weight
Plate mill	Type : 4-high reversing Work roll : 1 020φ × 5 490mm Back-up roll : 2 400φ × 5 390mm Main motor : 8 000kW × 2 Rolling force : Max. 10 000t

**Photo. 2** View of hot forming of an ultra-wide and-heavy plate for pressure vessel**Table 4** Typical examples of ultra-wide and-heavy plates manufactured at Mizushima Works

Grade	Dimension (mm)			Weight (kg)	Quantity	Total weight (kg)	Application
	t	w	l				
JIS SS41	250	4 880	4 965	47 550	1	47 550	Press bed
"	250	4 880	5 965	57 130	1	57 130	Press bed
ASTM A533B 1	163	4 085	12 580	65 800	1	65 800	Test plate
"	250	4 400	7 050	60 900	1	60 900	Test plate
ASTM A516 65	164	5 310	5 400	36 900	1	36 900	Pressure vessel
"	164	5 310	5 150	35 210	1	35 210	"
BS1501-224 32B	76	4 820	9 430	27 120	8	216 920	"
"	76	4 740	9 430	26 700	4	106 670	"
"	76	4 710	9 430	26 500	4	105 980	"
JIS SM41A	170	4 950	8 950	59 100	5	295 500	Base plate of bridge tower
Total					27	1 028 560	

Note : Manufactured since August '78 to June '79

7. むすび

以上極厚大単重鋼板用素材の製造技術に関する当社の現状を紹介した。

脱燐、脱硫、脱水素技術の確立および大型鋼塊

用鋳型の最適形状の検討等により、現在では、最大製品単量95tまで、最大製品幅5 300mmまでの高品質、極厚大単重鋼板の製作が可能である。

最近では、これらの技術を結集して、2¼Cr-1Mo極厚大単重鋼板の量産を行っている。

参考文献

- 1) 江本, はか: 鉄と鋼, 63 (1977) 13, 101

- 2) 岡野, ほか: 鉄と鋼, 64 (1978), S675
- 3) 北岡, ほか: 鉄と鋼, 64 (1978), S160
- 4) 中川: 鉄と鋼, 64 (1978) 12, 113
- 5) 平居, ほか: 鉄と鋼, 59 (1973) 11, S441
- 6) 鈴木, ほか: 鉄と鋼, 59 (1973) 3, 431
- 7) 川和, ほか: 鉄と鋼, 62 (1976) 13, 1668
- 8) 木下, ほか: 65 (1979) 13, 1868
- 9) 江本, ほか: 川崎製鉄技報, 6 (1974) 2, 152

