
川鉄の極厚鋼板について

Introducing Kawasaki Steel's Extra-Heavy Plates

松本 弘之(Hiroyuki Matsumoto)

要旨：

1971年4月、川崎製鉄（株）水島製鉄所で、極厚鋼板製造設備が稼働を開始した。当設備は、原子炉圧力容器や脱硫装置の圧力容器などの特殊な用途に用いられる高品質の極厚鋼板を製造するのが主目的である。大きな特長は、一貫した製造管理、品質管理ができること。母溶鋼の精錬に転炉・取鍋精錬炉方式を採用しているため、内部健全性のすぐれた高信頼性の鋼板が得られること、などである。本報告は、極厚鋼板の開発経緯、品質及び製造工程上の特長、規格、用途について概要を述べている。

Synopsis：

In April 1971, the extra-heavy plate production system started its operation at Mizushima Works, Kawasaki Steel Corporation. With its main purpose for the manufacture of high-grade extra-heavy plate for nuclear reactor vessels and pressure vessels for desulphurizing equipment, the system features an integrated control system for production and product control, together with the use of LD-LRF (ladle refining furnace) system for mother metal refining. These contribute greatly to the manufacture of highly reliable steel plates of superior soundness. This report relates some background of the development of the extra-heavy plate, its quality and characteristics for manufacturing process, specifications and applications.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

川鉄の極厚鋼板について

Introducing Kawasaki Steel's Extra-Heavy Plates

松 本 弘 之*

Hiroyuki Matsumoto

Synopsis:

In April 1971, the extra-heavy plate production system started its operation at Mizushima Works, Kawasaki Steel Corporation. With its main purpose for the manufacture of high-grade extra-heavy plate for nuclear reactor vessels and pressure vessels for desulphurizing equipment, the system features an integrated control system for production and product control, together with the use of LD-LRF (ladle refining furnace) system for mother metal refining. These contribute greatly to the manufacture of highly reliable steel plates of superior soundness. This report relates some background of the development of the extra-heavy plate, its quality and characteristics for manufacturing process, specifications and applications.

1. ま え が き

近年、めざましい産業発展にともない、石油精製工業、化学工業、火力および原子力発電などの分野で使われる圧力容器は、従来に比し大型化、高性能化が要求されるようになった。このような情勢に対処するため、鋼板の極厚化、高品質化がますます要望されるようになっている。

また公害問題、石油危機などが大きくクローズアップされた最近では、石油脱硫装置、原子力発電設備の設置が世界的に急激な伸びを見せており、これらの機器に使用される極厚鋼板の需要は膨大なものとなってきた。

一般に極厚鋼板とは、板厚 100mm 以上の鋼板の総称であるが、この中には従来の鑄鍛鋼品の代用として、重機械、産業機械などの構造用に使われる普通鋼規格のものから、高温、高圧で使われる化学用圧力容器とか、厳しい安全性が要求される発電用原子炉圧力容器など、特殊な分野に用いられる鋼板まで含まれており、単に極厚鋼板の呼称では範囲が広すぎて判然としないことから、当社では特殊工程を経由するもの、および特殊用途に使用されるものを「特殊極厚鋼板」と呼んで、一般用極厚鋼板と区別している。

特に圧力容器用特殊極厚鋼板は、その用途、操業条件、破壊時の影響の大きさからみて、最高級の製造技術が要求される鋼板といってさしつかえ

* 技術本部鋼材技術部部長

なく、その最たるものが原子炉压力容器用鋼板であらう。したがって、これらの鋼板について、メーカーとしては単に製造できる技術があればよいということだけでなく、綿密な品質保証体制の確立とその実施が要求されている。

最高の品質を生み出す技術と、それを常に安定して実施できる体制が要求されるということは、通常の鋼板の製作にあたって遭遇したことのない「事件」といえよう。

以下に当社極厚鋼板の開発経緯、品質、および製造工程の特徴、規格、用途などについて述べる。

2. 極厚鋼板の開発経緯

当社における極厚鋼板の製造は、いわゆる機械構造用鋼としてのものが最初である。従来、鋳鍛鋼品が主体となっていた大型機械部品が、溶接技術の進歩により、鋼板構造に変わってゆく傾向にあわせて、当時日本としては最新鋭の臨海製鉄所といわれた千葉製鉄所で、昭和30年より製造を開始した。

当時の製品寸法は、板厚 200mm まで、幅 1 500 mm までのもので、製造の当初は、表面欠陥、ひずみなど多くの問題はあったが、短期間でこれらを解決し、本格的な製造を開始した。鋼種は 40 kg/mm² 級のもので、主に重電機関係のベッド類など、従来の鋳造品の代替品として用いられた。

その後、鋼板の品質向上、溶接に対する信頼性の増大などとともに使用分野も拡大され、昭和40年頃より水車発電機の本体材の一部からはじまり、現在ではシャフト、ランナー、ステーベン、スパイダーなどにまで当社の極厚鋼板が使用されるようになった。最大板厚は 250mm で規格は SM41 相当のものであったが、超音波探傷基準が当時としては非常に厳しく、鋼塊より圧延のみで鋼板内部の健全な極厚鋼板を製作する技術の確立には非常に困難を伴ったが、特に溶鋼の脱ガス処理、注入方法の改善など、内部健全性の向上の問題に鋭意とりくんだ結果、短期間で高品質のものが得られるようになった。

昭和40年代にはいり、特に石油精製、石油化学、火力および原子力発電などの分野が大幅に拡

大、発展してくるにつれ、これら設備に使用される大型压力容器の需要が増大し、これらに使用される極厚鋼板の市場も拡大してきた。このような状況に対処するため極厚鋼板専門工場建設計画が立案され、種々検討した結果、昭和43年末、水島製鉄所内に設置することに決定された。

極厚鋼板専門工場設備の一環として、まず昭和44年7月に大型鋼塊鍛錬用 6 000 t プレスが完成し、続いて昭和45年4月に日本で初めての取鍋精錬炉（通常 ASEA-SKF プロセスと呼ばれているが、当社では "Ladle Refining Furnace" - 取鍋精錬炉、略称 LRF と呼んでいる。容量 100 t）、同じく6月に既設厚板圧延機に加え、広幅の粗圧延機が増設され、さらに昭和46年4月に極厚処理工場（矯正プレス、表面研削グラインダー、テストクーボン熱処理設備など）が稼動し、本格的に極厚鋼板の製造を開始した。

水島製鉄所の極厚鋼板専門工場の製品には、一般用の品質のものも当然含まれているが、主体はやはり発電用原子炉压力容器、重油直接脱硫装置などに用いられる高級な特殊極厚鋼板の製造が本来の目的であった。したがって工場設置の決定と同時に小型鋼塊による基礎実験から開始し、これらのデータをもとに、さらに中型鋼塊による試作実験を重ねた後、大型鋼塊による極厚鋼板製造のめどをつけた。続いて 6 000 t プレスと取鍋精錬炉の完成をまって、ASTM A387D および A533Gr. B Cl. 1 鋼の極厚鋼板を、それぞれ 100 t および 80 t の鋼塊より製造し、その機械的諸特性、鋼板の均一性、内部性状について徹底した調査を行なった。同時に大手のファブリーケーターと共同研究会を持つことにより、加工性、溶接性などについて、加工者側の立場からも十分な検討が加えられた。

これらの結果は十分満足すべきものであり、特に内部清浄度、材料の均一性については当初危惧されていた欠陥もなく、取鍋精錬炉の優秀性が実証されるとともに、製造工程が成功したことが裏付けられた。

その後続いてなお一層の材質のレベルアップを期して試験を続行した結果、ほとんど完全といえる諸性質が得られるようになり、同時に実際的な

製造工程上の諸問題も解決し、需要家の要求に十分こたえられる体制を確立した。

現在最大板厚 350mm, 最大単重45tまでの製造技術を完成しただけでなく、十分な品質保証体制も確立されるにいたっている。

3. 品質および製造工程上の特徴

3-1 品質

一般の極厚鋼板に要求される特性は、基本的には普通の板厚のものに要求されるものと変わりはないが、同じ規格、仕様の鋼板を作っても、同一製造方法を採用している限り、板厚が増大するにつれ内部健全性の確保、成分および機械的性質の均一性の保持などがむづかしくなってくる。

さらに原子力発電、化学工業用などの安全性の厳しい圧力容器用材料、または良好な内部清浄性が望まれる金型材などの分野に広く使用されている特殊極厚鋼板には、内部健全性、鋼板の均一性について特に厳しい仕様が付加されるのが普通であって、これらが特殊極厚鋼板の製造をますます困難で厳しいものになっている。

以下に特殊極厚鋼板の品質上特に留意している点について述べる。

(1) 内部健全性

特殊極厚鋼板で内部健全性の良否は、製品の品質を左右する大きな要因の一つである。当社はこれを最良のものとするために、取鍋精錬炉を採用している。取鍋精錬炉により、従来のプロセス（電気炉—DHまたはRH脱ガス）よりさらに良好な内部清浄性が得られており、また鋼板断面のカラーチェックにおいても Al_2O_3 クラスタなどの非金属介在物が原因となる欠陥や他の欠陥も皆無に等しい成

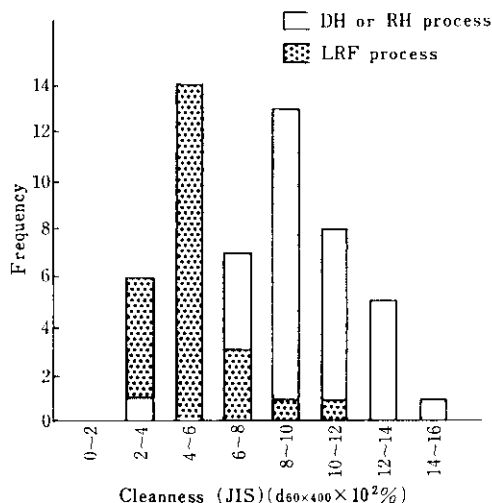


Fig. 1 Comparison of cleanliness between LRF process and DH or RH process

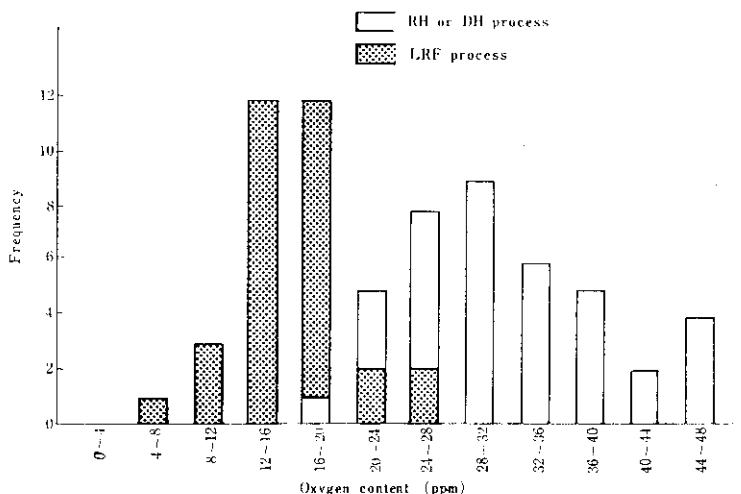


Fig. 2 Comparison of oxygen content between LRF process and DH or RH process

績を得ている。取鍋精錬炉材、および通常脱ガス材の鋼板清浄度、および鋼中酸素量の比較例を Fig. 1 および Fig. 2 に示す。

(2) 不純物元素および偏析の低減

スクラップの使用率の非常に低いLD転炉の溶鋼を使用することにより、不純物元素を最小にしている。この点がスクラップを多量に使用する従来の電気炉溶製鋼と大きく異なる点で、特に鋼板の中性子照射脆化に害があるといわれているCu, また焼もどし脆化を起こしやすいAs, Sb, Snなどの不純物元素の減少に効果がある。この効果の一例をTable 1 に示す。

また取鍋精錬炉の攪拌効果により溶鋼中の成分をより均一にし、鋼塊の偏析を少なくすると同時に、鑄型の形状を適切にし、鋼塊の凝固過程に生ずる偏析も最小になるよう多大の努力を払っている。

(3) 靱性の向上

大型圧力容器用特殊極厚鋼板は、一般的に鋼板の靱性の良好なことが強く要求される。これは圧力容器製作中、特に水圧試験時および操業中の破壊事故を懸念してのことである。上記(1), (2)はこの目的にも沿うものであり、さらにP, Sの低減、適正なる成分設計によって効果をあげている。

(4) 品質保証体制

品質保証という思想は、近年ASMEにより打ち出されたもので、特に原子力材の製造には、品質保証体制の確立が不可欠なものとなっている。当社でも、早くから品質保証体制の確立に力を入れており、水島製鉄所でもすでに確立して実際の製造工程に実施されて

いる。

品質保証に対する基本的な考え方は、製品の製造・品質管理が徹底して行なえ、かつ製造履歴が明確に追跡できるような品質保証プログラムを作り、それを実施し、監査機関をもち必要に応じそれをチェックするということである。実際には、品質保証のための組織を作り、その機能を明確にし、需要家の要求仕様書が品質設計の段階で完全に消化され、またその結果を正しく末端の作業者に指示できるよう、仕様書の管理体制を十分にし、さらに製造工程の管理が十分行なえるよう、関連した基準、帳票類を完備し、それぞれ厳しいチェックが行なわれるようになっている。

3.2 製造工程

極厚鋼板の製造工程は一般的には次のとおりである。

転炉、平炉、電気炉——脱ガス——造塊——鍛錬または分塊——圧延——熱処理——矯正——手入、検査——出荷

いわゆる特殊極厚鋼板の場合は、一般的には電気炉で溶製し、脱ガス処理を行ない、インゴットを鍛造してスラブをつくっている。

当社の製造工程の特徴としては、極厚鋼板製造設備をすべて水島製鉄所に集約し、原料の選定から最終製品にいたる総合的な品質管理、製造管理を可能にしていること、および溶鋼の精錬にLD転炉—取鍋精錬炉の組合せを採用していることである。

取鍋精錬炉は、スウェーデンの重電機メーカーASEA社と、ベアリングメーカーSKF社が共同

Table 1 Comparison of tramp elements of A533Gr. B between Ladle Refining Furnace (LRF) and electric furnace (%)

	Cu	Cr	V	Ti	Nb	Zr	Sn	Sb	As	Co
LD—LRF	0.02	0.01	0.001	0.002	0.001	<0.001	0.003	0.001	0.008	0.020
Electric furnace	0.16	0.17	0.003	0.003	0.005	<0.001	0.020	0.005	0.018	0.019

開発したものである。その概要図を **Fig. 3** に、その主要諸元を **Table 2** に示す。**Fig. 4** は取鍋精錬炉における精錬中の溶鋼の攪拌状況を示す。

取鍋精錬炉の概略について述べると **Fig. 3** に示すように、左右に移動が可能な台車上に、溶鋼攪拌用の電磁誘導コイルが取り付けられており、受鍋した取鍋がこのコイルの内側に設置されるようになっている。この台車の上側には合金添加用のホッパーが取り付けられている脱ガス用フード、および電弧加熱用フードが設置されていて、溶鋼は台車を移動することによって、脱ガスおよび電弧加熱が繰り返され、同時に合金元素も添加できるようになっている。またこれらの作業中、溶鋼は **Fig. 4** のように電磁誘導コイルで継続して攪拌されるので、各作業が完全に行なえる。

取鍋精錬炉の特徴をまとめると次の点が挙げられる。

- (1) 電弧加熱が可能であるので合金元素の添加を自由に行なえる。
- (2) 電弧加熱により注入温度を正確に調節できる。
- (3) 攪拌により、溶鋼の温度分布および成分が均一になり、また脱ガス効果が促進される。
- (4) 攪拌により、溶鋼中の非金属介在物が浮上

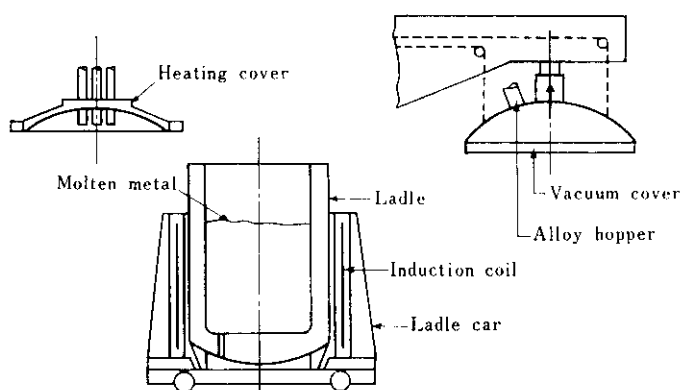


Fig. 3 100t LRF

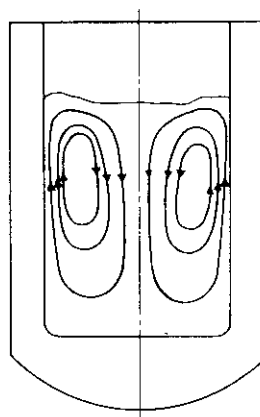


Fig. 4 Schematic picture of the flow pattern of molten metal in the LRF

Table 2 Outline of LRF

General specification	Heat capacity	100t
	Specification	From low-C to high-C steel including alloy steel
	Deoxidizing condition	Semi-killed steel, killed steel
Electromagnetic induction	Low frequency converter	Frequency 1~1.2Hz
	Generator	350kVA × 2
	Induction coil	Inner dia. : 3 450mm
		Height : 3 100mm
Heating equipment	Type	A. C. 3 phase, Arc heating
	Transformer	8 000kVA
Vacuum system	Type	Five stages steam ejector
	Operating pressure	Three stages condenser 0.05 Torr

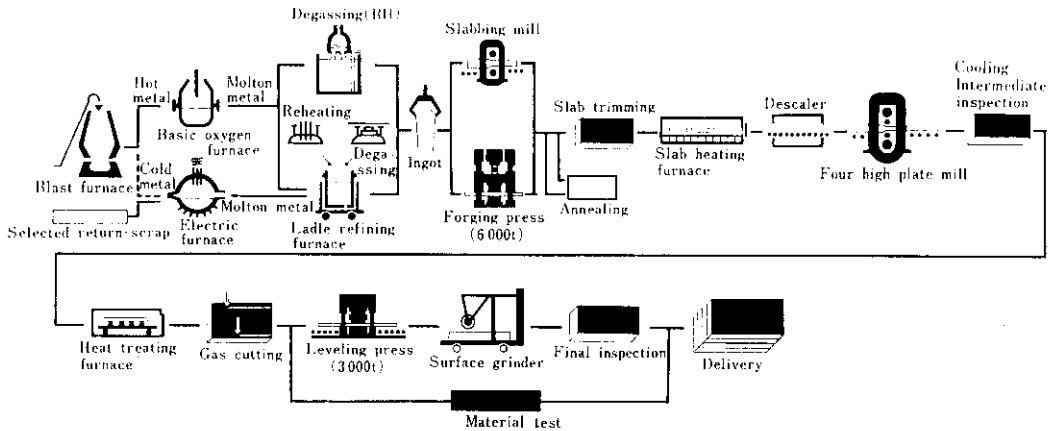


Fig. 5 Manufacturing process of the extra-heavy steel plates

分離しやすくなり、鋼板の清浄度が高められる。

(5) 成分の微調整が可能である。

当社が採用している極厚鋼板の製造工程は、Fig. 5 のとおりであるが、きびしい仕様の特厚極厚鋼板については、取鍋精錬炉および 6000 t 鍛造プレスを通すことにより最高の品質の確保をはかっている。

4. 極厚鋼板の規格、用途

極厚鋼板そのものには規格はなく、どんな鋼種でもよい訳であるが、ここでは範囲を限定して極厚鋼板の主な用途である機械構造用、大型溶接構造物用および大型压力容器用鋼材について述べる。

4-1 機械構造用鋼材

機械構造用鋼材としては主に S C 材が使用され、その他一般構造用としては S S 材がある。こ

れらの中で金型用としては成分の割合高い S50C, S55C などが使用される。

金型用鋼板に要求される点は、鋼板より切削成形により金型を作るところから、内部欠陥のないことが特に要求され、地疵のような小さい欠陥でも問題にされるため、金型用鋼板の製造にあたっては、特に鋼板清浄度に注意する必要がある。また一部の金型は、成型後「シボ加工」と呼ぶエッチング加工がなされるが、この場合、鋼板に成分偏析があるとエッチングむらが生ずるため、成分偏析にも注意しなければならない。

その他機械構造用、および一般構造用鋼板は従来の铸造品にかわって大型機械類のフレームおよびベッドなどに使用される。特性値としては特に高度のものは要求されないが、板厚が厚くなると内部欠陥の発生する割合が大きくなるのでこの点は注意を要する。

参考までに、一般構造用圧延鋼材、および機械構造用炭素鋼鋼材の JIS 規格を Table 3, 4 に示す。

Table 3 Rolled steels for general structure

Notation	Chemical composition(%)				Yield point or yield strength ⁽¹⁾ (kg/mm ²), min.	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation, min. ⁽²⁾ (%)
	C max.	Mn max.	P max.	S max.			
SS34	—	—	0.050	0.050	17	34~44	28
SS41	—	—	"	"	21	41~52	23
SS50	—	—	"	"	25	50~62	21
SS55	0.30	1.60	0.040	0.040	—	55 min.	—

Note ; (1) Y. S for plates in case of over 4in in thickness

(2) Test piece : JIS No. 4

Table 4 Carbon steels for machine structural use

Notation	Chemical compositions (%)				
	C	Si	Mn	P max.	S max.
S 10C	0.08~0.13	0.15~0.35	0.30~0.60	0.030	0.035
S 12C	0.10~0.15	0.15~0.35	0.30~0.60	0.030	0.035
S 15C	0.13~0.18	0.15~0.35	0.30~0.60	0.030	0.035
S 17C	0.15~0.20	0.15~0.35	0.30~0.60	0.030	0.035
S 20C	0.18~0.23	0.15~0.35	0.30~0.60	0.030	0.035
S 22C	0.20~0.25	0.15~0.35	0.30~0.60	0.030	0.035
S 25C	0.22~0.28	0.15~0.35	0.30~0.60	0.030	0.035
S 28C	0.25~0.31	0.15~0.35	0.60~0.90	0.030	0.035
S 30C	0.27~0.33	0.15~0.35	0.60~0.90	0.030	0.035
S 33C	0.30~0.36	0.15~0.35	0.60~0.90	0.030	0.035
S 35C	0.32~0.38	0.15~0.35	0.60~0.90	0.030	0.035
S 38C	0.35~0.41	0.15~0.35	0.60~0.90	0.030	0.035
S 40C	0.37~0.43	0.15~0.35	0.60~0.90	0.030	0.035
S 43C	0.40~0.46	0.15~0.35	0.60~0.90	0.030	0.035
S 45C	0.42~0.48	0.15~0.35	0.60~0.90	0.030	0.035
S 48C	0.45~0.51	0.15~0.35	0.60~0.90	0.030	0.035
S 50C	0.47~0.53	0.15~0.35	0.60~0.90	0.030	0.035
S 53C	0.50~0.56	0.15~0.35	0.60~0.90	0.030	0.035
S 55C	0.52~0.58	0.15~0.35	0.60~0.90	0.030	0.035
S 58C	0.55~0.61	0.15~0.35	0.60~0.90	0.030	0.035
S 9C K	0.07~0.12	0.10~0.35	0.30~0.60	0.025	0.025
S 15C K	0.13~0.18	0.15~0.35	0.30~0.60	0.025	0.025
S 20C K	0.18~0.23	0.15~0.35	0.30~0.60	0.025	0.025

Note ; 1. S 9CK, R 15CK and S 20CK : Cu max. 0.25%, Ni max. 0.20%, Cr max. 0.20%, (Ni+Cr) max. 0.30%
 2. Others : Cu max. 0.30%, Ni max. 0.20%, Cr max. 0.20%, (Ni+Cr) max. 0.35%

4・2 大型溶接構造用鋼材

エレクトロスラグ溶接法など、極厚鋼板の溶接に適した溶接法が進歩し、同時に溶接材料も大幅に改善され、信頼の高い溶接継手が得られるようになってから、それまでの鍛鋼品、鋳鋼品に代って大型機械類の本体にまで極厚鋼板を使用した溶接構造物が用いられるようになった。その一例が大型水車発電機本体材で、現実には最大 250mm までの SM41A、および SM41B 相当材が多く使用されている。その他製鉄機械、大型工作機械などにも極厚鋼板による溶接構造が採用され、その使用分野はますます拡大している。

このような傾向は、鋳鍛鋼品の鋼板溶接構造化による製造コストの低減、公害問題および人手不

足に起因する鋳鍛鋼品の伸び率の低下、さらには構造物の大型化により、鋳鍛鋼品の製造能力を越えたものができたことなどが原因として挙げられよう。

参考までに JIS 溶接構造用圧延鋼材の規格例を Table 5 に示すが、極厚鋼板の場合にはこれを準用している。

4・3 大型压力容器用鋼材

極厚鋼板の中でも花形であり、技術的にも品質的にも高度なものが要求されるのが、大型压力容器用極厚鋼板である。なかでも発電用原子炉压力容器用鋼板 A533 Gr. B Cl. 1 と、重油直接脱硫装置用鋼板 A387 Gr. D などがその代表であろう。

原子力発電が最近大きくクローズアップされる

Table 5 Rolled steels for welded structure

Notation	Chemical composition (%)				Yield point or yield strength, min. (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation, min. ⁽²⁾	
	C ⁽¹⁾ max.	Mn	P max.	S max.			Test piece	%
S M41 A	0.25	2.5 × C max.	0.040	0.040	22	41~52	JIS No. 4	24
S M41 B	0.22	0.60~0.20	"	"	"	"	"	"
S M50 A	0.22	1.50 max.	"	"	30	50~62	"	23
S M50 B	0.20	1.50 max.	"	"	"	"	"	"

Note ; (1) C% in case of 50~100mm in thickness

(2) El.% in case of over 40mm in thickness

ようになったのは、大気汚染源となる火力発電所の設置が地元住民の反対で困難になってきたこと、化石燃料資源とくに石油資源の枯渇化（石油資源はあと30年で枯渇するといわれている）などにより、発電のためのエネルギー源を従来の水力あるいは化石燃料から、豊富な核燃料へ転換を図

らなければならなくなったからである。原子力発電所の設置にしても問題ないわけではないが、やがて原子炉の安全性が十分実証されれば設置問題も解決されよう。

参考までに **Table 6** にわが国の原子力発電長期見通し、**Table 7** に各国の原子力発電設備容量

Table 6 Forecast of Japanese nuclear power generation (10⁴ kW)

	1970	1975	1980	1985	1990
Water	1 890 (32)	2 406 (21)	3 338 (19)	4 929 (20)	6 034 (20)
Fossil	3 871 (66)	8 370 (70)	10 918 (63)	12 414~12 914 (53~55)	13 136~15 136 (44~50)
Nuclear	132 (2)	944 (8)	3 117 (18)	6 000 (25)	10 000 (33)
Total	5 896 (100)	11 720 (100)	17 443 (100)	23 643 (100)	30 170 (100)

Note ; Parenthesis %

Table 7 Nuclear power capacity of the world (Jun. 30 1972) (MWe; Net)

Nation	Operating		Under construction or planning		Total	
	Capacity	Number	Capacity	Number	Capacity	Number
U.S.A.	10 851	25	109 978.1	119	120 829.1	144
Japan	1 741	6	14 267	19	16 008	25
U.K.	5 430	29	6 462	11	11 892	40
W. Germany	2 214.6	10	9 558	12	11 772.6	22
U. S. S. R.	2 065	13	9 338	12	11 403	25
Sweden	450	2	6 899	9	7 349	11
Spain	613.2	2	5 992.6	8	6 605.8	10
France	2 700	10	3 857	5	6 557	15
Canada	2 004.5	6	3 516	5	5 520.5	11
Swiss	1 006	3	3 275	4	4 281	7
Italy	554	3	840	2	1 394	5
India	380	2	808	4	1 188	6

を示す。また Fig. 6 に軽水型原子炉中心圧力容器内径と鋼板厚さの関係を示す。

一方、脱硫装置の設置は昭和48年後半より急激に活況を呈するようになった。この理由としては、脱硫プロセスの改善により、脱硫後の硫黄含有量を0.3%ぐらいまでに下げることが可能になったこと（水添脱硫プロセスによる脱硫率は従来

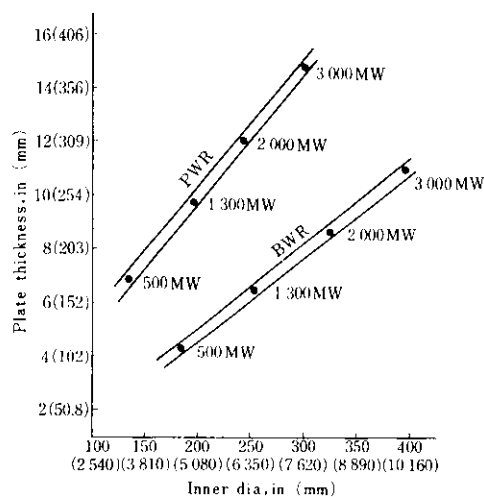


Fig. 6 Inner dia. vs. plate thickness of nuclear reactor pressure vessel

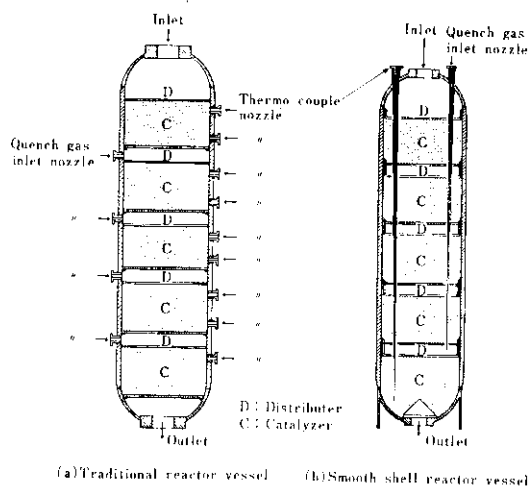


Fig. 7 Profile of desulfurization reactor vessel

75%が限度であったため、処理後の硫黄含有量を1%以下にすることができなかった）、低硫黄重油の価格上昇により高硫黄重油を脱硫しても價格的に引合うようになったこと、さらには環境基準の強化による低硫黄重油の需要が増加したこと、などが考えられる。

これらの装置に使用される鋼板の板厚は、プロセスによっても異なるが、装置そのものが大型化し、従来は200mm前後までであったものが、ごく最近では270mm近くにまでなっており、さらに300mmを超える鋼板の使用が検討の対象になっている。参考までに重油脱硫装置の構造をFig. 7に、また直接脱硫プロセスの種類をTable 8に、直接および間接脱硫法の運転条件をTable 9に示す。

Table 8 Kinds of direct desulfurization processes

Process	Invented company
RCD Isomax	Universal Oil Products Co. (UOP)
RDS Isomax	Chevron Research Company (CRC)
Gulf HDS	Gulf Research & Development Co.
H Oil	Cities Service Research & Development Co. and Hydrocarbon Research Inc.
IFP HDS	Institut Francais de Pétrol (IFP)
Residfining	Esso Research & Eng. Co. and Union Oil Co.
Varga	Lurgi Corp.
DHC	Badische Aniline und Soda Fabrik (BASF)

Table 9 Operating condition of oil desulfurization

	Direct desulfurization	Indirect desulfurization
Oil	Topped crude	Vacuum residue
Temp. (°C)	450°C max.	450°C max.
Press. (kg/cm ² g)	140~160	90~110
Life of catalyst (year)	0.5~2.0	3~5
Consumption of hydrogen (SCF/Bbl)	600~800	300~400

そのほか上記以外に、アンモニア、尿素、メタノール、ポリエチレンプラントの圧力容器（合成塔）用などにも使用される。

アンモニアプラント能力は従来 500t/day であったものが、現在では 1000t/day が主流となり、これがさらには 1700t/day にまで大型化されつつある。これは優秀なフォーミング触媒が開発されたこと、耐熱金属材料が進歩したこと、および高性能の遠心圧縮機が開発されたことなどによるものである。1000t/day 級合成塔の一例を示す次のような寸法である。

内 径 3 200mm
長 さ 15 000mm
鋼板規格 ASTM A302Gr. C
板 厚 150mm
重 量 300 t

また尿素、メタノール、ポリエチレンプラントなどでも、最近の技術進歩によりプラントが大型化し、極厚鋼板の需要も増大し、厚肉化の傾向をたどっている。

参考までに主な高温高压装置を Table 10 に、これらに使用される代表的な鋼板規格例を Table 11, 12 に示す。また高温圧力容器用鋼板の最高使用温度を Table 13 に示す。

次に代表的な成分系の品質特性、用途などについて簡単に述べる。

(1) 1/2% Mo 鋼

SB49M, A204 Gr. C がこの成分系の代表的なもので、Fig. 8 に示すように 500°C 付近で普通鋼の 2 倍以上のクリープ強度を持っている。またこの成分系では C 量 0.2~0.3% でクリープ強度が最も高くなるので、規格的には通常この範囲の C 量を採用している。

また比較的低い温度で許容応力が高くとれるように常温強度を高く設計されたのが A302Gr. B で、主にボイラードラムに使用される。これは初期の原子炉圧力容器用鋼板にも使用されていた。

(2) 1%Cr-1/2%Mo 鋼

この鋼種は 1/2% Mo 鋼に Cr を添加し、0.5% Mo 系として最大のクリープ強度を得られるように考慮されたものである。1/2% Mo 鋼に

Table 10 Main processes of high-temp. and pressure reactor vessel

Process	Operating pressure (kg/cm ²)	Operating temperature (°C)
Medium pressure polyethylene	50~100	100~120
High pressure polyethylene	1 000~2 000	190~250
Texaco gasification process	15~35	1 100~1 140
Reforming	15~50	470~510
Methanole synthesis	100~1 000	200~400
Ammonia synthesis		
Claude process	1 000	500~600
Fausser process	200~300	450~500
Casale proces	600~800	500~600
Topsoe proces	150~300	420~550

Cr を添加した場合 1% までは添加量に比例してクリープ強度が増加するが、それ以上は効果があまりないことからこの規格が生まれている。またこの鋼種は 1/2% Mo 鋼に比べ C 量を低くおさえているのは、C 量の増加によるクリープ強度の低下を防ぐためである。

この鋼種系には Si を比較的高くし、また Cr 量を 1 1/4% とした鋼種 (A387 Gr. C) も

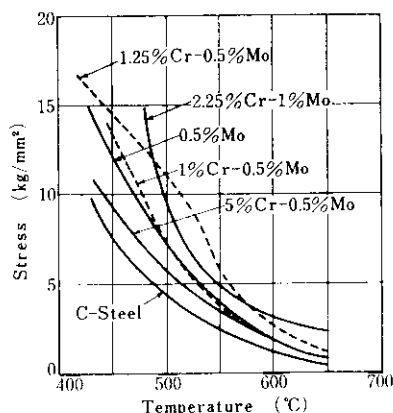


Fig. 8 Creep strength of pressure vessel steels (1%/10 000hr)

Table 11 Specification of steel plates for pressure vessel (Chemical compositions)

Steel	Notation	Heat treatment	Chemical composition for plates over 4in in thickness (%)					
			C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr
C-Mn	SB 42	N	≤0.30	0.15~0.30	≤0.80	—	—	—
	SB 46	N	≤0.33	"	≤0.90	—	—	—
	SB 49	N	≤0.35	"	"	—	—	—
	A 299	N	≤0.31	"	0.90~1.40	—	—	—
	A 515 Gr. 55	N	4~8in, ≤0.26, Over 8in ≤0.28	"	≤0.90	—	—	—
	" 60		≤0.31	"	"	—	—	—
	" 65		≤0.33	"	"	—	—	—
	" 70		≤0.35	"	"	—	—	—
	A 516 Gr. 55	N	4~8in, ≤0.24, Over 8in ≤0.26	"	0.60~1.20	—	—	—
	" 60		≤0.27	"	0.85~1.20	—	—	—
	" 65		≤0.29	"	"	—	—	—
	" 70		≤0.31	"	"	—	—	—
½Mo	SB 46M	N	≤0.25	0.15~0.30	≤0.90	0.45~0.60	—	—
	SB 49M	N	≤0.27	"	"	"	—	—
	A 204 Gr. A	N	≤0.25	"	"	"	—	—
	" B		≤0.27	"	"	"	—	—
	" C		≤0.28	"	"	"	—	—
Mn-Mo	SB 56M	N	≤0.27	0.15~0.30	1.15~1.50	0.45~0.60	—	—
	A 302 Gr. A	NT	≤0.25	"	0.95	"	—	—
	" B	NT	≤0.25	"	1.15~1.50	"	—	—
	A 533 Gr. A	QT	≤0.25	"	"	"	—	—
Mn-Mo-Ni	A 302 Gr. C	NT	≤0.25	0.15~0.30	1.15~1.50	0.45~0.60	0.40~0.70	—
	" D	NT	≤0.25	"	"	"	0.70~1.00	—
	A 533 Gr. B	QT	≤0.25	"	"	"	0.40~0.70	—
	" C	QT	≤0.25	"	"	"	0.70~1.00	—
	" D	QT	≤0.25	"	"	"	0.20~0.40	—
1Cr-½Mo	A 387 Gr. A	NT	≤0.21	0.15~0.30	0.55~0.80	0.45~0.60	—	0.50~0.80
	" B	NT	≤0.17	"	0.40~0.65	"	—	0.80~1.15
	" C	NT	≤0.17	0.50~0.80	"	0.45~0.65	—	1.00~1.50
2¼Cr-1Mo	A 387 Gr. D	NT	≤0.15 ⁽¹⁾	≤0.50	0.30~0.60	0.90~1.10	—	2.00~2.50
	A 542	QT	≤0.15 ⁽¹⁾	"	"	"	—	"
3Cr-1Mo	A 387 Gr. E	NT	≤0.15 ⁽¹⁾	≤0.50	0.30~0.60	0.90~1.10	—	2.75~3.25
Ni-Cr-Mo	A 543	QT	≤0.23	0.20~0.35	≤0.40	0.45~0.60	3.00~4.00	1.50~2.00

Note ; (1) The carbon content for plates over 5in in thickness is 0.17 max. on product analysis

Table 12 Specification of steel plates for pressure vessel (Mechanical properties)

Steel	Notation	Yield point or yield strength, min. (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation, min.	
				Test piece	%
C-Mn	SB 42	23	42~50	JIS No. 4	27
	SB 46	25	46~55	"	25
	SB 49	27	49~60	"	23
	A 299	27.6	51.7~62.1	GL=50mm	19
	A 515 Gr. 55	20.7	37.9~44.8	"	27
	" Gr. 60	22.1	41.4~49.6	"	25
	" Gr. 65	24.1	44.8~53.1	"	23
	" Gr. 70	26.2	48.3~58.6	"	21
	A 516 Gr. 55	20.7	37.9~44.8	"	27
	" Gr. 60	22.1	41.4~49.6	"	25
	" Gr. 65	24.1	44.8~53.1	"	23
	" Gr. 70	26.2	48.3~58.6	"	21
$\frac{1}{2}$ Mo	SB 46M	25	46~55	JIS No. 4	26
	SB 49M	27	49~60	"	24
	A 204 Gr. A	25.5	44.8~53.1	GL=50mm	23
	" Gr. B	27.6	48.6~58.6	"	21
	" Gr. C	29.6	51.7~62.1	"	20
Mn-Mo	SB 56M	35	56~70	JIS No. 4	21
	A 302 Gr. A	31	51.7~65.5	GL=50mm	19
	" Gr. B	34.5	55.2~68.9	"	18
	A 533 Gr. A Cl. 1	34.4	55.2~68.9	"	18
Mn-Mo-Ni	A 302 Gr. C, D	34.5	55.2~68.9	GL=50mm	20
	A 533 Gr. B,C,D Cl. 1	34.4	55.2~68.9	"	18
1Cr- $\frac{1}{2}$ Mo	A 387 Gr. A Cl. 2	31.0	48.3~62.1	GL=50mm	22
	A 387 Gr. B Cl. 2	27.6	44.8~58.6	"	22
	A 387 Gr. C Cl. 2	31.0	51.7~65.5	"	22
2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo	A 387 Gr. D Cl. 2	31.0	51.7~68.9	GL=50mm	18
	A 542 Cl. 4	41.4	58.6~72.4	"	20
3Cr-1Mo	A 387 Gr. E Cl. 2	31.0	51.7~68.9	GL=50mm	18
Ni-Cr-Mo	A 543 Cl. 3	48.3	62.0~73.9	GL=50mm	16

ある。これは高温における耐酸化性を向上させる目的で Si が加えられたもので、軽質の油や、重油の間接脱硫装置など、比較的低温で操業される圧力容器用として使用される。使用される鋼板の板厚も割合薄い。

(3) 2 $\frac{1}{4}$ % Cr-1% Mo 鋼

高温用フェライト系鋼の中で、クリープ強度、耐酸化性および耐水素脆化性に対して最

高の特性を示すのがこの系統の鋼種である。特にネルソンカーブ (Fig. 9 参照) より明らかなように、Cr-Mo 鋼は、高温高压の水素中で使用される場合、鋼中へ侵入し残留した水素によって生じる鋼材の劣化 (水素脆化) と鋼中に侵入した水素が、炭化物と反応して CH₄ を生成し、そのため脱炭と粒界亀裂が生ずることによって起る靱性と強度の低下、す

Table 13 Maximum available temperature of steel plates for pressure vessel for high temperature service

Steel	Specification	Heat treatment	Max. temp.
½Mo	ASTM A204C	N	1 000°F
Mn-Mo	ASTM A302B	NT	1 000°F
Mn-Mo-Ni	ASTM A533B	QT	800°F
1Cr-0.5 Mo	ASTM A387B	NT	1 200°F
1¼Cr-¾Si-1/2Mo	ASTM A387C	NT	1 200°F
2¼Cr-1Mo	ASTM A387D	NT	1 200°F
"	ASTM A542Cl. 1	QT	700°F*
Ni-Cr-Mo	ASTM A543	QT	650°F**

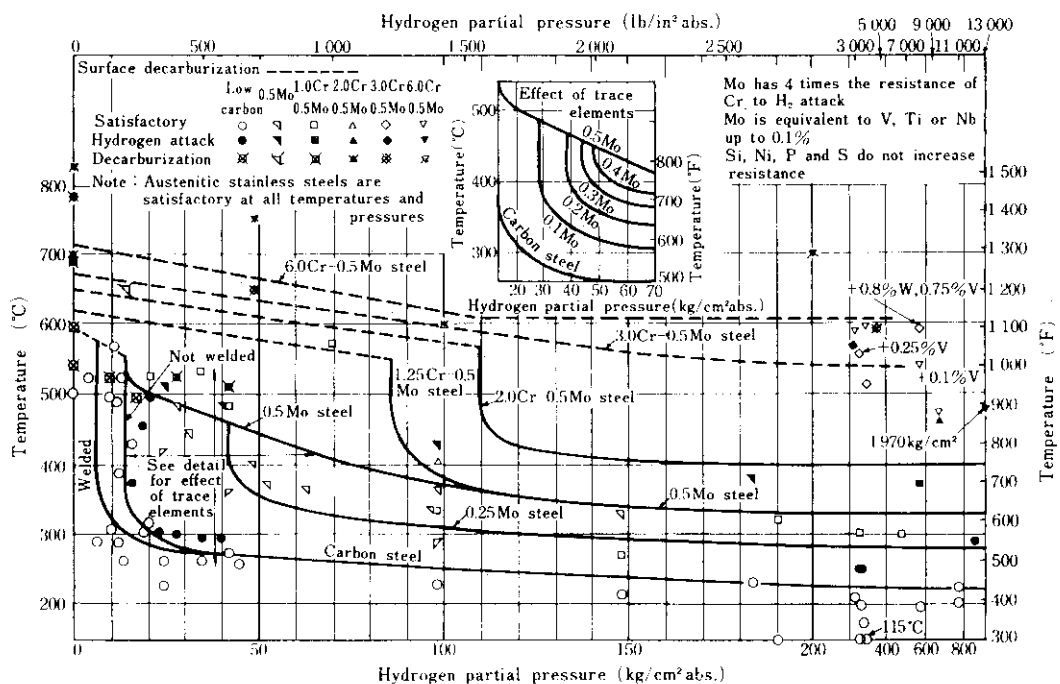
N ; Normalized

NT ; Normalized and tempered

QT ; Quenched and tempered

* : ASME Case Interpretation 1414

** : ASME Case Interpretation 1358-1

**Fig. 9** Operating limits for steels in hydrogen service

なわち水素アタック (hydrogen attack) に対し最も耐性がある。

しかも Cr, Mo とともに含有量の高いものほどよい訳で、高温強度特性、耐酸化性および耐水素性の点より、この鋼種は重油の水素

添加による直接脱硫法などに最も適したものであるといえる。

さらにこの鋼材は焼ならし時に加速冷却すると、低温靱性も非常に良好になるのが大きな特徴で、圧力容器の水圧試験時の脆性破壊

の危険を防ぐことができる。

(4) Mn-Mo-Ni 鋼

Mn-Mo-Ni 鋼で焼入れ、焼もどしの調質処理をした鋼板は、軽水炉型の原子炉圧力容器用鋼板として広く使用されている。

原子炉圧力容器用鋼板として最初に使われたのは、ボイラー用圧延鋼材であった。その後、高温強度の面より A 302 Gr. B 鋼が使用されたが、操業中の中性子照射による脆化と、炉の大型化に伴う使用鋼板の板厚増加のため、所定の靱性を確保できにくくなった。これを補うために、Ni の添加および従来の焼ならし、焼もどし熱処理にかわって焼入れ、焼もどし熱処理が行なわれるようになり、規格化されたものが A 533 Gr. B で、ほとんど原子炉圧力容器用として発展してきた鋼種であるといえよう。

さらに近年になって、大型圧力容器の水圧試験時の脆性破壊が問題にされるようになってから、低温靱性の良好な本鋼種が、アンモニア、メタノール合成などの化学プラントにも次第に広く用いられるようになった。

(5) 調質型 2 1/4%Cr-1%Mo 鋼, Ni-Cr-Mo 鋼

設備が大型化するにつれ、これに使用される圧力容器用鋼板の板厚も増大し、鋼板の製造、容器の製作ともに困難の割合が増加する。これを克服するため調質し、強度を補うことが考えられ、この 2 鋼種はこれらの要求を満たすために開発されたものである。調質 Ni-Cr-Mo 鋼は潜水艦用高張力鋼として開発された系統の材料で、高強度と高靱性を有していることから圧力容器用として選ばれたものである。いずれの鋼種も大型圧力容器用として実用化された例はほとんどなく、将来の鋼種といえる。

5. 極厚鋼板の将来の動向

まず量的な面を考えると、一般極厚鋼板につい

ては、製造コストおよび人的な面より、鑄鍛鋼品の生産量は頭打ちとなることが予想され、これに代るものとして極厚鋼板の使用量が当然増加することが考えられる。

また特殊極厚鋼板の分野では公害の面より、石油脱硫装置の需要が世界的に伸びるとともに、資源の枯渇が心配されている石油に代るものとして、原子力発電が一時的な波はあるとしても、基本的な傾向として上昇して行くことは間違いなく、さらに化学工業の発展も、たとえば肥料工業は世界の人口増による食料不足が目に見えているだけに増設の傾向は考えられても、減少または頭打ちということは全く考えられない。化学用大型圧力容器に対する需要は増大するとみて間違いない。これらが基本的な傾向であろう。

一方、質的には構造物、圧力容器などが大型化するにつれ、要求される鋼板の板厚、単重などますます増大するであろうが、これを回避するために鋼板の高張力化、さらには機器の安全性を高めるための高靱性化が進んでくることが予想される。また機器が大型になり、加えて厳しい操業条件が採用されるようになると、万一の破壊事故は大惨事につながることになるので、現在以上に材料の均質化が強く求められるようになり、ますます成分偏析、内部欠陥に対して厳しくなるであろう。

したがって将来、極厚鋼板は量的な面と同時に、品質向上の裏付けがなければならないので、材料メーカー、機器メーカーもこの点を十分考慮する必要がある。

6. む す び

以上、極厚鋼板の概要、当社における開発の過程ならびに主な鋼種について述べたが、極厚鋼板の需要はますます拡大し、品質的にも向上していくものと思われる。これらの要求を満足するすぐれた鋼材を、安定した価格で供給するための努力を続けることが、われわれ鉄鋼メーカーに課せられた社会的使命であると考えられる。