
直接脱硫装置用 ASTM A 387 Gr. D 極厚鋼板の製造

Performance of ASTM A 387 Gr. D Heavy Plates for Fuel Oil Desulphurizing Reactor,
Especially for Direct Desulphurization

佐々木 健二(Kenji Sasaki) 小桜 芳郎(Yoshiro Kozakura) 関根 稔弘(Toshihiro Sekine) 楠原 祐司(Yuji Kusuhara)

要旨：

近年になり直接脱硫装置用 A387 Gr. D 極厚鋼板の需要が増加し、当社においても ASEA-SKF 方式 (Ladle Refining Furnace) による溶製法でその製造を行なっている。製作経過は、きわめて順調で、その中には、板厚 268mm の超極厚大単重鋼板が含まれているが、180mm～200mm 厚の極厚鋼板の品質特性と比較し、板厚中心部においても、内部性状、常温強度、高温強度および低温靱性などいずれをとってもまったく遜色ない良好な結果が得られている。

Synopsis：

In recent years the demand for fuel oil desulphurizing reactors has unexpectedly increased, bringing about a tendency to substituting ultraheavy steel plates for forged rings as for the steel grades of ASTM A 387 D. A direct desulphurizing reactor came into service just recently in an oil refinery, using 185mm thick heavy plates of A 387 D with remarkable performance, delivered by Mizushima Works, Kawasaki Steel Corporation. At present, a large quantity of heavy plates A 387 D of from 131 up to 268mm thickness is produced in Mizushima and the mechanical properties are entirely of satisfaction even in the case of ultraheavy a 387 D plates of 268 mm thickness, in spite of more severer heat treating conditions; namely slower quenching rate and higher value of tempering parameter of 20.6×10^3 . For instance, the tensile strength even at the center of through-thickness is around 58 and 47 kg/mm² at room temperature and elevated temperature of 432°C, respectively, and Charpy impact values are higher than 20 kg m at 10°C. Besides, the difference of the mechanical properties between at quarter and center through-thickness is very small. Internal and external qualities of the plates are also very satisfactory.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

直接脱硫装置用 ASTM A 387 Gr. D 極厚鋼板の製造

Performance of ASTM A 387 Gr. D Heavy Plates for Fuel Oil
Desulphurizing Reactor, Especially for Direct Desulphurization

佐々木 健 二*

Kenji Sasaki

小 桜 芳 郎**

Yoshiro Kozakura

関 根 稔 弘***

Toshihiro sekine

楠 原 祐 司****

Yuji Kusuhara

Synopsis :

In recent years the demand for fuel oil desulphurizing reactors has unexpectedly increased, bringing about a tendency to substituting ultraheavy steel plates for forged rings as for the steel grades of ASTM A 387 D.

A direct desulphurizing reactor came into service just recently in an oil refinery, using 185mm thick heavy plates of A 387 D with remarkable performance, delivered by Mizushima Works, Kawasaki Steel Corporation.

At present, a large quantity of heavy plates A 387 D of from 131 up to 268mm thickness is produced in Mizushima and the mechanical properties are entirely of satisfaction even in the case of ultraheavy A 387 D plates of 268 mm thickness, in spite of more severer heat treating conditions; namely slower quenching rate and higher value of tempering parameter of 20.6×10^3 . For instance, the tensile strength even at the center of through-thickness is around 58 and 47 kg/mm² at room temperature and elevated temperature of 432°C, respectively, and Charpy impact values are higher than 20 kg·m at 10°C. Besides, the difference of the mechanical properties between at quarter and center through-thickness is very small. Internal and external qualities of the plates are also very satisfactory.

1. 緒 言

近年になり圧力容器用 ASTM A 387 Gr. D (以下 A387D と称す) 極厚鋼板 (板厚 100mm から 300mm) の需要が高まってきている。しかもこの需要は、長期にわたる見通しである。これは、最近の公害発生に関する規制強化、および低硫黄原油の入手難などにより、各石油精製メーカ

ーが低硫黄重油を生産するため直接脱硫リアクターの新增設を軒並み計画しているからであり、海外の計画も含め本体で 200 基、付帯設備も入れると 300 基にも達するといわれている。

当社においても、これら直接脱硫リアクター用の A 387 D 極厚鋼板を大量受注し、その製造を行っている。製造に先立って長期にわたり安定した高品質の鋼材を得るために種々検討を重ね万全の品質管理および工程管理体制を確立した。

* 水島製鉄所システム部部长

*** 水島製鉄所管理部厚板管理課掛長

** 技術本部鋼材技術部鋼材技術室課長

**** 水島製鉄所管理部厚板管理課

本報告は、直接脱硫用 A 387 D 極厚鋼板の製造上の特長、留意点および製造結果の一部についてまとめたものである。

2. 要求される性能

2.1 重油直接脱硫法の特徴

直接脱硫法は、常圧蒸留または減圧蒸留の残油をそのまま脱硫する方法である。常圧蒸留残油をさらに減圧蒸留し、残油中の脱硫上問題となる成分、アスファルテン、金属化合物、巨大分子などの重質分を除いて脱硫する間接脱硫法と異なり、すぐれた脱硫触媒と過酷な運転条件が要求される。すなわち反応圧力も間接脱硫法の 90~110kg/cm² に比べて 140~160kg/cm² と高く、当然これらに使用される鋼板は板厚も厚く、高品質のものが要求される。

2.2 鋼板に要求される性能

Table 1 は、代表的なプロジェクトごとに、使用鋼材の要求性能の概略をまとめたものである。

従来、直接脱硫リアクターの大半は、鍛鋼リング材のサブマージアーク溶接構造であった。ところが装置の大型化、経済性、製作所要日数などを考慮すると、従来の鍛鋼品にかわる鋼板による溶接構造が有利となり、溶接技術の急速な進歩などとあいまって、国内でも、A 387 D を用いた鋼板構造の直接脱硫リアクターが多く製作されるようになった。

さらに直接脱硫リアクターの肉厚もますますエスカレートし、250mm を超える超極厚鋼板を用いたリアクターも製作されるに至り、内外の注目を集めている。Case 3 のプロジェクトの場合がそれである。鋼板に要求される性能は、いずれの

Table 1 Requirements for materials

	Case 1		Case 2		Case 3	
Plate size	Thickness(mm)	Weight(t)	Thickness(mm)	Weight(t)	Thickness(mm)	Weight(t)
	Shell : 185	37	Shell : 131~164	35	Shell : 268	35
	Head : 110	15	Head : 75~85.5	15	Head : 188	29
Chemical compositions	C : 0.15max.	Cr : 2.00/2.50	C : 0.15max.	Cr : 2.00/2.50	C : 0.15max.	Cr : 2.00/2.50
	Si : 0.50max.	Mo : 0.90/1.10	Si : 0.50max.	Mo : 0.90/1.10	Si : 0.50max.	Mo : 0.90/1.10
	Mn : 0.30/0.60	Cu : 0.20max.	Mn : 0.30/0.60	Cu : 0.15max.	Mn : 0.30/0.60	Cu : 0.20max.
Mechanical properties	P : 0.012max.	Ni : 0.20max.	P : 0.012max.	Ni : 0.15max.	P : 0.012max.	Ni : 0.20max.
	S : 0.010max.		S : 0.010max.		S : 0.010max.	
	Y.S. : 31.6kg/mm ² , min.at R.T.		Y.S. : 31.6kg/mm ² , min.at R.T.		Y.S. : 31.6kg/mm ² , min.at R.T.	
Heat treatment of test piece	: 31.2 min. at 438°C		: 29.0 min. at 435°C		: 29.7 min. at 432°C	
	T.S. : 52.8~70.3 at R. T.		T.S. : 52.8~70.3 at R. T.		T.S. : 52.8~70.3 at R. T.	
	: 46.8 min. at 438°C		: 44.0 min. at 435°C		: 44.5 min. at 432°C	
Heat treatment of test piece	El. : 18% min.		El. : 18% min.		El. : 18% min.	
	R.A. : 40% min.		R.A. : 45% min.		R.A. : 45% min.	
	E ₂₀ : 5.6kg·m min.		E ₁₀ : 6.3kg·m min.		E ₁₀ : 5.6kg·m min.	
Heat treatment of test piece	(2mm V notch)		(2mm V notch)		(2mm V notch)	
	Normalizing : 940°C × 1hr/25.4mm		Normalizing : 925°C × 0.75hr/25.4mm		Normalizing : 940°C × 1hr/25.4mm	
	Quenching : 940°C × 1hr/25.4mm		Quenching : 930°C × 0.75hr/25.4mm		Quenching : 940°C × 1hr/25.4mm	
Heat treatment of test piece	Tempering : 645°C × 1hr/25.4mm		Tempering : 655°C × 0.75hr/25.4mm		Tempering : 645°C × 1hr/25.4mm	
	PWHT : 700°C × 19hr		PWHT(1) : 640°C × 30hr		PWHT(1) : 620°C × 18hr	
			(2) : 695°C × 18hr		(2) : 687°C × 30hr	

PWHT : Post weld heat treatment

プロジェクトにおいてもほとんど大差なく、その中で特筆すべき点は、鋼材の焼もどし脆性や、溶接性を考慮して、P, S を極端に厳しく抑えていることと、高温強度の要求値が特に引張強さの点で厳しいことの2点であり、さらに鋼板の内部健全性も含め、これらが鋼板製作上の最も重要なポイントである。

3. 製造条件

鋼板の製造工程を Table 2 に示す。当社における製造上の最も大きな特色は、製鋼設備として、従来のエール式電気炉に変わり、ASEA-SKF 方式による取鍋精錬炉 (Ladle Refining Furnace

略称 L R F) を導入し、180t の LD 転炉との組み合わせにより溶製を行なっている点である²⁾。以下に各製造条件の詳細について述べる。

3.1 製 鋼

3.1.1 脱磷, 脱硫

直接脱硫用リアクターに用いる鋼板は、焼もどし脆性、溶接性、板厚方向特性などを考慮し、他の鋼種に比較して特に P, S が厳しく抑えられる。当社においては、S は十分な溶銑脱硫を行なうことにより、P は、LD 転炉にて母銑鋼精錬時に除去される。Fig. 1 は、ASTM A 387 C, D 極厚鋼板の P, S 実績値の一例である。

Table 2 Manufacturing process of A 387 D Plate

Process	Process chart	Equipment	Check point
Steel making	○ Desulphurization of hot metal	Basic oxygen furnace (180t/charge) ASEA-SKF process (100t/charge) ASEA-SKF process	Chemical composition
	○ First refining		Chemical composition
	○ Final refining		Tapping temp.
	○ Vacuum degassing		Chemical composition
	◇ Ladle analysis		Temp. Degassing time Temp. Chemical composition
Forging	○ Forging	6000t hydraulic press	Slab dimension
	○ Annealing		Temp.
	○ Conditioning		Time
	◇ Visual inspection		Surface condition Dimension
Rolling	○ Plate rolling	Plate rolling mill	Plate dimension
	◇ Surface inspection		Surface condition Dimension
Finishing	○ Heat treatment	3000t levelling press	Temp. Time Flatness
	○ Levelling		Dimension
	○ Gas cutting		
	○ Surface grinding	Automatic surface grinding machine	Surface condition
	◇ Nondestructive inspection		Internal defect
	◇ Dimensional and visual inspection		Surface condition Dimension Contents of marking
	○ Marking		
	◇ Final inspection		
	○ Shipping		

◇ Step of inspection

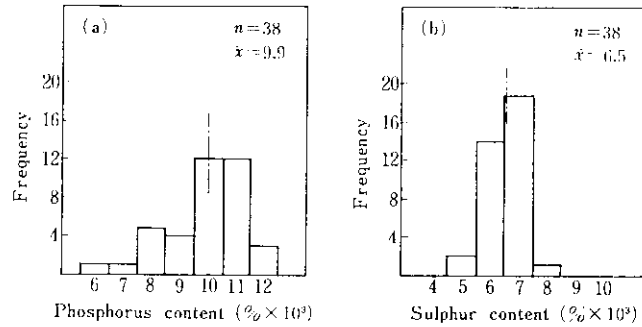


Fig. 1 Phosphorus and sulphur content of A 387 C, D heavy plates

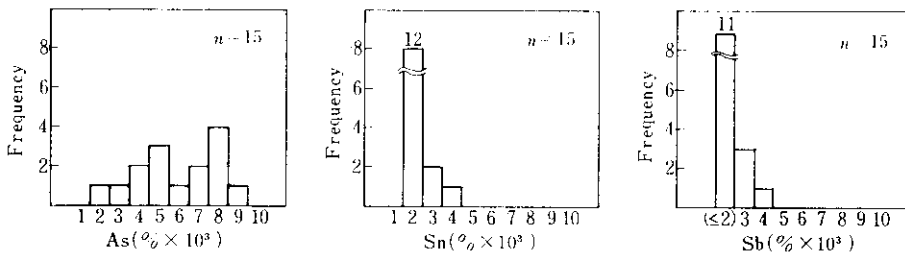


Fig. 2 Tramp elements of A 387 C, D heavy plates

3.1.2 不 純 物

従来の電気炉単体による操業では、どうしてもスクラップから混入してくる不純物を低くコントロールすることは、ほとんど不可能に近く、購入スクラップを使用する場合はことさらである。当社では、母溶鋼としてLD転炉鋼を使用するので、焼もどし脆性に悪影響をおよぼす Sb, Sn, As などの不純物がほとんどなく、したがってLD転炉とのコンビで操業されるLRFは、原子炉圧力容器用を含め、極厚鋼板の製鋼設備として最適であるといえる。Fig. 2 はその不純物分析結果の一例である。

3.1.3 脱ガス効果

LRFの設備上の特色として、電弧加熱設備を有していることと、溶鋼の攪拌に電磁誘導を利用していることなどがあげられる。そのため従来のRH, DH型の脱ガス設備の場合のように、脱ガス中の溶鋼の温度低下に伴う脱ガス時間の制約を受けることなく、十分な処理時間がとれ、また

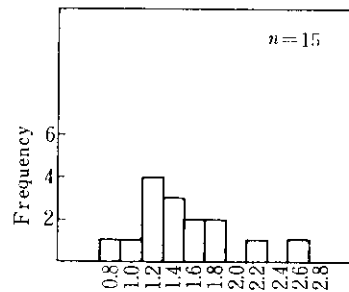


Fig. 3 Hydrogen content in molten steel (ppm)

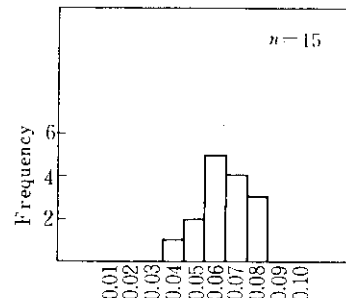


Fig. 4 Cleanliness of A 387 C, D heavy plates (%)

溶鋼の環流速度も、上記の理由で従来設備に比較して大きい³⁾。したがって脱ガス時の鋼中水素ならびに非金属介在物の除去には、非常に効果的である。**Fig. 3** は水素含有量、**Fig. 4** は非金属介在物を JIS の清浄度で表わしたものである。

3-1-4 造 塊

脱硫リアクター用の鋼板のうち特に胴板用は、製品単重が30tを超えるものがほとんど、50tから100tの大型鋼塊が用いられるのが普通である。そのため注入時の空気酸化防止と、大型鋼塊内の偏析対策には十分な注意を払わなければならない。前者については、完全な Ar シールを行なったうえでの下注ぎにより、後者に関しては、偏平鋳型の使用や、注入温度の徹底した管理により対処している。**Table 3** は、60t 鋼塊を用いて製造された鋼板内の化学成分のバラツキを示すが、ほとんど偏析は見られない。

3-1-5 化学成分の適中

鋼の溶製において目標化学成分どおりの組成に

適中させることは、最も重要なことである。特に A 387 D 鋼の溶製にあたっては、その要求される高温強度が非常に厳しいことから、目標化学組成は、規格上限をねらって出鋼されるので、化学成分の許容範囲が非常に狭い。LRFでの溶製では加熱設備を有し、化学成分の微調整が容易でしかも強力な電磁誘導攪拌により、取鍋内の化学成分のバラツキをなくすることができるので、目標どおりの化学成分を得ることは容易である。

3-2 鍛 錬

大型鋼塊は、かならず最終凝固域付近に気泡性欠陥を有し、場合によっては製品まで残存し、内部欠陥の原因（いわゆるザク疵）となる。この気泡性欠陥を圧着し、製品に悪影響をおよぼさないようにするためには、圧延のみのプロセスでは限界があるので、直接脱硫用などの極厚鋼板の場合には、分塊圧延にかわり鍛錬プロセスが採用される。鋼塊からスラブに鍛錬する際には、上記のような理由で鍛錬比が2.5～3以上とれるようなスラブ設計がなされる。鍛錬後はただちに焼鈍工程

Table 3 Result of check analysis of A 387 C, D heavy plates

Kind of steel	Location	Chemical composition (%)						
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
A 387 C	Ladle sample	0.15	0.55	0.61	0.008	0.007	1.35	0.54
	Plate top	0.16	0.57	0.64	0.009	0.008	1.34	0.52
	Plate bottom	0.15	0.57	0.60	0.007	0.007	1.34	0.52
	Ladle sample	0.14	0.59	0.63	0.009	0.006	1.35	0.55
	Plate top	0.14	0.62	0.65	0.009	0.007	1.35	0.54
	Plate bottom	0.14	0.60	0.64	0.009	0.007	1.32	0.54
A 387 D	Ladle sample	0.14	0.41	0.50	0.010	0.007	2.41	1.01
	Plate top	0.13	0.40	0.52	0.009	0.008	2.36	0.99
	Plate bottom	0.13	0.39	0.51	0.009	0.007	2.34	0.99
	Ladle sample	0.15	0.37	0.55	0.010	0.005	2.45	1.00
	Plate top	0.15	0.39	0.56	0.010	0.006	2.39	0.99
	Plate bottom	0.13	0.38	0.54	0.010	0.007	2.40	0.97

へとまわされる。この時の焼鈍条件は、造塊時の水素の量により設定される。その後スラブは、スカーフィングおよびグラインダーによる手入れ後、検査工程を経て厚板圧延工程へ送られる。

3.3 圧延

最終製品への圧延は、厚板工場の4700mmのロール胴長を持つ4段可逆式圧延機で行なわれる。鋼板は、最終工程で表裏面のグラインダー研削を受けるので、その予定研削量を考慮した目標厚みに従って圧延され、ただちに熱処理炉へ装入される。

3.4 仕上げ工程

圧延された鋼板は極厚鋼板処理工場へ運ばれ、熱処理、矯正、ガス切断、表面研削の順で製品となり、内部欠陥については、主として超音波探傷、表面欠陥については染色探傷による検査を受け、製品が完成する。

3.5 試験板の熱処理

直接脱硫用極厚鋼板は、容器製作メーカーにて熱間加工後、焼入れ・焼もどし処理がなされるので、鋼板の機械的性質の保証は、母板より切り離された試験板に、容器製作メーカーで受ける熱履歴を与えたのち行なわれる。試験板の熱処理に関しては、 $3T \times 3T$ (T は鋼板の厚さ)以上のテストブロックをそのまま焼き入れる方法、すなわちテストクーボン法(または $3T$ 法ともいう)と $21\text{mm} \times 220\text{mm} \times 250\text{mm}$ 程度の小試験板を用い、実際の容器の焼き入れ時の冷却速度をシミュレートさせる方法、すなわちプログラム法がある。当社の場合、需要家の要求によりいずれかの方法で行なっている。前者の焼入れは、Fig. 5のテストクーボン焼入れ設備で行なっているが、この方法においても、冷却速度のある程度のコントロールが要求される場合があるので、プロペラーを使用し、しかも給水を行なった場合の冷却速度と、プロペラーも停止し、給水も行なわない完全な静止水冷の場合のテストクーボン冷却速度を測定した。その結果を Fig. 6 に示す。両者の間では、特に $1/4T$ 部分においてその平均冷却速度に

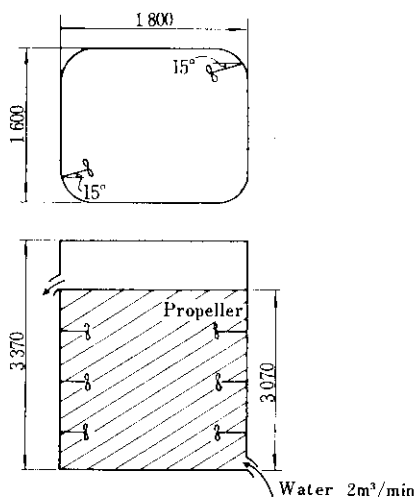


Fig. 5 Quenching pit for test coupon

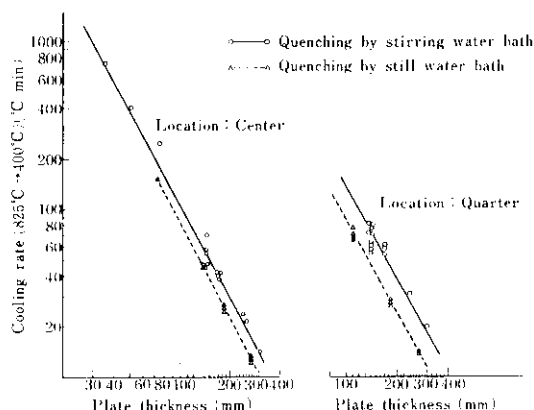


Fig. 6 Cooling rate of test coupon for quenching

大きな差が見られる。

4. 製造結果

4.1 化学成分

Table 4 に各プロジェクトごとの化学成分の一例を示す。いずれの場合も高温強度の要求が厳しいことを考慮し、各化学成分とも規格上限近くで成分設計されている。Cu, Niについては、規格及び仕様の内容に応じて添加されたものであ

Table 4 Recent results of chemical composition of A 387 D heavy plate

Project	Plate thickness (mm)	Ladle analysis (%)									Check analysis (%)			$\bar{X}^*$
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	As	Sn	Sb	
Case 1	185	0.14	0.34	0.56	0.011	0.007	0.19	0.14	2.45	1.03	0.002	0.002	<0.002	0.00130
		0.15	0.35	0.52	0.011	0.006	0.16	0.14	2.43	1.05	0.003	0.002	<0.002	0.00131
		0.15	0.37	0.55	0.010	0.005	0.15	0.16	2.45	1.00	0.008	0.002	<0.002	0.00126
		0.15	0.34	0.56	0.010	0.006	0.19	0.19	2.48	1.01	0.004	0.002	<0.002	0.00122
		0.15	0.36	0.58	0.009	0.007	0.16	0.15	2.42	1.04	0.004	0.002	<0.002	0.00112
Case 2	164	0.14	0.42	0.53	0.010	0.006	0.11	0.11	2.40	1.06	0.003	0.002	<0.002	0.00121
		0.14	0.38	0.53	0.012	0.007	0.13	0.09	2.42	1.03	0.003	0.002	<0.002	0.00141
		0.15	0.41	0.53	0.011	0.005	0.12	0.10	2.34	1.05	0.004	0.002	<0.002	0.00132
		0.14	0.40	0.54	0.011	0.006	0.12	0.09	2.35	1.05	0.004	0.002	<0.002	0.00132
		0.14	0.39	0.56	0.010	0.007	0.010	0.09	2.36	1.03	0.003	0.002	<0.002	0.00121
Case 3	268	0.14	0.38	0.56	0.012	0.006	0.08	0.11	2.43	1.02	0.003	0.002	<0.002	0.00141
		0.14	0.39	0.54	0.010	0.007	0.11	0.09	2.40	1.04	0.003	0.002	<0.002	0.00121
		0.15	0.38	0.55	0.009	0.006	0.15	0.15	2.37	1.03	0.004	0.002	<0.002	0.00112
		0.15	0.41	0.56	0.011	0.007	0.13	0.10	2.34	1.04	0.003	0.002	<0.002	0.00131
		0.14	0.40	0.55	0.011	0.007	0.13	0.14	2.39	1.04	0.003	0.002	<0.002	0.00131

$$* \bar{X} = \frac{(10P + 5Sb + 4Sn + As)}{100}$$

り、当社の場合は、著者らの研究結果に基づき¹⁾溶接性、加工性などに関し、影響のない範囲で常温強度、高温強度向上のため、有効に活用するように配慮している。また焼もどし脆性に影響をおよぼす元素といわれている As, Sn, Sb は、当社の LD 転炉と LRF との組合わせによる溶製法の場合は、ごくわずかで、Fig. 7 に示すとおり、焼もどし脆性感受性指数 $\bar{X}$ は、ほとんど P の含有量によって決まり、当社の場合に限って、焼もどし脆性感受性指数は、As, Sb, Sn を定数項として整理し

$$\bar{X} = \frac{1}{10} \cdot P + 0.0002$$

と置き換えることができる。

4.2 超音波探傷試験結果

直接脱硫用極厚鋼板は、その使用条件が苛酷な

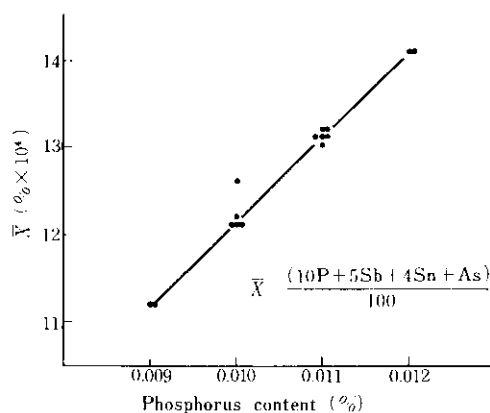


Fig. 7 Relation between phosphorus content and temper embrittlement sensitivity parameter $\bar{X}$

ことから、鋼板全面にわたり、ほとんど内部欠陥のない状態を要求され、この点が機械的性質と並んで鋼板製造上の重要なポイントで、またもっとも問題の発生しやすい項目でもある。これが大半重極厚鋼板になるとなおさらである。**Table 5**は、当社内におけるこの種の鋼板の、超音波探傷試験条件を示したものであるが、現在まで直接脱硫用極厚鋼板のみで50枚以上が超音波探傷を完了し、全数の鋼板が合格し、出荷されている。そのうち欠陥の見られたものは、4枚のみでしかも十分合格範囲にある軽度の微小欠陥であり、大半のものが無欠陥で合格している。

Table 5 Condition of ultrasonic test

Testing area	100% one major surface
Diameter of probe	30mm ϕ
Calibration	Gakushin type-III $V_{15-2.8}=80\%$
Frequency	2.25MHz

4.3 機械的性質

4.3.1 試験片熱処理条件

試験片の熱処理条件は、**Table 1** に示したとお

りであるが、**Case 1**, **Case 2**は、テストクーボンによる方法、すなわち3 T法、残りの**Case 3**がプログラム法(一部比較の意味で3 T法も実施)により試験片の熱処理を行なった。**Fig. 8**に、焼入れ時の冷却速度測定結果を示すが、いずれの場合も、需要家よりの冷却速度の上限規制があったため、攪拌、給水を行なわない、いわゆる静止浴槽へのドブ漬を実施した結果である。また**Case 3**のプログラム法における焼入れシュミレーション用のマスターカーブは、**Fig. 8**の268mmの結果をそのまま採用し、設定した。焼もどし、応力除去焼鈍条件は、各プロジェクトごとに多少違っているが、これをLarson-Millorの焼もどしパラメーター P で整理すると、いずれも $20.6 \sim 20.7 \times 10^3$ ただし

$$P = T(20 + \log t)$$

T : 絶対温度($^{\circ}\text{K}$)

t : 時間(hr)

で、機械的性質を比較する場合は、焼入れ冷却速度のみの相違を考慮すればよいと思われる。以後に示す機械的性質は、すべて上記の応力除去焼鈍後の値である。

4.3.2 引張試験結果

Fig. 9にASTM丸棒試験片(GL=2 in)を用いて行なった引張試験結果を示す。185mmの鋼板が、他に比べて強度が高くなっているのは、

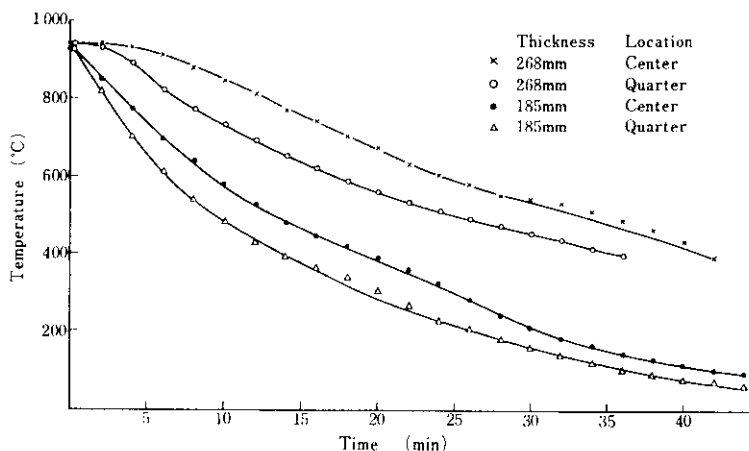


Fig. 8 Coolig curves during quenching

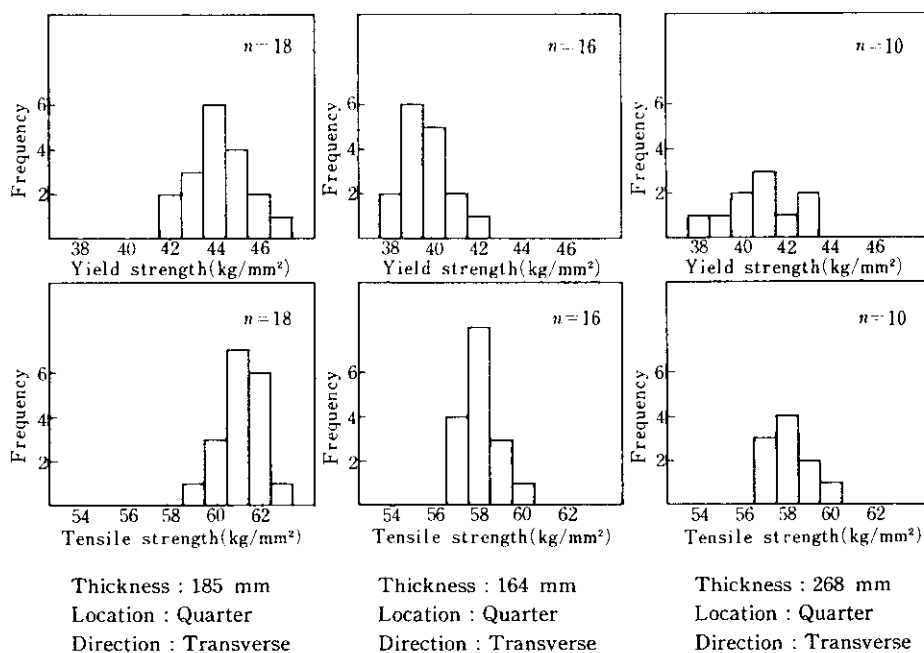


Fig. 9 Results of tension test at room temperature

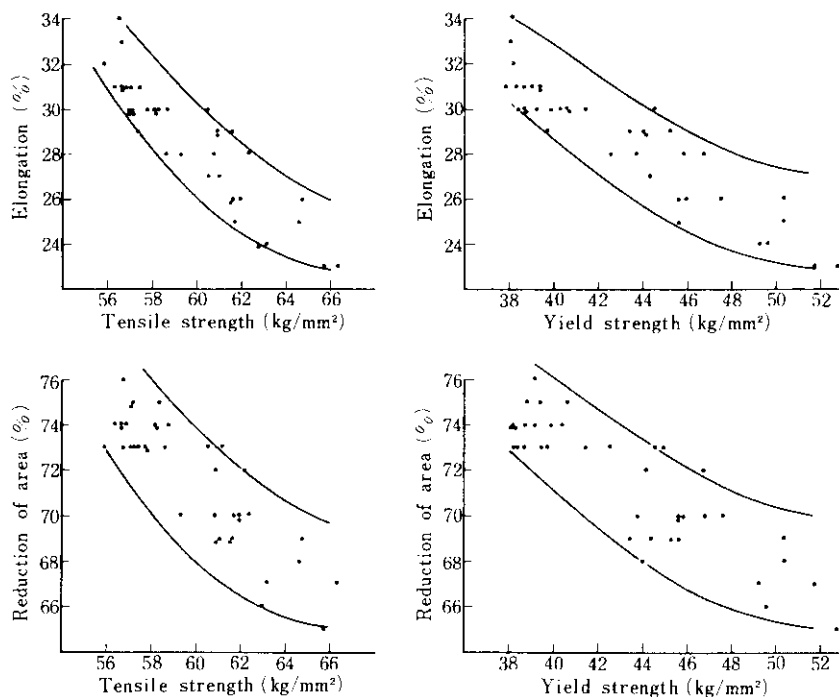


Fig. 10 Relation between tensile, yield strength and other tensile properties

C, Cu 含有量が高いためと思われ、焼入れ時の冷却速度の影響は全く見られない。Fig. 10 は、前述のデータのほかに焼もどしパラメーターを変化させ、強度範囲を拡げて強度と延性の関係を見たものである。また応力除去焼鈍による強度の低下

量を調べるために、焼入れ、焼もどしの状態、および $685^{\circ}\text{C} \times 6\text{hr}$ の応力除去焼鈍の状態での試験を追加し実施した。その結果が Fig. 11 である。これによれば、応力除去焼鈍による低下量は、降伏強さで約 20kg/mm^2 、引張強さで約 15kg/mm^2 程度である。

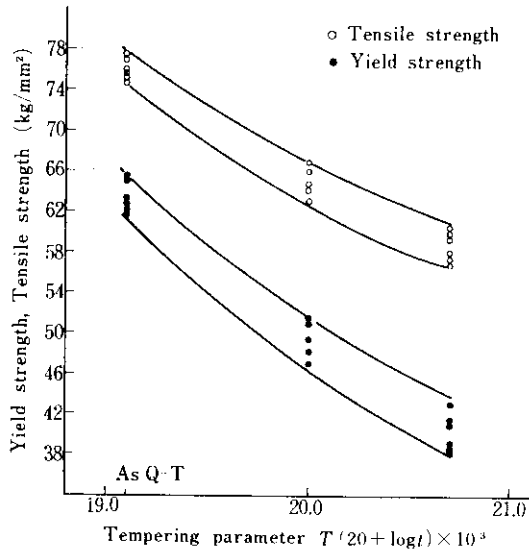


Fig. 11 Effect of PWHT conditions on yield strength and tensile strength

4.3.3 高温引張試験結果

高温引張試験は、すべて ASTM に規定するところの径 $= 12.5\text{mm}\phi$ 、 $GL=50\text{mm}$ の試験片を用い、島津製作所製 10t ロードセルタイプ高温引張試験機で行なった。現在までに終了した試験結果を Fig. 12 に示す。また常温強度と高温強度の対応を見るため、常温強度を広い範囲に変化させて試験を行なった。その結果を Fig. 13 に示す。 $432^{\circ}\text{C} \sim 438^{\circ}\text{C}$ の高温における低下量は、引張強さで約 $10 \sim 12\text{kg/mm}^2$ である。

4.3.4 2mmV シャルピー衝撃試験

Fig. 14 に 10°C 、 20°C におけるシャルピー衝撃試験結果を示す。焼入れ、焼もどし処理を施された A 387 D 鋼は、非常に高い靱性値を示し、圧

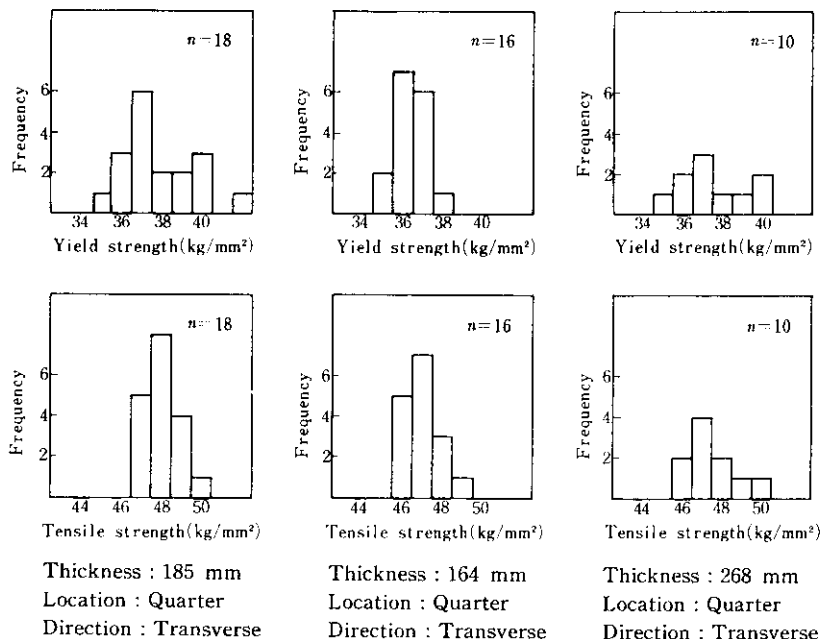


Fig. 12 Results of high temperature tensile test

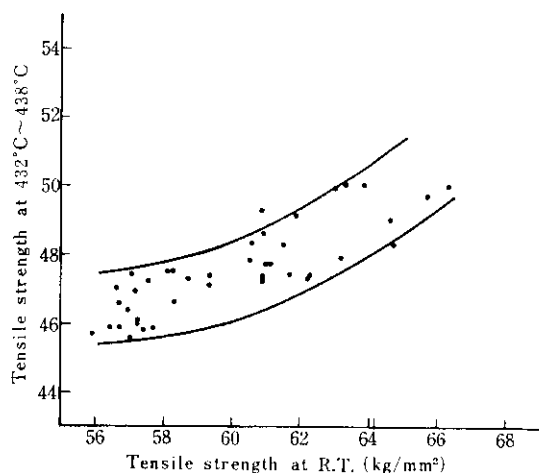


Fig. 13 Relation between tensile strength at R. T. and 432°~438°C

延方向に直角に採取された試験片の場合は、圧延方向の場合と比べて、わずかにエネルギーの飽和値が低くなっているが、規格値に対しては、十分余裕のある値であり全く問題はない。さらに268mm の場合のような超極厚鋼板の中心部でも $\frac{1}{4}$ T部とほとんど変わらない高い靱性値を示した。Fig. 15はシャルピー遷移温度曲線の一例で、185mm の場合を示すが、破面遷移温度が -47°C と非常に低く、これからもA 387 D鋼の低温靱性が非常に良好であることがわかる。

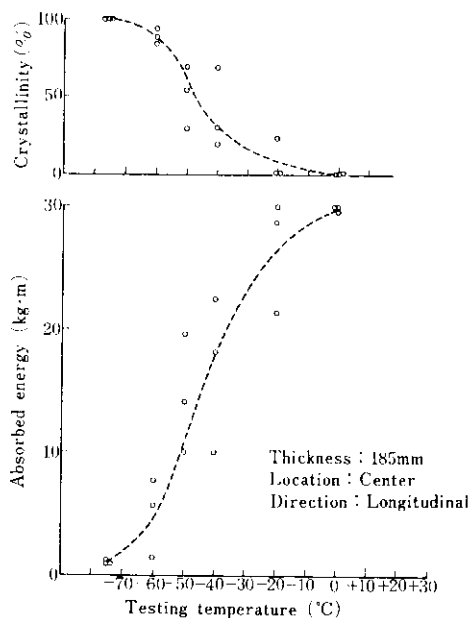


Fig. 15 An example of transition curve in 2 mm V notch Charpy impact test

4.3.5 超極厚鋼板 268 mm の機械的性質

268 mm 厚の極厚鋼板の製造で最も懸念されたのは、鋼板の中心部まで十分焼きがはいり、均一な機械的性質が得られるかどうかということであ

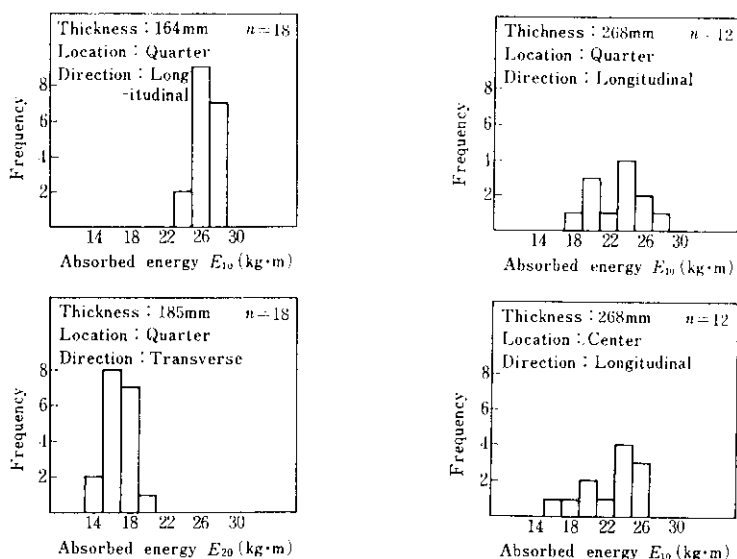


Fig. 14 Results of 2 mm V notch Charpy impact test at 10°C and 20°C

Table 6 Mechanical properties of ultra-heavy plates of 268 mm in thickness

Plate No.	Corresponding location in ingot	Through-thickness location	Cooling rate of quenching (800°C - 400°C) (°C/min)	Tensile test at R. T				Tensile test at 432°C			2 mm V notch impact test at 10°C (kg·m)
				Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	
1	Top	Quarter	12.3	41.6	58.3	30	73	38.3	47.6	23	19.9
		Center	11.5	40.2	58.8	30	73	37.2	46.9	22	18.4
	Bottom	Quarter	14.0	39.4	57.9	31	75	35.8	46.0	23	22.1
		Center	12.8	39.1	57.9	30	73	34.9	46.1	23	18.9
2	Top	Quarter	14.1	39.3	57.1	30	73	37.1	46.9	21	27.2
		Center	12.2	41.7	58.4	31	73	38.0	47.7	21	25.4
	Bottom	Quarter	14.2	39.1	57.7	33	74	35.3	46.1	22	28.6
		Center	13.7	37.9	57.3	30	73	35.0	46.4	23	24.6

Quenching of test pieces : 3T method
 Direction of test piece : Transverse

った。しかもファブリケーターでの焼入れ条件のバラツキを考慮し、実際の容器焼入れ時に得られるであろう冷却速度に対し安全側、すなわち前述のような非常に遅い焼入れ冷却速度で、材質保証を行なうようにしているのといふこのことが懸念された。結果の一部を **Table 6** に示す。これによると鋼板内の各位置、および板厚方向の各位置による差は見られず、十分満足できる結果を得た。このことは、**Fig. 8** のように 268 mm 厚の焼入れ時の平均冷却速度 (825°C-400°C) は、12~14°C/min であり、今回のような化学成分の A 387 D 鋼では、平均冷却速度が 6~8°C/min 以上ならば、初析フェライトの析出のない均一なベーナイト組織となり、強度レベルは焼入れ冷却速度に依存することなく、焼入れ後の焼もどしパラメーターのみにより決まるといふ著者らの研究結果¹⁾とあわせ考えれば十分うなずけることであり、さらには鋼塊の鍛錬効果が、十分内部までいきわたっていることによるものであると思われる。また **Fig. 16** の鋼板断面の硬度分布、**Photo. 1**

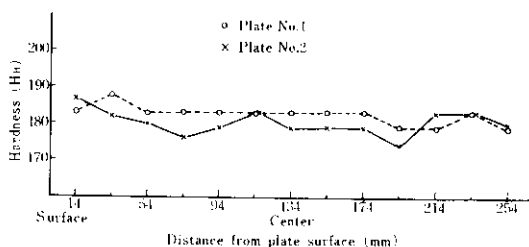
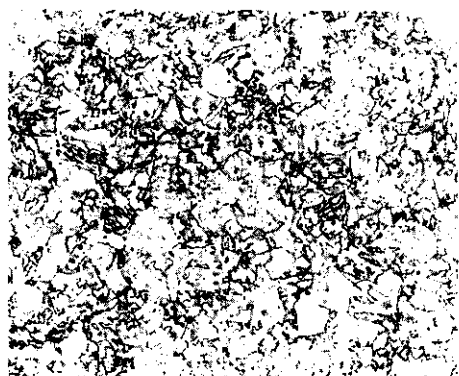


Fig. 16 An example of hardness distribution through thickness of 268 mm heavy plates

の顕微鏡組織においても、板厚中心部まで十分焼入れ効果がおよんでいることがわかる。

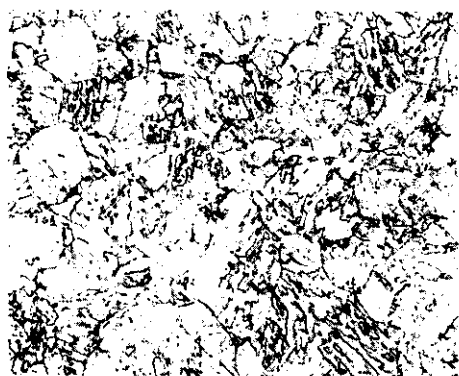
4.3.6 実物容器の機械的性質

脱硫リアクター容器完成後の機械的性質と、鋼板出荷に先立って行なわれるテストクーボン法 (3 T法) や、プログラム法によって得られた結果と比較することは、3 T法やプログラム法によ



Location : Quarter

(×200)



Location : Center

(×200)

Photo. 1 Microstructures of 268 mm thickness heavy plate after post weld heat treatment

る材質保証の信頼性の点からいっても非常に重要なことである。Case 1 の場合で比較すると、実際の容器のほとんどは、 $20.3 \sim 20.4 \times 10^3$ の焼もどしパラメーター相当の焼もどしおよび応力除去焼鈍しか受けないので、(テストクーポンでは 20.7×10^3) 出荷前のミルシートの値に比べて、引張強さは 5 kg/mm^2 程度高くなっているが、靱性は、ほとんど変わらない値となっている。

5. A 387 D 極厚鋼板の製作可能板厚

著者らは、すでに A 387 D 鋼の機械的性質におよぼす焼入れ冷却速度の影響について、広範囲な調査を完了しているが、板厚 300mm を超すような、さらに超極厚鋼板の製作可否を検討するため、今回の A 387 D 鋼の中で最も高い化学成分のものを選り、板厚 300mm 超の中心部に相当する冷却速度をシュミレーションにより与え、その機械的性質を調査した。その結果焼入れ冷却速度 5°C/min の場合は、Photo. 2 に見られるような初析フェライトの析出があるものの、実際の引張試験では、Table 6 のように焼入れ冷却速度 10°C/min の場合と変わらぬ強度を示し、化学成分の選定さえ間違えなければ、300mm を超える超極厚鋼板でも材質的に十分保証し得ることがわかった。ただし板厚が 300mm を超すような超極厚鋼板になると、内部性状の点、製品単重の制約

Table 7 Effect of cooling rate of quenching on tensile properties

Cooling rate of quenching	Tensile properties				Hardness	
	Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Hv (10kg)	H _B
10°C/min	46.8	65.7	30	73	197	183
	46.3	64.4	30	73	199	187
5°C/min	48.2	65.6	30	72	202	179
	46.3	65.7	30	72	196	179

Check analysis (wt%) C : 0.16 Si : 44 Mn : 0.58 P : 0.010 S : 0.006 Cr : 2.44 Mo : 1.01

Heat treating condition 700°C×15hr, Tempering parameter 20.6×10^3



(×100)



(×500)

(a) Cooling rate (800°C→400°C) 10°C/min



(×100)



(×500)

(b) Cooling rate (800°C→400°C) 5°C/min

Photo. 2 Microstructures of A 387 D (as quenched)

により鋼板寸法が幅、長さともかなり制限されるようになり、容器製作工数が増える点などの問題点があるので、さらに十分な配慮、検討が必要となろう。

6. 結 言

当社製 A 387 D 極厚鋼板が使用された鋼板構造による直接脱硫装置は、何のトラブルもなくその製作が完了し、十分従来の鍛鋼リング構造による脱硫装置にとってかわり得ることが証明された。また板厚 268mm という過去にない A 387 D

超極厚鋼板の製造も開始され、材質面においても、内部性状の面においても、従来の 200mm 以下の A 387 D 鋼と全く遜色ない結果が得られており、現在も順調な生産を続けている。これらの結果は、今後の直接脱硫装置の設計面で大いに活用されるものと思われる。また A 387 D 極厚鋼板の製造上今後に残された問題として、焼もどし脆性による脆化量の軽減を図り、同時に従来高温用ということであり行なわれていなかった大型試験片による破壊靱性の挙動を解明していく必要がある。これらの点に関しては、また稿を改めて報告したい。

参 考 文 献

- 1) 佐藤, 榎並, 楠原, 林: 川崎製鉄技報, 4 (1972) 3, 25
- 2) 西岡, 江本: 川崎製鉄技報, 4 (1972) 1, 12
- 3) 藤井, 他: 鉄と鋼, 58 (1972) 4, S. 55

