

# ジャッキアップリグのラック用極厚 (210mm)800N/mm<sup>2</sup>級鋼板の開発

## Development of Ultra-Heavy Gauge (210 mm Thick) 800N/mm<sup>2</sup> Class Steel Plate for Racks of Jack-up Rigs

大谷 幸三郎<sup>(1)</sup> 服部 恵一<sup>(2)</sup> 村岡 寛英<sup>(3)</sup> 川副 文宏<sup>(4)</sup>  
Kozaburo OTANI Keiichi HATTORI Hirohide MURAOKA Humihiro KAWAZOE  
鶴田 早苗<sup>(5)</sup>  
Sanae TSURUTA

### 抄 録

新日本製鐵は寒冷深海域用ジャッキアップリグのラック用極厚鋼板を開発した。この鋼板の板厚は210mmでラック用圧延鋼板としては世界最大厚である。強さは800N/mm<sup>2</sup>級で、溶接性が良く、板厚中心部の靱性を-60°Cまで保証する。この鋼板は化学成分の最適化、最新の製鋼技術及び鍛造によらず高度な圧延技術を駆使して製造される。

### Abstract

Nippon Steel Corporation has developed a 210 mm thick steel plate, world's heaviest gauge material, for racks of jack-up rigs to be used in frigid, deep seas. This plate combines a tensile strength of 800 N/mm<sup>2</sup> class with excellent weldability and high notch toughness at the mid-thickness at temperatures up to -60°C. The steel plate has been developed by optimizing the chemical composition and is produced by utilizing the latest steelmaking technology and advanced rolling process instead of forging.

### 1. 緒 言

海洋石油掘削リグには種々のタイプがあるが、図1に示すジャッキアップリグが最も多く使用されている。このレグ(脚)のラックには、重量軽減のため多くの場合強さ780~870N/mm<sup>2</sup>の鋼板(HT80)が使用される。ラック用鋼板に要求される特性は溶接性、切欠靱性のほかに、耐ラメラティア特性及びガス切断性等がある。

新日本製鐵では10年以上前からラック用鋼板の研究開発を進め、種々の海域用ラック用鋼板を製造し、その成果が報告されている<sup>1,2)</sup>。これらの高張力鋼板は板厚127mmから195mmまでのものであった。

しかしながら近年、図2に示すようにジャッキアップリグは深海化に伴う極厚化及び寒冷化の傾向にあり、最近、世界最大厚210mmで高靱性保証のラックの開発が要請された。開発されたラック用鋼板、ラックにコードが溶接されたレグの写真をそれぞれ写真1及び写真2に示す。

本報告は、低温用超極厚高張力鋼の開発の考え方、製造条件、機械的性質及び溶接性について報告する。

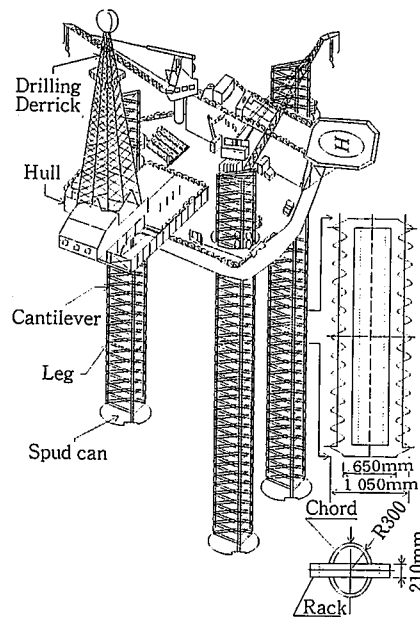


図1 ジャッキアップタイプリグ

<sup>(1)</sup> 技術本部 厚板技術部 部長代理  
<sup>(2)</sup> 名古屋製鐵所 品質管理部 室長  
<sup>(3)</sup> 名古屋製鐵所 品質管理部 掛長

<sup>(4)</sup> 名古屋製鐵所 品質管理部  
<sup>(5)</sup> 機械・プラント事業部 機械構造・素形材部 掛長

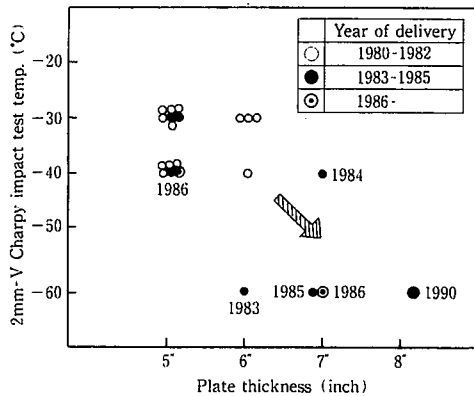


図 2 ラック用鋼板の受注動向

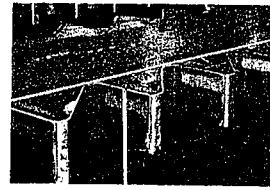


写真 1 超極厚鋼板からガス切斷加工されたラックの外観



写真 2 超極厚ラックを使用したレグの外観

## 2. 成分設計

### 2.1 従来の化学成分の考え方

新日本製鐵では、板厚127mm から195mm までの引張強さ780~870 N/mm<sup>2</sup>のラック用極厚鋼板を製造してきた。

これらの成分設計に関する基本的知見は既に報告しているように<sup>1)2)</sup>、次のようにまとめられる。

- (1) C量は、溶接継手部のボンド靱性を確保するためにはできるだけ低い方がよい。
- (2) Si量は、0.1%から0.4%の範囲内ではSiの増加と共に引張強さは大きくなるが、一方靱性は低下するので0.3%以下に抑える必要がある。
- (3) Pは少なければ少ないほど溶接継手部のボンド靱性の改善に有効で、0.008%以下になると顕著に向上する。
- (4) Bは焼入れ時の冷却速度の遅い極厚鋼板の板厚中心部の焼入性を改善し、板厚方向の機械的性質の均一化に役立つ。
- (5) Niの増量は低温靱性の向上及び引張強さの増大に効果的である。
- (6) C当量を一定にして焼入倍数(DI)を大きくするにはMn, Mo及びNiの増量が有効である。

### 2.2 開発目標と化学成分の決定

従来知見を基礎に、新たに開発された鋼板の化学成分を表1に示す。従来のラック用鋼板はシャルピー試験温度が-60°C以上で板厚

の1/4で靱性を保証するもので、しかも最大厚は195mm までのものであった。しかしながら、今回の開発目標は更に板厚が厚い210mm で、板厚の1/4より一般的に靱性確保が難しい板厚の中心部で $vE_{-60^{\circ}C} \geq 45J$ を保証するものである。

図3に $vE_{-60^{\circ}C}$ と50% FATT(破面遷移温度)の関係を示す。 $vE_{-60^{\circ}C} \geq 45J$ を保証するためには50% FATTを-55°C以下にする必要がある。

これが従来鋼の中でも板厚の厚い1.9% Ni系180mm 鋼板及び2.5% Ni系195mm 鋼板の成分で保証可能かどうかの検証を図4に示す。今回使用したローラクエンチでの板厚210mm 鋼板の板厚中心部の800°Cから500°Cまでの冷却速度は0.5°C/sであるので、板厚210mm 鋼板の板厚中心部の50% FATTは、1.9% Ni系180mm 鋼板の成分では点2aの値、2.5% Ni系195mm 鋼板の成分では点2bの値と推定される。同様に板厚の1/4部ではそれぞれ点4a, 点4bの値と推定される。これをまとめて表2に示す。即ち、冷却速度の遅い210mm 鋼板に従来成分を適用すると靱性保証が困難となる。従って、210mm 厚の板厚中心部のように冷却速度が遅くなる場合は靱性を悪化させるアッパーペーナイトが生成するので、これを防止するためには焼入性(DI

表 1 既開発最大板厚 HT80の化学成分と新開発鋼の目標化学成分

Steel	Case (Thickness:mm)	Chemical composition (wt %)														Ceq (%)		*3 P <sub>CM</sub> (%)	*4 DI (inch)	Remarks
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Al	B	N	*1 JIS	*2 IIW			
Conventional steel	1.9Ni (180)	0.12	0.32	1.07	0.006	0.002	0.28	1.85	0.51	0.56	tr	0.04	0.062	0.0012	0.0038	0.60	0.66	0.30	8.69	Guarantee of quarter-thickness $vE_{-60^{\circ}C}$
	2.5Ni (195)	0.11	0.26	1.11	0.003	tr	0.24	2.46	0.70	0.51	tr	0.04	0.072	0.0012	0.0045	0.64	0.72	0.31	10.59	Guarantee of quarter-thickness $vE_{-50^{\circ}C}$
Newly developed steel	Target (210)	0.11	0.25	1.05	≤0.005	≤0.001	0.25	3.35	0.70	0.55	—	0.04	0.065	0.0013	≤0.0060	0.64	0.78	0.32	12.15	

\*1 Ceq (JIS) = C+Si/24+Mn/6+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14

\*2 Ceq (IIW) = C+Mn/6+(Cu+Ni)/15+(Cr+Mo+V)/5

\*3 P<sub>CM</sub> = C+Si/30+(Mn+Cu+Cr)/20+Ni/60+Mo/15+V/10+5B

\*4 DI = 0.367√C(1+0.7Si)(1+3.33Mn)(1+0.35Cu)(1+0.36Ni)(1+2.16Cr)(1+3.0Mo)(1+1.75V)(1+1.77Al)

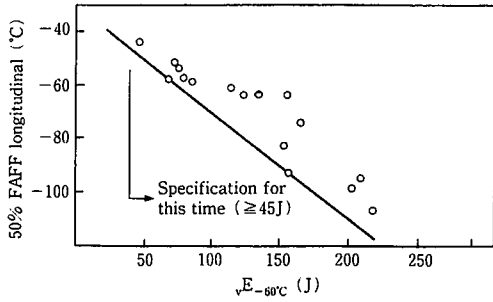


図 3 極厚HT80鋼板の $vE_{-60^{\circ}C}$ と50% FATTの関係

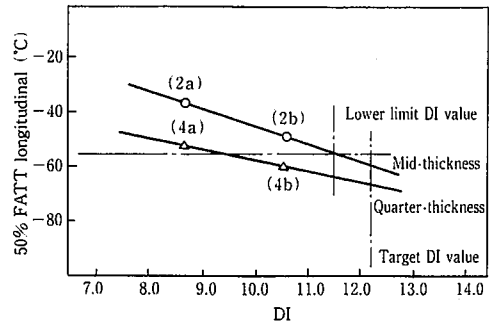


図 6 極厚HT80(210mm)のDI値と靱性値の推定

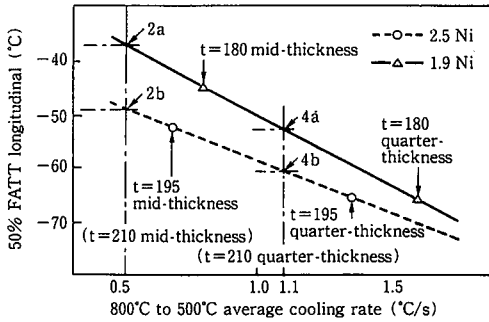


図 4 極厚HT80鋼板の各板厚位置における冷却速度と靱性の関係

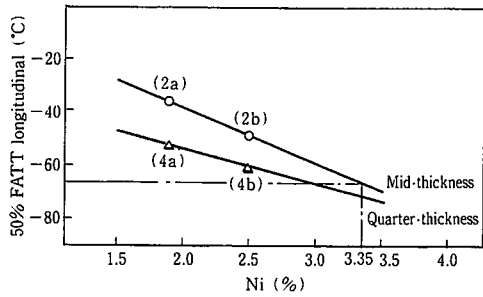


図 7 極厚HT80(210mm)の所要Ni量の推定

表 2 各成分系の板厚210mmにおける板厚中心部の靱性値推定

Composition system	50% FATT (°C)
1.9Ni	-37
2.5Ni	-49
Target value	≤ -55

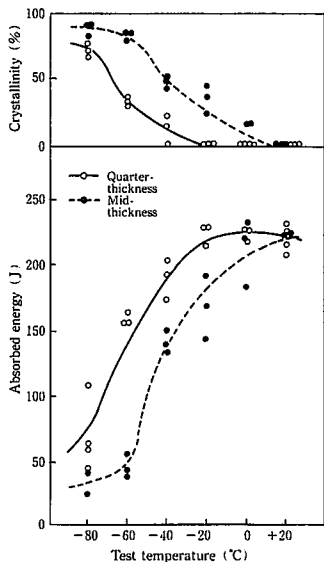


図 5 1.9% Ni HT80鋼板, 板厚180mmのシャルピー遷移曲線(圧延方向)

値)を増加させる必要がある。

参考のために1.9% Ni系180mm鋼板のシャルピー遷移曲線を図5に示す。

一般にDI値と靱性の間には密接な関係がある。図6は、図4から推定される210mm厚鋼板の50% FATT (2a, 2b, 4a, 4b)と前記1.9

% Ni鋼板及び2.5% Ni鋼板のDI値との関係を整理したものである。この図から板厚中心部で50% FATT ≤ -55°Cを保証するためにはDI値を11.5以上にする必要があることがわかる。そのため、製造のばらつきを考慮してDI値は12.1と設定された。このDI値の補償は溶接性に影響を及ぼす硬化性元素(C, Mn, Cr, Mo等)を従来鋼と同量とし、鋼板のマトリックスの靱性改善に効果のあるNiの増量により行われるようにした。その結果Ni量は3.35%と算定された。

図7に、図4から推定された210mm厚鋼板の50% FATT (2a, 2b, 4a, 4b)と前記1.9% Ni鋼板及び2.5% Ni鋼板のNi量との関係を示す。Niが3.35%であれば50% FATTは約-65°Cとなり、50% FATT ≤ -55°Cは充分保証されると推定される。

### 3. 製造条件

#### 3.1 製鋼法

図8にラック用鋼板の一般的な製造工程を示す。ラック用鋼板には次のような製鋼技術が要求される。

- (1)ガス切断時の耐割れ性及び耐ラメラテア性の確保のための非金属介在物対策(低S化, 低O化)
- (2)極厚化に伴う超音波欠陥対策(低H化)
- (3)母材や溶接継手熱影響部靱性確保のための低P化及び目標成分的中技術

これらの目的のためには、溶銲予備処理, 二次精練, 真空脱ガス等の適用とその処理条件が重要な項目となる。図9に高 cleanliness 鋼製造工程を示すが、これらの目的のために開発されたものである<sup>3,4)</sup>。この新しいプロセスを適用すれば、P ≤ 0.005%, S ≤ 0.001%, O ≤ 15ppm, H ≤ 1.5ppmの超清浄鋼が容易に得られる。

#### 3.2 圧延法

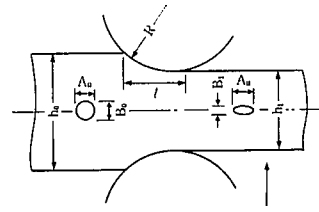
一般に極厚鋼板を圧延する場合、板厚中心部では板厚方向の圧下力が弱く、鋼塊の凝固過程で発生するポイドを十分に圧着できない。この問題は中尾等<sup>5)</sup>によって開発された高形状比圧延法によって解決

された。図10及び図11にその研究結果を示す。これらの図から明らかなように、ロール径や圧延1パス毎の圧下率を大きくすることにより、圧延形状比を1.0以上に確保すれば板厚中心部のボイドは充分に圧着される。この高形状比圧延はガス切断性も改善する。

3.3 熱処理法

図12にスラブ加熱から圧延された鋼板の焼入、焼戻しに至るまでの熱サイクルを示す。この熱サイクルを決定した基本的な考え方は山場らの研究結果<sup>2)</sup>による。すなわち、焼入性を確保するためのBの有効利用とAINの析出制御を考慮して決定された。

Bにより焼入性を高めるためには焼入前のBの状態をフリーB(B単独)にし、BNが生成するのを防止する必要がある。このためにはNをAINの状態にして固定しておくことが有効で、その際Alは若干過剰に添加される。しかしながら、分塊圧延後の冷却過程で粗大に析出するAINは母材の低温靱性を劣化させる。このため、スラブ加熱温度を1200°C以上にし、粗大なAINがAlとNの形で完全に溶解されるようにしなければならない。又、鋼板を焼入れする加熱過程でAINを微細な形で析出するためには、図12のT<sub>1</sub>温度(圧延後の冷却温度)は400°C以下に規制されなければならない。



$$\frac{l}{h_m} = \frac{\sqrt{R(h_0 - h_1)}}{1.2(h_0 + h_1)} \quad (\text{Shape factor})$$

$$X = \frac{B_1 - B_0}{B_0} = 1 - \frac{B_1}{B_0} \quad (\text{Deformation ratio of void in through thickness direction})$$

$$= Y = \frac{A_1 - A_0}{A_0} = 1 - \frac{A_1}{A_0} \quad (\text{Deformation ratio of void in rolling direction})$$

図10 形状比  $l/h_m$  の説明図

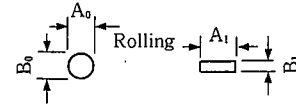
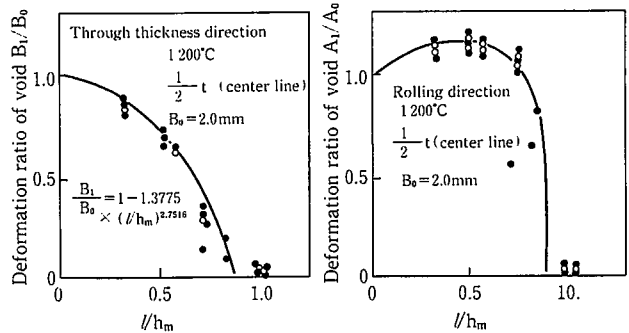


図11 変形比  $B_1/B_0$  及び  $A_1/A_0$  に及ぼす形状比の影響

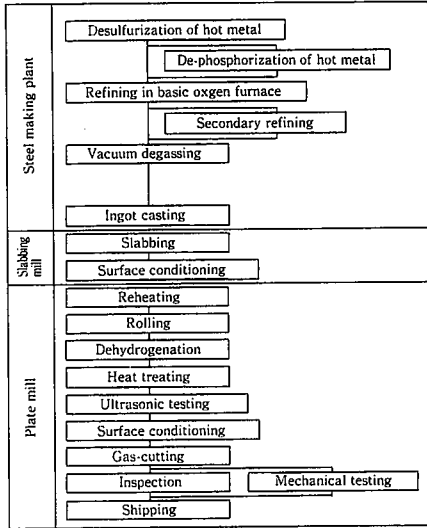


図8 製造工程

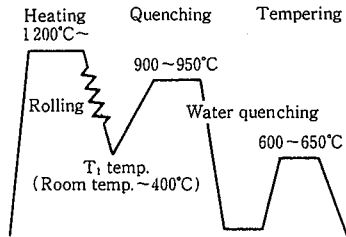


図12 焼入、焼戻しの熱サイクル

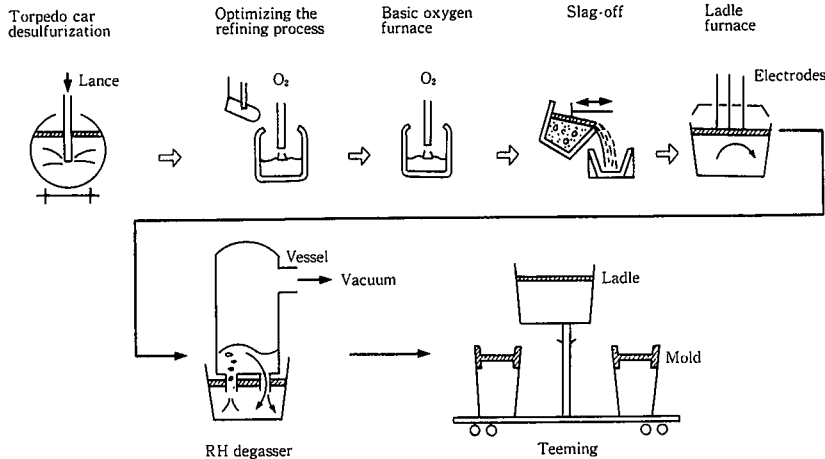


図9 高純度鋼の製造法

#### 4. 製造結果

前述の成分設計及び製造条件に従って、新開発鋼板を実製造ラインで製造した結果を以下に示す。

##### 4.1 化学成分

表3に実製造鋼の化学成分を目標化学成分と比較して示す。ほぼ目標通りの化学成分が得られている。又、更に詳細な製造実績を図13に示す。各成分のばらつきは極めて小さく、P及びS等の不純物元素は高纯净度鋼製造技術の効果により微量に抑えられている。

##### 4.2 機械的性質

母材の引張、曲げ試験結果を表4に示す。引張強さは目標値834N/mm<sup>2</sup>以上で十分な強度が得られ、曲げ性能も満足すべき結果が得られている。

シャルピー衝撃試験結果を図14に示す。50% FATTは目標の-55°C以下であり、-60°Cでの吸収エネルギーも目標値45Jの3倍以上の高エネルギーが得られている。

板厚方向の硬さ分布を図15に示す。板厚が厚いにもかかわらず、板厚中心部と表層部の硬さの差が少ない。これはBの焼入れ効果が充分であったことを示す。

#### 5. 溶接性

##### 5.1 y形溶接われ試験

新開発鋼の溶接われ試験はJIS Z 3158に準じて行われた。試験片は図16に示すように板の片面を50mmに減厚したものが使用された。試験結果を図17に示す。150°Cの予熱温度で溶接われの発生は防止でき、従来通りの溶接性を示している。

##### 5.2 最高硬さ試験

最高硬さ試験は図18に示すようにJIS Z 3101に従って行った。図19に従来の127mm厚鋼板と比較して示す。新開発鋼はより薄い127mm厚鋼板とほぼ同一のビッカース硬さ(荷重10kgf)を示している。ビッカース硬さは予熱温度室温から200°Cにわたって変化が小さく、385~392であった。

#### 6. 溶接継手性能

新開発鋼の継手性能を調べるために、ラックの溶接に最もよく使用される被覆アーク溶接法(SMAW)及びサブマージアーク溶接法(SAW)の2方法による溶接継手を作成し、試験を行った。溶接条件を表5に示す。又、開先形状を図20に示す。これらの溶接条件は引張強さが780~870N/mm<sup>2</sup>のラックの溶接に一般的に適用されている条件である。

##### 6.1 溶接継手引張試験

継手引張試験の結果を表6に示す。引張試験片は試験機的能力から板厚方向に3分割して採取した。試験片形状はロイド船級協会で規定された溶接継手引張試験片と同一である。引張強さは全ての試験で目標値の834N/mm<sup>2</sup>以上であった。

##### 6.2 溶接継手シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験片は図21に示すように板厚方向に3箇所から採取した。又、ノッチ位置は溶接金属中心部(WM)、ボンド部(FL)及びFLから母材側へ2mmの位置(FL+2mm)の3位置とした。衝撃試験結果を表7に示す。-60°Cの試験温度における吸収エネルギーは母材の影響の大きいFL及びFL+2mmの位置で目標値45J以上の値が得られている。

表3 新開発鋼の化学成分 (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	B	N	Ceq(JIS) (%)	Ceq(IIW) (%)	P <sub>cm</sub>	DI (inch)
Target	0.11	0.25	1.05	≤0.005	≤0.001	0.25	3.35	0.70	0.55	0.04	0.065	0.0013	≤0.0060	0.64	0.78	0.32	12.1
Typical example	0.11	0.24	1.06	0.003	0.001	0.24	3.30	0.69	0.54	0.03	0.078	0.0014	0.0045	0.65	0.78	0.32	11.9

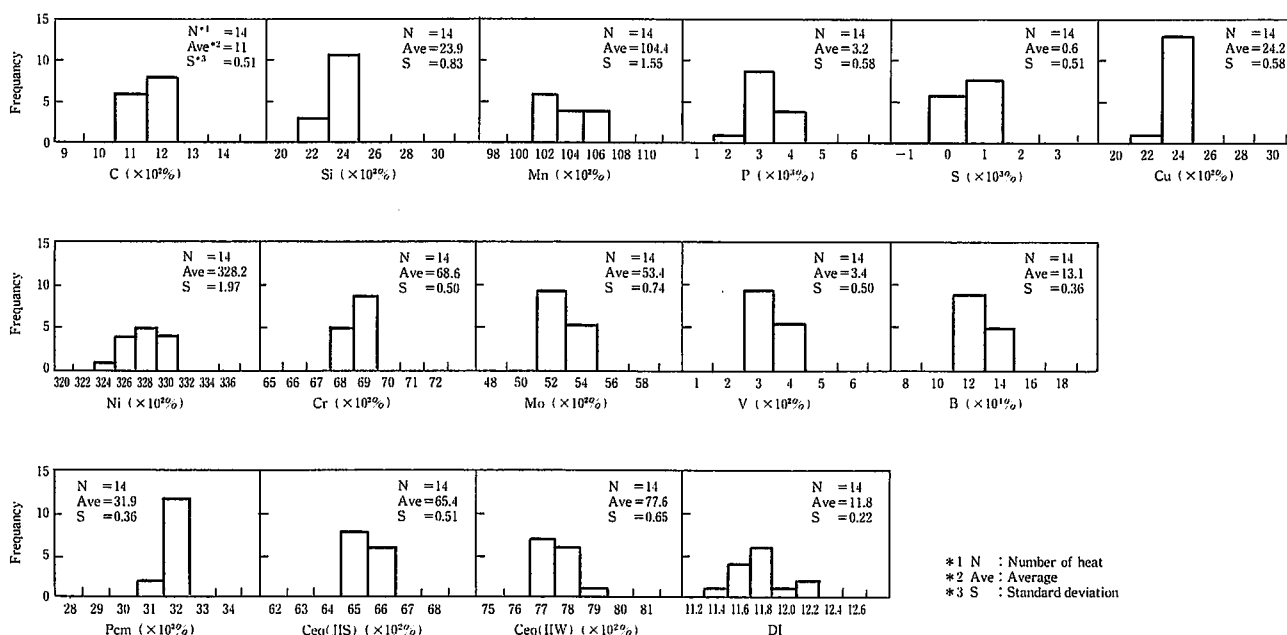


図13 化学成分実績値(溶鋼分析)

表 4 引張及び曲げ試験結果 (圧延直角方向)

Heat No.	Plate thickness (mm)	Heat treatment	Thickness position	Tensile test				Bend test		
				Yield point (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Reduction area (%)	Radius	Angle	Result
NQ0477	210	Quenched and tempered	1/4-thickness	826 827	886 884	19 20	64 65	Twice of thickness	180°	Good
			1/2-thickness	786 789	854 859	20 20	66 65			Good
Target	210	Quenched and tempered	1/4-thickness	Minimum 686 (≥70kgf/mm <sup>2</sup> )	Minimum 834 (≥85kgf/mm <sup>2</sup> )	Minimum 15	—	Twice of thickness	180°	No cracking

Note: (1) Tensile test specimen: Round type (Gauge length=70mm, diameter=14mm)  
 (2) Bend test specimen: Reduced to 35mm, thickness with the original top surface retained

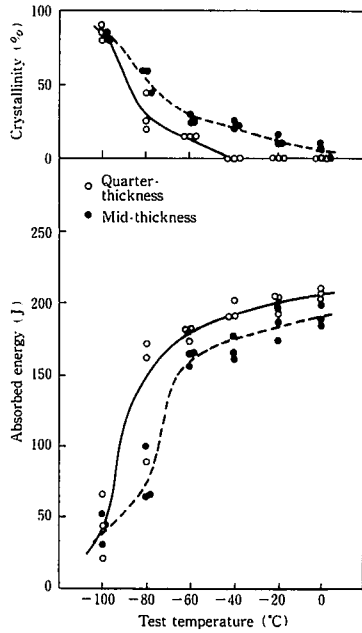


図 14 2mm V-ノッチシャルピー衝撃試験結果(圧延方向)

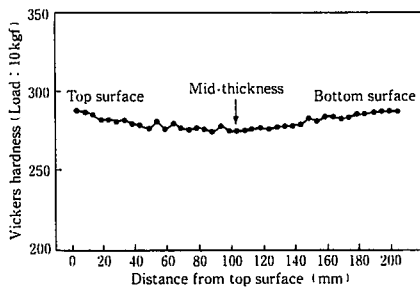


図 15 板厚方向硬さ分布

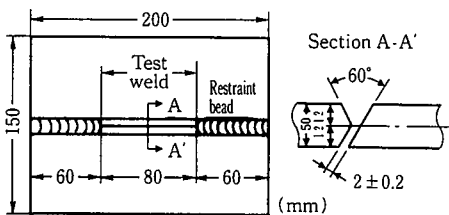


図 16 y形拘束割れ試験片の形状

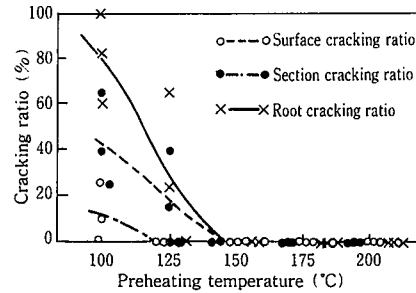


図 17 y形拘束割れ試験結果

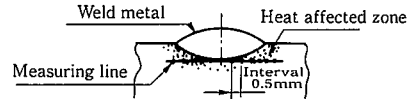


図 18 y形拘束割れ試験結果

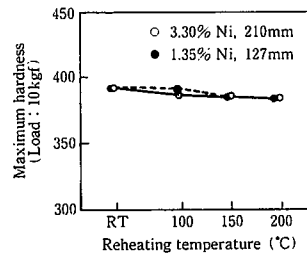


図 19 最高硬さ試験結果

表 5 溶接継手試験用溶接条件

Groove shape	Type A	Type B	
	SMAW	SAW	SMAW
Welding method	SMAW	SAW	SMAW
Welding consumables	L-80SN (4.5mmφ)	Y-80M×NB250H (3.2mmφ)	L-80SN (4.5mmφ)
Welding current (A)	130~180	470~500	170~230
Arc voltage (V)	23~25	28~30	25
Travel speed (cm/min)	7~12	29~32	18~24
Heat input (kJ/mm)	1.6~2.8	2.7~3.0	1.3~1.7
Preheating temperature (°C)	100	100	130
Interpass temperature (°C)	105~130	96~130	110~130

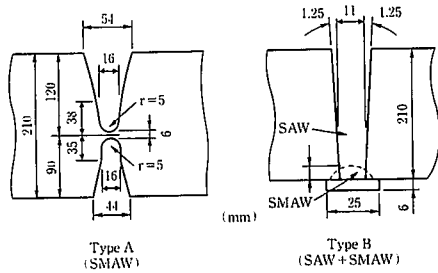


図 20 開先形状

表 6 溶接継手の引張試験結果

Type	Thickness location	Test piece size (mm)		Tensile strength	Fractured location
		Thickness	Width		
A (SMAW)	Surface to 1/3-thickness	69.90	25.10	896	Weld metal
		69.70	25.10	890	Weld metal
	1/3-thickness to 2/3 thickness	70.05	25.10	925	Weld metal
		70.00	25.00	916	Weld metal
	2/3-thickness to thickness	70.10	25.10	925	Weld metal
		70.00	25.10	913	Weld metal
B (SAW + SMAW)	Surface to 1/3-thickness	70.10	25.10	938	Base metal
		69.70	25.10	941	Base metal
	1/3-thickness to 2/3-thickness	70.00	25.10	937	Base metal
		70.00	25.15	943	Base metal
	2/3-thickness to thickness	70.15	25.15	938	Base metal
		70.10	25.15	944	Base metal

7. 結 言

新日本製鐵は、引張強さが780~870N/mm<sup>2</sup>の世界最大厚210mmの低温用のラック用鋼板を高価な鍛造法によらず、新日本製鐵が開発した特殊圧延法を用いる方式で開発した。

この新開発鋼板は超極厚鋼板であるにもかかわらず、従来の極厚鋼板と同程度の溶接性を有している。又、従来最も低温の試験温度-60°Cで、靱性のもっとも出にくい板厚中心部の靱性が保証される。この鋼板は合金成分と熱処理法の最適化、高清浄度鋼プロセスの適用及び高形状比圧延の採用により製造可能である。

新開発鋼の特徴は次の通りである。

- (1)母材の板厚中心部の2mmV ノッチシャルピー吸収エネルギー、 $\sqrt{E_{-60^\circ C}}$  は45J 以上で、破面遷移温度50% FATT は-55°C以下である。
- (2)溶接熱影響部の2mmV ノッチシャルピー吸収エネルギーも母材と同レベルの $\sqrt{E_{-60^\circ C}} \geq 45J$  を満足する。
- (3)溶接性は従来の低温用ラック用極厚鋼板と同程度で、y 形溶接われ試験における必要予熱温度は150°Cである。

参 照 文 献

- 1) Yamaba, R. et al. : Metallurgical Factors Controlling HAZ Toughness in HT80, IIW Document IX-1442-86
- 2) Yamaba, R. et al. : Newly Developed 80kgf/mm<sup>2</sup> Class High-Strength Quenched and Tempered Steel Plates with Heavy Sections. Conf. Proc. of Int. Conf. on Technology and Applications of HSLA Steels, 1983, ASM, p.667-677
- 3) 大西保之 ほか：鉄と鋼, 69, A41 (1983)
- 4) Ohnishi, Y. : A New Steelmaking System for Super Clean Steel. Iron and Steel Makers. 12 (2), 29-34 (1985)
- 5) 菊竹哲夫, 中尾仁二：鉄と鋼, 63 (4), S219 (1977)

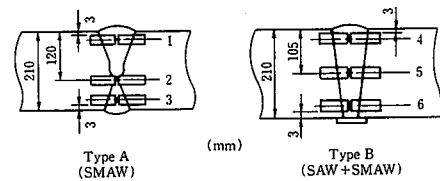


図 21 シャルピー試験片の採取位置

表 7 溶接継手の 2 mm V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

Type	Thickness location (See Fig.21)	Notch location	Test temp. (°C)	Absorbed energy (J)			Ave. value
				Each value			
A (SMAW)	1	WM	-60	77	91	86	85
		FL	-60	201	221	196	206
		FL+2mm	-60	206	231	142	193
	2	WM	-60	67	62	73	67
		FL	-60	157	93	142	131
		FL+2mm	-60	201	238	160	200
	3	WM	-60	96	142	82	107
		FL	-60	109	75	86	90
		FL+2mm	-60	98	211	211	173
B (SAW + SMAW)	4	WM	-60	69	75	84	76
		FL	-60	128	95	155	126
		FL+2mm	-60	219	192	211	207
	5	WM	-60	60	54	52	55
		FL	-60	234	196	179	203
		FL+2mm	-60	93	150	62	102
	6	WM	-60	64	69	64	66
		FL	-60	91	167	69	109
		FL+2mm	-60	241	211	172	208