

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol.11 (1979) No.2

アンモニアプラント機器用 SA533 Type B Class1, SA508 Class3 材の製造と品質特性
Characteristics of SA533 Type B Class 1 Plates and SA508 Class 3 Forgings for
Ammonia Plants

朝生 一夫(Kazuo Aso) 三宮 好史(Yoshifumi Sannomiya) 関根 稔弘(Toshihiro Sekine) 狩野 俊之(Toshiyuki Karino) 榎並 禎一(Teiichi Enami) 井上 武彦(Takehiko Inoue) 佐藤 新吾(Shingo Sato)

要旨：

SA533 Type B Class 1, SA508 Class 3 は、最高級の品質を要求される原子炉圧力容器用鋼材としてよく知られている。これらの材料は、また低温靱性にも優れており、化学工業の特定の分野にも使用されている。今回高級鋼溶製に最も適した当社独特の転炉－LRF(Ladle Refining Furnace)プロセスにより、上記 2 鋼種計 420t をアンモニアプラント反応容器用として製造した。これらの材料の均質性を鋼板内の多くの位置にて調査したが、偏析が少なく、強度、靱性、落重特性とも非常に満足すべきものであった。また原子炉圧力容器用鍛鋼を想定して、肉厚 500mm の SA508 Class 3 材の確性試験を実施し、原子力用として十分使用できることを確認した。

Synopsis：

SA533 Type B Class 1 and SA508 Class 3 are well-known as the RPV (Reactor Pressure Vessels) materials which are required to have the highest quality. As these materials are also excellent in toughness at low temperatures, they are often applied to the fabrication of plant vessels in special fields of chemical industries. Kawasaki Steel Corp. has recently produced about 420 tons in total of the two steel grades for the reactor vessels of ammonia plants. The steels have been refined through the LD-LRF (Ladle Refining Furnace) process, a unique steelmaking process best fitted for the refining of superior quality steel. In terms of segregation, tensile strength, notch toughness and drop weight test performed in their many locations, these products showed good homogeneity of chemical composition and sufficient mechanical properties. Furthermore, 500mm-thick products of SA508 Class 3 produces as material for the use in RPV gave sufficient results in various investigations such as tensile strength, impact test and so on.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

アンモニアプラント機器用 SA533 Type B Class 1,
SA508 Class 3 材の製造と品質特性Characteristics of SA533 Type B Class 1 Plates and SA508 Class 3 Forgings
for Ammonia Plants朝 生 一 夫*
Kazuo Aso三 宮 好 史**
Yoshifumi Sannomiya関 根 稔 弘***
Toshihiro Sekine狩 野 俊 之****
Toshiyuki Kano榎 並 禎 一*****
Teiichi Enami井 上 武 彦*****
Takehiko Inoue佐 藤 新 吾*****
Shingo Sato

Synopsis:

SA533 Type B Class 1 and SA508 Class 3 are well-known as the RPV (Reactor Pressure Vessels) materials which are required to have the highest quality. As these materials are also excellent in toughness at low temperatures, they are often applied to the fabrication of plant vessels in special fields of chemical industries.

Kawasaki Steel Corp. has recently produced about 420 tons in total of the two steel grades for the reactor vessels of ammonia plants. The steels have been refined through the LD-LRF (Ladle Refining Furnace) process, a unique steelmaking process best fitted for the refining of superior quality steel. In terms of segregation, tensile strength, notch toughness and drop weight test performed in their many locations, these products showed good homogeneity of chemical composition and sufficient mechanical properties. Furthermore, 500mm-thick products of SA508 Class 3 produced as material for the use in RPV gave sufficient results in various investigations such as tensile strength, impact test and so on.

1. 緒 言

またその使用条件も厳しくなる傾向にあり、高品質の極厚鋼材への要求が高まってきている。

化学工業の発展とともに各種装置は大型化し、

Mn-Ni-Mo 系の SA533 Type B Class 1 (以下 SA533B Cl. 1), SA508 Class 3 (SA508 Cl. 3)

* 水島製鉄所鍛鍛部鍛鍛管理室主任(部長待遇)

*** 水島製鉄所管理本部厚板管理課課長

***** 技術研究所水島研究室主任(研究員)

(昭和54年5月4日原稿受付)

** 水島製鉄所管理本部厚板管理課掛長

**** 水島製鉄所鍛鍛部鍛鍛管理室主任(課長待遇)

***** 技術本部鋼材技術部大阪鋼材技術室主任(副部長待遇)

は、最高級の品質が要求される原子炉圧力容器用材としてよく知られているが、一方低温靱性も優れているため化学工業の特定の分野の圧力容器にも使用されている。当社では水島製鉄所に 100t ASEA-SKF 炉（当社では Ladle Refining Furnace 略して LRF と呼ぶ）、6000t 自由鍛造プレス、胴長 5490mm の超広幅厚板圧延機および極厚大単重材処理設備¹⁾を設け、

- (1) 不純分の少ない健全な大型鋼塊の製造^{2,3)}
- (2) 鍛造スラブによる内部健全性の向上
- (3) 極厚鋼材の熱処理特性や成分系に関する基礎試験^{4~6)}と試作^{7~9)}

など極厚鋼材の品質向上のための製造技術の確立を図ってきた。今回これらの技術をもとにアンモニアプラント機器用として SA533B Cl.1, SA508 Cl.3 を製造する機会を得た。

本報告ではこれらの製造経過と品質特性および厚肉化した場合を想定して行った若干の試験成績についてまとめた。

2. 製造工程

水島製鉄所における圧力容器用鋼材の製造プロセスを Fig. 1 に示す。その特徴として、次の 3 項目が挙げられる。

- (1) 酸素上吹転炉と LRF の組合せ工程の採用

Cr-Mo 鋼等の耐焼もどし脆化特性に対しては P, Sn, Sb, As が、原子炉圧力容器用鋼に要求される耐中性子照射脆化に対しては P, Cu, V が、また靱性に対しては P, S 等が少ない方が望ましい^{10,11)}。圧力容器用鋼材の母溶鋼吹錬においては、鋼屑を全く使用しない 100% 溶銑配合を原則とし、溶銑に含まれる上記の不純物元素が極めて低い利点を活用している。LRF においては母溶鋼の成分調整、電弧加熱、脱ガスさらには脱酸後の脱酸生成物浮上分離等の各処理が、常時電磁誘導攪拌を受けながら進められるので、目標成分が極めてよく適中し、また水素含有量と非金属介在物量の極めて低い高品質の鋼塊が得られる。さらに造塊プロセスでは無酸化下注注入方法を採用し、地底、砂底などに代表される介在物性欠陥の発生を防止している。

- (2) 鍛造プロセス

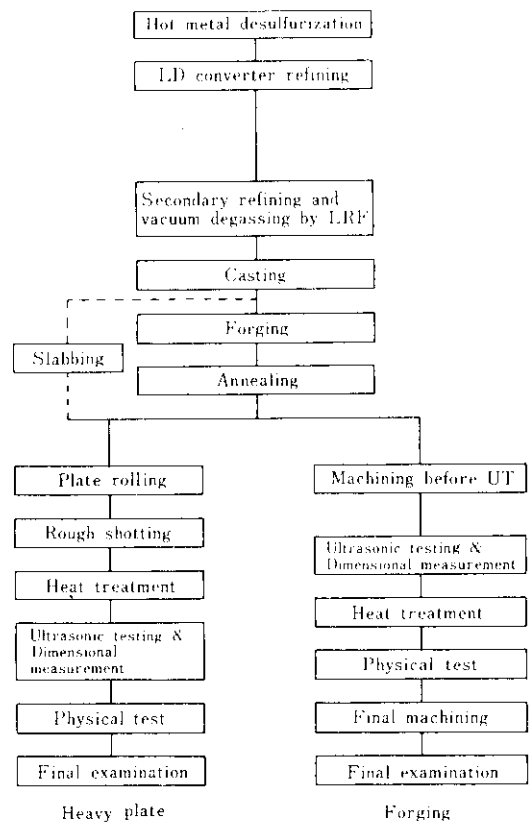


Fig. 1 Manufacturing process of pressure vessel plates and forgings

西独 Hydraulic 社製の全自動高速自由鍛造プレスを有しており、最高圧下力は 7200t、ディライトは 6000mm、作動水压 315kg/cm² である。超大型フランジ類の鍛造は特殊鍛造法により、外径約 7000mm まで可能である。また一方極厚鋼板の場合、要求品質に応じて鍛造プロセスを採用し中心部の微小空隙を完全に圧着し、圧延素材を供給することができる。

- (3) 厚板圧延プロセス

水島製鉄所の第 2 厚板圧延機は、ロール胴長 5490mm の超広幅厚板圧延機で、国内はもとより世界でも例をみない製品単重最大 95t、製品最大厚さ 350mm、幅 5300mm までの超広幅大単重極厚鋼板の圧延が可能である。

3. 成分系設定の基本方針

圧力容器用鋼材として使用される当鋼種は、優れた靱性を必要とする。化学成分設定にあたって

Table 1 Preferable procedure for obtaining good toughness

	Aimed effects	Aiming value
Reduction of S content	Improvement of shelf energy	$S < 0.003\%$
Reduction of P content	Lowering of transition temperature	$P \leq 0.010\%$
Control of C content	Prevention of lowering of shelf energy and high RT_{NDT} due to an increase of precipitate amount	$C \leq 0.22\%$
Control of Al, N content	Improvement of RT_{NDT} by austenite grain size refinement	Al: 0.010 ~ 0.020% N: 0.007 ~ 0.010%

は、Table 1 に示すような対策を検討した。

(1) P および S 含有量

P 含有量の減少は、遷移温度の低下および中性子照射脆化対策に効果がある。アンモニアプラント用材のため P は 0.010% 以下を目標とした。また一方 S 含有量を減少させると、MnS 系の非金属介在物を減少させ板厚方向特性を著しく改善するとともに、シャルピー衝撃試験のシェルフエネルギーの向上に効果があるため、0.003% 以下を目標とした。

(2) C 含有量

C の増加は強度を効果的に増加させるが、遷移温度をも上昇させる。このため C 含有量は、必要強度が確保できる最低値にとどめる必要がある。強度および靱性のバランス上、厚みが 90mm の薄肉鋼板は 0.18% を目標とし最大厚みが 230mm の鍛鋼品は 0.20% を目標とした。

(3) Al, N 含有量

Mn-Ni-Mo 鋼では十分な靱性を確保するためには、焼入れ時のオーステナイト結晶粒を微細化することが重要である。焼入れ時のオーステナイト結晶粒の大きさは主に鋼材中の Al および N 含有量と焼入れ加熱条件によって制御^{12,13)}される。この点から Al, N 含有量について Table 1 に示す目標値とした。

4. SA533B Cl. 1 鋼板の品質特性

アンモニアプラント機器の鏡板用として厚み 90mm の SA533B Cl. 1 の厚鋼板を約 60t 製造した。その品質実績について以下に述べる。

4.1 化学成分

取鍋代表分析値および鋼塊トップ相当位置の表

面、 $\frac{1}{4}t$ 部、 $\frac{1}{2}t$ 部のチェック分析値を Table 2 に示す。板厚方向の成分バラツキは少なくかつ不純物元素が極めて少ない。これは前述の酸素上吹転炉 LRF プロセス採用の効果と考えられる。

4.2 内部性状および清浄度

超音波探傷試験は JIS G 0801 基準の 2 倍の感度で実施したが全数無欠陥であった。サルファープリント試験、マクロエッチにおいても有害な S 偏析、異常な偏析はみられなかった。また JIS G 0555 による清浄度の測定結果を鋼塊の各相当位置、板厚方向各位置で整理して Table 3 に示す。鋼塊の部位および板厚方向においても低値であり、清浄な鋼板であることが明らかである。

4.3 機械的性質

機械的性質を調査するための試験片は、930℃ 焼ならし—660℃ 焼もどし処理された母板から 90×500×2100mm の試片を切り出した。その後 930℃×2h 焼ならし—880℃×2h 水焼入れ—670℃×2h 焼きもどし処理をほどこしたのちに 90×70×350mm のサイズに小切りし、試験片熱処理炉にて 620℃×20h の SR を行った。

4.3.1 引張特性

鋼塊各相当位置の引張特性を Fig. 2 に、引張特性の異方性について板厚方向各位置で調査した結果を Table 4 に示す。高温強度および焼もどし、SR の熱処理条件が規定されていたため、引張強度は高めをねらった。鋼塊内でのバラツキは少なく、鋼板の板厚方向各位置間のバラツキも少ない。また板厚方向の絞り率は 55% 以上であり、極めて異方性の少ない均質な鋼板であることが確認された。高温引張試験の結果を Fig. 3 に示す。すべて

Table 2 Chemical compositions of SA533 B Cl.1 plate

	Through thickness location	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	Nb	Sn	Sh	As	Ti	B	Co	O
Specification		Max. 0.25	0.15 ~ 0.30	1.15 ~ 1.50	Max. 0.035	Max. 0.040		0.40 ~ 0.70		0.45 ~ 0.60										
Aiming value		0.18	0.25	1.40	Max. 0.010	Max. 0.005	Max. 0.05	0.65	0.10	0.55	Max. 0.01	Max. 0.025	Max. 0.002	Max. 0.002	Max. 0.002	Max. 0.003	---	---	---	---
Ladle analysis		0.18	0.23	1.39	0.008	0.003	0.01	0.66	0.10	0.54	0.006	0.018	< 0.002	< 0.002	0.0004	0.002	---	---	---	---
Check analysis	Surface	0.17 ~ 0.23	0.23	1.40	0.006	0.002	0.01	0.63	0.10	0.54	---	0.020	---	---	---	---	---	---	---	---
	$\frac{1}{4}t$	0.17 ~ 0.24	0.24	1.40	0.006	0.003	0.01	0.64	0.10	0.54	0.006	0.020	< 0.002	< 0.002	0.0003	0.002	0.002	0.0003	0.01	0.0030
	$\frac{1}{2}t$	0.18 ~ 0.26	0.26	1.43	0.006	0.003	0.01	0.66	0.10	0.56	---	0.020	---	---	---	---	---	---	---	---

Sampling position of plate corresponds to the middle portion of ingot top

Table 3 Cleanliness by JIS G-0555 of SA533 B Cl.1 plate (%)

Sampling position	Through-thickness location	$dA_{60 \times 400}$	$dB_{60 \times 400}$	$dC_{60 \times 400}$	$dT_{60 \times 400}$
Top	$\frac{1}{4}t$	0.01	0.01	0.00	0.02
	$\frac{1}{2}t$	0.02	0.01	0.00	0.03
Middle	$\frac{1}{4}t$	0.01	0.01	0.00	0.02
	$\frac{1}{2}t$	0.02	0.01	0.00	0.03
Bottom	$\frac{1}{4}t$	0.01	0.01	0.00	0.02
	$\frac{1}{2}t$	0.01	0.01	0.00	0.02

Sampling position corresponds to the transverse center of ingot

の温度で SA533 B Cl.1 の規格を満足した。

4・3・2 衝撃特性

鋼塊トップ側角隅部の板厚方向各位置の 2mmV ノッチシャルピー衝撃試験結果を Table 5 に遷移曲線の代表例を Fig. 4 に示す。 $vTrs$ は板厚中心部の鋼板幅方向で -38°C と良好であった。

4・3・3 落重特性

板厚の表面および $\frac{1}{2}t$ 部より圧延方向に直角に採取した試験片にて NRL 落重試験を実施した。試験結果を Table 6 に示す。 $\frac{1}{2}t$ 部の NDT 温度は、 -45°C と良好であった。

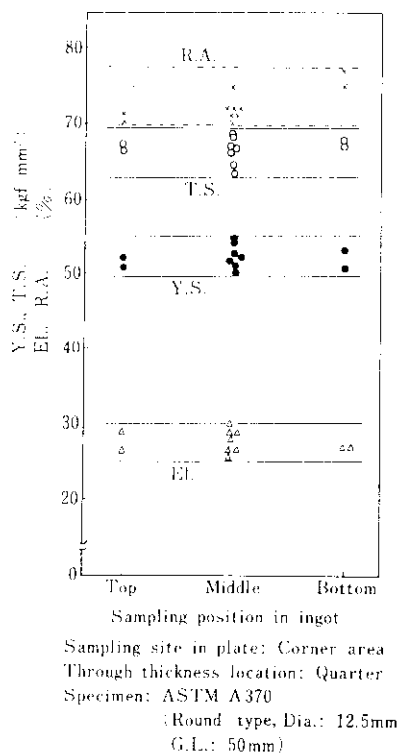


Fig. 2 Effect of sampling positions on tensile properties of SA533 B Cl.1 plate

4・3・4 顕微鏡組織

表面、 $\frac{1}{4}t$ 、 $\frac{1}{2}t$ 部の顕微鏡組織の一例を

Table 4 Tensile properties of SA533B CL1 plate

Through-thickness location	Direction*	Y.S. (kgf/mm ²)	T.S. (kgf/mm ²)	EL. (%)	R.A. (%)
(Spec.)	(Spec.)	Min.35.2	56.3~70.4	Min.18	
Surface	T	51.9	66.1	27A	74
	L	52.8	65.3	27A	74
	T	52.0	65.9	27A	73
	L	53.0	66.7	28A	73
$\frac{1}{4}t$	T	50.9	65.0	26A	73
	L	51.9	65.0	27A	75
	T	50.8	64.8	28A	73
	L	51.0	64.8	27A	74
$\frac{1}{2}t$	T	51.0	65.1	24A	73
	L	51.4	66.2	25A	72
	T	52.4	66.2	26A	69
	L	51.7	65.2	26A	69
	V	52.0	65.6	22A	56
	L	52.2	65.3	23A	61

* T: Transverse, L: Longitudinal, V: Vertical
 PWHT: 620°C×20h
 Specimen: ASTM A370 (Round type, Dia.:12.5mm, G.L.: 50mm)

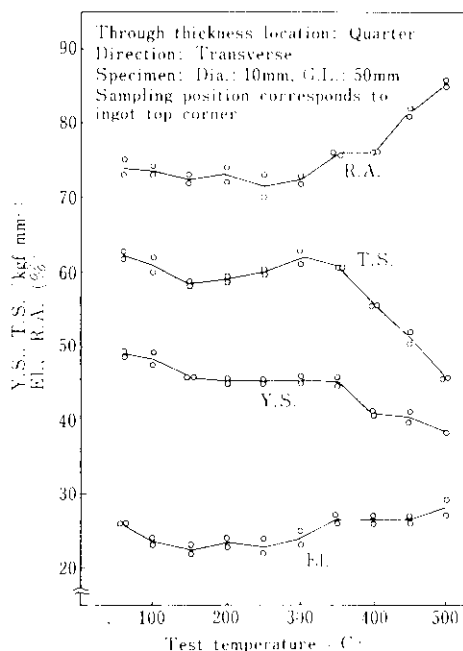


Fig. 3 Influence of temperature on tensile properties of SA533B CL1 plate

Table 5 Charpy impact properties of SA533B CL1 plate

Through-thickness location	Direction	vE_0 (kgf-m)	vTr_{50} (°C)	vTr_{35} (°C)
Surface	L	27.6	-83	102
	T	25.9	-80	-98
$\frac{1}{4}t$	L	27.1	-45	80
	T	23.8	40	-68
$\frac{1}{2}t$	L	25.6	44	68
	T	19.7	-38	-55
	V	9.2	11	-10

Direction: L: Longitudinal, T: Transverse,
 V: Vertical

PWHT: 620°C×20h

Specimen: ASTM A370 (2 mm V-notched)

Sampling position corresponds to ingot top corner

vTr_{50} : Temperature showing absorbed energy of 6.9 kgf-m

vTr_{35} : Temperature showing lateral expansion of 0.89mm

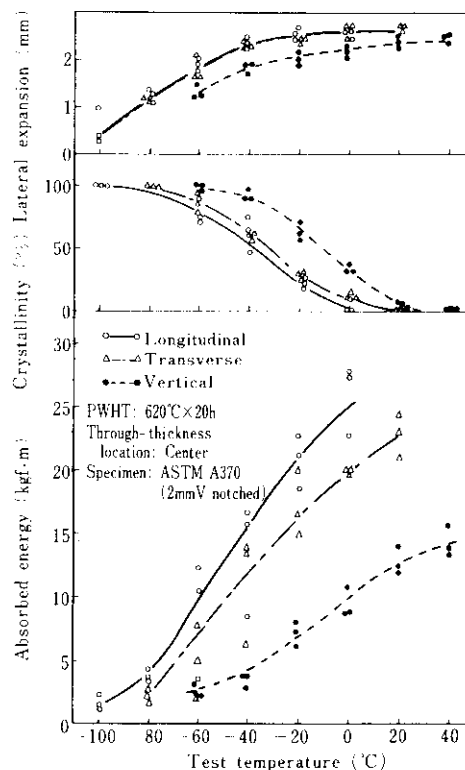


Fig. 4 Anisotropy of 2mmV-notched Charpy impact properties of SA533B CL1 plate

Table 6 Results of NRL drop weight test for SA533B Cl.1 plate

Through thickness location	Test temperature (°C)				NDTTC
	-60	75	80		
Surface	 	 	 		80
$\frac{1}{2}t$	40	45	50	60	45
	 	 	 	 	

Specimen: ASTM E208 Type P 3

Energy: 41kgf·m

Direction: Transverse

Sampling position corresponds to ingot top corner

Photo. 1 に示す。上部ベイナイトと下部ベイナイトの混合組織からなり、非常に微細な組織を呈している。なおオーステナイト結晶粒度はいずれの部位も ASTM NO. 8 であった。

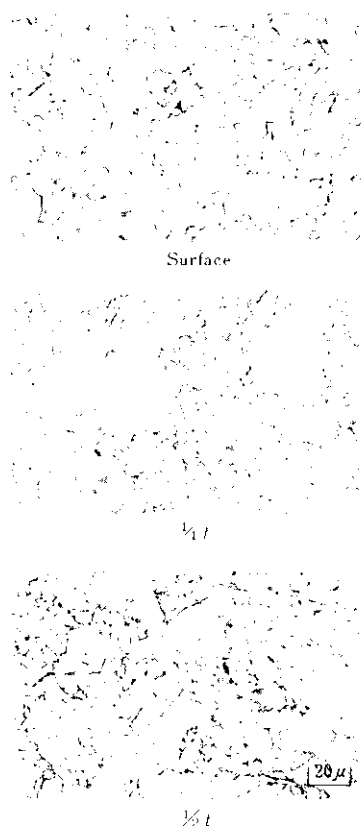


Photo. 1 Microstructure of SA533 BCl.1 plate

5. SA508 Cl. 3 鍛鋼品の品質特性

アンモニア機器用鍛鋼品として、厚み 156mm の胴および厚み 230mm のノズル等を約 360t 製造した。その品質実績について以下に述べる。

5.1 化学成分

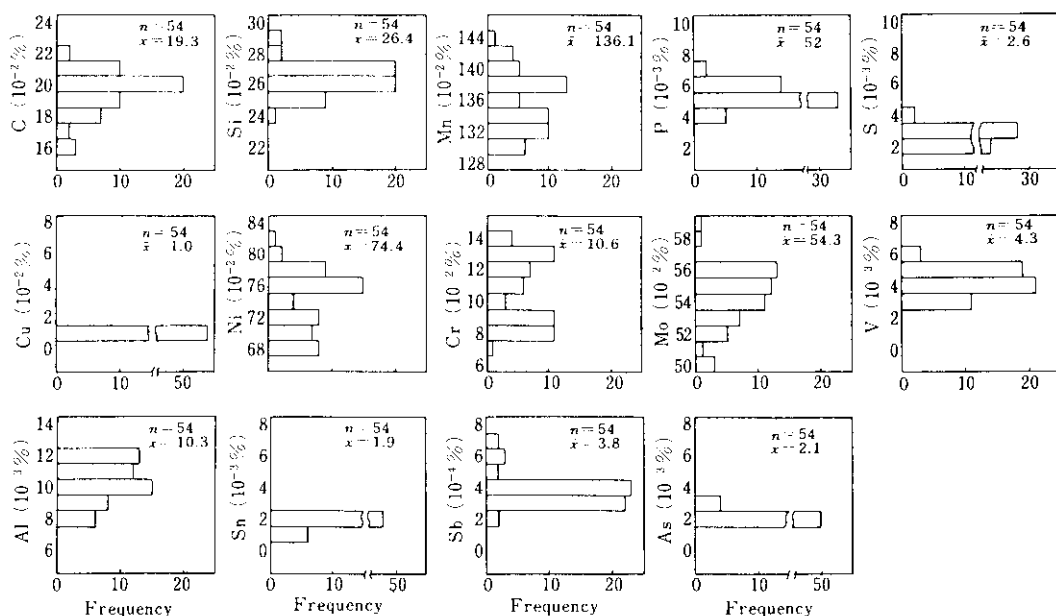
6 t 以上の取鋼代表分析値を Table 7 に示す。また全製品 ($n=54$) のチェック分析値を Fig. 5 に示す。各々の製品とも鋼塊トップ相当位置より分析を実施したが、成分偏析は極めて少ない。また不純物元素も鋼板のデータと同様低い値となり、酸素上吹転茹—LRF プロセス採用の効果が大きい。

5.2 内部性状および清浄度

超音波探傷試験は、ASME Sec. VIII Div. 2 Article M-2 Para AM203.2 および ASME Sect. II Part A SA388 に準拠し、また磁気探傷試験は ASME Sec. VIII Div. 2 Appendix 9 Article 9-1 および ASME Sec. V, Article 7 に準拠し、最終機械加工完了後実施したが、全製品無欠陥であった。サルファープリント、マクロエッチ結果においても有害な S 偏析、異常な偏析はみとめられなかった。前述のチェック分析と同じ部位より試験片を採取し、JISG 0555 により測定した清浄度試験結果を Fig. 6 に示す。非金属介在物は極めて少なく清浄な鍛鋼品が得られた。

Table 7 Chemical compositions of SA508 Cl.3 steel forgings by ladle sampling

Heat number	Ingot weight (t)	Chemical composition (%)														
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	Sn	Sb	As	Nb
Specification		0.15 ~0.25	0.15 ~0.40	1.20 ~1.50	≤ 0.025	≤ 0.025	≤ 0.10	0.40 ~1.00	≤ 0.25	0.45 ~0.60	≤ 0.05		—		—	—
Aiming value		0.20	0.25	1.40	≤ 0.010	~ 0.005	≤ 0.05	0.80	0.10	0.55	< 0.01	0.015	≤ 0.002	≤ 0.002	≤ 0.003	≤ 0.002
①	60	0.20	0.26	1.39	0.011	0.004	0.01	0.76	0.11	0.53	0.007	0.009	0.002	0.0004	0.002	0.002
②	44	0.20	0.27	1.40	0.009	0.002	0.01	0.74	0.13	0.52	0.004	0.010	< 0.002	0.0003	0.002	< 0.002
③	50	0.21	0.27	1.40	0.008	0.003	0.01	0.76	0.10	0.53	0.003	0.011	< 0.002	0.0005	0.002	< 0.002
④	40	0.21	0.25	1.44	0.009	0.003	0.01	0.79	0.07	0.55	0.005	0.011	< 0.002	0.0003	0.002	< 0.002
⑤	40	0.21	0.24	1.35	0.008	0.003	0.01	0.77	0.08	0.54	0.005	0.009	0.002	0.0007	0.002	< 0.002
⑥	50	0.19	0.25	1.37	0.009	0.003	0.01	0.79	0.11	0.55	0.001	0.015	< 0.002	0.0007	0.002	0.002



$B < 0.0002$, $Nb \leq 0.002$, and $Ti \leq 0.004$ (%) for all products

Fig. 5 Check analysis of SA508 Cl.3 steel forgings

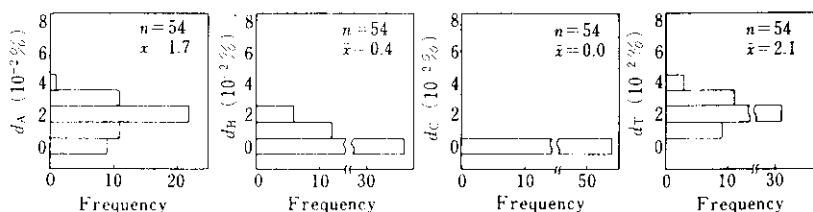


Fig. 6 Cleanliness by JIS G-0555 of SA508 Cl.3 steel forgings

5・3 機械的性質

鍛鋼品は一般的に付与した熱処理効果を確認するために、各々の製品より機械試験を実施する。熱処理は 900℃ 水焼入れ→660℃ 焼もどし後 620℃ × 20h の SR をほどこした。なお焼入れおよび焼もどしの保持時間は肉厚に応じて変化させ 0.5 h/in. 以上とした。試験片の採取部位は、チェック分析と同じく鋼塊トップ相当位置とし、接線方向、 $T \times T/4$ 法 (T : 肉厚) とした。

5・3・1 引張特性

230mm 材の肉厚方向での引張試験結果を Table 8 に示す。230mm 肉厚中心においても SA508 Cl. 3 の規格を充分満足し、かつ方向差も小さい。また 230mm 材の高温引張試験結果を Fig. 7 に示す。

5・3・2 衝撃特性

230mm 材の各方向特性を Fig. 8、肉厚方向での

Table 8 Tensile properties of SA508 Cl. 3 steel forgings with 230mm thickness

Through thickness location	Direction *	Y.S. (kgf/mm)	T.S. (kgf/mm ²)	El. (%)	R.A. (%)
(spec.) $\frac{1}{4}t$	(spec.) T	Min. 35.2	56.2~ 73.8	Min. 18	Min. 38
Surface	L	53.9	68.0	28A	75
		54.7	68.9	28A	74
	T	52.6	67.6	26A	72
		52.2	67.5	28A	71
$\frac{1}{4}t$	L	48.3	63.9	26A	71
		48.7	64.1	27A	72
	T	49.0	64.1	27A	68
		48.5	64.2	28A	67
$\frac{1}{2}t$	L	47.9	63.7	28A	73
		47.0	63.7	30A	74
	T	47.9	64.0	28A	70
		48.0	63.5	28A	70
	R	48.6	63.5	28A	69
		47.5	63.8	28A	69

* T: Tangential, L: Longitudinal, R: Radial
PWHT: 620℃ × 20h
Specimen: ASTM A370 (Round type,
Dia.: 12.5mm, G.L.: 50mm)

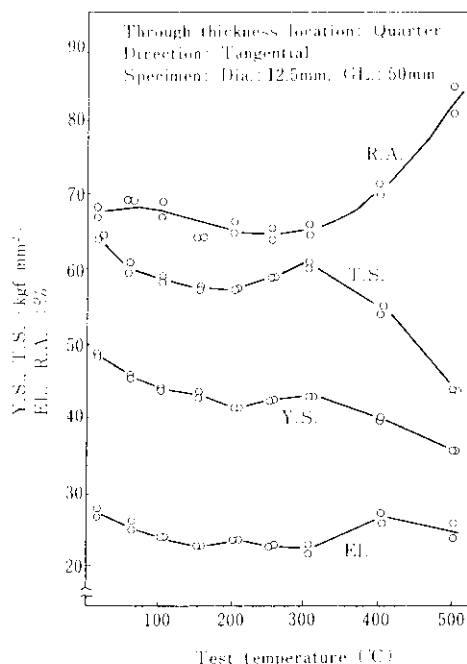


Fig. 7 Influence of temperature on tensile properties of SA508 Cl. 3 steel forgings with 230mm thickness

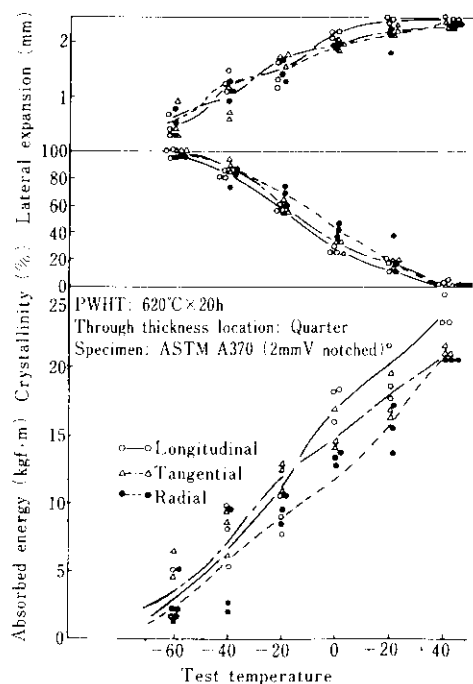


Fig. 8 Anisotropy of 2mmV-notched Charpy impact properties of SA508 Cl. 3 steel forgings with 230mm thickness

衝撃試験結果を Table 9 に示す。また全製品の機械試験結果を Fig. 9 に示す。肉厚、部位による影響は比較的少なくまた方向性も小さい。

5・3・3 落重特性

230mm 材の表面および $\frac{1}{2}t$ 部より円周方向に採取した試験片にて NRL 落重試験を実施した。試験結果を Table 10 に示す。 $\frac{1}{2}t$ 部の NDTT 温度は -30°C と良好であった。

5・3・4 顕微鏡組織

230mm 材の表面、 $\frac{1}{2}t$ 部の顕微鏡組織の一例を Photo. 2 に示す。いずれも均一なベイナイト組織を呈しており非常に微細である。なおオーステナイト結晶粒度は、いずれの部位も ASTM NO. 8 であった。

6. 溶接性

SA533B Cl. 1 および SA508 Cl. 3 材について、

Table 9 Charpy impact properties of SA508 Cl. 3 steel forgings with 230mm thickness

Through-thickness location	Direction	vE_0 (kgf·m)	$vTrs$ ($^{\circ}\text{C}$)	vTr_{50} ($^{\circ}\text{C}$)	LT_{35} ($^{\circ}\text{C}$)
Surface	L	23.3	-40	-74	-78
	T	18.9	34	-67	-80
$\frac{1}{2}t$	L	17.5	-12	-38	-45
	T	15.2	15	-42	-45
	R	13.8	-5	-29	50
$\frac{1}{2}t$	L	22.4	-14	-42	52
	T	14.7	-17	46	-45
	R	11.8	-8	34	45

Direction: L: Longitudinal, T: Tangential, R: Radial
PWHT: $620^{\circ}\text{C} \times 20\text{h}$

Specimen: ASTM A370 (2mmV notched)

Table 10 Results of NRL drop weight test for SA508 Cl. 3 steel forgings with 230mm thickness

Through thickness location	Test temperature ($^{\circ}\text{C}$)			NDTT ($^{\circ}\text{C}$)
	35	-40	-45	
Surface	1.5/3.0	1.0/2.0	2.5/3.0	-45
$\frac{1}{2}t$	-25	30	-35	-30
	1.5/0.5	1.0/0.5	3.5	

Specimen: ASTM E208 Type P-3

Energy: 41kgf·m

Direction: Tangential

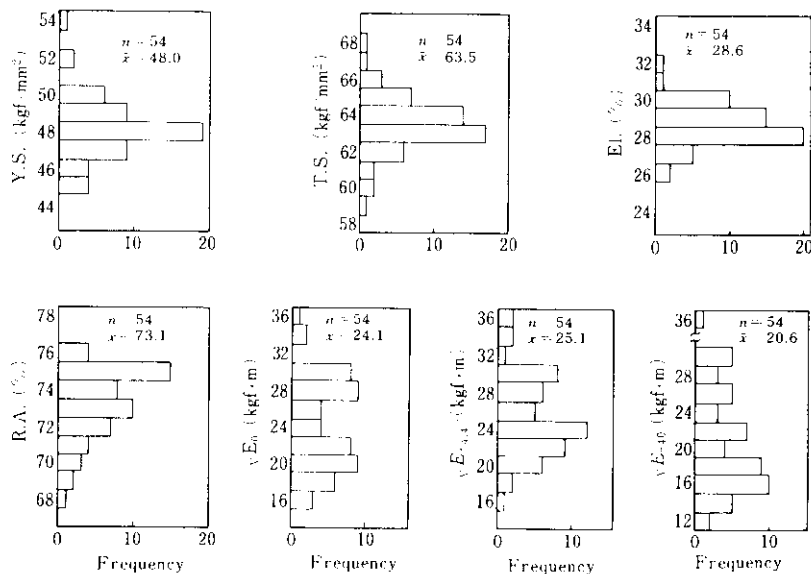


Fig. 9 Mechanical Properties of SA508 Cl. 3 steel forgings

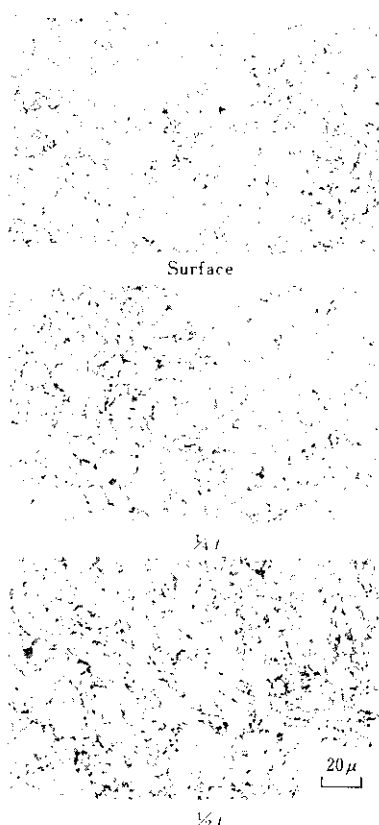


Photo. 2 Microstructures of SA503 Cl. 3 steel forgings with 230mm thickness

JIS Z3158による斜めY型溶接割れ試験およびSR割れ試験を実施した。

6・1 斜めY型溶接割れ試験

SA533B Cl. 1およびSA508 Cl. 3材の一例をFig. 10に示す。いずれの鋼材も予熱温度 200°Cで割れは停止した。

6・2 SR割れ試験

3種類のSR割れ試験を実施した。Aタイプの試験片の形状および寸法をFig. 11に示す。拘束はV開先に対して40ビード、80ビードの2条件にて行い溶接後のSR条件は620°C×20hとした。また予熱層間温度は250°Cとし、溶接条件は170~180A、25V、150mm/minで行った。Bタイプ(窓型拘束割れタイプ)の試験片の形状および寸法をFig. 12に示す。拘束は、拘束板の厚みを29、36、

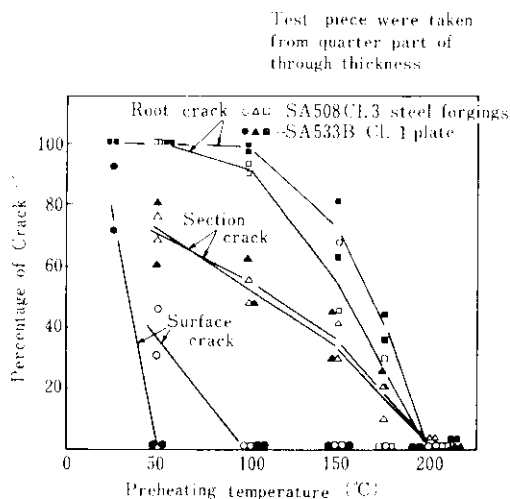


Fig. 10 Results of oblique y groove cracking test

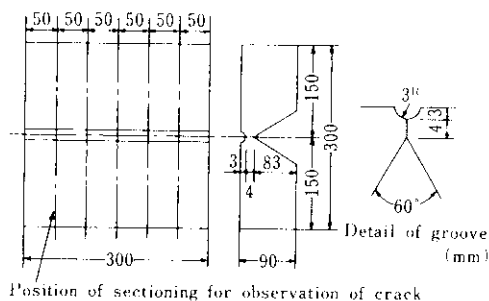


Fig. 11 Shape and dimensions of restraint stress relief cracking test specimen (A Type)

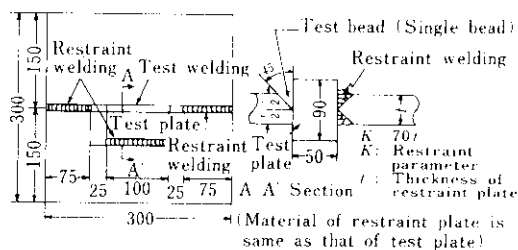


Fig. 12 Shape and dimensions of window-type restraint stress relief cracking test specimen (B Type)

43、50mmとした4水準を与えた。溶接後のSR条件、予熱層間温度、溶接条件はAタイプと同一とした。Cタイプ(US Navy Circular割れタイプ)の試験片の形状および寸法をFig. 13に示す。溶接後のSR条件、予熱層間温度、溶接条件はAタイプと同一とした。SA533B Cl. 1およびSA508 Cl. 3

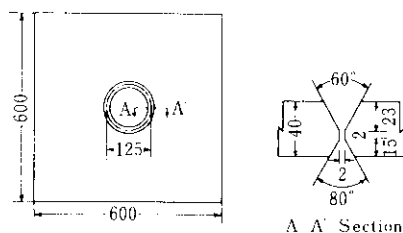


Fig. 13 Shape and dimensions of restraint stress-relief cracking test specimen (C Type, NS Navy circular type)

材とも各タイプのいずれの試験においても SR 割れは発生しなかった。

7. 考 察

7.1 Mn-Ni-Mo 鋼の強度と靱性

Mn-Ni-Mo 鋼の強度と靱性については、種々調査結果^{4-7, 14-25)}があるが、強度、靱性のバランス上、肉厚に応じた C 量のコントロールが重要である。C 量が強度および靱性に及ぼす影響を Fig. 14 に示す。焼入れ冷却速度 30~70°C/min, 焼戻しパラメーター 19.2~19.5×10³の範囲において

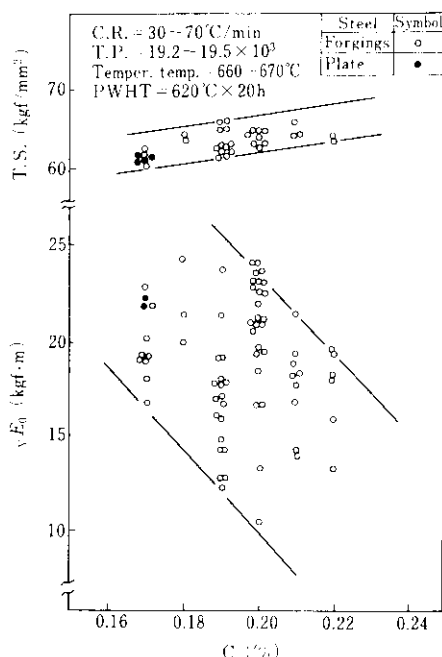


Fig. 14 Influence of carbon content on tensile and impact properties of Mn-Ni-Mo steels

は C 量の増加にともない強度は上昇するが靱性は劣化する。肉厚 90mm~230mm の範囲では、強度、靱性の観点から C 量は 0.18~0.20% の範囲が妥当と考えられる。一方靱性については、Al, N 含有量の管理によるオーステナイト結晶粒の微細化の効果が顕著であり、SA533B Cl. 1 および SA508 Cl. 3 材ともオーステナイト結晶粒度番号は 8 番であった。また P, S 含有量とも低いレベルであり靱性向上に効果をあげている。

7.2 溶 接 性

SR 割れ試験において、SA533B Cl. 1 および SA508 Cl. 3 材とも、いずれの試験においても SR 割れは発生しなかった。SR 割れ発生については、ΔG (割れ発生感受性指数) を負にすれば SR 割れはおこさないといわれている²⁶⁾。この ΔG を代表化学成分から計算すると Table 11 に示すとおりである。このように ΔG をできるだけ小さくしたことにより、SR 割れは発生しなかったと考えられる。

Table 11 Calculated ΔG values of SA533B Cl. 1 and SA508 Cl. 3 (%)

Material	Cr	Mo	V	ΔG*
SA533B Cl. 1	0.10	0.54	0.006	-0.07
"	0.15	0.54	0.007	-0.02
SA508 Cl. 3	0.11	0.53	0.007	-0.08
"	0.13	0.52	0.004	-0.12
"	0.10	0.53	0.003	-0.13
"	0.07	0.55	0.005	-0.07
"	0.08	0.54	0.005	-0.10
"	0.11	0.55	0.001	-0.07

* ΔG = Cr(%) + 3.3Mo(%) + 8.1V(%) - 2

8. 原子炉圧力容器用鋼材への適用

8.1 P 含有量

P 含有量の減少は、遷移温度の低下ばかりでなく中性子照射脆化対策に効果がある。Regulatory Guide 1.99²⁷⁾によれば RT_{NDT} のシフト量は (1) 式のように表されている。ただし、照射温度は 55°F である。

$$A = [40 + 1000(\% \text{ Cu} - 0.08) + 5000(\% \text{ P} - 0.008)](f/10^{19})^{1/2} \dots (1)$$

A: Predicted adjustment of reference temperature ($^{\circ}\text{F}$)

f: fluence (n/cm^2 , $E > 1\text{MeV}$)

今回はアンモニアプラント用材のためPは0.010%以下としたが、原子炉压力容器用鋼材に適用する場合Pは0.008%以下とする必要がある。極低磷鋼溶製プロセスとして当社では、原子炉压力容器用鋼材には転炉2回吹錬法の適用を標準としている。この転炉2回吹錬法は、予備吹錬→中間出鋼→スラグ除去→再装入→仕上吹錬→出鋼のプロセスをとり、徹底した排滓によりPレベルを低くすることが可能である。その後LRF精錬を経て、最終の取鍋代表分析では、すべて0.008%以下とすることができる。また中性子照射脆化対策には、PのほかCu、V、BおよびCoの低減が必要である。これらの元素はスクラップより混入するため転炉母溶鋼2回吹錬においてはスクラップを全く使用しない100%溶鉄配合を標準としている。最近の原子炉压力容器材のこれらの元素の一例をTable 12に示すが、非常に低い値となっている。

8・2 厚肉材の検討

原子炉压力容器用鋼材は大型化にともない肉厚も厚肉化の傾向にある。Mn-Ni-Mo鋼の強度と靱性については、種々の調査結果^{4-7, 14-25)}があるが、ここではTable 13に示す材料により熱処理シミュレート試験および500mm厚での実体確性試験

Table 12 Tramp elements of nuclear reactor pressure vessel materials (%)

Heat	P	Cu	V	B	Co
1	0.006	0.01	0.005	<0.0001	0.0050
2	0.004	0.01	0.005	<0.0001	0.0046
3	0.006	0.01	0.003	<0.0001	0.0050
4	0.004	0.01	0.005	<0.0001	0.0050

Table 13 Chemical compositions of materials used in (a) heat cycle simulation test and (b) 500mm thickness trial test (%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	V
(a)	0.21	0.27	1.40	0.008	0.003	0.01	0.76	0.10	0.53	0.011	0.003
(b)	0.21	0.24	1.35	0.008	0.003	0.01	0.77	0.08	0.54	0.009	0.005

を実施した。Mn-Ni-Mo鋼の焼入れ冷却速度と強度、靱性の関係をFig. 15に示す。代表的な冷却速

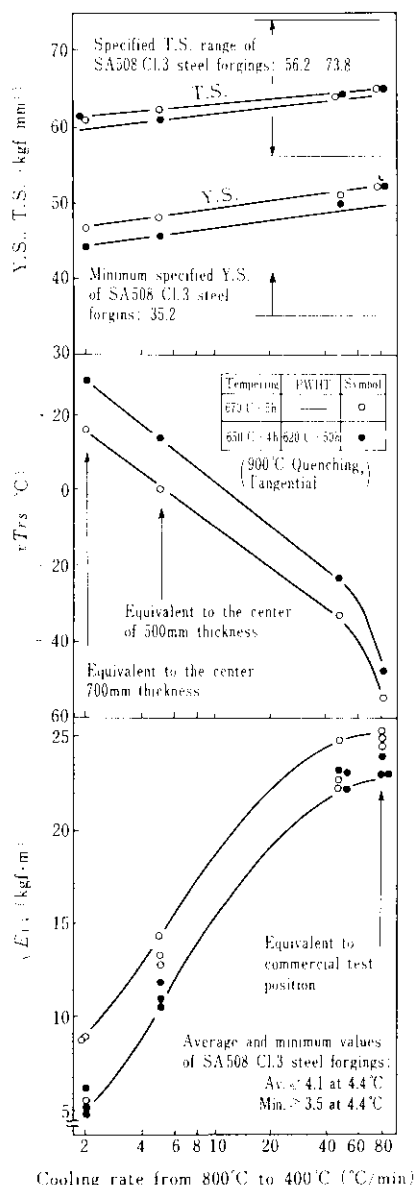


Fig. 15 Effect of cooling rate on tensile and impact properties of Mn-Ni-Mo steels

度の顕微鏡写真を **Photo. 3** に示す。一般的な傾向として焼入れ冷却速度が早くなると強度は高くなり靱性は向上する。また顕微鏡組織では、フェライトおよびベイナイト組織からベイナイト組織あるいはマルテンサイトおよびベイナイト組織へと変化する。また一方焼もどしパラメータと強度および靱性の関係を **Fig. 16** に示す。強度は焼もどしパラメータでよく整理され、このパラメータの増加にともない直線的に低下する。靱性については、焼入れ冷却速度、焼もどし条件によ

り複雑な様相を呈し、焼もどしパラメータに対して最適のヒークを有することが知られている。本材料の最適ヒークは、焼入れ冷却速度 $80^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の場合、焼もどしパラメータ 19.5×10^3 にみられ、さらに厚肉化した場合 ($2 \sim 5^{\circ}\text{C}/\text{min}$) にはピークはみられず、焼もどしパラメータの増加にともない靱性は直線的に低下する。

500mm 厚での実体確性試験の熱処理条件は $900^{\circ}\text{C} \times 10\text{h}$ 水焼入れ $-650^{\circ}\text{C} \times 10\text{h A.C.}$ とした。確性材の形状および測温部位を **Fig. 17** に示す。確

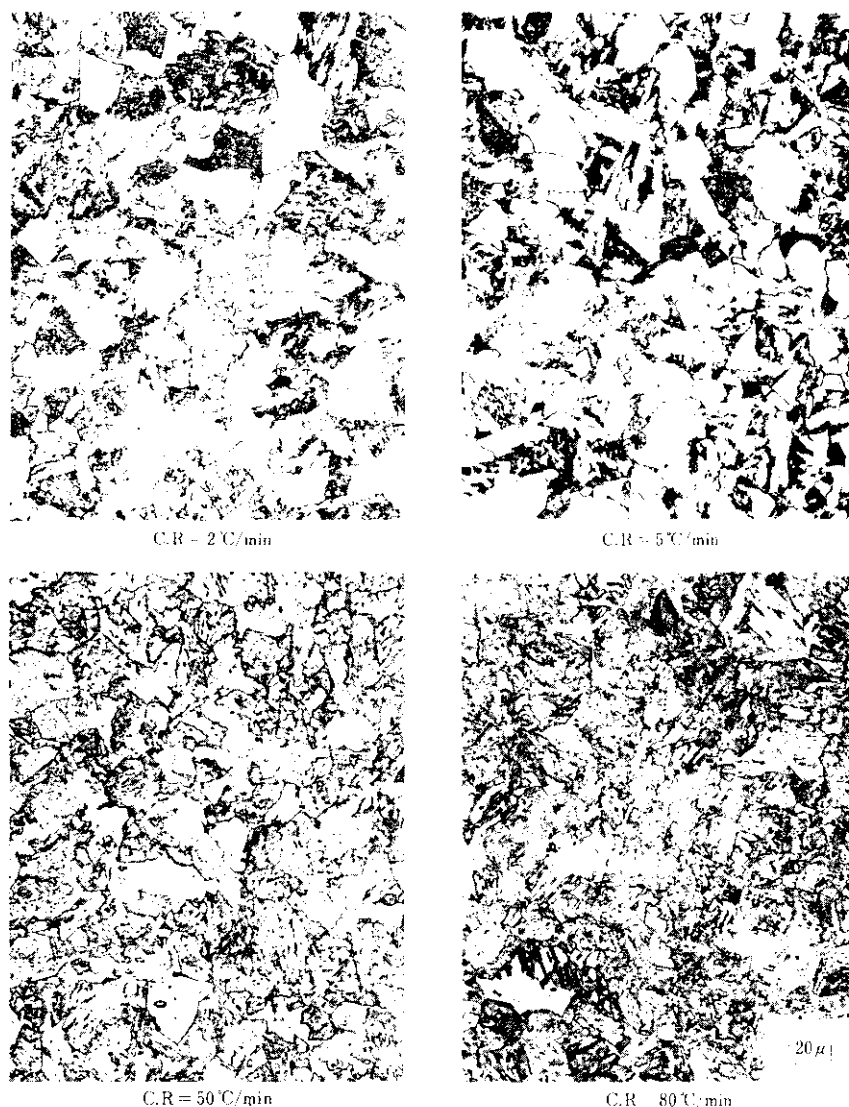


Photo. 3 Effect of cooling rate on microstructures of Mn-Ni-Mo steels

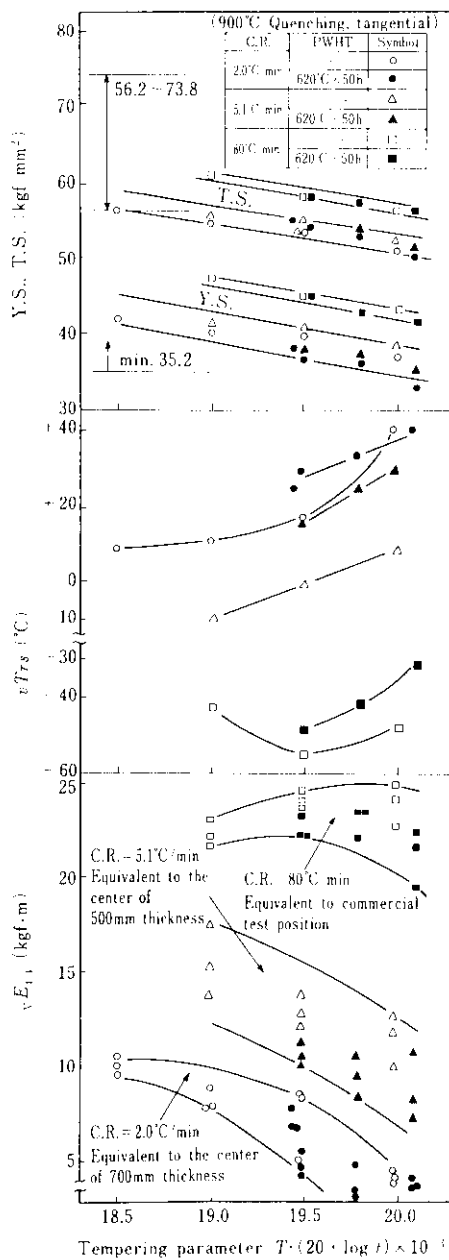


Fig. 16 Effect of tempering parameter on tensile and impact properties of Mn-Ni-Mo steel

性試験結果を Table 14, 15 に示すが、これらの値は熱処理シミュレート試験結果とほぼ対応しており、強度は中心部で 60kgf/mm² が確認できた。靱性は異方性の比較的小さいかつ優れた値が得られた。 T_{NDT} は中心部で -25°C であった。

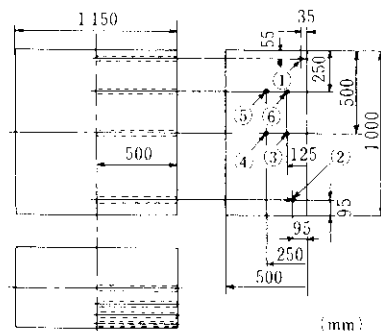


Fig. 17 Dimension of 500mm thickness trial forging and installing positions of thermo-couple

8.3 落重特性

原子炉圧力容器用鋼材の使用温度決定の基本となる RT_{NDT} の求め方は ASME Code Sec. III および通産省告示 501 号改正案で定められている。すなわち、

- (1) 落重試験により T_{NDT} を決定する。
- (2) ($T_{NDT} + 33^{\circ}\text{C}$) 以下の温度で衝撃試験を行い
 - (a) 吸収エネルギー値 50ft·lb (6.9kgf·m) 以上
 - (b) 横膨出量 35mils (0.89mm) 以上

を満足するとき T_{NDT} を RT_{NDT} とする。

- (3) (2) の要求が満足されない場合、さらに高い温度で衝撃試験を行い (2) の要求を満足する温度 T_{CV} を決定する。この場合 RT_{NDT} は ($T_{CV} - 33^{\circ}\text{C}$) または T_{NDT} のいずれか高い温度とする。

現在まで製造した SA533B Cl. 1 および SA508 Cl. 3 材の T_{NDT} と vTr_{50} , T_{NDT} と LT_{r35} の関係を Fig. 18 に示す。いずれの場合も前述の (2) 項は常に満足するので T_{NDT} がそのまま RT_{NDT} となる。また RT_{NDT} に及ばず焼入れ冷却速度の関係を Fig. 19 に示す。 RT_{NDT} は焼入れ冷却速度に依存するが同じ冷却速度でも約 20°C の幅でばらついている。このバラツキの原因として考えられることは、結晶粒度に大きな影響を及ぼす Al, N および焼入れ条件等の差が主なものと考えられる。このように RT_{NDT} の向上は、結晶粒微細化が大きなポイントである。

原子炉圧力容器用鋼材への適用を検討したが材料特性については、ほぼ満足すべき値が得られたと考えている。今後実機への適用について実体確

Table 14 Tensile properties of 500mm thickness trial forging

Cooling rate from 800°C to 400°C (°C/min)	position	Direction	Test temperature (°C)	Y.S. (kgf/mm ²)	T.S. (kgf/mm ²)	El. (%)	R.A. (%)
	(Spec.)	T	R.T.	Min. 35.2	56.2 ~ 73.8	Min. 18	Min. 38
80	(1)	L	"	47.3	61.6	28A	74
		T	"	48.0	62.3	28A	72
25	(2)	L	"	46.7	61.9	28A	74
		T	"	46.5	62.3	29A	69
10.8	(6)	L	"	45.9	61.6	29A	74
		T	"	45.9	61.4	27A	70
8.9	(5)	L	"	44.6	61.0	29A	71
		T	"	45.2	61.8	27A	68
7.8	(3)	L	"	45.7	61.5	28A	72
		T	"	45.3	61.7	28A	71
7.0	(4)	L	"	44.2	61.1	30A	73
		T	"	44.3	61.2	30A	72

Position: refer to Fig.17 Direction: L: Longitudinal, T: Tangential PWHT: 620°C×50h
Specimen: ASTM A370 (Round type, Dia.: 12.5mm, G.L.: 50mm)

Table 15 Charpy impact properties of 500mm thickness trial forging

Cooling rate from 800℃ to 400℃ (℃/min.)	Position	PWHT	Direction	$vTrs$ (℃)	$\sqrt{E_0}$ (kgf·m)	$\sqrt{E_{4.4}}$ (kgf·m)	vTr_{50} (℃)	NDT (℃)
80	①	620℃ × 50h	L	24	22.4	23.9	-55	35
			T	10	17.2	17.2	-50	35
25	②		L	-12	17.4	23.3	-38	30
			T	+1	17.2	18.3	-37	30
7.8	③		L	+15	11.9	14.4	16	-25
			T	+18	9.8	11.8	-12	—
7.0	④		L	+15	11.8	12.6	-18	25
			T	+18	9.4	10.4	-14	—
			R	+25	7.2	7.6	-1	—
80	①	620℃ × 100h	L	-17	21.4	21.9	43	—
			T	0	14.8	16.0	-42	—
25	②		L	-10	18.2	17.6	-37	—
			T	-11	16.0	16.8	35	—
7.8	③		L	+9	12.4	14.1	16	—
7.0	④		L	+20	8.5	9.6	-8	—
			T	+24	7.6	8.4	-4	—

Position: refer to Fig.17 Direction: L: Longitudinal, T: Tangential, R: Radial
Specimen: ASTM A370 (2mmV notched)

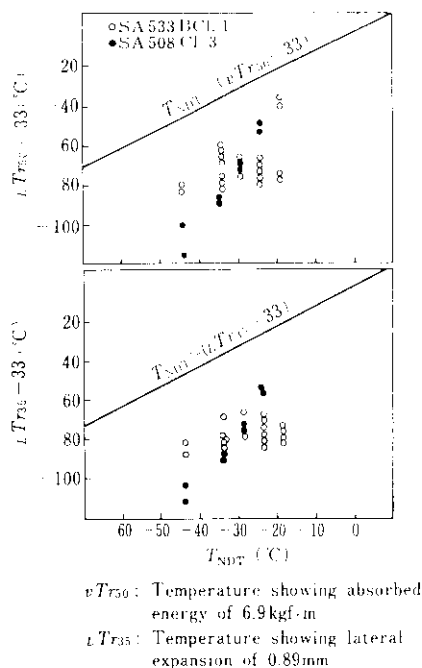


Fig. 18 Comparison of T_{NDT} with vTr_{50} and LT_{35}

性試験に基く材料特性データおよび中性子照射データの充実をはかる必要がある。特に実体規模の試験においては、破壊靱性試験を重視し、その特性データを充実する必要がある、この計画の実施

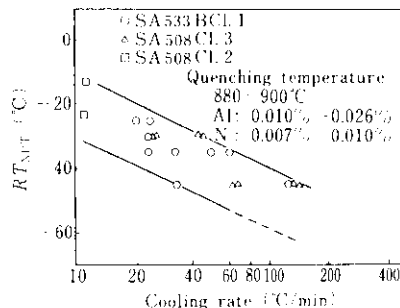


Fig. 19 Relation between RT_{NDT} and cooling rate from 800°C to 400°C

が緊急課題となっている。

9. 結 言

アンモニアプラント機器用材料として、SA533B CL1 材約60t SA508 CL3 材約360t 製造した。強度、靱性および溶接性ともアンモニアプラント機器用として優れた品質特性をうることができた。また原子力圧力容器材への適用を検討したが、材料特性については、ほぼ満足すべき値が得られた。これらのデータは、今後原子力圧力容器材製造に對して、大きな礎となった。

参 考 文 献

- 1) 江本, 宮田, 高橋, 鈴木, 関根: 川崎製鉄技報, 6 (1974) 2, 153
- 2) 大井, 松野, 西岡, 早川: 川崎製鉄技報, 4 (1972) 4, 17
- 3) 江本, 山本, 飯田, 大井, 西岡: 鉄と鋼, 6 (1977) 13, 102
- 4) 佐藤, 榎並, 楠原, 林: 川崎製鉄技報, 4 (1972) 3, 375
- 5) 榎並, 佐藤, 田中, 船越: 川崎製鉄技報, 6 (1974) 2, 15
- 6) 榎並, 波戸村, 田中, 船越: 川崎製鉄技報, 6 (1974) 2, 32
- 7) 楠原, 吉村, 狭野, 榎並, 船越, 林: 川崎製鉄技報, 6 (1974) 2, 44
- 8) 広, 西山, 坪井, 岡部, 森: 川崎製鉄技報, 6 (1974) 2, 69
- 9) 和中, 堀内, 灘, 松居, 早川: 川崎製鉄技報, 8 (1974) 1, 15
- 10) L.E.Steele: "The influence of composition on the fracture toughness of commercial nuclear vessel welds", NRL-Report 7095
- 11) K.Kussmaul, J.Ewald, G.Maier and W.Schellhammer: "Enhancement of the quality of the reactor pressure vessel used in Light Water Power Plants by advanced material, fabrication and testing technologies" 4th International conference on structural mechanics in reactor technology August 1977, Sanfrancisco, California, USA
- 12) R.A.Granger: Trans ASM, 59 (1966), 26
- 13) J.W.Halley: Trans AIME, 167 (1946), 229

- 14) 長島, 森, 上生, 千々岩: 鉄と鋼, 51 (1965) 11, 2037
- 15) 小野寺, 宮野, 山田, 千葉: 鉄と鋼, 52 (1966) 4, 594
- 16) 小野寺, 本間, 山田, 深町: 日本製鋼所技報, 22 (1967), 2445
- 17) 宮野, 島崎, 長谷川: 日本製鋼所技報, 29 (1971), 11
- 18) 牧岡, 広松, 平野: 神戸製鋼所技報, 22 (1972), 46
- 19) 高野, 大泉, 石原: 神戸製鋼所技報, 25 (1975) 4, 16
- 20) 国武, 菊竹, 斎藤, 小菅, 中尾, 五弓: 製鉄研究, 282 (1975), 9
- 21) 藤巻, 渡辺, 塚本, 今井: 製鉄研究, 282 (1975), 28
- 22) 斎藤, 中尾, 菊竹: 鉄と鋼, S 748 (1975)
- 23) 中尾, 菊竹: 鉄と鋼, S 271 (1976)
- 24) 小野寺, 大西, 塚田, 鈴木: 鉄と鋼, A 143 (1977)
- 25) 藤岡, 鈴木, 岡村, 塚田: 日本製鋼所技報, 38 (1978), 51
- 26) 内木, 岡林: 溶接学会誌, 39 (1970), 1059
- 27) U.S.NRC Regulatory 1.99 "Effect residual element on predicated radiation damage to Reactor Vessel Materials Rev. I" April 1977

