
原子炉圧力容器用鍛鋼材の製造

Manufacture of Steel Forgings for Reactor Pressure Vessel of Nuclear Power Plant

灘 清和(Kiyokazu Nada) 堀内 章(Akira Horiuchi) 和中 宏樹(Hiroki Wanaka)
松居 進(Susumu Matsui) 早川 泰司(Yasushi Hayakawa)

要旨：

LD 転炉・LRF (ladle refining furnace) プロセスで溶製した鋼塊から ASME SA508 Class 2 鋼による原子炉圧力容器上蓋フランジとノズルを試作し、それら厚肉鍛鋼材の内部性状、方向性、長時間応力除去焼なましの材質におよぼす影響などを調査した。その結果、試作鍛鋼材はすぐれた内部健全性と機械的性質を有していること、さらにこのプロセスの採用により、焼もどし脆化や照射脆化に有害な Cu, Sb, As, Sn 等の不純物は、通常の電気炉鋼に比較し極めて少なくできること、などがわかった。このようにして、当社水島製鉄所における原子炉圧力容器用厚肉鍛鋼材製造のための基礎技術を確立できた。

Synopsis：

ASME SA 508 Class 2 steel forgings such as flange and nozzle of nuclear reactor pressure vessel have been made for test purpose by means of combined process of LD converter and ASEA-SKF ladle refining furnace at Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp. Researches are performed into internal soundness and anisotropy of the forgings and into the influence of long time stress relief annealing on the forging quality. The forgings are found to have satisfactory internal soundness and excellent mechanical properties. Further, these steels are better than usual electric furnace steel in that they contain less impurities such as Cu, Sb, As and Sn which are liable to cause temper embrittlement and radiation damage.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

原子炉圧力容器用鍛鋼材の製造

Manufacture of Steel Forgings for Reactor
Pressure Vessel of Nuclear Power Plant

灘 清 和*

Kiyokazu Nada

堀 内 章**

Akira Horiuchi

和 中 宏 樹***

Hiroki Wanaka

松 居 進****

Susumu Matsui

早 川 泰 司*****

Yasushi Hayakawa

Synopsis:

ASME SA 508 Class 2 steel forgings such as flange and nozzle of nuclear reactor pressure vessel have been made for test purpose by means of combined process of LD converter and ASEA-SKF ladle refining furnace at Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp..

Researches are performed into internal soundness and anisotropy of the forgings and into the influence of long time stress relief annealing on the forging quality. The forgings are found to have satisfactory internal soundness and excellent mechanical properties.

Further, these steels are better than usual electric furnace steel in that they contain less impurities such as Cu, Sb, As and Sn which are liable to cause temper embrittlement and radiation damage.

1. 緒 言

わが国の発電は、ここ数年来急速な成長をみせ、従来の水力あるいは化石燃料から、新しい核燃料への転換がなされつつある。今後、このような原子力エネルギーの利用はさらに発展することが期待される。

一方、原子炉は、事故にともなう環境汚染の問題から、何にも増して高度な安全性を必要とするため、これに使用される鋼材の製造にあたって

は、十分な製造技術の確立とともに、厳重な品質保証体制の整備が要求される。

当社水島製鉄所におけるこれら原子炉用鋼材の製造に関しては、すでに極厚鋼板において、大規模な試験研究のもとにその製造体制が確立されている¹⁾。さらに鍛鋼材についても同様に、基礎実験、試作実験を行い製造技術の確立を図るとともに、品質保証体制の整備を進めてきた。

本報は、この原子炉に使用される鋼材のうち、極めて厳しい品質水準が要求される RPV (reactor pressure vessel) 用 ASME SA 508

* 水島製鉄所鋳鍛部熱処理課

*** 水島製鉄所鋳鍛部鍛錬課兼熱処理課課長

***** 水島製鉄所企画部企画室副部長

** 水島製鉄所鋳鍛管理部鋳鍛管理課掛長

**** 水島製鉄所鋳鍛管理部鋳鍛管理課課長

Class 2 上蓋フランジとノズルを、LD 転炉-LRF (ladle refining furnace) によって溶製した鋼塊から実製品と同一の形状寸法で試作し、これら厚肉鍛鋼材の内部性状、方向性、質量効果ならびに長時間応力除去焼なましの材質におよぼす影響を調査したので、その製造経過と試作鍛鋼材の品質特性について報告する。

2. 原子炉圧力容器用鍛鋼材

昭和50年におけるわが国のエネルギー長期需給計画によれば、昭和60年度における原子力発電に対する依存度は総エネルギーのおよそ10% (4900万kW) となっており、従来の計画目標6000万kWに比べると縮小されてはいるものの、その伸び率は依然として大きい²⁾。

原子力発電の形式には、軽水炉、重水炉、ガス冷却炉などすでに実用化されているもののほか、現在開発中の高温ガス炉や高速増殖炉などがあるが、現在最も広く採用されているのは軽水炉である。この軽水炉には沸騰水型 (BWR) と加圧水型 (PWR) の2方式があり、同等出力では沸騰水型の方が容器の内径は大きいとその肉厚は薄い。しかし鍛鋼材の肉厚は鋼板に比べ著しく厚く、また容器容量も高能率、経済性の立場から大型化の傾向にあり、これら鍛鋼材に要求される品質水準は一層厳しいものになってきている。Fig. 1 に電気出力と容器内径との関係³⁾を、Fig. 2 に容器内径と鋼材の肉厚との関係⁴⁾を示す。

原子炉 RPV に使用される鍛鋼材としてはボルト接合部のフランジ、循環水および各種制御用ノズルなどがある。Fig. 3 に750MW BWR 型原子炉 RPV の構造例を示す⁵⁾。

今回試作のベースとした鍛鋼材は、BWR 型原子炉 RPV 用500MW 級上蓋フランジと700MW 級ノズルであり、それぞれの形状寸法は Fig. 4 に示すとおりである。

これら鍛鋼材の材質については、若干の変遷はあるが、安全性に対する強い要求からその使用実績が極端に重要視され、現在ではほとんど ASME SA508 Class 2 によっている。最近になって、容器の大型化にともないさらに新しい鋼種

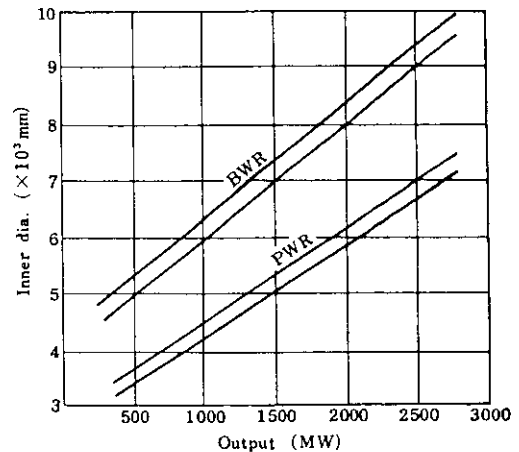


Fig. 1 Relation between output and inner dia. of nuclear reactor pressure vessel

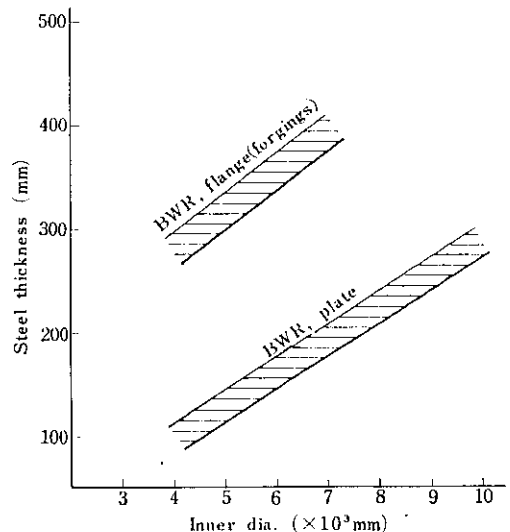


Fig. 2 Relation between inner dia. and steel thickness of nuclear reactor pressure vessel

の採用が検討されているが、やはり材質選定にあたっては、保守的、漸進的な一面がある。したがって、今回の試作も同様に SA508 Class 2 によって。Table 1 は同規格の概要を示したものである。

この鍛鋼材に要求される品質水準は極めて厳しく、内部健全性、高温強度、低温靱性、均質性等の諸性質の確保のほか、応力除去焼なまし (以下

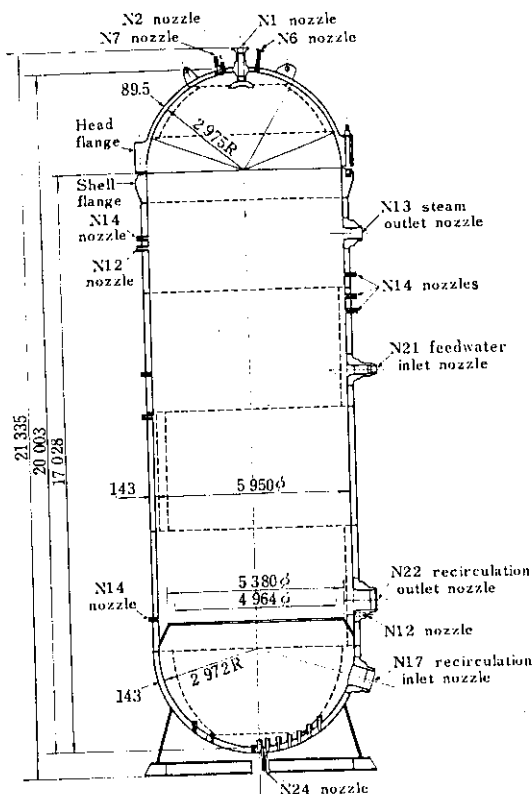


Fig. 3 General arrangement of reactor pressure vessel (750MW, BWR)⁽⁴⁾

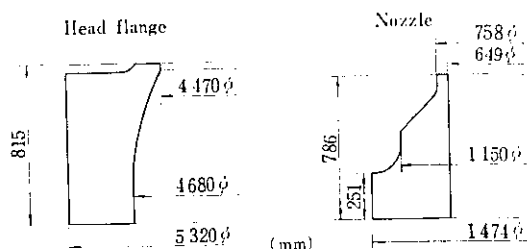


Fig. 4 Dimensions of trial forgings for 500MW Class head flange and 700MW Class nozzle

SRと略す)による脆化や照射脆化に有害な不純物元素をできるだけ少なくすることが必要であり、その製造にあたっては、これらの諸特性を満足させるに十分な製造技術が確立されているとともに、製品の品質とその安定供給を保証する一貫した厳重な品質保証体制の整備が要求される。

3. 製造経過

試作上蓋フランジおよびノズルの製造工程をFig. 5に示す。当社における製造上の特色は、製鋼設備として、従来のエール式電気炉に変わり180t LD 転炉と100t LRFとを組み合わせた精錬法を採用している点である^{6,7)}。その他の設備も含め、当社水島製鉄所における大型鍛鋼品製造のための主要設備はTable 2に示すとおりである。以下に各製造工程の詳細について述べる。

Table 1 Outline of ASME SA508 Class 2 specification

(a) Chemical composition (ladle analysis)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
0.27max.	0.15~0.35	0.50~0.90	0.025max.	0.025max.	0.50~1.00	0.25~0.45	0.55~0.70	0.05max.

(b) Mechanical properties

Tensile test				Charpy impact test		
T.S.	Y.S. (0.2%off-set)	El.	R.A.	Test specimen	Absorbed energy at 40°F	Test specimen
80 000psi (56.2kg/mm ²)	50 000psi (35.1kg/mm ²)	18%	38%	A370	Minimum average value 30ft·lb	A370
105 000psi (73.8kg/mm ²)	min.	min.	min.		Minimum value of one specimen 25ft·lb	V-notch, type A

Process	Process chart
Steel making	○ Desulphurization of hot metal
	○ First refining (LD converter)
	○ Final refining (LRF)
	○ Vacuum degassing (LRF)
	○ Ingot casting
	◇ Ladle analysis
Forging	○ Heating
	○ Forging
Pre-heat treatment	○ Normalizing-Tempering
	◇ Visual inspection
Rough machining (I)	○ Rough machining (I)
	◇ Nondestructive examination
Rough machining (II)	○ Rough machining (II)
	◇ Nondestructive examination
Heat treatment	○ Quenching-Tempering
	◇ Mechanical testing

Fig. 5 Manufacturing process of ASME SA508 Class 2 trial forgings

3.1 製 鋼

試作鍛鋼材は LD 転炉-LRF プロセスで精錬ならびに真空脱ガス処理を行った。使用した鋼塊は、上蓋フランジが 100t、ノズルが 25t の菊型で、注入法は不活性ガス雰囲気の上注とした。

試作鍛鋼材の取鍋およびチェック分析値を Table 3 に示す。いずれの鍛鋼材も、成分偏析は極めて小さく、良好な成分の均一性が得られた。また SR 脆化や照射脆化に有害であるといわれている P, S, Cu, Sb, As, Sn などの不純物元素も低い値を示している。特に Cu, Sb, As, Sn などは、高炉から LRF による精錬まで一貫した工程を採用しているために、従来の電気炉鋼に比較しても、著しく低い値が得られた。

一方、鍛鋼材の JIS G0555 による清浄度は

Table 2 Main facilities for production of large forgings at Mizushima Works

Section	Facilities	Number	Nominal capacity
Steel making	LD converter	3	250t
		3	180t
	RH degassing equipment	1	250t
		1	180t
	Ladle refining furnace (ASEA SKF process)	1	100t
	Electric furnace	1	30t
Forging	Vacuum arc remelting furnace	1	12t
	Free forging press	1	6 000t
		1	2 000t
		1	500t
	Radial ring rolling mill	1	Max. rolling diameter 3 300mm
Heat treatment	Reheating furnace	19	Max. load 400t
	Bogie hearth furnace	20	400t (10mW × 4.5mH × 12mL) 180t (3.5mW × 3.3mH × 20mL), etc.
	Vertical furnace	11	1 500φ × 5 000mm, etc.
	Oil bath	5	5 500φ × 4 000mm, 2 500φ × 15 000mm, etc.
	Water bath	6	10 000φ × 6 000mm, 2 500φ × 8 000mm, etc.
Machining	Vertical lathe	11	Dia. 13 000 × height 4 700 (max. 150t), etc.
	Lathe	49	Swing over saddle 2 300φ × between centers 16 000 (max. 70t), etc.

Table 3 Chemical composition of trial forgings

(%)

		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Sb	As	Sn	V	Al sol.
ASME specification (ladle analysis)		≤0.27	0.10 ~0.35	0.50 ~0.90	≤0.025	≤0.025	—	0.50 ~1.00	0.25 ~0.45	0.55 ~0.70	—	—	—	≤0.05	—
Head flange	Ladle analysis	0.20	0.32	0.71	0.010	0.010	0.015	0.82	0.37	0.60	—	—	—	0.007	0.019
	G	0.20	0.34	0.73	0.008	0.009	0.01	0.84	0.39	0.62	<0.002	0.003	0.002	—	0.020
	C	0.19	0.33	0.73	0.007	0.009	—	0.84	0.39	0.61	—	—	—	—	0.021
	D	0.20	0.33	0.73	0.007	0.009	0.01	0.85	0.38	0.62	<0.002	0.003	0.002	—	0.021
	E	0.21	0.33	0.72	0.008	0.010	—	0.86	0.40	0.62	—	—	—	—	0.020
	Ladle analysis	0.18	0.30	0.72	0.010	0.007	0.02	0.79	0.38	0.59	—	—	—	0.007	0.022
Nozzle	A	0.18	0.31	0.74	0.012	0.009	0.02	0.82	0.40	0.60	<0.002	0.004	<0.002	—	0.025
	D1	0.18	0.31	0.72	0.011	0.007	0.02	0.79	0.37	0.61	—	—	—	—	0.023
	D2	0.18	0.31	0.71	0.010	0.007	0.02	0.77	0.37	0.61	—	—	—	—	0.024
	D3	0.17	0.31	0.71	0.010	0.007	0.02	0.78	0.38	0.62	—	—	—	—	0.026

Note: Sampling positions of check analysis are shown in Fig. 8

Table 4 Cleanliness of trial forgings

Sampling position		dA60 ×400	dB60 ×400	dC60 ×400	d60 ×400
Head flange	G	0.033	0.029	0	0.062
	A	0.021	0.025	0.004	0.050
	B	0.029	0.004	0	0.033
	C	0.029	0	0.013	0.042
	D	0.017	0.042	0	0.059
	E	0.033	0.004	0	0.037
Nozzle	F	0.029	0.008	0.004	0.041
	A	0.038	0.004	0.004	0.046
	C2	0.054	0	0.004	0.058
	D2	0.054	0.008	0.004	0.066

Note: Sampling positions are shown in Fig. 8

Table 4 に示すとおりであり、非金属介在物の少ない清浄な鍛鋼材が得られた。

このように、LD 転炉-LRF プロセスは、非金属介在物のみならず、SR 脆化や照射脆化に有害な不純物元素量の少ない鋼材が得られることから、RPV 用鍛鋼材を製造するためにはむしろ電気炉製鋼法より適した製鋼法であるといえる。

3.2 鍛 練

各鍛鋼材は 6 000t 自由鍛造プレスで鍛造した。

その鍛造要領の概要を Table 5 に示す。鍛練プロセスの諸条件は、鍛鋼材の健全性と機械的性質の方向性などを考慮して決定した。

Fig. 6 は 100t 鋼塊から上蓋フランジを鍛造した時の作業工程を示し、Photo. 1, 2 はそれぞれその据込作業、穴広げ作業の状況である。

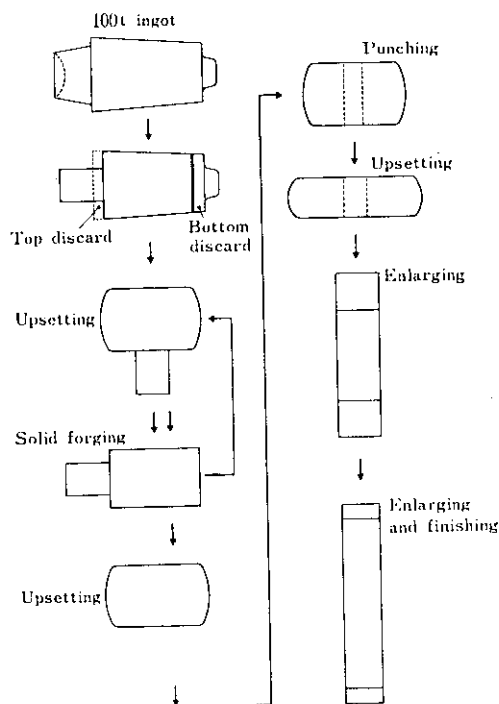


Fig. 6 Forging process of head flange

Table 5 Outline of forging conditions

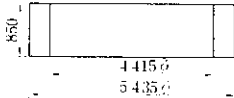
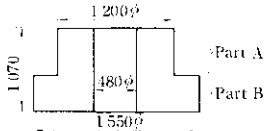
	Head flange	Nozzle
Press	6 000t free forging press	6 000t free forging press
Ingot weight	100t	25t
Heating temp.	1 200~1 250°C	1 200~1 250°C
Forging shape		
Forging ratio	$1.5 \text{ U} \cdot 1.5 \text{ S} \cdot \frac{1}{1.6} \text{ U} \cdot 1.6 \text{ S} \cdot \frac{1}{1.4} \text{ U} \cdot 1.1 \text{ E} \cdot \frac{1}{2.2} \text{ U} \cdot 1.2 \text{ E} \cdot \frac{1}{1.3} \text{ U} \cdot 1.1 \text{ E} \cdot \frac{1}{1.2} \text{ U} \cdot 1.6 \text{ E}$	Part A; $\frac{1}{1.9} \text{ U} \cdot 2.6 \text{ S} \cdot \frac{1}{2.9} \text{ U} \cdot 2 \text{ M}$ Part B; $\frac{1}{1.9} \text{ U} \cdot 2.6 \text{ S} \cdot \frac{1}{2.9} \text{ U} \cdot 1.4 \text{ M}$
Forging weight	57t	11t



Photo. 1 Upsetting forging of head flange



Photo. 2 Enlarging forging of head flange

3.3 非破壊試験

3.3.1 超音波探傷試験

焼ならし、焼もどし処理(前熱処理)を終えた各鍛鋼材の黒皮部を機械加工により除去し、鍛鋼材の内部全域にわたり垂直および斜角による超音波探傷試験を行った。その結果、フランジ材、ノズル材ともに欠陥波は検出されず内部健全性はすぐ

れたものであった。なお探傷条件は次のとおりである。

使用機器 Krautkrämer USIP 10W
 周波数 2MHz
 感度 垂直; STB-G $V_{15-28}=80\%$
 斜角; 60°V型ノッチ、深さ 6.3mm、長さ25mm、外周より $\frac{1}{2}$ スキップで80%

接触子 垂直; 24mm ϕ チタン酸バリウム
 斜角; 45°, 20 $\times$ 22(mm), チタン酸バリウム
 接触媒質 マシン油 (SAE30番)
 探傷面アラサ 25 S

3.3.2 染色浸透探傷試験 および 磁粉探傷試験

フランジ材は超音波探傷試験後 Fig. 7 (a) に示す形状に機械加工したのち、ノズル材は超音波探傷試験後にそれぞれ染色浸透探傷試験および磁粉探傷試験を鍛鋼材の全表面について実施した。その結果、いずれの試験においても欠陥は認められず、表面健全性はすぐれていた。Photo. 3, 4 にフランジ材およびノズル材の染色浸透探傷試験状況を示す。なお各試験の探傷条件は次のとおりである。

(1) 染色浸透探傷試験

試験温度	15°~25°C
浸透液	溶剤除去性染色浸透液 (特殊塗料欄製原子力用)
浸透時間	15min
現像時間	20min
表面アラサ	25 S

(2) 磁粉探傷試験

装置	Magnaflux KH-15
磁化方法	湿式連続法
プロット間隔	200~250mm
電流	1 000~1 200 A

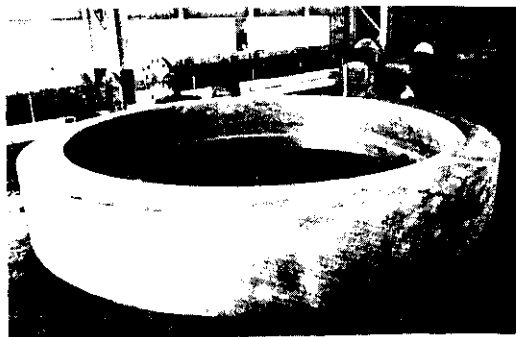


Photo. 3 Visible dye penetrant testing of head flange

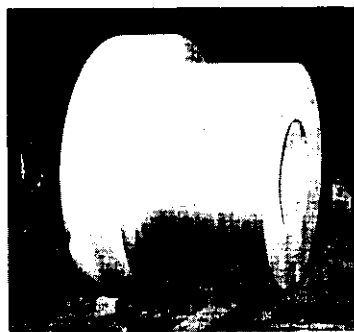


Photo. 4 Visible dye penetrant testing of nozzle

磁粉	蛍光磁粉
表面アラサ	25 S

3.4 熱処理および機械試験

フランジ材は磁粉探傷試験後、ノズル材は磁粉探傷試験後 Fig. 7 (b) に示す形状に機械加工した後、焼入れ・焼もどし処理を行った。上蓋フランジは870°Cから、ノズルは910°Cから水焼入れ

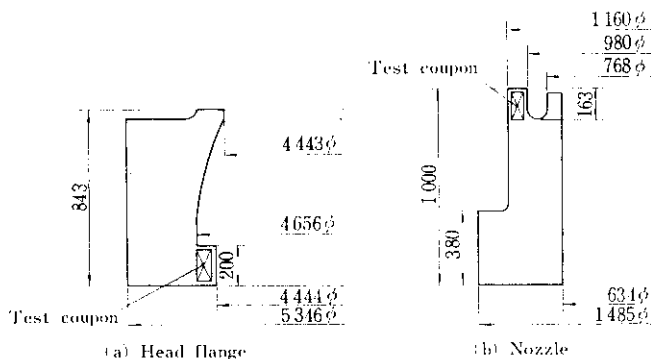


Fig. 7 Dimensions of head flange and nozzle before heat treatment

Table 6 Mechanical test results on test coupon

	Tensile test				High temperature tensile test (at 371°C)		$\sqrt{E_{-29^{\circ}\text{C}}}$		Charpy impact test						Nil ductility test	
	T.S. (kg/mm ²)	Y.S. (kg/mm ²)	El. (%)	R.A. (%)	T.S. (kg/mm ²)	Y.S. (kg/mm ²)	(kg · m)		$\sqrt{E_{-12^{\circ}\text{C}}}$		Lateral expansion (mm)				$T_{\text{NDT}}(^{\circ}\text{C})$	
							L	T	L	T	-29°C		-12°C		L	T
											L	T	L	T		
Head flange	68.8	54.7	27	73	60.4	46.4	8.5	20.5	15.4	21.8	1.3	2.0	1.7	2.1	-23	-29
	69.6	56.0	26	71												
Nozzle	66.6	53.6	26	70	57.0	42.5	19.1	11.9	19.6	16.9	2.0	1.8	2.0	1.7	—	-34
	65.6	52.6	26	69												

T : Tangential

L : Longitudinal

し、上蓋フランジは 650°C、ノズルは 665°C で焼もどした。焼入れ時に測定した各部の冷却速度のうち、肉厚中心部における 800°C から 400°C の平均冷却速度は上蓋フランジ (肉厚350mm) で 11.1°C/min、ノズル (肉厚263mm) で 19.5°C/min

であった。

熱処理後、本体付テストクーポン (Fig. 7 参照) にて機械試験を行った。その結果、Table 6 に示すとおり、強度、低温靱性、 T_{NDT} (nil ductility transition temperature) とともに十分満足できる

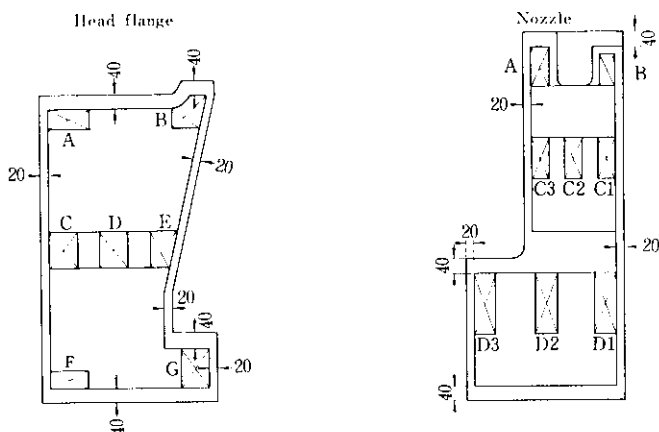


Fig. 8 Sampling position of trial forgings for material tests

Table 7 Heat treatment conditions of trial forgings

	Mark	Quenching	Tempering	SR	Tempering parameter ($\times 10^3$)
Head flange	ASQT	870°C $\times$ 8h	650°C $\times$ 8h	—	19.3
	QT45SR			625°C $\times$ 45h	19.7
	QT100SR			625°C $\times$ 100h	19.9
Nozzle	ASQT	910°C $\times$ 18h	665°C $\times$ 20h	—	20.0
	QT45SR			625°C $\times$ 45h	20.1
	QT100SR			625°C $\times$ 100h	20.2

値が得られた。

4. 確性試験

試作を終えた上蓋フランジとノズルを切断し、各種の調査を行った。試験片の採取位置はASME規格に準じて Fig. 8 に示すとおりとし、その採取方向は、それぞれ T(接線方向), L(軸方向) R(半径方向) の3方向とした。通常、容器の溶接組立後には長時間の SR 処理が行われるため、試験片の一部はこれに相当するSR処理を行った。これらの熱処理条件と次式で定義される Larson Miller の焼もどしパラメーター (以下 TP と略す) は Table 7 に示すとおりである。

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

ここに

T : 加熱温度 ($^{\circ}\text{K}$)

t : 保持時間 (h)

4.1 引張特性

4.1.1 常温引張特性

焼もどしおよびSR条件を TP で整理した時の常温引張試験結果を Fig. 9 に示す。降伏強さおよび引張強さは TP が増加するにしたがってゆるやかに低下しているが、この低下の割合に対する焼入冷却速度の影響は比較的小さい。また伸びおよび絞りに対する TP の影響はほとんど認められない。いずれにしても当試験における TP 範囲内

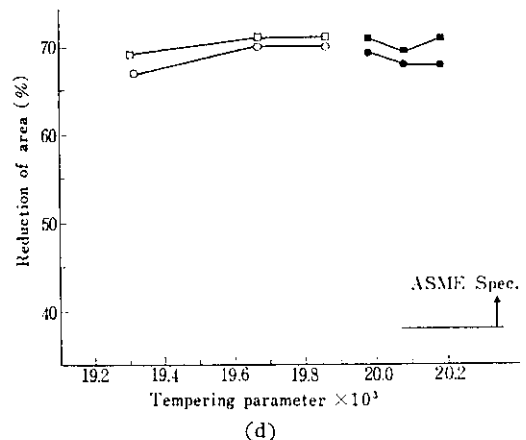
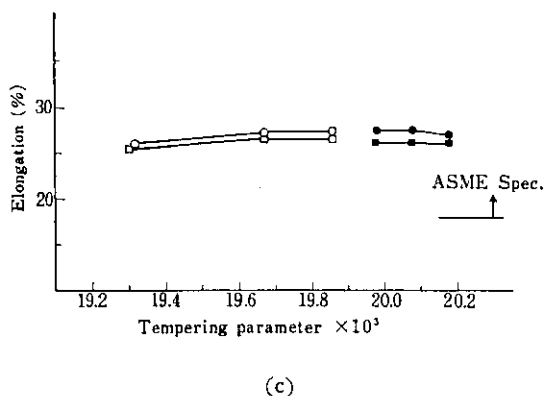
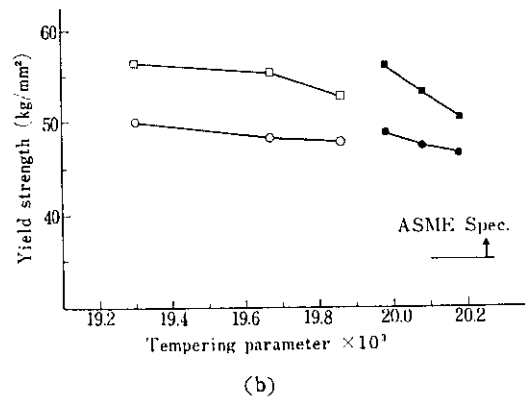
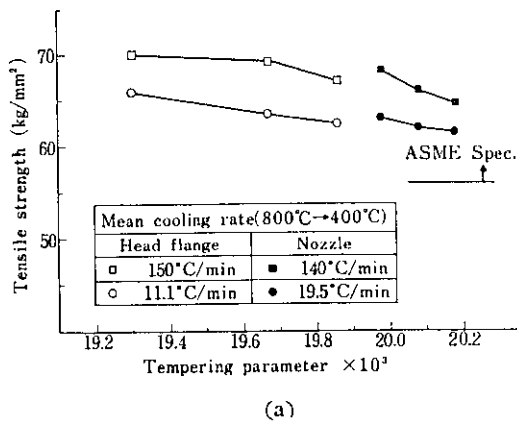


Fig. 9 Relation between tempering parameter and tensile properties of SA508 Class 2 steel forgings

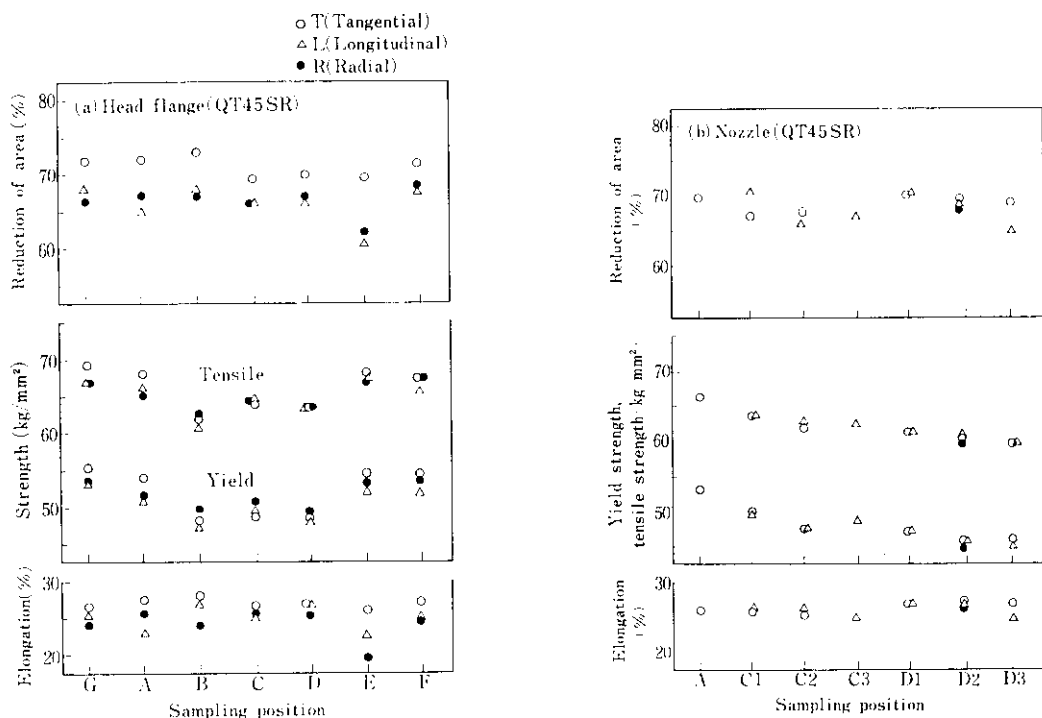


Fig. 10 Distributions of tensile test results for head flange and nozzle

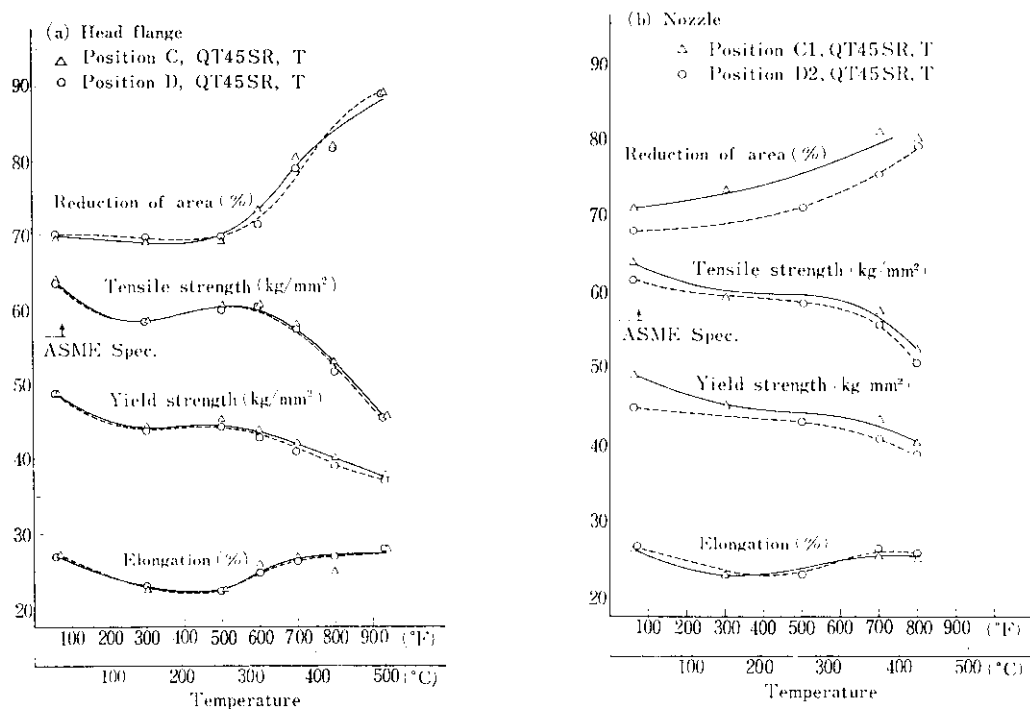


Fig. 11 Results of high temperature tensile test for head flange and nozzle

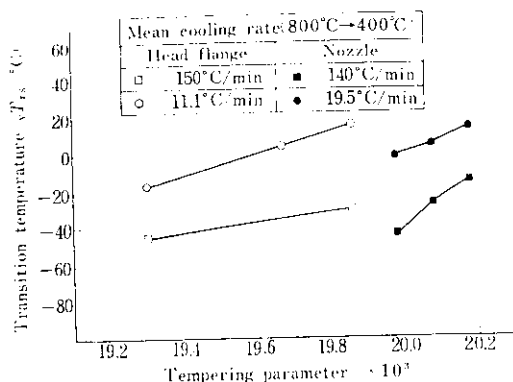


Fig. 12 Relation between tempering parameter and 50% fracture appearance transition temperature of SA 508 Class 2 steel forgings

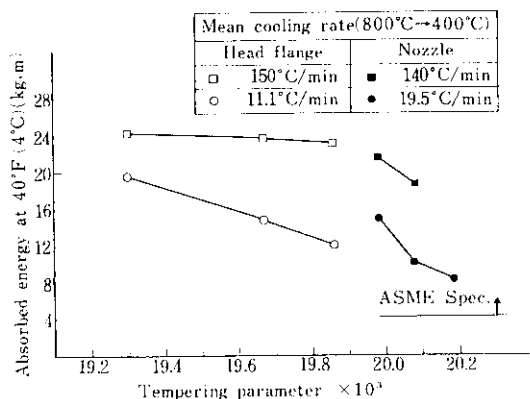


Fig. 13 Relation between tempering parameter and absorbed energy at 40°F of SA508 Class 2 steel forgings

では ASME の規格を十分満足することができた。

一方, Fig. 10 はフランジとノズルの位置別常温引張特性を示したものである。焼入冷却速度に関連する質量の影響も比較的小さく, また方向性も小さい。

4.1.2 高温引張特性

試作上蓋フランジとノズルの高温引張試験結果を Fig. 11 に示す。371°C (700°F) までは常温における引張強さの規格を満足している。371°C における引張強さは, 常温におけるその約90% であるが, 371°C 以上では温度の上昇につれて比較的急激に減少する。

なお, 使用した試験片は 12.5mmφ, GL=50mm で, 試験方法は JIS G0567 に準拠して行った。

4.2 靱 性

焼もどしおよび SR 条件を TP で整理した時のシャルピー衝撃試験結果を Fig. 12, 13 に示す。脆性破面遷移温度 ($\sqrt{v}T_{rs}$) は焼入冷却速度の増加にともない低温側に移行するが, TP が増加するにしたがってゆるやかに上昇している。この $\sqrt{v}T_{rs}$ の上昇に対する焼入冷却速度の影響は比較的小さい。40°F における吸収エネルギー ($\sqrt{v}E_{40°F}$) は TP の増加にともない減少しているが, 焼入冷却速度の大きい方がその減少傾向は小さい。

Fig. 14, 15 は, 625°C × 45h SR 後の上蓋フランジとノズルの各位置における方向別の $\sqrt{v}T_{rs}$ と

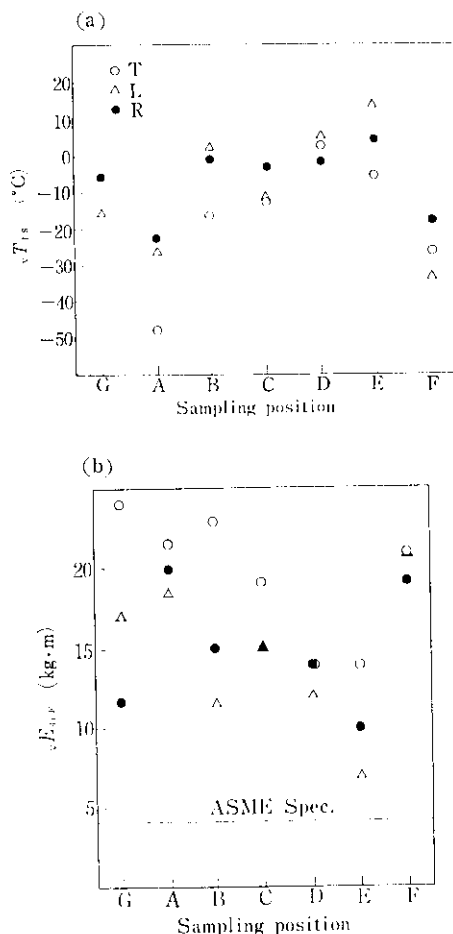


Fig. 14 Distributions of $\sqrt{v}T_{rs}$ and $\sqrt{v}E_{40°F}$ for head flange (QT45SR)

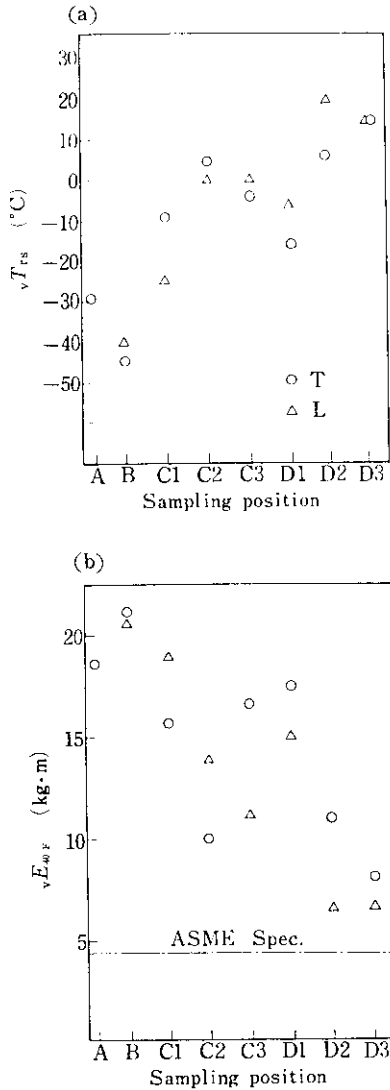


Fig. 15 Distributions of vT_{rs} and $vE_{40°F}$ for nozzle (QT45SR)

$vE_{40°F}$ を示したものである。肉厚中心部と内周部はその他の部位に比較し、靱性は低い傾向となっているが、方向性は顕著でなく、またすべての位置および方向において ASME 規格を満足した。

4.3 顕微鏡組織

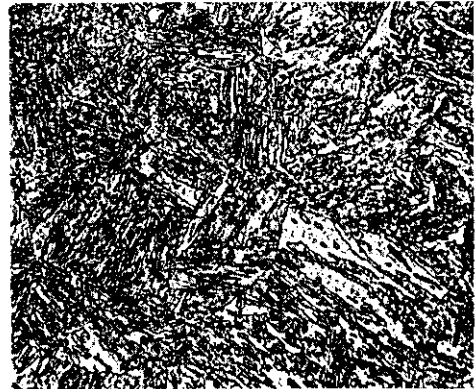
Photo. 5, 6 は、焼入冷却速度の異なる位置における顕微鏡組織例を示したものである。肉厚中心相当部はフェライトに若干ベイナイトが混在した組織であるが、焼入冷却速度の大きい表面側は、

ベイナイトのみの組織であった。

Table 8 は ASTM E112 の焼入法により測定したオーステナイト結晶粒度番号を示すが、フランジ材で約 6, ノズル材で 7~8 であり、肉厚中心部と表面部では大きな差はなかった。

Table 8 Austenite grain size number by quenching method (according to ASTM E112)

Head flange		Nozzle	
Position	No.	Position	No.
G	6.1	A	8.1
B	6.5	D1	7.6
D	6.0	D2	7.4
		D3	7.4

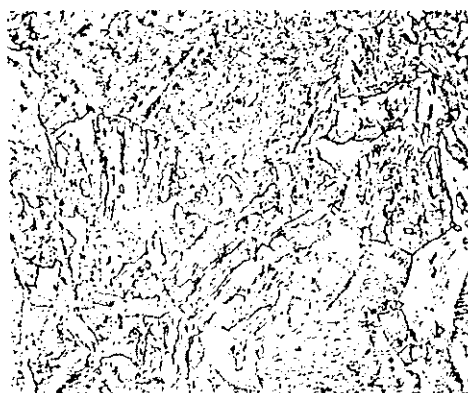


Position G

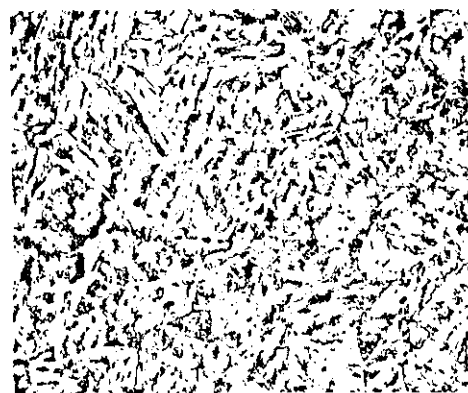


Position D (×500)

Photo. 5 Microstructure of head flange



Position A



Position C2 (×400)

Photo. 6 Microstructure of nozzle

5. 総 括

ASME SA508 Class 2 鋼による原子炉圧力容器用鍛鋼材の製造方法検討のため、LD 転炉-LRF により溶製した鋼塊から実製品と同一形状寸法の上蓋フランジとノズルを試作し、鍛鋼材の内部性状、方向性、質量効果ならびに長時間 SR の機械的性質におよぼす影響を調査した。得られた結果をまとめると次のとおりである。

(1) 磁粉探傷および超音波探傷検査では何ら欠

陥は認められず、表面および内部の健全性はすぐれたものであった。

- (2) 鍛鋼材の成分偏析は小さく、また SR 脆化、照射脆化に有害な不純物元素の量は極めて少なかった。
- (3) 非金属介在物の少ない清浄な鍛鋼材が得られた。
- (4) 降伏強さと引張強さは TP の増加にともないゆるやかに低下したが、通常実施される SR 条件ではすべて ASME 規格を満足し、また質量効果、方向性も比較的少なかった。
- (5) 高温強度は 371°C (700°F) まで常温の規格値を満たした。
- (6) 衝撃特性は TP の増加にともない低下の傾向にあったが、通常実施される SR 条件では問題のない良好な結果であった。また本体付テストクーボンの T_{NDT} も満足できる結果が得られた。

以上のとおり、ASME SA508 Class 2 による試作鍛鋼材は、不純物元素の量も極めて少なく、また内部性状、機械的性質ともに満足できるものであり、圧力容器用鍛鋼材の製造に対し、LD 転炉-LRF プロセスはすぐれた製鋼法であることが示され、当社水島製鉄所における新しい分野の鍛鋼材を製造するための基礎技術を確認することができた。

一方、近年はさらに低温靱性のすぐれた圧力容器用鍛鋼材の要求もあるので、当社では、引続き結晶粒の微細化方法、特殊熱処理法などの新しい技術の開発を行っている。

おわりに、当試験のうち上蓋フランジの試作にあたり多大のご指導をたまわるとともに、種々ご協力いただいた石川島播磨重工業株式会社技術研究所ならびに横浜第 3 工場の皆様に厚くお礼申しあげます。

参 考 文 献

- 1) 川崎製鉄技報, 6 (1974) 2
- 2) FAPIG, 78 (1975) 8, 59
- 3) JSSC, 9 (1973) 91, 53
- 4) JSSC, 9 (1973) 91, 54

- 5) 矢野ほか：石川島播磨技報, 12 (1972) 3, 269
- 6) 西岡, 江本：川崎製鉄技報, 4 (1972) 1, 12
- 7) 西岡, 江本：鉄と鋼, 60 (1974) 12, 79

