

当社の原子力用および圧力容器用材料

Kawasaki Steel Products for Nuclear Power Plant Components and Pressure Vessels

森 裕*
Hiroshi Mori

Synopsis:

Modern steelmakers are facing a problem to assure a high quality of products with minimum expenditure. This is especially true in the case of producing heavy plates and forgings for nuclear power plant components and pressure vessels, one of the end-uses demanding the highest quality requirements existing today.

This paper introduces features of KSC products of these steels and describes how they are manufactured, including an outline of major equipment and processes including BOF-LRF, quality assurance system, and some glimpse of efforts for research and development.

1. まえがき

近年のめざましい産業発展を支える最も効果的な要因の一つとして「量産化」が挙げられるが、これは製造設備、装置、構造物の「大型化」と同義語といって差支えない。しかも極度の経済性が追求されることから、この「大型化」は可能な限りの「極限設計」と「高能率加工」に立脚するため、その素材に対する品質要求もいやが上にも厳しくなるのは当然である。事故発生確率 10^{-7} 以下を要求される原子力発電に用いられる材料や、これに準じる安全性を要求される圧力容器材料は、この故に最高品質たるべき不断の開発とその品質保証の体制確立を求められ、現状の量産体制の中で、一品一品手作りの精神での生産が望まれるのはやむを得ないすう勢である。

このような背景の下で当社が製造している原子力用材料、圧力容器用材料の現状を、製造設備の特徴、品質保証体制を含めて、以下に紹介する。

2. 製造設備の特徴

原子力用鋼板、圧力容器用鋼板の製造工程は、Fig. 1に示すとおりで、高炉——溶銑脱硫——転炉・電気炉——真空脱ガス——造塊——鍛錬または分塊——厚板圧延——熱処理が一般工程である。品種によっては、介在物の減少に有利な縦型連铸機による転炉真空脱ガス鋼のスラブも用いられる。造塊の場合は下注で、品種・仕様に応じて上広鋳型の使用、無酸化注入等の処置がとられる。

当社の製造設備で特色のある代表例を以下に記す。

2・1 取鍋精錬炉¹⁾

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社が共同開発したもので、LRF (Ladle Refining Furnace) と略称され、従来の取鍋脱ガス法に電磁誘導攪拌装置と3相交流アーク加熱装置を組合わせて構成された冶金炉の一種と見なすことができる。その概要図をFig. 2に、LRFで精錬中の溶鋼の攪拌状況

* 技術本部鋼材技術部部長
(昭和54年12月26日原稿受付)

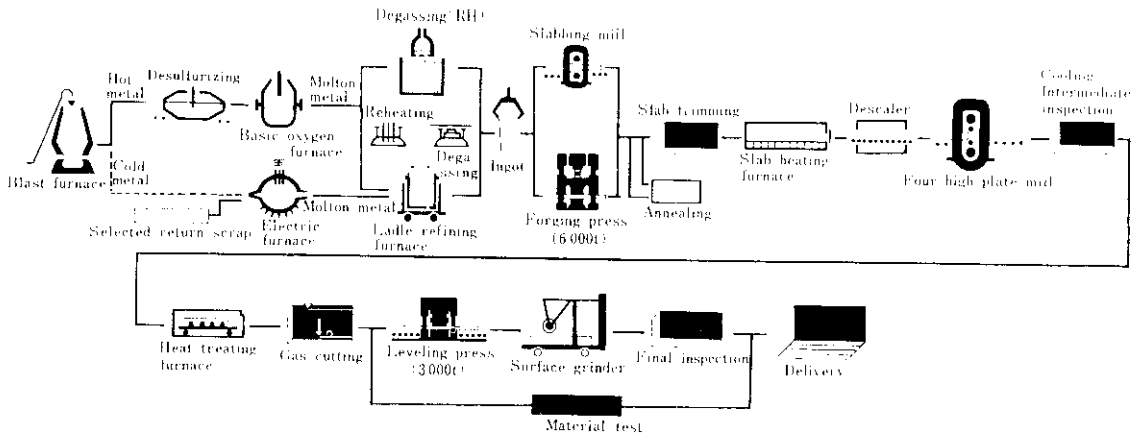


Fig.1 Manufacturing process of the extra heavy steel plates

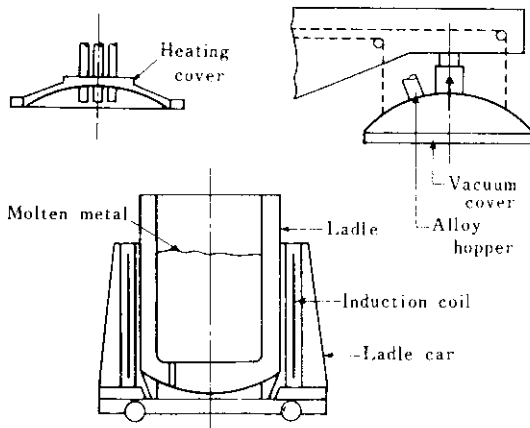


Fig.2 100t LRF (Ladle Refining Furnace)

をFig. 3にそれぞれ示すように、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付けられており、受鋼した取鍋はこのコイルの内側に置かれる。台車の上方には電弧加熱用フードと、合金添加用ホッパーを有する脱ガス用フードとが並んで設置され、台車を移動することによって電弧加熱と脱ガスとが交互に行え、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、溶鋼は電磁誘導コイルでFig. 3のように継続して攪拌される。

最近、これに加えて不活性ガス吹込による攪拌強化も行われるようになった。転が-LRF鋼の特色をまとめると次のとおりである。

(1) 不純物極少による優れた耐脆化特性

溶銑配合率が高く、従来の電気炉鋼に比べて、

不純物含有量が極めて少ない。

(2) 優れた内部性状

真空脱ガス処理の脱水素能力が極めて高く、非金属介在物も非常に少ない。また、アーク加熱と電磁誘導攪拌により、溶鋼の均一性が向上し、温度調整がはかれるため、内部健全性に優れ、超音波探傷試験等、内部欠陥試験成績の良好な鋼材が得られる。

(3) 成分調整精度向上による材質の均一性

アーク加熱、電磁誘導攪拌を伴った合金添加プロセスにより、添加成分が均一に溶解し、適中精度が極めて高いので目標材質に適した狭い範囲での成分設計ができ、材質のばらつきが少ない。

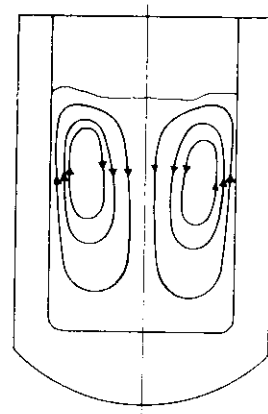


Fig.3 Schema of the flow pattern of molten metal in the LRF

2-2 底吹き転炉(Q-BOP)²⁾

転炉鋼は溶銑高配合率による高純度を特徴としており、真空脱ガス技術のめざましい発展と、ここ数年の溶銑脱硫技術の進歩に支えられて、在来の平炉、電炉が鋼に対してその鋼質の優位性を急速に増大し、今や高級鋼量産の無二の手段と考えられるまでの地位を確保している。そしてその繁栄は純酸素上吹転炉(BOF)によってかちとられたものであったが、最近、大型の純酸素底吹き転炉が世界の各所で稼動をはじめ、脚光をあびている。

当社千葉製鉄所では、Q-BOPまたはOBMと略称される、この純酸素底吹き転炉2基(容量、各230t)が1977年2月以来稼動しているが、その冶金的特徴は次のとおりである。

- (1) 鉄歩留りが高い。
- (2) 脱硫能が高い。
- (3) 脱磷能が高い。
- (4) 溶鋼の酸素含有量が低い。
- (5) 合金鉄使用量が少なくてすむ。

Fig. 4はBOFにくらべ吹錬終了時のQ-BOP

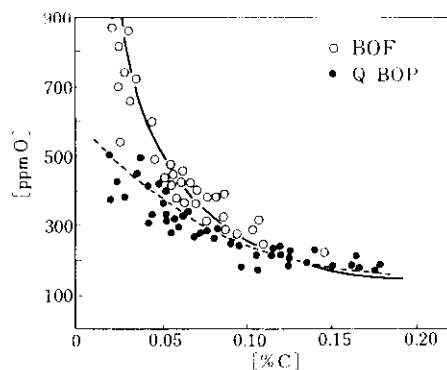


Fig. 4 Comparison of C-Q relations at turn down between Q-BOP and BOF

溶鋼の酸素濃度が低いことを示す。Fig. 5はスラグ塩基度と硫黄分配比の関係で、Q-BOPの脱硫能がBOFに対し著しく優れていることを示している。またFig. 6には、Q-BOPではスラグ中の酸化鉄含有量が低いにもかかわらず、磷分配比はBOFと比較して高い、即ち脱磷能が高いことを示す。

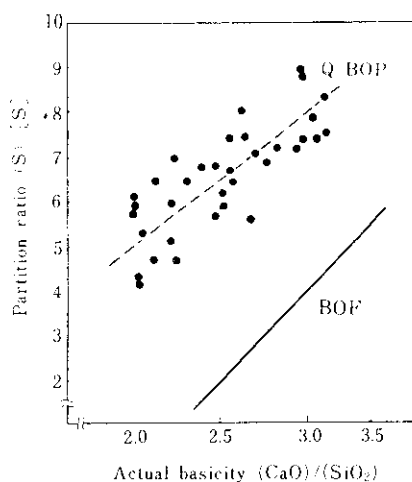


Fig. 5 Comparison of desulfurization performance at turn down between Q-BOP and BOF

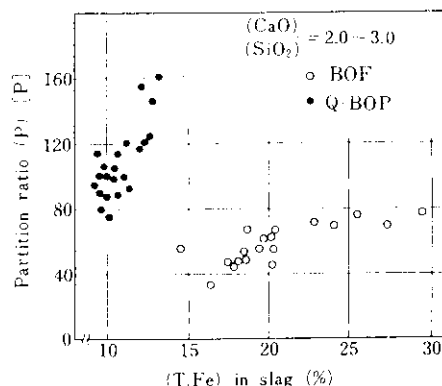


Fig. 6 Comparison of dephosphorization performance at turn down between Q-BOP and BOF

今後の溶接において、極めて大きな役割を果たすと考えられる電子ビーム溶接法(EBW)で健全な溶接部を得るためには、母材の酸素および窒素含有量を徹底的に低めることが最も重要であることから、Q-BOP鋼の優位性が着目され、現にこの材料を使ったEBWの実験が需要家で進みつつある。なお、前述のLRFも容易に15ppm以下という低酸素量を確保できるので、このEBWに適した極厚大単重鋼板を生産するのに適している。

その他、Q-BOPに関して特記すべき事項として、当社が開発したセンサーランス技術による吹錬適中率の向上が挙げられる。終点温度・炭素含有量の同時適中率98.8%、出鋼後取鍋内溶鋼の温度($\pm 2.5^\circ\text{C}$)適中率99.0%という驚異的な成績を挙げ

管理目標に合致した素材の確保に寄与している。

2-3 水島第2厚板工場³⁾

ロール幅5 490mm, 8 000 kW 主電動機の2基駆動による世界最大, 最強力の4重可逆式仕上圧延機を備え, 圧延機前後面のローラーテーブルは115 tもの圧延素材(スラブ)を搬送できる水島第2厚板工場は, まさに「大型化」時代の要求に最適の超厚超大単重の厚板を生産できる圧延工場である。「ノーマンコントロールへの挑戦」をテーマとして建設されたこの工場はスラブヤードから製品の精整ラインまで徹底的な自動化がはかられ, その成果は昭和52年度大河内記念生産特賞受賞の榮譽として輝いている。工場の主要諸元をTable 1に示す。

2-4 鍛錬プレス⁴⁾

昭和44年, 鍛錬専門の当社兵庫工場設備を水島製鉄所内に移し, 銑鋼一貫製鉄所内に位置するものとしては日本で唯一の鍛造工場として稼動を始めた。このねらいは, 高炉—転炉—電気炉(—LRF)による高級清浄鋼の供給という有利な素材条件と, 鍛造+厚板圧延を含めた, 同一製鉄所内における鍛鋼と厚板の連携体制との有機的活用であり, 原子力・压力容器用鋼材生産にうってつけの効果をもたらしている。プレス関係の主要設備をTable 2に示す。6 000t機を代表とするこれらプレス機, リングローリングミルに附帯する大型熱処理炉, 大型機械加工設備により, 単重250 tの鋼塊を用いた鍛鋼品の製造が可能となった。なお設備的には350 t鋼塊を用いた大型鍛鋼品も製作可能である。

Table 1 Facilities of Mizushima No.2 plate mill

Equipment	Maker	Unit	Specifications
Finisher	I. H. I.	1	Type: 4-high reversal twin-drive Roll size: W. R.: 1 200φ×5 490mm B. U. R.: 2 400φ×5 390mm Total weight: 240t Housing weight: 380t Mill modulus: 1 200t mm Rolling force: Max. 8 000t Rolling velocity: 3.1 7.5m/sec Slab weight: Max. 80t As rolled plate size: Thickness: 4.5-300mm Width: Max. 5 350mm Length: Max. 57m
Main motor	Mitsubishi Electric	2	Type: Double armature bottom forward control Capacity: 8 000kW×2 Speed: 50/120rpm
γ-ray thickness gauge	Toshiba EXATEST	1	Source: Cs137 20Ci Meas. range: 4.5-75mm
Width gauge	EXATEST	1	Type: Radiation survey Accuracy: ±4.5mm
Strain gauge	I. H. I.	2	Type: Reflection survey
Hot leveller	I. H. I.	1	Type: 4-high reversal Numbers of rolls: W. R. 11, B. U. R. 54 W. R. dia. & pitch: 275φ×290mm Levelling pressure: Max. 1 580t Main motor capacity: 1 000kW
Automatic marking equipment	Nakayama	1	Type: Powder spraying Number of nozzles: 7

Table 2 Forging mill facilities at Mizushima Works

Facilities	Type	Description	Remarks
6 000t free forging press	4 column push-down type Hydraulic accumulator	Daylight 6 000mm Dimension (column to column) 4 900mm×2 200mm Max. press capacity: 7 500t by a pressure intensifier	With 150m·t manipulator
2 000t free forging press	4 column push-down type Hydraulic accumulator	Daylight 2 500mm Dimension (column to column) 2 120mm×1 120mm	With 40m·t manipulator
500t free forging press	4 column push-down type Hydraulic accumulator	Daylight 1 750mm Dimension (column to column) 1 090mm×680mm	With 15m·t manipulator
Radial ring rolling mill	RW 125-3 000 Oil pressure	Max. rolling diameter 3 000mm Max. rolling height 450mm Max. rolling weight 3 000kg	
Crane for forging	Overhead travelling crane	Max. load 300t etc.	
Reheating furnace	Car bottom type	Max. load 400t etc.	

3. 品質保証体制⁵⁾

品質保証 (Quality Assurance, QA) にはいろいろな定義があるように、その考え方と実際の体制についてもある程度の差があつて当然である。ただ原子力用鋼材についてはASMEの考えに支配され、日本の各社はほとんど同ヒシステムになっている。当社も、昭和48年に制定された ASME BOILER & PRESSURE VESSEL CODE Sec. III Div.1 NA3 700に従ったQA体制を確立した。水島製鉄所は炭素鋼と低合金鋼の厚板と鍛鋼品の材料供給者としての品質保証認定 (Quality System Certificate (Materials)) を昭和52年3月に受け、引続き昭和52年5月にはステンレス鍛鋼品についてもその認定を取得した。

当社の特色として、専任者を配した品質保証室 (QS室) が、品質管理部門とは独立に製鉄所長、副所長の下に位置づけられ、QA体制の確立と維持、文書管理、製造管理、QSプログラムの実行とその実施の監視の権限を有する点が挙げられる。QS室は受注検討から製作、出荷までのすべての段階で必要な査閲、監視、確認を行い、材料証明書 (C

MTR) を発行する。ただし、これは ASME B & PV CODE適用材の場合であり、原子力用以外の圧力容器用鋼材には、基本理念は共通しているが日本の現状に適合するよう修正された、別のQA体制が適用されている。両QA体制の大きな相違点は次のとおりである。

まずASME方式は製造事業所単位であるのに対し、日本の現状は、本社の管理、調整機能の下に複数事業所が位置づけられた全社システムである。受注検討、受注、製作仕様投入等のオーダーエントリーシステムが、本社を起点とし、本社主導型で組まれている。

もう一つの大きな相違は検査体制である。ASMEの独立検査方式に対し、日本では自主検査に大きく依存している。もちろん、当社も圧力容器用材料のような重点管理品種に対する専門検査職による全数または抜取再チェックや、対象によっては、全般的なバトリールチェックだけのものも含めたチェックシステムで補完された自主検査で品質が確認されている。その品質の基盤である製作技術標準をはじめとする諸標準の制定発行や、実施確認等の品質管理、材料証明書の発行などの業務については、ASME B&PV CODE適用材につ

いては QS 室が主管するのに対し、それ以外の材料についてはすべて管理部を主管部門としている。この点は国内他社と同様である。ただし、それぞれの製品品種に適した QA 体制そのものの策定、確立、維持については QS 室が主管していて、この独立した QS 室の存在効果は極めて大である。

4. 原子力用厚鋼板

4-1 原子炉圧力容器用鋼板

原子炉圧力容器用 SA533 Gr. B Cl.1 鋼や JIS SQV2A 鋼の当社における開発経過はあらまし次のとおりである。まず、昭和43年、50kgの実験室溶解の鋼塊による適正成分決定実験にはじまり、20t 中型鋼塊を用い実用板厚による母材基礎性能の把握を目的とした最適熱処理条件の確立実験を経て、6 000 t プレス (44年7月)、LRF (45年4月) などの極厚鋼板用設備の完成により、46年から大単重実用寸法についての本格的な実験が開始された。

高純低磷溶銑を使用した BOF-LRF という特色あるプロセスの採用による非金属介在物の減少、上広扁平鑄型無酸化下注による成分偏析の大幅軽減、6 000 t プレスによる十分な鍛造効果等により、不純物が少なく耐中性子照射脆化特性にすぐれ、かつ誘導攪拌精錬により靱性にもすぐれた板厚 250mm までの大単重鋼板製造技術が確立された。現在製作可能な鋼板の最大単重は 95 t である。昭和52年からは日本溶接協会原子力研究委員会の HST 小委員会の「原子炉圧力容器用超厚鋼材の安全性に関する試験研究」活動に供試鋼板を提出して参加した。国内の重工メーカーとの間で溶接試験、確性試験を行って、信頼性の確認を得ている。

破壊靱性についても活発な研究が行われており、特に、当社技術研究所の 8 000 t 大型引張試験機は、大型破壊靱性の研究に大いに活用されている。社外の委員会に関しては、前述の溶接協会 HST 小委員会のほかに、同協会の AFC 小委員会 JI 委員会、日本電気協会、原子力専門委員会の PF 部会および ASTM E24, 03, 04 Committees に参加し、積極的な研究活動が行われている。

4-2 原子炉格納容器用鋼板

原子炉格納容器用鋼板は Table 3 に示すように昭和45年、動力炉・核燃料開発事業団の高速実験炉 (常陽) に SA516 Gr. 60 を 1 500 t 納入したので皮切りに、現在までに 15 000 t 以上の納入実績を持っている。特に注目されるのは、最近の格納容器の大型化への対処である。すなわち、次の要請、

(1) PWR 用では ASME Code Case 1714 (1975) を準用して、今までの応力除去焼鈍 (SR) なし許容板厚上限 38mm を超え、我が国でも 45mm まで SR なしで SGV49 を使用したい、

(2) BWR 用では SPV50 すなわち調質 60kgf/mm² 級高張力鋼 (調質 60 HT と略す、以後同様) にレベルアップして板厚減少をはかりたい、
という二点の採択可否に関する確性試験が、発電用熱機関協会の原子炉格納容器用材料確性試験技術検討委員会の P 分科会と B 分科会にわかれてそれぞれ行われ、当社も供試鋼を提出して参画した。その結果、それぞれ当該使用条件での安全性が十分認められた。その結果、特に SPV50 については、東京電力第2福島発電所で、我国で初の調質 60 HT を用いた格納容器材料として当社の製品が採用されている。この種材料の高拡張力化、厚肉化は強度と靱性という排反因子の双方を満足させるところが肝要点であり、当社の調質鋼に対する技術力の蓄積は、格納容器の貫通部材等を使用される SPV50 の 70mm 厚鋼板についても実製品について NDT 温度 -50℃ と、-8℃ における限界 COD 1.3 mm 以上の確保という結果に結実している。Fig. 7 に SPV50 鋼の母材および溶接継手の脆性破壊発生に関する限界応力-温度曲線を示す⁶⁾。また、これらの SGV49 および SPV50 鋼は、高温構造強度研究組合の「飛来物体に対する耐衝撃性に関する研究」用供試材としても使用されている。

なおまだ実際の格納容器には使用されていないが、昭和49年三菱重工業㈱の提唱により、A543 Gr. B Cl. 1 鋼 (Ni-Cr-Mo 低合金調質鋼) の格納容器への適用可否についての確認試験が、新日本製鉄㈱材料と当社材料を用いて行われ、SGV49 にくらべて十分優れた特性を示すことが立証されており、70 HT へのレベルアップに直ちに対応でき

Table 3 Production performance of plates for nuclear reactor containment vessels

Year	Contractor	Owner	Station name	Reactor type	Location	Material	Thickness (mm)	Weight of plates (t)
1970	IHI	Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corp.	Joyo	FBR	Oharai	SA516 GR.60	14-100	1500
1971	IHI	The Chubu Electric Power Co., Inc.	Hamaoka 1	BWR	Hamaoka-cho	SA516 GR.60	10-105	1500
1971	MHI	The Kansai Electric Power Co., Inc.	Takahama 2	PWR	Takahama-cho	SA516 GR.70	19	120
1971	MHI	The Kansai Electric Power Co., Inc.	Ohi 1	PWR	Ohi-cho	SGV42	6-32	1650
1973	IHI	The Chubu Electric Power Co., Inc.	Hamaoka 2	BWR	Hamaoka-cho	SGV49	10-105	1500
1973	MHI	Shikoku Electric Power Co., Inc.	Ikata 1	PWR	Nishiuwa-gun	SGV49	6-38	950
1974	IHI/PDM	Export	—	—	—	SA537 Cl. 1	12.7-50.8	300
1975	IHI/PDM	Export	—	—	—	SA516 GR.60	6-19	2500
1976	MHI	Kyushu Electric Power Co., Inc.	Genkai 2	PWR	Genkai	SGV49	6-38	1000
1977	MHI	Shikoku Electric Power Co., Inc.	Ikata 2	PWR	Nishiuwa-gun	SGV49	12-35	660
1978	HITACHI	The Tokyo Electric Co., Inc.	Fukushima 2-2	BWR	Futaba-machi	SGV49/SPV50Q	16-100/16-70	2100/750
1979	MHI	Kyushu Electric Power Co., Inc.	Sendai 1	PWR	Sendai-shi	SGV49	12-38	1900

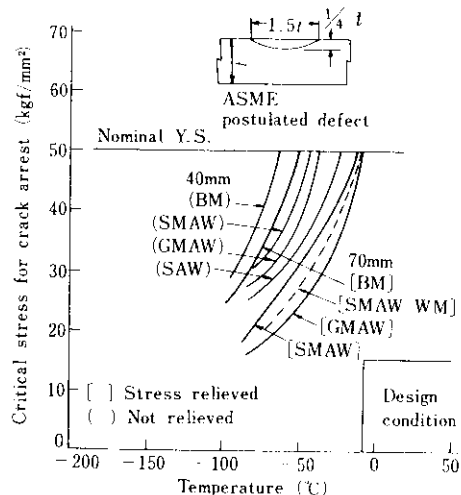


Fig. 7 Temperature dependence of critical stress for crack arrest of base weld and weld joint of SPV50 steel

る状態にある。

5. 圧力容器用厚鋼板

5.1 Cr-Mo鋼板

中・高温で使用される化学プラント圧力容器用鋼板として、Cr-Mo鋼板が、耐水素脆化とクリープ特性に特にすぐれたものとして重宝、多用されているが、近年その焼戻し脆性が特に大きな問題として論議されている。低Si化が有効であることは数多くの報告があるが、当社でもこの問題の究明に多大の精力を投入し基礎データの把握および対策究明については十分な成果を得ている。詳細は本特集号の個別論文に譲るとして、低Si化は高温

短時間強度の確保に問題があり、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼では通常Si量のままで、極低磷化が効果のあることをつきとめ、実用鋼に適用している⁷⁾ Fig. 8 および9は $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼の焼戻し脆化におよぼすSiおよびPの影響を示す図である。図中の直線の左下の範囲が、焼戻し脆化量として遷移温度の上昇($\Delta_v T_s$)が 20°C 以下となる成分範囲を示している。また脆化元素として、Pの他にSb, Sn, As等も有害であることは良く知られており、ここでも不純物元素の少ないBOF-LRFまたはBOF-RH法の有利性が強調されよう。Table 4は各種製鋼法による不純物含有量の比較例である。

5・2 高温高強度鋼板

最近の各種化学工業のめざましい発展に伴ってクリープを考慮しなくてもよい常・中温域で使用される、化学プラント用压力容器の需要が急速に

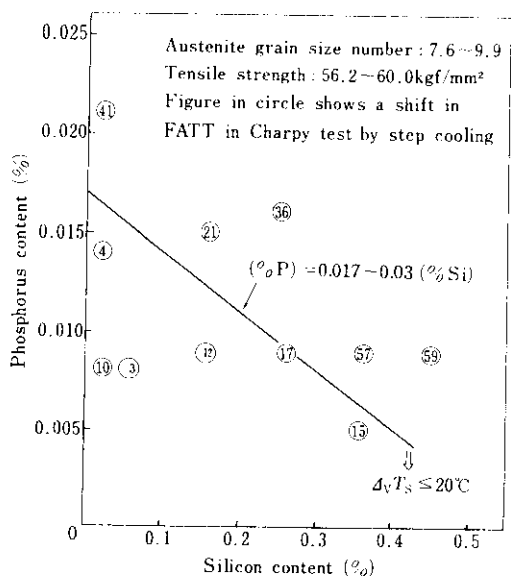


Fig.8 Effects of phosphorus and silicon contents on susceptibility to temper embrittlement of $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ steels

Table 4 Examples of impurity content in steels of several steelmakers

Steel-maker	Steel grades	Refining processes	P	Sn	Sb	As
A	Carbon steel Alloy steel	OH, EF	0.006~0.036	0.007~0.065		
B	Ni-Cr-Mo-V high pressure nuclear rotor		0.006~0.010	0.008	0.0006~0.0080	0.005
C	25 Ni-Cr-Mo-V	BOF	0.006~0.009	0.005~0.011	0.0013~0.0020	0.003~0.012
	14.5	EF	0.007, 0.008	0.012, 0.013	0.0036, 0.0034	0.0013, 0.0013
D	Ni-V-Mo generator rotor	EF	0.009 (0.009~0.013)			
	Ni-Cr-V-Mo turbine rotor	EF	0.009 (0.007~0.011)	0.01 (0.01)	0.0008 (0.0007~0.0011)	0.01 (0.01)
E	$3\frac{1}{2}\%$ Ni-Cr-Mo-V		0.006~0.010	0.007~0.013	0.002~0.004	0.018~0.031
F	SA508 Class 2	EF	0.006 (0.006~0.007)	(0.001~0.002)	(0.003)	(0.005~0.006)
	A336-F22	EF	0.008 (0.008~0.009)	(0.007)	(0.0006~0.0018)	(0.006~0.011)
G	2.8% Ni-Cr-Mo-V	EF	0.006 (0.005~0.009)	0.010 (0.005~0.013)	0.0019 (0.0017~0.0022)	0.010 (0.006~0.016)
H	2.8% Ni-Cr-Mo-V		0.007, 0.003	0.002, 0.003	0.0014, 0.0039	0.002, 0.003
I	$2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$	BOF-RH	0.009	0.001	0.002	0.003
J	Low Alloy Steel	BOF-LRF	0.003~0.012	<0.002	<0.002	0.002~0.003

J: Mizushima Works, Kawasaki Steel Corporation
(): Check analysis

増加しているが、わが国の圧力容器の法令および規格はASME B & PV CODE Section V III Div.1を基本としていて高応力設計ができず、Div.2を適用できる米国や、とくに降伏点基準の設計に豊富な実績をもち高応力設計が行われているヨーロッパ、なかでもドイツとの競合で、非常に不利な立場に立たされることが多い。そこでわが国でも高応力設計を可能ならしめるため、特定圧力容器構造規格制定に向って、日本工業標準調査会、圧力容器専門委員会の活動が行われている。

この特定圧力容器構造規格に対応した新鋼材の開発は、当初各スチールメーカー個別に始まり、当社でも主要ファブリケータ数社と共同で千葉大学鶴岡口教授を委員長としてHTY委員会を組織し、この種鋼材の開発を行った。350°Cにおける降伏強さが25kgf/mm²以上を保証するKHY25と、同じく35kgf/mm²以上を保証するKHY35をMo-V-Nb系鋼で実用化したが、各社のこれら鋼種の試験結果が、その後日本溶接協会の「常・中温用圧力容器用溶接構造用鋼材規格作成委員会(略称PMS委員会)」で制定した日本溶接協会の鋼材規格作成時に採り入れられた。また、当社の場合はこのシリーズの他にTÜV, BHW35 (Mo-Ni-Cr-Nb系)およびWB 36 (Mo-Ni-Cu-Nb系) 鋼についても、石川島播磨重工(株)殿と共同確性試験を行い、製造条件を確立している⁸⁾ Fig. 10にKHY35の高温引張試験結果を示す。

高温高強度鋼の一連の研究の中で特筆されることは、フェライト(α)とオーステナイト(γ)が共存するいわゆる2相域で熱間加工を行った場合の熱間加工とその後の熱処理による各種圧力容器用鋼の特性変化についての詳しい知見が得られたことである⁹⁾。

熱間加工シミュレーション実験によれば、

(1) 熱間加工後の空冷による組織がペーナイト組織となるような、いわゆる普通鋼よりやや焼きが入りやすい材料、たとえばA302-BやA387-12の場合、($\alpha+\gamma$)域の中間温度以上で加工し、つづいて応力除去焼鈍(SR)のみを施したものは、Fig. 11に一例を示すように、 γ 域加工後SRを施したものよりも高靱性を示す。そしてこの特性は、母材や、加工後再び焼ならしとSRまたは焼もどし処理したものにくらべて、より優れている。

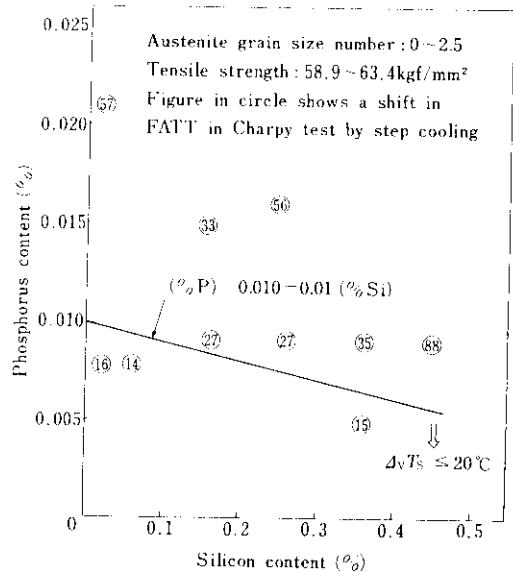


Fig.9 Effects of phosphorus and silicon contents on susceptibility to temper embrittlement of 2%Cr-1Mo steels treated with higher austenitizing temperatures

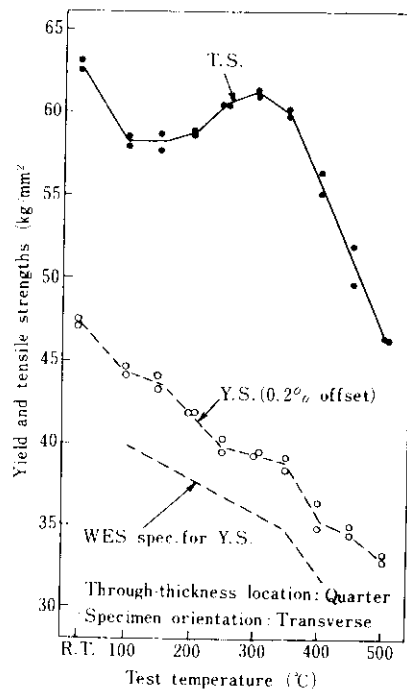


Fig.10 Short time tensile properties of 75mm thick KHY35 steel plate at elevated temperatures

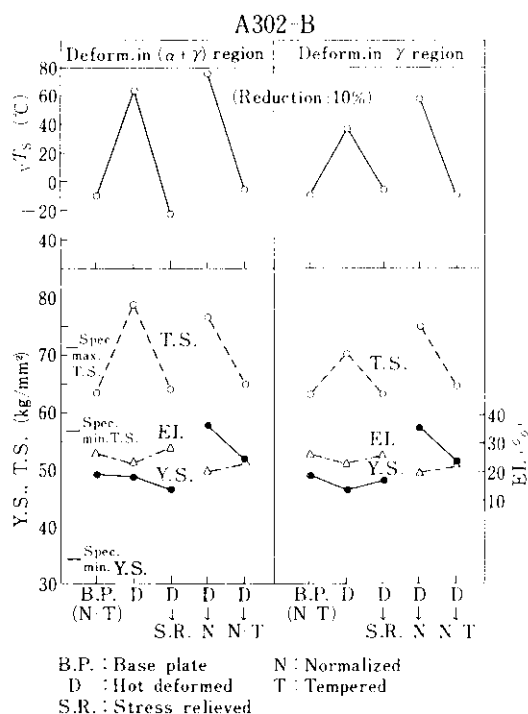


Fig.11 Comparison of tensile and impact properties between two ranges of deformation temperatures, γ vs. $(\alpha + \gamma)$

(2) 熱間加工後の空冷で、フェライト＋パーライト組織を示すような焼入性の低い鋼種、たとえば 516 70 の場合、同様の $(\alpha + \gamma)$ 域加工のままの靱性は、母材のそれよりもやや高く、 γ 域加工材とはほぼ同等である。

という結果が得られた。このような事実が現場加工材でも証明されれば、熱間加工時の加熱温度を従来より低減できること、加工後の再焼ならしの省略ができること等、ファブリケータにとっても大きなメリットがもたらされることになる。このような観点から、現在、実物大の鏡板を熱間プレスと熱間スピニングの両方法により、各種の鋼について各種条件での確性試験が行われている。その結果の詳細については本特集号の個別論文に譲るとして、上記シミュレーション試験と実物試験で若干の差があるものもあるが、一部鋼種では再焼ならし省略可能を裏付けるデータも得られつつある。

5.3 低温用鋼板

当社の低温用鋼は Fig. 12 に示すように、使用温度に応じて、各種強度レベルのものが製造されている。低炭素アルミキルド鋼 (KI シリーズ)、調質鋼 (River Ace-L シリーズ)、高ニッケル鋼 (KLN シリーズ) にわかれていた。詳細は低温用鋼特集号¹⁰⁾および本特集号の個別論文に譲るが、ここでは次のトピックスを紹介しておく。

9% Ni 鋼は通常は電気で溶製されているが、当社では早くから転炉による溶製技術確立した。各需要家で各種確性試験を行っていただき、転炉製 9% Ni 鋼の優秀性の確認を得ている。これらの実験の中には、需要家における加工の際に入熱量が過大になった場合や、手直し溶接が度を過ぎて反復された場合に生ずる可能性のある問題についての確性も含めている。Table 5 はその試験結果の一例である。立向被覆アーク溶接で、47.0 および 56.9 kJ/cm の過大入熱になった場合でも、 -196°C でのシャルピー V ノッチ試験における脆性破面率が 0 であるという結果が示されている。

もう一つの話は制御圧延 (CR) 材に関するものである。厚板の高張力化、高靱性化の要求はいきおい CR 技術の進歩を促したが、中でも近年の天然ガス輸送ラインパイプ材の量産は特にあずかって力が大きい。制御圧延の概念は Fig. 13 に示されるが、含 Nb 鋼は特に CR による細粒効果が顕著である。本来焼ならしを指定される材料でも、同等のシャルピー特性さえあれば焼ならしを省略した CR 材を用いてもよいことを最初に規格化したのは船級協会規則である。しかし、これは船殻用鋼板に限定され、かつ適用圧延温度範囲も Fig. 12 の「軽い制御圧延 (CR)」までであった。一方、ラインパイプ用鋼板では図の Ar_3 をさらに下回った「厳しい制御圧延 (SCR)」までを含んでいる。造船関係では、最近 CR 材の適用範囲を更に拡大し、LPG 船の二次防壁部材にも適用しようとしており、低温圧力容器自体への CR 材適用に一步近づいている。低温圧力容器加工業界ではこの動きを契機として、低温圧力容器への CR 材適用と、さらには普通圧延＋焼ならし材より優れた CR＋焼ならし材のより低温への適用が認められるようにしたいとの動きが活発である。

Table 5 Charpy impact test results of 20mm thick steel plates at welded parts with too heavy heat input

Position of notch	Test temp. (°C)	Heat input kJ/cm					
		47.0			56.9		
		Absorbed energy (kg·m)	Lateral expansion (mm)	Crystallinity (%)	Absorbed energy (kg·m)	Lateral expansion (mm)	Crystallinity (%)
W. M.	196	6.4	1.32		5.8	1.25	
		6.4	1.48	0	6.0	1.40	0
		7.0	1.07	0	6.6	1.43	0
	ave.	6.6	1.29	0	6.1	1.36	0
		6.8	1.38	0	6.2	1.00	0
		7.7	1.58	0	5.8	1.57	0
	-170	6.4	1.46	0	5.8	1.35	0
		7.0	1.49	0	5.9	1.31	0
		7.7	1.74	0	7.7	1.22	0
	-100	7.7	1.62	0	5.4	0.96	0
		7.0	1.58	0	5.6	1.15	0
		7.5	1.65	0	6.2	1.11	0
Bond	196	9.0	1.45		6.4	0.98	
		7.4	1.14	0	8.6	1.25	0
		9.4	1.08	0	8.2	1.25	0
	ave.	8.6	1.22	0	7.7	1.16	0
		10.9	1.72	0	8.4	1.12	0
		8.6	1.23	0	8.6	1.17	0
	-170	8.4	1.20	0	7.0	1.13	0
		9.3	1.38	0	8.0	1.14	0
		10.4	1.58	0	9.8	1.43	0
	-100	10.0	1.51	0	7.4	0.96	0
		10.7	1.80	0	8.4	1.15	0
		10.4	1.60	0	8.5	1.18	0
HAZ (center)	196	20.7	1.88		17.0	1.53	
		14.2	1.42	0	14.2	1.33	0
		17.9	1.45	0	14.0	1.46	0
	ave.	17.6	1.58	0	15.0	1.41	0
		22.2	1.88	0	20.3	1.73	0
		23.6	2.05	0	16.7	1.80	0
	-170	16.5	1.69	0	17.9	1.82	0
		20.8	1.87	0	18.3	1.78	0
		20.7	1.91	0	23.4	2.22	0
	-100	26.0	2.12	0	15.6	1.67	0
		23.4	2.12	0	20.5	2.16	0
		23.4	2.05	0	19.8	2.02	0
HAZ (adjacent to base metal)	196	22.9	2.17		28.1	2.22	
		22.4	2.23	0	24.8	2.30	0
		22.4	2.17	0	24.6	2.27	0
	ave.	22.6	2.19	0	25.8	2.26	0
		21.4	2.36	0	24.1	2.46	0
		23.4	2.18	0	26.0	2.42	0
	-170	22.2	2.30	0	25.3	2.31	0
		22.3	2.28	0	25.1	2.40	0
		25.3	2.47	0	25.3	2.53	0
	-100	26.5	2.23	0	29.3	2.42	0
		26.2	2.31	0	32.5	2.58	0
		26.0	2.34	0	29.0	2.51	0

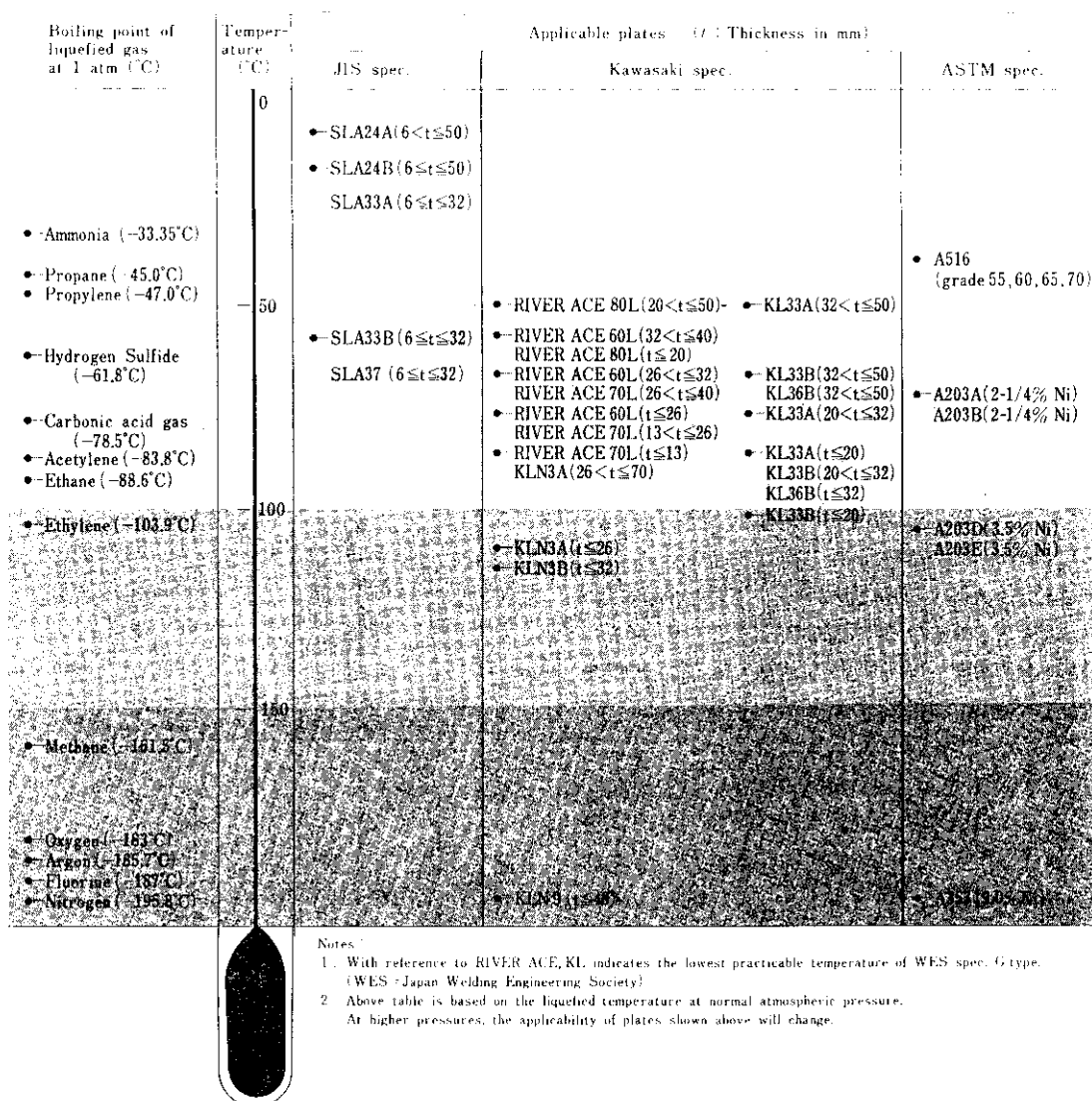


Fig. 12 Steel plate specifications applicable for liquefied gas containment

5・4 圧力容器用調質鋼板

当社の調質高張力鋼, River Ace シリーズの成分規格を Table 6 に示す。規格記号の数字は引張強さ (kgf/mm²) の下限値を表している。末尾の A は低溶接われ感受性鋼, いわゆるクラックフリー鋼で, M は Ni 入り, N は Ni 無しを意味する記号である。大入熱溶接に対処して, 熱影響部の靱性確保のため, 当社では低 C - 低 N - 低 B を成分設計の骨子としているが, Fig. 14 は 80HT の溶接熱サイクル再現試験ボンド相当部の vT_s によらず

B 量の影響を示しており, N を約 30ppm 以下に, B_{total} を 7~8ppm にすることが, ボンド部の靱性確保に最も効果のあることを表している。

6. 原子力用および圧力容器用鍛鋼

6・1 原子力用鍛鋼

当社における原子炉圧力容器用鍛鋼品の開発は前述の厚板と同じく昭和 45 年より開始され, 520 MWe 級 BWR のフランジおよびノズルの実物大鍛

Table 6 Chemical composition of RIVER ACE series steel plates

Designation	Chemical composition												C_{eq}^{*} Max.		P_{CM}^{**}						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Cr	Mo	V	B	$t \leq 50\text{mm}$	$50\text{mm} < t \leq 100\text{mm}$	Max.							
	max.			max.	max.					max.	max.										
RIVER ACE 60	0.16	0.15 --0.55	1.50 max.	0.030	0.030	Ni, Cr, Mo, V and other element may							0.44	0.48							
RIVER ACE 60A	0.09	0.15 --0.55	1.20 2.00	0.030	0.025	be added, if necessary							0.42	0.46	0.20						
RIVER ACE 60AN	0.09	0.15 --0.55	1.20 2.00	0.030	0.025	—	Cr, Mo, V and other elements may be added, if necessary							0.42	0.46	0.20					
RIVER ACE 62	0.16	0.15 --0.55	1.50 max.	0.030	0.030	1.00 max.	Cu, Cr, Mo, V and other element may be added, if necessary							0.45	0.49						
RIVER ACE 62A	0.09	0.15 --0.55	1.20 2.00	0.030	0.025	0.75 max.													0.42	0.46	0.20
RIVER ACE 62AN	0.09	0.15 --0.55	1.20 2.00	0.030	0.025	—													0.42	0.46	0.20
RIVER ACE 70	0.16	0.15 --0.35	1.20 max.	0.030	0.030	1.00 max.	0.40 max.	0.70 max.	0.50 max.	0.08	0.005	0.54	0.58	—							
RIVER ACE 72	0.16	0.15 --0.35	1.20 max.	0.030	0.030	1.00 max.	0.40 max.	0.70 max.	0.50 max.	0.08	0.005	0.55	0.59								
RIVER ACE 72M	0.15	0.15 --0.35	0.60 1.20	0.030	0.030	0.30 1.20	0.40 max.	0.20 --0.70	0.20 --0.50	0.08	0.005	0.52	0.56	—							
RIVER ACE 72N	0.16	0.15 --0.35	0.60 1.20	0.030	0.025	—	0.40 max.	0.70 max.	0.50 max.	0.08	0.005	0.52	0.56								
RIVER ACE 80	0.16	0.15 --0.35	1.20 max.	0.030	0.025	1.50 max.	0.50 max.	0.80 max.	0.60 max.	0.08	0.005	0.57	0.61	—							
RIVER ACE 80M	0.15	0.15 --0.35	0.60 1.20	0.030	0.025	0.30 1.50	0.20 --0.50	0.40 --0.80	0.20 --0.60	0.08	0.005	0.54	0.58	—							
RIVER ACE 80N	0.16	0.15 --0.35	0.50 1.20	0.030	0.025	—	0.50 max.	0.10 --0.80	0.10 --0.60	0.08	0.005	0.57	—	—							
RIVER ACE 100	0.18	0.15 --0.35	0.30 1.20	0.030	0.025	2.00 max.	0.70 max.	0.10 --0.80	0.10 --0.80	0.10	0.005	0.60		—							

* Carbon equivalent is calculated by following formula $C_{eq} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}$ (%)

** Weld cracking parameter (P_{CM}) is calculated by following formula

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (\%)$$

For plate having thickness of 50mm maximum, P_{CM} may be specified instead of C_{eq}

鍛鋼をSA508 Cl.2で製作し、切り刻んでの諸確性試験を満足な成果を得て終えた。その後SA508 Cl.2が再熱ワレ感受性対策としてSA508 Cl.3に成分変更して使用されるようになったことに伴いこれに対応する研究開発が進められ、現実はこの鋼種でアンモニア反応容器の胴およびノズル用鍛鋼を受注し、製造実績を積んだ。昭和53年春、いよいよ800MWe級BWRの実物大模型による確性試験を行うことになり、フランジおよび一体型ボトムヘッドドームの製造を行った。トップヘッドフランジは使用鋼塊重量165tで、LRFの容量が

100tのため、BOF-LRFとBOF-EF-LRFの併せ湯による菊型鋼塊を用いて鍛造された。加工寸法は $\phi 6260 \times \phi 5190 \times 1080$ で、Photo.1にその成品の外観を示す。ボトムヘッドドームは前述の極厚板専用上広偏平115t鋼塊を使用し、まず鍛造機械加工により $t200 \times \phi 6700$ の円板を製作し、これを上型は総型、下型はリング形状型としてプレス成形した。成形の途中工程をPhoto.2に示す。この方法は下型を総型とした部分押し繰返し成形にくらべ、鍛練・成形の均一性、再現性にすぐれていると考えられる。フランジ、ドームともに、

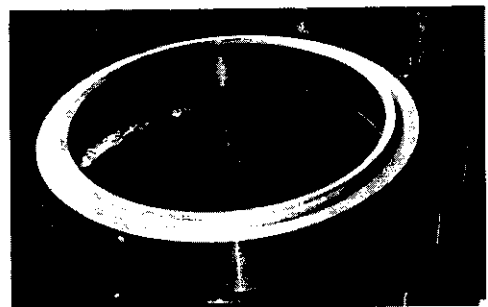
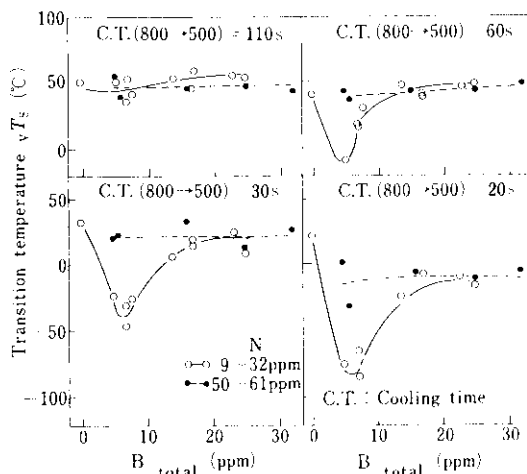
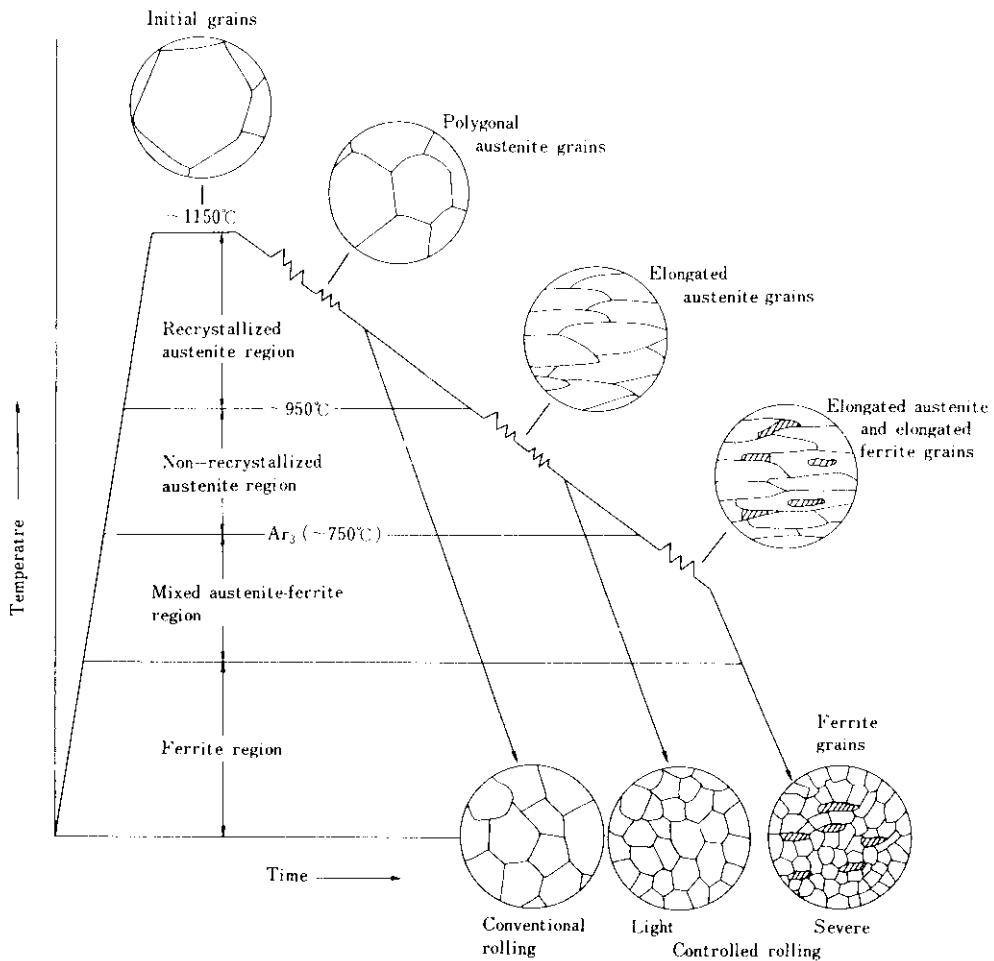


Photo.1 View of top head flange

両表面近傍、板厚方向各部位と円周方向各部位および主鍛造方向(L)、これと直角な方向(C)、または直径方向(R)、これと直角な方向(T)の各特性方向について、完成品の強度・靱性・疲労特性破壊靱性などに関して徹底的な確性試験を行っ



Photo. 2 Forming of bottom head dome

た。その結果、成分偏析の少なさはいうまでもなく確認されたほか、肉厚が厚いので厚さ方向については冷却速度の差に起因する若干の特性差はあるものの、同一厚さ位置での円周部位ごと、方向ごとの差が極めて小さく、靱性に優れた成品であることが立証されている。詳細については本特集号の個別論文を参照されたい。

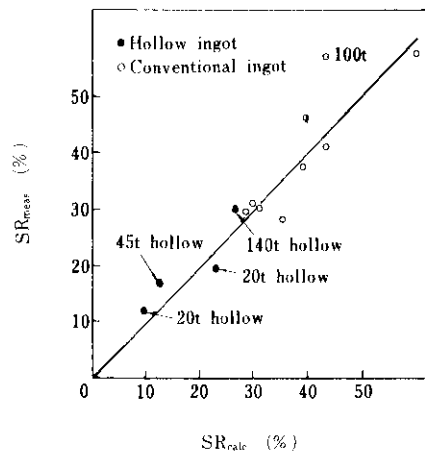
6.2 圧力容器用鍛鋼

圧力容器用鍛鋼としては、管板、胴板、ノズルフランジ等を普通炭素鋼から合金鋼まで幅広く製造している。特にCr-Mo系では $\frac{1}{2}$ Mo鋼から9Cr鋼まですべてのグレードについて納入実績があり、材質特性、製造技術についての蓄積がある。9Cr鋼は、SA182F9で熱交換器材のチャンネルとして60t鋼塊を鍛造して製作・納入した。Cr-Mo鋼の焼戻し脆性については厚肉鍛鋼ならびに厚板についての研究成果を併せ、広汎な視野から研究が進められている。現状の対策は、不純物の減少、低Si化オーステナイト粒度の調整、適正な焼戻し条件の設定で対処している。Ni-Cr-Mo鋼については、前項で述べたSA508 Cl. 3の実績のほかにSA508 Cl. 4についても高圧水槽部材として、90t鋼塊から製造した鍛鋼品の納入実績があり、その際十分な試験材余長を用いて、詳しい確性試験が行われている。

6.3 中空鋼塊による圧力容器用鍛鋼

円筒状鍛鋼品を製造する場合、中実鋼塊を据込んで軸芯部をポンチで打抜いた後、穴ひろげまたは締付けを行うのが普通であるが、この方法では多数回の加熱・鍛造の工程を必要とし、かつ製品に対する鋼塊歩留りが一般に低いという問題があ

る。中空鋼塊を使用するとこの問題は解決される。しかし、従来からその製造についての数多くの方法が提案されながら実用化に至っていなかった。最近、当社では特に鋳型中央に置かれる中子に工夫をこらし、単重140tまでの中空鋼塊の製造に成功した。中空鋼塊は、製品歩留りを高められることのほかに鋼塊凝固厚さが通常の菊型大型鋼塊よりも薄いため成分偏析がいっそう少ないという利点を有する。Fig. 15は実績および計算式により、この利点を裏付けたデータである。今後この中空鋼塊の利点を圧力容器用鍛鋼にも十分に活用して行きたい。



$$SR_{meas} (\%) = 100 (C_{max} - C_0) / C_0$$

$$SR_{calc} (\%) = 0.9D_1 \cdot f(C) + 5.46H$$

$$f(C) = 2.81 + 2.89[\% Si] + 805.8[\% S] + 235.2[\% P] \\ + 9.2[\% Mo] - 3.82[\% V]$$

C_0 : Carbon content by ladle analysis (%)

C_{max} : Maximum carbon content within ingot (%)

D_1 : Mean diameter of ingot (m)

H : Body height of ingot (m)

Fig. 15 Comparison of segregation ratio, SR, of carbon in forging ingots between measured and calculated values

7. 溶接材料

7.1 Cr-Mo鋼用溶接材料

当社が製造している中・高温圧力容器用溶接材料の銘柄をTable 7に示す。このうち、特にCr-Mo

Table 7 KSC welding materials for pressure vessels
(intermediate and high temperature service)

Base steel	SMAW	SAW	
1/2 Mo	KST-05B	KF-410	KW-40C
1 1/2 Cr-1/2 Mo	KST-105B	KF-410	KWT-105
2 1/2 Cr-1 Mo	KST-210B	KF-410	KWT-210
3 Cr-1 Mo	KST-310B	KF-410	KWT-310
5 Cr-1/2 Mo	KST-505B	KF-410	KWT-505

鋼の溶接材料については、焼戻し脆性の問題が母材以上に極めてやっかいであり、研究開発には多大の労を要している。Fig. 16に、2 1/2 Cr-1 Mo 鋼溶着金属の引張強さと靱性におよぼすSi, Mn量の影響を示す。SiはMnに比し微量の変化で強度を急激に高めるが、0.3%近辺を頂点として、それよりわずかに増量するだけで、極端に靱性を低下させることが明らかである。当社では、この種の溶接材料のSi量として溶着金属で0.35%程度を目標としている。Cr, Moについてはフラックスから入れる量を多くすると偏析の問題があるので、被覆アーク棒、サブマージドアーク溶接の芯線とも母材並のCr, Moを含有させている。なおこの種溶接材料では、この他に、粗大フェライトバンド出現のメカニズムの究明に力を注いでいる。

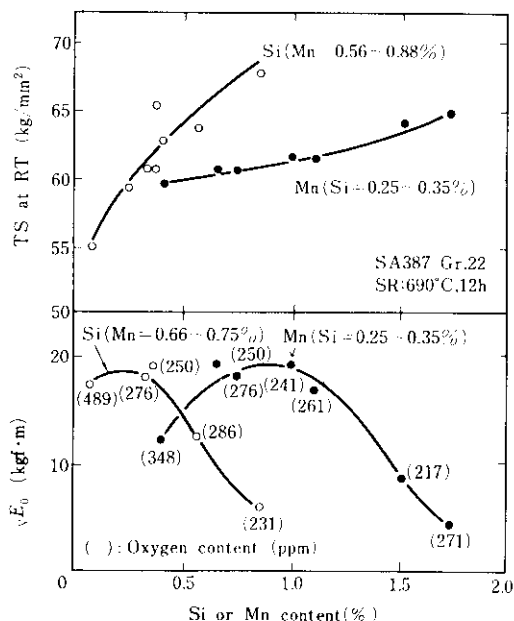


Fig.16 Effect of Si and Mn contents on toughness and tensile strength of 2 1/2 Cr-1 Mo steel weld metal

7-2 MAGLAY法(縦磁場を重畳したESWバンド肉盛溶接)の開発

化学反応容器、原子力圧力容器などの内面は、耐食性を得るためにSUS308, SUS347などのステンレス鋼が内張りされるが、鋼板板厚が40mm以下の場合には経済的見地から圧延クラッド、爆着クラッド鋼板が用いられることが多い。一方、板厚が50mm超の厚物ではほとんど、溶接による肉盛りクラッド鋼が使用される。現在肉盛り溶接の主流はSAWバンド溶接であるが、従来方法では電極幅75mm以下、とけ込み率15~20%程度で、しかも継目部を含むビード面の平滑度に問題があった。ところが当社が最近開発した、熱源としてスラグのジュール発熱を利用するESW肉盛りMAGLAY法によれば、とけ込み率を10%程度に低減でき、かつ使用可能な電極幅が150mmまで拡大し、さらに外部磁界の導入により溶融スラグ・メタルの流動をコントロールしてビード継目部のアンダーカットなどの不整を改善できる。Fig. 17に原理図、Photo. 3にビード重ね部を含むマクロ写真を示す。本法に対するファブリケーター各位の関心は極めて高く、急速な普及が期待されている。

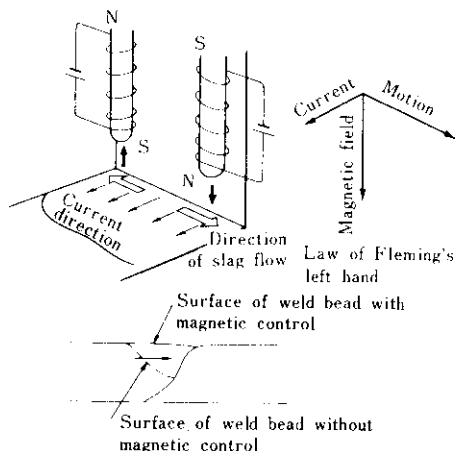


Fig.17 Control of slag flow pattern and improvement of flatness of weld bead surface with outer magnetic field

8. むすび

以上、当社の原子力用および圧力容器用材料の

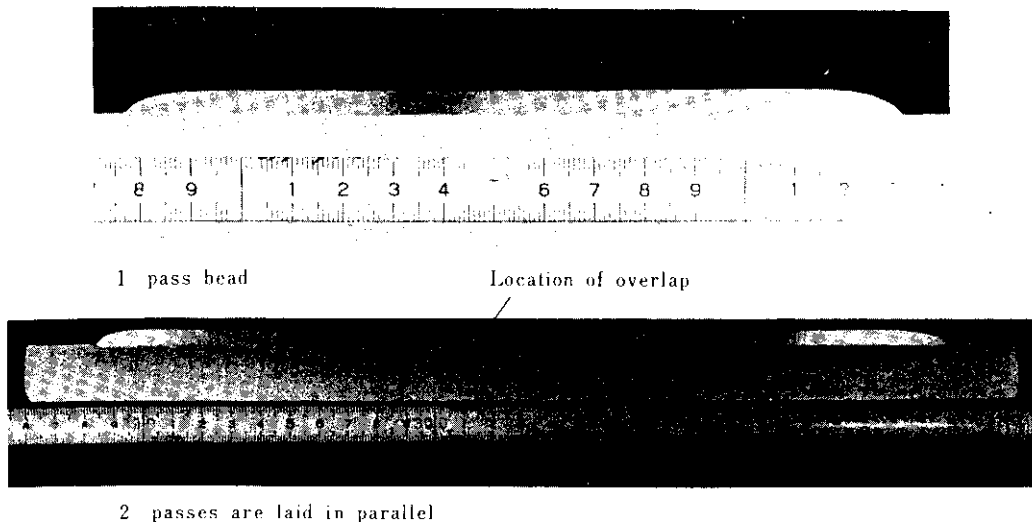


Photo.3 Examples of transverse section of weld head

現状について概要を紹介した。限られた紙面に多くを述べる余裕もないため、興味を持たれた項目については、是非、本特集号の個別論文を参照願いたい。鋼管に関する紹介はここでは省略したが、原子力用および圧力容器用材料ということであれば、当社にはパイプ製造専門工場として世界に誇れる知多製造所があり、シームレス管は $\frac{1}{2}$ インチ径から16 $\frac{1}{2}$ インチ径まで、電縫管は $\frac{1}{2}$ インチ径か

ら26インチ径までを製造している。中間サイズ用に $\frac{1}{2}$ Bから4インチ径までの冷けん設備も持っている。千葉製鉄所には20インチ径から64インチ径までのUOEミルがあるほか、板捲き管18インチ径から126インチ径までを製造するベンダー設備を有して、16インチ径から80インチ径までのスパイラルシーム管と併せ、パイプ製造設備は全社で充実完備していることを付言しておきたい。

参 考 文 献

- 1)西岡，江本：鉄と鋼，**60**（1974）12，1661 ほか
- 2)中西，三本木：鉄と鋼，**65**（1979）1，138 ほか
- 3)柳沢，三芳：川崎製鉄技報，**8**（1976）3，54 ほか
- 4)川崎製鉄(株)技術資料「川鉄の圧力容器用鍛鋼品」（1978 Jul.）
- 5)斎藤：川崎製鉄技報，**9**（1977）3・4，100
- 6)飯田ほか：火力原子力発電，**30**（1979）273，629 ほか
- 7)川崎製鉄(株)技術資料，「 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo耐焼戻し脆化鋼の研究」，（1979 Jul.）
- 8)石川島播磨技報，**19**（1974）4，202
- 9)石川，上田，大橋：鉄と鋼，**64**（1978）11，S772，S773 ほか
- 10)川崎製鉄技報，**3**（1971）2