

9Cr-1Mo-V 鋼製プロセス機器の製造技術確立

Establishment of Fabrication Technology for Process Equipment Made of 9Cr-1Mo-V Steel



安部 正光	Masamitsu Abe	①
篠田 薫	Kaoru Shinoda	②
楠 和憲	Katsunori Kusunoki	③
合田 明人	Akito Gouda	③
長尾 圭一朗	Keiichiro Nagao	④
竹中 俊哉	Toshiya Takenaka	②

あ ら ま し

当社は、石油精製プラント向け脱硫リアクターなどに用いられる $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo-V鋼製プロセス機器の製造実績を多く有している。今後、高温で使用可能な機器の需要が増大すると考えられるために、優れた高温強度、クリープ特性と耐酸化性を持つ9Cr-1Mo-V鋼の試験および技術的検討を行った。試験の結果、機器製造時に課題となる、切断、鋼板曲げ、予熱、溶接条件および熱処理条件について適切な施工要領が得られた。これら施工要領をもとに板厚160mm、内径2500mm、高さ1900mmの鋼板製円筒胴と鍛造ノズルで構成されるモックアップを製作した。

Abstract

Hitachi Zosen has a great deal of experience in fabricating process equipment for the oil refining industry, such as reactors made of $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo-V steel. As demand is expected to grow in the future for process equipment which can be applied to higher temperature designs, we performed a technical study taking into account the adoption of 9Cr-1Mo-V steel with higher strength, creep properties and oxidation resistance at high temperatures. As a result, we obtained an appropriate procedure for addressing several challenges in process equipment fabrication, such as cutting, plate bending, preheating, welding conditions and heat treatment conditions. Based on the fabrication procedure obtained, we made a mock-up consisting of a cylindrical shell measuring 160mm in thickness, 2500mm in inner diameter and 1900mm in height, and forged nozzles.

1. 緒 言

石油精製プラントなどにおいて、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼や $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo-V鋼は、高温引張強度および耐水素侵食性の特性により高温高圧の水素環境にも耐えうるため、脱硫リアクターなどの機器構成材料として用いられている。近年、原油価格高騰のため、低質原油を使用したプラントの需要が見込まれるが、それに対応するためにはより

高温高圧での機器運転が必要となる。また、石油の代替燃料として高温強度材料を用いる石炭ガス化プロセス機器の需要拡大が予測される。

一方、地球温暖化を防ぐため二酸化炭素排出量を減らす対策としては、火力発電所の発電プラントを効率よく運転することが挙げられる。発電効率を高めるには、発電用蒸気タービンを回す蒸気の温度・圧力を高める必要があり、一例として蒸気のタービン入口温度600℃で圧力31MPaという条件で運転されている。ここで、主蒸気管や管寄せなどの厚肉で直径が大きい大型部材には、9Cr-1Mo-V鋼が採用されている⁽¹⁾⁽²⁾。この鋼種は、優れた高温強度、クリープ特性および耐酸化性を有しており高温高圧運転に適した選択となっている。

① Hitachi日立造船㈱ 機械・インフラ本部 プロセス機器ビジネスユニット 博士(工学)
 ② Hitachi日立造船㈱ 機械・インフラ本部 プロセス機器ビジネスユニット プロジェクト部
 ③ Hitachi日立造船㈱ 技術開発本部 機械・インフラ研究室
 ④ Hitachi日立造船㈱ 機械・インフラ本部 プロセス機器ビジネスユニット 設計部

本稿では、450℃程度までの高温高压機器に採用してきた $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼や $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo-V鋼に対し、さらなる高温高压運転に適した材料として9Cr-1Mo-V鋼の鋼板⁽³⁾⁽⁴⁾を採用した機器の製造に対する技術的検討および試験を行った結果を述べる。

2. 設計

2.1 プロセス機器の設計 9Cr-1Mo-V鋼は、従来型の低合金鋼である $1\frac{1}{4}$ Cr- $\frac{1}{2}$ Mo鋼、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo-V鋼に比べ、高温域において優れた引張強度およびクリープ特性を有している。この9Cr-1Mo-V鋼は、圧力容器の国際規格として最も認知されている米国のASME Boiler & Pressure Vessel Code Section VIII Division 2 (以下、ASME-VIII-2と記す)において使用が認められており、鋼板であるSA387Gr.91Cl.2 (以下、SA387-91-2と記す)の許容応力はASME Section II (以下、ASME-IIと記す)に**図1**のように規定されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

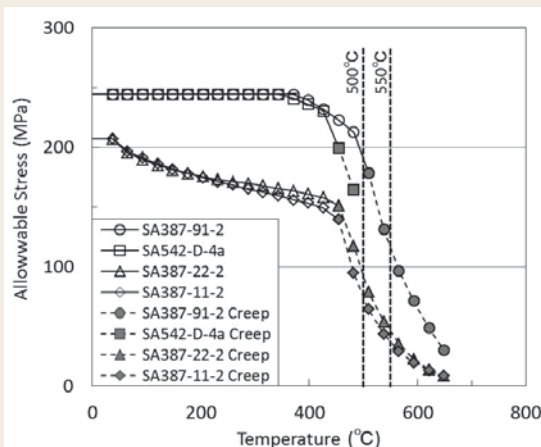


図1 ASME-VIII-2における許容応力 (US CustomaryをMetricに換算)

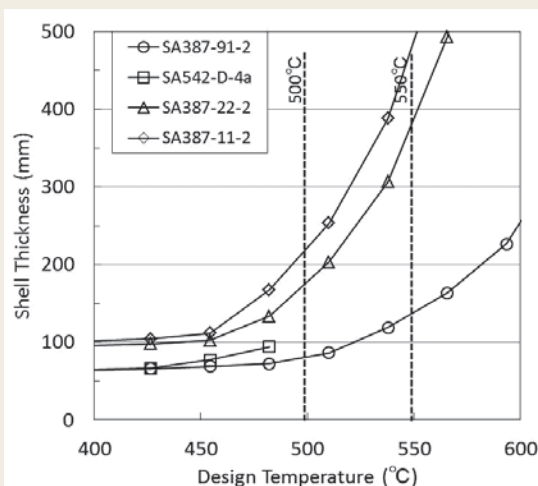


図2 圧力容器円筒胴板厚の一例 (円筒胴内径=3000mm, 設計圧力=10MPa)

9Cr-1Mo-V鋼は、500℃を超える高温域において、極めて高い許容応力を適用することが認められおり、593℃以上での許容応力は従来型低合金鋼に比べて3倍を超える。**図2**に9Cr-1Mo-V鋼および従来型低合金鋼を用いた機器の円筒胴をASME-VIII-2に従い設計した一例を示す。 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo-V鋼の使用が認められていない500℃を超える領域では、9Cr-1Mo-V鋼を使用する利点を最大に発揮することができ、その場合、従来型低合金鋼に比べて板厚を1/3以下に低減することが可能となる。これにより、機器の重量を飛躍的に低減でき、輸送コストおよび建設コストの大幅な低減を実現することができる。

2.2 ASME規格で必要とされるクリープ特性

ASME-IIにおいて、許容応力は、引張強さ、降伏強さおよびクリープ性能により定められており、その決定基準を**表1**に示す。ASME-IIにはクリープ特性が支配的となり許容応力が決定されている温度領域が明確に示されており、それらを**図1**に破線で示す。9Cr-1Mo-V鋼を使用する効果的な領域は500℃以上であるが、ASME-IIでは510℃より高い温度にてクリープ特性が支配的となり許容応力が決定されている。この決定基準により、9Cr-1Mo-V鋼に必要とされる10万時間クリープ破断強さを推定したものを**表2**に示す。これら推定値が、ASME-VIII-2にて設計される機器に使用する9Cr-1Mo-V鋼に必要とされるクリープ性能となる。

表1 圧力容器規格の許容応力基準

Code:	ASME-VIII-2
Tensile Strength: Room Temp.	1/2.4
Design Temp.	-
Yield Strength: Room Temp.	1/1.5
Design Temp.	1/1.5
10^5 h Creep Rupture Stress:	
Ave. Value at Design Temp.	×0.67
Min. Value at Design Temp.	×0.8
Creep Rate:	0.01%/10 ³ h
	×1.0

表2 必要とされるクリープ破断強さ(ASME)

Temperature (°C)	10^5 h Creep Rupture Stress (MPa)	
	Average	Minimum
510	266.6	223.3
538	195.5	163.8
566	144.0	120.6
593	106.0	88.8

3. 実験方法および結果

3.1 供試材 鋼板は、ASME規格の9Cr-1Mo-V鋼材であるSA387-91-2とし、板厚40mmおよび50mmのものを採用した。各鋼板の主要な化学成分を**表3**に示す。

表3 鋼板の化学成分 (wt %)

Thick.	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	V
40mm	0.11	0.46	0.30	8.95	0.90	0.21	0.20
50mm	0.10	0.43	0.32	8.68	0.94	0.11	0.22

3.2 溶接方法 適用する溶接方法は高温高圧機器に通常用いられているものとし、母材溶接に対してはサブマージアーク溶接(SAW)、被覆アーク溶接(SMAW)および手動ティグ溶接(GTAW)とした。また、機器内面に要求される場合があるオーステナイト系ステンレス347耐食肉盛溶接としては、エレクトロスラグ溶接(ESW)、炭酸ガスアーク溶接(FCAW)、自動ティグ溶接(AGTAW)および手動ティグ溶接(GTAW)を用いた。母材継手溶接後および肉盛溶接後に採取した各溶接金属の主要な化学成分結果を表4に示す。

表4 溶接金属の化学成分 (wt %)

Joint	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	V
SAW	0.08	1.00	0.21	9.02	1.04	0.46	0.20
SMAW	0.12	0.84	0.31	8.88	1.06	0.43	0.22
GTAW	0.11	0.73	0.28	9.38	1.05	0.48	0.22
Overlay	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Nb+Ta
ESW	0.051	1.17	0.58	18.51	0.15	9.15	0.43
FCAW	0.033	1.12	0.40	18.11	0.12	9.80	0.41
AGTAW	0.041	1.37	0.36	19.08	0.18	9.43	0.46
GTAW	0.040	1.31	0.33	19.00	0.06	9.65	0.50

3.3 切断加工 鋼板から機器を製造する場合、まず初めに入荷した平板端部の開先加工のために切断が必要となる。2¹/₄Cr-1Mo鋼や2¹/₄Cr-1Mo-V鋼では、顧客により切断時の予熱を要求されることがあるが、予熱の影響について本鋼種で確認した。

プラズマ切断機を用い、切断面が最も滑らかとなる最適な切断条件を見いだした後、切断部の硬さ分布を測定した。図3は切断面からの硬さ分布を示す。切断熱による熱影響部(HAZ)を母材程度まで硬さが下がるまでの範囲とすると、HAZの厚さは、予熱なしの場合2mm、予熱あり(100℃および200℃)の場合3mm程度となる。

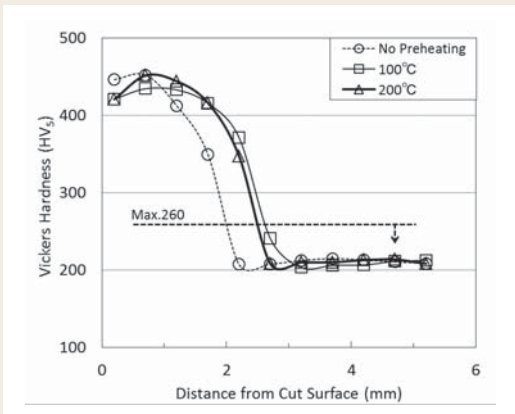


図3 プラズマ切断後の断面硬さ分布

機器を溶接する際の溶け込み深さは、板厚・溶接方法にもよるが3～5mm程度である。予熱の有無にかかわらず、切断面の凹凸部をグラインダー等にて滑らかに仕上げた後溶接することで、切断で形成されたHAZは溶融し、その溶接継手には残らないことが確認できた。

開先整形に際しては、切断面をどの程度研削する必要があるかを確認するために予熱なし切断試験片を用いて、切断による凹凸部削除後に研削深さを変化させて加工面を表面とした曲げ試験を行ったところ、凹凸部削除後に0.25mm研削すれば問題なく曲げ試験に合格することが確認できた。

3.4 曲げ加工 開先整形後、鋼板を曲げて半円筒形に加工する場合、曲げ加工に伴う靱性の低下および発生する応力によって加工途中で鋼板が破断する懸念がある。ここでは、鋼板曲げ時のひずみを模擬するた

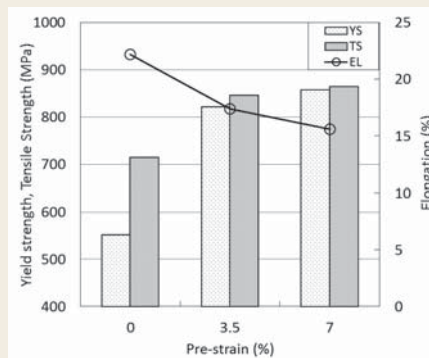


図4 母材ひずみ量と引張試験結果の関係

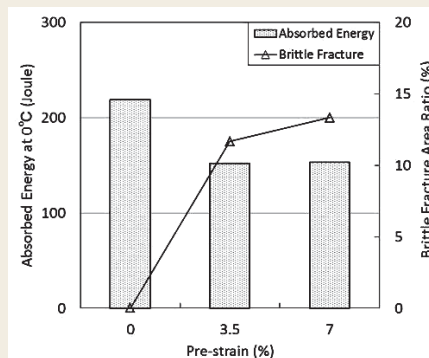


図5 母材ひずみ量と衝撃試験結果の関係

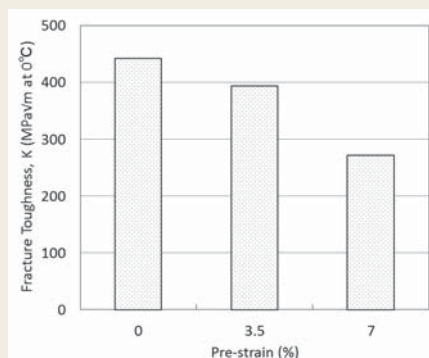


図6 母材ひずみ量と破壊靱性試験結果の関係

め、板厚50mm鋼板を用いて広幅引張試験片の平行部にひずみゲージを取付けて試験片を引張り、試験片の平行部に3.5%および7%のひずみを与えた。その後、ひずみを与えていない試験片とともに、引張、衝撃および破壊靱性試験を行った。

図4は予ひずみを与えた鋼板の引張試験結果を示す。予ひずみ量が増加するに伴い、耐力、引張強さは上昇し、破断伸びは低下するが10%以上ある。図5は予ひずみを与えた鋼板の0℃でのシャルピー衝撃試験結果を示す。予ひずみ量が増加するに伴い、吸収エネルギーは低下し、脆性破面率は上昇するが延性が優勢であり懸念される事象はない。図6は予ひずみを与えた鋼板の破壊靱性試験結果を示す。試験はASTM E1820-11に準拠し1.0TCT試験片(W=50.8mm、B=25.4mm、B_{net}=20.3mm)を用いて0℃で実施した。予ひずみ量が増加するに伴い、破壊靱性値Kは低下する。しかし、7%のひずみ与えた場合の破壊靱性値は272MPa√mと比較的大きく、常温で曲げ加工を行っても鋼板の急速破壊が起きることなく、安全に加工できると考えられる。

3.5 予熱 本鋼種は焼入れ硬化性が高く溶接時に低温割れが懸念される。溶接部の低温割れ感受性を確認するために板厚50mm鋼板と5mm径被覆棒を用いたSMAW施工によりJIS Z3158-1993に従いy形溶接割れ試験を行った。予熱条件はなし、100℃および200℃の3条件とし試験ビードの溶接後、48時間以上経過してから試験溶接部の5断面の断面割れ率を次式によって求めた。

$$Cs = Hc / H \times 100$$

ここで、

Cs: 断面割れ率 (%)

H: 試験ビードの最小肉厚(mm)

Hc: ルート割れの高さ (mm)



図7に試験後断面マクロの一例を、図8に試験結果を示すが、予熱なしと予熱100℃では平均割れ率100%、予熱200℃では平均割れ率6.4%であった。本試験に用いた溶接条件は実機製作時に用いる中でより低い入熱条件であり、1パス施工によるy形溶接割れ試験は実機での多

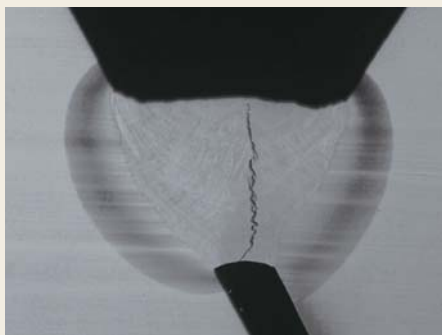


図7 y形溶接割れ試験結果の一例
(予熱なし、断面割れ率100%)

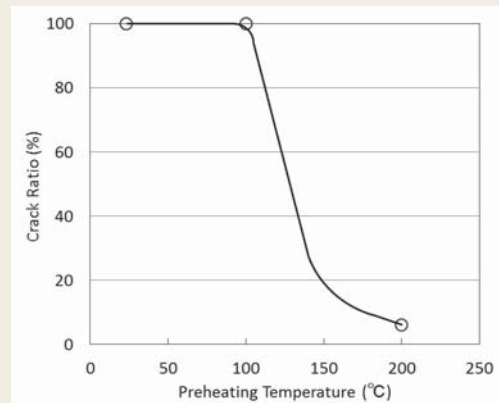


図8 y形割れ試験での割れ率と予熱温度の関係

層溶接よりもルート部の割れ感受性が高いといえる。1パス施工では予熱200℃において割れが発生しているものの、実機製作時の入熱量や多層溶接を考慮すると、実機では予熱200℃を行うことにより低温割れは防止できると考えられる。

3.6 溶接後熱処理 (PWHT) 本鋼種は炭化物形成元素であるCr、Mo、Vが含まれており、熱処理中にSR割れが発生する懸念がある。溶接部のSR割れ感受性を確認するために板厚50mm鋼板と5mm径被覆棒を用いたSMAW施工により前項と同じy形溶接割れ試験板を作製し、この試験板をSR割れ発生の温度域である500～600℃に加熱保持した。予熱条件は200℃とし溶接後、150℃/hで加熱し指定温度到達後10h保持して炉冷し、試験溶接部の5断面を観察した。試験を行った500℃×10h、550℃×10hおよび600℃×10hの熱処理3条件のいずれにおいても割れは発生しなかった。これにより、本鋼種のSR割れ感受性は低いと考えられる。

高温高圧機器のPWHT回数としては、工場での製造時の1回、工場での補修時の予備として1回、現地にて機器据付・運転後の補修時の予備として2回の計4回が要求される場合がある。ASME-VIII-2では本鋼種のPWHT温度として730～775℃の範囲が定められているが、温度が低すぎるとPWHT後の硬さが高くなり、温度が高すぎると4回PWHT後の引張強さが規格値を下回る懸念がある。板厚が厚い場合は、PWHT時間が長くなる(例えば、板厚150mmの場合、ASME規格により5時間15分必要)要素も考慮しなければならない。さらに、PWHTよりも条件は緩いが機器完成までに製造中部材のハンドリングを考慮して中間熱処理(SR)を適用する場合がある。熱処理条件による影響を確認するために、Larson-Millerパラメータ(×10³)として、20.46、20.84、21.15、21.38、21.70、21.99、22.19および22.42の8条件を選定しそれぞれ与えた場合の機械的性質を確認することにした。

機械試験は、鋼板単体とSAW、SMAWおよびGTAWによる溶接継手部に対して引張、衝撃および硬さ試験を行った。与えた熱処理条件と機械試験結果の関係により、

最適と考えられる次の熱処理条件を見いだした。ここで、Min.PWHTおよびMax.PWHTは機器に与えられると予測されるそれぞれ最小および最大の熱処理条件を示す。

- ・ SR: 725°C×4h
- ・ Min.PWHT: 750°C×10h
- ・ Max.PWHT: 725°C×40h+750°C×40h

3.7 母材継手溶接 板厚50mm鋼板を用いて溶接施工を行った。SAWは単電極で4mm径のワイヤを用い下向き姿勢で、SMAWは4および5mm径の被覆棒を用い立向き上進姿勢で、GTAWは2.4mm径の棒を用い立向き上進姿勢とした。SAWおよびSMAW試験板は表側溶接後にエアアークガウジングにて裏はつり、さらにグラインダーにて開先を整形した後に裏側溶接を行った。GTAW試験板は片側溶接とした。

溶接パス数は、スペーサを挟んだ表側開先ルート幅18mm、開先深さ35mmで角度8°のSAWは38パス（表側18パス、裏はつり側20パス）、表側開先深さ38mmで角度30°のSMAWでは20パス（表側9パス、裏はつり側11パス）、片側溶接としたルートフェース1.5mm、ルート間隔3mmから両側4mmRで角度30°のGTAWでは106パスとなった。例として、SAW溶接試験片の断面マクロ写真を図9に示す。SAWは溶接ビード形状と溶接条件によって高温割れ発生の懸念があるが、種々最適な条件を検討し欠陥のない溶接継手が得られた。

裏はつりに用いるエアアークガウジングは、2¹/₄Cr-1Mo鋼や2¹/₄Cr-1Mo-V鋼では、顧客により使用時の予熱を要求されることがあるが、その影響について板厚40mm鋼板を用いて確認した。予熱なし、100°Cおよび200°Cの条件で径16mm半丸のガウジング棒を用いて施工した。施工後、図10に示すように試験材断面の板幅方向と板厚方向に0.1mmピッチでビッカース硬さ測定を行った。板幅方向の硬さ試験結果を図11に示す。この結果により、予熱温度が高くなるにつれてHAZ幅が広がることが確認できた。前述の切断と同じく、本溶接時の溶け込み深さは3～5mm程度であるため、ガウジング表面の凹凸部をグラインダー等にて滑らかに仕上げた後溶接することで、ガウジングによるHAZはその溶接継手には残らないことが確認できた。よって、エアアークガウジングにて行う裏はつり作業には予熱を適用しないこととした。

各溶接法にて施工した溶接試験板にMin.PWHTおよびMax.PWHTを施し、以下に示す各種機械試験を行った。常温および538°Cにおいて、継手および溶着金属の引張試験を行った結果を図12に示す。母材であるSA387-91-2の耐力および引張強さの規定値（高温引張強さは規定値の0.9倍）を破線で示す。GTAW溶接金属の強度が他の溶接法に比べ高くなる傾向はあるが値は全て規定値を満たしている。また、ノッチ位置を表面から1.5mm深さ、板厚の1/2位置および板厚の3/4位置とした2mm-Vシャルピー衝撃試験の結果を図13に示す。試験温度は+15°Cとした。SMAW溶接金属の吸収エネルギーが他の溶接法に比べ低くなる傾向はあるが45J以上の値

は得られている。さらに、Min.PWHT後に表裏面から1.5mm深さおよび板厚の1/2位置とした断面のビッカース硬さ試験の結果を図14に示す。GTAW溶接金属の硬さが他の溶接法に比べ高くなる傾向はあるが値は全て設定値260HV₁₀以下となっている。



図9 SAW溶接試験片の断面マクロ

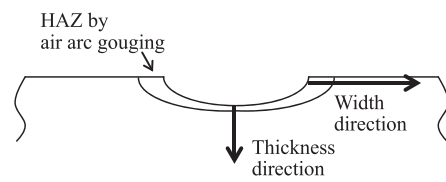


図10 ガウジング後の硬さ測定位置

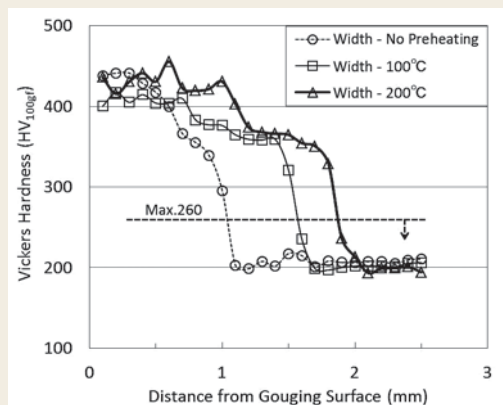


図11 ガウジング後の断面硬さ分布

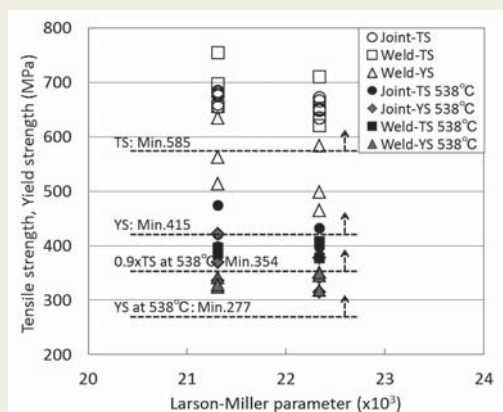


図12 引張試験結果

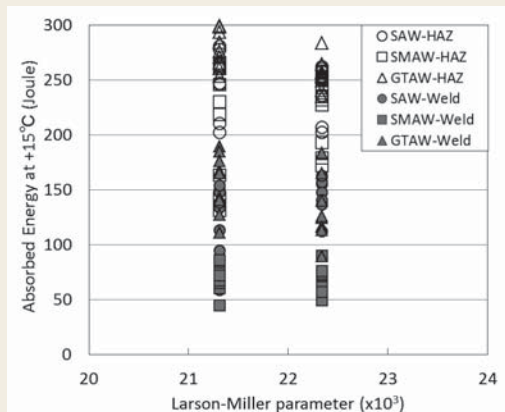


図13 衝撃試験結果

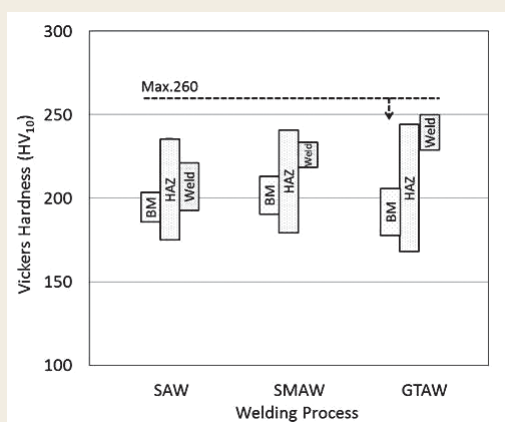


図14 硬さ試験結果

3.8 ステンレス肉盛溶接 円筒胴完成後、内面にステンレス耐食肉盛を施す場合がある。その際、胴内面は最も作業効率のよいESWが、継手部やノズル内面などの限られた部分にはFCAWやGTAWが用いられるためそれら溶接部の機械的性質についても調査した。ESWは板厚50mm鋼板を、その他の溶接方法は板厚50mm鋼板を18mmに減厚した鋼板を用いて溶接施工を行った。ESWは幅75mm×厚さ0.4mm径のフープを用い下向き姿勢で、FCAWは1.2mm径のワイヤを用い横向き姿勢で、AGTAWは1.2mm径のワイヤを用い下向き姿勢で、GTAWは2.4mm径の棒を用い立向き上進姿勢とした。

肉盛溶接において、ESWは1層盛のステンレス347とし、FCAWは初層ステンレス309Lと次層347の2層盛とし、AGTAWおよびGTAWは初層309Lと次の2層347の3層盛とした。いずれも肉盛溶接金属表面から3.2mm深さ位置でステンレス347の化学成分を満たす溶接条件により施工した。例として、ESW肉盛溶接試験片の断面マクロ写真を図15に示す。全ての溶接方法において、欠陥のない肉盛溶接が得られた。肉盛溶接においては剥離割れの懸念を考慮して、肉盛溶接金属と母材の境界部近傍のHAZ硬さを抑えておく必要がある。この境界部近傍の硬さと熱処理の影響についてESW肉盛溶接試験片にて得られた結果を図16に示す。境界部から極近い0.2mm母材側のHAZにおいて、溶接後の硬さは400HV₁₀程度にな

るが、Min.PWHT後には規定値以下の値となった。

内部が水素環境で高温高圧条件にさらされる内面347ステンレス肉盛施工機器は、シャットダウン時に肉盛溶接と母材の境界部近傍における剥離割れが懸念されるため、肉盛溶接剥離割れ試験を行った。各種肉盛溶接法を用いた溶接試験材にMax.PWHTを与えた後、保持温度500℃、水素圧力22MPaG、冷却速度300℃/hの条件でASTM G146-01規格により剥離割れ試験を実施した。その結果、各試験材において剥離は全く発生しておらず、供用中機器シャットダウン時の剥離割れ懸念は極めて低いことが確認できた。



図15 ESW肉盛溶接試験片の断面マクロ

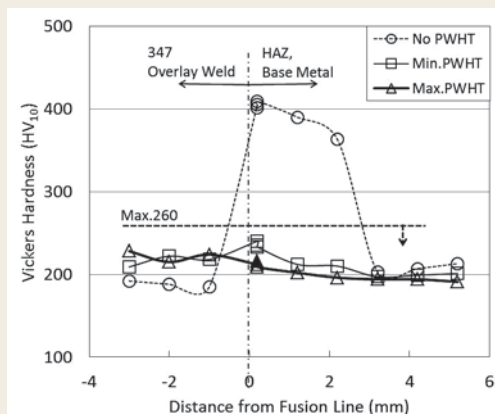


図16 肉盛溶接断面の硬さ試験結果

4. モックアップ

前項での試験結果により、実機を製造するために必要な作業要領が確立できた。これらの結果を踏まえ、実機を模擬したモックアップリングの製作を行った。モックアップリングは、SA387-91-2鋼板の板厚160mm、内径2500mm、高さ1900mmの鋼板製円筒胴で0°、90°、180°および270°位置に長手溶接継手を配置し、同一鋼種であるSA336Gr.F91の鍛造ノズルを3個所に配置した。円筒胴内面にはステンレス347の肉盛溶接を行った。完成後、Min.PWHTを付与し、長手溶接継手とノズルネック溶接部をそれぞれ1ヶ所切り出した。切り出し状況を図17に示す。今後、切り出した溶接部を用いて各種試験を行い機械的性質の確認を行う。さらに、残ったモック

アップリングは補修を模擬したPWHTを行い、今回同様に溶接継手部を切り出して機械的性質の確認を行う予定である。



図17 長手溶接継手部の切り出し

5. 結 言

石油精製プラントや石炭ガス化プロセスなどにおいて、今後さらなる高温高圧運転に適した機器の需要拡大が期待される。それに適した材料として9Cr-1Mo-V鋼を用いて機器製造に係る各作業工程における技術的検討を行った。本検討にて得られた結果を以下に示す。進行中(現在最長のもので2万時間弱)のクリープ試験や今後行うモックアップリングからの試験結果について引き続き検討を行いデータの拡充を図っていく。

- 1) 設計温度500℃を超える領域では、9Cr-1Mo-V鋼を使用することで $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼などの従来型低合金鋼に比べて機器重量を飛躍的に低減でき、輸送コストおよび建設コストの大幅な低減となる。
- 2) プラズマ切断時およびエアアークガウジングによる裏はつり時に、予熱ありよりも予熱なしの方が母材HAZ幅は小さくなった。HAZはその後の溶接施工による溶け込みにより、溶接継手には残らないことが確認できた。
- 3) 予ひずみを与えた引張、衝撃および破壊靱性試験結果により、鋼板は 常温曲げでも安全に加工できることが確認できた。
- 4) y形溶接割れ試験の結果により、溶接時の低温割れを防止するため予熱は200℃とした。また、SR割れ感受性が低いことを確認した。
- 5) 鋼板および溶接部の各種機械試験結果により、最適な熱処理条件としてMin.PWHTとMax.PWHTを見いだした。

- 6) 母材溶接において、Min.PWHTおよびMax.PWHTを施した各種機械試験結果は材料の規格および設定内になることを確認した。
- 7) ステンレス肉盛溶接において、溶接直後は肉盛溶接との境界に近い母材HAZで硬さは高いが、PWHTを行うことにより設定内になることを確認した。剥離割れ試験の結果、その感受性が低いことを確認した。
- 8) 実機を製造するために基本的に必要な作業要領を確立できたため、板厚160mm、内径2500mm、高さ1900mmの鋼板製円筒胴と鍛造ノズル3個で構成されるモックアップを製作した。

参考文献

- (1) (独) 物質・材料研究機構 : 「近未来の鉄鋼材料を知る」, 2002.
- (2) 増山不二光 : 環境対応材料の開発動向-超々臨界圧ボイラ用耐熱材料の開発動向-, 溶接学会誌, 2001, 70 (8), 20-25.
- (3) 土田豊ほか : 高強度高靱性Mod.9Cr-1Mo鋼板の開発と転炉による製造, 新日鉄技報, 1993, 348, 39-46.
- (4) Sylvain Pillot et.al: Hydrogen and High Temperature Resistant V-Modified 9Cr-1Mo Heavy Plates Devoted to New Generation High Performance Petrochemical Reactors, ASME PVP2011.
- (5) ASME Boiler & Pressure Vessel Code – Section VIII – Division 2, 2013 Edition, American Society of Mechanical Engineers (ASME).
- (6) ASME Boiler & Pressure Vessel Code – Section II – Part D, 2013 Edition, ASME.

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 機械・インフラ本部
プロセス機器ビジネスユニット
安部正光
Tel : 0968-78-2143 Fax : 0968-78-4416
e-mail : abe_m@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
Machinery & Infrastructure Headquarters
Process Equipment Business Unit
Masamitsu Abe
Tel : +81-968-78-2143 Fax : +81-968-78-4416
e-mail : abe_m@hitachizosen.co.jp



安部 正光



篠田 薫



楠 和 憲



合 田 明 人



長 尾 圭 一 朗



竹 中 俊 哉