

2023年3月 水素エネルギー部 水素利用推進室

高圧水素中で使用するためのステンレス鋼の溶接技術指針

◇一般則例示基準では高圧水素の配管類の接合には溶接を用いることが基本とされているが、実際の溶接の使用は少数に留まっている。

- ◇その理由の一つに、溶接による材料変化のため高圧水素環境での使用可能判断が非常に難しいことが挙げられる。材料変化の影響を取り除くには溶接部分に適切な熱処理を行う方法があるが簡便性は著しく低下する。
- ◇そこで、水素ステーションの整備における溶接施工の利用の簡便性向上を目的として、高圧水素環境で使用可能な溶接についての技術指針を構築し、溶接部の水素適合性に関する要件を解説する。
- ◇また、溶接後熱処理なし(As weld)でも高圧水素環境で使用可能な、水素適合性の 確認を溶接後に行う必要がない溶接の組合せについて例示する。

1.はじめに

水素はカーボンニュートラル社会を築く上での要 となるエネルギーであり、輸送、発電、産業といった 様々な分野での脱炭素化に寄与する。また、化学的 にも安定で毒性もなく、余剰エネルギーを変換・貯蔵 するための媒体としても適している。大量に水素を 貯蔵、運用するためには高圧水素、液体水素等の形 でエネルギー密度を高める必要があり、同時にこれ はじめに
高圧水素で使用できる溶接
溶接部の水素適合性判断基準
高圧水素で使用できる組合せの例
高圧水素 SSRT で直接評価を行う例
まとめ

らを扱うための社会インフラ整備も加速させていく必要がある。水素社会の形成において水素ステーションは、FCV、フォークリフト、バス、トラックなど様々な水素モビリティが普及していく上で欠かすことのできない社会インフラである。

水素ステーションの整備促進に向けて様々な規制見直しも進んでおり、法規制緩和の一例としては、 水素ステーションにおける遠隔監視による無人運営や利用客によるセルフ充填が可能となったこと等が 挙げられる。従業者の在/不在によらず、同等の保安水準を確保しつつセルフ充填を可能とするために 必要となる「監視体制」、「セルフ充填に対する追加的安全対策」及び「緊急時に備えた対応」の具体的要件 を定めることで遠隔監視による無人化営業が可能となり、保安監督者が複数の水素ステーションを掛け 持ちする兼務化も可能となった。上記の規制緩和に伴い、水素ステーションの自立運営化・コスト削減の ために無人化への流れは加速していくものと考えられるが、現状では一般高圧ガス保安規則第七条の三 2 十四に圧縮水素ガス設備の配管等の接合は基本的に溶接とする旨が記載されているにも関わらず、高 圧水素配管の施工には機械式継手が多用されており、漏洩のリスクや日常点検の所要時間等の問題があ る。溶接配管を導入することによりこれらの問題は大幅な改善が見込まれることから、高圧水素環境で の使用に適した信頼性の高い溶接施工の普及促進は重要度を増すものと考えられる。

一般則例示基準 9.2 記載のステンレス鋼を溶接により使用する場合、基本的に一般申請による使用と なる。一般則例示基準 9.2 記載のステンレス鋼は水素適合性が保証された材料であるが、溶接による材料 の組織変化や成分の偏析等を生じて溶接部分では水素適合性が低下する可能性がある。しかも、溶接部 の水素適合性に関する規則・基準類は存在せず、申請者が水素適合性の確認を求められる場合も想定され るが、-45℃・水素圧 82MPa 以上の環境下における溶接継手の水素適合性を SSRT(Slow Strain Rate Tensile test)によって確認することは負担が大きい。そこで、溶接まま(以降は As weld と記す)での水素 適合性を懸念して溶接後に熱処理工程を追加して出荷されているが、簡便とは言い難いのが実情である。 As weld での水素適合性が保証された母材と溶接材料の組合せが明らかになっていれば大変望ましく、 本書では As weld でも高圧水素環境下で使用できる母材と溶接材料の組合せと、溶接部の水素適合性の 判断方法について紹介する。

2. 高圧水素で使用できる溶接

高圧部分に用いる溶接継手の使用にあたっては、溶接の品質確認について特定設備検査規則、JIS B 8285 等に記載されている通り、溶接健全性の確認が必要となる。しかし、溶接継手を高圧水素で使用す る場合は溶接健全性の確保だけでは不十分であり、溶接部の水素適合性の確認も必要である。即ち、高圧 水素で使用できる溶接継手とは、一般的な溶接健全性を満たしていることが確認できている上で、水素 適合性も十分と認められるものでなければならない(図1)。また、溶接する配管自体の水素適合性も確保 する必要があることから、母材に用いるステンレス鋼は安定なオーステナイト構造を持つ一般高圧ガス 保安規則例示基準9.2 記載相当の水素適合性を有するステンレス鋼であることが必要である。

以下、本溶接技術指針ではステンレス鋼の溶接部の水素適合性の判断方法について述べる。本技術指 針の検討で用いた溶接は全て TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接(タングステン電極を使用するアーク溶接 の一種)であり、溶接後熱処理は行っていない(As weld)。





3. 溶接部の水素適合性判断基準

溶接に用いるオーステナイト系ステンレス鋼の組成や溶接条件等によって溶接後の組織はさまざまな 形態を取ることが知られている。一般にステンレス鋼の溶接における凝固モードは、A モード(オーステ ナイト単相凝固)、AF モード(初晶オーステナイト+フェライト・オーステナイト二相凝固)、FA モード(初 晶フェライト+フェライト・オーステナイト二相凝固)、F モード(フェライト単相凝固)の4 種類に分類さ れる。いずれの凝固モードを採るかは溶接金属の化学組成を元に推測可能とされフェライト生成元素の 指数である Cr 当量とオーステナイト生成元素の指数である Ni 当量との比率によって決定される(図2)¹。

【凝固モード】

Aモード,AFモード:	Cr 当量/Ni 当量 ≦ 1.48
FAモード	$1.48 \leq Cr$ 当量/Ni 当量 ≤ 1.95
Fモード:	1.95 ≦ Cr 当量/Ni 当量

ここで、

式(1) Cr 当量 = [wt%Cr]+1.5×[wt%Si] +[wt%Mo]+0.5×[wt%Nb]+2×[wt%Ti]

式(2) Ni 当量 = [wt%Ni]+0.5×[wt%Mn] +30×[wt%C]



Cr当量/Ni当量



オーステナイト相の水素適合性については、山田、小林ら²⁰の研究等により高圧水素の影響度合いが明 確化、数式化され、合金成分による水素適合性(相対比)の予測が可能である。しかし、ステンレス鋼の溶 接の場合は溶接金属部に 8 フェライトを含む場合が多く、フェライト相の影響も考慮する必要がある。 そこで、溶接部の水素適合性を確保するためのオーステナイト相とフェライト相のそれぞれの要件につ いて以下に解説する。

(1)オーステナイト相

2018~2022 年度の NEDO 研究事業「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業/国内規制適正化 に関わる技術開発/新たな水素特性判断基準の導入に関する研究開発」において、高圧水素で安全に使用で きるオーステナイト系ステンレス鋼の基準見直しに関する研究が進められた。高圧容器材料の安全要件 は使用雰囲気中における強度と延性の確保であることから、高圧水素環境で①引張強さが低下しないこ と、②応力ひずみ線図における一様伸びが確保できることが必要条件と結論付けられた。

種々の Ni 当量*の SUS316/316L による低温高圧水素(-40~-45℃、70~100MPa)中の SSRT の結果を 吟味した結果、少なくとも Ni 当量(平山の式)26.8%以上の SUS316/316L であれば、-45℃の高圧水素中 において引張強さは低下せず一様伸びでは破断しないことが確認された(図 3)。

*Ni 当量(平山の式(下記)で計算した数値。前章のNi 当量と計算方法が異なるので注意)

Ni 当量 =12.6×[wt%C] +0.35×[wt%Si] +1.05×[wt%Mn] +[wt%Ni] +0.65×[wt%Cr] +0.98×[wt%Mo])



図 3.SSRT データの例(左:Ni 当量 26.6%、右:Ni 当量 26.8%) ※九州大学による実施

図 3(左)の応力ひずみ線図では水素雰囲気の場合に最大強度に達する前の、一様伸びの途中段階で破断していると判断された。

さらに上記研究ではNi当量(平山の式)26.8%以上のSUS316/316Lについて、・45℃の高圧水素中における疲労特性の確認を行っており(図4)、疲労限度は大気中の場合と変わらないことが確認された。なお、SUS316よりもNi当量が低く、室温でも水素の影響を受けることが知られているSUS304であっても、疲労限度は水素の影響を受けないことが知られている。許容引張応力による耐圧設計を行う限りは疲労

特性に対する水素の影響の確認は不要である。



図 4.SUS316L の室温および 45℃の高圧水素中での疲労試験(Ni 当量:26.8%)

以上のことから、オーステナイト相は Ni 当量(平山の式)が 26.8%以上であれば-45℃の低温高圧水素 中においても強度、延性、疲労特性が確保できており、充分な水素適合性を有していると結論できる。

必要 Ni 当量値 26.8%は最低使用温度が-45℃の場合であり、これよりも高い温度で使用する場合は水素の影響が小さくなるため、強度・延性の確保に必要な Ni 当量値は低くなる。具体的な数値については 今後の研究が待たれる。

溶接時は溶接金属中においてミクロ的に成分の濃化、貧化などが起こるため、溶接金属のオーステナ イト相の Ni 当量を調べる際は EPMA 等の組成分析によって調べると良い。但し、AF モード凝固では オーステナイト相の中心部が、FA モード凝固ではフェライト相との界面近傍のオーステナイト相がそれ ぞれ低 Ni 濃度部位となり、凝固モードによってオーステナイト相の偏析状態は異なるので注意が必要で ある。後述の事例では FA モード凝固であったため、オーステナイト相の Ni 当量を調べる際はフェライ ト相との界面近傍のオーステナイト相に着目して解析している。また、多層溶接を行った場合は初層部 を確認できれば良い。

(2)フェライト相

フェライト相の方がオーステナイト相よりも亀裂進展速度は大きくなり、フェライト相の形成によっ て水素感受性が増す懸念があると報告されている³。しかし、溶接時におけるδフェライトの生成がある 程度抑制され鋼中に分散している状態であれば、溶接金属の水素適合性に影響を及ぼさないことも知ら れている⁴⁵。即ち、溶接金属内に連続的なフェライト相のネットワークが形成されておらずオーステナ イト相中に分散していれば、溶接金属全体として水素脆化に対する影響は見られない。

本技術指針においては、溶接金属を EBSD(電子線後方散乱回折法)により 8 相(フェライト相)と y 相(オ

 $\mathbf{5}$

ーステナイト相)のフェーズマップを作成し、フェライト相の形態を観察した。

図5は日本製鉄(株)により作製、解析された YS309LMo の全溶着金属の溶接金属の光学顕微鏡像および EBSD 像である。フェライト相は骨格状の組織形態(バミキュラーフェライト)が支配的であり、レース状の組織(レーシーフェライト)が少ないことがわかった。本溶接部の8フェライト量は約13%であり、フェライト相はバミキュラーフェライトの組織形態が支配的であることが確認できる。本例の場合、フェライト相はオーステナイト相中に分散して存在しているため水素適合性への影響は見られない(SSRT 実測による水素適合性の結果については表5の母材希釈率0%の欄を参照)。



図 5.YS309LMo 全溶着金属におけるフェライト相の分散状態 (左図)光学顕微鏡像 (右図)EBSD による α 相(赤)と γ 相(緑)のフェーズマップ 溶接条件(TIG 溶接): シールドガス:Ar100% 入熱:6kJ/cm·9kJ/cm パス間温度:150°C以下 溶接後熱処理:なし 本溶接部のδ フェライト量は約 13%。

表 1.使用した溶加材 YS309LMo の化学成分(mass%)

成分	С	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
濃度	0.02	0.35	2.08	13.92	23.42	2.23

フェライト相のネットワーク化を抑制するには、6フェライトの生成量を抑制することが有効である。 但し、溶接金属の水素適合性に影響を及ぼすとされる6フェライト量については諸説あり4%、研究例の 紹介に留めておく。

溶接金属中のδフェライト量は、式(1)、式(2)のNi当量、Cr当量を用いてシェフラーの組織図(図6)、 ディロングの組織図(図7)等から予測する方法がある。これらの組織図はJISZ3119「オーステナイト系 及びオーステナイト・フェライト系ステンレス鋼容着金属のフェライト量測定方法」に記載されている。 なおFAモード凝固する場合、Cr当量/Ni当量比が高くなると、溶接金属中のδフェライト量が増加し、 図2に示すフェライト相の組織形態はレース状になりやすい傾向にある。



(3)水素適合性の基準に合致するオーステナイト相およびフェライト相構造を有する溶接金属のSSRT に よる評価

(2)のYS309LMo全溶着金属をEPMAで成分分析しオーステナイト相(フェライト相近傍)のNi 当量(平山の式)を求めたところ、計算結果は約32.3%であった(表2)。即ち、(2)のYS309LMo全溶着金属は溶接部の水素適合性に対するオーステナイト相およびフェライト相の要件を同時に満たしている。金属組織解析による水素適合性基準を満たしている(2)のYS309LMo全溶着金属について高圧水素環境下でSSRTによる評価を行い、実際に水素の影響がないことを確認した事例を以下に示す。

表 2.YS309LMo 全溶着金属のオーステナイト相(フェライト相近傍)の各元素濃度

				T DIV	~ • •	11.11 - 12.47		
	成分	С	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Ni 当量(平山の式)
	濃度	< 0.01	0.35	2.16	13.3	22.2	2.22	32.3

(mass%)

SSRT 試験片の詳細や溶接継手からの採取方法等については図8に示す。試験片は溶接部の中央から 溶接線と並行に採取した。



図 8.溶接部 SSRT 試験片(左:溶接継手および採取位置、右:SSRT 試験片寸法)

SSRT 評価条件および評価結果を表3および図9に示す。SSRT の結果からは室温および40℃ともに 水素の影響は見られておらず、図3の構造のフェライト相は溶接部の水素適合性に影響を与えていない ことが、SSRT 評価結果との比較からも理解できる。

表 3.YS309LMo 全溶着金属の SSRT 試験結果

温度	RTS	REL	RRA
室温	0.977	0.860	0.962
-40°C	0.986	0.898	0.933

【SSRT 評価条件】

·水素圧力:90MPa(室温)、70MPa(-40℃)

・ひずみ速度:5×10⁻⁵s⁻¹



図 9.YS309LMo 全溶着金属 SSRT

応力ひずみ線図(-40℃)

<溶接部の水素適合性判断基準のまとめ>

溶接部の水素適合性は必ずしも SSRT で判断する必要はなく、溶接金属中(多層溶接の場合は初層部)の フェライト相、オーステナイト相が下記の条件を満たしていれば良い。

・フェライト相:溶接金属内を連通するような構造を取っていないこと(オーステナイト相中に分散していること)

・オーステナイト相:-45℃以上の高圧水素に用いる場合にあっては、Ni 当量(平山の式)が 26.8%以上であること**。

**凝固モードによって偏析状態が変わるため注意。FA モード凝固ではフェライト相周囲のオーステナイト相、A モード・AF モード凝固の 場合はオーステナイト粒子の中央部となる。

4. 高圧水素で使用できる組合せの例

溶接部の性状は、母材と溶接材料の組合せを固定しても溶接条件が変われば母材希釈率が変化し、溶 接金属の化学組成が変化する。その結果、フェライト相の形成状態やフェライト相近傍のオーステナイ ト相の組成が変化する。そこで、あらゆる母材希釈率(0~100%)においても溶接金属のオーステナイト相、 フェライト相に関する要件を満たしていることを確認できた組合せについては、溶接継手の健全性を確 認した上でAs weld で-45℃の高圧水素環境で使用可能である。

本章では、その組合せ例として母材に SUS316L(Ni 当量(平山の式)28.5%)、溶加棒に YS309LMo を 用いた事例を紹介する。以下に示す通り、この組合せは各種母材希釈率(0~100%)において溶接金属のオ ーステナイト相およびフェライト相に関する要件を満たしている。さらに、これらの溶接金属の水素適 合性を SSRT によって評価した場合、いずれも良好な水素適合性を示した。

本事例の溶接継手の作製、各種評価は日本製鉄(株)により実施された。表4に今回使用した母材と溶加 棒の化学成分を示す。

2	衣4 使用した内的おい格加棒の16子成力											
		С	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Ni 当量(平山の式)				
	SUS316L	0.02	0.37	1.71	12.49	17.44	2.57	28.5				
	YS309LMo	0.019	0.39	2.05	13.80	23.55	2.20	33.8				
								(mass%)				

表4 使用した母材および溶加棒の化学成分

表5に、母材希釈率0~100%のSUS316L(Ni 当量(平山の式)28.5%)、YS309LMoの溶接継手の溶接部 の金属組織、δフェライト量、フェライト相近傍のオーステナイト相Ni 当量、各相の水素適合性判定結 果、さらに参考値として溶接金属部から採取した試験片によるSSRT 評価結果を一覧に示す。母材希釈 率については入熱量、溶接電流、溶接速度や開先条件等の溶接条件を調整し、目的値に近づけるようにし た。母材希釈率100%は母材のノンフィラー溶接に相当し、母材希釈率0%は溶加棒のみを溶解疑固させ た場合、つまり全溶着金属に相当する。全ての希釈率でδフェライトの構造はバミキュラーフェライト であった。

SUS316L(Ni 当量(平山の式)28.5%)、YS309LMoの溶接の場合、溶接条件の変化によって様々な母材 希釈率の溶接金属が形成されるものの、全ての母材希釈率においてフェライト相はオーステナイト相中 に分散して存在しており連続的な構造になっておらず、オーステナイト相のNi 当量も26.8%以上を確保 していることから、SUS316L(Ni 当量(平山の式)28.5%以上)とYS309LMoの組合せの溶接については、 水素適合性をSSRT で確認することなくAs weld で高圧水素用途に用いることが可能である(但し、溶接 健全性は別途確認が必要)。

9

溶接方法: TIG 溶接(Ar100%ガスシールド) パス間温度 150℃以下											
母材希釈率0%	24.39%	40.18%	59.68%	74.83%	100%						
入熱量 6-10 kJ/cm	3-10 kJ/cm 12 kJ/cm 15 kJ/cm		12 kJ/cm	16.5 kJ/cm	9.2kJ/cm						
光学顕微鏡像											
	AL SHERE	Not and the									
				言語である							
2008	Ben	The second second	Ber	PART AND	AL JAN # XX - SI						
EBSD 像											
Store Bur	"ANTO I	Fire	211		ungs						
4477	1 Santa			A MA	THE WELL						
	in V.		\mathcal{F} , \mathcal{L} \mathcal{D}	$\mathbb{N} \to \mathbb{Y}_{\mathbb{Y}}$	7-17 1 m						
Stor B	the start	JEN AN AND	1500	15um	A. Cr						
δフェライト量											
13.2%	13.6%	12.9%	8.5%	6.5%	5.1%						
オーステナイト相											
32.3%	32.1%	31.4%	30.7%	28.5%	27.6%						
7.			品」 てわたずオーマ	マテナイト担由にア							
/:		ド 俗 按 立 偶 り を 理 に	■してわら9 A ―/	マノノイ 下相中に方	rfix)						
良	良	良	良	良	良						
	オースラ	テナイト相構造(Ni	当量(平山の式)26.8	3%以上)							
良	良	良	良	良	良						
		水素適合物	生判定結果								
良	良	良	良	良	良						
	(参	送考值溶接金属部 SSRI	Y(-40℃、水素圧 70MP	a)							
RRA:0.933	0.999	1.080	1.089	0.951	0.663						
REL:0.898	1.093	1.109	0.912	1.222	0.829						
RTS:0.986	1.015	1.016	1.011	1.021	1.019						

表 5.SUS316L(Ni 当量(平山の式)28.5%)と YS309LMo との溶接金属の組織と水素適合性

SSRT 試験片の形状、採取方法は図8参照。

溶接金属の元素分析の一例として母材希釈率約24.39%の場合を図10に示す。EBSD像の緑色部分(オーステナイト相)とNiのEPMA像を比較すると、オーステナイト相中央部よりもフェライト相の周囲でNi濃度が低下していることが確認できる。そのためこの事例では、オーステナイト相のNi当量を測定する際はフェライト相の周囲のオーステナイト相の元素濃度を用いてNi当量の計算を行っている。

先に述べた通り、AFモードで凝固する場合はオーステナイト相の低Ni濃度部位はオーステナイト相の中央部となるため、AFモード凝固する場合はオーステナイト相の中央部分のNi当量を測定する必要がある。



図 10.SUS316L(Ni 当量(平山の式)28.5%)と YS309LMo の溶接継手(母材希釈率 24.39%)溶接金属の EPMA/EBSD 像

表 6.SUS316L(Ni 当量(平山の式)28.5%)と YS309LMo の溶接継手(母材希釈率 24.39%)の溶接会

オーステナイト相(フェライト相近傍)の各元素濃度											
成分	С	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Ni 当量(平山の式)				
濃度	0.02	0.39	2.12	12.9	22.1	2.24	32.1				
							(mass%)				

以上、母材にSUS316L(Ni 当量(平山の式)28.5%)、溶加棒にYS309LMo を用いた TIG 溶接では母材 希釈率によらず、As weld で溶接部の水素適合性として良好なオーステナイト相、フェライト相の構造を 有しており、実際にSSRT で評価した水素適合性も高いことが確認できた。

<sus316l ys309lmo="" と="" との溶接について=""></sus316l>
・母材に Ni 当量(平山の式)28.5%以上の SUS316L、溶加棒に YS309LMo を用いた TIG 溶接は、母材
希釈率によらず As weld で良好な水素適合性を有している。この材料の組み合わせで溶接健全性が確
認できる溶接については、水素適合性が確保されているので-45℃の高圧水素環境でも使用可能であ
る。

5. 高圧水素 SSRT で直接評価を行う例

3章ではSSRTを用いない水素適合性の判断方法について説明したが、溶接継手の水素適合性をSSRT によって評価してもよい。但し、溶接部分の延性に関する数値的な要求が定められていないため、本技術 指針においては、SSRT で溶接部の水素適合性を判断する場合は、水素中における強度(引張強さ)・延性 (伸び・絞り)が大気中の場合と同等であることを条件とする保守的な基準とした。なお、母材、溶接部を 含む試験片で SSRT を行うと溶接継手は母材、溶接部のいずれかで破断するが、水素中と大気中で破断 部位が異なると、定義上、相対伸び、相対絞りの計算ができない点は注意が必要である。

本項では、SUS316L 管のノンフィラー溶接の例を取り上げる。使用した材料および溶接条件を表7に、 溶接部の組織について図11に示す。溶接後の金属組織解析の結果ではフェライト相はインターセルラー フェライト構造を取っており、δフェライト量は1.1%と少量であった。本例の凝固モードはAFモード であったと推定される。

SSRT 評価の結果を図 12 および表 8 に示す。管溶接継手の SSRT 評価は管の内外部が同圧・同雰囲気 となるよう中空状の心金を装着し、管の形状のまま実施した。なお、図 12 におけるひずみ量はストロー ク変位であり、表 8 の伸び値は熱影響部を含む溶接部両端に標線を設けた標点間距離による伸び値であ り溶接部に限定した伸びを表している。SSRT での破断位置は大気中、水素中ともに溶接部での破断で あった。低温高圧水素中(-45℃105MPa)での SSRT 評価後の破断面を図 13 に示す。

<SUS316LTP ノンフィラー溶接継手の SSRT 評価の例>

表7.溶接に使用したSUS316L 管(@14.3 mm、t=1.5 mm)

成分	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Mo	Ni 当量(平山の式)
含有量%	0.016	0.39	1.02	0.027	0.00	12.38	16.62	2.05	26.6

【溶接条件】

・TIG 自動溶接(入熱量 2.5kJ/cm 以下、Ar シールド、1パス)

・I 開先

・溶接後熱処理 なし(As weld)



図 11.SUS316L 管ノンフィラー溶接継手溶接部の金属組織 (左:光学顕微鏡像、中:反射電子像(拡大)、右:EBSD 像(中と同視野))



図 12.SUS316L 管ノンフィラー溶接継手の SSRT 評価結果(応力ひずみ線図)

表8	SUS316L	管ノン	フィラー	-溶接継手の	SSRT 評価結果
10	.DODDIUL	$H \neq \mathbf{v}$	/ 1 /	1/11/2/1/2: 1 2/2	

温度	試験片	雰囲気	破断位置	引張強さ	RTS	伸び	REL	絞り	RRA
				(MPa)		(%)		(%)	
会泪	溶接継手	大気	溶接部	551		50		49	
主価	溶接継手	水素	溶接部	565	1.03	56	1.12	41	0.84
作泪	溶接継手	窒素	溶接部	684		64		40	
TEN III.	溶接継手	水素	溶接部	696	1.02	61	0.95	44	1.10







図 13.SUS316L 管ノンフィラー溶接継手の低温水素 SSRT 評価後の破断試験片 (左:溶接継手全体 中:破断面 右:破断面(拡大))

これらの結果から低温水素中においても引張強さ、伸び、絞りは低下しておらず脆性破壊していない ことが確認できる。即ち、大気中の場合と同じ強度、延性を有することから、溶接健全性の確認ができれ ば高圧水素環境で使用しても問題がない溶接であると結論付けることができる。

本例で使用した SUS316L 管材の Ni 当量は一般則例示基準 9.2 の-45℃基準の Ni 当量に満たないもの であったが、今回の結果は-45℃の高圧水素環境においても水素適合性は良好であった。これは入手した 材料の品質および溶接技術が高いものであったためと推測される。

また、室温、低温いずれの高圧水素環境においても溶接継手の熱影響部(HAZ)での破断は起こらなかった。低炭素材(L材)を使用しているため HAZ における鋭敏化が抑制され、水素適合性に影響しなかったものと推測される。ステンレス鋼を溶接する場合は低炭素材(L材)の使用を強く推奨する。

以上のように、溶接継手を試験片とした SSRT によって溶接部の水素適合性を直接的に評価すること も可能である。

6. まとめ

以上、TIG 溶接で作製された As weld のオーステナイト系ステンレス鋼容接継手について、水素適合性の判定例を紹介した。高圧水素環境で使用できる溶接継手の条件について以下にまとめる。

<高圧水素環境で使用できる As weld のステンレス鋼の溶接継手>

① 溶接健全性が確認できていること。

- ② Ni 当量(平山の式)28.5%以上の SUS316L と、YS309LMo との溶接継手であること。
- 【②の組合せ以外の材料の場合、③または④】
- ③ 溶接金属初層において、フェライト相が溶接金属内を連通せずオーステナイト相中に分散しており、 かつオーステナイト相***の Ni 当量(平山の式)が 26.8%以上(-45℃以上の高圧水素に用いる場合)で あること。
- ④ 実使用条件の温度・圧力の高圧水素条件でSSRTによる溶接継手の評価を行い、強度および延性が水素の影響を受けないことが確認できていること。

***凝固モードによる観測場所の違いに留意のこと(3章参照)

即ち、一般的な溶接継手としての要求事項①を満たした上で、②、③、④のいずれかの水素適合性に関 する要求事項を満たしていれば、As weld でも溶接健全性と水素適合性を両立させた溶接継手であると 考えられ、・45℃以上、水素圧力 100MPa までの高圧水素環境での使用が可能である。本書が水素ステ ーションの整備における溶接施工の簡便化の一助となれば幸いである。

謝辞

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託研究「超高圧水素インフ ラ本格普及技術開発研究事業/国内規制適正化に関わる技術開発/新たな水素特性判断基準の導入に関す る研究開発」によって実施されたものです。関係各位に感謝申し上げます。

¹ N. Suutala, T. Taklo, and T. Moisio ; Met. Trans., 11A (1980), 717

² 山田、小林 ;高圧ガス vol.56,(2019), No.6, 526

- ³小林、佐々木、高見沢 ; Journal of Faculty of Engineering, Shinshu University, No.50(1981), 1
- 4 大村、平田、宮原、工藤 ;材料と環境, 57(2008), 30
- 5 大村、中村 ;材料と環境,60(2011),241

(問い合わせ先)

一般財団法人石油エネルギー技術セルター水素エネルギー部水素利用推進室 jrepo-3@pecj.or.jp

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の 委託業務(JPNP18011)の結果得られたものです。無断転載、複製を禁止します。 Copyright 2023 Japan Petroleum Energy Center all rights reserved.

⁶ M. I. Luppo, A. Hazarabedian and J. o-Garcia ;corro. Sci. 41(1999), 87