

水素社会実現に向けた，高品質かつ合理的な 高圧水素溶接一体構造部品製造技術の研究開発

宮川和幸・佐野正明・早川亮・石田正文・深澤郷平・古屋雅章・
守屋利彦*¹・船木 C 佑二郎*¹・庄司友幸*¹・浅川加津雄*¹・井上英樹*¹・今村正市*¹・中澤義智*¹・塩島淳美*¹・中村博*¹

Research and Development on Manufacturing Technology for High Quality and Reasonable Welded Monolithic Parts for High Pressure Hydrogen for the Realization of Hydrogen Society

Wako MIYAGAWA, Masaaki SANNO, Ryo HAYAKAWA, Masafumi ISHIDA, Kyohei FUKASAWA, Masaaki FURUYA,
Toshihiko MORIYA*¹, Yujiro Cristiano FUNAKI*¹, Tomoyuki SHOJI*¹, Katsuo ASAKAWA*¹, Hideki INOUE*¹,
Shoichi IMAMURA*¹, Yoshitomo NAKAZAWA*¹, Atsumi SHIOZAWA*¹ and Hiroshi NAKAMURA*¹

要 約

水素社会の実現には水素ステーションの普及が必須であり，そのために高品質かつ低価格な配管締結法が求められている．そこで本研究開発では，厚肉パイプ用自動溶接装置を開発し，溶接構造を採用した部品のサブモジュール化を進める．これにより，信頼性を低下させることなく水素ステーションの設置費用を低減可能とし，水素社会を実現するためのインフラ整備を加速することを目的とした．

本年度は，肉厚 5 mm 程度の SUS316 製配管に対し，安定的に裏波溶接を可能にする高品質自動溶接システムの仕様について検討を行い，自動溶接システムを試作した．また，水素ステーションの内部配管についてモデル化を検討し，サブモジュールの長さは 1 m 程度までにすることが妥当であることを確認した．併せて，前述の試作機により作製した溶接サンプルに対して，今回は裏波の安定性に着目し，マクロ観察を行った．その結果，内径の増減は 3.7%~8.7%とばらつきを見せたが，ほぼ内径と同程度の裏波を出す溶接条件も存在した．

1. 緒 言

水素社会を実現する方法の一つとして，水素ステーションをより多く設置することが有効であることは論を俟たない．現行の水素ステーションが有する問題点として，

- (1) 設置費用が高額（4~6 億円）
- (2) 継手の信頼性が低く，点検に要する時間が長大であることによる稼働率の低下

が挙げられる．

設置費用が高額化している原因の一つとして，配管結合に要する部品（継手）が高額（10 万円程度）であることも一因である．一カ所の水素ステーションに機械式継手が 2,000 個以上使用される例もあり，コスト低減に関する要望は大きい．

また，水素圧力が 70 MPa 以上となっており，高品質かつ低価格な配管締結法が求められている．本研究開発では，厚肉パイプ用自動溶接装置を開発し，溶接構造を採用した部品のサブモジュール化を進める．これにより，信頼性を低下させることなく水素ステーションの設置費用を低減可能とし，水素社会を実現するためのインフラ整備を加速することを目指す．

2. 技術動向および研究の内容

2-1 溶接加工の高品質自動化の課題への対応

既存の自動溶接機の改造による溶込み量の制御により高品質な溶接を可能とする高品質自動溶接システム（High quality Automatic Welding System : 以下 HAWS と略す）の開発と溶接条件の確立により，川下製造業者の様々なニーズに応えられる溶接部品の販路開拓を目指した．

*¹ 藤精機株式会社

現在、水素配管用に入手可能な素材は SUS316 であるが、水素圧力 70 MPa に耐えるには肉厚 5 mm 以上が必要であり、かつ継手との接続を考慮すると、外径は 27 mm 程度となる。機械式高圧継手の問題点としては、定期自主検査として、年 1 回の保安検査が義務付けられており、その際継手の分解、再締め付けが行われ、この作業が水素漏洩の原因ともなる。従って信頼性の高い溶接継手にすることはランニングコスト面からも重要であるが、そのためには溶接部は全て完全裏波溶接として、十分な溶け込みが得られていることが必要である。そこで、肉厚の SUS316 配管を突き合わせ溶接するにあたり、溶接を自動化する必要がある。溶接部からのコンタミネーションを防止する意味からも、溶接手法は TIG 溶接とし、全周を自動で溶接可能な装置を試作することとした。

これまでの溶接作業の経験及び高圧水素用配管という特性を考慮して、求められる仕様について検討を行った。その結果、以下の項目が必須な仕様であるということが明らかとなった。

- ①ワーク (SUS316 パイプ) のルートギャップを一定に保ちつつ、全周溶接過程においてもトーチとワークの位置関係が変化しないこと
- ②パイプ内径側に Ar ガスを流し、バックシールドを可能にすること
- ③パイプをチャックにて固定する際、正確な芯出しが可能であること
- ④溶接速度を制御可能であること
- ⑤コンタミ防止のため、溶接部を外部から遮蔽可能であること

以上を踏まえて、装置の設計・製作を行うこととした。なお、装置の大きさに関しては次項の高圧水素配管溶接一体構造に関する検討を踏まえて決定することとした。

2-2 高圧水素配管溶接一体構造化への対応

現状、商用水素ステーションの配管工事は現地で行われていて、作業スペースの制約も影響が大きい。また、現在は水素ステーションに使用する部品の形状について統一的な規格が存在せず、水素ステーションごとにそれぞれ独自に配管を設計している状態である。このような状態はコストの上昇を招く上、完成に要する期間の長期化につながる。この問題点を解決するための課題の一つが、配管部品の標準化である。内部配管を全て標準化部品で構築することは不可能であるが、複数の規格化された標準配管部品を用いることにより、継手の使用量を削減することも可能となり、全体的なコストを削減することが可能となる。このために、現

在稼働中である水素ステーションの内部配管の形状を調査する。各運営事業者にヒアリングしつつ特徴を抽出することにより、高圧水素配管一体構造化部品の仕様を確定する。

2-3 溶接品質管理システムの構築の課題への対応

前述のとおり、SUS316を70 MPa用高圧水素用配管に用いるには、肉厚が5 mm以上必要となる。かつ、安定した溶接品質を確保するためには全周にわたり裏波溶接が必須であるが、過剰な裏波ビードは配管内径の狭窄を起こしてしまうことが危惧される。従って、適切な裏波形状となるような溶接条件の確立が求められる。また、溶接部の形状測定に関して、外径は目視により欠陥の発生している可能性が高い場所の推測が可能であるが、内径側に関しては通常切断して確認することが一般的である。しかしながら、試料を切断することにより欠陥あるいは形状の特異点を切断してしまう可能性もあり、評価の信頼性を向上させるためには非破壊で高精度形状測定が可能な手法について検討する必要がある。

また、HAWSによる自動溶接では一定の品質を満たす溶接が可能になるが、HAWSで用いる加工条件と実際の溶接物の溶接品質との相関関係を明らかにし、製品の品質保証を行う必要がある。まず今年度は、HAWSによる溶接で得られる溶接試験片について、内径変化率など溶接品質の概要を把握することとした。

併せて、非破壊での溶接部の形状測定に関して、X線CTによる測定を試みた。X線CTによる測定は、国立研究開発法人 産業技術総合研究所 計量標準総合センター 工学計測標準研究部門 幾何標準研究グループと協力して行った。使用した装置は、XTH450 (Nikon Metrology 製) である。装置外観を図1に、測定条件を表1に示す。

溶接による内径の変化率測定については、溶接試料を切断した後、必要に応じて樹脂で包埋し、エメリー紙およびバフを使用して研磨し、シュウ酸による電解エッチングを行った。



図1 X線CT装置外観

表1 測定時装置パラメータ設定

管電圧	450 kV
管電流	600 μ A
露光時間	20 ms
メタルフィルタ	Cu 1 mm + Sn 2 mm
ビュー数	1500
ボクセルサイズ	68.7 μ m
スライス間隔	68.7 μ m
スライス数	150 または 200

3. 結果および考察

3-1 HAWS の試作

HAWS に採用する SUS の溶接法について検討を行った。被覆アーク溶接法については、溶接部への溶接棒の供給が困難であること、スラグ巻き込みの可能性が高く品質低下の懸念があることから不採用とした。半自動溶接についても、スラグ巻き込みの可能性があり、同様である。また、YAG レーザを熱源とする各種レーザ溶接は、高いエネルギー密度を有し、選択的に深い溶け込みが得られるという利点がある。しかしながら、HAWS の必須条件である 5 mm 程度の SUS316 パイプで裏波溶接を行うには、装置が大型となり導入費用も高額になる。従って、今回は SUS 材の溶接に多く用いられている TIG 溶接法を採用することとした。ワークはある程度の長さを有するものや側枝構造を有するものであっても対応できるよう、床面より約 1m 高い位置で固定でき、かつ、振れ止めを備える構造とした。試作機の写真を図 2 に示す。本試作機は 2-1 で述べた各種仕様のうち、コンタミ防止機構 (⑤) を備えていない。あくまでも試作機であり今後も回転機構やトーチ周りに改良を加えていく予定であるため、今回はコンタミ防止の遮断機構を未搭載とした。



図 2 HAWS 試作機外観

3-2 高圧水素配管溶接一体化の検討

配管部品の標準化を検討するにあたり、現状の水素

ステーションの構造を調査することは必須である。そこで、県内外の水素ステーションに関して調査を行い、配管の形状、口径、接合方法などについて情報を収集した。その結果、各水素ステーションにおいて基本構造自体には共通点があるが、一体化構造にする配管の範囲と具体的な 3D 構造を具体化するには配管の長さや口径、バルブ、圧力計等の取り付け位置等細部においては設置面積や製作時期などにより様々であった。そこで、HAWS を設置するスペースや装置自体の大きさ等を考慮し、1×1×2 m に収まる範囲の大きさとし、直線配管に複数の側枝を有する構造とすることとした。今後は突合わせ継手とすみ肉継手を有する構造の試作品を製作する予定である。

3-3 溶接品質管理システムの構築の課題への対応

3-3-1 継手部断面観察結果

今回は裏波の安定性に着目し、1 層目の溶接を行った段階で溶接部のマクロ観察を行った。図 3 に断面観察結果の一部を示す。

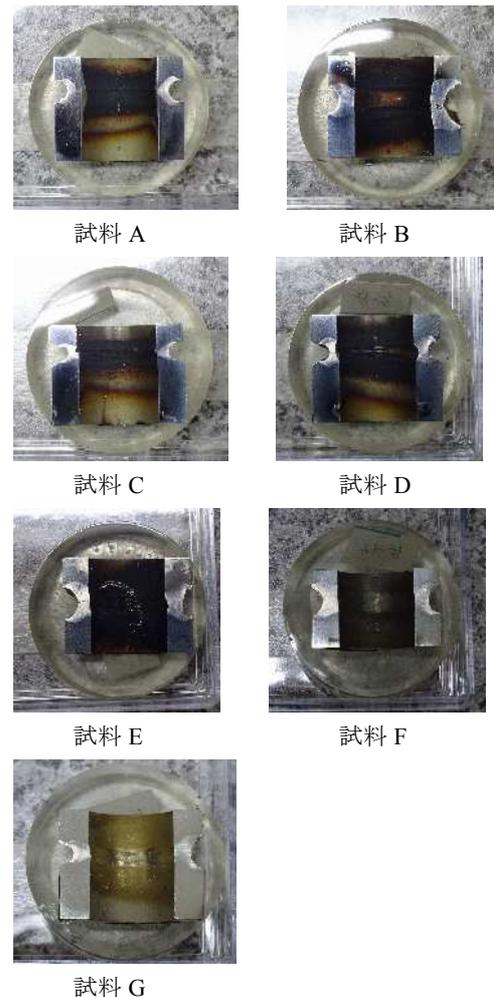


図 3 断面観察試料例

裏波ビードの形状を観察すると、目違い、溶け込み

不足等の凹形状だけでなく、裏波ビードの量にもばらつきがあり、十分な流路を確保できているかが問題となる。そこで、溶接部の内径の変化率を調査した結果は図4のとおりである。今回の試験片においては内径の変化率は-3.7%~8.7%とばらつきを見せたが、ほぼ内径と同程度の裏波を出す溶接条件も存在した。

なお、溶接金属部を観察すると、ポイドやクラックが見受けられる試験片も存在し、更なる溶接条件の検討が必要である。

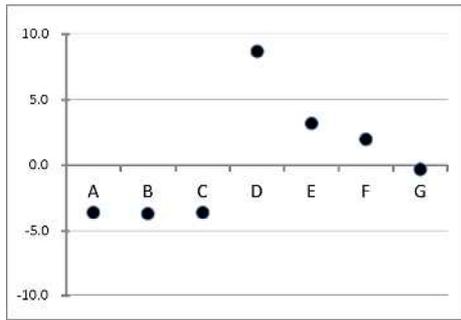


図4 裏波による内径の増減

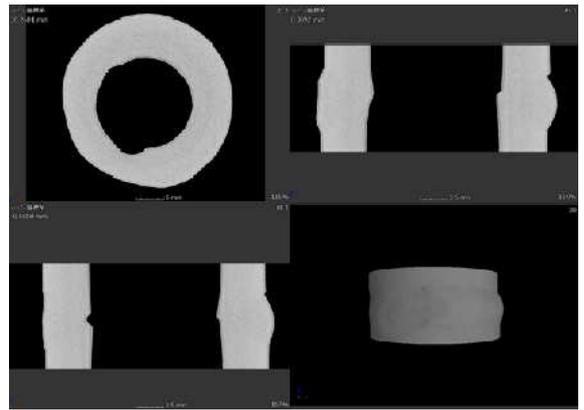
3-3-2 X線CTによる継手部測定結果

溶接試験片測定前に、SUS製分解能ゲージを用いて分解能に関する予備測定を行った。その結果、本システムでは概ね150µm以上の形状については識別可能である一方、概ね150µm以下の形状については識別が困難であるということが明らかとなった。これを基に、溶接試験片の測定を行った。測定したCTボリュームデータを基にして直交3断面画像および3Dボリューム全体像を構築した例を図5に示す。切断による断面観察では得られない、内径部の溶接ビードによる変形が明瞭に確認可能である。

試料2については、左上の断面画像を見るとポイドと思われる内部欠陥が複数確認できる。前述のとおり、欠陥検出可能な大きさは150µm以上であり、ソフトウェアが自動判別した欠陥の数は、図5において表示されていないものも含めて12個存在し、その詳細は表2のとおりである。

表2 検出された欠陥一覧

欠陥性	半径 [mm]	直径 [mm]	中央 x [mm]	中央 y [mm]	中央 z [mm]	体積 [mm ³]	ボクセル	面積 [mm ²]
582.33	0.73	1.46	10.39	1.87	39.39	0.25	761	3.19
361.71	0.49	0.98	-11.36	-6.91	41.57	0.19	590	2.63
320.96	0.39	0.78	-9.67	-8.97	39.48	0.13	388	1.85
212.69	0.33	0.66	-9.49	-9.16	40.36	0.08	232	1.29
39.82	0.22	0.45	-4.67	-13.68	37.33	0.02	55	0.48
39.79	0.22	0.44	4.16	-12.85	39.32	0.02	48	0.46
37.04	0.3	0.59	9.59	3.61	39.32	0.02	48	0.51
36.01	0.2	0.4	-8.71	-9.77	40.32	0.01	40	0.42
10.74	0.16	0.31	-6.37	-11.84	40.05	0	14	0.21
7.64	0.15	0.29	2.3	-13.3	39.39	0	15	0.22
5.42	0.14	0.27	4.57	-12.71	39.29	0	11	0.18
2.7	0.12	0.23	-10.45	-7.55	39.94	0	11	0.16



試料1



試料2

図5 断面画像および3Dボリューム全体像

今回の測定結果はX線CT装置による非破壊計測の有効性を十分に証明しているものと考えられる。

4. 結言

本研究開発において、次の事項を明らかにした。

- (1) 高圧水素配管の自動溶接を可能にする溶接システムの仕様について検討した。その結果、肉厚約5mmのSUS316パイプを突合わせ溶接可能な自動溶接システムを試作した。
- (2) 高圧水素配管のサブモジュールを作製するため現行の水素ステーションを調査し、内部配管のモデル化を検討し、サブモジュールの大きさは1×1×2m程度にすることが妥当であることが明らかとなった。
- (3) 試作機により作製した溶接サンプルに対して接合部の評価を開始した。今回の試験片においては内径の変化率は-3.7%~8.7%とばらつきを見せたが、ほぼ内径と同程度の裏波を出す溶接条件も存在した。また、X線CTを用いて非破壊計測を行ったところ、大きさが概ね150µm以上の欠陥については検出可能であることが明らかとなった。

本研究は経済産業省の戦略的基盤技術高度化支援事業に採択されて実施したものである。

謝辞

X線CTでの計測にあたり、ご指導いただいた国立研究開発法人 産業技術総合研究所 計量標準総合センター 工学計測標準研究部門 幾何標準研究グループ 阿部誠グループ長に感謝を申し上げます。