高圧水素施設で水素漏洩を起こした高圧配管用 T 型ジョイントの 材質調査と破面調査†

渡邊 正五* 松尾 尚** 吉田 聡子*** 松岡 三郎***

Material and Fracture Surface Examination of T-Joint for High Pressure Hydrogen Piping that Caused Hydrogen Leakage in a High Pressure Hydrogen Facility

by

Shogo WATANABE*, Takashi MATSUO**,

Satoko YOSHIDA*** and Saburo MATSUOKA***

This paper deals with the material and fracture surface examination of T-type joint for piping that caused hydrogen leakage in a high pressure hydrogen facility (Service pressure: 99 MPa). T-type joint is made of precipitation hardening martensitic 17-4PH stainless steel. The design fracture pressure of T-type joint is as high as 1050 MPa. Nevertheless, T-type joint caused hydrogen leakage in 150 MPa hydrogen gas whose pressure was 14 % of the design fracture pressure. Chemical composition analysis, microstructure observation and Vickers hardness measurement proved that 17-4PH of T-type joint was sound. Fracture surface observation showed that semi-elliptical crack surface was covered with quasi-cleavage and that peel-like defects were formed on taper surface. It was presumed from these points that hydrogen-leakage of T-type joint was caused by hydrogen-induced crack growth from peel-like defect in 150 MPa hydrogen gas.

Key words:

T-type joint, 17-4PH stainless steel, Hydrogen-leakage, Material and fracture surface examination, Quasi-cleavage, Peel-like defect

1 緒 言

燃料電池自動車の開発は 1990 年後半から本格化し¹⁾, 2014 年 12 月に 70 MPa 燃料電池自動車 MIRAI, 2015 年 3 月に CLARITY FUEL CELL が発売された. また, 70 MPa 燃料電池自動車に水素ガスを充填する 70 MPa 水素ステーションが全国の約 100 個所で建設されている. 燃料電池自動車と水素ステーションの安全性を向上させるためには, 使用材料の水素ぜい化を克服することが不可欠である. そのためには, 水素ぜい化に関する基礎研究と事例解析を平行して進めることが重要である. 事例解析としては, 水素漏洩を起こしたフレキホース²⁾, 圧力センサー³⁾の破損解析並びに実証プロジェクト終了後の蓄圧器^{4), 5)}, 圧縮水素容器 VH3⁶⁾, ブレーカー⁷⁾の健全性評価が報告されている.

本研究では, 高圧水素実験施設(常用圧力: 99 MPa)で水素漏洩を起こした高圧ガス配管用 T 型ジョイントの破損解析の第 1 報として, T 型ジョイントの材質調査と破面調査を行う. T 型ジョイントは析出強化型ステンレス鋼 17-4PH で作製されていた. T 型ジョイントの材質調査の

精度を高めるため, 17-4PH と同等である JIS-SUS630 の熱間圧延板(厚さ 20 mm)を準備し, 熱間圧延板についても材質調査を行う.

2 T 型ジョイントの使用履歴

Table 1 に, 高圧水素実験施設(常用圧力: 99 MPa)に設置されていた T 型ジョイントの使用履歴を示す. 17-4PH 製 T 型ジョイントの設計破壊圧力は 1050 MPa である. 高圧水素実験施設の受け入れ検査において, 水による耐圧試験を高圧水素実験施設の常用圧力 99 MPa より高い 247.5 MPa で行ったのち, 窒素ガスによる気密試験を 165 MPa で 1 回, 150 MPa で 2 回, 水素ガスによる試運転と気密試験を 150 MPa で 3 回行った. 3 回目の水素ガスに

Table 1 Usage history of T-joint.

	Hydraulic test	N ₂ gas test	H ₂ gas test
1 st step	247.5 MPa	165.0 MPa	-
2 nd step	-	-	150 MPa
3 rd step	-	150 MPa	150 MPa
4 th step	-	150 MPa	-
5 th step	-	-	150 MPa
Hydrogen leakage			

本報を「高圧水素施設で水素漏洩を起こした高圧配管用 T 型ジョイントの破損解析 (第 1 報) (Failure analysis of T-joint for high pressure hydrogen piping that caused hydrogen leakage in a high pressure hydrogen facility, I)」とする.

† 原稿受理 令和元年 6 月 3 日 Received June 3, 2019 ©2020 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 水素エネルギー製品研究試験センター 〒819-1133 糸島市富
Hydrogen Energy Test and Research Center, Tomi, Itoshima 819-1133.

** 福岡大学 〒814-0180 福岡市城南区七隈
Fukuoka University, Jonan-ku, Fukuoka 814-0180.

*** 九州大学 水素材料先端科学研究センター 〒819-0395 福岡市西区元岡
HYDROGENIUS, Kyushu University, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395.

よる試運転・気密試験を行ったとき、水素が漏洩した。水素ガスによる試運転・気密試験で使用した圧力 150 MPa は T 型ジョイントの設計破壊圧力 1050 MPa の 14 % である。水素ガスによる試運転・気密試験については、約 5 分で 150 MPa まで昇圧し、一晚 150 MPa を保持し、翌日に 150 MPa からの圧力低下を調べたのち、減圧した。

Fig. 1 (b) に水素漏洩した T 型ジョイント (幅 75.9 mm, 高さ 57.0 mm, 厚さ 37.7 mm) を示す。Fig. 1 (a) に示すように、T 型ジョイントのテーパ部分にき裂が目視で観察できた。

以上の事実より、水による耐圧試験と窒素ガスによる気密試験で問題が生じなかったことから、T 型ジョイントは適正に作製されていたと判断できる。一方、3 回目の水素ガスによる試運転・気密試験でき裂から水素漏洩が起こったことから、T 型ジョイントで使用されていた 17-4PH の水素ぜい化は破損解析の重要な視点の一つであると考えられる。

3 T型ジョイントと熱間圧延板からの試料・試験片の切り出し

3・1 T型ジョイント

Fig. 1 (a) に示すように、T 型ジョイントのテーパ部分にき裂が存在することが目視で確認できた。き裂は反対側のテーパ部分にも存在した。この点を考慮し、破面観察用試料に加え、化学成分分析用試料、ビッカース硬さ試験用試料、組織観察用試料を T 型ジョイントより切り出した。まず、Fig. 1 (b) の黄色の線で示した 3 箇所を切断し、A, B, C, D のブロックに分割した。分割した様子を Fig. 2 (a) と (b) に示す。Fig. 2 (b) は、Fig. 2 (a) の切断面の状態を示したものである。ブロック A において、き裂から十分離れた場所から組織観察 (EBSD: Electron Backscatter Diffraction) 用試料、ブロック D から化学成分分析用試料を採取した (Fig. 2 (a))。ブロック C において、破面出しを容易にするために、き裂先端から 2 mm 程度の余裕を残して余分な部分を切り落とした (Fig. 2 (c))。切り落とした部分からビッカース硬さ測定用試料を採取した。さらに、破面出しを容易にするために、ブロック C の上部に切り込みを入れた (Fig. 2 (d))。切り込みを入れたブロック C を液体窒素で 10 分程度冷却し、急速破壊すなわちぜい性破壊しやすい状態にした後、Fig. 2 (d) の下方向からハンマーで叩いて破面出しした。

3・2 熱間圧延板

後述する化学成分分析結果とビッカース硬さ測定結果 (Table 2 参照) をもとに、T 型ジョイントの 17-4PH と対

Fig. 1 Hydrogen-leaked T-joint.

Fig. 2 Samples for chemical composition analysis, EBSD analysis and Vickers hardness measurement.

応する JIS-SUS630^{8),9)}の熱間圧延板 (板厚 20 mm) を準備するとともに、準備した熱間圧延板から 70 mm×70 mm, 厚さ 20 mm の正方形板を切り出し、熱処理を行った。熱処理として、JIS G 4304 で規定される H900 にしたがって、溶体化処理 (1040 °C, 30 分, 水冷) した後、時効処理 (490 °C, 6 時間, 空冷) を行った。時効処理した 70 mm×70 mm の板から 7 mm×7 mm, 厚さ 1 mm の試料を切り出し、化学成分分析、ビッカース硬さ測定、EBSD による結晶方位解析を行った。

4 T型ジョイントと熱間圧延板の材質調査

4・1 化学成分分析

T 型ジョイントは 17-4PH で作製されていると報告を受けた。そこで、17-4PH に対応する JIS-SUS630 の熱間圧延板 (板厚 20 mm) を準備した。Table 2 に T 型ジョイントと熱間圧延板の化学成分分析結果を示す。Table 2 には JIS-SUS630 の規格範囲を JIS 規格^{8),9)}から引用して示してある。T 型ジョイントと熱間圧延板の化学成分は一致しており、JIS-SUS630 の規格範囲内であった。この結果から、T 型ジョイントは 17-4PH で作製されたことが確認できた。

Table 2 Chemical composition (mass %) and hardness of T-joint and hot-rolled plate.

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Nb	HRC	HV
T-joint	0.047	0.002	0.66	0.023	0.002	4.2	15.05	3.3	0.22	—	448
Hot-rolled plate	0.04	0.32	0.77	0.25	0.011	4.73	15.46	3.27	0.4	—	440
SUS630 (JIS G 4303)	< 0.07	< 1.00	< 1.00	< 0.040	< 0.030	3.00~ 5.00	15.00~ 17.50	3.00~ 5.00	0.15~ 0.45	>40	>(392)*

* : Conversion value from HRC.

4・2 ビッカース硬さ測定

ビッカース硬さは、T型ジョイントと熱間圧延板から切り出した7 mm×7 mm、厚さ1 mm 試料の表面をエメリー紙(#1500)で仕上げ、押し込み荷重9.8 N、保持時間30 sの条件で20点測定した。Table 2に測定したビッカース硬さの平均値を示す。Table 2には、JIS-SUS630をH900の条件で熱処理した時の硬さの規格範囲も示す。規格範囲はロックウェル(Cスケール)HRCで与えられていたもので、ビッカース硬さHVに換算して示した。T型ジョイントのビッカース硬さはH900熱処理したJIS-SUS630のビッカース硬さの規格範囲内であった。そこで、熱間圧延板にH900条件を満たす溶体化処理(1040℃、30分、水冷)と時効処理(490℃、6時間、空冷)を施した。Table 2に示すように、熱間圧延板のビッカース硬さはT型ジョイントのビッカース硬さと同等であった。この結果から、T型ジョイントにはH900に相当する熱処理が施されていたことが判明した。

4・3 EBSDによる結晶方位解析

組織は電子線後方散乱回折(EBSD: Electron Back Scatter Diffraction)で調べた。EBSD解析用試料(7 mm×7 mm、厚さ1 mm)の表面は、エメリー紙(#1500)およびダイヤモンドペースト(粒径1.25 μm)で研磨仕上げたのち、コロイダルシリカ溶液(粒径0.04 μm)を用いて最終仕上げした。Fig. 3のEBSD像は、T型ジョイントと熱間圧延板の組織がマルテンサイトであることを示している。また、T型ジョイントと熱間圧延板の両方において、A面とB面のEBSD像は同じであることから、材料は異方性を示さず、等方的であることがわかる。しかし、熱間圧延板(Fig. 3 (b))に比べ、T型ジョイント(Fig. 3 (a))のマルテンサイトは少し粗い。この原因は、幅78.9 mm、高さ57.0 mm、厚さ37.7 mmのT型ジョイント(Fig. 1 (b))が厚さ20 mmより厚い板から作製されたため、T型ジョイントの圧延比が小さかったことによると考えられる。

以上の化学成分分析、ビッカース硬さ測定、EBSDによる組織観察の結果から、T型ジョイントはH900相当の熱処理を施された17-4PHで作製され、その材質は健全であったと判断できる。

5 T型ジョイントの破面調査

5・1 破面観察

Fig. 4にT型ジョイントに形成されていた半だ円形状のき裂および水平穴、垂直穴、テーパの各部分をマクロ写真に示す。また、マクロ写真に示した位置(A~F)を走査型電子顕微鏡(SEM: Scanning Electron Microscope)で観察した。これらの位置で得られたSEM像をFig. 5に示す。Aは半だ円き裂の外側であり、液体窒素温度で強制破壊すなわちぜい性破壊させた位置である。そのため、SEM像はリバーパターンを有する平坦なファセットから成るへき開破面を示した(Fig. 5 (a))。半だ円き裂の境界Bでは、二次割れが形成されていた(Fig. 5 (b))。半だ円き裂の内側Cにおける破面は無特徴であった(Fig. 5 (c))。すなわち、ファセットのような平坦な面上にリバーパターン

Fig. 3 EBSD images of microstructure.

Fig. 4 Macroscopic fracture surface of T-joint.

(a) Magnification of A in Fig. 4

(b) Magnification of B in Fig. 4

(c) Magnification of C in Fig. 4

(d) Magnification of D in Fig. 4

(e) Magnification of E in Fig. 4

(f) Magnification of F in Fig. 4

Fig. 5 SEM images of A through F in Fig. 4.

ンがほとんど観察されなかった．このような破面は擬へき開 (QC : Quasi-Cleavage) 破面または水素誘起継続すべり (HIS² : Hydrogen Induced Successive Slip) 破面と名付けられ, 低合金鋼 SCM435, 炭素鋼 SM490B, ステンレス鋼 SUS304 を用いた 115 MPa 水素ガス中の低ひずみ速度引張 (SSRT : Slow Strain Rate Tensile) 試験で報告されている¹⁰⁾. 同様な QC 破面は半だ円き裂の中央 D, 水平穴付近 E, テーパー付近 F においても観察された (Fig. 5 (d) ~ (f)).

破面観察に加え, 水平穴表面, 垂直穴表面, テーパー表面を SEM で観察した. Fig. 6 中の矢印で示すように, テーパー表面にはく離状の欠陥が観察された. 同様なはく離状欠陥は反対側のテーパー表面でも観察された. はく離状欠陥は, コーンアンドスレッド継手で T 型ジョイントのテーパーにパイプ先端のコーンをスレッド (ねじ) で締結されたときに形成されたと考えられる. Fig. 6 の位置 H の最も大きいはく離状欠陥を対象にし, 角度が 10° 異なるステレオ SEM 像を取得し, 3 次元解析を行った. Fig. 7 (a) の A-A' と B-B' の断面プロファイルを Fig. 7 (b) と (c) に示す. Fig. 7 (c) から約 13.5 μm の高さの段付きが形成されていたことがわかる. そこで, このような段付きの根元からき裂が発生・進展したと考え, 破面とテーパー表面の両方を含めて破壊起点であろう箇所を観察したところ, Fig. 8 (a) の SEM 像を得た (Fig. 6 の位置 J). この SEM 像に対しても 3 次元解析を行い, C-C' の断面プロファイルを Fig. 8 (b) に示した. 断面プロファイルは, はく離状欠陥の高さ 24 μm の段付きの根元からき裂が発生・進展したことを暗示している. Fig. 8 (b) には, 仮想のはく離表面 (破壊前) を青色の破線で示している.

Table 1 の T 型ジョイントの使用履歴で説明したように, 150 MPa 水素ガスによる 3 回目の試運転と気密試験において水素が漏洩した. 水素ガス圧力 150 MPa は設計破壊圧力 1050 MPa の 14 %である. この点と上述の破面観察結果を考え合わせると, 設計破壊圧力の 14 %でしかない低負荷であるにもかかわらず, 水素ガスに曝されることで, 水素誘起き裂がはく離状欠陥から発生・進展したため, T 型ジョイントの水素漏洩が起こったと推定できる.

5・2 NASA水素ぜい化データ

NASA データベース¹¹⁾に示されている各種材料の水素ぜい化データによると, T 型ジョイントに使用された 17-4PH (16Cr-4Ni-4Cu-0.03Nb, H900 熱処理で $\sigma_B > 1310 \text{ MPa}$)

と同族の 17-7PH (17Cr-7Ni-1Nb, HT1050 熱処理で $\sigma_B > 1140 \text{ MPa}$) は最も水素ぜい化するグループ“Extremely embrittled”に分類されている. Table 3 は, NASA データベースと関連論文¹²⁾から引用した 17-7PH の引張特性である. 引張試験は 69 MPa ヘリウムガス中と 69 MPa 水素ガス中で平滑丸棒試験片と切欠き丸棒試験片を用いて行われている. 切欠き丸棒試験片には応力集中係数 $K_t = 8.7$ の極めて鋭い環状切欠きが加工されている. 平滑丸棒試験片 (Table 3 (a)) では, 引張強度 σ_B はヘリウムガス中と水素ガス中ではほぼ同じであるが, 絞り ϕ は水素ガス中で著しく低下している. そのため, 水素ぜい化指標として用いられる相対引張強度 RTS (Relative Tensile Strength) は 0.92 となり, ほぼ 1 であるが, 相対絞り RRA (Relative Reduction of Area) は 0.06 となり, 極めて小さい. 切欠き丸棒試験片 (Table 3 (b)) では, σ_B が水素ガス中で低下す

(a) SEM image

(b) Profile of A-A'

(c) Profile of B-B'

Fig. 7 Magnification of H in Fig. 6.

Fig. 6 SEM image of G in Fig. 4. Yellow arrows show peel-like defects.

(a) SEM image

(b) Profile of C-C'

Fig. 8 Magnification of J in Fig. 6.

るため、相対切欠き引張強度 RNTS (Relative Notch Tensile Strength) は 0.23 と小さくなり、相対切欠き絞り RNRA (Relative Notch Reduction of Area) については有効なデータが得られていない。NASA データベースでは、RRA と RNTS を用いて材料のグループ分けを行っている。17-7PH は、RRA (=0.06) と RNTS (=0.23) が小さいため、“Extremely embrittled”グループに分類されている。水素ぜい化をほとんど起こさない材料すなわち“Negligibly embrittled”グループに分類されている材料 (SUS316 や A286) では、RRA $\div$ 1, RNTS $\div$ 1 である。

Table 3 の 17-7PH の結果が 17-4PH にも適用できると考えると、17-4PH 製 T 型ジョイントの水素漏洩は次のように推定できる。T 型ジョイントの設計破壊圧力 1050 MPa の 14% でしかない 150 MPa 水素ガス中においては、T 型ジョイントの水平穴、垂直穴、テーパの表面における円周方向応力 (はく離状欠陥の段差に垂直に作用する応力) は $\sigma_{0.2}$ 以下の弾性応力であると考えられる。このことを考慮に入ると、Table 3 (a) で平滑試験片の引張強度は水素ガス中でほとんど低下しない (RTS = 0.92) ことから、水平穴、垂直穴、テーパの平滑表面では、水素誘起き裂は形成されないと推定できる。一方、Table 3 (b) で引張強度が水素ガス中で切欠きにより大幅に低下する (RNTS = 0.23) ことから、Fig. 6 と 7 で示したようなはく離状欠陥部においては、 $\sigma_{0.2}$ 以下の弾性応力であっても水素誘起き裂が発生し得ると考えられる。つまり、T 型ジョイントの水素漏洩ははく離状欠陥の段付き根元から発生・進展した水素誘起き裂によると推定できる。しかし、この推定を確実にするためには、T 型ジョイントの材料である 17-4PH の高圧水素ガス中における引張特性と破壊じん性 (水素誘起き裂進展下限値) を取得し、破壊力学解析を行う必要がある。これについては、第 2 報「高圧水素施設で水素漏洩を起こした高圧配管用 T 型ジョイントの破壊力学解析」で報告する。

6 結 論

高圧水素実験施設 (常用圧力 : 99 MPa) の立ち上げにおいて、150 MPa 水素ガスによる試運転・気密試験を行っていたときに、17-4PH 製高圧配管用 T 型ジョイント (設計破壊圧力 1050 MPa) から水素ガスが漏洩した。水素漏洩を起こした T 型ジョイントの破損解析の第 1 報として、T 型ジョイントの材質調査と破面調査を行った。比較材料として、17-4PH と同等である JIS-SUS630 の熱間圧延板 (厚さ 20 mm) を準備し、材質調査で使用した。得られた結果を下記に示す。

(1) T 型ジョイントの使用履歴によると、水による耐圧試験を 247.5 MPa で 1 回行い、窒素ガスによる気密試験を 165 MPa で 1 回、150 MPa で 2 回行った。これらの 2 種類の試験で問題が生じなかったため、T 型ジョイントは

 Table 3 Tensile properties of 17-7PH in 69 MPa helium gas and hydrogen gas^{(1),(2)}.

(a) Smooth specimen

	$\sigma_{0.2}$ (MPa) ⁺	σ_B (MPa) ⁺	δ (%) ⁺	φ (%) ⁺	RTS ⁺⁺	RRA ⁺⁺
Helium gas	1034	1131	17	45	0.92	0.06
Hydrogen gas	-	1041	17	2.5		

⁺ $\sigma_{0.2}$: 0.2 % proof strength, σ_B : Tensile strength, δ : Elongation, φ : Reduction of area

⁺⁺ RTS (= $\sigma_{B,H}/\sigma_{B,He}$): Relative Tensile Strength, RRA (= φ_H/φ_{He}): Relative Reduction of Area

 (b) Notched specimen ($K_t = 8.7$)

	$\sigma_{0.2}$ (MPa) [*]	σ_B (MPa) [*]	δ (%) [*]	φ (%) [*]	RNTS ^{**}	RNRA ^{**}
Helium gas	-	2082	-	0.6	0.23	-
Hydrogen gas	-	483	-	0.4		

^{*} $\sigma_{0.2}$: 0.2 % proof strength, σ_B : Tensile strength, δ : Elongation, φ : Reduction of area

^{**} RNTS (= $\sigma_{B,H}/\sigma_{B,He}$): Relative Notched Tensile Strength, RNRA (= φ_H/φ_{He}): Relative Notched Reduction of Area

適正に作製されていたと判断できた。2種類の試験に続き、150 MPa 水素ガスによる試運転・気密試験を3回行ったところ、3回目の試運転・気密試験で水素漏洩が起こった。

(2) T型ジョイントと SUS630 の熱間圧延板の化学成分分析、ビッカース硬さ測定、EBSD による組織観察から、T型ジョイントは H900 の熱処理が施された 17-4PH で作製され、その材質は健全であったことが明らかになった。

(3) T型ジョイントの破面観察によると、形成されていた半だ円き裂は擬へき開破面で覆われていた。テーパ一表面には、はく離状欠陥が存在した。これらの結果から、設計破壊圧力 1050 MPa の 14 %である比較的低圧の 150 MPa 水素ガス中においても、水素誘起き裂のはく離状欠陥から発生・進展することによって、T型ジョイントの水素漏洩が起こったと推定できた。しかし、この推定を確実にするためには、17-4PH と同等である SUS630 を用い、高圧水素ガス中における引張特性と破壊じん性（水素誘起き裂進展下限値）を取得し、破壊力学解析を行う必要がある。

参 考 文 献

- 1) H. Onaka, "Development status of fuel cell vehicle", *Journal of High Temperature Society*, Vol.35, No.5, pp.231-238 (2009).
- 2) Y. Murakami, T. Kanazaki, Y. Fukushima, H. Tanaka, J. Tomuro, K. Kuboyama, M. Matsue, M. Ito and H. Ando, "Failure analysis of SUS316L flexible hose for hydrogen station and fatigue life prediction method", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.75, No.749, pp.93-102 (2009).
- 3) T. Miyamoto, T. Kanazaki, H. Tasaki, N. Kobayashi, S. Matsuoka and Y. Murakami, "Failure analysis on the diaphragm of a high pressure hydrogen transducer", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.59, No.12, pp.916-923 (2010).
- 4) T. Matsuo, J. Yamabe, Y. Fukushima, S. Matsuoka and Y. Murakami, "Effect of microstructure on charpy impact properties and LBB assessment of SCM435 steel for storage cylinders of 35MPa hydrogen stations", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.59, No.12, pp.924-931 (2010).
- 5) A. Macadre, M. Artamonov, S. Matsuoka and J. Furtado, "Effects of hydrogen pressure and test frequency on fatigue crack growth properties of Ni-Cr-Mo steel candidate for a storage cylinder of a 70 MPa hydrogen filling station", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.78, No.18, pp.3196-3211 (2011).
- 6) H. Itoga, S. Watanabe, Y. Fukushima, S. Matsuoka and Y. Murakami, "Fatigue crack growth of aluminum alloy A6061-T6 in high pressure hydrogen gas and failure analysis on 35 MPa compressed hydrogen tanks VH3 for fuel cell vehicles", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.78, No.788, pp.442-457 (2012).
- 7) S. Matsuoka, S. Hamada, H. Itoga, M. Nakamura, S. Okazaki and H. Matsunaga, "Case study on cooling pipe of pre-cooler used for verification test of 70 MPa hydrogen station", *Transactions of the JSME*, Vol.83, No.848, DOI:10.1299/transjsme.16-00459 (2017).
- 8) JIS G 4303, *Stainless steel bars* (2012).
- 9) JIS G 4304, *Hot-rolled stainless steel plate, sheet and strip* (2012).
- 10) O. Takakuwa, J. Yamabe, H. Matsunaga, Y. Furuya and S. Matsuoka, "Comprehensive understanding of ductility loss mechanisms in various steels with external and internal hydrogen", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol.48, Issue.11, pp.5717-5732 (2017).
- 11) NASA, NSS 1740.16, *Safety standard for hydrogen and hydrogen systems*, Washington, D.C (1997).
- 12) W. T. Chandler and R. J. Walter, "Effect of High-Pressure Hydrogen on Metals", *The 1968 Materials Engineering Exposition & Congress*, American Society for Metals (1968).