

鋼管事業の新エネルギーへの取り組み

Initiatives for Energy Transition in the Pipe and Tubular Sector

石川 信行 ISHIKAWA Nobuyuki JFE スチール 厚板セクター部 主任部員 (部長)・博士 (工学)
平田 知正 HIRATA Norimasa JFE スチール 鋼管センター 鋼管企画部 主任部員 (課長)

要旨

カーボンニュートラルの実現のため、水素へのエネルギー転換と CO₂ 分離回収貯留 (CCS) の技術開発が世界各地で進められている。本稿では、CCS を含む水素サプライチェーンで必要とされる鋼管と JFE スチールでの開発状況を概説する。

Abstract:

Technologies for energy transition to hydrogen and CO₂ capture and storage (CCS) are being developed around the world for the realization of carbon neutrality. This paper briefly introduces pipe and tubular products used in the hydrogen supply chain including CCS and development status of these products in JFE Steel.

1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現には、従来の化石燃料から水素、アンモニアなどへのエネルギー転換が不可欠であり、これら新エネルギーの大規模サプライチェーン構築に向けた技術開発や実証事業が世界各地で進められている。日本では 2040 年で 1200 万トン、2050 年で 2000 万トンの水素導入 (アンモニア含む)¹⁾ を目指して、海外で製造した水素の海上輸送や水素混焼発電など、多くの実証事業が進行中である。水素には、再生可能エネルギーによる電力などで製造したグリーン水素のほかに、石油天然ガスの改質で製造し、製造過程で発生する CO₂ を分離回収・貯留 (CCS: Carbon dioxide Capture and Storage) するブルー水素があり、CCS を活用したブルー水素も水素導入量拡大のために極めて重要と考えられている。さらに、CCS または CCUS (Utilization) は CO₂ 排出削減に直接寄与する重要な技術であり、国内数か所で CCS 事業化の取り組みも進められている²⁾。

JFE スチールは長年、石油天然ガス分野で必要とされる多くの鋼管商品を開発・製造し、世界のエネルギー安定供給に貢献してきた。エネルギー転換による脱炭素化を進めるためには、水素や CO₂ の輸送や貯蔵または貯留 (圧入) のための新たなインフラが必要となるが、使用される材料には耐水素脆性や耐炭酸ガス腐食性など、従来にない性能が必要となっている。図 1 に CCUS を含む水素サプライチェーンと必要とされる鋼管材料の模式図を示す。本稿では、水素に代表される新エネルギー分野における JFE スチール鋼管事業の取り組み、特に鋼管商品の開発状況に関

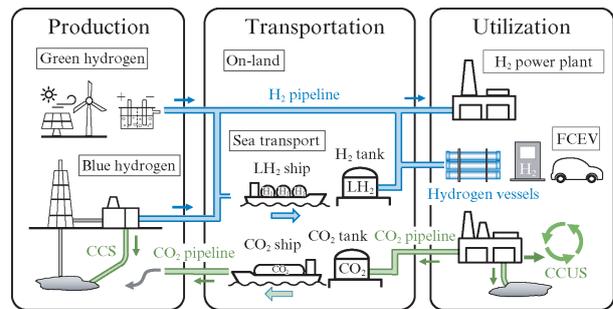


図 1 水素サプライチェーンの模式図 (CCUS 含む)

Fig. 1 Schematics of hydrogen supply chain including CCUS
して概説する。

2. 水素輸送・貯蔵に必要な鋼管商品

2.1 水素輸送用ラインパイプ

海外からの水素の大量輸送には液体水素での船舶輸送が検討されているが、陸上での輸送には高圧水素ガスでのパイプライン輸送が適している。国内でも小規模な水素のパイプライン輸送は行われているが、水素圧力が 1 MPa 未満であり、水素による材質劣化 (水素脆化) が顕著に表れないため、従来の材料が使用できている。しかし、水素を大量に輸送するためには 1 MPa 以上の高圧で輸送する必要があり、圧力に応じて鋼中への水素侵入量が増えるため、特に材料の破壊特性が顕著に低下することが懸念されている³⁾。

水素パイプラインの国際規格としては ASME B31.12 “Hydrogen Pipeline and Piping” があり、API (American Petroleum Institute, アメリカ石油協会) 規格のラインパイプが使用可能であるが、高圧輸送の場合は水素中での材料の破壊靱性試験と疲労き裂伝播試験による破壊安全性の検

2024 年 2 月 22 日受付

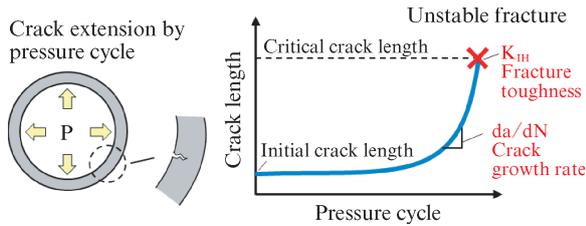


図2 水素パイプラインの破壊安全性評価の概念図

Fig. 2 Concept of integrity assessment of hydrogen pipeline

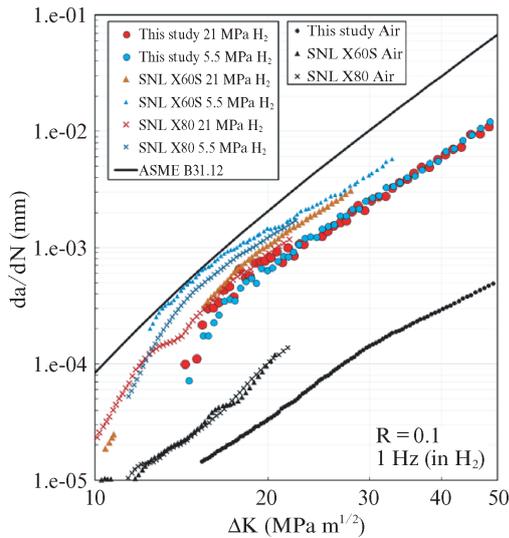


図3 X65ラインパイプの水素中疲労き裂伝播試験結果³⁾

Fig. 3 Fatigue crack growth curves of X65 linepipe³⁾

証が求められている。図2にASME B31.12に規定されている破壊安全性評価の概念図を示す。パイプ内面に微小な欠陥が存在する場合、内圧変動によって疲労き裂進展を生じ、あるところで破壊駆動力が材料の破壊靭性値を超え不安定破壊に至る。JFE スチールは水素輸送用ラインパイプの材料検討にいち早く取り組み、最適な材料設計指針を見出している。図3にAPI規格X65のUOE鋼管（外径914.4mm、鋼管厚さ（以下、管厚）28.6mm）母材部の高圧水素中疲労き裂進展試験結果を示す³⁾。大気中に比べ水素中では疲労き裂進展速度が大幅に増加するが、従来のラインパイプ材の報告値やASME B31.12に規定されている評価曲線に比べ進展速度が遅い。これは、適切な成分設計と鋼板製造時の圧延冷却制御によって微細なベイナイト均一組織となっているためである⁴⁾。本UOE鋼管は、水素中破壊靭性試験においても従来材よりも高い破壊靭性を有する。図4に同じX65鋼管の21MPa水素中での破壊靭性試験結果を示す。母材（BM）に比べ、鋼管シーム溶接部の溶接熱影響部（HAZ: Heat Affected Zone）や溶接金属（WM: Weld Metal）は低い値を示しているが、ASME B31.12に規定される最小破壊靭性値（55MPa√m）に比べ十分に高い値である。このHAZ部の水素中破壊靭性値を用いて破壊安全性の解析を

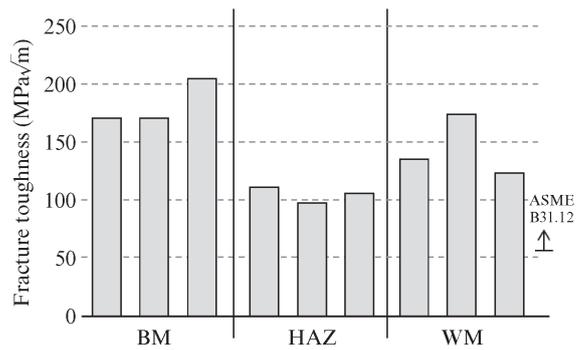


図4 X65ラインパイプの水素中破壊靭性試験結果³⁾

Fig. 4 Fracture toughness test results of X65 linepipe in hydrogen³⁾

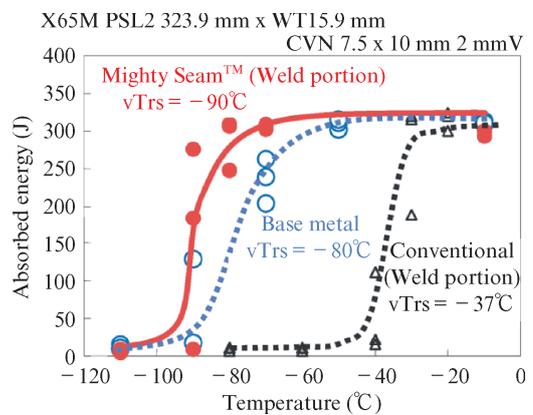


図5 電縫溶接部のシャルピー衝撃特性⁵⁾

Fig. 5 Charpy impact property of ERW weld⁶⁾

行った結果、長さ25mm、深さ3mmの大きさの欠陥があっても十分な安全余裕度を有することが示された⁵⁾。以上のように、適切な材質設計で製造された鋼管を使用することで水素パイプラインの破壊安全性を確保できる。

パイプライン用の鋼管として、電縫鋼管も広く使用されている。JFEスチールは電縫溶接部の信頼性を高めた「マイティーシーム®」を開発し、極低温や海底など厳しい環境のパイプラインに適用されている⁶⁾。マイティーシームは素材の化学成分や圧延条件の最適化、電縫溶接条件やシーム熱処理条件の最適化に加え、フェーズドアレイ超音波探傷技術により電縫溶接部に形成する微小酸化物を全長にわたって監視することで、電縫溶接部の安定した性能を保証するものである。図5に電縫溶接部のシャルピー衝撃特性を示す。マイティーシームは電縫溶接部の酸化物が低減されたことにより母材部と同等以上の高い吸収エネルギーが得られている。マイティーシームは高圧水素輸送用ラインパイプとしてもその性能が期待されており、「海洋石油・天然ガスに係る日本財団とDeepStarの連携技術開発助成プログラム」において、石油メジャーのExxonMobil社（米）、TOTAL Energies社（仏）と共同で高圧水素中での材料適合性評価を進めている⁷⁾。

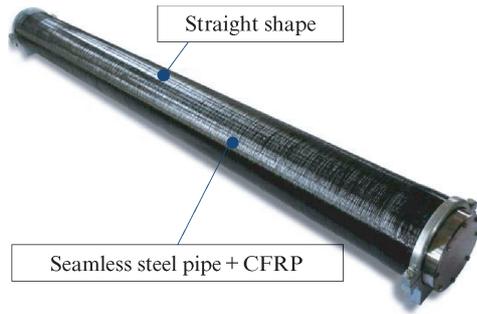


写真1 水素ステーション用 Type2 蓄圧器

Photo 1 Type 2 pressure vessel for hydrogen refilling station

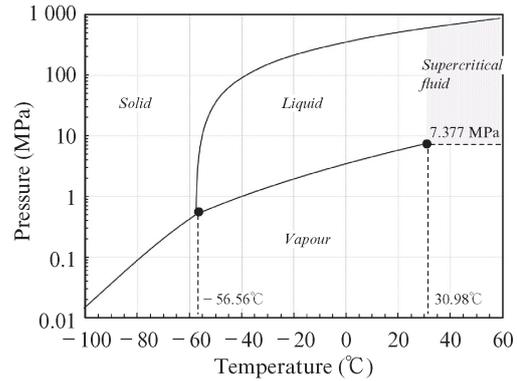


図6 CO₂の状態図¹³⁾

Fig. 6 Phase diagram of CO₂¹³⁾

2.2 水素ステーション用蓄圧器

国内での燃料電池車の普及と水素ステーションの整備は着実に進んでおり、東京オリンピックを契機に燃料電池バスの普及が大幅に拡大し、さらに燃料電池トラックなどの開発も進められている。燃料電池車の普及拡大のためには水素ステーションの建設コスト低減が重要課題であり、低コストの水素ステーション用蓄圧器の開発が進められている⁸⁾。JFE スチールは耐水素脆化特性に優れたシームレス鋼管を素材に炭素繊維強化樹脂 (CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics) を胴部に巻付けた Type2 蓄圧器 (写真1) を JFE コンテナと共同で開発した。Type2 蓄圧器は、高圧力範囲での長寿命化、ストレート構造とすることによる製造コスト低減、さらにはメンテナンスの簡略化が可能という特長がある^{9,10)}。JFE スチールと JFE コンテナは水素ステーションのさらなる低コスト化に対応できる、大容量の Type1 蓄圧器 (CFRP を使用しない鋼製容器) も商品化しており、Type2 蓄圧器と併せて今後の水素ステーション普及への寄与が期待される。

3. CO₂ 輸送・貯留に必要な鋼管商品

3.1 CO₂ 輸送用ラインパイプ

CO₂ (二酸化炭素) は常温常圧では気体で、-79°Cで固体 (ドライアイス) となるが、図6の状態図のように高圧では液化する特徴を持っている。CO₂ のパイプライン輸送は常温以上で圧力 10 MPa 弱の液相または超臨界相 (Supercritical fluid) で運ばれることが多い。CO₂ パイプラインの規格としては、ISO 27913 “Carbon dioxide capture, transportation and geological storage - Pipeline transportation systems” や DNV-RP-F104 “Design and operation of carbon dioxide pipelines” があり CO₂ 流の不純物成分や使用材料が規定されている。いずれの規格でも CO₂ 流に液体の水が存在するといわゆる炭酸ガス腐食¹¹⁾ を起こすため、不純物中の水分は厳しく制限されている。その上でラインパイプ材料には通常の高圧パイプラインと同様の炭素鋼が使用される。

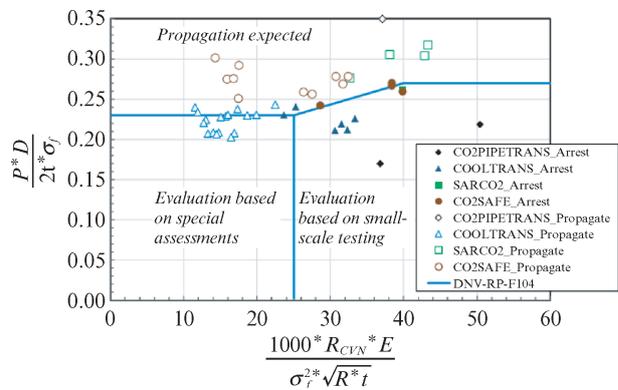


図7 DNV-RP-F104 に従った CO₂ バースト試験結果の整理

Fig. 7 CO₂ burst test results plotted on the DNV-RP-F104 diagram

高圧ガスパイプラインの安全性の課題として高速延性破壊があげられる。これは何らかの事故でラインパイプにき裂が発生した場合、高いガス圧力を駆動力として長距離にわたりき裂が高速で伝播する現象のことである。通常の高圧ガスパイプラインでは適切な材料が使用されていればガス圧の低下とともにき裂は停止するが、高圧の CO₂ (液相又は超臨界相) の場合は圧力が低下すると、図6の状態図で分かるように、気相が発生し圧力が低下しにくくなりき裂が停止しない現象が起きる。CO₂ パイプラインでの高速延性破壊を防止するために必要な材料性能を明らかにするため、これまでに多くの実管バースト実験が行われている¹²⁾。図7はそれらの実験結果を DNV-RP-F104 に規定されている設計式に従ってプロットしたものである。ここで、 P はき裂先端の圧力 (MPa)、 D はパイプ外径 (mm)、 t は管厚 (mm)、 σ_f は流動応力 (降伏応力と引張強さの平均値 MPa)、 R_{CVN} は断面積当たりのシャルピーエネルギー (J/mm²)、 E はヤング率 (MPa)、 R はパイプ半径 (mm) である。グラフの右下の領域ではき裂停止 (Arrest) しており、この領域に入らば、シャルピー吸収エネルギーに従った材料設計が可能である。例えば外径 610 mm、管厚 19.1 mm の API X65 で

表1 API X80 ラインパイプの化学成分 (mass.%)¹⁴⁾
Table 1 Chemical composition of API X80 linepipe¹⁴⁾

C	Mn	Others	Ceq	Pcm
0.06	1.9	Si, Cr, Mo, Nb, Ti	0.45	0.18

$$Ceq = C + Mn/6 + (Cu + Ni)/15 + (Cr + Mo + V)/5$$

$$Pcm = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

表2 API X80 ラインパイプの機械的特性¹⁴⁾

Table 2 Mechanical properties of API X80 linepipe¹⁴⁾

Grade	Tensile properties ^{*1}			Charpy test ^{*2} at -5°C vE (J)
	YS (MPa)	TS (MPa)	Y/T (%)	
API X80	602	706	85	330

*1 API 5L, transvers direction

*2 ISO 148 (converted from ASTM A370)

CO₂ 圧力 10 MPa の場合、必要吸収エネルギーが 210 J 以上となり、CO₂ パイプラインでは通常の高圧パイプラインに比べ高い吸収エネルギーが要求される。なお、強度グレードが X70 以上の場合は実管での実証試験が必要とされている。

日本および世界で CCS または CCUS と合わせた CO₂ のパイプライン輸送の検討が進められている。大量輸送のためにはより高強度で大径のラインパイプが必要となり、図7の DNV 設計式からも読み取れるように、より高い吸収エネルギーが求められる。JFE スチールは鋼板製造時の緻密な組織制御によって、高吸収エネルギー型の高強度ラインパイプを開発している¹³⁾。表1、表2に開発した API X80 UOE 鋼管の化学成分と機械的特性を示す。API X80 UOE 鋼管はきわめて高い吸収エネルギーを有している。このような材質制御はほかのグレードのラインパイプにも適用できることから、CO₂ パイプライン用としてさまざまなラインパイプを供給可能である。

3.2 CO₂ 圧入用高耐食性鋼管

石油や天然ガスを採掘する地中環境は湿潤でかつ CO₂ や H₂S 等の腐食性ガスが含まれる場合がある。このような環境で使用される油井管には優れた耐食性が要求されることから、マルテンサイト系ステンレス鋼の適用事例が多い。一方、CCS 用の CO₂ には回収源からの NO_x, SO_x, H₂, O₂ などの不純物が含まれている場合があり、より厳しい腐食環境になる可能性がある。JFE スチールでは、今後の開発進展に伴うコスト削減や納期短縮を視野に CCS 用圧入管の材料開発を進めるため、耐食性油井管で培った技術を基にマルテンサイト系ステンレス鋼管の耐食性に及ばず不純物の影響評価を進めている。図8に耐 CO₂ 腐食性と耐サワー性（硫化物応力腐食割れ SSC）の観点で整理した、JFE スチールの高 Cr 系耐食性油井管の適用鋼種の例を示す¹⁵⁾。結果として、例えば苫小牧 CCS 実証設備の CO₂ 圧入井向けの鋼管に

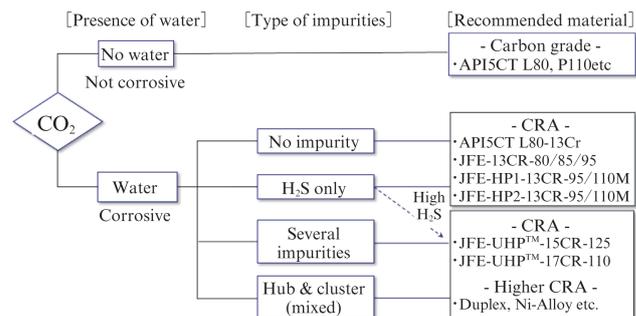


図8 JFE スチールの CO₂ 圧入管用鋼種の例

Fig. 8 Schematic illustration of JFE Steel's material selection for CO₂ injection tubing

JFE-HP2-13CR-110 が採用されており¹⁶⁾、今後、多くの CCS 事業での適用が期待される。

4. おわりに

水素に代表される新エネルギー分野における JFE スチール鋼管事業の取り組み、特に鋼管商品の開発状況を概説した。CCUS を含む水素サプライチェーンでは多くの鋼管が必要とされており、JFE スチールはこれらの商品開発をさらに推進することで、カーボンニュートラルの実現に貢献していく。

参考文献

- 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議。水素基本戦略。2023, p. 11.
- 国内初の CCS 事業化の取り組み。独立行政法人 エネルギー・金属鉱物資源機構。ニュースリリース、2023 年 6 月 13 日。
- Ishikawa, N.; Shimamura, J.; Izumi, D.; Okano, H.; Nishihara, Y. Hydrogen Effect on Linepipe Steel and Material Compatibility to High Pressure Hydrogen Pipeline. Proc. 32nd Int. Ocean and Polar Eng. Conference. 2022, p. 3019-3026.
- Izumi, D.; Ishikawa, N.; Uranga, P.; Isasti, N.; Ibabe, J.M.; Stalheim, D.; Jarreta, D.; Martin, D. Effect of Nb on Grain Growth Behavior in the Heat Affected Zone of Linepipe Steels. ISIJ Int. 2023, vol. 63, no. 6, p. 1066-1074.
- Ishikawa, N.; Sakimoto, T.; Shimamura, J.; Wang, J.; Wang, Y.Y. Integrity Assessment of Linepipes for Transporting High Pressure Hydrogen based on ASME B31.12. Proc. 14th Int. Pipeline Conference. 2022, IPC2022-87180.
- 岡部能知, 豊田俊介, 松井穰, 伊木聡, 飯本哲. 溶接部品質に優れたラインパイプ用電縫鋼管「マイティースーム®」の開発。あたりあ。2014, vol. 53, no. 3, p. 104-106.
- 高圧水素輸送用ラインパイプ材の研究開発について～石油メジャーが参画する日本財団と DeepStar の連携技術開発助成プログラムに採択～。JFE スチール。ニュースリリース、2023 年 6 月 21 日。
- 石川信行, 高木周作, 高野俊夫. 水素ステーション用蓄圧器と材料特性。水素エネルギーシステム, 2016, vol. 41, no. 1, p. 58-59.
- JFE 製水素ステーション用 Type2 蓄圧器の実用化～国産初の Type2 蓄圧器を採用した商用ステーションの実運用開始～。JFE スチール。ニュースリリース、2020 年 12 月 25 日。
- 岡野拓史, 高木周作, 松原和輝, 石川信行, 竹村泰昌, 影山泰輔, 戸田祐貴, 高野俊夫. 鋼と炭素繊維強化樹脂層を複合させた超高圧水素複合蓄圧器の開発。あたりあ。2021, vol. 60, no. 2, p. 113-115.

- 11) 木村光男, 宮田由紀夫, 島本健. 高深度油井・ガス井における腐食と高耐食油井管. JFE 技報. 2007, no. 17, p. 42-46.
- 12) Michal, G.; Øtsby, E.; Davis, B.J.; Rønneid, S.; Lu, C. An Empirical Fracture Control Model for Dens-Phase CO₂ Carrying Pipelines. Proc. 13th Int. Pipeline Conference. 2020, IPC2020-9421.
- 13) DNV-RP-F104, Design and operation of carbon dioxide pipelines. 2021.
- 14) Kimura, H.; Ishikawa, N.; Shimamura, J.; Kakihara, S.; Kondo, J. Development of Grade X80 High Charpy Energy Linepipe by MA Formation Control. Proc. 11th Int. Pipeline Conference. 2016, IPC2016-64179.
- 15) JFE スチールの高強度高耐食性シームレス油井用鋼管. JFE 技報. 2012, no. 29, p. 61-63.
- 16) 苫小牧 CCS 実証設備向け高性能特殊ネジ継手付き高合金継目無鋼管の設置完了～『JFE-HP2-13CR-110』および『JFEBEAR[®]』国内初採用～. JFE スチール. ニュースリリース, 2015年8月24日.