

## 水素ステーションでの低合金鋼の利用に向けて制定された技術文書

- ◇NEDO 事業において、水素ステーションでの高圧水素設備に使用する設備、材料について技術基準化、規制見直しを図ってきた。
- ◇汎用低合金鋼の利用については、82MPa 級のタイプ1 鋼製蓄圧器や、さらに高温・高圧水素中での使用可能範囲の拡大を図り、対象を圧縮機まで拡張した JPEC 技術文書を制定した。
- ◇技術基準、技術文書が制定されていなかったタイプ2 蓄圧器の JPEC 技術文書を制定した。これにより、国内においてタイプ1～4の定置式蓄圧器全ての技術基準が完備された。

## 1. はじめに

地球温暖化対策の一つとして、走行中に温室効果ガスである二酸化炭素を排出しない燃料電池自動車（FCV）への期待が高まっている。FCV の普及のためにはガソリン車と同等な 600 km以上の走行距離、電気自動車より短い充填時間が求められ、これらを実現するには FCV への水素の搭載圧力を 35MPa 級から 70MPa 級にまで高める必要があった。2011年1月の民間13社の「燃料電池自動車の国内市場導入と水素供給インフラ整備に関する共同声明」以来、その目標に向かってインフラ整備の一環として 70MPa 級水素ステーションの建設が計画された。

2012年に出された 70MPa 級水素ステーションの要件としては、1時間に6台の FCV へ 5 kgの水素を各3分間という急速で充填できることであり、さらに FCV タンクへの急速充填時にタンク温度が 85℃を超えないようにするために、蓄圧器については 82MPa 仕様が求められるとともに、充填時の水素を -40℃に冷却することが求められた。

## 2. 高圧水素設備で使用できる鋼材、技術文書制定への流れ

70MPa 級水素ステーション建設に合わせて、使用する鋼材が -40℃の高圧水素に晒されることから、SUS316 ステンレス鋼に関しては水素適合性材料の選定基準が Ni 当量規制という考えにより示され、2012年に一般高圧ガス保安規則例示基準が改正された（図1）。低合金鋼の使用に関しては、タイプ1

1. はじめに
2. 高圧水素設備で使用できる鋼材、技術文書制定への流れ
3. NEDO 事業における取組み
  - 3-1. 低合金鋼技術文書制定
  - 3-2. タイプ2技術文書制定
4. 今後の予定

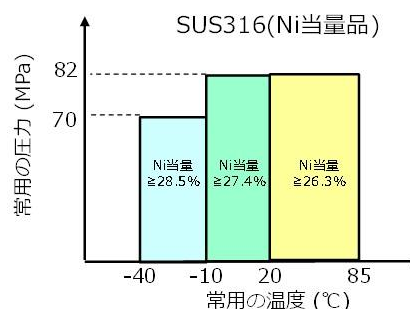


図1 2012年のNi当量規制による例示基準の事例

鋼製蓄圧器用の低合金鋼である SCM435 が 40MPa 以下の水素圧力の条件において使用できる鋼材として例示基準化も図られたが、70MPa 級ステーション用には使用できなかった。

当センターは 2013 年度から開始された NEDO 事業「水素利用技術研究開発事業」の鋼材に関するテーマにおいて、70MPa 級水素ステーションで使用できる金属材料の「種類の拡大」、「温度の拡大」、「使用方法の拡大」をキーワードに研究開発を推進し、例示基準の改正が図られ、現在に至っている（最新では 2020 年 11 月 4 日に例示基準改正が公示されている）。しかし、低合金鋼である SCM435 の例示基準は材料選定等の課題が残り、改正には至っていない。

それと並行して、2013 年 6 月 14 日の規制改革実施計画の閣議決定により、水素ステーションでの使用拡大のための低合金鋼の見直しが行われることとなった（表 1）。

表 1 2013 年 6 月 14 日規制改革実施計画における低合金鋼に関する当該部分の抜粋

46	水素スタンドの使用可能鋼材に係る性能基準の整備	海外で使用実績のあるクロムモリブデン鋼等の鋼材を我が国の水素スタンドにおいても使用できるよう、ドイツ、米国等諸外国の事例を踏まえ、使用可能鋼材の拡大につき検討し、その結果に基づき一般高圧ガス保安規則の例示基準を見直す。	平成25年度検討開始、平成25年度以降平成27年度までに順次結論、結論を得次第順次措置	経済産業省
----	-------------------------	---	---	-------

この閣議決定を受けて、当センターは 82MPa 級のタイプ 1 蓄圧器への低合金鋼の利用を推進すべく NEDO 事業「水素利用技術研究開発事業」において「低合金鋼技術文書制定」を 2014 年度に新たなテーマとして立上げ、検討を開始した。タイプ 1 蓄圧器を想定した低合金鋼技術文書は 2017 年度に JPEC-TD 0003 (2017) として制定し、継続された NEDO 事業「超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業」(2018~2022 年度) の鋼材テーマに引き継がれ、圧縮機まで使用範囲を拡大させた低合金鋼技術文書が 2020 年度に JPEC-TD 0003 (2020) として改正されるに至った。

その流れと並行して、水素ステーション用蓄圧器として、低合金鋼を利用したタイプ 1 鋼製蓄圧器より薄肉化が可能なため、熱処理および軽量化の観点で有利であり、なおかつタイプ 1 並みの低価格化が見込まれるタイプ 2 蓄圧器への要望が高まった。2015 年度より NEDO 事業「水素利用技術研究開発事業」の複合容器事業の追加テーマとして、タイプ 2 蓄圧器の研究開発（日本製鋼所、JFE スチール担当）と評価試験（当センター担当）が開始された。その成果を基に、2018 年度から新たにスタートした NEDO 事業「超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業」の複合容器事業で継承され、技術文書制定に取り組むこととなり、2020 年度に JPEC-TD 0008 (2020) として制定された。

次章でその取り組みの流れを解説する。

### 3. NEDO 事業における取り組み

水素ステーションの普及拡大に向け、経済産業省発表の水素・燃料電池ロードマップでは 2020 年度までに 160 か所、2025 年度までに 320 か所の整備目標、2020 年代後半には水素ステーション事業の自立化が掲げられている。水素ステーション事業の自立化には整備費・運営費の各種コスト低減が必須であり、汎用材をより広範囲、簡便に利用できる法的枠組みも必要となってくる。

当センターは、NEDO 事業「超高压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、汎用ステンレス鋼・低合金鋼の高圧水素中での挙動に関する研究開発を行っており、規制緩和につながる技術的な成果を期待されている。当センターの他に高圧ガス保安協会、九州大学、一般財団法人金属系材料研究開発センター、日本製鉄株式会社、愛知製鋼株式会社、株式会社日本製鋼所（2018～2020年度）が参加している。さらに「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発事業／水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発／複合圧力容器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発」については、当センターの他、高圧ガス保安協会、東京大学、株式会社日本製鋼所（2018～2020年度）により、タイプ3蓄圧器技術基準の改正、およびタイプ2蓄圧器技術基準の制定に向けた研究開発を行っている。

### 3.1 低合金鋼技術文書制定

低合金鋼技術文書制定においては、2013年度より九州大学等でデータ取得を開始し、2014年度に有識者による低合金鋼技術文書検討分科会、事業関係者による低合金鋼技術文書検討TFを立ち上げ、検討を開始した。技術文書の基本コンセプトは以下の3項目とした。

- ①本低合金鋼技術文書は、水素の影響による低合金鋼の致命的な損傷を回避するために必要な対応策を提供する。
- ②本低合金鋼技術文書においては、性能要件を基本とし、特に鋼種を特定しない。
- ③高圧水素環境下の材料特性を参照する必要がある場合には、従来蓄積されているSCM435・SNM439等のデータを参照する。

まず、タイプ1鋼製蓄圧器を想定した技術文書の制定に着手した。水素ステーションにおける蓄圧器用材料として低合金鋼を用いる場合においては、高強度材であることや非金属介在物等による水素の影響が認められることから、適切な蓄圧器材料の選定が一番重要な事項となる。

技術文書では、低ひずみ速度引張強度試験（SSRT）により蓄圧器材料の水素適合性を判定する方法を規定した。図2に水素適合性判定の一例を示す。

蓄圧器内面周方向からSSRT試験片を採取し、最低設計金属温度における水素ガス中および大気中（あるいは不活性ガス中）SSRTを実施する。水素ガス中SSRTの応力-変位線図における極大値が、大気中SSRTの極大値と同等であれば水素適合性を有する蓄圧器材料と判定する。

その他、硬さ試験、衝撃試験、許容引張応力、最小厚さ、疲労試験、破裂前漏洩等、高圧水素環境下で長期間使用するために考慮すべき項目等を定め、「水素スタンドで使用される低合金鋼製蓄圧器の安全利用に関する技術文書」JPEC-TD 0003 (2017)の制定に至った。

2018年度からNEDO事業を継続することになり、低合金鋼の使用範囲拡大のため、水素圧縮機のシリンダー部材への適用

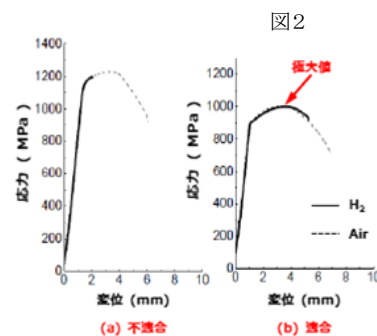


図2 SSRTにおける応力-変位線図の模式図

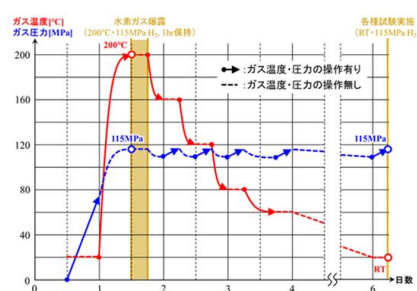


図3 水素ガス温度・圧力プロファイル

に向けた検討を開始した。

水素圧縮機シリンダー部材は、蓄圧器とは異なり高温高压水素環境で使用されるため、鋼中に侵入した水素（内部水素）が材料特性に及ぼす影響を評価する必要があった。そこで、シリンダーの使用環境を模擬した図3に示す温度・圧力プロファイルによって低合金鋼を高温高压の水素環境に曝露し、低合金鋼中の内部水素を飽和させた状態で高压水素中 SSRT 特性、疲労き裂進展特性および水素誘起裂進展下限値  $K_{I,H}$  を評価した。本検討の結果、材料特性に及ぼす内部水素の影響がないことが確認できたため、低合金鋼技術文書検討分科会および JPEC 内に設置した外部有識者による水素インフラに係る自主基準の制定・維持管理事業「水素インフラ規格基準委員会」に諮り技術文書を改正し、「水素スタンドで使用される低合金鋼製圧縮水素用設備（蓄圧器および圧縮機）に関する技術文書」JPEC-TD 0003 (2020)の制定に至った。

### 3.2 タイプ2技術文書制定

水素ステーションで使用する蓄圧器に関する技術基準について、タイプ1蓄圧器(鋼製蓄圧器)は「超高压ガス設備に関する基準」KHKS 0220 (2020)や「水素スタンドで使用される低合金鋼製蓄圧器の安全利用に関する技術文書」JPEC-TD 0003 (2017)、タイプ3およびタイプ4蓄圧器に関しては、「圧縮水素蓄圧器用複合圧力容器に関する基準」KHKS 0225 (2019)が制定されているが、タイプ2蓄圧器に関する技術基準は整備されていないため、タイプ2蓄圧器の導入が進まない一因となっていた。そこで、NEDO 事業（2013年度～2017年度）で得られたタイプ2蓄圧器の実容器試験成果を基に、2018年度から開始されたNEDO事業において、タイプ2蓄圧器の技術文書（以下、タイプ2技術文書）制定に向けた検討を開始した。

タイプ2技術文書の検討に当たっては、低合金鋼技術文書の検討と同様に有識者による検討分科会および事業関係者等によるTFを立上げ、検討を進めた。タイプ2技術文書の基本コンセプトを図4に示す。

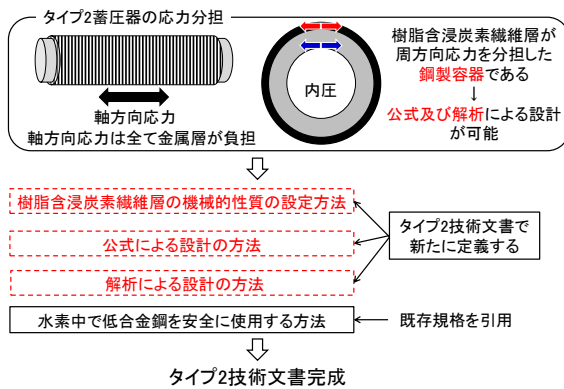


図4 タイプ2技術文書のコンセプト

$$p_c = \frac{-\delta}{c} + 2 \left[ \frac{p_i a^2}{E_1 (c^2 - a^2)} \right]$$

$$= \frac{\left( \frac{1 - \nu_1}{E_1} + \frac{1 + \nu_1}{E_2} \right) + 2 \left[ \frac{1}{E_1 (c^2 - a^2)} + \frac{1}{E_2 (b^2 - c^2)} \right]}{c}$$

$$\sigma_{\theta 1} = \frac{p_i a^2}{(c^2 - a^2)} \left( \frac{c^2}{r^2} + 1 \right) - \frac{p_c c^2}{(c^2 - a^2)} \left( \frac{a^2}{r^2} + 1 \right)$$

$$\sigma_{\theta 2} = \frac{p_c c^2}{(b^2 - c^2)} \left( \frac{b^2}{r^2} + 1 \right)$$

$$\varepsilon_{\theta 2} = \sigma_{\theta 2} / E_2$$

$$\sigma_{r 1} = a^2 p_c / (c^2 - a^2)$$



図5 タイプ2蓄圧器厚さの計算に用いる公式

- ①本技術文書が対象とするタイプ2蓄圧器は、特定設備検査規則の適用を受ける特定設備である。
- ②タイプ2蓄圧器は、CFRP層が金属層の周方向応力のみを分担した鋼製蓄圧器と考える。
- ③タイプ2蓄圧器の設計は公式による設計および解析による設計により行い、試験による設計（実容器

による破裂試験や液圧サイクル試験等) は行わない。

④金属層材料に使用する低合金鋼は、水素適合性を有する材料を用いる。

上記のコンセプトに基づき、タイプ2技術文書は既存の鋼製圧力容器の規格である「超高压ガス設備に関する基準 KHKS 0220」の設計思想をベースに検討した。図5にタイプ2蓄圧器の円筒部厚さの計算に用いる公式を示す。KHKS 0220には複合容器に関する規定は無いため、TF及び分科会で議論し適切な公式を作成した。タイプ2蓄圧器の使用回数は金属層材料の疲労解析により求めることとし、その方法は2020年9月に発行されたKHKS 0220(2020)の内容との整合を図った。

TF、分科会での検討、審議の結果をタイプ2技術文書案としてまとめ、JPEC内に設置した水素インフラに係る自主基準の制定・維持管理事業「水素インフラ規格基準委員会」に諮り、「圧縮水素スタンドで使用する炭素繊維強化鋼製圧力容器に関する技術文書」JPEC-TD 0008(2020)の制定に至った。今後の展開として、本成果の普及のためにKHKS 0220の附属書化を目指す予定である。

#### 4. 今後の予定

NEDO事業において、当センターは水素ステーションで使用できる鋼材の例示基準化や技術基準化、蓄圧器として表2に示すようにタイプ1～4全ての蓄圧器に対して研究開発を行い、技術基準化を共同実施者と図ってきた。

表2 水素ステーション用蓄圧器の技術基準

炭素繊維強化プラスチック：CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)

機能	型式			
	タイプ1	タイプ2	タイプ3	タイプ4
ガス封入	低合金鋼	低合金鋼金属層	アルミライナー	樹脂ライナー 金属ボス部
耐圧構造	低合金鋼	低合金鋼 金属層	CFRP (周方向)	CFRP
技術基準	KHKS0220(2020) JPETD0003(2020)	JPEC TD 0008(2020)	KHKS0225(2019)	
設計手法	解析による設計 公式による漸敬	公式による設計 解析による設計	試験による設計	

現在は、引き続きNEDO事業において、水素ステーションで使用できる鋼材の更なる汎用性拡大のための研究開発を行っている。また、タイプ3蓄圧器の技術基準の主要指針である「試験による設計」から「解析による設計」への改正や、複合容器として世界初の累積損傷関係式を適用させ寿命延長を図る基準化を目的とした研究開発を推進している。これらの結果は、成果が得られた段階で紹介したい。

(問い合わせ先)

一般財団法人石油エネルギー技術センター 水素エネルギー部 水素利用推進室 [jrepo-3@pecj.or.jp](mailto: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 2021 Japan Petroleum Energy Center all rights reserved