

水素ステーション用蓄圧器の寿命延長を図る累積損傷関係式の導入について

- ◇水素ステーション用蓄圧器の寿命は充填回数で規定されており、蓄圧器の疲労損傷に影響を及ぼす圧力変動幅の大小が考慮されていない。そのため、まだ十分使用に耐えうる蓄圧器を早期に交換する状況となっており、運営コスト上昇の要因となっている。
- ◇水素ステーション建設における設備投資(4.事業への展開参照)・運営コストを低減することを狙い、蓄圧器の寿命を適切に見積もる手法を確立することを試みた。燃料電池自動車への水素充填台数を増加(寿命延長)するため、充填時の圧力変動幅と蓄圧器の疲労損傷との関係を明らかにすることとした。
- ◇蓄圧器の圧力サイクル試験を実施し、圧力変動幅と蓄圧器の疲労損傷との相関を調査し、累積損傷関係式(圧力変動比 vs サイクル寿命増加比)を構築した。この関係式により、蓄圧器の寿命を適切に見積もることが可能となった。さらに、水素ステーションでの実証試験を通じて、現行の水素充填プログラムの簡易な改良で蓄圧器の寿命延長が可能であることを確認した。
- ◇今後、高圧ガス保安協会により、本検討結果を反映した技術基準の改正がなされる見通しである。

1. はじめに

日本での水素ステーションは 2014 年度より商用化がはじまり、2023 年 12 月 7 日現在、全国で 161 か所の水素ステーション(移動式を含む)が設置されている。経済産業省による最新(R5.6.6)の「水素基本戦略」では、2030 年度までに 1,000 か所程度の設置が目標とされている。

水素ステーションおよび燃料電池自動車(以下、FCV)を普及させるためには、それらのコスト低減が必要である。2021 年 10 月に発表された第6次エネルギー基本計画において、水素利用を拡大することが示され¹⁾、FCV や将来的な FCトラックなどへの更なる導入拡大に向け²⁾、水素ステーションの戦略的整備などに取り組むことが謳われている。水素ステーションの普及には設備投資、運営コストの低減に係る技術開発が重要である。その中の主要設備である超高圧蓄圧器は、運営コストも含めた経済性の向上が喫緊の課題である。

このような背景のもと 2018 年度より、当センターは、NEDO 事業における「超高圧水素インフラ本格普及技術研究開発

1. はじめに
2. 実験データに基づく累積損傷関係式(寿命延長式)の構築
3. 関係式を水素ステーションに導入するための実証試験
4. 事業への展開
5. まとめ

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／蓄圧器の評価手法確立・技術基準整備に関する技術開発」を受託し、複合圧力容器(以下、蓄圧器)に累積損傷則(修正マイナー則)の考え方を適用して充填時の蓄圧器の疲労損傷度をカウントする手法の検討を担当した。本稿では当該成果の概要について報告する。

本検討内容は、以下の3つのパートにより構成されており、次章以降で順に説明する。

- 実験データに基づく累積損傷関係式(寿命延長式)の構築
- 関係式を水素ステーションに導入するための実証試験
- 事業への展開

2. 実験データに基づく累積損傷関係式(寿命延長式)の構築

最初に、水素ステーション用蓄圧器を取り巻く環境について述べる。

今後の水素社会の普及に向け、蓄圧器の使用回数は10万回以上が求められている(市場ニーズ)。それに対し、現在の蓄圧器の認可回数は2～3万回であり、寿命延長の要望が強い。

また、現在の水素ステーション用蓄圧器の使用カウントは、蓄圧器の圧力変動幅の大小に関わらず、一回の充填で1カウントとされている。つまり、蓄圧器の疲労損傷に影響を及ぼす圧力変動幅の大小が考慮されていない。(図1) そのため、まだ十分使用に耐えうる蓄圧器を早期に交換する状況となっており、水素ステーション運営コスト上昇の要因となっている。そこで寿命延長の解決策として、圧力変動幅に応じて累積損傷則(修

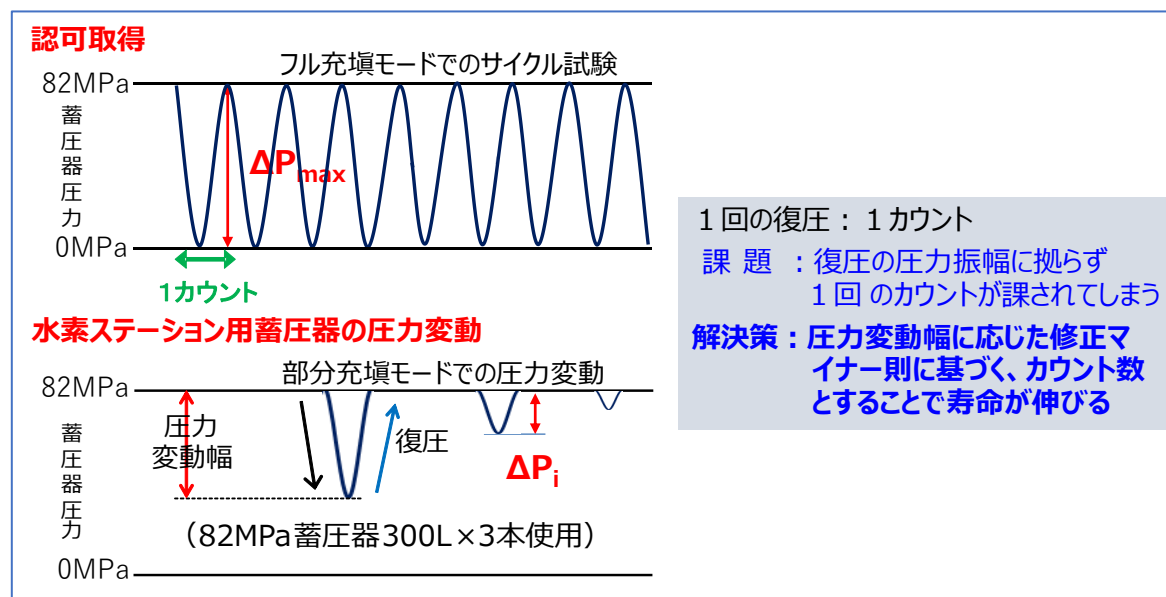


図1 蓄圧器の認可取得時の圧力変動幅と水素ステーションにおける圧力変動幅

正マイナー則)に基づく疲労カウント数(疲労損傷度の程度のこと)とすることで、蓄圧器の寿命延長を図ることが期待されている。

以上より、『蓄圧器の寿命を適切に見積もる手法を確立し、燃料電池自動車への水素充填台数を増加(寿命延長)することにより、水素ステーションの初期コスト・運営コストを低減する』ことを狙いとする。

課題は、『充填時の圧力変動幅と蓄圧器の疲労損傷との関係を明らかにする』ことである。

累積損傷則(修正マイナー則)に基づく累積損傷関係式を構築するためには、実機での蓄圧器を用いた試験データを取得する必要がある。そこで、蓄圧器の圧力サイクル試験を実施し、圧力変動幅と蓄圧器の疲労損傷との相関を調べた。そして、試験データから累積損傷関係式(圧力変動比 vs サイクル寿命増加比)を構築し、圧力変動幅に応じた疲労カウント数を導出することで、容器寿命の最大限の活用(ランニングコスト低減)を図った。

最初に、タイプ3蓄圧器を用いて、自緊条件(圧縮応力条件)が異なる蓄圧器、および最大圧力が異なる蓄圧器について漏洩に至る迄の圧力サイクル試験を実施した。また、蓄圧器の疲労カウントの最適化によるコストダウンを図るため、試験データを基に、タイプ3蓄圧器への累積損傷則(修正マイナー則)の適用について検討した。表1にタイプ3蓄圧器(サブスケール容器)の仕様を、表2に圧力サイクル試験条件を示す。

表1 蓄圧器仕様

材質	ライナー;A6061-T6, 繊維;PAN系炭素繊維
内容積	約76ℓ
設計圧力	99MPa
容器寸法	外径:458.7mm 長さ:1,520mm
損傷形態	胴部を起点とするLBB
最小破裂圧力	223MPa(設計圧力の2.25倍)以上

*LBB:Leak Before Burst の略

表2 圧力サイクル試験条件

		圧力範囲（MPa）			
		No.	上限	下限	備考
圧力条件	フル充填 サイクル	1	89	0	
		2	93	0	
	部分充填 サイクル	3	89	30	
		4	89	50	
		5	89	69	
		6	93	54	
		7	93	74	
	組合せ サイクル	8	89	0	89-0MPaを480回実施後に
			89	50	89-50MPaを漏洩まで実施
		9	89	50	89-50MPaと89-79MPaを
89			79	1セットとし漏洩まで実施	
サイクル速度		10（サイクル/分）以下			
圧力媒体		50%エチレングリコール水溶液			

圧力変動幅を種々の条件で行ったタイプ3蓄圧器の漏洩に至る迄の圧力サイクル試験データから、累積損傷則(修正マイナー則)に基づいた累積損傷関係式(寿命延長式)を構築した。部分充填サイクル試験の圧力変動幅と回数増加の関係を調べるために以下の3条件で整理を行った。

- i) X 軸を圧力変動比(無次元化)、Y 軸をサイクル増加比(無次元化)とすること
- ii) 水素ステーションの使用条件である最大圧力固定の圧力変動データとすること
- iii) 蓄圧器の使用条件である高サイクルデータ(寿命 10,000 回以上)とすること

その結果、仕様、自緊、最大圧力の異なる蓄圧器においても指数関数(式1)の形で相関良く整理することが可能となった(図2)。

$$(N_i / N_{max}) = 1.10 (\Delta P_{max} / \Delta P_i)^{1.41} \quad \dots\dots\dots(式1)$$

蓄圧器の圧力の変動比とサイクル寿命増加比の関係

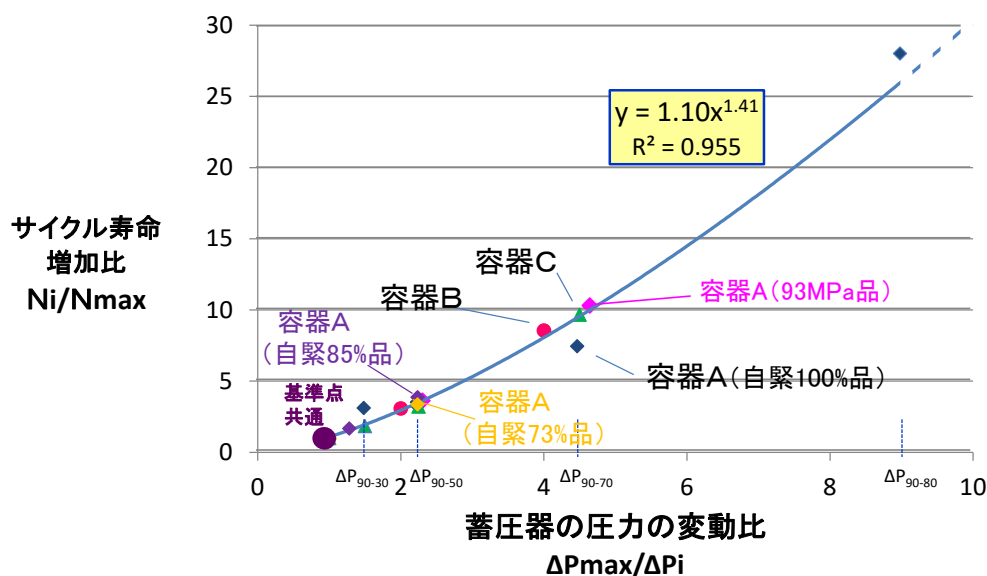


図2 部分充填サイクル試験の圧力変動幅の比とサイクル増加比の関係

3. 関係式を水素ステーションに導入するための実証試験

HySUT 水素技術センターにて累積損傷関係式の実証試験を行い、現行水素ステーションの水素充填プログラムに導入可能であることを実証した。

図3 にフルサイクルの圧力サイクル試験における圧力変動幅を ΔP_{max} とし、使用時の圧力変動幅を ΔP_i とした場合の、疲労損傷度 ΔL_i および累積の疲労損傷度 L の算出方法を示す。

部分充填の圧力変動幅と寿命の関係式(累積損傷関係式)

- ・圧力変動幅の設定
フルサイクル圧力サイクル試験における圧力変動幅を ΔP_{max} とし、
使用時の圧力変動幅を ΔP_i とする
- ・寿命の算出
圧力変動幅 ΔP_i 時の疲労損傷度 ΔL_i は次式とする。
$$\Delta L_i = (\Delta P_i / \Delta P_{max})^{1.41}$$

昇圧部により n 回復圧した蓄圧器の疲労損傷度の積算値を L
(カウント)とすると、 L は次式とする。
$$L = \sum \Delta L_i (1 \leq i \leq n)$$

図3 損傷度 ΔL_i および累積の疲労損傷度 L の算出方法

本内容に関しては、改正予定の KHKS 0225 の附属書に掲載予定である。

図4に水素を4kg 充填した場合の各蓄圧器バンク(高圧、中圧、低圧)における圧力と、その圧力変動幅 ΔP と累積損傷関係式に基づいて算出された疲労損傷度を示す。

図より、累積損傷関係式を現行の充填プログラムに組み込み、簡易な改良で疲労損傷度の算出が可能であることを確認した。

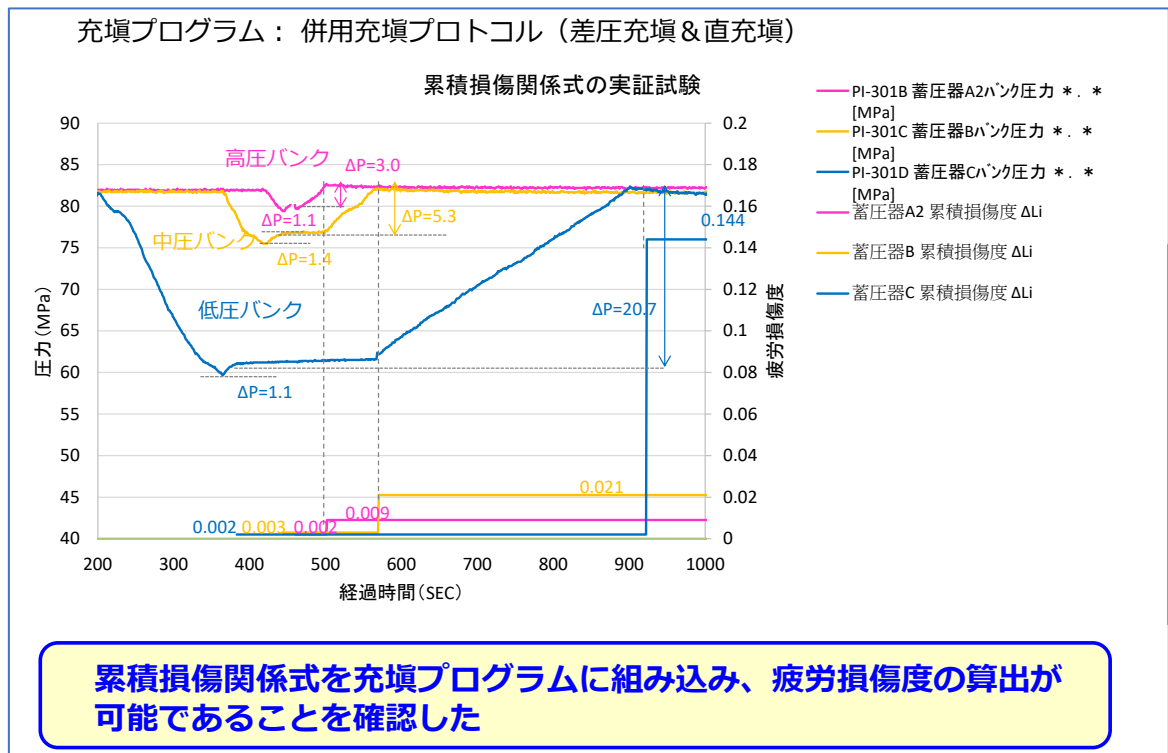


図4 水素を4kg 充填した場合の各バンク圧力と疲労損傷度

4. 事業への展開

次に、本累積損傷関係式を水素ステーションの蓄圧器バンクローテーションシステムに採用した例について述べる。図5は本累積損傷関係式を現行の水素充填プログラムに導入した3バンクシステムの例である。高圧、中圧、低圧の各バンクは一定台数(例えば1,000台)充填毎にローテーションされ、各バンクの蓄圧器の疲労損傷度が平準化される。充填方法は差圧充填と直充填の併用充填である。

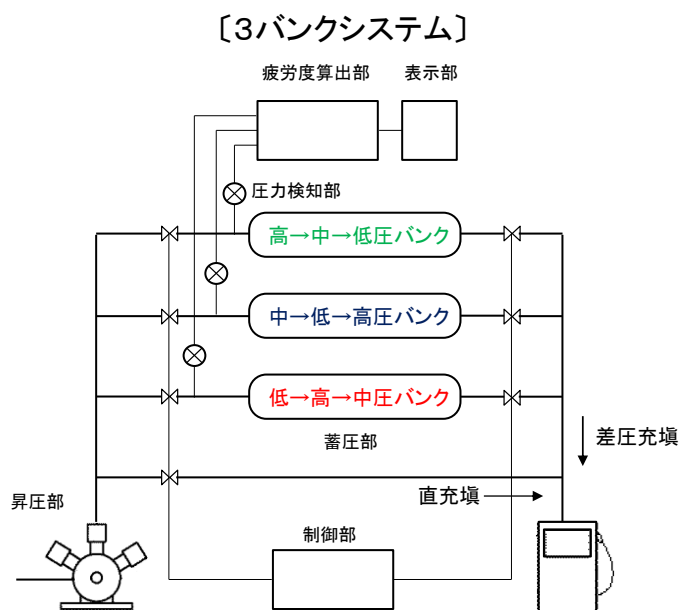


図5 本累積損傷関係式採用の3バンクシステム例

本累積損傷関係式(圧力変動比vs サイクル寿命増加比)を水素ステーションの3バンクシステムに採用することにより、従来FCV10万台に充填可能なタイプ3蓄圧器がFCV178万台まで充填台数を伸ばせること(蓄圧器の寿命を適切に見積もること)を実証試験のデータにより確認した(図6)。これにより、蓄圧器のサイクル仕様が低減され、初期コストの低減が図れる。また、一定台数毎のバンクローテーションにより、20年間蓄圧器の入れ替えを不要にでき(現状5~7回/20年)、運営コストの大幅な低減が図れることも明らかとなった。

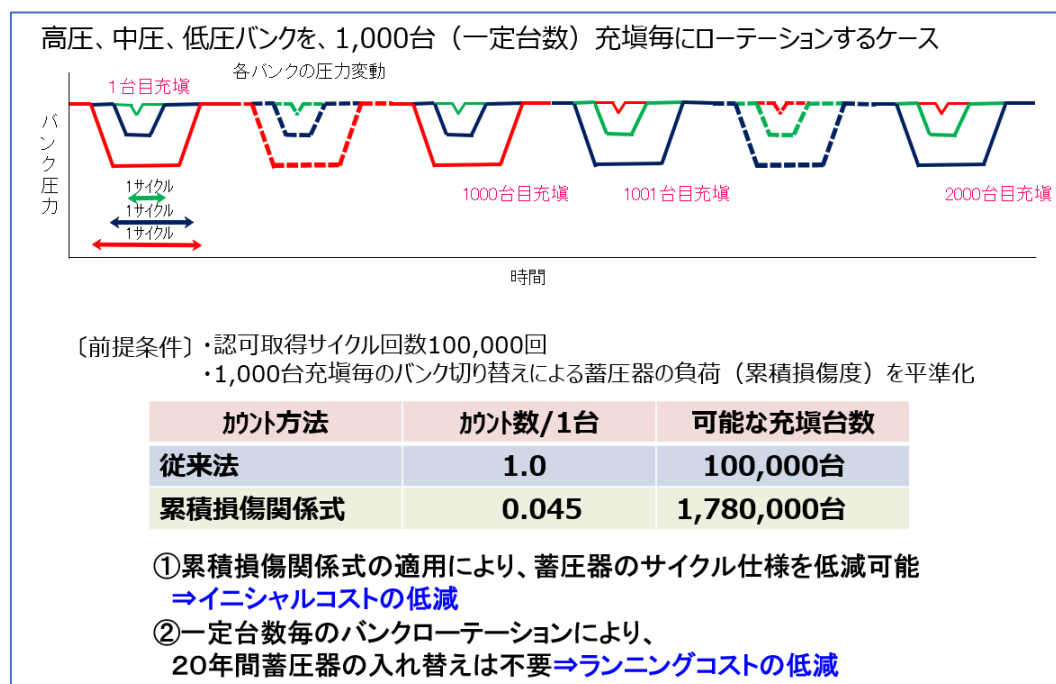


図6 累積損傷関係式適用時のFCV充填台数

本累積損傷関係式の技術開発成果を基本特許、運用特許、復圧途中の充填の3分野の特許として、国内3件、PCT(特許協力条約)2件の合計5件を出願した。

今後高圧ガス保安協会により本検討結果を反映した技術基準 KHKS 0225 の改正がなされる見通しである。

また、容器メーカーからは本累積損傷関係式に基づくカウント方法について、以下の回答を得ている。

①疲労損傷度のカウント方法は、KHKS 0225 の附属書に計算方法が具体的に解説されるため それに従わねばならないことを蓄圧器の仕様書(取扱説明書)に明記する。

②疲労損傷度のカウント方法は仕様書(取扱説明書)に記載してある通り、KHKS 0225 附属書に従うべきことを以下の者に対し連絡する。

- ・蓄圧器を購入する者(容器メーカーにとっての直接の顧客)
- ・蓄圧器を施工・設置する者(水素スタンド元請・エンジニアリングメーカー)
- ・圧縮水素スタンドの施主

また、蓄圧器設置までの説明責任は容器メーカーが負うことは可能だが、それ以降の使われ方については追って確認することが困難であるため、実際に運用する関係者(水素スタンドの運営者或いは施主)に管理頂く旨を2023年2月13日に燃料電池実用化推進協議会の水素インフラ SWG の参加メンバーに説明し了承を得た。

5. まとめ

本稿のまとめを以下に示す。

- ・実験データに基づく圧力変動幅と蓄圧器の寿命の相関について検証を行い、修正マイナー則に基づく累積損傷関係式(寿命延長式)を構築した。
- ・累積損傷関係式を水素ステーションに導入するための実証試験を行い、現行の水素充填プログラムに係式を組み入れることにより、蓄圧器からFCVへの充填台数を大幅に伸ばせることを確認したことから、水素ステーションの運営コストの低減が期待できる。
- ・今後、高圧ガス保安協会により、本検討結果を反映した技術基準 KHKS 0225 の改正が行われる見込みである。

参考文献

- 1) 水素基本戦略, 経済産業省, 2023,
<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf>.
- 2) NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ, 2023,
ロードマップ: <https://www.nedo.go.jp/content/100956710.pdf>
ロードマップ解説書: <https://www.nedo.go.jp/content/100956711.pdf>

(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 jrepo-1@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）委託事業
「超高温水素インフラ本格普及技術研究開発事業」（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 2024 Japan Petroleum Energy Center all rights reserved