

水素社会実現に向けた純水素燃料電池システム開発

Development of Technologies for Pure Hydrogen Fuel Cell System towards a Hydrogen Society

田村 佳央* 安本 栄一*
Yoshio Tamura Eiichi Yasumoto

純水素燃料電池システムは、都市ガスから水素を生成する燃料処理器が不要で、水素を作るエネルギーが不要となり、効率を高くすることができる。この高効率化を実現するために採用した水素循環方式において、希釈して排出するガスの水素濃度が可燃範囲以下であることを保証するために、排気ガスを空気で希釈する混合部と、水蒸気の影響を受けずに正しく水素濃度を検知する水素検知器からなる安全機構を開発した。

A pure hydrogen fuel cell system does not require a fuel processor that produces hydrogen from city gas, does not require energy to produce hydrogen, and can increase efficiency. In order to ensure that the hydrogen concentration of the discharged gas is below the flammable range with the hydrogen circulation method adopted to achieve high efficiency, we developed safety equipment that consists of a mixing section that dilutes the exhaust gas with air and a hydrogen detector that detects the hydrogen concentration stably without the influence of water vapor.

1. 純水素燃料電池システムの概要

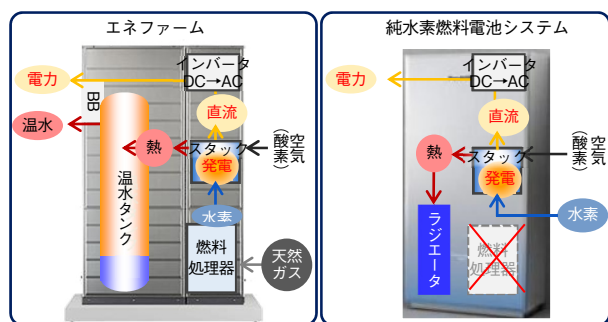
わが国では、2018年7月に閣議決定された第5次エネルギー基本計画において、水素社会実現に向けた取り組みの抜本強化として『燃料電池を活用した省エネルギーの推進、モビリティにおける水素利用の加速』が方針として明記されている。

このような状況を踏まえ、水素社会を実現するために、水素インフラと水素の利用機器を増やす必要があり、当社では水素利用機器の拡充を目的として、純水素燃料電池システムの技術開発を行っている。第1図に天然ガスから電力と温水を生み出すエネファーム^(注1)と純水素燃料電池システムの比較図を示す。エネファームも純水素燃料電池システムも燃料電池スタックに供給された水素と空気中の酸

素とを用いて燃料電池スタックで発電する装置である。エネファームでは燃料として都市ガスなどの天然ガスを水素に改質して用いるのに対して、純水素燃料電池システムでは水素ステーションなどから供給される水素を直接用いることが特徴である。そのため、純水素燃料電池システムは、都市ガスを水素に改質するためのエネルギーが不要となることから効率を高くすることができ、温暖化対策に大きく貢献できる。

また、純水素燃料電池システムはエネファームに比べて高い発電効率を実現するために、燃料電池スタックで使用しなかった水素を水素循環経路により燃料電池スタックに再供給して水素を無駄なく使用できる水素循環方式を採用した。しかし、このシステムでは、水素循環経路から排出するガスに含まれる水素濃度を安全に制御する必要がある。

本稿では、純水素燃料電池システムの安全機構の開発内容について報告する。



BB : Backup Boiler

第1図 エネファームと純水素燃料電池システムの比較図

Fig. 1 Comparison schematic diagram of ENE-FARM and a pure hydrogen

(注1) 東京瓦斯(株)、大阪瓦斯(株)、JXTGエネルギー(株)の登録商標。

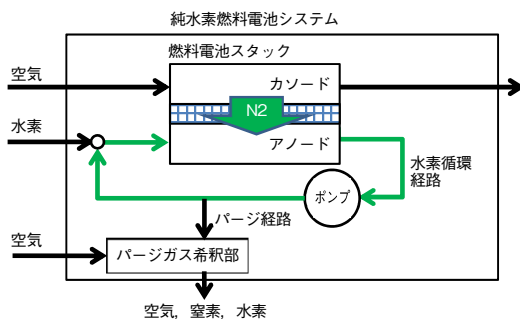
* アプライアンス社 技術本部
Engineering Div., Appliances Company

2. 純水素燃料電池システムの安全機構開発

2.1 純水素燃料電池システムの構成

第2図に純水素燃料電池システムの概略構成図を示す。

純水素燃料電池システムは水素循環方式を採用することで、供給した水素を無駄なく使用でき、高効率に電力・熱を生み出すことができる。燃料電池スタックではカソードとアノードは固体高分子膜を隔てて配置されており、固体高分子膜は分圧差によりガスを透過する特性を有する。さらに、アノード側は水素循環方式により閉じた系となっている。そのため、燃料電池スタックにおいてカソードに供給される空気中の窒素がカソードからアノードへ透過することで、水素循環方式では、閉じた系である水素循環経路に窒素が蓄積する。



第2図 純水素燃料電池システムの概略構成図
Fig. 2 Schematic diagram of the pure hydrogen fuel cell system

水素循環経路に窒素が蓄積すると、燃料電池スタックへ供給されるガス中の窒素濃度が上昇し水素濃度が低下することで、燃料電池スタックの発電効率が低下してしまう。そこで、燃料電池スタックの発電効率低下防止のために、水素循環経路から窒素を間欠的に排出するパージ経路を設け、パージ動作を行うことで水素循環経路の窒素濃度が所定値以上に上昇することを防止している。

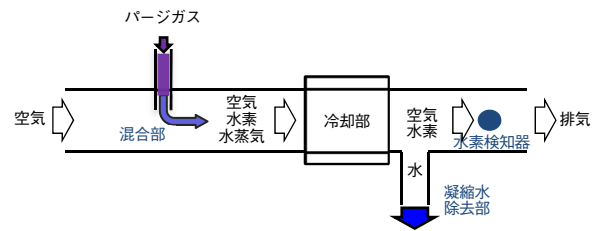
2.2 純水素燃料電池システムのパージガス希釈部開発

パージ動作により水素循環経路から窒素とともに水素も排出されることになる。この排出される水素を安全に処理し、純水素燃料電池システムとしての安全を担保するパージガス希釈部を開発したので、その開発内容について以下で述べる。

純水素燃料電池システムから水素を排出する際の安全基準として、(一社)日本電機工業会が定める共通認証基準に『排ガス中の水素濃度が4%を超えないこと』と記載されている[1]。本基準を満たすために、第2図に示すように純水素燃料電池システムに安全機構の1つであるパージガス希釈部を設けている。

パージガス希釈部として必要な構成は、空気により水素を4%未満の濃度に希釈する混合部と、希釈排気するガス中の水素濃度が4%を超えた場合に異常を検知し運転を停止するための水素検知器である。

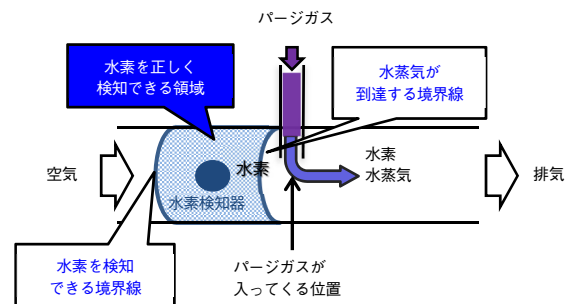
ここで、パージガス中には、窒素や水素だけでなく、水蒸気が含まれており、この水蒸気の水素検知器で結露し液滴として付着することで、水素検知器で正しく水素濃度を検出できなくなる。そのため、パージガスを冷却し水蒸気を除去したうえで水素検知するための冷却部と凝縮水除去部を第3図のように設けていた。しかしながら、パージガス希釈部が複雑化する課題があった。そこで、シンプルな構成のパージガス希釈部を実現するために、水蒸気の影響を受けずに正しく水素濃度を検知可能な機構を開発した。なお、水素検知器としては、エネファームで使用実績があ



第3図 原理モデルのパージガス希釈部の模式図
Fig. 3 Schematic diagram of the conventional purge gas dilution unit

る半導体方式を用いた。

水素と水蒸気の拡散係数の違いに着目し、かつ混合部内を流れる希釈のための空気の流速を規定することで、混合部の中で水素は水素検知器で検知するのに必要な濃度を確保しつつも、水蒸気は到達できない領域を作ることができると考えた。その領域に水素検知器を設置することで正しく水素を検知できると仮説を立てた。この仮説に基づくパージガス希釈部の模式図を第4図に示す。



第4図 新たなパージガス希釈部の模式図
Fig. 4 Schematic diagram of the new purge gas dilution unit

パージガス希釈部において、混合部内の希釈のための空気の流速を v_a [m/s]、水素の拡散速度を v_h [m/s]、水蒸気の拡散速度を v_w [m/s]とする。(1)式を満たすことで、パージガス希釈部内においてパージガスが入ってくる位置よりも、空気の流れに対して上流側に、水蒸気が到達せずに水素が到達し、正しく水素を検知できる領域を設けられる。

$$-v_w < v_a < -v_h \dots\dots\dots (1)$$

空気中の水素の可燃範囲は水素濃度4%以上である。当社として、安全を確保するために、水素濃度1%以下で排気することとした。そこで、希釈のための空気の流量は水素濃度を1%に希釈するように決めた。これにより、パージガス中の水素の流量 Q_h [m³/s]から希釈のための空気の流量 Q_a [m³/s]を(2)式にて決めることができる。

$$Q_h / Q_a \times 100 = 1\% \dots\dots\dots (2)$$

希釈のための空気の流速 v_a [m/s]と流量 Q_a [m³/s]が決まると、(3)式に基づき、混合部の断面積 A [m²]が決まる。

$$A = Q_a / v_a \dots\dots\dots (3)$$

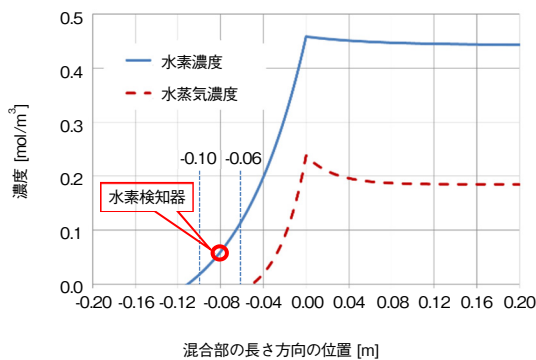
次に、混合部における水素と水蒸気の濃度分布について考察する。定常状態における水素と水蒸気の拡散を考える場合、水素と水蒸気の拡散速度はFickの第1法則に従う[2]。Fickの第1法則から、混合部の微小領域 S_{i+1} における水素の濃度 $C_{i+1}H$ [mol/m³]を(4)式で、水蒸気の濃度 $C_{i+1}W$ [mol/m³]を(5)式で示す。

$$C_{i+1}H = C_iH / (1 + dx \cdot dV / DH / A) + \epsilon \cdot v_a \dots\dots\dots (4)$$

$$C_{i+1}W = C_iW / (1 + dx \cdot dV / DW / A) + \epsilon \cdot v_a \dots\dots\dots (5)$$

ここで、水素の拡散係数 DH [m²/s]、水蒸気の拡散係数 DW [m²/s]、混合部の断面積 A [m²]、微小領域 S_{i+1} の体積 dV [m³]、混合部の長さ方向の位置 X [m]、対流補正係数 ϵ [mol·s/m⁴]、希釈のための空気の流速 v_a [m/s]である。第3図のパージガスが入ってくる位置を $X=0$ [m]、 $v_a=3$ [m/s]、 $Q_a=0.136$ [m³/s]での、混合部の長さ方向の位置 X [m]に対する水素と水蒸気の濃度 [mol/m³]の計算を行った。

第5図に、上記の計算を繰り返し行った計算結果を示す。第5図の横軸において、0は第4図のパージガスが入ってくる位置である。この結果のように、混合部の長さ方向の位置が-0.06 m～-0.10 mの区間において、第4図の模式図のように、水素を正しく検出できることがわかった。第5図の計算結果を踏まえ、水素検知器を混合部の長さ方向の位置-0.08 mに設けた。

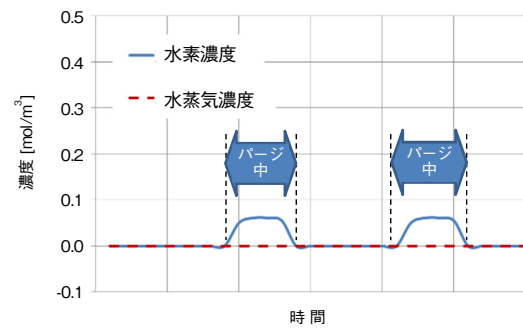


第5図 混合部の長さ方向の位置に対する水素と水蒸気の濃度
Fig. 5 Hydrogen and water vapor concentration on diffusion distance

2.3 結果と考察

本安全機構を搭載した純水素燃料電池システムでの、水素検知器の設置部における水素濃度と水蒸気濃度の実測結果を第6図に示す。この実測結果から、水素検知器に水蒸気が到達せず水素のみが到達することを確認できた。

水素検知器で計測される水素濃度 X [mol/m³]と、水素燃料電池システムの排気ガス中の水素濃度 Y [mol/m³]との相関式は(6)式となる。水素検知器で計測される水素濃度 X [mol/m³]から、純水素燃料電池システムの排気ガス中の水素濃度 Y [mol/m³]を推定することができる。水素濃度の単位をmol/m³から%に換算したものを(7)式に示す。



第6図 水素検知器設置部における水素と水蒸気の濃度
Fig. 6 Hydrogen and water vapor concentration at the hydrogen detector installation section

$$Y \text{ [mol/m}^3\text{]} = 7.62 \times X \text{ [mol/m}^3\text{]} \dots\dots\dots (6)$$

$$Y \text{ [%]} = 7.62 \times X \text{ [%]} \dots\dots\dots (7)$$

この結果を用いることで、純水素燃料電池システムの排気ガス中の水素濃度1%未満を保証するために、水素検知器で計測される水素濃度が0.13%を上回った場合に異常と判断する閾(しきい)値を設定すれば、安全性を確保できる。水素検知器で計測される水素濃度と、排気ガス中の水素濃度との相関関係を実機において確認し、本安全機構を採用することとした。

以上のように、シンプルな構成で水蒸気の影響を受けずに正しく水素濃度を検知可能なパージガス希釈部を開発した。

3. 純水素燃料電池システムの実証と今後の展望

山梨県のご協力のもと、「ゆめソーラー館やまなし」にて実証試験を2018年5月から開始した。開発した純水素燃料電池システムを実電力負荷で3台連携運転し、発電出力の可変性と各システムの発電時間を分散させることで高耐久化を目指している。

さらに、当純水素燃料電池システムは東京2020オリンピック・パラリンピック競技大会の選手村に設置される予定である。大会後は、純水素燃料電池システムを一般販売し、さまざまな電力需要のお客様に複数台連携の純水素燃料電池システムで対応することで、水素社会実現に向けて貢献していく予定である。

純水素燃料電池システムの実証試験にあたり、山梨県企業局より賜りましたご支援ご協力に感謝いたします。

参考文献

- [1] 定置用小形燃料電池の技術上の基準及び検査の方法、(一社)日本電機工業会。
- [2] Hirschfelder, J. O et al., Molecular Theory of Gases and Liquids, John Wiley, New Jersey, 1954.