

耐環境性水素濃度計の開発

Development of In-containment Hydrogen Sensor System against Harsh Environment

三菱重工業(株)	長谷川 翔平	Shohei HASEGAWA	Nonmember
三菱重工業(株)	丸田 祐史	Yuji MARUTA	Nonmember
三菱重工業(株)	右近 浩幸	Hiroyuki UKON	Nonmember
三菱重工業(株)	大庭 雅人	Masato OBA	Nonmember

Abstract

Mitsubishi Heavy Industries, LTD (MHI) developed accident tolerant in-containment hydrogen monitoring system that can operate under harsh environmental conditions during severe accident. The new hydrogen monitoring system consists of two types of detectors, which have different features and operating principles such as high sensitivity (for monitoring low hydrogen concentration) and wide range (for monitoring high hydrogen concentration of up to 20vol%), and hydrogen indication and transmitting modules (4-20mA DC). The operating conditions of newly developed hydrogen sensor are maximum operating temperature/pressure of up to 200 degree Celsius (°C) / 0.8MPa gage and total integrated dose (TID) of 0.5MGy gamma, which envelopes severe accident environmental conditions in a containment.

Keywords: Severe Accident, PWR, Primary Containment Vessel, Hydrogen Concentration, Catalytic Combustible, Thermal Conductivity

1. まえがき

格納容器内の水素濃度は、事故時に計測を必要とするパラメータであり、設計基準事故などでは、格納容器内の気体を格納容器外までサンプリングし、冷却器や湿分分離器により降温、除湿した気体の水素濃度を計測するサンプリング方式を採用している。

一方、格納容器内に検出器を設置し、水素濃度を直接計測することは、計測システムが簡素化されることによる計測の信頼性向上や、運転操作の削減などに寄与し、サンプリング方式と比較して優位性がある。

しかしながら、シビアアクシデントなど事故時の格納容器内は、高温、高圧および高放射線環境となるため、常温、常圧環境が使用範囲である一般的な水素濃度計では、事故時の格納容器内環境下での直接計測は困難である。

以上を踏まえ、シビアアクシデントなど事故時の格納容器内環境においても水素濃度を直接計測することが出来る耐環境性水素濃度計を開発した。¹⁾本稿では、開発した耐環境性水素濃度計のシステム構成、開発仕様、検証試験結果について紹介する。

連絡先:長谷川 翔平、〒652-8585 神戸市兵庫区和田崎町一丁目1番1号、三菱重工業株式会社 ICTソリューション本部 電気計装技術部 電気計装設計課、E-mail: shohei_hasegawa@mhi.co.jp

2. システム構成

Fig. 1 に耐環境性水素濃度計のシステム構成を示す。本システムは検出器と変換器から構成しており、検出器からの電気信号を変換器にて水素濃度に変換し、4-20mA DC の信号として出力する。

検出器は事故時の多様な環境（高温、高圧、水蒸気環境）での計測性維持を目的として、異なる2つの検出原理（接触燃焼式と熱伝導式）の検出部で構成しており、それぞれの検出部は、検知素子と温度影響を補償する目的で設置している補償素子を有した構造としている。

Fig. 2 に接触燃焼式の検出原理を示す。接触燃焼式は検知素子、補償素子および2つの固定抵抗 (R_B) でブリッジ回路を構成している。検知素子は触媒を有しており、検知素子に水素を含んだガスが接触すると、触媒上での燃焼反応により検知素子の抵抗値が上昇する。この抵抗値の上昇によるブリッジ電圧の変化を変換器にて水素濃度に変換する。接触燃焼式は、10vol%以下の水素濃度に対して高い感度を有する特徴がある。

Fig. 3 に熱伝導式の検出原理を示す。接触燃焼式と同様に検知素子、補償素子および2つの固定抵抗 (R_B) でブリッジ回路を構成している。検知素子に水素を含んだ気体が接触すると、検知素子から熱が奪われ、検知素子の抵抗値が低下する。この抵抗値の低下によるブリッジ電

圧の変化を変換器にて水素濃度に変換する。この検出原理は、広い計測範囲を有する特徴があり、20vol%までの水素濃度を計測範囲としている。

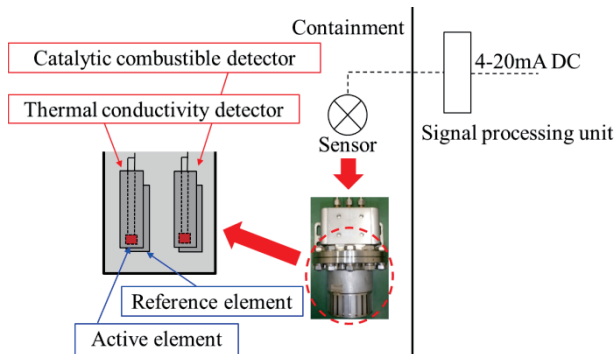


Fig. 1 In-containment hydrogen monitoring sensor system¹⁾

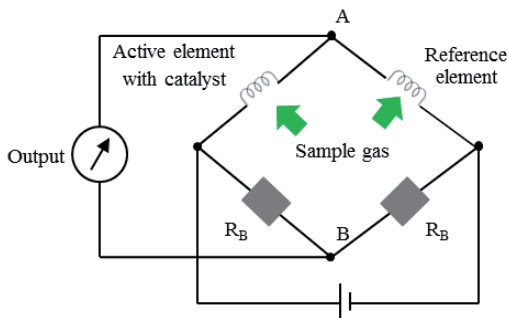


Fig. 2 Operating principle of catalytic combustible detector¹⁾

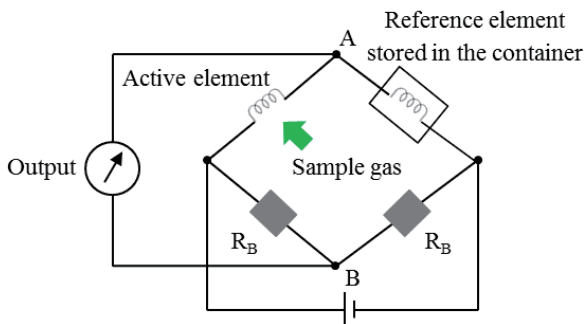


Fig. 3 Operating principle of thermal conductivity detector¹⁾

3. 開発仕様

Table 1 に示す温度、圧力などの環境条件の下で、定めた精度を満足させることを耐環境性水素濃度計の開発仕様としている。

Table 1 Development Specification¹⁾

Accuracy (detectors only)	±1.5 vol% (≤ 10vol%*) ±2.5 vol% (>10vol%*)
Measuring Range	0 – 20 vol%
Design Temperature	200 °C
Design Pressure	0.8 MPa gage
Radiation resistance	0.5 MGy gamma
Seismic	Horizontal 10 G Vertical 5 G

*: in air

4. 検証試験内容

耐環境水素濃度計は、以下に示す各検証試験により、Table 1 に示す開発仕様を満足することを確認した。各検証試験の内容を 4.1～4.5 章に示し、試験結果を 5 章に示す。なお、4.3～4.5 記載の試験はシーケンシャルに実施しており、IEEE Std. 323²⁾を参考に 4.3 章の試験前に温度、放射線のエージングを実施した。

4.1 基礎試験

通常環境において、接触燃焼式は 0～10vol%、熱伝導式は 0～20vol%の水素濃度に対する水素濃度指示値を確認した。

4.2 水蒸気試験

シビアアクシデント時の格納容器内環境は高温、高圧、水蒸気環境となり、通常環境と異なるため、本水素濃度計の水素濃度指示値に影響を与える可能性がある。これを踏まえ、高温、高圧、水蒸気環境下での接触燃焼式検出器と熱伝導式検出器の水素濃度指示値を確認する目的で本試験を実施した。

Table2 に水蒸気試験の環境条件、Fig. 4-1 に接触燃焼式検出器の水蒸気試験構成図をそれぞれ示す。本試験では、接触燃焼式検出器を設置した試験容器が Table2 記載の環境条件となるように、恒温槽により容器全体を加熱した状態で蒸気、水素、空気をそれぞれ試験容器内に流通させ、試験容器の出口側に設置した背圧弁により試験容器内の圧力を制御した。

Fig. 4-2 に熱伝導式検出器の水蒸気試験構成図を示す。目標環境条件については、Table2 と同じである。本試験では、目標環境条件から計算した水素と空気および水を予め通常環境の状態での熱伝導式検出器を設置した試験容器内に封入した後、恒温槽により試験容器を加熱した。

Table 2. Temperature/stream functional test conditions¹⁾

Temperature	80 - 200 °C
Pressure	0.1 - 0.8 MPa gage
Steam	30 - 80 vol%

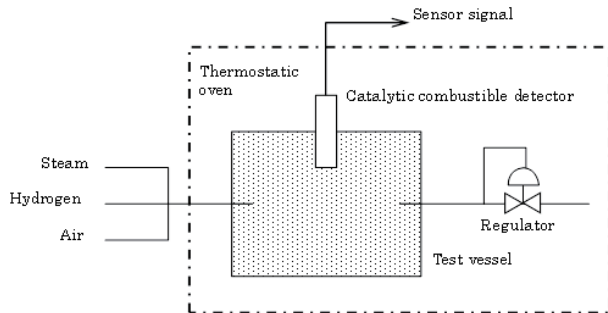


Fig. 4-1 Flow diagram for catalytic combustible detector test¹⁾

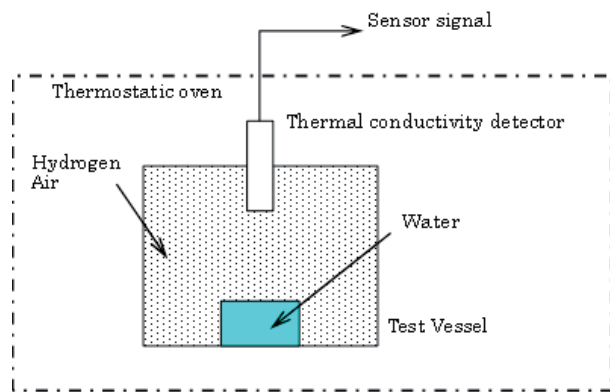


Fig. 4-2 Flow diagram for thermal conductivity detector test¹⁾

4.3 放射線照射試験

放射線照射試験は、シビアアクシデント事象発生から7日間の積算線量を上回る0.5MGyのガンマ線を検出器に照射し、放射線に対する耐性を有していることを確認した。

放射線照射率はIEEE Std. 383³⁾を参考に約10kGy/hとし、放射線照射中のゼロ点を確認すると共に、試験前後のゼロ点、4vol%水素濃度に対する水素濃度指示値を確認した。

なお、上記の試験前後での水素濃度指示値の確認は、4.4、4.5章記載の試験でも実施した。

4.4 耐震試験

放射線照射試験後、検出器と変換器をそれぞれ加振台に設置し、JIC C 60068-3-3⁴⁾、60068-2-59⁵⁾およびIEEE Std. 344⁶⁾を参考に、正弦波掃引試験とサインビート波を用いた試験を実施した。

正弦波掃引試験は、3方向（水平方向及び鉛直方向）それぞれに対して、1~50Hzの範囲で実施し、当該周波数範囲での固有値有無を確認した。

サインビート波を用いた耐力試験では、水平方向は10G、鉛直方向は5Gの加速度で実施した。

4.5 蒸気スプレイ試験

Fig. 6に蒸気スプレイ試験の試験構成図を示す。本試験では、試験容器内に検出器を設置し、175°C、0.8MPaの飽和蒸気や事故時の格納容器内スプレイを模擬した環境、および200°C、大気圧環境（ほぼドライ環境）に曝し、高温、高圧、水蒸気環境に対して機能が維持できることを確認した。

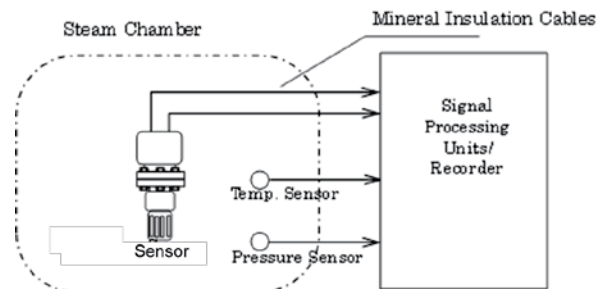


Fig. 6 Steam/temperature test apparatus in a chemical spray¹⁾

5. 検証試験結果

5.1 基礎試験

Fig. 7に試験結果を示す。Fig. 7より、本水素濃度計の接触燃焼式と熱伝導式の水素濃度指示値は水素濃度に対して直線性を有し、Table1記載の精度範囲内となる結果を得た。

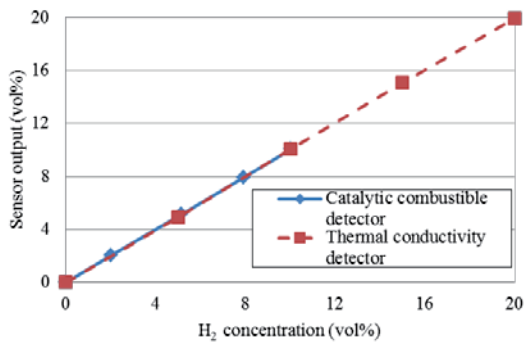


Fig. 7 Accuracy test results at normal operating condition¹⁾

5.2 水蒸気試験

Fig. 8 と Fig. 9 に接触燃焼式と熱伝導式の水蒸気試験結果をそれぞれ示す。Fig. 8、9 より、それぞれの計測範囲に対して、接触燃焼式は±1.0vol%、熱伝導式は±2.0vol%以内の精度となり、Table 1 記載の精度範囲内となる結果を得た。

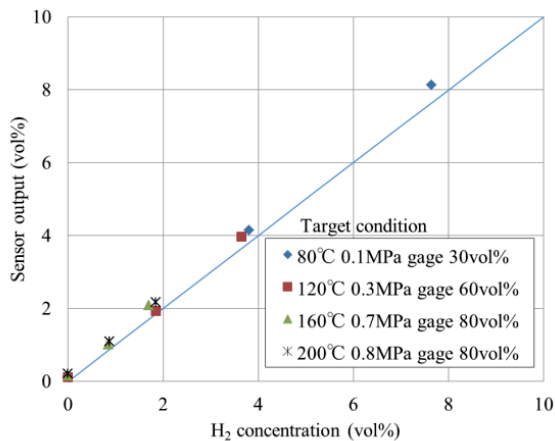


Fig. 8 Measurement of Hydrogen in the high temperature, pressure and stream (Catalytic combustible detector)¹⁾

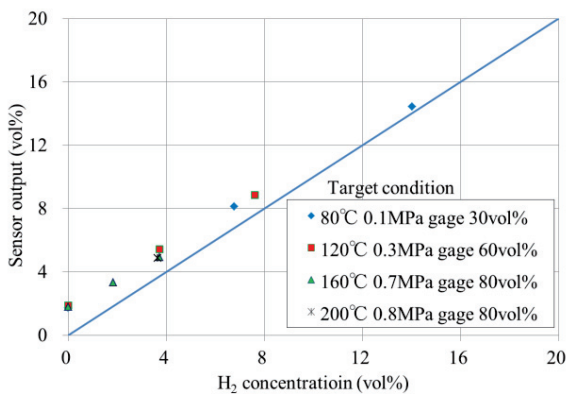


Fig. 9 Measurement of Hydrogen in the high temperature, pressure and stream (Thermal conductivity detector)¹⁾

5.3 放射線照射試験

Fig. 10 に放射線照射中の水素濃度指示値を示す。Fig. 10 より、放射線照射中においても、検出器の水素濃度指示値に有意な変動は認められなかった。

また、試験前後のゼロ点、4vol%水素濃度に対する水素濃度指示値についても異常は認められず、本水素濃度計の検出器は、0.5MGy の積算線量に対して耐力を有することを確認した。

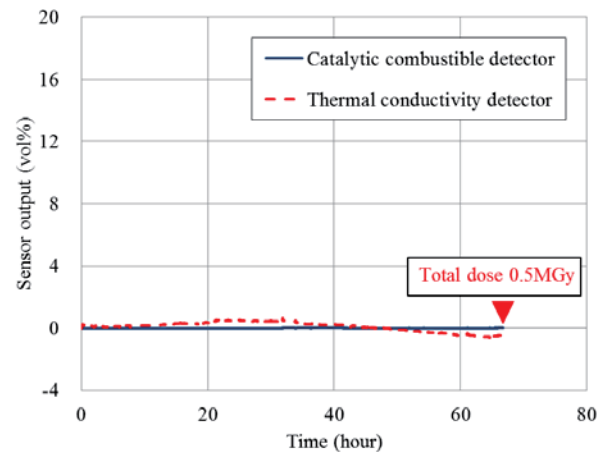


Fig. 10 Irradiation characteristic of each detector at zero hydrogen concentration¹⁾

5.4 耐震試験

検出器および変換器に対する正弦波掃引試験の結果、1~50Hz の範囲で有意な固有値は認められなかった。

また、サインビート波を用いた耐力試験では、検出器および変換器共に試験前後のゼロ点、4vol%水素濃度に対する水素濃度指示値の変動量は±1vol%以内であり、異常は認められなかった。

これより、本水素濃度計の検出器と変換器は水平 10G、鉛直 5G の耐震性を有することを確認した。

5.5 蒸気スプレイ試験

蒸気スプレイ試験中のゼロ点シフト量と試験前後の 4vol%水素濃度に対する水素濃度指示値の変動量の合計は、接触燃焼式は±1.0vol%以内、熱伝導式は±2.5vol%以内であり、Table1 記載の精度範囲内となる結果を得た。

これより、本水素濃度計の検出器は高温、高圧、水蒸気環境においても健全性を維持することを確認した。

6. 結言

格納容器内の水素濃度を直接計測する耐環境性水素濃度計を新たに開発し、水蒸気試験および放射線照射試験等のシビアアクシデント時の格納容器内環境に対する検証試験により、高温、高圧、水蒸気環境下において目標精度範囲内で計測可能であることを確認した。

これより、本耐環境性水素濃度計は、PWR のシビアアクシデント時の格納容器内水素濃度計測に適用可能となり、今後の実機適用を目指していく。

参考文献

- [1] S. HASEGAWA, et al., “In-containment Hydrogen Sensor System against Harsh Environment during a Sever Accident,” Proc. ICAPP '17, Fukui and Kyoto, Japan, April 24-28, 2017, Paper 17709 (2017) (CD-ROM).
- [2] IEEE Std. 323-1974, “IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations,” Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., U.S., 1974
- [3] IEEE Std. 383-1974, “IEEE Standard for Type Test of Class 1E Electric Cables, Field Splices, and Connections for Nuclear Power Generating Stations,” Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., U.S., 1974
- [4] JIS C 60068-3-3-2000, “Environmental testing – Part 3: Guidance Seismic test method for equipments,” Japanese Standards Association, Japan, February 2000
- [5] JIS C 60068-2-59-2001, “Environmental testing – Part 2: Test methods Test Fe : Vibration – Sine-beat method,” Japanese Standards Association, Japan, November 2001
- [6] IEEE Std. 344-2004, “IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E equipment for Nuclear Power Generating Stations,” Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., U.S., June 2005

