



2024年度

船用次世代燃料エンジン用の無酸素下でも検知可能な
水素ガス漏洩検知センサーの技術開発

成果報告書

2025年3月

一般社団法人 日本船用工業会

はしがき

本報告書は、BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて、2023年度及び2024年度に一般社団法人日本船用工業会が実施した「船用次世代燃料エンジン用の無酸素下でも検知可能なガス漏洩検知センサーの技術開発」の成果をとりまとめたものである。

本開発は、2023年度、2024年度の2年計画で、理研計器株式会社に委託して実施しており、2年度分の報告書をここにまとめたものである。

ここに、貴重な開発資金を助成いただいた日本財団、並びに関係者の皆様に厚く御礼申し上げる次第である。

2025年3月
(一社)日本船用工業会

目 次

1. 事業の目的	1
2. 事業の目標	2
2.1 本事業の最終目標（2024 年度の目標）	2
2.2 2023 年度の目標	2
3. 2023 年度の実施報告	3
3.1 2023 年度の実施内容	3
3.1.1 センサー構造の検討	3
3.1.1.1 センサーと受信部をリモートでつなぎ合わせる構成の検討	3
3.1.1.2 濃度値の表示	4
3.1.1.3 警報ランプの確認	7
3.1.1.4 センサー内部構造の検討	5
3.1.2 センサーの高感度化の検討	6
3.1.2.1 センサーに印加する電圧を周期的に変化させる駆動方式の検討	8
3.1.2.2 センサーに印加する電圧を周期的に変化させ出力された値を解析	9
3.1.2.3 ゼロ点変動とガス濃度による出力変動を判別する処理方法の検討	9
3.1.2.4 無酸素下 (N ₂ 環境下) での水素ガス爆発下限界濃度 (%LEL 濃度) 測定	11
3.1.3 センサーの作製	11
3.1.4 性能評価試験・仕様の決定	12
3.1.4.1 指示精度	13
3.1.4.2 応答試験	13
3.1.4.3 繰返し性試験	14
3.1.4.4 温度試験	15
3.1.4.5 湿度試験	15
3.1.4.6 振動試験	16
3.1.4.7 経時試験	17
3.1.4.8 圧力試験	17
3.1.4.9 流量試験	18
3.1.4.10 風速試験	19
3.1.5 性能比較用基準センサーによるフィールド条件データの事前取得	20
3.2 目標の達成状況	28
3.3 2023 年度の実施内容の概要	28

4. 2024 年度の実施報告	29
4.1 2024 年度の実施内容	29
4.1.1 フィールド試験① エンジン実稼働前後の性能差異確認	29
4.1.1.1 新規 H2 センサー振動試験(予備試験)	29
4.1.1.2 エンジン稼働時の振動センサーと新規 H2 センサーの出力値測定	32
4.1.1.3 エンジン稼働前後の新規 H2 センサーの出力値測定（社内試験）	40
4.1.1.3.1 指示精度	40
4.1.1.3.2 応答試験（エンジン稼働後）	41
4.1.1.3.3 繰返し性試験	42
4.1.2 フィールド試験② 比較用水素ガス測定器(基準器)との比較検討	43
4.1.2.1 基準器の精度の確認	44
4.1.2.2 基準器と新規 H2 センサー指示精度（直線性）の比較	44
4.1.2.3 基準器と新規 H2 センサー繰返し性の比較	47
4.1.2.4 基準器と新規 H2 センサー応答時間の比較	49
4.1.2.5 仮想漏洩箇所から新規 H2 センサーのガス検知までの時間測定	50
4.1.3 フィールド試験③ エンジン運転状態変化によるセンサーの各挙動変化確認	51
4.1.3.1 エンジン運転時における指示精度（直線性）	51
4.1.3.2 エンジン運転時における繰返し性試験	52
4.1.3.3 エンジン運転時における応答時間	53
4.1.3.4 エンジン運転負荷とセンサー出力値の比較	54
4.1.3.5 新規 H2 センサー出力値の経時試験	56
4.1.4 量産試作	57
4.1.4.1 量産試作機を作製	57
4.1.4.2 船級規格への適合性評価	58
4.2 目標の達成状況	59
4.3 2024 年度の実施内容の概要	59
5. 今後の予定	60
6. まとめ	60

1. 事業の目的

IMO GHG削減戦略の一つである水素燃料船の社会実装に向け、水素エンジン開発が進められている。水素は可燃性ガスであり爆発を起こす最低濃度が4vol%の爆発危険性を持つ物質であるため、爆発事故を未然に防ぐ水素検知センサーが必要とされる。

水素エンジン開発にて水素ガス検知が必要となる場所は、空気中の他に無酸素中(N₂)の箇所があり、産業界で使用する空気中の水素検知センサーは検知不可能である。

本開発では無酸素中(N₂)に漏洩した水素ガスを、正確かつ迅速に検知する世界初の水素ガス漏洩検知センサー開発を目指す。

本事業の目的は以上のとおりであるが、個別の事項について補足すると以下のとおりである。

(1)「意義」「必要性」

次世代燃料として位置づけられる水素は、従来燃料のメタン等の化石燃料に比べて爆発範囲が大幅に広く(水素:4vol%-75vol%/メタン:5vol%-15vol%)、かつ爆発に必要とされる最小着火エネルギーが大変小さい(水素:0.02mJ/メタン:0.28mJ)ため、漏洩した際により容易に着火・爆発する危険性がある。

そのため機関室内の水素ガス燃料管は万一漏洩したとしても、すぐに機関室内まで蔓延しない様に、不活性ガスの窒素により換気された二重管を採用する予定がある。

二重管を採用することはIMOが定める『ガス又はその他の低引火点燃料を使用する船舶に適用する強制コード(IGFコード)』でも規定されており、二重管内管から二重管外管へのガス漏洩を検知するため、恒久的なガス検知器の設置が規定されている。IGFコード規定では、二重管内は空気30回/hの換気とされているが、今後の実装に向けた安全性向上のため、窒素による強制換気が想定されている(換気能力は空気30回/hと同等性能:協力者の三井E&Sマシナリー殿の試験エンジン設備諸元より)。

よって二重配管外管内に漏洩する水素ガスを正確に検知することが求められているが、常時窒素換気されている場所のため無酸素状態での水素ガス漏洩検知が要求される。

(2)「課題」

一般的に産業界で使用する水素ガス検知器のセンサー原理は接触燃焼方式であるが、燃焼反応が必要なため無酸素下では使用できない。そこで燃焼反応を伴わない熱伝導方式のセンサー原理が適当だが、当該方式はガス固有の熱伝導率の変化を利用する原理上、化学反応を伴わないため高濃度検知が主であり、爆発下限界(4vol%)以下の低濃度検知の正確な検知が出来ない。

そこで、センサーを構成する熱線上での熱伝導をより迅速にするため、新たに回路構造の開発、センサーを反応させるための印加電圧値の開発、低濃度域のセンサー出力値データの解析によるS/N比(真の出力信号とノイズ信号の比率)向上の開発が必要になる。

(3) 「効果」 「新規性」

無酸素中の水素ガス爆発下限界濃度(4vol%以内)を、正確に検知(国際規格 IEC60079-29-1 準拠)可能な新製品の開発により、水素エンジンの爆発事故を未然に防ぎながら早期の開発を実現できる。

また、今後水素エンジンが実装される水素燃料船は、次世代燃料船普及シナリオより2050年に内航船全体の約55%と算出されている(「ゼロエミッション船シンポジウム・カーボンニュートラル時代に向けた国内海上輸送のあり方」2021年5月18日日本財団セミナー資料より引用)。

このことから、実装された際には国際規格に準拠した水素ガス検知器であれば日本国内をはじめ、各国船級規則にも対応が可能であるため、より多くの普及効果が見込める。

2. 事業の目標

2.1 本事業の最終目標 (2024 年度の目標)

(1) エンジン運転状態によるセンサーの各種性能の確認

水素ガス検知の反応速度と検知精度の向上を達成した試作センサーを、フィールド試験としてエンジン実機に搭載した状態で、国際規格 IEC60079-29-1 で要求される指示精度(測定レンジの±5%以内)および応答時間(T50 20 秒以内)を満たすセンサー性能を目指す。

(2) 量産試作

フィールド試験より得られたデータによる改良と、船級規格で準拠が要求される IEC60079-29-1 の適合性評価として、指示精度(測定レンジの±5%以内)および応答時間(T50 20 秒以内)を確立した量産試作機を作製する。

2.2 2023 年度の目標

(1) センサー構造の検討

水素ガス検知の反応速度向上として、センサーに導入した水素ガス濃度の50%濃度値を検知するまでの時間(応答時間 T50 と表す)が、20 秒以下となる構造開発を目指す。

(2) センサーの高感度化の検討

無酸素中の水素ガス爆発下限界濃度(4vol%以内 = 100%LEL*以内)を、正確に検知する指標として、爆発下限界値 4vol%の 1/10 濃度(0.4vol% = 10%LEL)を

正確に検知できる性能を確保する。そのため S/N 比(真のガス濃度出力信号とノイズ信号との比率)向上の高感度化開発を目指す。

*)爆発下限界 (%LEL) : 可燃性ガスはある濃度範囲で空気と混合し着火源があれば爆発する。

爆発下限界とは爆発可能範囲の最下限濃度の事で 100%LEL で表される (LEL:Lower Explosive Limit)。爆発下限界および爆発範囲は可燃性ガス毎に固有の値を持つ(水素爆発下限界 4.0vol% = 100%LEL)。

3. 2023年度の実施報告

3.1 2023年度の実施内容

3.1.1 センサー構造の検討

電気および電子技術に関する国際的な標準を策定する組織である IEC (国際電気標準会議) の規格である IEC60079-29-1 は、爆発性雰囲気におけるガス検知器の選定、取り付け、操作、および保守に関する国際規格である。この規格は、爆発性雰囲気(例: ガス、蒸気、粉塵)が存在する危険な環境で使用されるガス検知器に関する要件やガイドラインを定めている。そこに定められた性能試験項目を満たせるように想定して、熱伝導素子と温湿度センサーを一体化にしたセンサー構造を検討した。ここでいうセンサー構造とは、3.1.1.4 でも説明があるようにデジタル基板との構成も含めている。デジタル基板では、センサーを駆動する電圧を生成し、センサーからの出力値を受け取り、濃度に演算をして、受信部に送る役割がある。また、センサー構造は、センサーを設置するガス検知器端部、受信部、それらをつなぐリモートケーブルからなる一連のシステムにうまく機能するように設計された。下記のように項目 3.1.1.1~3.1.1.4 についてすべて実施して、センサー構造に問題がないことを確認した。

3.1.1.1 センサーと受信部をリモートでつなぎ合わせる構成の検討

ガス警報器において、ダクト内などのガスを検知する場合、ガスを検知するセンサーと検知された出力を受信する受信部に分かれた構造を採用するが多い。今回、水素燃料船用として採用された二重配管外管のガス検知は、ダクト内の検知と類似した環境であることから、同様の構成が望ましいと考えられる。そのため、図1のように、二重配管外管内へ直接挿入設置し水素ガスを検知するセンサーを設置したガス検知端部と、受信部を 3m のリモートケーブルによりつなぎ合わせる構成を作成した。その上で、デジタル基板はセンサー直下に配置された構造にして、センサーの出力信号が受信部に正しく到達することを確認した。

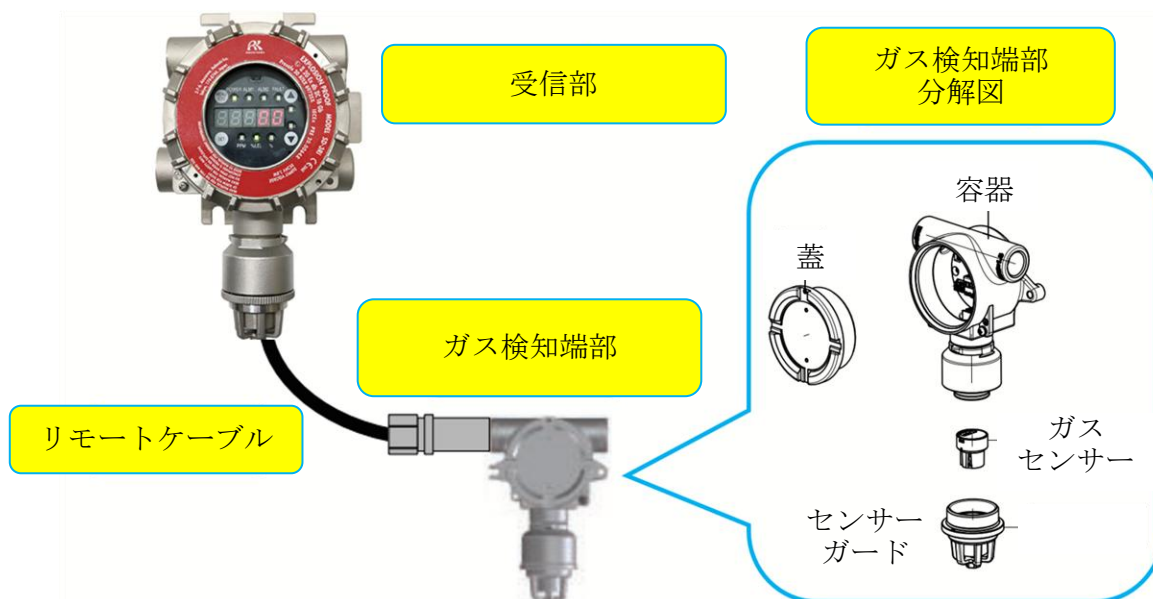


図 1. 開発イメージ（機器全体構成）

3.1.1.2 濃度値の表示

センサーはガス検知端部（図 1）と称するケーシングに内蔵され、デジタル基板で熱伝導素子と温湿度センサーを駆動させて、熱伝導素子と温湿度センサーの値をデジタル基板で受け取り、濃度演算を行い、その結果を出力信号としてリモートケーブルを通して受信部で受信、受信部内の回路で信号変換して受信部の表示部分で、図 2 の通りガス濃度値を指示値として表示ができることを確認した。図 2 はガスが導入されていないときの値「0」を示している。

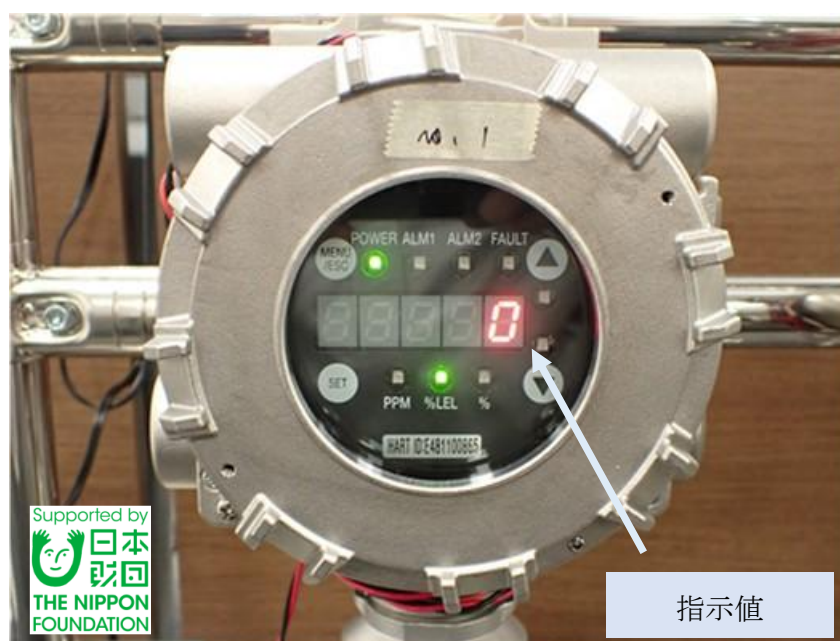


図 2. 受信部（濃度表示は 5 桁の 8 セグメント表示器の 3 個を使用予定）

3.1.1.3 警報ランプの確認

ガス濃度値が予め設定した警報設定濃度値を越えた場合には、受信部の表示部分に警報ランプとして表示ができることを確認した。ゼロガスである N2 を導入後、表示がゼロであることを確認してから、警報設定値 (10%LEL) の 1.6 倍の濃度の試験ガス (H2 16%LEL N2 希釈) を導入して、図 3 の通り、10%LEL になった時点でガス警報ランプが動作することを確認した（一般高圧ガス保安規則関係例示基準 23. ガス漏えい検知警報設備及びその設置場所 1.4 項による試験方法による）。



図 3. 受信部

3.1.1.4 センサー内部構造の検討

センサーを含むガス検知端部の構造は、二重配管外管へ直接挿入・装着できる方式とし、図 4 は、筒状の二重配管外管とは異なるが矩形のダクト内に設置したイメージ図を示し、配管へ直接挿入・装着できる方式を表現している。

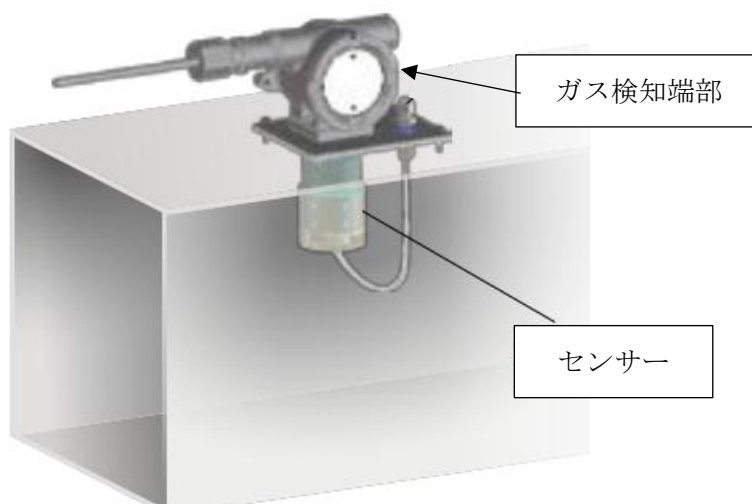


図 4. ガス検知端部 直接挿入・装着イメージ図

図 5 はそのセンサーの内部構造を示している。各パーツは、上からセンサケース、シール、ガラスシート、素子ベース、センサー基板を示している。素子ベースにはセンサー素子が設置され、センサー基板には温湿度センサーが設置されている。

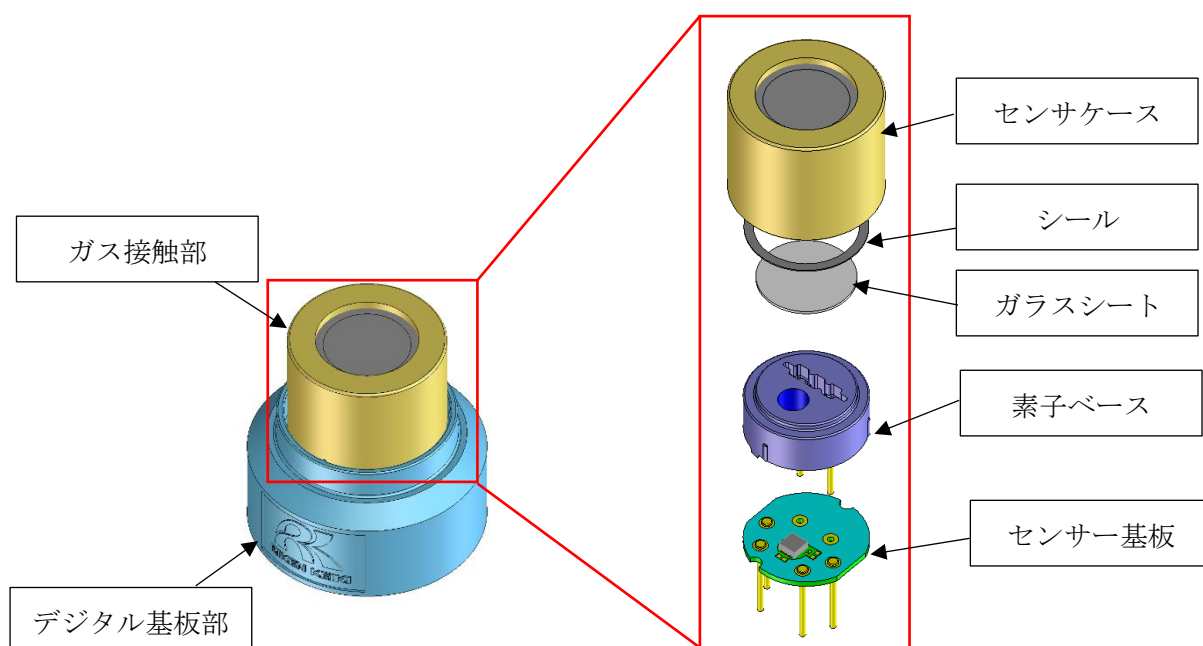


図 5. センサー内部構造

センサーの内部構造は特にセンサーの応答速度(応答時間 T_{50} (導入ガス濃度の半分を超える時間) 20 秒以下)を向上させるために、センサー内部の空間の容積を減らし、センサー素子から壁までの距離を均一にすることで、水素ガスがより速く検知できることがわかった。さらに、その距離を 2mm から 1mm にすることで、センサーの性能として本案の目的である応答速度だけでなく、IEC (国際電気標準会議) の規格である IEC60079-29-1 の他の規格についてもすべて満たすことが見込めるようになった。図 6-1～図 6-4 は、素子ベースにおけるセンサー素子の周りの空間を変化させたものである。センサー素子(図の赤枠)と壁との距離および空間の容量を変化させた結果、図 6-1、6-2 より図 6-3、6-4 で応答速度が速くなった。一方、図 6-3 のセンサーは、圧力試験で図 6-4 のセンサーに比べて性能が悪かったため、図 6-4 のセンサー構造を採用した。

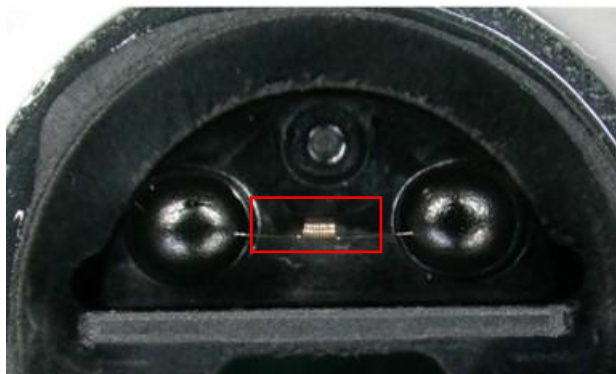


図 6-1. センサー素子周りの空間が広い

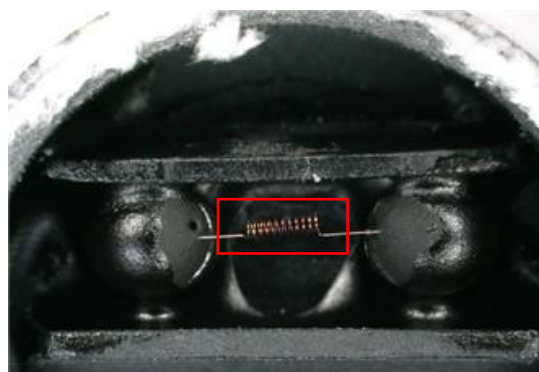


図 6-2. センサー素子周りに壁を設置

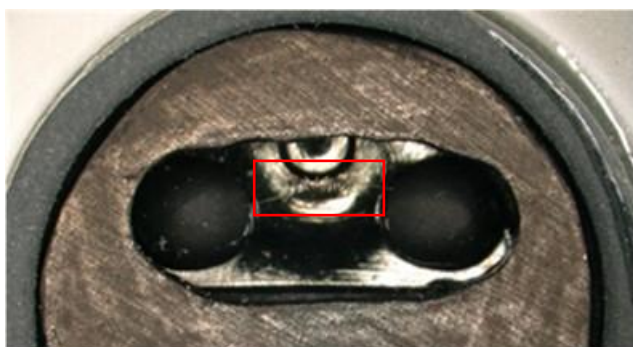


図 6-3. 素子周り空間を狭くしたもの

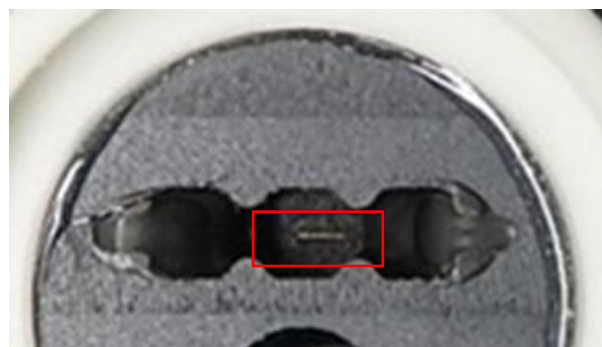


図 6-4. 素子周り空間をより狭くしたもの

図 7 と表 1 に示す通り、3 個の試作センサーを用いて、N2 を導入した状態から試験ガス 50%LEL (N2 希釈) を検知端部に導入し 25%LEL を指示するまでの時間 (T50) を確認する試験の結果、8~12 秒となり仕様並びに 2023 年度の目標 (1) を満足した (IEC60079-29-1 5.4.15 項 Time of response による試験方法)。

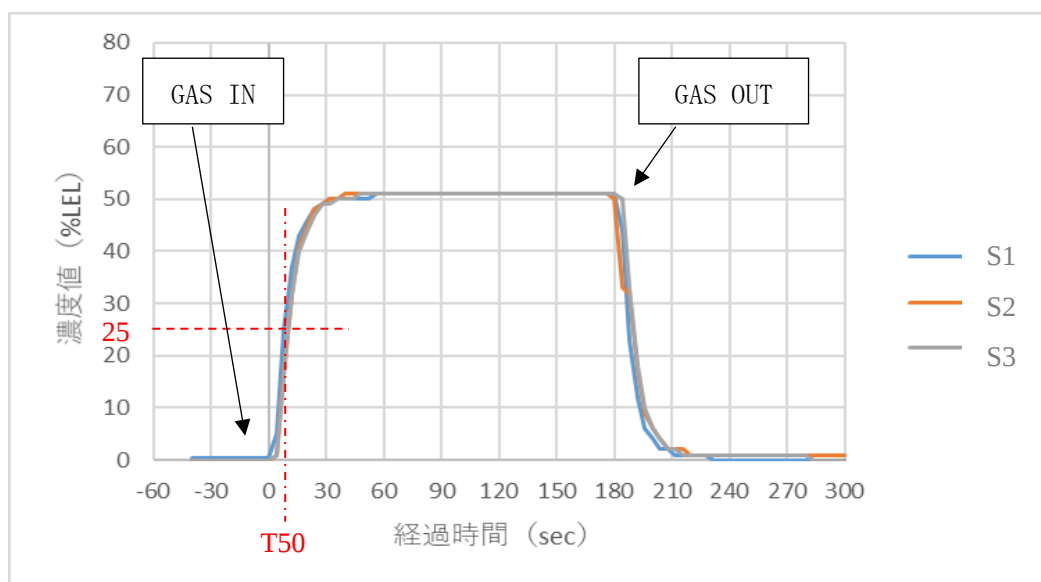


図 7. 応答波形

表 1. 応答速度

	No. 1	No. 2	No. 3
T50	8 秒	12 秒	12 秒

3.1.2 センサーの高感度化の検討

下記項目 3.1.2.1~3.1.2.4 について試作センサーを用いて、すべて実施した。その結果、SN 比が向上して高感度化を達成した。最適な電圧制御方式を確立して、指示精度 (ノイズレベル) 1%LEL (400ppm) 以内を実現した。

熱伝導センサーは、一般的に Vol レンジ (0~100vol%) のガスに用いられることが多く、LEL レンジ (0~4vol% (0~100%LEL)) のセンサーとして使用するためには高感度化する必要がある。そのためには、センサー出力の SN 比の向上、センサー出力の経時的な安定性、温湿度変化によるばらつきが小さいことが求められる。温湿度変化によるばらつきは温湿度センサーによる補正を行うことで小さくすることができるため、本案では、SN 比の向上とゼロ点の安定性の向上を目指した。ここで、ゼロ点とは、検知ガスがない状態（本件では N2 雰囲気）でのセンサー出力のことで、それが安定しているとは、長期的にセンサーが劣化しないで、出力が変動しないことである。

SN 比の向上のためにまず駆動電圧の最適化を実施した。駆動電圧については、センサー素子の温度に影響を与える。そのため、電圧が大きすぎても小さすぎても、SN 比やゼロ点の安定性に影響を与える。駆動パターンについては、単純な矩形波にした断続通電にするだけでは、センサー素子に急激な温度変化を与えてしまうので、こちらもゼロ点の安定性に良くないが、電圧をゆっくり上げ下げすると、駆動周期が遅くなり、それだけセンサーの応答時間が遅くなってしまふ。また、センサー素子の駆動電圧を安定させた状態でセンサー出力値をサンプリングする数 (AD 値の取得数) を増やすと SN 比が良くなるが、長くすると駆動周期が遅くなり、それだけセンサーの応答時間が遅くなってしまふ。これらのことを検討して、①電圧、②昇圧降圧条件、③サンプリング数の最適な値を決定した。

3.1.2.1 センサーに印加する電圧を周期的に変化させる駆動方式の検討

駆動電圧、駆動パターンの良好な条件が決定した (周期/昇圧角度/降圧角度/安定時間)。図8は、最適化したセンサーの駆動パターンを示している。

決定した駆動電圧、駆動パターン

周期 : 4.0sec (1.5secON 2.5secOFF)

昇圧角度 : 0.2V/100msec 0.1V、0.3V、0.5V、0.7V (400msec)

降圧角度 : -0.2V/100msec 0.6V、0.4V、0.2V、0.1V (400msec)

安定時間 : 0.8V (700msec)

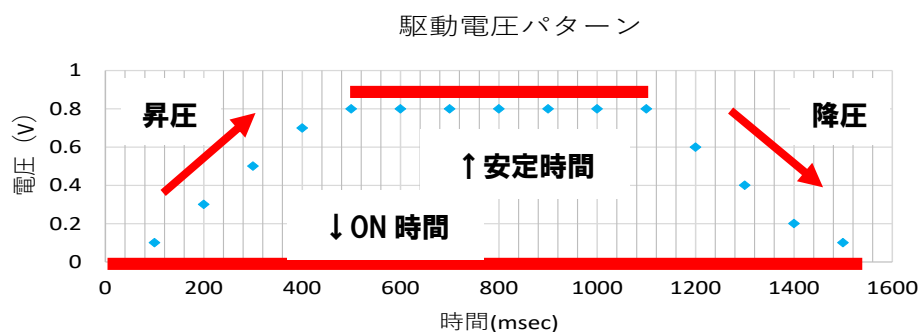


図 8. 最適化したセンサーの電圧印加駆動パターン

3. 1. 2. 2 センサーに印加する電圧を周期的に変化させ出力された値を解析

センサー出力の取得方法について、良好な条件が決定した(6点平均/最大値切捨/取得数)。

平均 : 6点

最大値 : 切捨

取得数 : 7点

図9は、試作品10個の最適化駆動パターンで得られたセンサーの電流値のSN比調査結果を示している。これは、N2導入したときのセンサー出力値(6点の平均:4秒周期なので1点/4秒)を3分間取得した(4秒周期15点/分 計45点)時の45点中の最大と最小の差をH2 1%LELのスパン値で割ったものを示している。試作センサー10個とも0.2%LEL(80ppm)の結果となり、すべて1.0%LEL(400ppm)以内であることを確認し2023年度の目標(2)を達成した。

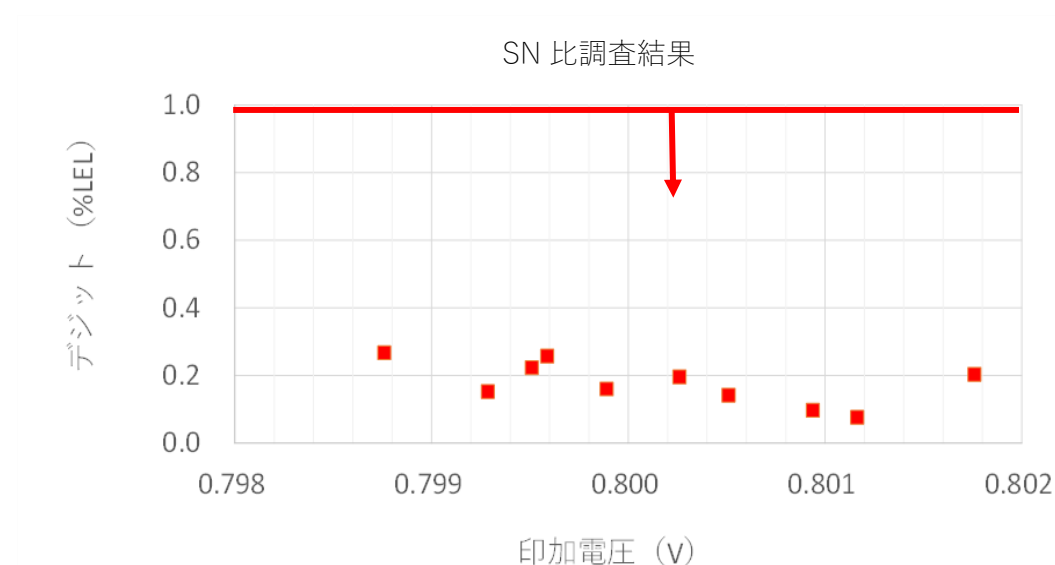


図9. 最適化駆動パターンで得られたセンサーのSN比調査結果

3. 1. 2. 3 ゼロ点変動とガス濃度による出力値変動を判別する処理方法の検討

項目3. 1. 2. 1および項目3. 1. 2. 2によって高感度化すなわちSN比の向上が達成した。これによって、1デジット1%LELで0~100%LELのH2の濃度表示が可能になった。一方、今回試作した熱伝導センサーの長期のゼロ点の安定性は、図10に示した通り、100日で最大2%LELの変動をした(センサー数5個)。これは、IEC規格内(規格の詳細は項目3.4参照)であるが、よりゼロ点の安定性を確保するために、多点データ解析手法によるガス有無判定法にて検知精度を向上する補正方法を導入した。

この多点データ解析手法は、温度、湿度および経時的な変化によって、試作センサー(30個)から得られたデータを用いて作成した。その手法によって得られる濃度値

は、従来の方法におけるゼロ点とスパン校正によって表示される指示値とは異なり、センサー内部で昇圧時、降圧時のデータを取得し、そのデータをすべて用いて解析して得られる。その多点データ解析手法で得られた濃度値を用いた補正方法により、ゼロ点の安定性を向上させることができた。図11は、この多点データ解析手法によって出力されたゼロ点のデータである。この補正手法を用いて、ゼロ点の比較は1日に1回実施して、表示部の指示値がプラス側にあるときは、最大0.1%LELまで、マイナス側にあるときは、最大1.0%LELまでのずれを補正することができるように設定した。図12はその方法で最終的に得られたゼロ点を示しており、常にゼロ点が安定して、検知ガスを待ち構えている状態を維持していることが示された。

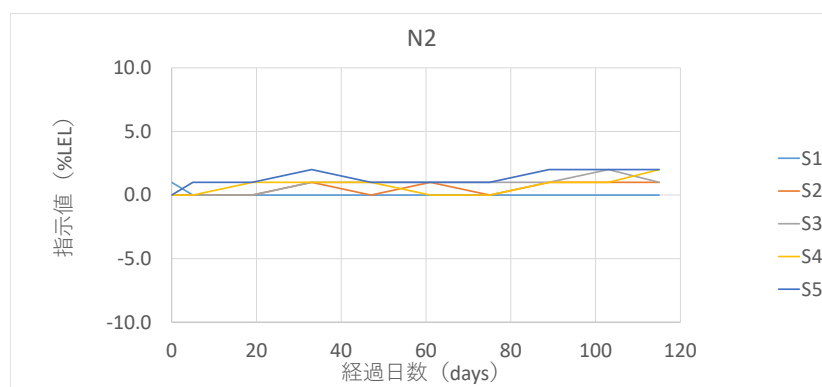


図 10. 従来法でのゼロ点の経時試験結果

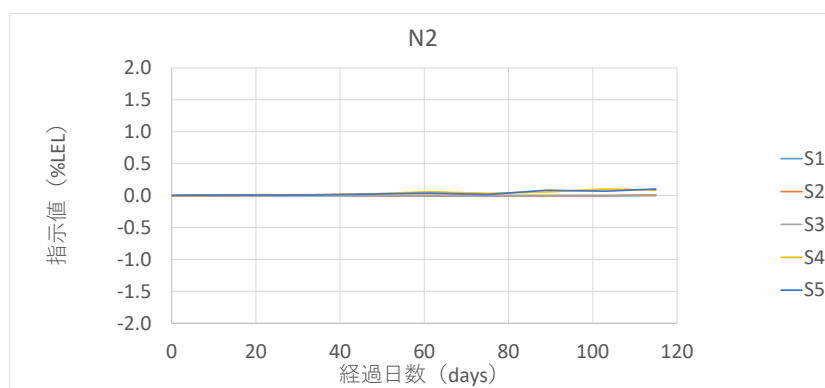


図 11. 多点データ解析手法で得られたゼロ点の経時試験結果

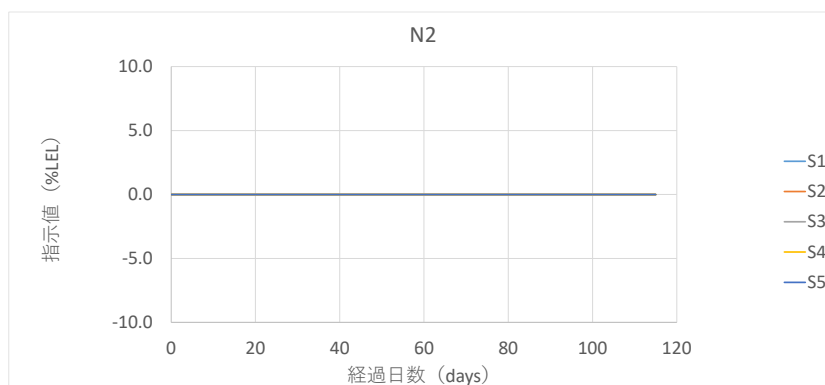


図 12. 最終的なゼロ点の経時試験結果

3. 1. 2. 4 無酸素下(N2 環境下) での水素ガス爆発下限界濃度(%LEL 濃度) 測定

3. 1. 2. 1～3. 1. 2. 3の検討によって高感度化したセンサーを用いることで水素ガス爆発下限界濃度(100%LEL=4. 0vol%濃度) が精度よく測定できることを確認した。試験ガスはN2希釈のH2 50%LEL濃度ガスを用いて、指示値が3分以上安定していることを示し、50%LEL±5%以内であることを確認した(IEC60079-29-1 5. 4. 3. 2項 Calibration and Adjustment Calibration curveによる試験方法)。図13は試作品センサー3個にN2導入後、N2希釈のH2 50%LELのガス検査結果を示しており、IECの規格を満たすことを確認した。

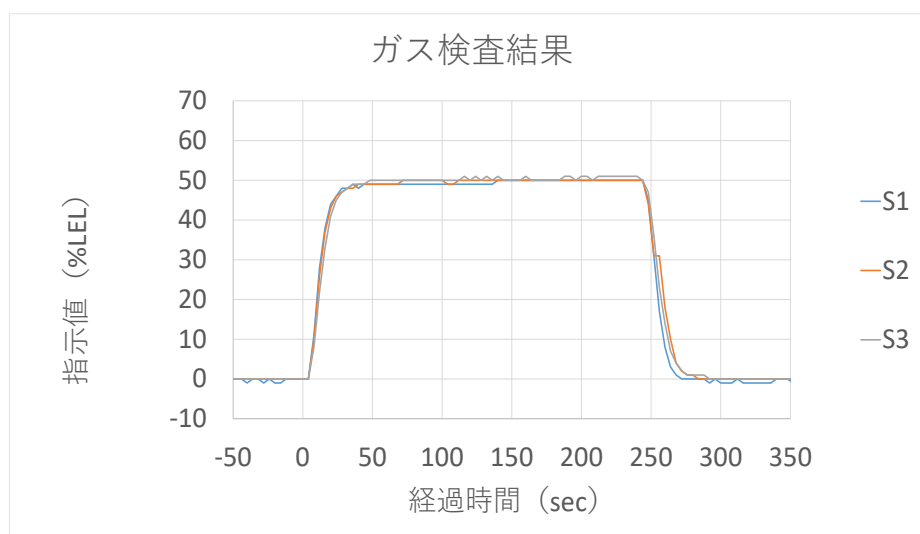


図 13. 指示精度データ

3. 1. 3 センサーの作製

図 1 及び図 5 に示す通りの構造にて検知器 8 台及びセンサー40 個を製造した。図 14 は受信部とガス検知端部が分離したもの(3 台分)であり、図 15 は受信部とガス検知端部が一体となったタイプ(5 台分)を示している。図 16 は、センサー(40 個)を示している。



図 14. 検知器
(受信部+ガス検知端部)

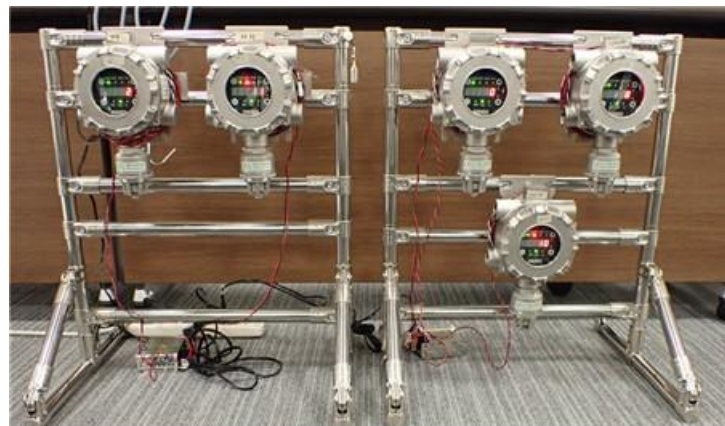


図 15. 検知器 (一体タイプ)



図 16. センサー

3.1.4 性能評価試験・仕様の決定

IEC60079-29-1(可燃性ガス用検知器の性能要求事項)の性能試験項目について、製造したセンサーを用いて評価試験を実施した。評価試験結果については表 2 の通りである。

表 2. 試験結果一覧表

試験項目	試験方法	判定
指示精度	ガス濃度： 0 %、10 %、30 %、50 %、70 %、90 %LEL ガス検査、連続 3 回実施	◎
応答試験	ガス検査 導入ガス濃度の半分を超える時間 (T50) 20 秒以内	○
繰返し性試験	6 回のガス検査繰返し時の指示の再現性	◎
温度試験	-20℃、20℃、55℃で試験	○
湿度試験	40℃ 0 %RH、20 %RH 50 %RH 95 %RH での試験	◎
振動試験	平行な 3 平面の各々でそれぞれ連続して 1 時間ずつ振動させる。10 Hz ～ 31.5 Hz, 0.5 mm 振幅 (全振幅 1.0 mm) 31.5 Hz ～ 100 Hz, 加速振幅 19.6 m/s ²	◎
経時試験	63 日間以上 定期的なガス検査指示値の安定性	◎
圧力試験	-20kPa 0kPa +20kPa で感度確認	◎
流量試験	1.5L/min, 1.0L/min, 0.5L/min, 0.2L/min の 4 段階での試験	◎
風速試験	無風、風速 0.5m/s、風速 3m/s、6m/s を検知器正面及び側面からあてて実施	◎

◎：規格の～1/3 ○：規格の 1/3～2/3

△：規格の 2/3～3/3 ×：規格外

全ての項目において規格の 2/3 までに収まった結果の判定であり良好な結果であった。詳細については下記に記載する。

3.1.4.1 指示精度

図 17 は、センサー10 個の指示精度の試験結果を示している。試験は室温雰囲気下で実施し、N2 を 5min 導入後、ある濃度の水素ガス (N2 希釈) を 2min 導入 (抽出値 1min 値) した。ガス濃度は 測定レンジの 0 %LEL、10 %LEL、30 %LEL、50 %LEL、70 %LEL、90 %LEL、100%LEL とし、試験では薄い濃度から順に導入した。この操作を連続 3 回実施したので図は 30 個のデータを含んでいる。50%LEL の指示精度は規格±5%LEL に対して、すべて±1%LEL 以内であった。赤色の線は規格の上下限を示している。

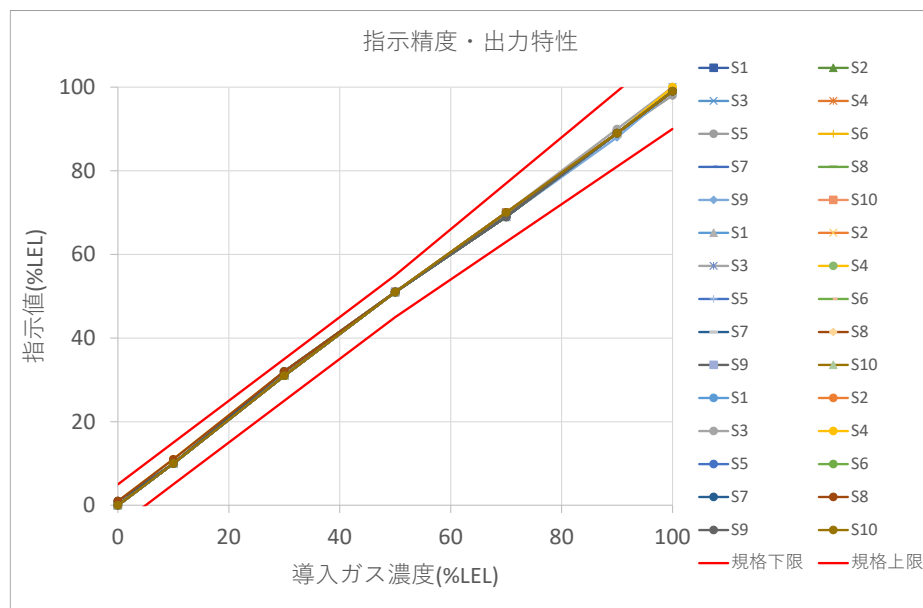


図 17. 指示精度試験結果

3.1.4.2 応答試験

ガス導入後の濃度上昇時の応答時間 (T50、T90) 及び、ガス抜き後の濃度下降時の応答時間 (戻り T50、戻り T10) を測定した。

※ T〇〇とは、ガス導入から濃度値が〇〇%に達した時の所要時間を示す。

戻り T〇〇とは、ガス抜き後から濃度値が〇〇%まで下降した時の所要時間を示す。

【IEC60079-29-1 規格】

T50：濃度値が 50%に達するまでの時間が 20sec 以内

T90：濃度値が 90%に達するまでの時間が 60sec 以内

戻り T50：濃度値が 50%に下降するまでの時間が 20sec 以内

戻り T10：濃度値が 10%に下降するまでの時間が 60sec 以内

表 3 に試験結果を示す。T50 は規格 20 秒以内に対し 4～8 秒、T90 は規格 60 秒以内に対し 12 秒、戻り T50 は規格 20 秒以内に対し 8 秒、戻り T10 は規格 60 秒以内に対し 12～16 秒であり、センサー10 個すべてにおいて規格を満足することを確認した。

表 3. 応答試験結果

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
ガスIN	T50	8	4	8	8	8	4	4	8	4	8
	T90	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
ガスOUT	T50	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	T10	16	12	16	12	16	12	12	16	12	16

3. 1. 4. 3 繰返し性試験

図 18 に示す通り、試験は、H2 50%LEL を 3 分導入して、そのあと N2 を 7 分導入するセットを×6 回繰り返した。1 セット毎に H2 と N2 暴露後のそれぞれの指示をセンサー 10 個用いて確認した。ゼロ点、ガス濃度 (H2 50%LEL) の規格±5%LEL に対して、用いたセンサーすべて±1%LEL 以内であった。赤色の線は規格の上下限を示している。

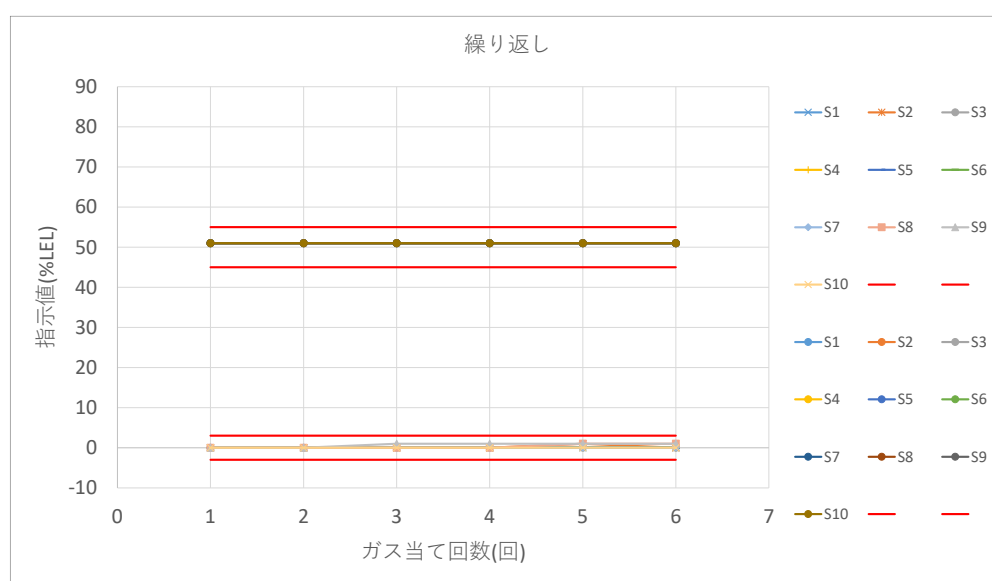


図 18. 繰返し性試験結果

3.1.4.4 温度試験

温度試験は各温度に設定して2時間放置後、次の順番でガス検査を実施した。①-20℃で試験(N2 5min 導入後 試験ガス (H2 50%LEL) を2min 導入 抽出値 1min)、以下同様に②20℃で試験(N2→ 試験ガス), ③50℃で試験(N2→ 試験ガス), ④60℃で試験(N2→ 試験ガス)。図19は、その時の試験結果を示している。ゼロ点、ガス濃度 (H2 50%LEL) の規格±5%LEL に対して、用いたセンサー10個すべて±1%LEL 以内であった。赤色の線は規格の上下限を示している。

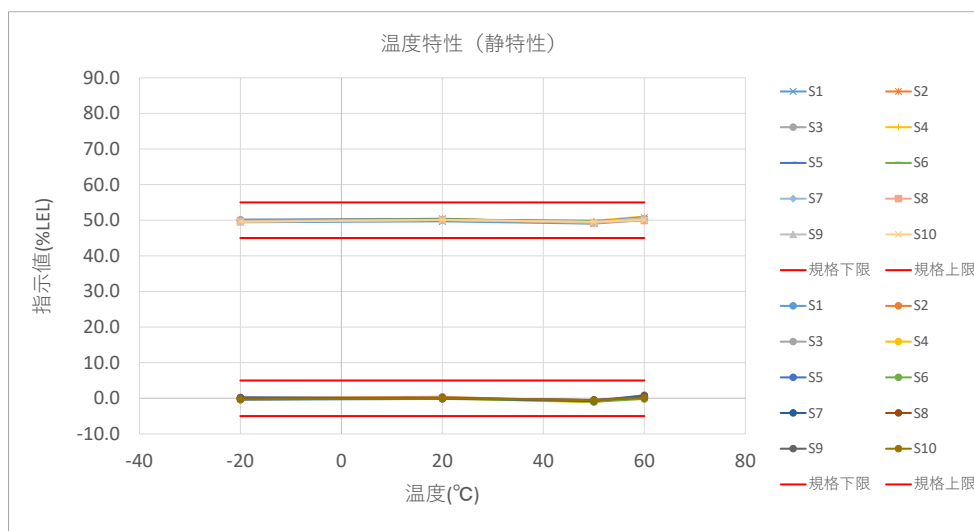


図 19. 温度試験結果

3.1.4.5 湿度試験

湿度試験は、40℃ドライの環境でセンサーの校正を実施してから、各湿度に設定して2時間放置後、次の順番でガス検査を実施した。①40℃20%RH で試験(N2 5min 導入後 試験ガス (H2 50%LEL) を2min 導入 抽出値 1min)、以下同様に②40℃50%RH で試験(N2→ 試験ガス)、③40℃90%RH で試験(N2→試験ガス)。図20は、その時の試験結果を示している。ゼロ点の規格±10%LEL に対して、用いたセンサー10個すべて±3%LEL 以内であった。また、ガス濃度 (H2 50%LEL) の規格±15%LEL に対して、用いたセンサー10個すべて±2%LEL 以内であった。赤色の線は規格の上下限を示している。

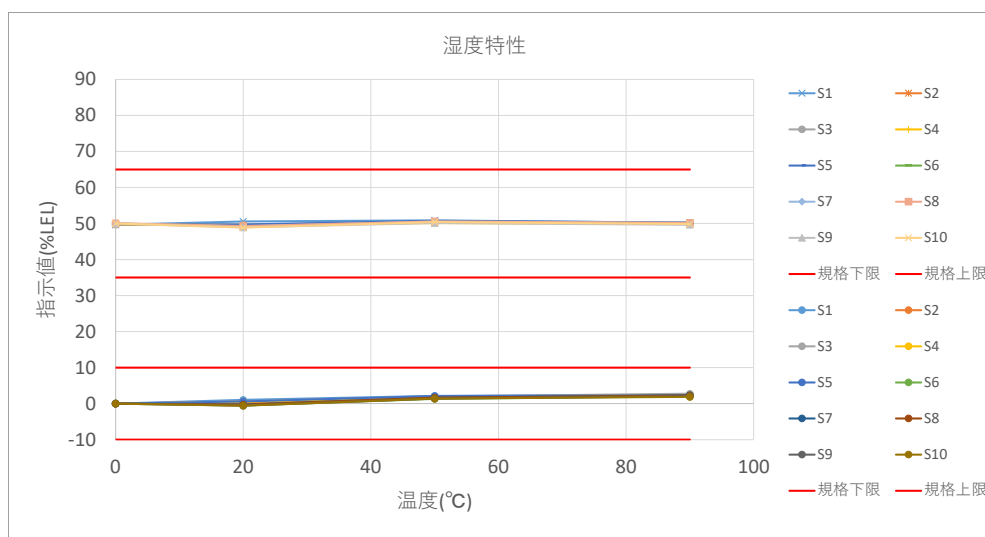


図 20. 湿度試験結果

3. 1. 4. 6 振動試験

振動試験は試験前に N2 と試験ガス (H2 50%LEL) でゼロ点とガス濃度値を確認した。N2 3min 導入後 試験ガス (H2 50%LEL) を 2min 導入 抽出値 1min 値とした。その後、検知器電源 ON 状態で振動試験機に取り付け、機器の 3 主軸の各々と平行な 3 平面の各々でそれぞれ連続して 1 時間ずつ次の条件で振動させた。

条件：

10 Hz ～ 31.5 Hz, 0.5 mm 振幅 (全振幅 1.0 mm)

31.5 Hz ～ 100 Hz, 加速振幅 19.6 m/s²)

3 回の振動後、試験前と同様にガス検査を実施した。図 21 は、その時の試験結果を示している。ゼロ点、ガス濃度 (H2 50%LEL) の規格±5%LEL に対して、用いたセンサー10個すべて±1%LEL 以内であった。赤色の線は規格の上下限を示している。

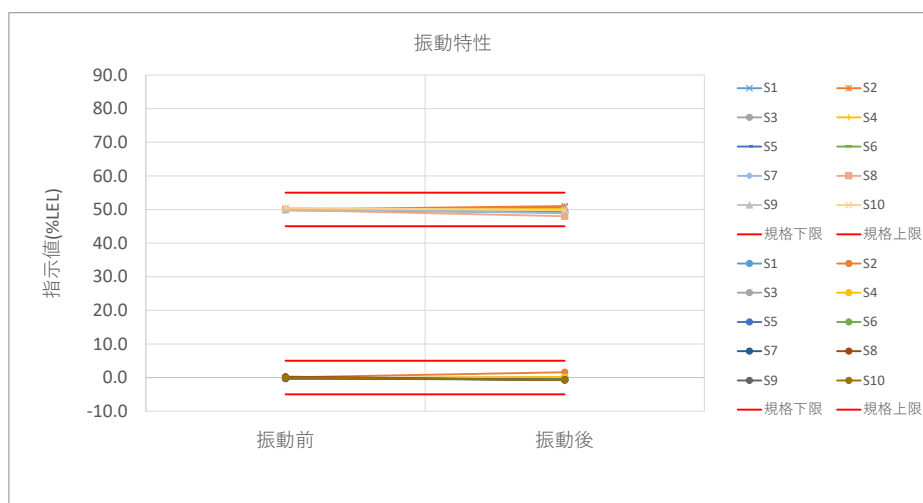


図 21. 振動試験結果

3.1.4.7 経時試験

経時試験は、校正後、試験品にゼロガス（N2）および試験ガス（H2 50%LEL）を定期的に導入し、ゼロ点および指示値の変化を記録した。ガス検査は、N2 3min 導入後 試験ガス（H2 50%LEL）を 2min 導入 抽出値 1min 値とした。また、IEC の規格（60079-29-1, 5.4.4.5）に則り、試験開始から 8 日目に 8 時間の連続接触試験（H2 50%LEL）をセンサーに導入）を実施し、連続接触試験前後で指示変動が 1%LEL 以内で規格±5%LEL を満たした。また、図 22 に示した通り、試験初日～63 日間のガス検査における指示変動もゼロ点、ガス濃度（H2 50%LEL）ともに 1%LEL 以内であり、IEC 規格±7%LEL を満たした。その後も継続して、200 日以上経過においても規格を満たしていることを確認した。

経時特性

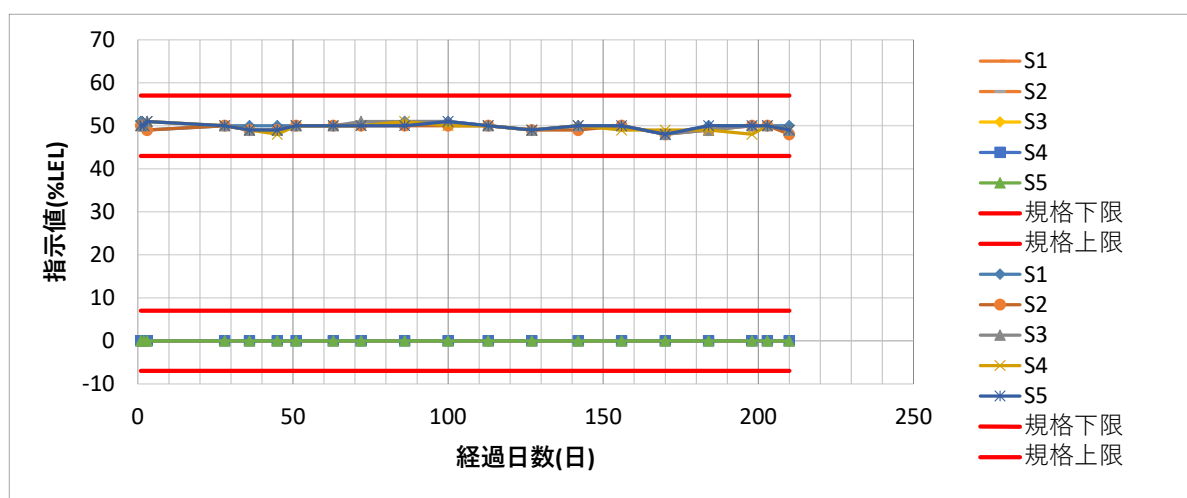


図 22. 経時試験結果

3.1.4.8 圧力試験

圧力試験は各圧力に設定して 2 分放置後、次の順番でガス検査を実施した。①-20kPa で試験（N2 5min 導入後 試験ガス（H2 50%LEL）を 2min 導入 抽出値 1min）、以下同様に ②0kPa で試験（N2→ 試験ガス）、③20kPa で試験（N2→ 試験ガス）。図 23 は、その時の試験結果を示している。ゼロ点の規格±10%LEL に対して、用いたセンサー 10 個すべて ±3%LEL 以内であった。また、ガス濃度（H2 50%LEL）の規格±15%LEL に対して、用いたセンサー 10 個すべて ±3%LEL 以内であった。赤色の線は規格の上下限を示している。

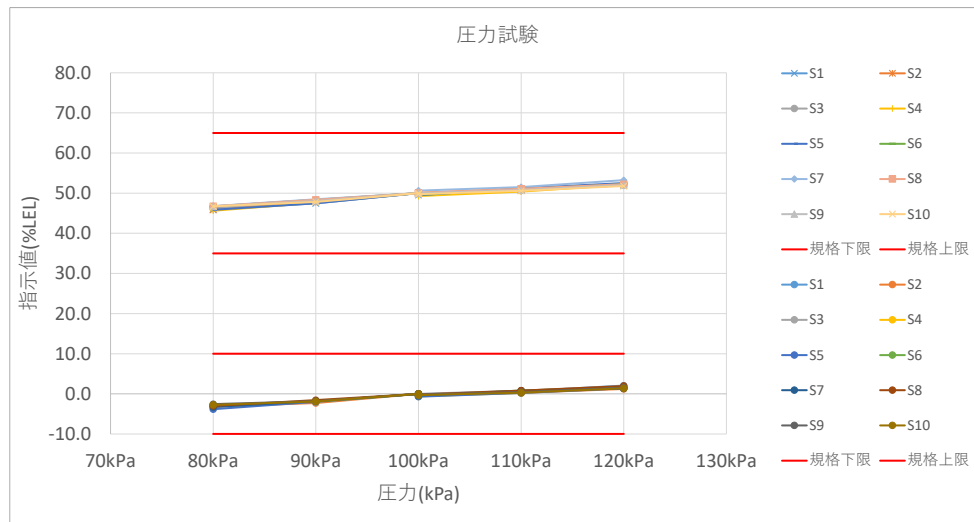


図 23. 圧力試験結果

3.1.4.9 流量試験

流量試験は各流量に設定して2分放置後、次の順番でガス検査を実施した。①0.2L/minで試験(N₂ 5min 導入後 試験ガス (H₂ 50%LEL) を2min 導入 抽出値 1min)、以下同様に②0.5L/minで試験(N₂→ 試験ガス)、③1.0L/minで試験(N₂→ 試験ガス)、④1.5L/minで試験(N₂→ 試験ガス)。図24は、その時の試験結果を示している。ゼロ点、ガス濃度(H₂ 50%LEL)の規格±5%LELに対して、用いたセンサー10個すべて±1%LEL以内であった。赤色の線は規格の上下限を示している。

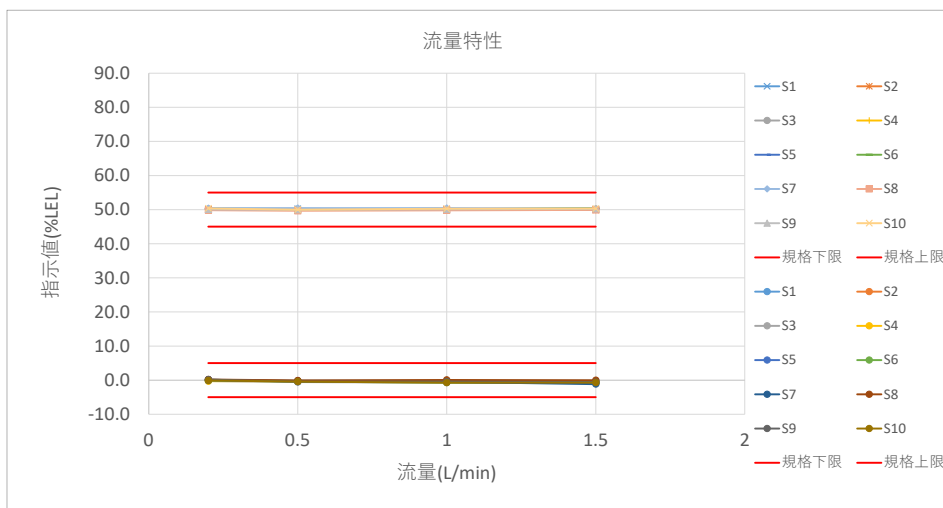


図 24. 流量試験結果

3. 1. 4. 10 風速試験

風速試験では、ガス検知器端部とファン（風速を調整できるもの）を拡散槽内にセットして、ガス検知器端部のセンサー部分の正面から風が当たるようにファンを設置する。その後、拡散槽を N2 あるいは H2 50%LEL (N2 希釈) で満たしたあと、ファンの回転数を 0m/sec、0.5m/sec、3m/sec、6m/sec に変化させて、それぞれの風速で、1min 放置後、指示値を確認する。また、同様の試験をセンサー側面から風が当たるようにセットして実施した。図 25-1 は正面からの風速試験、図 25-2 は側面からの風速試験を示している。ゼロ点、ガス濃度 (H2 %LEL) の規格±5%LEL に対して、用いたセンサー10 個すべて±1%LEL 以内であった。赤色の線は規格の上下限を示している。

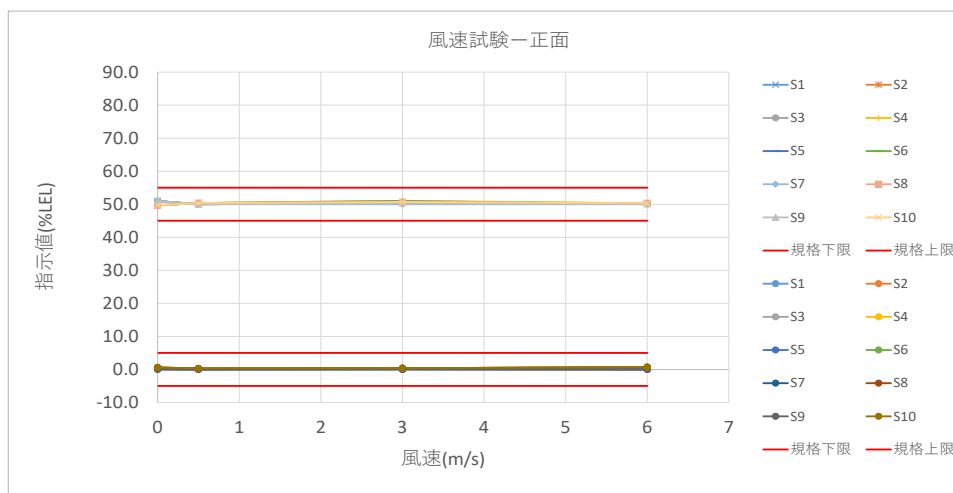


図 25-1. 風速試験結果 正面

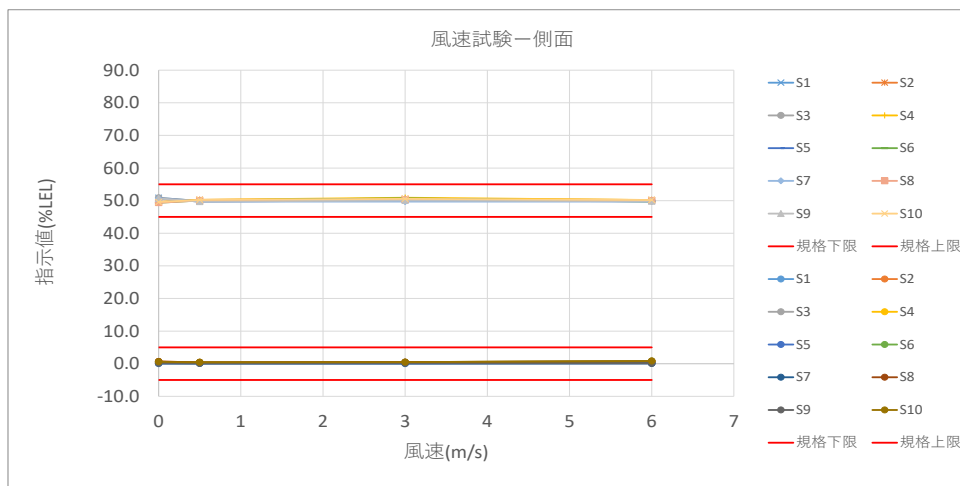


図 25-2. 風速試験結果 側面

本結果より、センサー構造及びセンサー性能に問題無いと判断し、2024 年度のフィールド試験へ進めると判断した。

3. 1. 5 性能比較用基準センサーによるフィールド条件データの事前取得

検知器を設置する環境の調査の為、株式会社三井 E&S（岡山県玉野市造船工場敷地内）の水素エンジン周囲の二重管内の気体の組成（雑ガス・ミスト・ダストの有無）、圧力変動、温湿度変化、流速、振動・共振のデータを取得した。水素検知器取付部の近傍でそれらのデータが取得できるように各種センサー治具類を設置した。図 26 は、水素エンジンシステムのイメージ図を示している。今回フィールド試験で水素検知器を設置した場所は、その図中の右側に記載のある二重管と呼ばれる配管に設置した。表 4 に本フィールド試験にて使用した機関諸元を記載する。本機関は 4 気筒からなり、水素燃焼試験は 4 気筒の内の 1 気筒を水素燃焼シリンダへと変更されている。他シリンダは A 重油で駆動している。

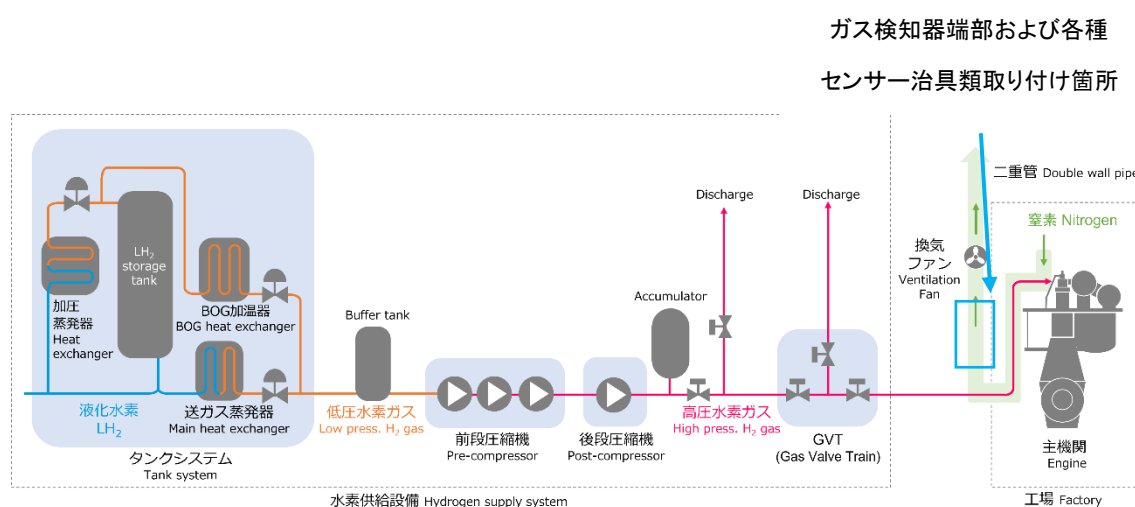


表 4. 三井 MAN B&W ディーゼル機関諸元

型式	4S50ME-T9.7
ボア x ストローク	500 [mm] x 2240 [mm]
エンジン定格回転数	117 [RPM]
出力	7120 [kW]
平均有効圧	2.1 [MPa]

各種センサー治具類の出力は、データロガーにて記録を行った。そのデータを取得する構成は、図 27 の通りである。また、図 28 に示す通り、ガス検知端部試作機は 3 台、温湿度データ、水素センサーの生データを取得するセンサー単体 6 台、風速トランスミッタ、加速度ピックアップ、圧力変換機を各 1 台取り付けた。

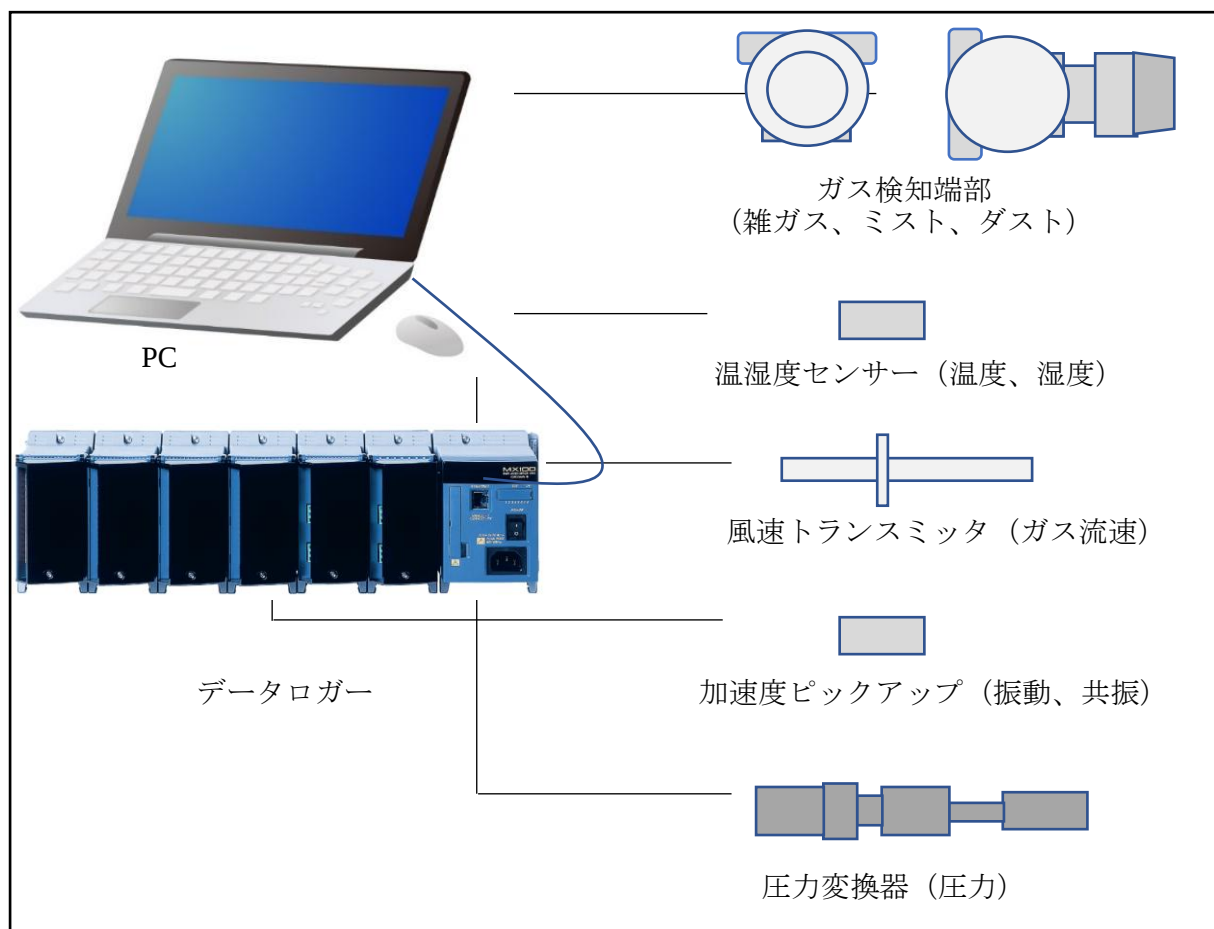


図 27. 試験機器構成

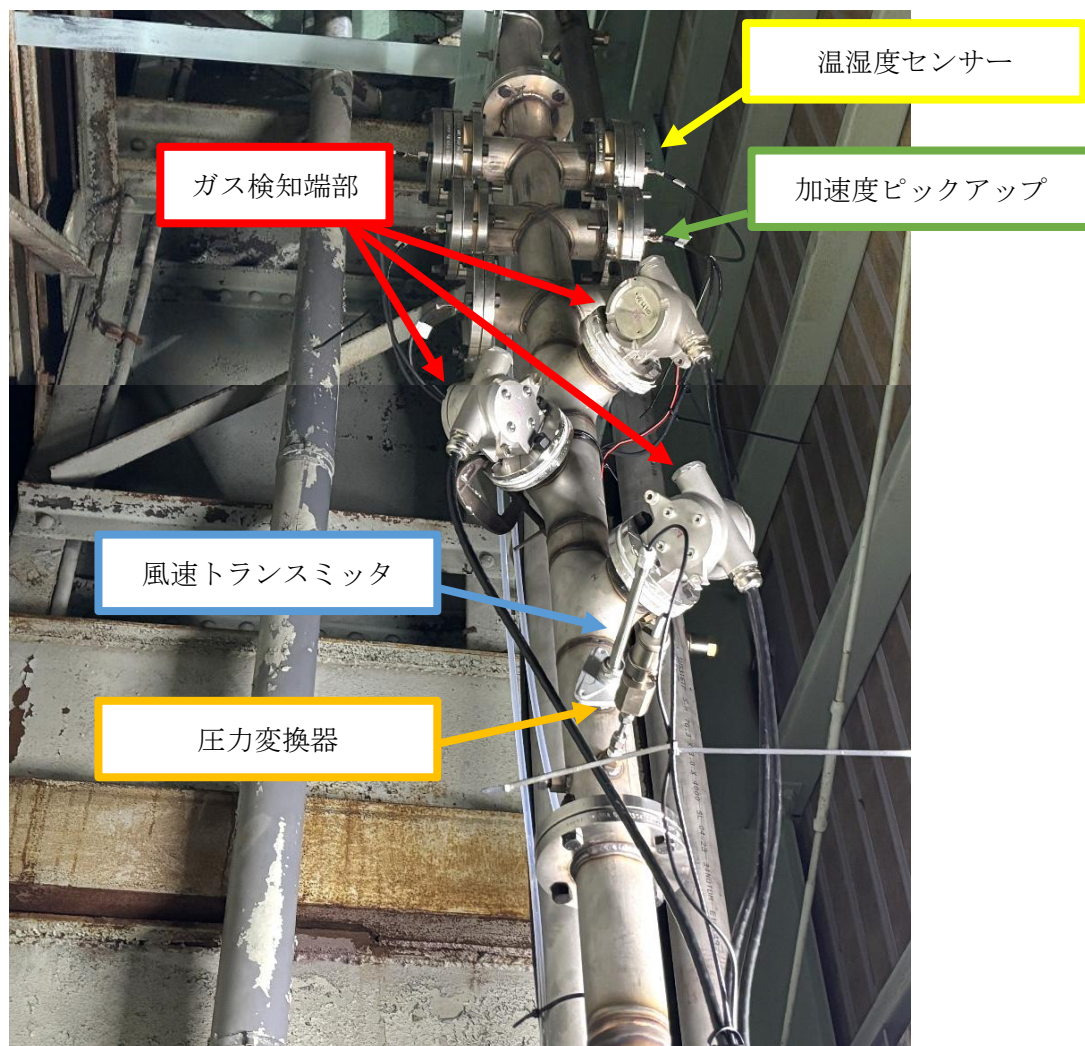


図 28. 試作検知器及び環境モニター用センサー治具類設置図

1) 二重配管内組成

2024 年 1 月 12 日に試作検知器を配管内に設置し、雑ガスの有無、ミスト、ダストによる目詰まりの確認試験を実施した。あらかじめ校正した試作センサーをガス検知端部にセットして、水素エンジン配管内に設置した（図 28）。その後、水素エンジン駆動前の期間（1 月 12 日～1 月 31 日）の約 20 日間、エンジン駆動期間（2 月 1 日～2 月 20 日）の約 20 日間、各種センサーからのデータを取得して、雑ガス、ミスト、ダストによる異常な応答、ダストによる目詰まりが生じないか調査した。その結果、一連の期間において、ガスセンサー、温湿度、振動、風速、圧力において異常な値は認められなかった。図 29 は、そのときのゼロ点の変動をプロットした図である。記録開始時（1 月 12 日）をゼロ点としてその変動値を記録したものである。今回は、環境調査のため、ゼロ点補正機能を OFF にしてデ

ータを取得した。水素エンジン駆動期間前および駆動後すべての期間でゼロ点が安定していた。このことから、センサー出力値に異常を生じるような雑ガス、ミスト、ダストによる影響はないと判断できる。また、水素エンジン駆動前の1月22日に160L/min以上の窒素が流れている二重管外管に1L/min、2.5L/min、5L/minの流量で水素を導入し、指示の上昇及び応答波形を確認した。その結果、図30の通り、窒素のみが流れている時には、指示値が0%LELを示し、水素ガスの導入時に指示値が上昇した為、このことから雑ガス、ミスト、ダストによる影響が無いことが確認できた。課題として、今後指示値の精度の検証について、配管内の窒素の流量の正確な把握やガスのサンプリングによるガス濃度の測定が必要である。

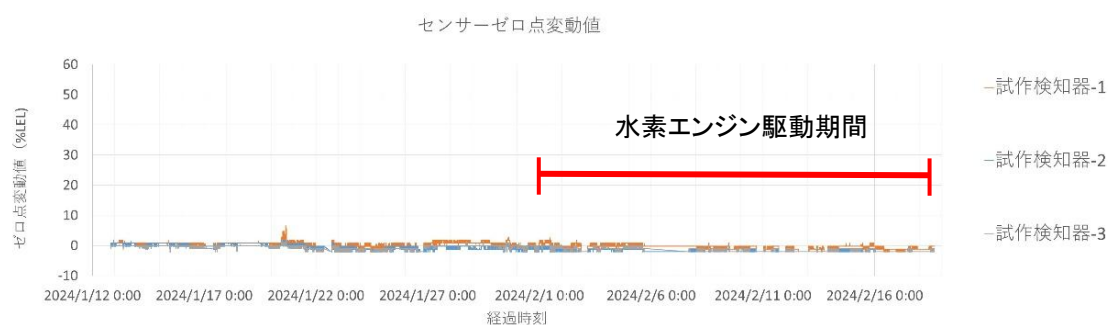


図 29. ゼロ点の変動値

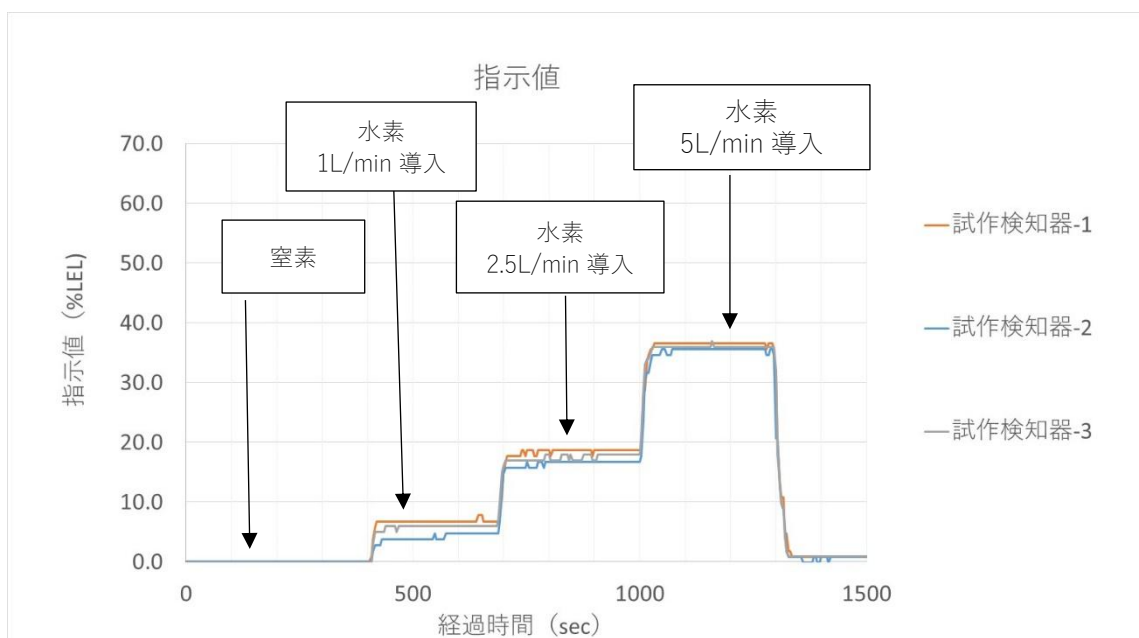


図 30. ガス導入時の指示値

2) 圧力変動

図 31 に圧力変換器（PHB-A-2MP 共和産業製）を示す。最大 1MPa かかることが想定されたため、2MPa まで測定できるこの圧力変換器を選定した。二重管外管に設置し、圧力変動を確認した。



図 31. 圧力変換器

試験期間の圧力変動は図 32 の通りである。配管内の圧力は $0.00 \pm 0.01 \text{MPa}$ 以内であった。社内の圧力試験において、 $0.00 \pm 0.02 \text{MPa}$ で IEC60079-29-1 の規格内であったことから、圧力変化に関して問題無いと考える。



図 32. 配管内圧力

3) 温湿度変化

温湿度センサーを配管内に設置して、温度と湿度をモニターした。試験期間の温度、湿度の変動は図 33、図 34 の通りである。配管内温度は 2～23℃の変動であった。絶対湿度は 0.5～10.5mg/L であった。社内の温湿度試験において、-20～60℃および 40℃90%RH（絶対湿度 46mg/L）で IEC60079-29-1 の規格内であることから温湿度に問題無いと考える。

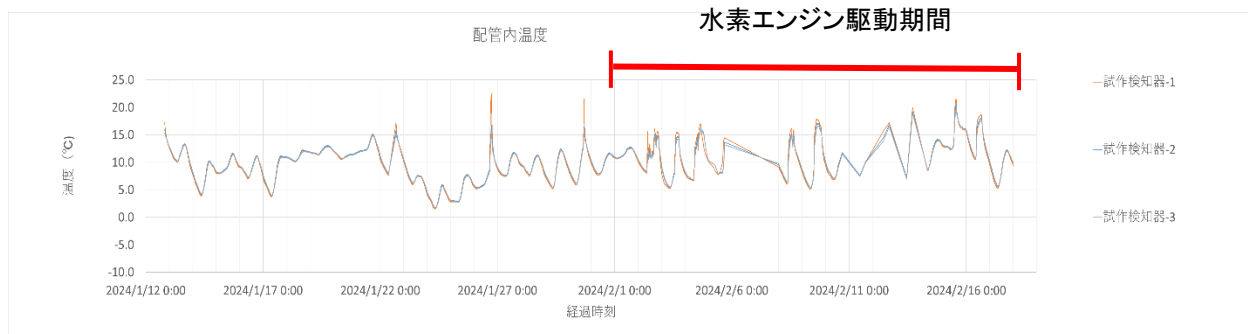


図 33. 配管内温度

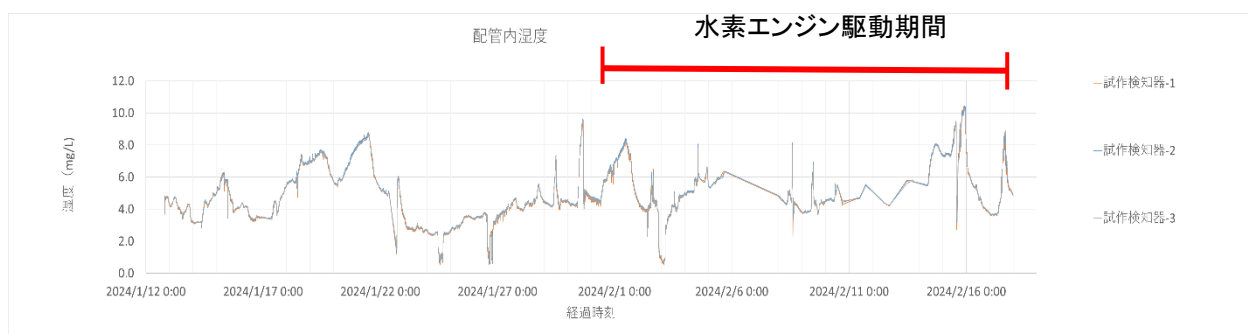


図 34. 配管内絶対湿度

4) ガス流速

図 35 に風速トランスミッタ (HD29V3T デルタオーム製) を示す。二重管外管に風速トランスミッタを設置し、風速を確認した。



図 35. 風速トランスミッタ

試験期間の風速は図 36 の通りである。配管内の風速は、エンジン停止時 0m/sec、稼働時 10m/sec であった。社内の風速試験において、0 ～ 6m/sec の条件で IEC60079-29-1 の規格内であることを確認していたが、実測値は 10m/sec であったため、追加で社内試験を実施することとした。

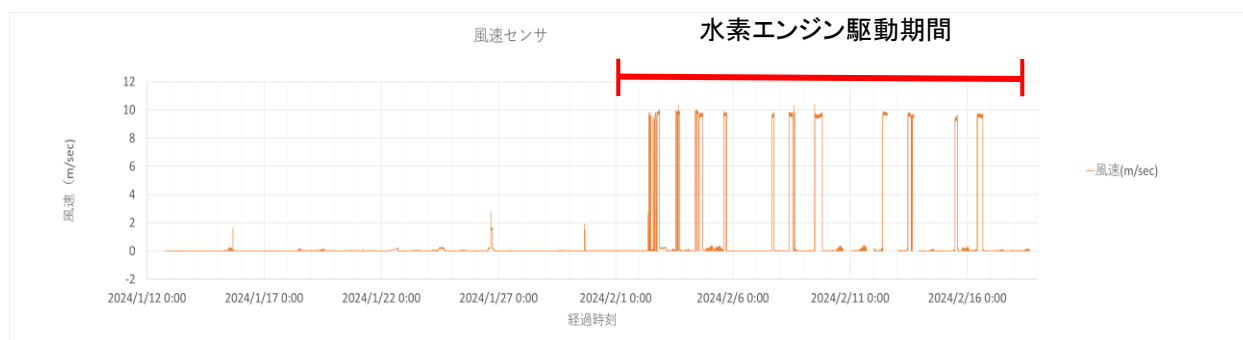


図 36. 配管内風速

5) 振動・共振

図 37 に圧電式加速度ピックアップ（548-ES 型 EMIC 製）を示す。二重管外管に圧電式加速度ピックアップを設置し、振動（加速度）を確認した。

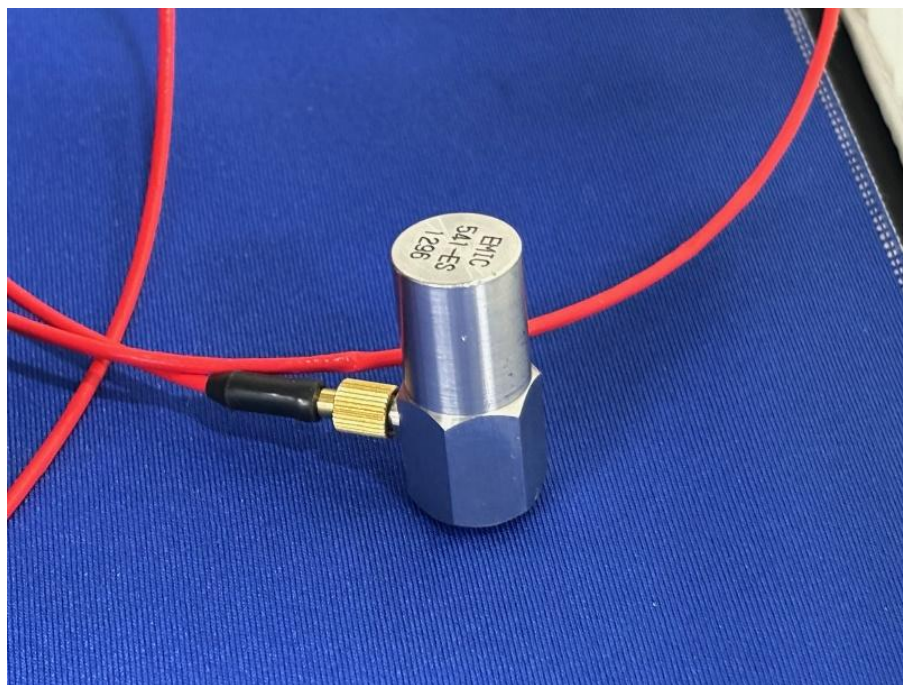


図 37. 圧電式加速度ピックアップ

試験期間の加速度は図 38 の通りである。検知器近傍の加速度は最大で 9m/s^2 であった。社内の振動試験において、 20m/s^2 の条件で IEC60079-29-1 の規格内であったことから、振動（加速度）に問題無いと考える。

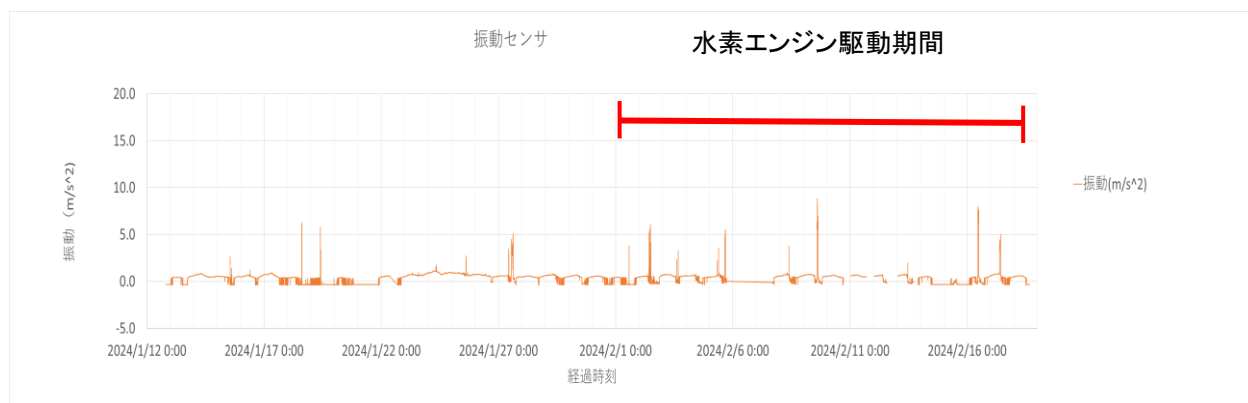


図 38. 検知器近傍の振動加速度

3.2 目標の達成状況

2.1 項に示した 2023 年度の目標の達成状況については計画に対し 100%であった。

目標 1) センサー構造の検討について、センサー内部の構造を最適化したことにより、水素ガスがより速く検知できるようになり、目標であった応答時間 T50 (導入ガス濃度の半分を超える時間) が 20 秒以下のところ、8 ～ 12sec となり、目標を達成した。

目標 2) センサーの高感度化の検討について、センサーに印加する電圧の駆動方式を検討して、SN 比が向上し 1 デジット 0.2%LEL (80ppm) となり、1.0 %LEL (400ppm) 以内となり、目標を達成した。また、多点データ解析手法によるガス有無判定法による補正方法を導入して、経時的なセンサー出力の安定性を向上することができた。その結果、10%LEL の検知精度は±1%LEL になり、爆発下限界値 4vol% の 1/10 濃度 (0.4vol% = 10%LEL) を正確に検知できる性能を確保できた。

3.3 2023 年度の実施内容の概要

1) センサー構造の検討

ガス検知端部の構造は、二重配管外管へ直接挿入・装着できる方式とし、センサーの内部構造はセンサー内部の容積を小さくし、且つセンサー素子と壁との距離を均一にすることで、水素ガスをより速く検知することができた。試験ガス 50%LEL を検知端部に導入し 25%LEL を指示するまでの時間を確認する試験の結果、T50 8～12 秒となり仕様を満足した (IEC60079-29-1 5.4.15 項 Time of response による試験方法)。

以後、本文では IEC 規格と用いる場合、IEC60079-29-1 のパフォーマンス規格を示すこととする。

2) センサーの高感度化の検討

センサーに印加する電圧を周期的に変化させる駆動方式を検討した結果、最適な駆動電圧および駆動パターン、センサー出力値をサンプリングする数の取得方法が見つかった。その結果、SN 比が向上して高感度化を達成し、精度 (ノイズレベル) が 1%LEL (400ppm) 以内を実現した。

4. 2024年度の実施報告

4.1 2024年度の実施内容

4.1.1 フィールド試験① エンジン実稼働前後の性能差異確認

開発事業協力者の株式会社三井 E&S 殿のエンジン実証機に試作センサーを取付け、エンジン実稼働状態による各種環境変化(振動、温度、湿度)に対する性能試験(指示精度、応答時間、繰返し性)を、予めガス濃度が確定された水素の試験ガスを用いて実施した。また、エンジン稼働中は、センサーのゼロ点の変動を記録し続け、一連のエンジン稼働期間が終了後、改めて、同様の性能試験(指示精度、応答時間、繰返し性)を実施した。また、エンジン稼働時に想定される振動において、試作センサーの耐久性確認するために、室内での予備試験を実施した。

4.1.1.1 新規 H2 センサー振動試験(予備試験)

図 39-1、39-2 の通り、フィールド試験で用いる加速度センサーは、ANALOG DEVICE 社製の ADXL345(誤差:0.16G (製品スペック (8G 設定)))を使用した。初期設定は、フルスケール 8G、周波数 400Hz に設定し、サンプリング方法は、加速度センサーを 2 秒間に 20 点(各 0.1 秒)を取得して、その最大値を抽出し、2 秒周期とした。

図 40-1、40-2、40-3 の通り、予備試験のための振動試験機は、EMIC 社製の F-0600BM/FA を用いて、IEC 規格(2G)より過酷な下記の条件(4G)で振動試験を H2 センサー 3 台(S1, S2, S3)で実施した。4G を振動条件として設定した理由として、一般財団法人日本海事協会による船用材料・機器等の承認及び認定要領により、ディーゼル機関、空気圧縮機などの振動条件が激しい機関に装備する機器の試験条件に加速度 4G が求められているためである。

振動試験前後でガス検査(ガス濃度: 50 %LEL)を実施し、ゼロ点、ガス濃度指示値の変動を確認した。振動試験は、センサーを直角 3 方向(水平方向(X 軸, Y 軸(X 軸とは直角)), 垂直方向(Z 軸))の各々で連続して 1 時間ずつ振動させた。

試験条件:

1. 10~30Hz 1mm 全振幅
2. 30~100Hz 39.2 m/s²(4G) 加速振幅
3. 100~30Hz 39.2 m/s²(4G) 加速振幅
4. 30~10Hz 1mm 全振幅
5. 直角 3 方向 (Z 軸, Y 軸, X 軸) の各々で連続して 1 時間ずつ振動

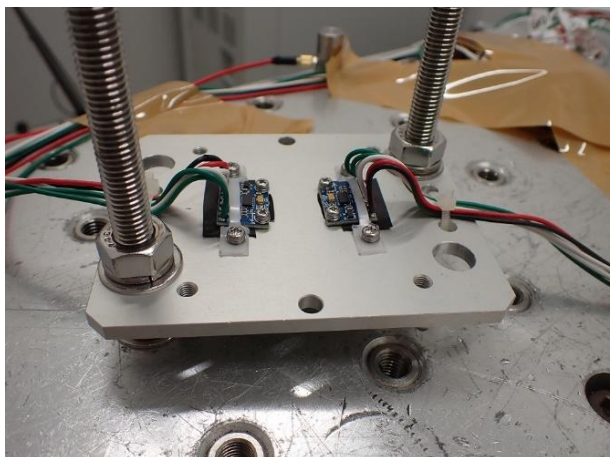


図 39-1. 加速度センサー振動台に設置



図 39-2. 加速度センサー

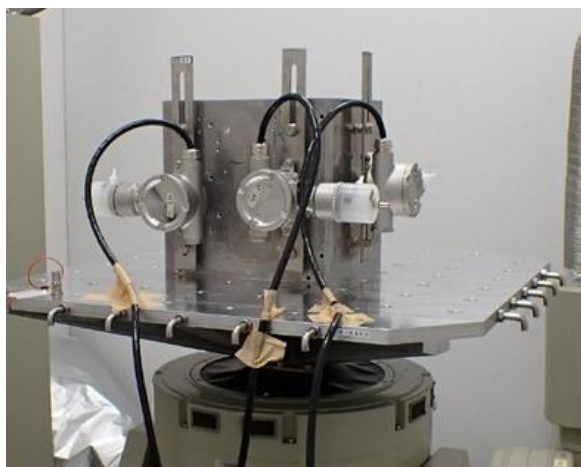


図 40-1. ガス検知端部 振動台に設置

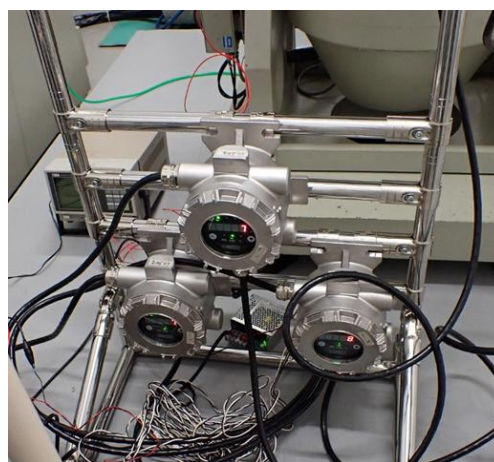


図 40-2. 受信部

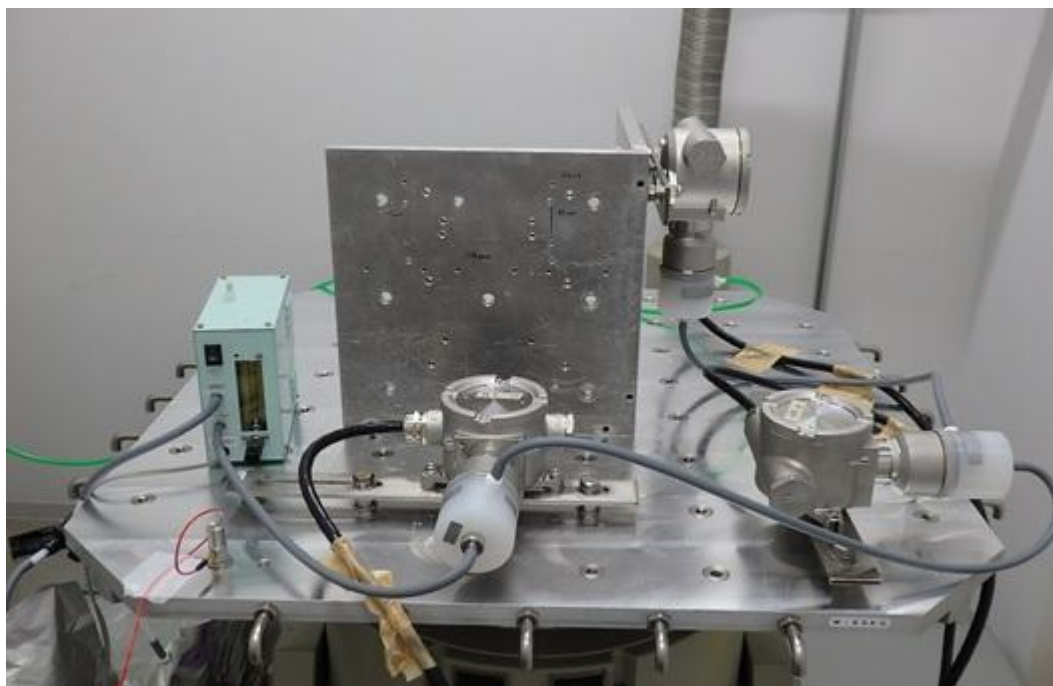


図 40-3. 振動試験前のガス検査の状況

図 41-1、41-2、41-3 はそれぞれ、振動 1 回目 (X 軸方向)、2 回目 (Y 軸方向)、3 回目 (Z 軸方向) における、H2 センサー (S1、S2、S3) の振動試験前後のガス検査 (H2 50%LEL) と振動中のゼロ点の指示値を示している。H2 センサー (S1、S2、S3) はどの方向に設置されても、振動前後のガス検査 (H2 50%LEL) による指示値及び 4G 振動中においてのゼロ点指示値がいずれも 2%LEL 以内であり、IEC 規格の 5%LEL 以内に収まった。

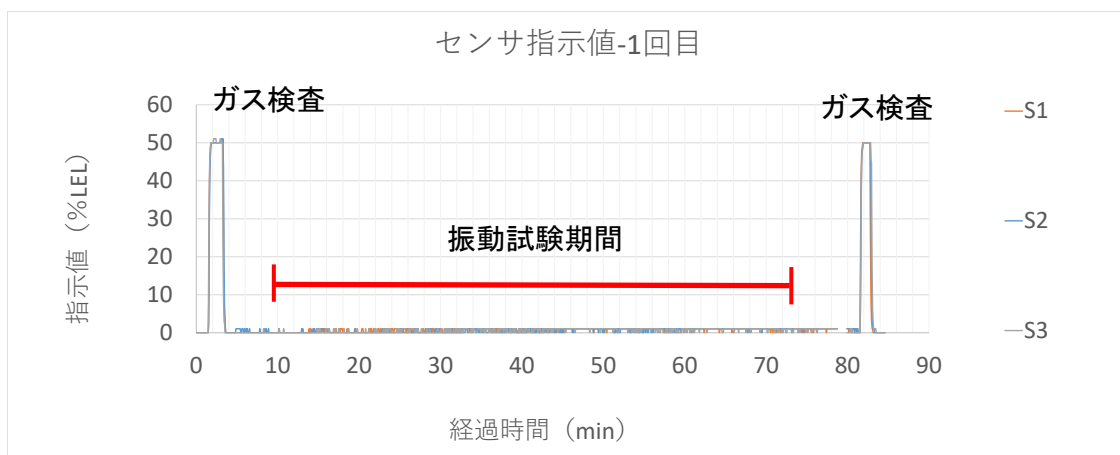


図 41-1. H2 センサー指示値 (1 回目 X 軸方向)

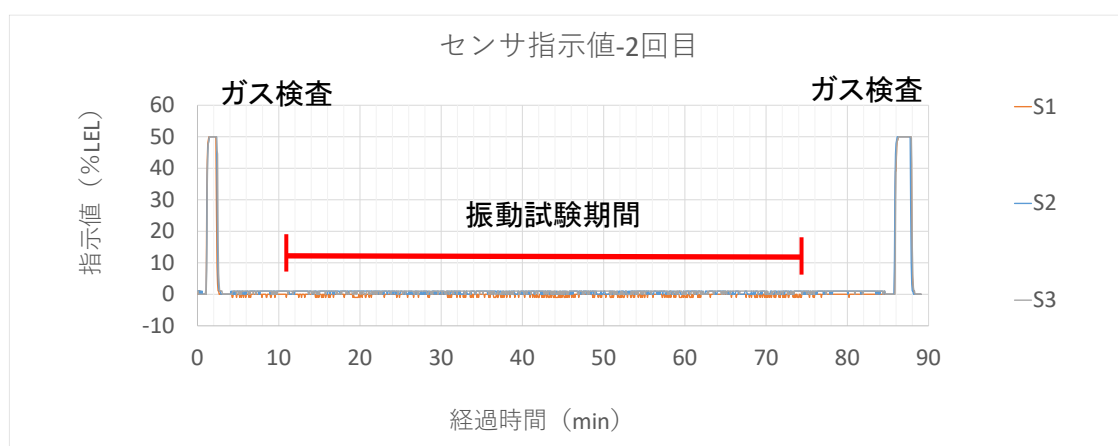


図 41-2. H2 センサー指示値 (2 回目 Y 軸方向)

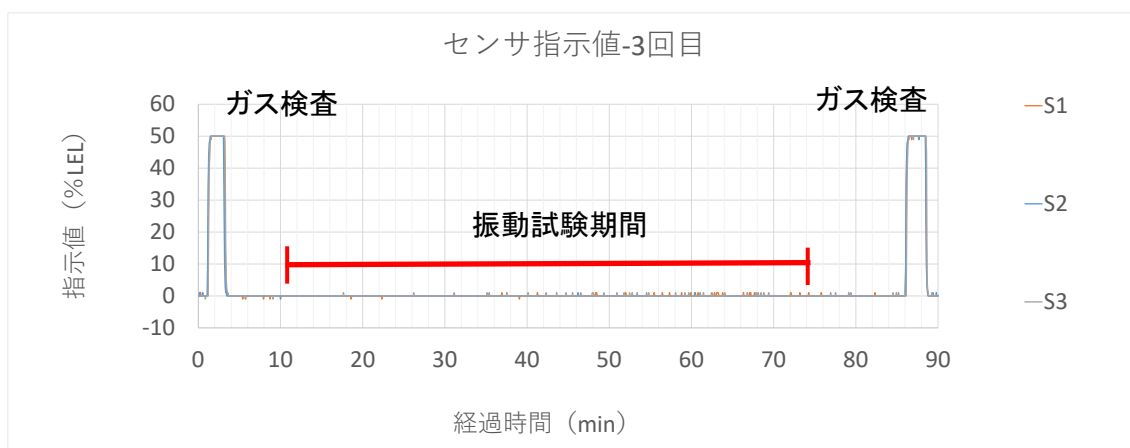


図 41-3. H2 センサー指示値 (3 回目 Z 軸方向)

4. 1. 1. 2 エンジン稼働時の振動センサーと新規 H2 センサーの出力値測定

図 42-1は、水素エンジンと水素センサーの設置場所の位置関係を示す模式図である。図 42-2 は実際の水素エンジンの 2m 以内直近に設置されている新規 H2 センサー (S1、S2、S3)と加速度センサーの状況を示している。図 42-3、42-4、42-5 は水素エンジンの約 8m 付近の配管内に設置されている新規 H2 センサー (SD3-S1、SD3-S2、SD3-S3)の状況を示している。また、図 43-1 は1回目のエンジン稼働試験のエンジン負荷率を示しており、図 43-2-1、43-2-2、43-2-3 は、その試験の加速度センサーの値(水平方向 2 方向 X 軸方向と Y 軸方向(X と Y は直角)、Z 軸方向(垂直方向))を示している。図 44-1、44-2 は、それぞれエンジン近傍と配管内の設置センサーの指示値を示している。図 45、46 は同様にエンジン稼働試験の 2 回目、図 47、48 は 3 回目のデータのセットを示している。

加速度センサーは、Z 軸方向(垂直方向)に振動が大きく、3 回の試験での最大値はそれぞれ、2.5G、2.8G、2.7G で、平均値はそれぞれ 0.98G、1.15G、1.03Gを示した。一方、X 軸 Y 軸の水平方向の最大値はそれぞれ、0.86G、0.90G、0.94G で、平均値はそれぞれ 0.25G、0.31G、0.31G であった。また、エンジンの負荷率が大きいきほど加速度センサーは大きな値を示す傾向にあった。

図 44-1、44-2、46-1、46-2、48-1、48-2 の通り、エンジン近傍の新規 H2 センサーの指示値はエンジン稼働中、停止中に差異はなく、IEC 規格 $\pm 5\%$ LEL 以内に対して、 $\pm 2\%$ LEL 以内であった。また、およそ 8m 離れている配管に設置されている H2 センサーも同様に指示値の変動はなく、IEC 規格 $\pm 5\%$ LEL 以内に対して、 $\pm 2\%$ LEL 以内であった。図 46、48 のセンサー (S3) のデータは、PC との通信の都合で取得できなかった。通信改善後の確認において、センサー出力に異常はなかった。

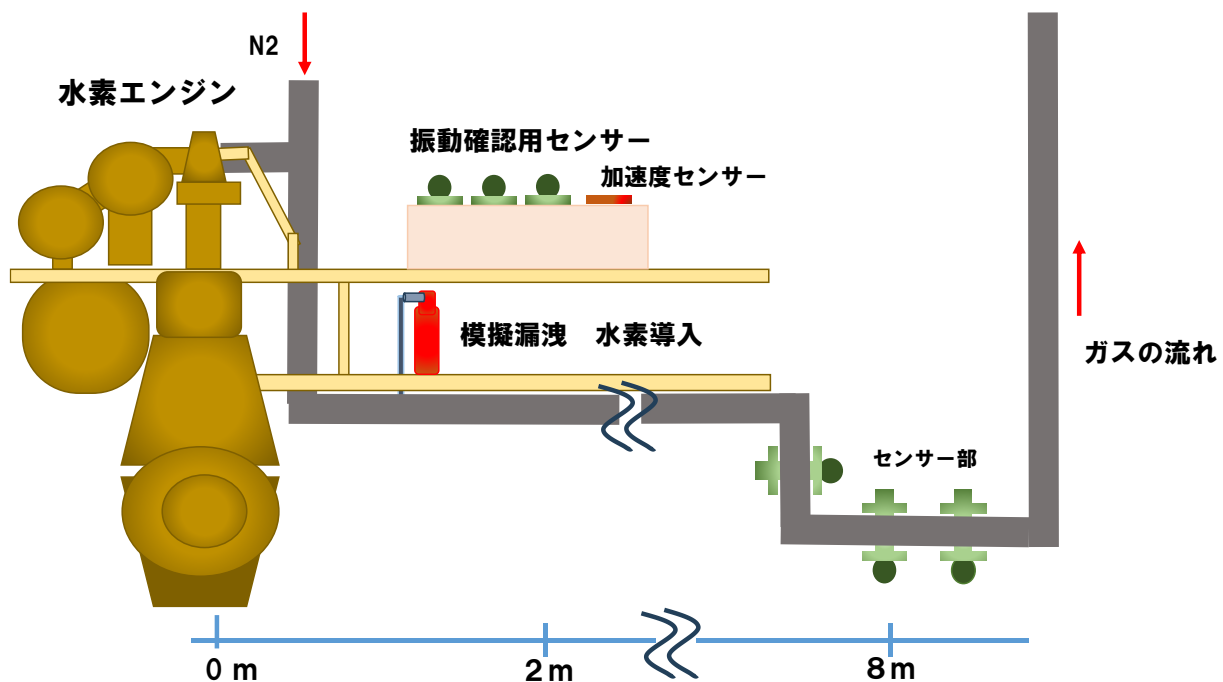


図 42-1.水素エンジンと水素センサーの位置関係の模式図

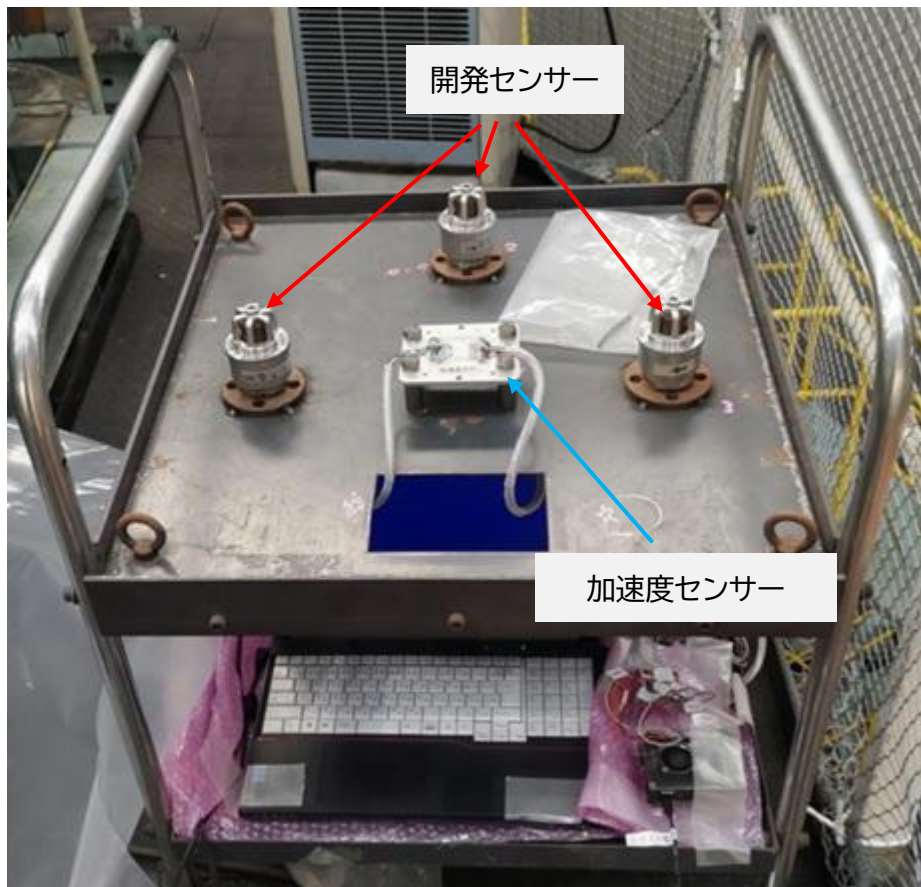


図 42-2. 水素エンジン付近に設置した開発センサー(S1,S2,S3)と加速度センサー



図 42-3. 配管に設置した水素センサー



図 42-4.配管に設置前のセンサー部



図 42-5.受信部

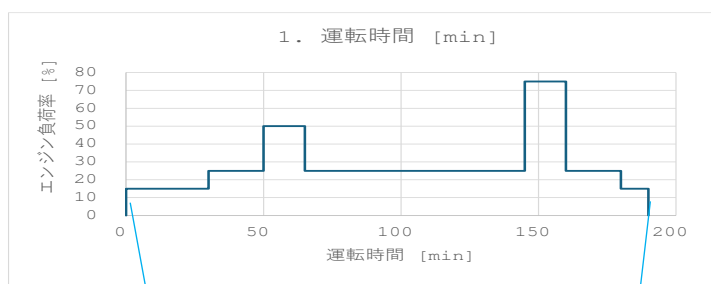


図 43-1. 水素エンジン負荷率変化 (試験 1 回目)

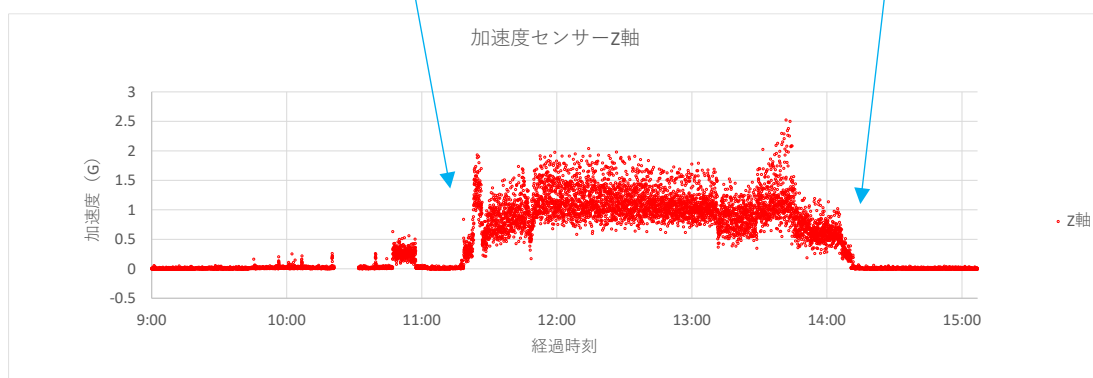


図 43-2-1. 加速度センサー (Z 軸 : 垂直方向)

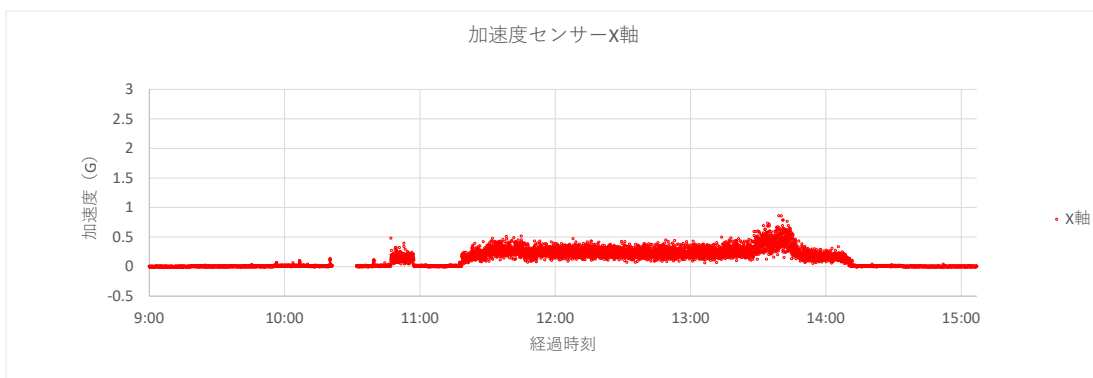


図 43-2-2. 加速度センサー (X 軸 : 水平方向)

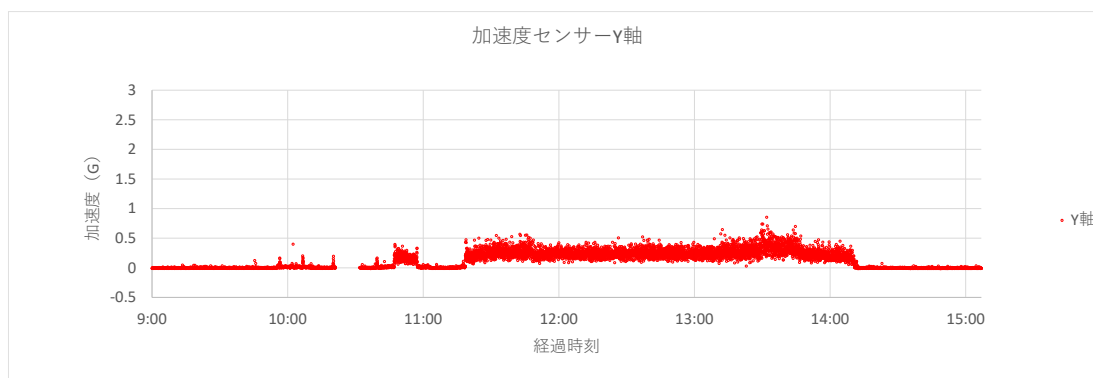


図 43-2-3. 加速度センサー (Y 軸 : 水平方向 X 軸と直角)

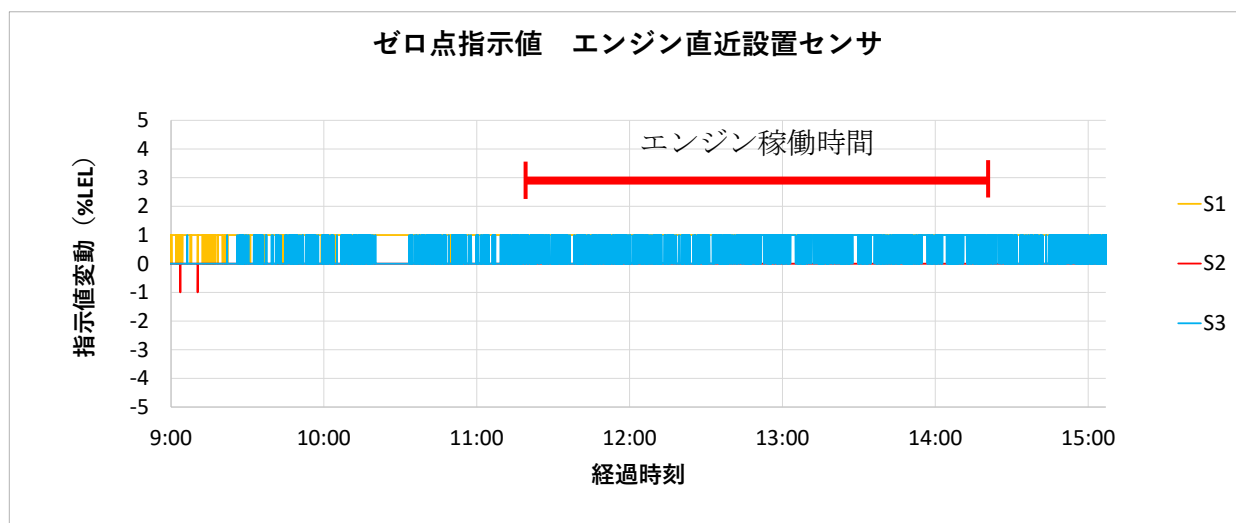


図 44-1.水素エンジン直近設置 H2 センサーの指示値

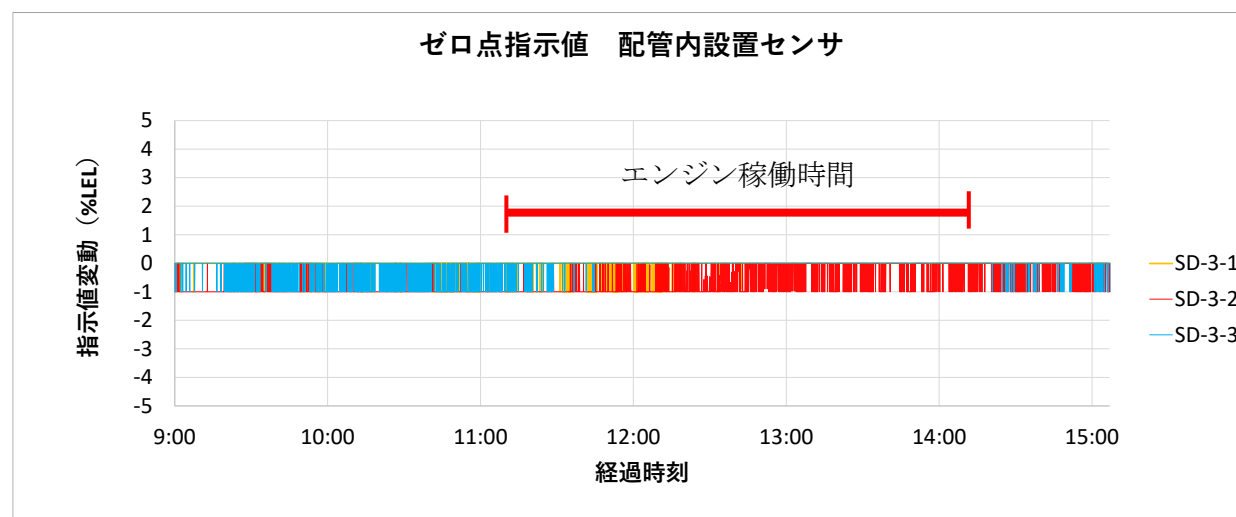


図 44-2. 配管内設置 H2 センサーの指示値

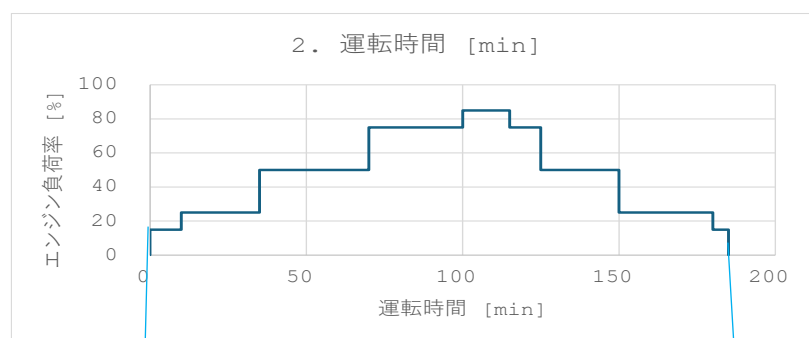


図 45-1. 水素エンジン負荷率 (試験 2 回目)

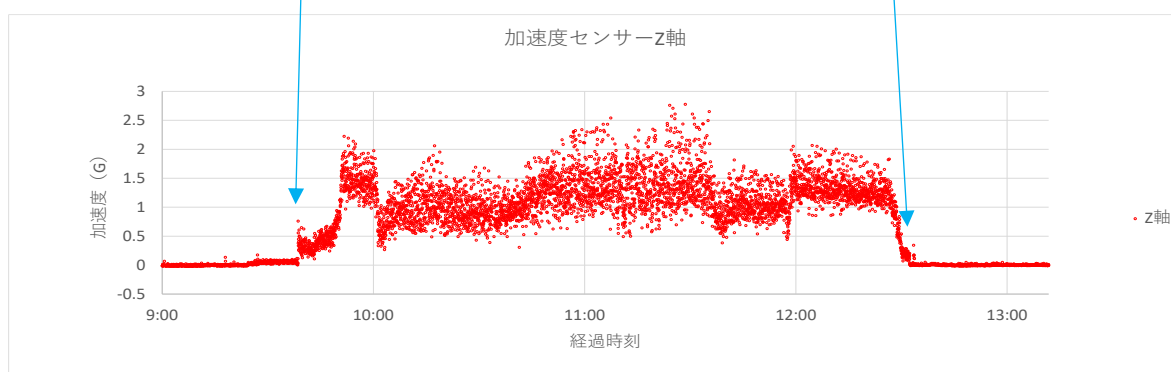


図 45-2-1. 加速度センサー (Z 軸 : 垂直方向)

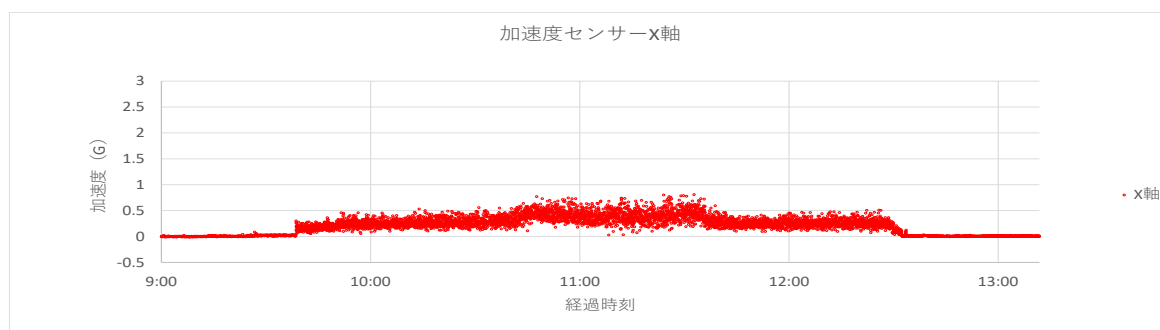


図 45-2-2. 加速度センサー (X 軸 : 水平方向)

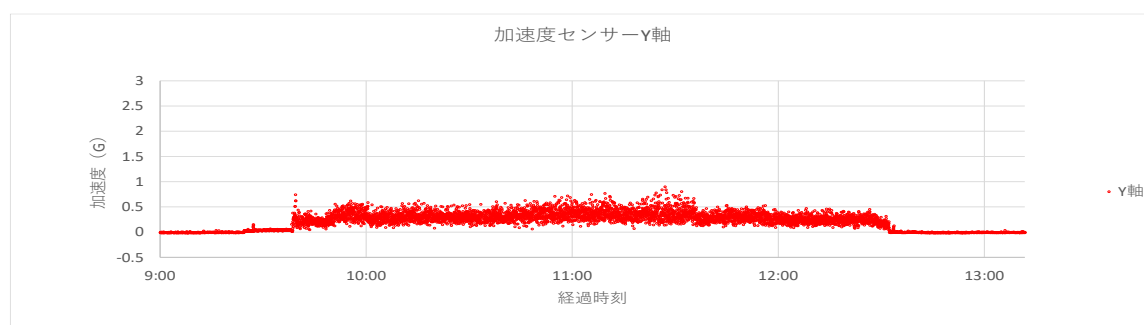


図 45-2-3. 加速度センサー (Y 軸 : 水平方向 X 軸と直角)

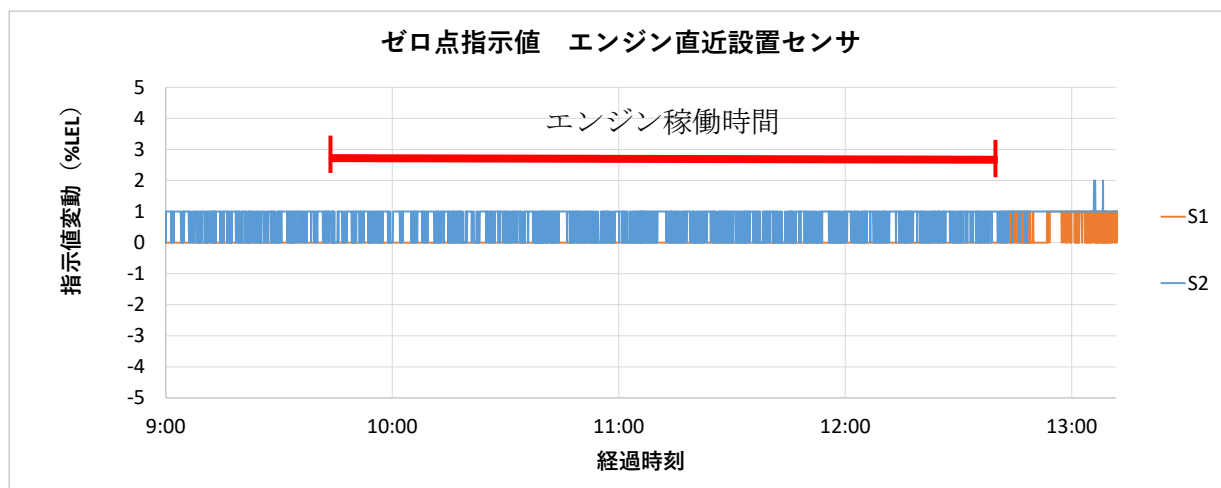


図 46-1.水素エンジン直近設置 H2 センサーの指示値

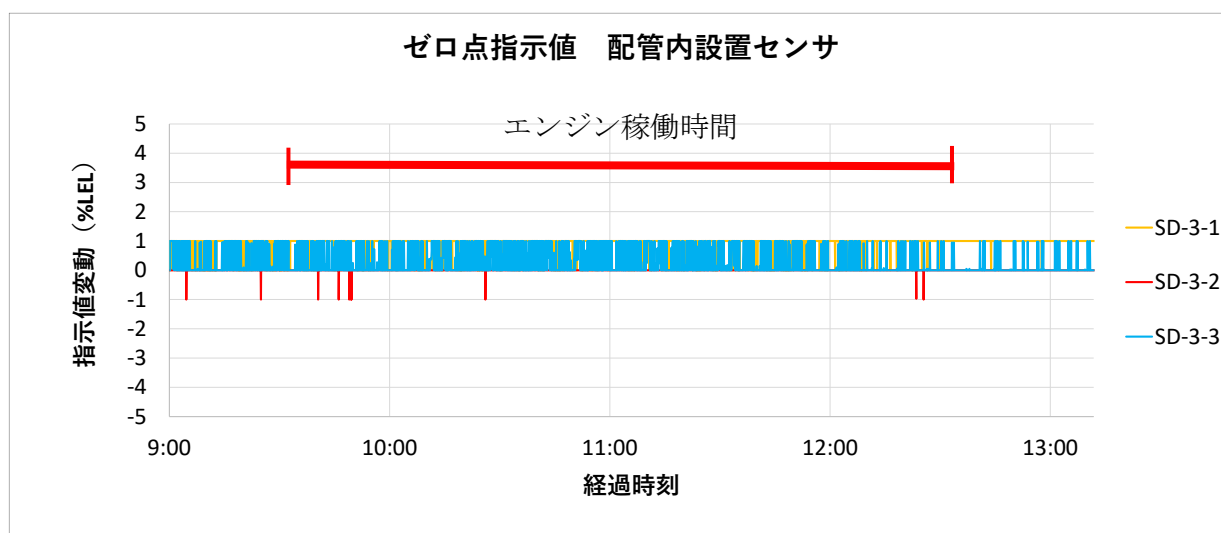


図 46-2.水素エンジン配管内設置 H2 センサーの指示値

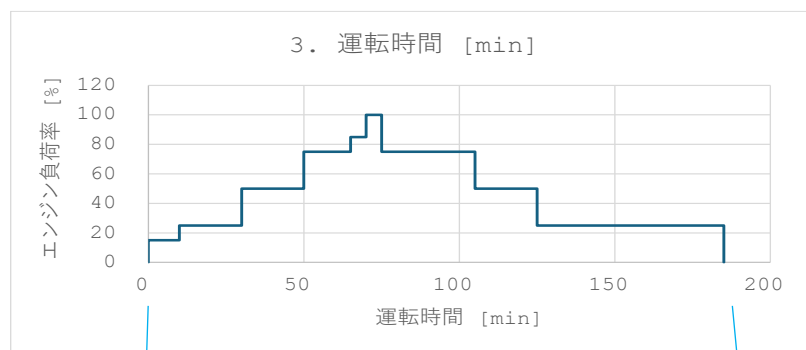


図 47-1. 水素エンジン負荷率（試験 3 回目）

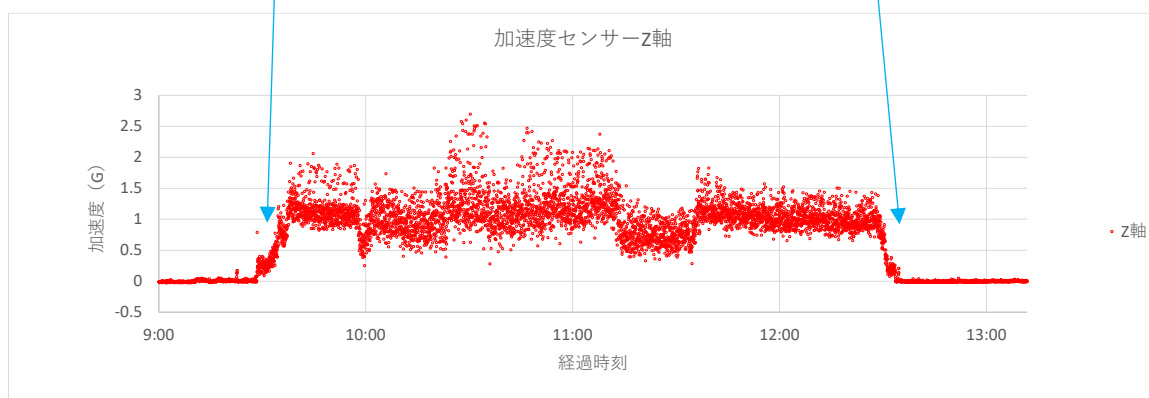


図 47-2-1. 加速度センサー（Z 軸：垂直方向）

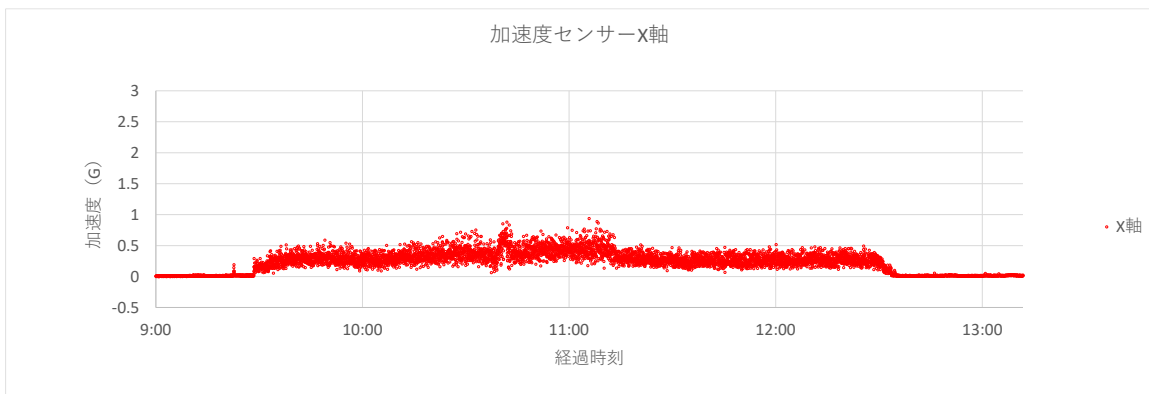


図 47-2-2. 加速度センサー（X 軸：水平方向）

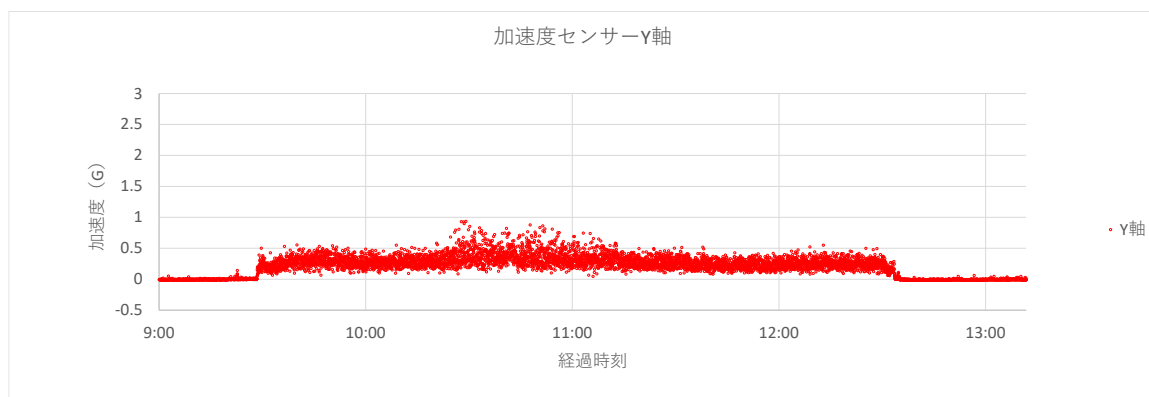


図 47-2-3. 加速度センサー（Y 軸：水平方向 X 軸と直角）

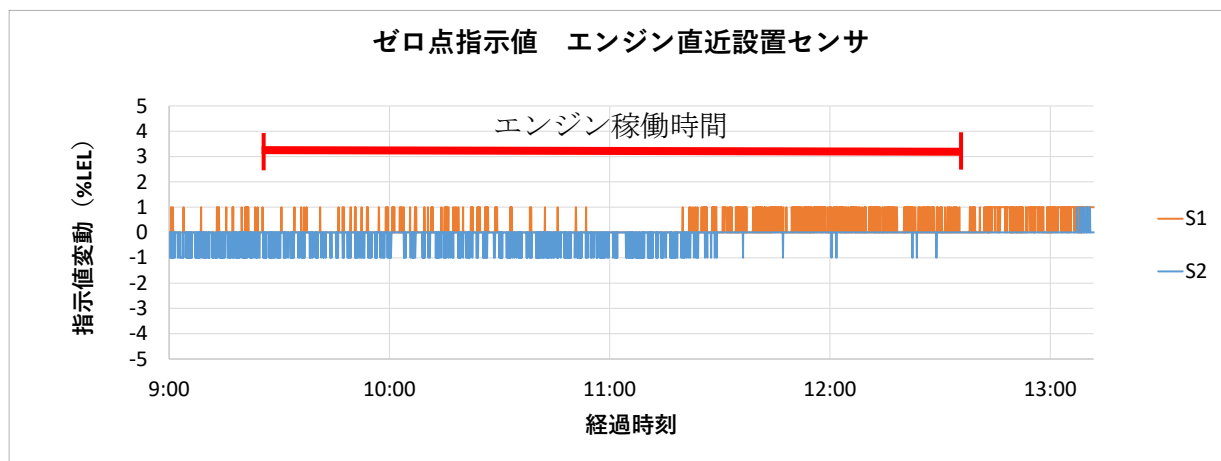


図 48-1.水素エンジン直近設置 H2 センサーの指示値

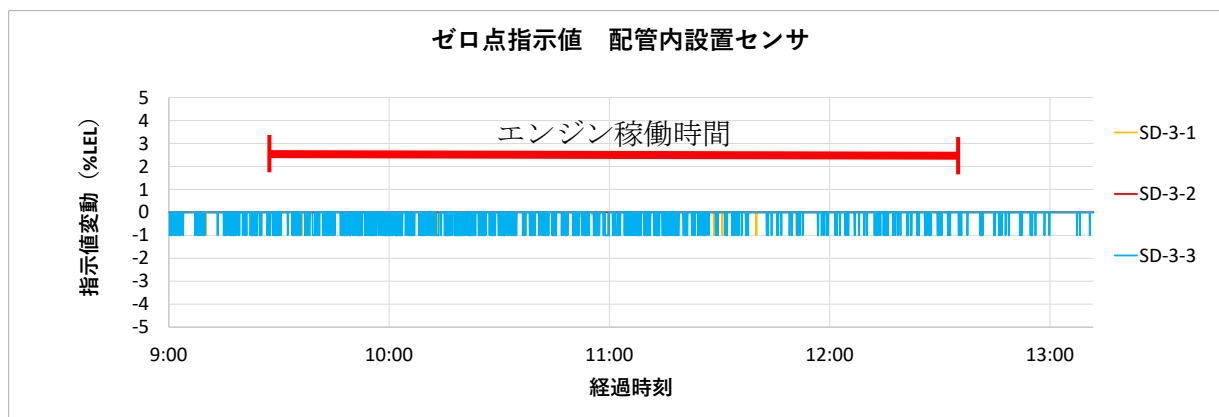


図 48-2.水素エンジン配管内設置 H2 センサーの指示値

4. 1. 1. 3 エンジン稼働後の新規 H2 センサーの出力値測定（社内試験）

水素エンジンの稼働試験時に直近に設置した新規センサーを社内で評価した。

4. 1. 1. 3. 1 指示精度

図 49 は、一連のエンジン稼働後の水素エンジン直近設置センサー3 台(S1、S2、S3)の指示精度の試験結果を示している。試験は室温雰囲気下で実施し、N2 を 5min 導入後、水素ガスを 2min 導入（抽出値 1min 値）した。ガス濃度は測定レンジの 0 %LEL、10 %LEL、30 %LEL、50 %LEL、70 %LEL、90 %LEL、100 %LEL とし、試験では薄い濃度から順に導入した。50%LEL 以下の指示精度は規格 $\pm 5\%$ LEL に対して、すべて $\pm 2\%$ LEL 以内であった。50%LEL 以上の指示精度の規格は 70%LEL、90%LEL、100%LEL に対してそれぞれの規格 $\pm 7\%$ LEL、 $\pm 9\%$ LEL、 $\pm 10\%$ LEL に対しても $\pm 3\%$ LEL 以内で規格内であった。赤色の線は規格の上下限を示している。

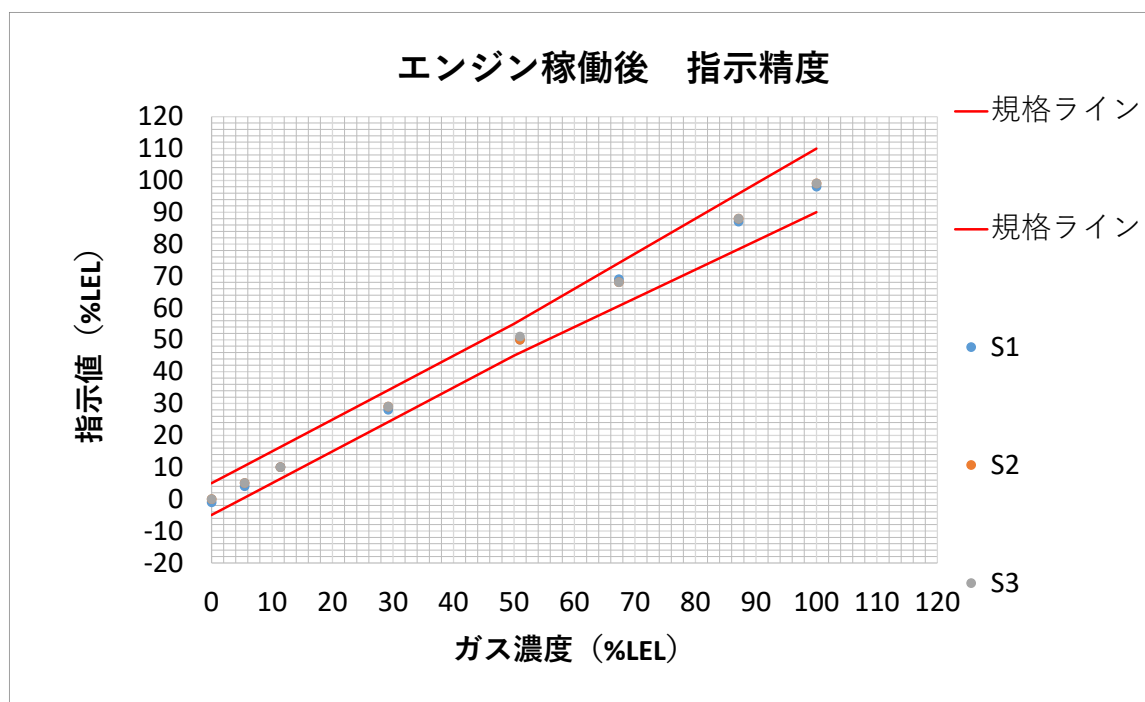


図 49. エンジン稼働後の指示精度試験結果

4. 1. 1. 3. 2 応答試験（エンジン稼働後）

ガス導入後の濃度上昇時の応答時間（T50、T90）及び、ガス抜き後の濃度下降時の応答時間（戻り T50、戻り T10）を測定した。

※ T〇〇とは、ガス導入から濃度値が〇〇%に達した時の所要時間を示す。

戻り T〇〇とは、ガス抜き後から濃度値が〇〇%まで下降した時の所要時間を示す。

【IEC60079-29-1 規格】

T50：濃度値が 50%に達するまでの時間が 20sec 以内

T90：濃度値が 90%に達するまでの時間が 60sec 以内

戻り T50：濃度値が 50%に下降するまでの時間が 20sec 以内

戻り T10：濃度値が 10%に下降するまでの時間が 60sec 以内

表 5 に試験結果を示す。T50 は規格 20 秒以内に対し 8～12 秒、T90 は規格 60 秒以内に対し 16 秒、戻り T50 は規格 20 秒以内に対し 8～12 秒、戻り T10 は規格 60 秒以内に対し 12～16 秒であり、一連のエンジン稼働後もセンサー3 個 (S1, S2, S3) すべてにおいて、規格を満足することを確認した。

表 5. エンジン稼働後の応答試験結果

		S1	S2	S3
ガスIN	T50	12	12	8
	T90	16	16	16
ガスOUT	T50	8	12	8
	T10	12	16	12

4.1.1.3.3 繰返し性試験

図 50 は、一連のエンジン稼働後の繰返し性試験結果を示している。試験は、H2 50%LEL を 3 分導入して、そのあと N2 を 7 分導入するセットを×6 回繰り返した。1 セット毎に H2 と N2 暴露後のそれぞれの指示をセンサー 3 個用いて確認した。ゼロ点、ガス濃度（50%LEL）の規格±5%LEL に対して、用いたセンサー（S1、S2、S3）すべて±2%LEL 以内であった。赤色の線は規格の上下限を示している。

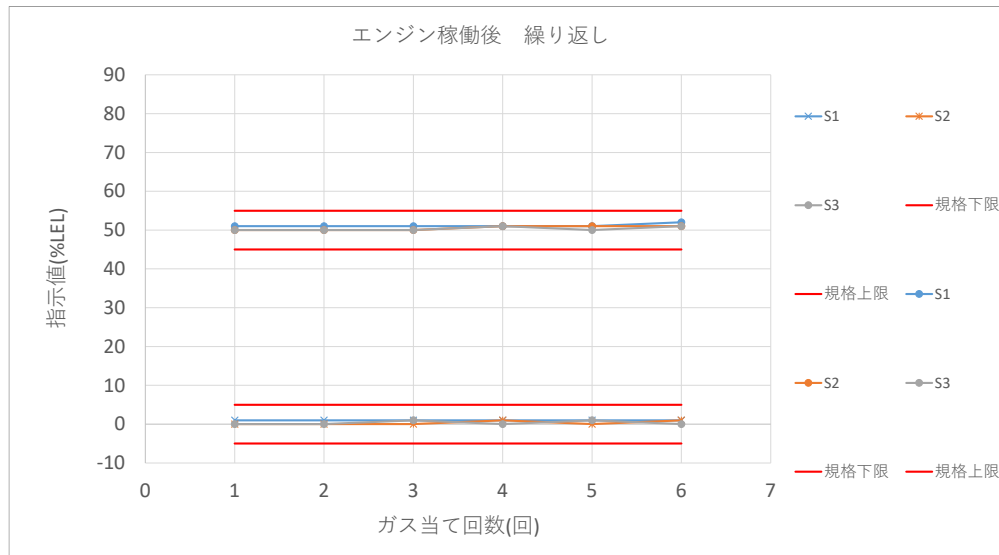


図 50. エンジン稼働後の繰返し性試験結果

4.1.2 フィールド試験② 比較用水素ガス測定器(基準器)との比較検討

比較用水素ガス測定器(基準器)との指示値の比較検討を実施した。比較する試験項目として、二重配管内組成(雑ガス・ミスト・ダスト)、圧力、温度、湿度、ガス流速、振動の条件下における、試験器の指示精度、応答時間、直線性、繰返し性の確認を実施した。

図 51-1 は、比較用水素ガス測定器(基準器 FI-900)を含むフィールドでのセンサー部の設置状況を模式的に示している。図 51-2、51-3 は、それぞれ実際の基準器、センサーの設置状況を示している。基準器 FI-900 での測定は、排気ダクトからポンプで気体を採取して基準器に導入しているのに対して、センサー部は 3 台とも排気ダクトへ直接挿入して設置されている。

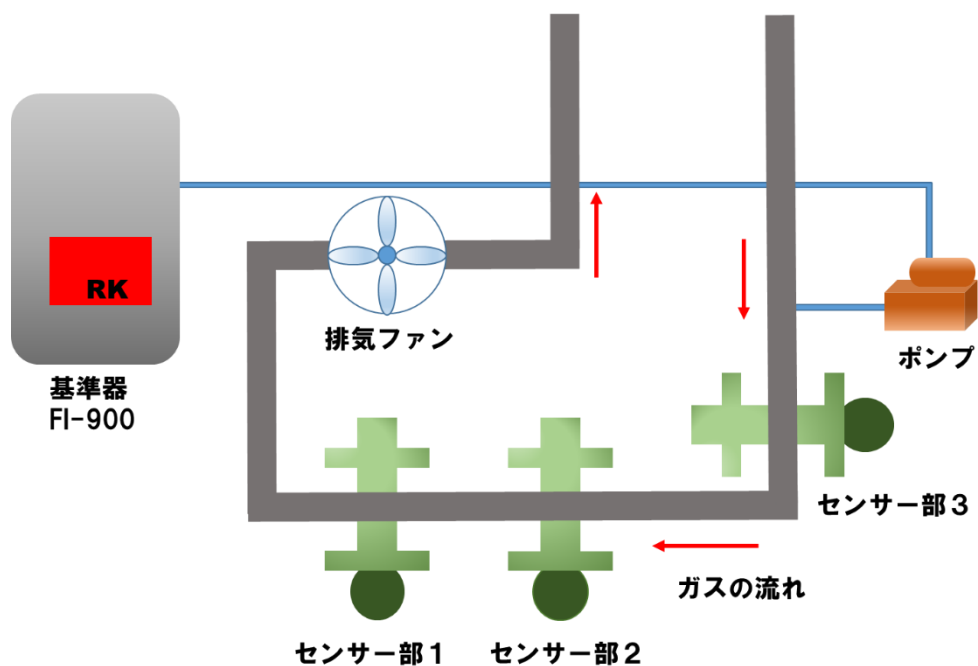


図 51-1. 現場での設置状況のイメージ図 (センサーSD3-S1, SD3-S2, SD3-S3)



図 51-2. 基準器 FI-900



図 51-3. 現場での設置状況

4.1.2.1 基準器の精度の確認

比較用水素ガス測定器(基準器)の精度を確認するために、N2 と H2 40%LEL をそれぞれ導入した。図 51-1 に示す配管からではなく、予め N2 と H2 40%LEL がそれぞれ入ったガス袋を用意したものを導入した。その結果 N2 で 0%LEL、H2 が 40%LEL を示した。表 6-1 に示す通り、合計 3 回繰り返して、すべて同じ結果を得た。

表 6-1. 基準器の校正ガス導入時の指示値データ

	1 回目	2 回目	3 回目
N2	0	0	0
H2 40%LEL	40	40	40

4.1.2.2 基準器と新規 H2 センサー指示精度（直線性）の比較

本フィールド試験では、比較用水素ガス測定器(基準器)の指示値、センサー(SD3-S1、SD3-S2、SD3-S3)の指示値を比較した。ガス漏れ事故を仮想的再現するために排気ライン（二重管外管）の上流側（エンジンの直近）から H2（99.99vol%）のボンベで 1.0L/min、2.5L/min、5.0L/min の流量でそれぞれ導入してセンサーの応答を確認した。エンジン稼働時通常ファンの回転数は 2280rpm であり、そのときの配管の N2 流量は、167L/min である。そのため、試験条件としては、2280rpm(167L/min)、3000rpm(191L/min)、1800rpm(136L/min)の 3 条件を用いた。通常と異なる流量を設定した理由は、ファンの設定できる上限と下限の条件でもセンサーが想定内の動作をするか確認するためである。事故を想定した場合、排気ファンが通常回転数になっている保証もなく、たとえ回転数が一定であったとしても配管が欠損するなどしてセンサーに通常の流量が導入されるとも限らない。

また、図 52-1 は、回転数 2280rpm における試験結果で、センサー 3 台分（SD3-S1、SD3-S2、SD3-S3）の指示値を示している。表 6-2 は、水素ガスを導入して、センサーと基準器がガスを検知してから、指示値が安定した値をまとめた表である。3 台とも同様の傾向を示し、基準器と比較して、IEC 規格 5%LEL 内に対して、すべて 3%LEL 以内であった。また、個々のセンサーの直線性は、水素ガス導入量 1.0L/min、2.5L/min、5L/min で比例関係であった。

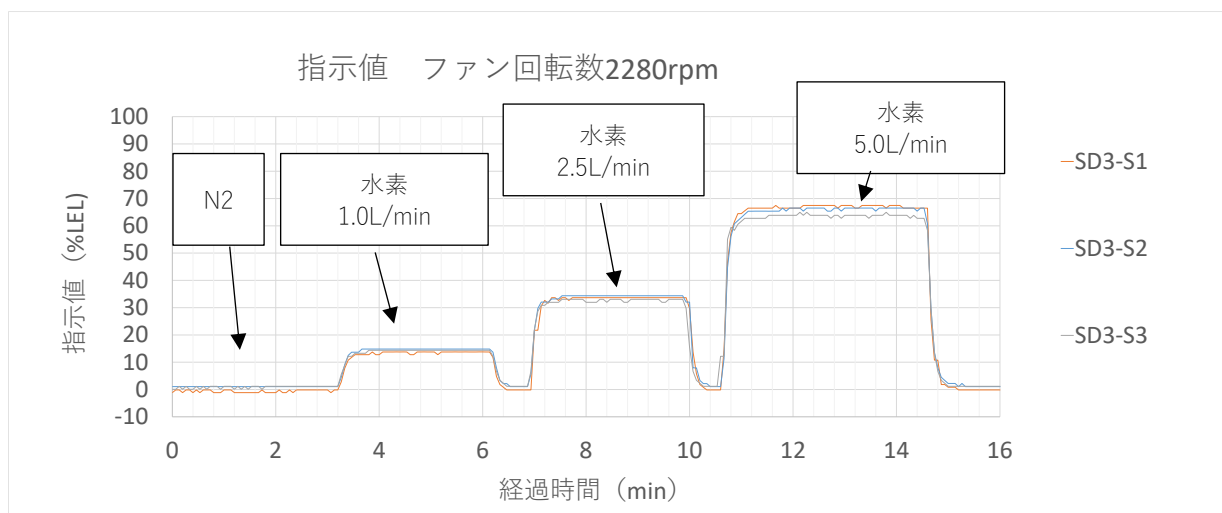


図 52-1. ガス導入時の指示値 ファン回転数 2280rpm

表 6-2. ガス導入時の指示値データ ファン回転数 2280rpm

		基準器	SD3-S1	SD3-S2	SD3-S3	外気	
						温度 (°C)	湿度(mg/L)
ファン回転 2280 rpm	N2	0	0	1	1	20.5	7.2
	H2 1L/min	13	13	15	14	20.6	7.2
	H2 2.5L/min	33	34	34	33	20.7	7.3
	H2 5L/min	66	66	66	64	20.7	7.2

図 52-2 は、回転数 3000rpm における試験結果で、センサー3 台分(SD3-S1、SD3-S2、SD3-S3)の指示値を示している。表 6-3 は、水素ガスを導入して、センサーと基準器がガスを検知してから、指示値が安定した値をまとめた表である。H2 50%LEL 以下の低濃度付近では、基準器と比較して、IEC 規格の 5%LEL 以内に対して、すべて 4%LEL 以内であり、あった。H2 50%LEL 以上の高濃度付近では、基準器と比較して、SD3-3 のセンサーの指示値が低く、指示値の 2280rpm の時と比べてバラつきが大きくなった。ただし、IEC 規格の 5%LEL に対して、すべて 5%LEL 以内であった。また、個々のセンサーの直線性は、水素ガス導入量 1.0L/min、2.5L/min、5L/min で比例関係があった。

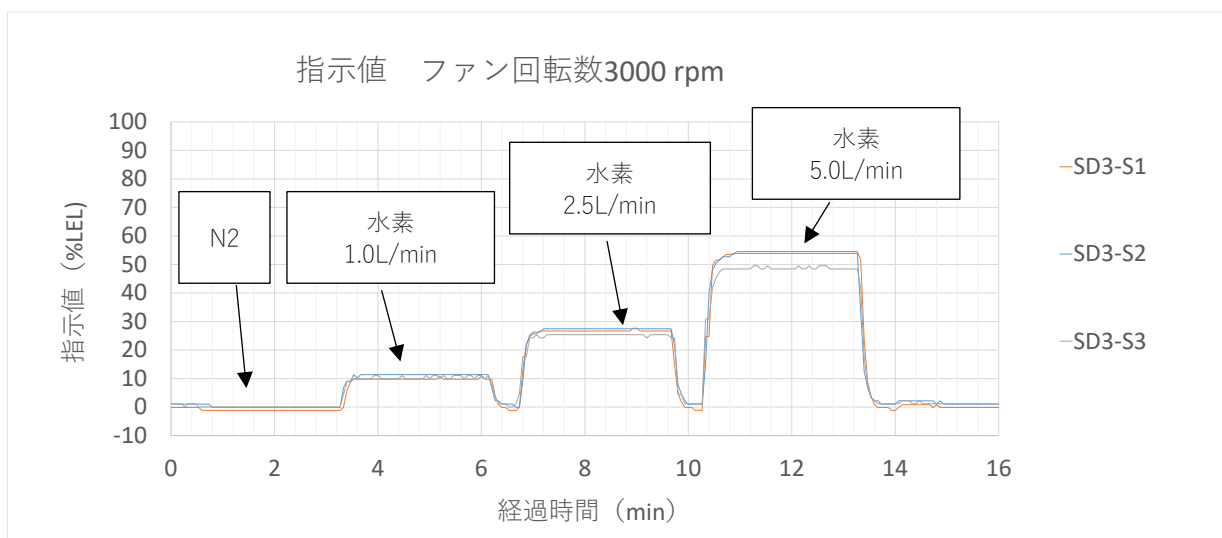


図 52-2. ガス導入時の指示値 ファン回転数 3000rpm

表 6-3. ガス導入時の指示値 ファン回転数 3000rpm

		基準器	SD3-S1	SD3-S2	SD3-S3	外気	
						温度 (°C)	湿度(mg/L)
ファン回転 3000 rpm	N2	0.0	-1	0	0	20.7	7.0
	H2 1L/min	7	10	11	11	20.8	7.1
	H2 2.5L/min	25	27	27	25	20.9	7.0
	H2 5L/min	55	55	54	50	20.9	6.8

図 52-3 は、回転数 1800rpm における試験結果で、センサー3 台分(SD3-S1、SD3-S2、SD3-S3)の指示値の推移を示している。表 6-4 は、水素ガスを導入して、センサーと基準器がガスを検知してから、指示値が安定した値をまとめた表である。H2 50%LEL 以下の低濃度付近では、基準器と比較して、IEC 規格の 5%LEL 以内に対して、すべて 3%LEL 以内であった。H2 50%LEL 以上の高濃度付近では、基準器と比較して、SD3-2 のセンサーの指示値が高く、指示値の 2280rpm の時と比べてバラつきが大きくなり、IEC 規格の 8%LEL 以内に対して、誤差が 7%LEL であった。また、個々のセンサーの直線性は、水素ガス導入量 1L/min、2.5L/min、5L/min で比例関係があった。

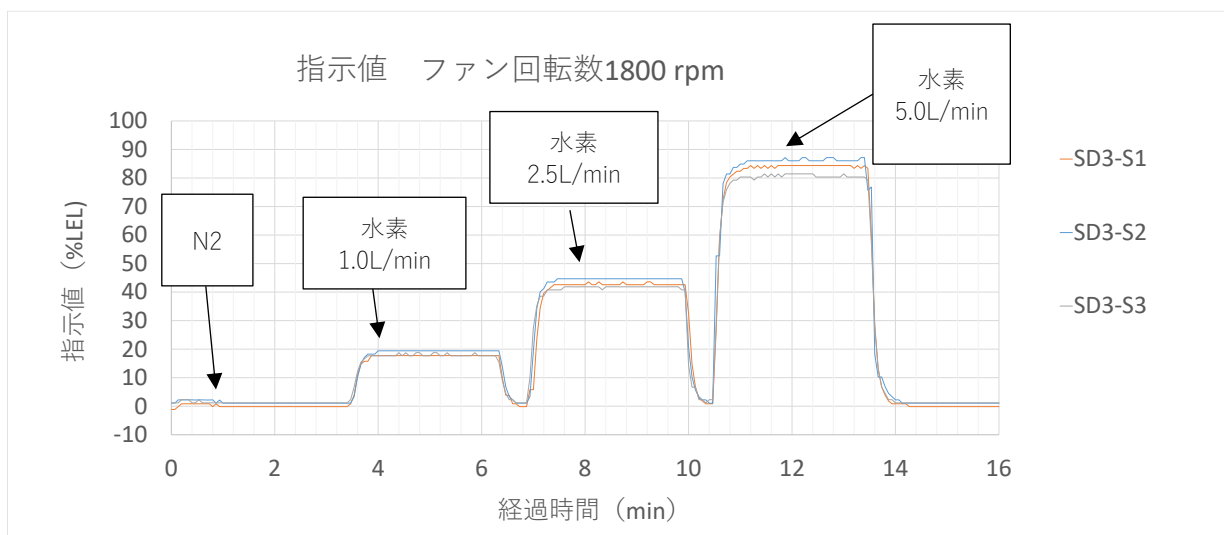


図 52-3. ガス導入時の指示値 ファン回転数 1800rpm

表 6-4. ガス導入時の指示値 ファン回転数 1800rpm

		基準器	SD3-S1	SD3-S2	SD3-S3	外気	
						温度 (°C)	湿度(mg/L)
ファン回転 1800 rpm	N2	0	0	1	1	20.9	6.9
	H2 1L/min	18	18	19	19	20.9	6.9
	H2 2.5L/min	44	43	45	42	21.0	6.9
	H2 5L/min	79	84	86	80	21.0	6.9

3 条件の回転数で基準器と比較した結果、H2 50%LEL 以下の低濃度付近では、誤差は比較的小さかったが、H2 50%LEL 以上の高濃度付近では、基準器と比較して、センサーによっては誤差が大きいものもあったが、すべて IEC 規格内であった。

4. 1. 2. 3 基準器と新規 H2 センサー繰返し性の比較

繰返し性試験を実施した。図 53-1、53-2、53-3 は、それぞれ回転数 2280rpm、3000rpm、1800rpm、における試験結果で、センサー3 台分(SD3-S1、SD3-S2、SD3-S3)の指示値の推移を示している。表 7-1、7-2、7-3 は、その試験におけるセンサーの安定値および基準器の値をまとめた表である。繰返し性については、センサー3 台(SD3-S1、SD3-S2、SD3-S3)とも個別には3 回ともほぼ同じ値(1%LEL 以内)を示し、繰返し性に問題なく、基準器と比較しても、IEC 規格の基準($\pm 5\%$ LEL 以内)に対して、どの回転数でも 4%LEL 以内であった。

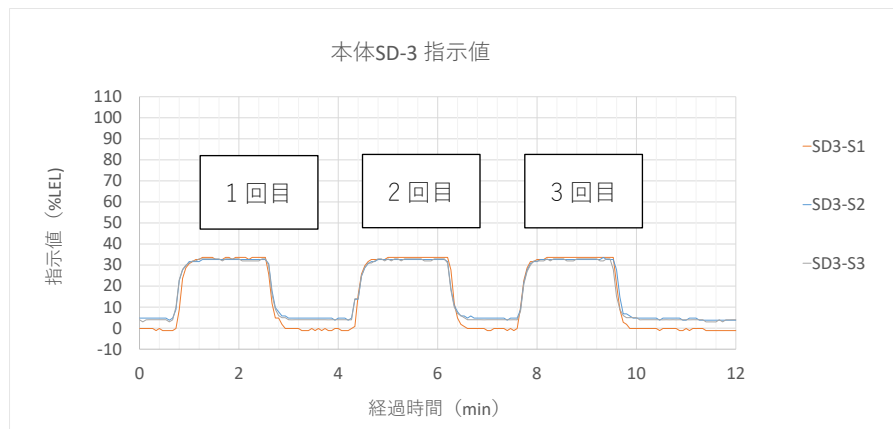


図 53-1. 繰返し性試験 チャート ファン回転数 2280 rpm

表 7-1. 繰返し試験 指示値 ファン回転数 2280 rpm

		基準器	SD3-S1	SD3-S2	SD3-S3	外気	
						温度 (°C)	湿度(mg/L)
ファン回転 2280 rpm	H2 2.5L/min	34	34	33	32	6.1	4.1
	H2 2.5L/min	34	34	33	32	6.2	4.2
	H2 2.5L/min	34	34	33	32	6.2	4.2

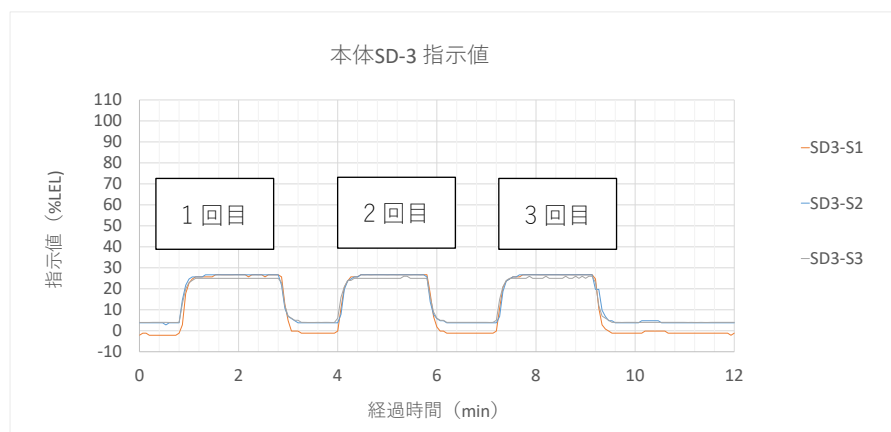


図 53-2. 繰返し性試験チャート ファン回転数 3000 rpm

表 7-2. 繰返し試験 指示値 ファン回転数 3000 rpm

		基準器	SD3-S1	SD3-S2	SD3-S3	外気	
						温度 (°C)	湿度(mg/L)
ファン回転 3000 rpm	H2 2.5L/min	28	27	27	25	6.3	4.2
	H2 2.5L/min	28	27	27	26	6.3	4.2
	H2 2.5L/min	28	27	27	25	6.4	4.3

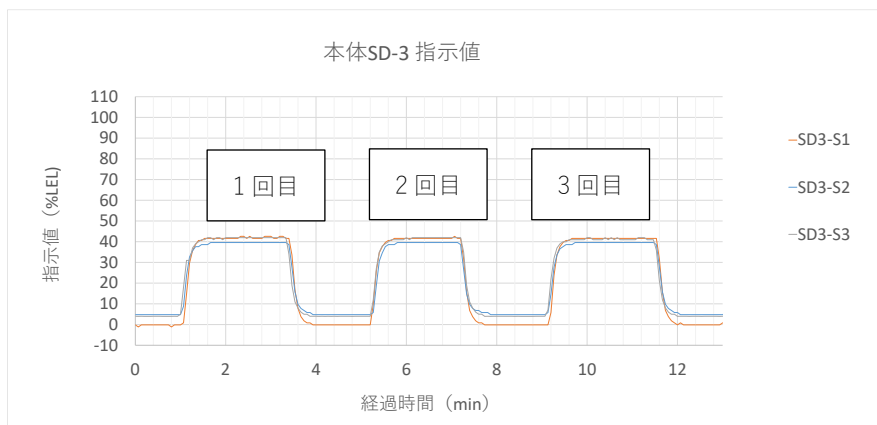


図 53-3. 繰返し性試験 チャート ファン回転数 1800 rpm

表 7-3. 繰返し試験 指示値 ファン回転数 1800 rpm

		基準器	SD3-S1	SD3-S2	SD3-S3	外気	
						温度 (°C)	湿度(mg/L)
ファン回転 1800 rpm	H2 2.5L/min	41	42	40	42	6.4	4.3
	H2 2.5L/min	41	42	40	42	6.5	4.4
	H2 2.5L/min	41	42	40	41	6.6	4.4

4. 1. 2. 4 基準器と新規 H2 センサー応答時間の比較

応答時間について検討した。水素ガスの漏洩検知までの時間は、漏洩箇所からセンサー設置場所までの配管の径や長さ、ファンの回転数などが影響される。そこで本試験では、センサーがガスを検知してから指示値が安定する値の半分の指示値に達する時間（T50）を計測した。ファンの回転数は、2280rpm、3000rpm、1800rpm の 3 条件で実施した。図 54-1、54-2、54-3 はそれぞれ 2280rpm、3000rpm、1800rpm の応答チャートを示している。図の中の赤線は、それぞれの安定指示値の半分の指示値を超えた濃度、すなわち T50 の応答時間を示している。表 8 の通り、応答時間は、回転数が高いほど早く、回転数 3000rpm、2280rpm、1800rpm で最高値はそれぞれ 4 秒、8 秒、12 秒であった。

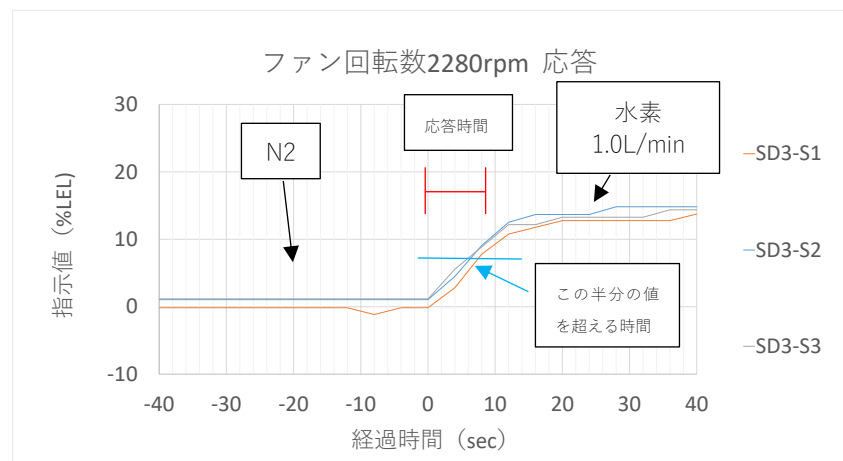


図 54-1. 応答試験 ファン回転数 2280 rpm

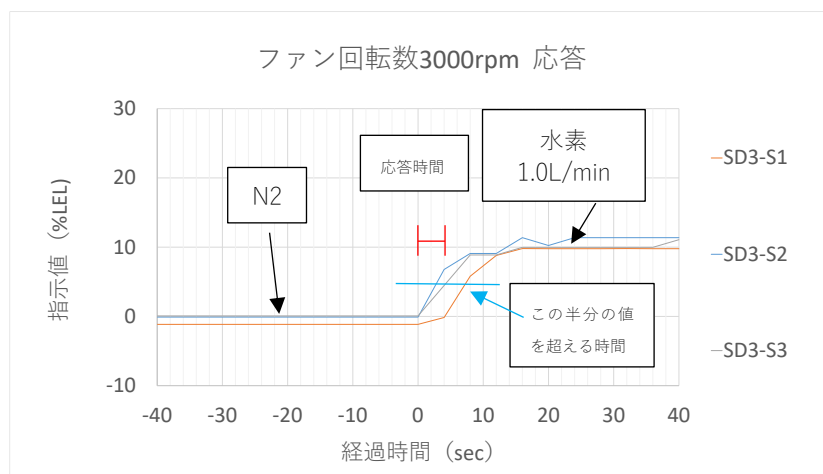


図 54-2. 応答試験 ファン回転数 3000 rpm

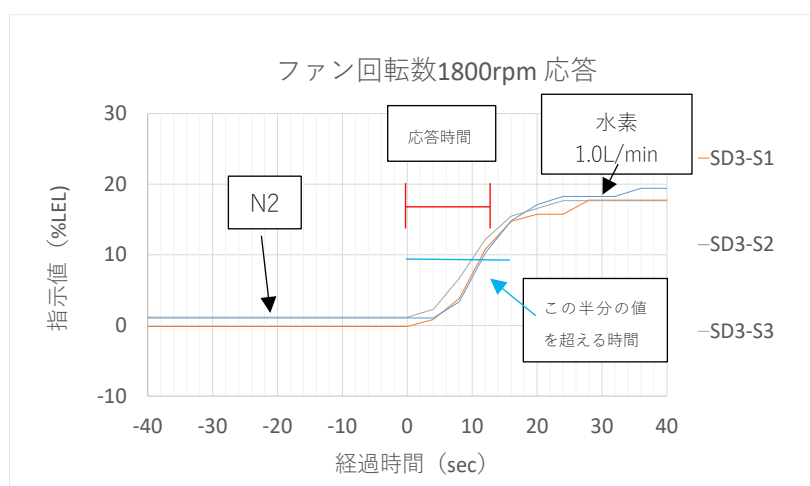


図 54-3. 応答試験 ファン回転数 1800

表 8. 応答時間測定結果

ガス検知から安定指示値の半分の指示値（T50）に達する時間（秒）

ファン回転数	SD3-S1	SD3-S2	SD3-S3	基準器	安定指示値(%LEL)
1800 rpm	12	12	12	12	18%LEL
2280 rpm	8	8	12	8	14%LEL
3000 rpm	4	8	8	8	11%LEL

4. 1. 2. 5 仮想漏洩箇所から新規 H2 センサーのガス検知までの時間測定

図 42-1 に示したように仮想の水素漏洩箇所から水素が漏洩したと仮定して、設置されているセンサー（SD3-S1, SD3-S2, SD3-S3）が検知するまでの時間を計測した。ファンの回転数は 2280rpm, 3000rpm, 1800rpm で調査した。今回の試験では、水素導入口から設置センサーまでの配管は立体的に配置されており、その配管長は計 33.5 メートル（二

重管 23.5m, シングル管 10m) であった。そのうち、二重管外管の内径 (φ 70.3mm)、二重管内管の外径 (φ 34.0mm) シングル管の内径 (φ 70.3mm) を考慮すると合計容量: 0.11m³ である。図 57 及び表 9 に示した通り、ファンの回転数が高いほど、すなわち流量が大きいほど検知までの時間が短いことを示している。

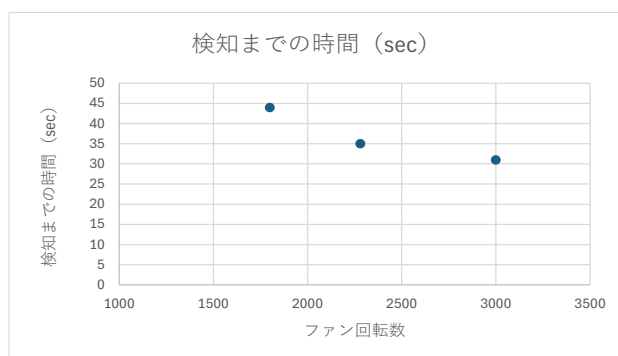


図 55. 導入から検知までの時間とファンの回転数

表 9. 導入から検知までの時間測定結果

ファン回転数	検知までの時間 (秒)
1800 rpm	44
2280 rpm	35
3000 rpm	31

4. 1. 3 フィールド試験③ エンジン運転状態変化によるセンサーの各挙動変化確認

エンジン運転状態の負荷率を変化させた際のセンサー各挙動および指示値の比較検討を実施する。エンジン運転状態の変化におけるセンサー各性能の差異が無いことを確認する際の試験項目として、二重配管内組成 (雑ガス・ミスト・ダスト)、圧力、温度、湿度、ガス流速、振動の変化に対する、試験器の指示精度 (直線性)、繰返し性、応答時間の確認を実施した。

4. 1. 3. 1 エンジン運転時における指示精度 (直線性)

本試験では、エンジン運転時にセンサーが正常に動作するか確認して、エンジン停止状態での試験結果と比較した。ファンの回転数が 2280rpm で実施した。また、ガス漏れ事故を仮想的再現するために排気ライン (二重管の外管) の上流側 (エンジンの直近) から H₂ (99.99vol%) のボンベで 1.0L/min、2.5L/min、5.0L/min の流量でそれぞれ導入してセンサーの応答を確認した。

図 56 は、回転数 2280rpm における試験結果で、センサー 3 台分 (SD3-S1、SD3-S2、SD3-S3) の指示値の推移を示している。表 10 は、その試験におけるセンサーの安定値および基準器の値をまとめた表である。基準器と比較して、IEC 規格 (5%LEL) に対して、誤差 ±3%LEL 以内であった。

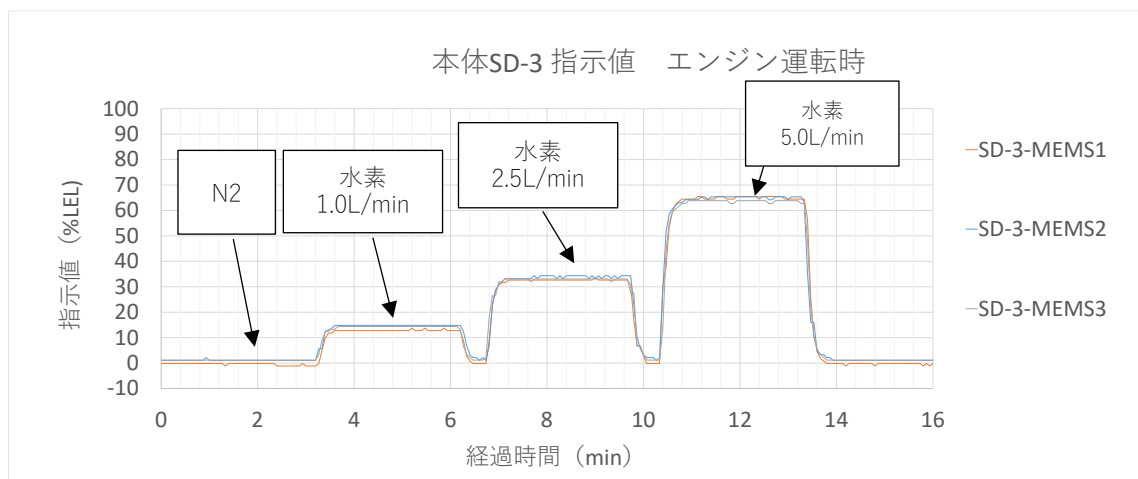


図 56. ガス導入時の指示値 ファン回転数 2280rpm エンジン運転時

表 10. ガス導入時の指示値データ ファン回転数 2280rpm エンジン運転時

		基準器	SD3-S1	SD3-S2	SD3-S3	エンジン負荷率	振動Z軸 (G)	外気	
								温度 (°C)	湿度(mg/L)
								MAX 2.1	AVE.1.0
ファン回転 2280 rpm	N2	0	0	1	1	25.0	MAX 2.1 AVE.1.0	17.5	7.8
	H2 1L/min	13	13	15	14			17.6	7.7
	H2 2.5L/min	33	33	34	33			17.7	7.7
	H2 5L/min	66	64	65	64			17.7	7.7

4. 1. 3. 2 エンジン運転時における繰返し性試験

繰返し性試験をエンジン運転時において実施した。エンジンの負荷率は、25% Z 軸方向の加速度は、最大 2.1G、平均 1.0G を示していた。図 57 は、回転数 2280rpm における試験結果で、センサー3 台分(SD3-S1、SD3-S2、SD3-S3)の指示値を示している。表 11 は、その試験におけるセンサーと基準器の安定値をまとめた表である。3 回とも同じ値を示し、基準器と比較して、IEC 規格 (5%LEL) に対して、誤差±2%LEL 以内であった。繰返し性試験の結果より、指示精度は誤差±2%以内であったため、±5%以内という目標を達成できたことを確認した。

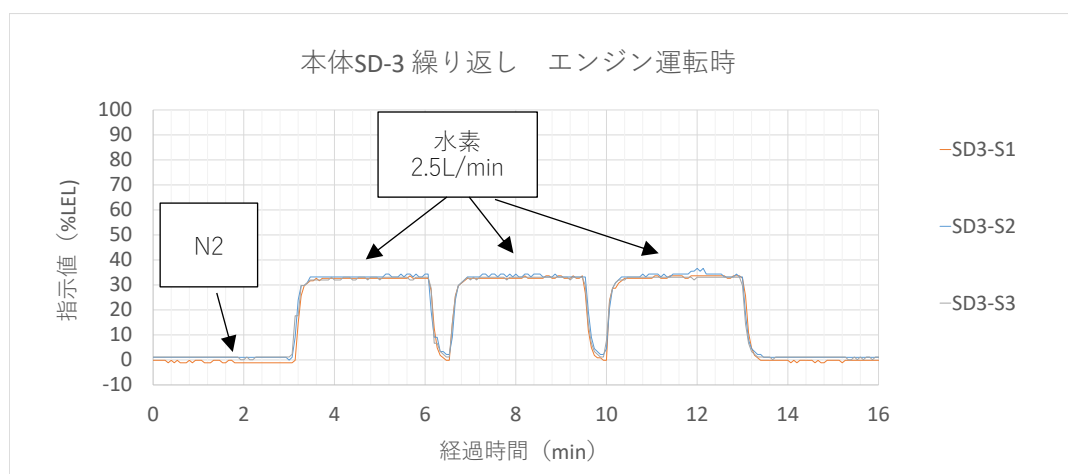


図 57. ガス導入時の指示値 ファン回転数 2280rpm エンジン運転時

表 11. ガス導入時の指示値 ファン回転数 2280 rpm エンジン運転時

		基準器	SD3-S1	SD3-S2	SD3-S3	エンジン負荷率	振動Z軸 (G)	外気	
								温度 (°C)	湿度(mg/L)
ファン回転 2280rpm	N2	0	0	1	1	25.0	MAX 2.1 AVE.1.0	17.8	7.7
	H2 2.5L/min	34	33	33	33			17.9	7.7
	H2 2.5L/min	34	33	33	33			18.0	7.7
	H2 2.5L/min	34	34	33	33			18.0	7.7

4. 1. 3. 3 エンジン運転時における応答試験

エンジン運転時の応答試験を実施した。本試験では、センサーがガスを検知してからの安定するまでの値の半分の指示値に達する時間 (T50) を計測した。ファンの回転数は、通常運転で使用する 2280rpm とした。図 58 及び表 12 の通り、3 台 (SD3-S1、SD3-S2、SD3-S3) とも、応答時間は、最も遅いセンサーにおいても 12 秒で、3 台とも IEC 規格の 20 秒以内をクリアした。試験の結果より、応答時間が最も遅いセンサーの場合でも 12 秒であったため、応答時間 T50 20 秒以内という目標を達成できたことを確認した。

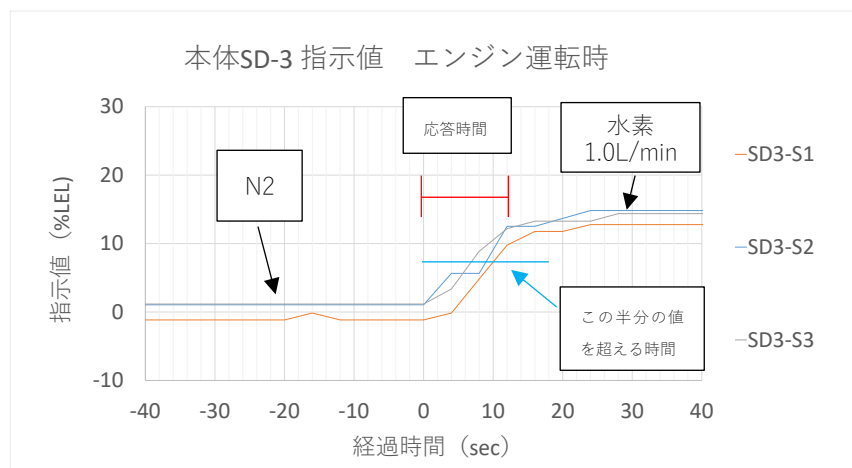


図 58. 応答試験 ファン回転数 2280 rpm エンジン運転時

表 12. 応答試験 エンジン運転時 ファン回転数 2280 rpm

ガス検知から安定指示値の半分の指示値 (T50) に達する時間 (秒)

ファン回転数	SD3-S1	SD3-S2	SD3-S3	基準器	安定指示値(%LEL)
2280 rpm	12	12	8	12	14%LEL

4.1.3.4 エンジン運転負荷とセンサー出力値の比較

エンジンの負荷率を 0%、25%、75%、100%と変化させて、指示精度(直線性)、繰返し性試験を実施した(負荷率 0% (エンジン停止状態) は別日のデータを使用、50%の負荷率は、その試験当日のエンジンのスケジュールにより実施せず)。この試験ではファンの回転数は 2280rpm を採用した。表 13、表 14 は、3 台のセンサー(SD3-S1、SD3-S2、SD3-S3)および基準器の指示値について、それぞれ指示精度、繰返し性を示した表である。指示精度について、基準器と比較して、IEC 規格(50%LEL 以下: $\pm 5\%LEL$ 、50%LEL 以上: ガス濃度の $\pm 10\%LEL$)に対して、センサー3 台(SD3-S1、SD3-S2、SD3-S3)すべてで $\pm 3\%LEL$ 以内を満たした。繰返し性試験についても、基準器と比較して、IEC 規格($\pm 5\%LEL$)に対して、センサー3 台すべてで $\pm 2\%LEL$ 以内であった。

表 13. 異なるエンジン負荷率による指示精度試験

		基準器	SD3-S1	SD3-S2	SD3-S3	配管内温度(°C)	配管内湿度 (mg/L)	外温度 (°C)	外湿度 (mg/L)
負荷率0% 指示精度	H2 1L/min	13	13	15	14	19.0	0.9	20.6	7.2
	H2 2.5L/min	31	34	34	33	19.0	0.9	20.7	7.3
	H2 5L/min	64	66	66	64	19.1	0.9	20.7	7.2
負荷率25% 指示精度	H2 1L/min	13	12	16	16	7.9	1.3	6.6	3.6
	H2 2.5L/min	33	32	33	33	8.0	1.1	6.6	3.6
	H2 5L/min	64	64	62	63	8.1	1.0	6.6	3.7
負荷率75% 指示精度	H2 1L/min	13	13	16	15	10.8	0.7	5.5	3.7
	H2 2.5L/min	33	33	33	32	10.9	0.6	5.5	3.7
	H2 5L/min	66	65	62	63	10.9	0.6	5.6	3.7
負荷率 100% 指示精度	H2 1L/min	13	13	16	16	11.1	0.6	5.6	3.8
	H2 2.5L/min	32	33	33	33	11.2	0.6	5.7	3.9
	H2 5L/min	65	66	63	65	11.2	0.6	5.7	3.9

表 14. 異なるエンジン負荷率による繰返し試験

		基準器	SD3-S1	SD3-S2	SD3-S3	配管内温度(°C)	配管内湿度 (mg/L)	外温度 (°C)	外湿度 (mg/L)
負荷率0% 繰返し	H2 2.5L/min	34	33	33	33	15.5	1.4	17.9	7.7
	H2 2.5L/min	34	33	33	33	15.6	1.3	18.0	7.7
	H2 2.5L/min	34	34	33	33	15.7	1.3	18.0	7.7
負荷率25% 繰返し	H2 2.5L/min	33	32	33	32	8.2	0.9	6.5	3.6
	H2 2.5L/min	33	32	33	32	8.4	0.9	6.5	3.6
	H2 2.5L/min	33	32	33	32	8.4	0.9	6.5	3.7
負荷率75% 繰返し	H2 2.5L/min	34	33	33	32	10.9	0.6	5.6	3.7
	H2 2.5L/min	34	33	33	32	11.0	0.6	5.6	3.7
	H2 2.5L/min	34	33	33	32	11.0	0.6	5.6	3.8
負荷率100% 繰返し	H2 2.5L/min	34	34	34	33	11.3	0.6	5.7	3.9
	H2 2.5L/min	34	34	33	33	11.3	0.6	5.7	3.9
	H2 2.5L/min	34	33	33	33	11.3	0.6	5.8	4.0

これらの結果について、直線性を調査するために、ガスのスパン値（指示値からゼロ点を引いたガス成分の出力値）と基準器の値と比較して、図 59-1、59-2、59-3、59-4 にまとめると下記ようになる。いずれも直線性が良く、どのようなエンジン負荷率でもすべての濃度範囲で精度良く測定できていることを示している。

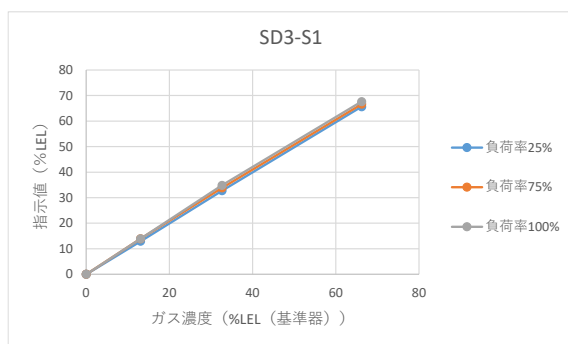


図 59-1. 検知器 1 SD3-S1

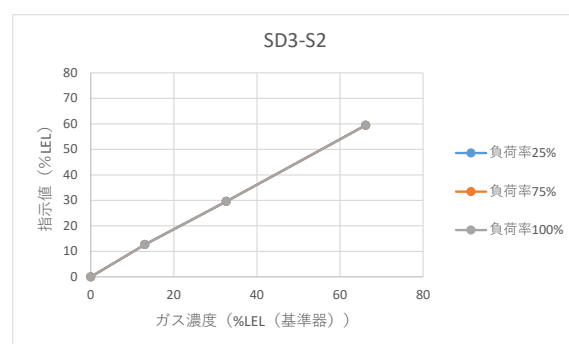


図 59-2. 検知器 1 SD3-S2

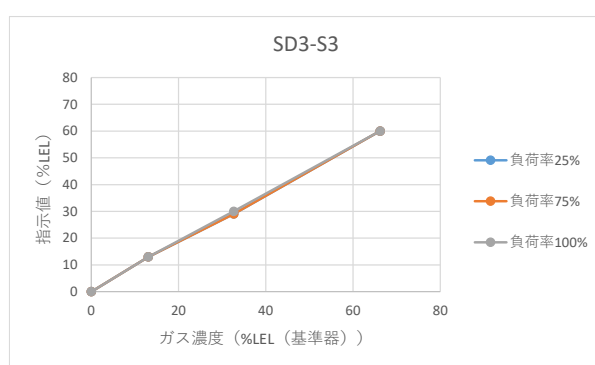


図 59-3. 検知器 3 SD3-S3

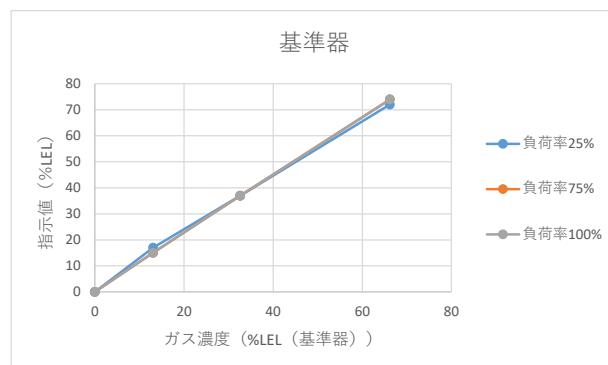


図 59-4. 基準器

また、ファンの回転数と指示値の関係を図 60-1、60-2 にまとめると下記ようになる。H2 を導入していないときの指示値（ゼロ点）に関しては、流量の影響を受けず、H2 を導入（2.5L/min）しているときの指示値に関しては、基準器と同様の傾向を示した。この結果はファンの回転数が通常より大きくなったり、小さくなったりしても精度良く測定できることを示している。

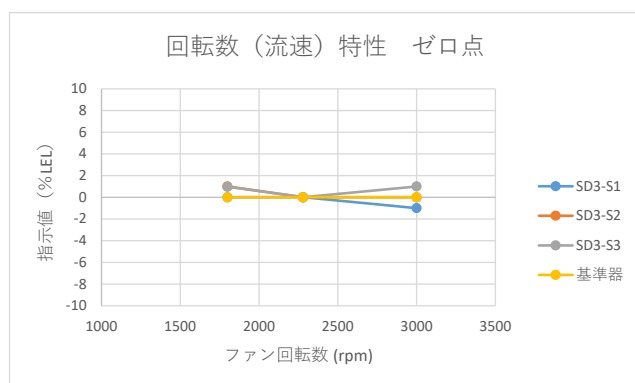


図 60-1. 回転数とゼロ点

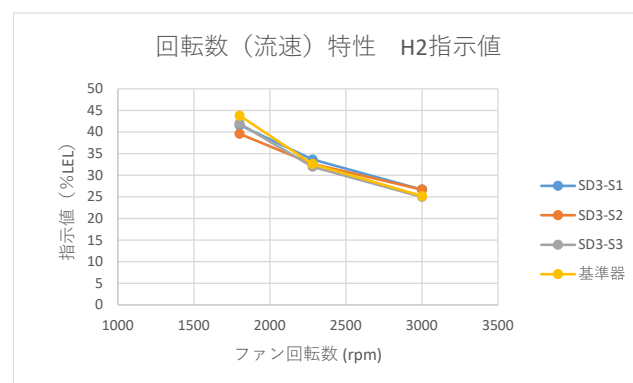


図 60-2. 回転数と指示値

4. 1. 3. 5 新規 H2 センサー出力値の経時試験

新規 H2 センサー出力値の経時的な安定性を確認するために、多点データ解析手法を用いず、約 90 日間指示値を記録した。2024 年 11 月 1 日～2025 年 1 月 31 日まで実施した。図 61 に示す通り、IEC 規格 (60079-29-1) の長期安定性項目 63 日 $\pm$ 7%以内に対して、 $\pm$ 3%LEL 以内であった。

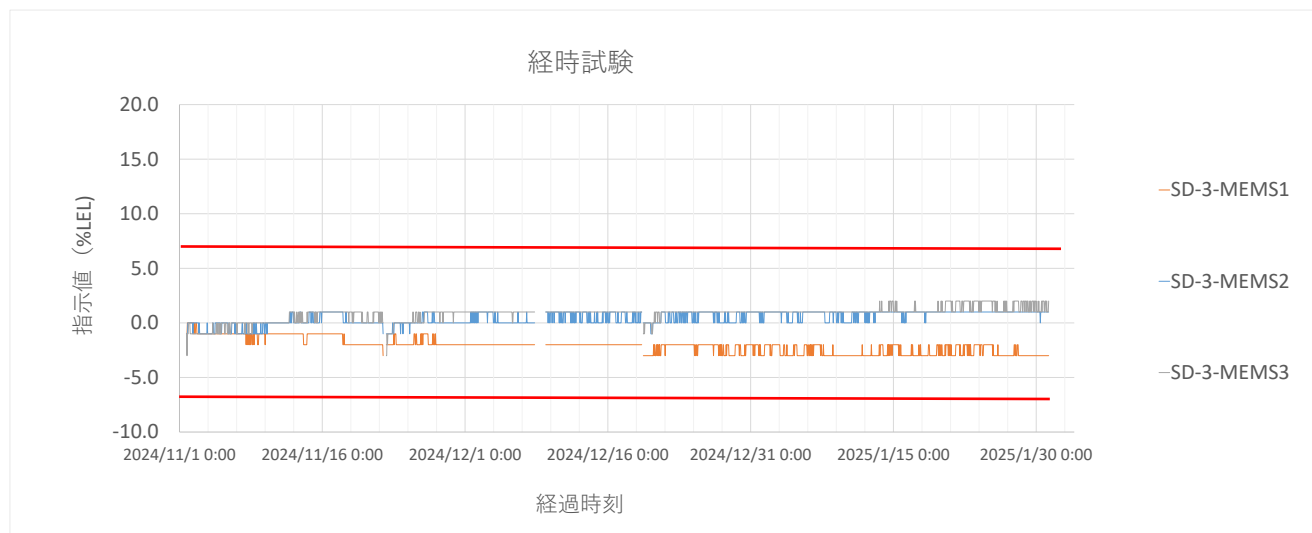


図 61. 経時試験結果

4.1.4 量産試作

4.1.4.1 量産試作機を作製

フィールド試験の結果、2023 年の設計が最適であったため修正および改良する必要がなかった。従って、2023 年度に設計した図面を基に製造現場にて 40 個試作した。図 62 は試作したセンサーを示す。



図 62. 試作センサー

4.1.4.2 船級規格への適合性評価

船級で必要とされる IEC60079-29-1(可燃性ガス用検知器の性能要求事項) の性能試験項目について、試作したセンサーを用いて評価試験を実施した。評価試験結果を表 15 に示す。

表 15. 評価試験結果一覧表

試験項目	試験方法	判定
指示精度	ガス濃度： 0 %, 10 %, 30 %, 50 %, 70 %及び 90 %LEL ガス検査、連続 3 回実施	◎
応答試験	ガス検査 導入ガス濃度の半分を超える時間 (T50) 20 秒以内	○
繰返し性試験	6 回のガス検査繰返しの再現性	◎
温度試験	-20℃, 20℃, 55℃で試験	○
湿度試験	40℃ 0 %RH、20 %RH、50 %RH、95 %RH で試験	○
振動試験	平行な 3 平面の各々でそれぞれ連続して 1 時間ずつ振動させる。10 Hz ～ 31.5 Hz, 0.5 mm 振幅 (全振幅 1.0 mm) 31.5 Hz ～ 100 Hz, 加速振幅 19.6 m/s ²	◎
経時試験	63 日間以上 定期的なガス検査指示値の安定性	◎
圧力試験	-20kPa 0kPa +20kPa で感度確認	◎
流量試験	1.5L/min, 1.0L/min, 0.5L/min, 0.2L/min の 4 段階での試験	○
風速試験	無風、風速 0.5m/s, 風速 3m/s, 6m/s を検知器正面及び側面からあてて実施	○

◎：規格の～1/3 ○：規格の 1/3～2/3

△：規格の 2/3～3/3 ×：規格外

全ての項目において規格の 2/3 までに収まった結果の判定であり良好な結果であった。

船舶機器指令 (MED : marine equipment) は、 船用材料・機器に対して発効されている EU 指令の一つであり、この MED の取得条件に IEC 規格 (60079-29-1) のパフォーマンス要求事項を満たす必要がある。ここで示した評価試験結果は、そのすべてに合格したことを示している。量産試作機の内、指示精度の誤差が最も大きい試作センサーでも計測レンジの±3%以内となり、IEC 規格 (±5%以内) をクリアし、応答時間が最も遅い試作センサーでも T50(導入ガス濃度の半分を超える時間) が 12 秒となり IEC 規格 20 秒以内を達成した。このように、船級規則を満足する量産試作機を製作する体制を確立し、実際に 40 個の優良なセンサーを製作することができたため、目標を達成することができた。今後、適合性評価機関にサンプルを提出して試験を実施する。

4.2 目標の達成状況

1) エンジン稼働状態によるセンサーの各種性能の確認

水素ガス検知の反応速度と検知精度の向上を達成した試作センサーを、フィールド試験としてエンジン実機に搭載した状態で、国際規格 IEC60079-29-1 で要求される指示精度を計測した。フィールド試験①のエンジンから 2m 直近に配置されたすべてのセンサーにおいて、エンジン稼働状態における指示値は、エンジン稼働していないときと比べて、計測レンジの±1%以内となり、目標の±5%以内をクリアした。また、フィールド試験③において、エンジン負荷率 100%の状態、すべてのセンサーで指示精度は±3%LEL 以内、繰返し性は±2%LEL 以内となり、いずれも目標を達成した。また、応答時間は、最長でも 12 秒で、3 台とも IEC 規格の 20 秒以内をクリアした。

2) 量産試作

フィールド試験より得られたデータにより、2023 年度の設計が最適であり改良の必要が無かったため同設計図により量産試作機を 40 個製作し、船級規格で準拠が要求される IEC60079-29-1 の適合性評価として、指示精度の誤差が最も大きい量産試作機でも IEC 規格 (±5%LEL) に対して、計測レンジの±2%LEL となった。応答時間の最も遅い試作センサーでも T50 (導入ガス濃度の半分を超える時間) 12 秒となり IEC 規格の 20 秒以内を満たすセンサーを製作する体制を確立し、船級規則を満たすセンサーを 40 個製作したため、目標を達成することができた。

4.3 2024年度の実施内容の概要

1) フィールド試験①

エンジン稼働前後の性能差異を確認した。エンジン稼働後、50%LEL 以下の指示精度は規格±5%LEL に対して、すべて±2%LEL 以内であった。50%LEL 以上の指示精度の規格は 70%LEL、90%LEL、100%LEL に対してそれぞれ、7%LEL、9%LEL、10%LEL に対しても±3%LEL 以内で規格内であった。エンジン稼働後の応答試験においてもセンサー3 個すべて 12 秒以内で、20 秒以内という規格を満足した。繰返し性試験においても規格±5%LEL に対して、センサーすべて±2%LEL 以内であった。

2) フィールド試験②

ファンの回転数 1800rpm、2280rpm、3000rpm の指示精度について、基準器と比較して、センサー3 台すべて 50%LEL 以下の指示精度は規格±5%LEL に対して、すべて±4%LEL 以内であった。50%LEL 以上の指示精度は、誤差が最大 7%LEL であったが、IEC 規格 (±8%LEL) を満たした。繰返し性試験について、基準器と比較して、IEC 規格 (±5%LEL) に対して、センサー3 台すべてで±2%LEL 以内であった。また、応答時間は、3 台とも、IEC 規格の 20 秒以内に対して、最大 12 秒であった。

3) フィールド試験③

エンジン負荷率を 0%、25%、75%、100%で変化させ、指示精度 (直線性) と繰返し性試験を実施した (ファン回転数: 2280 rpm)。すべてのセンサーで指示精度は±3%LEL 以内、繰

返し性は $\pm 2\%$ LEL 以内となり、いずれも IEC 規格(50%LEL 以下： $\pm 5\%$ LEL、50%LEL 以上：ガス濃度の $\pm 10\%$ LEL)を満たした。また、応答時間について、3 台(SD3-S1、SD3-S2、SD3-S3)とも、応答時間は、最長でも 12 秒で、3 台とも IEC 規格の 20 秒以内をクリアした。

4) 量産試作

船級で必要とされる IEC60079-29-1(可燃性ガス用検知器の性能要求事項)の性能試験項目について、試作したセンサーを用いて評価試験を実施結果、そのすべてに合格した。特に、指示精度試験を実施したところ、目標の $\pm 5\%$ LEL 以内に対して、 $\pm 2\%$ LEL 以内となり、目標を達成した。応答試験については、T50(導入濃度の半分を超える時間)が、12 秒となり IEC 規格の 20 秒以内を達成した。船級規則を満足する量産試作機を製作する体制を確立し、実際に 40 個の優良なセンサーを製作することができたため、本プロジェクトの目標を達成することができた。

5. 今後の予定

1) 国際規格の取得

2024 年度に実施したフィールド試験及び、船級規格への適合性評価結果が良好であった為、2025 年度に船級の認証を目指す。

2) 商品化に向けた取り組み

2026 年度中旬に販売を開始し受注を目指す。販売数は、2026 年度は新造の水素燃料船 2 隻に対し、合計 30 台(エンジン付帯は 8 台)を販売。2027 年度は 4 隻(60 台)の販売を目指す。

6. まとめ

1) フィールド試験①

エンジン稼働前後の性能差異を確認し、指示精度はすべて規格内で $\pm 3\%$ LEL 以内、応答試験は全センサーが 12 秒以内で基準を満たし、繰返し性試験も $\pm 2\%$ LEL 以内で良好だった。

2) フィールド試験②

基準器と比較し、全センサーが指示精度・繰返し性で IEC 規格を満たし、流量がどの条件でも適合した。応答時間も最大でも 12 秒で規格内だった。

3) フィールド試験③

エンジン負荷率を変化させても、全センサーが指示精度・繰返し性で 3% LEL 以内となり IEC 規格を満たし、応答時間も最大でも 12 秒で規格内だった。

4) 量産試作

新規水素センサーの量産試作体制を確立し 40 個作製した。IEC 規格(60079-29-1)のパフォーマンス要求事項の全試験で IEC 規格の 2/3 以内に収まり、指示精度 $\pm 3\%$ 以内、応答時間 12 秒以内で基準を満たした。

謝辞

最後に、本開発事業は公益財団法人日本財団の助成金を受けて実施しており、ここに記して厚く感謝申し上げます。

「この報告書は BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました」

(一社)日本船用工業会

〒105-0001

東京都港区虎ノ門一丁目 1 3 番 3 号 (虎ノ門東洋共同ビル)

電話 : 03-3502-2041 FAX : 03-3591-2206

<https://www.jsmea.or.jp>