

(III-1)「水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全基盤整備に関する研究開発 / 水素ステーション高度安全・安心技術開発」

委託先：(一社)水素供給利用技術協会

成果ガリ (実施期間：平成26年度～平成29年度)

- ・商用水素ステーションの事故・トラブル事例、対策を収集したセーフティーデータベースを構築し、検索・活用できる仕組みを完成。重要事例の深掘りと周知・展開も実施。
- ・平成27年度に完成した「水素ステーション教育設備・訓練内容指針(案)」を基に「水素ステーション運営訓練カリキュラム」を完成し、水素技術センターにて試験運用予定。
- ・次世代水素ステーションに必要な技術開発項目を検討・抽出し、開発テーマ候補として報告済み。(平成27年度に完了)
- ・一般向けのポータルサイトである「水素エネルギーナビ」を開発し、動画を盛り込み、またFC EXPO等でのHySUTブース出展や国内外でプレゼンを行い、社会受容性の向上を促進。

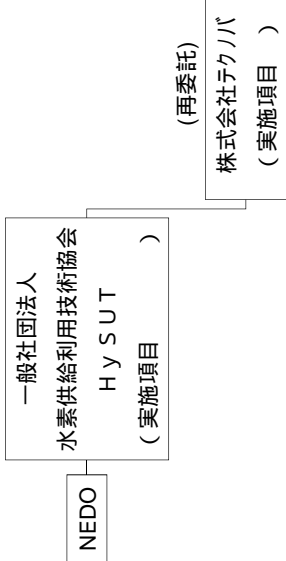
背景/研究内容・目的

- ・2015年の普及開始初期に向けて、一般ユーザーに安定したサービスの提供を可能とするための運用技術の開発を実施する。
- ・2025年の本格普及期に向けて、欧米等の海外の動向も参考に、地方自治体や地域住民がより一層安心して受け入れられる安全・安心な次世代水素ステーションに必要な技術開発を行う。

研究目標

実施項目	目標
セーフティーデータベース	データベースの完成と運用
人材教育・育成手法の開発	教育マニュアル、指針(案)、訓練カリキュラムの完成
次世代水素 S T 技術開発	必要な技術開発項目の抽出
社会受容性の向上	ポータルサイト開設や展示会出展

実施体制及び分担等



これまでの実施内容 / 研究成果

- ・商用水素ステーションの事故・トラブル事例、対策を収集した水素ステーションセーフティーデータベースを構築し、運営者が検索・活用できる仕組みを完成した。データ集計による分析・解析を行い、また重要事例の深掘りを実施し、水素ステーション運営会社への周知・展開を行った。
- ・平成27年度に完成した「水素ステーション教育設備・訓練内容指針(案)」を基に「水素ステーション運営訓練カリキュラム」を完成し、山梨県に完成予定の水素技術センターにて試験運用を行う予定である。
- ・次世代水素ステーションに必要な技術開発項目を検討し、フォアキャスト方式で28件、バックキャスト方式で19件を抽出して、開発テーマ候補として報告を完了した。(平成27年度に完了)
- ・日本で初となる、水素エネルギーに関する一般向けポータルサイトである「水素エネルギーナビ」を開発し、埋蔵促進のために動画も製作した(テックリバへの再委託事業)。またFC EXPO等でのHySUTブース出展や国内外でプレゼンを行い、社会受容性の向上を図った。

今後の課題

水素ステーションの本格普及期に向けて、トラブルの削減、水素ステーション運営者の教育・育成および一般市民に対する社会受容性の向上は、引き続き重要な課題であると思われる。

実用化の見通し

商用水素ステーションの設置が進み、本格普及期に向けて更に拡大していく中で、水素ステーションのトラブル削減や増加する水素ステーション運営者の教育・育成に有効な事業となると期待される。また次世代水素ステーションに必要な技術開発については、抽出項目の開発の実現により、更なる安全・安心な次世代水素ステーションが期待できる。一方、社会受容性の向上活動は、本格普及期に向けて継続して行う必要がある。

研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
セーフティーデータベース	セーフティーデータベースの完成と運用	
人材教育・育成手法の開発	教育設備・訓練指針(案)と訓練カリキュラム完成、試験運用	
次世代水素 S T 技術開発	必要な技術開発項目の抽出・報告	
社会受容性の向上	ポータルサイト開設、展示会出展、国内外プレゼン実施	

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
0	0	11	0

課題番号： - 1

水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全基盤整備に関する研究開発 /

水素ステーション高度安全・安心技術開発

一般社団法人水素供給利用技術協会(HySUT)

1. 研究開発概要

本研究開発は、水素ステーションにおける安全・安心を目指し、水素ステーションのトラブル事例データベースの構築および水素ステーショントレーニングセンター構想案(教育マニュアルの作成を含む)の検討を進めるとともに、一層安心して受け入れられる安全・安心な次世代水素ステーションに必要な技術開発を検討するものである。水素供給利用技術協会(HySUT)は、以下に示すテーマの取り組みを実施する。

(1) 水素ステーション高度安全運用技術の開発

2015年の普及開始期に向けた水素ステーションの運用にあっては、社会受容性確保の観点からも、事業者は一層の安全への配慮が必要である。このため、トラブルの未然防止や発生時の迅速な対応を効率的に実施するための方法の確立を図る。具体的には、水素ステーションの部品構成機器の安全に資する技術を確立する。また、これまでの水素ステーションの運用上得られた知見や、今後建設される商用ステーションにおける情報をデータベース化するとともに、これを日々の運用やメンテナンスに活用するツールや、この情報も活用した運用のための人材教育・育成手法のツール等を開発する。更に業界自主基準の制定に向けたガイドライン案を策定する。

- a. トラブル事例データベース化の検討(HySUT、出光興産、大阪ガス、(一財)エンジニアリング協会、岩谷産業、JX 日鉱日石エネルギー、大陽日酸、東京ガス、東邦ガス)
- b. 人材教育・育成手法の開発(HySUT、出光興産、大阪ガス、(一財)エンジニアリング協会、日産自動車、本田技術研究所)
- c. トータル運用技術の開発(HySUT)

(2) 次世代水素ステーション高度安全・安心技術開発

2025年の本格的な普及拡大に向け、現在取り組んでいる規制の見直しや、海外の状況も踏まえて、低コスト且つ高度に安全を確保した次世代水素ステーションのコンセプト策定と、これを実現するために必要な技術開発について、安全性に係る知識体系の確立も行いながら、現行規制の見直しに必要な研究開発も含めて総合的に実施する。

なお実施にあたっては、フェージビリティスタディを通じて技術開発課題の抽出と目標設定を行ったうえで、技術開発を実施する。

- d. 次世代水素ステーション高度安全安心技術開発(HySUT)

これらの研究実施体制は図1のとおりである。

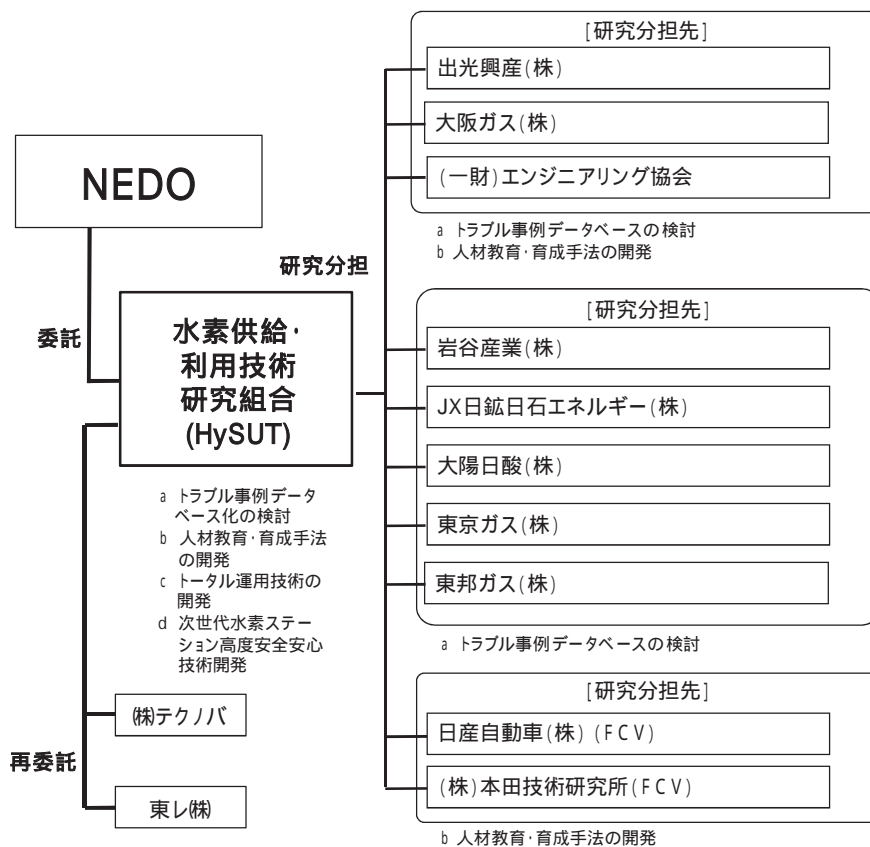


図1 研究実施体制

委託期間:平成26年6月11日から平成28年3月31日まで

本研究開発の委託先は HySUT であり、再委託先としてテクノバが水素ステーション高度安全運用技術の開発、次世代水素ステーション高度安全・安心技術開発(平成26~27年度)を、さらに東レ(平成27年度)が、電気化学式水素ポンプの調査研究を、それぞれ実施する。

平成 28 年度以降の研究実施体制を図 2 に示す。本研究開発の委託先である HySUT は、事故・トラブル事例データの収集とデータベース化の検討、人材教育・育成方法の開発検討、社会受容性向上活動を実施する。再委託先であるテクノバは、水素ステーションや水素安全全般に係るワンストップポータルの開発(平成 28～29 年度)を実施する。

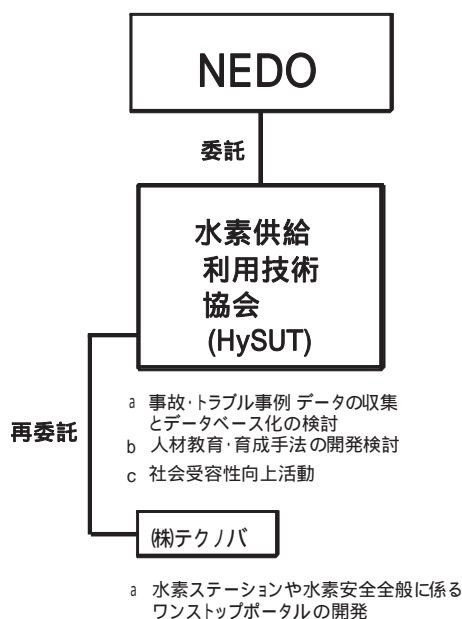


図 2 研究実施体制

委託期間:平成 28 年 4 月 1 日から平成 30 年 2 月 28 日まで

2. 研究開発目標

燃料電池自動車(以下、FCV)と水素供給インフラは、エネルギー源のベストミックスや CO₂ 排出量削減の有効策として、「エネルギー基本計画(2014 年閣議決定)」および「Cool Earth - エネルギー革新技術計画(2008 年経済産業省策定)」における重要技術と位置付けられている。

これまで我が国では「水素・燃料電池実証プロジェクト(JHFC1)」(平成 14～17 年度)、「燃料電池システム等実証研究(JHFC2)」(平成 18～22 年度)、及び「地域水素供給インフラ技術・社会実証」(平成 23～25 年度)において FCV・水素ステーションの実用性、省エネルギー性等を実証すると共に、実用化課題の抽出を進めてきた。

加えて 2015 年からの FCV の量産開始と水素供給インフラの先行整備を目指すこととした 2011 年 1 月の自動車メーカー及び水素供給事業者 13 社の共同声明を受け、2013 年度から「水素供給設備整備事業費補助金」に係る補助事業がスタートし 2015 年度までの 3 年間で 100 ヶ所の水素ステーションの整備を開始している。

このような背景の下、2015 年の普及開始初期に向けて、一般ユーザーに安定したサービスの提供を可能とするための運用技術の開発を実施する。また 2025 年の本格普及期に向けて、欧米等の海外の動向も参考に、地方自治体や地域住民がより一層安心して受け入れられる安全・安心な次世代水素ステーションに必要な技術開発を行う。

(1) 水素ステーション高度安全運用技術の開発

事故・トラブル事例データの収集とデータベース化の検討(担当:HySUT、出光興産、大阪ガス、エンジニアリング協会、岩谷産業、JXTG エネルギー、太陽日酸、東京ガス、東邦ガス)

FCVと水素ステーションの実証事業として、これまで「水素・燃料電池実証プロジェクト(JHFC1)」(平成14～17年度)、「燃料電池システム等実証研究(JHFC2)」(平成18～22年度)及びHySUTの実施した「地域水素供給インフラ技術・社会実証(JHFC3)」(平成23～25年度)が進められ、実証の水素ステーションで発生した事故・トラブル事例の収集・分析・水平展開を行ってきた。具体的にはJHFC1で16件、JHFC2で141件、JHFC3で68件、合計225件の事故・トラブル事例をHySUTで蓄積しており、その実績をもとに、今後HySUTで運用する水素ステーションに関し、平成26～27年度も事故・トラブル事例の収集を行い、原因解析・究明と再発防止策の検討および水平展開を実施すると共に必要な技術開発の抽出を行う。必要な項目は次世代水素ステーションの技術開発に反映させる。

また国内・海外の事故・トラブル事例に関するデータベースの現状調査を行い、その調査結果も参考として、データベースの基本設計の検討を行う。その際は、HySUTが行ったJHFC3で確立した水素ステーション集中管理システムの活用も考慮し、基本仕様を検討する。データベースに取り込む項目として想定されるものは、発生日時、設備区分、水素漏洩有無、発生状況、被害・損傷状況、発生要因、措置、対策等である。また運用方法や維持・管理体制についても検討を行い、対象ステーションをHySUT運用ステーションから先行整備ステーション等にも拡大して検討する。これにより水素ステーション運用会社間での情報の共有化を図る。

(平成27年度中間目標)

検討結果を反映したデータベースの製作試行を行い、対象ステーションをHySUT運用ステーションから運営を開始した先行整備ステーション等にも拡大して検討する。

(平成29年度最終目標)

セーフティーデータベースの改良を完了し、商用水素ステーションからのデータも取り込んで展開を実施する。

人材教育・育成手法の開発検討(担当:HySUT、出光興産、大阪ガス、エンジニアリング協会、日産自動車、本田技術研究所)

水素ステーションの安全・安心の実現には、ステーションの効率的な運用・管理・非常時対応等に必要となる専門的かつ高度な知識・技術を備えた人材を育成することが求められる。そこで、人材育成に必要なコンテンツを抽出し、着実にレベルアップさせるための手法について検討を行う。人材育成の一手法として、実際の水素ステーションをトレーニングセンター化し、OJTにより人材育成することも検討する。トレーニングセンターでは、一連の水素ステーション業務である車両の誘導、水素充填、水素ステーション設備の運転、点検、メンテナンスなどを安全に遂行できるように必要な知識、経験の習得の場として有効に機能するために必要な、トレーニングメニュー及び具体的な内容についての検討を行う。また、トレーニングを行うために、トレーニングセンターにどのような設備が必要かについて検討を行う。検討に際しては、ガソリンスタンド、CNGスタンドなど水素ステーションに類似の設備だけでなく、その他の設備などの教育訓練に関する情報を収集し、トレーニングセンターの運用構想案の検討に資する調査を行う。

また上記の講義、実地訓練の内容についての検討を行うために、HySUTが運用している成田水素ステーション(オフサイト)、大阪水素ステーション(オンサイト)やFCVなどを活用し、模擬的な講義、訓練等を実施する。更に業界自主基準の制定に向けたガイドライン案を策定する。

- 1 トレーニングセンター開設運用構想案の検討

(平成27年度中間目標)

水素ステーションにおける保安管理項目の抽出と防災訓練の検討を実施する。具体的には、以下の項目について検討する。

a. 水素ステーションにおける保安管理項目の抽出

水素ステーションの業務の流れに則して保安上、留意すべき点、管理すべき点を抽出し、従業員の教育マニュアルの作成に反映させる。

- ・水素カードルの受入[オフサイトステーションの場合]
- ・水素製造装置の運転[オンサイトステーションの場合]
- ・水素の昇圧・蓄圧作業(水素圧縮機の稼働、蓄圧器への水素受入)
- ・水素のFCVへの充填作業(FCVの誘導、FCVの停止、充填口へのノズル接続、充填開始動作、充填中の動作、充填終了の動作、ノズル取り外し、FCVの誘導)
- ・日常点検、設備維持の業務

b. 防災訓練の検討

水素漏洩、水素火災、設備不調等の高圧ガス事故時の対応について行動のシナリオを作成し、効果のある防災訓練のしくみを構築する。

- ・不具合・事故のパターン別行動シナリオの策定
- ・通報先、通報ルート of 検討、通報訓練の実施
- ・訓練実施時の課題抽出

上記検討結果を反映し、従業員教育マニュアルを作成する。具体的には、以下の項目について検討する。

c. 従業員教育マニュアルの作成

上記の保安管理項目の抽出、防災訓練の検討の結果や高圧ガスや一般基礎知識等を織り込んだ従業員用の教育マニュアルを作成し、商用化時の標準マニュアル作成に寄与する検討を行う。

- ・高圧ガスの基礎知識、高圧ガス保安法、危害予防規程
- ・水素ステーションの通常運用方法
- ・機器不具合時の対応
- ・事故事例
- ・日常点検、月例点検
- ・防災訓練、通報訓練
- ・保安検査

(平成 29 年度最終目標)

水素ステーション教育設備・訓練内容指針(案)を基にした設備の完成と訓練を実施する。

- 2 水素ステーション運用の検討

(平成 27 年度中間目標)

HySUT が運用している成田水素ステーション(オフサイト)、大阪水素ステーション(オンサイト)を活用し、実際に模擬教育を行う。また、水素ステーション及びFCVを活用し、保安に関する課題の抽出を行う。また、この両ステーションは、設備の運用開始から比較的長期間運用しており、メンテナンスに関する課題抽出も合わせて実施する。

a. 模擬教育

策定した教育マニュアルを使用し、模擬受講者に対して実際に教育を行うことで、課題を抽出し、マニュアルのブラッシュアップを図る。また、水素ステーションの設備を使用し、模擬受講者に対して実際に訓練を行うことで、課題を抽出し、実地訓練の内容のブラッシュアップ、必要な教育用設備の検討に反映する。模擬実地訓練内容としては、次の項目を想定している。

- ・水素カードルの受入、搬出作業(成田水素ステーションのみ)
- ・水素製造装置の運転(大阪水素ステーションのみ)
- ・水素圧縮機の操作(=蓄圧器への水素充填)
- ・ディスペンサーの操作(=FCVへのホース着脱、水素充填)

成田水素ステーション、大阪水素ステーションとも35MPa充填のステーションであるため、70MPa充填対応を想定し、模擬の充填ホース及びカプラーの脱着を行う。

プレクーラー装置はないため、代表的なプレクーリングプロセスについての運用方法については講義にて説明する。

- ・ガス漏れ警報器など保安設備の取扱い

b. 水素ステーション及びFCVの活用

実際にFCVを使用し、水素ステーションでの充填回数を増やし、教育、訓練や保安に関する課題の抽出に反映させる。充填することが教育や課題の抽出に寄与するため、できるだけこまめに充填し、充填回数を増やす。

- ・成田水素ステーション:FCVの使用と水素充填
- ・大阪水素ステーション:FCVの使用と水素充填

- 3 トレーニングセンターでの訓練実施の検討

(a)訓練科目の検討

平成27年度までの検討に基づき、商用水素ステーション従業員育成に必要な「水素ステーション教育設備・訓練内容指針案」を作成した。この指針案のコンテンツを効率よく習熟するために必要な訓練科目の検討を行う。訓練科目の検討では、科目ごとの目的、概要、訓練期間等について検討を行う。

また、関係者との協議の上、水素ステーションの保安監督者育成を目的とした訓練コースについても検討を行う。具体的には、トレーニングセンターでの訓練コースを修了すれば、保安監督者選任に必要な「圧縮水素の製造経験6月以上」の実務経験と同等とみなせるカリキュラムの構築を検討する。

(b)訓練教材の検討

訓練科目ごとに必要な教材を検討する。検討にあたっては、平成27年度末に完成予定のHySUT「水素ステーション教育設備・訓練内容指針案」を参考にする。

(c)評価手法の検討

訓練はこなすだけに終始せず受講生のレベルアップが求められる。そのためには受講者を適切に評価し習熟度を把握することが有効である。また、評価結果を分析し受講者へのフィードバックやカリキュラム/教材を改善していくことが求められる。そこで、評価項目や評価基準等の検討を行い、評価手法を開発する。

(d)水素ステーション運営訓練コースの開発

訓練科目の整備、訓練教材の整備、評価手法の開発等を通じて水素ステーション運営訓練コースを開発する。水素技術センターを活用し水素ステーション運営訓練コースの試験運用を行う。

(平成 28 年度取組み内容)

- ・訓練科目の検討を行い、科目ごとの目的、概要、訓練期間等を決定した。
- ・保安監督者育成を目的とする教育プログラムの有用性について検討を行った。有用性が確認できたので保安監督者育成を目的とした訓練コース開発に向けて検討を行う事とした。
- ・各教育科目に必要な訓練教材について検討を行った。訓練教材の検討には訓練用のハードウェアを含む。

(平成 29 年度の目標)

- ・必要な訓練教材を制作する。
- ・訓練受講生の評価手法について検討を行う。評価項目や評価基準等の検討を行い、評価手法を開発する。
- ・水素ステーション運営訓練カリキュラムを完成する。
- ・水素技術センターにて水素ステーション運営訓練コースの試験的運用を実施する。

トータル運用技術の開発(担当:HySUT)

HySUT の実施した「地域水素供給インフラ技術・社会実証(JHFC3)」(平成 23～25 年度)においては、社会実証の一環として一般を対象にした水素およびFCV、水素ステーションに関する社会受容性調査を3年間実施した。上記、に加え社会受容性の調査結果を合わせ、安全・安心という観点から広くステーションの運用技術に展開する。

(平成 27 年度中間目標)

上記、およびJHFC3の活動を活用し、ファーストレスポnderへの対応等(消防等への初期対応のリスト化ほか)を含めた、水素ステーションの効率的なトータル運用手法を開発する。また社会受容性向上に向けた諸活動や調査を必要に応じて実施するとともに、上記データベースや管理手法等の蓄積を活かし、海外のデータベースとの共有化や海外機関との連携を図る。

(平成 29 年度最終目標)

上記を活用した水素ステーションの効率的なトータル運用手法を確立し、また海外関連機関とデータベースや人材育成等に関する国際連携を強化する。

(2)次世代水素ステーション高度安全・安心技術開発(担当:HySUT)

2025 年の本格的な普及拡大に向け、現在取り組んでいる規制の見直しや、海外の状況も踏まえて、低コスト且つ高度に安全を確保した次世代水素ステーションのコンセプト策定と、これを実現するために必要な技術開発について、安全性に係る知識体系の確立も行いながら、現行規制の見直しに必要な研究開発も含めて総合的に実施する。

なお実施にあたっては、フィージビリティスタディを通じて技術開発課題の抽出と目標設定を行ったうえで、技術開発を実施する。また、安心を確保するためには社会受容性の向上が必要と考えられることから、社会受容性向上に資する活動も行う。

コンセプトの検討

次世代水素ステーション検討分科会でテーマ、スコープ等検討内容の全般検討を行う。高度に安全・安心な次世代水素ステーションのコンセプト策定を目的に、民間の安全経験者(水素に限定しない)、シンクタンクメンバー、及び FCCJ-TF メンバー等から成る次世代水素ステーション検討分科会を組織し検討する。ソフト面、ハード面の双方の検討を行い、アウトプットの明確化と技術開発目標とスケジュールを決定する。

(平成 27 年度最終目標)

次世代水素ステーション検討分科会で、コンセプト検討と具体的な実施案の検討を行う。

関連開発スコープの検討

次世代水素ステーション検討分科会で検討する。

(平成 27 年度最終目標)

次世代水素ステーション検討分科会でテーマ、スコープ等検討内容の全般検討を行う。有望テーマについては、実施体制・スケジュールを作成し、検討結果から課題抽出を行う。

社会受容性の向上活動

次世代水素ステーション検討分科会で検討する。

(平成 27 年度中間目標)

・社会受容性を向上させた類似例についての調査と教訓の洗い出し

水素エネルギーの必要性はかなり理解されてきたが、安全性に関する更なる受容性向上、特に身近に水素ステーションが建設されることへの受容性向上が必要である。市民にとって身近である類似例、例えばごみ焼却炉等について社会受容性向上の取り組みを調査し、教訓を洗い出す。

類似例について受容性向上のための取組みに関する調査・教訓の洗い出しを行い、それを参考にして、水素ステーション運営上の、安全・安心に関する社会受容性向上に向けた活動や他の調査を必要に応じて実施する。

(平成 29 年度最終目標)

水素ステーションの安全・安心に関する社会受容性向上活動を継続し、商用水素ステーションの新規需要創出を図る。

3. 研究開発成果

3.1 研究開発成果、達成度

(1) 水素ステーション高度安全運用技術の開発

事故・トラブル事例データの収集とデータベース化の検討(担当:HySUT、出光興産、大阪ガス、エンジニアリング協会、岩谷産業、JXTG エネルギー、太陽日酸、東京ガス、東邦ガス)

a. 事故・トラブル事例データの収集とデータベース化の検討

平成26年度は、HySUTが運用する水素ステーション(実証ステーション)の中から、16件の事故・トラブル事例データを収集した。セーフティーデータベース検討会を4回開催し、重要と思われる14件を水素ステーション運営会社に水平展開した。事例データのうち、ランク区分D1及びD2の事例でより有効な再発防止対策が必要と考えられる10件について、事象展開図を作成し原因解析を行った。

b. セーフティーデータベースの設計と製作

高圧ガス保安協会(KHK)が製作、公開している「事故事例データベース」を参考に、セーフティーデータベース検討会でデータベース設計の検討を行い、データベースの開示項目を決定した。Microsoft Excelを用いたデータベース基本仕様を決定後、平成26年12月にデータベース製作を外部委託し、平成27年3月に「水素ステーションセーフティーデータベース検索システム」(以下、セーフティーデータベース)が完成した。その後、本検討会メンバーを中心に試運用を実施した。開示項目を図3に示す。

No.	設備		水素漏洩	ランク区分	発生状況	人的被害	設備損傷	高圧ガス設備
	区分	発生箇所						
1	水素製造・貯蔵設備	カードル置場	無し	E	カードル置場の温度センサーが温度異常検知して、散水ポンプが作動した。	無し	無し	
2	補助機器	制御盤タッチパネルモニター	無し	D3	制御盤タッチパネルモニター表示不能となった。	無し	無し	-
発生要因分類								
	分類	内容	要因	措置	対策	水平展開	発生日	
4	技術的要因	設計不良	季節による太陽高度の変化を全てカバー出来ていなかった為、温度センサーが夏場の朝日の影響を受けた。	温度センサー上にカバーを設置し、朝日の影響を受けないようにした。	センサー設置環境の改善	実施済み	2011/6/23	
	運転・維持管理要因	経年劣化	経年劣化により基盤故障が発生した。設置後5年経過。	基盤を交換した。	交換時期の設定	実施済み	2011/6/30	
	技術的要因	条件設定の不備	軸受温度が設定値を超えた。	夏場の気温上昇を考慮して警報設定値を80℃から90℃に変更した。(軸受け設計温度=120℃)	適切な設定値の設定、類似事例の十分な評価の実施	実施済み	2011/7/3	

図3 セーフティーデータベースの開示項目

平成27年度は、セーフティーデータベース検討会を3回開催し、セーフティーデータベースを用いて、水素ステーション事故・トラブル事例データ収集を継続実施した。過去の実証水素ステーション事例(JHFC1～JHFC2)157件を本システムに取り込む等により、実証水素ステーションのデータ数は252件に増加した。平成27年度より商用水素ステーションの事故・トラブル事例データの入手が可能となり、商用水素ステーション事例161件が追加

された。

平成 27 年度は実証水素ステーション事例の収集から、商用水素ステーション事例の収集へと移行し、商用水素ステーショントラブル事例の分類(ランク区分別、設備区分別、要因別)を開始した。

c. セーフティーデータシステムの運用と改良

平成28年度は、セーフティーデータシステム検討会を3回開催した。セーフティーデータベース検索システムの見直し改良を実施し、検索画面改良による操作性の向上、表現や用語の見直し統一による検索性能の向上を図った。平成28年度は、商用水素ステーションの事故・トラブル事例を327件収集し、セーフティーデータベースを用いて、ランク区分別、設備区分別、要因別毎に、分析・解析を実施した。事故・トラブル事例の詳細分析を行うため、事故・トラブル報告の内容や方法の見直しも行った。発生要因分類を大分類、中分類、小分類に細分化する等、セーフティーデータベースの見直し改良を実施し、検索画面改良による操作性の向上、検索性能の向上を図った。

また平成 28 年度は、新たにセーフティーデータシステム分科会を設置し、セーフティーデータベースを用いて、商用水素ステーション事故・トラブル事例の深掘り検討を実施した(計5回開催)。その結果、重要事例に関する周知文書を作成し、水素ステーション運営会社に発信し、事故・トラブルの再発防止に役立てた。

さらに平成 28 年度は、事故・トラブル事例の分析・評価方法を検討し、結果をユーザーにアウトプットするスキームを構築した。データ収集/分析・評価/アウトプットの各プロセスが一体化し循環するセーフティーデータシステム(図4参照)の運用・改良を行い、本検討を完了した。

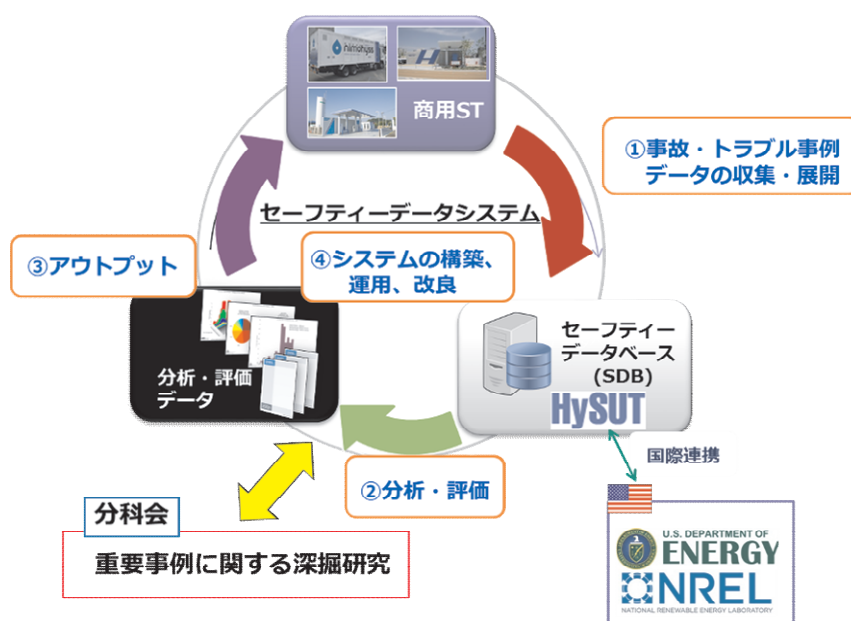


図4 セーフティーデータシステム

平成 29 年度は、引き続き商用水素ステーションの事故・トラブル事例を収集し、重要事例の深掘り検討を実施する一方、安全の専門家による商用水素ステーションの事故・トラブル事例分析評価を実施する予定である。

人材教育・育成手法の開発検討(担当:HySUT、出光興産、大阪ガス、エンジニアリング協会、日産自動車、本田技術研究所)

平成 26 年度はトレーニングセンター検討会を 3 回開催した。成田水素ステーション、大阪水素ステーションや FCV を活用し、人材教育・育成手法の開発検討を行った。

a. 保安管理マニュアルの作成

水素ステーションの業務に則して保安上、留意すべき点、管理すべき点を抽出し、従業員の教育マニュアル(案)を作成した。

b. FCV に関する講習テキストの作成

水素ステーション運営者が、水素ステーションにおける FCV 関連作業を正しく理解した上で実行できるように FCV 及び水素ステーションでの充填に関する基本的な事項を整理した「燃料電池自動車 (FCV) 講習テキスト(案)」を作成した。

c. 模擬訓練検討

成田水素ステーション、大阪水素ステーションや FCV を活用し、模擬訓練の検討を実施した。実地検討は全 5 回行い、成田水素ステーションにて 3 回、大阪水素ステーションにて 2 回実施した。実際の模擬訓練検討時の写真を図 5 から図 8 に示す。課題を抽出し、実地訓練内容のブラッシュアップと必要な内容をマニュアルに反映させた。



図 5 基礎座学



図 6 FCV の構造説明



図 7 水素充填訓練



図 8 防災訓練

水素ステーション教育設備・訓練内容指針案(仮称)の目次例を図9に示した。

1. 目的・定義	
2. 水素の物性、特性	
3. 高圧ガスの基礎知識	圧縮水素スタンド関連基準
4. 危害予防規程	危害予防規程の解説
5. 保安管理マニュアル	機器、作業項目毎のマニュアル
6. 燃料電池自動車	水素ステーション運営者に必要なFCV基礎情報
7. 水素ステーション模擬訓練	水素の昇圧、蓄圧、FCVの誘導・充填、日常点検等
8. 防災訓練	燃焼、消火、ガス漏洩対処作業等
9. 事故・トラブル事例	国内外の水素ステーション事故トラブル (セーフティーデータベースほか)

図9 水素ステーション教育設備・訓練内容指針案(仮称)

平成27年度はトレーニングセンター検討会を2回開催した。成田水素ステーション、大阪水素ステーションやFCV(ホンダ車)を活用し、「水素ステーション運営訓練(仮称)」の検討を実施した。実地検討は全2回行い、第1回は成田水素ステーションにて平成27年5月27日に、第2回は大阪水素ステーションにて平成27年7月8日に実施した。成田水素ステーションでは商用水素ステーションの実運営者も合わせて総数22名が参加して、基礎座学、水素ステーションの運営業務および防災訓練等を行った。大阪水素ステーションでは、商用水素ステーションの実運営者も合わせて総数17名が参加して、基礎座学、水素ステーションの運営業務および防災訓練等を行った。

実際の模擬訓練検討時の写真を図10と図11に示す。課題を抽出し、実地訓練内容のブラッシュアップと必要な内容をマニュアルに反映させた。



図10 成田水素ステーション



図11 大阪水素ステーション

d. 「水素ステーション教育設備・訓練内容指針案」の作成・完成

cの検討内容を反映させて、「水素ステーション教育設備・訓練内容指針案」(図12)を作成・完成し、検討会メンバーに配布を行い、周知を図った。

関係者限定	目次
NEDO水素ステーション安全基盤整備に関する研究開発/ 水素ステーション高度安全・安心技術開発	
水素ステーション教育設備・訓練内容指針案	
2016年2月	
水素供給・利用技術研究組合	
	第1章 目的・意義 第2章 水素について 第3章 水素インフラ関連法規等 第4章 燃料電池自動車 (FCV) 第5章 保安管理マニュアル 第6章 緊急時対応の指標 第7章 緊急時対応訓練 第8章 水素ステーションの事故・トラブル事例

図12 水素ステーション教育設備・訓練内容指針案

e.水素ステーション従業員(保安監督者を含む)育成に関する事業者の取組み等調査

- ・国内商用水素ステーション事業者8社(既存事業者4社、新規事業者4社)に対してヒアリング調査を行い、ステーション従業員の人材育成に関する訓練内容や課題、トレーニングセンターへのニーズ等を抽出した。
- ・本調査によりトレーニングセンターでの保安監督者育成に対するニーズを確認し、保安監督者育成コースの有用性を把握した。
- ・新規事業者は現状他社ステーションでのOJT等により人材育成を行っており、自社のみでの人材育成は困難であるという意見が複数あった。また、保安監督者育成だけでなく新人や水素製造経験の浅い人を対象とする教育訓練実施に対してもニーズがあることを把握した。

f.訓練カリキュラムの検討

- ・高圧ガス保安法や上記ヒアリングの結果等を基に人材育成に必要となる訓練コース及びその受講推奨者、育成目標、職務・仕事の具体例を検討した。(図13)

訓練の種別 (コース名称)	受講推奨者	育成目標	職務・仕事の具体例
初級者コース	<ul style="list-style-type: none"> (1) 新人として初めて水素ステーションで働く人 (2) 水素ステーションでの実務経験の浅い人 (3) 上位者の指示指導をもとに基本業務を行う人 	<ul style="list-style-type: none"> (1) 担当業務の一通りの知識・技能を有す。 (2) 上位者の指示指導をもとに、定型業務を安全に正しく処理できる。 (3) 現場の危険性の認識と回避行動ができる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 日常 / 月例点検作業 ・ 水素ガスの受入作業 ・ 充填設備に関する運用とその管理 ・ FCV充填作業(車両の誘導、充填操作、POS処理・監視盤監視等) ・ 緊急時対応の補佐
保安監督者育成コース	<ul style="list-style-type: none"> (1) 保安監督者を目指す人 (2) おおよそ実務経験6ヶ月未満で業務の知識・技能を高めたい人 	<ul style="list-style-type: none"> (1) 水素ステーション全般の知識・技能を有し 定常・非定常業務を的確に遂行できる。 (2) 水素ステーションの業務全般を監督でき、下位者の指導ができる。 (3) 故障・災害想定ができ、関係先を含めた対応措置を指揮、実行できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水素ステーション業務全般(定常業務、非定常業務) ・ 緊急時対応 ・ 下位者の指導育成 ・ 重要な事故事例、機器トラブル事例の情報収集 / 分析および社内展開

図 13 訓練コースの種別と内容

・水素ステーション従業員(保安監督者を含む)育成訓練に必要な科目、内容、訓練時間等を検討し、「水素ステーション運営訓練カリキュラム(案)」(図 14)を作成した。

科目	内容		訓練時間 (h)		
	座学	現場実習	初級者 コース	保安監督者 育成コース	
基礎知識	一般高圧ガス	高圧ガスの基礎知識、高圧ガスの分類、高圧ガスの定義、高圧ガスについての規則	0.5	0.0	
	水素	水素とは、水素エネルギー技術の全体像、水素製造技術、水素輸送・貯蔵技術、水素利用技術	0.5	2.0	
	水素インフラ関連法規	高圧ガス保安法（法体系、目的、高圧ガスの定義、用語の定義、事業所の分類、製造、貯蔵、消費、移動、販売、例示基準 等）、その他（消防法、条例 等）	0.5	3.0	
	水素ステーション概要	構成と特徴、安全対策、課題		0.5	0.5
		普及状況と今後の整備計画、水素ステーション設備使用材料		0.0	0.5
	水素ステーション関連設備	水素トレーラー、水素カードル、液化水素関連設備、水素製造装置、圧縮機、蓄圧器、プレクーラー、ディスベンサー ノズル、水素充填ホース、弁類、圧力計、温度計、流量計、制御、電気、通信機器	圧縮機、蓄圧器、ディスベンサー、保安設備等水素ステーション構成機器の機能と役割を理解する。	2.0	3.0
	水素ステーション自主管理ガイドライン	充填ガイドライン、品質ガイドライン、計量ガイドライン、JPEC技術基準	充填性能試験車両を使用し充填性能確認検査の実習を行う。	1.5	5.0
FCVの知識	燃料電池とは、燃料電池の仕組み、燃料電池の用途、FCVとは、FCVの安全対策、水素充填方式	座学の内容をFCVを使って実地で学ぶ。（試乗を含む）	1.0	2.0	
運営・保安管理	安全設計・管理	安全設計、安全・信頼性管理、安全管理組織、保安規程、教育	0.0	2.0	
	保安・防災設備	ガス漏洩検知センサ、火災検知センサ、消火・散水機能、緊急停止スイッチ、車両衝突防止・緊急離脱カブラ、安全装置（安全弁 等） 地震計、インターロック、アース、緊急遮断装置・逆流防止装置、電気設備の防爆構造、保安電力、流動拡散防止装置および障壁	保安・防災設備の実操作を体験するために、緊急停止スイッチを実際に押す、散水機能等の保安・防災設備を稼働させてみる等により非定常時の操作訓練を行う。	2.0	5.0
	水素ステーション運転管理実習	組織・基準類、保安管理項目と点検要領、FCVの誘導要領、充填操作、POS処理・監視盤監視要領、日常点検、月例点検	車両の誘導、車両容器情報の確認、充填ノズルの着脱、充填開始操作、POS処理・監視盤監視、充填ライン脱圧、日常/月例点検作業、カードル受入・切離作業、蓄圧操作 他	3.0	10.0
	水素ステーション設備管理実習	基準類、設備の検査、設備の診断	設備交換・メンテ対応、（検査前を想定した）設備停止操作、（検査終了後を想定した）運転開始操作、検査時の対応、自主管理ガイドライン検査対応 他	1.5	5.0
	基本作業実習		トルクレンチの使い方、圧力計着脱、継手の着脱、携帯ガス検知器の使い方、定置式ガス検知器の動作試験、ガasketの取替え 他	1.0	0.0
	水素ステーション事故/トラブル事例	事例紹介、事例の解析と対策、セーフティデータベース 他		2.0	4.0
非常時対応訓練	トラブル時対応訓練	トラブル時対応訓練（座学編）、机上型シミュレーション訓練（グループ討議を通じたシナリオ作成/確認ワークの実施）	トラブル時対応要素が多いFCV充填中の軽微な水素漏えい事故を想定し、水素ステーション従業員による初期動作、情報伝達、漏えい箇所の特定及び現場での応急措置など実践的な訓練を実施する。	2.0	5.0
	防災訓練	組織・基準類、災害の備え、災害の対策、緊急時対応の知識、消防計画の理解、FCVの安全性、海外の訓練事例紹介、防災訓練（座学編）、机上型シミュレーション訓練（グループ討議を通じたシナリオ作成/確認ワークの実施）	水素の大量漏えいや火災発生等重大事故を想定し、水素ステーション従業員による人の安全確保、初期対応、関係機関等への通報・出動要請、消防等公設機関への協力など実践的な訓練を実施する。	3.0	7.0
評価方法の検討					

図 14 水素ステーション運営訓練カリキュラム(案)

g. 訓練教材の検討

- ・水素ステーション運営訓練カリキュラム(案)の科目ごとに必要な教材について検討を行った。教材制作にあたっては、水素ステーション運営事業者の意見を反映させながら、基礎知識から運営・保安管理、防災訓練まで、水素ステーション従事者にとって必要な全般的な知識の習得ができる内容とした。さらに水素技術センターの運転マニュアルに基づいて「運転管理実習」、「設備管理実習」の教材制作を行う予定であり、現場実習と併せて効果的に知識・経験の修得が図られる内容とする。訓練教材の一部を図 15 に示す。



図 15 訓練教材(一部)

・「トラブル時対応訓練」の現場実習用に、ディスペンサー内部より水素が微量漏えいした場合を想定したシナリオを新たに制作した。

h. 評価方法の検討

- ・受講者の修得度合を評価する目的で評価テストを実施する。具体的にはカリキュラムの学習項目のなかで、確実に習得が必要なポイントを中心にテストを行い、その結果に基づいて本人が受講期間中に確実な習得を行う時間を設ける。(初級者コース1回、保安監督者育成コース2回実施)

i. 水素技術センターでの訓練実習

- ・水素技術センターにおいて、平成29年12月～平成30年2月の間に計3回、水素ステーション運営訓練カリキュラムに基づいた座学及び実習を実施する予定である。この訓練実習の結果に基づいて、教材や実習内容の見直しを行っていくことで、完成度の高い教育訓練を目指す。

(2) 次世代水素ステーションに必要な技術開発の検討

2025年の本格的な普及拡大に向け、現在取り組んでいる規制の見直しや、海外の状況も踏まえて、低コスト且つ高度に安全を確保した次世代水素ステーションのコンセプト策定と、これを実現するために必要な技術開発について、安全性に係る知識体系の確立も行いながら、現行規制の見直しに必要な研究開発も含めて総合的に実施した。なお実施にあたっては、フィージビリティスタディを通じて技術開発課題の抽出と目標設定を行ったうえで、技術開発を実施した。また、安心を確保するためには社会受容性の向上が必要と考えられることから、社会受容性向上に資する活動も行った。

「次世代水素ステーションに必要な技術開発テーマ」の評価

平成26年度は、次世代水素ステーション技術開発検討会を2回、平成27年度は、次世代水素ステーション技術開発検討会を5回開催した。平成26年度に抽出した次世代水素ステーションに必要な技術開発テーマのうち26件について評価を行った。評価結果をまとめた資料、「次世代水素ステーションに必要な技術開発テーマの評価結果」を作成した。

a. 分科会での検討による技術開発テーマの提案

次世代水素ステーション検討分科会において、次世代ステーションに必要な技術開発の検討を実施した。検討にあたっては、まずブレインストーミングにより、次世代水素ステーションの姿を想定し、将来どういった技術開発が必要となるか自由に意見を出し合い、その後、開発内容を時系列と技術開発の目的を軸にして分類した(バックカスティング)。検討結果を図16に示す。

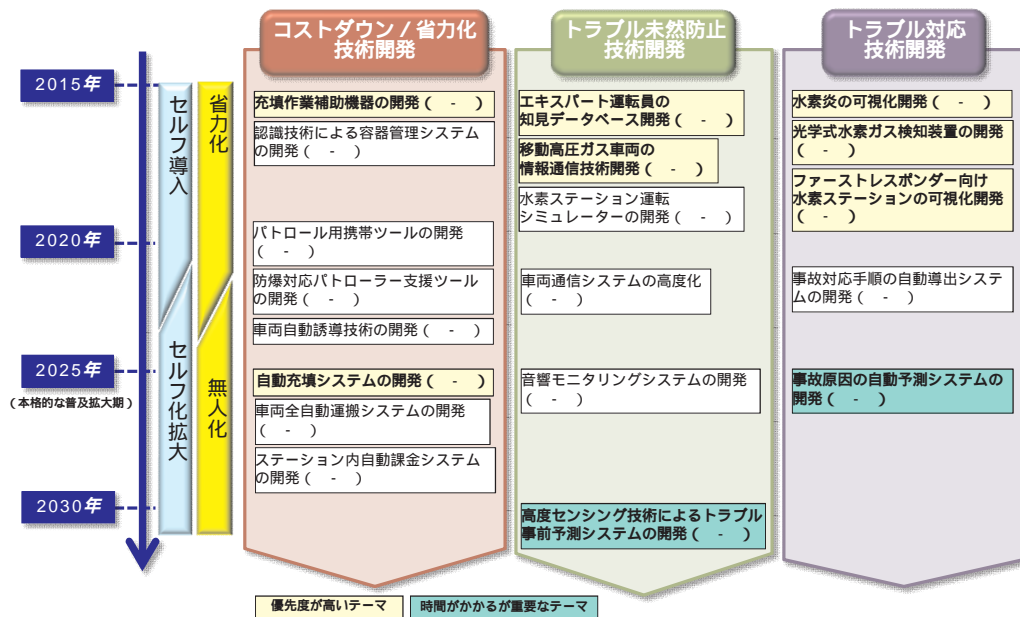


図 16 次世代水素ステーション技術開発検討の整理

b. 過去の事故・不具合等事例データ分析による技術開発テーマの提案

JHFC1, 2, 3(2002 年度～2013 年度)に発生した事故・不具合等事例データ 237 事例及び 2014 年 4 月～7 月に発生した 5 事例を合わせた計 242 事例のデータ分析を行い、次世代水素ステーションに必要な技術開発テーマ(28 テーマ)を提案した(フォアキャスティング)。結果を表 1 に示す。

表 1 過去の事故等事例データ分析による技術開発テーマ提案

NO.	タイトル	技術開発テーマ
1	異常・損傷・事故の発生防止技術	(1-) 共通設計・要求性能仕様書整備
		(1-) 振動場所での「ねじ」部緩み防止技術
		(1-) サイクリックな曲げ/ねじれ負荷や圧力負荷に強い充填ホースの開発
		(1-) 異物混入防止・除去技術、錆・粉塵等固着防止技術の開発
		(1-) F C V 車両整備工場向け洗浄装置の開発
		(1-) ノズル着脱操作に対する高信頼度充填ノズルの開発
		(1-) 継ぎ手のない溶接構造方式の開発
2	異常・損傷・事故発生時の早期検知技術	(2-) 水素微量漏洩検知自動化技術の開発
		(2-) 異常の遠隔監視装置の開発
3	異常・損傷・事故発生時の被害拡大防止技術	(2-) 地震、台風等による自然災害に配管、機器の健全性を確認できる技術開発
		(3-) 蓄圧器接続配管破損時の過流防止弁作動確認技術の開発
4	保安設備の信頼性向上	(4-) 高信頼度の火災検知センサーの開発
		(4-) 冗長化による信頼性向上対策
		(4-) 人工知能を活用した信頼性向上策
5	運転技術向上	(5-) マニュアルの標準化
		(5-) ステーション共有教育訓練専門家・教育プログラム
		(5-) 業界共有教育施設の整備
		(5-) タブレットを活用した教育訓練、運転支援システム開発
		(5-) 不具合事例のDB化及びメーカーとの情報共有化
6	保全技術向上	(6-) 機器の点検・交換基準の整備
		(6-) 機器点検手順の標準化とチェックリストの整備
		(6-) 水素ステーション保全専門家育成
		(6-) 保全専門家による教育、訓練、日常的保全指導(巡回、メール等による遠隔指導)システム開発
		(6-) タブレットを活用した教育、日常点検等システム開発
		(6-) 保全に関する不具合情報のDB化とメーカーとの情報共有システム開発
		(6-) 点検用空中監視ロボットによる点検システム開発
7	セルフステーションにおけるナビゲーションシステムの開発	(7-) 音声形式での充填ナビゲーションシステムの開発
		(7-) ガス充填後の異常や不具合の有無を確認するシステムの開発

水素ステーション以外の類似施設を対象とした事例調査

水素ステーションの設置数は今後増加すると見込まれるため、水素ステーションの建設にかかり地元住民

の社会受容性を向上させていくことが急務となっており、地元住民との合意形成の問題に直面してきた水素ステーション類似施設の経験や教訓をステーションの建設に取り入れていく必要があると考えられる。

そこで、今後の水素ステーションの社会受容性向上活動に活かすことを目的として、住民にとって身近な類似施設について社会受容性向上の取り組み調査を行った。調査施設は、ごみ焼却炉、救急病院、幼稚園・保育園・小学校等施設、コンビニエンスストア、ガソリンスタンド、リサイクル施設、火葬場を対象とした。

本事例調査により、今後の水素ステーションの社会受容性向上活動へのいくつかの示唆を導出した。

トータル運用技術の開発(担当:HySUT)

水素および FCV、水素ステーションに関する社会受容性調査を実施し、上記に加え社会受容性の調査結果を合わせ、安全・安心という観点から広くステーションの運用技術に展開した。

(3) 社会受容性向上活動

展示会への出展

a. FC EXPO2015

FC EXPO2015(平成27年2月25日～2月27日、東京ビッグサイト)に出展し、FCV及び水素ステーションの理解促進と社会受容性の向上を図った。HySUTブース内来場者数の総合計は48,414人(ブース内来場者数合計:45,579人、プレゼン参加者数合計:2,835人)であった。出展の様子を図17から図20に示す。なおHySUTブース内にて社会受容性調査も行った。



図17 FC EXPO2015 HySUTブースの様子



図18 FC EXPO2015 FCV試乗会の様子



図19 FC EXPO2015 HySUTブースの様子

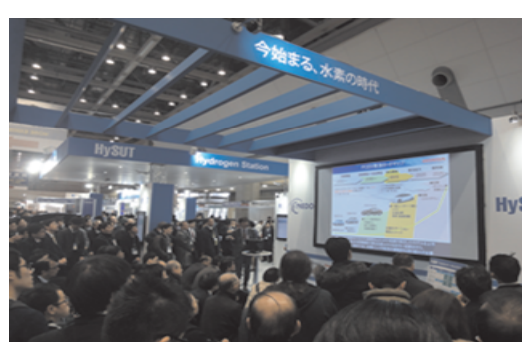


図20 FC EXPO2015 HySUTブースの様子

b. 東京モーターショー2015

東京モーターショー2015(平成27年10月29日～11月8日、東京ビッグサイト)に出展し、FCV及び水素ステーションの理解促進と社会受容性の向上を図った。出展内容は以下の通りであった。

・模擬水素ステーション、ディスペンサー、安全設備
・水素ステーションの整備状況、水素と

は、FCV とは、安全の考え方 ・FCV 実車展示(MIRAI) ・プレゼンテーション(水素ステーション整備、ブース説明) ・子供向け実験イベント

HySUT ブース内来場者数の総合計は 34,482 人(プレゼンテーション参加者数 4,304 名、実験イベント参加者数 200 名を含む)であった。出展の様子を図 21 と図 22 に示す。なお HySUT ブース内にて社会受容性調査も行った。



図 21 東京モーターショーHySUT ブースの様子

図 22 東京モーターショー子供向け実験イベントの様子

c. FC EXPO2016

FC EXPO2016(平成 28 年 3 月 2 日～3 月 4 日、東京ビッグサイト)に出展し、FCV 及び水素ステーションの理解促進と社会受容性の向上を図った。出展内容は以下の通りであった。

・模擬水素ステーション、ディスペンサー、安全設備 ・水素ステーションの整備状況、水素とは、FCV とは、安全の考え方 ・FCV 展示(CLARITY FUEL CELL、MIRAI カットモデル) ・プレゼンテーション(FCV の普及、水素ステーション整備等) ・FCV 試乗会(MIRAI 5 台)

HySUT ブース内来場者数の総合計は 30,338 人(プレゼンテーション(計 36 回)への参加者数 2,677 人を含む)であった。FCV 試乗会参加者数は 419 人であった。出展の様子を図 23 と図 24 に示す。なお HySUT ブース内にて社会受容性調査も行った。



図 23 FC EXPO2016 HySUT ブースの様子

図 24 FC EXPO2016 FCV 試乗会の様子

d. FC EXPO2017

FC EXPO2017(平成 29 年 3 月 1 日～3 月 3 日、東京ビッグサイト)に出展し、FCV 及び水素ステーションの理解促進と社会受容性の向上を図った。出展内容は以下の通りであった。

・水素ディスペンサー ・水素ステーションジオラマ ・FCV 外部給電器 ・FC スタック、高圧水素タンクの模型 ・商用水素ステーション分布図、水素ステーションバックヤード壁面展示など ・FCV 展示(CLARITY FUEL CELL、MIRAI カットモデル) ・FCV 試乗会(TOYOTA MIRAI、HONDA CLARITY)

HySUT ブース内来場者数の総合計は28,002人であった。FCV 試乗会参加者数は430人であった。出展の様子を図25と図26に示す。なおHySUTブース内にて社会受容性調査も行った。



図25 FC EXPO2017 HySUT ブースの様子



図26 FC EXPO2017 FCV 試乗会の様子

(4)再委託事業(株式会社テクノバ)

水素ステーションや水素安全全般に係るワンストップポータルの開発と講演会の実施を行った。平成29年9月までに水素情報ポータル検討会(座長:横国大 太田健一郎 特務教授)を計14回開催し、検討を行った。

ワンストップポータルによる水素の認知性向上活動を実施し、平成26年度に「水素エネルギーナビ」(<http://hydrogen-navi.jp/>)を一般公開した(図27、図28参照)。さらに平成28年度は動画作成を外注し、「Suiso なセカイへ」を完成させた。動画はFC EXPO2017会場にて紹介すると共に水素エネルギーナビに実装した。



図27 水素エネルギーナビの画面



図28 水素エネルギーナビの画面

3.2 成果の意義

商用水素ステーションの事故・トラブル事例、対策を収集した水素ステーションセーフティーデータベースを構築し、運営者が検索・活用できる仕組みを完成した。データ集計による分析・解析を行い、また重要事例の深掘りを実施し、トラブル削減に向けて水素ステーション運営会社への周知・展開を行った。

平成27年度に完成した「水素ステーション教育設備・訓練内容指針(案)」を基に「水素ステーション運営訓練力

リキュラム」を完成し、山梨県に完成予定の水素技術センターにて試験運用を行う予定である。

このカリキュラムの活用は、今後の水素ステーションの拡大や新規参入促進の一助となる。

次世代水素ステーションに必要な技術開発項目を検討し、フォアキャスト方式で28件、バックキャスト方式で19件を抽出して、開発テーマ候補として報告を完了した。(平成27年度に完了)この開発テーマ候補の中から次期開発事業が選定される予定。

日本で初となる、水素エネルギーに関する一般向けポータルサイトである「水素エネルギーナビ」を開設し、理解促進のために動画も製作した(テクノバ殿への再委託事業)。またFC EXPO等でのHYSUTブース出展や国内外でプレゼンを行い、社会受容性の向上を図った。

4. まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

水素ステーション運営者がセーフティーデータベースを検索・活用することや、データ集計による分析・解析、重要事例の深掘りにより、水素ステーションでのトラブル削減が期待でき、安全・安心な水素ステーションの運用に貢献できる。

「水素ステーション教育設備・訓練内容指針(案)」と「水素ステーション運営訓練カリキュラム」の水素技術センターでの試験運用が、安全・安心な水素ステーションの拡大や新規参入促進の一助となる。

次世代水素ステーション技術開発については、この技術開発候補の中から、次世代水素ステーションに必要な技術開発が完成し、更なる安全・安心な水素ステーションの運営に寄与することが期待できる。

社会受容性の向上は、水素ステーションの本格普及期に向けて、継続的に必要なテーマである。

5 . 研究発表・特許等

- 研究発表・講演、文献等、その他 -

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	平成 26 年 11 月 10 日 ~ 13 日	2014 Fuel Cell Seminar	Activities of FCV/Infrastructure Demonstration Program in Japan: Poster Presentations-Fuel Cell Seminar & Energy Exposition (2014,November 9-16,Los Angels)	曾根洋一
2	平成 27 年 2 月 26 日	FC EXPO 2015 専門技術セミナー	HySUTにおける FCV・インフラ実証事業の取り組み	池田哲史
3	平成 27 年 3 月 25 日	NEDO 海外水素ステーション調査報告会	海外水素ステーション動向	山梨文徳
4	平成 27 年 5 月 29 日	第 22 回 FCDIC 燃料電池シンポジウム	海外水素ステーション動向	山梨文徳
5	平成 27 年 5 月 25 日	九州大学主催 水素ステーション動向講演会	『そこまで来ている水素の未来』 ~ 国内の水素供給インフラ普及に向けた取り組み ~	山梨文徳
6	平成 27 年 10 月 20 日	6th International Conference on Hydrogen Safety, ICHS 2015	Research and development about safety improvement of hydrogen refueling stations	廣瀬正典
7	平成 28 年 6 月 13 日 ~ 6 月 16 日	WHEC 2016	FCV and Hydrogen Infrastructure Development Activities in Japan	阿部正
8	平成 28 年 11 月 10 日	日本エネルギー学会、天然ガス部会合同シンポジウム	燃料電池自動車普及に向けた水素インフラに関する取り組みと今後の展望	曾根洋一
9	平成 29 年 3 月 8 日	FCCJ 燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等 動向説明会	水素ステーション高度安全・安心技術開発	曾根洋一
10	平成 29 年 3 月 8 日	FCCJ 燃料電池・水素に係る規制見直し・標準化等 動向説明会	水素エネルギー情報ポータルサイト	丸田昭輝
11	平成 29 年 7 月 6 日	FCCJ FCV 水素インフラ WG	水素ステーション高度安全・安心技術開発	阿部正
12	平成 29 年 9 月 11 日	6th International Conference on Hydrogen Safety, ICHS 2017	Research and Development for Safety Improvement of Hydrogen Refueling Stations in Japan	阿部正

(111-2)「水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全基盤整備に関する研究開発 / 高圧水素ガス用高窒素高強度ステンレス鋼配管の溶接継手に関する研究開発」

委託先：(株)エア・リキード・ラボラトリーズ

成果サマリ(実施期間：平成26年度～平成28年度)

- ・溶接ガス、溶接材料を開発し、それらを含めて溶接条件の最適化を行った。母材の引張強さの規格値以上の配管溶接継手の引張強さを達成した。
- ・溶接部の窒素濃度分布、結晶粒径、フェライトの定量評価から強度特性との関連付けを行い、溶接パラメータ最適化の指針となるデータを取得した。
- ・配管溶接継手の高圧水素ガス中のSSRT試験、圧力サイクル試験と水素チャージ材の疲労試験によりSSRT特性、疲労強度と疲労寿命に水素の影響が無いことを明らかにした。

背景/研究内容・目的

水素ステーション用高圧水素ガス配管に高窒素高強度ステンレス鋼の使用と溶接継手の導入が期待されている。窒素は材料中に固溶することで材料強度を向上させるが、溶接熱によって窒素放出が生じる懸念がある。溶接継手の導入には、高窒素濃度および高強度維持を達成する溶接技術の開発が必要である。

本研究開発は以下の三項目からなる。

A：高窒素高強度ステンレス鋼配管の溶接技術開発

B：溶接金属の金属組織評価

C：溶接部の水素脆化評価

項目Aでは、高窒素高強度ステンレス鋼XM19を用いて、実用化を念頭に置いた高窒素濃度および高強度維持を達成する溶接技術開発を行う。溶接継手の材料特性には、溶接ガス、溶接材料、溶接パラメータ等、様々な因子が関係している。項目B、Cにて溶接継手の特性評価を行い、溶接条件の最適化および溶接継手の健全性評価を行う。

研究目標

実施項目	目標
A	高窒素濃度・高強度維持を達成する溶接技術開発
B	溶接金属の組織評価および強化機構の解明
C	溶接継手の疲労特性および水素脆化特性評価

実施体制及び分担等

(再委託)

NEDO	(株)エア・リキード・ラボラトリーズ (実施項目A)	九州大学 (実施項目B、C)
------	-------------------------------	-------------------

これまでの実施内容 / 研究成果

実施項目A

高窒素高強度ステンレス鋼配管の溶接技術開発については、シールドガス成分、フィラー（インサートリング）と関連させる形で溶接電流、溶接時間を変化させて、溶接継手の引張強度が母材の規格強度を越える溶接条件を確定した。とくに溶接金属部での脱窒を抑制するため、ヘリウムに窒素を添加したシールドガスを開発した点が本事業の重要なポイントである。インサートリングには配管素材と同一の材料を用い溶接施工性を改善する形状をデザインした。なお、引張強さが母材の規格強度を上回った溶接継手については、引張試験の破断は母材部から生じた。

実施項目B

溶接金属の金属組織評価については、溶接部に生成する相の種類や体積率に及ぼす窒素濃度等の影響を明確化するために、XM-19の平衡状態図を作製した。その状態図により、窒素量の減少とフェライトの生成の定量的な関係を予測した。さらに、溶接部のEPMA成分分析を行い、溶接継手における溶接部の強度低下と脱窒量との関係を明らかにした。また、溶接時間が長い方が溶接継手の引張強度が高くなった結果に対して、フェライト相の発達有益であることを推定した。

実施項目C

配管溶接継手の水素脆化特性の評価として、配管溶接継手から切り出した試験片に対する高圧水素ガス中のSSRT試験、配管溶接継手の疲労試験、高圧水素ガス圧力サイクル試験を実施した。溶接継手の引張強さが母材の規格強度を越える溶接継手について、温度-10、室温、50で高圧水素ガス中(-10は70MPa、他の温度は85MPa)でSSRT試験を実施した結果、相対絞りはいずれの条件下でも0.8を大きく越えていた。その配管溶接継手の疲労特性に対しても、水素の影響が認められないことをS-N線図、破壊力学的評価、破面観察により確認した。研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
A	溶接材料とガスおよび溶接パラメータの最適化	
B	試作溶接継手の金属組織評価	
C	疲労特性および水素脆化特性評価	

実用化の見通し

本プロジェクトで開発した溶接継手の水素ステーションでの実用に向け、承認手続きを開始した。さらに、本溶接継手を適用した予備経済分析を行った。

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
3	0	6	0

課題番号： III-2

水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全基盤整備に関する研究開発 /

高圧水素ガス用高窒素高強度ステンレス鋼配管の溶接継手に関する研究開発

株式会社エア・リキード・ラボラトリーズ

1. 研究開発概要

高圧水素ガス配管用に高窒素ステンレス鋼の使用と溶接継手の導入が期待されている。窒素は材料強度と耐水素脆化特性を向上させる重要な元素であるが、溶接熱によって窒素放出または窒素の存在状態変化が生じることが懸念される。本研究開発は、大きく分けて以下の3つの研究開発項目からなり、これらの研究開発成果を活用することで高圧水素ガス配管への高窒素高強度ステンレス鋼溶接継手導入を目指す。

- ・高窒素高強度ステンレス鋼配管の溶接技術開発
- ・溶接金属の金属組織評価
- ・溶接部の水素脆化評価

以下にそれぞれの研究開発項目の概要を述べる。

1.1 高窒素高強度ステンレス鋼配管の溶接技術開発

本研究開発では、高窒素高強度ステンレス鋼 XM19 を用いて、溶接継手の窒素量低減抑制および高強度維持を達成するガスタングステンアーク溶接手法を開発する。開発した溶接継手の普及のため、溶接には自動溶接機を使用する。課題解決のため以下の3つの手法を用い、開発溶接継手に対して大気中材料強度評価を行う。

(1) 高窒素ステンレス鋼用溶接ガスの開発

一般に、アルゴンやヘリウムといった不活性ガスが溶接ガスとして使用されるが、窒素量低減抑制には窒素ガスの添加が有効であると考えられる。しかし、多量の窒素ガスが溶接ガスに含まれるとタングステン電極の寿命を著しく低下させることが知られているため適切な窒素ガス濃度を決定する必要がある。また、溶接継手の高窒素濃度維持と溶接作業性の両立のため、その他ガスの混合についても検討を行い最適な溶接ガスの開発を行う。

(2) 溶接材料を用いた溶接技術の確立

小径配管の自動溶接では、溶接材料を使用しないノンフィラー突合せ溶接が広く用いられているが、ノンフィラー溶接ではアンダーカットと呼ばれる溶接欠陥が生じる懸念がある。溶接継手の高強度維持にはアンダーカットの防止と余盛りの確保が効果的と考えられ、それらは溶接材料の使用によって得られる。しかし、溶接材料の使用方法によっては溶接作業の負担増加を招く可能性がある。本研究開発では、高強度維持と作業性を両立する溶接材料の開発を行うとともに、溶接材料に使用する鋼種についても検討を行う。

(3) 溶接パラメータの最適化

使用する溶接ガス、溶接材料によって溶け込み量は変化する。上記(1)、(2)で開発した溶接ガス、溶接材料使用時に完全溶け込みおよび均一なビードが得られる溶接パラメータを決定するとともに開発した溶接継手が所定の材料特性を得られる溶接パラメータ範囲の検討を行う。

1.2 溶接金属の金属組織評価

溶接によって溶接金属および熱影響部(Heat Affected Zone: HAZ 部)の金属組織は変化する。材料の機械的

性質、耐食性、水素脆化特性といった様々な材料特性は金属組織と密接に関係しており、高圧水素配管に溶接を適用するにあたって第一の基準になると思われる溶接継手の強度を評価するには、母材および溶接金属の組織ならびに強化機構の理解が重要となる。具体的な金属組織評価項目を以下に示す。

(1) 窒素濃度分布

溶接熱によって材料中の窒素は材料外に放出される。溶接ガスと溶接材料の開発による溶接部窒素濃度の変化量を測定し、窒素濃度が材料特性におよぼす影響について調査する。また、窒素濃度プロファイルを取得することで母材部～溶接金属の窒素濃度遷移を明らかにする。

(2) フェライト分布と組成分配

オーステナイト系ステンレス鋼の溶接金属には フェライトと呼ばれる金属組織が形成される。多量の フェライトが形成されると耐食性や切欠き靱性の低下だけでなく耐水素脆化特性の低下が生じる。溶接金属部の フェライト量を測定し、材料特性および水素脆化特性に及ぼす影響の評価を行う。

(3) 析出物の種類と分布

本材料は、材料中に多量のクロムと窒素を含有するため、溶接後の冷却速度が遅いと粗大なクロム窒化物が析出する可能性がある。粗大なクロム窒化物が多量に形成されると基体組織の固溶窒素濃度を低下させるだけでなく、低温靱性や耐食性を低下させる可能性がある。溶接金属の組織観察を行い、析出物の種類および分布の調査を行う。

(4) 母材と溶接金属の金属組織観察

上記の項目に加えて、結晶粒径やオーステナイト安定度(マルテンサイト変態量)など、材料特性および水素脆化特性に関わる総合的な金属組織観察を行う。

1.3 溶接部の水素脆化評価

配管溶接部の水素脆化評価を実施するにあたって、材料の疲労特性評価が必須項目となる。配管内圧力変動に起因する疲労破壊は円周方向に負荷される応力によって配管が軸方向に割れるように生じるため、小径配管の内圧疲労評価に際しては特別な疲労試験が必要である。本研究開発では、高圧水素ガス中低速引張試験および配管圧力サイクル試験に加えて、配管圧力サイクルを模擬した疲労試験を実施し水素環境中材料強度評価を実施する。具体的な評価試験項目は以下である。

(1) 内圧模擬疲労試験(水素チャージ材)

従来の配管圧力サイクル試験では、実ガスを用いて配管に応力サイクルを負荷するため平滑材や疲労限度付近の疲労特性を取得することが困難であった。本研究開発では、機械的手法を用いた内圧模擬疲労試験法を開発し、疲労限度を含む広い応力範囲で溶接継手の疲労特性評価を行う。水素環境下での疲労特性評価には水素チャージ材を使用する。

(2) 高圧水素ガス中低速引張試験(Slow Strain Rate Test: SSRT)

材料の水素脆化特性を評価する最も基本的な試験法の一つに SSRT 試験がある。本研究開発においても高圧水素ガス中で SSRT 試験を実施し、大気中 SSRT 試験との絞り比を評価することで溶接継手の水素脆化特性を取得する。

(3) 高圧水素ガス配管圧力サイクル試験

内圧模擬疲労試験は、比較的、簡便に溶接継手の疲労特性を取得可能であるが、実際の使用条件で負荷される圧力サイクルを完全に再現することは困難であるので一部の溶接配管に対して配管圧力サイクル試験を実施し、内圧模擬疲労試験結果との整合性評価を行う。

2. 研究開発目標

2.1 高窒素高強度ステンレス鋼配管の溶接技術開発

(1) 平成 26 年度目標

高窒素ステンレス鋼用溶接ガスの開発

溶接部の高窒素濃度維持および作業性の両立が可能な溶接ガスの開発を行う。窒素ガスを含む複数のシールドガスを製造し溶接試験を行うことで、溶け込み量、溶接作業性、溶接継手強度、溶接部窒素濃度等によぼすシールドガスの影響を検証し、最適なシールドガス混合比の検討を行う。

溶接材料を用いた溶接技術の確立

アンダーカットを防止し、余盛りを確保することで溶接継手の高強度維持を達成するため溶接材料の開発を行う。種々の溶接材料を試作し、余盛り量と溶接継手強度の関係性を調査することで、高強度維持と作業性の両立が可能な溶接材料を開発する。原則、溶接材料の材料には XM19 を用いるが、必要に応じて他鋼種の使用も検討する。

大気中材料強度評価

母材および試作した溶接継手の材料試験を行い、溶接ガスおよび溶接材料が溶接継手強度におよぼす影響を調査する。

(2) 平成 27 年度目標

溶接継手の開発

平成 26 年度の成果をもとに、高窒素濃度維持および高強度維持が可能な溶接手法を開発し、その手法を用いた溶接継手を作製する。具体的な数値目標は、余盛り削除溶接継手強度が母材規格値以上、余盛り付き溶接継手強度が母材実力値以上である。さらに、開発した溶接継手に対して「溶接金属の金属組織評価」および「溶接部の水素脆化評価」を行い、良好な特性が得られない場合には溶接手法の更なる検討を行う。

(3) 平成 28 年度目標

開発溶接継手の事業化推進

開発した溶接技術の事業化に資するデータ取得や関係者との協議、コスト試算等を行う。

2.2 溶接金属の金属組織評価

(1) 平成 26 年度目標

母材と基礎溶接継手の金属組織観察

母材および開発前段階で試作した溶接継手(基礎溶接継手)の金属組織観察を行い、溶接が母材組織に与える影響を明らかにする。金属組織観察結果をもとに溶接手法の改善を随時行う。

(2)平成 27 年度目標

試作溶接継手および開発溶接継手の金属組織観察

平成 26 年度の金属組織観察から得られた知見をもとに、「高窒素高強度ステンレス鋼配管の溶接技術開発」で試作および開発した溶接継手の金属組織観察を行い、溶接金属の健全性評価を行う。

(3)平成 28 年度目標

開発溶接継手の金属組織と破壊の関連付け

開発溶接継手の金属組織を継続して行うとともに、材料試験後の溶接継手の金属組織観察から破壊形態と金属組織の関連性を明らかにし、破壊にともなう金属組織変化(マルテンサイト変態等)を調査する。

2.3 溶接部の水素脆化評価

(1)平成 26 年度目標

水素チャージ材試験計画検討

水素チャージ材の内圧模擬疲労試験に必要な試験条件の決定、試験設備の整備、基礎データの取得を行う。

高圧水素ガス中材料試験計画検討

高圧水素ガス中材料試験に必要な試験条件の決定、基礎データの取得を行う。

(2)平成 27 年度目標

内圧模擬疲労試験

基礎溶接配管の内圧模擬疲労試験を実施し、溶接部の疲労特性におよぼす水素チャージの影響を明らかにする。材および高圧水素ガス中の SSRT から得られた試験結果のデータ解析を行い、試験環境の違いが静的水素脆化特性に及ぼす影響を解明する。

高圧水素ガス中 SSRT 試験

高圧水素ガス中 SSRT 試験を実施し、高圧水素ガス中と大気中の絞り比(Relative Reduction of Area: RRA)を取得する。水素ステーション用高圧水素ガス配管に溶接継手を導入するためには、現在、使用が認可されている SUS316(Ni 当量材)と同等以上の耐水素脆化特性($RRA \geq 0.8$)を有する必要がある。開発溶接継手が、 $RRA \geq 0.8$ であることを確認する。

(3)平成 28 年度目標

高圧水素ガス圧力サイクル試験

高圧水素ガス圧力サイクル試験結果の解析を行い、内圧模擬疲労試験との整合性評価を行う。

開発溶接継手の水素脆化評価

全ての水素環境中材料試験から得られた強度データを統合し、開発溶接継手が母材と同等の耐水素脆化特性を有することを確認する。

3. 研究開発成果

3.1 研究開発成果、達成度

(1) 高窒素高強度ステンレス鋼配管の溶接技術開発

溶接継手の強度特性および金属組織は、溶接ガス、溶接材料、溶接パラメータ、使用する溶接機器等、様々な因子が相互に影響した結果得られる。本研究開発では、溶接技術の事業化・普及を念頭に置いて、それぞれの因子の最適化を行い、水素ステーション用高圧水素ガス配管に適用可能な溶接技術、溶接継手の開発を行う。

供試体

供試体は、外径9.53 mm、内径5.13 mmのXM19配管である。XM19はASTM A312で規定されるオーステナイト系ステンレス鋼であり、その最小引張強さは690 MPaである。本供試体に対して、図3.1に示すように配管引張試験を行った結果、0.2%耐力 $\sigma_{0.2} = 583$ MPa、引張強さ $\sigma_B = 899$ MPaであった。このことから本供試体は規格強度を十分に満足していることがわかる。表3.1にXM19化学成分の規格値と実測値を示す。いずれの化学成分も規格値の範囲内であった。

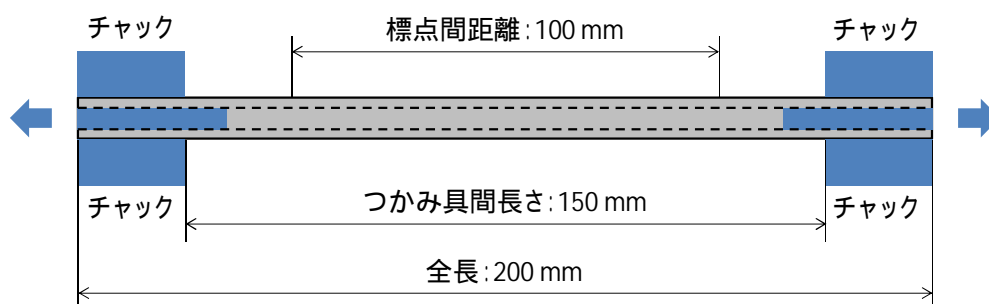


図3.1 配管引張試験

表3.1 XM19 化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Nb	N
規格値	≤ 0.06	≤ 1.00	4.0 - 6.0	≤ 0.040	≤ 0.030	11.5 - 13.5	20.5 - 23.5	1.5 - 3.0	0.10 - 0.30	0.10 - 0.30	0.20 - 0.40
実測値	0.033	0.42	4.20	0.013	0.001	12.06	22.18	2.03	0.16	0.19	0.311

溶接技術開発

a. 配管引張強度におよぼす余盛り(アンダーカット回避)の影響

本事業のインサートリングは、一般的な溶接では溶加材ないしフィラーと呼ばれるものである。形状がリング状で、付き合わせた2本の配管の間に挿入するために、インサートリングと称する。図3.2にインサートリングの形状を示す。インサートリングはパイプ外径よりも外径が大きいリング状で、パイプが隙間なくはめられるように両面からザグリを施してある。このような形状とすることにより、溶接施工時の付き合わせた2本のパイプの軸心調整が不要となり、施工の容易化がはかれる。インサートリングのパイプの覆い被さる部分をリップと称する。リップの大きさによって余盛りの大きさも制御することができる。

図3.3にインサートリングの有無により、余盛りの形状がどのように変化するかを比較して示す。インサートリング

未使用の図(b)の溶接では、素材の配管の肉厚よりも薄い部分ができている。このような形状は、溶接時の強度にとっては致命的に悪影響を及ぼす。一方、インサートリングを使用した図(c)の溶接では、インサートリングにより溶接金属が補給され、肉厚が薄くなる現象を防止することができた。

図3.4に、インサートリングのリップ寸法と余盛り付きの溶接継手の引張強さの関係を検討した結果を示す。図にはさらにインサートリングの寸法に応じた作業性についても示している。リップの寸法が大きくなると溶接継手の引張強さも増加した。これはリップ寸法が大きくなるにつれて余盛りも大きくなり、溶接部の断面積が増加するためである。ただし、リップが大きくなるにつれて溶融させる材料のボリュームも大きくなるために、それだけ溶接施工性が悪化する。

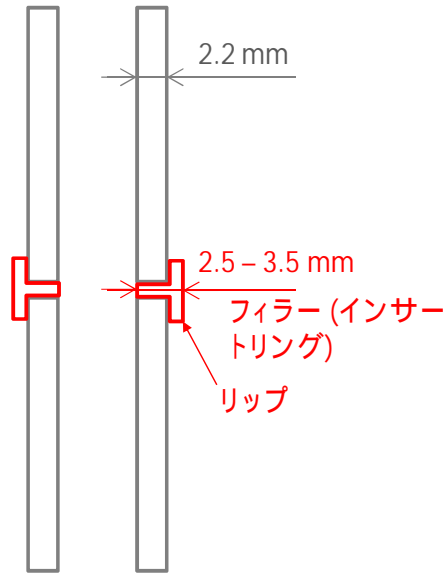
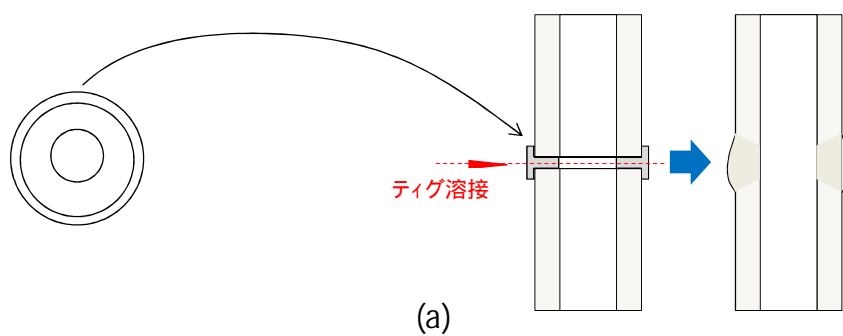


図3.2 インサートリングの形状

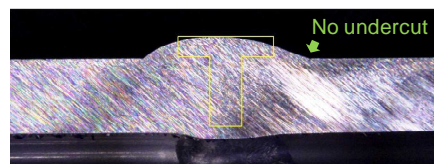


(a)



溶接の断面図(インサートリング無し)

(b)



溶接の断面図(インサートリングあり)

(c)

図3.3 インサートリングの使用による余盛り不足の防止

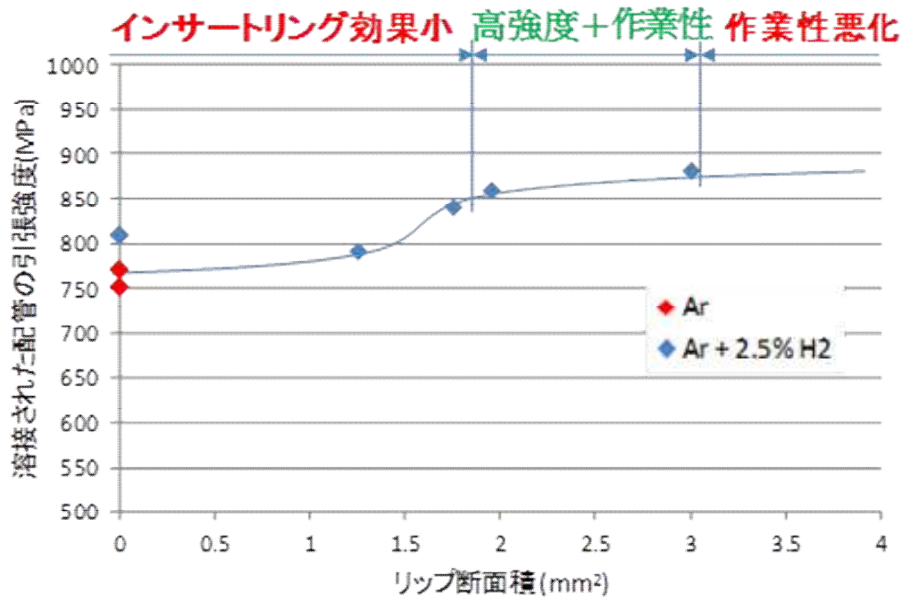


図 3.4 インサートリングの形状と溶接継手の引張強さ、作業性の関係の検討

b. 配管引張強度におよぼすインサートリングの材料

本事業では溶接後も材料中の窒素濃度を維持することができる成分があれば溶接継手の開発に有益であるとの考えのもと、インサートリングの成分についても検討を行った。溶接後も材料中の窒素濃度を維持するためには、溶融金属中の窒素の平衡濃度がクロム濃度に応じて増加する理由により、高クロムのインサートリングの使用が有効と考えられた。そのため、インサートリング材料として、配管素材である XM-19 の成分を基本として、3 mass% および 6 mass% クロム濃度が高い材料を製鋼メーカーに依頼して作製した。図 3.5 は、XM-19 (22 mass% Cr)、XM-19 よりクロム濃度が 3 mass% 高い材料 (25 mass% Cr) および 6 mass% 高い材料 (28 mass% Cr) に対して [シールドガス Ar + 50% He + 2% N₂, バックシールドガス N₂, バックシールドガス圧力 0.9 kPa, 溶接時間 53 s, 溶接電流 41.4 A, 溶接速度 3.7 rpm, 回転数 3.2 回, 溶接電圧 11.2 V] の条件で溶接を行った溶接継手の溶接金属部を抽出し、窒素濃度分析を行った結果を示す。インサートリングの組成が配管と同じ XM-19 の場合は明らかに脱窒が生じており、もともとの窒素濃度 0.3 mass% に対して溶接後は約 0.2 mass% にまで低下している。これはバルク材の固溶強化量に換算すると約 20 MPa の強度低下に対応する。それに対して、Cr を増量したインサートリングを使用すると脱窒量が低減し、6 mass% Cr 増量の場合においては、脱窒量はわずかである。溶融した溶接金属部での Cr 濃度の増大が、溶接ガスと平衡する窒素濃度を高めた結果が凝固時の組成にも明らかに反映されている。

これらのインサートリングを使用して作製した溶接継手の引張試験結果を図 3.6 に示す。高クロムのインサートリングを使用した溶接継手の強度を、同様の条件で溶接した配管素材のインサートリングを使用した溶接継手の強度と比較すると、高クロムのインサートリングの使用により有意に高い強度が得られている。すなわち、開発の方針通り、高クロムのインサートリングを使用することにより溶接時の脱窒が抑制され、溶接継手の強度が改善さ

れることが確認された。しかしながら、高Crインサートリングを使用すると素材が高価であることから施工のコストを押し上げることとなり、本事業の目的に反する面もある。インサートリングの種類については、溶接継手の強度とコストの両面から判断する必要がある。

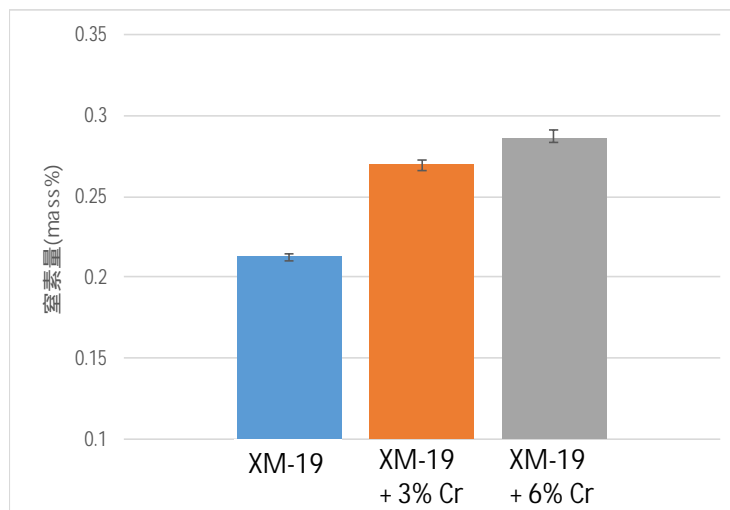


図 3.5 高クロムインサートリングを用いた溶接金属部の窒素濃度分布
溶接条件[(シールドガス Ar + 50% He + 2% N₂, バックシールドガス N₂)]

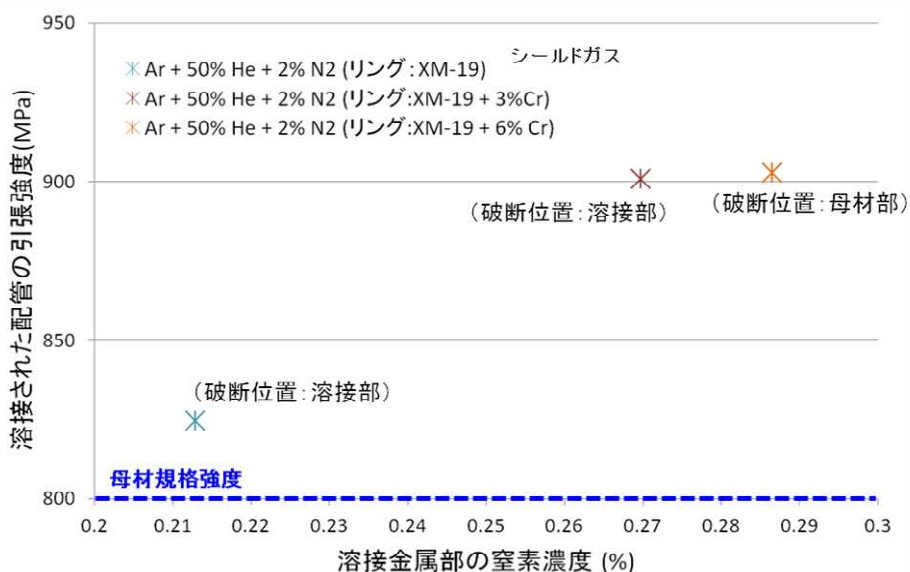


図 3.6 高クロムインサートリングを用いた溶接継手の引張強度

c. 引張強度におよぼすシールドガスの成分

シールドガスの成分については、さらに検討を進めた。高窒素ステンレス鋼である配管材料は、溶融時に窒素量が減少し、強度や耐水素脆化特性の悪化が懸念される。溶接による入熱は溶融部以外の熱影響部(HAZ)の組織にも影響し、結晶粒を著しく粗大化させる。それにより結晶粒微細化強化によって高められていた本材料の

本来の硬さが失われる(HAZの組織の詳細については3章で記載する)。HAZ部は溶融しておらず、窒素が散逸する懸念はないことにより、HAZ部の硬さの顕著な低下は結晶粒の粗大化が原因であると判断される。すなわち、高強度の溶接継手を実現するためには、HAZ部の結晶粒粗大化の抑制も効果的であることが予想される。結晶粒粗大化は溶接入熱により支配されており、HAZの組織の粗大化の抑制に関しては、入熱の小さい溶接が好ましい。以上のことを考慮して、シールドガスの成分については、水素を添加し溶け込み深さを増加させ入熱の影響を最小限とする方法、水素と同様に溶け込み深さを増加させる作用があるHeの添加する方法、窒素の添加による溶融時の窒素吸収の効果について検討した。

溶接時に金属に窒素吸収が起こることを期待して、シールドガスに窒素を混合した。シールドガスに含まれる窒素の量、溶接時間、水素あるいはヘリウム添加をパラメータとして溶接継手を製作し、溶接後の溶接部の窒素濃度を測定した。その結果を図3.7に示す。溶接後の窒素量はシールドガスの成分に影響を受けて変化していることが分かる。いずれのシールドガスを用いても、溶接時間が長くなるにつれて溶接金属部の窒素濃度は低下した。基本となるArをシールドガスに用いたものよりも高い窒素濃度が得られたシールドガスは窒素とヘリウムを混合したものであり、窒素と水素を混合したシールドガスでは窒素濃度は変わらないか、または減少が見られた。この理由は、溶接時に水素と窒素の反応が生じて窒素が消費されているためと考えられる。

次に引張試験を実施して、これらの継手の強度を調べた。図3.8にシールドガスの違いによる溶接継手の引張強さの比較を示す。ただし、本結果は溶加材を加えない場合である。標準的なシールドガスであるArに比べて、窒素とヘリウムを添加した場合は引張強さが顕著に向上した。一方、窒素と水素を添加したのもArだけの場合に比べて溶接継手の強度が向上しているが、向上の度合いはヘリウムに比べて顕著に少ない。水素を添加した場合は溶け込みの深さについてはHeを添加した場合よりも有利であることが明らかにされており、このことは窒素量の減少やHAZ部の結晶粒成長の観点からは有利であると考えられたが、結果はHe添加の場合に比べて低い強度を示した。これは、溶接部で水素と窒素が反応し材料中の窒素が消費されるためと推測される。

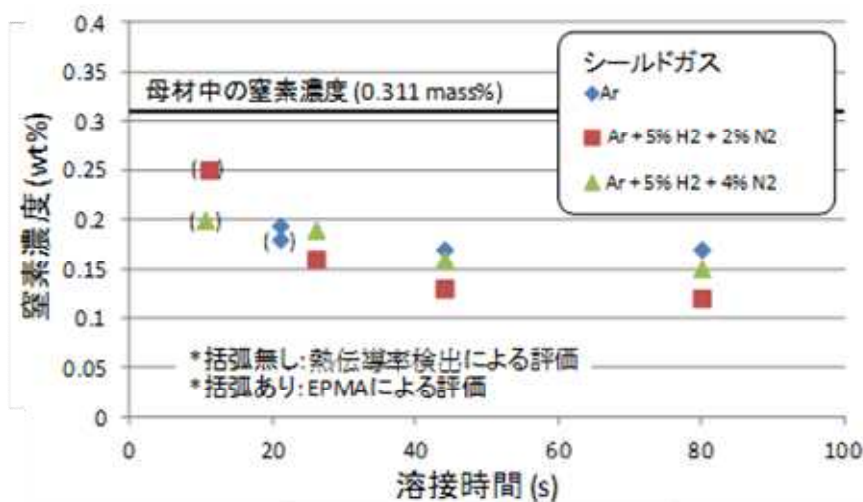


図3.7 シールドガスに窒素を添加した場合の溶接部の窒素量

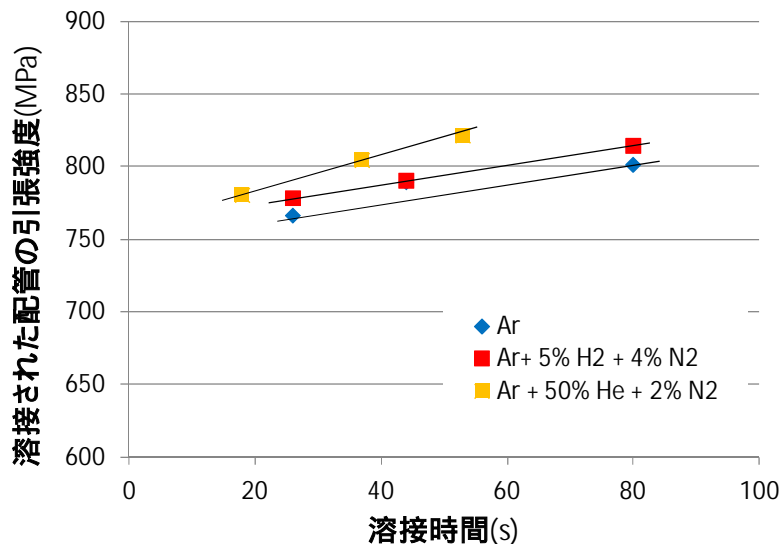


図 3.8 シールドガスの違いによる溶接継手の引張強度の違い

d. 最終的な溶接継手の引張強度

最終的な溶接継手の引張試験結果を表3.2に示す。開発の途中段階の溶接継手でも母材の規格値(800 MPa)を超える強度は得られていたが、溶接ガスの種類、溶接パラメータの管理、溶加材のすべてを制御し、母材の強度と同等の溶接継ぎ手強度を達成した。図 3.9 に示すように、母材 + 5%Cr の成分であるインサートリングを用いた場合には、ビードがそのままであるが、破断は溶接金属部や熱影響部位 (HAZ) ではなく母材で起きており、これは溶接部の強度が母材よりも高いことを示している。

表 3.2 開発した溶接継手の引張強度

インサートリングの種類	引張強さ (MPa)	伸び (%)	破断位置
母材と同一	895	27.9	溶接部
母材 + 3%Cr	901	26.1	溶接部
母材+5%Cr	903	31.1	母材部
母材	899	34.2	---

溶接条件[「Ar + 50% He + 2% N2」: (シールドガス Ar + 50% He + 2% N2, バックシールドガス N2)]



図 3.9 母材 + 5%Cr のインサートリングを使用した配管溶接継手の引張試験片の破断の様相
溶接条件[「Ar + 50% He + 2% N2」: (シールドガス Ar + 50% He + 2% N2, バックシールドガス N2)]

e. コスト試算

水素ステーションの高圧配管組み立てに XM-19 溶接部を使用する場合、気密性を保つために使用されているコーン&スレッド(C/T)技術を用いた継手(エルボー、ティー、クロスコネクタ)や部品(バルブ、逆止弁、圧力計など)を溶接スリーブ、ナット、ガスケットを用いるよりコンパクトな継手や部品で代替することが出来る。(例 フジキン製 UPG®継手)

その場合に予想される削減可能な初期費用は、以下である。

- 配管の肉厚減少による材料費(スレッド加工用の肉厚不要)
- 配管上のスレッド加工費
- 配管や継手を接続する際の作業費(1C/T 継手あたり数分だが、1スリーブ/ナット+ガスケットあたりでは数秒)
- ガスパネルの小型化による費用

しかしながら、C/T 継手と比較して以下の追加費用が必要となる。

- 配管に接続するためのスリーブ、ナットの溶接作業 費(インサートリングの利用を含む)
- 100%溶接されているかを確認するための X 線検査
- XM-19 材料費(高クロム含有のためステンレス 316/316L よりも高コスト)

次の図に示すように XM-19 溶接部とスリーブ/ナット継手を用いた場合、ガスパネル設置時のコスト削減が期待されるが、C/T 継手の場合よりも接続が容易のために総合的に見るとステーションの寿命までに必要なメンテナンスコストの大幅な削減が期待出来るということが最も需要である。

表 3.3 では、試算した高圧配管(>35MPa)用継手、バルブの数と C/T 継手及び溶接 + 継手の関連コストを示す。XM-19 溶接部と関連するガスケット使用継手を用いる場合の試算では、継手コストは量産された場合を想定した。また、実際に XM-19 溶接部を導入する場合、いくつかの追加費用(接施工要領書、溶接施工試験成績書、特定案件事前評価)についても必要だが、今回の試算には加えていない。溶接部 + 継手を用いることで、C/T 継手の場合よりも 110 万円コスト削減可能と試算したが、2way バルブ以外を使用した場合、ガスパネルのコンパクト化に係る削減額については考慮していない。XM-19 の材料費はステンレス 316/316L より高いが、配管の肉厚減により必要材料量が減るため、全体のコストは XM-19 と 316/316L 配管でほとんど違いがないと考えられる。

表 5 は、それぞれ取り外しに 5,6 分かかる C/T 継手に比べ XM-19 溶接部 + 継手の場合は数分ですむため、1年あたりの保守点検費が 110 万円削減が期待可能ということも示している。さらに、C/T 継手とは異なり、XM-19 溶接部 + 継手は隣接機器を取り外すことなく取り外しが可能である。

最後に、溶接部 + ガスケット継手を利用することで水素ステーション運用における漏洩リスクや関連被害を大幅に減らすことが出来るということが主な経済的利点であることを注記する。

C/T 継手は漏洩が起りやすく、理想的には1か月に1度程度各継手のトルクを検査する必要があるということが知られている。一方で稼働中の漏洩量や漏洩頻度がガスケット使用継手よりとても低い。C/T 継手からの漏洩対策としては水素検知器で十分であるが、発見後すぐ県に報告しなければならず、確認が終わるまで場合によっては1～数週間ステーションは稼働を止めなければならない。将来の水素価格が 100 円/Nm³、1日 50 台の車が利用すると仮定し、漏洩が起り1週間ステーションが止まった場合には 100 万円以上の損出となるため、長期的に漏洩リスクを減らすことはとても有益である

表 3.3 開発した溶接継手の引張強度

部品	個数	C/T 継手コスト	溶接部+ 継手コスト	C/T 継手を用いた場合の保守点検コスト (/年)	溶接部+ 継手を用いた場合の保守点検コスト (/年)
エルボー	25	975,000	996,000	350,000	82500
ティ	30	1,575,000	1,617,300	540,000	136500
クロス	5	325,000	359,400	110,000	27000
2 way バルブ	40	3,240,000	1,997,600	640,000	228000
合計		6,115,000	4,970,300	1,640,000	474,000
コスト削減 (vs. C/T 継手)		導入	- 1,144,700	メンテナンス	- 1,166,000

(2) 溶接金属の金属組織評価

溶接された XM19 基礎溶接管において、母材から溶接金属にわたりピッカース硬さ分布を測定すると、溶接金属部で著しい軟化が生じていることが示される (図 3.10)。その一つの要因として、溶接時に生じる脱窒によって固溶強化されていた合金の強度が低下したことが挙げられるが、実際にはそれほど単純な現象ではなく、結晶粒径、析出物の種類と量、相の生成、相間での窒素分配など様々な因子が硬さ変化に影響すると考えられる。また、マクロなピッカース硬さの分布だけでは、HAZ 部での特性変化も捉えられておらず、溶接管の力学特性を予測するには情報が不十分である。XM19 溶接管の特性を理解し、より高性能な溶接技術を確立するには、マイクロ領域の特性やそれを理解するための組織情報、および組織制御技術が必要となる。本研究では、以下の観点から溶接された XM19 基礎溶接管の組織解析を行うことを目的とする。

溶接部～母材間における、

- ・強度(硬さ)分布
- ・窒素濃度分布
- ・フェライト分布と組成分配
- ・窒化物の種類と分布

本項では、上記 4 項目に関して現時点で得られている実験結果について報告する。

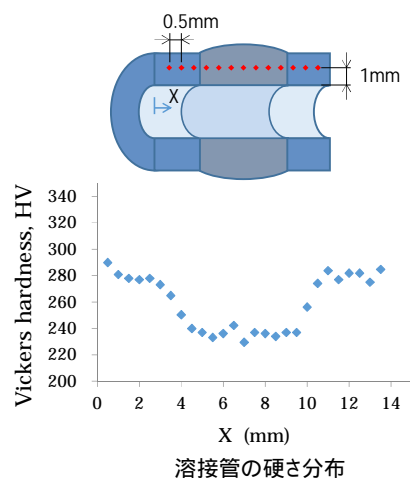


図 3.10 溶接管のピッカース硬さ分布

状態図から予想される窒素濃度と組織の関係

鉄鋼材料の耐水素脆化特性はその金属組織に強く依存することが知られており、安全な部材の製造のために鋼材の組織評価と制御は最も重要な課題のひとつである。とくに溶接部においては、熱履歴の違いにより母材とは組織が顕著に異なり、また場合によってはその化学組成も変化して特性劣化を引き起こすことが懸念される。とくに本研究で対象材料としている XM-19 には約 0.3mass% の窒素が添加されており、溶接時にその量が減少することが報告されている。本鋼において窒素量が減少すると、もともと安定な組織であったオーステナイトが不安定化し、フェライトの生成量が増加する可能性がある。一方、溶接後の熱履歴によっては析出物の種類や量が変化して固溶窒素量も変化し、やはりフェライト量が影響を受けることも考えられる。このような溶接部における組織を理解し特性の最適化を図るには、溶接部に生成する相の種類や体積率に及ぼす窒素濃度および温度の影響を明確化しておくことが必要である。そこではじめに、熱力学的観点から任意の組成および温度での平衡状態における組織を予測する計算ソフト、ThermoCalc.を用いて本鋼における平衡組織に及ぼす窒素濃度と温度の影響について計算を行った。

図 3.11 は ThermoCalc.による計算で得られた供試材の状態図を示す。

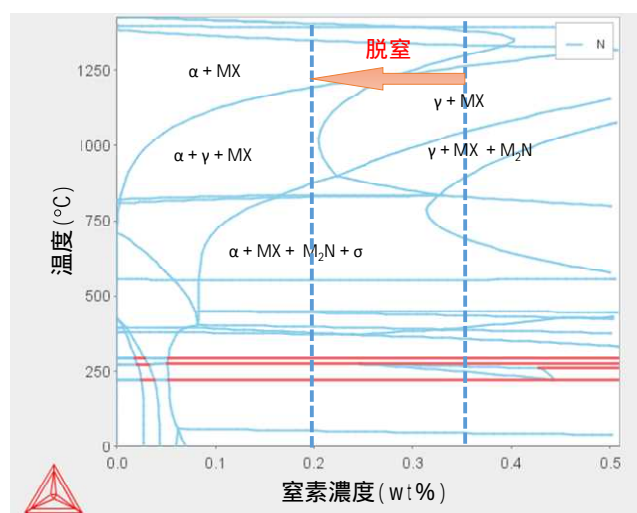


図 3.11 ThermoCalc.による計算で得られた供試材の状態

横軸に窒素濃度、縦軸に温度を取って表している。本計算結果によると、窒素濃度が 0.3% であれば 800 以上の高温ではオーステナイト()中に窒化物が存在した組織が安定であるが、溶接時に脱窒を起こして窒素濃度が仮に 0.2% まで低下したとすると、フェライト()が形成されることが予想される。一方 ThermoCalc.では、温度を指定すると平衡相の種類だけでなく、各相の体積率や組成を求めることもできる。溶接金属部は液相から連続冷却されるため温度を指定することはできないが、例えば拡散性が十分なおおよその下限温度と考えられる 1000 付近での平衡組織を計算すると、表 3.3 に示すようにオーステナイト中にフェライトと MX 型窒化物が共存することになる。注目すべき点はフェライトの組成である。計算では窒素濃度が平均組成よりかなり低く、逆に Cr は著しく濃化していることがわかる。その組成変化によって、溶接部の耐食性や力学特性に影響をうけることになる。

表 3.3 0.2%N まで脱窒した供試材の 1000 における平衡組織(組成の単位は mass%)

	Cr	Ni	Mn	Mo	V	Nb	N	モル分率
オーステナイト	22.0	12.1	5.0	2.0	0.12	0.05	0.16	0.992
フェライト	32.9	5.4	3.8	3.2	0.17	0.03	0.02	0.004
MX	2.0	-	-	0.05	28.0	54.5	15.3	0.004

成果詳細-(610)

なお、800 以下の低温側には フェライトよりさらに Cr が濃化した (シグマ)相が形成されることがわかるが、溶接後の冷却速度が十分速いため、少なくとも溶接ままの組織に 相が現れることはないと考えられる。

(母材/溶接金属) 界面近傍の金属組織、マイクロ硬さ分布と窒素濃度分布

図3.12に溶接部(シールドガス・バックシールドガス Ar100%, インサートリングなし)の光顕組織および母材から溶接金属部にかけて測定した硬さプロファイルの一例を示す。図中の縦点線より左側が母材, 右側が溶接金属部に相当する。まず金属組織に着目すると、溶接金属から1mm以上離れた母材では結晶粒径が6 μ m程度の微細なオーステナイト組織を有しているが、界面に近づくにつれて熱影響を受けて粒成長を生じており、界面近くのHAZ部では粒径が40 μ m程度にまで粗大化している。一方、溶接金属部においては フェライトが分散しているためこの写真の倍率では判別できないほど非常に細かい組織が形成されている。その詳細については次節にて述べる。次に硬さに着目すると、母材部で最大の硬さを示しているが、溶接金属部に近づくにつれて硬さは低下し、界面近傍のHAZ部では約HV50程度の硬さ低下が生じている。この硬さ低下は、各強化機構の定量評価を行った結果、結晶粒微細化強化の低下で生じていることが明らかとなった。一方、溶接金属内部は微細な組織を有しているにもかかわらず母材よりも低い硬さを有している。これは溶接部での脱窒による固溶強化の低下が生じたことを示唆している。

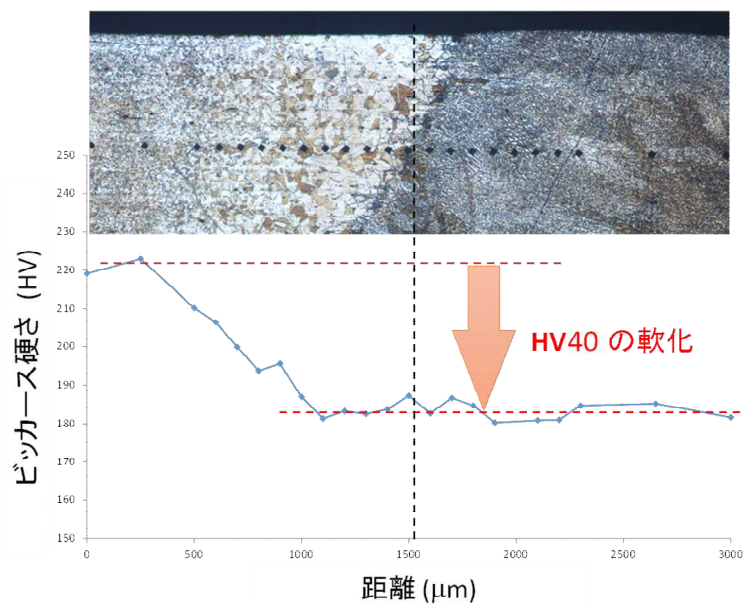


図 3.12 母材/溶接金属界面近傍の光顕組織と硬さ分布
溶接条件[シールドガス Ar, バックシールドガス Ar,]

図3.13にシールドガスに Ar を用いた基準となる溶接継手について、溶接金属部の窒素濃度を EPMA によってライン分析した結果を示す。分析は溶接部の軸方向断面で、表面からの深さ 100 μ m, 500 μ m, 1000 μ m の位置で、軸方向に行った。グラフの中央部に、窒素濃度が低い部分が存在し、この部分が溶接金属部である。

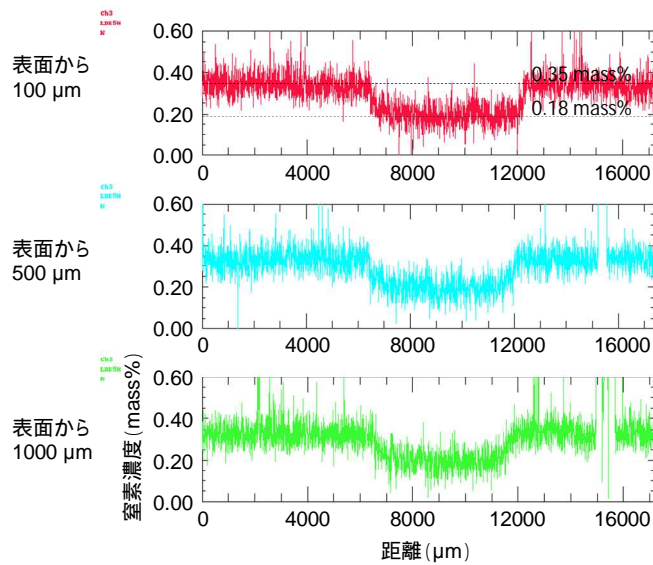


図 3.13 EPMA により測定した溶接金属部の窒素濃度分布
溶接条件[シールドガス Ar, バックシールドガス Ar]

そこでの窒素の濃度の平均値は約0.18%であり、母材の窒素量(0.31%)と比べて大幅に低下している。この結果は前掲図3.12に示される溶接金属部の低い硬さに対応している。さらに、この溶接継手の強度は母材の規格値は越えるが母材の強度以下であり、窒素濃度の維持が高強度実現のために必要であることが示唆される。

溶接金属部の組織評価

以上のように、溶接金属部において窒素濃度が低下しており、それに伴う硬さの低下やフェライトの形成が溶接継ぎ手の特性に多大な影響を及ぼすと考えられる。ここではとくに溶接金属の内部の組織に着目し、より微小なスケールでの組織観察、ならびにX線やEBSDによる定量的な解析を実施した。

図 3.14 は母材と溶接金属の界面近傍の微視組織を光学顕微鏡により高倍率で観察した結果を示す。写真中央の点線より上側がHAZ部、下側が溶接金属部に相当する。HAZ部には図 3.12 でも観察されたように粒径が数十 μm 程度にまで粗大化したオーステナイトが観察され、溶接金属部には、オーステナイト中に分散したフェライトが観察される。フェライトは樹枝状に連なって存在するが、幅は数 μm 程度と微細である。オーステナイトや

フェライトの結晶学的特徴を明確にするため、EBSD(Electron Back Scatter Diffraction)法を用いて図 3.14 と同様に母材/溶接金属界面近傍の組織を観察した結果を図 3.15 に示す。

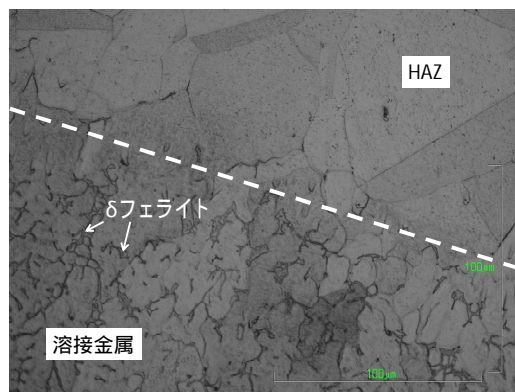


図 3.14 母材/溶接金属界面近傍から得られた光学顕微鏡組織
溶接条件[シールドガス Ar, バックシールドガス Ar]

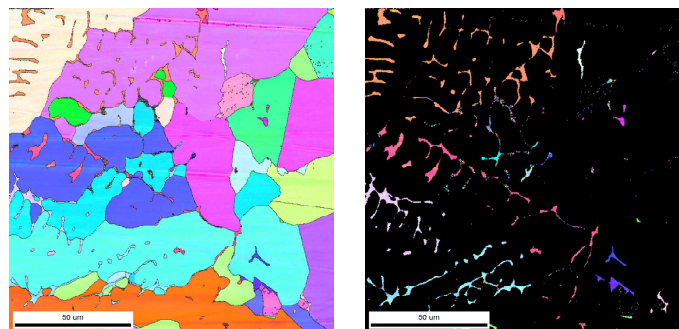


図 3.15 母材/溶接金属界面近傍から得られた EBSD 結晶方位マップ:
(a) fcc 相+bcc 相, (b) bcc 相のみ
溶接条件[シールドガス Ar, バックシールドガス Ar]

図 3.15(a)は fcc(オーステナイト)と bcc(フェライト)の両相における結晶方位を示したカラーマッピングであり、図 3.15(b)は bcc(フェライト)の結晶方位のみを示したものである。溶接金属部のオーステナイトは粒径が 50 μm 前後であり、その形状が等軸ではなく入り組んだ粒界を有するいびつな形であるのが特徴である。また図 3.15(b)から、同一方位のフェライトが、数十 μm 程度のかなり広い領域(コロニー)にわたって存在することもわかる。これらの観察結果は、この微視組織が、図 3.11 の状態図にも示されるように、液相フェライトオーステナイトという相変態過程を経て生成したものであることを示す。

図 3.16 に溶接時間の変化による微視組織性状の変化を示す。測定試料は前掲図 1.4.4 のシールドガスが Ar のものである。

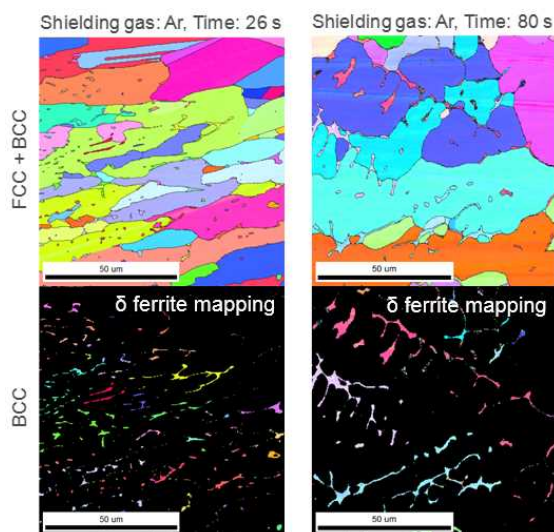


図 3.16 溶接部微視組織の性状と溶接時間の関係

溶接条件[「26s」:シールドガス Ar,バックシールドガス Ar, 溶接時間 26 s インサートリング無し,「80s」:シールドガス Ar,バックシールドガス Ar, 溶接時間 80 s, インサートリング無し]

(3)溶接部の水素脆化評価

本事業で用いている配管の材料は高窒素高強度ステンレス鋼 XM-19 であり,素材の耐水素性は充分であることが他の研究でも認められている。したがって,本事業での課題は,溶接部の水素脆化評価である。その評価は水素脆化特性を調べる代表的な方法である SSRT 試験と,構造物の設計で最も注意が必要である疲労について調べる疲労試験により行った。疲労試験については,配管溶接継手の実際の使用環境にもっとも近い方法として配管溶接継手に高圧水素ガスにより内圧を繰返し負荷する方式(高圧水素ガス圧力サイクル試験),水素チャージを施した配管溶接継手に水圧で内圧サイクルを加える方式(水圧サイクル試験),簡便に多数の試験を実施することが可能で疲労破壊機構の解明に有利な内圧模擬疲労試験で行った。高圧水素ガス圧力サイクル試験と水圧サイクル試験については,高圧ガス配管をそのままの肉厚で評価できるだけの高圧を負荷できる試験装置は内外に見当たらないため,本事業では初期欠陥を導入して評価を実施した。

内圧模擬疲労試験法の開発

図3.17に,本研究開発の一環で実施した配管未溶接材の内圧による破裂試験で見られた破壊の様相を示す。図のように,配管の内圧による破壊は,配管が軸方向に割れるように起きている。これは内圧により配管に発生する応力は,円周方向の成分が最大であることによる。このような応力状態は疲労試験にも同様であり,配管溶接材の内圧変動による疲労の評価が目的である本研究開発にとって,配管の軸方向に疲労き裂を生じる疲労試験法の開発が必須である。一般に広く行われている軸荷重や曲げ荷重形式の疲労試験では,疲労き裂が試験片の軸に対して直角方向に生じるため,内圧による疲労破壊を模擬することは困難である。一方,内圧を繰り返す疲労試験は,想定している配管の疲労破壊そのものを評価できるが,ガスの圧縮による発熱,内圧の繰返し速度が数 Hz と低いこと,実物の配管を疲労破壊させるには相当に高い内圧を負荷できる試験機を用意するか配管の肉厚を薄く加工するかしなければならないことなど,限られた研究期間内で目的を達成するためには多数のバリアがある。



図 3.17 内圧による管の破壊様式

図 3.18 に、本研究で開発した内圧模擬疲労試験方法の原理を示す。図のように、上下の極を圧縮するように配管に線状の荷重を負荷すると、荷重線直下の配管内面には引張の円周方向応力が発生する。き裂はこの円周方向応力によって発生・進展するため、配管軸方向にき裂が発生する内圧による疲労破壊の様式が再現される。線荷重は通常の疲労試験と同様の機械的な方法をもって与えることができるため、数十 Hz の負荷周波数により効率的な評価が可能である。さらに、ある安全率をもって厚肉につくられている実物の配管を疲労破壊させるだけの荷重を負荷することも可能である。その上、水素チャージを施した配管を試験片に用いたり、水素ガス容器付きの疲労試験機を用いたりすることにより、配管の疲労強度に及ぼす水素の影響を解明することも可能である。ただし、線荷重による円周方向応力の肉厚方向の分布は、内圧により生じる応力分布とは完全には一致しないため、この方法の適用範囲を明確にする必要がある。

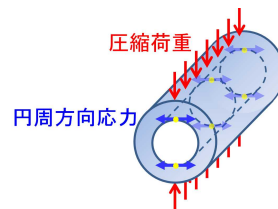


図 3.18 内圧により配管に疲労破壊を生じる応力を模擬する方法

配管を上下から圧縮する方法による疲労試験が、内圧の繰返しによる疲労を模擬するために妥当であるかどうか検証するために、有限要素法(FEM)による解析を行った。解析に使用したモデルを図 3.19 に示す。き裂の計算を行うため、内圧負荷の解析にも軸対称ではなく、1/4 対称モデルを使用した。有限要素分割はき裂の部分で最小にし、その寸法は $1\ \mu\text{m}$ とした。要素には平面ひずみ要素を定義し、二次元弾性解析を行った。モデルに付与した材料定数は、弾性係数 198GPa 、ポアソン比 0.3 である。モデルは実物の配管と同じ大きさ(外径 4.88mm 、内径 2.34mm 、肉厚 2.34mm)となるように作製した。

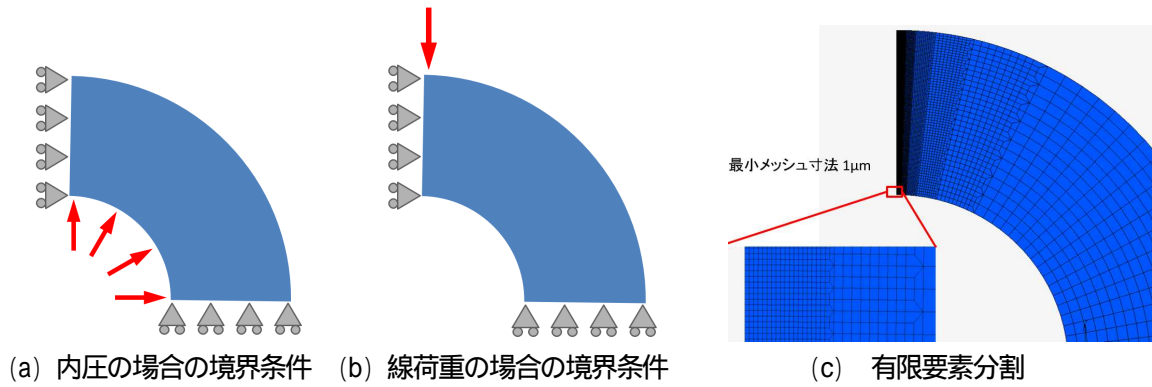
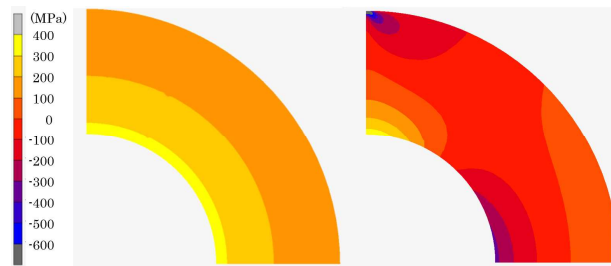


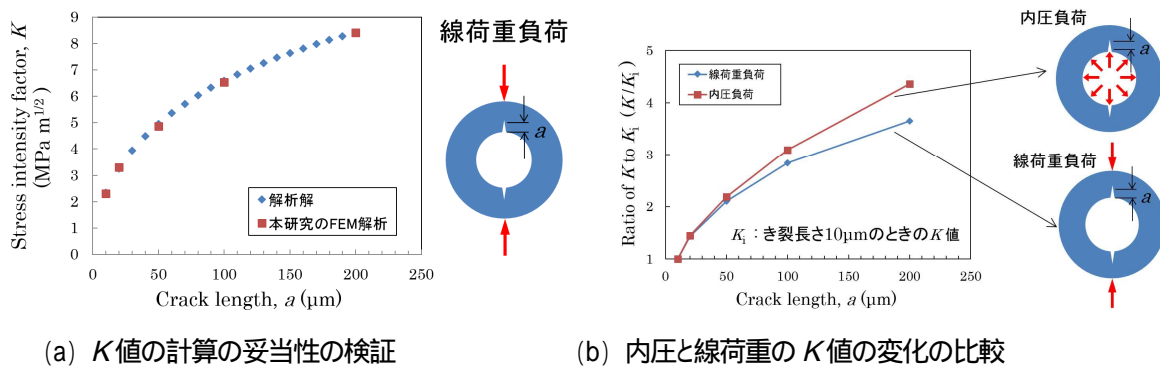
図 3.19 内圧模擬疲労試験の妥当性検証のための有限要素法解析モデル

図 3.20 に配管断面における円周方向応力分布を示す。内圧を負荷した場合、引張の円周方向応力が発生している。円周方向応力は内面で最大である。一方、線荷重の場合は荷重点直下に限定されるものの内面に最大の引張円周方向応力が発生している。



(a) 内圧 200MPa の場合 (b) 線荷重 4kN の場合
図 3.20 配管断面における円周方向応力分布の比較

図 3.21 に、有限要素モデルにき裂を導入して、き裂の応力拡大係数(K 値)を求めた結果を示す。 K 値は変位外挿法によって求めた。図(a)は解析解(村上、岸根、鶴、機論 A52-480 (1986) 1855-1863)と本研究の FEM 解析結果の比較を示す。両者の結果は良く一致しており、本解析が妥当であることが確認された。



(a) K 値の計算の妥当性の検証 (b) 内圧と線荷重の K 値の変化の比較

図 3.21 配管のき裂の解析

図(b)はき裂が成長するにつれて生じる K 値の変化を内圧の場合と線荷重の場合で比較したものである。き裂が短い間は、内圧と線荷重による K 値はよく一致した。き裂長さが大きくなるにつれて線荷重の K 値が低めになる傾向を示し、き裂長さが 100 μm に達すると両者の差は約 10%となった。

図 3.22 に、配管側面のひずみをき裂長さとの関係により示す。図のように、配管側面のひずみはき裂の成長とともに単調に増加しており、また、この関係はひずみの初期値で基準化したひずみを用いれば荷重の大きさに関係なく一本の曲線で表される。そのため、配管にひずみゲージを貼り付けて疲労試験中にひずみを連続的に測定すれば、この関係に基づいてき裂長さの推定ができる。この方法により、上図(b)のようなき裂が長くなった時に内圧と線荷重の状態が乖離する問題を解決した。

以上の解析により、内圧の繰返しにより配管に生じる疲労破壊を、線荷重で模擬する試験方法の原理が確立された。

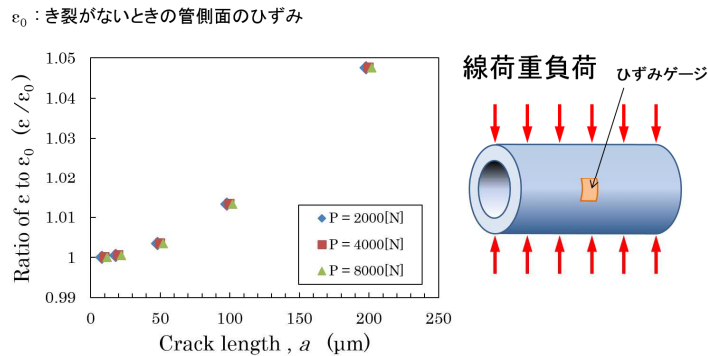


図 3.22 き裂成長にともなう配管側面のひずみの変化

図 3.23 に、この方式で疲労試験を実施し、疲労破壊した配管の写真を示す。疲労き裂は配管の軸方向に発生しており、内圧の繰返しによる疲労の場合と同様の破壊モードが再現できた。

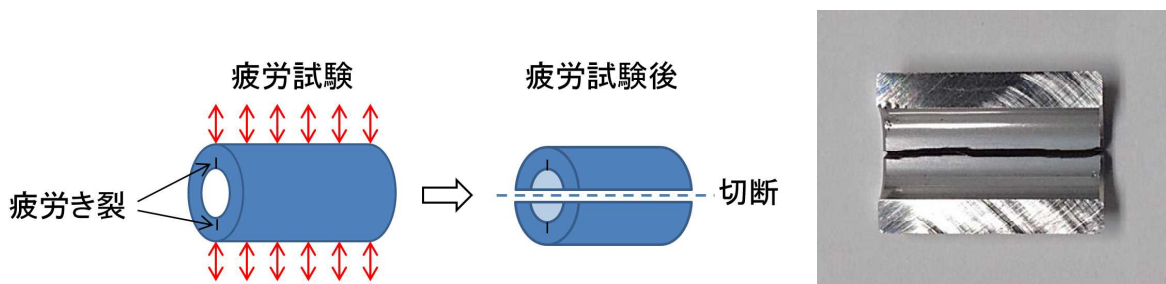


図 3.23 内圧模擬疲労試験の疲労き裂

内圧模擬疲労試験

図 3.24 に、上述のような負荷形式による疲労試験を実施した疲労試験機を示す。配管を 15mm の長さに切り出したものを疲労試験片とした。ピンで支持したレバーに偏心カムで振動を与え、その振動により繰返しの圧縮荷重を試験片に与えた。荷重の大きさは偏心カムの偏心量とレバーとカムの接触位置により調節できる。圧縮荷重は試験片ホルダの下側に取り付けたロードセルによって測定した。試験片の側面にひずみゲージを貼り付け、配管側面のひずみを試験中連続的に測定した。試験機の負荷容量は 2kN、負荷周波数は可変であり最大は 30Hz である。

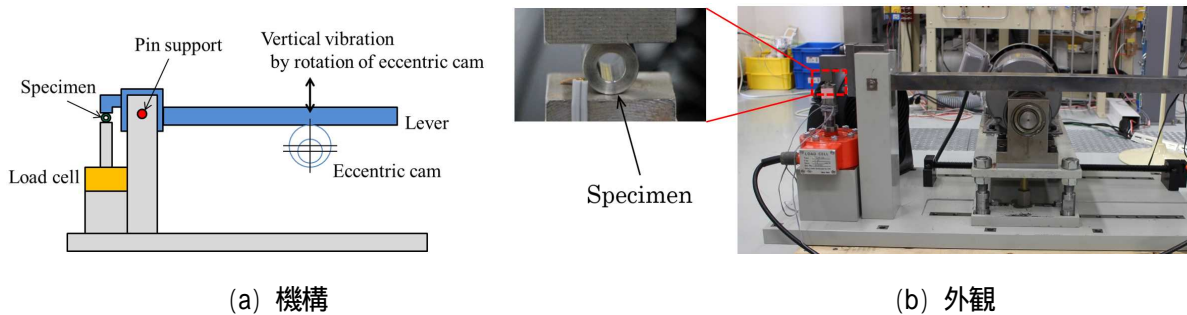


図 3.24 内圧模擬疲労試験機

図 3.25 に本研究開発で評価に用いた基礎溶接配管の外観を示す。溶接条件は今後の開発により複数あるが、現在までに基準となるもっとも基本的な溶接条件で溶接した配管の疲労強度評価を行った。図 3.26 に溶接配管と未溶接配管の断面の硬さの分布を示す。溶接配管の硬さは溶接熱影響部(HAZ)から溶接部に向かって低下している。疲労強度は硬さと良い相関があることが知られており、その知見からは基本溶接条件で施工した溶接部の疲労強度は未溶接部の疲労強度よりも低いことが予想される。



図 3.25 内圧模擬疲労試験に供した溶接配管

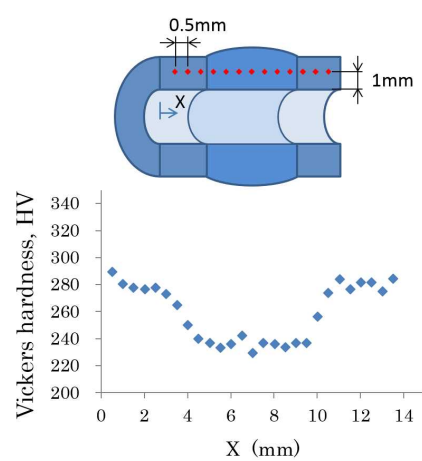


図 3.26 溶接配管(基本溶接条件)の断面の硬さ分布

図 3.27 に、溶接配管から切り出した疲労試験片を示す。外面に溶接ビードの盛り上がりがあるままでは均一な線荷重の負荷が非常に困難であるので、ビードの盛り上がりなくなるまで最小限外径を切削してから疲労試験に供した。疲労試験に使用した配管の外径は、未溶接管 9.55mm、溶接管 8.91mm であった。

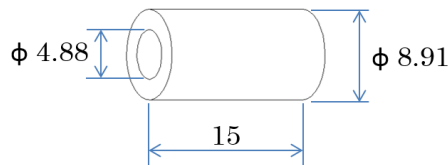


図 3.27 内圧模擬疲労試験の試験片形状・寸法(寸法の単位は mm)

内圧模擬疲労試験は、応力比 $R = 0.1$ 、負荷周波数 20Hz、室温、大気中で実施した。

図 3.28 に基本の溶接条件で作成した配管溶接継手の疲労強度と最終的な溶接条件で作成した配管溶接継手の疲労強度を比べて示す。

第 1 章の引張試験結果を参照すると、引張強さは基本の溶接条件では約 800 MPa、最終的な溶接条件では約 900 MPa である。平滑材の疲労限度は引張強さと良い相関があることを考えると、10%程度は疲労強度に差があることが予期されたが、結果はそうになっていなかった。まず、基本の溶接条件の配管溶接継手の疲労強度は、溶接の再凝固組織の影響を受けており、完全な平滑材に対して求められた疲労限度と引張強さの関係を適用できない。次に、基本の溶接条件の配管溶接継手の疲労強度は、完全に平滑な試験片の疲労強度よりは低いことが見込まれる。そのため、最終的な溶接条件の配管溶接継手の疲労強度がそれよりも高くないということは、最終的な溶接条件の配管溶接継手の疲労強度も欠陥の影響を受けたものであることが予想される。いずれにしても、本事業で重要であるのは、疲労強度が水素の影響を受けるかどうかであり、いずれの溶接条件の継手にも疲労強度に対する水素の影響は見られなかった実験結果は非常に良い結果である。

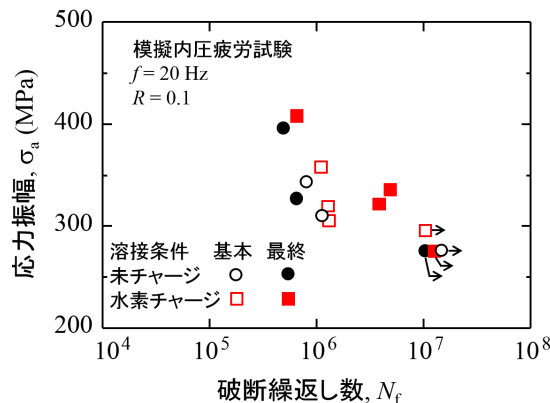


図 3.28 溶接配管(基本溶接条件)の内圧模擬疲労試験結果

水圧サイクルと高圧水素ガス圧力サイクル試験

内圧模擬疲労試験で得られた結果、すなわち、本事業で開発した配管溶接継手の疲労強度に水素の影響が認められないという結果は、配管溶接継手の開発にとっては非常にいい結果である。しかしながら、結果の信頼性向上の観点からは、より実際の条件に近い状態で水素の影響を評価したいという要望がある。そのため、本事業でも配管溶接継手の高圧水素ガス圧力サイクル試験を実施した。

高圧水素ガス圧力サイクル試験は、非常に時間と費用のコストがかかる試験である。そのため、その試験条件の設定に際しては十分な検討が必要である。本事業で開発の対象としている 110 MPa 級の高圧ガス配管を疲労破壊を発生させ、かつ限られたプロジェクトの期間内に十分なデータが取得できるだけの高応力を発生させることは実験装置の制約により難しい。したがって、その試験条件の設定に際しては十分な検討が必要である。本事業では 2 回の水圧サイクル試験を実施し、高圧水素ガス圧力サイクル試験の試験条件の検討、水素チャージ材を用いた水素脆化評価、溶接部の強度のばらつきの検討を行った。

図3.29に、水圧サイクル試験と高圧水素ガス圧力サイクル試験で用いた試験片を示す。高圧水素ガス圧力サイクル試験で疲労破壊を起こすことができるように、配管肉厚を薄く加工して内圧による応力を高くした。疲労破壊は内面から生じるので、外径の切削は疲労破壊機構には影響を及ぼさない。さらに、内面には人工微小欠陥を導入した。その形状は図3.29に示したとおりアスペクト比が1:3となるものであり、KHKS 0220(2010)の手順に準じて設定した。同基準にはき裂の大きさについても規定があり、肉厚16 mm以下の時に指定されている0.5 mmを採用した。人工微小欠陥は放電加工によって導入した。試験片に人工初期欠陥を導入した意図は、疲労破壊はき裂の進展した結果生じるため本質的にき裂進展に対する水素の影響を調べることが重要であるためである。また、高圧水素ガス圧力サイクル試験の試験時間、費用、試験機の利用可能枠の制約から疲労限度を調べる実験は実施し難いことも理由の一つである。人工初期欠陥寸法は同一であるが、肉厚が異なるため、同じ内圧に対しても管壁の応力は異なる。従って、一つの内圧に対して異なる応力拡大係数範囲、あるいは疲労寿命の実験が可能である。疲労寿命に及ぼす水素の影響は、水素チャージによって評価した。図3.30に水圧サイクル試験の試験片のセットアップを示す。

図3.31に水圧サイクルと高圧水素ガス圧力サイクル試験結果の破壊力学的評価を示す。結果はいずれも前の水圧サイクル試験と基本の溶接条件で施工した配管溶接継手の高圧水素ガス圧力サイクル試験結果と一致する場所にプロットされた。1点だけ破断しても良い繰返し数でも未破断であったが、結論として言えることは本事業で開発した配管溶接継手の疲労寿命は水素の影響を受けないということである。

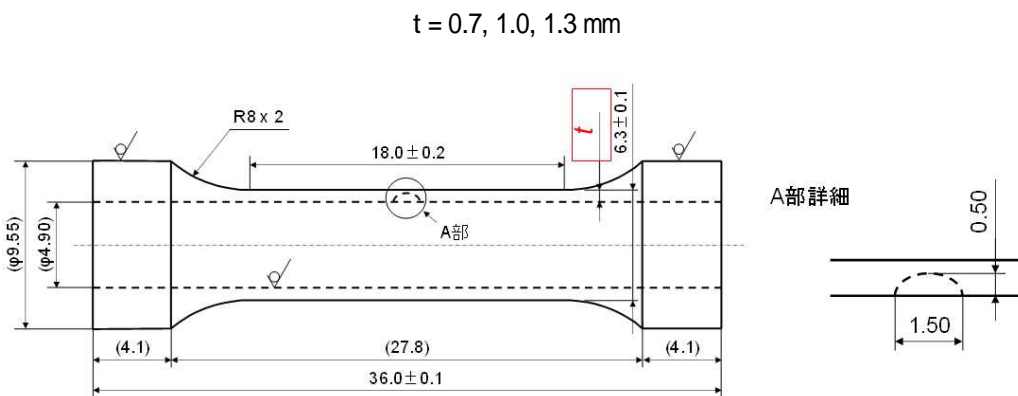
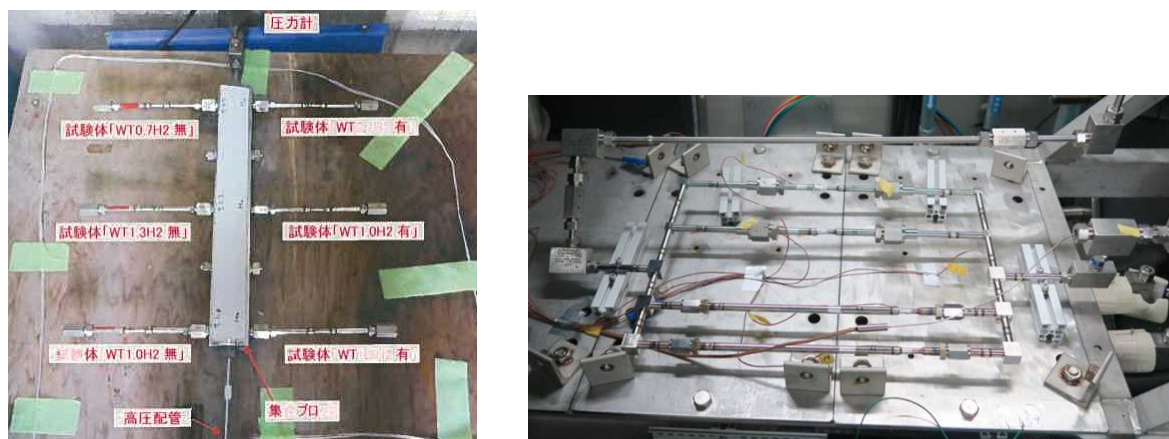


図3.29 水圧サイクルと高圧水素ガス圧力サイクル試験の試験片と人工初期欠陥研形状(第1回目)



(a) 水圧サイクル試験

(b) 高圧水素ガス圧力サイクル試験

図3.30 水圧サイクルと高圧水素ガス圧力サイクル試験セットアップ

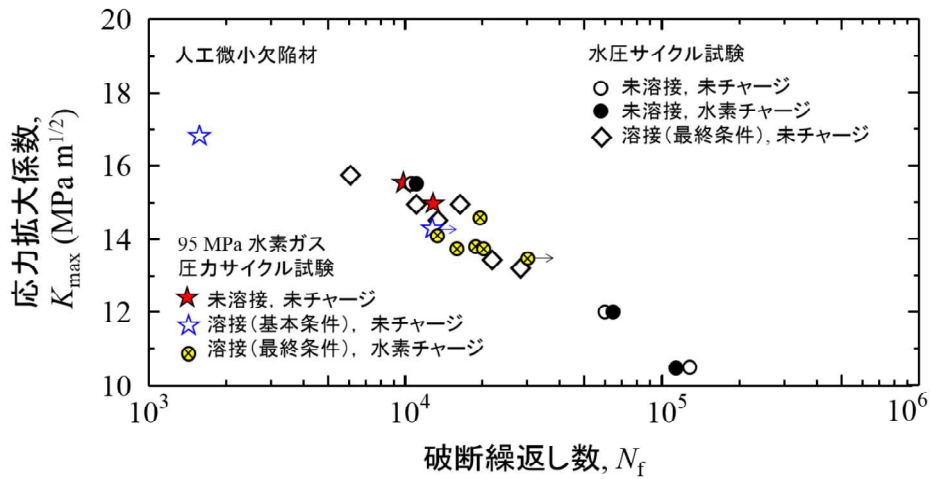


図 3.31 高圧水素ガス圧力サイクル試験結果の破壊力学的評価

溶接部の水素脆性評価のまとめ

内圧の繰り返しによる溶接配管の疲労損傷に対する水素の影響を解明するために、配管の内圧疲労に特有な破壊モードをシミュレートし、効率的に研究開発を可能とする疲労試験方法を開発した。基本溶接条件で溶接した溶接配管の疲労強度を取得した。水素の影響を評価するために、溶接配管に水素チャージを施した。水素チャージによる溶接配管の疲労寿命の低下は認められなかった。

3.2 成果の意義

(1) 高窒素高強度ステンレス鋼配管の溶接技術開発

高窒素高強度ステンレス鋼配管の溶接技術開発については、シールドガス成分、フィラー（インサートリング）と関連させる形で溶接電流、溶接時間を変化させて、溶接継手の引張強度が母材の規格強度を越える溶接条件を確定した。とくに溶接金属部での脱窒を抑制するため、ヘリウムに窒素を添加したシールドガスを開発した点が本事業の重要なポイントである。インサートリングには配管素材と同一の材料を用い溶接施工性を改善する形状をデザインした。なお、引張強さが母材の規格強度を上回った溶接継手については、引張試験の破断は母材部から生じた。

(2) 溶接金属の金属組織評価

溶接金属の金属組織評価については、溶接部に生成する相の種類や体積率に及ぼす窒素濃度等の影響を明確化するために、XM-19の平衡状態図を作製した。その状態図により、窒素量の減少とフェライトの生成の定量的な関係を予測した。さらに、溶接部のEPMA成分分析を行い、溶接継手における溶接部の強度低下と脱窒量との関係を明らかにした。また、溶接時間が長い方が溶接継手の引張強度が高くなった結果に対して、フェライト相の発達が有益であることを推定した。

(3) 溶接部の水素脆化評価

配管溶接継手の水素脆化特性の評価として、配管溶接継手から切り出した試験片に対する高圧水素ガス中のSSRT試験、配管溶接継手の疲労試験、高圧水素ガス圧力サイクル試験を実施した。溶接継手の引張強さが母材の規格強度を越える溶接継手について、温度-10℃、室温、50℃で高圧水素ガス中(-10℃は70 MPa、他の温度は85 MPa)でSSRT試験を実施した結果、相対絞りはいずれの条件下でも0.8を大きく越えていた。その配管溶接継手の疲労特性に対しても、水素の影響が認められないことをS-N線図、破壊力学的評価、破面観察により確認した。

4. まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

本プロジェクトは、水素ステーションへの導入に向けて、3つの基本的な基準、容易に実現が可能(空冷式溶接機、フィルター材としてシンプルなインサートリング、温和な溶接パラメータ)、高強度(母材規格 800MPa 以上)、高い水素脆化特性、を満たす溶接継手の開発に繋がった。プロジェクト内で行った予備経済評価では、メンテナンスや漏洩リスクに関するコストを減らす溶接継手や関連するガスケット利用継手の長期的利点を示した。今後、溶接継手の導入へ向けて以下の3段階が考えられる。

・第1段階:水素ステーションの高圧配管の一部に溶接継手を使用した実証

本新規配管継手を使用した試験を行い、実環境下において実現可能性を示すことを目的とする。

・第2段階:完成したステーションへの溶接継手導入

一般的なコーン&スレッド継手と本新規継手とを技術的経済的に比較することを目的とする。

・第3段階:すべての水素ステーションへの系統的展開

この3段階の進行速度は、溶接継手のコスト、すなわち XM-19 材料や関連するガスケット利用継手のコストに大きく依存するものと思われる。

5. 研究発表・特許等

- 研究発表・講演、文献等、その他 -

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	9/1/2014	平成26年度NEDO新エネルギー成果報告会 燃料電池・水素分野	高圧水素ガス用高窒素高強度ステンレス鋼配管の溶接継手に関する研究開発	松本 拓哉, 久保田 祐信, 土山 聡宏
2	3/1/2015	日本機械学会九州支部 第68期総会・講演会	高圧水素配管の疲労試験方法の開発	山本 侑生, 久保田 祐信, 松本 拓哉
3	8/1/2015	平成27年度NEDO新エネルギー成果報告会 燃料電池・水素分野	高圧水素ガス用高窒素高強度ステンレス鋼配管の溶接継手に関する研究開発	松本 拓哉, 久保田 祐信, 土山 聡宏
4	12/1/2015	日本材料学会 九州支部 第2回学術講演会	高窒素ステンレス鋼の溶接配管の疲労強度評価	山本 侑生, 久保田 祐信, 松本 拓哉
5	2/1/2016	I2CNER Annual Symposium 2016 (Poster session)	Development of weld joint for XM-19 high-pressure hydrogen tubing	山本 侑生, 久保田 祐信, 松本 拓哉
6	2/1/2016	Joint HYDROGENIUS and I2CNER International Workshop on Hydrogen-Materials Interactions 2016 (Poster	Fatigue strength of XM-19 weld joint for high-pressure hydrogen tubing	山本 侑生, 久保田 祐信, 松本 拓哉

		session)		
7	9/14/2016	日本機械学会 2016 年度年次大会	高窒素ステンレス鋼の高圧水素溶接配管の疲労強度評価	山本 侑生, 久保田 祐信, 土山 聡宏, 松本 拓哉
8	10/25/2016	平成28年度NEDO新エネルギー成果報告会 燃料電池・水素分野	高圧水素ガス用高窒素高強度ステンレス鋼配管の溶接継手に関する研究開発	松本 拓哉, 久保田 祐信, 土山 聡宏
9	12/10/2016	日本材料学会九州支部 第3回学術講演会	高窒素ステンレス鋼製の高圧水素配管の水素脆化評価	山本 侑生, 久保田 祐信, 土山 聡宏, 松本 拓哉

- 特許等 -

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託会社名
1	2015年8月12日	特願 2015-159523	溶接継手およびその溶接材料、溶接方法	レール・リキード・ソシエテ・アニム・プール・レテュード・エ・レクスプロワタシオン・デ・プロセデ・ジョルジュ・クロード 国立大学法人九州大学
2	2015年8月12日	特願 2015-159524	溶接継手およびその溶接材料、溶接方法	レール・リキード・ソシエテ・アニム・プール・レテュード・エ・レクスプロワタシオン・デ・プロセデ・ジョルジュ・クロード 国立大学法人九州大学
3	8/9/2016	PCT/JP2016/003688	WELD JOINT, WELDING MATERIAL USED THEREFOR, AND WELDING METHOD	L'Air Liquide, Societe anonyme pour l'etude et l'exploitation des procedes Georges Claude Kyushu University, National University Corporation

(111-3)「水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全基盤整備に関する研究開発 / 水素ステーションにおける雷被害対応技術の研究開発」

委託先：佐賀県（有）鳥栖環境開発総合センター、（一社）日本雷保護システム工業会

成果ガリ（実施期間）：平成26年度～平成28年12月

- 水素ステーションの雷リスクを分析し、雷リスク軽減のための対策の必要性とともに、雷リスクを軽減する対策について検討し、「水素ステーションの雷被害対策ガイドライン（案）」を取りまとめた。

背景/研究内容・目的

水素ステーションへの落雷を想定して、人的被害や水素ステーションに使用されている計器等の被害（雷害）の発生リスクを検証し、被害防止に向けた研究開発を行うことで、「水素ステーションの雷被害対策ガイドライン（仮称）」を策定する。

研究目標

実施項目	目標
	既設水素ステーション及び類似施設の雷被害対策実施状況の把握
	水素ステーションの構成機器等を分析し、構成機器毎の雷被害リスク（影響度）を想定
	鳥栖実証水素ステーションにおいてリスク評価（印加）試験を実施し、雷被害リスクを分析
	雷被害リスク軽減のための対策案の検討
	雷被害対策の実施及び雷保護対策評価試験の実施
	水素ステーションの雷被害対策ガイドライン（案）策定

実施体制及び分担等

NEDO	佐賀県（実施項目A,D,G）
	(有)鳥栖環境開発総合センター (実施項目A,D,G)
	(一社)日本雷保護システム工業会 (実施項目A,B,C,E,F,H,I)

これまでの実施内容 / 研究成果

開発項目	目標	成果
現状把握	既設水素ステーション及び類似施設の雷被害対策実施状況の把握	水素ステーションを視察調査するとともに、CNGステーションについて聞き取り調査を実施し、雷被害対策の現状を把握
雷害リスクの想定	水素ステーションの構成機器等を分析し、構成機器毎の雷被害リスク（雷被害の影響度）を想定	構成機器等の直撃雷リスク及び雷サージリスクを分析し、個別ステーション毎にリスクを評価するための基準を定めるとともに、リスクに応じた対策の考え方を検討
リスク評価試験の実施	鳥栖実証水素ステーションにおいてリスク評価（印加）試験を実施し、雷被害リスクを分析	鳥栖実証水素ステーションにおいて雷を模した電流を実際に印加する試験を実施し、雷被害リスクを分析
雷害対策の検討	雷被害リスク軽減のための対策案の検討	水素ステーション固有の雷被害リスクを軽減するための具体的な対策案をとりまとめ
雷害対策評価試験の実施	鳥栖実証水素ステーションにおいて雷被害対策を実施し、その有効性を検証	鳥栖実証水素ステーションに対し雷被害対策を実施したうえで、実際の落雷に対する効果について検証し、対策の有効性を確認
雷害対策ガイドライン(案)策定	水素ステーションの雷被害軽減のためのガイドライン(案)策定	水素ステーション固有の雷害リスク軽減に有効な「雷被害対策ガイドライン（案）」をとりまとめた

今後の課題

取りまとめたガイドラインの周知。

実用化の見通し
水素ステーションの整備を進める事業者が参考にできる状態を既に実現。

研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
現状把握	聞き取り調査を実施し、雷被害対策の現状を把握	
雷害リスク想定	個々の水素ステーションの雷害リスクを評価するための基準（案）を定めた	
リスク評価試験	実証ステーションに雷を模した電流を印加し、雷害リスクを明らかにした	
雷害対策検討	雷害リスクを軽減するための具体的な対策案をとりまとめた	
対策評価試験	雷害対策が実際の落雷に対し効果があることを確認	
ガイドライン(案)策定	水素ステーションの雷害対策ガイドラインをとりまとめた	

特許 出願	論文 発表	外部 発表	受賞 等
0	0	6	0

課題番号： - 3

水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全基盤整備に関する研究開発 / 水素ステーションにおける雷被害対応技術の研究開発

佐賀県
有限会社鳥栖環境開発総合センター
一般社団法人日本雷保護システム工業会

1. 研究開発概要(事業の背景・目的・位置づけ)

燃料電池自動車(FCV)の市場投入に向けては、これまで水素ステーションとして求められる性能の確保、水素ステーションの低コスト化、市街地への水素ステーションの設置を可能にする規制見直しのためなどの研究開発とともに、水素ステーションを各地に設置して実証研究が行われてきた。しかしながら、これまで実施されてきた実証研究は、水素ステーションから水素の供給を受ける FCV の台数が限られていたことなどもあり、充填実施日については予約制を基本とし、例えば、近隣地域で落雷が懸念される悪天候の中であえて充填を行うような実証研究は行われていなかった。そのため、落雷対策としては「避雷針の設置」といった一応の基準が定められているが、施設のレイアウトによっては結果的にベントスタックが避雷針と同様の機能を有することが懸念され、例えば、充填作業中にベントスタックに落雷があった場合など、商用運用において発生し得る状況を想定した人的被害等の発生リスクについては、具体的な検討が行われていなかったのが実情である。

本研究は、水素ステーションにおける人体や設備に対する雷リスクを評価し、効果的な対策を検討することにより、水素ステーションの安全性・信頼性の確保に資することを目的とする。

2. 研究開発目標(設定の理由、妥当性も含め)

本研究事業は、平成 23 年 3 月に鳥栖市内に整備した実証水素ステーションにおいて、平成 26 年 3 月までに雷が原因と思われる計器類の誤反応が 21 回発生したことを受け、水素ステーション固有の雷被害リスク軽減を目的として実施したものである。

鳥栖実証水素ステーションは実証研究施設としては国内で最もコンパクトであるとともに、実際に雷被害を受けた事例がある。そこで、当該ステーションをモデルに以下の研究を行い、直撃雷や雷サージに対する人的被害や水素ステーションに使用されている計器類への被害について発生リスクを検証し、水素ステーション固有の雷被害リスクに対し、被害防止又は軽減に向けた方策について研究を行い、「水素ステーションにおける雷害対策ガイドライン(案)」を策定する。

(1) 現状把握

既設水素ステーション及び類似施設の雷被害対策実施状況の把握

(2) 雷害リスクの想定

水素ステーションの構成機器等を分析し、構成機器毎の雷被害リスク(影響度)を想定

(3) リスク評価試験の実施

実際に稼働している鳥栖実証水素ステーションにおいて落雷を模擬した雷インパルス電流印加試験による、雷サージの発生状況の確認および過去の雷被害の再現し、雷被害リスクを分析

(4) 雷害対策の検討

雷被害リスク軽減のための対策案の検討

(5) 雷害対策評価試験の実施

雷被害対策の実施及び雷保護対策評価試験の実施

(6) 雷害対策ガイドライン(案)策定

上記の調査結果および IEC(国際電気標準会議)/JIS(日本工業規格)に基づいた規格水素ステーションの雷被害軽減のためのガイドライン(案)策定

3. 研究開発成果

3.1 研究開発成果、達成度

(1) 現状把握

国内におけるそれぞれに特徴を有する既設水素ステーション及び類似施設の現地視察調査を行い、雷被害対策実施状況の把握を行った。さらに、水素ステーションにおける雷被害・雷保護実施状況調査をアンケート形式にて行った。

現地調査を行った水素ステーションは4施設。都市ガス水蒸気改質によるオンサイトステーションの「とよたエコフルタウン水素ステーション」、液化水素が外部供給されるオフサイトステーションである「岩谷産業(株)尼崎水素ステーション」、カードルにより水素を供給し、天然ガススタンド「練馬エコステーション」と併設されている「東京ガス(株)練馬水素ステーション」、国内で最もコンパクトであるとともに、実際に雷被害を受けた事例がある「鳥栖実証水素ステーション」となっている。

各水素ステーションにおいて、設備概要、周囲環境、設備の設置状況、配線の敷設状況、接地システム、雷被害および雷保護の実施状況について、現地担当者の話も踏まえ、調査内容を取り纏めた。

さらに、水素ステーションにおける雷被害および雷保護の考え方や取組状況を把握するため、既存の70MPa水素ステーション8サイトについてアンケート調査を実施した。

調査の結果、水素ステーションにおいて雷被害は発生していない(鳥栖水素ステーションを除く)ことが明らかとなった。これは、調査時点における水素ステーションの設置数が少なかったこと、調査対象サイトが、雷日数が少ない地域、平地、市街地または住宅地といった雷リスクが低い地域であったことが考えられる。

また、ほとんどのステーションにおいて雷保護を実施されていなかった。これは、水素ステーションの雷害対策について、法令・基準など指針となるものがないこと、また、雷被害＝「直撃雷による被害」という認識があり、「直撃雷のリスクは小さい」「雷リスクは小さい」と考えられているためだと推測された。

これらの調査結果により、水素ステーションにて発生しうる雷リスク想定的基础となると共に、雷リスクに対する認識のズレが浮き彫りとなり、本研究の最終目標である水素ステーションにおける雷リスク対策ガイドラインの重要性が示唆された。

(2) 雷害リスクの想定

(1)の調査結果を基に、構成機器等の直撃雷リスク及び雷サージリスクを分析し、個別ステーション毎にリスクを評価するための基準を定めるとともに、リスクに応じた対策の考え方を検討した。

水素ステーションの雷被害と影響度について、表1に示す。被害の内容と被害の条件によって影響度を3段階で評価する。まず、水素の漏えいについて、「一般高圧ガス保安規則関係例示基準」の「23.ガス漏洩検知警報設備およびその設置場所」(1)において、可燃性ガスは爆発下限界の1/4以下の値となっており、水素の爆発下限界値が4%であることから、1%(10,000ppm)以上を影響度:大とした。これを基準とし、0.1%(=1,000ppm)以上1%(10,000ppm)未満を影響度:中、それ未満を影響度:小とした。影響度:大に該当する設備としては、蓄圧器、水素配管などが考えられるが、影響度:中、影響度:小については、今のところ、該当する設備はない。次に、施設の損傷について、高圧ガス保安上、重要な設備とされているセンサー類、圧力計、安全弁、防爆機器、散水設備、プレクーラーなどの他、高圧ガスの製造において重要なその他設備として、圧縮機、制御盤、受電盤が損傷した場合の影響度を大とした。営業上、重要な設備である計量器や精算機などが損傷した場合の影響度を中、上記以外の設備が損傷した場合の影響度を小とした。また、人的な被害については、特に条件は設けず、影響度:大とする。

表 3.1.1

影響度	被害内容	条件	該当する設備(例)
大	水素漏えい	1% (10,000ppm) 以上	蓄圧器、水素配管
	施設の損傷	高圧ガス保安法上、重要な設備	センサー類、圧力計、安全弁、 防爆機器、散水、ブローラー
		高圧ガスの製造において、 重要なその他の設備	圧縮機、制御盤、受電盤
	人的被害		
中	水素漏えい	0.1% (1,000ppm) 以上、1% 未満	該当なし
	施設の損傷	営業上、重要な設備	計量器、精算機
小	水素漏えい	0.1% 未満	該当なし
	施設の損傷	上記に含まれない設備	一般警備機器、照明、 サービス施設

(3) リスク評価試験の実施

(有)鳥栖環境開発総合センター内の水素ステーションにおいて、近傍への落雷(近傍落雷)が原因と思われる設備障害が発生した。これは、近傍落雷による大地電位上昇の影響により雷サージが侵入して設備障害が起きたと考えられる。雷対策構築のためには、現状設備形態における落雷時の雷電流侵入様相を把握する必要がある。

そこで、雷サージの侵入が想定される箇所にインパルス電圧/電流を印加/通電し、雷電流様相を把握する試験を実施した。

インパルス試験システムを図 3.11.1 に示す。

試験に用いるパルス発生器(以後 PG)の仕様を表 3.1.2 に、インパルス発生器(以降 IG)を表 3.1.3 に示す。IG の駆動電源は発動発電機を用いた。

PG は短時間の現象で、電流が流れている時間が短くエネルギー量が少ない。IG は PG と比較し、長時間の現象で、電流が流れている時間が長くエネルギー量が多いことから、試験項目毎に分けて使用した。

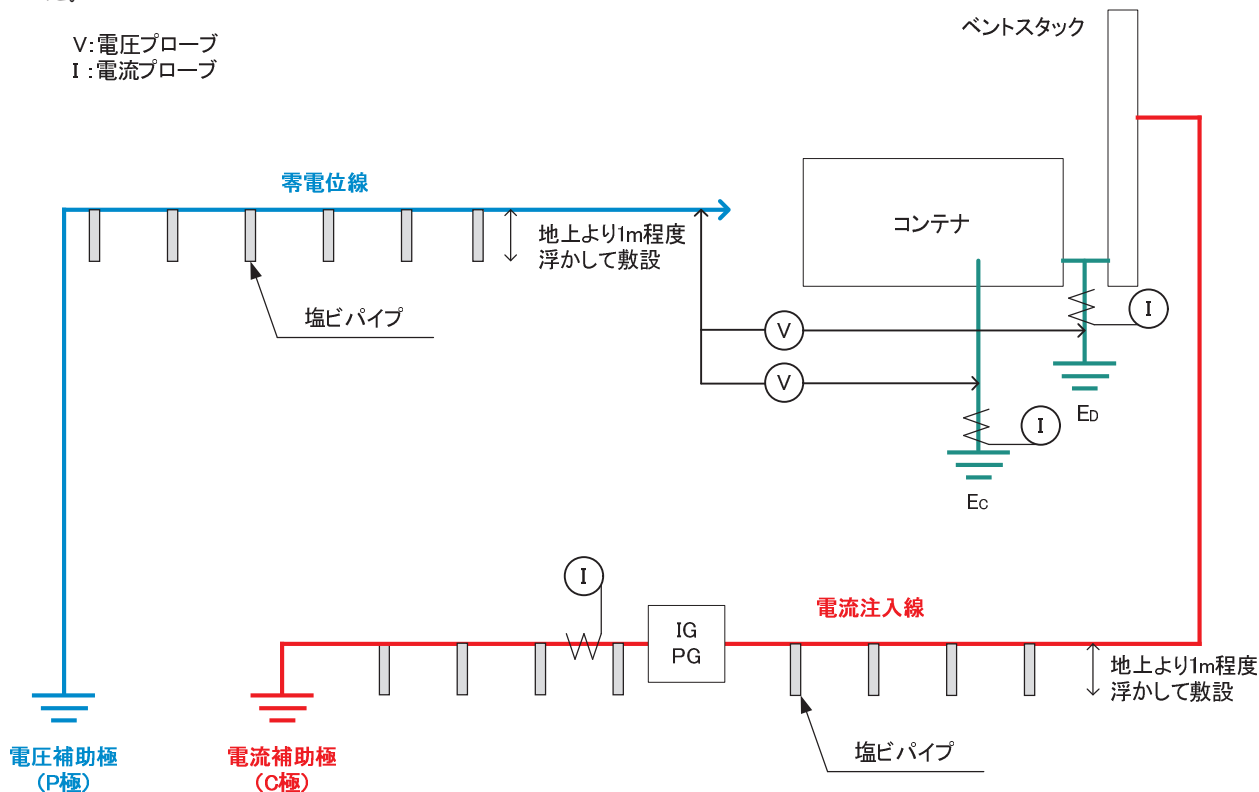


図 3.1.1 インパルス試験システム(試験イメージ)

表 3.1.2 PG の電氣的仕様

項目	仕様
印加電圧	500V ~ 1kV
連続パルス印加	10 回/s
電源電圧	AC100V

表 3.1.3 IG の電氣的特性

項目	仕様
印加電圧	1kV ~ 2kV
主コンデンサ容量	0.5 μ F
出力波形(開放時)	1.2/50 μ s
電源電圧	AC100V

その結果、現状の設備状態では、C 種接地極と D 種接地極との間に電位差が発生した場合、模擬防爆バリア(ツェナーダイオード)が動作、接続されている PLC や PIT 等の機器に雷サージが侵入し、警報が発報された。

雷サージが防爆バリアを通過する過程で、定格電流の低いヒューズが溶断した。

ベントスタックに印加した際、電源線に分流する事が確認出来た。ステーションと離れた位置にある設備との間に生じた電位差によって、電源線が雷サージの経路となると考えられる。

ディスペンサーと大地間に電位差が生じていた。

本試験より判明した雷リスクを以下に示す。

落雷による電位上昇により、配線用遮断器(MCCB)の不要動作(トリップ)が想定される。

ベントスタックへの直撃雷、あるいは近傍落雷により、D 種接地極と C 種接地極との間に電位差が発生した場合、防爆バリアを破壊し、各機器に雷サージが印加され誤動作、損傷が発生する。

落雷による電位上昇によって、水素ステーションと接続されている遠方の機器において、誤動作・損傷が発生する。

ベントスタックへの直撃雷によって、ディスペンサーと大地間に電位差が発生し、人体に高電圧が印加される。

PLC のスキャンタイムと雷サージが重なった場合、センサが誤動作する可能性がある。

(4) 雷害対策の検討

上記(3)の結果を踏まえ IEC や JIS の基準等に照らし合わせ、対策案を検討した、対策の一覧を表 3.1.4 に、対策の概要を図 3.1.2 に示す。

表 3.1.4 対策一覧

No	項目	内容	期待する効果
	接地端子間	接地端子間を短絡又は接地間 SPD を接続	電位差を抑制
	電源線	電源用 SPD の設置又は耐雷トランスの新設	電源線に流れる雷電流の低減及び過電圧抑制
	通信線	通信用 SPD の設置又は耐雷トランスの新設	通信線に流れる雷電流の低減及び過電圧抑制
	ディスペンサー	水素充填地点の足元に金属板を新設し、ステーションの筐体と接続して等電位化を図る	落雷がステーションに直撃した際に人体と大地との間に発生する電圧の抑制

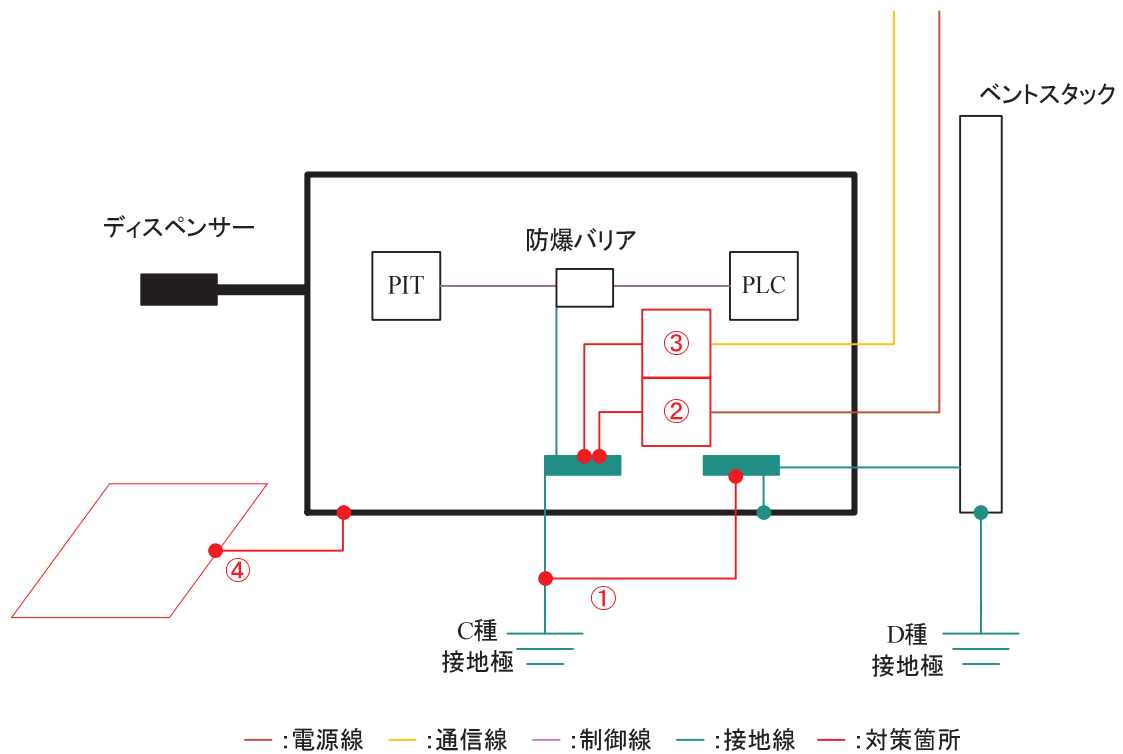


図 3.1.2 対策概要

(5) 雷害対策評価試験の実施

鳥栖水素ステーションにおいて、検討した対策(表 3.1.3)のうち、対策、対策、対策を実施した。電源用 SPD の取付け状況を図 3.1.3 に、仕様を表 3.1.5 に示す。また、通信用 SPD の取付け状況を図 3.1.4 に、仕様を表 3.1.6 に示す。なお、A/C 種接地極と D 種接地極間は IV 線で接続した。



図 3.1.3 電源用 SPD

表 3.1.5 電源用 SPD 仕様

試験クラス	クラス
最大連続使用電圧 U_c	AC280V
公称放電電流 I_n	20kA
電圧防護レベル U_p	1.4kV 以下



図 3.1.4 通信用 SPD

表 3.1.6 通信用 SPD 仕様

試験カテゴリ	JIS C 5381-21
最大連続使用電圧 U_c	DC60V
電圧防護レベル U_p	600V 以下
インパルス耐久性 カテゴリ C2 8/20us	5kA

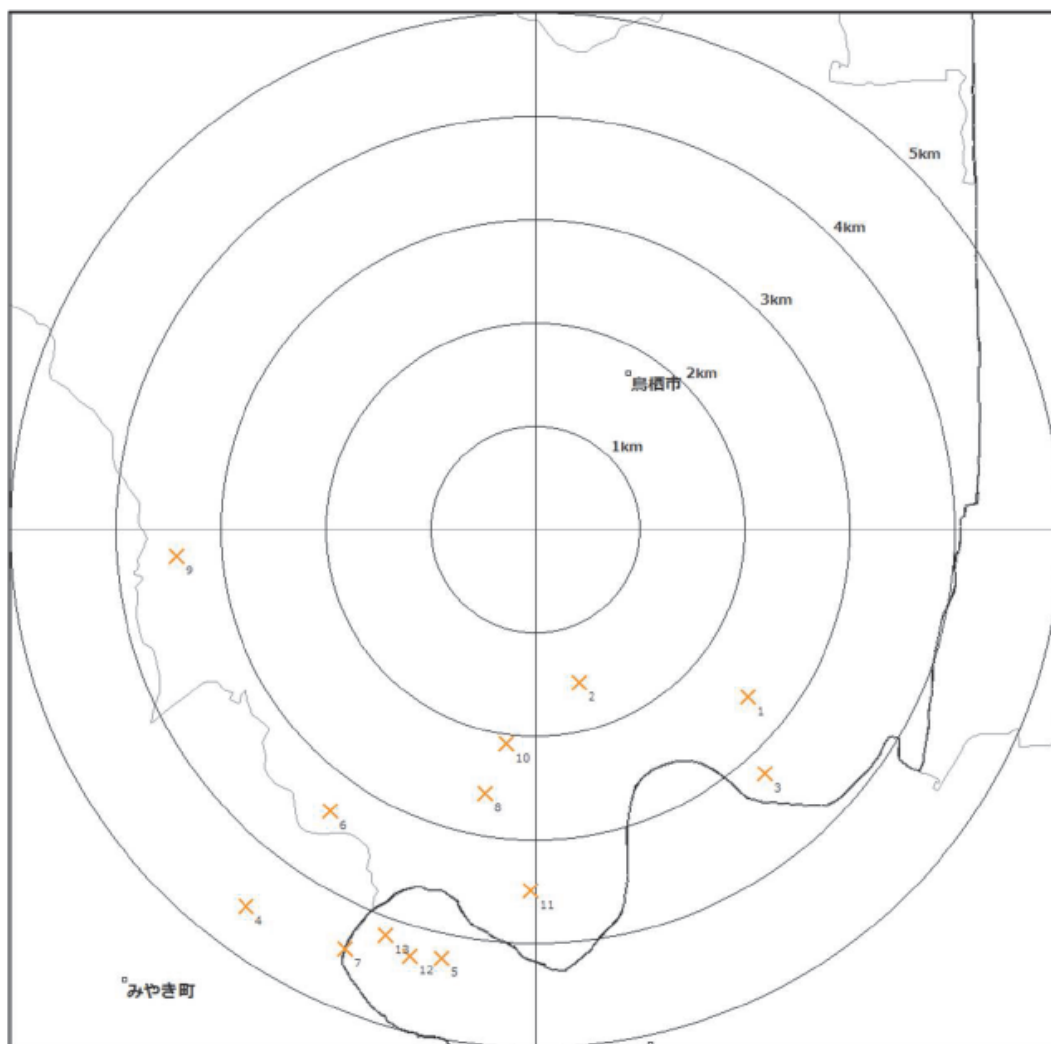
試験の結果、鳥栖水素ステーション近傍に複数回の落雷が発生した。
 2016年8月4日 15:00～16:00の落雷データを図 3.1.5、表 3.1.7 に示す。
 水素ステーションから最も近い位置としては、1.5km で 10kA の負極性落雷が観測されている。

中心位置：佐賀県鳥栖市森木町929-2付近

(北緯 33° 21' 50" /東経 130° 29' 48")

表示範囲：上記地点を中心とした 10km × 10km

表示期間：2016年08月04日 15:00 ~ 2016年08月04日 16:00



凡例: × 15:00 ~15:15 × ~15:30 × ~15:45 × ~16:00

図 3.1.5 2016年8月4日 15:00~16:00 の落雷位置

中心位置：佐賀県鳥栖市轟木町929-2付近
 (北緯 33° 21' 50" /東経 130° 29' 48")
 表示範囲：上記地点を中心とした 10km × 10km
 表示期間：2016年08月04日 15:00 ～ 2016年08月04日 16:00

落雷データ

番号	年	月	日	時	分	秒	緯度(°)	経度(°)	電流値(KA)	中心からの距離(km)
1	2016	8	4	15	32	56	33.350	130.518	-7	2.6
2	2016	8	4	15	36	38	33.351	130.501	-10	1.5
3	2016	8	4	15	37	41	33.343	130.520	-16	3.2
4	2016	8	4	15	37	41	33.331	130.467	-10	4.6
5	2016	8	4	15	40	27	33.327	130.487	-42	4.2
6	2016	8	4	15	40	27	33.340	130.476	-6	3.4
7	2016	8	4	15	40	27	33.328	130.477	-26	4.4
8	2016	8	4	15	42	21	33.341	130.492	-34	2.6
9	2016	8	4	15	42	21	33.362	130.460	-7	3.4
10	2016	8	4	15	42	21	33.346	130.494	-8	2.1
11	2016	8	4	15	43	6	33.333	130.496	-82	3.5
12	2016	8	4	15	44	48	33.327	130.484	-20	4.3
13	2016	8	4	15	44	48	33.329	130.481	-21	4.2

表 3.1.7 2016年8月4日 15:00～16:00の落雷データ一覧

A/C種接地線とD種接地線には、防爆バリアのヒューズの定格電流(数十mA)以上の雷サージ電流が流れていたが、A/C種接地線とD種接地線を接続したことで、雷サージ電流が防爆バリアを通過せずに連接接地線を通じて大地に流れ、防爆バリアの被害を防止したと考えられる。このように、水素ステーション内に存在する接地は全て接続することで等電位化を図り、電位差による機器の障害、損傷を防ぐことができる。また、設備上、常に接地を共通にする事が難しい場合は、接地間用 SPD を設ける事で、接地間に高電圧が加わった時に瞬時に導通状態となり、接地を一時的に共通化し、機器の障害、損傷を防ぐことができる。

電源線、通信線への雷サージの侵入は確認できなかった。しかし、現状の設備形態では、電源線及び通信線に雷サージが侵入することは十分考えられる。そのため、外部に接続されている電源線及び通信線と接地端子間に SPD を設置することで、雷サージ侵入時の異常電圧から機器を保護することができる。SPD のサージ電流耐量について、直撃雷のリスクが小さい本ステーションでは、非直撃雷用の SPD(電源用:クラス、通信用:カテゴリ C)でよい(SPD のクラス・カテゴリについての詳細は別添「水素ステーションにおける雷害対策ガイドライン」参照)と考えられるが、直撃雷を考慮する場合は、電源用はクラス、通信用はカテゴリ D の SPD を選定する。なお 6.3 項で観測された雷サージ電流であれば、電源用はクラス、通信用はカテゴリ C の SPD で充足する。

また、電源線及び通信線を耐雷トランスで絶縁することによっても、外部から侵入する雷サージによる影響を抑制することが出来る。耐雷トランスについては、Surge Isolation Transformer (SIT)として IEC 規格で新規制定中である。

(6) 雷害対策ガイドライン(案)策定

上記評価試験の結果により、対策の有効性が確認されたことから、調査結果および IEC(国際電気標準会議)/JIS(日本工業規格)に基づいた規格水素ステーションの雷被害軽減のためのガイドライン(案)策定を策定した。

ガイドライン(案)の概要を別添「水素ステーションの雷害対策ガイドライン(概要版)」に示す。

3.2 成果の意義

事業の実施により、今後、雷害リスクの高い地域に対しても整備が進むことが予想される水素ステーションの、雷害リスクに対する安全性・信頼性の向上に貢献した。

3.3 開発項目別残課題

特になし。

4.まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

直撃雷や雷サージに対する人的被害や水素ステーションに使用されている計器類への被害について水素ステーション固有の雷被害リスクを整理するとともに、被害防止又は軽減のための方策を検討し、具体的な実証研究を通じてその有効性を確認し、「水素ステーションにおける雷害対策ガイドライン(案)」を取りまとめた。

本事業は、体系的に整理されている雷被害対策を、水素ステーションに合わせて整理したものであり、雷被害対策に係る各種規格の改正に対しては、我が国における雷被害対策の規格化に中心的な役割を担ってきた実績を有する「一般社団法人日本雷保護システム工業会」が対応していくこととしており、既に実用化段階にある。

また、研究成果については、水素ステーションに係る安全基準等を策定・運用する団体に共有するとともに、展示会等で普及に努めている。

5. 研究発表・特許等

- 研究発表・講演、文献等、その他 -

年月日	発表媒体	タイトル	発表者
2016.7.1	The International Conference on Electrical Engineering 2016(ICEE2016)	Study of Lightning Protection for Hydrogen Station	(株)昭電 大林 和輝
2016.9.30	The International Conference on Lightning Protection 2016(ICLP2016)	Study of Lightning Protection for Hydrogen Station	(株)昭電 大林 和輝
2015.10.7 ~ 2015.10.9	エコテクノ2015	水素ステーションにおける雷被害対応技術の研究開発(ポスター展示)	佐賀県
2016.10.12 ~ 2016.10.14	エコテクノ2016	水素ステーションにおける雷被害対応技術の研究開発(ポスター展示)	佐賀県

- 特許等 -

該当なし。

(1111-4)「水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全基盤整備に関する研究開発 / 水晶振動子を利用した信頼性向上が期待できる水素センサの研究開発」

委託先：学校法人早稲田大学、(株)坂本電機製作所、KOA(株)

成果ガリ(実施期間：平成26年度～平成29年度)

- ・センサ素子の高感度化のために、ナノ構造白金触媒をセンサ上に選択的電気メッキするプロセス技術を開発し、検出下限濃度：約0.01%を達成した。
- ・自己故障診断機能のキー要素であるセンサの機械的振動特性の変化を非常にシンプルな構成で検出できる劣化検出回路を開発した。
- ・吸引式のハンディー型水素ガス検知器、拡散式の定置型水素ガス検知器の実証器を開発した。模擬フィールドを用いた環境試験は事業期間内に終了見込み。

背景/研究内容・目的

既存の水素センサでは、個々のセンサが実際の使用現場において劣化等を監視する機能については研究がなされておらず、劣化状況監視機能を組込むことは容易ではない。

これに対して、要求されている性能を満足するだけでなく、センサの劣化・故障を随時監視する自己故障診断機能を組込むことで信頼性を高めた水晶振動子式水素センサを開発する。

- ・検出下限：0.01%
- ・応答時間：30秒以内
- ・劣化・故障の定量的評価法を確立
- ・応用機器開発：ハンディー型、定置型センサ

研究目標

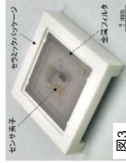
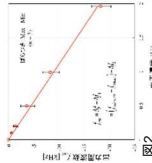
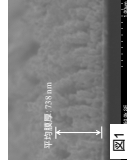
項目	目標
目標仕様の明確化、定量的評価法の調査	
白金触媒・水晶形状の最適化、製作プロセスの確立	
センサ素子設計のための熱・振動解析結果の提供	
感度及び応答速度が測定できる装置の開発	
水素ステーションにおけるセンサ設置場所や個数等の調査	
発振回路、ヒータ制御回路、信号処理回路の開発	
環境試験の実施、コンタミネーションの影響評価	
JIS、ISO等の調査、防爆構造の調査	
セラミックパッケージの開発	
ハンディー、定置型検知器の筐体、機構部の設計開発	
濃度演算、故障診断機能、制御プログラムの開発と動作試験	
防爆認定に向けた構造検討	

実施体制及び分担等

NEDO	早稲田大学 (, , ,)
	坂本電機(平成26-27年度) (, , ,)
	KOA (, , , ,)

これまでの実施内容 / 研究成果

- ・電気メッキ技術を利用したナノ構造を有する白金触媒をセンサ上に選択形成する技術を確認した。それにより、従来のセンサに対して4~5倍の感度向上を実現し、検出下限濃度：0.01%を達成(図1, 2)。
- ・センサ素子と駆動回路を実装したTCC製の小型パッケージを開発した(図3)。
- ・吸引ポンプを内蔵したハンディー型検知器および、耐圧防爆構造を適用した定置型検知器の実証機を開発した(図4, 5)。



今後の課題

開発途中の定置型検知器の実証機を完成させ、その動作を確認する。
センサの模擬フィールド試験を実施し、温湿度環境における安定性、メタン、CO等に対するガス選択性を検証する。並行して、自己故障診断機能の有効性を評価検証する。

実用化の見通し

事業終了後にサンプル出荷を経てセンサ単体 / モジュールでの販売開始。
優位性が市場認知された段階でハンディー式、定置式センサを市場投入する。

研究成果まとめ

項目	成果内容	自己評価
	目標仕様を決定、センサの定量的な評価法の文献調査、及び検討	
	電気メッキによるナノ白金触媒の形成条件最適化、製作プロセスでのセンサの試作	
	センサ素子の熱・振動解析結果に基づき(素子設計)の方向性決定	
	幅広い水素濃度に対する感度試験が可能な自動校正システムの開発	
	ステーションでの定置型検知器の現状把握、市販のハンディー型検知器の性能調査	
	高精度のヒータ温度制御回路、マイコンを用いた水素濃度演算機能の開発	
	環境試験装置の仕様策定、装置発注(10月月上げ、2月評価終了予定)	(2月達成見込)
	該当するJIS、ISOの調査、適応する防爆構造(定置：耐圧、ハンディー：本安)の決定	
	センサ素子と駆動ICを実装した小型セラミックパッケージの開発	
	ハンディー型検知器の機構部試作、定置型検知器の耐圧容器設計(2月組上げ予定)	(10月達成見込)
	ハンディー型の試作器完成、定置型は開発中(2月完了予定)	(2月達成見込)
	ハンディー型の本安回路および、定置型の耐圧容器のための設計仕様調査と検討	

大幅達成、達成、達成見込み、×未達

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
1	8	2	1

課題番号： -4

水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全基盤整備に関する研究開発 /

水晶振動子を利用した信頼性向上が期待できる水素センサの研究開発

学校法人早稲田大学

株式会社坂本電機製作所(平成 28 年度終了)

KOA 株式会社

1. 研究開発概要

本プロジェクトは、2025 年の水素ステーションの本格普及期に不可欠な技術要素である高度な次世代水素ガスセンサの開発を目的として実施した。水素ステーションの普及に求められる要件には、トラブルの未然防止及び迅速な解決に必要な安全技術の向上、周辺地域に理解されうる安心技術を両立することが重要な課題となっている。現状の水素センサではガスの選択性・検出感度・応答性・環境補償性・低消費電力等の要求を満たした上で、更にセンサ素子自身の劣化状況監視機能を組み込むことはセンサの動作原理上不可能である。これに対し、本グループが実現する水素センサでは、白金触媒と水晶振動子を組み合わせることにより水素ステーションで使用されている従来の水素センサの性能目標を達成し、その上で MEMS (Micro electro mechanical systems) 技術を応用することで白金の使用量を低減することにより価格低下を実現する。更に、例えば水晶振動子の機械的な振動特性の変化を検出することによってセンサの故障や性能劣化が随時監視できる自己故障診断機能を新たに開発し、その機能を付加することで水素センサの信頼性向上及び、維持コスト削減を実現する。

2. 研究開発目標

本プロジェクト中に、自己故障診断機能を搭載した水素センサを開発し、そのアプリケーションとして、水素ステーションの設備等に設置される定置型水素ガス検知器と、水素ガス漏れ検査など保守点検で用いられるハンディー型水素ガス検知器の2種類の検知器について研究開発を行うことを事業の目的と位置付けている。表 1 に実施計画書に記載の実施項目と、それぞれの最終目標を示す。表に記載の通り、防爆構造については認定取得のための検討を行い、取得見込みを得るところまでを本プロジェクトにおける達成目標とする。

また、それぞれの検知器の開発目標仕様を表 2、表 3 に示す。目標仕様は、市場にある水素センサの調査結果及び、2015 年 2 月 13 日に開催した有識者および NEDO 関係者との意見交換会の内容をベースとして検討、策定したものである。また、各目標値の試験条件については JIS および ISO に基づいて設定し、2017 年 7 月 7 日付けで NEDO 担当者へ提出した改訂版センサ目標スペックに記載したものである。

表 1 実施項目名とそれぞれの最終目標

実施項目名	最終目標(H29 年度)
水素センサの要求仕様と評価法の調査	目標仕様の明確化、定量的評価法の調査
センサの高感度化と製作プロセスの確立	白金触媒・水晶形状の最適化、製作プロセスの確立
シミュレーション技術の開発	センサ素子設計のための熱・振動解析結果の提供
水素センサ評価装置の改良	感度及び応答速度が測定できる装置の開発

水素ステーションの計装における水素センサの位置付け調査	水素ステーションにおけるセンサ設置場所や個数等の調査
センサ駆動回路の開発	発振回路、ヒータ制御回路、信号処理回路の開発
模擬フィールド試験	環境試験の実施、コンタミネーションの影響評価
水素センサ実用化における法規に関する調査	JIS、ISO 等の調査、防爆構造の調査
センサパッケージの開発	セラミックパッケージの開発
検出部ケースの開発	ハンディー、定置型水素ガス検知器の筐体、機構部の設計開発
センサシステムの開発と評価	濃度演算、故障診断機能、制御プログラムの開発と動作試験
防爆構造の検討	防爆認定に向けた構造検討

表2 ハンディー型水素ガス検知器の製品仕様(目標)

項目	目標	条件
1 検知範囲	0 ~ 100%LEL (空気中水素濃度 0 ~ 4%) LEL: Lower Explosion Limit 爆発下限界	温度: 20 ± 5 湿度: 65 ± 10%RH 気圧: 1,013 ± 50hPa
2 検出下限	空気中水素濃度 0.01%	
3 指示精度	試験用ガスの濃度 (水素濃度 F.S.20%、F.S.50%、F.S.80%) と指示値の差が ± 25%以内	
4 応答速度	水素濃度 F.S.50%において、吸引装置を用いた場合の 90%応答が 30 秒以内	
5 水素防爆	本質安全・耐圧防爆構造 (JIS C 0901, JIS C 0903, JIS F 8004 又は JIS F 8005 に適合)	-
6 自己故障診断機能	定量的評価法の確立	-
7 環境影響	環境温度: 温度 0、20、40 において試験用ガス (水素濃度 F.S.50%) の濃度と指示値の差が ± 15% 以内	湿度: 65 ± 10%RH 気圧: 1,013 ± 50hPa 使用温度範囲を網羅。
8 ガス選択性	メタン、イソオクタン、一酸化炭素に対する感度が同濃度の水素の 10%以下 (ISO 26142:2010)	温度: 20 ± 5 湿度: 65 ± 10%RH
9 耐被毒性	HMDS ガス被毒性評価 : 欧州規格 EN50291 に従う	気圧: 1,013 ± 50hPa

他の項目については、JIS M 7653_1996 (携帯形可燃性ガス検知器) を準拠。

表3 定置型水素ガス検知器の製品仕様(目標)

項目	目標	条件
1 検知範囲	0 ~ 100%LEL (空気中水素濃度 0 ~ 4%) LEL: Lower Explosion Limit 爆発下限界	温度: 20 ± 5 湿度: 65 ± 10%RH 気圧: 1,013 ± 50hPa
2 検出下限	空気中水素濃度 0.01%	
3 指示精度	試験用ガスの濃度 (水素濃度 F.S.20%、F.S.50%、F.S.80%)と指示値の差が ± 25%以内	
4 応答速度	水素濃度 F.S.50%において、60%応答が 30 秒以内	
5 水素防爆	本質安全・耐圧防爆構造 (JIS C 0901, JIS C 0903, JIS F 8004 又は JIS F 8005 に適合)	-
6 自己故障診断機能	定量的評価法の確立	-
7 環境影響	環境温度: 温度 -10、20、40 において試験用ガス (水素濃度 F.S.50%) の濃度と指示値の差が ± 25%以内	湿度: 65 ± 10%RH 気圧: 1,013 ± 50hPa 使用温度範囲を網羅。
8 ガス選択性	メタン、イソオクタン、一酸化炭素に対する感度が同濃度の水素の 10%以下 (ISO 26142:2010)	温度: 20 ± 5 湿度: 65 ± 10%RH
9 耐被毒性	HMDS ガス被毒性評価 : 欧州規格 EN50291 に従う	気圧: 1,013 ± 50hPa

他の項目については、JIS M 7626_1994 (定置形可燃性ガス検知警報器) または、ISO 26142:2010 (Hydrogen detection apparatus — Stationary applications) を準拠。

3. 研究開発成果

3.1 研究開発成果、達成度

(1) 水素センサの要求仕様と評価法の調査

本項目については、目標仕様の明確化、定量的評価法の調査を目的として実施した。目標仕様については表 2、3 に示したとおり、有識者および NEDO 関係者との意見交換会の内容をベースに、関係者で検討の上、前記の通り策定した。それらの数値目標と試験条件は関連する JIS および ISO に基づいて設定した ()。

評価法に関しては、文献調査と検討を行い、センサの定量的評価法について方針性を決定した。詳細については実施項目 (4) 「水素センサ評価装置の改良」に記述する ()。

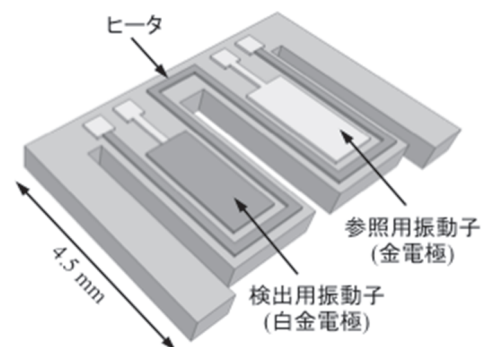


図1 水素センサ素子の概形

(2) センサの高感度化と製作プロセスの確立

本センサは、白金触媒上での水素と酸素の反応熱を検出する接触燃焼式水素センサに属し、温度検出のために水晶振動子を用いた周波数出力型の水素センサである。図 1 にセンサ素子の概形を示す。水素を検出するための白金触媒電極を有した水晶振動子の近くに、センサ加熱用ヒータと検出用振動子と同じ周波数温度特性を有し、尚且つ水素に反応しない参照用振動子を隣接して作り込み、二つの水晶振動子の周波数変化率の差分を取ることで環境変化を補償できる構造となっている。更に、センサ加熱用ヒータにより 100 付近に加熱して使用することで、十分に高い触媒活性を得ると共に、外気の湿度や水素の燃焼反応によって発生した水分の影響を抑制することができる。100 という低温で動作可能なことは、消費電力、ガス選択性、水素防爆における安全性において優位性が期待できる。

接触燃焼式水素センサの高性能化のためには、触媒構造を最適化することによる反応熱量の増大及び、センサ形状の最適化による熱容量・熱損失の低減が有効的な手段である。そのため、白金触媒とセンサ形状の二つの切り口でセンサの高性能化について研究開発を行なった。

はじめに、白金触媒について説明する。本センサは、ウェハプロセスによりサブミクロンオーダーの微細パターンを有することから、触媒形成においてもパターンニング性が重要な要件となる。また、プロセス温度やコストなども総合的に考慮し、電気メッキ法を用いたナノ構造白金触媒の形成技術について研究開発を行なった。予備実験の結果、成膜した白金皮膜の構造は電流密度によって制御することが可能であり、比較的低い電流では光沢を持った白金皮膜、その後は白金グレー、白金黒へと段階的に変化することが確認された。図 2 と図 3 に電気メッキにより形成した白金皮膜の表面と断面の SEM 写真を示す。白金黒となる範囲では、ナノオーダーの白金粒子が樹枝状に成長した立体構造が確認でき、効果的に触媒の表面積を増加できたと考えられる。

次に、水晶のエッチング加工及び、電極のフォトリソ加工を施した実際的水晶ウェハに対して電気メッキを行なった。図 4 に電気メッキ前後の水晶ウェハの写真を示す。その結果、ウェハ内の全てのセンサ素子の所定電極上に選択的に白金皮膜を形成できることが確認された。また、パターンニング精度については、約 10 μm と十分なレベルが実現できた。同様に、膜厚の制御技術についても実験を通じたデータ取得を行い、センサ感度と安定性に対して最適な形成条件を決定した。

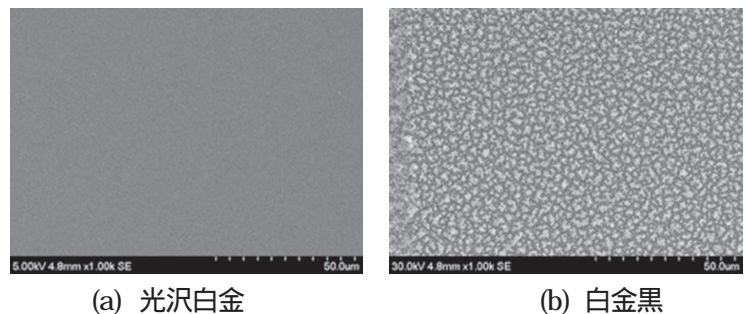


図 2 白金皮膜表面の SEM 写真

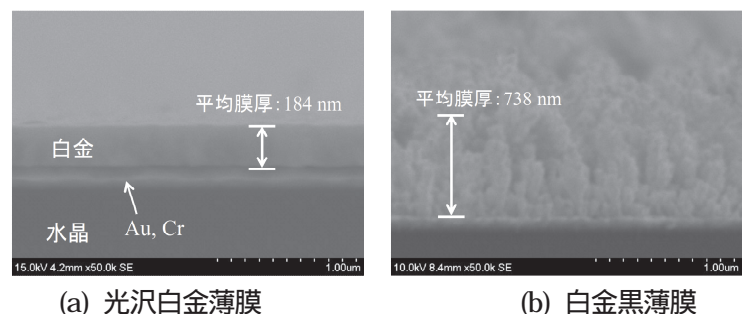


図 3 白金皮膜断面の SEM 写真

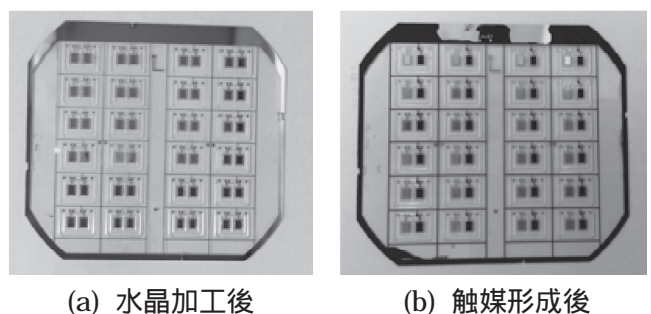


図 4 加工中の水晶ウェハの写真

図 5 にセンサ素子の感度の測定結果の一例を示す。グラフの縦軸はセンサ出力(周波数変化)を表しており、水素濃度 0%と 0.3%のガスを繰り返し導入して得られた結果である。従来の白金スパッタ薄膜を触媒としたセンサと比較すると、4 倍以上の感度向上が確認できた。これらの結果より、センサの高感度化が実現できる量産に向けた白金触媒形成技術を確認することができた。開発した MEMS 水素センサのための白金触媒の電気メッキ技術について、2016 年に米国で開催された IEEE 国際学会で発表した結果、論文賞を受賞する高い評価を受けた()。

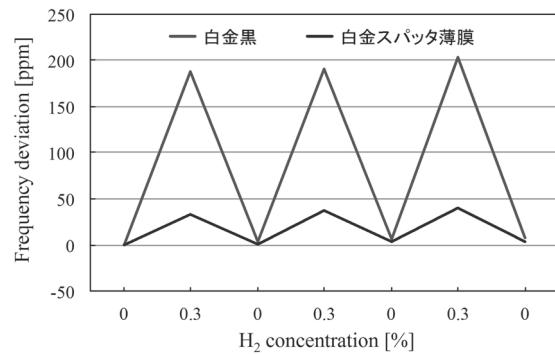


図 5 水素感度の比較結果の一例

次に、センサ形状の最適化について説明する。水晶振動子式水素ガスセンサにおいて、センサを構成する水晶振動子の Q 値は動作の安定性を決定する重要なパラメータの一つであり、水晶の形状や寸法によって大きく左右される性質を持っている。そこで、Q 値に着眼し、具体的な素子の寸法について検討した。寸法の異なる 4 種類の振動子を試作し、それらの Q 値を比較した結果を図 6 に示す。便宜上、それぞれの形状を SS、S、M、L と呼称する。グラフより、L (2800 μm) のサンプルが最も Q 値が高く、実用上必要十分なレベルを実現した()。

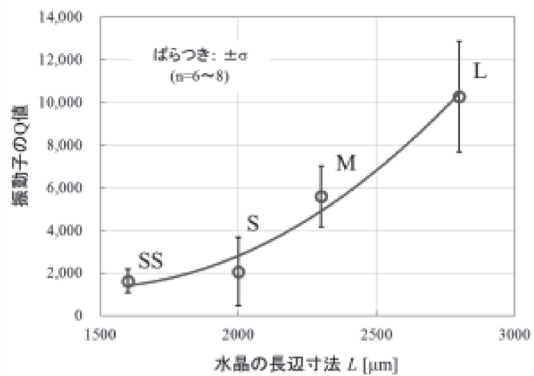


図 6 素子サイズと Q 値の関係

図 7 に水素濃度 0.1 ~ 4% に対するセンサの周波数変化を測定した結果を示す。結果は 3 個のセンサの平均値であり、縦軸は、検出用振動子と参照用振動子の周波数差の初期値をゼロとおいている。結果より、水素濃度に対して直線性に優れた出力が得られた。水素濃度 1%あたりの周波数変化は 9kHz、一方、センサのゼロ点安定性 3 (標準偏差) は実測で約 25Hz であった。S/N 比の考え方により水素濃度検出下限は 0.003% となり、目標である 0.01% を達成した。また、移動平均などの統計的手法を組み合わせることで、更なる微小濃度検出も十分に可能と考えられる。()

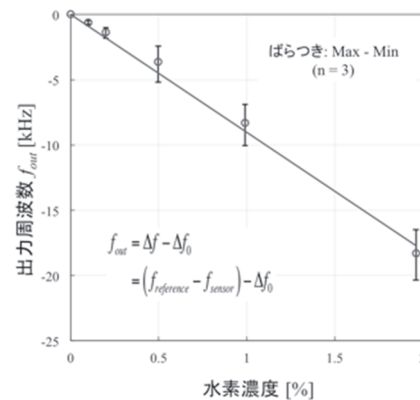


図 7 水素濃度に対するセンサの検量線

(3) シミュレーション技術の開発

本項目は、センサ素子設計のための熱的および振動についての定量的な解析結果を提供することを目標として実施した。

熱解析に関しては、水晶振動子を用いた水素センサでは、白金触媒上での反応熱を素早く検知し、周囲への熱流の流出を押さえることでセンサとしての性能を高めることができる。熱解析については各種シミュレータが市販されているが、水素センサでは白金触媒上での反応熱を定量的に導くことがネックとなっている。具体的には、実際の触媒は成膜条件により表面構造が大きく変化するため、それらを逐一モデル化することは困難であり、実際との一致は得られ難い。そこで、実際に試作した水素センサの感度測定結果から白金触媒単位面積あたりの反応熱を見積もることでこれを解決した。算出した反応熱量や水晶の比熱など

のパラメータから、水素センサの応答時間と感度、検出下限濃度、消費電力などの特性を試算した。図 8 は、センサ素子の面積と厚さ変数として、特性を算出した結果を示す。グラフの縦軸はプロジェクト開始以前に試作したセンサの代表長さを 100%としている。計算結果より、従来設計のセンサでは応答時間が 0.55 秒に対して、サイズの最適化により 0.2 秒以下に改善できることが明らかになった。一例として、素子サイズを半分に、厚さを 30 μm 薄くすることで、応答速度 3 倍、消費電力 1/4 に改善することができる。ただし、検出下限濃度に関しては触媒面積も比例して狭くなることから小型化により感度低下の傾向にある。

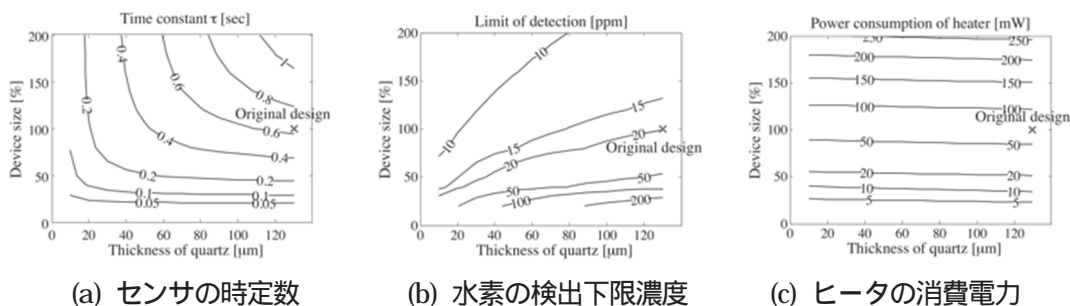


図 8 センサの形状と特性の関係性に関する熱解析結果

一方、振動解析については、数式による解析と有限要素法を用いたシミュレーションにより最適化検討を行った。はじめに、水晶振動子の寸法と振動特性の良否関係を推定するために、モードチャートと呼ばれるグラフを作成して検討した。図 9 に作成したモードチャートの一例を示す。モードチャートでは、縦軸が周波数、横軸が水晶の寸法を表しており、主振動を太線、他の不要な振動を細線で示している。設計上、太線と細線が交差する寸法は避けることが通常であり、最終的に丸印が付いているところが試作条件として採用された寸法である。

代表寸法の最適値をベースに詳細な設計を行い、有限要素シミュレーションにより振動の良否を再確認した。その結果を図 10 に示す。シミュレーション結果は、振動時の水晶の変位の大きさを色で示している。従来の設計では、色が濃い中央エリアに規則的な斑模様が見られ、不要振動の影響を受けていることがわかる。改善後の設計は、より安定した動作を実現するために細部の形状が調整されており、シミュレーションによりその改善効果が確認できた。

熱解析と振動解析の結果を基に総合的に検討を行い、センサ素子の最適形状を決定した()。

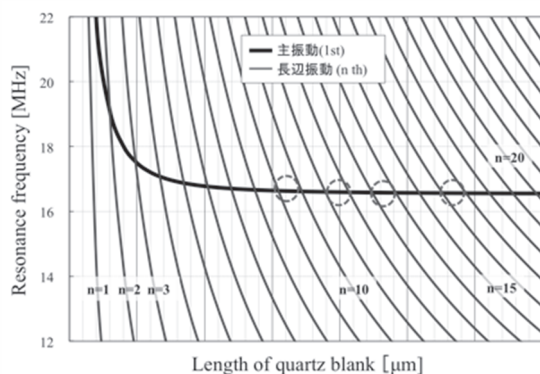
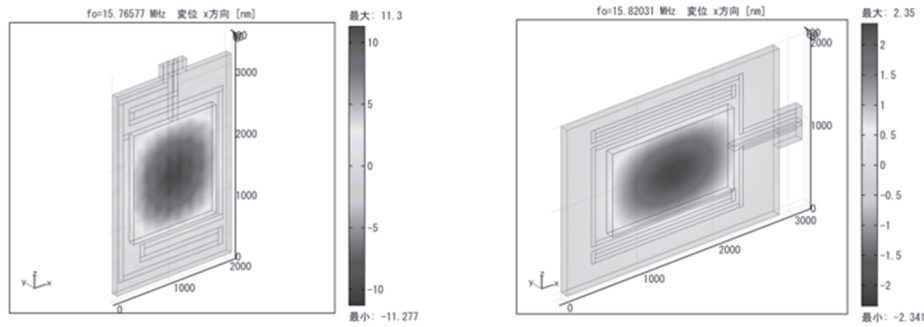


図 9 主振動と不要振動のモードチャート



(a) 従来設計 (b) 改善後の設計

図 10 有限要素法による主振動の変位分布の比較

(4) 水素センサ評価装置の改良

水素ステーション用途の水素検知器に関する国際規格として、ISO 26142:2010 (Hydrogen detection apparatus — Stationary applications) が施行されており、その中に、水素感度の試験方法に関する記載がある。試験法は代表例として示されている試験法のイラストを図 11 に示す。拡散チャンバ内にセンサを入れ、フィルムで封をする。拡散チャンバの周囲に水素ガスを一定量導入し、フィルムに穴を開けることでセンサと水素ガスを反応させるという至ってシンプルな手法である。しかしながら、センサを量産する上では、繰返し使用でき、尚且つ再現よく定量的に感度を校正する必要がある。また、ISO の方式では、フィルムの穴の開け方によってチャンバ内での水素ガスの拡散時間が大きく変化し、センサ自身が持つ応答速度特性を正確に計測することが困難になるという問題もある。

そのような背景から、特に研究開発段階においては、様々な水素濃度環境下で応答・回復時間、感度のリニアリティなどの評価ができる装置が必須と考えられ、水素と空気の質量流量比により幅広い濃度範囲の希釈ガスが生成できる機能を有した水素センサ評価装置の開発を行なった。

図 12 に開発した評価装置の写真を示す。また、表 4 に装置の目標仕様と開発装置の性能の比較表を示す。質量流量制御にはデジタルマスフローコントローラ、圧力制御にはデジタルオートプレッシャレギュレータを使用することで、試験環境を高精度でコントロールすることを実現した。拡散チャンバの形状は、容積とガス交換時間の関係を理論的に解析し、それに基づいて設計を行なった。ガス希釈系及び計測器は一括してパソコンで制御できるようになっており、GUI 上で任意の濃度シーケンスを組むことが可能である。また、センサの出力信号のサンプリング間隔は通常モードで最速 2 秒であり、試験内容に合わせて設定できる。一方、応答時間測定に特化した高速モードでは 0.3 秒に短縮される。装置開発の結果、センサ感度に関してセンサ開発を進める上で必要な性能を満足する装置が実現でき、量産時におけるセンサの感度校正装置としての知見が得られた ()。

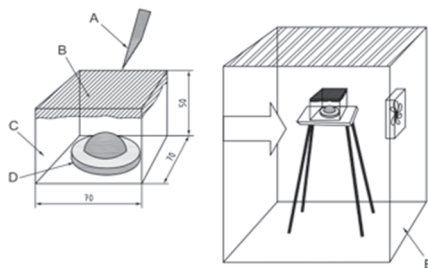


図 11 ISO に代表例として提示されている感度試験法

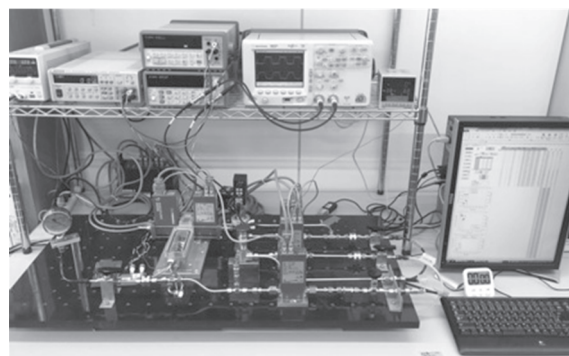


図 12 センサ感度評価装置

表 4 評価装置の開発目標と実際の性能の比較

項目	評価装置の開発目標	開発した評価装置の性能	センサの開発目標
濃度範囲	センサ仕様よりも広範囲	0.004% ~ 10%	検出範囲 0.01% ~ 4%
ガス交換時間()	10 秒位内	6 秒(設計値)	応答時間 30 秒
圧力範囲	80kPa ~ 120kPa(A)	80kPa ~ 120kPa(A)	1,013 ± 50hPa
周波数測定精度	0.01%	10 ⁻⁸	ノイズレベル 0.01%
サンプリング間隔	5 秒以内	最速 2 秒	

(5) 水素ステーションの計装における水素センサの位置付け調査

水素ステーションに組み込まれている計装の構成、具体的な水素センサの設置場所と個数、組込み可能な検出部のサイズ、水素センサの価格と維持コストに関する情報を得るため試験運用中の水素ステーションを訪問し見学を行った。2015 年 4 月 23 日に JHFC 千住水素ステーション水素ステーションを訪問・見学した際の情報を元に下に記述する。

JHFC 千住水素ステーションは東京ガス株式会社と大陽日酸株式会社で運営され、都市ガス改質型ステーションである。表 5 に水素ステーションにおける水素センサ設置状況を、図 13 にステーションの写真を示す。センサは建屋の天井と、ディスペンサ本体に設置されているのが確認できた。

表 5 JHFC 千住水素ステーションにおける水素センサ設置状況

センサの形態	センサ設置場所	個数	サイズ	備考
定置型	建屋の天井	複数	20cm 角程度	高濃度用
	建屋の天井	複数	20cm 角程度	低濃度用
ディスペンサ組込型	ノズル先端付近	1 個	20cm 角程度	
	ディスペンサ本体ケース裏	1 個	20cm 角程度	



(a) 供給設備建屋



(b) 水素製造設備



(c) 水素ディスペンサ



(d) 耐圧防爆型炎検知装置



(e) 耐圧防爆型漏洩検知器

図 13 訪問した JHFC 千住水素ステーション

水素ステーション定置型水素ガス検知器

水素センサに要求される最も重要な役割は水素ガス漏れを検出し、システムを停止することである。例えば、常時水素濃度を監視し、爆発下限濃度の 1/4(=水素濃度 1%)を検出するとシステム停止信号を出力してシステムを停止させる、という検知システムである。瞬間的な異常の検出を目的とするため、長期にわたり精度を確保する必要はなく、センサ感度 20%/年程度のドリフトは問題無い。また、オンサイト型のステーションでは、水素中の不純物濃度をモニターするために常時水素を大気放出しているため、低濃度の水素検出能力は重要でない。最も重要な要件は誤動作しないことであり、水素センサが、特にガソリンや LPG などのハイドロカーボンの干渉を受けない必要がある。また、屋外設置のため雨やホコリへの耐久性も必要である。

動作確認試験としては、例えば年 1 回センサメーカーによる有償での試験、標準ガスをビニールパックに入れてセンサに吹き付け後、ストップウォッチでシステム停止までの時間を計測、10 秒程度の応答ならば異常無しとするようなものである。一般的には 1 ステーション当たり、5～15 個程度設置される。また、高圧ガス保安法上、設置が義務となるセンサ(防爆構造が必須)である。

ディスベンサ組込型水素ガス検知器

ディスベンサの本体天井裏に拡散式センサ 1 個と、ノズル先端からチューブで導入する吸引式センサ 1 個の計 2 個の水素センサが必要である。どちらも防爆構造が必須である(耐圧・本安防爆どちらでも可、第一種接地工事の理由から耐圧が主流)。メンテナンス性を確保するために、吸引式センサのフィルタ交換が簡単な方が良い。定置型、ディスベンサ組込型共に、水素濃度 1%を閾値とした On/Off 信号のみの出力でも良い。法令点検が 1 年に 1 回で共に耐圧防爆構造を採用し、本質安全防爆構造は第一種接地が取れないので現状では難しいと考えられる。

ハンディー型水素ガス検知器

このタイプの位置づけは、定置型センサで水素漏れが検出された場合に、漏れている箇所を特定するためのセンサである。法律によって義務化されたセンサでは無いが、水素漏洩エリアで使用することが前提となるため防爆構造が必要である。水素ステーションのメンテナンスのため自主的に数台保有することが望まれる。配管の継手などを検査するために小型で吸引機能を有することが必要である。校正はステーション事業者がメーカーへ依頼し、年 1 回程度である。現在は海外製が多く、進出が比較的容易。センサ出力は低濃度までリニアリティがあり、応答も高速である必要がある。

これらの調査の結果、検知器の種類毎の個別要求事項、設置数量、保守体制などの有益な情報を収集することができた()。ディスベンサ組込型はディスベンサメーカーとの連携した開発が必須であるため、本プロジェクトでは、定置型検知器とハンディー型検知器の二種類に開発対象を絞ることとした。

(6) センサ駆動回路の開発

センサ素子を駆動するための発振回路、ヒータ制御回路、及びセンサの劣化検出回路について設計、試作評価を行なった。以下に、各回路の結果についてそれぞれ説明する。

発振回路

センサ素子は検出用と参照用の二つの水晶振動子で構成されており、センサ素子を駆動するためにはそれぞれの振動子に発振回路が必要である。2ch 分の発振回路をセンサパッケージ上に実装するためには、1cm²

の面積に収まるように非常にコンパクトに設計する必要がある。従来のコルピッツ型発振回路では回路を構成する部品点数が多く、面積的に実現困難という結論に達した。そこで、センサ素子の電極構成の変更や、市販の安価なワンチップ IC への対応により、発振回路の小型単純化を実現した()。開発した発振回路の駆動能力を評価した結果、振動子の Q 値が 3000 以上ならば安定して発振ができることが確認された。

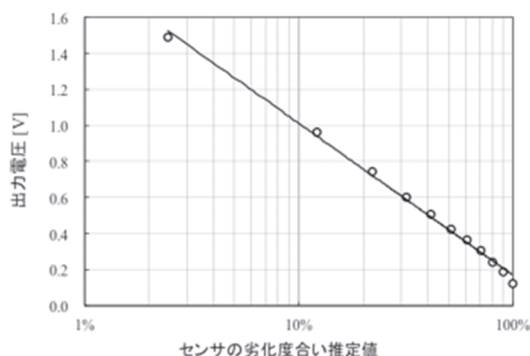


図 14 劣化検出回路の動作の一例

ヒータ制御回路

センサ素子表面に形成されたヒータを温度制御する

上で、外気温や風が変化しても温度を一定に保つ必要があり、それにはヒータの抵抗値を一定制御する方式が最適と考えられる。そこで、ホイートストンブリッジ回路を基本とした定抵抗制御回路を設計した。また、電源投入直後に短時間の内に急加熱するとセンサへの熱ストレスが過剰となるため、温度の立ち上がり制御機能を含めて独自の回路を設計した。ハンディー型検知器向けに設計したヒータ制御回路では、多回転型ボリューム抵抗器によりヒータの設定温度を微調整できる構成とした。また、単 3 電池 2 本の DC3V 電源でも 100 まで安定して昇温制御できるように回路構成を工夫した。

一方、定置型検知器では、ハンディー型検知器よりも広い使用温度範囲が想定され、ヒータ制御回路においても温度精度への要求が厳しくなる。そこで、ハンディー型検知器用に設計した回路を改良し、ヒータの温度をマイコンから直接制御できる様に変更した。また、回路に使用する能動部品の精度に影響され難い構成を独自のヒータ回路を新たに開発し、高精度化を達成した()。これにより、設計上、 20 ± 40 の環境下でもヒータの温度を ± 2 以内に安定制御することが可能となった。

自己診断機能

振動子表面にコンタミネーションが生じると水晶振動子の機械的振動の安定性が低下することが知られており、これを応用することでセンサの劣化診断が実現できる可能性がある。その定量的な指標が Q 値やクリスタルインピーダンスなどのパラメータであるが、それらの評価には高価な計測器を使用することが一般的である。そこで、発振の立ち上り時間や位相、振幅変化など複数の手段について理論解析に基づき検討した結果、振動子の振幅から効果的に特性変化が検出できる可能性が見つかり、更に、非常にシンプルな回路構成により変化が検出できることをプリント基板上で実証した。その結果を図 14 に示す。グラフ横軸の劣化度合い推定値とは、センサの劣化の進行度合いを等価回路パラメータにより疑似的に再現したものである。グラフで示したように、劣化の進行度合いに対して指数関数的に出力が変化している。

最終的には、模擬フィールド試験を通して、回路動作を確認する計画である()。

(7) 模擬フィールド試験

開発段階の水素センサは防爆認可が取得できておらず、また、電気的な不具合が発生する可能性を完全に否定することができないため、実際に稼働している商用水素ステーションで試験を行うことは危険を伴う。安全を確認した上で水素ステーションにてフィールド試験を実施するという段階を踏むために、準備として基礎的なデータ取得のための予備実験を行うことを目的として実施する。

試験設備については、外部委託できる施設も検討したが、こちらの要求に合致する適切な施設が見つからなかったことから、最終的に実施計画書に記載の通り試験設備を開発保有することに決定した。環境試験装置としては、温湿度調整機能、水素ガス濃度調整機能、圧力調整機能、一酸化炭素およびメタン、その他ガスの導

入機能を搭載した装置を開発しており、2017年10月完成予定である。装置立上げ後、直ぐに環境試験を実施し、事業期間内に目的の試験が終了する計画である。スケジュールについては、実施計画書に記載された計画に対してほぼオンスケジュールで進行しており、2月に完了見込みである(見込み)。

表6 模擬フィールド試験における評価項目と内用

	項目	目標	条件
定置型	環境影響	環境温度:温度 0、20、40 において試験用ガス(水素濃度 F.S.50%)の濃度と指示値の差が ±15% 以内	湿度:65 ± 10%RH 気圧:1,013 ± 50hPa 使用温度範囲を網羅。
	ガス選択性	メタン、イソオクタン、一酸化炭素に対する感度が同濃度の水素の 10%以下 (ISO 26142:2010)	温度:20 ± 5 湿度:65 ± 10%RH
	耐被毒性	HMDS ガス被毒性評価 :欧州規格 EN50291 に従う	気圧:1,013 ± 50hPa
ハンディー型	環境影響	環境温度:温度 -10、20、40 において試験用ガス(水素濃度 F.S.50%)の濃度と指示値の差が ±25%以内	湿度:65 ± 10%RH 気圧:1,013 ± 50hPa 使用温度範囲を網羅。
	ガス選択性	メタン、イソオクタン、一酸化炭素に対する感度が同濃度の水素の 10%以下 (ISO 26142:2010)	温度:20 ± 5 湿度:65 ± 10%RH
	耐被毒性	HMDS ガス被毒性評価 :欧州規格 EN50291 に従う	気圧:1,013 ± 50hPa

(8) 水素センサ実用化における法規に関する調査

水素ステーションの運営団体へのヒヤリングの結果、ステーションにおいては、高圧ガス取扱箇所に指定されていることから主に高圧ガス保安法が適応されているとのこと。2010年頃から順次、高圧ガス保安法や消防法などへの適応、およびその改正について関係省庁および外郭団体に議論がなされている。例えばその一つが、高圧ガス保安法における水素ディスペンサ周辺の防爆ゾーン基準の明確化である。水素センサについても例外ではなく、定置型検知器は設置場所により対応する防爆規格が定められており、年一回の法定点検が義務付けられている。また同時に、水素インフラ普及に向けて、経済産業省をはじめ、NEDOにより規制緩和の動きもあるが、安全安心の要である水素漏洩検知については、その動きは消極的である。いずれにせよ、定置型検知器およびハンディー型検知器、どちらにおいても防爆構造が必須条件であり、実用化においてはその認定を得ることが第一関門であることが判明した()。

一方、家庭用燃料電池エネファームにおける水素センサの位置付けについては、ヒヤリングより明確な回答を得ることはできなかった。エネファーム内での水素貯蔵量は微量なため、センサは不要と話す関係者もいれば、反対にメーカーが定期点検と交換をしているという声もあった。従って、各社足並みが揃っていない可能性があり、エネファーム向けの水素センサとして実用化する場合は、継続調査が必要である。

(9) センサパッケージの開発

センサ素子と駆動回路を実装したセンサパッケージの開発を行なった。材質には、高周波特性に優れ、過酷環境においても劣化し難く車載用パッケージとても実績のある LTCC(低温同時焼成セラミックス)を採用した。図15に検知器の構成ブロック図を示す。図中の破線の範囲がパッケージに実装された機能である。図16にパ

パッケージ構成を表した断面図を、図 17 に試作したパッケージの写真をそれぞれ示す。LTCC パッケージは 1 次設計と、改良版の 2 次設計を試作評価した。掲載した写真は 2 次設計のものである。パッケージの上面側に水晶のセンサ素子、下面側に IC と受動部品を実装し、LTCC の両面にキャビティーを作ることで、小型化を図った。実施計画書で掲げた検出部 4cm³ 以下の小型化目標に対し、外形寸法 L16mm×W16mm×H3.5mm と 1cm³ 未満に抑えることができた()。センサ実装面の蓋については、当初は複数の穴を設けた LTCC 製のものを使用していたが、孔径を小さくすることに対する限界と、製造コストの観点から SUS 製に変更した。

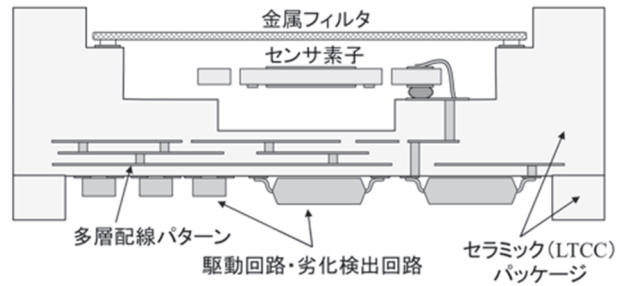
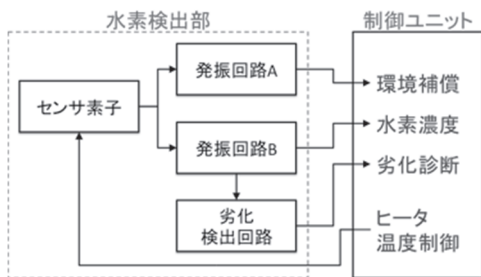
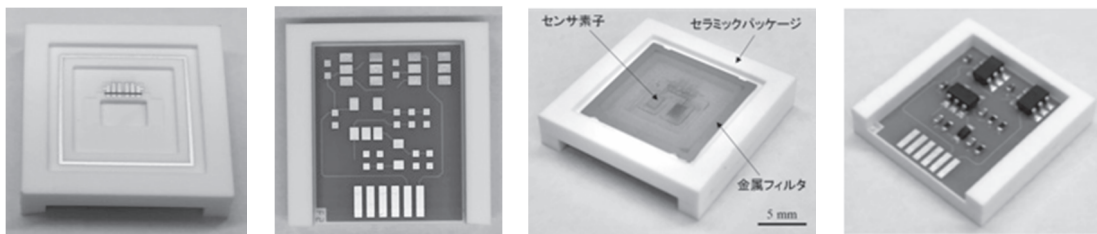


図 15 検知器の基本構成ブロック図

図 16 パッケージの構成



(a) LTCC オモテ

(b) LTCC ウラ

(c) 実装後オモテ

(d) 実装後ウラ

図 17 試作したセンサパッケージの写真

(10) 検出部ケースの開発

国内における防爆認定は型式認定の形を取っているため、型式が振られた製品が認可対象となってくる。検出部ケースにおいては、研究開発段階における試作器という位置付けとすることが妥当と考えられ、基本的な防爆構造に関する設計要件を満足した機器開発をターゲットとして実施した。よって、防爆検定时に求められる火花試験や耐圧力などの種々の試験は専用設備が必要となるため、事業内には実施しない方針とする。

ハンディー型検知器

実施計画書においては、検出部ケースの構造は据え置き用途として記述されており、LTCC パッケージと駆動回路を一体のケースに収めて検出部とする計画であった。しかし、ハンディー型検知器においては、前述の調査の結果、吸引機構を設けることが必須と判断されたことから、センサへ効率的に外気を導入するための機構を設けた。吸引用の小型ポンプを用いて、プローブ先端から取り込んだ外気をセンサ部までパイプで導入し、更に穴加工を施した流路ブロック内に固定されたセンサへと効率的に導くことができる構造とした。また、実施項目(11)「防爆構造の検討」にて詳細について記載しているが、ハンディー型検知器では適応する防爆構造を本質安全防爆とし、本安回路を重点的に開発すべきと判断されたことから、ケース本体は軽量安価なプラスチックケースを加工して作成した()。

図 18 に開発した流路ブロックの写真を、図 19 にハンディー型検知器のケースの写真を示す。図 18(a)の底側部品中央の白いパーツがセンサパッケージとなっており、蓋側部品内に形成された流路によりセンサ直上へと外気が導入される。一方、プローブは SUS とアクリルで作製した。アクリル製の容器内部は二重のフィルタ

となっており、一方が水分と粉塵対策としての中空糸膜フィルタ、もう一方は湿度とシリコン系揮発性ガス対策としてシリカゲルを入れて使用するようになっている。

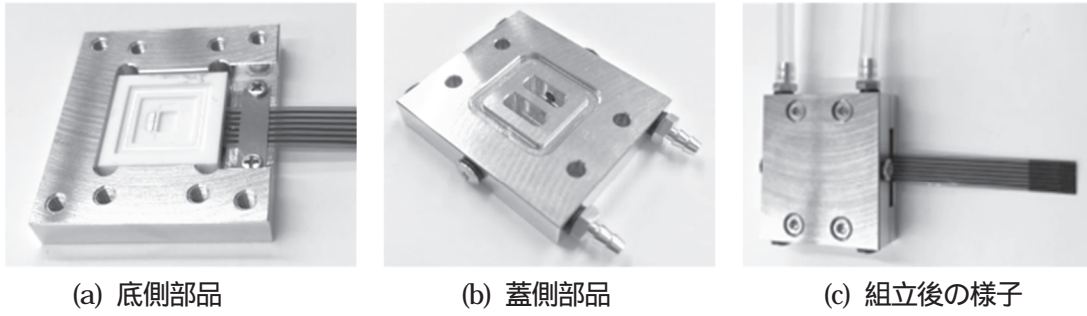


図 18 流路ブロックの写真

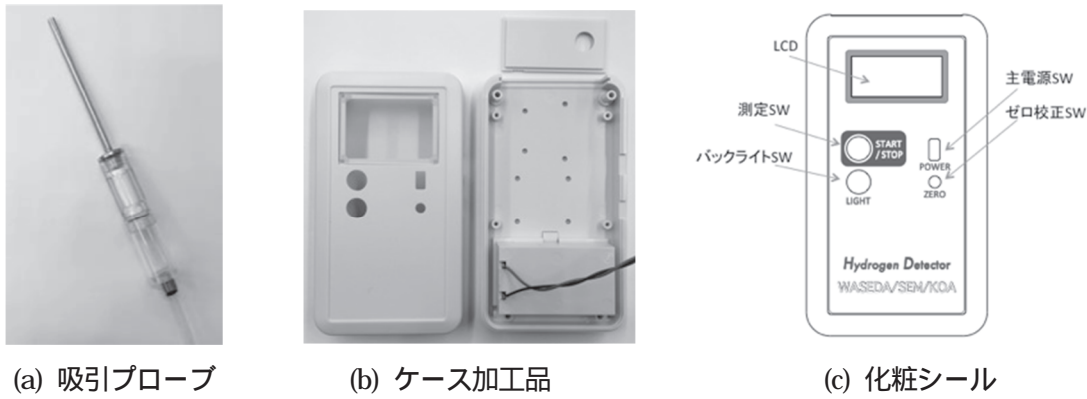


図 19 ハンディー型検知器のケースの写真

定置型検知器

定置型検知器では、適応する防爆構造を耐圧防爆としたため、機構的要件を盛込んだケース設計を行なった。完成予想図を図 20 に示す。耐圧容器は、主に本体と蓋、外気導入用フィルタの 3 つで構成されており、本体内部にマイコン等を実装したプリント基板が収められる。また、センサの応答時間を短縮するために、センサはフィルタの近傍に配置するように工夫されている。耐圧容器の材質は、容器本体と蓋はアルミニウム合金製、外気導入用フィルタ部は SUS 製とした。蓋の中央部にはガラス窓を設け、プリント基板上のインジケータが見えるように設計されている。ケーブルグラウンドについては市販のものを使用する。

現在、耐圧容器の筐体および部品加工を進めており、9 月末の完成予定である(**見込み**)。

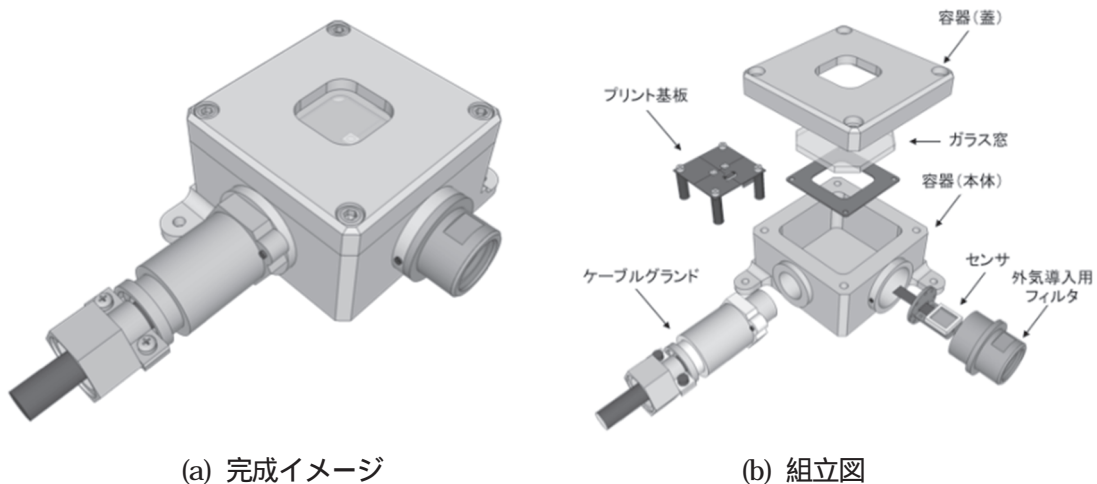


図 20 定置型検知器のケースの完成予想図

(11) センサシステムの開発と評価

ハンディー型と定置型検知器については、マイコンを中心としたシステムのコア部分は基本的に共通の機能を実装した。センサパッケージには2ch分の発振回路が搭載されており、センサの検出用振動子と参照用振動子の夫々の発振周波数のクロックが出力される。検知器側の電子回路では、2chの周波数信号を周波数差検出回路に通すことで、差の周波数のクロックを得る。一例として、元の周波数が16.0MHzと15.95MHz出会った場合、周波数差検出回路の出力は50kHzとなり、扱いやすい周波数帯へと変換される。その差の周波数はマイコンのI/Oポートに入力され、内部の32bitカウンタ機能によって、周波数を測定する。その後、周波数に感度係数を四則演算することで、環境影響を補正した水素濃度値が算出できる。

自己故障診断については、パッケージに実装された劣化検出回路の電圧出力をマイコン内蔵のA/Dコンバータで読み取り、診断結果を表7に示す三段階で状態分けし、その信号をリアルタイム出力できるようになっている。中間の劣化状態とは、センサが近々寿命を迎えるので交換を推奨するという位置付けである。例えば、この期間内にユーザはメーカーへ部品交換を注文するなどの対処をとり、検知器が故障停止する前に安全に交換することができる。

表7 自己故障診断機能によるセンサの状態分け

状態	説明
正常	センサは健全であり、問題なく動作できる
劣化	寿命が近いいため新しいセンサへの交換を推奨する
故障	劣化が完全に進行し、水素濃度測定ができない状態 水素濃度の出力を遮断し、検知器を安全停止する

ハンディー型検知器

ハンディー型検知器の機能に関する設計仕様を表8に示す。表内に記載した使用温湿度範囲については、冒頭に示した製品仕様(目標)とその試験条件を確実に満足するために、設計仕様は多少厳しい条件を目標として掲げている。

ハンディー型検知器のシステムブロック図を図21に、試作した検知器の写真を図22に示す。ハンディー型検知器は、システム制御用にマイコンを搭載しており、入力としては、センサからの周波数信号と操作用スイッチ二個、出力としては、RS-232Cシリアル信号出力、4-20mAアナログ電流出力、液晶ディスプレイ表示、吸引ポンプのOn/Off制御などの機能を実現した。検知器に搭載されるセンサは、全て事前に感度校正されたものを使用し、固有の校正データを検知器内部の不揮発性メモリEEPROMに保存する構成とした。これにより、センサが劣化した際に、EEPROMに記録されている校正データを上書きすることでセンサ交換にも対応できるようにした。

開発したマイコンプログラムとプリント基板をケースへの組込み、実際のセンサを接続した上で動作試験し、全ての機能が正常動作することを確認した()。

表8 ハンディー型検知器の機能に関する設計仕様

検知原理	接触燃焼式
検知方式	ポンプ吸引式
検知範囲	0.01 ~ 4 vol%
表示機能	LCD表示(バックライト付き) 水素濃度や故障診断結果などをテキスト表示

外部出力	濃度:4-20mA アナログ電流出力 ¹ および、RS-232C シリアル信号出力
電源	単3電池2本または、ACアダプタ(3V) ²
防爆構造	本質安全防爆構造 Exia C T4 相当
保護等級	
使用温湿度範囲	0～50、10～90%RH(結露なきこと)
外形寸法	L135mm×W80mm×H35mm(吸引プローブ除く)

- 1 受信器に使用するシャント抵抗は 100 Ω 以下
- 2 外部電源は動作試験用、防爆規格適応外

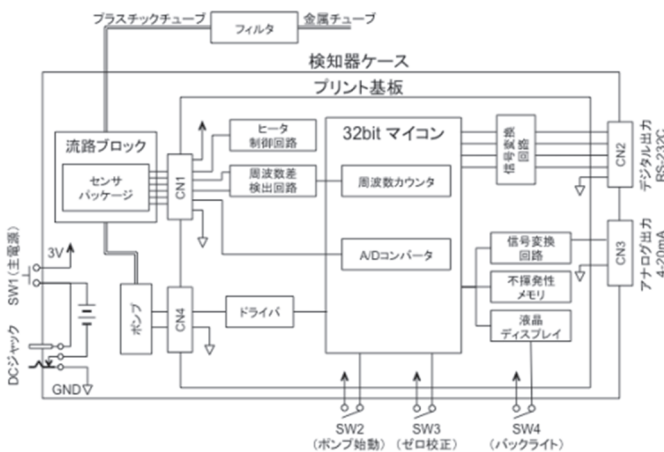


図 21 ハンディー型検知器のシステムブロック図

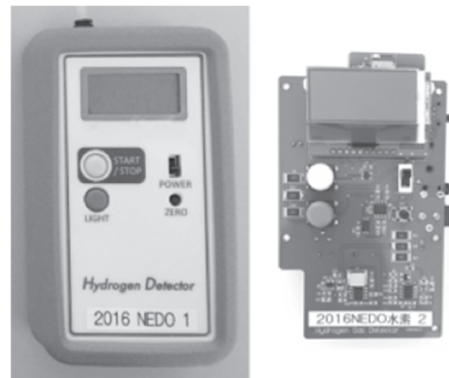


図 22 ハンディー型検知器の二次試作 (左: 外観、右: プリント回路基板)

定置型検知器

定置型検知器の機能に関する設計仕様を表 9 に示す。表内に記載した使用温湿度範囲については、冒頭に示した製品仕様(目標)とその試験条件を確実に満足するために、設計仕様は多少厳しい条件を目標として掲げている。

定置型検知器は有線ケーブルによる電源供給、および信号出力とした。出力信号は水素濃度と故障診断結果の二種類で、どちらも長距離伝送に向く 4-20mA 出力とした。一方、外部から供給される電源電圧は DC9V と設定している。検知器の内部に電源回路を搭載しており、供給電圧が 9V ± 2V の範囲で振れても問題なく動作できることを確認している。

また、検知器には無線信号出力機能を搭載した。これにより、アナログ出力では実現できない高分解能の濃度データや、詳細な劣化診断結果、種々のエラーコードを送受信可能である。例えば、検知器に異常が生じた際に、無線受信端末によっていち早く状態を診断し、結果として迅速な修理、交換等の対応措置を採ることに繋がることを期待している。また、水素ステーションに検知器を設置する際の試験運転時に無線通信機能によって検知器の状態が詳細に把握できることは大きなアドバンテージになり得る。通信規格としては Bluetooth を採用した。将来的に、水素ガス検知器にも独立電源のニーズが高まると予想され、特に Bluetooth4.0 以降は工業用無線規格の中でも取り分け消費電力が小さいことが特徴である。また、特別な受信装置が無くともノート PC やスマートフォンなどの端末でも簡単に受信ができる。ただし、防爆指針により危険場所における通常の通信端末の使用は制限されている。無線機器のため、防爆エリア外でも使用は十分に可能と予想しているが、保守作業上、防爆適応の受信機器の需要があれば、製品設計時に別途検討する。

現状では、プリント基板の開発と動作確認まで完了した。製作したプリント基板の写真を図 24 に示す。前途の

通り、防爆容器は9月末の完成予定であり、プログラム開発も同時期に完了する計画である。10月初旬に全てのコンポーネントが揃い、組立評価に移る。よって、実施計画書のスケジュール通り最終年度の第3四半期中旬に完了することが見込まれる(見込み)。

表9 定置型検知器の機能に関する設計仕様

検知原理	接触燃焼式
検知方式	拡散式
検知範囲	0.01 ~ 4 vol%
表示機能	水素漏洩インジケータ:青色LED(点滅) 故障診断インジケータ:緑 黄 赤(常灯)
外部出力	濃度:4-20mA アナログ電流出力 ¹ 故障診断:アナログ電流出力 ¹ 無線信号出力:検知器の運転状態モニタリング ²
電源	DC9V、有線にて供給
適合ケーブル	CCV-Sケーブル(4芯)
防爆構造	耐圧防爆構造 Exd C T4相当
保護等級	IP65(対塵、耐噴流水)相当
使用温湿度範囲	-20 ~ 60、10 ~ 90%RH(結露なきこと)
外形寸法	L110mm x W90mm x H50mm(突起部除く)

1 受信器に使用するシャント抵抗は200以下

2 検知濃度や劣化診断結果に加えて、

センサの生データやエラーコードなどの詳細データを無線データ送信

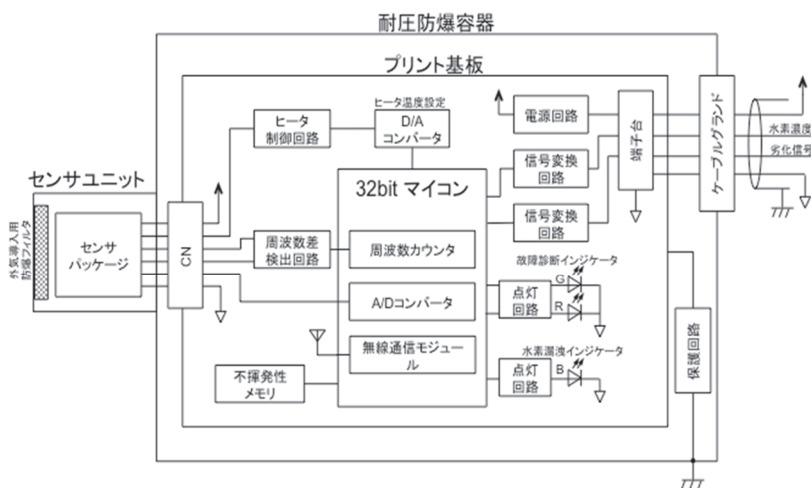


図23 定置型検知器のシステムブロック図

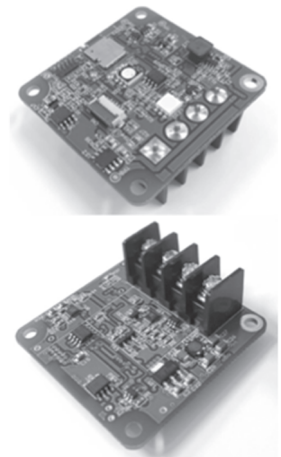


図24 プリント基板の写真(上:表側、下:裏側)

(12) 防爆構造の検討

防爆構造については、防爆指針(国際整合技術指針 2015)の文献調査と有識者からの助言を基に検討した。ハンディー型と定置型検知器では仕様が大きく異なるため、防爆構造について完全に分けて調査検討した。

ハンディー型検知器においては、本質安全防爆構造 Exia C T4 への適応に向けて検討した。センサ素子のヒータが最も消費電力が大きく外気温-20 の風が吹く過酷環境を想定すると解析上最大 100mW と予想されている。一方、吸引ポンプについては、消費電力 150mW とヒータよりも大きい。試作検知器で採用した小型ポンプは比較的入手性の良い市販品であり、製品設計時には専用開発する必要があると考えられることから、最終的に消費電力も半分程度にまで低減できる見込みである。また、電源電圧も3Vと小さい。これらの電気エネルギーの値を、防爆指針に記載されている水素ガスの火花曲線と照合した結果、火花が生じる可能性は十分に小さいと判明した。従って、プリント基板レイアウト設計において、規定の離隔距離など幾つかの項目を満足し、更に故障に備えて過電圧・電流防止するために電源回路に電流制限抵抗と保護ヒューズを設けることで設計上求められる電気的な基本要件を満足できると判断した。故障時の異常電圧の論理検証や火花点火試験については、高額な専用設備を要することから製品設計時に実施する。また、筐体に要求される項目についても同様である。

定置型検知器においては、独立電源を搭載し、無線通信により配線フリーとした本質安全防爆構造の検知器という新しいコンセプト提案も検討したが、現時点でのユーザへの受容性を優先し、現存の水素ステーションで採用されている定置型検知器のように建屋に取り付ける検知器と、事務所内に設ける指示計などの受信側をケーブルにて有線接続する方式とした。危険区域と安全区域をケーブルで接続しようとした場合、本質安全防爆構造ではセーフティーバリアを間に挟む方法が一般的であるが、それには A 種接地工事が必要となるため、ユーザから採用し辛いとの声があった。そのため、A 種接地工事を必要としない耐圧防爆構造を最終的に選定した。耐圧防爆構造の場合、その容器の構造が防爆指針に準ずる必要があるが、電気的な要件は一部を除いて基本的に無い。そこで、耐圧防爆構造 Exd C T4 の適応に向けて、防爆指針を調査の上、耐圧容器の設計のための仕様を作成し、それを基に筐体設計を行なった。

以上、防爆指針の文献調査と有識者からのヒヤリングにより、ハンディー型および定置型の水素ガス検知器の研究開発において必要な防爆構造に関する知見と具体的な設計根拠が得られた()。

3.2 成果の意義

従来の水素ガス検知器においては、高圧ガス保安法で設置が義務付けられるセンサについては定期点検の実施が定められているが、そうでないものは、任意での有償点検という維持管理方法を採用してきた。しかしながら、1 年毎の定期点検で不良と判断されたセンサは、過去一年以内のある期間の間、性能を十分に満足せずに放置されていたことになり、将来的に水素エネルギーを世界的に普及させていこうとする中で、安心安全を確実に担保できるとは言いきれない。当然、市場にあるセンサは、そういった不良が発生しないように品質が保証され、必要十分な安全率を鑑みて製品寿命が与えられるが、結果として、水素センサの価格が高額になってしまう。しかしながら、センサが使用される実環境は千差万別であり、工業地帯や沿岸部など、過酷な環境下で使用されるセンサの中には想定以上に劣化が進むものや、品質保証範囲から漏れて出荷された不良製品が統計確率的に必ず存在する。このような現状に対し、自己故障診断機能を有した水晶振動子式水素センサという、個々のセンサがリアルタイムで自身劣化度を診断できる高信頼化技術を開発した点に最も意義があると言える。

また、本プロジェクトの成果を広く公開することにより、水素センサは劣化や故障するものという新たな観点か

ら現状の安全設備を見直すきっかけ作りになったことにも意義があり、センサ自身の信頼性の重要度について認識向上に繋がると予想される。

更に、本プロジェクト実施後の事業化により、自己故障診断機能を有した信頼性の高い新たな方式の水素センサを市場に投入することにより、水素センサ市場における競争が活発化し、水素センサ全体の高性能化、低コスト化を促すことが期待できる。水素センサ市場の活性化により、水素の取り扱いに関わる分野について安全、安心が低コストで担保できるようになれば、水素インフラ及び燃料電池産業への信頼性も向上し、当該分野のより一層の普及拡大が期待できる。結果として、エネルギーセキュリティ等の国家的課題、クリーンエネルギー活用による地球環境的課題、当産業全体の国際競争力の向上など多くの面に寄与し、水素関連技術の国内生産拡大とそれに伴う雇用創出に貢献できると考える。

3.3 開発項目別残課題

当初、定置式のセンサシステムとして提案したが、有識者から将来的な水素ステーション業界への参入を考えるとハンディー型検知器を先行して開発すべきとの助言を受け、ハンディー型検知器と定置型検知器の二種類について研究開発を実施することに計画変更した。それに伴い、二種類の検知器についての開発計画を作成し、修正計画書をNEDOへ提出、受理された。

修正計画書に記載の開発スケジュールに対して、現状、ほぼオンスケジュールで進行できていることから、本プロジェクト期間中に全ての項目について完了できる見込みである。したがって、残課題はない。

4. まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

製品の優位性

既存の水素センサでは、個々のセンサが実際に使用されている現場において劣化等を随時監視する機能については研究がなされておらず、劣化状況監視機能を組み込むことは容易ではない。これに対して、本グループで開発を進めている水晶振動子を利用した水素センサは、要求されている性能を満足するだけでなく、センサの劣化・故障を随時監視する自己故障診断機能を組み込むことが可能であり、本センサを水素ステーションへ搭載することでシステムの信頼性向上が期待できる。また、MEMS技術を応用した生産技術を確立することによって小型、低消費電力、尚且つ量産化による低価格を実現することによって、水素ステーションだけでなく並行して普及が求められる燃料電池自動車や、家庭用燃料電池にも応用可能な水素センサとして、水素エネルギー社会実現へ貢献することができる。

本製品の技術は他社技術と比較し、自己故障診断機能を有し信頼性が高い、長寿命で安定性が高い、高分解能で低消費電力、低コストなど優位性を持ち、十分な競争力があるといえる。また、本製品の投入で市場の競争力の活性化が期待できる。

シナリオ

事業化はKOA株式会社が実施し、早稲田大学からは助言を得る形で進める計画である。この技術的優位性を前提に、事業化計画としてはセンサ単体/モジュール、ハンディー型検知器、定置型検知器の三段階に分けて市場投入を計画している。はじめに、センサ素子と駆動回路を実装したパッケージまで、或いは水素濃度演算機能まで組み込んだモジュールの形態での市場投入を図る。装置組込の用途を想定しており、主な市場ターゲットとしては水素製造装置などの関連機器や、エネファームとなる。まずはセンサ単体で実績を積み、その後、ハンディー型検知器、定置型検知器の順で市場投入を図る。事業化までのスケジュールを図25に示す。プロジェクト期間終了後1年目(平成30年度)にVOC収集を再度実施し、センサ単体/モジュールの製品企画および製品設計を行う。その後、工程設計と量産設備導入を経て、平成32年度中に市場投入を目指す。製

品構想・開発の段階においては、試作と実証評価を繰り返し改良を進め、プロジェクト期間内で得られなかった長期評価の結果等を設計に反映させる。信頼性などで仕様を満たせない場合には、製品試作完成予定を延長することも有り得る。また、展示会出品やサンプル出荷などの拡販活動を並行して行い、客先での実証試験等により、装置とのインターフェイスやオプションなどの客先仕様へ対応するための設計製作を行う。

現在の試作ラインでは、月産 50 個程度の能力しか持ち合わせていないため、ある程度の設備投資は避けられない。初期の量産設備としては、これまでの試作用ラインも流用しながら 1 億円程度に抑える。市場投入時はモジュール状態で売価 1 万円、年間 2 千個程度を目標に生産を開始する。単一商品では市場獲得が難しいため、客先仕様と量産を考慮しながらラインアップを強化し、各分野への売込みを開始し、4 年後には量産設備の増強に着手、5 年後にはコストを下げた上で販売数の増加により年間 4 万個、2 億円の売上を見込む。ハンディー型検知器については、市場動向を注視して販売戦略を検討の上、適切な時期に市場投入する。定置型検知器については、現時点での市場規模は小さく、収益が見込まれないため、水素ステーションの設置数が増え、水素エネルギーの本格普及が始まる 2025 年以降が主体となると予測する。

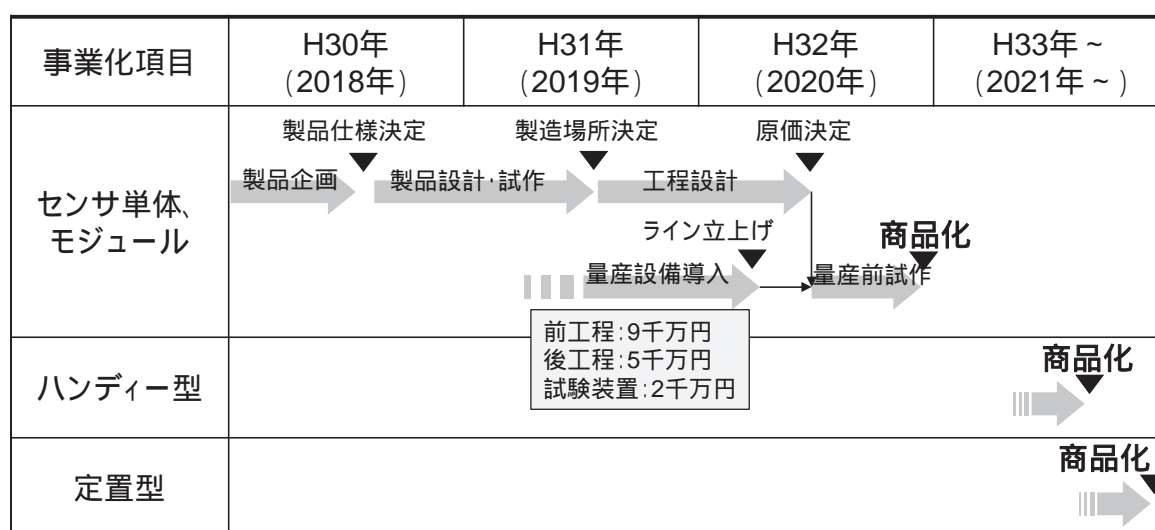


図 25 事業化スケジュール

5. 研究発表・特許等

- 研究発表・講演・文献等、その他 -

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2014年 11月3日	The 21 st Tri-University International Joint Seminar and Symposium (口頭発表)	Development of the quartz-hydrogen gas sensor using porous platinum catalyst	Maki Nakamura, Hiroshi Oigawa, Satoshi Ikezawa, Toshitsugu Ueda
2	2015年 10月30日	第32回「センサ・マイクロ マシンと応用システム」シ ンポジウム (ポスター発表)	MEMS 水素ガスセンサのた めの白金触媒めっき技術の 開発	大井川寛、池沢聡、 植田敏嗣
3	2016年 3月16日	平成28年電気学会全国 大会(口頭発表)	水素センサの応答時間測定 システムの開発	安部光政、大井川寛、 池沢聡、植田敏嗣
4	2016年 3月16日	平成28年電気学会全国 大会(口頭発表)	水晶振動子式水素センサを 使用した白金黒触媒の最適 化	楊凱麟、大井川寛、 池沢聡、植田敏嗣
5	2016年 10月30日 ～11月2日	IEEE SENSORS 2016 (ポスター発表)	Development of Optimal Electroplated Platinum-black Catalyst for Quartz Hydrogen Sensors	H. Oigawa, K. Harima, F. Kohsaka, T. Tsuno, T. Ueda
6	2016年 10月20日 ～10月21日	北九州学術研究都市産学 連携フェア (ポスター展示)	展示会会場にてポスター展 示	KOA株式会社
7	2016年 12月1日	電気学会論文誌E (論文発表)	MEMS 水素ガスセンサのた めの白金触媒のめっき技術	大井川寛、池沢聡、 植田敏嗣
8	2016年 12月12日	九州センサーフォーラム (ポスター展示)	展示会会場にてポスター展 示	KOA株式会社
9	2017年 10月31日 ～11月2日 (Accepted)	第34回「センサ・マイクロ マシンと応用システム」シ ンポジウム (ポスター発表)	水晶振動子式水素センサに おける鍍金白金触媒の最適 化	大井川寛、播磨幸一、 幸坂扶佐夫、津野徹、 植田敏嗣
10	2017年 12月4日 ～12月6日 (Accepted)	The 11th International Conference on Sensing Technology (発表形式:未定)	Sensitivity of Improvement of Quartz Hydrogen Sensor with Novel Designed Heater	Hiroshi Oigawa, Mizuho Shimojima, Tooru Tsuno, Fusao Kohsaka, Toshitsugu Ueda

- 特許等 -

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託会社名
1	2016年9月16日	PCT/JP2016/773 67	水素センサ	KOA株式会社

(III-5)「水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全基盤整備に関する研究開発 / 光学式水素ガスセンサーおよび水素ガスリークディテクタの研究開発」

委託先：(株)四国総合研究所、(国)千葉大学

成果サマリ(実施期間：平成26年度～平成29年度)

- ・ エネルギー供給事業者、水素インフラ事業者等に対するニーズ調査を実施し、本研究開発における目標仕様を明確化した。
- ・ 応答が速く、センシング部に電気系を用いない光学式水素ガスセンサーを開発し、目標仕様の達成及び模擬フィールドにおける機能検証を完了した(平成29年度未予定)。
- ・ 水素ガス漏洩箇所を特定する近接型及び遠隔型水素ガスリークディテクタを開発し、目標仕様の達成及び模擬フィールドにおける機能検証を完了した(平成29年度未予定)。

背景/研究内容・目的

[背景] 現行の水素ステーションでは、水素が漏洩した際の安全対策のため、水素が滞留しない開放構造となっている。これら構造は、万一の水素漏洩時に生じる着火の危険性を大きく低減するために有効である一方で、固定点において受動的に水素ガスを検知する従来のガス検知器では、センサーまで水素が到達せず漏洩状態の検知に遅れが生じるケースが生じるという課題がある。

[目的] 水素漏洩時に瞬時に応答し、アクティブな水素漏洩位置探査を実現する新たな水素ガス検知器の次世代水素ステーションへの適用を目指すし、レーザ光の照射により水素分子から生じる固有波長の散乱光(ラマン散乱光)を捉える光学計測手法を用いた水素ガス検知装置を開発する。

研究目標

実施項目	目標	実施項目	目標
ニーズ調査、目標仕様の設定	ニーズ調査、目標仕様の設定	ニーズ調査、目標仕様の設定	ニーズ調査、目標仕様の設定
センサチップの開発	センサチップの開発	システムの開発	システムの開発
システムの開発	システムの開発	MEMSモノクロメータの開発	MEMSモノクロメータの開発
MEMSモノクロメータの開発	MEMSモノクロメータの開発	実証機の開発	実証機の開発
実証機の開発	実証機の開発	実証試験	実証試験

実施体制及び分担等



これまでの実施内容 / 研究成果(平成29年度未予定)

- ・ 光学式水素ガスセンサーの研究開発
- ・ ニーズ調査により、本研究開発の目的が市場ニーズの方向性に相応するものであることを確認し、装置の性能として、水素ガスの検出限界を500ppmに設定した。
- ・ 要素技術開発を実施すると共に、その成果を基に光学式水素ガスセンサー実証機を開発した。
- ・ 実証試験により、目標性能の達成と、単一のシステムにより複数箇所のモニタリングができる光学式水素検知システムが実現可能であること検証した。
- ・ 水素ガスリークディテクタの研究開発
- ・ ニーズ調査により、本研究開発の目的が市場ニーズの方向性に相応するものであることを確認し、装置の性能として、近接型について水素ガスの検出限界を500ppm、遠隔型について1%に設定した。
- ・ 近接型水素ガスリークディテクタを試作し、実証試験により、目標性能の達成を検証すると共に配管等からの水素漏洩箇所を探査・特定できる新たな技術を確認した。
- ・ 遠隔型水素ガスリークディテクタを試作し、実証試験により、目標性能の達成を検証すると共に、遠隔から水素ガスの空間分布を計測することで、水素漏洩箇所を探査・特定することができると新たな技術を確認した。

研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
-	検出限界を500ppmに設定	
-	実用機が完成、機能評価が完了。(水素検出限界500ppm、応答速度2sec、使用温度上限200℃を達成)	
-	現在実施中。	(12月時見込)
-	検出限界を500ppmに設定	
- (-)	実証機が完成、機能評価が完了。(水素検出限界250ppm、測定精度30%を達成)	
- (-)	現在実施中。	(12月時見込)
- (-)	試験機が完成、機能評価が完了。(水素検出限界0.5%、離隔距離8m、位置精度0.2mを達成)	
- (-)	現在実施中。	(12月時見込)

今後の課題

- ・ 光学式水素ガスセンサーについては、本事業において開発した装置を基に、実フィールド試験を実施し、長期稼働における課題の抽出や、ユーザーの向上に向けた研究開発を進めると共に、量産化に向けた研究開発を実施し、低コスト化を図る必要がある。
- ・ 水素ガスリークディテクタについては、現在まで実現されていないオンライン・ワン技術として、市場に向けた積極的な情報発信を進める必要がある。

実用化の見通し

本事業終了後の実用化研究において進める製品コストの削減や水素ステーション関連市場の獲得を積極的に推進することで、次世代水素ステーションや、水素関連施設をターゲットとした実用化が実現できる見通しである。

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
3	0	17	0

課題番号： -5

水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全基盤整備に関する研究開発 /

光学式水素ガスセンサおよび水素ガスリークディテクタの研究開発

株式会社四国総合研究所

国立大学法人千葉大学

1. 研究開発概要(事業の背景・目的・位置づけ)

(1) 事業の背景

現行の水素ステーションでは、水素が漏洩した際の安全対策として、各所にガス検知器を配置すると共に、換気設備、開口窓、水素が外部へ抜ける構造の屋根等により、水素が滞留しない開放構造となっている。

これらの構造は、万一の水素漏洩時に生じる着火の危険性を大きく低減するために有効である一方で、漏洩した水素ガスの濃度が短時間で低下するため、固定点において受動的に水素ガスを検知する従来のガス検知器では、センサまで水素が到達せず漏洩状態の検知に遅れが生じるケースが想定される。したがって、より安全性の高い水素ステーションの運用を実現するためには、この課題を解決するための技術開発が必要である。

(2) 目的

本研究では、水素漏洩時に瞬時に応答し、アクティブな水素漏洩位置探査を実現する新たな水素ガス検知器の次世代水素ステーションへの適用を目指し、レーザ光の照射により水素分子から生じる固有波長の散乱光(ラマン散乱光)を捉える光学的計測手法を用いた水素ガス検知装置を開発する。

(3) 研究開発内容

本研究開発において実現を目指す装置(3機種)の構想について以下に示す。

[] 光学式水素ガスセンサの開発

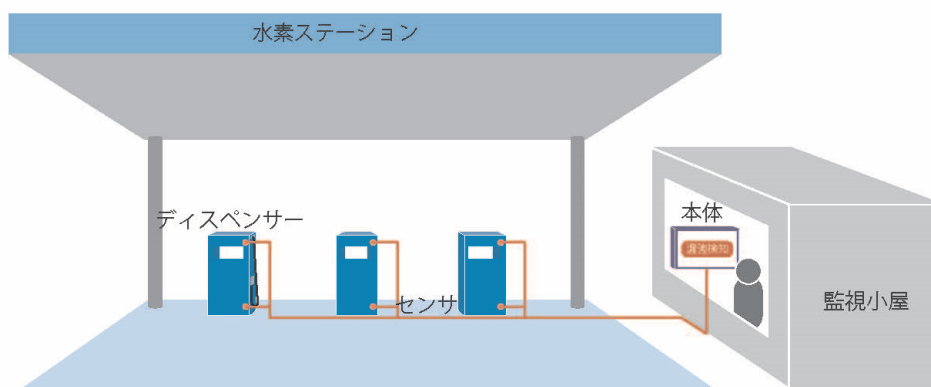


図 1-1 光学式水素ガスセンサの概念

防爆エリアや機器内部の水素ガス濃度モニタリングや水素ガス漏洩監視への適用を目的とした小型光学式水素ガスセンサを開発する(図1-1)。

計測原理として、ガス分子にレーザ光を照射した際に生じる分子種固有のラマン散乱光を捉えることにより、ガス種と濃度を特定するレーザラマン分光法を用いる。

本センサシステムは、レーザ装置及び受光装置から成る本体と、観測箇所を設置するセンサチップにより構成される。一つの本体に対し、センサチップを直列または並列に複数配置し、光ファイバにより、本体から各センサチップへのレーザ光の伝送と、センサチップから本体に向けたラマン散乱光の伝送を行う。得られたラマン散乱光信号強度と同信号のディレイタイムから、漏洩箇所と水素ガス濃度が特定される。

センサチップは、微細加工技術を用いて製作した小型の精密光学ベンチに、レーザ光の照射とラマン散乱光の集光を行う小型光学部品を集積配置した構造であり、これを光ファイバ結合により複数箇所配置することで、多点の濃度情報を一括監視できるシステムが実現される。本センサは光と水素分子

の相互作用のみによって水素ガスを検知するため、センシング部に電気系は一切含まれない。また、センサチップに耐熱性を付加することにより、事故発生時に環境が高温に変化しても水素ガス検知機能を維持することができる。

本事業では、水素ステーション等への適用を目的とした、小型光学式水素ガスセンサの実証機の完成と、フィールド試験による機能検証を最終目標とした。

[] 水素ガスリークディテクタの開発

水素ステーションにおける水素ガス漏洩時に、漏洩箇所を特定できる水素ガスリークディテクタを開発する。

近接型水素リークディテクタの開発

水素導管等における微量の水素ガス漏洩をプローブにより探査し、漏洩箇所を特定する近接型水素ガスリークディテクタを開発する(図 1-2)。

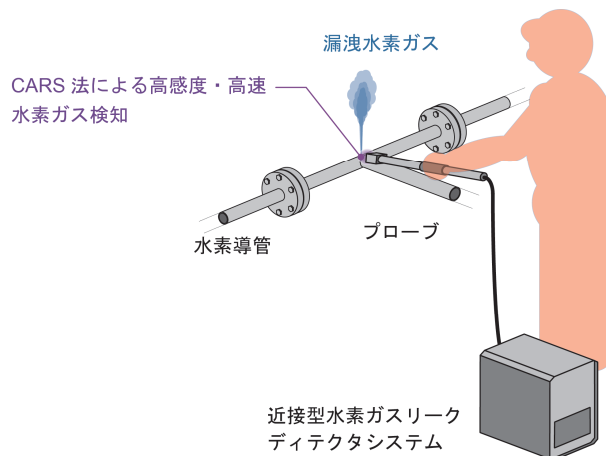


図 1-2 近接型水素ガスリークディテクタの概念

本装置は、計測原理として、ガス分子にレーザー光とストークスラマン散乱光を同時に照射した際に生じる反ストークスラマン散乱光(レーザー光よりも短波長に発生する散乱光)を捉える CARS 法(コヒーレント反ストークスラマン散乱法)を用いる。微量水素ガス漏洩の探査では、配管の直近にプローブをかざし、レーザー光を照射し計測する状況が想定されるが、本原理によれば、測定の際に、配管等にレーザー光が照射されることにより発生するレーザー誘起蛍光の影響を回避し、高感度で応答の速い漏洩検知が可能となる。

近接型水素リークディテクタは、レーザー光源と、ストークス光を発生させるための光学系、水素ガスによる反ストークス光を検出する受光器、信号処理系等から成るシステム本体と、光送受信及びセンシング光学系から成るプローブにより構成される。プローブは、本体から観測箇所までレーザー光とストークス光を伝送すると共に、水素ガスにより生じる反ストークス光を本体まで伝送する光学系と、観測箇所にレーザー光とストークス光を照射し、水素ガスにより生じる反ストークス光を集光する光学系により構成される。本装置は、水素分子と光の相互作用のみにより水素ガスを検知するため、プローブ部に電気系は一切含まれない。本事業では、近接型水素ガスリークディテクタの実証機の完成と機能検証を最終目標とした。

遠隔型水素リークディテクタの開発

観測空間にレーザー光を照射し、危険区域外の遠隔から水素漏洩箇所を探査、特定する遠隔型水素ガスリークディテクタを開発する(図 1-3)。

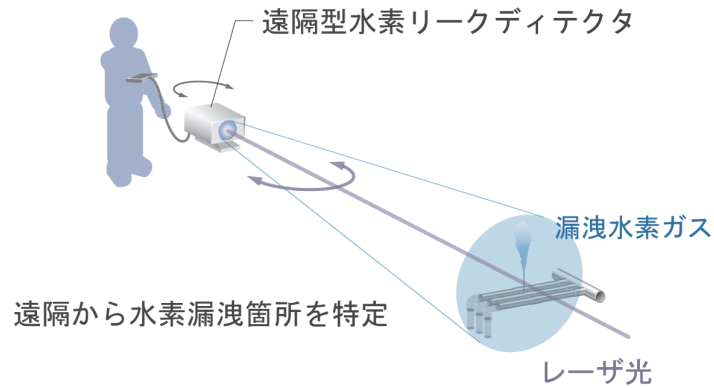


図 1-3 遠隔型水素ガスリークディテクタの概念

本装置は、光学式水素ガスセンサの開発に用いるレーザーラマン分光法と、レーザーを用いたリモートセンシング技術(以下ライダ計測技術)を融合することで実現される。観測空間中にレーザー光を照射すると、レーザー光軸上に存在するガス分子によるラマン散乱が生じる。ラマン散乱光の波長は分子固有の値であり、レーザー光軸上に水素分子が存在すると、水素分子固有の波長をもった散乱光が生じる。水素のラマン散乱光のみを選択的に集光、分離し、検出することにより、観測空間中における他のガス分子から水素のみを特定し、検知することができる。また、レーザー光をパルス発振させ、レーザー光の発振から水素ラマン散乱光検出までの時間を計測することにより、水素ガスが存在する位置を特定することができる。

これらの機能を用いて、観測空間中にレーザー光を走査することで、遠隔から水素ガスの空間的な分布を明らかにすることができ、高濃度位置を追跡することにより、漏洩箇所を特定することができる。

本事業では、遠隔型水素リークディテクタの試験機の完成と機能検証を最終目標とした。

(4) 実施体制

本事業は株式会社四国総合研究所及び国立大学法人千葉大学の共同実施事業とし、開発項目の一部を国立大学法人香川大学、及び株式会社長峰製作所へそれぞれ共同研究、再委託として実施した。

また、成果の意義を向上するために、適宜研究開発責任者との協議を行い、実施内容の確認・軌道修正を行った。

限界濃度 4%の 1/4 以下として 1%を設定した。離隔距離は防爆指針等において示されている危険場所外からの遠隔計測を目指すため、8m 以上に設定した。

3. 研究開発成果

3.1 研究開発成果, 達成度

(1) 研究開発成果

[] 光学式水素ガスセンサの研究開発

光学式水素ガスセンサは、レーザラマン分光法を原理とするガスセンサである。本装置は、小型レーザ光源と波長選択機能を備えた検出器により構成される本体と、測定箇所に配置し、レーザ光の照射とラマン散乱光の受光を行うセンサチップから構成され、両者を光ファイバで接続しレーザ光及びラマン散乱光の伝送を行う。光学部品のみで構成され電気系を一切含まないセンサチップは、配置箇所を制限されず、センサチップが配置された任意箇所における水素ガスを瞬時に検知できる。また、単一のシステムに複数のセンサチップを備え、多点監視を実現することにより、効率的な運用が可能となる。

本研究開発では、事業実施期間を通して、実フィールドを模擬した環境における機能評価試験を行うことができる光学式水素ガスセンサ実証機の完成を目指し、次の成果を得た。

ニーズ調査、目標仕様の明確化 (担当: 株式会社四国総合研究所)

水素ステーションを設置・運営するエネルギー供給事業者や水素インフラ事業者などを調査訪問して、事前に通知したアンケート項目に対する意見交換を実施した。

当該調査により明らかとなった事項は以下の 4 点に集約される。

- ・ 着火に至る前段階(水素ガス検知の段階)で安全な措置を講じることが基本である。
- ・ ガス検知が優先されるべきである(濃度測定機能は十分条件であり必要条件でない)。
- ・ 容易にガス漏洩箇所を特定できる技術に対するニーズが非常に高い(可能であれば遠隔から漏洩箇所を特定したい)。
- ・ 可能な限り微量のガス漏洩を検知したい。

これを受け、本事業では、レーザ計測技術の適用により、応答が速く、センシング部に電気系を一切含まない、常時数百 ppm の水素漏洩監視を行う装置について研究開発を行うこととし、市場ニーズとの方向性の一致を確認した。水素ガス検出限界濃度は、ニーズと汎用水素警報器における低濃度アラームレベルを基準として 500ppm に設定した。

センサチップの開発 (担当: 株式会社四国総合研究所, 株式会社長峰製作所)

水素ガス検出限界 500ppm を実現するためのセンサチップ実証器として、双眼の小型広角レンズを用いた並列型センサチップ(寸法 21×28×12mm)を開発した(図 3-1-1 左)。また、モニタリングの時間分解能やエネルギー効率の更なる向上を実現するために、新たに光の照射及びラマン散乱光の集光にボールレンズと小型直角プリズムの集積光学系を用いた直列型センサチップ(寸法 29×20×8mm)を考案し(特許出願中)、設計・試作を完了した。これらのセンサチップの材料は、迷光によるレーザ誘起蛍光の発生が最も少ない黒アルミナを用いた(図 3-1-1 右)。

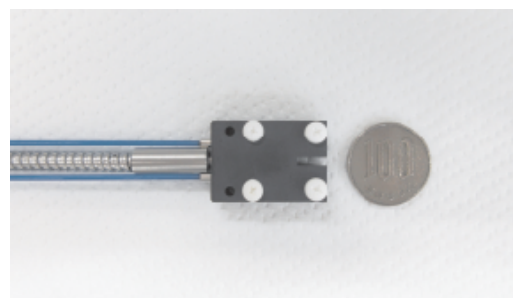
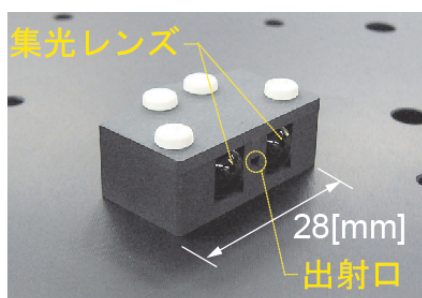


図 3-1-1 センサチップ外観(左: 並列型, 右: 直列型)

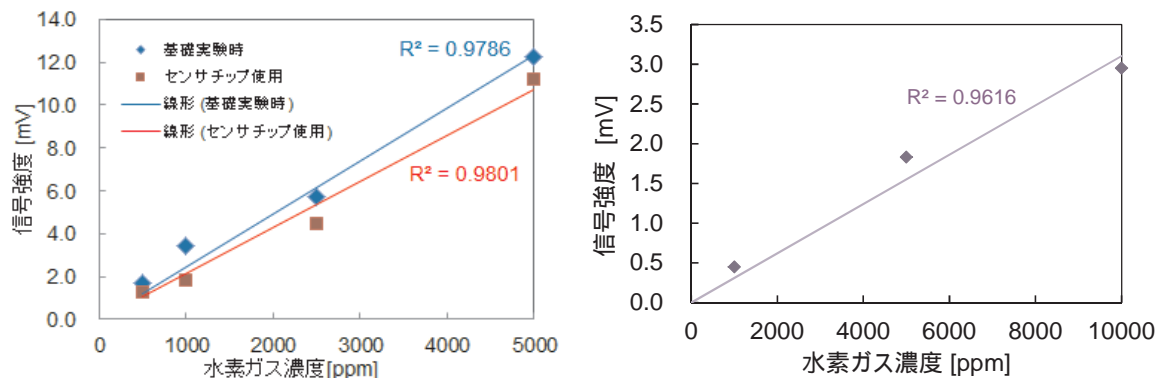


図 3-1-2 機能試験結果事例(左:並列型,右:直列型)

両センサチップを用いて水素ガス検知機能試験を行い,並列型センサチップにより水素検出限界 500ppm 以下を検証した。直列型センサチップの検出限界は 1000ppm 以下であった(図 3-1-2)。

システムの開発 (担当:株式会社四国総合研究所)

以下のデバイスの開発を完了し,これらを統合したシステム実証機を開発した。

(a) 多点監視に向けた UV パルス用小型光スイッチの開発

光ファイバ結合光学系の最適化と集積設計及び反射光学系の軽量化設計によるアクチュエータの小型化に成功し,前年度までの試作機に対し,同等の光伝送効率を維持し,体積比を約4分の1とする UV パルス用小型光スイッチを実現した(図 3-1-3)。

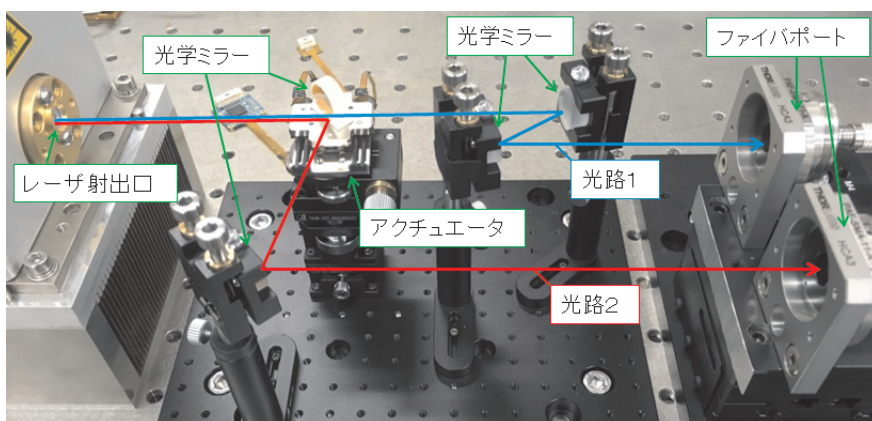


図 3-1-3 UV パルス用小型光スイッチの構造

(b) LD 適用性の検討

システムの小型・低コスト化に向けた,半導体レーザ(Laser Diode :以下 LD)および Si 受光素子の適用について,実験的検討を行った。これまでに,光源に波長 405nm の半導体レーザ(出力 200mW),受光器に光電子増倍管を用いて,レーザ光軸に対し垂直方向からラマン散乱光を捉える配置により水素ガス濃度計測試験を行い,濃度 2%までの水素ガス検知が可能であることを検証した(図 3-1-4)。

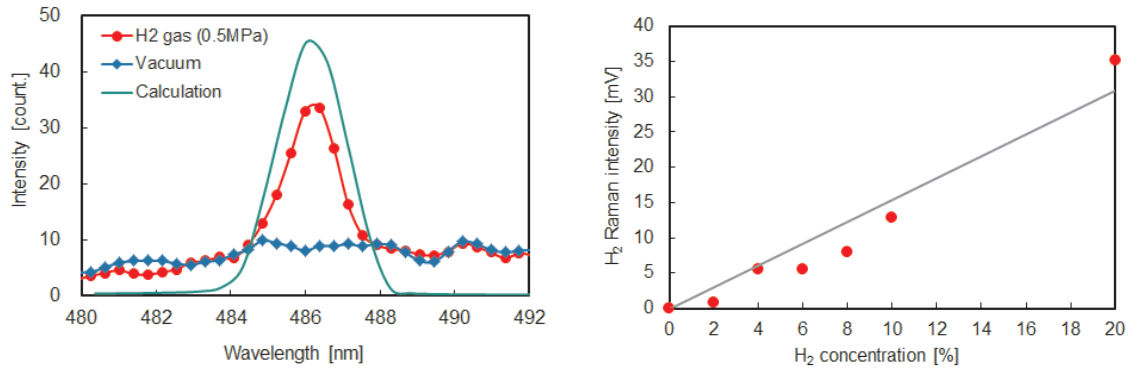


図 3-1-4 405nmLD による水素ラマンスペクトル(左)と水素濃度依存性(右)

また、後方ラマン散乱光を捉えることで感度が3倍以上向上すること、Si 受光素子によっても検知可能であることを検証した。これらにより、本システムの光源としてLDを、受光素子としてSi 受光素子を適用するできる可能性を見出すことができた。

(c) 高速デジタイザの開発

パルスレーザ励起によって得られる短パルスラマン光信号を正確にデジタル変換する 1.5GS/s 高速デジタイザを開発した(図 3-1-5)。AD コンバータのトリガ信号としてパルス波形を取込みO/E変換を行うトリガユニット、アナログ信号をAD コンバータへの入力に合わせて増幅するアンプユニット、並列動作型AD コンバータとCPUから構成した。出力はノートPC、タブレットPC等任意の電算機を選択でき、データ通信は有線・無線の切替え可能な方式とした。



図 3-1-5 高速デジタイザ外観

MEMS モノクロメータの開発(担当:株式会社四国総合研究所, 国立大学法人香川大学)

MEMS モノクロメータの開発は、MEMS 回転アクチュエータと、Si マイクログレーティングにより構成されるMEMS 回転グレーティングと、マイクロレンズ等の他のモノクロメータ光学系をシリコンオプティカルベンチ(以下 SiOB)上に集積実装することにより、本センサに必要な分光機能を有する小型モノクロメータを実現するものである。これまでに、MEMS モノクロメータの主要部品であるMEMS 回転グレーティングについて、回転アクチュエータ(図 3-1-6 右)とSi グレーティング(図 3-1-6 左)をそれぞれ試作し、その動作特性と光学特性を評価した。

MEMS 回転アクチュエータは、SiOB への集積実装が可能な形態として、面内回転型を採用し、SOI ウェハを用いて製作した。アクチュエータ構造としては、駆動構造が単純であることや、駆動時にスティッキングが生じにくく、発生力をトルクに変換することが可能な湾曲型静電櫛歯アクチュエータを採用した。SiOB 中央に設置した可動ステージは、4本のサスペンションによって支持され、静電アクチュエータのトルク発生に伴い、サスペンションに変位が生じ可動ステージが面内回転駆動を行う。また、回

転中心はこれらのサスペンションによって維持される。試作したデバイスは、寸法 10×10mm である。本デバイスについて、印加電圧に対する回転角度を測定し±1.6deg.の回転駆動が可能であることを検証した。

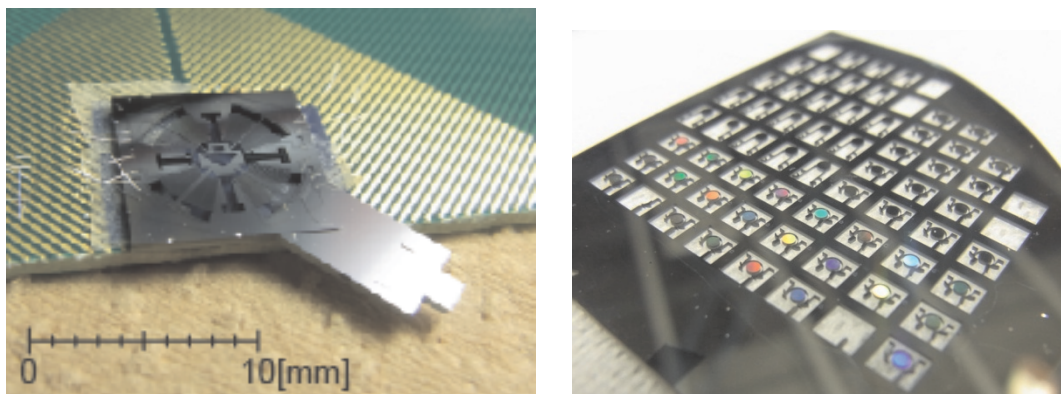


図 3-1-6 MEMS 回転アクチュエータ外観(左)と Si グレーティング一括製作事例(右)

Si グレーティングは ICP-RIE を用いて製作した。有効面を 2.0mm とし、刻線数は ICP-RIE 工程の最適化により 500～3000Lines/mm まで刻むことができる。また、グレーティング構造にスプリング構造を一括形成し、回転アクチュエータの可動ステージに自動的に垂直実装される機能を付加した(図 3-1-7 右)。試作した Si グレーティングについて、グレーティング方程式から求まる分散と、実測値の比較を行い、両者が極めて良好に一致することを検証した。また、入射光強度と回折光強度の比較を行い、回折効率 15%以上が確保されていることを検証した。

これらの Si デバイスを用いて、モノクロメータ光学系を構成し分光検出機能試験を実施し、MEMS モノクロメータを用いることで、大気成分や他の可燃性ガスと水素を分離識別して検出することが可能であることを実証した(図 3-1-7 左)。

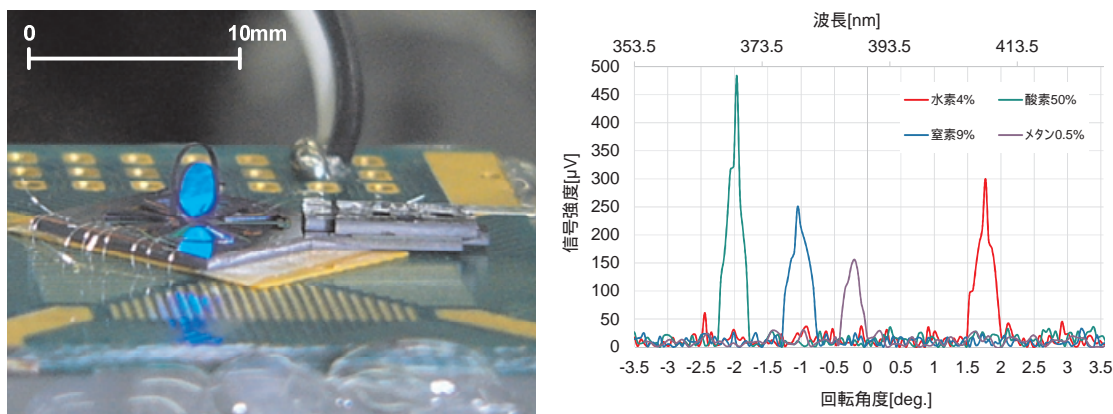


図 3-1-7 MEMS モノクロメータの外観(左)と分光検出機能試験結果(右)

小型光学式水素ガスセンサ実証機の開発 (担当:株式会社四国総合研究所)
 前述の要素技術開発によって得られた成果を基に、小型光学式水素ガスセンサ実証機を開発した(図 3-1-8)。

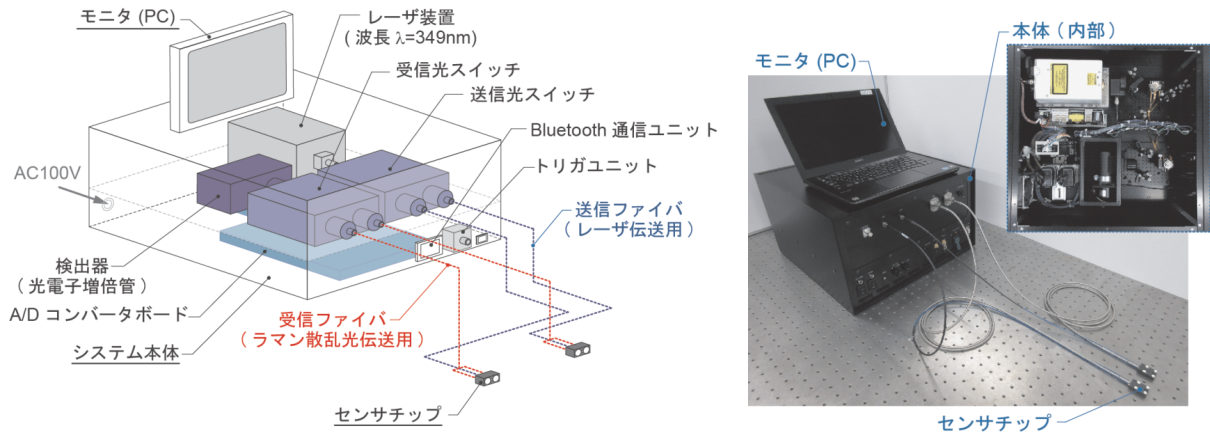


図 3-1-8 小型光学式水素ガスセンサ実証機図(左), 外観(右)

本体には、レーザ装置、光スイッチシステム、検出器、高速デジタイザ等の主要機器が格納されており、寸法約 430×430×250mm、重量約 20kg である。本システムでは、センサチップのチャンネルを 2 セットとし、光スイッチシステムを拡張することで、任意の複数チャンネルを制御することが可能である。また、モニタは任意の PC に専用のソフトウェアをインストールすることにより、濃度表示機能を有するモニタとして使用することができる。

実証試験 (担当: 株式会社四国総合研究所)

完成した実証機を用いて、配管からの水素漏洩を模擬した実証試験を行った(現在実施中平成 29 年末完了予定)。

[] 水素ガスリークディテクタの研究開発

近接型水素ガスリークディテクタの研究開発

近接型水素ガスリークディテクタは、誘導ラマン散乱分光法を原理とするガス検出器であり、レーザ光と水素ガスのストークスラマン散乱光を同時に照射した時に発生する水素ガスの反ストークスラマン散乱光を測定することで、微量水素ガス検知を実現するものである。本装置は、レーザ光源と水素ガスのストークスラマン散乱光を発生させ、両者を合波して出力する機能を有する光源と、測定箇所までレーザ光とストークス光を導く伝送路及び、反ストークスラマン散乱光の受光を行うプローブにより構成される。

本研究開発では、事業期間を通じ、配管等からの水素漏洩を模擬した環境において、本装置による水素漏洩検知が可能であることを検証する実証機の完成を目指し、次の成果を得た。

() システムの開発(担当: 株式会社四国総合研究所)

ストークス光(波長 416nm)の発生には、水素ガスを高圧充填したガスセル(以下ラマンセルと呼称)にレーザ光(波長 355nm)を照射する方法を用いた。図 3-2-1 に示した実験系において、水素ガスの測定に必要なストークス光を安定的に得るためのラマンセル長と水素ガス充填圧力およびレーザ集光条件を実験的に求めた。7 気圧の水素ガスを充填した光路長 470mm のラマンセルにレーザ光を集光照射することにより水素ガスのストークス光を発生させ、空間強度分布を最適化し、さらに折り返しミラーを配置することで図 3-2-2 に示したとおりストークス光のばらつきが抑制できることを明らかにした。

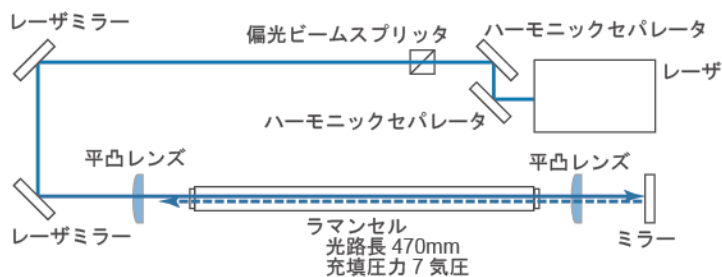


図 3-2-1 光源の実験配置図

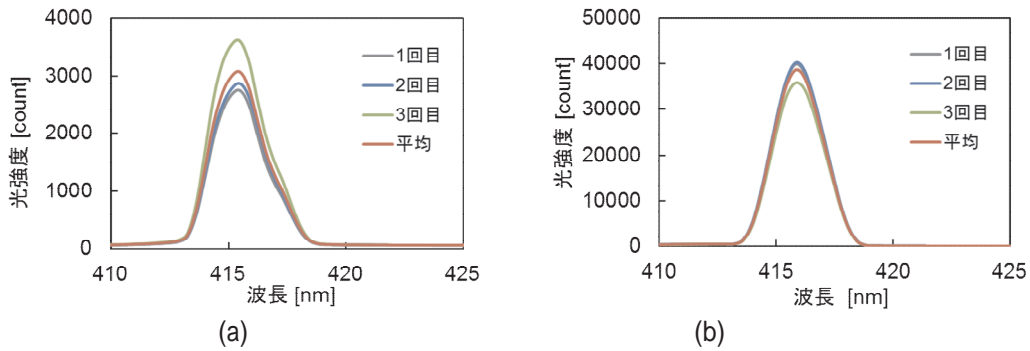


図 3-2-2 折返しミラーを配置しない場合(a)と配置した場合(b)のストークス光スペクトル

前述のとおり最適化を行った光源の仕様を基に、目標測定下限濃度を測定するための光学系の仕様および配置を検討した。前述したラマンセルからは、ストークスラマン散乱光と同時に反ストークスラマン散乱光(波長 309nm)も発生しており、この反ストークスラマン散乱光が被検体の水素検知の妨害となる。このため、ラマンセルの後方に各種のフィルタを配置して反ストークスラマン散乱光の遮断性能を測定し、フィルタとしてラマン分光用の長波長透過フィルタを用いることで、ラマンセルから発生する反ストークス光を排除できることを確認した。

また、被検体からの水素ガスの反ストークス光を測定する場合の最も大きな外乱要因はレーザー光の反射や散乱であり、波長選択ミラーと光学バンドパスフィルタを組合せて使用することによりレーザー光の影響を受けることなく被検体からの反ストークス光を測定することが可能となった。

上述のフィルタやミラーの組み合わせることで、紫外線レーザー装置のエネルギーを mJ オーダまで低出力化した上で、濃度 200ppm の水素ガスからの反ストークスラマン散乱光を検出できることを確認した(図 3-2-3)。

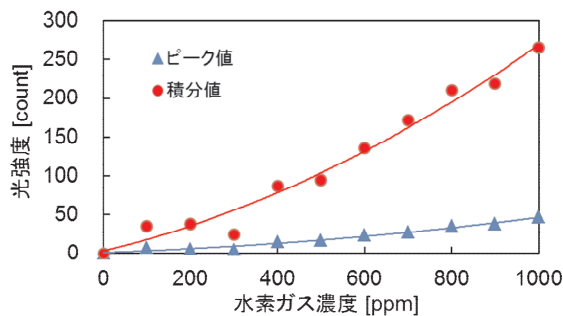


図 3-2-3 反ストークス光強度の水素ガス濃度依存性

以上の経緯により最適化を行った実験系を用い、伝送距離 1.2m、レーザー光波長 355nm、レーザーエネルギー 2mJ の条件で、500ppm の水素ガス濃度測定を 20%以下の精度で測定できることを検証した。

これらの試験結果を基に、近接型水素ガスリークディテクタシステム機能モデル光学系の設計を行った(図 3-2-4)。光源は、紫外線レーザーをラマンセルに集光して導入し、水素のストークスラマン散乱光を発生させ、ラマンセルから発生する反ストークスラマン散乱光をラマンセルの後方に設置したラマン分光用長波長透過フィルタによって排除する構造とした。伝送路は、レーザー光とストークスラマン散乱光を複数枚のミラーにより反射させて伝送する構造とし、先端のレンズにより集光して被検体に照射した。被検体周辺の水素ガスから発生する反ストークスラマン散乱光は、この伝送路あるいは光ファイバで受光部に伝送した。受光部は、フィルタと光検出器により構成し、フィルタは波長選択ミラーと光学バンドパスフィルタを組合せ、外乱光の除去と被検体周辺の水素ガスから発生する反ストークスラマン散乱光の選択を行った。光検出器は単一受光素子あるいは CCD 分光装置を用い、反ストークスラマン散乱光の強度測定と水素の反ストークスラマン散乱光の波長確認を行った。

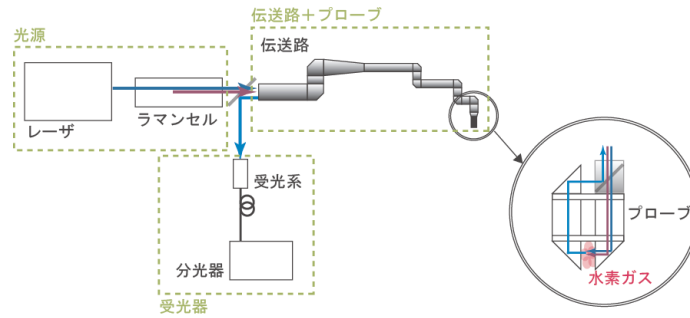


図 3-2-4 機能モデルイメージ

機能モデルを用いた評価試験により得られた知見を基に、レーザ光を2分岐し、光路の一方にラマンセル(光路長 400mm)を設置した光源光学系を考案し(図 3-2-5)、シードレーザ装置の注入エネルギーに対し、最も効率的に反ストークス光が検出できる最適なレーザ光分岐比を見出した(図 3-2-6)(特許出願済)。また、反ストークス光検出に最適なダイクロックミラーを用い、外乱光を抑制し高効率で反ストークス光を検出する受光光学系を考案した。これを基に実証機の光学設計及び試作を完了した。

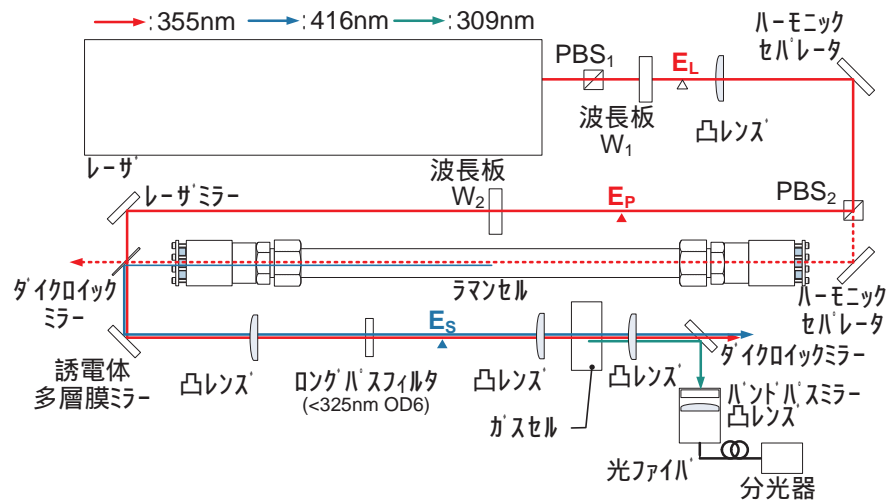


図 3-2-5 実証機光源の構成

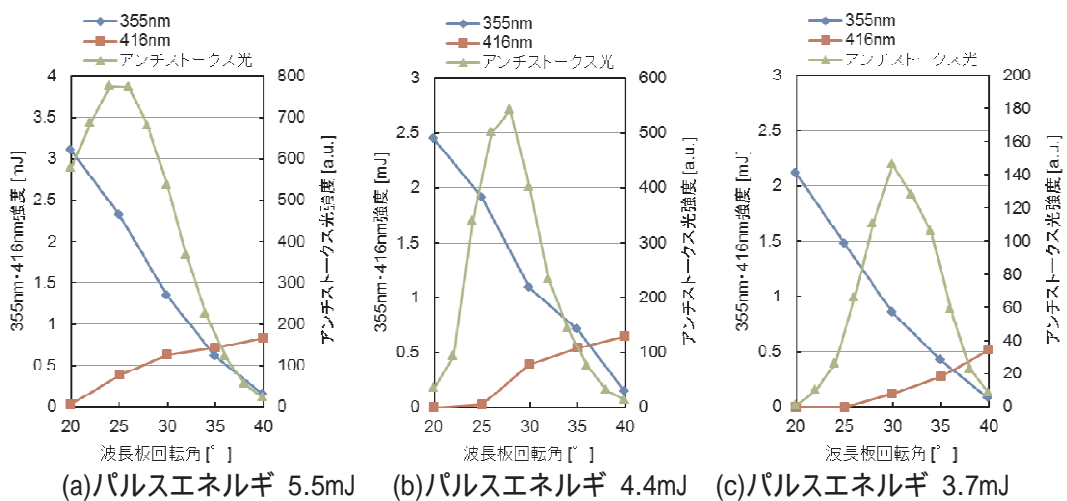


図 3-2-6 レーザ分岐比率最適化試験結果
(ラマンセル圧力を 0.7MPa とし、パルスエネルギーを変化させて計測)

() プロープの開発(担当: 国立大学法人千葉大学, 株式会社四国総合研究所)

レーザー光とストークス光を被検体に照射し, 被検体周辺の水素ガスから発生する反ストークスラマン散乱光測定するためのプロープを設計した。プロープは, 被検体からの反射光を測定する方式と被検体周辺の透過光を測定する方式の2種類である。

反射光を測定する方式は, 上述の伝送路先端に取り付けたレンズで水素ガスの反ストークスラマン散乱光を集光して, 伝送路を介して受光部に導入するものである。

透過光を測定する方式は, 伝送路を通過したレーザー光とストークスラマン散乱光の光軸をプリズムで90度回転させて照射し, 対向したプリズムで反ストークスラマン散乱光を伝送路の方向に反射して光ファイバに導入するものである。この方式は, 対向したプリズム間で発生した反ストークスラマン散乱光を測定する。

これらの方式による計測を実現するためのプロープを試作し, 水素ガスの反ストークスラマン散乱光を測定した。透過光を測定する方式について, 図3-2-7に部品構成図を図3-2-8に試作品外観を示す。

反射光を測定する方式では, ガスセルに既知濃度の水素ガスを封入して, ガスセルの後方に配置したアルミ板からの反射光を測定した結果, 1%の水素ガスからの反ストークスラマン散乱光が検知でき, その強度から濃度測定ができることを確認した。

透過光を測定する方式では, 内径・1mmのノズルから水素ガス(濃度:4%, バランスガス:窒素)を放出し水素ガスの反ストークスラマン散乱光を測定した結果, 図3-2-9に示したとおり, 放出量が1.1ml/minの場合においても水素ガスの反ストークスラマン散乱光が検知できることを確認した。

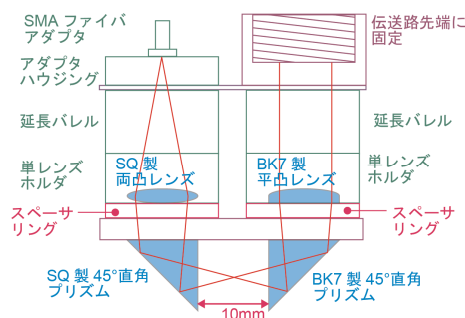


図 3-2-7 プロープ部品構成図



図 3-2-8 試作品外観

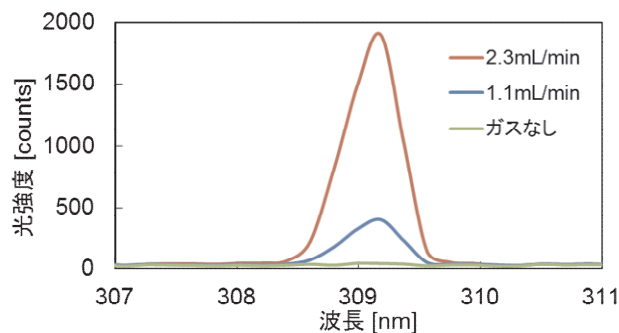


図 3-2-9 4%水素ガス測定試験結果

伝送光学系の検討として, 波長の異なるレーザー光とストークスラマン散乱光および反ストークスラマン散乱光が高効率で伝送でき, かつ被検体への照射を自由に行うことを目的として, 複数枚のミラーを使用した伝送光学系を検討した。レーザー光とストークスラマン散乱光の波長域を反射する7枚のミラーにより, レーザ光およびストークスラマン散乱光を1m以上伝送することができ, これを水素ガスに照射して反ストークスラマン散乱光が測定できることを実験的に確認した。

上記伝送光学系に類似したレーザーメスの伝送路を参考に, レーザ光とストークスラマン散乱光および反ストークスラマン散乱光の伝送性能を評価して, 伝送距離1mを7関節ミラーで実現できる伝送路と先端の照射・集光系を設計製作した(図3-2-10)。また, 伝送用ミラーの仕様検討を行い, レーザ光とストークスラマン散乱光および反ストークスラマン散乱光の伝送に最適な光学特性

のミラーを選定した。

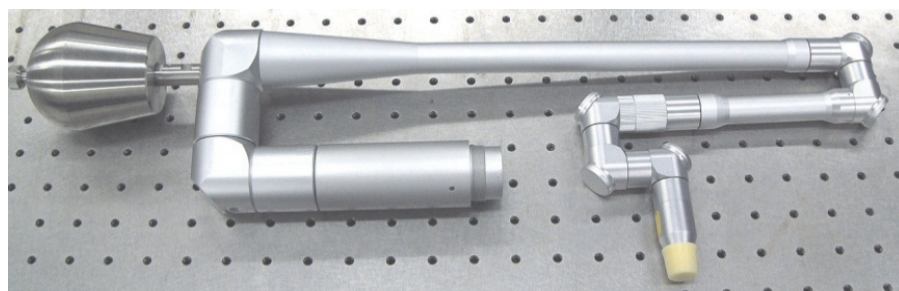
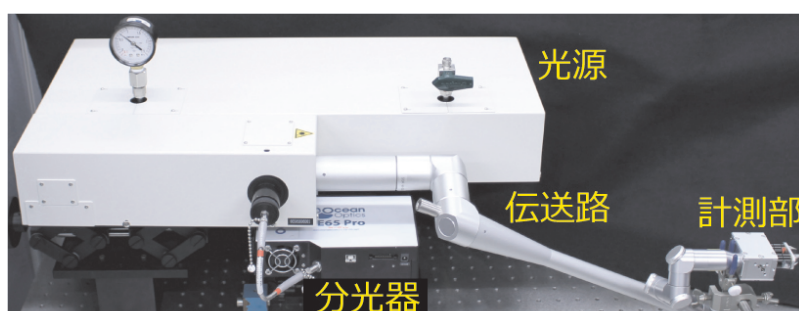


図 3-2-10 伝送路外観

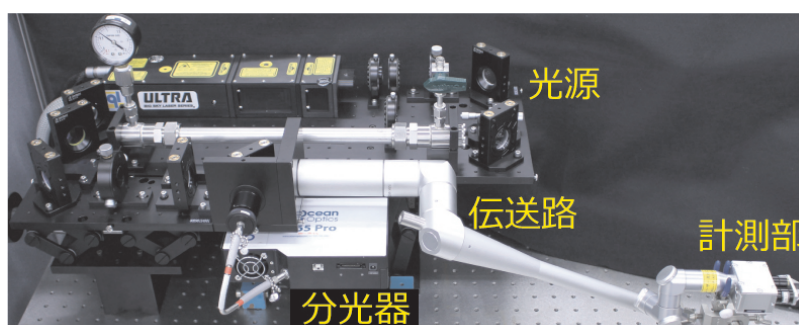
() 実証試験 (担当:株式会社四国総合研究所, 国立大学法人千葉大学)

前述のシステム及びプローブの開発により得られた知見を基に, 近接型水素ガスリークディテクタ実証機を試作した(図 3-2-11)。本装置は, レーザ光源及びピラマンセルにより構成される光源と, 励起レーザ光及びストークス光及び観測したアンチストークス光を伝送する伝送路と, 漏洩水素ガスのアンチストークス光を発生させ, 受光する計測部(プローブ), 観測したアンチストークス光を分光計測する分光器により構成される。

近接型水素ガスリークディテクタ実証機を用いて, 配管からの漏洩を模擬した環境において実証試験を行った(平成 29 年 12 月完了予定)。



(a)装置外観



(b)内部構造

図 3-2-11 近接型水素ガスリークディテクタ実証機 (a)装置外観 (b)内部構造

遠隔型水素ガスリークディテクタの開発

遠隔型水素ガスリークディテクタは、レーザラマン分光法とLIDAR(Light Detection and Ranging)技術を融合した、コンパクトな水素ガスリモートセンシングシステムである。LIDAR は、空間にパルスレーザ光を照射し、観測領域に存在する微粒子や分子等により生じる光の応答(ライダエコー)を望遠鏡で捉えることにより、物質の種類や位置・量等を非接触計測する技術である。本研究開発では、本年度から事業期間終了までの間で機能検証ができる試試験機の完成を目指し、次の成果を得た。

()ヘッ드의開発

光学設計に向けた基礎試験として、水素ラマンスペクトルの計測と、水素ラマン散乱光信号の濃度依存性の計測を行い、水素ガスが大気(窒素及び酸素)と十分に分離して検出可能であること、ラマン散乱光信号がガス濃度に対し線形の相関を示すため水素濃度の定量化が可能であることを検証した。コンパクトなLIDARヘッドの実現を目指し、ラボ内においてDPSSマイクロチップレーザとリッチークレチアン(反射)式小型望遠鏡によるLIDAR光学系を構成し(図3-2-12)、水素ガスの遠隔計測試験を行い、8mの遠隔における濃度1%の水素ガス検知が、十分なS/N比と200mmの空間分解能をもって可能であることを実験的に検証した(図3-2-13, 3-2-14)。併せて、シミュレーション解析により、水素ガスを遠隔計測する場合を想定した昼間及び夜間におけるライダエコーのS/N比を評価し、目標の仕様が達成できることを確認した(図3-2-15)。

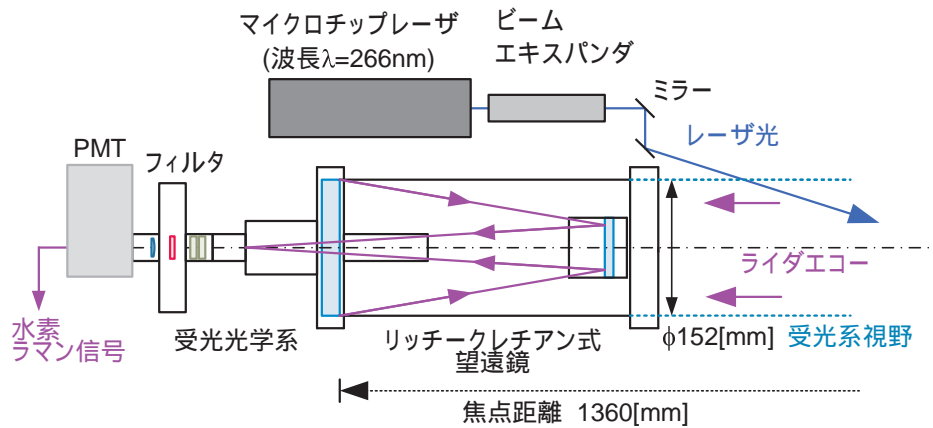


図 3-2-12 ライダヘッド光学系構成

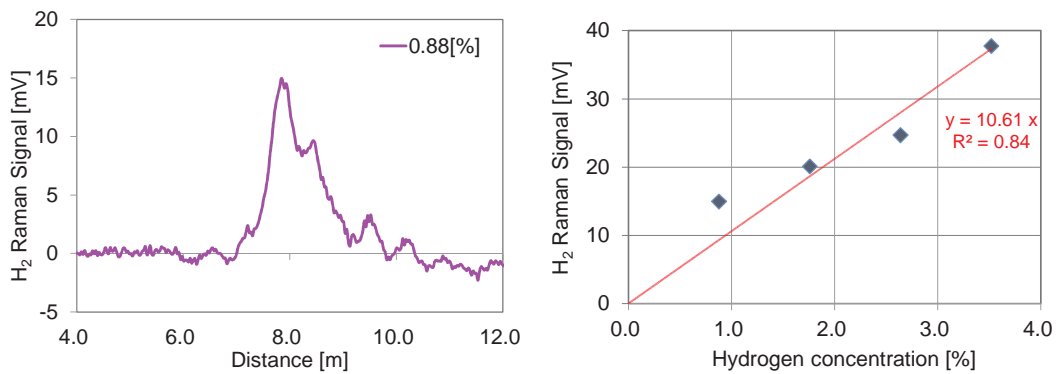


図 3-2-13 水素ガス濃度遠隔計測試験結果事例
(左:ラマン散乱光信号ピーク値の水素濃度依存性
右: 8m先濃度1%水素のラマン散乱光信号時間波形)

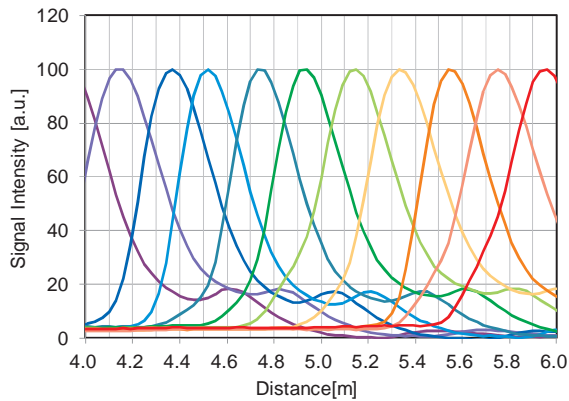


図 3-2-14 空間分解能評価結果

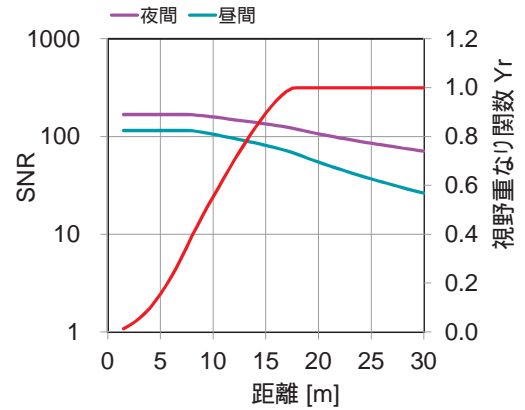


図 3-2-15 シミュレーション結果事例

() 信号処理システムの開発

本 LIDAR システムでは、約 1ns の短パルスレーザー光を用いることで、高い空間分解能の実現を目指している。したがって、ラマンエコーは同程度の短パルスラマン散乱光となる。ここでは、本システムによって得られるラマンエコーを、波形を崩すことなく高い再現性でサンプリングするために、サンプルレート 3GS/s 以上を目標とする高速デジタイザを考案し、設計試作を行なった(図 3-2-16)。機能試験により、目標の高速波形サンプリングが可能であることを検証した。



図 3-2-16 高速デジタイザ外観

() 機能試験

前述のライダヘッド及び信号処理システムを組み合わせ、遠隔型水素ガスリークディテクタを試作した(図 3-2-17)。ライダヘッド寸法は 400 × 700 × 200mm である。

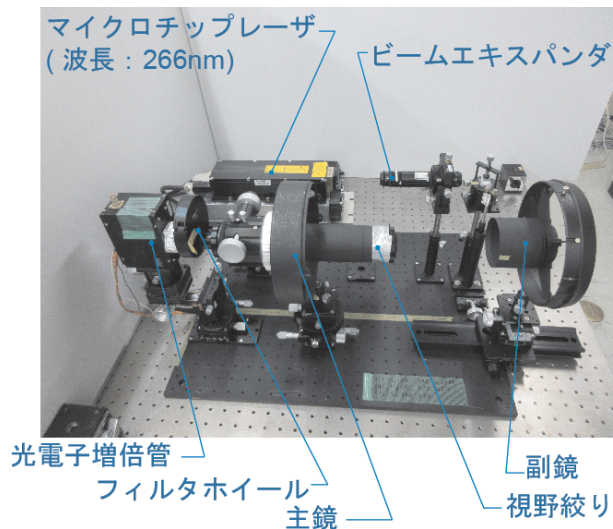


図 3-2-17 遠隔型水素ガスリークディテクタ試験機外観

遠隔型水素ガスリークディテクタ試作機を用いて、野外模擬フィールドにおいて機能試験を実施した(図 3-2-18, 3-2-19)。遠隔型水素ガスリークディテクタヘッドから 8m 遠方にノズルを設置し、純水素ガスを大気放出した際の遠隔型水素ガスリークディテクタによって検出されたラマン散乱信号を取得した。データ解析のため、ここではラマン信号の取り込みにオシロスコープを用いた。環境条件は夏季晴天の昼間屋外であり、風速約 2m である。

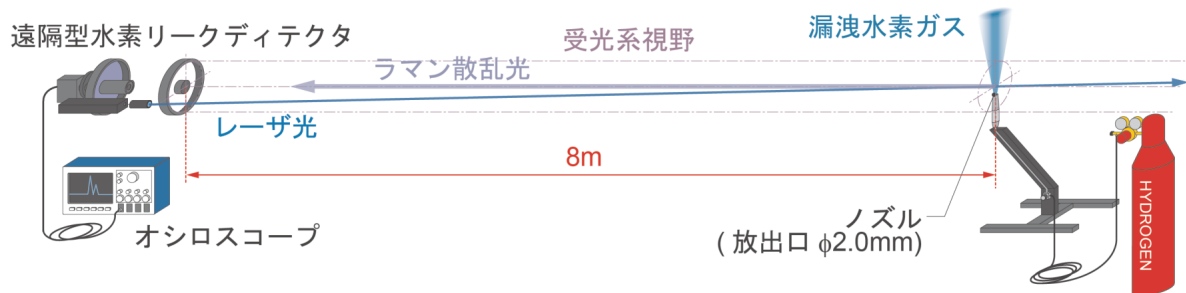


図 3-2-18 実証試験配置

その結果、距離 8m の位置にピークを有する水素ガスの空間分布波形の取得に成功した。背景に強い太陽光が存在する条件の中で、これに由来する DC 成分の信号はほぼ観測されていない。また、風により空間的に広がった水素の分布が、良好に取得されている(図 3-2-20)(平成 29 年 12 月完了予定)。

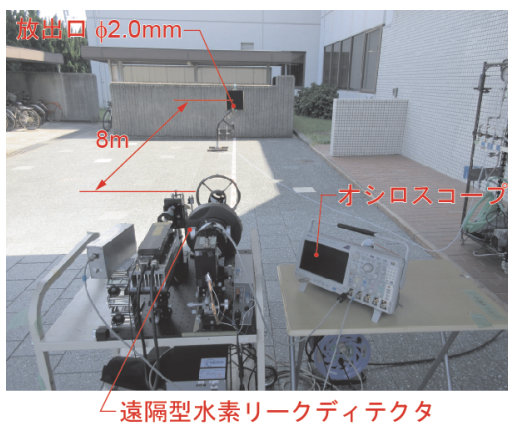


図 3-2-19 実証試験状況

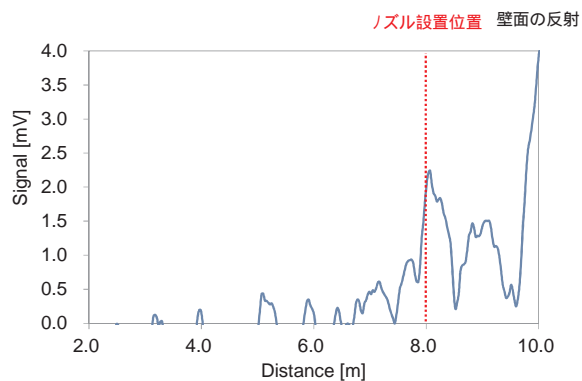


図 3-2-20 実証試験結果事例

(2)達成度

[]光学式水素ガスセンサの研究開発項目及び達成度は以下のとおりである。

事業項目	達成度	平成26年度		平成27年度		平成28年度				平成29年度			
		上期	下期	上期	下期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
		<p>ニーズ調査及び仕様の明確化</p> <p>センサチップの開発</p> <p>(a)基礎試験, 光学設計 (b)光学ベンチ構造設計 (c)試作, 機能評価 (d)実証器の設計, 製作 (e)実証器の機能試験, 評価</p> <p>システムの開発</p> <p>(a)多点監視システム構成の検討, 基礎機能試験 (b)LD 適用性の検討 (c)信号処理系の試作 (d)ソフトウェアの試作 (e)信号処理機能評価 (f)実証機の設計, 製作 (g)実証機の機能試験, 評価</p> <p>MEMS モノクロメータの開発</p> <p>(a)Si-G の設計・試作, 評価 (b)回転アクチュエータ設計・試作, 動特性評価 (c)分光光学系の設計 (d)MEMS モノクロメータの試作, 機能評価</p> <p>小型光学式水素ガスセンサ実証機の開発</p> <p>・組合せ機能試験, 評価</p> <p>実証試験</p> <p>(a)実証試験 (b)事業化に向けた課題の抽出と改良</p>											

3.2 成果の意義

本成果は、光学式水素ガスセンサ及び水素ガスリークディテクタが、それぞれ当初構想どおりの用途向けに実用化が可能であることを示すものであり、より安全性の高い水素ステーションの運用を実現できる新たな水素検知技術として極めて有意義な成果である。

3.3 開発項目別残課題

(1) 光学式水素ガスセンサの研究開発

[]- システムの開発における観測点数5点以上の装置開発 (分類)

当初目標として観測点数5点以上の装置を目指していたが、プロジェクト進捗に従い、より重要度の高い課題([]- 遠隔型水素ガスリークディテクタの開発)に集中するため、優先度を下げるべきと判断した。

なお、観測点数の拡大は、本事業において開発した2点監視システムを新たな技術開発を伴うことなく拡張するのみで実現できることが自明であるため、目標達成と判断した。

その他 量産化技術の開発 (分類)

本成果を基に、今後の事業化を推進するために装置の低コスト化が重要な課題となる。そのためには量産効果の獲得が必要不可欠であることから、特に、システム本体の量産化(低コスト化)に向けた研究開発を進める必要がある。

(2) 水素ガスリークディテクタの研究開発

[]- ()-(b) 光源の低出力化の検討 (分類)

本事業において、光源の低出力化を検討し、数mJ程度の出力で微量水素ガス計測が実現可能であることを検証した。しかしながら、本装置の普及に向けては、更なる光源の低出力化による装置の小型化及び低出力化が課題となる。

したがって、今後数十～数百 μ の出力で微量水素ガス計測が可能となる技術を見出し、光源としてDPSSレーザ又はマイクロチップレーザが適用できるまで技術を昇華させる必要がある。

[]- ()-(c) 伝送光学系の検討 (分類)

本事業では、伝送光学系として多関節ミラーを採用し、実証機の開発を行った。一方で、光ファイバによる伝送技術開発も並行して実施し、観測部までのレーザ光及びストークス光の伝送と、水素から生じたアンチストークス光の観測が原理的に可能であることを検証した。今後、光ファイバによる伝送技術を更に磨き、実用レベルまで昇華することで、ユーザビリティが大きく向上するものと見込まれる。

[]- () 機能試験 (分類)

本事業では、装置の試作及び機能試験までを実施したが、より早期の市場投入を目指すためには、製品化に向けた研究開発を引き続き実施する必要がある。

4. まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

4.1 まとめと今後の予定

(1) 光学式水素ガスセンサの研究開発

水素利用機器の内部や防爆エリア内に適用できる光学式水素ガスセンサの開発を実施した。当初計画どおり、実証機の開発及び実証試験を完了し、各目標の達成を検証した。開発した装置の使用は以下のとおりである。

[装置仕様]水素ガス検出限界 500ppm, 応答速度 2sec, 使用温度上限 200 以上
マルチモニタリング機能, 自己診断機能付帯

(2) 水素ガスリークディテクタの研究開発

近接型水素ガスリークディテクタの研究開発

パッキンやバルブからの漏洩水素ガスを探査する水素ガスリークディテクタの研究開発を実施した。当初計画どおり、実証機の開発及び実証試験を完了し、各目標の達成を検証した。開発した装置の使用は以下のとおりであり、検出限界については目標を上回る成果を得た。

[装置仕様] 水素ガス検出限界 250ppm, 測定精度 30%

遠隔型水素ガスリークディテクタの研究開発

遠隔から観測空間中の水素ガス濃度分布を計測し、水素漏洩箇所を特定する水素ガスリークディ

テクタの研究開発を実施した。当初計画どおり、試験機の開発及び実証試験を完了し、各目標の達成を検証した。開発した装置の使用は以下のとおりであり、検出限界及び位置精度については目標を上回る成果を得た。

[装置仕様] 水素ガス検出限界 0.5%以下、離隔距離 8m 以上、位置精度 0.2m 以下

今後は製品化に向け、開発した試験機及び試作機を基に、量産化技術開発等による低コスト化を視野に製品モデルの開発を行い、同装置により各種環境への耐性、長期稼働試験など、実用に向けた各種フィールド試験を行う予定である。

4.2 事業化までのシナリオ

(1) 実用化・事業化を行う製品と販売先

光学式水素ガスセンサ

水素ステーション及び水素製造プラント等の水素関連施設に向け、応答が速い小型の光学式水素ガスセンサを低コストで提供する。

水素ステーションや複合燃料スタンドに向け、水素ガスセンサ取扱い業者を通じて販売を行う。また、将来的に水素エネルギー利用が拡大すれば、水素供給・保管施設が大幅に増加することが予想される。これらの施設をはじめ、ガス検知器の設置が義務付けられているプラント等は、本システムの適用により保安管理の高度化が図れるため重要な市場となりうる。また、本技術によれば、水素以外の様々なガス検知や濃度計測、マルチガス計測が可能であるため、将来的には水素ガスに限らず、各種ガス製造、利用施設を対象に製品の開発、販売を目指す。

水素ガスリークディテクタ

水素ステーション等の水素関連施設に向け、配管継手等から生じる微量の漏洩水素ガスを近接又は遠隔から瞬時に検出し、現在煩雑な作業を要する水素漏洩箇所を特定し、短時間で効率的に行うことができるリークディテクタを提供する。

水素燃料、水素ステーション及びステーション構成部品を取扱う水素エネルギー事業関連企業に対し、微量の水素ガス漏洩箇所を瞬時に特定する必要がある特殊環境を対象に事業を展開する。

(2) 実用化・事業化への取組み

本事業者は研究開発を生業としており、事業の成果を知財という形態で権利化することを基本とし、本事業に於いてもこの基本路線を踏襲する。本事業者自らが製品製造を行う機能を有していないため、サンプル出荷、受注生産では製造委託する場合がある。本格的な製造・販売はメーカ等へのライセンス供与により実現する。実用化・事業化の成功は、知財を実施する製造・販売パートナーが重要となることから、事業成果と関連のある企業に向けた情報発信や情報提供、情報共有などを積極的に推進する。技術指導や技術協力を行ってきた企業とは技術交流を深め、本事業者の保有知財の有利な条件での実施許諾により、低コスト製品の早期市場投入を共通目標として取り組む。

実用化・事業化に向けた計画等

プロジェクト終了後 2~3 年間を目途に、各種フィールドでの実証試験や展示会への出展・広報活動を重ね、本製品の優位性をアピールしていくと共に、サンプル出荷による実績を積み上げ、その後商品販売へ移る。

提案者である(株)四国総研は、これまでに自社開発技術の商品化・事業化実績を多数有し、事業化に必要な体制が確立されている。また、本件シーズ技術開発過程において、多くのエネルギー関連企業や商社とのコネクションを構築しており、市場ニーズや実証試験フィールドの提供及び、サンプル販売の端緒を得ることができる環境にある。製造は本件各再委託先が行うが、各企業とも、自社開発技術に基づく商品化・事業化実績を有し、商品が高い品質で安定供給できる製造プロセスに必要な体制が確立されているため、これらを総合的に活用することで強力な事業化の推進が見込める。

優位性と課題

a. 事業の新規性・独創性

現在水素ガス検知には主に、防爆構造を付加した半導体式、熱伝導式等の接触式ガスセンサが用いられている。これらのセンサは小型、低コストである一方で、応答に数十秒程度の時間を要するため、漏洩監視の観点ではガス漏洩から警報発報までにタイムラグが生じ、漏洩探査の観点では、漏洩箇所を効率的に特定することが困難であるという課題が残る。

これに対し、本提案の水素ガス検知技術は光学的手法(レーザラマン分光法及び CARS)に基づき、応答速度 2 秒以内を実現することが可能であるため、漏洩監視、漏洩探査のいずれの観点から

もその高度化を図ることができる。本提案に用いる光学的水素ガス検知手法は、提案者が発案した全く新しい独自の技術である。また、とりわけ水素ガスリークディテクタについては、現在同等の機能を有する装置は存在せず、オンリーワンとなる新技術である。

b. 他との競争力

これまでの研究開発過程において水素ガス検知の原理については十分に検証がなされており、これに係る産業財産権は国内外において取得済みであるため、同様の手法で他社との競争となった場合、提案者が圧倒的に有利である。

c. 課題と解決方法

事業化までに想定される課題は、製品コストと水素ステーション関連市場の獲得である。

[製品コスト]

従来の光学式ガスセンサは極めて大型であり、～数千万円程度のコストであったが、提案者はこれまでに、装置の大幅な小型化(システム一式でテーブルトップサイズ)と低コスト化(500万円以下)を実現してきた。本提案では、技術開発と量産効果により小型・低コスト化を進め、市販の水素ガス検知システム(例えば6点監視で200万円程度)と同等のコストで実現する。これによって、従来と同等のコストで、光学的手法による応答の速い水素ガスセンサを提供することができる。また、リークディテクタについては、主に特殊用途への適用が想定されるため、コストよりも機能を優先し事業化を進めるべきであると考えられる。

[水素ステーション関連市場の獲得]

水素ステーションのパッケージ化や試験運用が進められる中で、保安設備についても既に一定の仕様が決定されており、一般のセンサ市場と比較して開拓が困難であると言える。しかしながら、本技術による保安管理水準の大幅な向上と、近年の自然災害など、想定外事故発生時に備えた安全対策に対する世論の動向に照らせば、水素ステーションの本格普及が進められる中で、前述現行技術における課題等に起因するアクシデントが生じた際に、随時本事業における完成度の高い商品と実績を提示することで、市場を切り開くことが十分に可能であると考えられる。

(3) 実用化・事業化のスケジュール

製品設計

小型光学式水素ガスセンサ、水素ガスリークディテクタのいずれについても、本事業が終了する平成29年度までに実証機の設計試作を終え、製品化に向けた課題を抽出する。

設備投資

製造は外部委託とするため、各部品や製品検査用機器の購入が主な設備投資となる。

生産

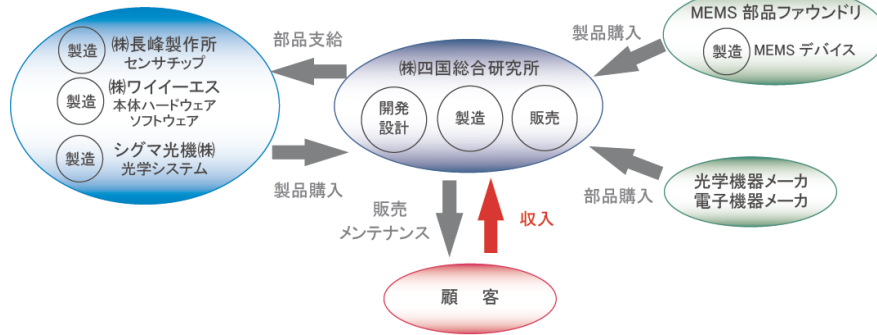
本事業終了後平成30年から生産(サンプル出荷)を開始する。

事業開始当初は、受注生産体制を想定し、本件再委託先企業や電子機器メーカー、光学機器メーカーにより行う。小型光学式水素ガスセンサについては、本体を(株)ワイイーエス、センシング部については(株)長峰製作所、MEMS部品についてはファウンドリを活用する。水素ガスリークディテクタについては、シグマ光機(株)が担当する。なお、年間生産台数が50台を超えた時点で、量産ラインの導入を検討する。

販売

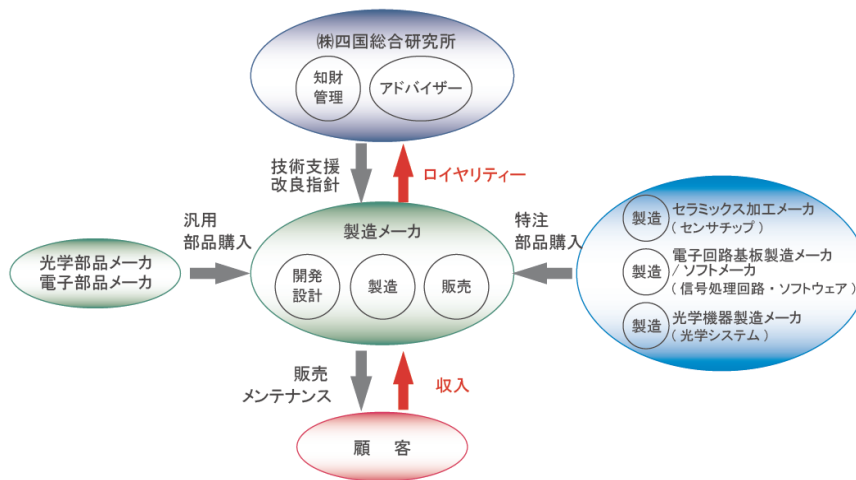
当初は提案者により販路の開拓、拡大を推進する。平成32年度終了時点の成果を基に、本事業の続行/中断の判断と、製造委託企業に対する受注・製造・販売業務の移管を検討する。

[事業化のスキーム]
受注生産体制



量産体制

[量産体制]



[事業化のスケジュール]
光学式水素ガスセンサ

	H29 年度	H30 年度	H31 年度	H32 年度	H33 年度	H34 年度
製品設計	■					
設備投資		■	サンプル出荷開始			
生産		■	■	■	■	■
販売				■	■	■
収益発生				■	■	■
備考		事業終了	続行/中断, 業務移管を判断			

水素ガスリークディテクタ

	H29 年度	H30 年度	H31 年度	H32 年度	H33 年度	H34 年度
技術開発	■					
製品開発		■	■	■	■	サンプル出荷開始
生産					■	■
販売						■
収益発生						■
備考		事業終了			続行/中断, 業務移管を判断	

予想される重大な障害:
 製品設計段階: 製品コストの削減。
 設備投資段階: 特になし。
 生産段階: 特になし。
 販売段階: 水素ステーション関連市場の獲得。

5. 研究発表・特許等

- 研究発表・講演, 文献等, その他 -

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	平成 26 年 9 月	第 32 回レーザーセンシングシンポジウム	半導体レーザーを用いた水素ガス濃度測定	二宮英樹(四国総研) 他
2	平成 26 年 11 月	第 31 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム	SiOB への適用を目指した光学自動アライメント技術の開発	高尾英邦(香川大学) 他

3	平成 27 年 1 月	レーザー学会学術講演 会第 35 回年次大会	レーザーラマン分光マルチガ スセンサ用小型分光デバイ スの開発	朝日一平(四国総研) 他
4	平成 27 年 5 月	18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Transducers 2015	A rotational mems diffraction grating for realization of micro sized spectroscopy system	Hidekuni Takao (Kagawa Univ.) etc.
5	平成 28 年 1 月	燃料電池 Vol.15 No.3	光計測技術を用いた水素ガス 及び水素火炎可視化技術の 開発	朝日一平(四国総研)
6	平成 28 年 7 月	The International Conference on Electrical Engineering 2016	Development of light source for hydrogen gas detection using CARS	Sachiyo Sugimoto (Shikoku Research Institute) etc.
7	平成 29 年 3 月	第 42 回リモートセンシ ングシンポジウム	ラマン効果を用いた光ファイ バ伝送式ガス濃度遠隔計測 装置の開発	市川祐嗣(四国総研) 他
8	平成 29 年 3 月	第 42 回リモートセンシ ングシンポジウム	ラマンライダによる小型水素ガ スリークディテクタの基礎検討	荻田将一(四国総研) 他
9	平成 29 年 3 月	平成 29 年電気学会全国 大会	レーザーラマン分光法によるマ ルチガス計測装置の高感度 化	市川祐嗣(四国総研) 他
10	平成 29 年 3 月	平成 29 年電気学会全国 大会	CARS を用いた水素ガスリーク ディテクタの開発	杉本幸代(四国総研) 他
11	平成 29 年 3 月	平成 29 年電気学会全国 大会	ガス漏洩位置探査に向けた 小型ラマンライダの基礎検討	荻田将一(四国総研) 他
12	平成 29 年 7 月	第 54 回研究発表会	レーザーラマン分光法による水 素ステーション多点漏洩監視 装置の開発	市川祐嗣(四国総研) 他
13	平成 29 年 7 月	第 54 回研究発表会	微量漏洩水素ガス検知技術 の開発(第 2 報)	杉本幸代(四国総研) 他
14	平成 29 年 7 月	第 54 回研究発表会	ラマン式水素漏洩位置探査 装置の開発に向けた実験的 検討	荻田将一(四国総研) 他
15	平成 29 年 9 月	第 35 回レーザーセンシ ングシンポジウム	レーザーラマン分光法による直 列型マルチガス多点監視シ ステムの開発	市川祐嗣(四国総研) 他
16	平成 29 年 9 月	第 35 回レーザーセンシ ングシンポジウム	CARS による水素ガス検知感 度向上に向けた励起条件の 最適化	杉本幸代(四国総研) 他
17	平成 29 年 9 月	第 35 回レーザーセンシ ングシンポジウム	深紫外マイクロチップレーザ を用いた高空間分解能小型 水素ライダの開発	荻田将一(四国総研) 他
18	平成 27 年 3 月	第 11 回[国際]水素・燃 料電池展 ~ FC EXPO 2015 ~	展示会出展	四国総研
19	平成 28 年 3 月	第 12 回[国際]水素・燃 料電池展 ~ FC EXPO 2016 ~	展示会出展	四国総研

20	平成 28 年 9 月	水素ステーション・インフ ラ展(Hy-STEX)2016	展示会出展	四国総研
21	平成 29 年 9 月	第 3 回[関西]水素・燃料 電池展 ~ [関西]FC EXPO ~	展示会出展	四国総研

- 特許等 -

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託会社名
1	平成 26 年 10 月 9 日	特願 2014-208063	水素ガス濃度計測装置およ び方法	(株)四国総合研究所
2	平成 29 年 6 月 16 日	特願 2017-118661	ガス濃度計測装置および方 法	(株)四国総合研究所
3	平成 29 年 (出願手続中)	-	(仮)直列配置が可能な光学式 センサチップ	(株)四国総合研究所

基本特許については既已取得済

- ・ガス漏洩監視方法, およびそのシステム(特許第 3783019 号/平成 16 年 3 月 5 日) 他
海外特許有(7385681: 米国, 2518491: カナダ 他)

(1111-6)「水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全基盤整備に関する研究開発 / 水素火炎可視化機能を有する監視システムの研究開発」

委託先：(株)四国総合研究所

成果がけ(実施期間)：平成26年度～平成29年度)
 ・イメージファイバを用いて防爆区域の画像を非防爆区域に伝送し、二波長分光によって選別・撮像した特定波長域の近赤外画像(可視画像)と合成することにより、5m遠方に在る微小水素火炎を可視化することの出来る監視システムの実用化の見通しを得た。

背景/研究内容・目的
 水素火炎は検知できないため、水素を扱う現場には保安装置として、水素火炎の中心部から発せられる紫外線に反応する火炎検知器が設置されている。当該検知器は、火炎の有無を判定するものであり、着火位置の特定は、これまで通りパトロール員の現地巡視に委ねられている。しかも、検知波長域の全ての光に反応するため誤検知が多い。
 本研究では、水素火炎から発せられる各種波長域の発光を専用カメラで画像として捉え、火炎の判定や火炎領域の抽出を行う手法を高度化することにより、火炎長が数cmの微小水素火炎を遠方から検知して可視化する機能を具備する監視システムと高性能携帯型火炎可視化装置の開発をする。

実施項目	目標
A. ニーズ調査、目標仕様の決定	水素関連事業者を対象とするニーズ調査により、開発目標仕様を明確にする。
B. 火炎可視化装置の小型・高性能化	水素火炎を検知するシステム構成やデータ処理手法、火炎判定ロジックを明確化し、機能モデルを試作して検証・評価を行う。
C. 水素火炎検知機能を有する監視システムの開発	汎用システムを応用する新しい監視システムを考案し、機能モデルを試作して検証・評価を行う。
D. 防爆対策	新しい防爆仕様を考案し、機能モデルを試作して検証・評価を行う。
E. フィールド試験	設計・試作した実用モデル機を用いてフィールド試験を実施、当該モデル機の機能や性能、信頼性、設計の妥当性などを検証・評価する。
F. 製品コスト試算	フィールド試験の結果を反映させて製品モデルの仕様を決定し、当該モデル機のコストを試算する。

実施体制及び分担等

NEDO 株式会社四国総合研究所

これまでの実施内容 / 研究成果

- A. ニーズ調査、目標仕様の決定
 水素関連事業者など5者を調査訪問し、開発目標仕様を顕在化させた。
 (目標15mの離隔距離を以て、誤動作することなく確実に数cmの微小水素火炎を可視化する。
- B. 水素可視化装置の小型・高性能化
 特定波長域の近赤外光を画像として捉えることにより、微小水素火炎の可視化が可能であることを検証した。
- C. 水素火炎検知機能を有する監視システムの開発
 水素火炎検知の信頼性を高めるための遠赤外光画像を流用する監視システムの実用性を確認した。
- D. 防爆対策
 イメージファイバを用いる画像伝送方式を考案し、実用モデル機を試作してその実用性を検証・評価した。
- E. フィールド試験
 実フィールドを模擬した事業者構内の屋外環境下で各種の評価試験を実施中である。
- F. 製品コスト試算
 10月中旬より、モデル機の仕様を決定してコスト試算を実施する予定。

研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
A	水素関連事業者など5カ所を調査訪問して、市場ニーズと開発目標を明確化した。	
B	近赤外カメラと光学フィルターの適用により、水素火炎の可視化が可能であることを実証した。	
C	監視用途には近赤外画像よりも遠赤外画像が適していることを確認した。	
D	画像伝送方式の可能性を実証した。	
E	前照灯の影響を排除するための効果的な対策の必要性を顕在化させた。	
F	(実施中)	(12月時点見込)

今後の課題

様々なケースや場面を想定した条件下でのデータ取得とデータベース化、及び実態に即した最適な閾値を決定するアルゴリズムの開発、ならびに前照灯の影響排除のための根本的な解決策の検討。

実用化の見通し

技術面での実現の可能性はほぼ確認していることから、光学部品やイメージファイバなど、大きな量産効果を期待することの出来るシステム構成品の新たな製造技術が開発されれば、市場に受け入れられるコストの実現は可能である。

課題番号： - 6

水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全基盤整備に関する研究開発 /

水素火炎可視化機能を有する監視システムの研究開発

株式会社四国総合研究所

1. 研究開発概要

水素ステーションの運用におけるトラブルの未然防止や、トラブル発生時の迅速な対応を効率的に実施するために、通常では視認できない水素火炎を可視化することのできる防爆対応の装置を開発することにより、水素火炎可視化機能を有する水素ステーション監視システム、及び可燃性物資に水素が含まれる火災現場に於いて、水素火炎を特定することのできる可搬型水素火炎可視化装置を提供する。

2. 研究開発目標

通常、水素火炎は視認することが出来ないため、水素を扱う現場には、水素火炎から発せられる紫外光に反応する炎検知器が設置されている。当該検知器は、火炎の有無を判定して警報発報することを基本としており、その着火位置の特定は巡視員の現地パトロールに委ねられている。当該検知器は、検知波長帯域の全ての光にセンサが反応するため、太陽光や溶接火花などに含まれる紫外光に起因する誤検知が多いことが、水素関連事業者への聞き取り調査により明らかとなっている。

水素ステーションの普及に向けて期待される“水素火炎を迅速・確実に検知する”ことは、水素インフラの社会受容性を確保する観点からも極めて重要である。本研究では、水素火炎から発せられる紫外光や可視光・近赤外光・遠赤外光を専用のカメラで撮像し、これらの撮像画像をパソコン上で画像処理することにより、通常では視認することの出来ない水素火炎を可視化する手法を基本とする。

(1) ニーズ調査、目標仕様の決定

現行の水素ステーションに設定されている炎検知器を調査し、本研究開発に必要な仕様目標を明確にする。併せて、水素ステーション管理事業者などへのヒアリングを通して、本研究で開発する技術の目標仕様を明確化する。

(2) 火炎可視化装置の小型・高性能化

火炎から発せられる各種波長域の光の輝度情報に基づき、通常では視認することの出来ない水素火炎の可視化技術を具現化させるために、水素火炎検知のための光学系構成や画像処理手法、火炎検知判定のフローなどを明確化し、実証モデル機を試作して検証試験を行い、それらの妥当性を評価する。

(3) 水素火炎検知機能を有する監視システムの開発

汎用の防犯監視システムを応用した水素火炎検知装置の光学系構成や画像処理手法、火炎検知判定フローなどを決定して実証モデル機を試作し、フィールド試験を行って、その妥当性を評価する。

(4) 防爆対策

水素火炎の監視は“遠方から安全・確実に”を基本とする。しかし、発光量の小さい微小火炎や配管・バルブなどが複雑に入り混じった蓄圧器室内の監視のためには、防爆エリア内への装置設置を余儀なくされる場合があることに鑑み、水素火炎検知機能を阻害しない光学系で構成される画像伝送手法を具現化させた実証モデル機を試作し、フィールド試験を行って、その妥当性を評価する。

(5) フィールド試験

現行の水素ステーションに設置されている炎検知器と、可視光束と近赤外光束を集光・分光・伝送・撮像する実証モデル機を事業者の構内に設置し、同一条件下で各種評価試験を実施することにより、誤動作発生件数などの具体的な数値を以て、実用モデル機の性能や信頼性、設計の妥当性などを検証・評価する。

(6) 製品コスト試算

フィールド試験の結果を反映させて製品モデル機の仕様を決定し、その仕様の製品コストを試算する。

3. 研究開発成果

3.1 研究開発成果、達成度

(1) ニーズ調査、目標仕様の明確化()

水素ステーションを設置・運営するエネルギー供給事業者や水素インフラ事業者、ならびに水素火災時の消防戦術を検討・策定する総務省消防庁を調査訪問して、事前に通知してあったアンケート項目に対する回答や説明・解説のほか、意見交換を実施した。

当該調査により明らかとなった事項は以下の3点に集約される(表1)。

- 火炎検知のニーズはガス検知ニーズより低い。
 - ・ 着火に至る前段階(ガス検知)で安全な措置を講じることが基本である。
 - ・ ガス検知機能は必須であり、濃度測定機能は必ずしも必要ではない。
 - ・ 検漏液塗布以外の方法でガス漏洩箇所を特定する技術へのニーズが非常に高い。
- 水素火炎と一般火炎(炭化水素火炎)の区別は不要である。
 - ・ 火の気(火炎)の確実な検知が第一義である。
- 誤検知することなく確実に水素火炎を捉える装置が望まれている。

調査結果を踏まえ、水素火炎可視化装置の検知能力の仕様を以下のように明確化した。

【開発目標】

5mの離隔距離を以て数cmの微小火炎を確実に検知する。

訪問先	東京ガス株式会社 千住水素ステーション	岩谷産業株式会社 尼崎水素ステーション	株式会社日立製作所 インフラシステム社	大陽日酸株式会社 水江事業所	総務省 消防庁
調査対象・目的	従来型水素ステーション (都市ガス改質)	商用水素ステーション (オフサイト方式)	水素コンプレッサー製造者 からの意見聴取	移動式水素ステーション (オフサイト・パッケージ型)	携帯型火災可視化装置の 消防戦略上の適用性調査
訪問調査日	平成26年 8月20日	平成26年 9月 3日	平成26年 9月24日	平成26年11月19日	平成26年11月20日
調査概要	<p>着火前に対処することを基本と 考えており、火災検知のニーズ は低く、ガス漏洩検知のニーズ は高い。</p> <p>検漏液塗布（発泡検査）を実施 する前に別の方法でガス漏洩箇 所を特定し、増し締めなどの然 るべき措置を講じたい。</p> <p>このため、ガス漏洩箇所を特定 することのできる技術に対する ニーズは極めて高い。</p>	<p>水素火災と一般火災（炭化水素 火災）の区別は不要であるが、 水素火災は見逃すことなく検知 されたい。</p> <p>鎮火確認の観点から、着火位置 の特定機能は必要。</p> <p>漏洩ガス濃度に応じて重警報と 軽警報を使い分けられていること を助案すれば、水素ガス濃度測定 機能が必要。</p> <p>火災検知と水素ガス漏洩検知/ 濃度測定の必要性の観点では、 後者のニーズが高い。</p>	<p>水素インフラ事業者の立場から 発言すれば、水素火災可視化は 不要であるが、低濃度まで対応 可能な水素ガス検知器ならば、 例え高価であっても欲しい。</p> <p>水素ステーションの現場では、 10ppmレベルの水素ガス漏洩 でワイワイ騒いでいる。</p> <p>現地担当者は、ガス漏洩検知器 の針が若干でも振れるものなら ば、直ちにメーカーに対応を強要 する。</p>	<p>高圧ガス保安法上、移動式水素 ステーションは防爆対応は不要 であり、水素ガス漏洩/検知器 は設置するも火災検知器の設置 は義務付けられていない。</p> <p>水素ガス漏洩検知機能が最優先 される。ガス検知器がLELの1/4 で警報発報するため、水素ガス 濃度測定機能の必要性について 特段、考えたことがない。</p>	<p>消火活動現場でサーモカメラを 使用している現状から言えば、 火災可視化装置の消防戦略上の 要否や消火活動上の適否に関す る積極的な回答は困難である。</p> <p>消火活動の現場では赤熱面所の 把握が最も重要であり、強いて ニーズを挙げるならば、火災可 視化装置とサーモカメラ機能の 一体化。更に、頑強な構造体で あることやズーム機能の具備。 汎用性の高い装置であることが 重要。</p> <p>現在まで水素ステーションでの 火災事故が発生していないこと から、水素火災に対する消火活 動で何が問題なのか、そのため には何が必要なのか、正直など ころ、把握できていない。</p>

表 1 水素関連事業者などへの訪問調査結果

(2) 火炎可視化装置の小型・高性能化()

水素分子を含む可燃性ガスが燃焼することにより、OHラジカルからの紫外光と、燃焼によって生成した水蒸気(H₂O)分子からの近赤外光、及び結露した水蒸気から遠赤外光が発せられる(図 1)。このため、水素火炎から発せられる光は、280～320nm の波長域(紫外光領域)で観察されるため、当該波長域の光を光学バンドパスフィルターで選別することにより水素火炎を検知することが出来る。燃焼によって生じる高温の水蒸気は火炎周辺の空気に曝されて結露し、温度相応の輻射熱を発するため、当該熱輻射を検知することにより、火炎近辺の温度分布の熱画像化が可能となる。一方、燃焼によって火炎から発せられる水蒸気(H₂O)分子の発光スペクトルが近赤外光波長域にピーク値を有していることに鑑みれば、太陽光(外乱光)の発光スペクトル輝度が小さく、かつ水蒸気(H₂O)分子の発光スペクトル輝度の強い波長帯域の発光を画像化することによっても火炎の可視化は可能である。本研究では、専用カメラを用いて水素火炎から発せられる紫外光や近赤外光、遠赤外光を画像として捉え、これらの撮像画像を処理して背景画像(可視光画像)上に重ね合わせる手法(以下「重ね合わせ手法」)を適用する。

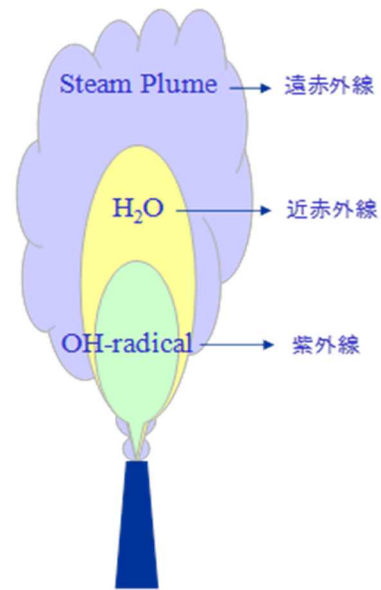


図 1 水素火炎の模式図

口径 1mm のマイクロ火口を用いて 2cm 程度(OH ラジカル部分)の微小な水素火炎を発生させ、5m の離隔距離を以て当該

火炎の撮像試験を行った。紫外光画像は専用の UV カメラで、近赤外光画像は 930nm のバンドパスフィルターを介して CCD カメラで、遠赤外光画像はサーモカメラで撮像した。OH ラジカルの発光は信号強度が微弱であるため、イメージ・インテンシファイアー(以降、I.I.と表記する)で約 10,000 万倍に増幅した。可視光及び水

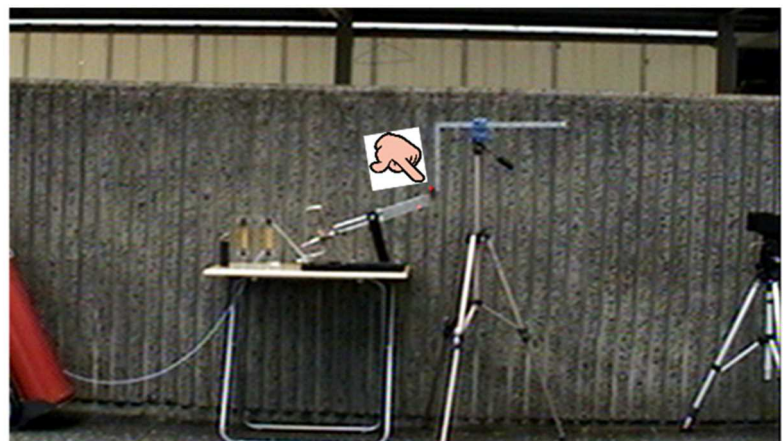


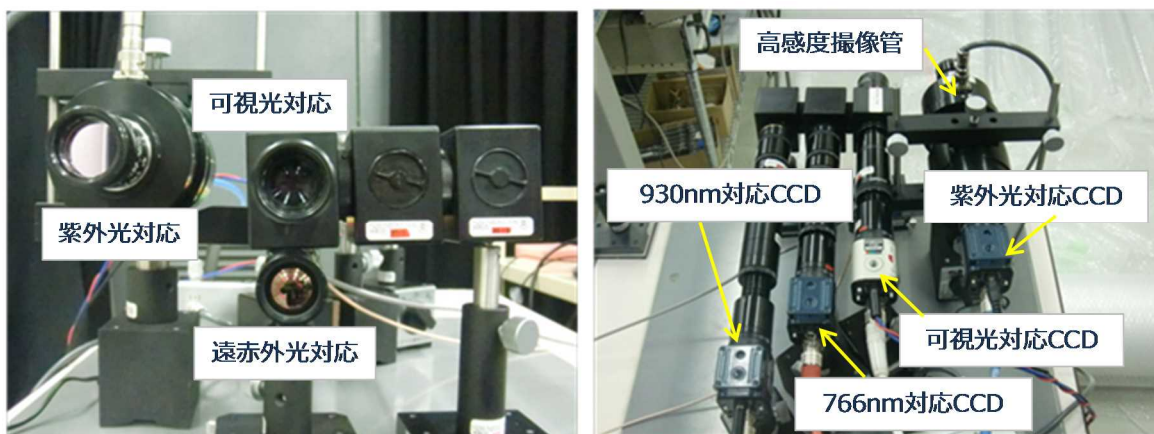
図 2 水素火炎可視画像(離隔距離 5m、火炎長 2cm)

素火炎から発せられる異なる 2 波長の近赤外光(900nm、930nm)と遠赤外光を CCD カメラで同時に撮像し、2 つの近赤外光画像の差分画像と赤外光画像の共通の領域を水素火炎と判定し、当該領域を赤く着色して可視光画像上に重ね合わせて表示した。図 2 中の米粒ほどの極めて小さい赤色領域(指さしマーク部)が水素火炎である。この結果により、重ね合わせ手法の適用による “5m の離隔

距離を以て数 cm の水素火炎を検知する、この可能性が示唆された。重ね合わせ手法では、水素火炎を複数台のカメラで同時に撮像し、所定の要件を満たす画像領域のみを水素火炎と判定しているため、紫外光を検知した場合であっても、他の要件を満たされなければ水素火炎と判定しない。また、周囲が高温であった場合でも、水素火炎の領域のみの抽出が可能である。しかし、重ね合わせ手法では、同時に捉えた複数枚の画像を処理する必要があることから、各画像の画角を一致させることが極めて重要であることに鑑み、画角の不一致(ズレ)を最小限に抑える手法として“波長分光”を検討した。

そこで、まず、可視光と近赤外光の一眼3波長分光方式を含む三眼3波長分光システムの実現の適否を検討した。石英レンズ(1)で集光した光を2個のダイクロイックミラーと1個のホットミラーを介して可視光線と異なる2波長の近赤外線に分光する一方で、OHラジカルから発する紫外線は、石英レンズ(2)を介して集光してバンドパスフィルターで選別してイメージ・インテンシファイアーで増幅する。

当該一眼3波長分光方式の適用性を評価するために、図4に示す機能検証モデルを製作し、当該モデルを用いて屋内外で実水素火炎の撮像試験を実施した。当該試験は、火炎長2cm程度の微小な水素火炎の発光を撮像対象波長毎に専用の5台のCCDカメラで画像として捉え、パソコンに取り込んで画像処理することにより所期の目的が達せられる。しかし、現有の画像処理システムは4チャンネル対応であり、チャンネル数の不足により全ての画像データを同時に処理することが出来ないため、撮像に若干の時間差が生じることによる撮像画像への影響は小さいことから、パソコンに接続するCCDカメラを適宜変更することで同様の条件下で撮像試験を2回実施し、各々の画像データを重ね合わせた可視化画像を以て妥当性を評価した。



(a) 正面からの外観写真

(b) 上部からの外観写真

図4 機能検証モデル外観

屋内試験

太陽光線の差し込まない実験室内で、5m の離隔距離を以て設置したテーブル・フード内で発生させた微小火炎を撮像した。図 5 に近赤外光画像(左端:766nm、中央:930nm、右端:両画像の差分)を、図 6 には紫外光画像、図 7 には遠赤外光画像を示す。ノイズなどの影響により確認し難いが、火炎長 2cm 程度の微小な水素火炎から発せられる紫外光と近赤外光、遠赤外光の発光が撮像画像として捉えられている。当該試験では、可視光画像を除く 4 画像(紫外光画像、近赤外光画像×2、遠赤外光画像)を以て 4 チャンネルに供した。

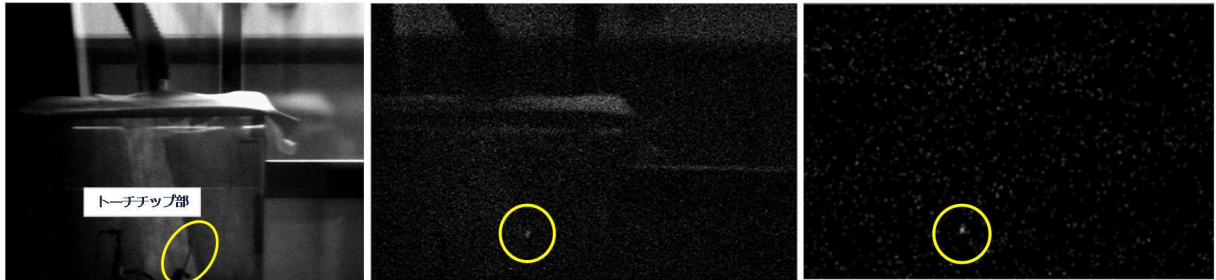


図 5 近赤外光画像(左端:766nm、中央:930nm、右端:両画像の差分)



図 6 紫外光画像

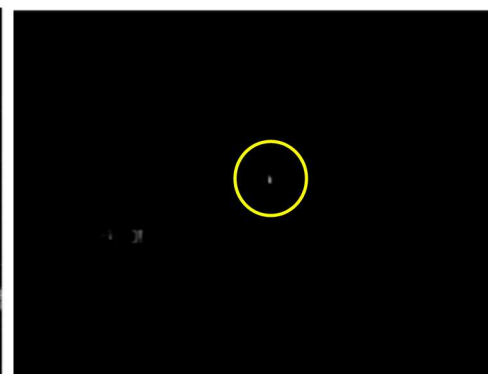


図 7 遠赤外光画像

屋外試験

西陽の遮られた建物の陰で、屋内試験と同様、5m の離隔位置で発生させた約 2cm の微小な水素火炎の発光を、光学フィルターを介して CCD カメラで撮像した。画像処理システムのチャンネル数の制約により、当該試験では、異なる 2 波長(766nm、930nm)の近赤外光画像の差分領域と紫外光画像領域を同時に満たす領域を水素火炎領域と判定して可視光画像に重ね合わせて可視化するほか、異なる 2 波長(766nm、930nm)の近赤外光画像の差分領域と遠赤外光画像領域、紫外光画像領域の 3 つの領域を同時に満たす部分を水素火炎領域と判定し、可視画像に重ね合わせて可視化した。

図 8 に近赤外光画像(左端:766nm、中央:930nm、右端:両画像の差分)、図 9 に紫外光画像を示す。図 10 は、近赤外光画像の差分画像領域と紫外光画像領域の両領域を満たす領域を水素火炎領域と判定し、当該領域を可視光画像に重ね合わせたものであり、5m 遠方の 2cm 程度の微小水素火炎を可視化することが出来ることを確認した。

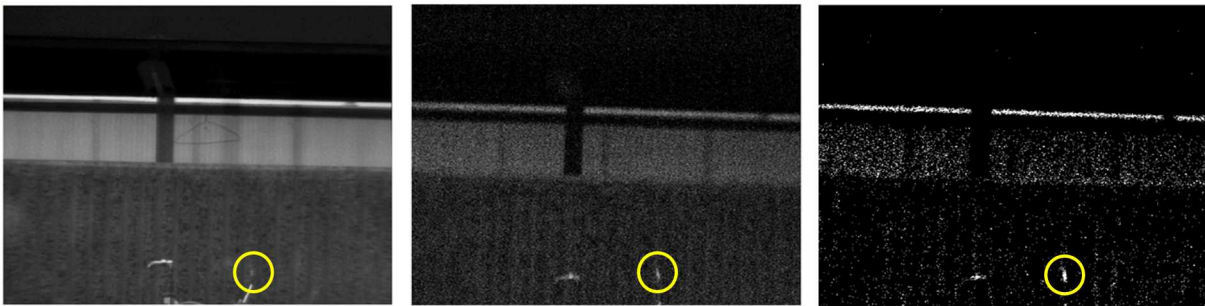


図 8 近赤外光画像(左端:766nm、中央:930nm、右端:両画像の差分)

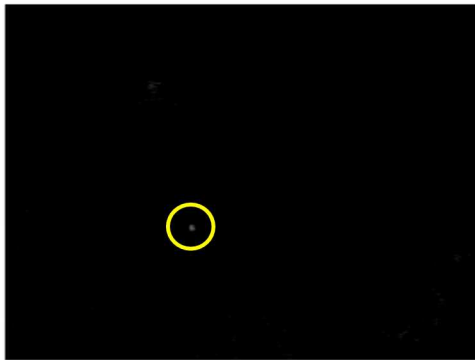


図 9 紫外光画像

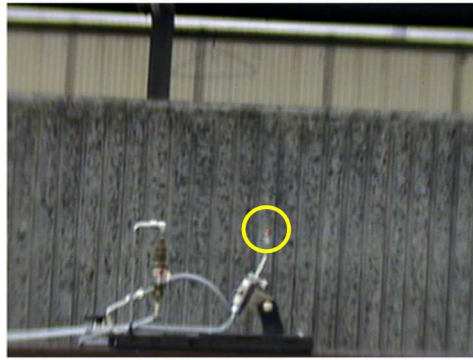


図 10 合成画像

一方、水素火炎のスペクトル測定により、1300nm を超える近赤外光波長帯域に、水蒸気(H₂O)の強い自発光が存在することを確認した(図 11)。この発光スペクトルの強度は、これまで検討していた 900nm 近傍の近赤外光のそれに比べると数倍強いことに加え、当該波長域では太陽光のスペクトル強度が弱いため、水素火炎の誤検知や撮像時の外乱要因となり得る太陽光の影響を排除することができると考えられる。そこで、950～1700nm の分光感度特性を有し、InGaAs を撮像素子とする近赤外光カメラを用いて、5m 遠方の火炎長約 2cm の水素火炎を撮像した(図 12)。この撮像結果は、適切な波長帯域の光学フィルターを使用することにより、近赤外光画像と可視光画像との差分処理が不

要であることを示唆するものである。この知見は、水素火炎可視化装置の小型化や、携帯型水素火炎可視化装置のシステム構成に大いに反映させることができる。

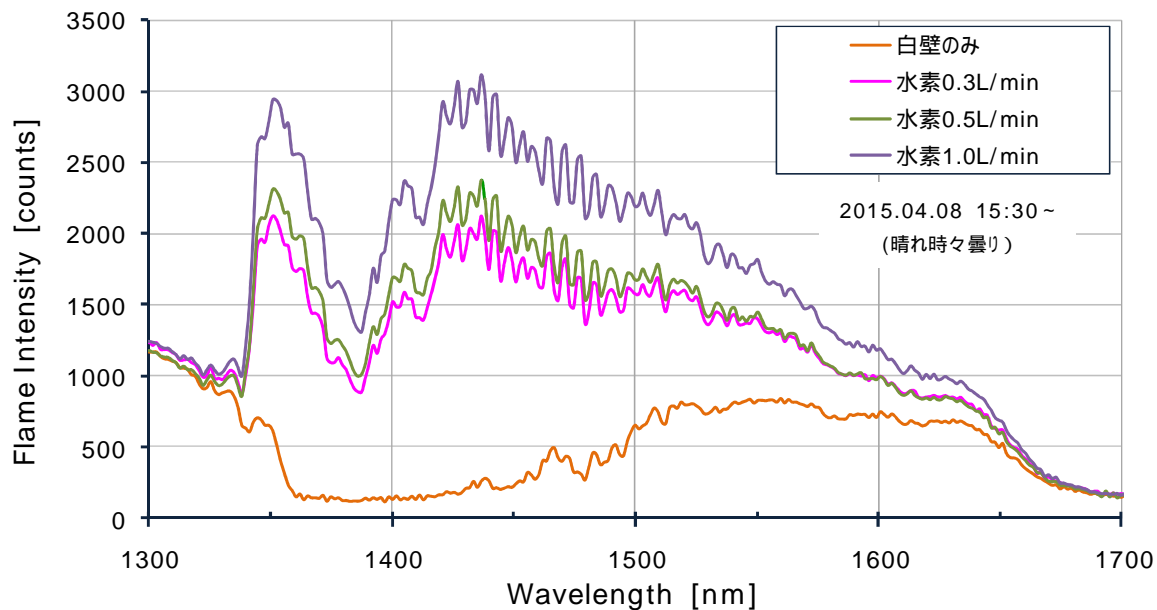
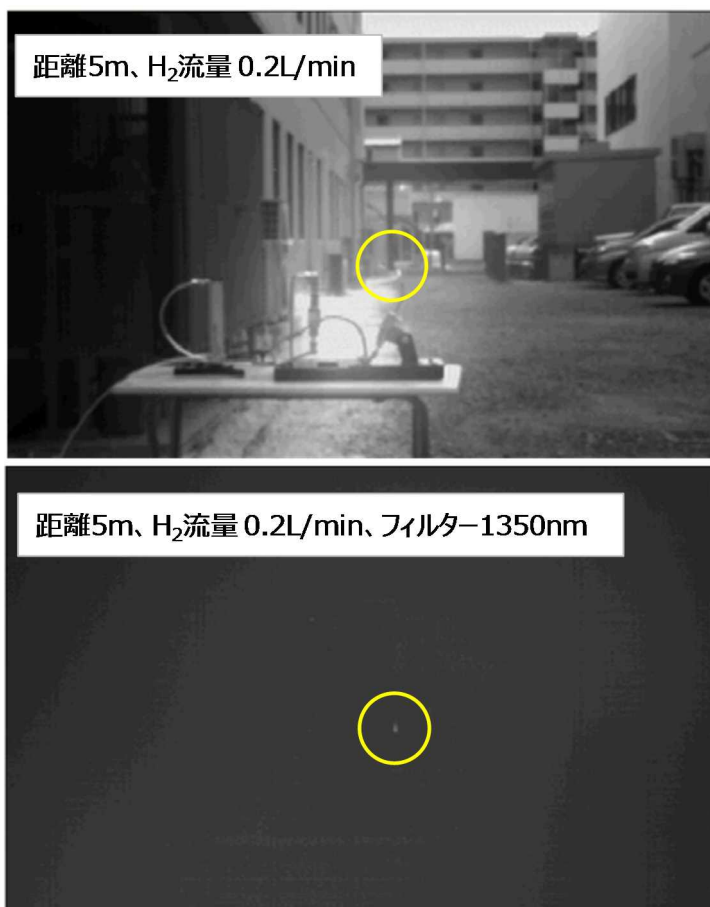


図 11 水素火炎の発光スペクトル



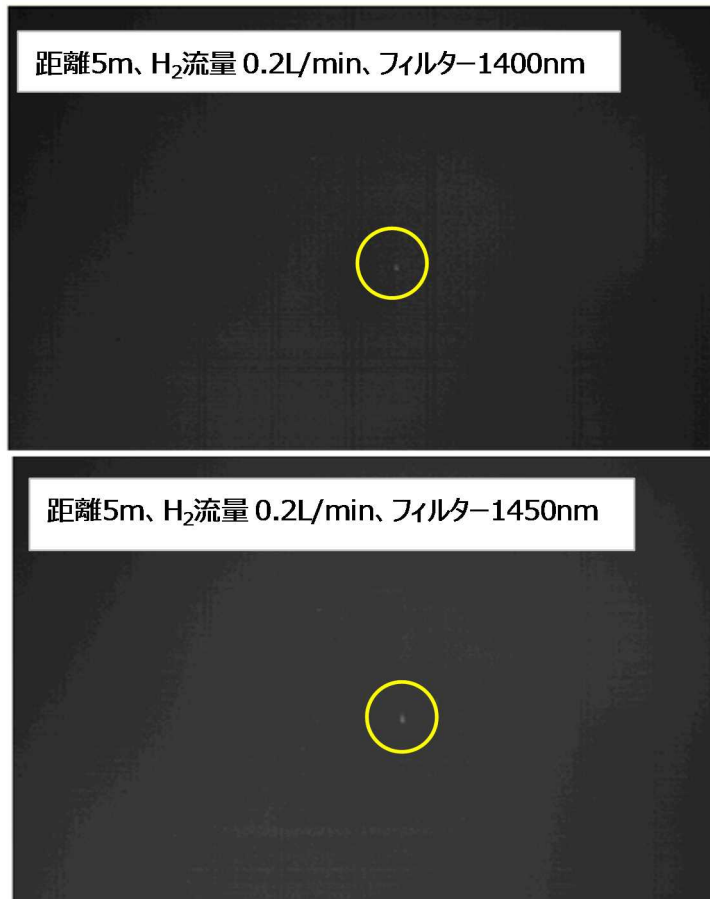


図 12 水素火炎の近赤外光画像

(3) 水素火炎検知機能を有する監視システムの開発()

ガソリンスタンドや天然ガススタンド、LPG スタンドなどに設置されている監視カメラの機能に、水素火炎可視化機能を有機的に統合させることにより、高度な水素ステーション監視システムを提供することができる。水素火炎の可視化が、水素火炎から発せられる紫外線と近赤外線、遠赤外線を画像として捉えることにより実現していることに鑑み、これらの撮像画像の何れかを監視用途に適用することが合理的であると考え、模擬実験を実施して遠赤外画像と近赤外画像の監視用途としての適否を検討・評価した。

遠赤外光画像の適否

水素ステーション内への人や各種車両の進入を想定し、ビデオ解析装置と遠赤外光カメラを用いて侵入検知の可否に係る模擬実験を行った。その結果、昼間は路面と人物・車両の輝度差(温度差)が小さく背景と侵入物が見分けが困難である一方、夜間は、路面と人物・車両の輝度差も大きく検知が可能であった。つまり、画像に温度差が出ない事象では、意図的に温度差が出る工夫が必要であることが明らかとなった(図 15)。

近赤外光画像の適否

近赤外光カメラ(撮像素子: InGaAs、分光感度範囲が $1 \sim 1.7 \mu\text{m}$)の撮像画像が侵入監視用途として利用可能か否かを評価するため、先の遠赤外画像の適否検討と同様の模擬試験を行った。ポー

ルを用いた試験(小動物を模擬した試験)でも、サイズ規格条件が有効で検知除外することが出来るなど、昼間の事象試験では全てのケースで安定した侵入検知を確認した。一方、夜間試験では、「歩行者(前後)ブラック雨合羽」の事象以外は安定した侵入検知が可能であった。車のヘッドライトに対しては、今回の試験では誤検知は認められなかったが、ヘッドライトの照射光がカメラ視野に入る場合の誤報の可能性は否定できない。一般的なハロゲン投光器(ハロゲン光波長 375～4000nm)は照明として用いることが出来るが、白色 LED(波長 450～700nm)などの波長帯域の狭い照明は近赤外光波長域に発光がないため、照明として不向きである。また、降雨自体は画像処理に影響するほどの輝度差や大きさはなく、誤報要因にはならないと判断されるが、水溜りへの映り込みによる誤報が懸念される。従って、近赤外画像を用いて夜間の侵入監視を実施する場合には、カメラへの入射光を制御するためのレンズの絞り調整操作が必要であること、ならびに監視エリアをハロゲン光や白熱光などを照射する必要があることが明らかとなった。

以上、遠赤外光画像と近赤外光画像の適用性について検討・評価した結果、侵入監視用途には遠赤外光画像を用いることが適切かつ妥当であるとの結論を得た。

(4) 防爆対策()

現行の高圧ガス保安法では、圧縮水素ステーションのディスペンサー周囲及び蓄圧器には、水素火災が発する紫外線を検知する方法により、常時、水素火災の発生を監視することが義務付けられている。一方、可燃性ガスまたは引火性物質の蒸気が爆発の危険のある濃度に達する恐れのある場所で使用する電気機器類は、それらのガスや蒸気の種類と危険のある濃度に達する恐れに応じた防爆性能を有する防爆構造電気器具でなければならない。一般高圧ガス保安規則の「高圧ガス保安法及び関係政省令の運用及び解釈について(内規)」では、防爆指針などに基づく防爆上の非危険場所に分類される場所に設置する電気機器類は、たとえ防爆構造を有していなくとも“火気を取り扱う施設”には該当しないが、水素ステーション設備に係る危険場所の設定基準が整備されていないことから、ディスペンサー周囲 8m(火気離隔距離)の範囲内は危険箇所と考えるべきであり、その範囲内に設置する電気機器類には防爆構造が要求される。蓄圧器周囲に設置する電気機器類に対しても同様である。ディスペンサー周囲及び蓄圧器周囲は、危険個所の分類上で“ゾーン2”に該当し、当該設備の周囲に設置する電気機器類は防爆措置の講じられた容器に格納しなければならない。防爆構造容器の設計・製作は、厚生労働省告示の「電気機器防爆構造規格」や厚生労働省労働基準局通達の「技術的基準」に準拠すればよく、設計・製作要領がある程度まで標準化されているなど、技術的難易度は低く、本事業で開発すべき要素も少ない。そこで、格納容器の防爆構造化の代替策として、“非防爆区域から監視する方式”と“画像伝送方式”を比較・検討した。その結果、水素ステーション用途以外にも幾つかの適用先が考えられることや、配管やバルブ・計器などが煩雑に入り混じった狭隘部の監視用途にも適していることなどの観点から、本事業の防爆対策として画像伝送方式を採用することとした。

図 13 に画像伝送方式のイメージを示す。

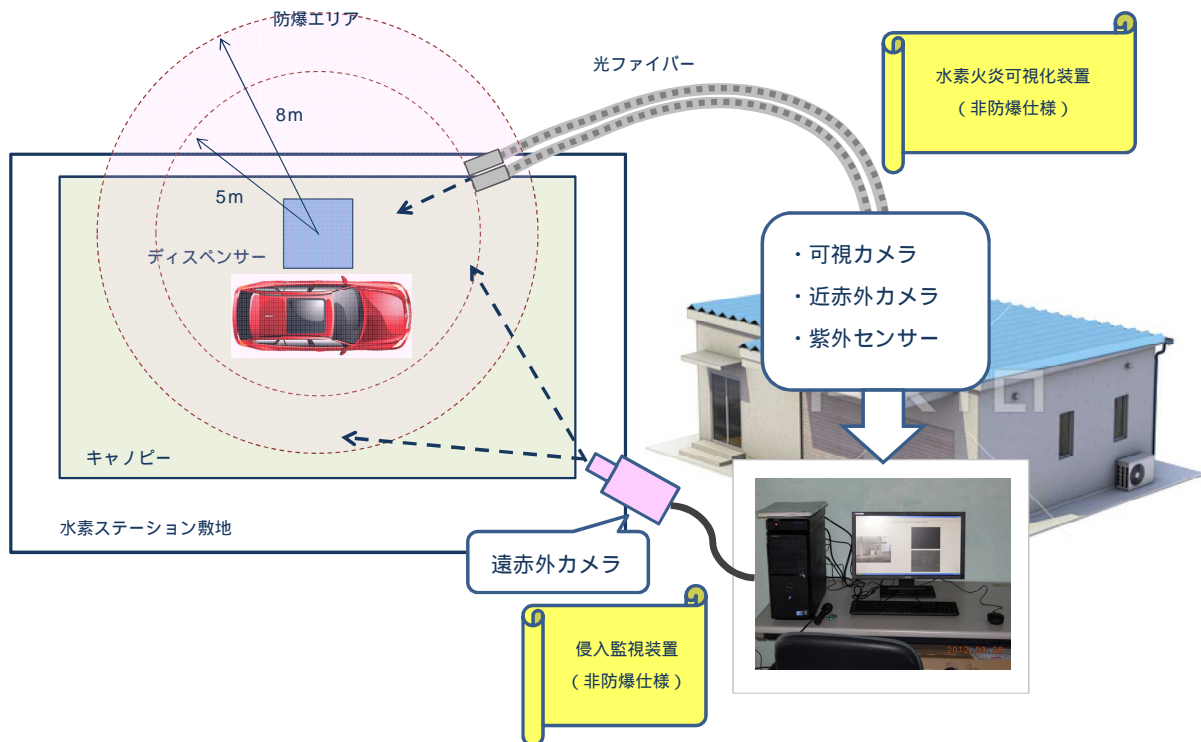


図 13 画像伝送方式を適用した水素ステーション監視システムのイメージ

本研究では、通常の状態では殆ど視認することの出来ない水素火炎、特に 2cm 程度の微小な水素火炎を、5m の離隔距離を以て確実に検知することを開発目標としている。既に、5m の遠方に位置する火炎長 2cm ほどの水素火炎から発せられる各種発光を、専用の CCD カメラを用いて可視光画像と紫外光画像、近赤外光画像、遠赤外光画像として捉え、画像処理した後、それら複数の撮像画像を重ね合わせる手法を適用することにより、米粒ほどの極微小領域ではあるが、モニター画面上で水素火炎を可視化している。ノイズなどの外乱信号に起因する領域との区別を勘案すれば、可能な限り火炎発生の想定される近傍で監視することにより、火炎領域を出来るだけ大きく捉えることが合理的である。この観点から、本研究では 5m の離隔距離を水素火炎可視化装置の設置位置、及び装置仕様の制約条件と考えて、光学部品とイメージファイバ(マルチコア光ファイバ)を組み合わせによる画像伝送方式を提案している。当該方式では、水素ステーションの防爆区域内の機器類は全て光学部品である一方で、防爆対策を講じる必要のある電子機器類は、防爆区域外の安全な場所、例えば水素ステーションの巡視・点検員の常駐建屋などに設置することを特徴としている。

(5) フィールド試験()

車両や人の出入りが多く、多様な事象の発生が想定される事業者構内の駐車場の一角に新たに設計・試作した実証モデル機を設置し、平成 29 年 6 月 13 日からフィールド試験を継続している。

近赤外光対応イメージファイバの試作

近赤外光対応の光学系(対物レンズ、結像レンズ)と可視光対応のイメージファイバ(メーカー標準品)の組み合わせでは、光量不足により近赤外光画像(水素火炎撮像画像)のコントラストの低下が大き

く、撮像画像が不鮮明となる課題が顕在化していることに鑑み、新たに近赤外光の透過率を高めるためのカスタム設計を行い、近赤外光対応のイメージファイバを試作した。当該イメージファイバを用いて水素火炎撮像試験を行い、可視光対応のイメージファイバを用いる際の課題であった“コントラストの低下”が改善されていることを確認した(図 14、図 15)。

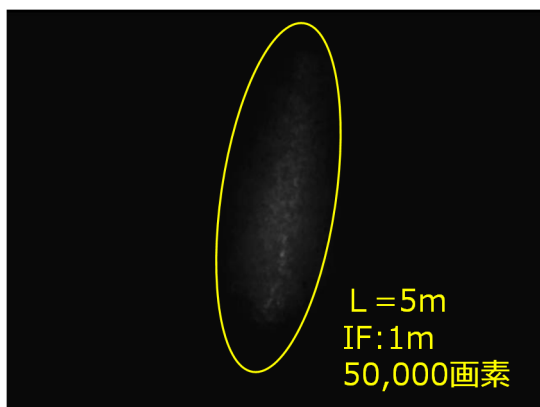


図 14 伝送画像(メーカー標準品)

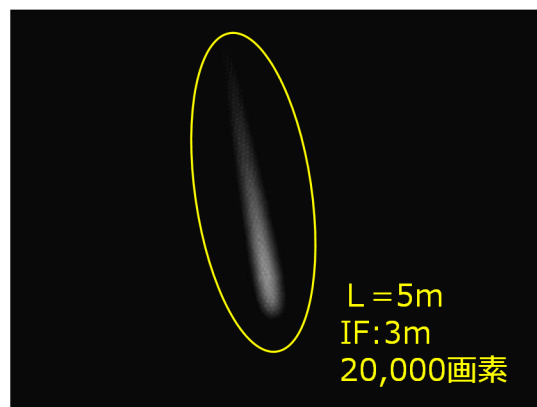


図 15 伝送画像(カスタム設計品)

フィールド試験に供したシステム

水素ステーションのバックヤード、特に狭隘部に高圧配管の混在する蓄圧器室での水素火炎検知用途を勘案すれば、現場に設置する装置としては小型化が可能なシンプルな装置構成が望ましい。この観点から、本件研究では一個の対物レンズで集光する光学構成のフィールド試験向けのモデル機を設計・試作した。

今回のフィールド試験に供したシステム構成を図 16、画像処理フローを図 17、火炎判定ロジックを図 18 に示す。

水素火炎を可視化するために捉える光は、背景画像としての可視光(400~700nm)と水素火炎から発する近赤外光(1,300~1,700nm)である。この二つの光は、波長域が大きく離れているため完全に合波させることが出来ないことに鑑み、本研究では、対物レンズの出口端で可視光束と近赤外光束の二波長に分光し、各々の光束を専用のイメージファイバで結像系まで導光する光学系の構成を採用している。

本研究で試作した対物レンズには、コスト上の制約から、可視光(代表値 546nm)と近赤外光(代表値 1,500nm)の焦点位置に於いて約 0.14mm の軸上色収差がある。これは、近赤外光と可視光の焦点距離の差が 0.14mm であることを意味しており、近赤外光が可視光よりも光軸方向に 0.14mm 先の位置で焦点を結ぶ。この焦点位置の差は対物レンズに起因するものであり、結像性の観点からこの差はゼロであることが望ましいが、設計上、この差をゼロにすることが難しいことに鑑み、対物レンズで集光した光束を可視光と近赤外光の二波長に分光し、各々の光束を専用のイメージファイバ端面に結像させる光学系構成を採用した。

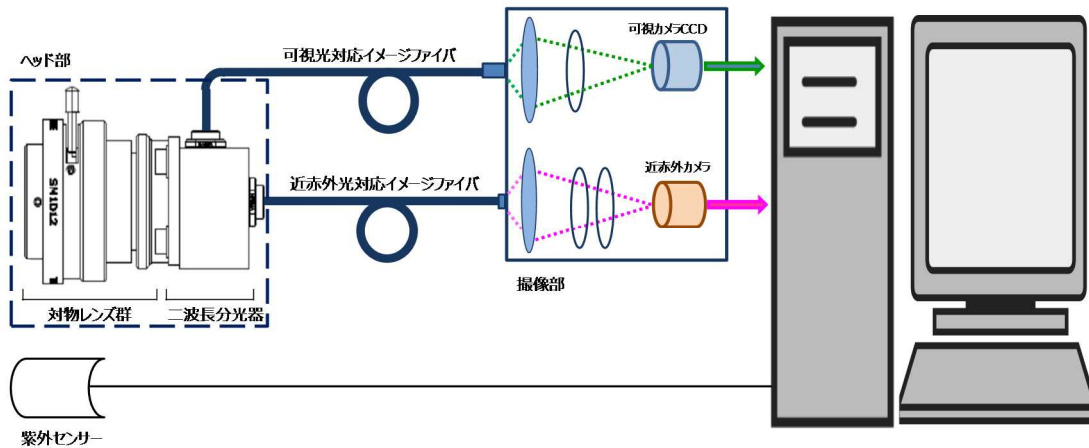


図 16 フィールド試験に供したモデル機のシステム構成

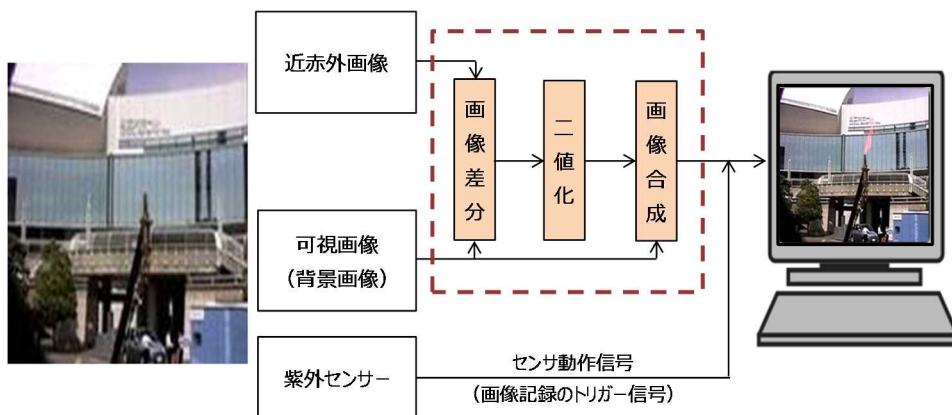


図 17 画像処理フロー

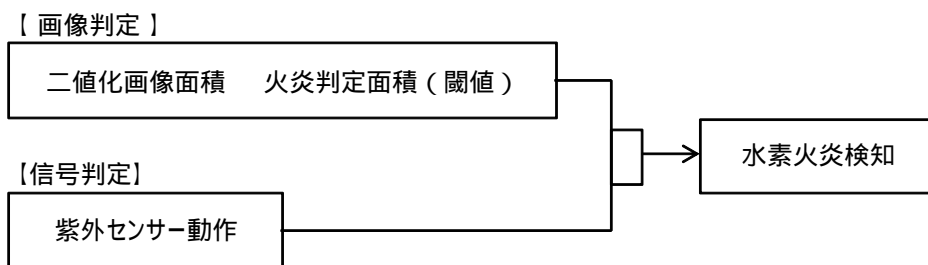


図 18 火炎判定ロジック

水素火炎の撮像

図 19 に示す火口に着火した水素火炎から発する紫外光(OH ラジカルの発光)の長さを水素火炎長と定義し、水素火炎の撮像に先立って、イメージ・インテンシファイアーを用いて水素ガス燃焼量と水素火炎長の相関を調べた(図 20)。本研究では、水素火炎長を水素ガス燃焼量を以て管理している。

図 19 に示す火口で発生した水素火炎を、試作した試験モデル機を用いて撮像し、5m の離隔距離を以て 2cm 程度の微小水素火炎の撮像と可視画像化が可能であることを検証した。

図 21 に水素火炎の撮像結果の一例を示す。撮像条件は以下の通りである。

* 撮像日:6月12日(晴天)、13:40 ~ 14:00

* 屋外(離隔距離 5m)

* 火炎表示閾値:40

・差分画像を二値化(256 階調;0:黒 255:白)した際の火炎として扱う最小階調値

* 火炎判定面積:0.1

・火炎として扱う二値化画像中の画素数がモニター画面中に占める比率(%)



図 19 水素燃焼に用いた火口

流量 (L/min)	火炎長 (mm) 事前に測定した紫外光領域
0.7	20mm程度
1.0	25mm程度
1.5	50mm程度
2.0	65mm程度

図 20 水素ガス燃焼量と火炎長の相関

水素火炎を確実に検知するためには、水素火炎から発する微弱な近赤外光を漏れなく画像として捉える必要がある。この観点から、火炎表示閾値は小さいほど望ましいが、太陽光や信号ノイズなど、水素火炎を可視画像化する上で外乱となり得る要素まで画像化される可能性が高まる。

図 22 に、火炎表示閾値 10 を以て 20mm 程度の水素火炎を撮像した結果を示す。

太陽光に含まれる近赤外光の撮像画像に水素火炎の近赤外光画像が埋もれ、図 21 の撮像画像のように、鮮明に水素火炎の着火位置を視認することができない。このことから、火炎表示閾値の最適化が重要である。

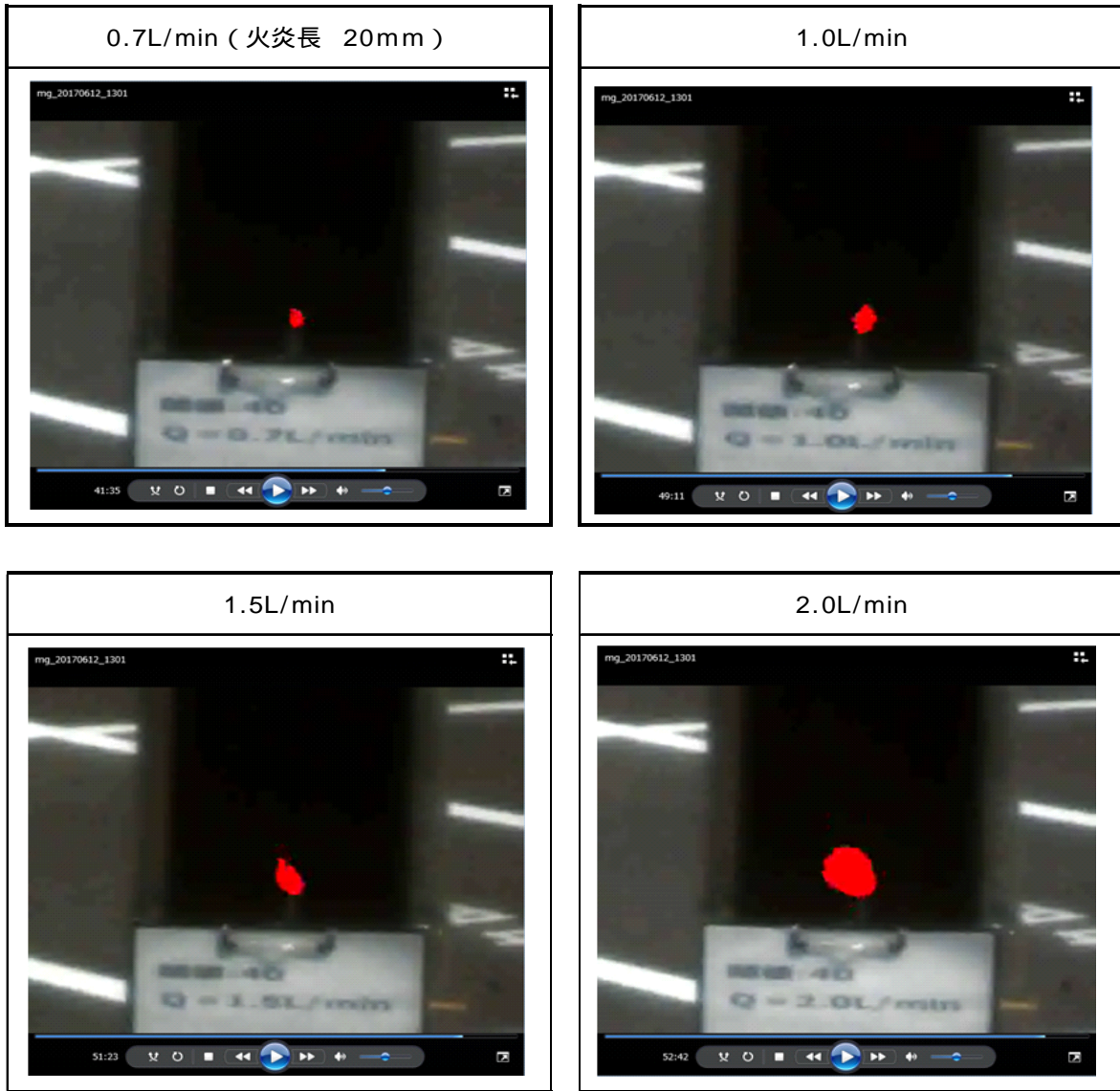


图 21 水素火炎撮像例(火炎表示閾値:40)

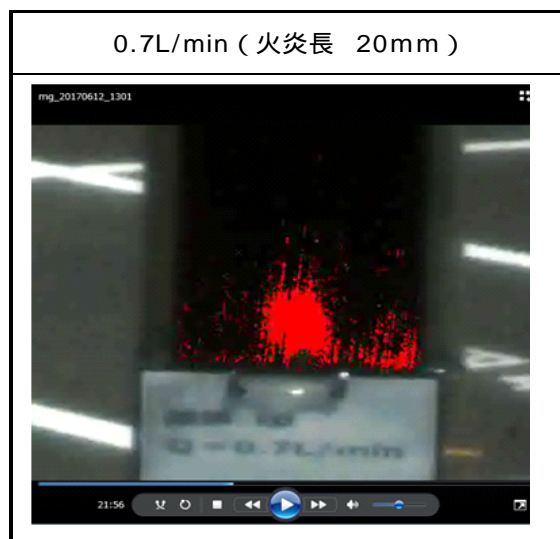


图 22 水素火炎撮像例(火炎表示閾値:10)
成果詳細-(698)

前照灯の影響

水素火炎から発せられる近赤外光を可視画像化する観点から、水素ステーションには、水素火炎を撮像する際の外乱光となり得る可能性の高い多種多様の光源が存在する。中でも特に注意を要するのが、水素ステーションに出入りする自動車の前照灯や、緊急・救急車両などの特殊車両が点滅させる回転灯である。前照灯や回転灯の光源にはHIDランプ(ディスチャージ、キセノン)やLEDランプ、ハロゲンランプが用いられている。

これらの光源の発する紫外光は非常に微弱であることに加えて、前照灯や回転灯の樹脂製カバーには紫外光カット効果があるため、水素火炎から発せられる紫外光の検知に対して、これらの光源は外乱となり得る可能性は極めて小さい。

一方、近赤外光波長域では、HIDランプやハロゲンランプからの発光は非常に強い。このため、対物レンズから観てHIDランプやハロゲンランプが水素火炎の背後に存する位置関係では、HIDランプやハロゲンランプの発する近赤外光の撮像画像に、水素火炎から発せられる近赤外光の撮像画像が埋もれ、水素火炎を特定することが出来ない(図23)。これに対して、LEDランプから発する近赤外光は極めて微弱であるも、可視光域の発光が強いため、対物レンズから観てLEDランプが水素火炎の背後に存する位置関係では、近赤外光画像と可視光画像の差分処理により水素火炎から発せられる微弱な近赤外光の撮像画像が失われ、水素火炎を可視化することが出来ない(図24)。

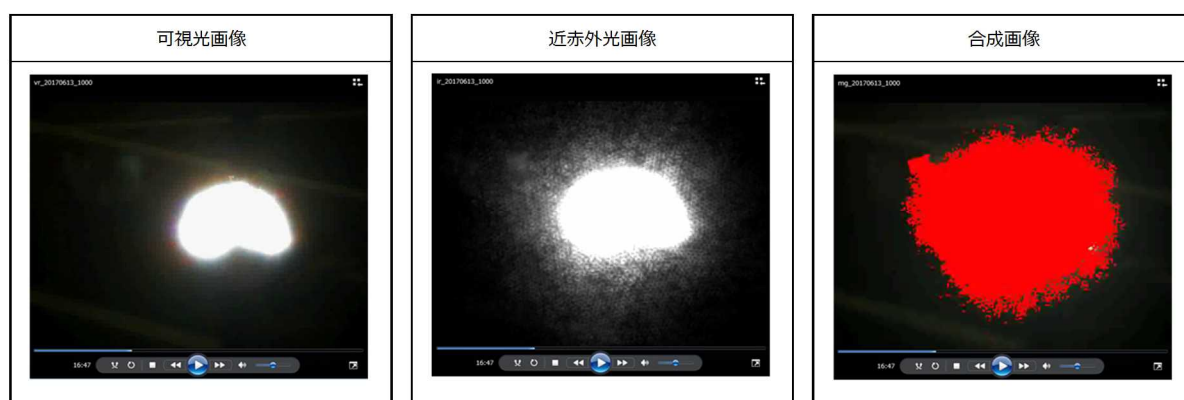


図23 前照灯(HIDランプ)の撮像結果

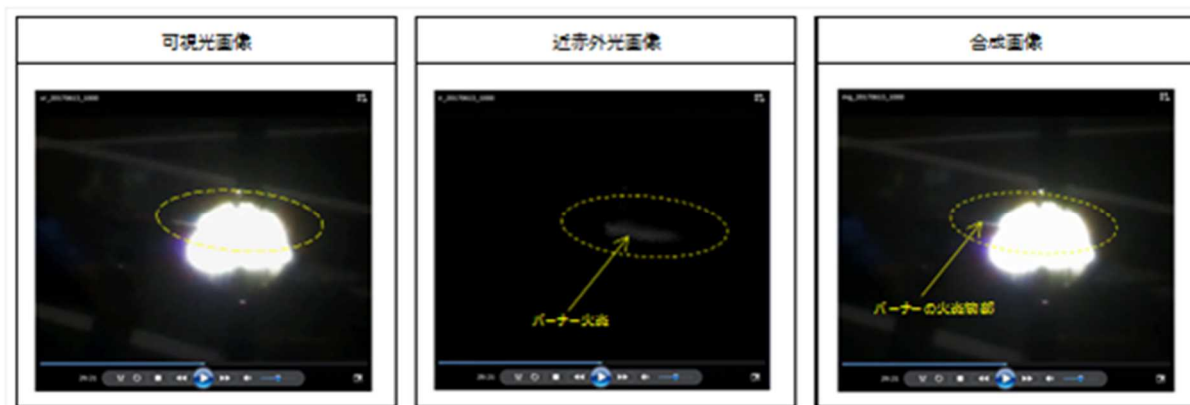


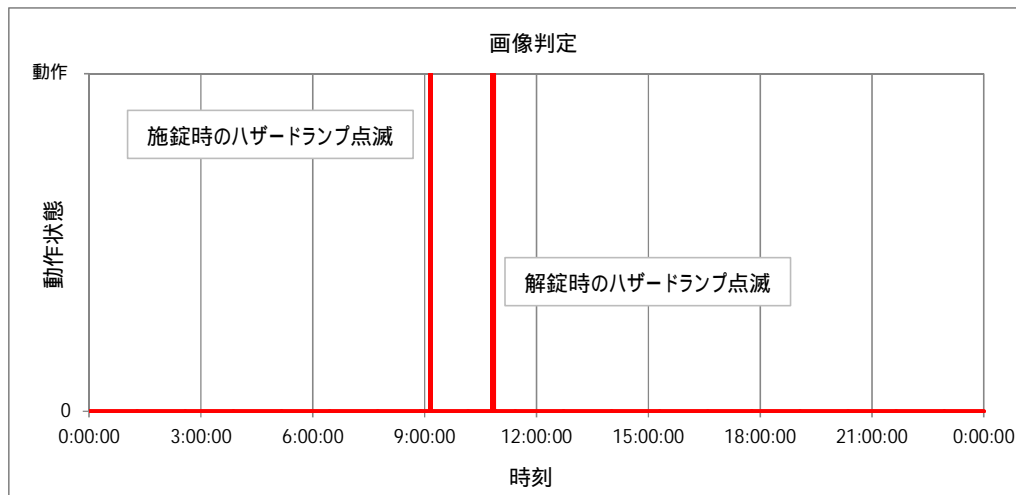
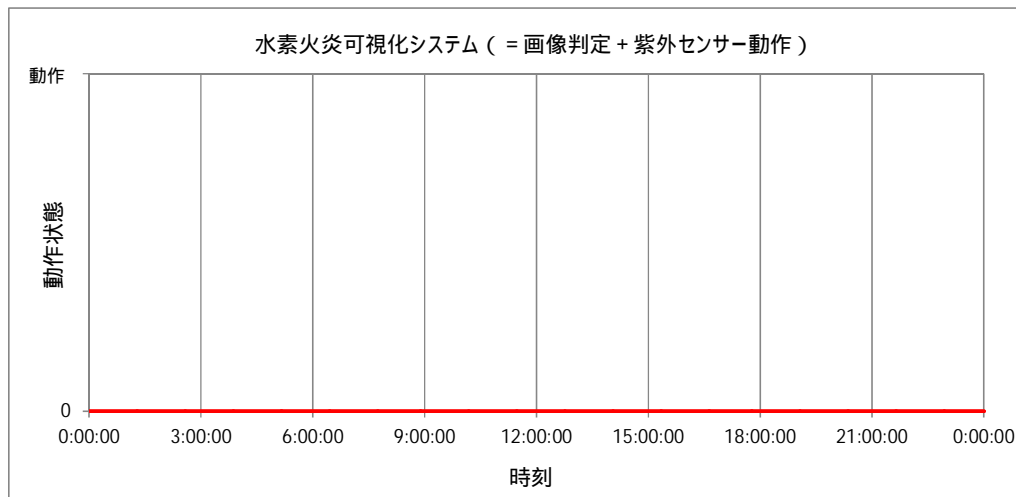
図24 前照灯(LEDランプ)とボタン火炎の撮像結果

信頼性の検証

フィールド試験を行っている期間中、毎日、フィールド試験に供している機器の動作状況(正動作 or 誤動作)をモニタリングし、誤動作発生件数などの具体的な数値を以て、機器の信頼性を検証・評価している。

一例として、図 25 に平成 29 年 7 月 14 日のモニタリングの実績を示す。

先に述べたように、本研究で開発している水素火炎可視化システムは、画像判定と紫外センサーの動作信号の両条件が成立したことを以て火炎検知の判定を下すものである。7 月 14 日の午前中、乗用車の施錠・解錠に伴うハザードランプから発せられる近赤外光に反応して画像判定された。一方、紫外センサーと炎検知器は、型式は異なるも同じメーカーの検知管を搭載していることから、紫外センサーと炎検知器は同じ振る舞いをしている。すなわち、乗用車のハザードランプからは紫外光が発せられないため動作していないが、HID ランプが点・消灯時に瞬間に発する紫外光で動作している。炎検知器は、何に反応したのかは定かではないが、夜中に動作している。水素火炎検知の観点から、火炎以外の光に反応することは誤動作である。これらの実績から、水素火炎可視化システムには誤動作は認められないも、炎検知器には 2 回の誤動作があったことになる。7 月 14 日の実績から、水素火炎判定条件の重畳化が誤動作の回避に有効である。



成果詳細-(700)

図 25 信頼性検証事例()

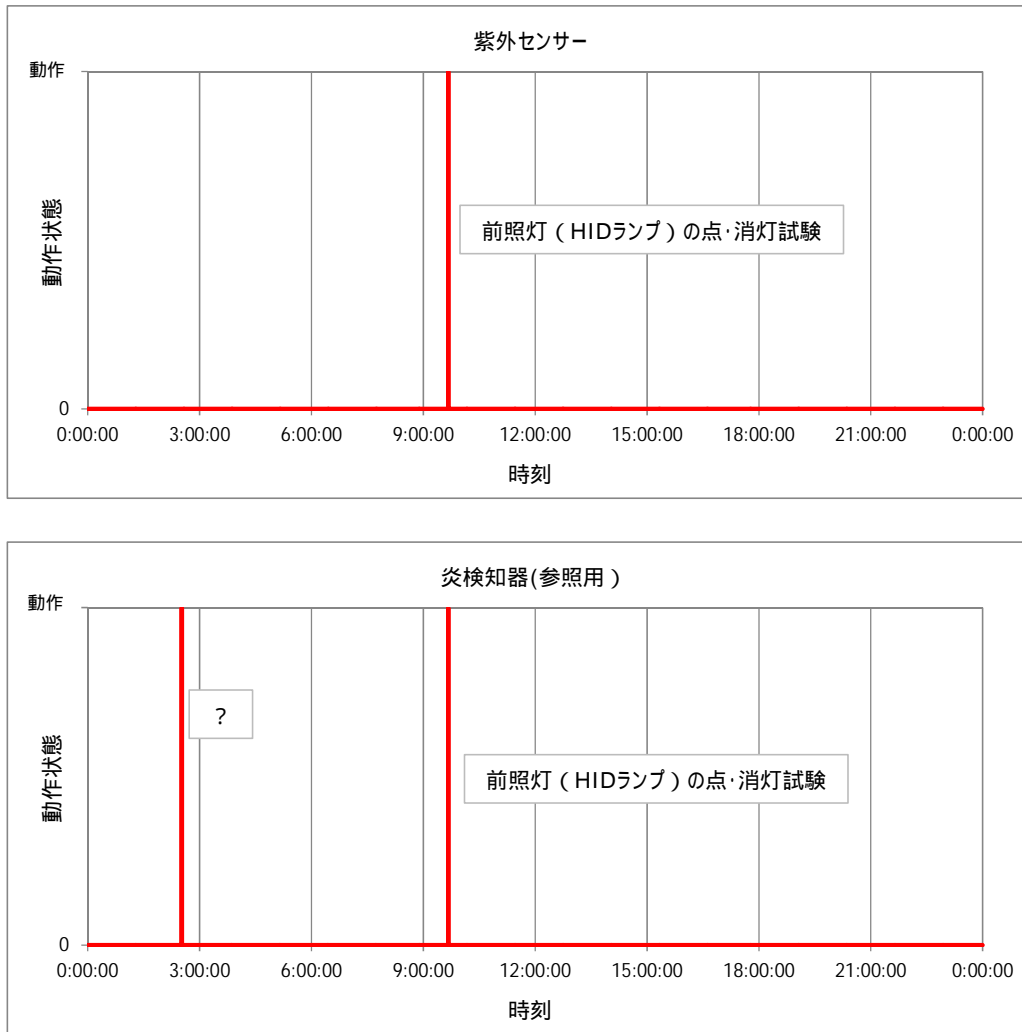


図 25 信頼性検証事例()

3.2 成果の意義

水素は、ガス漏洩した場合は勿論のこと、着火した場合でも殆ど肉眼では視認することができない特異性を有しているため、水素を扱う現場にはガス検知器や火災検知器が設置されている。しかし、当該火災検知器は、火災の有無のみを判定して警報発報する機能を有するものであり、水素火災が発生した場合でも、その着火位置の特定や火災挙動の把握、着火原因の究明などに資することはできない。このため、着火位置の特定は、座敷蓐を身体の前に翳した巡視員の現地パトロール作業などに委ねられている。しかも、太陽光の反射や溶接火花などにも反応するため、警報発報が水素火災に依るものなのか、それとも他の要因、つまり誤検知に依るものなのかを識別することができない。このような状況を鑑みれば、普及に向けての環境が整いつつある水素ステーションの社会受容性を高める観点から、安全・迅速・確実に水素火災を捉え、迅速に安全確保に資する保安技術や保安装置の意義は極めて大きい。

本事業者は、平成 13 年以降、水素関連の要素技術の開発に取り組み、平成 16～17 年には、国の

補助事業として水素火炎可視化に係る基本技術を開発し、専用のカメラを用いて火炎の発する紫外光や近赤外光、遠赤外光を画像として捉え、これらの画像を火炎の背景画像上に合成することにより、通常では視認することのできない水素火炎をモニター上で可視化する幾つかの水素火炎可視化技術を権利化している。水素火炎可視化には、紫外光と遠赤外光、或いは近赤外光と遠赤外光が同時に放射されている領域を火炎として判別する技術と、火炎の発する波長を含む近赤外光画像と火炎の波長を含まない、或いは火炎発光が極微量な波長域の近赤外光画像を取得し、輝度の差分処理によって火炎を明瞭に映像化して、差分処理した火炎領域画像と遠赤外光画像の重なる領域を火炎と判別した上で、紫外光を検知した場合に火炎発生と判断する技術がある。これらの技術は、紫外光や近赤外光、遠赤外光の放射エリアと発光強度、および持続時間をパラメータとする。

本研究成果のうち、近赤外光画像と可視光画像を重ね合わせて可視化する技術は、既に権利化している基本特許を補完する発明と位置付け、特許出願している。当該発明により、太陽光の影響排除による誤検知の低減のみならず、一般的な近赤外光照射器を具備する従来型侵入監視装置との共存を可能とする。つまり、本研究で開発する侵入監視システムは、水素火炎可視化装置と近赤外光照射器付侵入監視装置(市販品)とを併存させた実施態様であることを勧告すれば、今後の事業化の支障となることはない。また、単眼のレンズで集光した入射光を波長分光して近赤外光と可視光とを撮像するため、火炎画像と背景画像のズレを防止することができる。さらに、画像の伝送路としてイメージファイバを用いることにより、水素火炎可視化装置の電気機器部品類を集光部分と切り離して非防爆区域に設置することを可能としている点は、これまでのように装置全体を重厚構造の容器に格納する必要がなく、コスト削減に対しても大きく貢献する成果である。

3.3 開発項目別残課題

事業の進捗に従って、以下の2課題が新たに見出された。

(1) 最適な火炎表示閾値の決定

外乱光の影響を排除して、適切妥当な領域を水素火炎領域として可視化するためには、火炎領域として扱う最適な閾値(“火炎表示閾値”)を見出すことが重要である。つまり、時々刻々と変化する監視環境に迅速に追従できるよう、予め決定した火炎表示閾値が不適切となった場合でも、その状況に即した最適な火炎表示閾値に自動更新する新たなアルゴリズムの開発が求められる。そのためには、様々なケースや場面を想定した条件下でのデータ取得とデータ・ベース化が急務と考えられる。

(2) 前照灯の影響排除

先に述べたように、前照灯と水素火炎の位置関係如何では、前照灯からの発光に水素火炎から発せられる光が埋没し、水素火炎を可視化することができない場合がある。現在までのところ、この現象を回避する抜本的な解決策は見出せていない。光の直進性を考慮すれば、ディスプレイを見下ろすように対物レンズをキャノピーに取り付けることは有効である。

4.まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

4.1 まとめ

(1) ニーズ調査、目標仕様の決定

水素関連事業者など5か所を調査訪問して、市場ニーズと開発目標を明確化した。

(2) 水素可視化装置の小型・高性能化

近赤外カメラと光学フィルターの適用により、水素火炎の可視化が可能であることを実証した。

(3) 水素火炎検知機能を有する監視システムの開発

監視用途には近赤外光画像よりも遠赤外光画像が適していることを確認した。

(4) 防爆対策

画像伝送方式の可能性を実証した。

(5) フィールド試験

ヘッドライトによる影響排除のための効果的な対策が必要であることを明らかにした。

(6) 製品コスト試算

10月から実施の予定。

4.2 課題

本事業者は、事業化に向けた喫緊の課題を“市場環境の醸成”と捉えている。

水素関連事業者を対象とするニーズ調査により、水素火炎可視化に対するニーズが低いことが明らかとなっている。水素ガスの漏洩を高感度に検知することが前提となっていることを勧告しても、訪問調査の結果から、現在の水素関連事業者にとって水素火炎可視化装置は十分条件ではあるも必要条件ではないことが窺い知れる。従って、事業化を成功させるためには、水素関連事業者に水素火炎を可視化することの意義や必要性を意識させるよう、環境を整備し、必要性を掻き立てることが重要と考えられる。このため、本事業者は、“水素火炎を可視化する方法を以て火炎を検知するための措置”と定義付けられることが必要と考えており、水素関連事業者や関係業界団体に対して、根気強く説明や広報活動など継続する。

一方、水素関連事業者にとって水素火炎可視化装置は十分条件ではあるも必要条件ではない理由の一つが、コスト面での問題と認識される。すなわち、国が設置目標を設定したことに呼応して各地に整備されつつある水素ステーションの設計は、新しい技術を採用しつつも、コスト低減という命題に対処するために、一部、従来技術の適用による標準化が進められている。殆どの水素ステーションに設置されている炎検知器は、火炎の発する紫外光を検知して警報発報するものである。安価ではあるが、太陽の直射日光はもとより、その反射光や溶接火花に至るまで検知波長域の全ての光に反応するため、誤検知が多いことがニーズ調査でも明らかとなっている。通常、火炎検知器が動作すれば、警報発報とともに水素供給弁が遮断され、予め設定された機器への散水が開始する。水素ステーション設置者は、工事着工に先立って実施する地域住民への説明の席上、火災事故発生時には散水設備の起動を以て安全性が担保されることを謳っているため、散水設備の起動、即、水素ステーションの異常、と地域住民に解され得るため、火炎検知器の誤検知は是非とも避けなければならぬ

い。本事業者の提供する製品は、水素火災の判定要件を多重化することにより、誤検知を生ずることがなく極めて高い信頼性を実現しており、水素インフラの保安管理面の質的レベルを確実に向上させることが出来る。このため、水素社会に向けた社会ニーズとして絶対的な安全性が求められていることなどの観点から、市場獲得は可能である。

4.3 事業化までのシナリオ

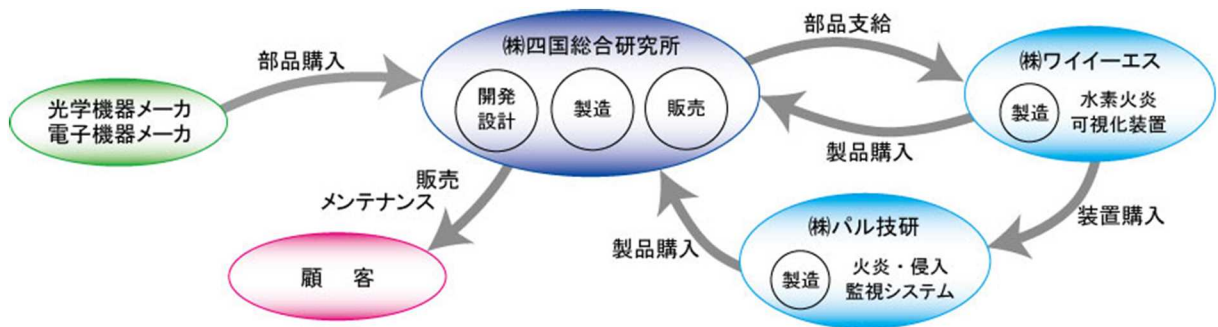
本研究では、期間中に実用化に必要と考えられる基本技術の開発を終えることが出来たと考えている。研究終了後の2~3年間を目途に、実サイトでの実証運用や展示会への出展、研究・論文発表などによる市場認知向上に努めると共に、サンプル出荷により市場の声(反響)を製品改良に反映させる。

本事業者は、これまでに自社開発技術を商品化・事業化した実績を有しており、事業化に必要な社内体制が整備されていることに加えて、エネルギー供給事業者や水素インフラ関連事業者との間にネットワークを有している。当該ネットワークを活かすことにより、比較的容易に実証サイトやサンプル出荷先などを選定し得る可能性を有している。

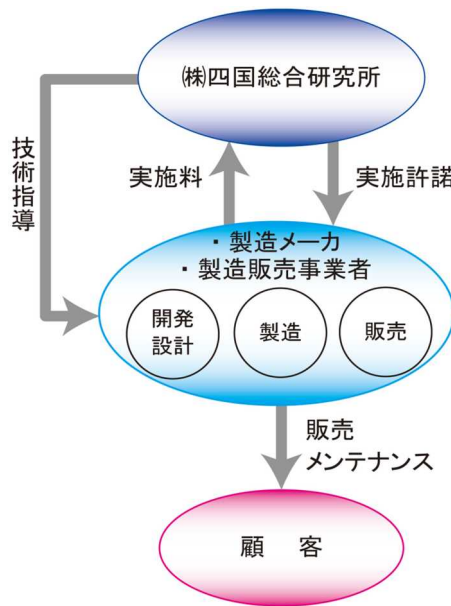
研究開発を生業とする本事業者は、事業の成果を知財という形態で権利化することを基本としており、本研究に於いてもこの基本路線を踏襲している。一方、本事業者は自らが製品製造を行う組織上の機能を有していないため、市場投入初期のサンプル出荷や受注生産では製造委託とするも、本格的な製造・販売の段階に至れば、メーカーなど他事業者を知財の実施を許諾することで事業を拡大させる予定である。このためには、知財を実施する製造・販売パートナーの存在が重要であり、本事業成果と関連のある企業に向けた情報発信や情報提供・情報共有などを積極的に推進する。また、これまで技術指導や技術協力、技術供与を行ってきた企業とは引き続いて一層の交流を深め、本事業者の保有する知財の実施にアドバンテージを与えるなど、低コスト製品の早期市場投入を共通目標として取り組む所存である。現在、製品の委託製造を予定している事業者は、従来仕様の携帯型水素火災可視化装置製造に対して、電子部品の最適仕様の決定や入手ルートの確立、安価な筐体設計など、低コスト化実現のための技術や知見を保有しており、これらの技術・知見が、早期に市場に受け入れて貰える価格での製品提供の一助となる。

(1) 事業化のスキーム

【 受注生産の場合 】



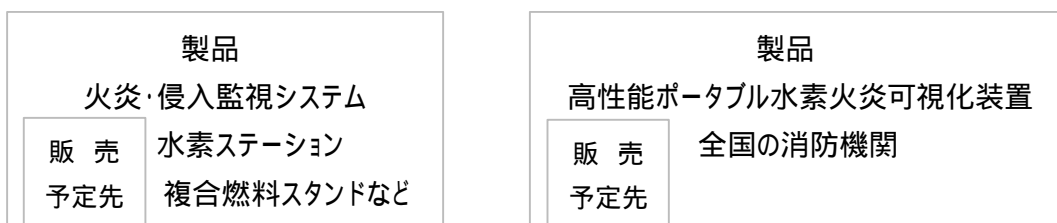
【 本格生産の場合 】



(2) 事業化のスケジュール

	~ H29年度	H30年度	H31年度	H32年度	H33年度	H34年度	H35年度以降
製品設計	→						
商品化開発		→	→				
生産		サンプル出荷			量産体制の検討・・・年間ロット数50台を超えた		
販売			→	→	→	→	→
収益発生					→	→	→
備考	研究終了			事業の継続・中断・移管などを判断			

(3) 国内マーケットと売上目標



		H30年度	H31年度	H32年度	H33年度	H34年度	H35年度
製品	新設水素ステーション(件)*1	85	92	100	110	120	150
	市場規模(百万円)*2	680	736	800	880	960	1,200
	想定シェア(%)	0	2	5	15	30	40
	売上額(百万円)*2	0	14.7	40	132	288	480
製品	消防本部・消防署(箇所)	2,500					
	市場規模(百万円)*3	7,500					
	想定シェア(%)	0	0.5	1.5	2	2.5	5
	売上額(百万円)*3	0	37.5	112.5	150	187.5	375
売上予想(百万円)		0	52.2	152.5	282	475.5	855

* 1 「2012年度版 水素燃料関連市場の将来展望」(富士経済)をベースに推定。

* 2 火炎・侵入監視システム

ディスプレイ監視用：500万円/台、蓄圧器室監視用：300万円/台として算出。

(イメージファイバ費用は含まない)

* 高性能ポータブル水素火炎可視化装置 300万円/台として算出。

5. 研究発表・特許等

研究発表・講演、文献等、その他

該当なし

特許等

NO.	出願日	出願番号	発明の名称	委託会社名
1	平成 27 年 8 月 17 日	特 願 2015-160733	水素火炎監視装置および水素 取扱施設	-
2	平成 29 年 2 月 16 日	特 願 2017-027390	火炎監視方法、火炎監視装置 およびガス取扱施設	-

以上

(111-7)「水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全基盤整備に関する研究開発 / 電気化学式水素ポンプに係る研究開発」

委託先：東レ(株)

成果ガリ(実施期間：平成27年度～平成29年度)

- ・45MPa対応の高圧電気化学式水素圧縮評価設備を導入した。
- ・炭化水素系電解質膜 (PEM) を用いた電気化学式小型水素ポンプセルの設計・開発により、45MPaの高圧水素圧縮 (低圧側0.6MPa) を達成するとともに、機械式圧縮機と同等レベルの効率を確認し、最終目標達成の見通しを得た。

背景/研究内容・目的

燃料電池自動車本格普及の鍵の一つは水素ステーションの拡充であるが、現在導入されている機械式圧縮機は効率やコスト面での課題に加え、騒音やサイズの大きさといった水素ステーション拡充の障壁となる本質的に解決できない課題を抱える。

本プロジェクトでは、上記課題を解決し得る、低騒音、省スペースな電気化学式水素圧縮機 (以下、電気化学式水素ポンプと呼ぶ) に係る技術開発を通じて、水素ステーションの社会的な受容性向上に資することを目的とする。

研究目標

実施項目	最終目標
A. 電気化学式水素ポンプ用電解質膜・触媒設計	炭化水素系膜を用いた小型水素ポンプセル (電極面積5～25cm ²) の初期消費電力 (理論電力 / 電力効率 @ 圧縮圧35MPa) が、機械式圧縮機 (0.5kWh/(Nm ³) と同等) 以上の見通しを得る。(JHFC2 報告書 (H23年3月))
B. 電気化学式水素ポンプの運転条件設計	
C. 電気化学式水素ポンプ用膜電極接合体・セル設計	
D. 現行水素ステーションに適用するための課題抽出と解決策の検討	圧縮圧70MPa以上の中大型化に向けた技術課題と解決策を検討する。
E. 電気化学式水素ポンプの調査研究	フィージビリティスタディーによる技術開発課題の抽出と目標設定を行う。

実施体制及び分担等

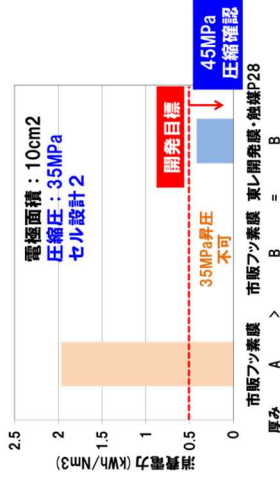
NEDO	東レ株式会社
------	--------

これまでの実施内容 / 研究成果

- ・H28年度に45MPa対応の高圧水素ポンプ評価装置を設計・導入。
- ・東レ炭化水素系膜の高プロトン伝導性、超低水素透過性により、35MPa水素圧縮において、機械式圧縮機と同等以下の消費電力を確認。更なる高圧45MPa圧縮を達成。



PEMポンプ性能評価装置 (H28年度導入)



今後の課題

現行水素ステーションへの適用を見据えた、圧縮圧70MPa以上の中大型機器開発に向けた技術課題と解決策を検討する。

実用化の見通し

本事業の成果を使用する電解質膜、膜電極接合体 (MEA) について、国内外のエネルギー事業者、水素圧縮メーカー等との事業連携を想定している。現時点では共同開発を検討しており、事業化における連携は未定である。事業化の目標時期は、2020～2025年を想定している。

研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
A	炭化水素系膜を用いた小型水素ポンプセルの設計・開発により、高圧35MPa水素圧縮に成功 (低圧側0.6MPa)。35MPa機械式圧縮機と同等レベル以上の効率を確認した。更なる45MPa圧縮を達成した。	
B		
C		
D	中大型化に向け機械式圧縮機メーカー等との連携を検討し、課題を抽出中。	
E	FS結果から、大型水素ST事業に関してはPEMポンプの適用が見込まれ、中小型水素STに関しては小規模に適した周辺機器開発や低コスト化により、事業性が見込まれることがわかった。	

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
0	0	3	0

課題番号： - 7

水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全基盤整備に関する研究開発 / 電気化学式水素ポンプに係る研究開発

東レ株式会社

1. 研究開発概要

1.1 事業目的

(1) 背景

水素は、無尽蔵に存在する水や多様なエネルギー源から製造でき、気体、液体、固体(合金に吸蔵)の形態で輸送・貯蔵が可能である。また、高エネルギー効率、低環境負荷であるため、将来の二次エネルギーの中心的役割を担うことが期待される。

2014年4月11日閣議決定された「エネルギー基本計画」では、水素を日常の生活や産業活動で利活用する社会である“水素社会”の実現に向けた取り組みを加速することが定められた。

これを踏まえ経済産業省では2014年6月23日に「水素・燃料電池戦略ロードマップ～水素社会に向けた取組の加速～」が策定された。この戦略ロードマップにおいて、水素社会の実現に向けて、これまで取り組んできた定置用燃料電池の普及の拡大、燃料電池自動車市場の整備に加え、水素発電の本格導入といった水素需要の拡大や、その需要に対応するための水素サプライチェーンの構築の一体的な取り組みの必要性が示されている。

特に燃料電池は「Cool Earth - エネルギー革新技术計画」の中で2050年に世界のCO₂排出量を半減する上での重要技術と位置づけられ、また、新成長戦略(2009年閣議決定)、エネルギー基本計画(2014年閣議決定)等の種々の政策の中でその重要性・必要性について言及されており、中でも高分子電解質膜を用いた固体高分子形燃料電池(以下、PEFC)は、高出力密度、低温作動等の特徴を活かした燃料電池自動車(FCV)としての普及が期待されている。

(2) 本事業の目的

燃料電池自動車本格普及の鍵の一つは水素ステーションの拡充であるが、現在、水素ステーションに導入されている機械式圧縮機は効率・コストに加え、騒音やサイズの大きさといった水素ステーション拡充の障壁となる本質的に解決できない課題を抱える。

本プロジェクトでは、上記の課題を解決し得る、低騒音、省スペースな電気化学式水素圧縮機(以下、電気化学式水素ポンプまたはPEMポンプと略する)に係る技術開発を通じて、水素ステーションの社会的な受容性向上に資することを目的とする。

2. 研究開発目標

2.1 研究開発項目

電気化学式水素ポンプに係る技術開発を通じて、現行の水素ステーションで用いられている水素圧縮機同等以上の性能を実現するための課題を抽出し、それらの解決策を提示する。

【研究開発項目】電気化学式水素ポンプ用電解質膜・触媒設計

電気化学式水素ポンプに適用する上で、その高圧に耐えうる機械強度・強靱性を持ち、起こりうる劣化を抑制出来る電解質膜を開発する。触媒については低白金量での高効率化・低コスト化を図ると共に、炭化水素系電解質膜上に触媒層を形成する最適な方法を提案する。

【研究開発項目】電気化学式水素ポンプの運転条件設計

電気化学式水素ポンプとして高い性能の得られるバランスのとれた運転条件(温湿度、圧力、電流密度等)を設計する。

【研究開発項目】電気化学式水素ポンプ用膜電極接合体・セル設計

炭化水素系電解質膜のポテンシャルを十分に引き出すことの出来る、最適な膜電極接合体の設計・開発、及びセルの設計・開発を行う。

【研究開発項目】現行水素ステーションに適用するための課題抽出と解決策の検討

PEMポンプを開発するに当たり、現行の水素ステーションで用いられている水素圧縮機同等以上のポンプ性能を実現するための課題を抽出し、それらの解決策を検討する。

【研究開発項目】電気化学式水素ポンプの調査研究

フィージビリティスタディー(FS)を通じて、技術開発課題(装置の用途、規模、コスト等)の抽出と実使用における設備仕様検討を行う。FSの実施にあたっては、エネルギー機関として、東京瓦斯株式会社、システム機関としてパナソニック株式会社、株式会社神鋼環境ソリューションと連携し、検討委員会を設置する。

2.2 目標

前述の研究開発項目 ~ について、具体的な数値を表1にまとめた。

表1 本事業の目標

研究開発項目	H28年度中間目標	H29年度最終目標
気化学式水素ポンプ用 電解質膜・触媒設計	炭化水素系膜を用いた小型水素ポンプセル(電極面積5~25cm ²)の初期電力効率(電流効率×電圧効率@圧縮圧10MPa)が、基準フッ素系膜を用いた基準水素ポンプセルと同等以上の見通しを得る。	炭化水素系膜を用いた小型水素ポンプセル(電極面積5~25cm ²)の初期消費電力(理論電力/電力効率@圧縮圧35MPa)が、機械式圧縮機(0.5 kWh/Nm ³)と同等以上の見通しを得る。
気化学式水素ポンプの 運転条件設計		
気化学式水素ポンプ用 膜電極接合体・セル設計		
行水素ステーションに 適用するための課題抽出 と解決策の検討	フィージビリティスタディーによる技術開発課題の抽出と目標設定を行う。	圧縮圧70MPa以上の中大型化に向けた技術課題と解決策を検討する。
電気化学式水素ポンプ の調査研究	フィージビリティスタディーを通じて、技術開発課題の抽出と目標設定を行う。実施にあたっては、エネルギー機関、システム機関などと連携し、検討委員会**を設置し、取り組む(H27年9月まで)	-

JHFC2 報告書(H23年3月)、97~105ページ一覧表中の日本製鋼所製等を参照

**東京ガス株式会社、パナソニック株式会社、株式会社神鋼環境ソリューション、東レ株式会社

3. 研究開発成果

3.1 研究開発項目 電気化学式水素ポンプ用電解質膜・触媒設計

(1)東レ電解質膜の基本特性

電気化学式水素ポンプ(PEMポンプ)の原理を図1に示す。PEMポンプは、水素の酸化還元反応を基本原理としており、同じく電解質膜を利用した燃料電池(PEFC、水素の酸化、酸素の還元、水の生成・排出)より反応がシンプルで、過電圧が小さく、PEFCとほとんど同じ構成材料(電解質膜、触媒層等)を用いて製造が可能であるといった特徴を有している。

燃料電池 (PEFC)

電気化学式水素ポンプ (PEMポンプ)

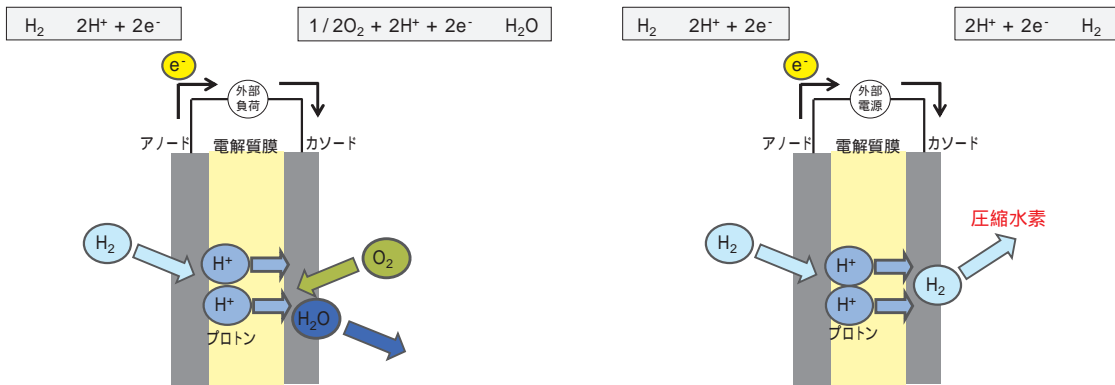


図1. 電気化学式水素ポンプの原理

表2にPEMポンプとデファクトである機械式水素圧縮機の対比を示す。PEMポンプは、従来の機械式水素圧縮機と比較して、高効率で水素を圧縮することが可能だけでなく、機械的な可動部が本質的に無いことから優れた耐久性や静音性も期待できる。また、電気化学的に水素を圧縮する原理から、現行の水素ステーション(以下、水素ST)用の機械式水素圧縮機とは異なり、効率を下げることなくコンパクトな設計が可能となり、圧縮効率が規模に依存しない等の優れたポテンシャルを有している。

表2. 電気化学式水素ポンプと機械式水素圧縮機の比較

	電気化学式水素ポンプ	機械式水素ポンプ(従来型)
エネルギー効率	○高い(等温圧縮)	△低い(断熱圧縮)
騒音	○小さい	×大きい
圧力変動	○無し	△有り(バッファータンク必要)
水素精製機能	○あり	×なし
アイドリング運転	△電流印加が必要	○遮断可能
水分管理	△必要	○不要
スケラビリティ	規模に依存しない	規模に依存する
吐出量調整	電流制御のみ	方式、吸込圧に依存
耐久性	膜・セルの耐久性に依存	可動部の耐久性に依存

電気化学式水素ポンプ(PEMポンプ)は、外部電力により正極で水素の酸化反応($H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$)が起こり、生成したプロトン H^+ が電解質膜中を、電子 e^- が外部回路を通過して、負極に移動し、負極でプロトン H^+ と電子 e^- から水素 H_2 が生成($2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$)し、圧縮される機構から成る。そのため、電解質膜には、高プロトン伝導性や高水素バリア性(低水素透過性)に加え、高い圧力に耐え得る高機械強度が要求される。東レは、これまでに独自の炭化水素系電解質膜(東レ膜)を開発し、フッ素膜同等以上のプロトン伝導性を維持しながら、約10倍の超低水素透過性、約50倍の超低酸素透過性、強靱な機械強度(フッ素膜比 約4倍)の破断強度を実現しており、これらの膜特性を有する東レ膜は、PEMポンプ用途に適していると考えられる。

(2)電力効率試算

東レ膜による PEM ポンプ性能向上ポテンシャルを検証するため、大型水素 ST を想定した、低压:0.6MPa、高压:82MPa、80℃、80%RH、2A/cm²の条件を一例として、電力効率を試算し、Nafion 膜と比較した。

具体的には、表3の膜の基本特性およびネルンスト式($E_n=RT/2F \ln(P_H/P_L)$ 、ここで、R: 気体定数、T: 絶対温度、F: ファラデー定数、P_H: 高压側圧力、P_L: 低压側圧力を表す)を用い、膜中の水素逆透過ロスを電流ロスとして電流効率を、膜のプロトン伝導抵抗を抵抗過電圧として電圧効率を算出し、それらに乗じて電力効率を試算した(図2)。但し、次の ~ を仮定した試算結果である点に注意が必要である。

水素透過係数は、本来、温湿度条件により変化するものであるが、80℃ 90%RH 時の水素透過係数を用いている。

0.6 ~ 82MPaのような高差圧領域における水素透過係数は、低差圧領域の水素透過係数と異なる可能性があるが、今回は、0.5atm の低差圧領域の水素透過係数を用いている。

圧力により電解質膜が薄膜化しない。

圧力により湿潤した電解質膜から水が排出されない。

加湿水素の供給が十分で、電気浸透水による膜の乾燥を無視できる。

給電体とセルとの接触抵抗過電圧や電極反応の活性化過電圧、水素ガスの拡散過電圧等、その他の過電圧成分がない。

表3 電力効率試算の前提条件(膜の基本特性)

膜	差圧0.5atm、80℃90%RH の水素透過係数 (cm ² /s/cmHg)	80℃80%RH のプロトン伝導度 (S/cm)
Nafion	5.5×10 ⁻⁹	0.11
東レ膜	5.7×10 ⁻¹⁰	0.22

$$\text{電力効率 (\%)} = \frac{\text{電流効率 (\%)} \times \text{電圧効率 (\%)}}{100}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{電流効率 (\%)} = \frac{2 - I_{\text{loss}}}{2} \times 100 \\ \text{電圧効率 (\%)} = \frac{E_n}{E_n + 2 \times R_m} \times 100 \end{array} \right.$$

E_n : ネルンスト電圧 = $RT/2F \times \ln(P_H/P_L)$
 R_m : 膜抵抗
 I_{loss} : 水素透過による電流ロス

図2 電力効率の試算方法

試算結果を図3に示す。東レ膜は、水素透過性が低いこととプロトン伝導性が高いことから、東レ20um膜において、Nafion 50um膜比で、約1/4という低水素透過性を維持しながら、膜抵抗を低減できた。この結果、圧縮電力効率、Nafion 50um膜対比で2倍以上に向上できる可能性があることが明らかとなった。

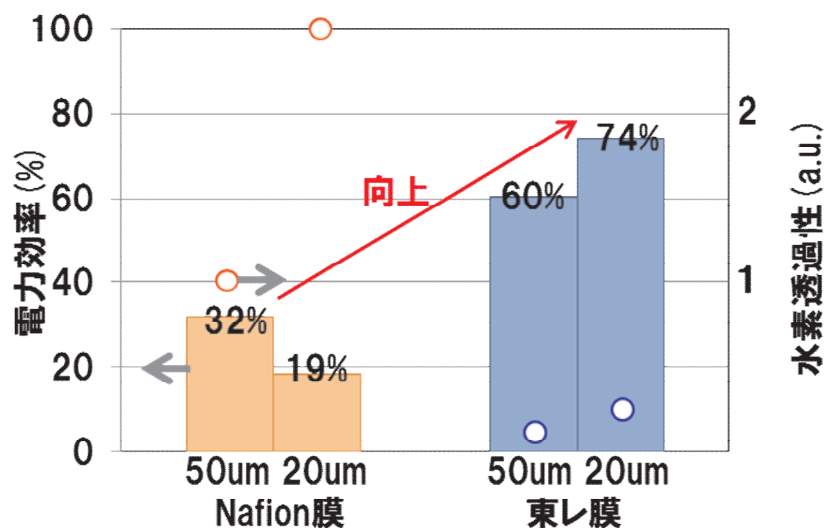


図3 電力効率の試算結果

(3) ポンプ消費電力量の試算

東レ膜を用いたPEMポンプ性能とデファクト機械式水素圧縮機性能の比較および電気化学式水素ポンプの事業性試算を目的として、

ケース : 小型水素スタンド用電気化学式水素ポンプ

ケース : 中型水素ST用電気化学式水素ポンプ

ケース : 大型水素ST用電気化学式水素ポンプ

の3つのケースにおいて、ポンプ消費電力量および必要な総電極面積を試算した。具体的な試算方法を以下(ア)~(オ)に、試算条件を表4に示す。

< 試算方法 >

(ア) 水素供給能力(Nm³/h)を総電流(A)に変換

(イ) 下記式から、水素供給能力を達成するために必要な電力(kW)を算出。

$$\text{電力(kW)} = \text{ネルンスト電圧(V)} \times \text{総電流(A)} / \text{電力効率(\%)} \times 100 / 1000$$

(ウ) (イ)の電力を水素供給能力で除して、ポンプ消費電力量(kWh/Nm³)を算出。

(エ) 総電流を電流効率で除して、水素供給能力を達成するために必要な電流(A)を算出。

(オ) (エ)の該電流を電流密度(A/cm²)で除して、10000を乗じて、総電極面積(m²)を算出。

表4 試算条件

ケース		圧縮圧力 (MPa)	水素供給能力 (Nm ³ /h)
①	大型	0.6→82 (PSA使用前提)	300
②	中型	0.6→45 (PSA使用前提)	30
③	小型	0.1→45	1

試算結果として、電流密度とポンプ消費電力量、総電極面積の関係を図4に示す。ケース①～③いずれも、高電流密度ほど、必要な総電極面積を低減でき、材料コストを削減できる。一方、膜の抵抗過電圧(電流×抵抗)増加に伴い、ポンプ消費電力量は増大し、運転コストアップに繋がる。しかしながら、東レ膜を50um→20umに薄膜化、膜の抵抗過電圧を低減することで、消費電力量の大幅な上昇なく、トータルコストを低減できる可能性が示された。この試算結果を踏まえ、ポンプ消費電力量、コストの点から、東レ膜20umの使用と、ケース①、②の運転電流密度2A/cm²、ケース③の運転電流密度1A/cm²を想定した。

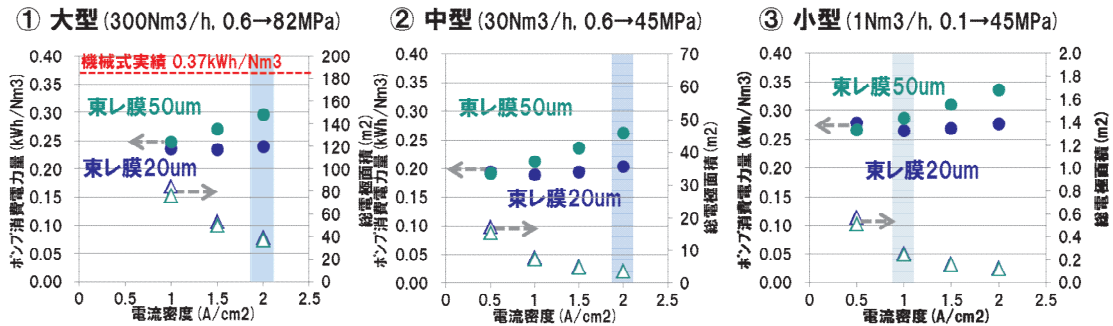


図4 ポンプ消費電力量試算結果(@80%RH)

ケース①および②について、前記想定条件におけるPEMポンプの消費電力量と機械式水素圧縮機の実績消費電力量およびJHFC2報告書記載の将来消費電力量とを比較した(図5)。ケース①、②ともに、機械式水素圧縮機の実績および将来消費電力量をさらに削減できる可能性があり、特にケース①の場合、機械式実績比約4割削減できる可能性があることが分かった。

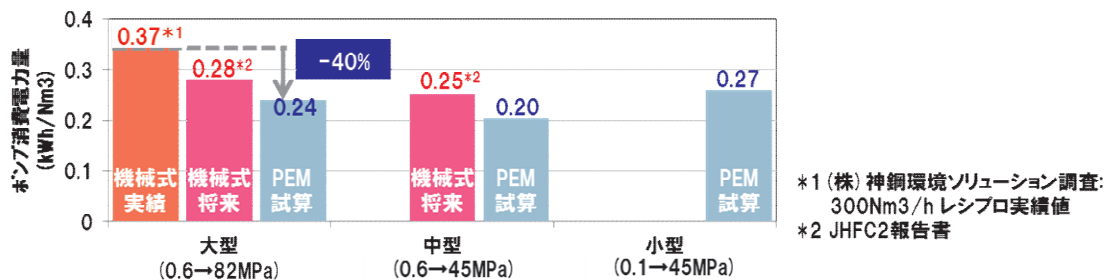


図5 ポンプ消費電力量試算結果(@80%RH)

(4) 低圧小型セル試験による消費電力検証

燃料電池評価用セルを用いた純水素系低圧小型セル試験により、 項で試算したポンプ消費電力(ケース 、)を検証した。電解質膜両面に触媒層を形成させ、膜電極接合体(MEA)を作製し、セルに組み込んで評価した。電解質膜は、Nafion 膜(NRE212) 50um に対し、同じ膜厚の東レ膜と、薄膜化の効果検証を目的に、東レ膜30um を用いた。詳細条件は以下のとおり。

- ・ガス:純 H₂ 加湿(100%RH)
- ・温度:80
- ・U(利用率):70%
- ・圧縮比:1、2、3、3.5
- ・触媒:アノード Pt 0.3 mg/cm², カソード Pt 0.7 mg/cm²
- ・電極面積:23cm²
- ・電流密度:1 A/cm², 2 A/cm²
- ・電解質膜:Nafion 膜(NRE212) 50um, 東レ膜 50um, 30um

試験結果を図6および7に示す。

ネルンスト式を用いて各圧縮比におけるネルンストロス(緑色)を、膜なしMEAのIn-situインピーダンス測定により膜以外の抵抗過電圧(水色)を、膜ありMEAの同インピーダンス測定により膜の抵抗過電圧(紫色)を求めた。それら合計と実測電圧(黒丸)が概ね一致することを確認した。

電流密度 1A/cm², 2A/cm²のいずれの場合も、電解質膜によらず、In-situ インピーダンス測定から求められる膜抵抗過電圧と、試算で用いたプロトン伝導性基礎データから見積もられる膜抵抗過電圧とが概ね整合した。また、基礎データとして、Nafion 比2倍の高プロトン伝導性を有する東レ膜の抵抗過電圧は、同膜厚の Nafion 比で概ね 1 / 2 にあり、妥当な結果を示した。また、東レ膜を 50um 30um に薄膜化することで、膜抵抗過電圧をさらに低減できることを確認した。

@1A/cm²

(想定: ケース③ 0.1→45MPa)

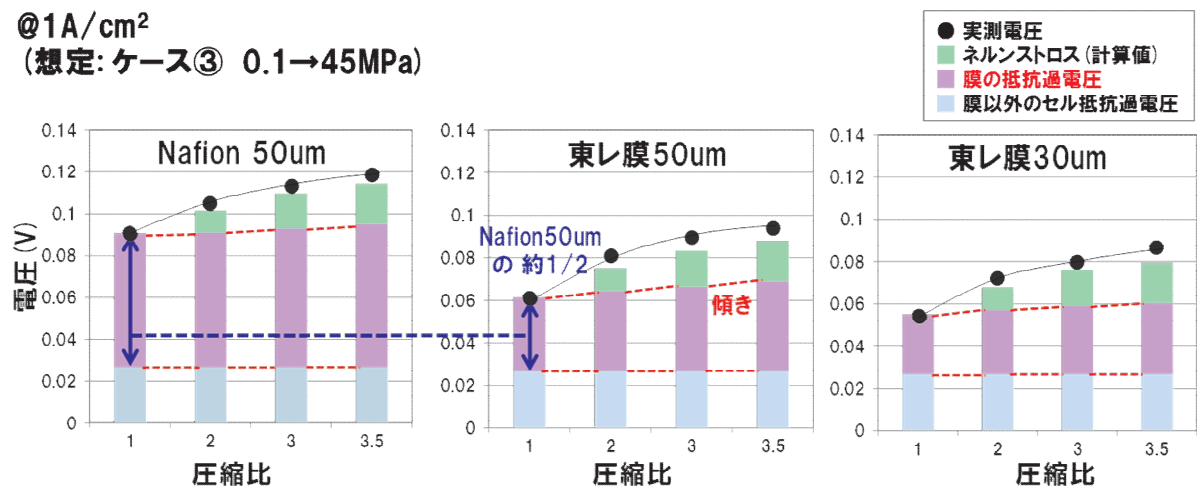


図6 低圧小型セル試験結果@1A/cm² (想定: ケース 0.1 45MPa)

@2A/cm²
(想定: ケース① 0.6→82MPa)

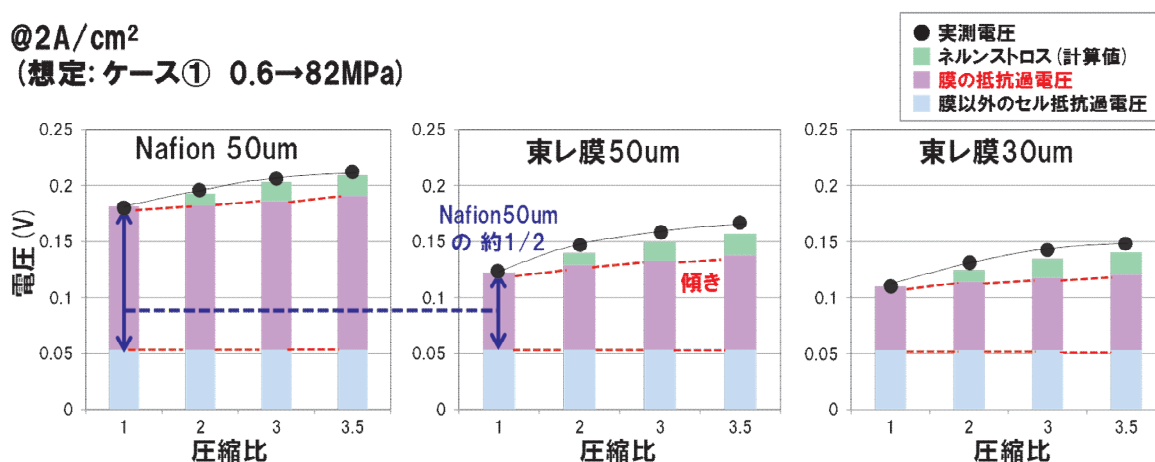


図7 低圧小型セル試験結果@2A/cm²(想定: ケース 0.6 82MPa)

低圧小型セル試験では、圧縮比3.5が限界であったため、得られた結果を近似して、ケースおよびのポンプ消費電力量を見積った。具体的には、膜の抵抗過電圧+ネルンスト電圧と圧縮比の相関を対数近似し、圧縮比137(ケース :0.6 82MPa)、450(ケース :0.1 45MPa)まで外挿して見積もられる電圧を用いて、ポンプ消費電力量を算出した(表5および6)。

3.1.(3)項で算出した試算値に比べ、消費電力量が大きくなる要因としては、下記が考えられる。

- (ア) 膜以外の抵抗成分による過電圧増加
- (イ) 圧縮比増大に伴う膜抵抗過電圧の増加(傾き)
- (ウ) 近似式精度

水素圧縮に適した高圧セル設計ができれば、膜以外の抵抗と傾きを低減でき、ポンプ消費電力を試算値に近づけることができると考えている。

表5 0.1 45MPa 圧縮時のポンプ消費電力(電圧と圧縮比の対数近似式より算出)

	試算消費電力 (kWh/Nm ³)	膜の抵抗過電圧+ネルンスト電圧ベース (kWh/Nm ³)
Nafion 50um	0.49	0.52
東レ膜 50um	0.29	0.45
東レ膜 30um	0.27	0.42

表6 0.6 82MPa 圧縮時のポンプ消費電力(電圧と圧縮比の対数近似式より算出)

	試算消費電力 (kWh/Nm ³)	膜の抵抗過電圧+ネルンスト電圧ベース (kWh/Nm ³)
Nafion 50um	0.56	0.56
東レ膜 50um	0.30	0.42
東レ膜 30um	0.26	0.40

(5)電気化学式水素ポンプ用電解質膜の調査研究まとめ

異なる規模の電気化学式水素ポンプについて、東レ膜 20um を適用した場合の消費電力の試算結果を表7のケース ~ にまとめた。

表7 ケース ~ の試算結果

ケース		圧縮圧力 (MPa)	水素供給能力 (Nm ³ /h)	電流密度 (A/cm ²)	消費電力 (kWh/Nm ³)	総電極面積 (m ²)
①	大型	0.6→82 (PSA使用前提)	300	2	0.24	38.8
②	中型	0.6→45 (PSA使用前提)	30	2	0.20	3.72
③	小型	0.1→45	1	1	0.27	0.260

電気化学式水素ポンプ用電解質膜の調査研究のまとめを以下(ア)~(工)に示す。

- (ア) 東レ膜は、電気化学式水素ポンプ用途に適するプロトン伝導性・低水素透過性・高強度特性を有する。
- (イ) 東レ膜 20um により、低水素透過性を維持しながら、膜抵抗を低減でき、水素圧縮の電力効率を Nafion 50um 比 2 倍以上に向上できる可能性がある。
- (ウ) 東レ膜 20um 用いた場合の各水素ポンプの試算消費電力量は、小型水素スタンド用:0.27kWh/Nm³、中型水素 ST 用:0.20kWh/Nm³、大型水素 ST 用:0.24kWh/Nm³となり、特に大型水素 ST 用において、現行の機械式比約 4 割削減できる可能性がある。
- (工) 水素圧縮に適した高圧セル設計ができれば、膜以外の抵抗と傾きを低減でき、ポンプ消費電力を試算値に近づけることができると考えられる。

3.2 研究開発項目 電気化学式水素ポンプの運転条件設計

H28年度に運転条件設計を検討するために、電気化学式水素ポンプ評価設備を導入した(図8)。主機能として水素供給制御 温度制御 電流制御 圧力制御(35MPa 対応)、試験結果収集機能、安全装置等を備え、運転条件の検討が可能となった。



図8 PEMポンプ性能評価装置

3.3 研究開発項目 電気化学式水素ポンプ用膜電極接合体・セル設計

(1)小型PEMポンプセル

H28年度に、35MPa以上の耐圧性を有する小型PEMポンプ単セル(MEAの入れ替え可能)を設計した(図10)。本セルの応力解析を実施した結果、100MPaの耐圧性を確認した。

設計した小型PEMポンプセルを試作し、水素エネルギー製品研究試験センター(HyTREc)で耐圧破壊試験(耐圧性評価)を実施し、70MPa以上(110MPaでガスケット部破壊)の耐圧性を確認した(図9)。

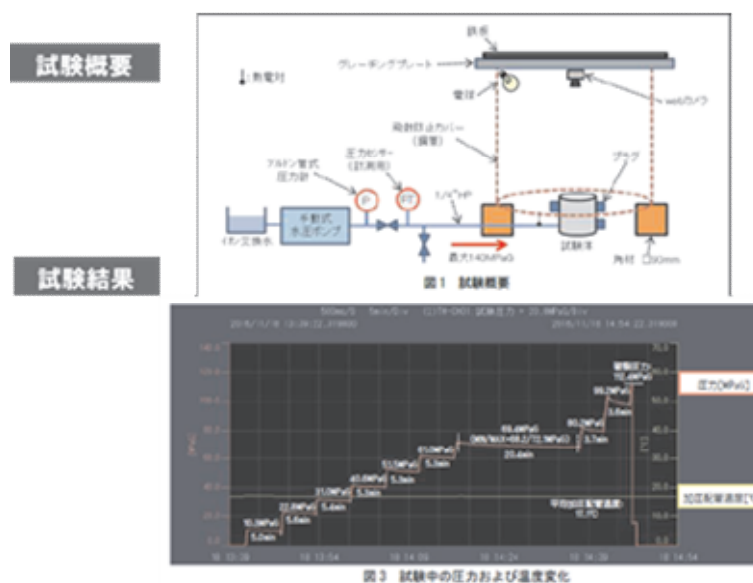
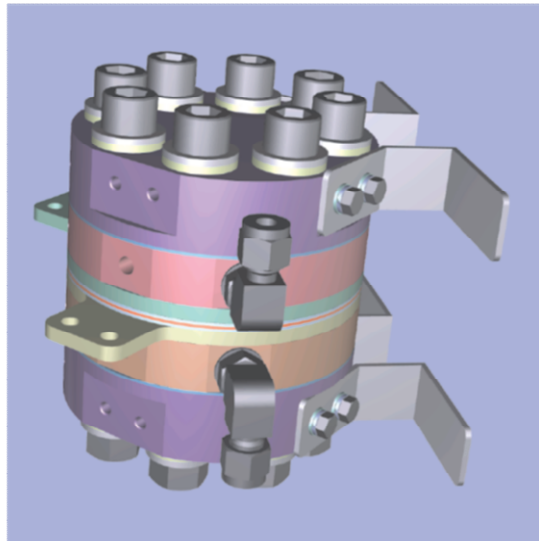


図9 耐圧破壊試験結果



外観：10cm φ × 10cm

高圧側内容積： $2.9 \times 10^{-6} \text{m}^3$

破壊テストで110MPa耐圧性確認

図10 小型PEMポンプセル

(2) 東レ開発膜を搭載した水素ポンプ性能

図8に示す評価装置を使用し、図10の小型PEMポンプセルに東レ開発膜を用いたMEAを搭載して水素圧縮評価を実施した。

その結果、図11に示すとおり、東レ炭化水素系膜の高プロトン伝導性、超低水素透過性により、高圧35MPa水素圧縮において、機械式圧縮機と同等以下の消費電力を達成し、最終目標を達成した。また、更なる高圧45MPa圧縮を確認。装置安全対策のリリース弁が作動し45MPaで装置限界となるため評価装置を80MPa対応に改造し評価を継続する。

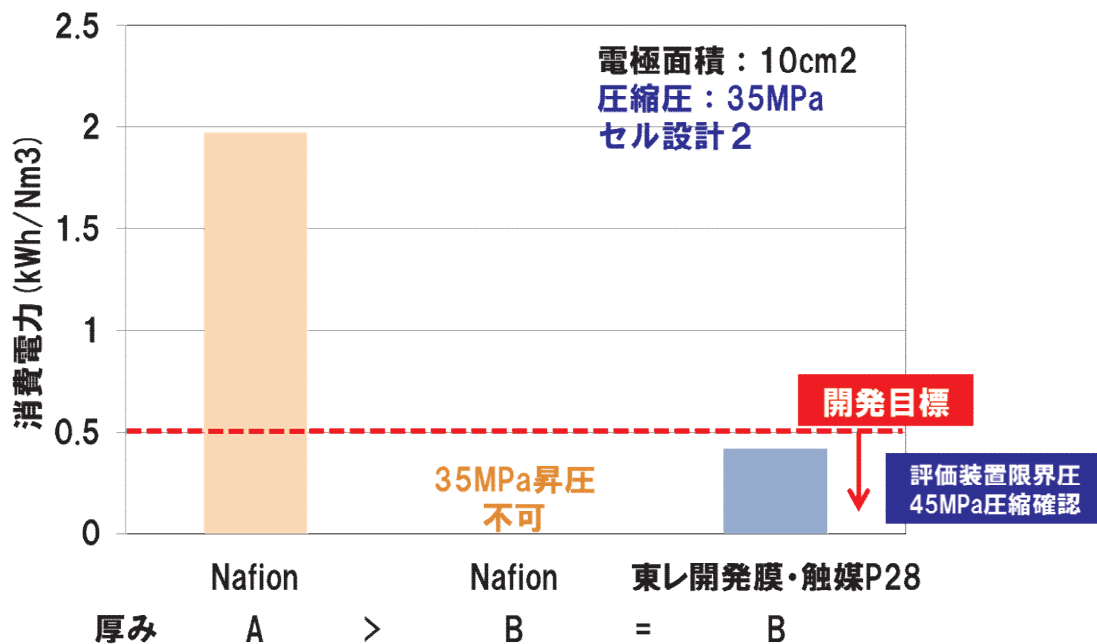


図11 東レ開発膜を搭載した水素ポンプ性能

3.4 現行水素ステーションに適用するための課題抽出と解決策の検討

現行水素ステーションへの適用を見据えた、圧縮圧70MPa以上の中大型化に向けた技術課題と解決策を検討中で有り、次項3.5のFS結果を踏まえ、圧縮機メーカーやエネルギー事業者等に協力を得ながら課題抽出と解決策の検討を実施中。年度内には目処が得られる見込み。

3.5 電気化学式水素ポンプの調査研究

(1)実施体制

実施体制を図12に記載した。HySUT 受託事業の再委託先として東レが参画し、電気化学式水素圧縮機に関する調査研究を実施した。

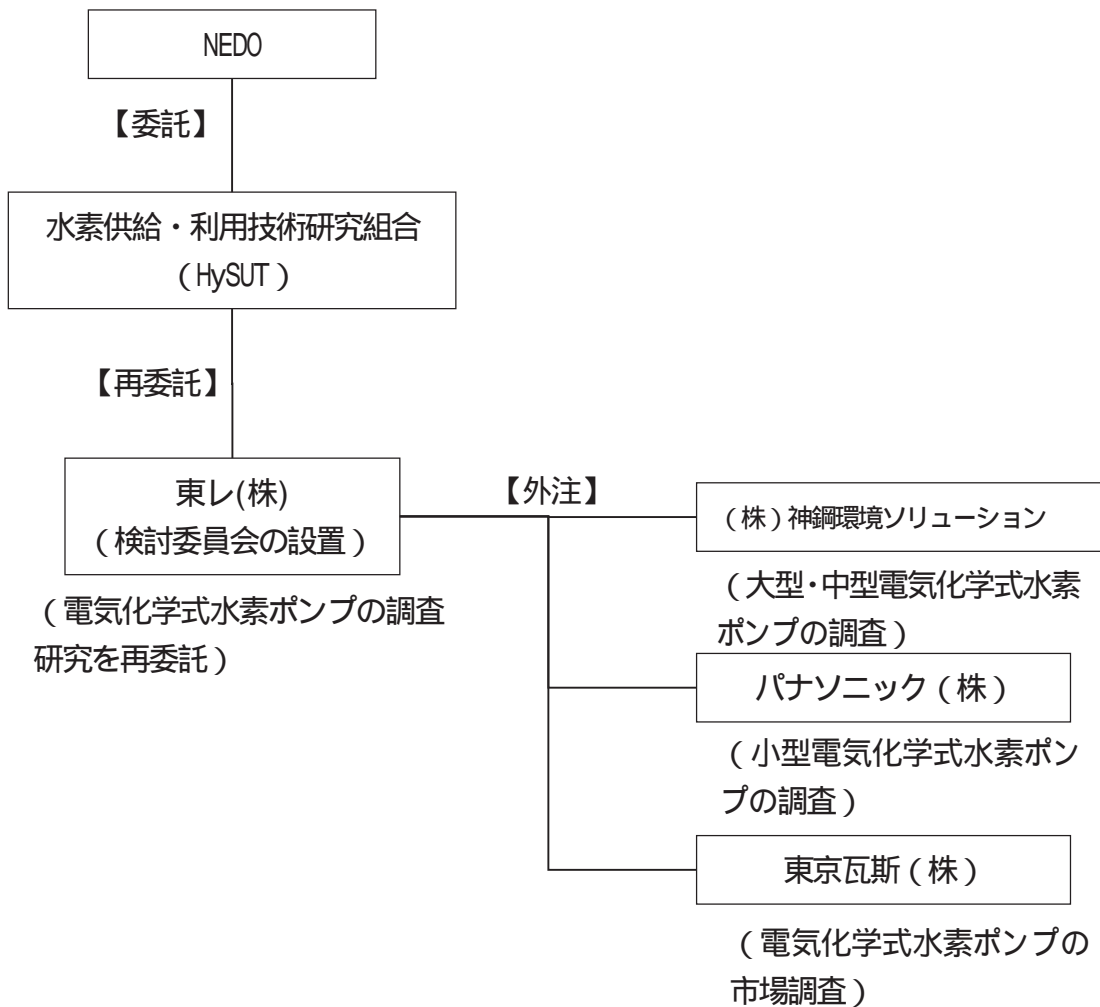


図12 調査研究の実施体制

(2)実施内容

H27年9月を目処にフィージビリティスタディー(FS)を通じて、技術開発課題の抽出と実使用における設備仕様検討を行なった。実施にあたっては、以下に示すエネルギー機関、システム機関などに協力して頂き、検討委員会を設置して取り組んだ。

電気化学式水素ポンプ用電解質膜の調査研究(担当:東レ株式会社)

FSを通じて、材料の技術開発課題(性能、耐久性、コスト等)の抽出と実使用における材料仕様検討を行った。

低圧小型セルによる基礎実験を行い、調査精度の向上に努めた。

本調査結果の詳細については、3.1項を参照。

電気化学式水素ポンプ(大型・中型)の調査研究(協力:株式会社神鋼環境ソリューション)

FSを通じて、大型・中型用途の技術開発課題(装置の用途、規模、コスト等)の抽出と実使用における設備仕様検討を行った。

電気化学式水素ポンプ(小型)の調査研究(協力:パナソニック株式会社)

FSを通じて、小型用途の技術開発課題(装置の用途、規模、コスト等)の抽出と実使用における設備仕様検討を行なった。

電気化学式水素ポンプの市場調査(協力:東京瓦斯株式会社)

電気化学式水素ポンプのメリットを活かすことができる適用先を検討するとともに、それぞれの適用先におけるモデルとなる高圧水素製造システムを想定し、イニシャルコスト、ランニングコストの検討とともに課題を抽出し、各適用先となる市場での導入台数を予測することで、電気化学式水素ポンプの事業性について検討した。

(3)まとめ

電気化学式水素ポンプの調査研究のまとめを以下に示す。検討委員会として調査研究から本格実施に移行し、高圧セル・システム設計の基礎研究を開始すべきであるとの結論に至った。

FCV ユーザーのニーズ変化・事業者の戦略多様化に対応し、水素ST数を増加させるため、実質的に日本全土をカバーできるように、300 Nm³/h 級を「大型水素 ST」、その 1/10 規模の 30 Nm³/h 級を「中型水素 ST」、更に小さい 1 Nm³/h 級を「小型水素スタンド」として検討した。

東レ膜を用いた電気化学式水素ポンプの消費電力量は、現行大型機械式比約 4 割削減できる可能性がある。水素圧縮に適した高圧セル設計ができれば、ポンプ消費電力を試算値に近づけることができると考えている。

大型水素 ST 用水素ポンプの 10 年投資回収可能な水素販売価格は、100 円/Nm³ 程度で、2015 年 9 月現在の水素販売価格と同程度であるが、サイズ、静音性等の点で、機械式にはない付加価値を提供できる可能性がある。

大型・中型水素 ST 用は、ともに、低ポンプ消費電力により、光熱費は機械式比安価となるが、相対的に固定費が高いため、水素販売価格に対する光熱費のインパクトは小さい。事業性を高めるためには、固定費の低減が必要。水素圧縮用途だけでなく、FCV や水電解など他用途との部材共通化により、更なる固定費低減が期待できる。

小型水素スタンド用では、水素販売価格の半分以上をディスペンサー固定費が占める。事業性を高めるためには、小型水素スタンドに適した低コストディスペンサーの開発が必要不可欠である。

固定費の更なる低減のためには、圧縮機の低コスト化・高性能化を目指した、高圧セルや、ディスペンサーな

ど PEM ポンプ以外の部材・機器を含むトータルシステム設計が必要。調査研究から本格実施に移行し、高圧セル・システム設計の基礎研究を開始すべきである。

3.6 達成度

研究成果と達成度を表8にまとめた。

東レ炭化水素系膜を用いた小型水素ポンプセル(電極面積 10cm²)の設計・開発により、評価装置限界圧力である高圧 45MPa 水素圧縮を実現、機械式圧縮機と同等レベル以下の消費電力を確認し、最終目標を前倒して達成した(達成度)。

表8 研究成果と達成度

研究開発項目	H29年度最終目標	開発成果	達成度
電気化学式水素ポンプ用電解質膜・触媒設計	炭化水素系膜を用いた小型水素ポンプセル(電極面積5~25cm ²)の初期消費電力(理論電力/電力効率@圧縮圧35MPa)が、機械式圧縮機(0.5 kWh/Nm ³)と同等以上の見通しを得る。	炭化水素系膜を用いた小型水素ポンプセルの設計・開発により、高圧35MPa水素圧縮に成功(低圧側0.6MPa)。35MPa機械式圧縮機と同等レベル以上の効率を確認した。更なる45MPa圧縮を達成した。	
電気化学式水素ポンプの運転条件設計			
電気化学式水素ポンプ用膜電極接合体・セル設計			
現行水素ステーションに適用するための課題抽出と解決策の検討	圧縮圧 70MPa 以上の中大型化に向けた技術課題と解決策を検討する。	中大型化に向け機械式圧縮機メーカー等との連携を検討し、課題を抽出。	
電気化学式水素ポンプの調査研究	フィージビリティスタディーを通じて、技術開発課題の抽出と目標設定を行う。実施にあたっては、エネルギー機関、システム機関などと連携し、検討委員会を設置し、取り組む(H27年9月迄)	FS結果から、大型水素STに関してはPEMポンプの適用が見込まれ、中小型水素STに関しては小規模に適した周辺機器の大幅なコストダウンが実現すれば、事業性が見込まれることがわかった。	

JHFC2 報告書(H23年3月)、97~105ページ一覧表中の日本製鋼所製等を参照

**東京ガス株式会社、パナソニック株式会社、株式会社神鋼環境ソリューション、東レ株式会社

達成度: :大幅達成(特筆すべき成果有り) :達成

3.7 成果の意義

東レ開発膜を搭載することで45MPa以上の電気化学式水素ポンプの可能性を実証できた。水素社会に向けた新たな要素技術研究の継続と、国内外のエネルギー事業者、水素圧縮機メーカー等との連携により、大型水素ポンプの開発実証に向けた取り組みを開始する価値があることを示せた意義は大きい。

図13に示すとおり水素ステーションの整備費用の1/3程度を占める圧縮機本体および周辺部材の費用を低減できれば、本技術開発の成果を通じて、水素ステーションの社会的な受容性向上に資することができる。

水素ステーションの整備費の内訳

左図の出典：資源エネルギー庁作成

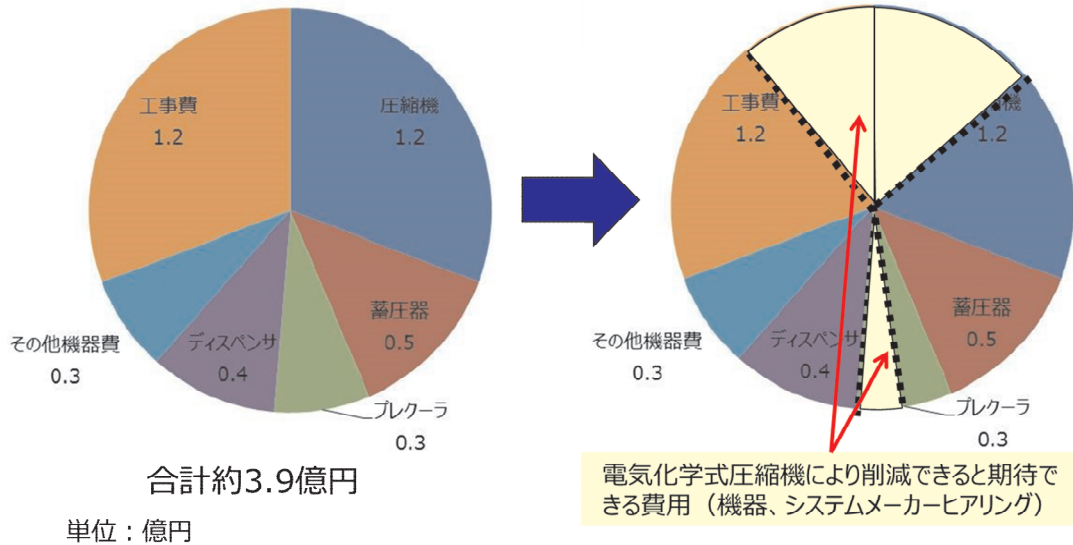


図13 水素ステーションの整備費用

3.8 開発項目別残課題

開発項目別残課題を表9に示す。

表9 開発項目別と残価大

研究開発項目	開発成果	残課題
電気化学式水素ポンプ用電解質膜・触媒設計	炭化水素系膜を用いた小型水素ポンプセルの設計・開発により、高圧35MPa水素圧縮に成功(低圧側0.6MPa)。35MPa機械式圧縮機と同等レベル以上の効率を確認した。更なる45MPa圧縮を達成した。	さらなる要素技術研究による圧縮効率の向上と、実機を想定した耐久性プロトコルによる劣化挙動の把握と対策の立案
電気化学式水素ポンプの運転条件設計		
し 電気化学式水素ポンプ用膜電極接合体・セル設計		
現行水素ステーションに適用するための課題抽出と解決策の検討	中大型化に向け機械式圧縮機メーカー等との連携を検討し、課題を抽出。	スタック設計、システム設計による実用技術開発・実証
電気化学式水素ポンプの調査研究	FS結果から、大型水素STに関してはPEMポンプの適用が見込まれ、中小型水素STに関しては小規模に適した周辺機器の大幅なコストダウンが実現すれば、事業性が見込まれることがわかった。	最近の情勢による調査結果のアップデート、精査

4.まとめ及び課題 事業化までのシナリオ

4.1 H28 年度開発成果まとめ

東レ炭化水素系膜を用いた小型水素ポンプセル(電極面積 10cm²)の設計・開発により、評価装置限界圧力である高圧 45MPa 水素圧縮を実現、機械式圧縮機と同等レベル以下の消費電力を確認し、最終目標を前倒しで達成した(達成度)。

4.2 課題 今後の取り組み

現行水素ステーションへの適用を見据えた、圧縮圧70MPa以上の中大型化に向けた技術課題と解決策を検討する必要がある。

電気化学式水素ポンプは、高効率・小型・静音・水素精製機能など、機械式圧縮機にはない優位な特徴を有するが、圧縮システムとしての使用方法に適合した、水分管理方法および耐久性の向上検討および実証試験を行うことが課題であり、今後の取り組みとして、水素圧縮メーカー、エネルギー事業者との連携による要素技術の深化および実用化技術の開発・実証が必要である。

4.3 事業化までのシナリオ

(1)実用化・事業化に向けた計画等

本事業の成果を使用する電解質膜、膜電極接合体(MEA)について、国内外のエネルギー事業者、水素圧縮装置メーカー、MEA・CCMメーカーとの事業化における連携を想定している。現時点では共同開発としての連携を考えており、事業化における連携は未定である。事業化の目標時期は、2020～2025年を想定している。

(2)実用化・事業化を考えるに至った経緯

FCVの本格普及時にはオンサイト水素ステーションも増加すると考えており、水素圧縮システムの高効率化に東レ開発膜が貢献できることを実証すれば、本格的な水素社会向け、国内生産・雇用、輸出、内外ライセンス収入、国内生産波及・誘発効果、国民の利便性向上など、我が国の経済再生への貢献が期待できる。

(3)事業として成功すると考える理由

東レ炭化水素系電解質膜は、H25-26年度のNEDO燃料電池次世代技術開発において、発電性能と耐久性の目標を達成しており、超低ガス透過性(既存フッ素膜対比 1/10)および弾力性を活かした水素圧縮向け膜電極接合体、水素圧縮セル、および高効率水素圧縮システムの開発を推進することにより、業界標準膜として、高効率な水素社会構築に大きく貢献できると考えている。また、PEMポンプ用途に、水素製造やFCV用途と共通の電解質ポリマーを用いることができれば、生産量が増加することにより、低コストでの電解質膜供給体制が実現でき、水素社会構築に貢献できると考えられる。

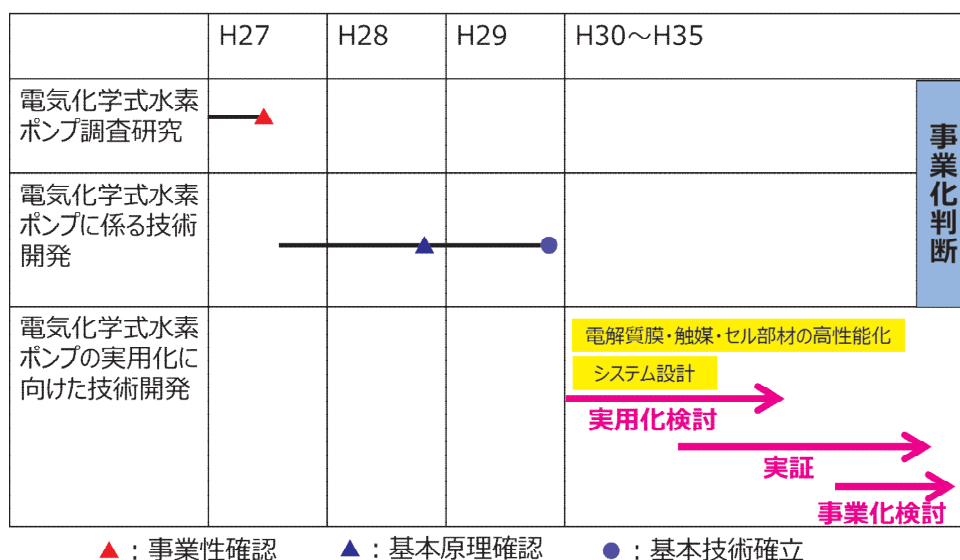


図14 事業化計画

5. 研究発表・特許等

- 研究発表・講演 文献等 その他 -

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2016.4	2016 MRS Spring Meeting 招待講演	Development of Highly-Reliable Hydrocarbon-based Membrane for Polymer Electrolyte Fuel Cells	出原大輔
2	2016.6	高分子学会 水素・燃料電池材料研究会 招待講演	高信頼性炭化水素系電解質膜の研究開発	出原大輔
3	2016.7	東レ先端材料展 インノベーションステージ	水素社会実現に向けた取り組み	出原大輔

以上

(1111-8)「水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全基盤整備に関する研究開発 / 水素社会構築に向けた社会受容性調査」

委託先：みずほ情報総研(株)

成果サマリ(実施期間：平成27年度～平成28年度)

一般市民に対するアンケート調査等を実施し、一般市民の水素に対するイメージや認識、水素ステーションに対する受容性について、現状を詳しく把握するとともに、過去の調査との比較も行い、経年的変化を分析した。有識者とアリアリング結果もあわせて、一般市民の懸念と技術開発やコミュニケーションのあり方についてまとめた。
水素ステーションのさらなる普及にあたっては、国民の正しい理解に基づいた賛成がその後押しとなると考えられることから、水素ステーションのみならず水素エネルギーや水素利用技術に関する情報提供（さらには双方方向のコミュニケーション）を引き続き行っていくことは非常に重要であることが示唆された。

背景/研究内容・目的

< 背景 >

水素供給インフラの整備が進みつつある状況の中で、商用水素ステーションの設置の一層の拡大のため社会受容性の更なる向上は重要な課題の一つである。

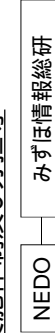
< 研究内容・目的 >

2025年のFCV・水素ステーションの普及拡大に向けて、水素や燃料電池、水素ステーションに対して一般市民の認識、受容性を調査することにより、水素供給インフラ整備における必要な技術課題を明確にし、社会受容性向上のための提案を行う。

研究目標

実施項目	目標
社会受容性に関する仮説の抽出	探索的調査の実施
社会受容性に関する仮説の検証	代表性が担保された偏りの少ないサンプルを基にした検証、および経年的変化の分析
技術開発課題の明確化とコミュニケーションへの示唆の抽出	社会的理解と技術課題の両面の十分な理解による課題・示唆の抽出

実施体制及び分担等



これまでの実施内容 / 研究成果

水素ステーションのより一層の普及拡大に向けて、水素に関連するインフラの社会受容性の向上に資する提案を行うことを目的として、国内外の取り組みやtwitterなどのインターネット上での発言に対する調査を行うとともに、一般市民の水素に対する認識や意見に対するアンケート調査を実施した。また、有識者（環境・エネルギー分野、水素分野）へのヒアリングを実施し、一般市民の認識や意見とヒアリング結果の両面から、一般市民の懸念と相当するリスクそれぞれに対応する技術開発やコミュニケーションのあり方をまとめた。

今後の課題

今後、水素利用が社会において普及していきにあたり、社会受容性を向上させていくための課題は以下のとおりである。

技術開発の進展

一般市民以外の意見の把握
水素に関するコミュニケーションの場の構築
国による将来のエネルギーシステム及びその中の水素の位置づけの明確化

実用化の見通し

本事業の成果を水素ステーション事業者や政策立案者、一般市民等が参照することで、今後の水素ステーション設置・拡大の一助となると考えられる。

研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
社会受容性に関する仮説の抽出	国内外の文献調査、一般市民を対象にしたグループインタビュー、ウェブ上の発言の分析（テキストマイニング）より、水素の社会受容性に関する仮説を抽出した。	
社会受容性に関する仮説の検証	エリアサンプリングによる大規模アンケート調査を実施し、平成21年度調査との比較分析や属性による影響等に関する分析を実施するとともに、専門家へのヒアリングを行い、仮説の検証を行った。	
技術開発課題の明確化とコミュニケーションへの示唆の抽出	の結果より、一般市民の認識ごとに技術開発やコミュニケーションのあり方について整理した。	

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
0	0	0	0

課題番号： -8

水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全基盤整備に関する研究開発 / 水素社会構築に向けた社会受容性調査

みずほ情報総研株式会社

1. 研究開発概要

1.1 調査の背景・目的

NEDO では平成 19 年度に「水素社会受容性に関する調査」、また平成 21 年度には「燃料電池、水素に関する社会受容性に関する調査」(以降、「平成 21 年度調査」とする。)を行い、後者においては、システムに対する不安(技術の信頼性、事故の種類や可能性)の認識が受容性を低下させる大きな要素であること、「社会が必要としているという認識」が受容性を向上させる大きな要素であること等の示唆を得た。その後、東日本大震災における福島第一原子力発電所の事故を経験し、燃料電池自動車(FCV)や水素ステーションの実物を目の当たりにするなかで、世の中が水素、供給インフラ、及び FCV 等の消費機器を見る目も当時から変わっているものと推察される。

「水素ステーション安全基盤整備に関する研究開発」では、より高次元の安全・安心を実現する機器及び運転・管理手法等の要素技術を確立して、水素ステーションの社会受容性の向上に資することを目的としている。本調査では、上記の背景のもと、2025 年の FCV・水素ステーションの普及拡大に向けて、一般ユーザーの意識調査を行い、特に水素供給インフラ(水素ステーション)に対する一般市民の認識・受容性に着目して一般市民の現状の意識を把握するとともに、社会受容性向上のための提案を行うことを目的とする。

1.2 調査の概要

本調査における調査開発項目を図 1 に示す。

本調査では、1.1 に示したとおり一般市民の意識を把握することを目的の 1 つとしており、その方法としてアンケート調査を実施する。アンケート調査では、調査票にある質問以外の回答・情報は基本的には得られないので調査票の設計が非常に重要となるため、アンケート調査実施前に一般市民の意見のヒントになる情報をなるべく多く集めておくことが必要である。本調査の「社会受容性に関する仮説の抽出」においては、グループインタビューや twitter などの分析(テキストマイニング)を行い、その結果をもとに探索的な仮説の抽出を行う。

次の「社会受容性に関する仮説の検証」では、一般市民の意見を正確に把握するため、インターネットモニターまたは来場者アンケートではなく、代表性が高く偏りのないサンプルに対するアンケート調査を実施する。

最後に、「技術開発課題の明確化とコミュニケーションへの示唆の抽出」において、水素ステーションや水素インフラについての社会的認識、社会的理解の課題と技術課題のつながりを確認し、技術開発の重点を探るとともに、技術開発による安全性の担保の状況の伝え方などのコミュニケーションのあり方についても検討を行い、示唆を得る。

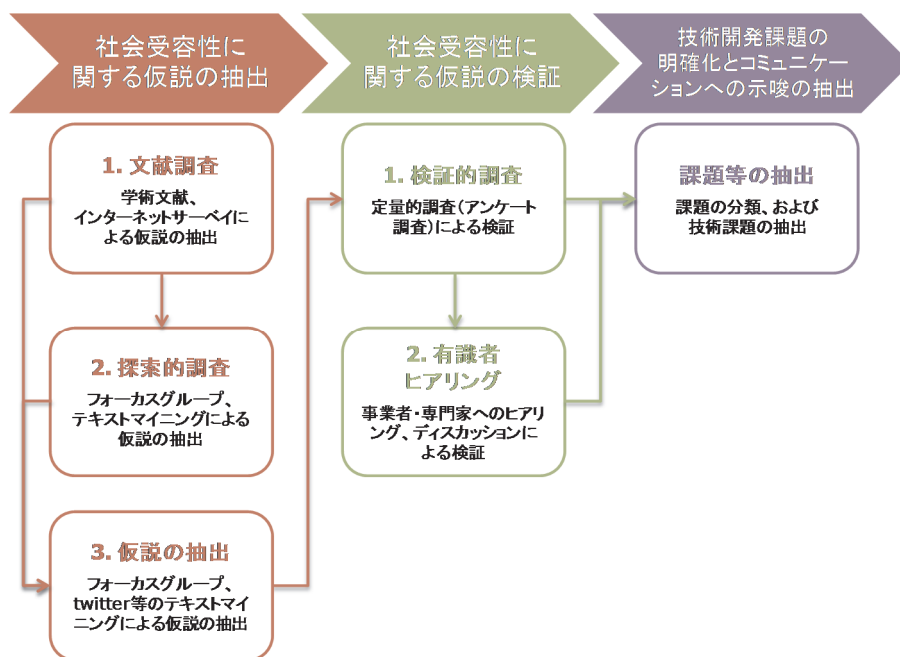


図 1 本調査の調査開発項目

2. 研究開発目標

本調査の目標を表 1 に示す。

調査開発項目 については、エリアサンプリングという手法を用い、代表性が高く偏りの少ない意見を収集することで、一般市民の意見をより正確に把握し、政策立案に反映できる調査結果とする。本分野における国内の調査事例は他にはないと考えられ、非常に有益な調査となる。また、調査開発項目 において一般市民の認識ごとに技術開発やコミュニケーションのあり方についてまとめた成果を水素ステーション事業者等が参照することで、水素ステーションの導入促進に寄与できると考えられる。

表 1 本調査の調査開発項目と目標

調査開発項目	最終目標
社会受容性に関する仮説の抽出	探索的調査の実施
社会受容性に関する仮説の検証	代表性が担保された偏りの少ないサンプルを基にした検証、および経年的変化の分析
技術開発課題の明確化とコミュニケーションへの示唆の抽出	社会的理解と技術課題の両面の十分な理解による課題・示唆の抽出

3. 研究開発成果

3.1 研究開発成果、達成度

(1) 社会受容性に関する仮説の抽出

本項目では、国内外の文献調査、一般市民を対象にしたグループインタビュー、ウェブ上の発言の分析(テキストマイニング)より、水素の社会受容性に関する仮説を抽出した。文献調査において、特に参照した事例は以下のとおりである。

- 国内
 - NEDO「水素社会受容性に関する調査」
 - NEDO「燃料電池、水素に関する社会受容性調査」
 - HySUT「地域水素供給インフラ技術・社会実証 / 技術・社会実証研究」
 - 東京都「水素社会の実現に向けた東京戦略会議」
- 海外:米国
 - エネルギー省「Hydrogen Knowledge and Opinions Assessment project 後の活動」
- 海外:欧州
 - HyTrust「ドイツ市民の水素に対する見方の全国的調査」(ドイツ)
 - HyNor「ノルウェーにおける水素・燃料電池車の社会受容性に影響を及ぼす因子の関係性調査」(ノルウェー)

また、最近の市民の発言を分析するため、2016年1月から2016年12月の1年間におけるtwitterの発言を分析対象とし、テキストマイニング分析を行った。調査期間内に燃料電池自動車に関する報道などがあつたため、燃料電池の仕組みに関する共起語や、水素、酸素といった単語が多くみられる。また、水素爆弾と水素爆発という共起語が現れており、これがトヨタ自動車といった言葉とも共起していることから、燃料電池自動車に関して関連付けられた言葉でありイメージであることも予想される。

以上より、社会受容性に関する仮説を以下のとおり抽出し、これらをもとにアンケート調査票の設計を行った。

- 水素の製造には再生可能エネルギーを利用すべきであるとの意見が多い。
- 水素に関する知識を持っている方が、受容性が高い。
- 水素が危険であるという認識を持つ回答者は一定程度存在し、その理由は、爆発、引火、漏洩しやすい等である。一方、正しく使用すれば問題ないという認識を持つ回答者も多い。
- 安全性への関心が高い。
- 水素ステーションの安全対策の理解度は増加している。
- 知識不足が直接水素自動車の購入判断や水素自動車に対する意見に影響している。
- 水素に関する知識より環境問題に対する意識が高いことが燃料電池車及び水素ステーションの社会受容性の向上に繋がる。
- 購入判断の条件となる基準は、水素ステーションのインフラが十分であること、先進的な技術にチャレンジをするリスク受容性を高め、従来の自動車への慣れから脱却するための知識を高めること、及び経験の場を拡大すること。

(2)社会受容性に関する仮説の検証

(1)で抽出した仮説を検証するために、アンケート調査と有識者へのヒアリングを行った。アンケート調査の概要は表2のとおりである。

表2 アンケート調査概要

調査期間	2016年10～11月
調査地域	東京都、神奈川県、埼玉県、千葉県、山梨県、愛知県、大阪府、京都府、兵庫県、滋賀県、福岡県、佐賀県、山口県 2016年8月時点で水素ステーションが建設されている都道府県(移動式を除く)
調査対象	国内在住の満20歳以上の男女
調査方法	エリアサンプリング (住宅地図を用いて、ランダムに抽出した1地点から等間隔に世帯を訪問し、調査対象者を探すサンプリング方法)
サンプリング法	層化二段無作為抽出 (性別、年齢、地域の属性に比例した層化抽出)
回収率	52.5%
有効回答数	1,004

主な調査結果は以下のとおりである。

● 水素に対するイメージ・認識

- 「きれい(クリーン)」と回答した回答者が多い一方、「危険」についてはばらつきが大きい(図2参照)。

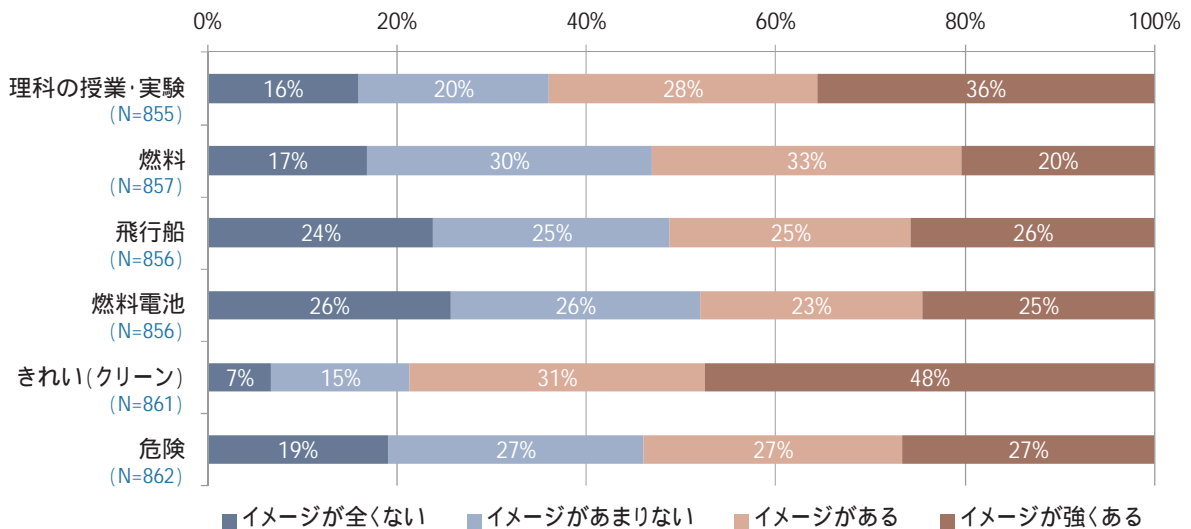


図2 アンケート調査集計結果:水素に対するイメージ

- 水素利用によって化石燃料への依存を減らすことや地球温暖化の解決への貢献などに期待が寄せられ、「正しく使用すれば他の燃料と同様に安全に使える」という認識を持つ回答者が多いが、「コストが高くて再エネを使って作るべき」という意見は多くない(図3参照)。

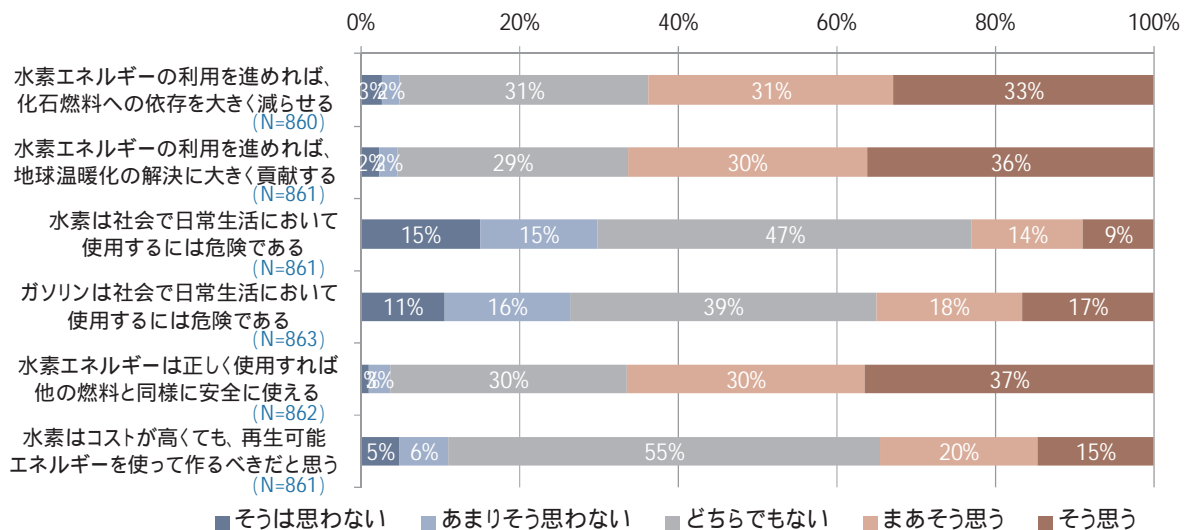


図3 アンケート調査集計結果:水素・ガソリンに対する意見

● 水素ステーションの建設に対する意見

- 半数以上の回答者が「(どちらかといえば)良いと思う」と賛成方向の意見を持つが、「どちらともいえない」と態度を保留した回答者が 3 割であり、反対方向の「(どちらかといえば)問題だと思う」が 1~2 割であった(図4、図5参照)。

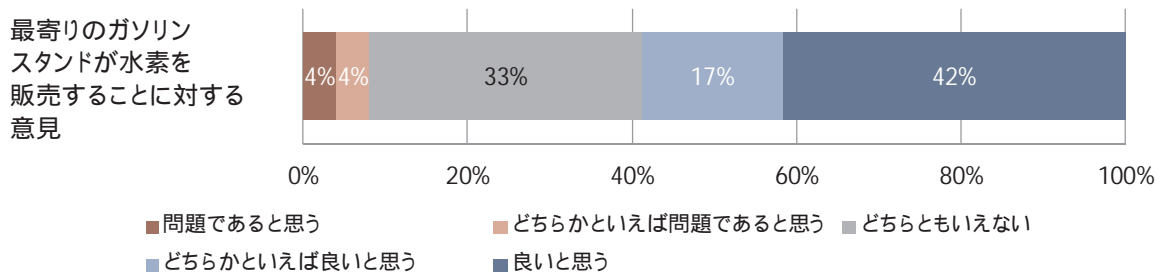


図4 アンケート調査集計結果:最寄りのガソリンスタンドが水素を販売することに対する意見 (N=862)

(質問 あなたの家の最寄りのガソリンスタンドが水素ステーションとして水素の販売を行う(水素とガソリンを併売する)ことについてどのように思いますか?)

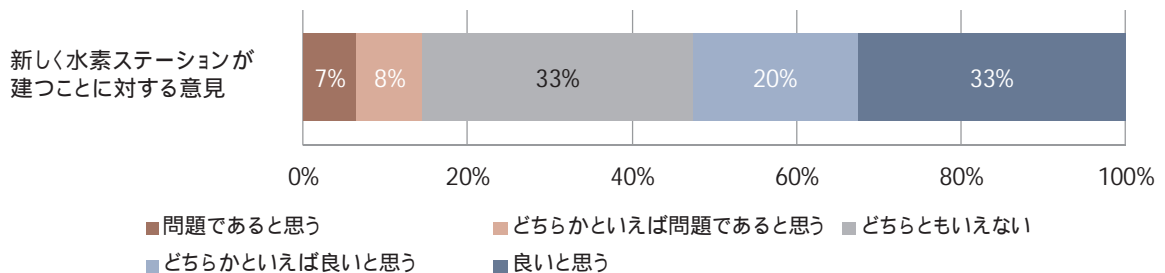


図5 アンケート調査集計結果:新しく水素ステーションが建つことに対する意見 (N=858)

(質問 あなたの家の近くに水素とガソリンを併売するスタンドが新しく建つとします。どのように思いますか?)

- 水素ステーションの建設に対して「距離によらず根本的に反対」と答えた回答者は水素利用による便益の認識が低い一方で、「社会で利用するには危険」との認識が強く、安全性への懸念をより強く感じている傾向がある(図6、図7参照)。

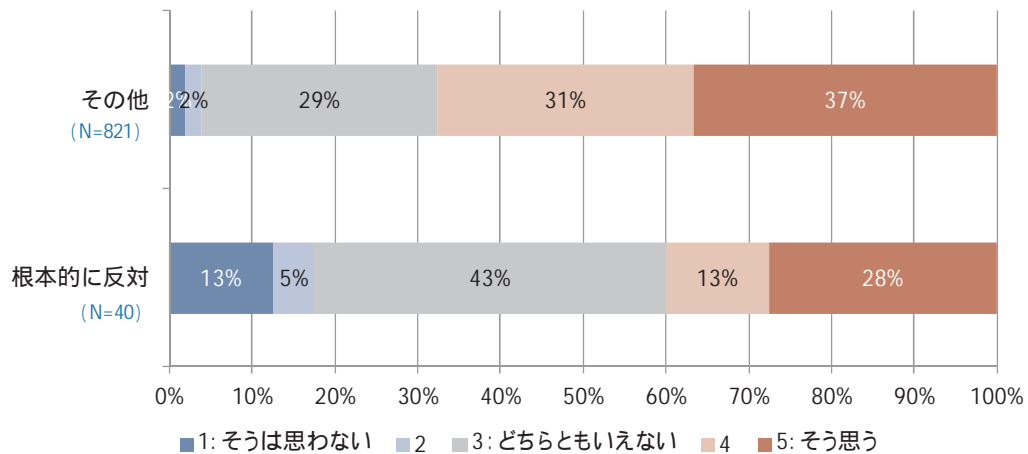


図6 クロス集計結果:水素ステーション新設に対する意見と「水素エネルギーの利用を進めれば、地球温暖化の解決に大きく貢献する。」に対する意見の関係

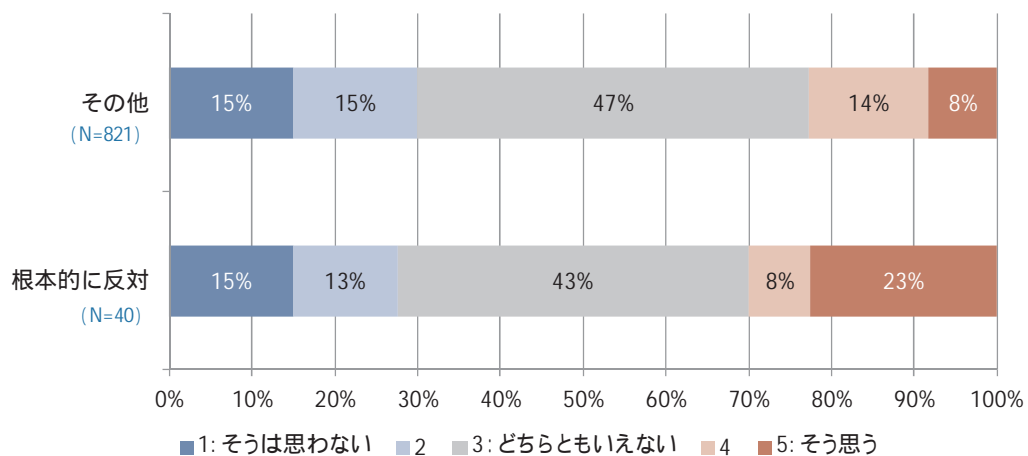


図7 クロス集計結果:水素ステーション新設に対する意見と「水素は社会で日常生活において使用するには危険である。」に対する意見の関係

● 経年的変化の分析

- NEDO では 2009 年度に「燃料電池、水素に関する社会受容性調査」を実施しているため、本調査と2009年度調査との比較を行った。
- 水素エネルギーおよび水素ステーションの認知度は向上したが、FCV に関してはほとんど変化がなかった(図8参照)。

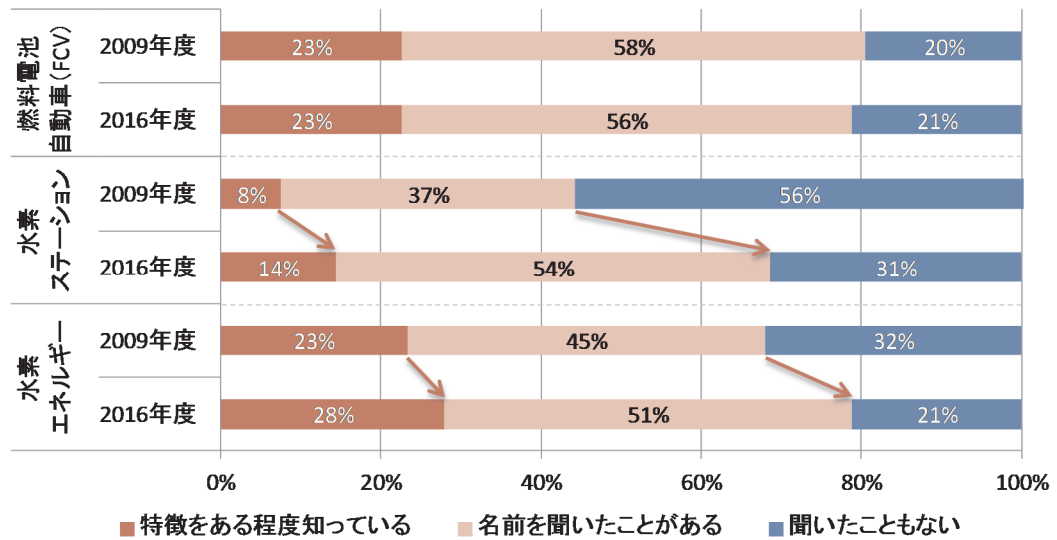


図 8 2009 年度調査結果との比較: 認知度 (水素エネルギー、水素ステーション、FCV)

- 水素に対するイメージについては、「きれい(クリーン)」、「危険」のイメージがやや増加した(図 9 参照)。また、「水素は社会で日常生活において使用するには危険である」や、社会で水素を利用することによる便益(化石燃料への依存の低減、地球温暖化の解決への貢献)の認識を持つ回答者は増加した(図 10 参照)。

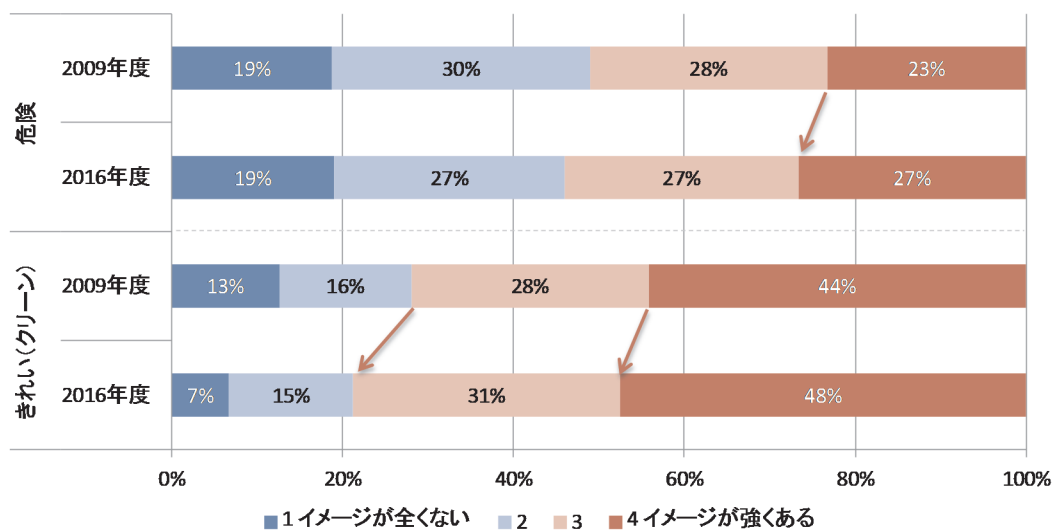


図 9 2009 年度調査結果との比較: 水素に対するイメージ(きれい、危険)

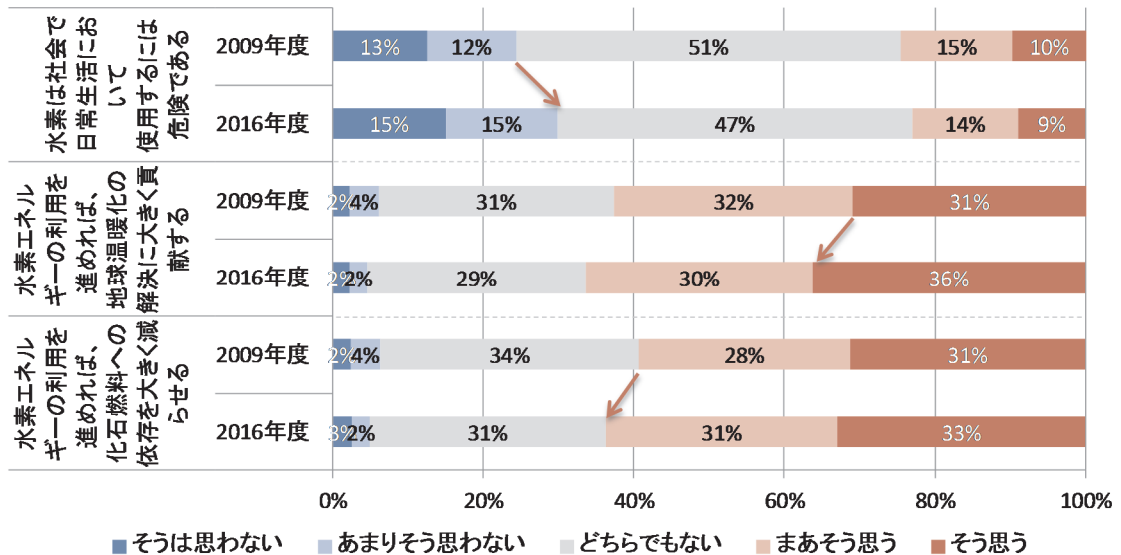


図 10 2009 年度調査結果との比較:水素に対する認識

- 水素ステーションに対する意見は、「良いと思う」、「どちらかといえば良いと思う」の回答が増加しており、「問題であると思う」の回答は減少している(図 11 参照)。現在の一般市民の方が水素利用の便益をより感じており、そのため水素ステーション建設に対しても好意的な意見が示されたものと考えられる。

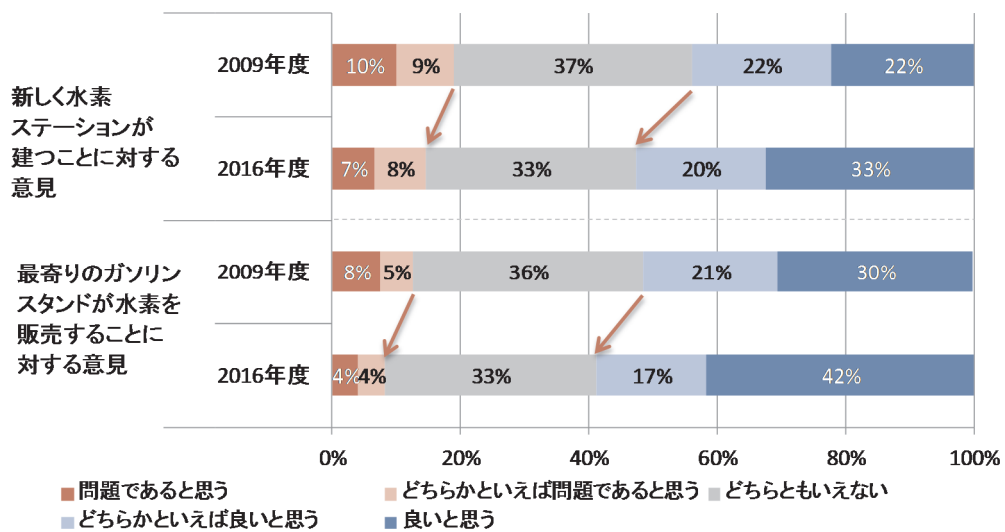


図 11 2009 年度調査結果との比較:水素ステーション建設に対する意見

● その他

- FCV の認知度と年代の関係を図 12 に、水素ステーションの認知度と年代の関係を図 13 に示す。どちらも、40 代以下は、年代が下がるほど認知度が低く、「聞いたこともない」の回答が増加する。年代が若い層への情報提供が必要であると考えられ、SNS(ソーシャルネットワーキングサービス)への投稿や YouTube などへの動画提供等、年代が若い層への訴求を考慮した方法の検討も重要である。

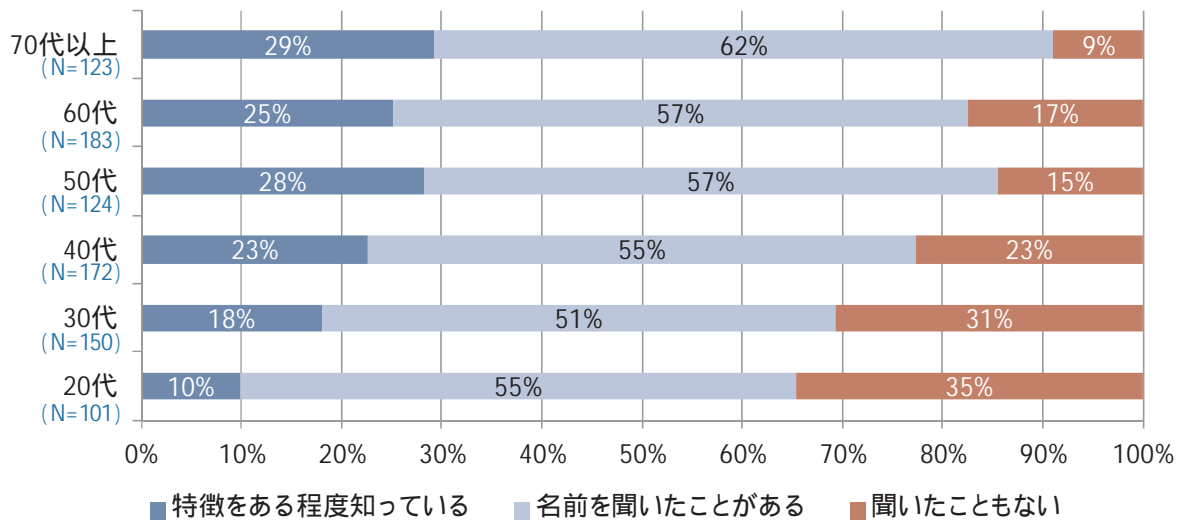


図 12 クロス集計結果:年代とFCVの認知度の関係

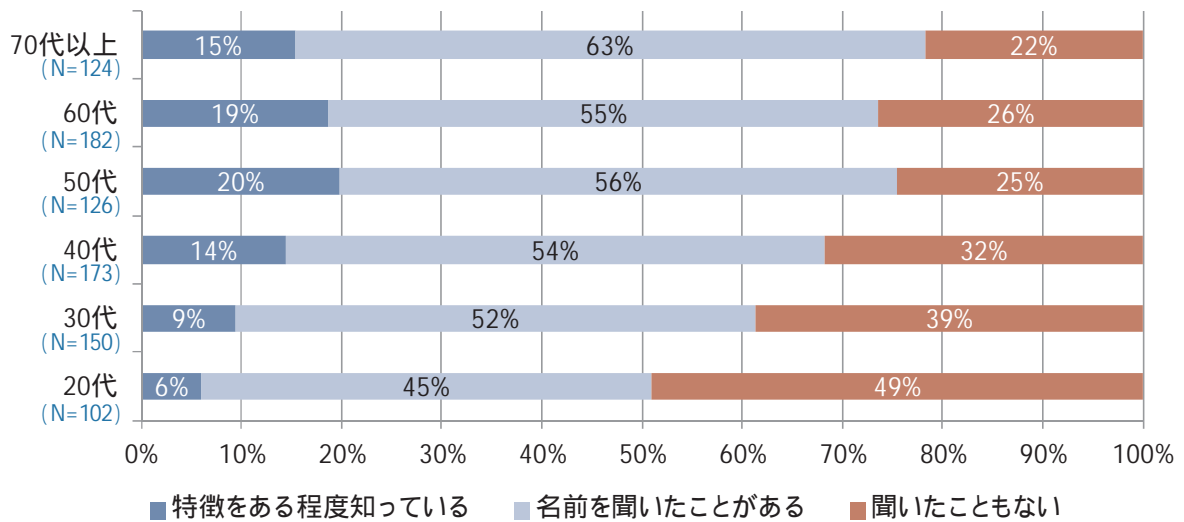


図 13 クロス集計結果:年代と水素ステーションの認知度関係

また、有識者ヒアリングとして、環境・エネルギー分野のオピニオンリーダー及び水素分野の専門家より、水素ステーションを始めとする水素社会を構成するインフラ等についての情報提供やコミュニケーションのあり方や今後の技術開発課題について意見収集を行った。アンケート調査で得られた一般市民の認識・意見と有識者ヒアリングから得られた情報を、以下の表3にまとめる。

表3 検証結果のまとめ

項目	一般市民の認識・意見	有識者の意見
水素ステーション建設への全般的な懸念	<ul style="list-style-type: none"> ● 水素ステーションの建設には「どちらともいえない」と態度を保留した回答者が3割であり、反対よりの「(どちらかといえば)問題だと思う」との回答が1~2割であった。 ● 「社会で日常生活において使用するには危険」、「扱っているもの自体が不安」、「技術の信頼性が低い」という認識も水素ステーション建設への意見に影響が見られるものの、その認識に関わらず「反対」方向の意見を持つ層が見られる。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 爆発等の事故への懸念のほかに、騒音や景観への影響、土地価格の下落等、さまざまな理由が存在する。 ● 「水素」に起因する理由ではなく、工場など建造物が新しく建つ際の懸念事項と同じである理由も多い。 ● 住民の生活に影響があるかどうか重要なポイントである。
安全性	<ul style="list-style-type: none"> ● 水素は「正しく使用すれば他の燃料と同様に安全に使える」という認識を持つ回答者が多い。 ● 上記の認識は、水素ステーション建設に「賛成」方向に影響する可能性がある。 ● 水素利用のリスクについて、「どのような事故が起こるかわからない」との認識は、水素ステーション建設に「反対」方向に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 事故をどう捉えるかと、どう減らして行くかを重点的に今後も取り組む。また、トラブルの事例を科学的に分析する必要がある。 ● 予見できない案件を事業者で共有するなど横展開を行うことで、同種のトラブル予防に効果があると考えられる。 ● 一般市民と接するのは水素ステーションの従業員であるため、安全装置・技術に加え、人材の教育も重視している。人材を育成し、現場力を上げるためのサポートが、社会受容性向上のためにも、安全性向上のためにも重要である。

項目	一般市民の認識・意見	有識者の意見
水素利用の意義	<ul style="list-style-type: none"> ● 化石燃料への依存を減らすことや地球温暖化の解決への貢献などに期待が寄せられている。 ● 上記の便益を強く認識している回答者ほど賛成よりの意見を持つ傾向が見られた。 	<ul style="list-style-type: none"> ● なぜ社会において水素を利用するのか、その意義について、現段階では十分に説明できていないのではないかと率直に説明する、議論するといったことが必要。 ● 国の進めたい方向は曖昧であり、わかりづらい。 ● FCV がどのくらい便利なのかが普及に影響し、水素が受け入れられるかに影響を与える。便利か、安全か、安いかというところが決め手になるのではないかと想像する。 ● 水素ステーションだけでなく、地域に必要な施設全体の導入がしやすくなるような施策が必要。「地域へのメリットが、水素ステーションがあることにより促進する」となるとよい。
コミュニケーションの課題	<ul style="list-style-type: none"> ● FCV や水素ステーションの認知度について、40代以下は、年代が下がるほど認知度が低く、「聞いたこともない」の回答が増加する。年代が若い層への情報提供が必要である。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 何か軸を一つ決めて、日本全体で統一して、それをもとにコミュニケーションを行うことが重要。 ● 水素の情報は一般市民の多くには非常に難しい。うまくかみ砕き、いろいろな形で伝えていくことが課題である。 ● 現状は一方向の情報提供である。また、現在行っている情報提供は自分で見に行かなければいけないため、発信をどのように行っていくかは今後も課題である。

(3) 技術開発課題の明確化とコミュニケーションへの示唆の抽出

(1)、(2)の結果をもとに、表4に一般市民の懸念と相当するリスクそれぞれに対応する技術開発やコミュニケーションのあり方をまとめた。大きく3つの項目(水素ステーション建設への全般的な懸念、安全性に対する懸念、水素利用の意義の明確化)に分類した。

表 4 一般市民の懸念と技術開発やコミュニケーションのあり方のまとめ

人々の懸念	リスクの種類	技術開発における対応	コミュニケーションのあり方
水素ステーション建設への全般的な懸念			
水素の取り扱いそのものに対する漠然とした懸念	爆発、火災、漏洩、破裂・破損等のリスク	操業実績の積み上げ	これまでの産業ガスとしての取扱いの経験を基にした説明、水素ステーションの操業実績やトラブル対応事例の説明、類似の技術を基にした説明
建造物が新しく建つ際の懸念 (騒音や景観への影響、土地価格の下落等)	住民の生活への影響	事例の共有化(データベース化)、水素ステーション建設が地域にメリットをもたらす施策	影響軽減策の具体的説明、水素ステーションにおける事例の説明、住民との情報共有の仕組みの構築、信頼醸成
安全性に対する懸念			
爆発等の事故等への具体的な懸念	爆発、火災、漏洩、破裂・破損等のリスク	事故の未然防止または予測、被害の最小化、水素ステーション運営に携わる人材の育成	具体的なリスクに関する説明、事故の防止・被害最小化機能や検知の仕組みの視覚化、類似の技術を基にした説明
水素利用の意義の明確化			
水素利用を進めることの意義に対する疑問	社会受容性低下(水素ステーション建設に対する反対意見の増加、等)	水素利用技術が社会にもたらす便益の定量化(省エネ効果、CO2削減効果、経済効果、等)、効率向上やコスト低下技術開発(上記便益の増加につながる技術開発)	水素利用の意義に対する中立的かつ一貫した説明、双方向の議論ができるプラットフォームの確立
水素利用技術の利便性に対する疑問	社会受容性低下(水素利用技術の普及の減速、等)	利便性向上技術開発(水素技術ならではの利便性の探求・開発)	水素利用技術に求める利便性の具体化

3.2 成果の意義

表 5 に本調査事業の成果を示す。

表 5 本調査の調査開発項目と成果

開発項目	成果
社会受容性に関する仮説の抽出	国内外の文献調査、一般市民を対象にしたグループインタビュー、ウェブ上の発言の分析(テキストマイニング)より、水素の社会受容性に関する仮説を抽出した。

開発項目	成果
社会受容性に関する仮説の検証	エリアサンプリングによる大規模アンケート調査を実施し、平成 21 年度調査との比較分析や属性による影響等に関する分析を実施するとともに、専門家へのヒアリングを行い、仮説の検証を行った。
技術開発課題の明確化とコミュニケーションへの示唆の抽出	、の結果より、一般市民の認識ごとに技術開発やコミュニケーションのあり方について整理した。

2で示したとおり、調査開発項目 については、エリアサンプリングという手法を用い、代表性が高く偏りの少ない意見を収集することができたため、一般市民の意見をより正確に把握し、政策立案に反映できる、非常に有益な調査結果となった。また、調査開発項目 において一般市民の認識ごとに技術開発やコミュニケーションのあり方についてまとめた成果を水素ステーション事業者等が参照することで、水素ステーションの導入促進に寄与できると考えられる。

3.3 開発項目別残課題

今後、水素利用が社会において普及していくにあたり、社会受容性を向上させていくための課題は以下のとおりである。以下の課題はいずれも将来解決することが望ましい課題であり、「プロジェクト進捗に従い、新たに見いだされた。」に相当する。

- 技術開発の進展
 - 社会受容性を向上させるために最も有効な方法は、利用技術が普及し、技術が身近になるとともに、一般市民がその利便性や利用による効果を実感することである。そのためには、さらなる効率の向上やコスト低減、安全な利用実績の蓄積が必要である。
 - 国の支援は、個別の要素技術開発にとどまるのではなく、システムとしての普及を目指す段階まで必要である。水素を将来、我が国で大規模に利用していくことを目指すのであれば、水素供給だけでなく、水素需要の創出に関わる技術開発や、インセンティブ・規制等の政策が重要である。
- 一般市民以外の意見の把握
 - 本調査では一般市民の現状の意見・認識の把握を行ったが、その他のステークホルダの意見やそのロジックを把握することも、政策立案の際には重要であると考えられる。
- 水素に関するコミュニケーションの場の構築
 - 水素について疑問に思ったことに対する答えを、誰もが即座に知ることのできるポータルサイトは、受容性向上のためにも非常に有益である。また、それが双方向であると、さらに理解が深まることが期待される。
 - 水素利用に関しては、水素ステーション建設の際に近隣住民から懸念が表明される場合があることや、そもそもその推進に対して賛否がある。さまざまな意見をふまえた上での、水素利用の意義や技術開発の方向性などの説明があることが望ましいと考えられる。
- 国による将来のエネルギーシステム及びその中の水素の位置づけの明確化
 - 水素利用に対する現状の好意的な意見は水素利用の便益の認識の上に成り立っていると考えられるが、それが正しい理解の上の認識であるかは疑問の余地がある。そのため、水素利用に対する意見は、将来、他のエネルギーの受容性に影響を受ける可能性がある。

- 将来のエネルギーシステムにおける水素の位置づけや、期待している意義を示すことにより、多くの議論ができ、情報が普及することにより正しい理解につながるのではないかと考えられる。

4. まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

本調査は、水素ステーションのより一層の普及拡大に向けて、水素に関連するインフラの社会受容性の向上に資する提案を行うことを目的として、国内外の取り組みや twitter などのインターネット上での発言に対する調査を行うとともに、一般市民の水素に対する認識や意見に対するアンケート調査を実施した。また、有識者(環境・エネルギー分野、水素分野)へのヒアリングを実施し、一般市民の認識や意見とヒアリング結果の両面から、一般市民の懸念と相当するリスクそれぞれに対応する技術開発やコミュニケーションのあり方をまとめた。

本事業の成果を水素ステーション事業者や政策立案者、水素ステーション近隣住民等の一般市民等が参照することで、今後の水素ステーション設置・拡大の一助となると考えられる。

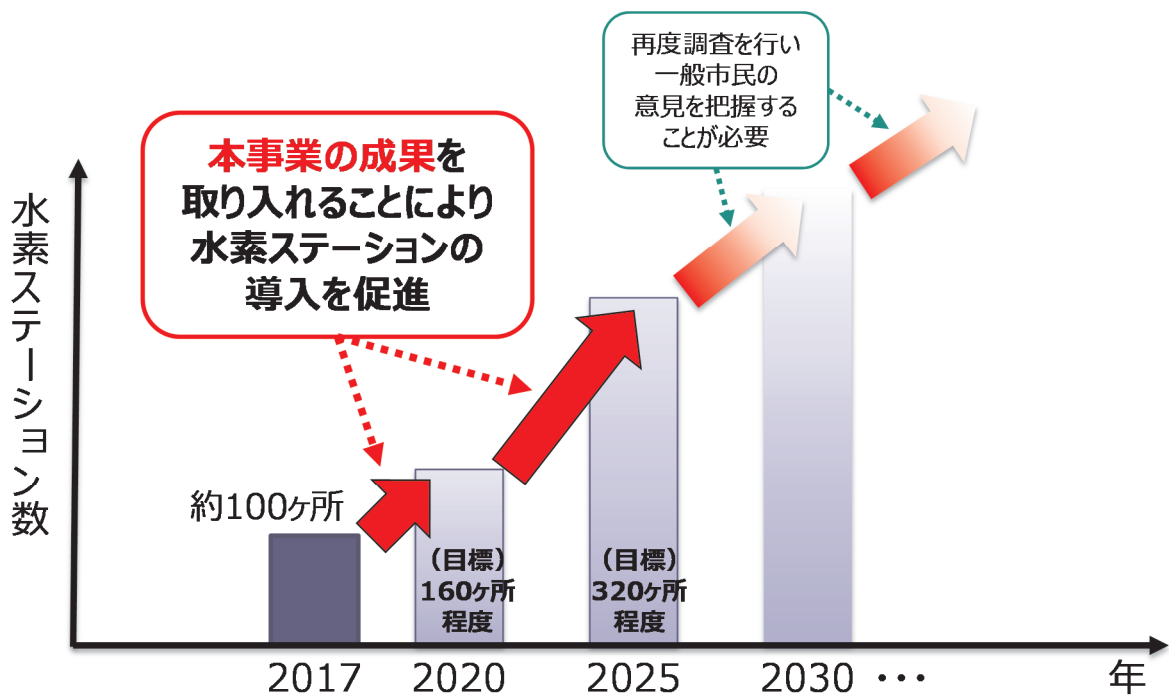


図 14 水素ステーションの普及と本調査事業の成果活用イメージ

5. 研究発表・特許等

なし。

(III-9)「水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全整備に関する研究開発 / 実環境下における安全運用技術の技術開発」

委託先：(一社)水素供給利用技術協会 (HySUT)

成果ガリ(実施期間：平成27年度～平成29年度)

- ・商用STの標準的な仕様を構築した充填施設とするのに加えて、国際標準となつて、低コストな充填施設を構築した。
- ・実使用環境下における各種評価試験について詳細試験計画を策定した。
- ・実環境下での各種試験を実施し、実用性・実効性を確認する。

背景/研究内容・目的

これまで我が国では「水素、燃料電池実証プロジェクト(JHFC1)」、「燃料電池システム等実証研究(JHFC2)」及び「地域水素供給インフラ技術、社会実証」においてFCV・水素ステーションの実用性、省エネルギー性等を実証すると共に、実用化課題の抽出を進めてきた。

加えて2011年1月の自動車メーカー及び水素供給事業者13社の共同声明を受け、2013年度から「水素供給設備整備補助金」に係る補助事業がスタートし2015年度までの3年間で100ヶ所程度の水素ステーションの整備が行われてきた。

一方で、商用ステーションの導入に伴い、開発品等の実証可能なステーションがなくなる状況となっているが、今後の水素ステーションの本格普及に向け実環境下での実証試験の重要性は高まる事が予想される。

そこで本研究開発テーマでは、より一層の普及拡大のために、商用ステーションの標準的な仕様を構築した「水素技術センター」を整備し、水素ステーション全体としては部品・構成機器の一層の安全・安心に資する技術開発、並びに水素ステーションの運転・管理手法の更なる高度化をはかる技術開発を行う。

研究目標

実施項目	目標
水素技術センター整備	水素技術センターの完成
実使用環境下における評価技術の実証	開発品の実証、充填プロトコルの実証、人材育成、技術伝承及びトレーニング、計量技術の実証評価の試験方法、試験計画を決定し、検証試験を実施する。
セル対応関連技術の実証	連続充填時の氷結対応技術の実用性の検証の試験方法、試験計画を決定し、検証試験を実施する。
低コストガソリン技術の安全性検討	ST設備仕様の抜本的な見直し検証の試験計画、低コスト設備仕様の充填制御の安全性/運用性検証の試験計画、次世代プロトコルや直充制御を活用したSTコスト低減の検証計画を決定し、検証試験を実施する。
実施体制及び分担等	
NEDO	HySUT本部(～)
	HySUT分室(三菱化工機、～)
	HySUT分室(JXTGエネルギー、)
	HySUT分室(日立オートモティブシステムズ、)

これまでの実施内容 / 研究成果

水素技術センターの整備

水素技術センターは、商用STの標準的な仕様を構築した充填施設とするのに加えて、国際標準となつて、低コストな充填施設を構築した。また、低コストな充填施設を構築した。また、低コストな充填施設を構築した。また、低コストな充填施設を構築した。

実使用環境下における評価技術の実証

実使用環境下における評価技術の実証
-1 開発品の実証
「水素ステーションの高圧水素用ホースとシールシステムに関する研究開発、テマと連携し、横浜ゴムが開発中の87.5MPa充填ホースの実証を計画した。また、他の試験において本ホースを使用し、充填を行うことで充填回数の増加を図ることを計画した。

-2 充填プロトコルの実証

タンクカゴリター：7-10 kg、水素温度：T30を中心とした充填プロトコルの実証を計画した。HySUT号を利用することで、タンク容量が7-10kgの車両を確保。実際の車両との違いを整理し、タンク容積の通信のやりとりに関し、STの制御にて対応することで試験実施することとした。

-3 計量技術の実証

マスターメータ法と重量法の比較試験の実証 (NEDO他事業との連携)を計画した。また、直充時の計量器の精度確認試験を計画した。

-4 人材育成・技術伝承及びトレーニング

NEDO安全・安心事業で作成する「水素ST運営者訓練カリキュラム」に基づき、実際に本センターで一連の運転・設備管理実習や非常時シナリオ訓練等を計画した。

セル対応関連技術の実証

デスベンサーメータから氷結対策についてヒアリングを実施した。

JPECのセル関連の技術検討効果があると示唆された現行の氷結対応技術をら台連続充填を用いて実施することを計画した。

低コストステーション技術の安全性検討

実施予定項目が可能となる水素技術センターの仕様を検討し発注仕様を踏まえたステーション設備仕様の抜本的な見直し検討(2)低コスト設備仕様の前展とした充填制御の安全性/運用性検討(3)次世代プロトコルを活用したステーションコスト低減の検討について試験計画の検討を行った。

今後の課題

- ・11月末からの実証試験を試験計画に則り、効率的に実施を行う。
- ・センターを利用した実環境下での評価試験を継続実施し、試験回数の増加を図るとともにラテ試験との相関関係を導き出すとともに、本センターで得た知見を活かし、水素ステーション機器の国際競争力の強化、低コスト化、安全性・耐久性向上を目指していく。

実用化の見直し

当センターをNEDO事業等で継続的に利用することで、他の商用STでは実現困難な実環境下における耐久性・実用性等の実証試験が可能となり、更なるSTの低コスト化、安全性向上に貢献できる。また、海外で標準となっている87.5MPa充填を実環境下で国内で唯一可能な実証試験場として、82MPa超えの開発品の評価を実施することで日本の国際競争力向上に寄与することができる。

実施項目	成果内容	自己評価
水素技術センター整備	センターの建設完了	○
実使用環境下における評価技術の実証	試験計画の検討完了	○
セル対応関連技術の実証	試験計画の検討完了	○
低コストガソリン技術の安全性検討	試験計画の検討完了	○
論文発表	外部発表	受賞等
特許出願	0	0
	2 (プレスリリース)	0

課題番号： -9

水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全整備に関する研究開発 / 実環境下における安全運用技術の技術開発

一般社団法人 水素供給利用技術協会 (HySUT)

1. 研究開発概要

燃料電池自動車(以下、FCV)と水素供給インフラは、エネルギー源のベストミックスやCO2排出量削減の有効策として、「エネルギー基本計画(2010年閣議決定)」および「Cool Earth - エネルギー革新技術計画(2008年経済産業省策定)」における重要技術と位置付けられている。

これまで我が国では「水素・燃料電池実証プロジェクト(JHFC1)」(平成14～17年度)、「燃料電池システム等実証研究(JHFC2)」(平成18～22年度)、及び「地域水素供給インフラ技術・社会実証」(平成23～25年度)においてFCV・水素ステーションの実用性、省エネルギー性等を実証すると共に、実用化課題の抽出を進めてきた。

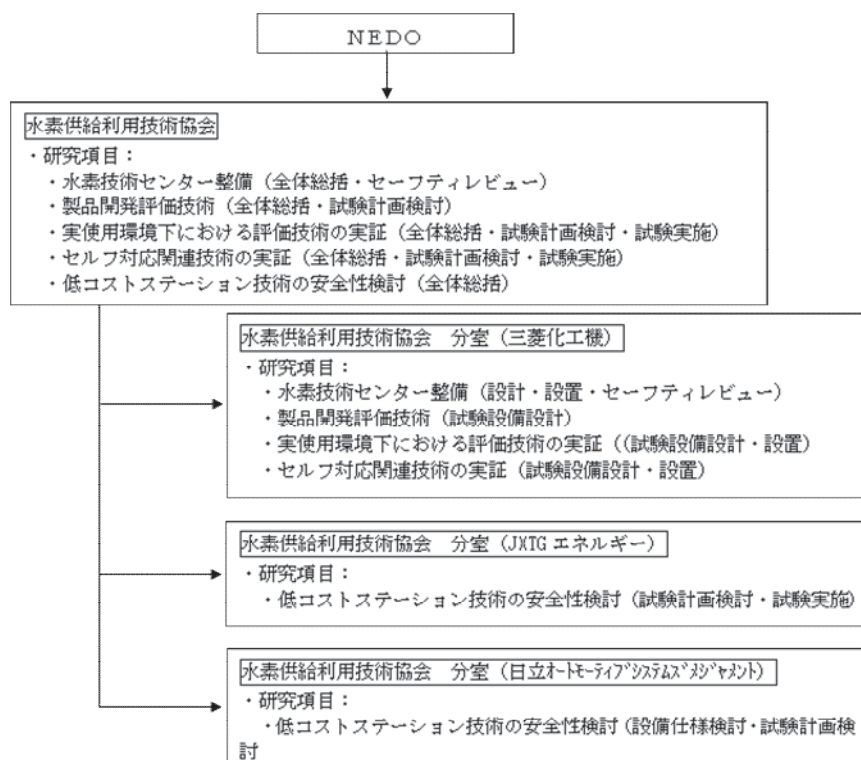
加えて2015年からのFCVの量産開始と水素供給インフラの先行整備を目指すこととした2011年1月の自動車メーカー及び水素供給事業者13社の共同声明を受け、2013年度から「水素供給設備整備事業費補助金」に係る補助事業がスタートし2015年度までの3年間で100ヶ所程度の水素ステーションの整備を行ってきた。

一方で、商用ステーションの導入に伴い、開発品等の実証可能なステーションがなくなる状況となっているが、今後の水素ステーションの本格普及に向け実環境下での実証試験の重要性は高まることが予想される。

本研究開発テーマでは、より一層の普及拡大のために、商用ステーションの標準的な仕様を備えた「水素技術センター」を整備し、水素ステーション全体または部品・構成機器の一層の安全・安心に資する技術開発、並びに水素ステーションの運転・管理手法の更なる高度化をはかる技術開発を行う。

本研究開発は、水素供給利用技術協会が、実環境下における安全運用技術の研究開発に係る以下について、実施項目ごとに適切な検討体制を構築して進めるものとする。

- (1) 水素技術センター整備
- (2) 実使用環境下における評価技術の実証
- (3) セルフ対応関連技術の実証
- (4) 低コストステーション技術の安全性検討



2. 研究開発目標

2.1 水素技術センター整備

(1) 研究開発目標

商用ステーションの標準的な仕様を備えた水素技術センターの建設を完了する。

(2) 設定の理由

国内においては実証研究の終了後、商用ステーションの導入が進み、耐久性等の評価が実施できる水素ステーションは存在しない。商用ステーションの導入拡大に伴い、ステーションでの使用を想定した実環境下での各種評価試験の重要性は今後さらに高まるものと思われる。

そこで、商用ステーションの標準的な仕様を備えた水素技術センターを建設し、実環境下での各種評価試験を実施可能とする。

さらに、水素技術センターを用いて、現在実施中の安全基盤整備事業(トレーニングセンター構想)においての活用や低コストステーションの設備仕様検討も視野に入れて設計する。

2.2 実使用環境下における評価技術の実証

(1) 研究開発目標

他の NEDO 事業と連携し、開発品、充填プロトコル、計量技術の実証評価を行い実環境下での実用性を確認するとともに人材育成・技術伝承及びトレーニングの実環境下での実行性を確認する。

(2) 設定の理由

水素関連技術の開発において、水素ステーションでの実使用を想定した評価は、より高次元の安全性を確保する上で重要な研究開発と位置づけられる。水素技術センターの充填設備の能力範囲内で実施できる条件の中で、開発品の実証、充填プロトコルの実証、人材育成・技術伝承及びトレーニング、計量技術の実証評価を行う。なお、開発品の実証については、NEDO 事業「タイプ2複合容器蓄圧器の研究開発」、「水素ステーションの高圧水素用ホースとシールシステムに関する研究開発」等と、充填プロトコルの実証については、NEDO 事業「燃料電池自動車への水素充填時における過充填防止のための措置に係る技術基準の見直し等に関する研究開発」と、人材育成・技術伝承及びトレーニングについては、NEDO 事業「水素ステーション高度安全・安心技術開発」と、計量技術の実証評価については、NEDO 事業「水素ステーションにおける水素計量管理方法に関する研究開発」と連携し進める。

2.3 セルフ対応関連技術の実証

(1) 研究開発目標

他の NEDO 事業と連携し、現行の氷結対応技術の実環境下での実用性を確認する。

(2) 設定の理由

セルフ充填の実現のためには、円滑なノズルの脱着や海外で認められるノズルの落下事例を防止するための対応技術が求められている。更により一層の安全を目指したセルフ充填の実現のためには、現状では検討されていないセルフ化充填向け新規技術を具現化させ、効果の見極めを行うことが必要である。本テーマでは水素技術センターにてセルフ対応関連技術の試験データを取得・分析することを主眼とする。なお、本テーマの実施にあたっては、一般財団法人 石油エネルギー技術センターが NEDO から受託している「水素利用技術研究開発事業 / 燃料電池自動車及び水素供給インフラの国内規制適正化、国際基準調和・国際標準化に関する研究開発 / 水素ステーションの設置・運用等における規制の適正化に関する研究開発」と連携して進めることとする。

2.4 低コストステーション技術の安全性検討

(1) 研究開発目標

ステーション設備仕様の抜本的な見直し検証の試験計画、低コスト設備仕様の充填制御の安全性/運用性検証の試験計画、次世代プロトコルや直充填制御を活用したステーションコスト低減の検証計画を決定し、検証試験を水素技術センターで実施する。

(2) 設定の理由

普及期の安全・安心な低コストステーションが求められており、水素利用技術研究開発事業において実施してきた水素ステーションに係る技術開発の検証に取り組み、2 億円水素ステーションの目途付けを行う必要がある。そこで、低コストステーションの設備仕様検討及び安全性検証を実施する。

3. 研究開発成果

3.1 研究開発成果、達成度

(1) 水素技術センター整備(達成度:○)

候補地の選定

水素技術センターの設備を建設する候補地選定にあたって、時間的な制約もあることから予め絞り込みを行った。自治体の経験や対応等を考慮すると、これまで水素インフラ関連における技術開発研究等の取組み実績のある、福岡県(九州大学、HyTReC)、山梨県(FC関連研究)、茨城県(JARI・HySEF)の3県に絞られた。一方、立地についてのメーカーヒアリングを実施した結果も併せて、事業実施上の効率等を考慮して東日本の2県(山梨県、茨城県)に絞り込み、候補地の選定作業を実施した。

その後、2県の候補地のヒアリング並びに比較を行い、他の NEDO 事業との連携等も期待できる、山梨県を設置場所として選定した。



図1 建設地周辺

センター仕様検討

水素技術センターは、商用ステーションの標準的な仕様を備えた充填施設とする前提として、国際標準となっている最高充填圧力 87.5MPa の充填にも対応可能な施設 とすることで、NEDO 他事業で開発されている様な開発品の実環境下における安全性や実用性を確認できる仕様となるよう検討を行った。

また、低コストステーション設備仕様・技術の検討を行うため、蓄圧器を介さない直充填制御を可能と出来るよう充填制御を柔軟に変更できる仕様となるよう検討を行った。

以下に主要設備の仕様及びフローを示す。

表1 水素技術センター仕様

設備	仕様
受入設備	19.6MPa カードル3 基受け入れ可能
圧縮機	流量: 340Nm ³ /h 以上 吐出圧: 87.5MPa
蓄圧器	常用圧力: 87.5MPa 容量: 300L x 4 本 材質: 炭素繊維強化プラスチック(CFRP)製(TyPE3)
ディスペンサー	常用圧力: 87.5MPa(ホースまで) JPEC-S0003 の充填に加え、直充填制御等にも対応可能

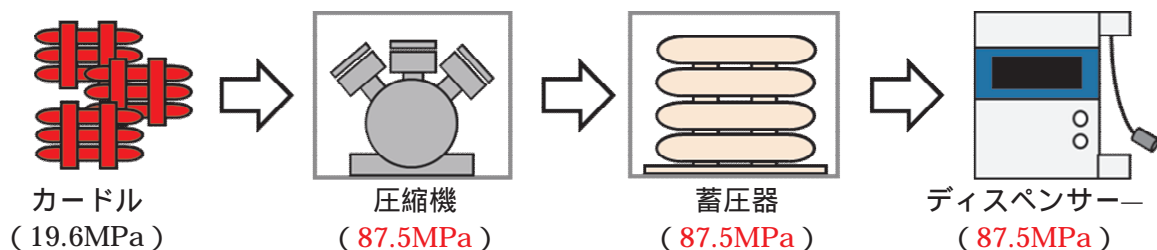


図2 フロー

高圧ガス保安法上、一般高圧ガス保安規則7条の3で建設する商用ステーションでは82MPaを超えた充填が出来ないため、一般商用ステーションでは87.5MPaの各種評価試験を実施することが困難である。一方、水素技術センターは一般高圧ガス保安規則6条で建設するため82MPaの上限に縛られることなく評価試験を実施することが可能。

センター整備

上述の仕様検討結果を踏まえ、2017年1月より建設プロジェクトを開始し、基本・詳細設計を行った。国内で事例のほとんどない87.5MPaの水素ステーション相当の試験設備の建設・運用となるため、高圧化に伴う建設時のリスク低減及び運用後のトラブルの未然防止を目的として、セーフティレビューを実施した。

具体的には、センター設備を主要機器毎(ノード)に分割し、それぞれの機器に対し、流量、圧力、温度のデビエーション等が発生した場合のリスクを抽出した。その際にリスクの抜け漏れがなるべく発生しないようにするため、表2の通り、デビエーションリストを作成し、各ノードに対し、そのデビエーションが起こる原因、現状の対策、(必要があれば)追加検討を実施した。その検討結果の一例を表3に示す。

表2 デビエーションリスト

	NO/Don't 無	Less 量的減少	More 量的増加	Reverse 逆転	Part of 質的減少	As well as 質的増加	Other Than 想定外
Flow 流量	No Flow 流れ停止	Low Flow 流量減少	High Flow 流量増加	Reverse Flow 逆流	-	-	Relief 圧力放出設備
Pressure 圧力	Vacuum 真空	Low Pressure 圧力低下	High Pressure 圧力上昇	-	-	-	Sampling サンプリング
Temperat ure 温度	-	Low Temperature 温度低下	High Temperature 温度上昇	-	-	-	Corrosion/Ero sion 腐食 Maintenance メンテナンス

表3 セーフティレビューワークシート(一例)

検討部位(配管/機器) : 水素圧縮機 (C-11)	P&ID 番号 : D-D6-12339-01-101
ガイドワード : 無/減少	Deviation/ずれ : 流量 無/減少

番号	パターン	想定される原因	予想される結果	現在の対策	追加検討・提言
3A-1	1,2	水素流量 無/減少 C-11 故障	V-11A~D への 蓄ガス不可能	C-11 異常(オイル圧力、オイルレベル等)によりC-11 ESD C-11 停止で XV213,214 閉	なし

その後、効率的な運用等を配慮した設備配置等を検討し、6月より現地工事を開始した。設計および現地工事工程および水素技術センター完成予想図は表4、図3の通り。

表4 建設工事工程表

項目	2016年												2017年										
	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月				
マイルストーン	見積プロジェクトスタート									建設プロジェクトスタート					現地工事開始			試運転開始	引渡し				
1. 設計	基本設計条件書作成	基本設計仕様	見積積算業務		再基本設計仕様	再見積積算業務			機器購入引合(長納期品)	基本設計	詳細設計												
2. 現地工事関係									現地工事発注引合	機器購入発注(長納期品)	現地工事発注				仮設工事	土木建築工事	建築確認完成検査	高圧ガス完成検査	機器据付	配管・電気・計装工事	試運転		

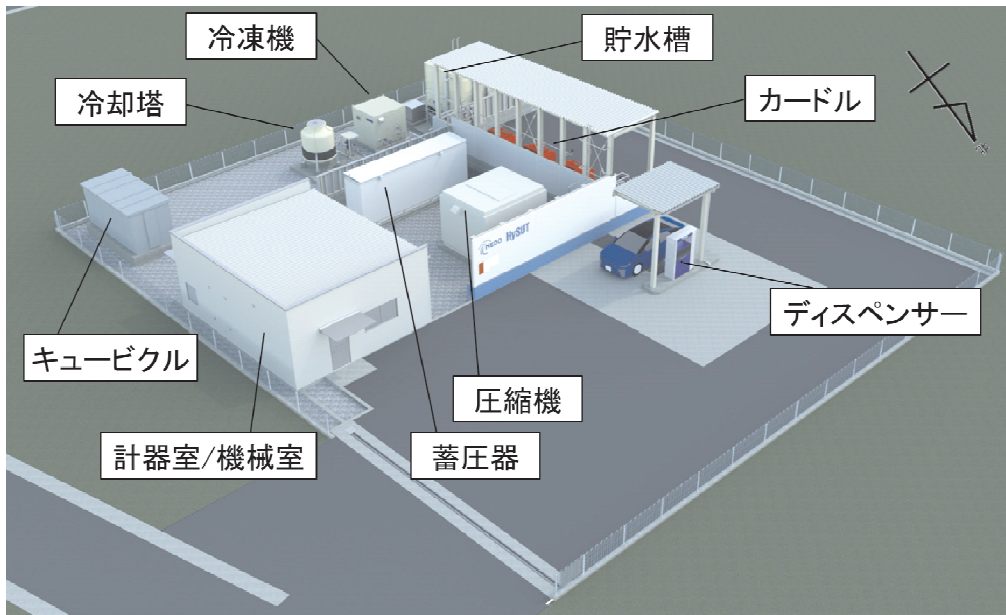


図3 水素技術センター完成予想図

(2)実使用環境下における評価技術の実証(達成度:○)

水素技術センターで行う実使用環境下における製品評価の試験方法、必要な試験設備について、他のNEDO 事業の事例や既知の事例を含め調査し、本センターにおいて実施可能である以下の項目について、詳細試験計画の検討を実施した。

開発品の実証

NEDO 事業「水素ステーションの高圧水素用ホースとシールシステムに関する研究開発」テーマと連携し、横浜ゴムが開発中の 87.5MPa 充填ホースの実証を計画した。加えて、充填回数の増加を目的とし、他の試験や試運転においても本ホースを使用することを計画した(100 回程度の充填が出来ると想定)。

また、NEDO 事業「タイプ2複合容器蓄圧器の研究開発」テーマとの情報交換を実施し、本事業期間中の設置は困難であったが、事業終了後の設置を検討し、JFE コンテナが作成する KHK への特定設備事前評価申請書の想定設置場所を水素技術センターとすることで合意した。

充填プロトコルの実証

NEDO 事業「燃料電池自動車への水素充填時における過充填防止のための措置に係る技術基準の見直し等に関する研究開発」テーマと連携し、商用ステーションで通常運用されていない充填プロトコルの実用性検証を計画した。具体的にはタンクカテゴリー:7-10 kg、水素温度:T30 を中心とした充填プロトコルの実証を計画した。HySUT 号を利用することで、タンク容量が7-10 kg の車両を確保し、タンク容積の通信のやりとりに関し、ステーションの制御にて対応することで試験を実施することを予定している。

計量技術の実証

NEDO 事業「水素ステーションにおける水素計量管理方法に関する研究開発」テーマと連携し、マスターメータ法と重量法の比較試験の実証を計画した。また、蓄圧器を介さない直充填制御を利用し、直充填を実施した際の計量器の精度確認試験を行うことを計画した。

人材育成・技術伝承及びトレーニング

NEDO 事業「水素ステーション高度安全・安心技術開発」テーマで作成する「水素ステーション運営者訓練カリキュラム」に基づき、実際に本センターで一連の運転・設備管理実習や非常時シナリオ訓練等を計画した。

(3)セルフ対応関連技術の実証(達成度:○)

商用水素ステーション等での氷結発生状況やノズル落下の発生状況を調査すると共に、他 NEDO 事業で取り組んでいる氷結対応やノズル落下防止技術の取り組みを調査し、現行の氷結対応技術について 5 台連続充填を用いて実施することを計画した。

(4)低コストステーション技術の安全性検討(達成度:○)

普及段階の実使用条件を踏まえたステーション設備仕様の抜本的な見直し検証、低コスト設備仕様を前提とした充填制御の安全性/運用性検証、次世代プロトコルを活用したステーションコスト低減の検証を実施するため、水素技術センターの仕様を検討し発注仕様に反映した。

加えて、以下の試験計画の検討を行った。

- 1)普及段階の実使用条件を踏まえたステーション設備仕様の抜本的な見直し検討
- 2)低コスト設備仕様を前提とした充填制御の安全性/運用性検討
- 3)次世代プロトコルを活用したステーションコスト低減の検討

(2)～(4)の試験については効率的な試験実施により試験回数を確保すべく、相互に連携をとり表 5 の試験スケジュールにて試験を実施する。

表 5 試験実施工程

実施項目	試験回数 (想定)	平成29年	平成30年	
		12月	1月	2月
1.実使用環境下における評価技術の実証				
1-1 開発品の実証	100回	[Orange bar spanning Dec 2017 to Feb 2018]		
1-2 充填プロトコルの実証	20回	[Green bar in Dec 2017]		
1-3 計量技術の実証	16回	[Blue bar in Dec 2017]		
2.セルフ対応関連技術の実証	5×2回		[Purple bar in Jan 2018]	
3. 技術伝承・トレーニング	3回 (2~3日間/回) ※トレーニング回数	[Pink bar in Dec 2017]	[Pink bar in Jan 2018]	[Pink bar in Feb 2018]
4. 低コストST技術の安全性検討	55回	[Teal bar in Dec 2017]	[Teal bar in Jan 2018]	[Teal bar in Feb 2018]

3.2 成果の意義

(1)水素技術センター整備

商用ステーションの展開に伴い、開発品等の実証可能なステーションがなくなっている状況下において、ステーション機器の更なる性能向上、開発品の商用ステーションでの普及促進、商用ステーションで露見したラボレベルでは明らかにならなかった技術的課題の解決を行う場として提供できる。

ステーション従業員のスキルアップや知識の向上によるステーションの安全性向上のための育成施設として利用できる。

(2)実使用環境下における評価技術の実証

開発品の実証

87.5MPa 充填ホースの安全性及び実用性を確認できる。また、NEDO 事業「水素ステーションの高圧水素用ホースとシールシステムに関する研究開発」テーマ事業への実環境下での充填データの提供が可能となる。

低コストを目的とした NEDO 開発品の商用ステーションへの導入促進が可能となり、ステーション建設コストの低減に寄与できる。

充填プロトコルの実証

実環境下における商用ステーションで通常運用されていない充填プロトコルの実用性を確認できる。また、「燃料電池自動車への水素充填時における過充填防止のための措置に係る技術基準の見直し等に関する研究開発」テーマで実施している充填性能確認ガイドラインの改定のためのデータ取得・提供を行い、商用ステーションの建設・運用コストの低減に貢献できる。

計量技術の実証

マスターメータ試験装置の実環境下での実用性を確認できる。また「水素ステーションにおける水素計量管理方法に関する研究開発」テーマで実施しているマスターメータ法による検査手順を運用ガイドラインに追記するためのデータ取得・提供を行うことができる。

人材育成・技術伝承及びトレーニング

「水素ステーション運営者訓練カリキュラム」を本センターで運用することで実行性を確認できる。また、「水素ステーション高度安全・安心技術開発」テーマに本センターでのトレーニング結果をフィードバックすることで、商用ステーション従業員の技術力や知識の向上による水素ステーションの安全性向上、教育・訓練内容、技能レベルの標準化、水素ステーションを安全かつ円滑に運営できる人材を育成し、人材不足解消に貢献することができる。

(3)セルフ対応関連技術の実証

現行の氷結対応技術の実環境下での実用性を確認できる。

(4)低コストステーション技術の安全性検討

普及段階の実使用条件を踏まえたステーション設備仕様の抜本的な見直しを行い、適正な仕様を明らかにする。また、低コスト設備仕様を前提とした充填制御の安全性/運用性を明らかにし、低コスト仕様の可能性を示す。加えて、次世代プロトコルを活用したステーションコスト低減を明確にする。

4.まとめ及び課題、事業化までのシナリオ

<まとめ>

商用ステーションの標準的な仕様に加え、国際標準となっている 87.5MPa 対応機器の評価も可能な施設を建設した。また、低コストステーション設備仕様・技術の実証試験を可能とすべく、蓄圧器を介さない直充填制御を可能とする充填設備とした。

各種実証試験については、他の NEDO 事業と連携をとるなどして、試験内容を検討した。また相互の実施項目について連携し効率的な試験スケジュールを計画した。

<課題、事業化までのシナリオ>

当センターを NEDO 事業等で継続的に利用することで、他の商用ステーションでは実現困難な実環境下における耐久性・実用性等の実証試験が可能となり、更なるステーションの低コスト化、安全性向上に貢献できる。また、海外で標準となっている最高充填圧力 87.5MPa の充填を実環境下で国内で唯一可能な実証試験場として、87.5MPa 対応機器の評価を実施することで日本の国際競争力向上に寄与することができる。

5. 研究発表・特許等

- 研究発表・講演、文献等、その他 -

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	平成 28 年 11 月	(プレスリリース)	水素エネルギー関連産業の集積に向けた取り組みに関する協定の締結について	HySUT (山梨県との共同実施)
2	平成 28 年 11 月	(プレスリリース)	水素技術センター(山梨県)の設計及び試験設備の検討について	三菱化工機(株)

(III-10)「水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全基盤に関する研究開発 / 四大都市圏から全国普及に向けた水素ネットワークの技術課題に関する検討」

委託先：(一財)九州環境管理協会

成果ガリ(実施期間：平成29年度)

- ・九州地域(主に福岡県)の乗用車の保有・走行条件、水素供給状況を調査
- ・乗用車の保有状況、分布状況からFCV普及および水素ステーションの配置方針(普及シナリオ)を構築
- ・普及シナリオを成立させるための条件を提示し、実現に際しての技術的課題を抽出する

背景/研究内容・目的

2010年7月に燃料電池実用化推進協議会により、2015年のFCV一般ユーザーへの普及開始に向けたシナリオが産業界の総意として提案された。さらに、2011年1月には自動車メーカー及び水素供給事業者13社が共同声明を発表し、自動車メーカーがFCV量産車を2015年に四大都市圏を中心とした国内市場への導入と一般ユーザーへの販売開始を目指し開発を進め、水素供給事業者が2015年までにFCV量産車の販売台数の見通しに応じて100箇所程度の水素供給インフラの先行整備を目指すこと等が示され、現在までに100箇所程度の水素ステーションが整備されてきた。本調査では、FCV及び水素供給インフラの本格的普及期である2020年以降を想定した普及シナリオを設定し、これに基づき技術的課題を抽出する。

研究目標

実施項目	目標
A) 地域特性調査	水素供給源の分布、再生可能エネルギー利用状況、既存SSの活用ポテンシャル把握
B) 水素ステーションの適正配置とFCV普及シナリオ検討	FCV・水素ステーションの適正配置と成立条件の提示
C) 水素ステーション普及にあたっての給油所活用等における課題抽出	技術的課題の抽出
D) 課題に係る因子間の関連性検討	課題因子間の関連性に対する対応優先度の提示
E) 課題解決の方向性の検討	仕様目標の提示、給油所活用方向性検討

実施体制及び分担等



これまでの実施内容 / 研究成果

- ・対象地域(九州地域、主に福岡都市圏・福岡県)における乗用車保有特性を調査
- ・乗用車保有台数は人口に比例し、人口集地域に分布する特徴、FCVも同様に普及する可能性
- ・既存水素ステーション・既存SSは人口集地域に偏在、FCVへの水素供給も同様に効果が期待
- ・水素供給ポテンシャルを有する石化コンビナート、製鉄所は沿岸部に所在、同再生可能エネルギー事業は資源分布に依存し、オンサイトステーションとしてのポテンシャルを有する
- ・FCVの遠距離利用(観光資源分布との関連)を可能にするための基幹水素ステーション配置の必要
- ・基幹水素ステーション配置として高速道路のSA併設が有効、ことから既存SSへ移動水素ステーションによる水素供給が効果的
- ・普及シナリオモデルへ反映、適正配置条件をシミュレーションにより算出
- ・普及の初期段階では、相当数のFCVの集中配置が必要(市民への「普及の見える化」)

今後の課題

- ・既存SSを活用した水素供給ネットワーク構築の四大都市圏への水平展開

研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
A) 地域特性調査	乗用車と水素供給源の分布特性	(実施中)
B) 水素ステーションの適正配置とFCV普及シナリオ検討	基幹水素ステーションの配置と既存SSを活用した水素供給ネットワーク案の構築と可視化	(実施中)
C) 水素ステーション普及にあたっての給油所活用等における課題抽出	ヒアリング等	(実施中)
D) 課題に係る因子間の関連性検討	モデルの感度解析による課題の関連表	(実施予定)
E) 課題解決の方向性の検討	仕様目標提示、給油所活用方向性検討	(実施予定)

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
0	0	0	0

課題番号：III-10

水素利用技術研究開発事業 / 水素ステーション安全基盤に関する研究開発 /

四大都市圏から全国普及に向けた水素ネットワークの技術課題に関する検討

一般財団法人九州環境管理協会

1. 研究開発概要

水素ステーション普及を早期に実現させるために、FCV の将来における政府の導入目標台数に基づき、新規水素ステーション建設に係る課題の改善策として既存給油所(既存 SS)を活用し、水素の需要、供給の両面から因子間の関連性を考慮して具体的な水素ステーションの適正配置をモデル化・設定し、その実現にあたって解決すべき技術的課題と、それに関連する因子および関連性を抽出する。

本調査では、我が国の自動車の生産拠点の一つである「九州地域」を調査フィールドとして、当該地域ですでに多くの水素ステーションが建設されている福岡県における今後整備すべき水素ステーションの、既存 SS 施設を活用した適正配置を検討する。水素の安定供給が図られ FCV が安全・安心をもって走行するために必要な課題(FCV および水素供給インフラの本格的普及に向けた技術的課題)を、平時・緊急時などのいろいろな入力条件を変えたケーススタディ、および既存給油事業者からのアンケートなどにより抽出し、水素の供給・需要ネットワーク形成における課題間の連関表として出力し、解決のための方向性を示す。

2. 研究開発目標

本調査における目標は、

対象地域特性の把握(水素ネットワークに関する現状調査)

水素ステーションの適正配置と FCV 普及シナリオの検討

水素ステーション普及にあたっての給油所活用における課題抽出(地域普及、全国普及に向けた技術的課題の抽出)

課題に係る因子間の関連性の検討

課題解決の方向性の検討

である。

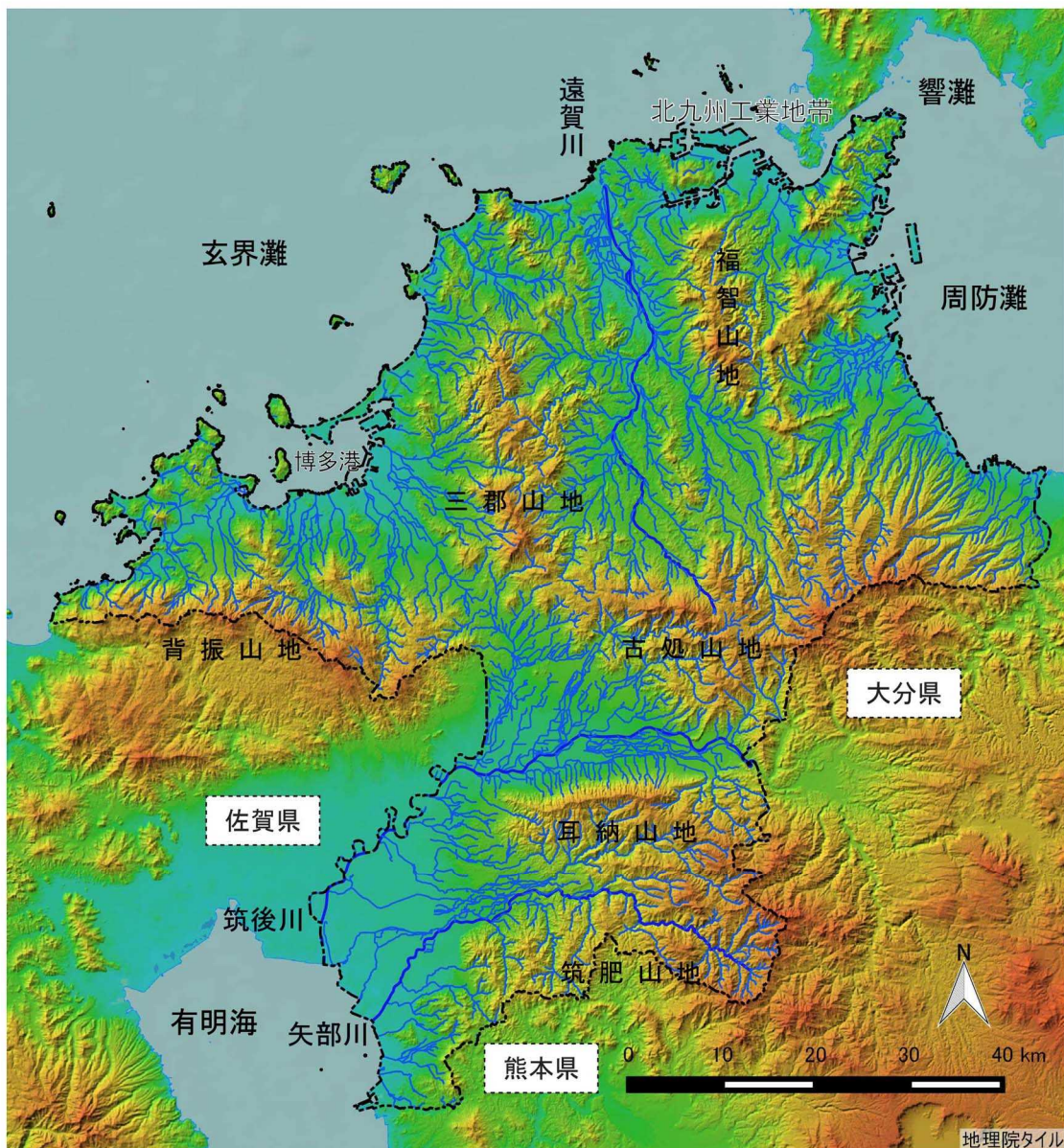
3. 研究開発成果

3.1 研究開発成果、達成度

(1) 対象地域特性の把握(水素ネットワークに関する現状把握) < >

地勢

福岡県の北部には、玄界灘、響灘、周防灘が、西南部には有明海が広がり、三郡山地、脊振山地、耳納山地等の山地と、その間を流れる遠賀川、筑後川、矢部川、山国川等の河川、河川の流域に開けた肥沃な平野など自然に恵まれた地域である(図1)。九州の最北部に位置し、大陸にも近いという地理的条件から、渡り鳥の中継地としても重要な役割を果たしている。また、アジア・世界に繋がる国際拠点港湾である博多港と北九州工業地帯を有し、水素の供給における有利な条件が整っている。



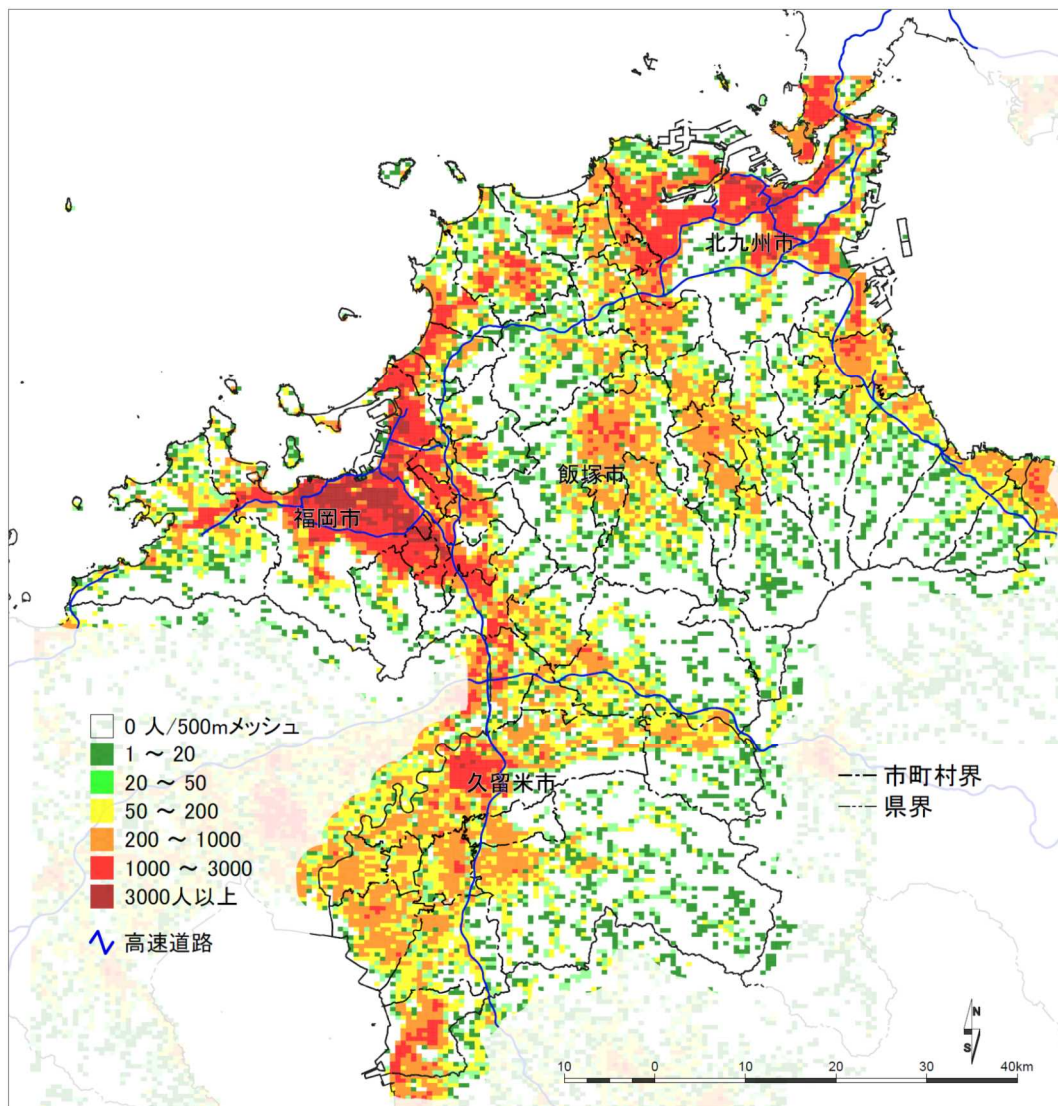
出典：国土地理院「地理院タイル(色別標高図)」

図1 地勢

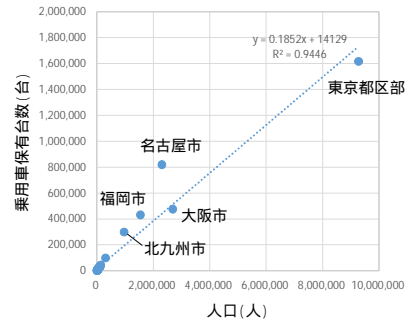
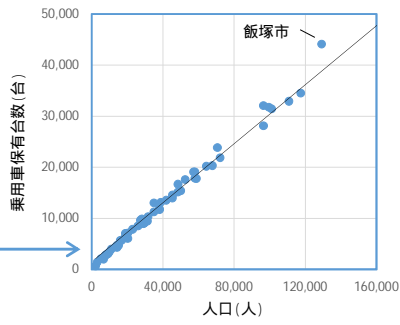
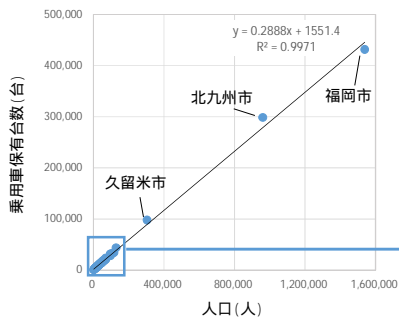
人口分布と自動車保有台数

福岡県は全国第9位の人口規模となっており、九州の総人口の約35%を占め、人口集積が高い。500mメッシュ内の人口分布(図2)をみると、政令市である福岡市・北九州市の都市圏及び久留米市と飯塚市の人口密度が高い。人口が集積している地域は、川沿いの平野であり、福岡市、北九州市、久留米市においては、高速道路が通って物流の拠点となっている。

県内市町村の乗用車保有台数は、人口が密集している福岡市、北九州市、久留米市、飯塚市の順で多く、人口との相関がみられている(図3-)。福岡市は、県内では他都市より一人あたりの乗用車保有台数が少ないが、他都市圏と比較すると(図3-)、東京都区部及び大阪市よりは多くなっている。図4に示す交通手段分担率をみると、一人あたりの自動車保有台数が少ない東京都区部と大阪市で自動車分担率が低くなっており、公共交通機関の発達のため乗用車の保有台数が少ないと考えられる。しかし、東京都区部と大阪市の公共交通機関においては、鉄道の分担率が多くを占め、バスの分担率は福岡市と北九州市が高くなっている。この傾向から、今後乗用車以外の車種における燃料電池の導入について、福岡県内のFCバス普及の可能性が考えられる。



出典：総務省統計局「平成27年国勢調査」、国土交通省国土政策局「国土数値情報」
図2 人口分布(500mメッシュ)



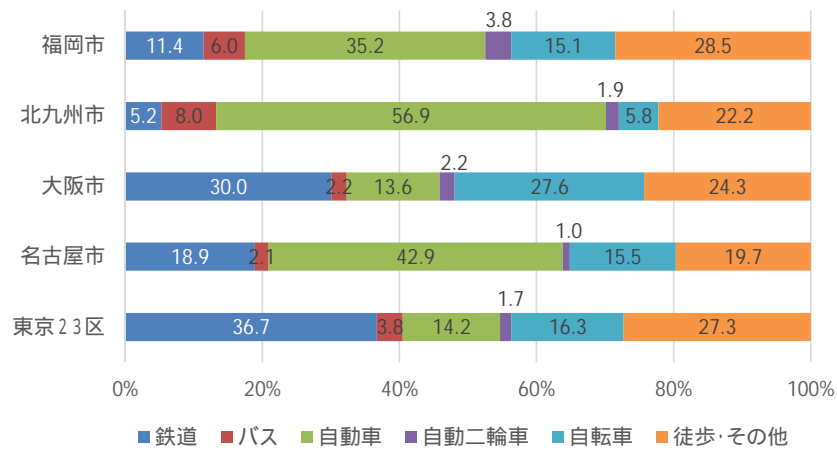
出典：「福岡県統計年鑑国」、「大都市比較統計年表」

図 3 -

図 3 -

図 3 -

図 3 人口と乗用車保有台数の関連



出典：国土交通省「平成 22 年度全国都市交通特性調査」

図 4 平日の代表交通手段分担率(平成 22 年)

FCV 保有状況

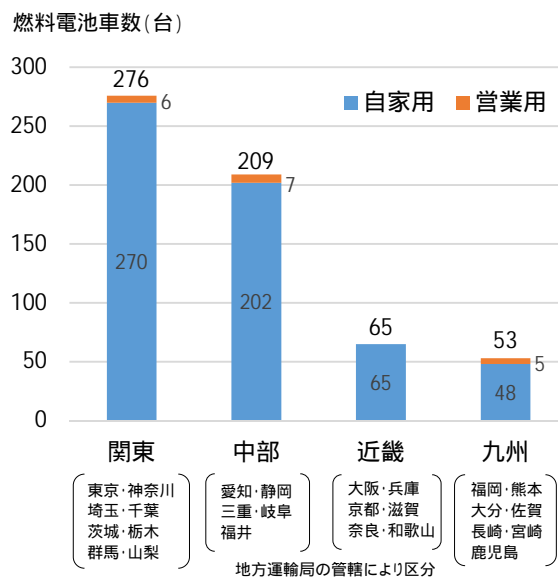
福岡県では、FCV の先進的な普及拠点の形成を図るため、地元の産学官が一体となって、「ふくおか FCV クラブ」を 2014 年に設立した。地域を挙げて、FCV の普及と水素ステーションの整備を一体的に推進している。そのため九州地域において福岡県の FCV 保有台数は 44 台と最も多い(表 1)。しかし、2020 年の国の普及目標 1,800 台に対して 2.4%しか達成できていない。水素ステーションは、福岡県に 10 か所、佐賀県・熊本県・大分県にそれぞれ 1 か所整備となっており、福岡以外の県では普及が進んでいない。FCV の保有状況を全国地域別にみると、関東・中部地域において普及が進んでいる(図 5)。

表 1 九州地域における FCV の保有状況及び普及目標

(単位:台)

県	保有状況		普及目標		
	2016 年	全国比	2020 年	2025 年	2030 年
福岡	44	7.0%	1,800	8,800	35,000
佐賀	5	0.8%	400	1,800	7,100
長崎	0	0.0%	500	2,500	9,900
熊本	1	0.2%	700	3,600	14,300
大分	3	0.5%	500	2,400	9,600
宮崎	0	0.0%	500	2,500	9,900
鹿児島	0	0.0%	700	3,500	14,100
地域合計	53	8.4%	5,000	25,000	100,000

出典：国土交通省九州運輸局「平成 27 年度版九州管内自動車数統計」
経済産業省「水素・燃料電池戦略ロードマップ」

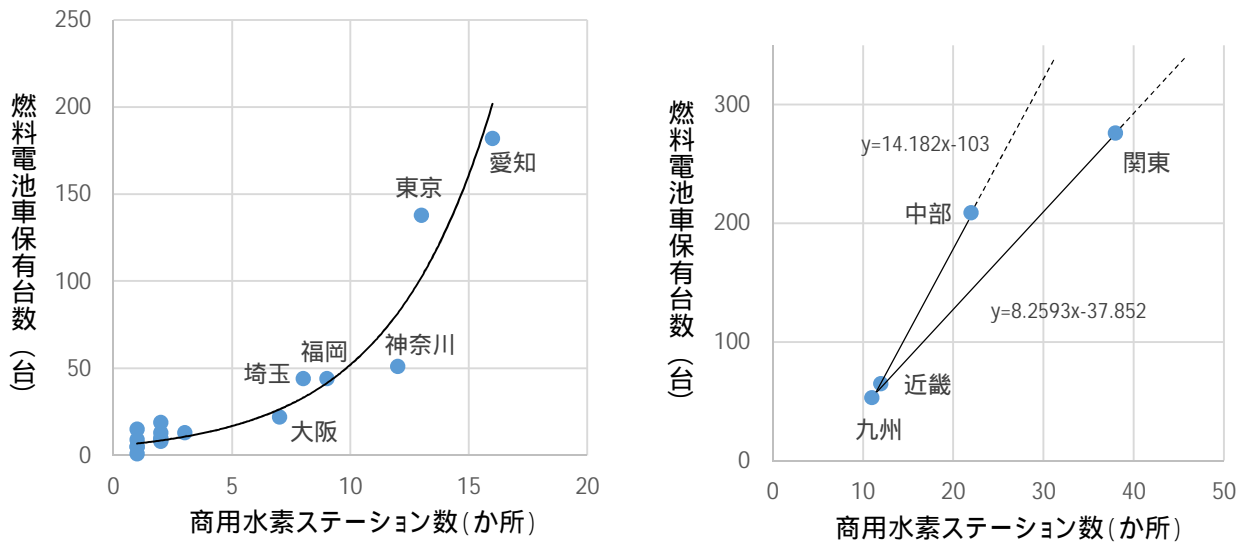


出典：国土交通省九州運輸局「平成 27 年度版九州管内自動車数統計」
一般社団法人次世代自動車振興センター「水素ステーション整備状況」

図 5 全国における FCV の保有状況

水素ステーションと燃料電池車の関係について、水素ステーションの整備が進むと、燃料電池車の普及速度が増加する傾向にある(図6左)。また、水素ステーション1か所あたりの燃料電池車数を計算することで、水素ステーションの配置について比較することができる。関東は7.7(台/か所)、中部は9.5(台/か所)となり、中部のほうが関東よりも効率的な配置ができていることがわかる。図6右のように、九州と中部・関東を結んだ直線の傾きがその効果を表している。

水素ステーションを適正に配置することで、燃料電池車保有者がより多くなり、国の燃料電池の普及目標達成に繋がると考えられる。



出典：国土交通省九州運輸局「平成27年度版九州管内自動車数統計」
一般社団法人次世代自動車振興センター「水素ステーション整備状況」

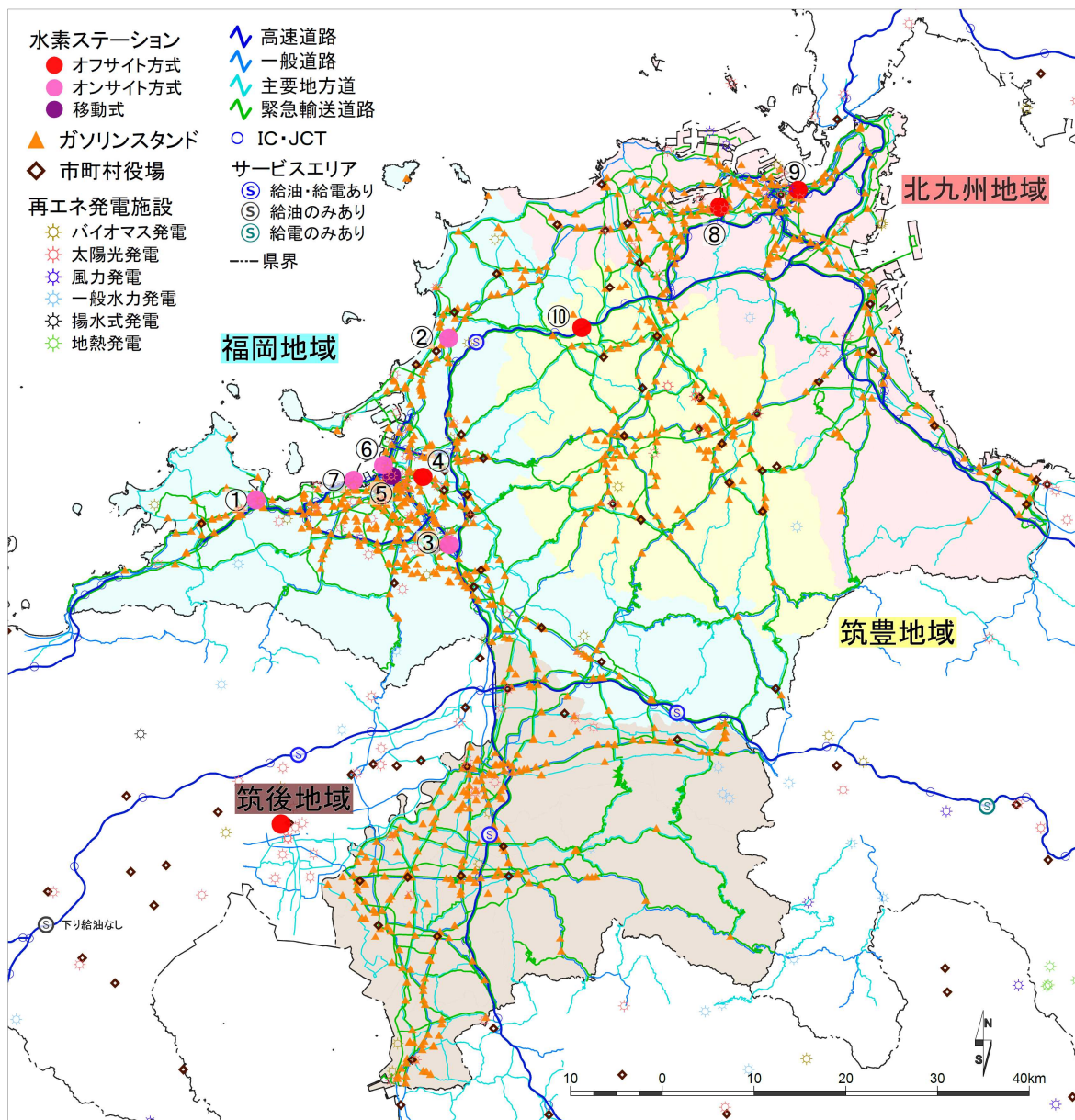
図6 水素ステーション数と燃料電池保有台数の関連

既存水素ステーションの整備状況

県内の水素ステーションは、人口が密集している福岡及び北九州地域の高速道路沿いを中心に配置されている(図7、表2)。

福岡地域には都心部に太陽光発電施設が多く分布し、北九州地域には海岸に響灘風力発電所等の風力発電施設が稼働されており、既設水素ステーションの燃料供給源としての活用が期待できる。また水素ステーションが整備されていない筑豊地域及び筑後地域においては山間部の水力発電施設や清掃工場などで運営しているバイオマス発電施設の活用が考えられる。

新たな水素ステーションの配置においては、ガソリンスタンドが密集している地域は燃料への需要が高いと判断できるため、既存ガソリンスタンドの活用や隣接配置が考えられる。福岡県内を走る高速道路の全てのサービスエリアには給油と給電設備が整備されており、長距離移動や燃料の輸送を考慮すると、サービスエリアの燃料供給所との併設も検討できる。また、FCV の非常時の外部電源としての利用が可能となるよう、役所や避難所への移動経路を考慮する必要がある。



出典：国土交通省国土政策局「国土数値情報」

各ステーションの詳細は次頁の表2に示す。

図7 水素ステーションの整備状況

表 2 水素ステーションの供給方式、供給能力、事業者(福岡県)

地域 ^{*1}	ステーション名称	供給方式 水素供給能力 ^{*2}	事業者	他地域との距離 ³
福岡	① Dr.Driveセルフ伊都店 水素ステーション	オンサイト方式 300Nm ³ /h以上	JXTGエネルギー (株)	北九州：63km 筑豊：45km 筑後：51km
	② Dr.Driveセルフ古賀店 水素ステーション	オンサイト方式 300Nm ³ /h以上	JXTGエネルギー (株)	北九州：39km 筑豊：27km 筑後：59km
	③ Dr.Driveセルフ太宰府インター店 水素ステーション	オンサイト方式 300Nm ³ /h以上	JXTGエネルギー (株)	北九州：45km 筑豊：25km 筑後：37km
	④ Dr.Driveセルフ福岡空港店 水素ステーション	オフサイト方式 300Nm ³ /h以上	JXTGエネルギー (株)	北九州：45km 筑豊：27km 筑後：45km
	⑤ イワタニ水素ステーション 福岡県庁	移動式 100Nm ³ /h以上 300Nm ³ /h未満	岩谷産業 (株)	北九州：48km 筑豊：30km 筑後：46km
	⑥ 東浜水素ステーション	オンサイト方式 (原料：都市ガス) 300Nm ³ /h以上	西部ガス (株)	北九州：48km 筑豊：31km 筑後：48km
	⑦ 福岡市中部水処理センター 水素ステーション	オンサイト方式 (原料：下水バイオガス) 300Nm ³ /h以上	三菱化工機 (株)、福岡市、 九州大学、豊田通商 (株)	北九州：52km 筑豊：34km 筑後：47km
北九州	⑧ 八幡東田水素ステーション	オフサイト方式 300Nm ³ /h以上	JXTGエネルギー (株)	福岡：42km 筑豊：28km 筑後：74km
	⑨ イワタニ水素ステーション小倉	オフサイト方式 300Nm ³ /h以上	岩谷産業 (株)	福岡：50km 筑豊：32km 筑後：79km
筑豊	⑩ 福岡宮田水素ステーション	オフサイト方式 300Nm ³ /h以上	日本エア・リキード (株)	福岡：22km 北九州：25km 筑後：59km

出典：一般社団法人次世代自動車振興センター「水素ステーション整備状況」、福岡県 HP

- 1:福岡県 60 市町村を、地理的、歴史的、経済特性などから、北九州・福岡・筑後・筑豊の 4 地域に分けられる。
- 2:燃料電池自動車 1 台に充填できる水素が約 50Nm³ であり、300Nm³/h の供給能力のステーションの場合、1 時間当たり約 6 台に充填可能な能力があることを示す。充填時間は約 3 分。
- 3:各地域の中心点からステーションとの直線距離。

表 3 (参考)水素ステーションの供給方式、供給能力、事業者(福岡県外)

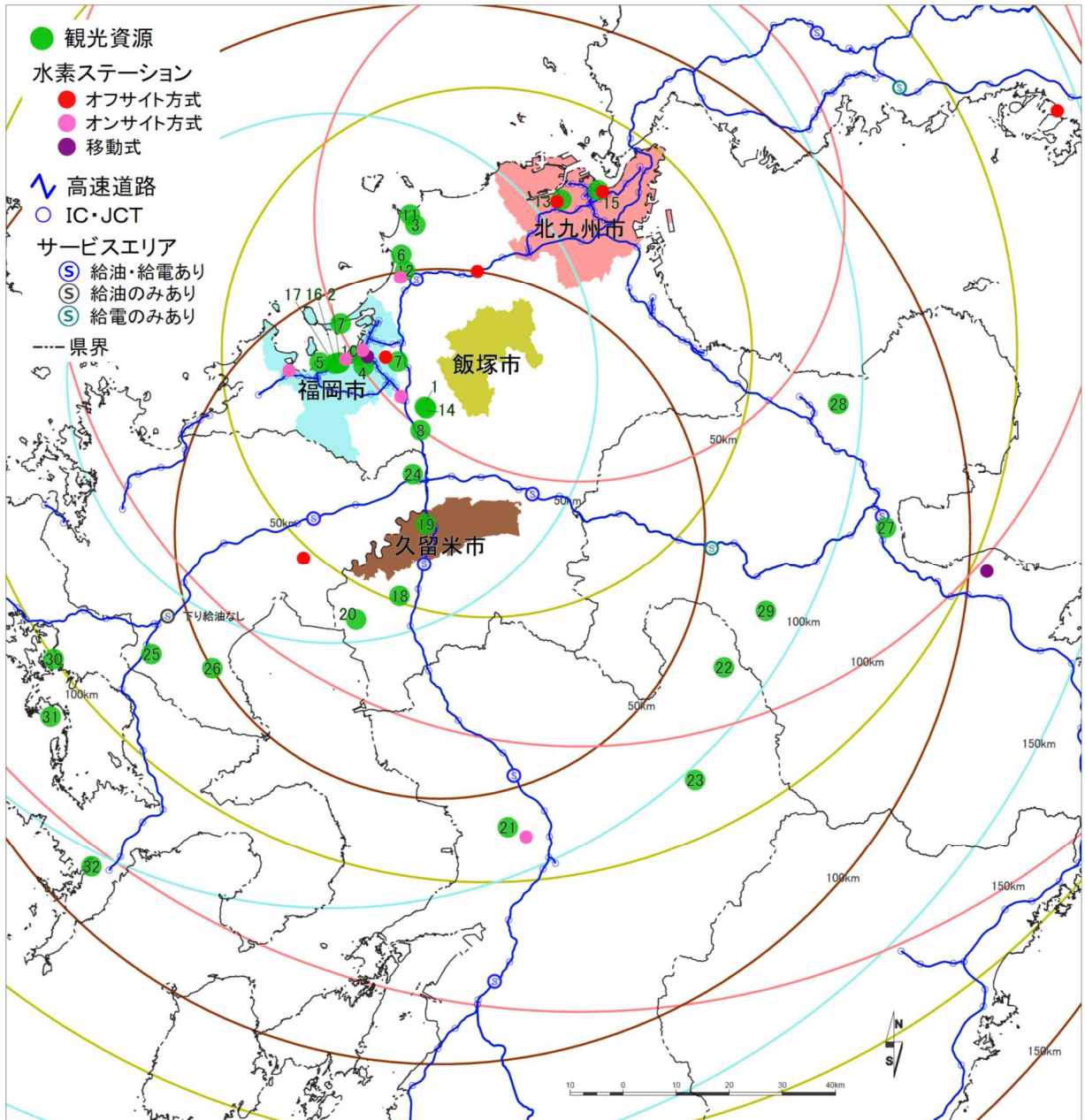
県	ステーション名称	供給方式 水素供給能力	事業者
佐賀県	佐賀水素ステーション	オフサイト方式 100Nm ³ /h以上 300Nm ³ /h未満	日本エア・リキード (株)
熊本県	熊本県庁スマート水素ステーション	オンサイト方式 100Nm ³ /h未満	岩谷産業 (株)
大分県	大分 EBL 水素ステーション	移動式 100Nm ³ /h以上 300Nm ³ /h未満	江藤酸素 (株)

出典：一般社団法人次世代自動車振興センター「水素ステーション整備状況」

遠距離移動と既存水素ステーションの配置

遠距離移動に適切な水素ステーションの配置を考えるために、遠距離移動の目的の一つである観光地の分布と既存水素ステーションの配置状況を図 8 に示す。北部九州 5 県(福岡県・佐賀県・長崎県・熊本県・大分県)の観光地の中で、経路検索サービスにてユーザーが行った検索回数が多い観光地を、福岡県は上位 20 位、その他県は上位 3 位まで示している。福岡県内では、太宰府天満宮が休日に自動車が多く訪れられている。次いで福岡ヤフオクドーム、宗像大社である。

県内で人口及び乗用車保有台数が最も多い福岡市、北九州市、久留米市、飯塚市の中心から直線距離が最も離れているグラバー園(32 番)は、飯塚市と久留米市からは 100km 圏内に位置している。しかし、既設水素ステーションがある福岡市からは 100km、北九州市からは 150km を越えている。FCV の一充填走行距離は約 650km(トヨタ MIRAI の JC08 モード走行パターンによるトヨタ測定値(平成 29 年 9 月時点))であるが、実際の移動距離を直線距離の約 1.5 倍と想定し、現地での移動や燃料欠乏に対する安心感まで考慮すると、1 回の充填で北九州市からグラバー園間を往復することは考えにくい。福岡県外には佐賀県・熊本県・大分県にそれぞれ 1 か所(前頁の表 3 参照)水素ステーションが整備されているが、高速道路へ近接性と供給能力の面から十分とは言えない状況である。



出典：地域経済分析システム RESAS、株式会社ナビタイムジャパン「経路検索条件データ」、国土交通省国土政策局「国土数値情報」

- | | | | |
|-------------|----------------|------------------|-------------|
| 1 太宰府天満宮 | 9 海ノ中道海洋生態科学館 | 17 福岡タワー | 25 嬉野温泉 |
| 2 福岡ヤフオクドーム | 10 マリンメッセ福岡 | 18 水田天満宮 | 26 祐徳稲荷神社 |
| 3 宗像大社 | 11 道の駅むなかた | 19 ゆめタウン久留米 | 27 別府温泉 |
| 4 キャナルシティ博多 | 12 イオンモール福津 | 20 柳川藩主立花邸御花 | 28 宇佐神宮 |
| 5 マリアシティ福岡 | 13 スペースワールド | 21 熊本城 | 29 九重夢大吊橋 |
| 6 宮地嶽神社 | 14 九州国立博物館 | 22 黒川温泉 | 30 ハウステンボス |
| 7 イオンモール福岡 | 15 西日本総合展示場 | 23 阿蘇山 | 31 長崎バイオパーク |
| 8 イオンモール筑紫野 | 16 ヒルトン福岡シーホーク | 24 鳥栖プレミアムアウトレット | 32 グラバー園 |

図8 観光資源の分布(福岡県は上位20位、その他県は上位3位まで)

(2) 水素ステーションの適正配置とFCV普及シナリオの検討

現状調査結果の分析の結果をまとめると、対象地域(九州地域、主に福岡都市圏・福岡県)における乗用車分布特性および水素供給特性として、

- ・乗用車保有台数は人口に比例し、人口集地域に分布する特徴、FCVも同様に普及する可能性
- ・既存水素ステーション・既存SSは人口集地域に偏在、FCVへの水素供給も同様に効果が期待
- ・水素供給ポテンシャルを有する石化コンビナート、製鉄所は沿岸部に所在、同再生可能エネルギー事業は資源分布に依存し、オンサイトステーションとしてのポテンシャルを有する。

が得られた。この結果から、水素ステーションの配置にあたっては、

- ・FCVの遠距離利用(観光資源分布との関連)を可能にするための基幹水素ステーション配置の必要
- ・基幹水素ステーション配置として高速道路のSA併設が有効、ここから既存SSへ移動水素ステーションによる水素供給が効果的
- ・愛知県でのFCV普及台数と配置密度は、ほかの四大都市圏に比べ高く、水素ステーションの目標配置基準の可能性

を検討する。これらを普及シナリオモデルに前提条件として反映させ、適正配置条件(普及シナリオ)をシミュレーションにより算出する。

一方、FCVの設定台数については、ロードマップによる段階的な目標台数を基本とするが、そのエリアへの配分は、“FCVおよび水素ステーション普及感の見える化”に留意し、初期段階の普及の加速をはかるため福岡市域への相当台数の集中配置などを検討する。

FCVのエリア配分の決定と道路距離の算出

シミュレーションの実施に際しては、水素ステーションの配置だけでなく、水素ステーション周辺にどの程度のFCVが導入もしくは走行しているかが重要な要素となる。

そこで、本事業では、FCV台数を乗用車1800台(2020年福岡県FCV普及目標)、水素バス10台とし、それらを人口密度や現在のガソリン車の保有台数分布等の将来のFCV普及状況に密接に関連すると思われる情報に応じて県内各エリア(現在の市町村の行政区域に相当)に配分し、各エリアに存在するFCVの想定台数を決定する。そして地理情報システムソフトウェアArcGIS(Esri社)を用いて水素ステーション間もしくは各エリア間等の道路距離を算出する。

理論上の水素ステーションの最適配置を決定

で構築したシミュレーション実施のための体系を用いて、想定するFCVエリア配分に対して、水素を安定的に供給できるための水素ステーションの理想的な配置をpメディアン問題と呼ばれる数理計画法手法を用いてモデル化して決定する。モデル化に際して、の結果に基づいて水素充填のための許容移動距離等を設定し、実際の水素関連設備の特性が十分に反映されるようにし、シミュレーションの高精度化を図る。なお、数理計画法による解析の実施については、数理計画法ソルバーパッケージGurobi Optimizer(OCTOBER SKY社)を用いて、必要な水素ステーション数およびその最適配置を決定する。

また、シミュレーション結果をArcGISで可視化して、現状の水素ステーション配置との比較を行い、現状配置の妥当性について考察を行う。

現存ステーションを考慮した適正配置および移動ステーションの活用を検討

の解析に加えて、福岡県内にすでに複数の水素ステーションが設置されているため、これを前提とした上で、既存の水素ステーションのみで、2020年時の想定台数である1800台に十分な供給が可能か、また、適正な配置となっているかを検討する。解析の結果、追加設置が必要と思われるエリアにおいては、既存SSの活用(水素併設)・水素ステーションへの転換、または移動式ステーションの活用を含めた再解析を行い、シミュレーションの結果に基づき福岡県下での今後の水素ステーション配置の方向性について提案を行う。

代替案の比較・検討

人口密度の他、自動車保有台数データに基づくFCVのエリア配分をベースにするモデルや、観光地への移動を考慮したモデル、さらに実際の人々の移動を大規模に調査したパーソントリップデータ(福岡県、平成17年度調査版)を用いて交通ネットワーク上の最適配置モデル等についてもシミュレーションを行い、複数の適正配置案を提示して水素供給の安定性や災害時のロバスト性、コスト等の面から比較・検討を行う。

普及シナリオの検討

2020年以降については、NEDO策定のロードマップに従い5年ごとにFCV普及台数を設定し直し、それぞれ必要十分な水素ステーションの配置最適化を行う。シミュレーションの結果に基づき、新たにステーションを追加設置する必要性、またその場合の設置場所を決定するための指針や新規技術などを提案する。

(3)水素ステーション普及にあたっての給油所活用における課題抽出(地域普及、全国普及に向けた技術的課題の抽出)

(2)で構築した具体的な普及シナリオ(="普及の見える化")に基づき、現存の水素ステーションおよび既存SS(給油所)活用による水素供給ネットワークが実現すると仮定した際に生じる当該地域における技術的課題を、給油事業者、企業、自治体等に対するアンケート・ヒアリング結果から抽出する。

(4)課題に係る因子間の関連性の検討

FCV台数によるモデルの感度解析

前述のロードマップで示された普及台数が実現されるかどうかは、経済情勢や新規技術開発の動向など不確定な要素が影響するため、確実ではなく、場合によっては、目標台数より多いことも想定すべきである。そこで、ロードマップで提示されたFCV台数予測に対して、普及台数に確率的要素を取り入れ、台数の増減によって水素ステーションの適正配置がどのように変化するかを分析する。

水素バランス、コストバランスの変化の定量的提示

ヒアリング結果等に基づき現時点の水素ステーションの建設費用、ランニングコストを推計する。その上、製鉄所の副生水素やメガソーラー発電での水電解施設等の水素供給基地から水素供給をモデルに取り入れ、経済在庫モデルをたて、水素ステーションの収益のシミュレーションを行う。もし現状では採算がとれない場合、シミュレーションの結果に基づいて、ステーション存続・普及のために必要なFCV台数、水素仕入れ・供給価格、ランニングコスト等を算出し、今後の発展のために行政機関や関連企業に情報を

提供する。

(5) 課題解決の方向性の検討

アンケート結果や課題の連関表に基づき、課題解決の方向性を検討し、次ステップの検討課題、研究開発テーマとして提案する。また、水素ステーションとしての給油所の活用における課題解決のための検討課題および解決の方向性(技術開発、法整備の必要性、規制緩和、経済的支援制度の必要性など)を提示する。

3.2 成果の意義

本研究成果により、“FCVおよび水素ステーションの普及の見える化”が実現された場合の、基幹ステーションおよび既設ステーションの役割や既存SSの活用条件に対して、数理計画手法によるシミュレーション結果を用いて、定量的な課題提示と対策の方向性を示し、FCV および水素ステーションの普及支援ツールを提供する。