

令和元年度新エネルギー等の保安規制高度化事業
水素導管供給システムの安全性評価事業
(総合調査)

調査報告書

令和2年3月

一般社団法人 日本ガス協会

目 次

I. 調査概要

1. 背景と目的	1
2. 調査実施概要	1
3. 調査実施体制	2
4. 調査内容	7
4. 1 付臭措置に関する技術調査	7
4. 2 水素ガス工作物の技術基準の整備のための技術調査	7
4. 3 他調査の実施者に対する助言等	7
4. 4 委員会の設置、運営	7

II. 調査結果

1. 水素ガス工作物の技術基準の整備のための技術調査	
1. 1 調査の概要	8
1. 2 調査の進め方	8
1. 3 調査の結果	8
1. 4 まとめ	16
2. 付臭措置に関する技術調査	17
2. 1 調査の概要	17
2. 2 調査の進め方	17
2. 3 燃料電池性能への影響調査	18
2. 4 排気臭気への影響調査	25
2. 5 まとめ	27
3. 他調査の実施者に対する助言等	
3. 1 地中および大気中の水素拡散挙動調査及びまとめ	28
3. 2 水素導管の大規模損傷リスク評価及びまとめ	28
4. 委員会の設置、運営	
4. 1 特別専門委員会	30
4. 2 推進ワーキンググループ	30

5. 水素導管供給システムの安全性評価事業のとりまとめ	
5. 1 過去の水素パイプライン供給に係る委託事業の経緯	32
5. 2 過去成果のまとめ	34
5. 3 成果の活用	47
6. 謝辞	49

(別紙1) 水素導管供給システムの安全性評価事業のとりまとめ (4年レビュー)

(別紙2) 過去事業のとりまとめ (10年レビュー)

I. 調査概要

1. 背景と目的

平成 29 年 12 月に開催された「第 2 回再生可能エネルギー・水素等閣僚会議」において、世界に先駆けて水素社会を実現するための「水素基本戦略」が決定され、国内での水素の大量輸送手段として、将来的にコスト・環境性の両面からパイプラインが有力となる可能性があると記載された。また、平成 30 年 7 月に閣議決定された「第 5 次エネルギー基本計画」では、2030 年、2050 年に向けたエネルギー政策の基本的な方向性が示されており、水素社会実現に向けては、上述の水素基本戦略に基づき実行していくと記載されている。

近年では、各自治体や民間企業による「貯蔵」・「輸送」・「利用」も含めた本格的な水素サプライチェーンの構築を目指した実証プロジェクトが各地で実施されており、2020 年の東京オリンピック・パラリンピック競技大会における選手村及び選手村跡地での水素利活用に向けた計画も着々と進んでいる状況にある。

そのような中、水素のパイプライン供給に関する取り組みは、過去に水素供給に関連する調査事業として、地方都市ガス事業天然ガス化促進対策調査「水素供給システム安全性技術調査事業」（平成 17 年度～平成 19 年度）、「水素漏えい検知技術調査事業」（平成 18 年度～平成 20 年度）及び「水素ネットワーク構築導管保安技術調査事業」（平成 23 年度～平成 27 年度）等が実施され、それらを通じて基礎的な技術調査（主に設計・施工面）は完了している。

平成 28 年度以降は、より実用面を考慮し、水素社会システムを想定した際の水素供給の安全性に関する評価のため、「水素導管供給システムの安全性評価事業」（以下、「本調査」という。）を実施しており、水素導管供給システムを実際に運用していく際の維持管理上の課題について、技術調査等を通じて安全かつ合理的な維持管理方法を明らかにすることにより、水素ガスの工作物の技術基準の整備に資することを目的としている。

2. 調査実施概要

本調査事業は、近年、実用化が想定される水素導管の供給形態を見据え、想定される新設の中低圧水素導管供給システムを構成する要素を整理し、その安全を確保するための手法や保安のレベルのあり方等を検討することにより、水素ガスの工作物の技術基準の整備に資することを目的としている。

近年の自治体等における実証モデル、将来の事業モデル及び海外の事例等を元に設定した新設の中低圧水素導管供給システムの構成要素のうち、都市ガスと同様の需要家保安を確保するため、需要家先に設置されるガス遮断機能を有するガスメーターの検討に資する調査を実施した。

また、水素導管供給システムを運用する上で、万が一水素が導管から漏えいした場合の保安を確保するため、都市ガスと同様に付臭措置又はそれに代わる付臭代替措置（漏えい検知装置の設置等）を講じる必要がある。そこで、水素導管供給システムにおける付臭剤の候補として考えられるシクロヘキセンを含有する水素を、脱臭せずに燃料電池にて使用した場合を想定し、燃料電池性能（燃料電池スタック電圧等）への影響及び排気臭気への影響について調査を実施した。

水素導管供給システムを実際に運用していく際に必要な維持管理について、安全かつ合理的な方法を明らかにし、水素ガスの工作物の技術基準の整備に資するため、令和元年度に実施された「令和元年度水素導管供給システムの安全性評価事業（維持管理工法の水素適用性評価（地中および大気中の水素拡散挙動調査）」及び「令和元年度水素導管供給システムの安全性評価事業（水素導管の大規模損傷リスク評価）」（以下「他調査」という。）の実施者に対して必要な助言等を行うとともに、他調査を含む本調査事業を効率的かつ円滑に実施するため、専門家からなる委員会を設置し、水素導管供給システムの安全性評価全体の事業の計画、進捗及び成果について評価等を実施した。

また、平成 28 年度から取り組んでいる「水素導管供給システムの安全性評価事業」を今年度事業の成果をもって、設計・施工のみならず実運用時における維持管理に関する事項の技術調査を終えることから、過去 4 か年分のとりまとめを行った。

3. 調査実施体制

本調査実施にあたっては、日本ガス協会内に設置した事務局組織（技術ユニット技術普及グループ）を中心に、都市ガス事業で培われたガス導管供給に関する専門的な知見を生かし、水素導管供給システムの安全性評価事業全体（他調査を含む）を運営した。また、事業運営に関しては、円滑な進捗のため、適宜、各調査の進捗状況の確認を行いつつ、調査計画策定から最終的な取りまとめの方向性に対する助言を行った。

調査事業の成果に関しては、「水素導管供給システムの安全性評価事業 特別専門委員会」（以下、委員会とする）を設置し（委員の選任を含む）、学識経験者、各調査分野の専門家、ガス事業者等との協議を経た取りまとめを行った。

また、上記委員会の下部組織として「推進ワーキンググループ」を設け、委員会が効率的に運営できるよう、各調査の計画及び進捗状況等について、適宜確認を行った。

図 1. 3. 1 に事業全体の調査実施体制、図 1. 3. 2 に日本ガス協会内の調査実施体制を示し、表 1. 3. 1～1. 3. 3 には委員会等の名簿を示す。

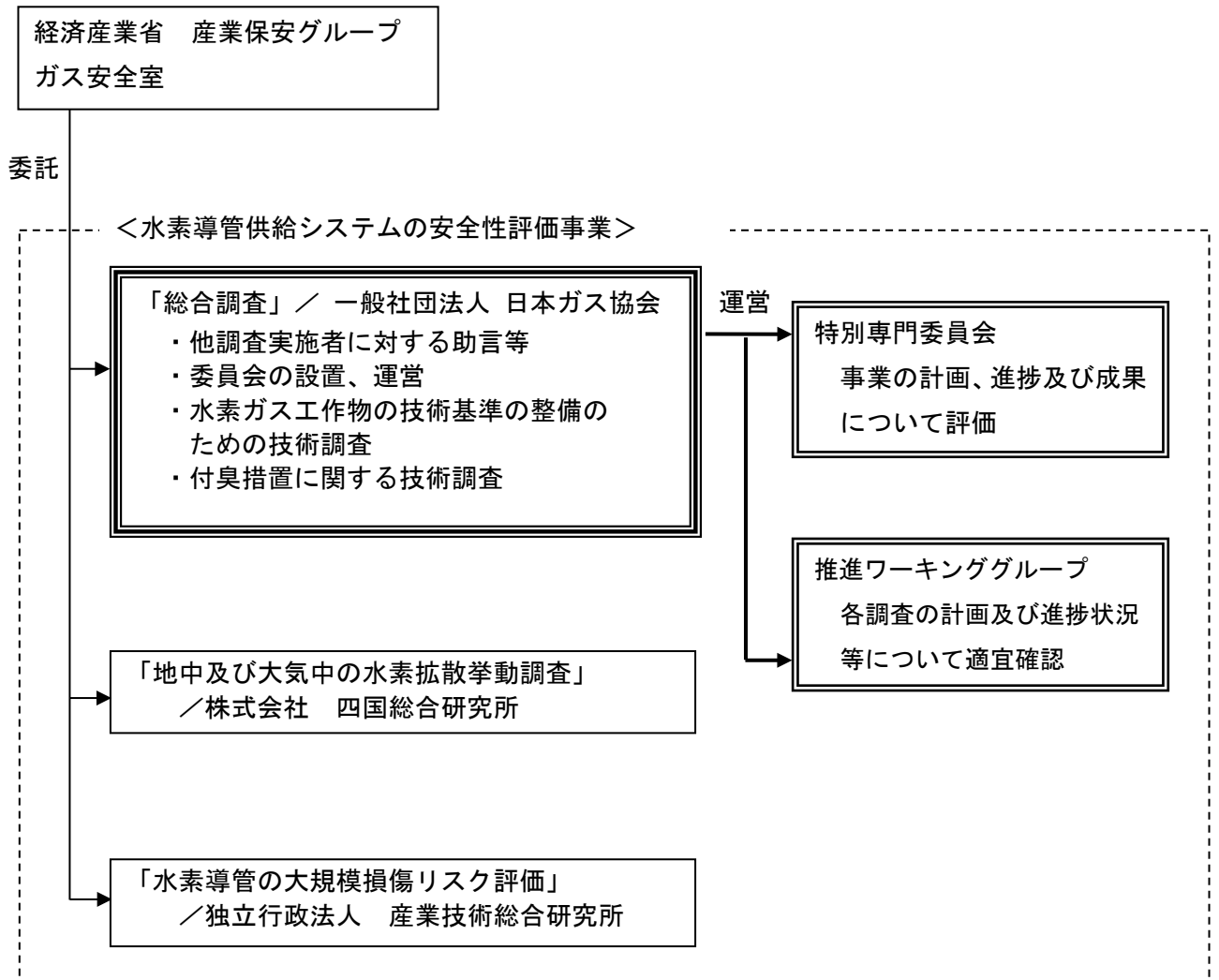


図 1. 3. 1 調査実施体制（全体関連図）

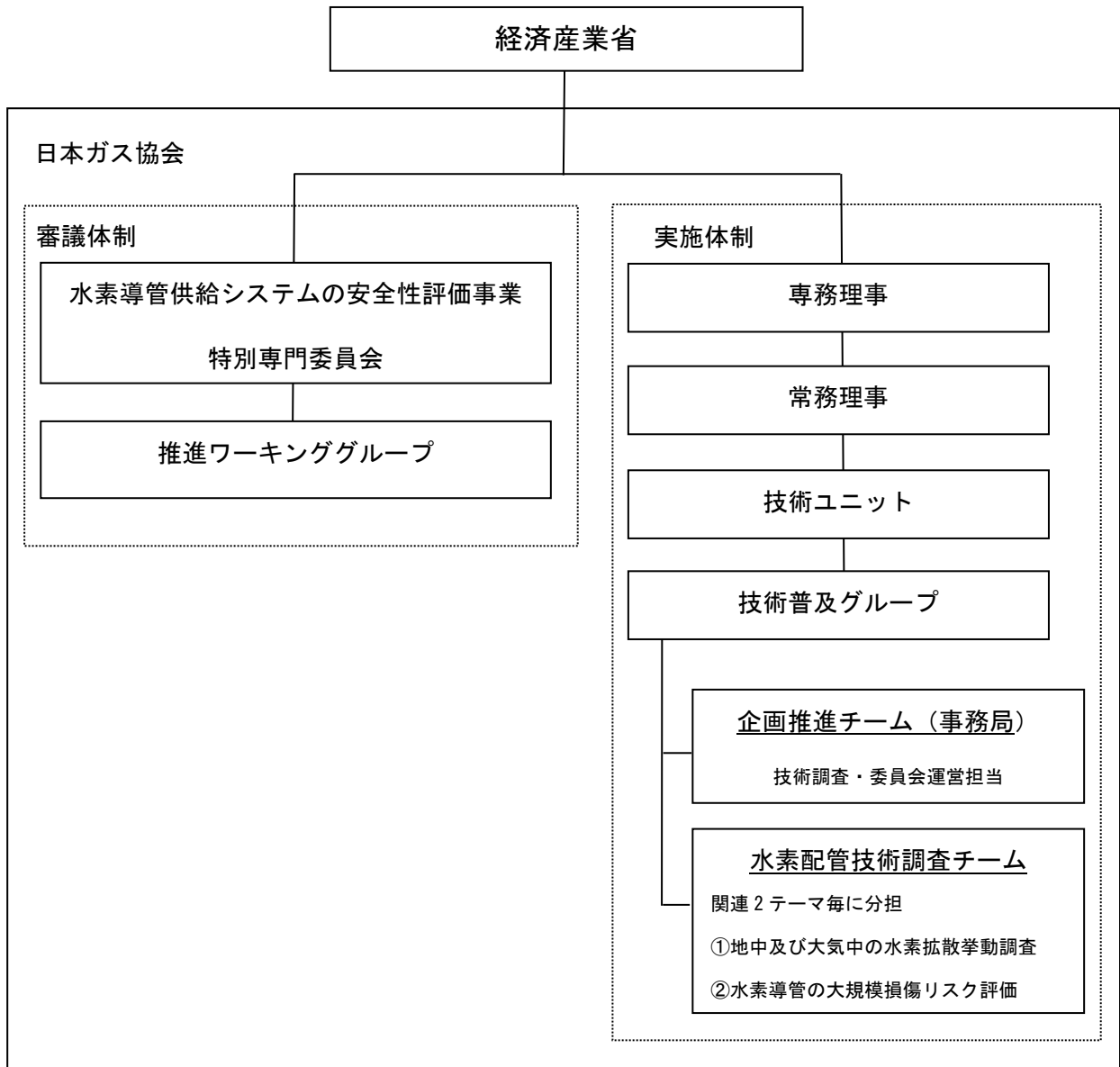


図 1. 3. 2 調査実施体制 (日本ガス協会)

表1. 3. 1 水素導管供給システムの安全性評価事業 特別専門委員会名簿

委員長	倉淵 隆	東京理科大学工学部建築学科 教授
委員	石原 達己	九州大学 大学院 工学研究院 応用化学部門 教授
	岩本 薫	東京農工大学 大学院 工学府 機械システム工学専攻 教授
	笠井 尚哉	横浜国立大学 環境情報研究院 准教授
	西崎 邦博	東京ガス株式会社 デジタルイノベーション本部 基盤技術部長
	石井 義章	大阪ガス株式会社 理事 ネットワークカンパニー 供給部長
関係者	月舘 実	経済産業省 産業保安グループ ガス安全室 ガス安全室長
	義経 浩之	経済産業省 産業保安グループ ガス安全室 ガス・熱供給保安担当補佐
	志村 泉	経済産業省 産業保安グループ ガス安全室 都市ガス保安担当
事務局	日本ガス協会 技術ユニット 技術普及グループ	

表1. 3. 2 推進ワーキンググループ名簿

リーダー	塚本 保夫	日本ガス協会	技術ユニット	技術普及グループ	マネジャー
メンバー	富永 隆一	技術ユニット	技術普及グループ		
	山崎 修一		同	上	
	吉野 充徳		同	上	
事務局	日本ガス協会	技術ユニット	技術普及グループ	企画推進チーム	

表1. 3. 3 日本ガス協会技術ユニット 技術普及グループ名簿 (事務局)

技術ユニット長	安藤 広和
技術普及グループ マネジャー	塚本 保夫
企画推進チーム	今井 和哉、横山 光雄
水素配管技術調査チーム	富永 隆一、山崎 修一、吉野 充徳

4. 調査内容

4. 1 水素ガス工作物の技術基準の整備のための技術調査

ガス遮断機能を有するガスメーターに求められる遮断弁について、必要な構成（弁体構造、構成機器、材料種（パッキン、Oリング等のシール用材料））及び遮断性能に関する技術的課題について、平成18年度水素供給システム安全性技術調査事業の事業成果や国内外の文献等関連情報を基に情報収集・整理を行った。

4. 2 付臭措置に関する技術調査

水素導管供給システムにおける付臭剤の候補として考えられるシクロヘキセンを含有する水素を、脱臭せずに燃料電池にて使用した場合を想定し、燃料電池性能（燃料電池スタック電圧等）への影響及び排気臭気への影響について、実験により調査を行った。

4. 3 他調査の実施者に対する助言等

日本ガス協会内に、検討のための組織（技術ユニット 技術普及グループ 企画推進チーム及び水素配管技術調査チーム）を設置し、調査テーマ毎に配置された各分野に精通したメンバーが、他調査の実施者と必要に応じ協議、助言等の連携を図りながら、本事業を実施・推進した。この際、他調査の実施者との協議・連携を効率的・効果的に推進するために「連携会議」を設け、適宜開催し業務を遂行した。

4. 4 委員会の設置、運営

水素導管供給システムの安全性評価事業を効率的かつ円滑に実施するため、水素の拡散や燃焼、安全性等に係る学術的及び実務的に精通した専門家を選任、委嘱し、その専門家から構成される水素導管供給システムの安全性評価事業特別専門委員会（以下、本委員会という。）を設置した。

なお、本委員会においては、他調査を含めた事業全体を対象とした調査計画・進捗についての助言、そして、その調査結果に対する評価を実施した。

本委員会の運営は、日本ガス協会内に設置する「技術ユニット 技術普及グループ 企画推進チーム」において実施した。また、本委員会の下部組織として「推進ワーキンググループ」を設置し、各調査の進捗及び結果など情報の共有化することでの事業者間の連携強化、各調査の取りまとめに関する方向性の調整等を実施した。

II. 調査結果

1. 水素ガス工作物の技術基準の整備のための技術調査

1. 1 調査の概要

近年の自治体等における実証モデル、将来の事業モデル及び海外の事例等を元に設定した新設の中低圧水素導管供給システムの構成要素のうち、都市ガスと同様の需要家保安を確保するため、需要家先に設置されるガス遮断機能を有するガスメーター※1の検討に資する調査を実施した。

本調査を進めるに当たっては、過去の「経済産業省委託事業 地方都市ガス事業天然ガス化促進対策調査「水素供給システム安全性技術調査事業」(平成 18 年度)で得られた成果(需要家敷地内(内管)に設置される配管材料及びシール材の水素透過性ならびに水素気密性評価の結果(以下、「過去事業」という))を基に、最新の文献情報等を収集し、ガスメーターに内蔵される遮断弁の水素適合性を評価・整理した。

※1: ガス遮断機能を有するガスメーターは、ガス工作物の技術上の基準を定める省令第 50 条にて、需要家保安を目的にガス事業法が定める低圧(0.1MPa 未満)供給のうち、4kPa 以下の供給時に限定して設置が必要なガス工作物である。これまでの事業では、供給圧力 4kPa 超の中圧及び低圧供給を想定した評価を行ってきたが、近年の実証モデル等から、将来の一般家庭用等の需要家向けの低圧(4kPa)供給も視野に、技術調査を行った。

1. 2 調査の進め方

本調査においては、過去事業でガス工作物が水素適合性を有することを整理・評価した結果を基に、内管に設置されるガス遮断機能を有するガスメーターのシール構造やシール材料を調査し、そのシール性能が水素適合性を有しているか、最新の文献情報等によって調査・整理した

1. 3 調査結果

1. 3. 1 過去事業の調査内容

過去事業では、ガス工作物のうち代表的な内管材料(継手、ガス栓、バルブなど)及び内管接合部について、長時間使用を想定した耐久加速処理時及び外力付加状態において適切な水素気密性が確保されることを確認した。また、内管接合部に用いられる代表的なシール材料である NBR、フッ素ゴム、ノンアスベストシートを選定して水素透過性を確認し、ガス工作物の水素適合性に問題がないことを確認した。その結果を図 1. 3. 1 に示す。

(1) 水素気密性

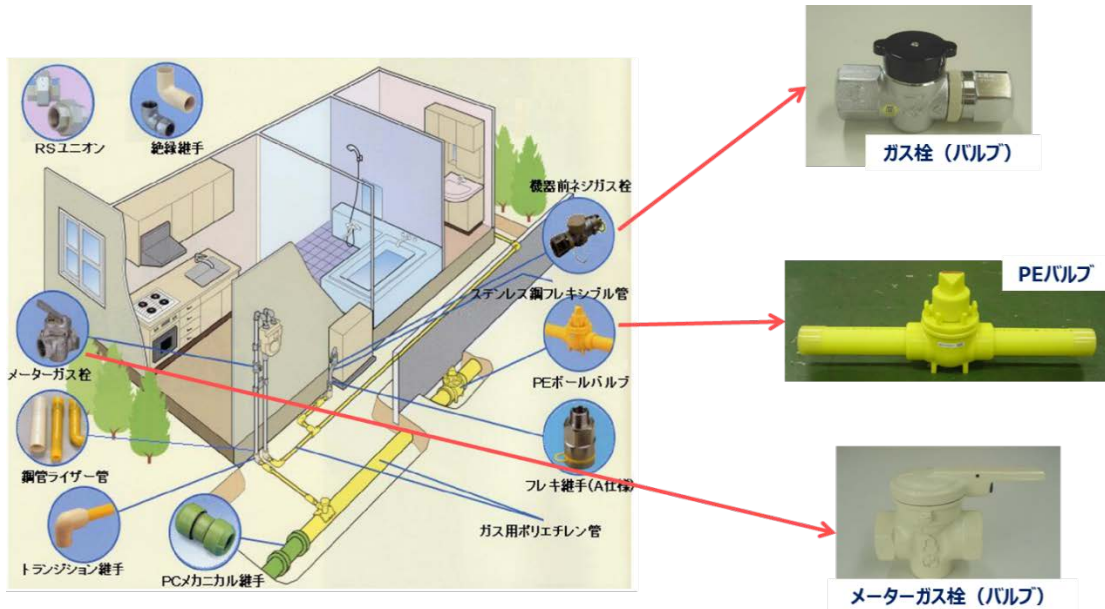
- ・内管材料のうち、ガス栓やバルブ等の遮断装置は作動以後(遮断時)の気密性評価も必要なため、静的な(常態的な)気密性評価に加え、作動時(遮断時)の気密性評価を実施。
- ・所定の圧力封入後、耐久加速処理試験(約 20 年相当)及び外力付加試験の結果、いずれの内管材料も水素気密性が確保されていることを確認。

(2) 水素透過性

- ・ガス透過度試験は JIS K 7126-1 に準拠した差圧法を用いて行い、長時間使用を想定した耐

久加速処理時において適切な水素透過性が確保されることを確認した。

- ・透過係数はフッ素ゴムが最も小さく、フッ素<NBR硬度 50<NBR硬度 70<ノンアスベストシートの順で大きくなることを確認した。なお、透過係数は文献値と実験で得られた値はほぼ同じオーダーであった (NBR : 10^{-16} 、フッ素ゴム : 10^{-17} のオーダー)。



(a) 水素気密試験を行った内管材料 (そのうち、「ガス遮断装置」のみを拡大)

■ 水素気密性試験(耐久加速処理時)の対象と結果

No	アイテム	呼び径	名称	材質	耐久加速処理条件	圧力値 [kPa(abs)]	確認結果
1	ねじ込み継手	20A	テーパネジ	シール材A	大気雰囲気 90℃ × 1440時間 (20℃環境で約 20年に相当)	211	○
2	ねじ込み継手	20A	テーパネジ	シール材B		211	○
3	絶縁継手	20A	テーパネジ コーティング	エポキシ樹脂		212	○
4	RSユニオン	20A	ガスケット	NBR硬度70		212	○
5	PCメカニカル継手	25A	パッキン	NBR硬度70		212	○
6	トランジション継手	25×20A	パッキン	NBR硬度70		210	○*1
7	鋼管ライザー管	30×25A	パッキン	フッ素ゴム		211	○
8	フレキ継手(A仕様)	20A	パッキン	NBR硬度50		212	○
9	フレキ継手(B仕様)	20A	ガスケット	ノンアスシート		211	○*2
10	フレキ継手(C仕様)	20A	パッキン	NBR		212	○
11	鋼管フランジ(ガスケット)	50A	ガスケット	ノンアスシート+ペーस्ट		212	○
12	鋼管フランジ(絶縁スペーサー)	50A	Oリング	SBR+NR	212	○	
13	メータガス栓(開栓状態)	25A	テーパ栓	グリース	開閉 2000回	124	○
14	メータガス栓(閉栓状態)	25A	テーパ栓	グリース	124	○	
15	機器接続ガス栓(開栓状態)	20A	テーパ栓	グリース	開閉 6000回	124	○
16	機器接続ガス栓(閉栓状態)	20A	テーパ栓	グリース	124	○	
17	PEボールバルブ(開栓状態)	50A	Oリング シートリング	NBR硬度70	開閉 100回	211	○*1
18	PEボールバルブ(閉栓状態)	50A	Oリング シートリング	NBR硬度70		211	○*1

* 1: 微小圧力変化(48時間で1kPaの低下)が確認されたが、水素リーク検知器では検出されず。

* 2: リーク検知器で水素が検出されたが、圧力変化は他と同レベル(微小圧力変化)。

(b) 水素気密試験の結果

■ 測定方法

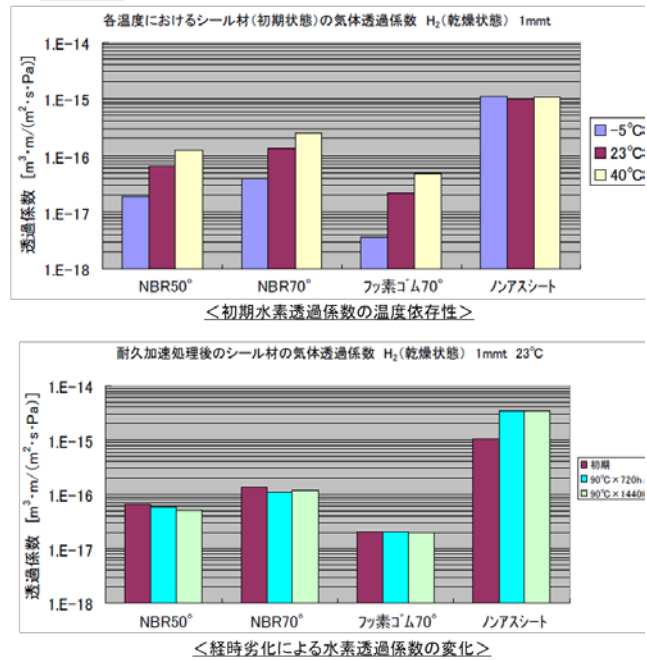
試験片によって隔てられた一方(低圧側)を真空に保ち、他方(高圧側)に試験ガスを導入。試験片を通して低圧側へ透過したガス量をガスクロマトグラフ法によって測定してガス透過度を算出する方法。
(JIS K 7126-1 準拠)

(1) 耐久加速処理(2ケース)

- ・大気中、90℃×720時間の熱処理
⇒ 20℃環境での約10年経過に相当
- ・大気中、90℃×1,440時間の熱処理
⇒ 20℃環境での約20年経過に相当

(2) 測定により得られた透過量と膜厚、透過面積などの条件から、透過係数を算出。

■ 測定結果



(c) 水素透過試験の結果

図1. 3. 1 過去調査の結果

1. 3. 2 ガス遮断機能を有するガスメーターの詳細調査

ガス遮断機能を有するガスメーターの、ガス遮断時のシール構造やシール材料等のシール性能の詳細調査を行った。調査にあたっては、過去事業(ガス工作物の水素適合性評価)を受託し、遮断装置等のガス工作物を製造・販売している「日立金属株式会社」へ外注して調査を行った。

ガスメーターに内蔵される遮断装置は、災害や機器の不具合など緊急時に一時的にガスの供給を遮断する機能を有しており、その作動原理の例を図1. 3. 2に示す。

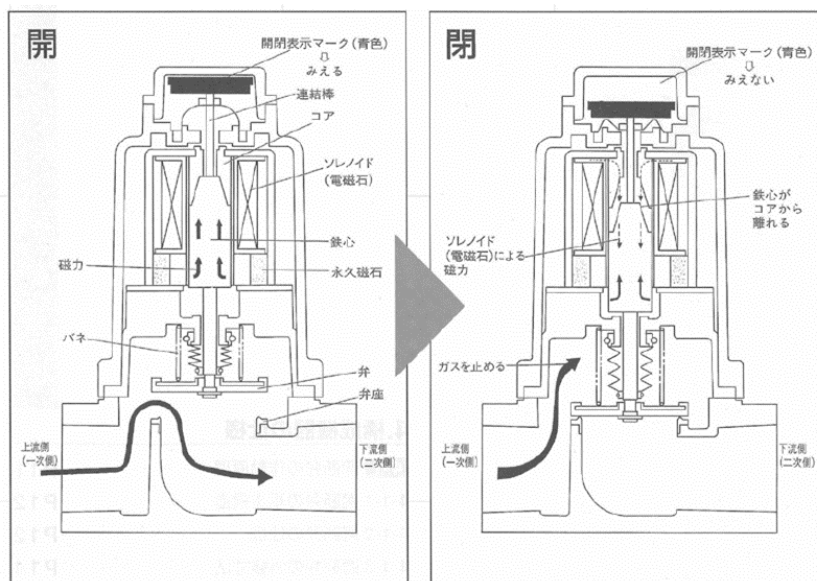


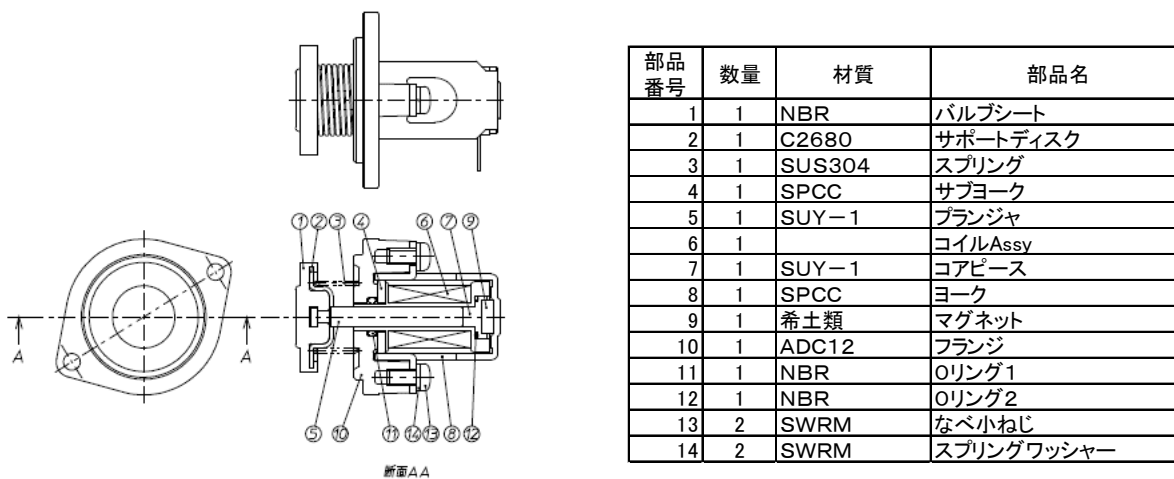
図1. 3. 2 遮断弁の作動原理

[出典] (社) 日本エルピーガス供給機器工業会 JLIA-E「遮断装置」より

(1) 遮断弁のシール構造

通常の弁体が「開」であった状態から、異常検知などによって磁力で支えられていた固定部（図1.3.2ではコアと鉄心箇所）が外れ、ばねによって弁体が瞬時に流路を遮断する機構となっている。また、一般的な遮断弁部分の構造を図1.3.3に、それに用いられる部品一覧表を表1.4にそれぞれ示す。

表1.4 遮断弁の部品一覧表



部品番号	数量	材質	部品名
1	1	NBR	バルブシート
2	1	C2680	サポートディスク
3	1	SUS304	スプリング
4	1	SPCC	サブヨーク
5	1	SUY-1	ブランジャ
6	1		コイルAssy
7	1	SUY-1	コアピース
8	1	SPCC	ヨーク
9	1	希土類	マグネット
10	1	ADC12	フランジ
11	1	NBR	Oリング1
12	1	NBR	Oリング2
13	2	SWRM	なべ小ねじ
14	2	SWRM	スプリングワッシャー

図1.3.3 遮断弁の弁体外観図

(2) 遮断弁のシール材料

シール性能は、遮断弁のシール機能として作用する部品には部品番号1のバルブシート（シートリング）が用いられ、躯体接合部には部品番号11、12のOリングが用いられており、各々の材質はNBRが使用されていることを確認した。

NBRは、ガス工作物の遮断装置や接続部のシール構造に最も利用されているシール材料の一つであり、ガスメーターに内蔵される遮断弁にもNBRをシール材料として用いている。

1.3.3 まとめ（1.3.1及び1.3.2のまとめ）

(1) 過去事業の振り返り

- ・PEボールバルブのシール材料（バルブシート等）がNBRであることを確認。
- ・PEボールバルブの気密試験は200kPa超であり、ガス遮断機能を有するガスメーターの設置要件圧力の4kPaを大幅に上回る試験圧力によって、当該NBRを評価。

(2) 遮断弁のシール構造

- ・弁体遮断時は、過去事業で評価した「PEボールバルブ」と類似のシール機構（遮断時のみシール機構が働く）であることを確認。
- ・遮断弁の接合部は、ガスメーター内部にOリングによってシールされていることを確認。

(3) 遮断弁のシール材料

- ・遮断時のシール機構に用いられているバルブシート及びOリングは、過去事業で評価した「NBR」であることを確認。

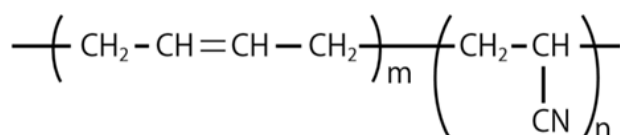
1. 3. 4 シール材料 NBR の特性に関する最新文献調査

ガス遮断機能を有するガスメーターの遮断弁等のシールには、シール材料として NBR が使用されていることを確認したため、NBR の詳細調査を行った。調査にあたっては、材料分野を中心とする研究開発や分析及び試験評価に実績のある「KRI 株式会社」へ外注して調査を行った。

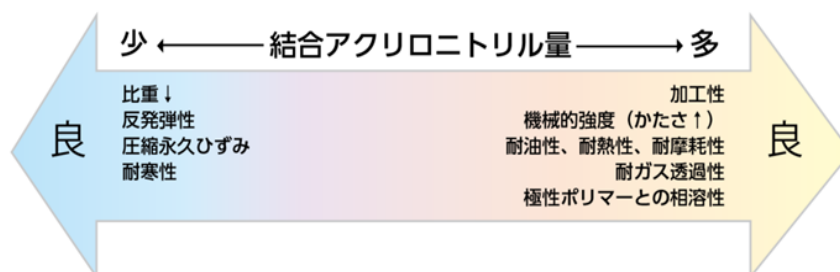
遮断弁のシール機構に用いられているシール材料の NBR とは、ニトリルブタジエンゴム (Nitril-Butadiene Rubber) の呼称であり、最も流通しているシール性能の優れた合成ゴム (配合ゴム) であり、その特性等を図 1. 3. 4 に示す。

NBR はブタジエンとアクリロニトリル (以下、「ニトリル」という) の共重合体からなっており、側鎖に極性の高いシアノ基 (ニトリル基) を有することを特徴としている。その構造により高い耐油性を有するとともに、耐熱性、耐ガス透過性や引張強度など機械的性質に優れた特性の材料となっている。

ニトリル配合量 (含有量) が多いほど、ガス透過性が低下する (ガスが透過しにくい) 傾向があり、配合量に応じて、「低ニトリル」～「高ニトリル」等と種類 (特性) が変わる。ニトリル配合量によって硬度 (デュロメータ A で測定される硬さ) は増す傾向があるが、添加剤によって柔軟性担持が可能のため、低硬度でもニトリル含有量が多いものもある。



(a) NBR の構成



(b) アクリロニトリル配合に応じた特性

図 1. 3. 4 NBR の特性

[出典] NOK (株) ホームページより

(1) NBR 種類別特性と JIS 規格値

一般的なガス工作物 (都市ガス用) へ使用される NBR (O リング) の、メーカーが推奨する適合表を図 1. 3. 5 に示す。また、NBR (O リング) の JIS 規格は NBR-70-1 (硬度 70)、NBR-90 (硬度 90)、NBR-70-2 (硬度 70) があげられ、これを図 1. 3. 6 に示す。

この JIS 規格材料と NBR 種類との関係については、NBR-70-1、NBR-90 が中高ニトリル、NBR-70-2 が高ニトリルの関係になっている。これらより、中高ニトリル以上であれば、ガス工作物 (都市ガス) のシール材料に適合しているといえ、実際にガス工作物のシール材料

として広く NBR の中高ニトリルが採用されている。

なお、1. 3. 1 で示した過去事業で調査対象とした NBR の硬度 50 及び硬度 70 は、実際のガス工作物に採用されている中高ニトリル以上のものを用いた評価を行い、水素適合性に問題のないことを確認している。

NOK Oリング材料		硬さ	使用温度範囲の目安*1 (°C)	主な使用例	適用 シリーズ	JIS JASO 記号	潤滑油		作動油		燃料	水	冷却水	薬品	気体	その他		
材料名 (材質記号)	特徴	材料記号 (デュロ メータ)	()内は Max 値を示す。 -50°C 0°C 100°C 200°C				エンジン油	工業油	液压油	燃料油	軽油・灯油	60°C以下	100°C以下	150°C以下	水素還元水(H ₂ LTC)	有機系ガス	無機系ガス	その他
ニトリルゴム (NBR)	シール材料として各種品目へ広く利用されており、性能、加工性のバランスが最も良い材料です。	A402	60	-25 ~ 100(120)	汎用		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		A122	70	-22 ~ 80(100)	燃料用	JIS-JASO	JIS 1999-702 JASO 702	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		A305	70	-24 ~ 100(120)	汎用	JIS-JASO	JIS 1999-701 JASO 701	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		A746	70	-25 ~ 100(120)	LPG 用			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		A908	70	-25 ~ 80(100)	燃料用			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		A980	80	-45 ~ 80(100)	低温用			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
A105	90	-23 ~ 100(120)	汎用	JIS-AS	JIS NBR-90	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		

図 1. 3. 5 NBR の都市ガス適用性 (カタログ値)

[出典] NOK (株) ホームページを基に編集

		<中高ニトリル>		<高ニトリル>		<高硬度ニトリル>	
特徴		最も広く大量に使用されているOリング用のゴム材質。 NBRが保持する耐油性をはじめ、安価であるにも関わらず耐摩耗性などの機械特性もバランス良く有している。量販店などで販売されているOリングの殆どはこの材質。		NBR-70-1(1種A/1A)などと比べて耐油性がより一層優れており、フッ素ゴムがベースのFKM-70(4種D/4D)には及ばないものの、燃料油(灯油・軽油・ガソリンなど)に対する強い耐性も有する。また、気体透過性が低く、ガス系のシール材としても使用される。		耐油性を備えている他、硬度が高い(A90)ことで耐圧性にも優れる。 硬度の影響で強度が増しているが、伸び率などは低下。強度向上によってOリングが溝からはみ出すのを抑制する効果が高い。	
主な使用箇所		<ul style="list-style-type: none"> 油空圧シリンダー、ピストン、ロッドの密閉部 ポンプのハウジング及び接続部 バルブのステム及び接続部 継手のシール材 産業用設備の密閉箇所 容器の密閉材、電子機器の防水、防塵材 機械可動部のショックダンパー 搬送ローラーの滑り止め、駆動用の丸ベルト 		<ul style="list-style-type: none"> 燃料ポンプのハウジング及び接続部 油空圧シリンダー、ピストン、ロッドの密閉部 燃料バルブのステム及び接続部 インジェクターのシール材 燃料容器のシール材 燃料ガスの切替バルブ 燃料ガスの検知器やセンサーのシール材 		<ul style="list-style-type: none"> 油空圧シリンダー、ピストン、ロッドの密閉部 高圧ポンプのハウジング及び接続部 高圧バルブのステム及び接続部 高圧継手のシール材 産業用設備の高圧密閉箇所 機械可動部のショックダンパー 搬送ローラーの滑り止め 駆動用の丸ベルト 	
規格試験種類	項目	新JIS: NBR-70-1	旧JIS: 1種A(1A)	新JIS: NBR-70-2	旧JIS: 2種(2A)	新JIS: NBR-90	旧JIS: 1種B(1B)
常態物性試験	硬度 (JIS-A)	70±5	70±5	70±5	70±5	90±5	90±5
	引張強さ (MPa)	> 10.0	> 9.8	> 10.0	> 9.8	> 14.0	> 14.0
	伸び率 (%)	> 250	> 250	> 200	> 200	> 100	> 100
	100%引張応力 (MPa)	> 2.5	> 2.7	> 2.5	> 2.7	—	—
耐熱老化試験	試験条件	120°C x 72時間	120°C x 70時間	100°C x 72時間	100°C x 70時間	120°C x 72時間	120°C x 70時間
	硬さ変化	< +10	< +10	< +10	< +10	< +10	< +10
	引張強さ変化率 (%)	> -15	> -15	> -15	> -15	> -25	> -25
	伸び変化率 (%)	> -45	> -45	> -40	> -40	> -55	> -55
圧縮永久歪み試験	試験条件	120°C x 72時間	120°C x 70時間	100°C x 72時間	100°C x 70時間	120°C x 72時間	120°C x 70時間
	圧縮永久歪み率 (%)	< 40	< 40	< 25	< 25	< 40	< 40

(a) 主な NBR の特徴

[出典] 桜シール (株) ホームページを基に編集

ニトリル配合量 (wt%)	~24	25 ~ 30	31 ~ 35	36 ~ 42	43~	
種類	低ニトリル	中ニトリル	中高ニトリル	高ニトリル	極高ニトリル	
JIS B 2401規格	—	—	NBR-70-1 (硬度70)	NBR-90 (硬度90)	NBR-70-2 (硬度70)	—

(b) ニトリル配合別種類

図 1. 3. 6 ニトリル配合別種類と JIS 規格との関係

(2) NBR がガス透過性に与える影響

シール性能の重要な特性となるガス透過性について文献調査した結果、ガス透過性に影響を与える因子について実験計画表や品質工学で用いられる直行表 L18 により評価を行い、その因子の影響度合いを整理した文献 A^{*1}を確認した。その実験因子と評価水準を表 1. 3. 1 に、測定したガス透過係数に対する因子の寄与率を図 1. 3. 7 に示す。

表 1. 3. 1 NBR の配合・加工条件とその水準

実験因子	第1水準	第2水準	第3水準
A 作製者	X	Y	
B 加硫温度 (°C)	140	150	160
C 加硫促進剤の種類	チアゾール (MBTS)	スルフェンアミド (TBBS)	チウラム (TMTD)
D CB添加量 (FEF)	10 phr	30 phr	50 phr
E NBR 種	低ニトリル (15%)	中高ニトリル (35%)	極高ニトリル (48%)
F フィラーの種類	なし	炭酸カルシウム	タルク
G 加硫時間	アンダー加硫	最適	オーバー加硫
H 加硫系	CV	準EV	EV

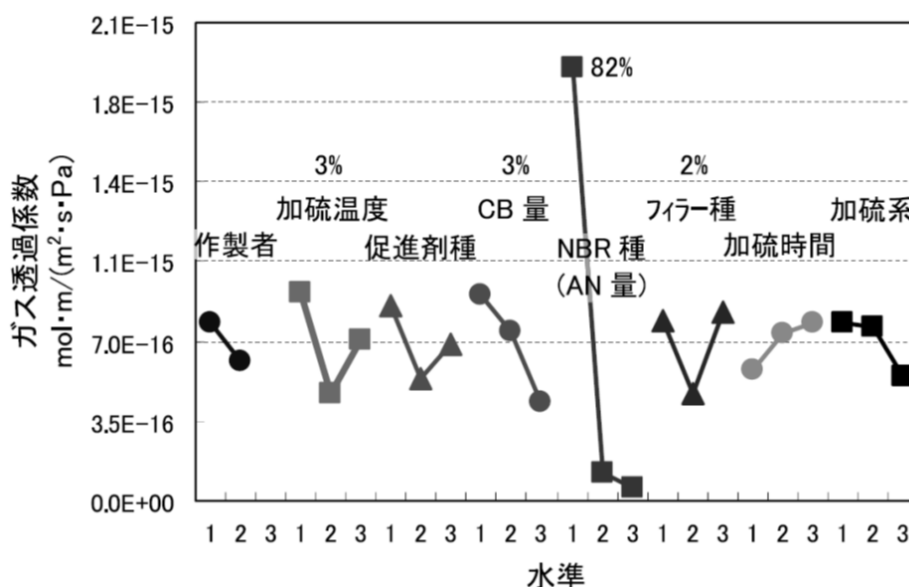


図 1. 3. 7 NBR のガス透過係数に対する実験因子の水準別平均値

図 1. 3. 7 に示されるように、8 項目ある因子のうち、ガス透過係数に対する NBR 種 (ニトリル配合量) の寄与率 82% に対し、機械的強度や硬度などに寄与する項目は殆ど影響しておらず、ニトリル配合量が支配的であることが分かる。この実験で使用したガス種は酸素であるため、水素と酸素のガス透過係数を比較した文献を調査した結果を、文献 A^{*1}より表 1. 3. 2、文献 B^{*2}より表 1. 3. 3 にそれぞれ示す。これらから、酸素に対して水素は同様の透過傾向となっており、水素においてもニトリル配合量が支配的であることがいえる。

※1 文献A：春松哲史他 エラストマーの気体透過性評価方法 2010年第83巻第1号日本ゴム協会誌

※2 文献B：桜シール（株）ホームページ ゴム材料のガス透過性（ガス透過性データ（測定値））

表1. 3. 2 NBRのガス透過係数（文献A※1）

ゴム材料		温度	ガス透過係数 [m ³ ・m/ (m ² ・sec・Pa)]	
			H ₂ (水素)	O ₂ (酸素)
NBR	ニトリル 27% (中ニトリル)	25℃	1.19 × 10 ⁻¹⁶	0.29 × 10 ⁻¹⁶
		50℃	3.33 × 10 ⁻¹⁶	1.04 × 10 ⁻¹⁶
	ニトリル 39% (中高ニトリル)	25℃	0.53 × 10 ⁻¹⁶	0.07 × 10 ⁻¹⁶
		50℃	1.68 × 10 ⁻¹⁶	0.35 × 10 ⁻¹⁶

表1. 3. 3 NBRのガス透過係数（文献B※2）

ゴム材料		温度	ガス透過係数 [m ³ ・m/ (m ² ・sec・Pa)]	
			H ₂ (水素)	O ₂ (酸素)
NBR	中高ニトリル	25℃	12.1 × 10 ⁻⁸	0.29 × 10 ⁻¹⁶
		50℃	3.33 × 10 ⁻¹⁶	1.05 × 10 ⁻¹⁶
	高ニトリル	25℃	5.42 × 10 ⁻¹⁶	0.07 × 10 ⁻¹⁶
		50℃	1.70 × 10 ⁻¹⁶	0.35 × 10 ⁻¹⁶

(3) NBRのガス透過性まとめ（過去事業との比較整理）

これまで、NBRのニトリル配合量がガス透過性に与える影響を整理してきた。過去事業のガス透過性評価は、実験値と当時の文献値を基に水素適合性を評価し、NBRは水素適合性に問題のないことを確認した。今回の調査で得られた最新の文献値を踏まえ、ガス透過性を再評価した結果を表1. 3. 4に示す。いずれも10⁻¹⁶オーダーであり、過去事業同様であることを確認した。

なお、文献値より、中高ニトリルよりもニトリル配合量が少ない中ニトリルであっても、ガス透過性（透過係数）は同じオーダーであるため、水素適合性があることが示唆された。

表1. 3. 4 NBRのガス透過係数まとめ

ゴム材料		温度	ガス透過係数 [m ³ ・m/ (m ² ・sec・Pa)]			
			過去事業		今回の調査	
			実験平均値	当時の文献	文献A	文献B
NBR	中ニトリル	約 25℃	—	1.18 × 10 ⁻¹⁶	1.19 × 10 ⁻¹⁶	—
		約 50℃	—	3.33 × 10 ⁻¹⁶	3.33 × 10 ⁻¹⁶	—
	中高ニトリル	約 25℃	0.28 × 10 ⁻¹⁶	9.10 × 10 ⁻¹⁶	0.53 × 10 ⁻¹⁶	1.22 × 10 ⁻¹⁶
		約 50℃	0.19 × 10 ⁻¹⁶	—	1.68 × 10 ⁻¹⁶	3.37 × 10 ⁻¹⁶

(4) NBR 特性のまとめ

ガス工作物(都市ガス)に使用されるシール材料として、NBR は最も広く採用されている。また、カタログ値やメーカー推奨、ガス工作物製造・販売メーカーの使用実績等から、その NBR は中高ニトリル以上が採用されていることを確認した。

①NBR の特性

- ・ニトリル配合量を多くすることにより、ガス透過性が低下する(ガスが透過しにくい)。

②NBR の種類

- ・ニトリル配合量に応じ、低ニトリル<中ニトリル<中高ニトリル<高ニトリル<極高ニトリルの順に種類が変化する。
- ・一般的にガス工作物に用いられる NBR は中高ニトリル以上であり、ガスメーターに内蔵される遮断弁にも使用されていることを確認。

③NBR の透過性(過去事業との関係)

- ・ガス透過係数に関する最新文献を調査した結果、当時の文献値と差異がないことを確認。
- ・当時(過去事業)を含めて、ガス工作物に使用される中高ニトリル以上の NBR は、水素適合性に問題がないことを再評価した。(文献値より、中高ニトリルよりもニトリル配合量が少ない中ニトリルであっても、水素適合性があることを確認)。

1. 4 まとめ(全体のまとめ)

過去事業を基に最新の文献情報等を収集し、ガスメーターに内蔵される遮断弁の水素適合性を評価・整理した結果、水素適合性に問題のないことを確認した。主な評価事項は以下の通り。

(1) シール構造

- ・シール構造は、過去事業で評価済みの PE ボールバルブと同様の遮断機構(遮断時のみシール機構が働く)である。

(2) シール材料

- ・シール材料は、ガス工作物に最も広く利用されている、NBR の中高ニトリル以上である。
- ・NBR は、ニトリル配合量に応じてガス透過性が低下する(ガスが透過しにくい)といった、優れた特性をもつ合成ゴムである。

(3) 過去事業の再評価

- ・過去事業で、NBR 中高ニトリルは、試験圧力 200kPa 超の気密試験及び差圧法によるガス透過試験によって水素適合性を確認済みである。この気密試験圧力は、ガスメーターに内蔵される遮断弁の設置要件圧力 4kPa を大幅に上回るため、同遮断弁の運用圧力範囲において水素適合性を有するといえる。

2. 付臭措置に関する技術調査

2. 1 調査の概要

水素導管供給システムを運用する上で、万が一水素が導管から漏えいした場合の保安を確保するため、都市ガスと同様に付臭措置を講じる必要がある。そこで本調査では、過去の漏えい検知方法に関する調査として実施した経済産業省委託による技術調査事業^{※1}において、水素用付臭剤の最有力であると確認されたシクロヘキセン（非硫黄系付臭剤）について、未確認事項である、脱臭せずに燃料電池にて使用した場合の燃料電池性能への影響及び排気臭気への影響に関する調査を実施した。

平成 29 年度は、既往研究や文献調査を実施し、シクロヘキセン（ C_6H_{10} ）による燃料電池性能及び排気臭気への影響がない可能性が示唆された。平成 30 年度は、市販または開発中の燃料電池システム（または本システムに使用されている燃料電池スタック）を用いた短時間（連続 10 時間程度）の試験を実施し、シクロヘキセンによる燃料電池性能への初期の影響及び排気臭気への影響について確認した。その結果、連続 10 時間程度の運転では運転ができなくなるほどの電池スタック電圧低下は発生しないことを確認した。また、シクロヘキセンは電池スタック内でシクロヘキサン（ C_6H_{12} ）に水素化され、さらにシステム排気口出口で、換気用空気により希釈されるため、排気はほぼ無臭であることが確認された。今年度は、開発中の燃料電池システムを用いた長時間（累積 100 時間相当以上（連続 10 時間／回×10 回以上））の試験を実施し、付臭剤による燃料電池性能への影響及び排気臭気への影響について確認し、脱臭装置なしでの長期運転の可能性について評価を行った。付臭剤には平成 30 年度と同様にシクロヘキセンを使用し、検証としてシクロヘキサン添加による試験を行った。シクロヘキセンは電池スタック内でシクロヘキサンに水素化され、水素リサイクルラインにより濃縮されたシクロヘキサンが電池スタックに投入されるため、シクロヘキサンの影響も確認する必要がある。

※1 経済産業省委託事業 地方都市ガス事業天然ガス化促進対策調査「水素漏えい検知技術調査事業」（平成 18 年度～平成 20 年度）

2. 2 調査の進め方

付臭剤による影響調査にあたっては、家庭用純水素型燃料電池システムを開発中の「A 社」へ外注し、当該開発中のシステムにて試験を行った。

試験条件として、表 2. 2. 1、表 2. 2. 2 に示す通り、水素中のシクロヘキセン濃度、シクロヘキサン濃度をそれぞれ 3 条件設定し、脱臭せずに燃料電池システムにて運転を行った。本調査では、性能への長時間運転の影響を調査することを目的とするため、運転時間は累積 100 時間相当以上（連続 10 時間／回×10 回）とし、燃料電池性能への影響評価として電池スタック電圧低下の挙動の確認及び排気臭気への影響評価として排気ガスの分析、臭気の確認を行った。

表 2. 2. 1 試験条件（シクロヘキセン濃度）

条件 1	0ppm（純水素運転）	リファレンスデータとして設定
条件 2	150ppm ^{※3}	ガス事業法で定められている臭気とするためのシクロヘキセンの最低濃度（61.5ppm ^{※2} ）を基に、実運用の際に想定される濃度
条件 3	300ppm	

※2 経済産業省委託事業 地方都市ガス事業天然ガス化促進対策調査「水素漏えい検知技術調査事業」（平成 18 年度～平成 20 年度）にてシクロヘキセンの臭気閾値が 61.5ppb であることを整理。ガス事業法にて定められている「ガスの吸気中の混合容積比率が 1/1,000 である場合に臭気の有無が感知できること」を満たす最低濃度は 61.5ppm となる。

※3 北九州水素タウン実証（平成 21 年度～）での水素導管供給における付臭運用濃度

表 2. 2. 2 試験条件（シクロヘキサン濃度）

条件 1	0ppm（純水素運転）	リファレンスデータとして設定
条件 2	150ppm	シクロヘキセン濃度による試験（表 1. 2. 1）と同濃度に設定
条件 3	300ppm	

2. 3. 燃料電池性能への影響調査

（1）試験方法

図 2. 3. 1 に評価に用いた 700W 純水素型燃料電池システムを示す。また、本システムでは、水素リサイクルラインが設けられており、電池スタックで使用されなかった水素は、水素リサイクルラインを循環し、途中に設置された水素ブリード弁を定期的にかけてパージ（排気）している。水素リサイクルラインを表したイメージ図を図 2. 3. 2 に示す。

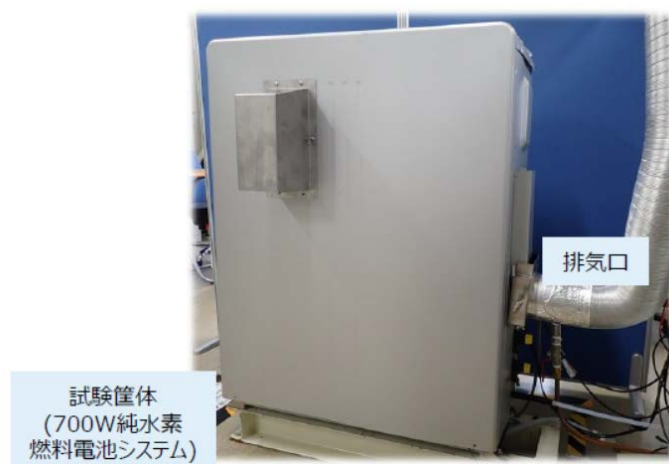


図 2. 3. 1 700W 純水素型燃料電池システム

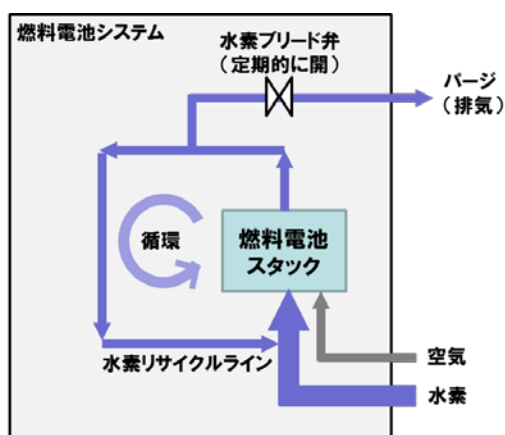


図 2. 3. 2 システム構成イメージ図

試験は、A社と協議の上、以下の手順で行った。

- ① 連続 10 時間運転/回とし、毎回、起動停止する。
- ② 試験中のシステム発電出力は 700W 一定とする。
- ③ 計測項目は、システム発電出力、電池スタック電圧 (V)、電池電流 (I) を燃料電池システムデータにて計測する。

また、システムによる運転結果で評価を行う場合、補機動力等の違いにより電池スタック電圧へ影響が発生するため、この影響を排除するために IV 特性により評価を行う。評価を行う際には、起動直後の低負荷～部分負荷運転データは除き、IV 特性は定格 700W 運転開始 6～7 時間目のデータを用いる。

試験ガスの条件を表 2. 3. 1 (シクロヘキセン)、表 2. 3. 2 (シクロヘキサン)、試験方法のイメージを図 2. 3. 3 (シクロヘキセン) に試験方法に示す (シクロヘキサンも同様の試験方法)。初期性能を確認するために、純水素にて連続 10 時間/回×2 回の運転を行い、その後、シクロヘキセン (またはシクロヘキサン) 150ppm を添加した水素にて、連続 10 時間/回×12 回の運転を行い、付臭剤の影響を確認する。さらに、劣化の可逆性を確認するために、再度、純水素にて連続 10 時間/回×2 回の運転を行う。その後、シクロヘキセン (またはシクロヘキサン) 300ppm を添加した水素にて、連続 10 時間/回×2 回の運転、純水素にて連続 10 時間/回×2 回の運転を行い、同様に付臭剤の影響、劣化の可逆性を確認する。

表 2. 3. 1 試験ガスの条件 (シクロヘキセン)

条件	試験ガス	累積運転時間 (時間)	備考
1	純水素 (工場水素)	20	連続 10 時間/回×2 回
2	150ppm シクロヘキセン (ボンベ)	120	連続 10 時間/回×12 回
3	純水素 (工場水素)	20	連続 10 時間/回×2 回
4	300ppm シクロヘキセン (ボンベ)	20	連続 10 時間/回×2 回
5	純水素 (工場水素)	20	連続 10 時間/回×2 回
	累積運転時間合計 (時間)	200	—

表 2. 3. 2 試験ガスの条件 (シクロヘキサン)

条件	試験ガス	累積運転時間 (時間)	備考
1	純水素 (工場水素)	20	連続 10 時間/回×2 回
2	150ppm シクロヘキサン (ボンベ)	120	連続 10 時間/回×12 回
3	純水素 (工場水素)	20	連続 10 時間/回×2 回
4	300ppm シクロヘキサン (ボンベ)	20	連続 10 時間/回×2 回
5	純水素 (工場水素)	20	連続 10 時間/回×2 回
	累積運転時間合計 (時間)	200	—

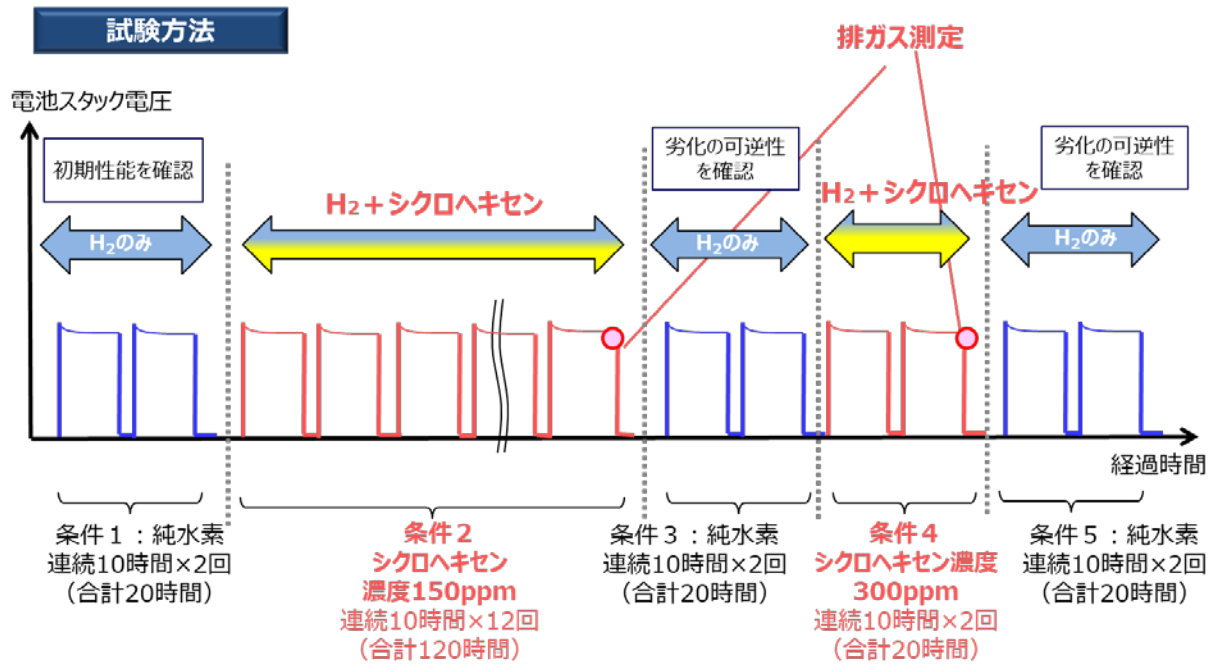


図2. 3. 3 試験方法イメージ図 (シクロヘキセン)

(2) 試験結果

①シクロヘキセンの場合

A) 試験ガス全条件

試験結果として、試験ガス全条件のシステム発電出力とセル電圧^{※4}の変化を図2. 3. 4に示す、試験ガス全条件において、システム発電出力は700Wで安定していることを確認した。また、シクロヘキセンを150ppm、300ppm添加しても運転停止に至らず、添加有り無しでは、セル電圧に顕著な差が見られないことがわかった。

※4 セル電圧=電池スタック電圧/セル数

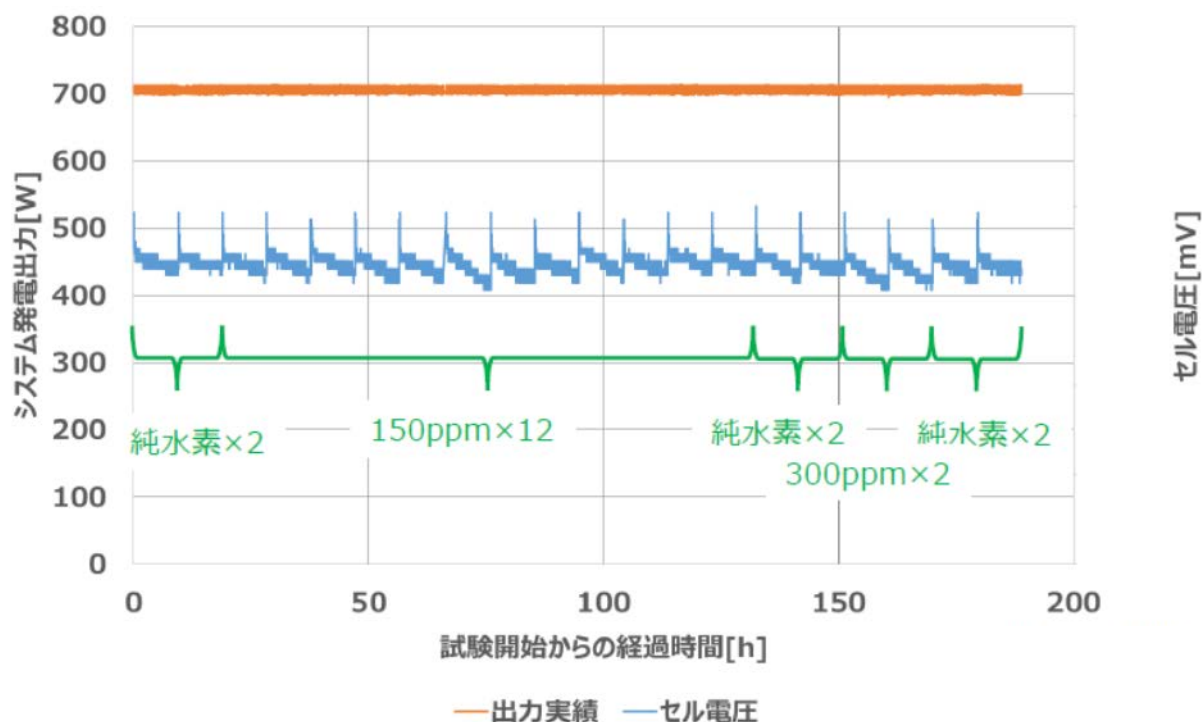


図2. 3. 4 システム発電出力とセル電圧の変化（試験ガス全条件（シクロヘキセン））

B) シクロヘキセン 150ppm 添加試験

純水素運転（150ppm 添加試験前後）とシクロヘキセン 150ppm 添加試験中の IV 特性を図2. 3. 5 に示す。純水素運転時のデータは、添加前の純水素累積 20 時間目（純水素②※5）、添加後の純水素累積 40 時間目（純水素④※5）、添加時のデータは添加始めの累積 10 時間目（150ppm①※6）、添加終わりの累積 120 時間目（150ppm⑫）、及び途中でセル電圧低下量の最も大きい累積 60 時間目のデータ（150ppm⑥）を選定した。

その結果、セル電圧はシクロヘキセン添加時の方が同等ないし数mV程度低く、シクロヘキセンの電池スタック電圧への影響がある可能性が示唆された。ただし、セル電圧の差は1～2 測定分解能程度であり、システム運転ができなくなるような影響はみられなかった。

※5、6 試験ガス条件+運転時間を示す。例えば、純水素②は純水素にて累積 20 時間運転時のデータ、150ppm①はシクロヘキセン 150ppm にて累積 10 時間運転時のデータを示す。

また、シクロヘキセン 150ppm 添加中（150ppm①、⑥、⑫）と添加試験後（純水素④）の IV 特性を比較すると、添加試験後のセル電圧が若干高いため（1 測定分解能程度）、シクロヘキセンの影響は可逆の可能性があると考えられる。

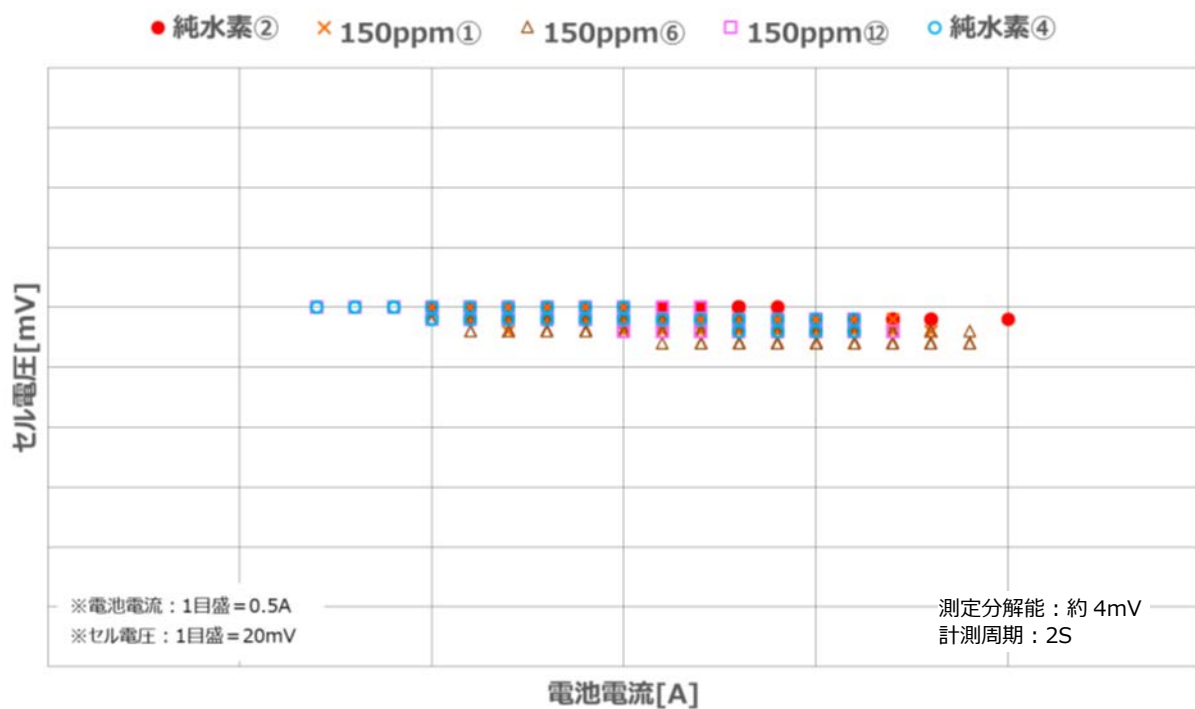


図 2. 3. 5 純水素運転（添加試験前後）とシクロヘキセン 150ppm 添加中の IV 特性比較

C) シクロヘキセン 300ppm 添加試験

純水素運転（300ppm 添加試験前後）とシクロヘキセン 300ppm 添加試験中の IV 特性を図 2. 3. 6 に示す。シクロヘキセン添加前後（純水素④、⑥）とシクロヘキセン 300ppm 添加中（300ppm①、②）の IV 特性を比較すると、セル電圧はシクロヘキセン添加時の方が同等ないし数mV 低く、シクロヘキセンの電池スタック電圧への影響がある可能性が示唆された。ただし、セル電圧の差は 1~2 測定分解能程度であり、システム運転ができなくなるような影響はみられなかった。

また、シクロヘキセン 300ppm 添加中（300ppm①、②）と添加試験後（純水素⑥）の IV 特性を比較すると、添加試験後のセル電圧が若干高いため（1 測定分解能程度）、シクロヘキセンの影響は可逆の可能性があると考えられる。

さらに、300ppm における運転時間は累積 20 時間と短い、150ppm と 300ppm の濃度の違いによる燃料電池の性能への影響の差は見られなかった。

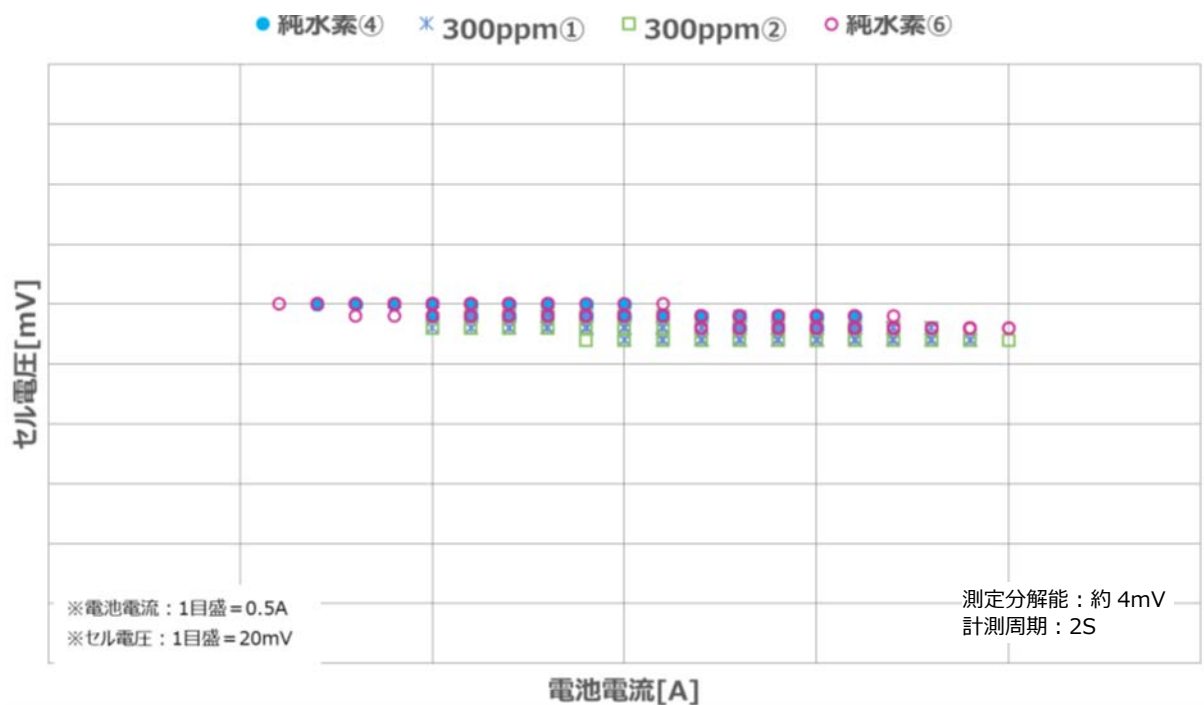


図 2. 3. 6 純水素運転（添加試験前後）とシクロヘキセン 300ppm 添加中の IV 特性比較

②シクロヘキサンの場合

試験結果として、試験ガス全条件のシステム発電出力とセル電圧の変化を図 2. 3. 7 に、純水素運転（150ppm 添加試験前後）とシクロヘキサン 150ppm 添加試験中の IV 特性を図 2. 3. 8 に、純水素運転（300ppm 添加試験前後）とシクロヘキサン 300ppm 添加試験中の IV 特性を図 2. 3. 9 に示す。

試験ガス全条件において、システム発電出力は 700W で安定していることを確認した。また、シクロヘキサンを 150ppm、300ppm 添加しても運転停止に至らず、添加有り無しでは、セル電圧に顕著な差が見られないことがわかった。

シクロヘキサン 150ppm 添加前後（純水素②、④）とシクロヘキサン 150ppm 添加中（150ppm ①、⑨、⑫）の IV 特性を比較する。添加中のデータは、添加始めの累積 10 時間目、添加終わりの累積 120 時間目、及びセル電圧低下量の最も大きい累積 90 時間目のデータを選定した。その結果、セル電圧はシクロヘキサン添加時の方が同等ないし数 mV 低い。その差は 1~2 測定分解能程度であり、システム運転ができなくなるような影響はみられなかった。

シクロヘキサン 300ppm 添加前後（純水素④、⑥）とシクロヘキサン 300ppm 添加中（300ppm ①、②）の IV 特性を比較すると、150ppm の試験結果と同様に、セル電圧はシクロヘキサン添加時の方が同等ないし数 mV 低い。その差は 1~2 測定分解能程度であり、システム運転ができなくなるような影響はみられなかった。

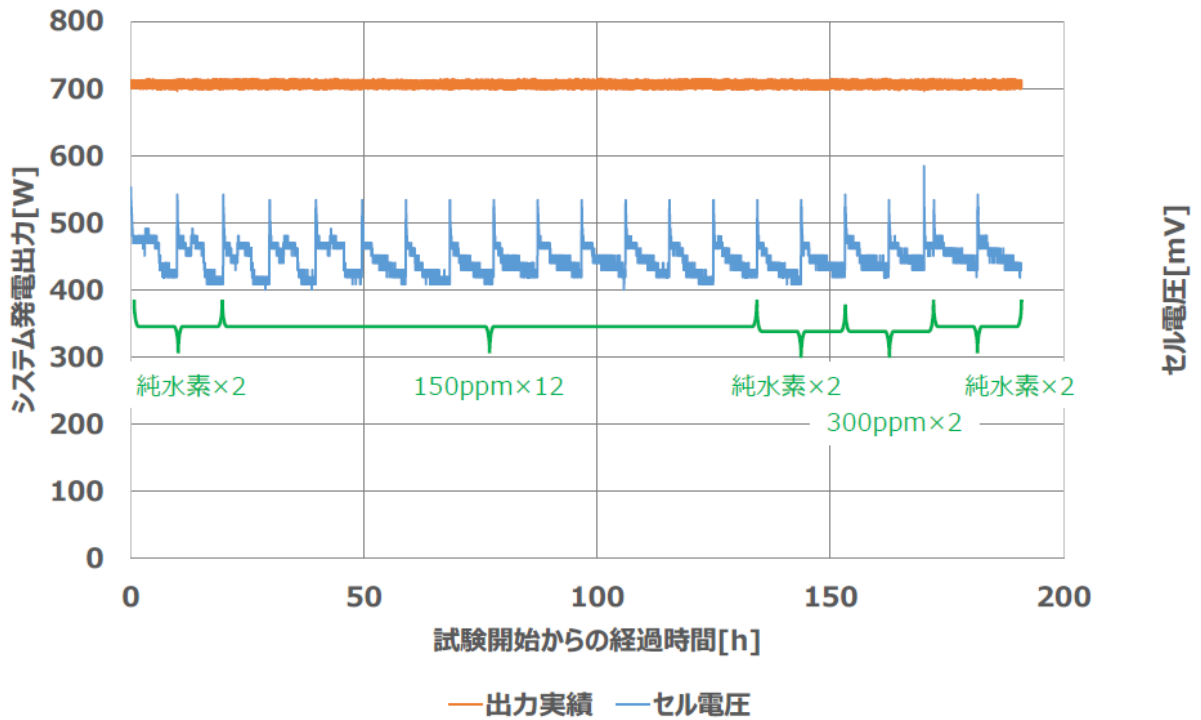


図2. 3. 7 システム発電出力とセル電圧の変化（試験ガス全条件（シクロヘキサン））

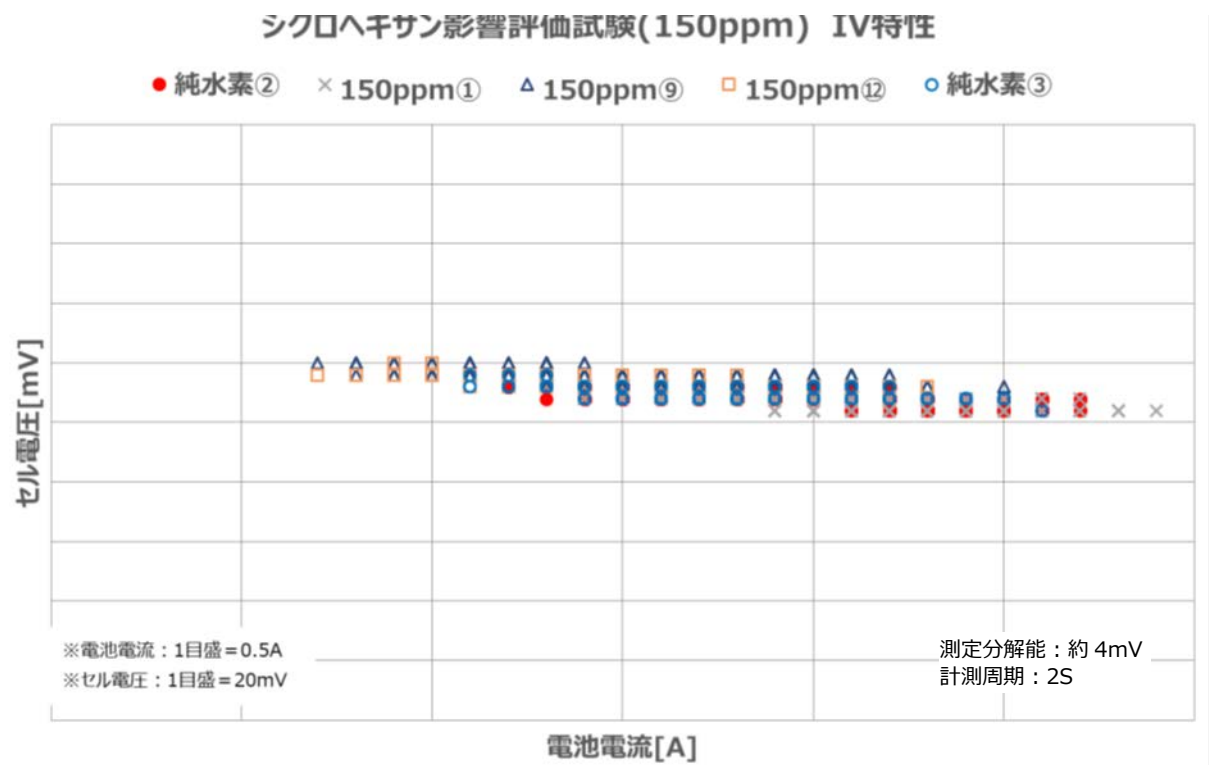


図2. 3. 8 純水素運転（添加試験前後）とシクロヘキサン 150ppm 添加中の IV 特性比較

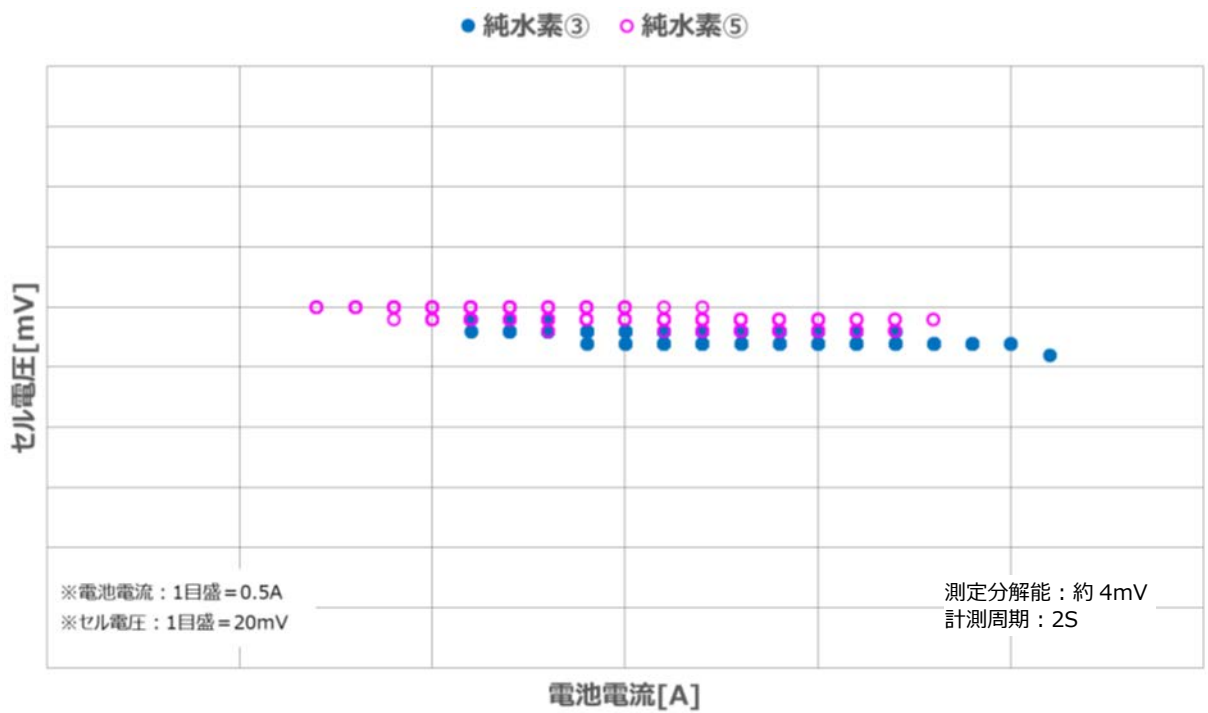


図2. 3. 9 純水素運転（添加試験前後）とシクロヘキサン 300ppm 添加中の IV 特性比較

(3) まとめ

シクロヘキセンを脱臭せずに運転した際の、燃料電池性能への長時間運転（累積 100 時間相当以上（連続 10 時間／回×10 回））の影響について評価を行った。試験の結果、累積 100 時間程度の運転で数 mV 程度（1～2 測定分解能程度）のセル電圧低下の影響が見られたが、運転ができなくなるほどのセル電圧低下は発生しなかった。また、シクロヘキセン添加試験後の純水素運転時のセル電圧が添加時より若干高いため（1 測定分解能程度）、シクロヘキセンの燃料電池性能への影響は可逆の可能性があると考えられる。

また、シクロヘキセンは電池スタック内でシクロヘキサンに水素化され、水素リサイクルラインにより濃縮されたシクロヘキサンが電池スタックに投入されるため、シクロヘキサンによる影響も同様に確認した。その結果、シクロヘキセンと同様に、累積 100 時間程度の運転で数 mV 程度（1～2 測定分解能程度）のセル電圧低下の影響が見られたが、運転ができなくなるほどのセル電圧低下は発生しなかった。

2. 4 排気臭気への影響調査

(1) 試験方法

シクロヘキセン濃度 150ppm 及び 300ppm における、700W 発電中（水素ブリード弁制御通常時）に、電池スタック出口（アノード出口）及びシステム排気口出口でガスを採取し、シクロヘキセン、シクロヘキサンの濃度を分析した。なお、電池スタック出口でのサンプリングは 60 分程度、システム排気口出口でのサンプリングは 40 分程度かけて実施しており、どちらも水素ブリード弁の開動作が入っているタイミングとした。また、電池スタック出口ガスのサンプリング自体が水素ブリード弁からのパージ動作と同じ状態となり、リサイクルライン中のシ

クロヘキセン、シクロヘキサン濃度が低下するため、システム排気口出口、電池スタック出口、の順でサンプリングを行った。

図2. 4. 1に燃料電池システム構成におけるガス採取箇所を示す。システム排気口出口では、水素リサイクルラインから定期的にパージされるアノード排ガスとカソード排ガス、システム内換気のための空気の混合ガスとなる。

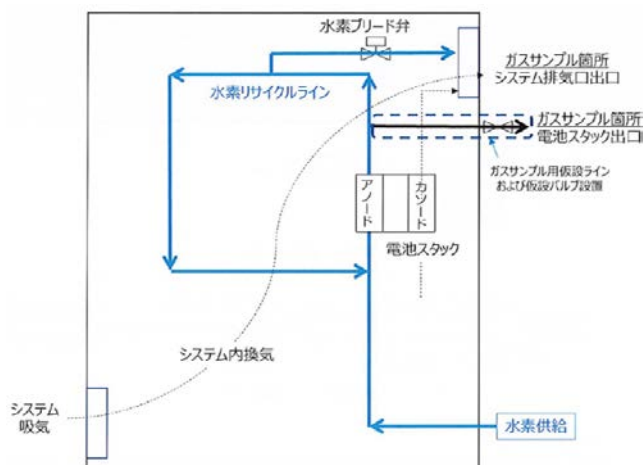


図2. 4. 1 燃料電池システム構成におけるガス採取箇所

(2) 試験結果

シクロヘキセン濃度 150ppm におけるガス分析結果を表2. 4. 1に、シクロヘキセン濃度 300ppm におけるガス分析結果を表2. 4. 2にそれぞれ示す。

2つの試験における電池スタック出口でのシクロヘキセン濃度は、2ppm 以下と微量であった。一方、シクロヘキサン濃度は、水素リサイクルによる濃縮の影響もあり、1400ppm (シクロヘキセン 150ppm 添加時) 及び 2200ppm (同 300ppm 添加時) であった。このことから、シクロヘキセンは、電池スタック内でほとんどが水素化され、電池スタック出口では臭気の弱いシクロヘキサンとして排出されることが確認された。

また、システム排気口出口でのガス分析結果については、換気用空気により希釈されているため、シクロヘキセンは検出されず、シクロヘキサン濃度は 3ppm 以下と低く、問題のないレベルであった。

さらに、複数人 (3人以上) による臭気評価の結果、炊飯器から排出される水蒸気のような臭気を感じるも、付臭剤のような異臭は感じなかった。

表2. 4. 1 シクロヘキセン濃度 150ppm におけるガス分析結果

(単位: vol ppm、サンプリング時間内の平均値)

	電池スタック出口	システム排気口出口
シクロヘキセン	0.50	0.02 未満
シクロヘキサン	1400	1.5

表 2. 4. 2 シクロヘキセン濃度 300ppm におけるガス分析結果 (単位 : vol ppm)
(単位 : vol ppm、サンプリング時間内の平均値)

	電池スタック出口	システム排気口出口
シクロヘキセン	2.0	0.02 未満
シクロヘキサン	2200	3.0

(3) まとめ

本試験において、シクロヘキセンは電池スタック内で水素化され、臭気の弱いシクロヘキサンとして排出されることが確認された。なお、本試験で濃縮後の濃度として計測された 2200ppm のシクロヘキサンが排出された場合、臭気閾値の 4.3ppm^{*7}以下として排気するには約 500 倍の希釈が必要であるが、本試験で使用した燃料電池システムでは、それ以上の倍率で希釈されており、ほぼ無臭となる。

また、システム入口より供給された水素と水素リサイクルラインにてリサイクルされた水素が混合されて、電池スタックへ投入されるため、電池スタック内でシクロヘキサンに水素化している場合、電池スタック入口のシクロヘキセン濃度は、システム入口よりも低い濃度で投入されることとなる。

※7 経済産業省委託事業「水素導管供給システムの安全性評価事業（総合調査）」（平成 29 年度）にて、シクロヘキセンの臭気閾値（付臭されたガスを徐々に希釈した時に臭気を感じることができなくなった時の濃度）は、シクロヘキサンの臭気閾値の約 1/70 であることを調査。シクロヘキセンの臭気閾値が 61.5ppb (0.0615ppm) のため、シクロヘキサンの臭気閾値は $0.0615\text{ppm} \times 70 = 4.3\text{ppm}$ となる。

2. 5 まとめ

開発中の燃料電池システムを用いた試験を実施し、長時間運転（累積 100 時間相当以上（連続 10 時間／回×10 回）による付臭措置（付臭剤シクロヘキセン、シクロヘキサン）の燃料電池性能への影響及び排気臭気への影響について確認し、脱臭装置なしでの長期運転の可能性について評価を行った。

付臭剤の燃料電池性能への影響については、累積 100 時間程度の運転で数 mV 程度のセル電圧低下の影響（1～2 測定分解能程度）が見られたが、運転ができなくなるほどのセル電圧低下は発生しなかった。また、付臭剤添加時と付臭剤添加後の純水素運転時のセル電圧を比較した結果、純水素運転時の方が若干高く、付臭剤の影響が可逆である可能性が示唆された。さらに、排気臭気への影響については、シクロヘキセンは電池スタック内で臭気強度の弱いシクロヘキサンに水素化され、さらにシステム排気口出口で、換気用空気により希釈されるため、排気はほぼ無臭であることが確認された。

以上より、累積 100 時間程度の運転結果としては、付臭剤による大きな影響は確認されなかったが、今後の実用化検討にあたっては、メーカー等において、付臭剤を添加した水素で連続運転を含めた長時間運転(10 年相当寿命)した場合の燃料電池性能(電池スタック電圧)、排気臭気及び寿命に対する影響などを確認していく必要があると考える。

3. 他調査の実施者に対する助言等

他調査の各実施者との会議（以下、連携会議という。）や推進ワーキンググループ等を通じて他調査の実施者との連携を図りながら、必要な協議、助言等を実施した。また、他調査の調査目的と調査結果に対する考察を以下に示す。

3. 1 地中および大気中の水素拡散挙動調査

(1) 調査概要

水素ガス漏えいを迅速に検知、遮断等の措置を講じるための技術を対象とし、地中埋設導管からのガス漏えい時の対応措置検討において基本的な知見となりうる地中及び大気中（地表面近傍）での拡散挙動を把握、整理する。本年度は、平成28年度及び平成29年度、平成30年度の調査結果（一般的な道路構造における、均一な性質の土が地中に分布している環境における拡散挙動を調査）を踏まえ、地中埋設導管からの水素ガス漏えい時における対応措置の検討において、基本的な知見となり得る、地中障害物による地中及び大気中（地表面近傍）への拡散挙動への影響を確認するため、実フィールド試験及びシミュレーションを行い、水素ガスの拡散挙動について調査した。

(2) 実施した助言等（主なもの）

- ①一般的な道路構造部にて想定される地中障害物に関する情報提供
- ②試験条件や試験時間等、実フィールド試験方法に関する提案
- ③濃度計測センサ配置方法とその測定方法に関する提案

等、上記助言を行い、試験及びシミュレーションの条件設定や考察に反映させた。

(3) 調査結果

地中障害物を設置した実フィールド試験にて、地中及び大気中の水素拡散挙動の経時変化を確認した。

地中においては、地中障害物による高濃度水素範囲の拡大が確認された。大気中においては、平成30年度の調査結果と同様に、大気中（舗装透過後）の水素濃度計測では漏えい位置特定が困難なことを確認した。また、実験結果の再現性評価により、シミュレーションによって実運用時に近い条件においても地中及び大気中の水素拡散挙動を評価できることを確認した。

3. 2 水素導管の大規模損傷リスク評価

(1) 調査概要

大規模事故シナリオ（リスクシナリオ）の設定をもとに、漏えいした水素に着火した場合等、事故発生時の周囲影響の定性的・定量的評価及びそれを踏まえたリスク対策（対応措置や外部影響の緩和策等の提言）に資する技術的知見を得ることとしている。本年度は、平成28年度及び平成29年度、平成30年度の調査結果（漏えい水素に着火した場合の火炎や爆風圧等の周囲影響を調査）を踏まえ、損傷によって漏えいした水素に着火し、火炎が形成された後に供給停止した場合の、火炎の持続挙動や管内側への火炎伝播挙動を実験的に把握、整理した。

(2) 実施した助言等（主なもの）

- ①大規模漏えい発生時の漏えい状況に関する情報提供
 - ②試験方法（条件や安全対策等）に関する提案、考察
 - ③試験結果の考察方法に関する提案
- 等、上記助言を行い、実験方法や条件設定、考察に反映させた。

(3) 調査結果

損傷等による管内濃度変化については、損傷を想定した孔径が大きいほど空気が侵入しやすく、水素との混合が促進されやすい。また、孔の位置は上方よりも水平（管体の側面）の方が空気層・水素層に分かれやすいため拡散が進み、さらに傾斜がある方が、同様に拡散が進みやすい傾向がある。ただ、着火時における火炎の管内への侵入（逆火）については、孔の位置及び傾斜の影響は少なく、孔径の大きさが最も影響し、50A の全破断では管端から管内へ約 80cm の逆火が生じることを確認した。

4. 委員会の設置、運営

4. 1 特別専門委員会

令和元年度は、全3回の特別専門委員会を開催した。以下に、全3回の委員会の開催内容について記す。

(1) 第1回特別専門委員会

日時： 令和元年8月8日（木） 10:00～12:00

場所： 日本ガス協会 7階 701会議室
(東京都港区虎ノ門1-15-12)

- 議題： ① 委員長挨拶、委員並びに関係者の紹介
② 令和元年度「水素導管供給システムの安全性評価事業」事業計画の審議
③ その他

(2) 第2回特別専門委員会

日時： 令和元年12月17日（火） 15:00～17:00

場所： 日本ガス協会 7階 701会議室
(東京都港区虎ノ門1-15-12)

- 議題： ① 令和元年度「水素導管供給システムの安全性評価事業」事業進捗状況の審議
② その他

(3) 第3回特別専門委員会

日時： 令和2年2月12日（水） 15:00～17:00

場所： 日本ガス協会 7階 701会議室
(東京都港区虎ノ門1-15-12)

- 議題： ① 令和元年度「水素導管供給システムの安全性評価事業」事業成果の審議
② その他

4. 2 推進ワーキンググループ

令和元年度は、全5回の推進ワーキンググループを開催した。以下に、全5回の推進ワーキンググループの開催内容について記す。

(1) 第1回推進ワーキンググループ

日時： 令和元年7月24日（水） 13:30～17:00

場所： 日本ガス協会 7階 702会議室
(東京都港区虎ノ門1-15-12)

- 議題： ① 本年度事業の全体計画（役割分担・スケジュール等）
② 第1回特別専門委員会に向けた報告内容の確認
③ その他

(2) 第2回推進ワーキンググループ

日時： 令和元年9月5日(木) 15:30~17:00

場所： 東邦ガス(株) 会議室
(愛知県名古屋市中熱田区桜田町19-18)

議題： ① 各テーマ進捗状況の共有及び協議
② その他

(3) 第3回推進ワーキンググループ

日時： 令和元年12月10日(火) 11:00~15:00

場所： 日本ガス協会 7階 707会議室
(東京都港区虎ノ門1-15-12)

議題： ① 第2回特別専門委員会に向けた報告内容の確認
② その他

(4) 第4回推進ワーキンググループ

日時： 令和2年2月4日(金) 9:30~12:00

場所： 西部ガス(株) 会議室
(福岡市博多区千代1-17-1)

議題： ① 第3回特別専門委員会に向けた報告内容の確認
② その他

(5) 第5回推進ワーキンググループ

日時： 令和2年3月9日(火) 13:00~17:20

場所： 日本ガス協会 7階 708会議室
(東京都港区虎ノ門1-15-12)

議題： ① 第3回特別専門委員会を踏まえた事業成果報告内容の確認
② その他

(6) 第5回推進ワーキンググループ(継続)

日時： 令和2年3月10日(水) 9:30~17:20

場所： 日本ガス協会 7階 702会議室
(東京都港区虎ノ門1-15-12)

議題： ① 第3回特別専門委員会を踏まえた事業成果報告内容の確認
② その他

5. 水素導管供給システムの安全性評価事業のとりまとめ

5. 1. 1 過去の水素パイプライン供給に係る委託事業の経緯

水素パイプライン供給に係る委託事業は、平成 17 年度からガス事業法による水素導管供給の可能性を評価するための調査として実施してきた。将来の水素社会における水素パイプラインの想定（前提条件）を、中圧及び低圧による少数需要家向けの供給とし且つ、新設するローカルな水素導管と設定し、ガス工作物（技術基準）の水素適合性評価を目的に技術調査を行ってきた。前提条件とした想定イメージを図 5. 1. 1 に示す。

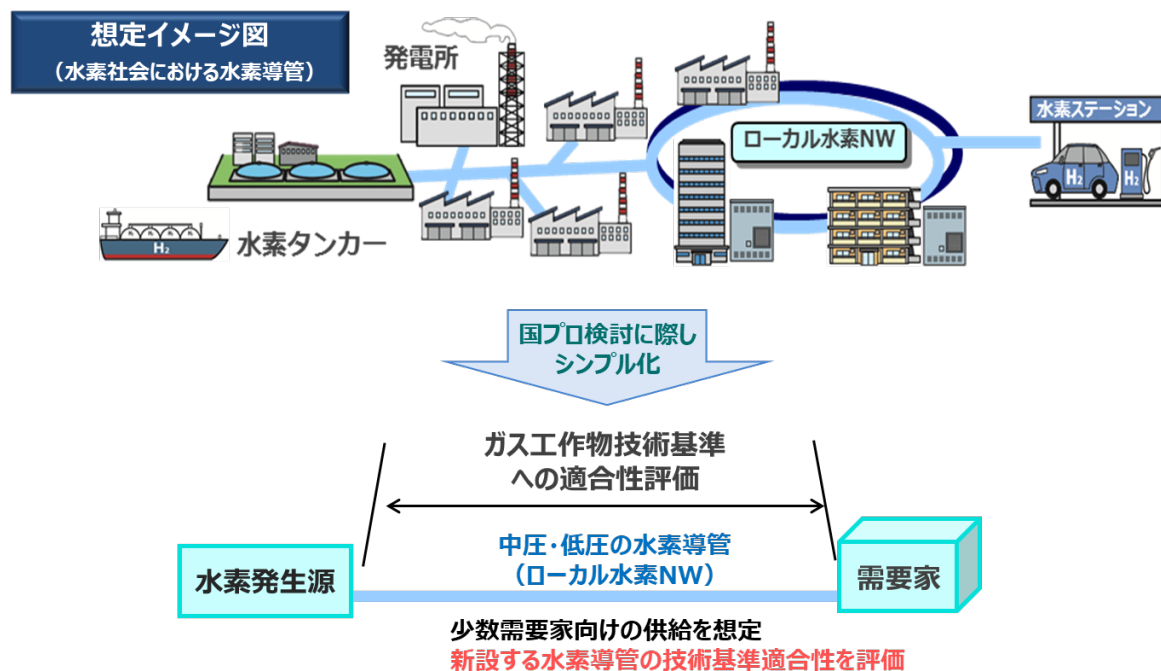


図 5. 1. 1 水素社会における水素導管の想定イメージ

平成 17 年度～19 年度に実施された「水素供給システムの安全性技術調査」から事業を開始し、それ以降、平成 18 年度～20 年度の「水漏えい検知技術調査」、平成 23 年度～27 年度の「水素ネットワーク構築導管保安技術調査」がある。いずれの事業も中圧及び低圧導管を対象に、水素供給に向けた技術的知見を蓄積してきた。

また、平成 28 年度～令和元年度までの 4 年間は、委託事業の最終事業として「水素導管供給システムの安全性評価事業」にて、水素導管供給の維持管理に関する技術調査を実施してきた。これらの経緯及び活動概要、調査結果を、図 5. 1. 2、図 5. 1. 3、図 5. 1. 4 に示す。



図 5. 1. 2 委託事業の経緯

事業名	目的と成果
① 水素供給システム 安全性技術調査事業 (H17～H19年度)	<p>《目的》 現行の中低圧導管材料を水素輸送に供する場合の基本的な材料特性調査を行う。</p> <p>《成果》 現行の主な導管材料（炭素鋼鋼管およびポリエチレン管等）の水素脆性や気密性の面について適合性を確認。 （評価した導管材料等の水素脆化は認められず、基本的な継手類の気密性低下もないことから、中低圧の水素供給に適合できる。）</p>
② 水素漏えい 検知技術調査事業 (H18～H20年度)	<p>《目的》 水素が漏えいした場合、需要家がすぐに分かるための付臭等について調査を行う。</p> <p>《成果》 水素付臭剤としてのシクロヘキセンの適用性（土壌透過性）およびガス同等の方法（検知器と臭気感知）で水素漏えいが検知可能であることを確認。</p>
③ 水素ネットワーク構築 導管保安技術調査事業 (H23～H25年度)	<p>《目的》 将来の水素パイプラインネットワークの構築に向け、保安確保のために、現時点で不可欠と考えられる検証データを取得する。【外管を対象】</p> <p>《成果》 施工法の安全性評価、水素漏えい時の拡散挙動確認、水素置換挙動確認、水素導管圧力解析を実施し、成果・課題を整理。</p>
④ 水素ネットワーク構築 導管保安技術調査事業 (H26～H27年度)	<p>《目的》 将来の水素パイプライン供給に向け、建物内とその周辺の水素配管に関する保安確保のために、現時点で不可欠と考えられる検証データを取得する。【内管を対象】</p> <p>《成果》 水素置換の挙動、配管材料の水素適合性を確認。</p>
⑤ 水素導管供給システムの 安全性評価事業 (H28～R1年度)	<p>《目的》 実用化が想定される水素導管の供給形態を見据え、実際に運用していく際の、維持管理に関する技術的課題を調査する。</p> <p>《成果》 遮断弁シール材料、緊急時の活管遮断工法の水素適合性を確認。地中および大気中の拡散挙動、大規模な損傷事故時のリスク評価、付臭措置並びに付臭代替措置を調査し、成果・課題を整理。</p>

図 5. 1. 3 委託事業の概要

		調査状況	
技術基準 (~2015)	ガス管等材料	済	中圧：鋼管 低圧：PE管
	付臭措置	付臭剤：済	
	バルブ（遮断弁）	機器影響：済	
	ガバナ（整圧器）	済	
	ガスメーター (低圧のみガス工作物)	計量機能：済	
		遮断機能：済	
	工法	分岐・穿孔	済
遮断		済	
応急処置		済	
維持管理 (2016~)	・損傷リスク評価 ・地中・大気拡散	済	

図5. 1. 4 調査結果の概要（赤枠は本年度事業）

5. 1. 2 とりまとめの進め方

これまでの過去事業では、平成27年度の「水素ネットワーク構築導管保安技術調査」をもって、水素パイプライン供給における材料（設計）や工事方法（施工）等の基礎的な技術調査を終えたことから、事業スタート時からの過去10か年分のとりまとめ^{※1}を行った経緯がある。

このたび、今年度事業の成果をもって、平成28年度から取り組んでいる「水素導管供給システムの安全性評価事業における」維持管理に関する技術調査を終えることから、過去4か年分のとりまとめを行うこととした。とりまとめ対象の、4か年事業の成果一覧を表5. 1. 3に示す。

成果のとりまとめは、（1）水素導管の大規模損傷リスク、（2）地中・大気中の水素拡散挙動調査、（3）穿孔作業の水素適用性調査、（4）付臭措置、（5）付臭代替措置の、（6）遮断弁評価の6テーマを対象にした。なお、今年度のみのも事業であったガス遮断機能を有するガスメーターの「遮断弁評価」は、本年度調査報告書に記載があるため本項では除外とした。

とりまとめに当たっては、過去のとりまとめを参考にしつつ、単に各年度の報告書をレビューするだけでなく、今後利用者が成果を活用しやすいとりまとめとなるよう留意した。そのため、事業ごとでのとりまとめではなく、成果項目別に整理することや、できる限り簡素化するなどの作業を行った。また、概要整理した、別紙（「4か年レビュー」）も参照のこと。

なお、詳細にあたっては、過去の各調査事業報告書を参照頂きたい。

※1 経済産業省委託事業 平成27年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査 別紙（「10年レビュー」）参照

表5. 1. 1 成果とりまとめ一覧

	H28年度（2016年度）	H29年度（2017年度）	H30年度（2018年度）	令和元年度（2019年度）
1. 水素導管の大規模損傷リスク評価	<ul style="list-style-type: none"> ・既往研究調査 ・着火実験（開放空間） ・シミュレーションによる拡散挙動調査 	<ul style="list-style-type: none"> ・着火実験（掘削坑内想定） ・シミュレーションによる拡散挙動調査 	<ul style="list-style-type: none"> ・供給遮断による着火影響低減効果検証 ・事故発生時のリスク対策に関する提言 	<ul style="list-style-type: none"> ・噴出ガスに着火した場合の、管内側への着火影響を調査 ・事故発生時のリスク対策に関する提言
2. 地中・大気中の水素拡散挙動調査 受託：四国総合研究所	<ul style="list-style-type: none"> ・模擬土砂での基礎実験 ・シミュレーションによる再現検証 	<ul style="list-style-type: none"> ・フィールド実験（漏えい深さ0.7m、舗装なし） ・シミュレーションによる再現検証・補完 	<ul style="list-style-type: none"> ・フィールド実験（漏えい深さ1.2m、舗装あり） ・シミュレーションによる再現検証・補完 	<ul style="list-style-type: none"> ・地中内障害物による拡散挙動への影響調査 ・フィールド実験（漏えい深さ1.2m、舗装あり） ・シミュレーションによる再現検証・補完
3. 穿孔作業の水素適用性調査 受託：日鉄住金P&E	<ul style="list-style-type: none"> ・施工機器の水素適用性確認 ・穿孔部温度測定 ・穿孔試験、遮断試験 			
4. 総合調査 受託：日本ガス協会	<ul style="list-style-type: none"> ・他調査への助言 ・委員会設置、運営 	<ul style="list-style-type: none"> ・他調査への助言 ・委員会設置、運営 	<ul style="list-style-type: none"> ・他調査への助言 ・委員会設置、運営 	<ul style="list-style-type: none"> ・他調査への助言 ・委員会設置、運営
付臭措置		文献調査	短時間試験（連続10h）	長時間試験（累積100h）
付臭代替措置		水素検知センサ技術調査（ハンドホール内設置）	水素検知センサ技術調査（埋設環境・水没調査）	
技術基準	維持管理技術の調査			遮断弁（シール材）評価

5. 1. 3 総まとめ（ガス工作物の水素適合性）

これまで、現行定められているガス工作物に係る技術基準が、新設する水素導管による供給（中圧・低圧）に適合できるかを評価・整理してきた。その結果、現行の技術基準が適合できることが確認された。なお、本結果（事業の総括）は、令和2年3月11日に開催された経済産業省 産業構造審議会 保安・消費生活用製品安全分科会 ガス安全小委員会においても報告された。

5. 2 過去成果のまとめ

5. 2. 1 水素導管の大規模損傷リスク評価事業

(1) 調査目的

水素導管供給システムの大規模事故シナリオ（リスクシナリオ）の設定をもとに、漏えいした水素に着火した場合等、事故発生時の周囲影響の定性的・定量的評価及びそれを踏まえたリスク対策（対応措置や回避措置等の提言）に資する技術的知見を得ることを目的とする。

(2) 調査概要

①平成 28 年度

漏えい水素の開放空間への噴出（架空噴出）を想定し、漏えい孔径（Φ5mm/10mm）及び供給圧力（0.3Mpa/0.5MPa）を条件に、濃度分布の計測及び着火時の周囲への影響リスク評価を実施した。

②平成 29 年度

水素が滞留しやすい半閉空間（掘方内噴出）を想定し、漏えい水素の条件を漏えい孔径 Φ10mm、供給圧力（0.1MPa/0.3MPa/0.5MPa）、掘方サイズ（30cm/80cm/120cm）の条件で実験を実施し、濃度分布の計測及び着火時の周囲への影響リスク評価を実施した。着火位置を掘方内に複数点設置し、着火位置の差異による爆発挙動への影響評価も行った。

③平成 30 年度

前年度の半閉空間（掘方内噴出）における着火時の爆風圧のリスクを低減する対策として、遮断弁による圧力（流量）低減の影響評価を実施した。前年度に大きなピーク波（爆風圧）が発生した条件（漏えい孔径 10mm、圧力 0.1MPa、掘方 80cm）を基に、圧力低下ごとの掘方内の着火時の爆風圧を計測し、火炎挙動をカメラで可視化した。損傷孔径の影響（7mm、14mm）も評価している。

④令和元年度

前年度の調査（着火実験）の過程で、水素供給停止後に管内を窒素置換した際、消失したと思われた火炎が管外側に再出現する現象が見られた。火炎の再出現は潜在的なリスクとなるため、導管から漏えいした水素への着火後、遮断措置により管内への空気混入と同時に火炎が侵入する現象（管内側における燃焼を、以下「逆火」と呼称）について検証を行った。損傷を想定した漏えい孔径、漏えい孔の位置、管の傾斜等を条件として、シミュレーションおよび実験で水素濃度値を検証することにより、空気が混入し、予混合となる範囲を整理した。また、温度計測、可視化観測実験により、逆火の有無および火炎の伝播挙動について調査した。

(3) 調査結果

①平成 28 年度の調査結果

開放空間への噴出（架空噴出）の場合、着火時の周囲へのリスク影響は、高温領域＞輻射熱＞爆風圧の順であることが分かった。実験結果を整理し、当影響を評価するためのスケール則を作成した（図 5. 2. 1）。

②平成 29 年度の調査結果

前年度の開放空間への噴出の場合と異なり、半閉空間（掘方）に滞留した水素と空気の混合

気に着火した際に発生する爆風圧（予混合爆発モデル）が、高温領域・輻射熱よりもリスクとなりうるということが分かった。

さらに、条件によっては予混合爆発モデルを上回る爆風圧が観測された。掘方サイズによっては、掘方内に噴出する水素の流速分布が爆風圧（燃焼形態）に影響を及ぼし、高速な噴出流に火炎が干渉すると、TNT 等価モデルに相当する鋭いピークを有する速い燃焼（爆風圧）が発生することが分かった。

これらの結果より、周囲への爆風圧の影響を示す TNT 等価モデル・予混合爆発モデルのスケール則を作成した（図5. 2. 2）。また、着火位置によって着火時の挙動が異なり、掘方の下方で着火すると上方の開放空間へ燃焼が促進されやすく大きな爆風圧が発生しやすい。なお、爆風圧の算定例として、供給圧力 0.1MPa・掘方 80cm の場合に TNT 等価モデルを適用すると、人間に直接被害を及ぼさない目安とされる 12.3kPa の爆風圧が到達する範囲（距離）は 11.4m となる。

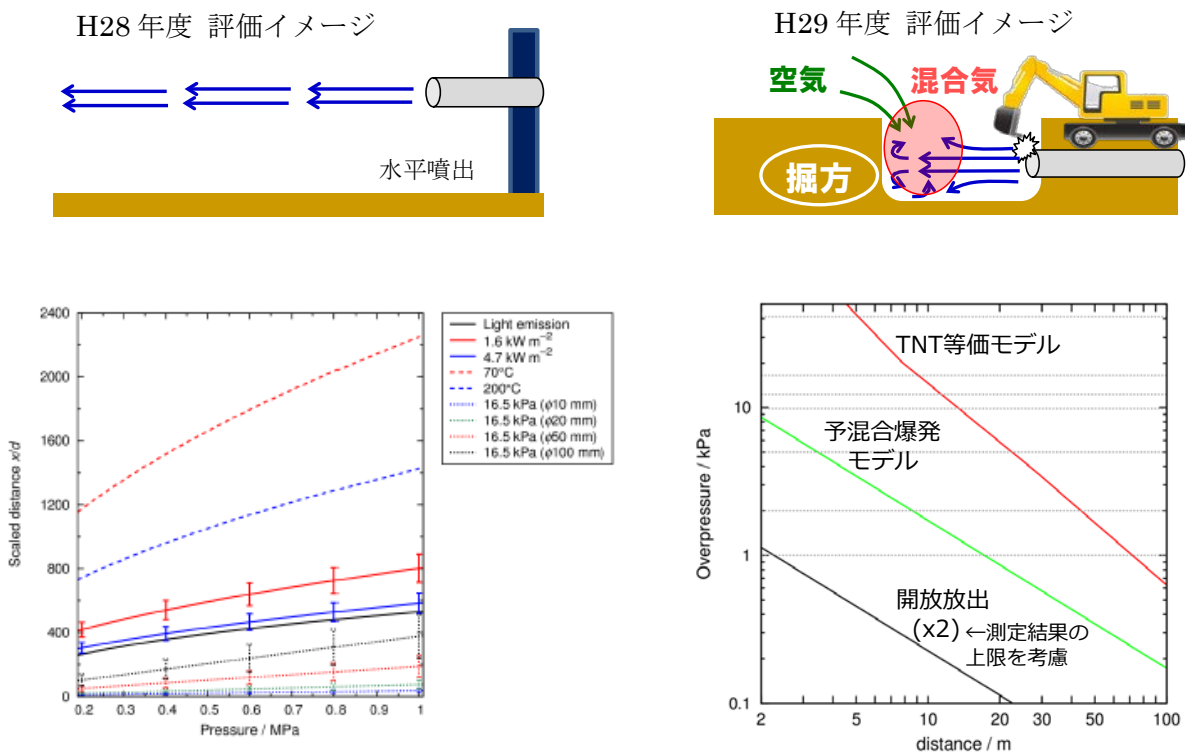


図5. 2. 1 影響リスクのスケール則の例

図5. 2. 2 爆風圧スケール則の例

③平成 30 年度の調査結果

前年度に大きなピーク波（爆風圧）を観測した供給圧力 0.100MPa（100kPa）、掘方サイズ 80cm（深さ 1.2m）、漏えい孔径 10mm の場合、圧力が 0.009MPa（9kPa）まで低下すると、発生する爆風圧は TNT 等価モデルから予混合爆発モデルの適用となることが実証された。その際、人間に直接被害を及ぼさない目安とされる 12.3kPa の爆風圧が到達する範囲は、当圧力値を境に、11.4m→2.5m まで低減する。ただし、予混合爆発のリスクは残ることに留意する。また、漏えい孔径を変化した場合、流量が同一でも小孔径で流速が速い方が坑内の流れが乱さ

れやすく、燃焼速度が上がることで爆風圧が大きくなる傾向が見られた。

④令和元年度の調査結果

全体の傾向として、濃度については損傷を想定した漏えい孔径が大きいほど空気が侵入しやすく、水素との混合が促進されやすい。漏えい孔の位置は上方よりも水平の方が空気層・水素層に分かれやすいため拡散が進み、傾斜がある方が同様に拡散が進みやすい傾向がある。ただ、着火時における逆火の管内への侵入については、漏えい孔の位置及び傾斜の影響は少なく、配管径に対する漏えい孔径の大きさが最も影響する。50A 全破断の場合、流量遮断後に端点で着火させた際に約 80cm 地点まで火炎が進み消失した。今回の試験条件では、火炎が長距離・長時間にわたり管内へ侵入する現象は確認できなかったが、条件が異なれば損傷箇所から離れた場所まで火炎が侵入する可能性が十分にあるため、注意を要する。

H30 年度 評価イメージ

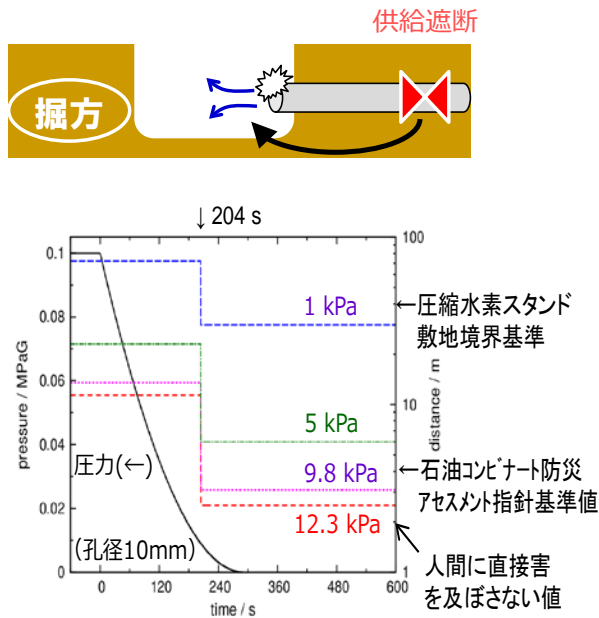
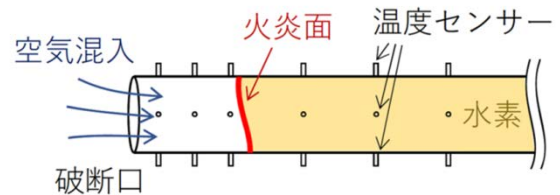


図5. 2. 3 爆風圧到達距離のスケール則

R1 年度 評価イメージ



損傷程度(孔径)	管径	逆火のしやすさ
小孔径(10mm)	150mm	小
大孔径(50mm)	150mm	↓ 大
全破断(50mm)	50mm	

5. 2. 2 地中および大気中の水素拡散挙動調査事業

(1) 調査目的

地中での水素ガス漏えいを迅速に検知、位置を特定、遮断等の措置を講じるための技術を対象とし、地中埋設導管からの水素漏えい時の対応措置検討において基本的な知見となりうる地中及び大気中（地表面近傍）での拡散挙動を把握、整理する。また、地中の条件には、基礎的な条件から実運用時に近い条件（舗装や地中障害物の有無）を設定するとともに、供給遮断後を想定した漏えい停止後の地中濃度の経時変化を確認し、実用面に考慮した調査とする。

(2) 調査概要

①平成 28 年度

土質（粒径バラつき等）の影響を排除した理想的な系について調査するため、粒径の揃ったガラスビーズを用い、小規模容器（直径 $\Phi 1\text{m}$ ）にて拡散挙動を確認した。

②平成 29 年度

土質影響を考慮した調査をするため、一般的な道路構造部へ使用される土砂（真砂土）を用い、実現場を想定したフィールド実験（直径 $\Phi 7\text{m}$ 、深さ 0.7m ）にて拡散挙動を確認した。

③平成 30 年度

舗装の影響も考慮した調査をするため、平成 29 年度調査で用いた土砂に加え、一般的な道路構造部へ使用される舗装を施した実フィールド実験（直径 $\Phi 7\text{m}$ 、深さ 1.2m ）を行い、拡散挙動を確認した。

④令和元年度

地中障害物の影響を考慮した調査をするため、平成 30 年度調査で用いた土砂及び舗装に加え、障害物の基本的な構成要素としての水平構造体と垂直構造体を埋設した実フィールド実験（直径 $\Phi 7\text{m}$ 、深さ 1.2m ）を行い、拡散挙動を確認した。

図 5. 2. 5 に、平成 28 年度の調査にて使用した小規模実験装置の外観と概要図を示す。また、図 5. 2. 6 に、平成 29 年度～令和元年度の調査にて使用したフィールド実験装置の外観と概要図を示す。

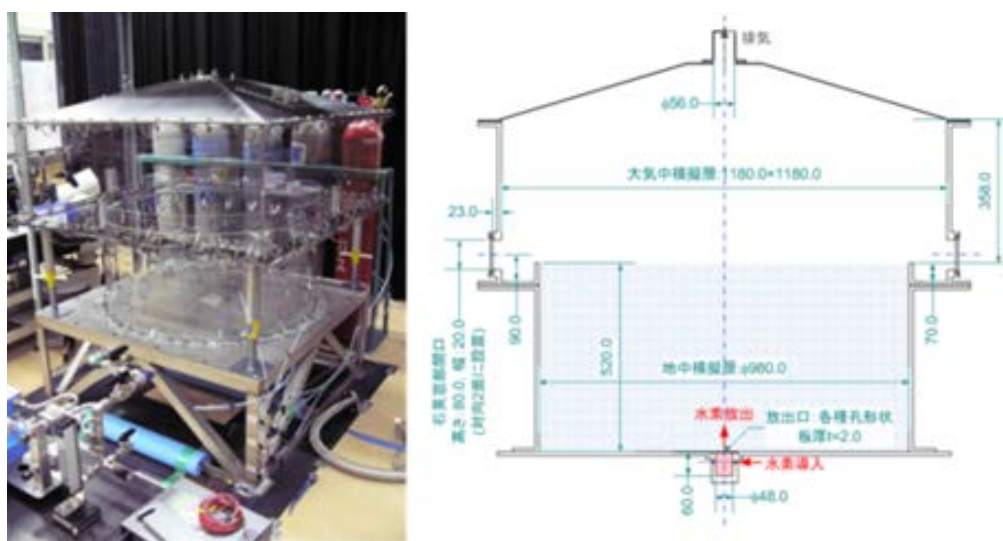


図 5. 2. 5 小規模実験装置（平成 28 年度）の外観と概要図

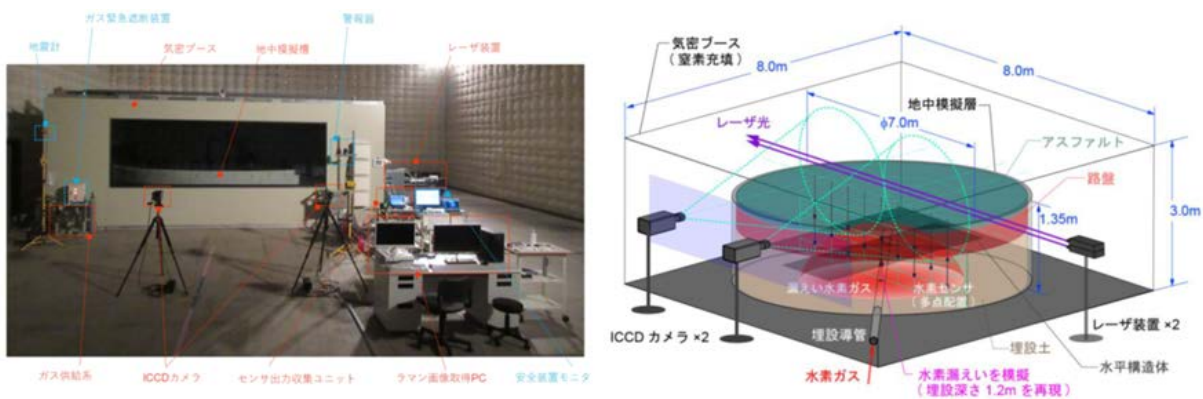


図5. 2. 6 フィールド実験装置（令和元年度）の外観と概要図

(3) 調査結果

表5. 2. 1に、平成28年度～令和元年度における調査内容の全体概要を示す。また、図5. 2. 7にフィールド実験結果の例（条件：真砂土+舗装）を示す。

①平成28年度の調査結果

気体熱伝導式ガスセンサにより、無酸素環境下における地中水素ガスの濃度計測が可能であることを確認し、地中における放出口を中心とした同心円状の濃度分布を把握した。また、レーザーラマンイメージングにより、地中から染み出した大気中の水素ガスの濃度分布計測が可能であることを確認した。

②平成29年度の調査結果

地中における放出口を中心とした同心円状の濃度分布と、平衡状態において地中に形成される高濃度の領域を把握した。また、漏えい停止後の経時変化を確認し、約5時間経過にて全ての計測点における水素濃度が4%を下回ることを確認した。大気中では、放出口の直上にピークを持つ正規分布上の濃度分布が形成されることを確認した。

③平成30年度の調査結果

アスファルト層により地中の水平方向への拡散が促進され、高濃度の水素範囲が拡大することを確認した。加えて、アスファルト層下部では放出口直上にピークを持つ濃度分布があるものの、アスファルト表面から大気に染み出す水素の濃度はほぼ一様であり、大気中（地表面近傍）の水素濃度計測では漏えい位置を特定することは困難であることが明らかになった。また、漏えい停止後の経時変化では、平成29年度に調査したアスファルト層がない場合と比べて水素が地中に長時間滞留することを明らかにした。

④令和元年度の調査結果

水平構造物により地中の水平方向への拡散が促進され、高濃度の水素範囲が拡大することを確認した。垂直構造物においては、垂直及び水平方向への拡散促進と高濃度水素範囲の拡大を確認するとともに、壁面近傍の転圧不足など施工の状態によっては、転圧不足の範囲を優先的に拡散する可能性があることが示唆された。漏えい停止後の経時変化では、水素が地中を水平方向に徐々に拡散しながら濃度低下する様子が確認された。大気中（地表面近傍）の水素濃度計測では、平成30年度と同様、漏えい位置を特定することは困難であることが確認された。

⑤地中及び大気中の水素拡散挙動シミュレーション解析と再現性

平成 28 年度～令和元年度に実施された、基礎的な条件から実運用時に近い条件における小規模実験あるいはフィールド実験に対し、水素拡散挙動シミュレーション解析による再現性を評価した結果、汎用数値流体解析ソフトウェア（本調査では ANSYS Fluent を使用）により地中及び大気中の拡散挙動を概ね良好に再現できることを確認した。

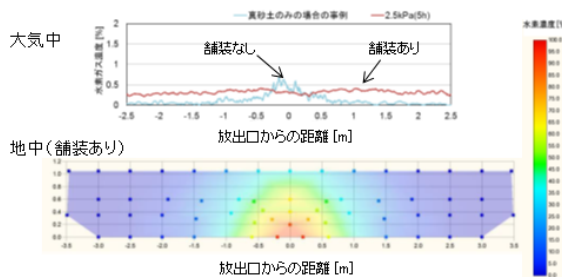
表 5. 2. 1 平成 28 年度～令和元年度における調査内容

	← 基礎的・理想的な条件			実運用に近い条件 →
年度	H28	H29	H30	R1
地中構成	ガラスビーズ	真砂土のみ	真砂土+舗装(アスファルト, 碎石)	真砂土+舗装(アスファルト, 碎石)+地中障害物
小規模実験	水素漏えい量 ・ 土壌層厚さが水素漏えい量に与える影響を確認 拡散挙動(地中) ・ 無酸素環境下において気体熱伝導式ガスセンサにより土壌中水素ガスの濃度計測が可能であることを確認 拡散挙動(大気中) ・ レーザラマン分光により、地中から大気中に染み出した水素ガスの濃度分布計測が可能であることを確認	水素漏えい量 ・ 「30cmφアルルパイプ」により、損傷形状(ピンホール面積)、供給圧力、土壌の乾圧状態(乾燥密度)の各パラメータが漏えい量に与える影響を確認 地質パラメータ ・ 「5.25cmφSUSパイプ」により、真砂土の透気係数及び拡散係数を計測	拡散挙動(地中, 大気中) ・ レーザラマン分光により、アスファルト舗装時においても大気中水素ガスの濃度分布計測が可能であることを確認 ・ アスファルト有無及び厚さ、供給圧力、アスファルト乳剤(カット剤)の有無の各パラメータが地中及び大気中の拡散挙動に与える影響を確認 地質パラメータ ・ 「10cmφアルルパイプ」により、真砂土とアスファルトの透気係数及び拡散係数を計測	拡散挙動(地中) ・ 地中障害物が垂直方向の拡散挙動に与える影響を確認 拡散挙動(大気中) ・ 地中障害物が大気中濃度分布に与える影響を確認 地質パラメータ ・ 「4.75cmφSUSパイプ」「10cmφアルルパイプ」により、真砂土, 碎石, アスファルトの透気係数及び拡散係数を計測
フィールド実験	(予備試験として真砂土を充て込んだ小規模容器による地中及び大気中の水素拡散挙動計測を実施)	拡散挙動(地中) ・ 放出口を中心とした同心円状の濃度分布を確認 ・ 平衡状態における爆発下限界を超える濃度領域を確認 ・ 漏えい停止後の経時変化を確認 拡散挙動(大気中) ・ 放出口直上が最も高い正規分布状の濃度分布を確認	拡散挙動(地中) ・ 放出口を中心とした同心円状の濃度分布を確認 ・ アスファルト層による水平方向への拡散促進、高濃度水素範囲の拡大を確認 ・ 漏えい停止後の経時変化を確認(アスファルト層により水素の地中滞留が長時間化) 拡散挙動(大気中) ・ アスファルト層通過後、ほぼ一様の濃度分布となることを確認	拡散挙動(地中) ・ 水平構造物:水平方向への拡散促進、高濃度水素範囲の拡大を確認 ・ 垂直構造物:垂直及び水平方向への拡散促進、高濃度水素範囲の拡大を確認 ・ 漏えい停止後の経時変化を確認 拡散挙動(大気中) ・ アスファルト層通過後、ほぼ一様の濃度分布となることを確認
シミュレーション	汎用数値流体解析ソフトウェア(ANSYS Fluent)により地中及び大気中の拡散挙動を評価できることを確認	地中及び大気中における拡散挙動を概ね良好に再現できることを確認	舗装(アスファルト, 碎石)時においても、地中及び大気中における拡散挙動を概ね良好に再現できることを確認	舗装(アスファルト, 碎石)及び地中障害物が存在しても、地中及び大気中における拡散挙動を概ね良好に再現できることを確認

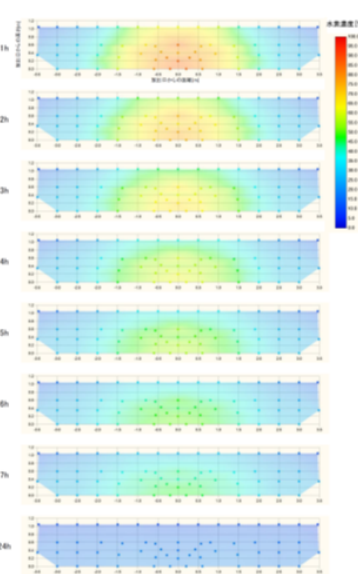
■フィールド実験結果の例

条件: 真砂土+舗装(アスファルト, 碎石)

地中障害物なし(供給圧力2.5kPa, 経過時間4h)における水素濃度分布



供給停止後の地中水素濃度分布の経時変化(供給圧力10kPa, 舗装あり, 地中障害物なし)



地中障害物あり(供給圧力2.5kPa, 経過時間6h)における水素濃度分布

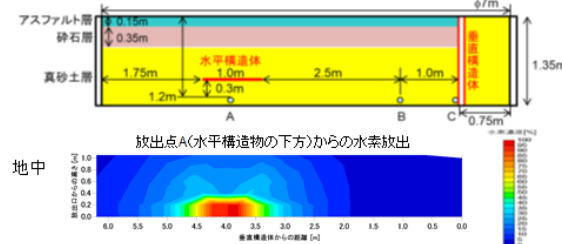


図 5. 2. 7 フィールド実験結果の例 (条件: 真砂土+舗装)

5. 2. 3 穿孔作業（活管遮断（緊急遮断））の水素適用性調査

（1）調査目的

水素導管供給システムにおいて、人為もしくは自然災害等で損傷し水素漏えいが生じた際、適切な箇所にてガス遮断等の措置を講ずる必要がある。活管遮断に用いる都市ガス用施工機器で、水素供給中の導管への穿孔ができ、水素供給を適切に遮断できるかどうかの調査を行った。

（2）調査概要

都市ガス用施工機器での施工性、水素遮断性能の確認に先立ち、水素気密性と穿孔貫通部の温度が水素の着火温度に到達していないかを確認した。

水素気密性は、各施工機器から外部への水素漏えいが無い事を気密性により確認した。試験圧力は、中圧(1MPa 未満)を想定し 0.9MPa 程度とした。穿孔貫通部の温度上昇を確認するために、口径 150A の SGP 管を用いて実際に穿孔作業を行い、貫通部の温度を測定した。

上記2つの確認結果を踏まえ、都市ガスと同じ工法・遮断機で SGP150A の水素導管に穿孔ができ、遮断が可能かを確認した。

（3）調査結果

①都市ガス用施工機器の水素気密性の確認

中圧(1MPa 未満)を想定し 0.9MPa 程度で、各施工機器から外部への水素漏えいがない事を気密試験で確認した。図 5. 2. 8 に穿孔機器の概要を示す。

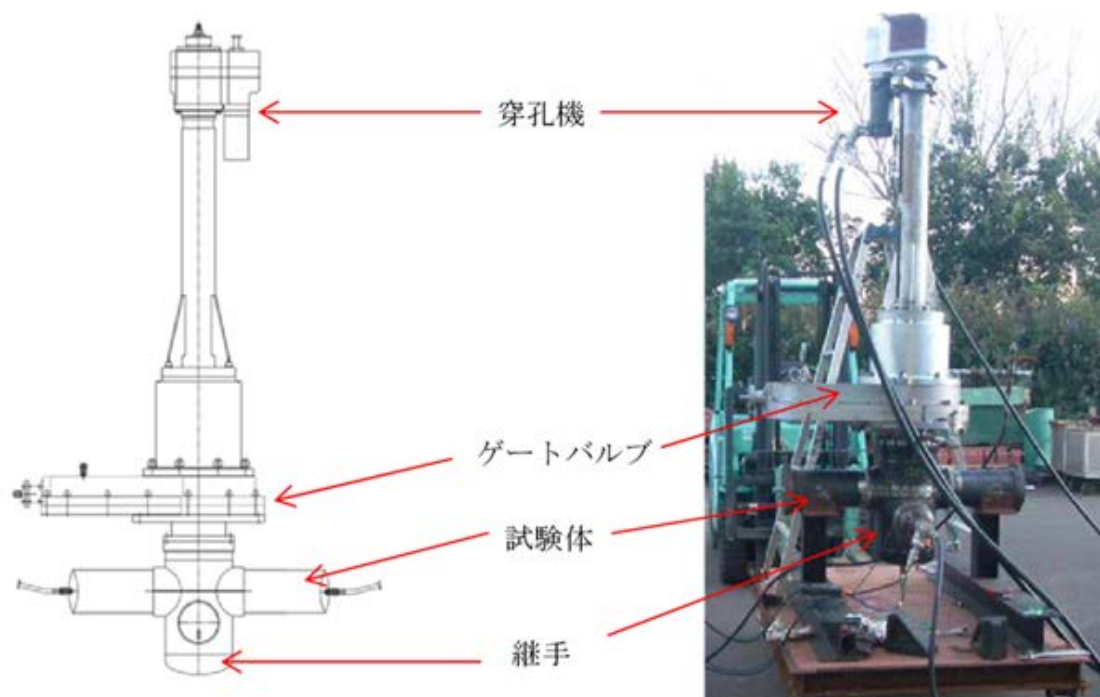


図 5. 2. 8 穿孔機器の概要

②穿孔部の温度測定

穿孔部は最高約 350℃であり、水素着火温度（約 500℃）未満を確認した。温度測定結果と穿孔部の様子を図 5. 2. 9 に示す。

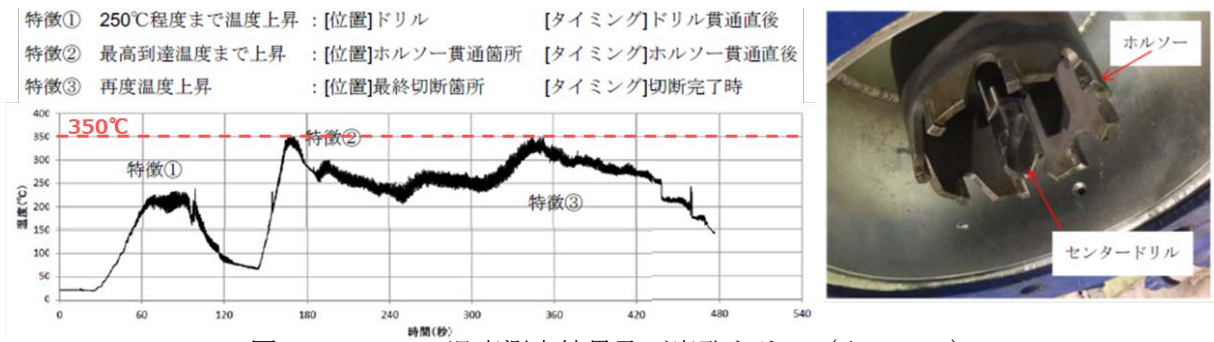


図 5. 2. 9 温度測定結果及び穿孔ドリル（ホルソー）

③施工性・水素遮断性能の確認

0.3MPa,0.9MPa の試験圧力で穿孔ができ、遮断が可能であることを確認した。穿孔機器による遮断の概要を図 5. 2. 10 に示す。

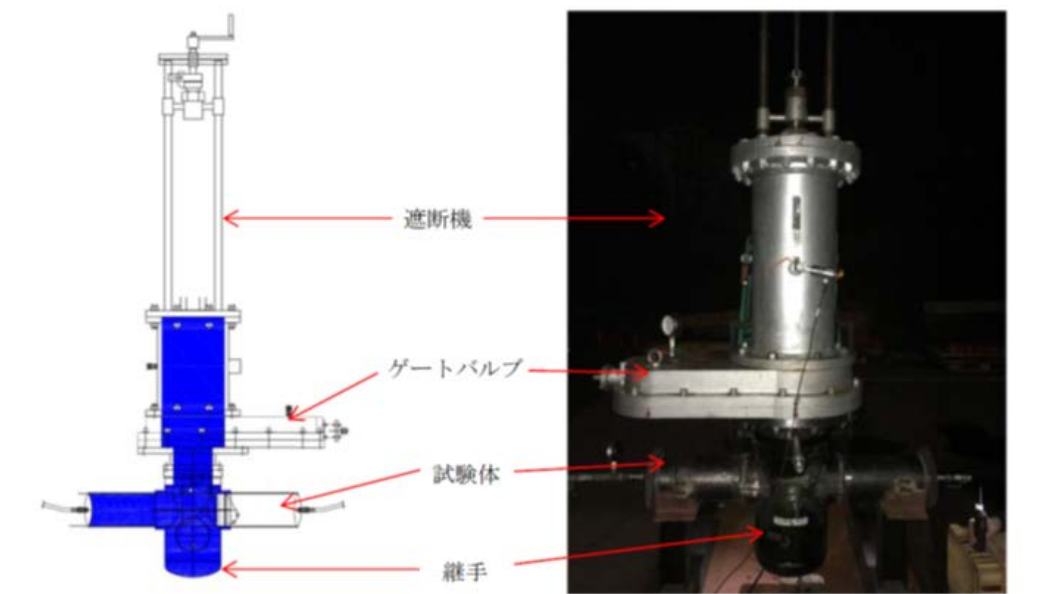


図 5. 2. 10 穿孔機器による遮断の概要

(4) 結論

活管遮断に用いる都市ガス用施工機器で、中圧以下の水素導管への穿孔ができ、水素遮断性能に問題の無いことを確認した。

5. 2. 4 付臭措置（総合調査事業）

（1）調査目的

過去の漏えい検知方法に関する調査として実施した経済産業省委託による技術調査事業 ※1 において、水素用付臭剤の最有力であると確認されたシクロヘキセン（非硫黄系付臭剤）について、未確認事項である、脱臭せずに燃料電池にて使用した場合の燃料電池性能への影響及び排気臭気への影響に関する調査を実施する。

※1 経済産業省委託事業 地方都市ガス事業天然ガス化促進対策調査「水素漏えい検知技術調査事業」（平成18年度～平成20年度）

（2）調査概要

①平成29年度

水素導管供給システムにおける付臭剤の候補として考えられる、硫黄系付臭剤及び非硫黄系付臭剤に関して、それぞれ脱硫または脱臭を行う場合と行わない場合に想定される技術的課題（機器（燃料電池）への影響、排気臭気影響等）について、国内外の文献等関連情報を基に情報収集・整理を行った。

②平成30年度

水素導管供給システムにおける付臭剤の候補として考えられるシクロヘキセンを含有する水素を、脱臭せずに燃料電池にて使用した場合を想定し、燃料電池性能（電池スタック電圧）への影響及び排気臭気への短時間運転時（連続10時間程度）の影響について、市販または開発中の燃料電池システム（または本システムに使用されている燃料電池セル）を用いた実験により調査を行った。

③令和元年度

平成30年度と同様に、燃料電池性能（電池スタック電圧）への影響及び排気臭気への長時間運転時（累積100時間程度（連続10時間／回×10回））の影響について、開発中の燃料電池システムを用いた実験により調査を行った。試験方法のイメージを図5. 2. 1 1に示す。

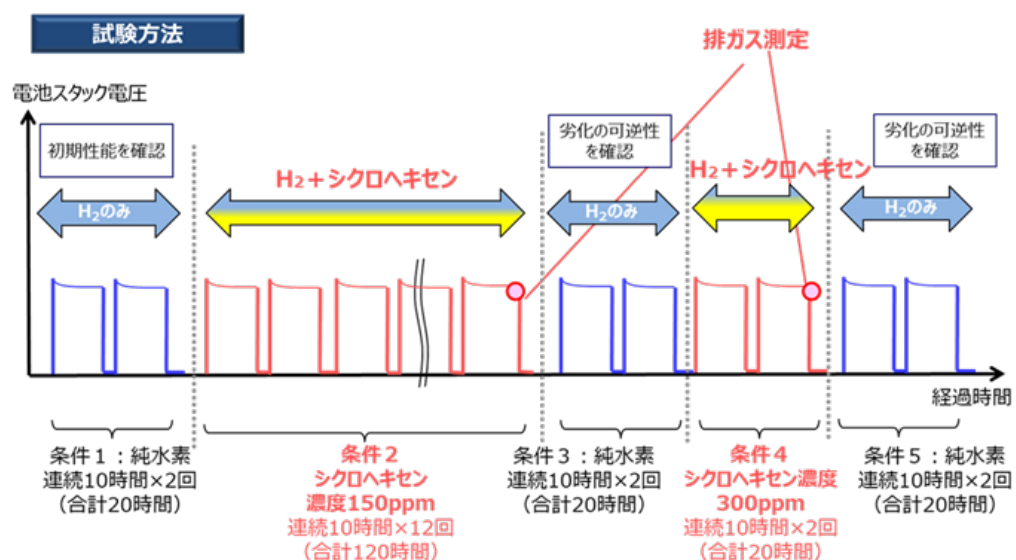


図5. 2. 1 1 試験方法イメージ図（シクロヘキセンの影響調査）

(3) 調査結果

①平成 29 年度の調査結果

既往研究や文献調査を実施し、電池スタック内でシクロヘキセン C_6H_{10} が臭気の弱いシクロヘキサン C_6H_{12} に水素化され、燃料電池性能及び排気臭気への影響がない可能性が示唆された。

②平成 30 年度の調査結果

連続 10 時間程度の運転では運転ができなくなるほどの電池スタック電圧低下は発生しないことを確認した。またシクロヘキセンは電池スタック内でシクロヘキサンに水素化され、さらにシステム排気口出口で、換気用空気により希釈されるため、排気はほぼ無臭であることが確認された。

③令和元年度の調査結果

平成 30 年度の短時間試験（連続 10 時間程度）の結果と同様に、累積 100 時間程度（連続 10 時間/回×10 回）の運転では運転ができなくなるほどの電池スタック電圧低下は発生しないことを確認した。またシクロヘキセンは電池スタック内でシクロヘキサンに水素化され、さらにシステム排気口出口で、換気用空気により希釈されるため、排気はほぼ無臭であることが確認された。結果の概要を、図 5. 2. 1 2、図 5. 2. 1 3、表 5. 2. 2 に示す。

なお、平成 29 年度から令和元年度までの成果一覧を表 5. 2. 3 に示す。

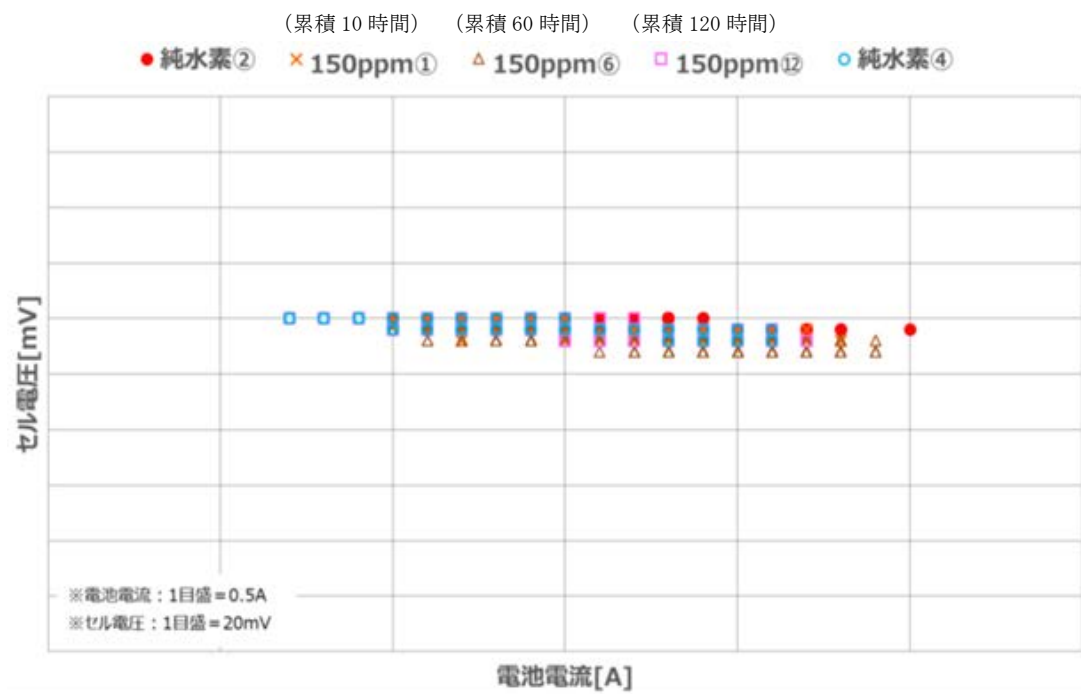


図 5. 2. 1 2 純水素運転とシクロヘキセン 150ppm 添加の IV 特性比較

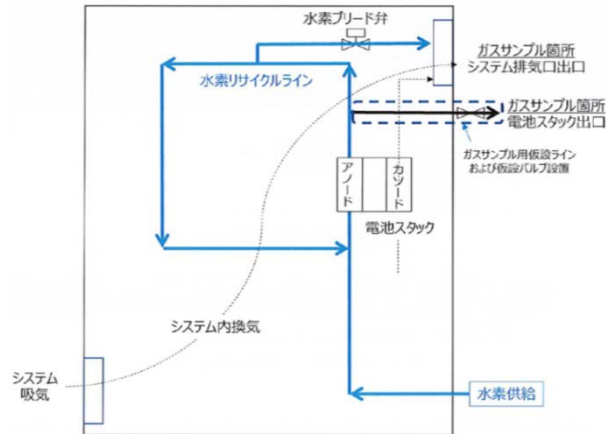


図 5. 2. 1 3 燃料電池システム構成におけるガス採取箇所

表 5. 2. 2 シクロヘキセン濃度 150ppm におけるガス分析結果

(単位 : vol ppm、サンプリング時間内の平均値)

	電池スタック出口	システム排気口出口
シクロヘキセン	0.50	0.02 未満
シクロヘキサン	1400	1.5

表 5. 2. 3 成果まとめ一覧

	燃料電池性能への影響	排気臭気への影響
H29	<p>既往研究、文献調査 ※1、2)により、電池スタック内でシクロヘキセン C_6H_{10} が臭気の弱い ※3シクロヘキサン C_6H_{12} に水素化され、性能、排ガス臭気への影響がない可能性を示唆。</p> <p>※1 「水素社会構築共通基盤整備事業」水素・燃料電池自動車の基準・標準化に係る研究開発 燃料電池性能評価法の標準化（燃料性状 WG 活動成果報告）平成 22 年 3 月（NEDO 平成 17 年度～平成 21 年度成果報告書、委託先：JARI）</p> <p>※2 「純水素 PEFC システム脱臭機構の簡素化に向けた取組み」（2011 年都市ガスシンポジウム）発表者：東京ガス株式会社</p> <p>※3 シクロヘキサンの臭気はシクロヘキセンの約 1/70</p>	
H30	<p>燃料電池セル、燃料電池システムを用いた試験により、連続 10 時間の運転では運転ができなくなるほどの影響が無いことを確認。</p> <p>・シクロヘキセン濃度：100、150ppm</p>	<p>電池スタック内でシクロヘキセンがシクロヘキサンに水素化され、換気用空気により希釈されるため、排気はほぼ無臭。</p> <p>システム排気口出口の排ガス分析結果：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・シクロヘキセン、シクロヘキサン、ベンゼンは 1ppm（定量下限値）未満 ・ホルムアルデヒドは 0.08ppm（定量下限値）未満

R1	<p>燃料電池システムを用いた試験により、累積 120 時間（連続 10 時間／回×12 回）の運転では運転ができなくなるほどの影響が無いことを確認。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・シクロヘキセン濃度：150、300ppm ・シクロヘキサン濃度：150、300ppm 	<p>同上</p> <p>システム排気口出口の排ガス分析結果：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・シクロヘキセン 0.02ppm（定量下限値）未満、シクロヘキサンは 3ppm 以下 ・臭気確認： 複数人（3 人以上）での確認の結果、水蒸気のような臭いはしたが、異臭は感じられなかった
----	--	--

5. 2. 5 付臭代替措置（総合調査事業）

（1）調査目的

水素導管供給システムを運用する上で、万が一水素が導管から漏えいした場合の保安を確保するため、都市ガスと同様に付臭措置又はそれに代わる付臭代替措置（漏えい検知装置の設置等）を講じる必要がある。本調査では、水素導管の埋設部における付臭代替措置（水素検知センサによる漏えい検知）の適用可否の検討に資する調査として、水素検知センサに関する技術調査を実施する。

（2）調査概要

①平成 29 年度

水素センサをハンドホール内へ設置する場合を想定して、水素検知センサに求められる要件について整理を行った（図 5. 2. 1 4）。また既存の水素検知センサについて、国内外の文献等関連情報を基に調査（リストアップ）し、リストアップされた水素検知センサについて、上記の要件を基に、水素導管供給システムにおける漏えい検知への適用可能性について検討を行った。

②平成 30 年度

水素センサの埋設環境に応じた地下水や雨水による影響を調査し、埋設された検知装置の水没がありうる環境下においても、水素センサを長期間にわたり保護することができる構造面の対策について調査・検討を行った。また雨水や地下水変動による水没可能性の調査も実施した。

（3）調査結果

①平成 29 年度

水素検知センサによる漏えい検知システム（ハンドホールの場合）に関して、センサの仕様上（性能・対環境）の課題としては、水没環境に対する開発・対応が必要である。

また、漏えい検知システム運用上の課題について、付臭措置との比較も含めて整理を実施し、水素検知センサによる漏えい検知システム特有の課題（電池駆動対応、無線出力対応、健全性の確認方法等）があることがわかった。

②平成 30 年度

水素センサを保護するハンドホール構造での対策の検討を行った結果、ハンドホール内への水の浸入対策に既存のフタ・フィルタの製品・技術を活用できる可能性があることがわかった。また、ハンドホールとは異なる構造での水の対策として、二重管構造による対策を検討した結果、製品化されている水素センサでは、二重管構造の場合に水素センサに求められる全ての目安値に適合する水素センサはないことがわかった。その他、いずれの場合においても、システム運用上の課題を整理した（表 5. 2. 4 ）。

また、水没可能性の調査の結果、国内主要 3 大都市について、浸水実績や浸水予測、内水氾濫予測、地下水位データを整理したところ、雨水や地下水変動によって地中に設置した水素センサが水没する可能性が示された。また、国内の各都市の地形・地表地質の特徴は概ね一致するため、各都市にて同様に水没する可能性があることがわかった。

水素センサによる漏えい検知については、様々なシステム構成が考えられるため、水素センサによる漏えい検知可否に関しては、今後、各事業者の具体的な運用方法（ハンドホール・二重管仕様）に応じた検討が必要となる。また、現在新たな検知原理のセンサが開発中であり、それらのセンサの開発動向を注視する必要がある。

なお、参考までに、水素検知センサによる漏えい検知システム（ハンドホールの場合）のシステム例ならびに、道路へのハンドホール敷設イメージをそれぞれ示す。水素導管埋設位置を考慮の上で、水素検知センサー（ハンドホール）を配置する必要があるため、多量のハンドホール設置に当たっては、道路管理者等との協議も必要となる（図5. 2. 15）。

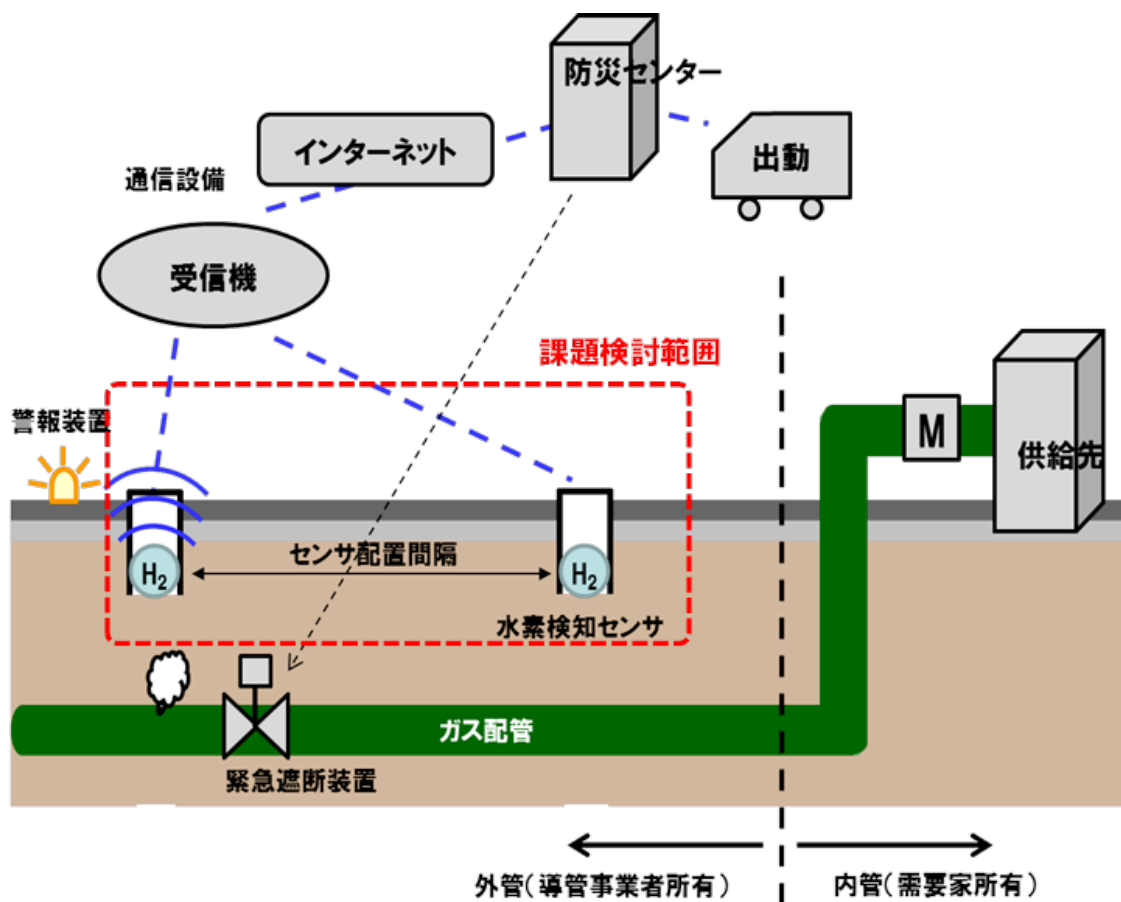
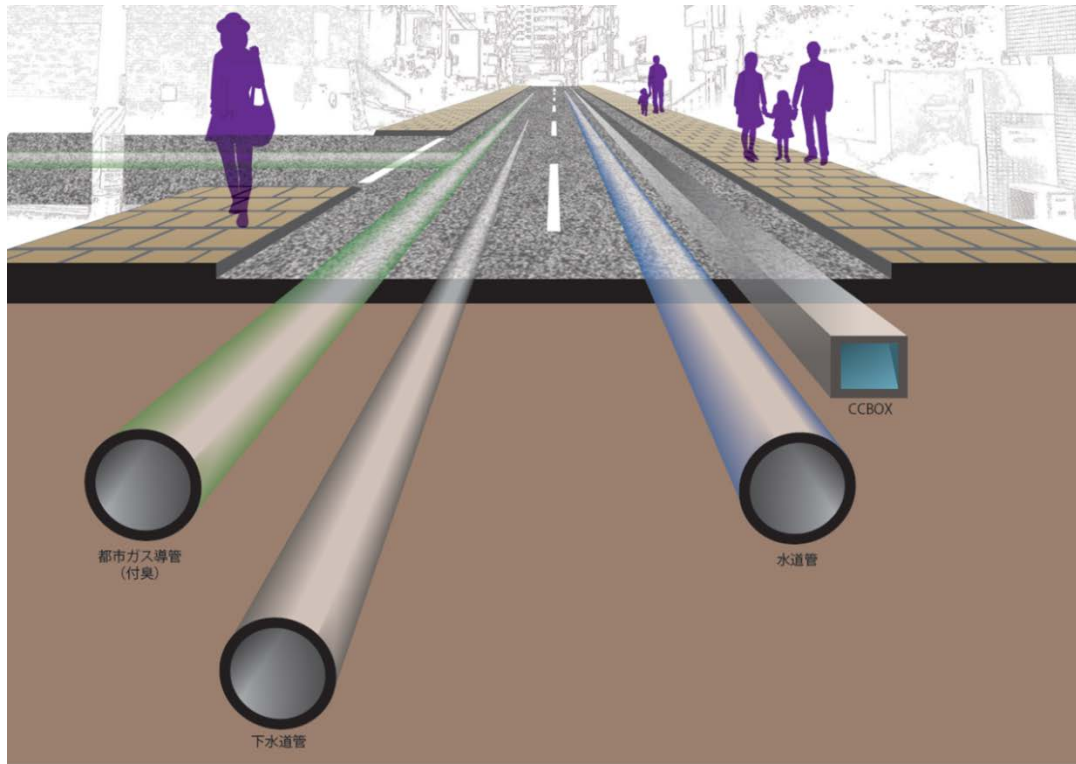
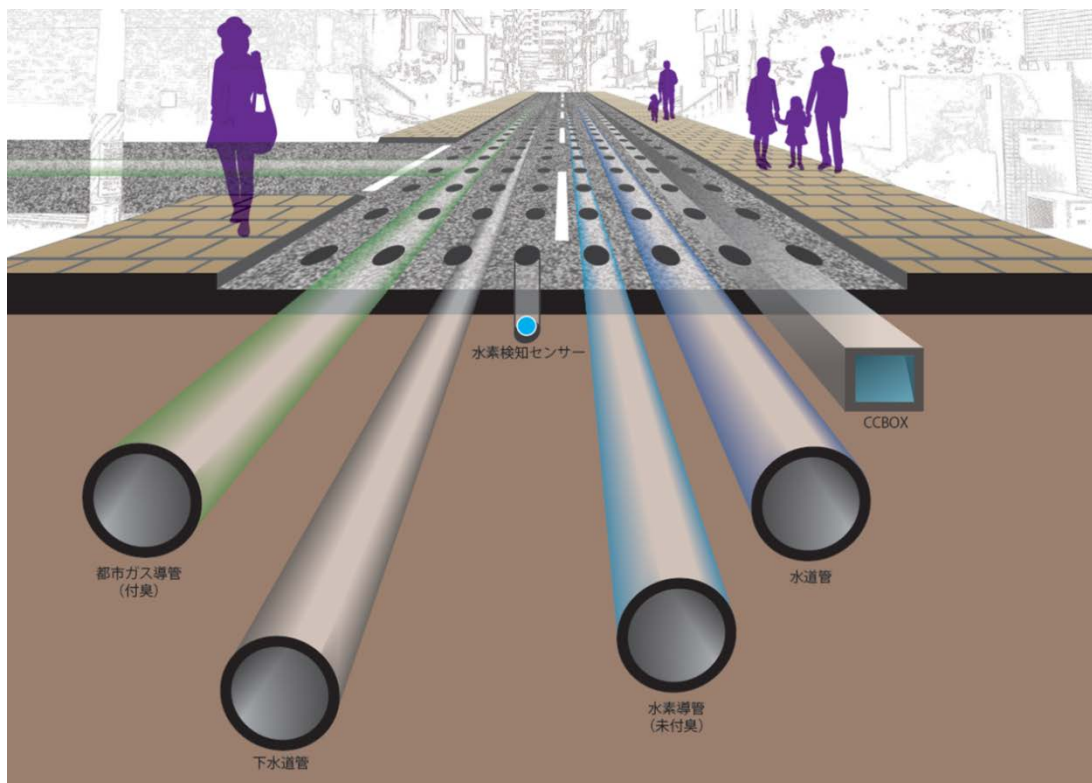


図5. 2. 14 水素検知センサによる漏えい検知システム例（全体概要）



(a) 付臭による漏えい検知システム（水素導管がない場合）



(b) 未付臭による漏えい検知システム（水素導管がある場合）

図5. 2. 15 水素検知センサによる漏えい検知システム例（道路構造）

表 5. 2. 4 漏えい検知システム運用上の課題

[凡例：○：課題あり]

課題		ハンドホール 設置	二重管構造
課題①	省電力化（電池駆動対応）	○	○
課題②	無線出力対応	○	○
課題③	機能搭載によるサイズアップへの対応	○	○
課題④	健全性（センサ・通信）の確認方法	○	○
課題⑤	センサ配置密度の設定方法	○	○
課題⑥	漏えい位置の特定方法		○
課題⑦	メンテナンス方法	○	○
課題⑧	大規模災害時や他工事による損傷時の漏えい検知方法	○	○

5. 3 成果の活用

平成 28 年度から 4 年間取り組んできた「水素導管供給システムの安全性評価事業」による、維持管理に関する技術調査の成果を、5. 2 では項目別にとりまとめた。本項では、利用者がより成果活用しやすいよう、活用事例別に整理を行った。結果を、表 5. 3 に示す。なお、活用にあたっては、各項目の調査事業報告書も参照頂きたい。

表 5. 3 維持管理における事業の活用例

[凡例 ○ : 成果を参照]

過去事業	活用例	付臭供給	未付臭供給	漏えい位置特定	他工事損傷対策
付臭剤の選定 (H18、19 年度水素漏えい検知技術調査)	シクロヘキセンが水素ガス用の低硫黄付臭剤候補として最有力	○ 付臭剤選定		○ 付臭剤選定	○ 付臭剤選定
付臭措置に関する技術調査 (H29～R1 年度総合調査)	燃料電池性能、排気臭気への影響確認	○ 付臭剤の影響		○ 付臭剤の影響	○ 付臭剤の影響
水素検知センサに関する技術調査 (H29、30 年度総合調査)	・ハンドホール内、二重管構造に設置時のシステム運用上の課題整理 ・雨水や地下水変動による埋設センサの水没可能性の調査		○ 漏えい検知手段	○ 漏えい検知手段	○ 漏えい検知手段
地中および大気中の水素拡散挙動調査 (H28～R1 年度総合調査)	地中埋設導管からのガス漏えい時の拡散挙動の把握、整理		○ ・センサ配置 ・漏えい位置特定	○ ・センサ配置 ・漏えい位置特定	○ ・センサ配置 ・漏えい位置特定
水素導管の大規模損傷リスク評価 (H28～R1 年度)	漏えい水素に着火した場合の周囲影響の定性的・定量的評価及びリスク対策に資する技術的知見の取得				○ リスク対策
穿孔作業の水素適用性調査 (H28 年度)	水素漏えい時の遮断措置として、活管に対する穿孔作業性、水素遮断性の調査				○ 遮断措置

6. 謝辞

本調査事業の遂行にあたり、ご指導いただいた特別専門委員会の倉渕委員長ならびに委員の皆さま、調査の実施や内容のまとめでお世話になった推進ワーキンググループの皆さまに厚く感謝の意を表します。

また、本調査事業の実施により、水素ガス導管供給における基本的な保安の確保に関する重要な知見を得ることができ、事業を立案・実施いただいた経済産業省産業保安グループガス安全室殿に深く感謝の意を表します。

令和元年度水素導管供給システムの安全性評価事業(総合調査)

水素導管供給システムの安全性 評価事業のとりまとめ (4年レビュー)

令和2年3月

一般社団法人 日本ガス協会

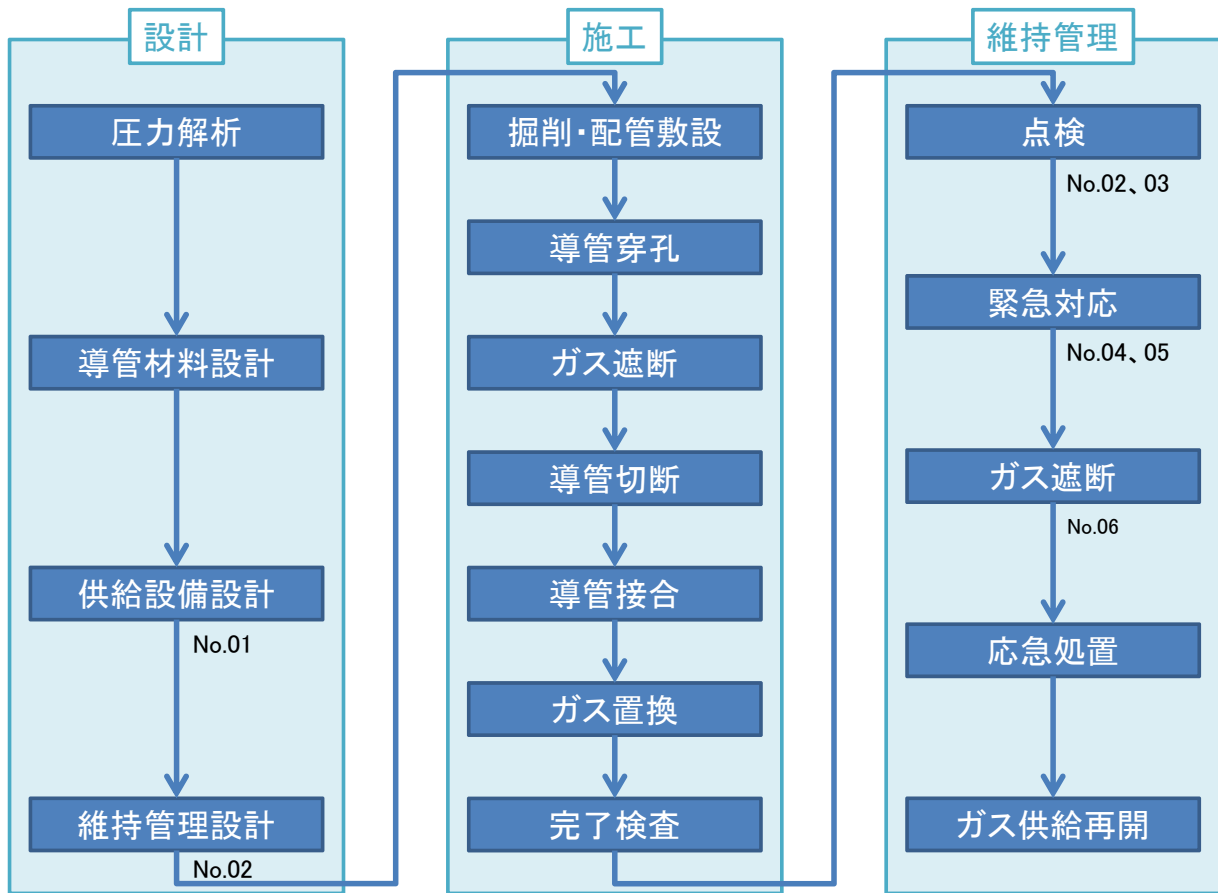
1

目次

	No.	成果項目
設計	01	メーター内蔵遮断弁
維持 管理	02	付臭剤の影響
	03	付臭代替措置
	04	拡散挙動(地中及び大気中)
	05	大規模損傷時リスク
	06	活管遮断(緊急遮断)

※本とりまとめは、過去の報告書記載内容を要約し、作成している。
活用にあたっては、各項目の末尾に記載している過去の調査事業報告書も参照頂きたい。

事業対象範囲における作業フロー



3

水素導管供給システムの安全性評価事業の概要

	H28年度 (2016年度)	H29年度 (2017年度)	H30年度 (2018年度)	令和元年度 (2019年度)
01. メーター内蔵遮断弁				遮断弁 (シール材) 評価
02. 付臭剤の影響		文献調査	短時間試験 (連続10h)	長時間試験 (累積100h)
03. 付臭措置		水素検知センサ技術調査 (ハンドホール内設置)	水素検知センサ技術調査 (埋設環境・水没調査)	
04. 拡散挙動調査	<ul style="list-style-type: none"> ・模擬土砂での基礎実験 ・シミュレーションによる再現検証 	<ul style="list-style-type: none"> ・フィールド実験 (漏えい深さ0.7m、舗装なし) ・シミュレーションによる再現検証・補完 	<ul style="list-style-type: none"> ・フィールド実験 (漏えい深さ1.2m、舗装あり) ・シミュレーションによる再現検証・補完 	地中内障害物による拡散挙動への影響調査 <ul style="list-style-type: none"> ・フィールド実験 (漏えい深さ1.2m、舗装あり) ・シミュレーションによる再現検証・補完
05. 大規模損傷リスク評価	<ul style="list-style-type: none"> ・既往研究調査 ・着火実験 (開放空間) ・シミュレーションによる拡散挙動調査 	<ul style="list-style-type: none"> ・着火実験 (掘削坑内想定) ・シミュレーションによる拡散挙動調査 	<ul style="list-style-type: none"> ・供給遮断による着火影響低減効果検証 ・事故発生時のリスク対策に関する提言 	噴出ガスに着火した場合の、管内側への着火影響を調査 <ul style="list-style-type: none"> ・事故発生時のリスク対策に関する提言
06. 活管遮断 (緊急遮断)	<ul style="list-style-type: none"> ・施工機器の水素適用性確認 ・穿孔部温度測定 ・穿孔試験、遮断試験 			

<参照>

➤水素導管供給システムの安全性評価事業(総合調査)／(一社)日本ガス協会 令和元年度

4

【設計】

01:メーター内蔵遮断弁

目的	<p>将来の一般家庭用等の需要家向けの低圧(4kPa以下)供給を見据え、都市ガスと同様の需要家保安を確保するため、需要家先に設置されるガス遮断機能を有するガスメーターの遮断弁が水素に適合するか、過去事業^{*1}を基に、最新の文献情報等によって調査・整理した。</p> <p>※1・・・平成18年度水素供給システム安全性技術調査事業</p> <ul style="list-style-type: none"> 代表的な内管材料について、長時間使用を想定した耐久加速処理時及び外力付加状態において適切な水素気密性を評価。 内管材料に用いられる代表的なシール材料(合成ゴム(NBR)等)について、水素透過性(初期及び経時劣化時)を評価。 シール材料のNBR中高ニトリルを200kPa超で気密試験・ガス透過試験を行い、水素適合性を評価。
評価項目	遮断弁のシール構造やシール材料を調査し、過去事業でガス工作物が水素適合性を有することを整理・評価した結果を基に、水素適合性を評価した。
調査結果	<p>➢ <u>シール構造及びシール材料</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 過去事業で評価済みの「PEボールバルブ」と同様の、シール機構(遮断時のみシール機構が動く)及びシール材料(NBR:中高ニトリルのバルブシート)であることを確認。 (一般的なガス工作物に用いられるNBRは中高ニトリル以上) <p>➢ <u>シール材料であるNBRの最新文献調査による水素適合性評価</u></p> <ul style="list-style-type: none"> NBRは、ニトリル配合量を多くすることにより、ガスが透過しにくくなる。 中高ニトリルのガス透過性は、最新文献値による再評価においても、水素適合性に問題がないことを確認。 (過去事業で評価した水素透過性(当時)と差異がないことを確認)

【結論】

◆ガスメーターに内蔵される遮断弁は、過去事業で水素適合性を評価済みのシール構造及びシール材料にて構成されていることを確認した。また、最新文献調査においても、シール材料に使用されているNBR中高ニトリルの水素適合性は問題がないことを確認した。

<参照>

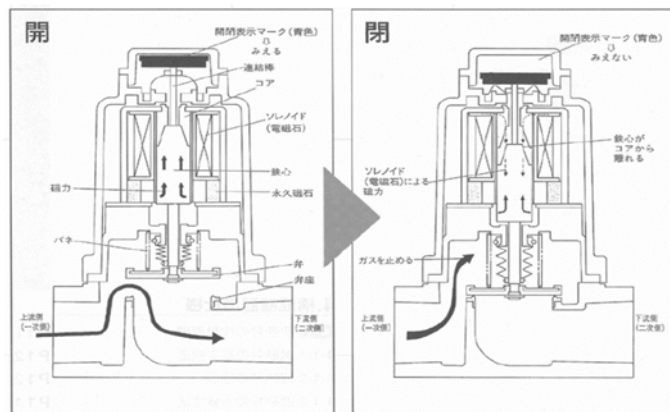
- 水素供給システム安全性技術調査(内管の仕様検討等/日立金属(株) 平成18年度
- 水素導管供給システムの安全性評価事業(総合調査)/ (一社)日本ガス協会 令和元年度

【設計】

■ 遮断時のシール機構の概要

【作動原理】

弁体が「開」の状態から、異常検知時に瞬時に、磁力で支えられていた固定部が外れ、流路を遮断



<遮断弁の作動原理>

■ NBRのニトリル配合量別の分類

	ニトリル配合量(wt%)				
	~24	25 ~ 30	31 ~ 35	36 ~ 42	43~
種類	低ニトリル	中ニトリル	中高ニトリル	高ニトリル	極高ニトリル
JIS B 2401規格	—	—	NBR-70-1 (硬度70)	NBR-90 (硬度90)	NBR-70-2 (硬度70)

■ NBRのガス透過係数まとめ

ゴム材料	温度	ガス透過係数 [m ³ ・m/(m ² ・sec・Pa)]				
		過去事業		今回の調査		
		実験平均値	当時の文献	文献A	文献B	
NBR	中ニトリル	約25℃	—	1.18 × 10 ⁻¹⁶	1.19 × 10 ⁻¹⁶	—
		約50℃	—	3.33 × 10 ⁻¹⁶	3.33 × 10 ⁻¹⁶	—
	中高ニトリル	約25℃	0.28 × 10 ⁻¹⁶	9.10 × 10 ⁻¹⁶	0.53 × 10 ⁻¹⁶	1.22 × 10 ⁻¹⁶
		約50℃	0.19 × 10 ⁻¹⁶	—	1.68 × 10 ⁻¹⁶	3.37 × 10 ⁻¹⁶

目的	過去の漏えい検知方法に関する調査として実施した経済産業省委託による技術調査事業※1において、水素用付臭剤の最有力であると確認されたシクロヘキセン(非硫黄系付臭剤)について、未確認事項である、脱臭せずに燃料電池にて使用した場合の燃料電池性能への影響及び排気臭気への影響に関する調査を実施した。	
評価項目	<ul style="list-style-type: none"> 燃料電池性能への影響: 付臭剤添加の有無(純水素、シクロヘキセン150ppm)による電池スタック電圧低下の挙動の確認 排気臭気への影響: 電池スタック出口、システム排気口にて排気ガスの分析(シクロヘキセン、シクロヘキサン、ベンゼン、ホルムアルデヒド)、臭気の確認 	
調査結果	H29年度	既往研究や文献調査を実施した結果、電池スタック内でシクロヘキセンC ₆ H ₁₀ が臭気の弱いシクロヘキサンC ₆ H ₁₂ に水素化され、燃料電池性能及び排気臭気への影響がない可能性が示唆された。
	H30年度	市販または開発中の燃料電池システム(または本システムに使用されている燃料電池セル)を用いた実験により調査を行った。その結果、連続10時間程度の運転では運転ができなくなるほどの電池スタック電圧低下は発生しないことを確認した。またシクロヘキセンは電池スタック内でシクロヘキサンに水素化され、さらにシステム排気口出口で、換気用空気により希釈されるため、排気はほぼ無臭であることが確認された。
	R01年度	開発中の燃料電池システムを用いた実験により調査を行った。その結果、連続10時間運転時と同様に、累積120時間程度(連続10時間/回×12回)の運転では運転ができなくなるほどの電池スタック電圧低下は発生しないことを確認した。また電池スタック内でシクロヘキセンに水素化され、換気用空気により希釈されるため、システム排気口出口の排気はほぼ無臭であることが確認された。

【結論】

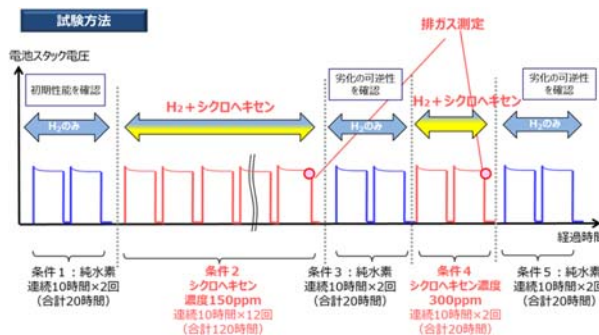
◆ 付臭剤による燃料電池性能、排気臭気への影響はほとんどみられない※2。
(累積120時間(連続10時間/回×12回)の運転結果より)

※1 経済産業省委託事業 地方都市ガス事業天然ガス化促進対策調査「水素漏えい検知技術調査事業」(平成18年度～平成20年度)
 ※2 実用化検討にあたっては、メーカー等において、連続運転を含めた長時間運転(10年相当寿命)の影響を確認する必要がある。

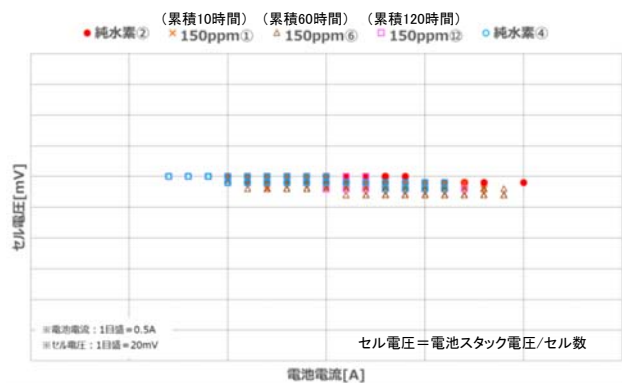
<参照>

➢水素導管供給システムの安全性評価事業(総合調査)／(一社)日本ガス協会 [平成29年度](#)、[平成30年度](#)、令和元年度

■ 燃料電池性能への影響



<試験方法イメージ図>



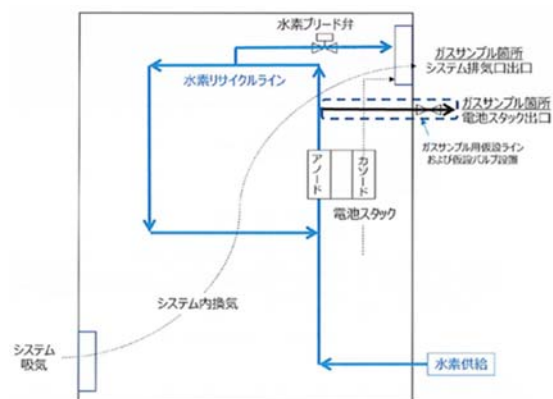
<純水素運転とシクロヘキセン150ppm添加のIV特性比較>

■ 排気臭気への影響

<排ガス分析結果(シクロヘキセン150ppm添加)>

単位: vol ppm、サンプリング時間内の平均値

	電池スタック出口	システム排気口出口
シクロヘキセン	0.50	0.02未満
シクロヘキサン	1400	1.5



<排ガスサンプリング箇所>

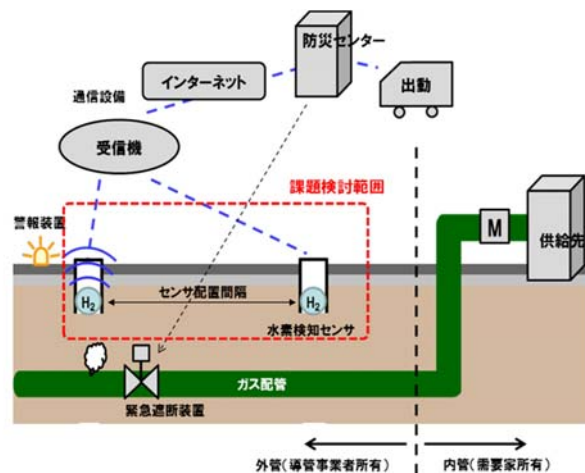
目的	水素導管供給システムを運用する上で、万が一水素が導管から漏えいした場合の保安を確保するため、都市ガスと同様に付臭措置又はそれに代わる付臭代替措置(漏えい検知装置の設置等)を講じる必要がある。本調査では、水素導管の埋設部における付臭代替措置(水素検知センサによる漏えい検知)の適用可否の検討に資する調査として、水素検知センサに関する技術調査を実施する。
評価項目	(1)平成29年度 ・水素センサをハンドホール内へ設置する場合を想定して、水素検知センサに求められる要件整理 ・国内外の文献等関連情報を基に既存の水素センサをリストアップし、漏えい検知への適用可能性の検討 (2)平成30年度 ・水素センサの埋設環境に応じた地下水や雨水による影響を調査し、長期間保護が可能な構造面対策の調査・検討 ・雨水や地下水変動による水没可能性の調査
調査結果	H29年度 ・ハンドホール内設置の場合、センサの仕様上(性能・対環境)の課題として、水没環境に対する開発・対応が必要となる。 ・水素検知センサによる漏えい検知システム運用上の課題として、電池駆動対応、無線出力対応、健全性の確認方法等を整理した。
	H30年度 ・ハンドホール内設置の場合、ハンドホール内への水の浸入対策に既存のフタ・フィルタの製品・技術を活用できる可能性があることがわかった。 ・二重管構造による対策を検討した結果、適合する市販水素センサはないことがわかった。 ・ハンドホール内設置、二重管構造の場合におけるシステム運用上の課題を整理した。 ・水没可能性の調査の結果、雨水や地下水変動によって地中に設置した水素センサが水没する可能性が示された。

【結論】

◆ ハンドホール内設置、二重管構造の場合、検討すべきシステム運用上の課題があることがわかった。
 (電池駆動対応、無線出力対応、健全性の確認方法、漏えい位置の特定方法等)

<参照>

水素導管供給システムの安全性評価事業(総合調査) / (一社)日本ガス協会 [平成29年度](#)、[平成30年度](#)



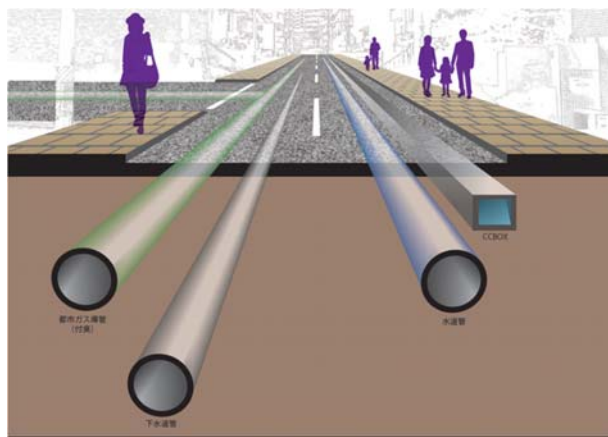
<水素検知センサによる漏えい検知システム例(全体概要)>

<漏えい検知システム運用上の課題>

凡例 「○」: 課題あり

課題	ハンドホール設置	二重管構造
課題① 省電力化(電池駆動対応)	○	○
課題② 無線出力対応	○	○
課題③ 機能搭載によるサイズアップへの対応	○	○
課題④ 健全性(センサ・通信)の確認方法	○	○
課題⑤ センサ配置密度の設定方法	○	○
課題⑥ 漏えい位置の特定方法		○
課題⑦ メンテナンス方法	○	○
課題⑧ 大規模災害時や他工事による損傷時の漏えい検知方法	○	○

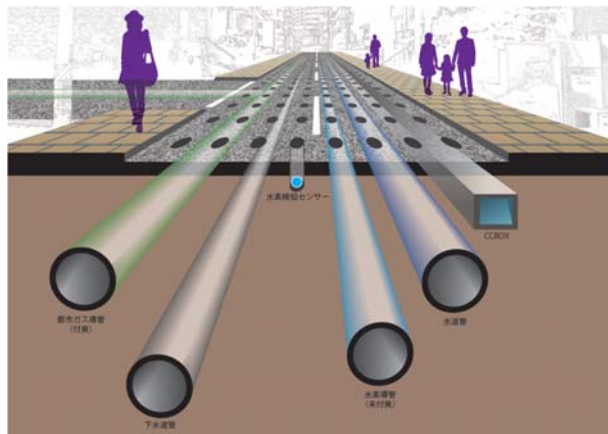
【維持管理】



付臭措置を講じる場合の、道路構造は左図の通り。

現状のガス事業では付臭措置を行っている。

＜道路構造における漏えい検知システム(水素導管がない場合)＞



水素の未付臭供給を行おうとする場合のイメージは左図の通り。
(ハンドホール設置の場合)

水素導管管理設置位置を考慮の上で、水素検知センサー(ハンドホール)を配置する必要がある。多量のハンドホール設置に当たっては、道路管理者等との協議が必要となる。

＜道路工場における漏えい検知システム(水素導管がある場合)＞

11

【維持管理】

04: 拡散挙動(地中及び大気中)

目的	<ul style="list-style-type: none"> 地中埋設導管からの水素ガス漏えい時における対応措置の検討において基本的な知見となりうる、地中及び大気中(地表面近傍)での水素拡散挙動を実験及びシミュレーションにより把握、整理する。 地中の条件は、基礎的な条件から実運用時に近い条件(舗装や地中障害物の有無)を設定する。 供給遮断後を想定し、漏えい停止後の地中濃度の経時変化を確認する。
評価項目	<ul style="list-style-type: none"> 地中における水素漏えい量の計測(流量計測) 地中及び大気中における水素拡散挙動の計測(濃度計測) 地中及び大気中における水素拡散挙動のシミュレーション解析と再現性評価
調査結果	<ul style="list-style-type: none"> 実験により、土壌層の厚さ、導管損傷形状(ピンホール開口面積)、供給圧力、土壌の転圧状態(乾燥密度)の各パラメータが漏えい量に与える影響が明らかになった。 実験により、基礎的な条件から実運用時に近い条件における地中及び大気中の水素濃度状況が明らかになった。 拡散挙動シミュレーションにおいて、基礎的な条件だけでなく、実運用時に近い条件においても地中及び大気中の水素拡散挙動を評価できることが確認された。

年度	事業内容			主な成果
H28	小規模実験	小型容器(直径Φ1m)	ガラスビーズ	理想的な系による拡散挙動を確認(同心円状の挙動)
H29	フィールド実験	直径Φ7m×深さ:0.7m	真砂土のみ	半径2.5m間隔で漏えい検知可能(同心円状の挙動)
H30	フィールド実験	直径Φ7m×深さ:1.2m	真砂土+舗装	舗装により 地表面の濃度勾配からの位置特定が困難+漏えい停止後の地中滞留が長時間化
R1	フィールド実験	直径Φ7m×深さ:1.2m	真砂土+舗装+地中障害物	地中障害物により 高濃度水素範囲が拡大+地表面の濃度勾配からの位置特定が困難

【結論】

- ◆ 実験及びシミュレーションにより、**基礎的な条件から実運用時に近い条件**における**地中及び大気中(地表面近傍)**の水素拡散挙動を明らかにすることができた。また、シミュレーションによる**水素拡散挙動予測**は、**実運用における維持管理上の課題**に対し、**有効な情報を提供する手段**となることを確認できた。

＜参照＞

水素導管供給システムの安全性評価事業(地中及び大気中の水素拡散挙動調査)／(株)四国総合研究所
 > [平成28年度](#)、[平成29年度](#)、[平成30年度](#)、令和元年度

12

【維持管理】

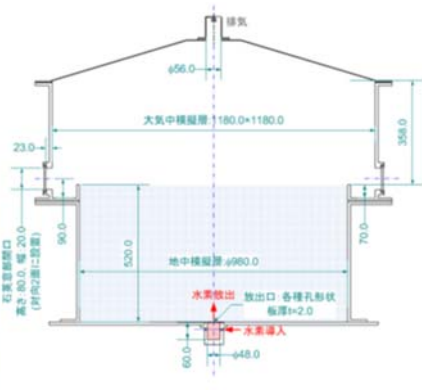
■平成28年度～令和元年度における調査内容

	← 基礎的・理想的な条件		実運用に近い条件 →	
年度	H28	H29	H30	R1
地中構成	ガラスビーズ	真砂土のみ	真砂土＋舗装(アスファルト, 碎石)	真砂土＋舗装(アスファルト, 碎石) ＋地中障害物
小規模実験	水素漏えい量 ・ 土壌層厚さが水素漏えい量に与える影響を確認 拡散挙動(地中) ・ 無酸素環境下において気体熱伝導式ガスセンサにより土壌中水素ガスの濃度計測が可能であることを確認 拡散挙動(大気中) ・ レザラマイメージングにより、地中から大気中に染み出した水素ガスの濃度分布計測が可能であることを確認	水素漏えい量 ・ 「30cmΦアクリルパイプ」により、損傷形状(ピンホール面積)、供給圧力、土壌の転圧状態(乾燥密度)の各パラメータが漏えい量に与える影響を確認 地質パラメータ ・ 「5.25cmΦ SUSパイプ」により、真砂土の透気係数及び拡散係数を計測	拡散挙動(地中, 大気中) ・ レザラマイメージングにより、アスファルト舗装時においても大気中水素ガスの濃度分布計測が可能であることを確認 ・ アスファルト有無及び厚さ、供給圧力、アスファルト乳剤(コート剤)有無の各パラメータが地中及び大気中の拡散挙動に与える影響を確認 地質パラメータ ・ 「10cmΦアクリルパイプ」により、真砂土とアスファルトの透気係数及び拡散係数を計測	拡散挙動(地中) ・ 地中障害物が垂直方向の拡散挙動に与える影響を確認 拡散挙動(大気中) ・ 地中障害物が大気中濃度分布に与える影響を確認 地質パラメータ ・ 「4.75cmΦ SUSパイプ」「10cmΦアクリルパイプ」により、真砂土、碎石、アスファルトの透気係数及び拡散係数を計測
フィールド実験	(予備試験として真砂土を充てんした小規模容器による地中及び大気中の水素拡散挙動計測を実施)	拡散挙動(地中) ・ 放出口を中心とした同心円状の濃度分布を確認 ・ 平衡状態における爆発下限界を超える濃度領域を確認 ・ 漏えい停止後の経時変化を確認 拡散挙動(大気中) ・ 放出口直上が最も高い正規分布状の濃度分布を確認	拡散挙動(地中) ・ 放出口を中心とした同心円状の濃度分布を確認 ・ アスファルト層による水平方向への拡散促進、高濃度水素範囲の拡大を確認 ・ 漏えい停止後の経時変化を確認(アスファルト層により水素の地中滞留が長時間化) 拡散挙動(大気中) ・ アスファルト層通過後、ほぼ一律の濃度分布となることを確認	拡散挙動(地中) ・ 水平構造物・水平方向への拡散促進、高濃度水素範囲の拡大を確認 ・ 垂直構造物・垂直及び水平方向への拡散促進、高濃度水素範囲の拡大を確認 ・ 漏えい停止後の経時変化を確認 拡散挙動(大気中) ・ アスファルト層通過後、ほぼ一律の濃度分布となることを確認
シミュレーション	汎用数値流体解析ソフトウェア(ANSYS Fluent)により地中及び大気中の拡散挙動を評価できることを確認	地中及び大気中における拡散挙動を概ね良好に再現できることを確認	舗装(アスファルト, 碎石)時においても、地中及び大気中における拡散挙動を概ね良好に再現できることを確認	舗装(アスファルト, 碎石)及び地中障害物が存在しても、地中及び大気中における拡散挙動を概ね良好に再現できることを確認

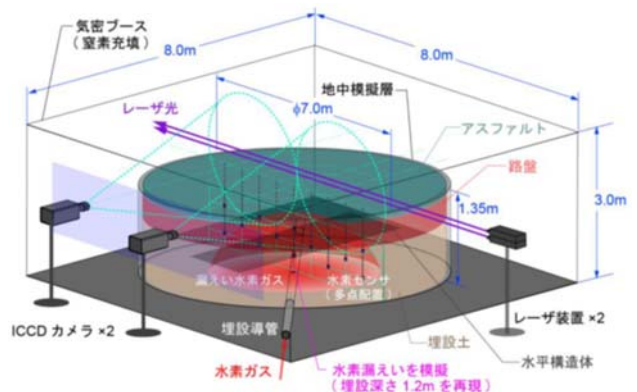
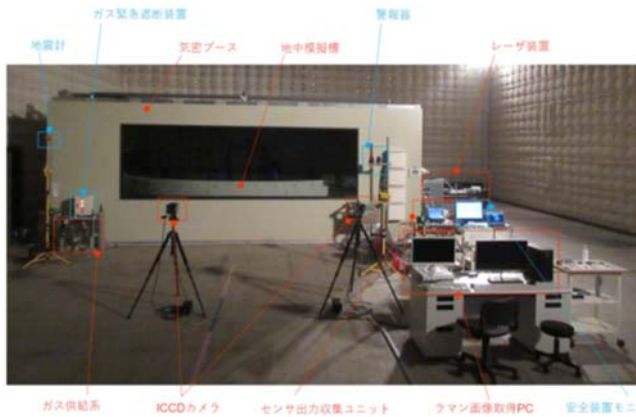
13

【維持管理】

■実験装置の外観と概要図



＜小規模実験装置(平成28年度)の外観と概要図＞



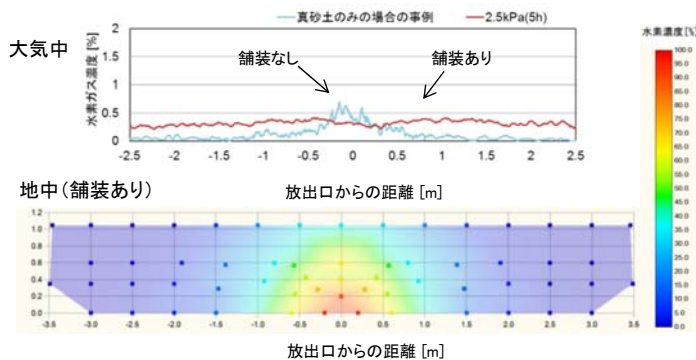
＜フィールド実験装置(令和元年度)の外観と概要図＞

14

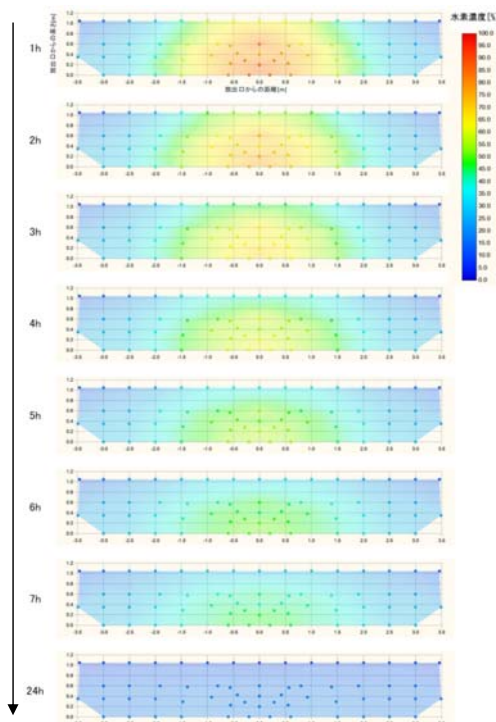
【維持管理】

■フィールド実験結果の例 条件:真砂土+舗装(アスファルト, 砕石)

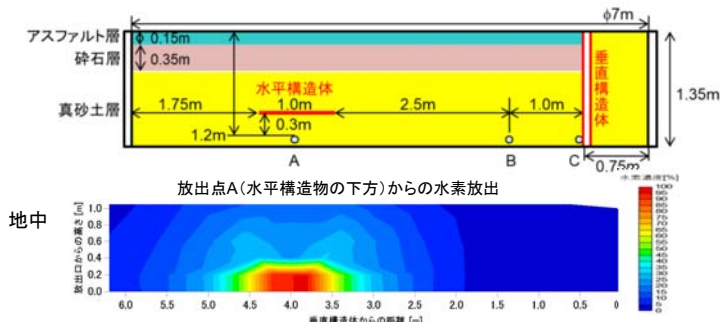
地中障害物なし(供給圧力2.5kPa, 経過時間5h)における水素濃度分布



供給停止後の地中水素濃度分布の経時変化 (供給圧力10kPa, 舗装あり, 地中障害物なし)



地中障害物あり(供給圧力2.5kPa, 経過時間6h)における水素濃度分布



15

【維持管理】

05: 大規模損傷時リスク

目的	実験・数値解析を通じて、水素導管の大規模損傷時リスクをケース別(開放/半閉空間)に定性的・定量的に評価する。また、リスクを低減する対策(対応措置、外部への影響緩和措置等の提言)に資する知見を整理する。
評価項目	<ul style="list-style-type: none"> ・ケース別(開放/半閉空間)の濃度分布、着火時の輻射熱・爆風圧分布(数値解析による検証含む) ・リスク低減のための減圧措置範囲と事象の整理、着火時の管内へ侵入する火炎挙動(逆火)把握(熱分布及び映像記録)
調査結果	<p>H28年度</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 開放(架空噴出)のリスク評価 <ul style="list-style-type: none"> ・漏えい孔径Φ5mm、10mm及び供給圧力0.3MPa、0.5MPaを実施 ・着火時の周囲への影響リスクは高温領域>輻射熱>爆風圧の順で、当影響を評価するスケール則を作成。
	<p>H29年度</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 半閉空間(掘方内噴出)のリスク評価 <ul style="list-style-type: none"> ・漏えい孔径Φ10mm、供給圧力3ケース(0.1MPa、0.3MPa、0.5MPa)、掘方サイズ3ケース(30cm、80cm、120cm)、及び着火位置を複数点設定して着火時の挙動を検証。開放の場合と異なり、爆風圧が最も影響リスクが高く、爆風圧の評価方法としてTNT等価モデル※・予混合爆発モデルのスケール則を作成。
	<p>H30年度</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ リスク低減評価 <ul style="list-style-type: none"> ・前年度の半閉空間(掘方内噴出)の着火対策として、遮断弁による圧力(流量)低減の影響を検討。 ・例えば、供給圧力0.100MPa、掘方サイズ80cm、漏えい孔径10mmの場合、圧力を0.009MPaまで低下させると爆風圧はTNT等価モデルから、予混合爆発モデルへの適用となる。これによって、人間に直接被害を及ぼさない目安とされる12.3kPaの爆風圧到達距離は、TNT等価モデルの11.4mより、予混合爆発モデルの2.5mにまでリスクは低減する。(ただし、予混合爆発のリスクは残ることに留意)
	<p>R1年度</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 管内挙動(逆火)評価 <ul style="list-style-type: none"> ・着火時に管内へ侵入する火炎挙動(逆火)の検証を実施。(着火前の管内への大気混入挙動も検証) ・管の孔径、漏えい孔の位置、傾斜等を条件とし、熱電対による温度計測及びサーマルカメラによる火炎の管内挙動の可視化を実施。 ・50A全破断の場合、流量遮断後に端点で着火させた際に管内の約80cm地点まで火炎が進み消失

【結論】

- ◆ 損傷時の噴出状況によって、着火時の挙動が大きく異なることが判明した。周囲により影響がある条件は半閉空間(掘方内噴出)であり、TNT等価モデルが適用可能な爆風圧が発生する。
- ◆ 流量遮断後に管内へ逆火が発生する可能性があり、空気が混入しやすい大きな孔径ほど可能性は大きい。
注)各年度のリスク評価の結果は、あくまで設定した条件下での結果であり、大規模損傷時のリスクすべてを評価しているものではない

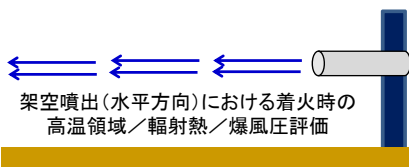
<参照>水素導管供給システムの安全性評価事業(水素導管の大規模損傷リスク評価)/産業技術総合研究所 平成28年度,平成29年度,平成30年度,令和元年度

16

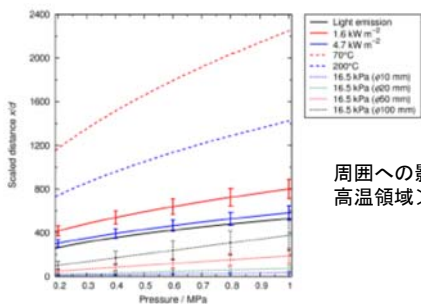
【維持管理】

H28年度

■ 開放(架空噴出)のリスク評価



<実験の様子(定常火炎を高速カメラ撮影)>

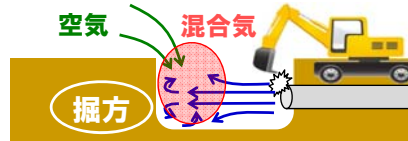


周囲への影響が大きい順は
高温領域 > 輻射熱 > 爆風圧

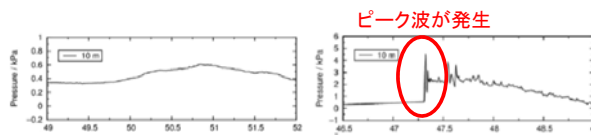
<影響リスクのスケール則の例>

H29年度

■ 半閉空間(掘方内噴出)評価



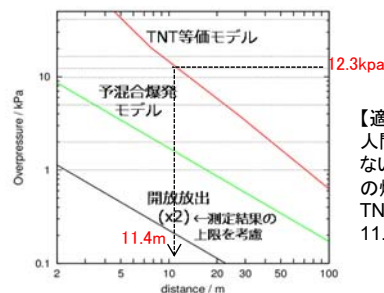
掘方内混合気に着火時の
高温領域/輻射熱/爆風圧評価



<予混合爆発時の爆風圧時刻歴>

ピーク波が発生

<TNT等価モデル爆発時の爆風圧時刻歴>



【適用例】
人間に直接被害を及ぼさない目安とされる12.3kPaの爆風圧到達距離は、TNT等価モデルの場合、11.4mとなる。

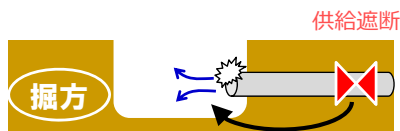
<爆風圧のスケール則>

圧力0.1Mpa、Φ10mm、掘方角(TNT:80cm/予混合:120cm)の場合

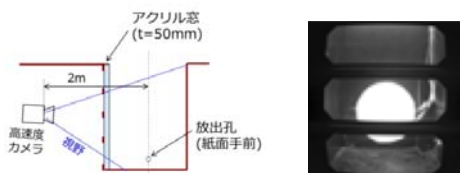
【維持管理】

H30年度

■ リスク低減評価

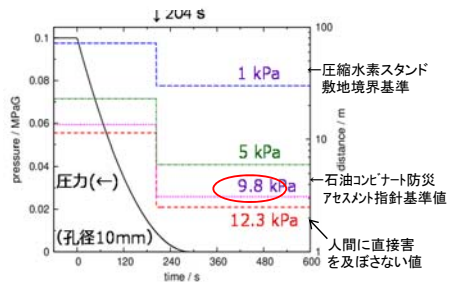


半閉空間(掘方内噴出)における供給遮断(圧力低減)による着火時のリスク低減評価



<掘方とカメラ位置>

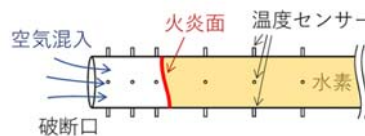
▲火炎挙動の例(カメラ画像)



<圧力-爆風圧到達距離のスケール則>
(口径150A、漏れい孔径10mm、遮断弁まで1kmの場合)

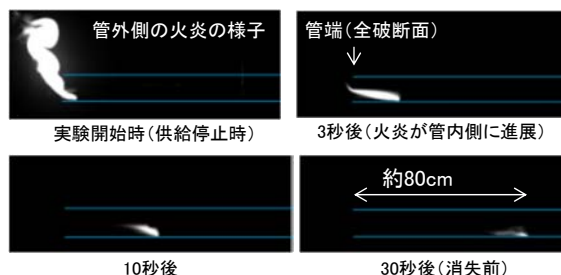
R1年度

<管内挙動(逆火)評価>



遮断措置後(水素流入停止後)に着火し、火炎の挙動を検証

損傷程度(漏れい孔径)	管径	逆火のしやすさ
小孔径(10mm)	150mm	少
大孔径(50mm)	150mm	↓ 大
全破断(50mm)	50mm	



<管内挙動(逆火)の例(口径50A、全破断の場合)>

<p>目的</p>	<p>水素導管供給システムにおいて、人為もしくは自然災害等で損傷し水素漏えいが生じた際、適切な箇所にてガス遮断等の措置を講ずる必要がある。活管遮断に用いる都市ガス用施工機器で、水素供給中の導管への穿孔ができ、水素供給を適切に遮断できるかどうかの調査を行った。</p>
<p>評価項目</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・都市ガス用施工機器の水素気密性の確認: 中圧以下における、気密性を確認 ・穿孔部の温度測定: SGP150A穿孔貫通部の温度が、水素の着火温度(500℃)に到達していないかを確認 ・施工性・水素遮断性能の確認: 都市ガスと同じ工法・遮断機でSGP150Aの水素導管に穿孔ができ、遮断が可能かを確認
<p>調査結果</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 都市ガス用施工機器の水素気密性の確認 中圧(1MPa未満)を想定し0.9MPa程度で、各施工機器から外部への水素漏えいがないことを気密試験で確認 ➢ 穿孔部の温度測定 穿孔部は最高約350℃であり、水素着火温度(約500℃)未満を確認 ➢ 施工性・水素遮断性能の確認 中圧以下を想定し0.3MPa,0.9MPaの試験圧力で、穿孔ができ、遮断が可能であることを確認

【結論】

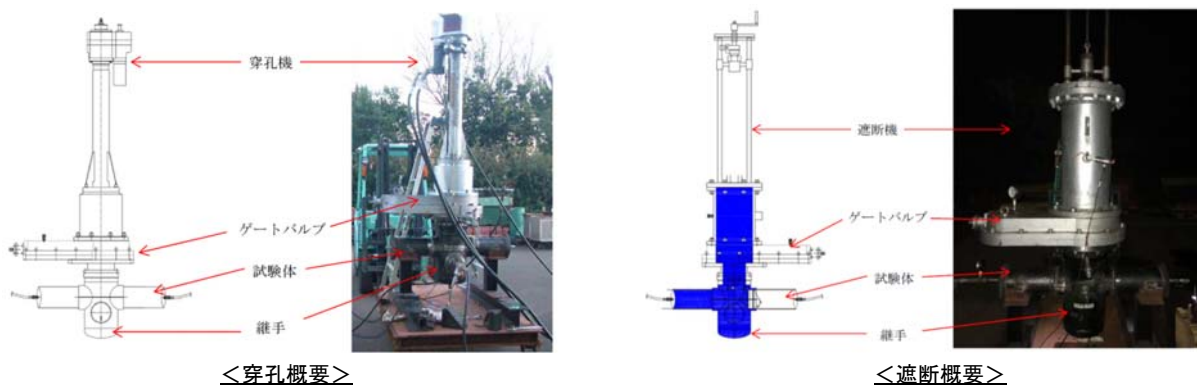
◆活管遮断に用いる都市ガス用施工機器で、中圧以下の水素導管への穿孔ができ、水素遮断性能に問題の無いことを確認

<参照>

>水素導管供給システムの安全性評価事業(穿孔作業の水素適合性評価)/日鉄住金パイプライン&エンジニアリング(株) 平成28年度

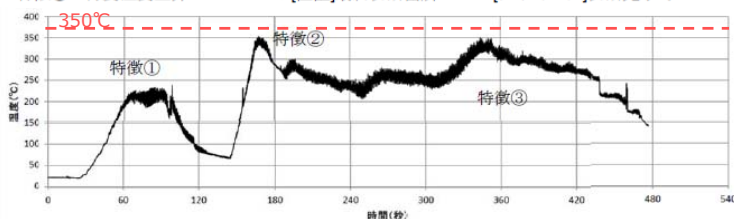
【維持管理】

■活管遮断装置



■穿孔部の温度計測

- 特徴① 250℃程度まで温度上昇 : [位置]ドリル [タイミング]ドリル貫通直後
- 特徴② 最高到達温度まで上昇 : [位置]ホルソー貫通箇所 [タイミング]ホルソー貫通直後
- 特徴③ 再度温度上昇 : [位置]最終切断箇所 [タイミング]切断完了時



<穿孔部の温度推移>



<穿孔部材>

平成27年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査事業(総合調査)

過去事業のとりまとめ (10年レビュー)

平成28年3月16日
一般社団法人 日本ガス協会

1

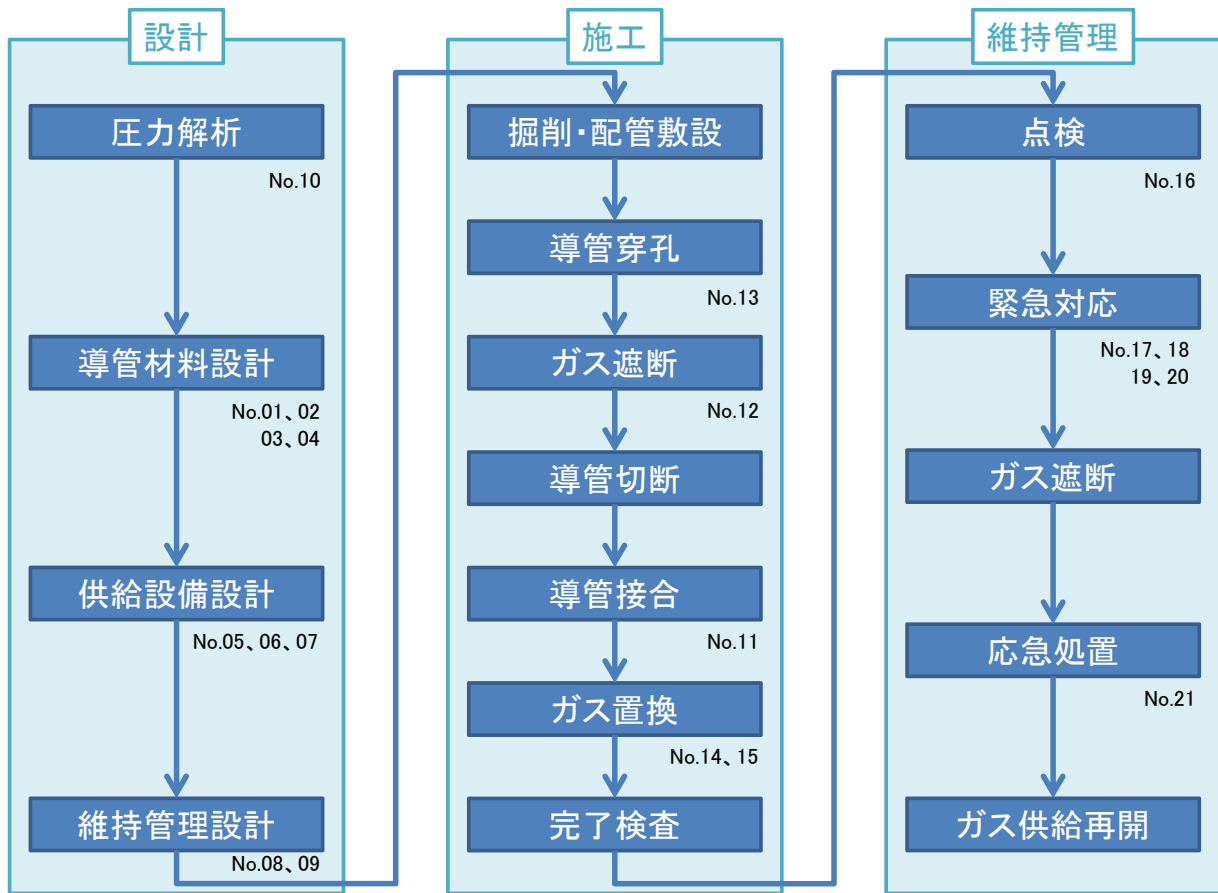
目次

	No.	成果項目	対象事業
基礎	00	水素の基本特性	—
設計	01	金属系材料	①、③
	02	樹脂系材料	①
	03	継手・ガス栓・バルブ等	①、④
	04	シール材	①、④
	05	接合	①
	06	メーター	①
	07	整圧器	③
	08	付臭剤	②
	09	検知センサー	②
	10	圧力解析	①、③
施工	11	分岐工法	③
	12	遮断工法	③

	No.	成果項目	対象事業
施工	13	穿孔作業	③
	14	置換作業(外管)	③
	15	置換作業(内管)	④
維持管理	16	漏えい検知	②
	17	拡散挙動(土中)	②
	18	拡散挙動(開放)	③
	19	拡散挙動(密閉)	④
	20	着火挙動	③
	21	応急処置工法	③
その他	22	海外事例(北米)	①、②、③、④
	23	海外事例(欧州)	①、②、③
	24	国内事例	④

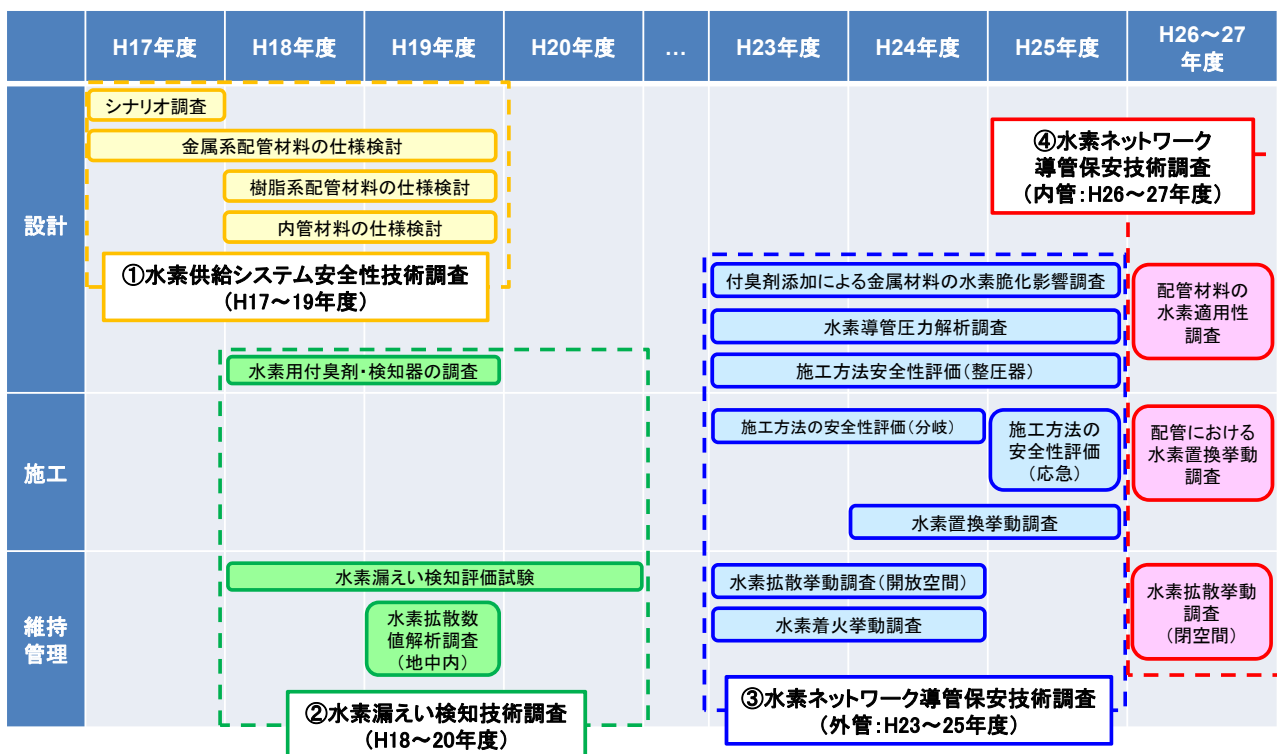
- ①水素供給システム安全性技術調査事業
②水素漏えい検知技術調査事業
③水素ネットワーク構築導管保安技術調査事業(H23～25)
④水素ネットワーク構築導管保安技術調査事業(H26～27)

事業対象範囲における作業フロー



3

水素導管供給に関する技術調査事業の経緯・展開



4

水素導管供給に関する技術調査事業の概要

事業名	目的と成果
水素供給システム安全性技術調査事業 (平成17～19年度)	<p>《目的》 現行の中低圧導管材料を水素輸送に供する場合の基本的な材料特性調査を行う。</p> <p>《成果》 現行の主な導管材料(炭素鋼鋼管およびポリエチレン管等)の水素脆性や気密性の面について適用性を確認。 (評価した導管材料等の水素脆化は認められず、基本的な継手類の気密性低下もないことから、中低圧の水素供給に適用できる。)</p>
水素漏えい検知技術調査事業 (平成18～20年度)	<p>《目的》 水素が漏えいした場合、需要家がすぐに分かるための付臭等について調査を行う。</p> <p>《成果》 水素付臭剤としてのシクロヘキセンの適用性(土壌透過性)およびガス同等の方法(検知器と臭気感知)で水素漏えいが検知可能であることを確認。</p>
水素ネットワーク構築導管保安技術調査事業 (平成23～25年度)	<p>《目的》 将来の水素パイプラインネットワークの構築に向け、保安確保のために、現時点で不可欠と考えられる検証データを取得する。【外管を対象】</p> <p>《成果》 施工法の安全性評価、水素漏えい時の拡散挙動確認、水素置換挙動確認、水素導管圧力解析を実施し、成果・課題を整理。</p>
水素ネットワーク構築導管保安技術調査事業 (平成26～27年度)	<p>《目的》 将来の水素パイプライン供給に向け、建物内とその周辺の水素配管に関する保安確保のために、現時点で不可欠と考えられる検証データを取得する。【内管を対象】</p> <p>《成果》 水素置換挙動調査、配管材料の水素適用性を確認。</p>

5

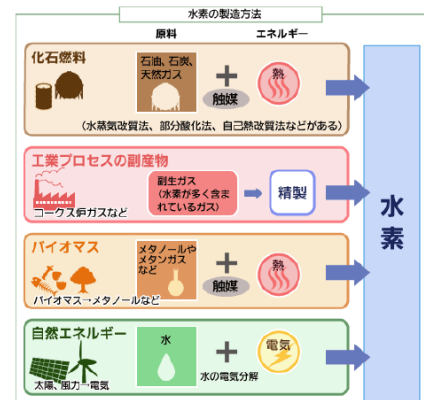
00:水素の基本特性

水素と都市ガスとの物性の違い

	水素	都市ガス	備考
比重	0.0695	0.65	約1/10
燃焼範囲(%)	4.0～75.6	4.4～14.3	都市ガスの約5倍広い
燃焼速度(cm/s)	282	38～40	約7倍
着火温度(°C)	560	537	ほぼ同じ
着火エネルギー(mJ)	0.02	0.29	約1/10
液化温度(°C)	約-253	約-162	液化温度が低い
発熱量(MJ/m³)	12	45	約1/4

水素エネルギーを導入する意義※

- **エネルギー・セキュリティの向上**
将来的には海外の褐炭や原油随伴ガスなどの未利用エネルギーや、国内外の再生可能エネルギーを用いて製造できる可能性があり、利活用技術の適用可能性は幅広く、エネルギー・セキュリティの向上に大きく貢献できる。
- **省エネルギー、環境負荷低減**
再生可能エネルギーから水素を製造するといった水素の製造方法次第では、CO2 排出量を大幅に削減でき、さらにはCO2 フリーのエネルギー源として水素を活用し得る。
- **産業振興**
水素・燃料電池関連の市場規模拡大により、大きく成長する分野と期待されている



※独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 NEDO水素エネルギー白書より引用

6

【設計】

01: 金属系材料

目的	中低圧都市ガス配管用金属材料の母材と溶接部を対象に、中低圧の水素環境がその機械的性質に及ぼす影響や、変動荷重および地震による水素配管の繰り返し変形を考慮した金属材料の疲労特性へ及ぼす影響を調査した。
評価項目	中低圧都市ガス配管を想定した水素ガス暴露条件(ガス圧1MPa、温度50℃、100時間暴露)下で、機械的性質、破壊特性等に影響が見られないこと。 ・評価対象母材: フェライト-パーライト組織を主体とする SGP, STPG370 ・溶接: 被覆アーク(SMAW)溶接、TIG溶接
調査結果	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 素材まま(予ひずみ無し)の母材および溶接部は、想定水素ガス暴露条件下では、水素侵入量(拡散性水素(300℃以上での放出水素量))自体は極微量であり、母材の降伏応力以下である実用応力域では機械的性質および破壊特性に水素の影響は見られなかった。 ➢ 高圧ガス導管耐震設計指針のLEVEL1地震動を2回想定した予ひずみを受けた母材および溶接部についても、上記水素ガス暴露条件による水素侵入量の増加は無く、機械的性質および破壊特性の大きな変化は確認されなかった。 ・ただし、使用環境より著しく厳しい水素環境(強制水素チャージにより、上記水素ガス暴露での拡散性水素侵入量より2オーダー程度水素侵入量が多い条件)での特性試験において、予ひずみを付与した母材では、絞りや衝撃値の低下が見られた。 ➢ 水素雰囲気下での塑性変形を伴うほどのひずみ振幅の大きい大地震を想定した低サイクル疲労試験において、疲労き裂が発生するまでの繰り返し数は大気中と大きな差は無いと考えられるが、疲労き裂進展速度で5~10倍の上昇が見られた。

【結論】

- ◆ 中低圧都市ガス配管に用いられているSGPおよびSTPG370について、今回想定した実用応力域の水素使用条件では水素による機械的性質、破壊特性の差はみられず、配管の寿命内に発生を想定するLEVEL1地震動を2回想定した予ひずみ材(母材、溶接部)についても水素による機械的性質、破壊特性に大きな変化はみられない。
- ◆ ただし、実用応力範囲外(塑性域のひずみ振幅)において水素雰囲気条件での疲労き裂進展速度に影響が見られ、水素ガス配管への適用には配慮が必要。⇒ 別途に詳細調査(p.9参照)

7

【設計】

■ 水素環境下における試験結果

試験項目	機械的性質および破壊特性調査 素材まま(予ひずみ無し)		ひずみの影響調査	
	母材	溶接部	±1%32回繰り返し予ひずみ母材	±0.5%32回繰り返し予ひずみ溶接部
引張試験	水素の影響なし	水素の影響なし	水素の影響なし	
破壊靱性	水素の影響なし	水素の影響なし	水素の影響なし (僅かな予ひずみ靱性低下、延性き裂抵抗向上)	
高サイクル疲労	水素の影響なし	水素の影響なし	水素の影響なし (試験速度・ひずみ硬化の影響あり)	—
疲労き裂伝播	実用応力域(0.1%)では水素の影響なし [大ひずみ繰り返し(低サイクル疲労領域)では、疲労き裂進展速度が5~10倍加速]	—	水素の影響なし	—
低サイクル疲労	水素の影響なし	SMAW部短命化、TIG部(水素量小)は影響小 ひずみ集中を考慮した設計が有効	水素の影響なし	

<参照>

- 平成17年度水素供給システム安全性技術調査(金属系配管材料の仕様検討)
- 平成18年度水素供給システム安全性技術調査(金属系材料接合部等の仕様検討等)／新日鉄エンジニアリング(株)
- 平成19年度水素供給システム安全性技術調査(金属系材料の仕様検討等)／日鉄パイプライン(株)

8

【設計】

01: 金属系材料(水素脆化)

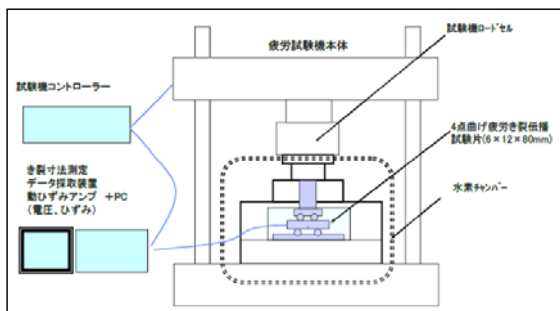
目的	<p>実用応力域の金属母材の疲労き裂進展特性、特にひずみ振幅が大きく、き裂進展速度が速い領域において水素の影響が見られていた点を踏まえ、疲労試験中新生成面に生じる疲労についてのみ付臭材添加による水素脆化影響の調査を実施した。</p>
評価項目	<p>H17～H19年度調査等で金属材料(SGP, STPG)への水素影響の懸念が残る以下の項目について明らかにする。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水素ガスへ添加された付臭剤による金属材料の疲労き裂進展特性への影響(き裂の進展により常に新生面が現れることから、何らかの影響を懸念) ・試験周波数(1Hz)での水素ガス中疲労き裂進展特性
調査結果	<p>➢ 水素ガス添加付臭剤の影響</p> <p>2種の付臭剤(シクロヘキセンおよび2ヘキシン)を添加した水素ガス中(ガス圧1MPa、温度50℃、試験前水素保持24時間)でのそれぞれの疲労き裂進展特性は、水素ガス中(濃度99.99%以上)の結果と同等で差は見られない。</p> <p>➢ 大気中と水素ガス中の疲労き裂進展特性の比較(水素脆化影響)</p> <p>大気中の疲労き裂進展速度の結果は試験片毎の差が水素ガス中での結果に比べて大きく、明確ではなく、データの追加が望ましい。(SGPについては、大気中に比べ、水素ガス中では応力拡大係数が大きいほど疲労き裂進展速度は増大傾向がみられた。しかし、STPGについては水素による疲労き裂進展速度の加速は見られず、H17～19年度調査の傾向と一致しなかった。この原因として素材の拡散性水素量の影響が原因と考えられる。)</p>

【結論】

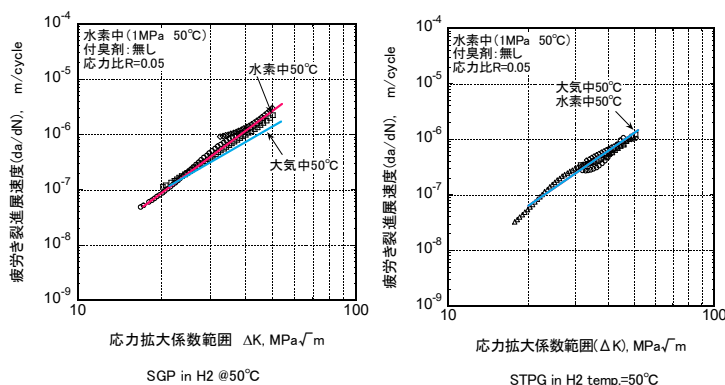
- ◆ 金属疲労き裂進展特性への付臭剤の影響は見られない。
- ◆ ひずみ振幅が大きい場合(実用応力範囲外)の疲労き裂進展速度への影響については、調査による新たな知見は得られていない。

9

【設計】



＜疲労き裂伝播試験の概要図＞



＜き裂進展特性測定結果の例＞
(大気中および水素中)



＜疲労き裂進展試験後の試験片外観＞


[疲労き裂が測定範囲(応力拡大係数範囲)を超えて進展した状況]

水素ガス中の方が、特に応力拡大係数が大きいほど疲労き裂進展速度が大きくなる傾向を示している。
↓
水素ガス配管に適用する際に配慮が必要

＜参照＞

- 平成23年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(付臭剤添加による金属系材料の水素脆化影響調査)／日鉄パイプライン(株)
- 平成24年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(付臭剤添加による金属系材料の水素脆化影響調査)／日鉄住金パイプライン&エンジニアリング(株)
- 平成25年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(付臭剤添加による金属系材料の水素脆化影響調査)／日鉄住金パイプライン&エンジニアリング(株)

10

目的	<p>既存ガス事業で積極使用されているPE(ポリエチレン)管について、その母材・融着部に対する水素暴露環境下での機械的性能、水素透過性などを調査した。</p> <ul style="list-style-type: none"> これまで、JIS-PE管を含む樹脂管において、水素環境下における物理性能(樹脂物性)および管状態での機械性能(管性能および融着性能)への影響について詳細調査がなされていなかった。 水素は他の気体と比較し分子径が小さいことから、各種分子フィルム(厚み数10μm)に対する透過性が高くなることが知られているが、パイプ形状肉厚(厚み数mm)での実験データは極めて少なかった。
評価項目	都市ガス供給で用いられるJIS-PE管(JIS K 6774規定のガス用PE管)の物理的性能、機械的性能が、水素暴露環境下でもJIS規格を満足すること。
調査結果	<p>➢ 水素暴露下における性能調査 水素暴露(80$^{\circ}$C、0.1MPa、1,270Hr)後においても暴露前と比較して変化は無く、JIS規格を満足している。</p> <p>➢ 水素透過性調査 JIS PE管の水素透過性は、実配管を考慮した曲げ配管、高加湿環境下においても直管状態およびドライ雰囲気状態と同じであり、施工上の問題はない。</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px 0;"> <p>PE管の特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> ・腐食しない ・金属管よりも低価格 ・伸びが大きく破断しにくい (東日本大震災、中越地震でも実証) ・軽く曲げやすい ・接合が簡単(施工性が良好) </div> 

【結論】

- ◆ JIS-PE管は、水素暴露環境下(0.1MPa、約50年相当想定)でも経時劣化は認められず、JIS性能規定を十分に維持している事を確認した。

■ 水素環境下における性能調査試験結果

評価項目(水素暴露:80 $^{\circ}$ C \times 1,270h後 [約50年相当と想定])		JIS規格	結果
管の物理的性能(JIS K6774)	熱安定性試験	≥ 20 min	○
	マルチスフローレイト試験	変化率 $\pm 20\%$	○
管の機械的性能(JIS 6774)	内圧クリープ [°]	規定時間で異常無し	○
	引張り伸び試験	$\geq 350\%$	○
	耐低速き裂成長性試験	規定時間で破断無し	○
	シャルピ [°] 衝撃試験(*1)	(≥ 9.8 kJ/m ²)	○
継手の機械性能(JIS K6775)	融着部強度試験	剥離率 $\leq 33.3\%$	○
気密性(*1)	直管	—	○
	曲げ配管	—	○
	湿度の影響	—	○

<調査対象PE管(PE80)の樹脂性能および寸法>

- ・A社中密度ポリエチレン
- ・MFR=0.21g/10min
- ・密度=939kg/m³
- ・口径=50A、外径=60mm、内径=48.2mm
- ・最小厚さ=5.5mm

*1: JIS規格外項目

■ 水素透過性調査結果

- ・各種JIS-PE管の水素透過性は、フィルム形状で測定されていた文献値とほぼ同等の結果を得た。
- ・更に、種々のパラメータの影響に関する調査より、現行採用されている融着工法は水素供給管の融着として問題ないことを確認。

■ バリア層付き試作PE管の水素透過性調査

(既に暖房温水管として欧州・日本で実績のある酸素バリア樹脂多層管の構成を参考に、JIS-PE管の内層にバリア層を導入したバリア層付きPE管を試作して調査)

- ・床暖房用で使用されている汎用のEVOH(エチレンビニルアルコール共重合体)を中間に100 μ m導入することで、水素透過性はJIS-PE管の1/10~1/20のレベルとなり、さらにより高バリアのEVOHを導入することで、水素透過性は更に1桁低減された。
- ・本試作管の性能調査の結果、主要なJIS規格性能を保持していることを確認した。

<参照>

- 平成18年度水素供給システム安全性技術調査(樹脂系材料の仕様検討)／三井化学(株)
- 平成19年度水素供給システム安全性技術調査(樹脂系材料の仕様検討)／三井化学(株)

目的	都市ガス内管の埋設部には主にPE管が使用されるが、露出部では鋼管、鋳物継手、ステンレスフレキ管など様々な材料の組合せにより配管されており、これらの水素気密性について調査した。
評価項目	代表的な内管材料(継手、ガス栓、バルブなど)および内管接合部について、長時間使用を想定した耐久加速処理時および外力付加状態において適切な水素気密性が確保されること。
調査結果	<p>▶ 耐久加速処理時</p> <p>所定の圧力で水素を封入した後、継手に対しては耐久加速処理(約20年相当)、ガス栓等に対しては各々の検査規格に記載の開閉回数処理を行った後、48時間の圧力変化量および水素リーク検知器による確認を実施。</p> <ul style="list-style-type: none"> 全18ケースの内、殆どのケースでは圧力変化は確認されず、かつ水素リーク検知器による確認でも検知されず。 3ケースでは48時間で1kPaの圧力低下が見られたが、これは微小領域*の確認であり、かつ水素リーク検知器では検出されなかったことから、実運用レベルでは気密性があると考えられる。 1ケース(フレキ継手B仕様)では、リーク検知器で水素が確認されたが、これはガスケットを通過した水素が継手内部に滞留し易い構造となっており、時間の経過と共に継手内部の水素濃度が検知感度まで上昇したためと考えられるが、圧力変化量は他の継手と同等であり、実運用レベルでは気密性があると考えられる。 <p>※ ガス工作物技術基準の解釈例 第51条第2項第三号に記載の「気密試験方法」の参照により、今回試験方法との換算比較において、3桁程度小さいオーダーの微小領域。</p> <p>▶ 外力付加時</p> <p>適切支持固定された状態において内管材料に発生する最大応力を想定し、引張荷重付加および曲げ荷重状態などにおける水素気密性を調査した。</p> <ul style="list-style-type: none"> 全23項目試験の内、19項目については、圧力変化およびリーク検知器のいずれにおいても検知されなかった。 他の項目の試験においては若干の圧力変化が検知されたが、この変化量は初期状態における変化量(初期試験実施時に測定)と同等であること等から、外力付加による影響ではないものと考えられる。 <p>＞ 適切な施工および支持固定が行われていれば、実使用を考慮した外力付加条件下では、十分な水素気密性を有していると確認される。</p>

【結論】

- ◆ 都市ガス用として使用されているバルブ・継手では、長期間使用時および外力付加状態においても実運用レベルでの水素気密性が確保されていることが確認できた。

■ 水素気密性試験(耐久加速処理時)の対象と結果

No	アイテム	呼び径	名称	材質	耐久加速処理条件	圧力値 [kPa(abs)]	確認結果
1	ねじ込み継手	20A	テーパネジ	シール材A	大気雰囲気 90℃ × 1440時間 (20℃環境で約 20年に相当)	211	○
2	ねじ込み継手	20A	テーパネジ	シール材B		211	○
3	絶縁継手	20A	テーパネジ コーティング	エポキシ樹脂		212	○
4	RSユニオン	20A	ガスケット	NBR硬度70		212	○
5	PCメカニカル継手	25A	パッキン	NBR硬度70		212	○
6	トランジション継手	25×20A	パッキン	NBR硬度70		210	○*1
7	鋼管ライザー管	30×25A	パッキン	フッ素ゴム		211	○
8	フレキ継手(A仕様)	20A	パッキン	NBR硬度50		212	○
9	フレキ継手(B仕様)	20A	ガスケット	ノンアスシート		211	○*2
10	フレキ継手(C仕様)	20A	パッキン	NBR		212	○
11	鋼管フランジ(ガスケット)	50A	ガスケット	ノンアスシート+ペースト		212	○
12	鋼管フランジ(絶縁スペーサー)	50A	Oリング	SBR+NR	212	○	
13	メータガス栓(開栓状態)	25A	テーパ栓	グリース	開閉 2000回	124	○
14	メータガス栓(閉栓状態)	25A	テーパ栓	グリース		124	○
15	機器接続ガス栓(開栓状態)	20A	テーパ栓	グリース	開閉 6000回	124	○
16	機器接続ガス栓(閉栓状態)	20A	テーパ栓	グリース		124	○
17	PEボールバルブ(開栓状態)	50A	Oリング シートリング	NBR硬度70	開閉 100回	211	○*1
18	PEボールバルブ(閉栓状態)	50A	Oリング シートリング	NBR硬度70		211	○*1

* 1: 微小圧力変化(48時間で1kPaの低下)が確認されたが、水素リーク検知器では検出されず。
* 2: リーク検知器で水素が検出されたが、圧力変化は他と同レベル(微小圧力変化)。

【設計】

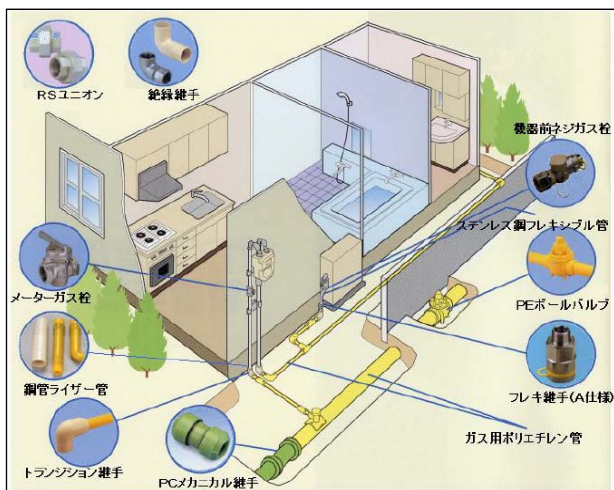
■ 水素気密性試験(外力付加状態)の対象と結果

アイテム	引張	曲げ	振動	衝撃
絶縁継手	○	○	—	—
RSユニオン	○	○	—	—
PCメカニカル継手	—	○	—	—
トランジション継手	○*	—	—	—
フレキ継手(A仕様)	○	—	○	○
フレキ継手(B仕様)	○	—	○	○
鋼管フランジ(ガスケット)	○	○	—	—
鋼管フランジ(絶縁スペーサ)	○	○	—	—
メータガス栓(開栓状態)	—	○	—	—
メータガス栓(閉栓状態)	—	○	—	—
機器接続ガス栓(開栓状態)	—	○	—	—
機器接続ガス栓(閉栓状態)	—	○	—	—
PEボールバルブ(開栓状態)	○*	○*	—	—
PEボールバルブ(閉栓状態)	—	○*	—	—
項目数	8	11	2	2

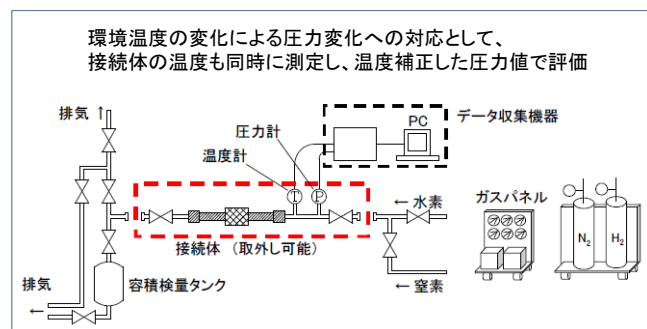
* :PE部の影響として、初期封入圧力 110kPaに対し、-1kPa/2day の圧力変化が検知されたが、この変化量は初期状態における既試験結果と同じであり、外力付加による影響ではないものと考えられる。

また、この圧力変化量は(耐久加速処理時と同様に)微小領域を確認したものであり、かつ4項目のいずれも水素リーク検知器では検知できなかったことから、実運用レベルでは気密性があると判断される。

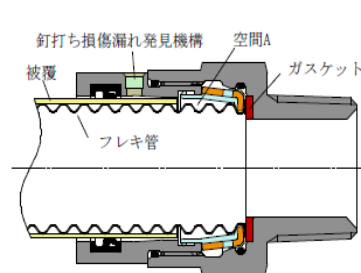
【設計】



＜都市ガス内管材料の配管例＞



＜水素気密性試験装置の模式図＞



ガスケットを透過した水素が継手内部の空間Aに滞留しやすい構造となっており、時間の経過とともに空間Aの水素濃度が上がる。滞留した水素は、釘打ち損傷漏れ発見機構の局所的な穴から外部に出るため、その穴の直近では水素濃度が水素リーク検知器の検出感度まで上昇していると考えられる

＜リーク検知器での水素検知ケース:フレキ継手(B仕様)の断面図＞

＜参照＞

- ▶平成18年度水素供給システム安全性技術調査(内管の仕様検討等)/日立金属(株)
- ▶平成19年度水素供給システム安全性技術調査(内管の仕様検討等)/日立金属(株)

【設計】

03: 継手・ガス栓・バルブ等(長期性能)

目的	配管材料で使用されるシール部材について、長期水素暴露による影響を評価する適切な劣化評価手法を検討し、期待耐用寿命に相当する促進劣化処理を配管材料に施し、長期水素暴露による影響を評価する																
評価項目	各シール部材について、使用用途と関連性の高い評価項目について各種劣化分析を行い、劣化パラメータを選定された劣化パラメータにおける劣化促進比を導出 各シール部材が用いられている配管材料について、耐用寿命に相当する促進劣化処理を配管材料に施し、水素気密性を確認																
調査結果	<ul style="list-style-type: none"> シリコン系シール材、NBR パッキンは、シール性との関係性が強いとされている永久ひずみを、グリースにおいては明瞭な変化が認められた見かけ粘度をそれぞれ劣化パラメータとして選定した。 各シール材の活性化エネルギーと劣化促進比 <table border="1"> <thead> <tr> <th>材料</th> <th>劣化パラメータ</th> <th>活性化エネルギー</th> <th>劣化促進比</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NBRパッキン</td> <td>圧縮永久ひずみ</td> <td>88.3 kJ/mol (21.1 cal/mol)</td> <td>474倍(20°C→80°C)</td> </tr> <tr> <td>シリコン系シール材</td> <td>引張永久ひずみ</td> <td>68.6 kJ/mol (16.4 cal/mol)</td> <td>427倍(20°C→100°C)</td> </tr> <tr> <td>グリース</td> <td>粘度</td> <td>56.6 kJ/mol (13.5 cal/mol)</td> <td>146倍(20°C→100°C)</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> 全ての配管材料において、水素ガスのリークは認められず、水素気密性を有していることを確認した 	材料	劣化パラメータ	活性化エネルギー	劣化促進比	NBRパッキン	圧縮永久ひずみ	88.3 kJ/mol (21.1 cal/mol)	474倍(20°C→80°C)	シリコン系シール材	引張永久ひずみ	68.6 kJ/mol (16.4 cal/mol)	427倍(20°C→100°C)	グリース	粘度	56.6 kJ/mol (13.5 cal/mol)	146倍(20°C→100°C)
材料	劣化パラメータ	活性化エネルギー	劣化促進比														
NBRパッキン	圧縮永久ひずみ	88.3 kJ/mol (21.1 cal/mol)	474倍(20°C→80°C)														
シリコン系シール材	引張永久ひずみ	68.6 kJ/mol (16.4 cal/mol)	427倍(20°C→100°C)														
グリース	粘度	56.6 kJ/mol (13.5 cal/mol)	146倍(20°C→100°C)														

【結論】

- ◆ 都市ガス用として使用されているバルブ・継手では、期待寿命相当の長期水素暴露においても実運用レベルでの水素気密性が確保されていることが確認できた。

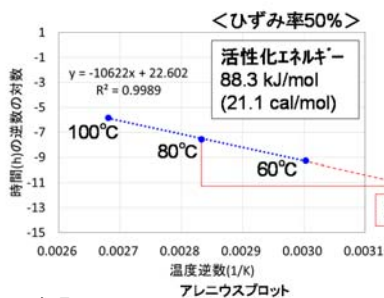
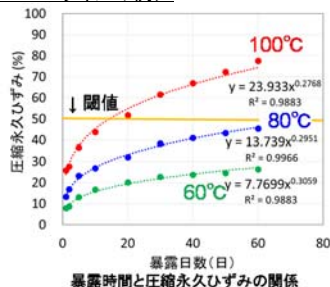
17

【設計】

対象部材	シール材	短期水素気密性※1	長期水素気密性※1 (30年相当)
フレキユニット	NBRパッキン	○	○
ねじ込み継手	シリコン系シール材	○	○
フレキ継手	NBRパッキン	○	○
鋼管用サドル	NBRパッキン	○	○
メーターユニオン	NBRパッキン	○	○(10年想定)
ボールバルブ	PTFE	○	○
緊急遮断バルブ(ボールバルブ型)	PTFE	○	○
緊急遮断バルブ(バナ式)	NBRパッキン	△※2	△※2
検査口付ねじガス栓	NBRパッキン	○	○
ボールスライドジョイント	NBRパッキン	○	○
エキスパンション継手	NBRパッキン	○	○
検圧プラグ	NBRパッキン	○	○

※1
耐用圧力の1.1倍の圧力の水素ガスを封入し、24時間における圧力降下を測定(○:圧力降下なし)
※2
圧力低下はないものの、水素気密性試験後の配管材料を水素リークディテクターで確認したところ、保護キャップ内で最大20 ppmの水素を検知した

<NBRパッキンの例>



$$\text{促進比} = \frac{20^\circ\text{Cでひずみ50\%に達する時間}}{80^\circ\text{Cでひずみ50\%に達する時間}} = 474$$

80°C処理は、20°C処理の474倍の促進となる

<参照>

- >平成26年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(配管材料の水素適用性調査)／化学物質評価研究機構
- >平成27年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(配管材料の水素適用性調査)／化学物質評価研究機構

18

目的	内管材料にパッキン、Oリングやガスケットとして用いられる代表的シール用材料について、水素透過性(初期および経時劣化時)を評価した。									
評価項目	水素の初期透過量に対し、耐久加速処理(大気雰囲気中での熱処理)後の透過量が影響を受けないこと。 <調査対象としたシール用材料>									
	<table border="1" style="display: inline-table; margin-right: 20px;"> <thead> <tr> <th>材料</th> <th>厚さ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>・NBR硬度50</td> <td>1mm</td> </tr> <tr> <td>・NBR硬度70</td> <td>1mm, 1.5mm</td> </tr> <tr> <td>・フッ素ゴム</td> <td>1mm</td> </tr> <tr> <td>・ノンアシート®</td> <td>1mm, 1.5mm</td> </tr> </tbody> </table> - NBRは、ブタジエンとアクリロニトリルの共重合体からなっており、その優れた耐油性から、工業用品のOリングやオイルシールとして最も多く使用されているゴムの一つ。 - フッ素ゴムは、フッ化ビニリデン系のものが一般的であり、耐熱性・耐薬品性などが他のゴムと比較して非常に優れているもの。 - ノンアシート®は、無機繊維とアラミド繊維に無機充填剤を加え、バインダーにゴムを配合したもので、主に配管のフランジ用ガスケットとして使用されるもの。	材料	厚さ	・NBR硬度50	1mm	・NBR硬度70	1mm, 1.5mm	・フッ素ゴム	1mm	・ノンアシート®
材料	厚さ									
・NBR硬度50	1mm									
・NBR硬度70	1mm, 1.5mm									
・フッ素ゴム	1mm									
・ノンアシート®	1mm, 1.5mm									
調査結果	> 初期水素透過係数 ・文献値とほぼ同じオーダーであり、最も水素透過係数が小さいシール材料はフッ素ゴム。 ・NBR50およびノンアシート®では、[厚さ]が異なっても透過係数はほぼ同じ値。 ・ノンアシート®に限って、測定温度によらず水素透過係数がほぼ一定。これは他のゴム系材料と比較して、分子運動の温度依存性が小さいためと推察される。 > 経時劣化による水素透過係数の変化 ・NBRでは初期状態に対し、耐久加速処理後の水素透過係数は僅かに小さくなっている。 ・フッ素ゴムでは殆ど変化が見られない。 ・ノンアシート®では、大気中90℃×720時間の熱処理(20℃環境での約10年に相当)後に透過係数が3倍程度へ増加、1,440時間の熱処理(約20年に相当)では更なる係数増加は見られない。(この原因は明らかにできなかった)									

【結論】

◆ 経時劣化(0.1MPa, 約10年及び約20年相当)後の水素透過性では、ノンアシート®で透過係数が初期の約3倍となったが、他の材料では大きな影響は見られなかった。

■ 測定方法

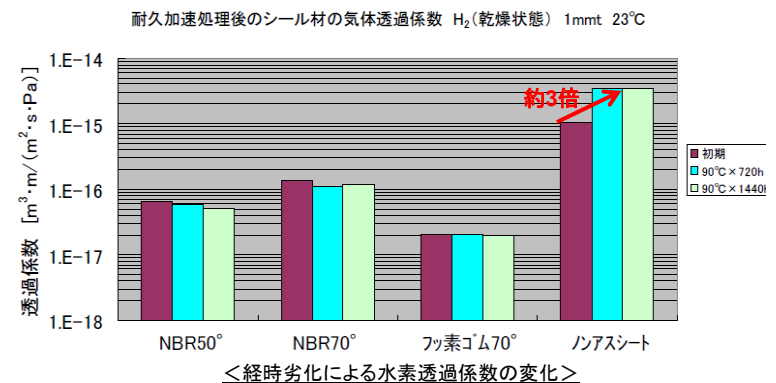
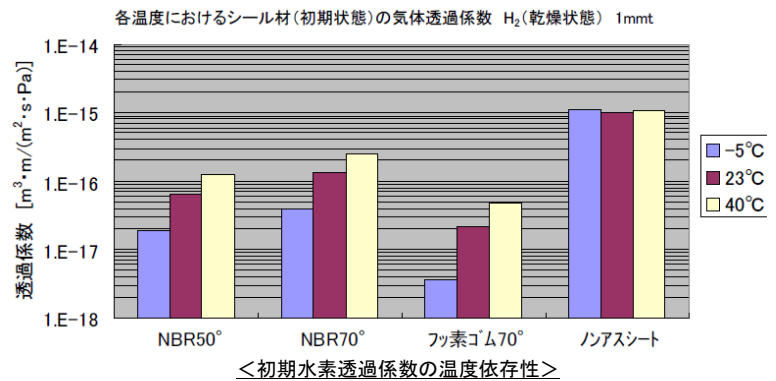
試験片によって隔てられた一方(低圧側)を真空に保ち、他方(高圧側)に試験ガスを導入。試験片を通過して低圧側へ透過したガスをガスクロマトグラフ法によって測定してガス透過度を算出する方法。
(JIS K 7126-1 準拠)

(1) 耐久加速処理(2ケース)

- ・大気中、90℃×720時間の熱処理
⇒ 20℃環境での約10年経過に相当
- ・大気中、90℃×1,440時間の熱処理
⇒ 20℃環境での約20年経過に相当

(2) 測定により得られた透過量と膜厚、透過面積などの条件から、透過係数を算出。

■ 測定結果



<参照>

> 平成18年度水素供給システム安全性技術調査(内管の仕様検討等/日立金属(株) 20

目的	中低圧都市ガス配管用金属材料のメカニカル接合部として一般的なフランジ接合を用い、水素環境下における気密性を調査した。
評価項目	水素ガス環境下で最高使用圧力の気密試験を行ったとき、漏えいがないことを確認 ・対象：中低圧都市ガス配管用のメカニカル接合部として一般的なフランジ接合 ・試験条件：0.99MPa、保持時間 2時間
調査結果	> 試験体 メーカー推奨取り付け方法に基づいた組立を実施したフランジ構造(前面座EF、平面座RF)を供し、対象とするフランジ接合のガスケットも、一般的に適用されている次の2種を使用。 ・非金属平形ガスケット(ジョイントシート) ・うず巻形ガスケット(外輪付きうず巻き方ガスケット) > 試験方法 ・水素ガス検知器(検出感度1ppm)を使用し、これが作動しないことにより気密性を判定。 ・参考データとして、圧力測定器具により気密保持時間以上保持し、その始めと終わりの測定圧力差が測定器具の許容誤差内にあることを確認することによる判定も実施 ・ガス工作物技術基準・同解釈例の解説(2次改訂 H18.3)第51条を参考とした。 > 試験結果 全4体(各1体)の試験体に対し、水素ガス検知器および圧力測定器具による水素漏えいは確認されなかった。

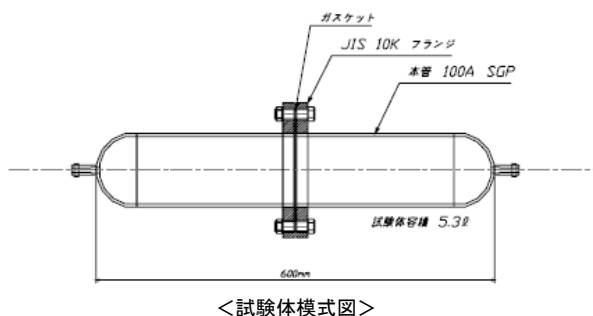
【結論】

- ◆ 都市ガス配管用として一般的なメカニカル接合(フランジ接合)部では、本試験条件下において、水素気密性を確保されていることが確認された。

【設計】

■ メカニカル接合部の水素気密性に関する試験結果

試験体	ガスケット座の種類	ガスケット仕様		内容積 (l)	水素気密性の試験結果			
		名称	厚さ (mm)		ガス検知器	圧力測定器具		結果 (保証精度 0.0114MPa)
						ゲージ圧(MPa)		
		初期圧/温度 (MPa) (°C)	120分後圧力変化 (温度補正実施)					
1	全面座 (FF)	汎用NAジョイントシート TOMBO No.1995 (ニチアス㈱製)	1.5	5.3	検知不可	0.993/12.7	0.009	N.D
2			3.0	5.3	検知不可	0.991/15.9	0.006	N.D
3	平面座 (RF)	ガスケットペースト塗布 #9400 (ニチアス㈱製) NAボルテックス®ガスケット TOMBO No.1834R-NA (ニチアス㈱製)	1.5	5.3	検知不可	0.996/17.9	0.008	N.D
4			4.5	5.3	検知不可	0.991/14.4	0.006	N.D



<参照>

> 平成18年度水素供給システム安全性技術調査(金属系材料接合等の仕様検討等)/新日鉄エンジニアリング(株)

目的	現在使用されている家庭用を主とするガスメータ、ガス流量計及び、現在開発中あるいは今後予測される水素ガスメータ候補等の仕様を調査することで、家庭用を主とする水素ガスメータとしての使用可能性(改造を含む)を調査した。
評価項目	家庭用水素ガスメータへの要求仕様 ・供給水素ガス: 燃料電池からの発生水素ガスで純度99.999%、水分なし。ただし供給時には混入の可能性あり。 ・圧力: 5~100kPa、温度: -5°C~40°C、その他、現行家庭用ガスメータに準じる。
調査結果	初期調査(文献および評価者経験による)に基づき 水素ガスメータ化の可能なガスメータ(5機種)、流量計(8機種)、新提案流量計(2機種)の計15機種を選択。 ここから再評価により7機種へ絞り込み、その結果に対し家庭用水素ガスメータとしての可能性の観点から評価した。

【結論】

◆ 家庭用水素ガスメータ化へ向けた可能性の結論

- ◆ 現状のまま改造なしで、家庭用水素ガスメータに転用できるガスメータは無い。
- ◆ 10kPa以内において膜式ガスメータは原理的には使用できる可能性があると考えられるが、耐久性の確認が必要。
- ◆ 超音波式ガスメータは、低圧水素ガスの計測が難しいが、H17~19年度の研究開発プロジェクト(九大、他)にて試作もなされている※ことから、水素ガスメータに使用できる可能性があるものと思われる。

(※ 文科省 H20年度科学技術振興調整費の評価結果[需要家用水素ガス計量システムの研究開発] より)

◆ 安全性の結論

- ◆ 水素防爆: 現在のマイコンガスメータは本質安全防爆構造を基本とした設計思想となっており、都市ガスが水素ガスに変わっても同様の考えで良いと思われる。そのために屋外設置の義務付けが必要。
- ◆ 耐水素脆性材料: 機能部品の強度の劣化や気密、性能への影響について今後調査研究が必要。
- ◆ 気密性: ガasket材、シール材の耐水素ガス、10年間に耐え得る耐久気密性の調査研究が必要。

【設計】

■ 絞り込まれた7機種の方式と評価結果

No.	分類	計量原理構造	主計測分類	水素化価格予測	法定精度予測	対水分	耐水素ガス	脈動流対策	可能性評価	可能性結論	評価判定理由・特徴、他		
1	ガスメータ	実測式	膜式(家庭用)	体積	*L(注1)	A	△	○	○	○	有り	・水素計測で使用実績 ・現状のガスメータの使用の可能性あり ・低開発費	・従来ガスメータ使用の可能性あり
2		推量式	フルイディック(流体振動式)	体積	L	A	△	○	○	○	小	・家庭用ガスメータとして完成している ・MEMSセンサ使用でコスト低減が望める ・膜式について有力	・流体素子で計量、微小流量域はμフロ
3			超音波式	体積	L	B	△	○	△	△	*有り(注3)	・LNG家庭用としてほぼ完成 ・高圧水素ガス流量計が開発中 ・H17水素ガスメータ開発プロジェクト発足	・全流域を超音波で計量
4			タービン式	体積	L	B	△	○	△	△	小	・20年前に技術確立 ・小型低コスト	・特殊な樹脂製タービンで計量、微小流量は切替えてノズルより噴射
5	流量計	渦式	カルマン渦	体積	L	B	△	○	必要	△	[*有り](注4)	・新規提案 ・μフロセンサ渦検出により体積計測⇒水分に強い	・大、中流量はカルマン渦、小流量はμフロ
6		熱式	フローセンサ	質量	L	A	▲(注2)	○	必要	△	[*有り]	・水素ガスが計測できうる唯一の流量計 ・質量流量のため計量法改正が前提	・μフロセンサで全流域を計量 ・水分が誤差に繋がる
7	新提案	差圧式&μフロ式	新ピトー管	体積	L	A	○	○	必要	△	[*有り]	・新開発ピトー管流量計 ・小流量域はμフロセンサ ・水分に強い	・大、中は差圧センサ、小流量域はμフロ ・オフィスに比べ更に水分に強い

A: 器差、精度等、現行計量法で定める合格範囲をクリア B: 改造でクリア
 L: 現行膜式メータと比較して、同等(改良等により低減できる可能性あり)

注1: *1(膜式)が製品単価、改造開発費、メンテナンス費を含めて最廉価。

注2: ▲は△より劣る。

注3: *は新規設計開発が必要、注4:[]はガスメータに比べレベルが低い。

<参照>

>平成18年度水素供給システム安全性技術調査(内管の仕様検討等/日立金属(株)24

目的	現行の都市ガス供給にて使用されている整圧器が、水素に対しても同様の制御性を示すのか、また、水素を制御可能な場合において水素に対する気密性を評価した。
評価項目	整圧器のダイヤフラムにおける水素の透過挙動、整圧器本体の気密性および制御性 ・制御性: 静特性および動特性 ・安全性: 本体およびダイヤフラムの気密性
調査結果	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 制御性: 都市ガス用整圧器で水素2次圧力の制御性が確認され、供給に必要な水素量に対する適切な選定を行うことにより、本調査で確認出来た領域に限られるが、水素流量の急激な変化に対しても追従可能なものであることを確認した。 ➢ 水素透過性および気密性: NBR製ダイヤフラムからの微量な水素透過は確認されたが、整圧器全体やシール部分からの漏れは確認されなかった。

項目	目的
ダイヤフラム水素透過試験	都市ガス用整圧器として使用されている、ダイヤフラムと同材質の基布入りゴムシートを使用し、水素の透過量を確認。
整圧器本体気密試験	水素透過試験の結果を受け、実際の整圧器として組み立てた際の、ダイヤフラム膜面だけでなくダイヤフラム側面などからの水素の透過を機器全体として確認。
整圧器特性試験	都市ガス用整圧器に水素を流した場合の制御特性を確認 <ul style="list-style-type: none"> ・静特性試験: 静的流量変化に対する制御性の確認、最大流量、オフセット、あおり有無 ・動的特性試験: 動的流量変化に対する制御性の確認、オーバー/アンダーシフト、静定時間 ・P1-P2特性試験: P1変化に対する制御性確認、最低動作圧

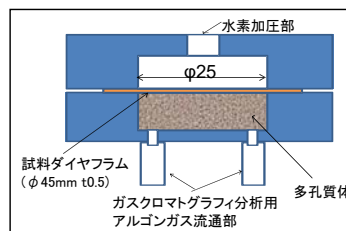
< 整圧器の調査項目 >

【結論】

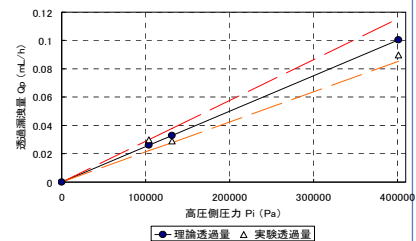
- ◆ 都市ガス用整圧器による水素2次圧力の制御性が確認され、都市ガス用整圧器室と同様環境への設置が可能なレベルの水素気密性を保持していることが分かった。

■ ダイヤフラム水素透過性試験

理論透過計算式による透過量と実験結果では、ゴム材の不均一さによる僅かな誤差は見受けられたが、漏えい検知液でも検出不可な程度の微量な漏えいであった。



< 透過試験用試料ホルダ >



< 透過量 [理論値と実験値] の比較グラフ >

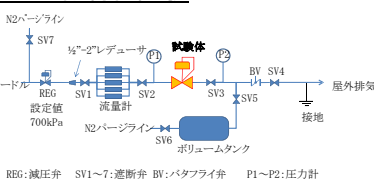
■ 整圧器本体気密性能試験

約20時間の整圧器本体気密性試験の結果、微量ではあるが圧力降下が確認された。しかし、透過試験結果からダイヤフラム膜面の水素透過量を算出すると、圧力降下のほぼ全量がダイヤフラムからの透過量と推測され、整圧器本体の気密性には問題ないという結果が得られた。この整圧器を、都市ガス用の整圧器室と同様環境に設置し、風速・換気回数等を想定した場合、整圧器室内の漏えい水素ガス濃度は $2.37 \times 10^{-4}\%$ と計算され、水素爆発下限濃度(4%)と比較しても十分に小さい値と判断される。



< パイロット式アンローディング型整圧器 > (300kPa)

■ 整圧器特性試験



< 特性試験フロー >

制御方式	オフセット	シフト	応答性	微小流量でのあおり	制御性総括
直動	あり	あり	早い	なし	オフセットシフトはあるも問題ないレベルで良好な制御
直動	あり	あり	早い	なし	
パイロット	微小	微小	遅い	弱くあり	微小流量で弱いあおり有るも、流量増に伴って解消し制御可能
パイロット	微小	微小	遅い	弱くあり	
パイロット	(微小)	微小	遅い	強くあり	あおりで静特性は中止したが、動特性では安定制御であり、大流量制御は可能と推察

目的	水素ガスの万一の漏えいの際に臭気を確実に認知でき、安全性を確保できる付臭剤候補を明らかにした。
評価項目	土中埋設の水素供給における付臭剤として具備すべき主な要件 ・人が検知できる独特の臭い(異臭)を有する、燃料電池への影響が無い無硫黄性、等 ・土壌透過性を有する(土中パイプライン供給時) 想定試験前提:水素ガス漏えい微小漏れ(60L/H)、代表的埋設深さ(1.2m)、など
調査結果	➢ 国内外の事例調査より、有臭の既知合成化合物より無硫黄の候補物質を13種リストアップ ➢ 要素試験を通じた適性評価により4種へ絞り込み ➢ 実スケールでの土中水素漏えい検知評価試験(臭気倍率2000倍)の結果、付臭剤[シクロヘキセン]で良好な土壌透過性が示された。(臭気棒試験の結果、漏えい中心から2.5m離れた深さ50cm地点で臭気を認知)

都市ガス・LPG用付臭剤に求められる要件

- a. 人に対して安全
- b. ガス漏れをすぐに検知させる臭い
- c. 物理的・化学的に安定
- d. 安全に燃焼し、燃焼後は無臭・無毒
- e. 水に溶けない
- f. 嗅覚疲労をおこさない
- g. 土壌透過性が良い
- h. LPGボンベ中に濃縮されない
- i. 腐食性が無く金属やゴムに影響を与えない
- j. 添加量が少なくすみ、安価

燃料電池用水素付臭剤に求められる要件

- ＜燃料電池システム＞
 - ・電極触媒を被毒しない
 - ・電解質膜を劣化させない
 - ・水素吸収合金の性能を低下させない
- ＜付臭剤の物理的・化学的物性＞
 - ・高圧充填時に凝縮せずに適切な臭気強度を保てる蒸気圧を有する
 - ・高圧充填時に水素化や分解等が起こらず化学的に安定
 - ・充填容器材料を劣化させない
 - ・漏えい時に水素に追従して拡散する

【結論】

- ◆ 「シクロヘキセン」が水素ガス用の低硫黄付臭剤候補として最有力であることが確認された。
(実スケール検知評価試験において 都市ガス漏えい検査と同等の方法で漏えい検知可能なことを確認)

■ 付臭剤の候補物質(13種)と要素試験結果による適性評価

#	化合物名	臭気強度 (ppb)	曇点	蒸発残渣 (%)	浮遊物	水への溶解度 (%)	沸点 (°C)	土壌透過性	適性評価結果	備考
1	ジアセチル	◎ 0.267	△:融点から室温まで観測されず	△ 2.36	◎ なし	△ 完全溶解	◎ 88	△	△:低硫黄付臭剤候補として有力	JARI*における検討中の燃料電池自動車向け無硫黄付臭剤候補 ※(財)日本自動車研究所
2	エチルシュガーラクトン	0.020	—(室温で固体)	0.68	なし	136.1 (g/L)	103 0.5mmHg	—		
3	イソ酪酸エチル	8.01	観察されず	0.00	なし	0.20	110	—		
4	5-エチリデン-2-ノルボルネン	2.10	観察されず	4.16	なし	0.10	147	—		
5	アクリル酸メチル	○ 66.7	◎ 観察されず	○ 0.09	◎ なし	○ 17.0	◎ 80	○	○:低硫黄付臭剤候補として有力	水素用無硫黄無窒素付臭剤
6	アクリル酸エチル	◎ 0.5	◎ 観察されず	○ 0.02	◎ なし	○ 15.0	◎ 99	○	○:低硫黄付臭剤候補として有力	ドイツ都市ガス用無硫黄付臭剤の主成分
7	プロピオンアルデヒド	4.37	観察されず	7.86	なし	76.00	46	—		水素用無硫黄無窒素付臭剤の少量成分
8	アミルアセテート	21.86	融点から室温まで観測されず	0.93	なし	0.30	148	—		
9	サリチル酸メチル	7.08	融点から室温まで観測されず	0.57	なし	0.00	224	—		
10	アセトフェノン	15.49	—(融点19-20°C)	0.95	なし	4.7 (g/L)	202	—		
11	インデン	8.27	融点から室温まで観測されず	2.20	なし	0.00	182	—		
12	メチルエチルピラジジン	2.20	観察されず	2.07	なし	完全溶解	169-171	—		ドイツ都市ガス用無硫黄付臭剤の成分
13	シクロヘキセン	○ 61.5	○: -5°C以下で僅かに濁り、-5°C以上では観察されず	◎ 0.00	◎ なし	◎ 0.10	◎ 83	◎	◎:低硫黄付臭剤候補として最有力(実スケール検知評価試験で確認)	国内都市ガス用低硫黄付臭剤の主成分(無硫黄成分)

＜参照＞ ➢ 平成18年度水素漏えい検知技術調査(地中内水素拡散試験)／JFEテクノサーチ(株)
 ➢ 平成19年度水素漏えい検知技術調査(水素漏えい検知評価試験等)／JFEテクノサーチ(株) 28

目的	水素ガスの万一の漏えいを確実に検知し、安全性を確保できるかどうかを調査・検証した。
評価項目	実用水素センサとして具備すべき要件 ・水素検知性: 検出感度(爆発下限界の1/4[1/4LEL]検知) ・水素選択性 ・可搬性
調査結果	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 水素検知性: 実用化済み検知方式および新しい検知方式を対象とした国内外の情報収集調査により、半導体式、接触燃焼式、Pd/Ni式、電気化学式で検知可能であることを確認。 ただし、FID式(水素炎イオン化型検出器)は原理的に水素への適用不可。 ➢ 水素選択性: Pd/Ni式は原理的に水素選択性あり。 ➢ 可搬性: 代表的な可搬型センサ製品を対象に情報収集、ヒアリング調査を実施。 ➢ 代表的可搬型検知器(4種)を用いた実スケールの水素ガス土中漏えい検知試験の結果、漏えい開始数時間後 漏えい点直上部において検知可能であることを確認。

【結論】

- ◆ 現行ガス事業で使用される可搬型検知器で水素検知は可能(FID式を除く)である。
- ◆ ただし、実用化済み検知器には水素選択性がないため、今後の技術進歩に期待。

■ 水素ガス検知方式の比較

検知方式	原理	特徴	検出範囲	応答時間	水素選択性	可搬型センサ事例	
実用化済み方式	接触燃焼式	水素の触媒燃焼に伴う生成熱による素子の温度上昇を検出	定量性に優れる	1000ppm ~4%	5~10秒	なし	・新コスモス:XP-3160 ・理研計器:GP-88AS
	熱線型半導体式	SnO ₂ 等金属酸化物表面の酸素と水素反応による電気伝導度変化を検出	低濃度検知が可能	100ppm ~1%	~20秒	なし	—
	気体熱伝導式	水素混合に伴う気体熱伝導率の変化を検出	低感度だが水素選択性が比較的高い	1vol%~ 100vol%	5~10秒	なし	—
新しい方式	電気化学式	電解液中の2つの電極間に反応等が生じることで発生する異常電位を検出	応答性の速さ 水素選択性も可能	100ppm	数秒	なし (フィルター、触媒材料、電解液等の組合せで向上可能)	・MST(独):H2 SE 4% ・ドレーゲル(独):PackIII
	Pd/Ni触媒方式	水素ガスがPd, Niなどの金属に吸蔵されることによる電気抵抗変化を検出	応答性の速さ 水素選択性	15ppm~	数秒	あり	・H2Scan(米):HY-ALERTA MODEL 500
	FET型半導体式、熱電式、固体電解質式、等		研究段階	—	—	—	—

<参照>

- 平成18年度水素漏えい検知技術調査
- 平成19年度水素漏えい検知技術調査(水素漏えい検知評価試験等) / JFEテクノロジー(株)

目的	水素導管で想定されている1MPa未満の中低圧導管を対象に、各種計測(圧力・流量等)に際して活用可能な圧力解析式を導出した。
評価項目	・汎用性: 中低圧の直管ならびに異形管など、水素導管網全体の圧力解析式として活用できること ・簡略性: 解析式は現行の都市ガス指針式レベル同等に簡略利用できること
調査結果	<ul style="list-style-type: none"> 中低圧水素直管部に汎用する圧力解析式 実証確認(実際の水素ガスを使用した圧力損失測定)を通じた実測値と、導出した圧力解析式による理論値が一致することを確認した。 異形管を対象とした圧力解析上の取扱い方法 一般の導管で古くから利用されてきた既往手法(直管相当長手法)が適用可能であることを導き出し、水素導管に特有する点などに留意した上で同様に活用できることを確認した。

$$\Delta P = K_p \frac{TL Q_0^2}{D^5 2P_1} \quad (\text{一般式})$$

$$K_p = 3.87 \times 10^{-18} (\log Re)^{-2.43}$$

ただし、 $10^4 < Re < 10^5$

ΔP :	導管入口出口間の圧力損失	[MPa]
Q_0 :	標準状態体積流量	[Nm ³ /h]
K_p :	圧力損失係数	[-]
T :	温度	[K]
L :	導管長さ	[m]
P_1 :	導管入口圧力	[MPaG]
D :	管内径	[m]
Re :	レイノルズ数	[-]

<圧力解析式>

H23: 低圧PE管を対象にした圧力解析式を導出。

(実際の水素ガスを使用した圧力損失測定を実施し、測定データを基に多数の既往圧力解析式の原形であるDarcy-Weisbachの式を原点にして測定条件に限定される暫定解析式を導出)

H24: 実証確認を通じてネットワークの中圧水素の直管部に汎用する圧力解析式を導出。

H25: ネットワーク全体の圧力解析手法整備を目的に、中圧直管部以外へ取り組む。

[条件]: 低圧水素直管部に汎用する圧力解析式を導出。(中圧水素直管部向け解析式を低圧にまで適用可能なことを証明)

[対象]: 異形管(ティ、エルボ等)を対象に、一般のパイプラインで以前より広く利用されてきた既往手法が適用できることを証明し、水素導管に特有する点などに留意した上で、そのままの活用を提言。

【結論】

◆ 流体の性質を示す損失係数をRe数で整理し、水素を供給するRe数領域を限定すれば、既存の簡易式を流用して、高精度な圧力解析式を一つに定められることが確認できた。

【設計】

水素ネットワークにおける圧力解析式

(1) 圧縮性流体の圧力解析式: パイプラインの基本的な設備仕様の管径と延長に対して、始発点の圧力と流量が求められる。

$$P_1^2 - P_2^2 = K_p \frac{TL Q_0^2}{D^5}$$

Q_0 :	標準状態体積流量	[Nm ³ /h]
P_1 :	ライン入口圧力	[MPa]
P_2 :	ライン出口圧力	[MPa]
T :	温度	[K]
L :	ライン長さ	[m]
D :	管内径	[m]
K_p :	圧力損失係数	[-]

(2) 圧力損失係数 K_p の一般式は次式であり、流体の物性値と摩擦係数で示される。

$$K_p = 2.400 \times 10^{-16} f \frac{zG}{z_0}$$

f :	Fanning の摩擦係数	[-]
G :	空気に対する比重	[-]
z :	圧縮係数	[-]
z_0 :	標準状態における圧縮係数	[-]

(3) 水素ネットワークにおける適用範囲として、摩擦係数 f をレイノルズ数を用いて表す次式として提案。

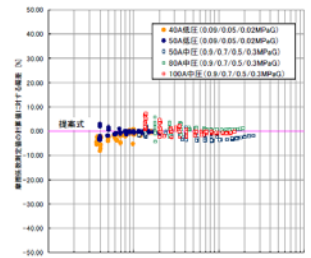
$$f = 0.231 (\log Re)^{-2.43}$$

$$K_p = 3.87 \times 10^{-18} (\log Re)^{-2.43}$$

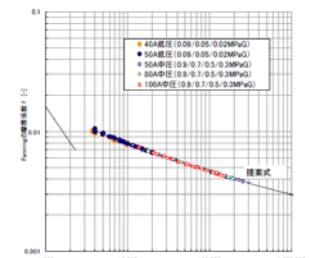
適用範囲 $0.1 \leq P < 1.0$ のとき $10^4 \leq Re \leq 10^5$
 $P < 0.1$ のとき $4,000 \leq Re \leq 15,000$

Re :	レイノルズ数	[-]
f :	Fanning の摩擦係数	[-]
K_p :	圧力損失係数	[-]
P :	運用圧力	[MPaG]

(4) 上記式に、低圧および中圧の試験結果を合わせてプロットしたグラフを右図に示すが、摩擦係数の提案式は低圧から中圧まで一貫して試験結果と良好な一致を示す。



<摩擦係数測定値と提案式計算値の偏差> (低圧、中圧全データ)



<レイノルズ数と摩擦係数の関係> (低圧、中圧全データ)

解析式では包含できない異形管部の圧力損失の取扱い

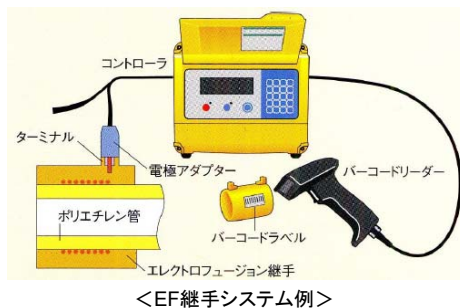
- ・都市ガス導管における圧力解析同様、直管相当長手法(消防法)を活用し、管形状が変化している部分のみ(接合部の影響は直管に含む)を追加計上するという形で運用していく一般的な方法で対処できる。
- ・ただし、一般のパイプライン同様に全ての圧力損失の発生源を見込めない点を補う安全率が必要である事、さらに一般のパイプラインよりも圧力損失値を過剰に計上する事を認識した上で活用する必要がある。

<参照> >平成18年度水素供給システム安全性技術調査(金属系材料接合部等の仕様検討等)/新日鉄エンジニアリング(株)
>平成23年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(水素導管圧力解析調査)/三井化学産産(株)
>平成24年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(水素導管圧力解析調査)/JFEエンジニアリング(株)
>平成25年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(水素導管圧力解析調査)/JFEエンジニアリング(株)

【施工】

11:分岐工法

目的	都市ガスの通常工法である活管分岐工法について、その際の各部位が水素の着火エネルギーの小ささ故に火気設備と成り得るかどうかを調査し、都市ガス施工への使用時と同様の取扱いでの安全性を調査した。
評価項目	PE管融着作業時の継手およびEFコントローラが水素ガスの着火源となる可能性 ・PE管EF継手※で発生の可能性のある異常状況(電熱線短絡時の局部的加熱等)を想定した通電時の融着面温度 ・EFコントローラで発生の可能性のある異常温度状況を想定したコネクター部と内部部品の温度
調査結果	<ul style="list-style-type: none"> PE管EF継手施行異常時における温度 EF継手施工異常時の管内面最高温度は 197.5℃。(参考に測定した通電時のワイヤー最高温度は 453.8℃) EFコントローラにおける異常発生時の温度 ・コントローラ内部の最高温度は、想定異常状態において 115℃。 ・ターミナル部の最高温度は、接触不良状態の想定条件下で 246℃。



※ PE管EF継手(PE管エレクトロフュージョン継手):
継手の内面に電熱線を埋め込んだ継手で、主にガス低圧配管に使用されており、左図システム例のような構成となっている。
EF継手の接合は、継手の内面に埋め込んだ電熱線にEFコントローラより電流を供給することによる発熱で継手内面のポリエチレンを加熱溶融させ、パイプと一体構造とする融着接合方式である。

【結論】

◆ PE管の接合に際し、必要な工具(コントローラ等)の使用時でも、水素が着火すると想定される温度(一般的な値として500℃)に到達することは無く、施行時の安全性が確保できることを確認した。

33

【施工】

■ PE管EF継手に関する高温想定調査・試験

想定状況	異常状態	測定内容
管の過剰変形による融着時の電熱線の短絡	電熱線短絡による局部加熱	・電熱線を部分的に接触させた継手を製作して測定
クランプ工具不良でのクランプ力不足による電熱線短絡		・短絡による継手抵抗値の15%低下を想定した供給エネルギーを投入して測定
2度融着、環境温度の誤認による通電時間増加	過剰融着による加熱	・同一継手で融着作業を2回行うことを想定し、標準通電時間の2倍の融着による温度測定

＜想定異常状況＞

測定部位	測定内容	最高温度 (n=3 実測最大値)		
		環境温度 -5℃	23℃	40℃
管内面	・電熱線短絡条件での局部加熱による温度上昇	—	130.6℃	—
	・2倍通電時間条件での温度上昇	178.4℃	195.0℃	197.5℃
管内面	(参考) 標準条件での温度確認	109.2℃	113.2℃	117.5℃
電熱線	(参考) 継手の参考温度部位の融着時の温度確認	463.1℃	453.8℃	439.5℃

＜管内面温度の測定結果＞

■ EFコントローラに関する高温想定調査・試験

測定部位	想定状況	異常状態	測定内容
EFコントローラ内部部品	経年劣化による接触不良	内部部品温度の加熱	a) 古品EFコントローラの温度上昇測定
	継手短絡による電流値変動	電流変動時の内部部品の加熱	b) 電熱線短絡による温度上昇の測定
	フィルター目詰まり	外気導入不可時の冷却不良による内部部品の加熱	c) フィルター閉塞状態での温度上昇の測定
ターミナル部	経年劣化による接触不良 EF継手とコントローラ結合部のゆるみ	ターミナル部の接触抵抗増による温度上昇	ターミナル勘合ゆるみでの温度測定

＜想定異常状況＞

測定内容	通電条件	コントローラ製造年月	最高温度	
			コイル	抵抗
a) 経年劣化時	99分	11年2月	108.6	97.0
	99分	03年9月	114.8	105.9
b) 電熱線短絡	20分, 短絡想定電流変動	03年9月	71.4	88.7
c) フィルター閉塞状態	99分	11年2月	114.8	106
	99分	03年9月	114.8	105.9
a)+c)	20分×5回連続融着	03年9月	93.5	101.4

＜EFコントローラ内部温度の測定結果＞

＜参照＞

＞平成23年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(施工方法の安全性評価調査) / 日立金属(株) 34

12:遮断工法

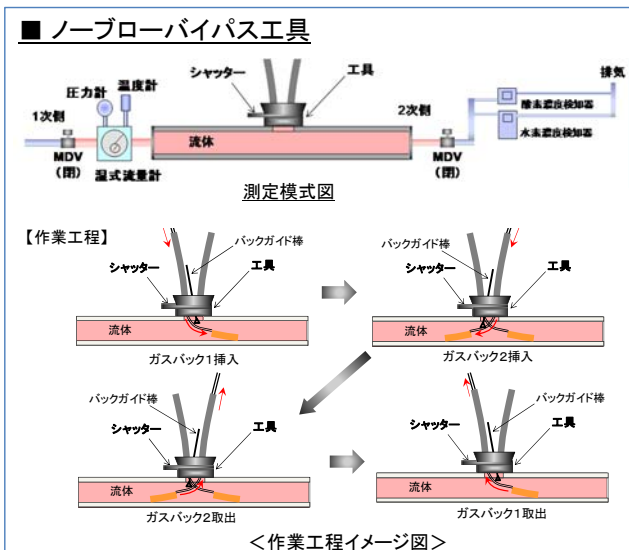
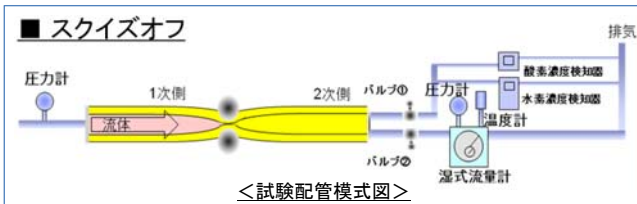
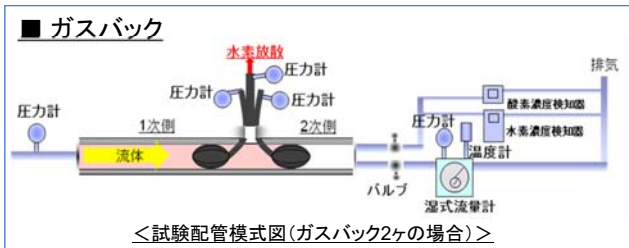
目的	現行の都市ガス分岐工法に用いられる工具を用い、鋼管、PE管にて実際に水素を使用した場合の遮断性能を調査した。
評価項目	選定した都市ガス用工具の仕様通りの使用のもとでの、 ・水素へ適用できる可能性 ・水素用として安全に適用できる条件
調査結果	> ガスバック遮断性能評価 ・適用管種、工具等: 右表 ・通常使用状態(ガスバック2ヶ)での漏れ量の把握を行った結果、ガスバックの仕様圧力範囲内で検出限界以上の漏れは見られず、都市ガス用ガスバックの水素への適用が可能であることを確認。 > スクイズオフ遮断性能評価 ・適用管種: PE管(100A) ・標準状態でのスクイズオフの漏れ量の把握を行った結果、通常ガス供給圧での漏れが見られたが、都市ガスの施行方法同様の対応(明らかな臭気が確認された場合には再度の遮断実施、など)により着火下限(4%)以下の運用は可能であることを確認。ただし、作業については自主基準を策定した上での運用が必要。 > ノーブローバイパス工具気密確認評価 ・適用管種: 鋼管(50A) ・2種の工具について、シャッターを閉めた状態および開けた状態での気密確認を行った結果、検出限界以上の漏れは見られなかった。また、ガスバック挿入およびガスバック取出しの作業状態での漏れ量を把握した。

適用管種	バッグ種類	適用可能範囲	バッグ内規定圧力
SGP管(100A)	パラソル型	2.0kPa以下	80kPa
	フラグロン	5.0kPa以下	100kPa
	TS型	2.3kPa以下	15kPa
PE管(100A)	TS型	2.3kPa以下	15kPa

【結論】

◆ 都市ガス用の遮断工具を、その仕様に基づく使用方法で、また通常の施工方法同様の対応を行うことで、水素へ適用可能な遮断性能を有することが確認できた。

【施工】



通常ガス供給圧での通過が確認されたが、実際の施工時には自主基準として実施されている以下の対応を行うことで、着火可能性を抑制可能と判断される。(下表参照)

- 明らかな臭気、ガス圧が確認された場合には、作業を継続せず再度の遮断を行い、通過量が少ないことを確認して作業。
- 導管切断箇所に対し、切断した導管先端を開放しておくことはなく、通常、導管内への異物混入、接合面保護の観点より止水栓などで閉塞を行う。

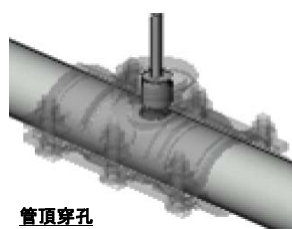
着火源	配管作業	配管作業(自主基準対応)	接合(融着)作業	
	人体による静電気	人体による静電気	なし	なし
通過量	大(明らかな着火可能性がある量)	着火可能性あり ↓対応(1)↓	着火可能性なし	着火可能性なし
	中(一般的な着火量4%)	着火可能性あり	着火可能性あり ↓対応(2)↓	着火可能性なし
	小(着火下限に満たない微量量)	着火可能性なし	着火可能性なし	着火可能性なし

<p>目的</p>	<p>導管工事で使用する工具が水素の着火エネルギーの小ささ故に火気設備と成り得るかどうかを調査し、都市ガス施工への使用時と同様の取扱いの下での安全性を調査した。</p>
<p>評価項目</p>	<p>鋼管用活管分岐継手の穿孔時における以下の状況を明らかにする。</p> <ul style="list-style-type: none"> 鋼管と穿孔用の摩擦による穿孔部管内面の温度上昇が水素着火温度(500℃)に達しないこと(現在、国内ガス用活管分岐継手の穿孔方式として使用されている「管頂穿孔」と「管側面穿孔」で確認) 穿孔時における穿孔機内の水素ガス濃度が着火下限(4%)以下であること
<p>調査結果</p>	<p>➢ 穿孔管の内面温度測定</p> <ul style="list-style-type: none"> 最も温度上昇が想定される施工条件を一般的な平板鋼板を用いた予備実験により導き出し、これを鋼管における測定へ適用し測定した結果、最高温度が最も高くなった時、管頂穿孔で492.4℃、管側面穿孔で419.7℃。(管頂穿孔より管側面穿孔の方が最高温度は低い、これは穿孔刃の管との接触長さが短いと推察) 仕様外の異常な使用状態(グリス無しなど)を想定しても、水素着火温度には達していないことを確認したが、十分に安全とは言い切れない温度範囲であった。 <p>➢ 穿孔機内の水素ガス濃度測定</p> <ul style="list-style-type: none"> 穿孔機を模擬して製作した容器内に施工箇所からの漏えいを想定した条件にて水素ガスを放出し、容器内部における水素ガス濃度を非接触測定した。 放出口直上の測定において、穿孔終了時間における水素濃度は放出口形状により4~10%程度であったが、都市ガスの施工方法と同様に導管内を減圧することにより、水素の着火下限以下になることが確認された。

【結論】

- ◆ 穿孔管の内面温度の上昇は、特定の条件を想定した範囲のものではあるが、水素が着火すると想定される温度を上回る結果は認められなかった。ただし、一般的な解釈を行う際には注意が必要。
- ◆ 穿孔管内の水素濃度は、都市ガス施工と同様に導管内を減圧することを想定すれば、水素の着火下限以下とすることが可能なことが確認された。

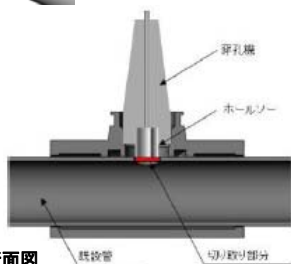
■ 穿孔方式の概念



管頂穿孔

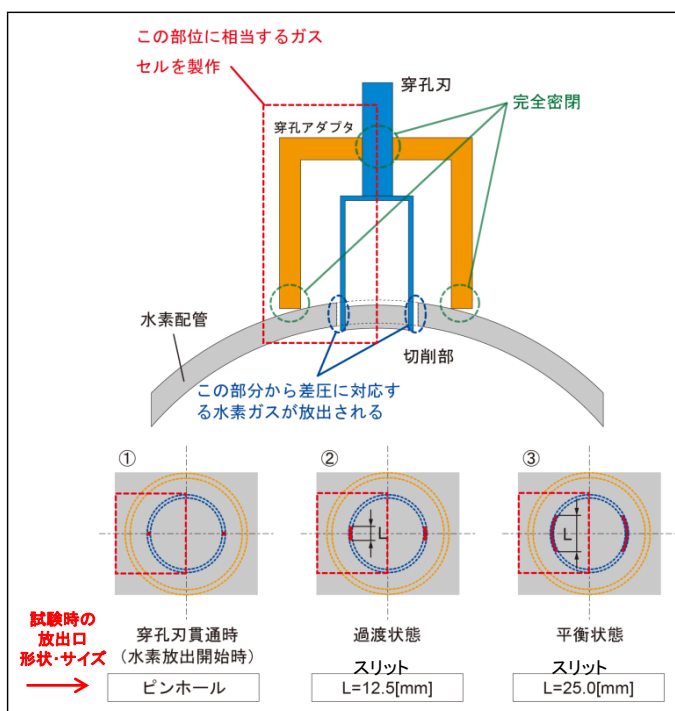


管側面穿孔



管頂穿孔時断面図

■ 穿孔機内の漏えいイメージ



<穿孔過程のモデル図>

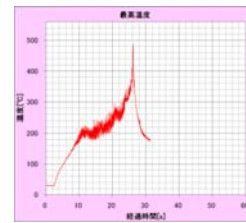
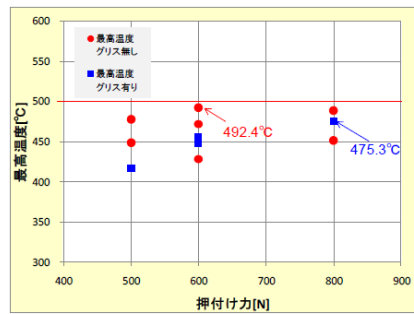
【施工】

■ 穿孔管の内面温度測定

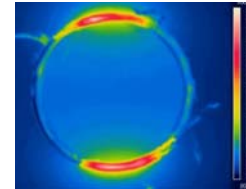
項目	測定条件
押し付け力	管頂：500N, 600N, 800N 管側面：500N, 600N, 700N
グリスの有無	無し、有り
回転速度 (無負荷)	450rpm (最大)
穿孔刃の状態	新しい刃
穿孔径	管頂：32A, 50A 管側面：80A

<測定条件>

【管頂穿孔(50A・グリス無)の測定結果】

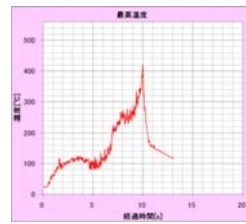
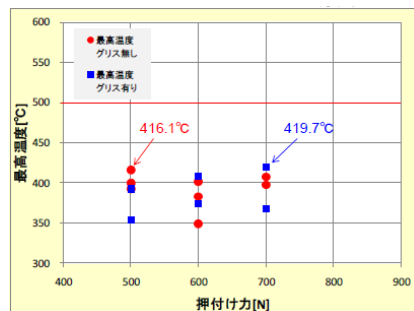


<最高温度の推移
(押し付け力 800N)>

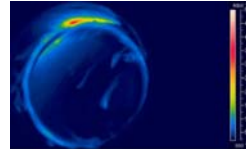


<最高温度時
(押し付け力
800N、26秒経過)
のサーモ映像>

【管側面穿孔(50A・グリス無)の測定結果】



<最高温度の推移
(押し付け力 700N)>



<最高温度時
(押し付け力
700N、10秒経過)
のサーモ映像>

【施工】

■ 穿孔機内の水素ガス濃度測定

鋼管種	32A分岐用	50A分岐用
穿孔機相当体積[cc] (穿孔機模擬容器寸法 W×D×H [mm])	97.5 (25×39×100)	250.5 (33×52×146)
穿孔機内初期圧 充填ガス種	大気圧 大気	
放出形状 [mm]	ピンホール：0.6, 1.2 スリット：0.6×12.5, 0.6×25.0	
放出圧力[kPa] (ゲージ圧)	10, 2.5 (導管内減圧の想定では1.0kPa)	

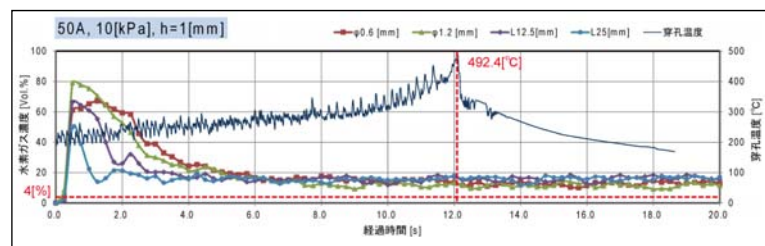
<水素ガス放出条件>

測定の結果、水素放出形状について貫通の開始から終了時までの4段階で想定した放出形状にて水素濃度を測定した結果、穿孔終了時間の水素濃度は10%程度まで上昇する結果であった。

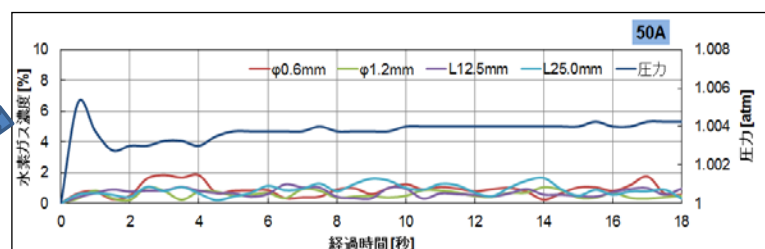
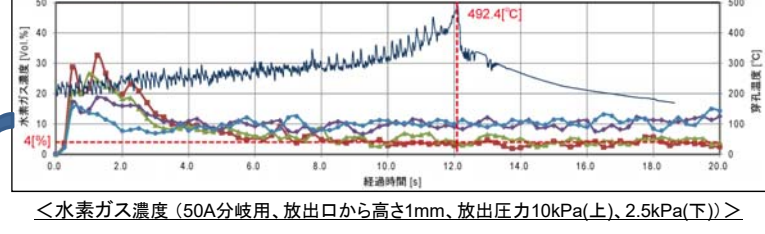
しかし、ガス事業者の実際の作業を想定した場合、特に中圧供給での穿孔では導管内を減圧する手法がとられている。そこで次に、導管内を減圧したことを想定し、放出圧力 1.0kPa での水素濃度測定を実施。

その結果、都市ガスの施工方法と同様に導管内を減圧することにより、水素の着火下限(4%)以下になることが確認出来た。

減圧



<水素ガス濃度 (50A分岐用、放出口から高さ1mm、放出圧力10kPa(上)、2.5kPa(下))>

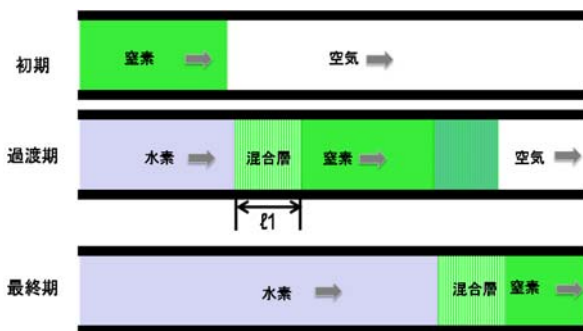


<水素ガス濃度 (50A分岐用、放出口からの高さ1mm、放出圧力1.0kPa)>

<参照>

- 平成23年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(施工方法の安全性評価調査)／日立金属(株)
- 平成24年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(施工方法及び供給設備の安全性評価調査)／日立金属(株) 40

目的	中低圧の水素導管を想定し、ガス開通時等に導管内のガスを置換(空気から水素へ)する際に、水素に先行して不活性ガス(窒素等)を導入する方法を念頭に置き、窒素と水素の挙動について調査した。 (都市ガスの場合、窒素や酸素の分子量・粘性・拡散速度は大きくは異なるが、窒素と水素の間には大きな隔りがあり、置換作業における窒素と水素が接した界面では拡散混合や浮力の及ぼす影響が無視できなくなることが懸念されていた。)
評価項目	管内ガス置換作業時に水素と空気の混合気体が形成されない条件や法則性 ・空気と水素の間に挟み込む窒素量 ・新設導管条件に依存した窒素量の法則性
調査結果	➢ 新設導管への水素置換作業時に空気と水素の接触を抑止できる不活性ガス(窒素)量の存在が確認された。 ➢ 空気と水素の接触を抑止できる不活性ガス量に関する法則性(下式)を導出・確認した。



■ 安全な置換のための最低窒素量 (これに加えて安全率を考慮必要)

・導管口径 50A以上の場合

$L \leq 20$	$20 < L \leq 80$
$l1 = (0.0227ReH_2 + 202) \cdot d$	$l1 = (0.0833ReH_2 + 328) \cdot d$

※水素のレイノルズ数: $ReH_2 \leq 2,000$ (窒素の $Re \leq 14,000$) の範囲に限る

L: 導管延長(全長)、
l1: 水素/窒素混合層(窒素が2%~98%)長さ
d: 導管口径、

・導管口径 25Aの場合

80m以下の導管延長であれば導管全てを窒素で置換できるだけの量を供給するのが妥当

【結論】

◆ 新設導管への水素置換作業時における、空気と水素の接触を抑止できる不活性ガス(窒素)量の存在が法則性として確認された。

■ ガスの置換現象の考え方

- ・各気体の界面で一切の混合が生じなければ初期に導入した窒素層Vがその長さを保持したまま末端まで移動することになるが、現実には必ず気体分子の拡散に伴う混合が生じる。
- ・その結果、l1およびl3が気体の進行と共に増加し l2が減少する。
- ・「水素と空気が混合しない条件」を見出すことは、空気とl3が完全に排出された時点で管内のl2が残存している条件を見出すことに等しい。
- ・このため、l1、l2、l3の挙動解析が求められる。

■ ガスの進行時挙動解析から導かれること

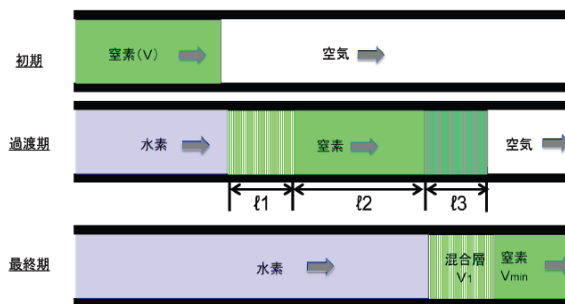
- ・導管内を進行する水素の流速には鉛直方向依存性がある。
 - 上部または中央の到達時間が短く、下部の到達時間が長い。
 - 導管口径が大きく流速が遅いほど、この傾向が顕著。
 - これは、水素と窒素の密度差に依る浮力の影響に由来。
- ・50A以上の口径の場合、鉛直方向の窒素に対する水素の拡散はほぼ距離に比例して生じており、また水素と窒素の界面に係る現象は水素に先行する窒素、並びに空気の状態にはほとんど影響を受けない。

■ 導管内の鉛直方向位置とレイノルズ数の関係

- ・等しい距離における導管内の上部、中央部、下部ごとの解析から、上部では水素レイノルズ数の増大に伴ってl1/dは減少するが、下部では逆に増加する傾向が導かれた。このl1/dの減少は窒素に対する水素の拡散の抑制を意味し、逆にl1/dの増加は水素の拡散の促進を意味する。
- ・一般にはレイノルズ数の増加に伴い気体の拡散は抑制を受けるとされるが、導管上部ではこれに従うものの、下部では管壁の摩擦を強く受けながら流れが進行していることで逆の現象を示していると考えられる。(気体の密度差に由来)

■ 安全な置換のための最低窒素量算定の考え方

- ・管延長方向の距離が長くなるほどl1/dは増加し、本水素レイノルズ数の範囲内では気体進行に伴う拡散は避けることができない。
- ・安全対策の観点から l1/dは、上部/中央/下部のうち最も大きな値を示すL(導管延長)の値を採用するのが妥当。



l1: 水素窒素混合層長さ(窒素が2%~98%)
l2: 窒素層混合層長さ(窒素が98%超)
l3: 窒素空気混合層長さ(窒素が98%~80%)
V: 導入した窒素の初期体積
 V_{min} : l3まで導管から排出された時点のl2の占める体積
 V_1 : l3まで導管から排出された時点のl1の占める体積

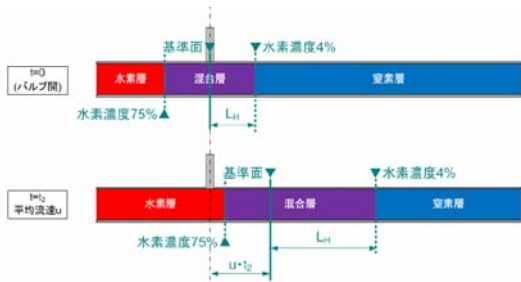
<参照>

- 平成24年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(水素拡散挙動調査)/産業技術総合研究所
- 平成25年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(水素置換挙動調査)/産業技術総合研究所

【施工】

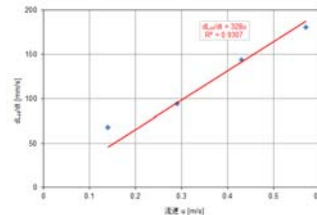
15: 置換作業(内管)

目的	一般集合建物内へ水素 配管供給を想定した際のガス開通作業時において、配管内で水素と空気の混合をさせずに完全に置換作業を行える条件等の検証を行うため、不活性ガスを介して空気から水素へ置換する際の管内挙動について調査を実施。
評価項目	<ul style="list-style-type: none"> 各配管要素で残留ガス等がなく、置換ガスで完全に置換されることを確認。 試験で得られた濃度分布がシミュレーションにより再現可能かどうかについて評価。
調査結果	<ul style="list-style-type: none"> いずれ要素形態についても、管内全域が置換ガスで満たされること確認した。 本調査にて用いたシミュレーション手法により、各種要素配管内におけるガス置換挙動が再現され、いずれの条件も試験結果と極めて良好に一致することを確認した。 水素混合層の発達挙動について、水平直管、鉛直直管、曲管のそれぞれについて解析し、混合層長の発達量を見積もる手法(流速に対する一次関数)が示された。



■水平直管内流れにおける混合層長の見積り

$$L_H = 328u \cdot t + 250 \quad [mm] \quad (t \geq 1.0)$$



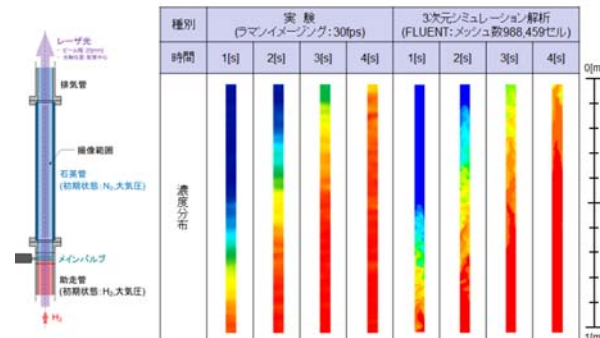
＜発達勾配の流速(Re数)依存性(水平直管)＞

【結論】

- ◆ 新設配管への水素置換作業時における、空気と水素の接触を抑制できる不活性ガス(窒素)量の存在(混合層の発達状況)が法則性として確認された。

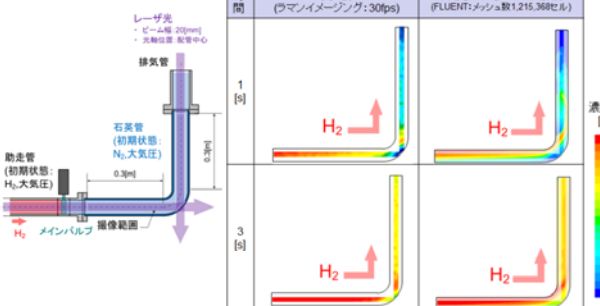
【施工】

■鉛直直管内流れ



界面の形成に伴い、水素が窒素側へ浮上すると共に、水素側へ窒素が一定量降沈する。初期段階では水素と窒素の混合ガスとなっており、高濃度水素層の進行までに一定時間を要する

■曲管内流れ

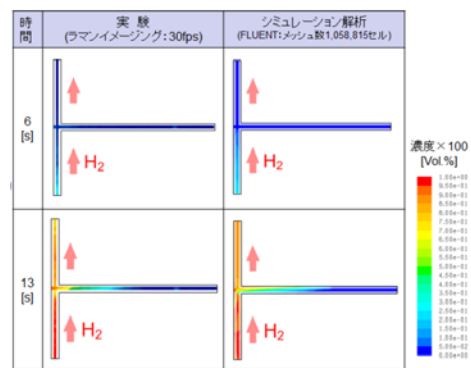
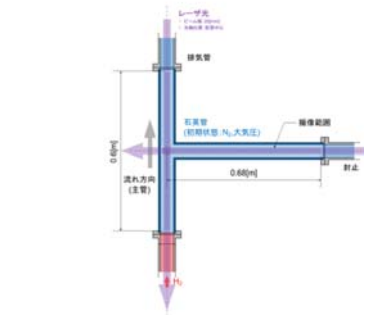


屈曲部において水平間上方に先行していた水素層が、鉛直配管の外周側へ大きく回り込み剥離する挙動が確認される

＜参照＞

- ＞平成26年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(配管における水素置換挙動調査)／(株)四国総合研究所
- ＞平成27年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(配管における水素置換挙動調査)／(株)四国総合研究所

■分岐管内流れ



閉止方向に向けても徐々に水素が進行し、これに伴い、分岐部から排出される窒素ガスが主管の分岐部下流側の流れへ少しずつ混合する。

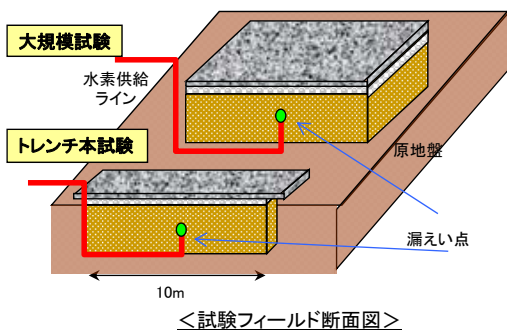
目的	水素供給事業における安全性確保のため、地中の導管から水素が漏えいした場合の検知において十分有効な手段を調査した。
評価項目	<p>実現場を模擬した実スケール試験(大規模試験、トレンチ試験)において、現行の都市ガス事業で規定される漏えい検知と同等の方法により、以下のような検知が可能であること。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地表面上でガス検知器により漏えい水素ガスが検知できること、または一定間隔(例えば5m)のボーリング(例えば深さ50cm)により水素ガスが検知器で検知できること。 ・水素ガスに付臭してある場合には拡散してくるガスの存在が臭気(ニオイ)により検知できること。
調査結果	<p>通常想定される漏えい形態や敷設条件(土被り、土質条件)を考慮した大規模試験およびトレンチ試験を実施。</p> <p>▶ 大規模試験</p> <p><水素></p> <ul style="list-style-type: none"> ・漏えい開始数時間後、漏えい点直上部において、水素検知器で検知可能 ・地上面から50cmの深さにおいて水平方向2.5m程度までの拡散を確認 <p><シクロヘキセン></p> <ul style="list-style-type: none"> ・臭気棒試験の結果、漏えい中心から2.5m離れた深さ50cm地点で臭気を確認 <p>▶ トレンチ試験</p> <p><水素></p> <ul style="list-style-type: none"> ・漏えい開始数時間後、漏えい点直上部において、水素検知器で検知可能。 ・臭気棒試験の結果、地表面から50cmの深さにおいて、トレンチ軸方向に最大3.5m程度まで水素を検知 ・ガスクロデータより、軸と垂直方向に1m程度まで、検知器に検知可能なレベルで拡散を確認 <p><シクロヘキセン></p> <ul style="list-style-type: none"> ・臭気棒試験の結果、地表面から50cmの深さにおいて、トレンチ軸方向で最大3.5m程度まで臭気認知を確認 ・ガスクロデータより、軸と垂直方向は1m程度まで、検知可能なレベルで付臭剤の拡散を確認

【結論】

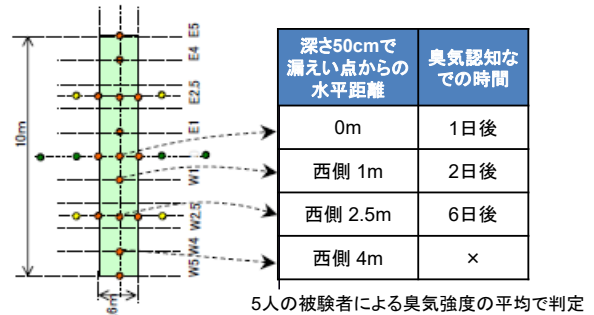
◆ 現行の都市ガス事業と同等の方法(検知器、臭気)で水素の漏えい検知が可能であることが示された。

■ 実試験概要

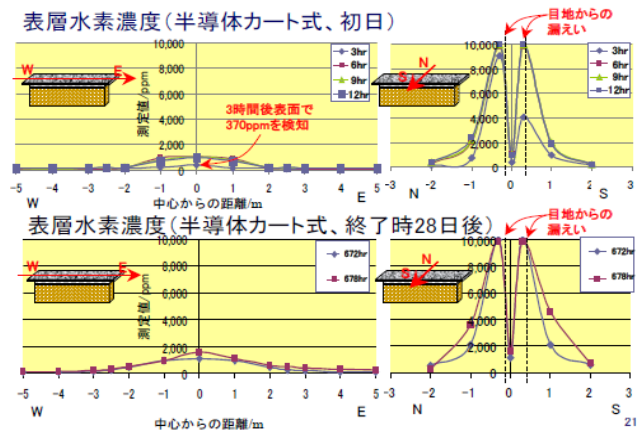
	大規模試験	トレンチ予備試験、本試験
試験フィールド [*]	10×10×2m	0.6×10×1.5m
試験フィールド [*] 境界	地表面: As 側面: 原地盤 底面: 遮水シート	地表面: As 側面、底面: 原地盤
試験ガス	水素+シクロヘキセン(臭気強度2000倍程度)	
漏えい量	60リットル/hr	
漏えい位置	深さ1.2m	
実験時間	漏えい点から水平2.5m、深さ0.5mの水素が定常傾向となるまで	
サンプリング間隔	漏えい開始から3、6、9、12、27時間後、以降は24時間間隔	



■ 臭気試験結果



■ ガス検知器測定結果



<参照>

- ▶ 平成18年度水素漏えい検知技術調査
- ▶ 平成19年度水素漏えい検知技術調査(水素漏えい検知評価試験等)/JFEテクノロジー(株)
- ▶ 平成20年度水素漏えい検知技術調査(水素漏えい検知評価試験等)/JFEテクノロジー(株)

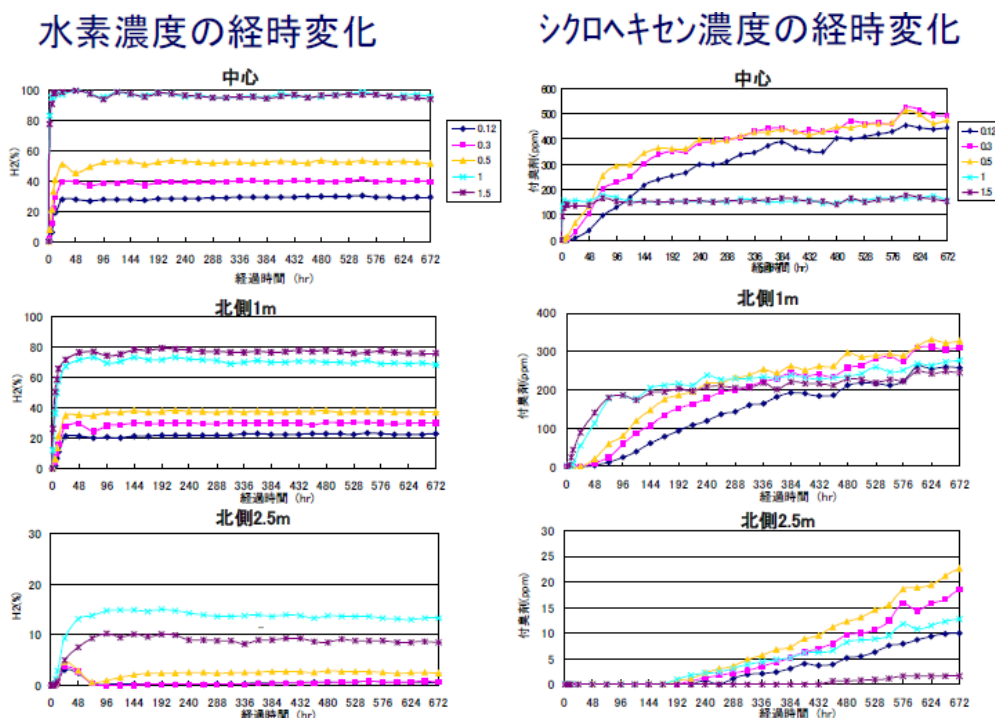
目的	水素ガスの万一の漏えいの際の土中における水素拡散の挙動について、実験およびシミュレーションにより解明した。
評価項目	一般市道レベルの道路性状を想定し、以下のような通常想定される漏えい形態や敷設条件(土被り、土質条件)を考慮。 ・水素ガス漏えい: 微少漏れを想定 60 リットル/時、代表的な埋設深さ 1.2m ・埋め戻し土壌・土質: 代表的な土の種類、代表的な土質 (基本的な条件(均一な山砂の上にアスファルトが施工されているケースなど)を実験で確認した上で、土質、地中構造物、地下水位など土中の拡散挙動に影響を及ぼすと想定される条件については、数値シミュレーション解析にて補完し確認)
調査結果	・実験により、土中での拡散状況および地表面での水素濃度状況が明らかにされた。 ・拡散挙動シミュレーションにより、最も厳しい敷設条件(土壌、土質)においても、土中漏えい時には道路表面上に検知可能な濃度の水素ガスが存在することが確認された。

性能要件	評価項目	結果	
土中に漏えいた水素の検知に影響すると考えられる要件	拡散範囲	中心から、 水平方向3m程度 まで検知可能レベルで拡散した。	
	拡散形状	大規模試験	水平方向の濃度分布は同心円状、等方的。 定常時においては、上方への拡散流により、上部にいくに従って濃度が低下する。
		トレンチ試験	トレンチに対して垂直方向については、埋め戻し土を超えて若干原地盤にも拡散があり、水平方向の濃度分布はトレンチ軸が長軸となる楕円状となる
	地表面水素濃度	漏えい試験開始数時間後には、漏洩点直上部において水素検知器で検知可能。	
実スケール試験以外に実施した実験および解析手法	小規模試験:「30cmΦ垂直アクリルパイプ」による	土壌の性状の違いによる影響の大きさや、各種の付臭剤の土中内挙動を把握するために、小規模試験を考案し、本調査で課題となったいくつかの事象を検証した。	
	水素拡散シミュレーション:「3次元地中拡散プログラム」*による *東京ガス、大阪ガス、フランスガス公社による共同開発[1992年]	都市ガスの知見を参考に、種々の埋設状況についてケーススタディを実施し、その結果を用いて安全性確認に際して実用的な範囲で 最も厳しい埋設条件(地表面にガスが浮上りにくい条件) によるシミュレーションを実施したところ、道路舗装の表層上にはガス検知器で十分検知できる濃度の水素ガスが存在することを解析により確認した。	

【結論】

- ◆ 試験測定により、土中での水素拡散挙動について概ね明らかにすることができ、シミュレーションによる拡散挙動予測も有効な手段となることを確認できた。

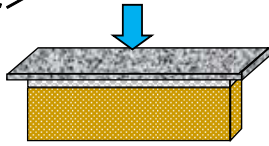
■ 土中におけるガス拡散実験結果(大規模試験における経時変化)



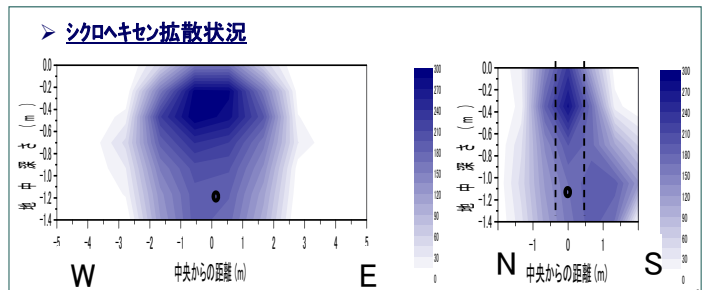
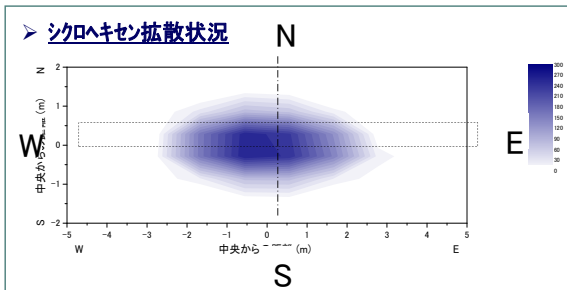
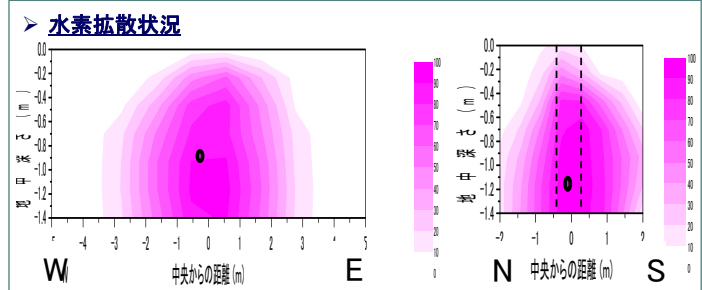
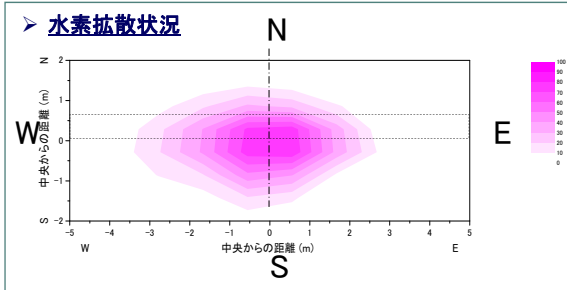
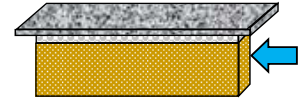
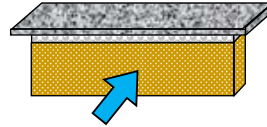
【維持管理】

■ 土中におけるガス拡散実験結果(大規模試験 672hr経過時点)

<平面状況>



<断面状況>



49

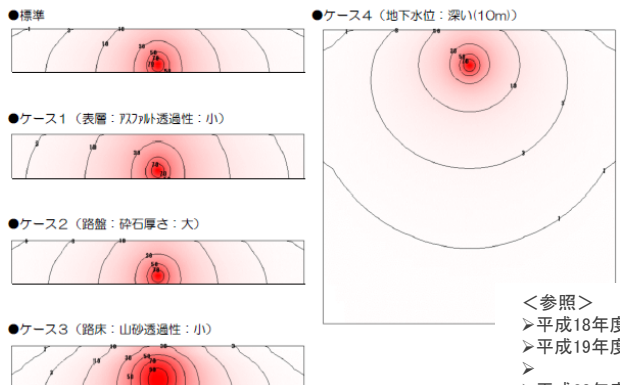
【維持管理】

■ 水素拡散シミュレーションにおける様々な条件のケーススタディ

各種パラメータ	標準	ケーススタディ			
		①	②	③	④
表層	アスファルト透過性:標準	○	○	○	○
	アスファルト透過性:小*1	●			
路盤	砕石厚さ:標準 15cm	○	○	○	○
	砕石厚さ:大 40cm		●		
路床	山砂透過性:標準	○	○	○	○
	山砂透過性:小*2			●	
地下水位	標準 2m	○	○	○	○
	深い 10m				●

*1:空気間隙率5.0%, *2:空気間隙率9.4%

濃度分布(定常状態:240h)



<参照>

- >平成18年度水素漏えい検知技術調査
- >平成19年度水素漏えい検知技術調査(水素漏えい検知評価試験等)/JFEテクノリサーチ(株)
- >(水素拡散数値解析調査等)/みずほ情報総研(株)
- >平成20年度水素漏えい検知技術調査(水素漏えい検知評価試験等)/JFEテクノリサーチ(株)
- >(水素拡散数値解析調査等)/みずほ情報総研(株)

■ 最も厳しい埋設条件下における濃度分布予測

実用的な範囲で最も厳しい埋設条件ケース
[砕石厚さ:大、地下水位:深い]

漏えい点からの水平距離 (m)	地中水素濃度 [計算値] (VOL%)	地表水素濃度 [推測値] (ppm)	地表水素濃度 [推測値] (ppm)
0.0	16.5	1,138	939
1.0	10.1	696	498
2.0	4.0	276	77
2.5	2.8	193	0
3.0	1.8	124	0
4.0	1.0	69	0
5.0	0.5	34	0

(* 風などの外乱要因によるバラツキを考慮)

カート式濃度計により路線上を漏えい調査することで
検知可能であることが確認できた

50

目的	腐食や破損に起因する漏えい孔から、非着火状態として噴出する水素の大気中における拡散範囲を調査した。
評価項目	閉空間での漏えいを想定した場合、最大の被害程度を推定するには漏えい量が重要であるが、開放空間での漏えい事故における被害想定には、漏えい後の拡散による濃度分布がより重要であるため、実測およびシミュレーションにより、水素ガス漏えい拡散時の濃度分布を明らかにする。
調査結果	<p>➢ 屋外測定</p> <p>漏えい孔上3m×3m×3mの空間内に50個の水素濃度センサを設置した[やぐら]を用い、濃度変化状況を測定。</p> <ul style="list-style-type: none"> 漏えい孔の鉛直線上では、孔に近いほど水素濃度は高く、離れるにしたがって濃度は減衰。ただし、漏えい孔径が小さくなるほどバラつきが顕著になる。 漏えい孔から上方への噴出による速度依存性が顕著で、噴出速度が大きいと多くが上方へ達し水平方向には検出されにくい。 ただし、噴出速度や噴出量が大きくとも上方には高水素濃度の領域が存在すること、および[やぐら]よりも上部では水平方向にも水素濃度の高い領域が広がると考えられるので注意が必要。 また、多くの時間は水素濃度が低くとも、突発的に高濃度の水素が接近することがあることにも十分留意すべき。 <p>➢ 水素濃度変化の再現シミュレーション</p> <p>流体解析ソフトを用い、ピンホールからの水素漏えいシミュレーションを実施。(拡散屋外実験とも確認)</p> <ul style="list-style-type: none"> 管内圧力の増加による漏えい範囲の拡大よりも、漏えい孔径の増加による範囲拡大の方が顕著。

【結論】

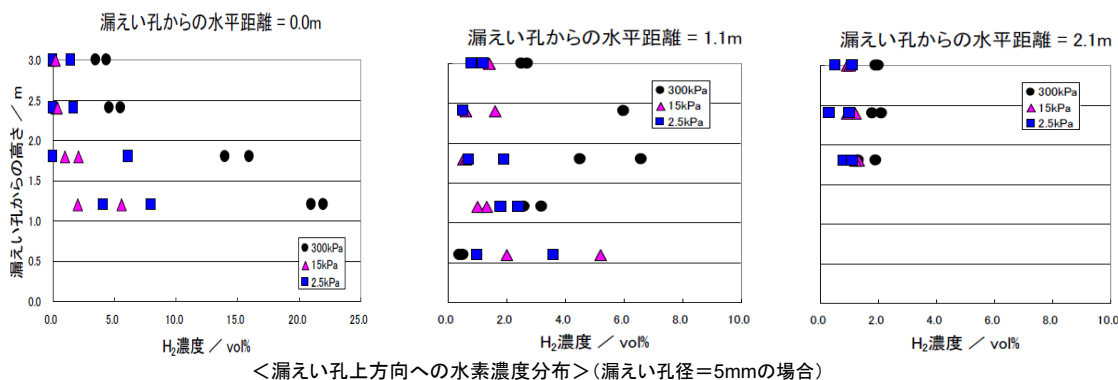
- ◆ 屋外測定により、着火の危険性を有する水素濃度範囲は、噴出速度が大きいほど、水平方向への拡がりよりも鉛直方向の拡がり大きいことが確認された。



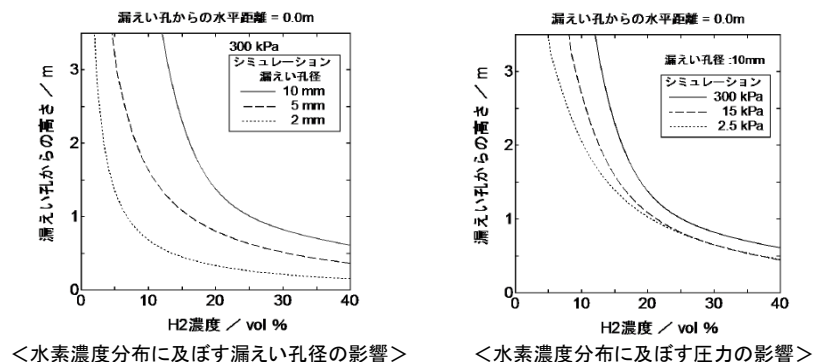
計測やぐら

【維持管理】

■ 屋外測定結果



■ シミュレーション結果



＜参照＞

- 平成23年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(水素漏えい・拡散挙動調査)/産業技術総合研究所
- 平成24年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(水素拡散挙動調査)/産業技術総合研究所

【維持管理】

19: 拡散挙動(密閉)

目的	一般集合建物内への水素配管供給を行った際の、パイプシャフト内における配管継手部からの水素漏えいを想定した水素の拡散挙動(濃度分布の経時変化)を調査する。
評価項目	パイプシャフト内における様々な条件が水素の拡散挙動に与える影響を調べるため、 ・漏えい量、・漏えい位置、・機器配置(内部機器の発熱)の有無、・日射等を想定した扉温度分布の有無、 ・換気口面積 を変えた実験およびシミュレーションを実施。
調査結果	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 模擬空間に発熱体がある場合や扉面が加熱される(日射等により)場合には、空間内の水素濃度は明確に低くなった。 ➢ 模擬空間内で換気を阻害すると考えられる大きな構造体の存在や、換気口面積の制限は、拡散挙動に影響を与えるが、水素濃度の最大値に大きな影響は見られなかった。 ➢ 水素放出口付近以外で、水素濃度が水素の爆発下限界濃度である4vol%を超えている部分はないと考えられる。 ➢ 実験中に大きな外部環境要因により、模擬空間内の水素濃度が急激に低下する様子が観測されており、実際のパイプシャフトにおいては、外部流れ場の影響も考慮しておく必要がある。

	漏えい量	漏えい位置	設置機器	発熱体	扉加熱	換気口面積
設定条件	50ml/min 130ml/min 550ml/min	上部 下部	あり なし	あり なし	あり なし	100cm ² 500cm ² 以上

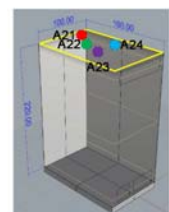
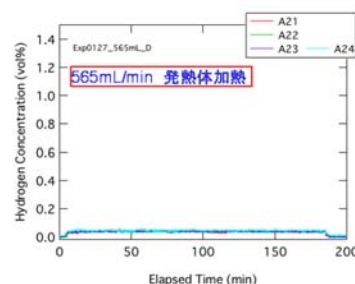
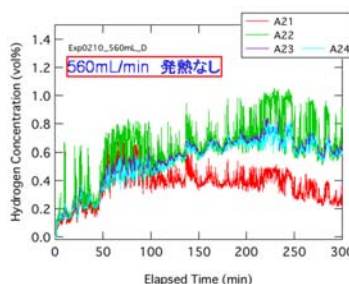
【結論】

- ◆ 今回の想定条件下では水素放出口付近以外で、水素濃度が水素の爆発下限界濃度である4vol%を超えている部分はなく、発熱体がある場合や扉面が加熱される(日射等により)場合には換気が促進される傾向にある。

53

【維持管理】

検討内容	作業内容	実験結果
流量の影響	漏えい量を模擬した放出量をおよそ50, 130, 550 ml/minと変化させた	50, 130, 550ml/minと水素流量の増加に従い、濃度増加の傾向を定量的に示した
漏えい位置	放出口を、模擬空間の床面付近(下部漏えい)から天井付近(上部漏えい)に変えて放出した	50, 130, 550 ml/minのいずれの流量でも、天井付近では上放出が高い濃度を示した
発熱体効果	燃料電池を模擬した発熱体を設置し40℃に加熱した場合の影響を調べた	換気が促進されたと考えられ水素濃度は大きく減少した
扉加熱効果	扉が日光で加熱された場合を想定し40℃に加熱して影響を調べた	換気が促進されたと考えられ水素濃度は大きく減少した
障害物効果	燃料電池を模擬した構造物を設置し対流を阻害する影響を調べた	わずかに天井付近での濃度上昇、全体的な濃度上昇速度の上昇が見られた
換気口サイズ	換気口有効面積を上下各100cm ² とし対流を阻害する影響を調べた	中央部は水素濃度上昇の傾向はあるものの最大濃度は若干低くなった



<参照>

- 平成26年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(水素拡散挙動調査)/産業技術総合研究所
- 平成27年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(水素拡散挙動調査)/産業技術総合研究所

54

目的	漏えい孔から大気中へ噴出する水素に着火した際の、人体および建築物への影響範囲を調査した。
評価項目	・着火する瞬間の爆風圧 ・着火し火炎が継続的に存在する状態での火炎サイズ、熱発生の特性
調査結果	<p>➢ 爆風圧の影響</p> <p>安定した漏えい状態で着火し、計8個の爆風圧センサによって測定。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ピーク爆風圧はほぼ等方的に減衰し、その減衰の程度はほぼ距離の2乗に対し反比例の関係となる。 ・等しい漏えい孔径であっても、管内の水素圧力が増加し漏えい量が増すごとに発生爆風圧は大きくなる。同様に等しい管内圧力であっても、漏えい孔径が拡大し漏えい量が増すごとに発生する爆風圧が大きくなる。 ・漏えい孔径10mm、圧力300kPa、漏えい孔から1.5m地点における人体への影響としては、比較的軽微なレベル（鼓膜への影響が発生するとされる爆風圧の約1/16）に留まっている。一方、建築物に対しては1.5mという近接距離ではあるが一般的に窓ガラスが割れる程度に等しい。 <p>➢ 火炎・熱の影響</p> <p>着火状態で、高速カメラを用いて可視化された火炎（水素火炎は視認できない）を撮影して測定、また輻射熱センサ等で温度を測定。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・火炎が安定に存在する条件では、輻射熱は距離のほぼ2乗に反比例して減衰している。 ・水素の火炎は輻射熱が非常に小さく、ラボスケールではほぼ無視できるレベルであることが知られているが、漏えい時のような大量に水素を消費して燃焼するようなケースでは、その輻射熱は接近した状態においては無視できるレベルではない。

【結論】

- ◆ 水素供給圧力が低圧(0.1MPa未満)の場合、水素噴出孔(5mm以下に限る)から1m以上の離隔があれば、概ね、火傷、爆風圧等の影響が生じることは無いことが確認された。
- ◆ ただし、水素では火炎が視認できず、接近に従い急激に熱・温度が増加するため、火炎の存在を認知していない場合は逆に危険であり、強く注意することが必要。

■ 漏えい水素の火炎



＜炭酸ナトリウム噴霧により可視化された火炎映像＞



＜赤外線フィルムによる可視化映像＞
(炭酸ナトリウム噴霧なし)

■ 人体へ影響(火傷等)を及ぼさない安全距離

漏えい時のように、大量に水素を消費して燃焼するような条件では、それに応じた量の高温の水蒸気が発生し、そこから発生する輻射熱があること、及び火炎が周囲の気体を巻き込み熱を伝えることによって輻射熱が発生すること等に由来し、相当量の輻射熱が発生している。

そこで、水素供給圧力が低圧(0.1MPa未満)であり、かつ特定の噴出条件下(噴出口径、圧力等)において、火傷や爆風圧等の影響が生じる可能性がある範囲を確認した。

孔径 圧力	0.8mm	2mm	5mm	10mm
2.5kPa	数cm	数cm	20cm 程度	1~2m
15kPa	数cm	数cm	40cm 程度	2m 程度
100kPa	数cm	数cm~10cm	1m 程度	2.5m 程度
300kPa	不明	10cm 程度	2m 程度	3m 程度

＜接近しても火傷を負わないと考えられる大凡の距離＞
(火炎がほぼ鉛直に形成されている場合)

火炎は自然風等の影響を受けるので単純な漏えい孔との距離関係だけでなく十分に安全率を考慮する必要がある。

＜参照＞

- 平成23年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(水素漏えい・拡散挙動調査)／産業技術総合研究所
- 平成24年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(水素拡散挙動調査)／産業技術総合研究所

目的	水素の導管供給時のガス漏えいに対して、漏えい個所の取替え等の修繕を実施するまで、一時的にガスの漏えいを抑制できる工法・工具を調査し、その安全性を評価した。
評価項目	工法の気密性および施工性
調査結果	<p>➢ 緊急時ガス漏えい抑制工法の調査</p> <p>流体を問わず、漏えい抑制用として一般的に利用されている工具/工法から、水素漏えい抑制の可能性あるものを11種リストアップした。</p> <p>➢ 抑制工法の安全性評価</p> <p>リストアップされた工法から適用性が高いと思われる4種を代表として選定し、基本性能(施工性、水素シール性)に関する評価試験を実施。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・施工性評価結果: いずれの工法でも10kPa吹き出しでの施工は可能、ただし一部工法(自己融着テープ方式)では、施工ばらつきが生じる可能性がある。 ・シール性評価結果: 自己融着テープ方式以外では、室温以外の温度環境においても漏れが見られなかった。

工法	評価項目		総合評価
	施工性	シール性	
ゴムパッキン方式-A	○	○	○
ゴムパッキン方式-B	○	○	○
多層テープ方式	○	○	○
自己融着テープ方式	△	×	×

○ 良い
△ 課題あり
× 悪い

< 代表的方式に対する評価結果 >

【結論】

- ◆ 代表的な工具や工法(4種)を対象とした評価の結果、「ゴムパッキン方式」、「多層テープ方式」については、緊急時の水素ガス漏えい抑制工法として十分な性能を有していた。

■ リストアップされた緊急時ガス漏えい抑制工法(11種)

(朱記した工法・製品は、次ページの安全性評価に使用した)

施行位置	分類	No.	工法・製品名	シール方式	採用事業者		適用管種			販売元メーカー
					都市ガス	その他	都市ガス用		水道用	
							鋼管	铸铁管		
管外面側	継手取付	1	アダムスクランプ	ゴムパッキン方式	○		50~300A	50~300A		ニシヤマ
		2	割スリーブ	ゴムパッキン方式	○			80~150A		日立金属
		3	クランプ	ゴムパッキン方式	○		50~200A			日立金属
		4	フクロジョイント	ゴムパッキン方式		水道			塩ビ管 40~200A	大成機工
		5	漏水補修バンド	ゴムパッキン方式		水道			铸铁管 75~200A	コスモ工機
		6	カバージョイント	ゴムパッキン方式		水道			铸铁管 75~400A	コスモ工機
		7	パイププロテクター	ゴムパッキン方式		水道			塩ビ管 50~150A	コスモ工機
	テープ巻き	8	リヴァイブ工法	多層テープ方式	○		20~150A			東京ガス・エンジ
		9	金属テープシール工法	多層テープ方式	○		25~80A			大阪ガスエンジ
		10	LLFA® TAPE	自己融着テープ方式		水道				マテックス
		11	アロンテープ	自己融着テープ方式		水道				ユニテック
管内面側			(該当なし)							

< 本調査の対象外としたケース >

- ・圧力が中圧
- ・当該箇所が露出していない
- ・当該箇所が大規模
- ・現場状況により本修理への移行が長時間になると想定される



【維持管理】

■ 安全性評価の対象 (適用性が高いと考えられる4種を選定)



適用外径 59.7~66.8 mm
クランプ長さ 150 mm
施工方法 ボルト締め

<ゴムパッキン方式-A>



適用外径 PE2層被覆鋼管 50A
 配管用炭素鋼管 50A
クランプ長さ -
施工方法 ボルト締め

<ゴムパッキン方式-B>



適用外径 配管用炭素鋼管
補修長さ ラップ巻きにより限度なし
施工方法 テープ巻き付け

<多層テープ方式>



適用外径 配管用炭素鋼管
補修長さ ラップ巻きにより限度なし
施工方法 テープ巻き付け

<自己融着テープ方式>

■ 安全性評価結果(概要) (適用管種:PE被覆鋼管 50A, 疑似穴径:10mm, 内圧:10kPa)

参考: 実腐食孔の径 1~2mm(ピンホール)
 工事現場の工具 5~6mm

工法	作業時間の短さ	施行ばらつき の少なさ
ゴムパッキン方式-A	○	○
ゴムパッキン方式-B	○	○
多層テープ方式	○	○
自己融着テープ方式	○	△*

*: 自己融着テープ方式はテープを引張りながら巻き付ける必要があり、この引張り力がばらつきを生む要因となる。また、テープを巻く際に異物を巻き込んでしまうとそこから漏れにつながるため、これもばらつき
 の要因となる。

<施工性の評価結果>

工法	水素シール性能		
	室温	-5℃	40℃
ゴムパッキン方式-A	○	○	○
ゴムパッキン方式-B	○	○	○
多層テープ方式	○	○	○
自己融着テープ方式	×*	-	-

*: 自己融着テープ方式では微量ながら水素検知器での反応があったことから、漏れ有り
 と判定した。そこで試験圧力を下げて2.5kPaの試験圧での測定も行ったが、差圧の変化がみられ、水素検知器の反応もあつたので、漏れ有り
 と判定。

<シール性の評価結果>

○ 漏れ無し
 (検知器反応なし)
 × 漏れ有り
 (検知器反応1ppm以下)

【維持管理】

■ 緊急時ガス漏えい抑制工法の安全性評価結果(詳細)

➢ 施工性の調査方法

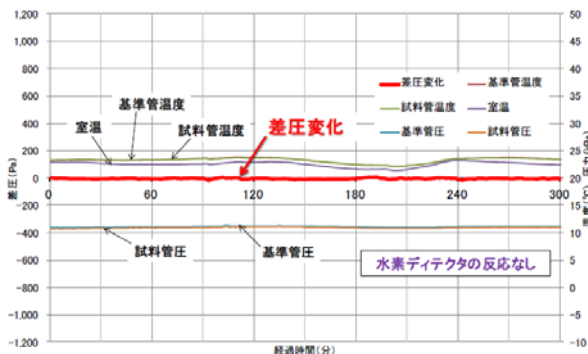
- 1) 10mmの穴をあけた試料管に10kPaの圧力が加わるようにレギュレータにて調整。
- 2) 試料管の穴から10kPaで噴き出していることを圧力計で確認。(※圧縮空気を使用)
- 3) 調査対象のそれぞれの工法で試料管の穴を塞ぐ作業を実施。
- 4) 目視および噴き出し時の音等から、噴き出しを止めることができたかを確認。
- 5) 噴き出しを止めるところまでの作業時間の相対的な比較を実施。

・いずれの工法でも10kPa噴き出しでの施工は可能であった。
 ・施工時間に関しては、いずれの工法でも、試料管の穴から流体が噴き出していても通常の施工状態と変わらずに施工でき、特別な問題はなかった

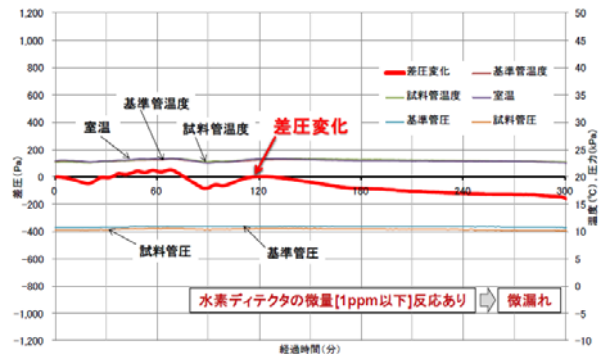
➢ 気密性(シール性)の測定方法

- 1) ガス漏えい抑制工法(工具)を施した試料を試験配管に接続
- 2) 試験配管内に窒素パージ、差圧測定により漏れが無いことを確認。
- 3) 試料内に水素パージ実施。水素検知機にて水素置換確認。差圧測定計測、あわせて検知器により漏れ有無を確認。

- ・測定項目: 差圧、圧力、温度、漏れ有無
- ・内圧: 10 kPa (使用想定圧力を上回る圧力)
- ・疑似穴径: 10 mm (想定径より大、かつ応急措置可能な最大径)
- ・環境温度: 室温(23℃程度)、-5℃および40℃(温度環境試験室にてヘリウムを代替使用)
- ・測定時間: 5時間(漏れ箇所の特定期間から切断工事迄の最大時間)
- ・測定装置: 差圧計、圧力計、温度計、水素(ヘリウム)検知器



<ゴムパッキン方式-Aの気密確認測定結果グラフ>



<自己融着テープ方式の気密確認測定結果グラフ>

<参照>

➢ 平成25年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査(施工方法の安全性評価調査)/日立金属(株) 60

【その他】

22: 海外事例(北米)

■ 訪問調査先一覧

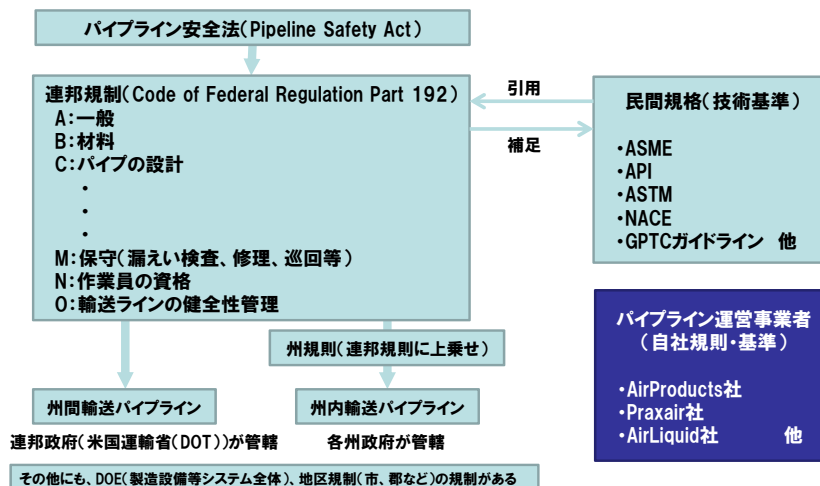
訪問先	調査内容
【H17年度:水素供給システム安全性技術調査】	
・Air Products 社	水素製造技術、パイプライン技術、運転管理・メンテナンス、技術基準等の調査
・Los Alamos National Lab.	水素貯蔵施設および燃料電池の開発に関する情報収集
・SRI International	水素爆発実験、水素脆化メカニズム、鋼材へのコーティング材料等の情報収集
【H18年度:水素漏えい検知技術調査】	
・H2SCan 社	同社製水素検知センサ(Pd/Ni触媒方式)の測定原理・性能等を確認
・Air Products 社 他	水素漏えいに関する米国の規制、漏えい管理の考え方および取組み内容
【H19年度:水素漏えい検知技術調査】	
・Praxair 社	パイプライン水素供給に関する国の漏えい管理方針や安全性確保の考え方を確認
【H24年度:水素導管の保安技術調査】	
・TOYOTA 社	水素パイプライン供給による水素STにおけるパイプライン活用課題を調査
・OCSD	水素パイプライン供給により稼働している水素STの運用状況を確認
・Elster 社	現行都市ガスメータを水素用ガスメータとして利用する際の課題を確認
・Emerson (Fisher) 社	水素用として利用されている整流器の運用状況や今後の課題を確認
・Air Liquid 社	水素パイプラインの維持管理方法や設備構築時に用いている基準を確認
【H26年度:水素ネットワーク構築導管保安技術調査】	
米国運輸省(DOT)	水素パイプライン供給の保安に関する規制の実施実態を調査
テキサス州鉄道委員会	水素パイプライン供給の保安に関する規制の実施実態を調査
米国機械学会(ASME)	水素パイプライン供給の保安に関する技術基準整備の状況を調査
Air Products 社	水素パイプライン供給の事業運営実態を調査

61

【その他】

22: 海外事例(北米)

■ 米国におけるパイプライン事業の枠組み

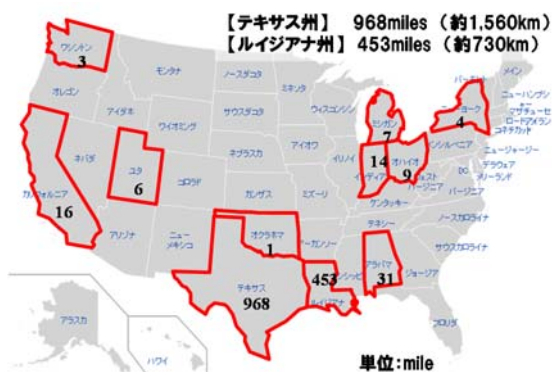


- Subpart A - 一般
- Subpart B - 材料
- Subpart C - 管設計
- Subpart D - パイプライン構成要素の設計
- Subpart E - 鋼材の溶接
- Subpart F - 溶接以外による材料の接合
- Subpart G - 一般建設要求条件
- Subpart H - 顧客メーター、サービスマニフェスト、供給管路
- Subpart I - 腐食管理に関する要求事項
- Subpart J - 試験要求事項
- Subpart K - 昇圧
- Subpart L - 運用
- Subpart M - 維持管理
- Subpart N - 認証・認可
- Subpart O - 輸送管路の健全管理
- Subpart P - 配給管路の健全管理

No.	基準名	概要
B31.12	Hydrogen Piping and Pipelines	水素パイプラインの設計、運転、維持管理全般に関する基準
B31.8	Gas Transmission and Distribution Piping Systems	パイプラインの設計、運転、維持管理全般に関する基準。(連邦規則に引用)
B31.8S	Supplement to B31.8 on Managing System Integrity of Gas Pipelines	陸上輸送パイプラインの健全性評価に関するガイドライン(連邦規則に引用)

62

■各州における水素パイプライン延長



総延長	約2,600km (10年前までは、半分程度以下の延長)
主な事業者	Air Products社、Praxair社、Air Liquid社
主な州	テキサス州、ルイジアナ州、カリフォルニア州に集中 (上記3州で、米国全土の2/3を占める)
用途	エネルギーとしての利用ではなく、化学プラント等の原料ガスとして利用
その他	1970年代より水素パイプライン事業が開始 州内および州間パイプラインにて分類 (州間パイプライン: 連邦政府管轄、 州内パイプライン: 州政府管轄)

■その他

◆ NRELのガイドブック

DOEの再生可能エネルギー研究所(NREL)は2015年1月にHydrogen Technologies Safety Guideというガイドブックを発行。包括的な文書で現存する規格や規制にも触れている。今まで水素を扱ったことがない人達が今後、水素に関連した仕事に就くことを想定した入門書のようなもので、水素のテクノロジーの歴史などにも触れながら平易な説明が展開されている。

◆ NISTの管材に関する報告

現状の水素パイプラインの規格が古いデータに基づいている懸念があり、アメリカ国立標準技術研究所(NIST)で管材に関する研究が行われている。この研究にはPraxAir、AirLiquidなどの大手ガス会社やASMEも参画している。

◆ Sandia研究所による水素脆化に関する報告

DOEの水素・燃料電池プロジェクトの一環で2007年に始まった。2015年に中間報告がなされた。本プロジェクトでは水素影響下の金属疲労による亀裂進展や溶接部への影響などを調べている。オークリッジ研究所、NIST、ASMEなどとの共同研究である。

■ パイプラインによる水素供給事例の概要比較

推進者 (実施エリア)	Air Liquid 社 (メキシコ湾沿岸部)	Air Products & Chemicals 社 (テキサス、ルイジアナ、カリフォルニア)	PraxAir 社 (ヒューストン)
用途(供給先)	産業用(石油精製・石油化学)	テキサス: 石油精製・化学が主, 40社 カリフォルニア: 石油精製, 5社	主に製油所など約100件
設計	適用基準	ASME B31.8 – 2010, B31.12 CGA G-5.6 自主基準: Air Liquid Design Standards	設計係数: 0.3 (自主的にASMEのクラス3以上の設計係数を適用)
	材質, 管径	API X60, 10インチ (14、20インチもある)	API 5L X42 または X52, 4~12インチ 外面 FBEコーティング+電気防食
	延長	約530km	全米総延長 約560km
	供給圧力	顧客ニーズに依る(5MPa, 3MPaが主)	2.4~13MPa(設計圧力)
	埋設深さ	通常 1.2m(専用道路下)	1.2mが主、最小で0.9m
施行	接続	溶接が主 ガスケットによるフランジ接続もあり	溶接(API 1104準拠)のみ、施工時に全線のX線検査実施
	分岐取り出し	潜在需要向けの分岐バルブ事前設置 活管穿孔は未実施(将来の実施へ向けて基準準備中)	—
	窒素パージ	パージ範囲: 顧客消費機器の手前まで 完了目安: 酸素含有量 0.4%以下 (昇圧・減圧を2~3回繰り返す) 水素はベントにて大気拡散	—
維持管理	漏えい時対応	緊急減圧用の大気放散STを設置 作供給停止時のバックアップ(ボンベ又は他社パイプライン利用)を需要側にて確保	—
	漏えい管理	付臭剤は未使用 IMPという社内プログラムのもと、24時間稼働の管理センターにて圧力と流量を監視。 定期的な空中からのモニタも実施。 保守は連邦法や州法の要求よりも厳格な基準で運営	付臭剤は未使用 テキサス州WoodlandにPipeline Business Centerという管理センターがあり、純度、圧力、流量などを常時リアルタイムで監視。この監視センターはDOTのPHMSAの規則に準拠
	基準	—	DOT CFR 49 Part192(定期漏えい検査)に加え、自主基準を作成

【その他】

23:海外事例(欧州)

■ 訪問調査先一覧(1)

訪問先	調査内容
【H17年度:水素供給システム安全性技術調査】	
・Ecole Polytechnique	材料疲労研究に関する調査
・Air Liquide 社 (Antwerp Site)	水素製造技術、パイプライン技術全般に関する調査
・Infraserv Höchst 社	副生水素を昇圧しての配管供給技術に関わる調査
・Gastec Technology 社	欧州における水素輸送に関する検討状況、パイプ材料評価試験に関する調査
・Icelandic New Energy 社	水素燃料電池バス実証試験、今後のインフラ構築計画などの調査
【H18年度:水素供給システム安全性技術調査】	
・MPA NRW 社	樹脂管評価技術(主に樹脂管のガス透過性評価)に関する調査
・Degussa 社	高機能樹脂管材料、樹脂管評価技術、水素供給への取組みに関する調査
・Arkema 社	高機能樹脂管材料、樹脂管評価技術、水素供給への取組みに関する調査
・Georg Fisher 社	既往樹脂管材料・高機能樹脂管材料、樹脂管評価技術、水素供給への取組みに関する調査
・Hewing 社	高機能樹脂管材料、樹脂管評価技術、水素供給への取組みに関する調査
・Kiwa-Gastec 社	屋内ガス用樹脂管の開発・実用化状況、樹脂管評価技術(主に樹脂管のガス透過性評価)、水素供給への取組みに関する調査
【H19年度:水素供給システム安全性技術調査】	
・Danish Gas Tech. Centre社	水素配管試験について、気密性能試験・材料への影響等、実機試験設備などに関する調査
・Gasunie Eng. & Tech.社	Naturalhy Project の取組み内容、天然ガスへの水素添加に関する課題、パイプライン材料に関する課題などの調査
・Gas de France 社	水素混入による天然ガスパイプラインの耐久性への影響評価に関する情報収集
・Infraserv Höchst 社	Zero Regio Project の水素供給実証試験設備における材料面からの水素影響、トラブル事例調査

65

【その他】

23:海外事例(欧州)

■ 訪問調査先一覧(2)

訪問先	調査内容	訪問先	調査内容
【H18年度:水素漏えい検知技術調査】		【H23年度:水素導管の保安技術調査】	
・MST 社	同社製水素検知センサの検知原理・性能・価格等の調査	・LOK/SEAS-NVE	ロラン島実証事業の進捗状況、水素を一般家庭へ供給する際の必要設備、課題等
・Energie Technologie 社	水素漏えいに関する技術動向、案件に関する考え方などの調査	・Fabbrica del Sole 社	一般家庭へ供給する際の水素パイプラインの維持管理状況や保安管理に必要な課題
・Linde 社	水素の付臭剤に関する調査	・Air Liquide 社	水素パイプライン敷設に必要な基準や現状の維持管理状況
・Symrise 社	付臭剤(燃料電池向け無硫黄)に関する調査	・Enel 社	水素利用手段として想定される水素燃焼機器の現状と課題
・DEW21 社	都市ガスにおける無硫黄付臭剤への変更に関する考え方、実施上のポイント	【H25年度:水素導管の保安技術調査】	
・ケンブリッジ大(管我研究室)	地中内拡散シミュレーションの解析モデルに関する技術調査	・TWI	金属材料の水素脆化に関する研究状況や今後の取り組み
【H19年度:水素漏えい検知技術調査】		・Linde 社	水素を利用する設備に必要な仕様現在の運用状況
・Air Liquide 社(グローバル研究所)	EUにおける水素供給パイプラインや水素STに関する現状	・Perrin 社	水素供給実施に関わる日本と欧州における規格の差とその影響
・ドレーゲル・セイフティ社	同社製水素検知センサの検知原理・性能・価格等の調査		
・Icelandic New Energy 社	水素社会デモプログラムにおける安全性確保の考え方、水素に関する社会受容性等の調査		
【H20年度:水素漏えい検知技術調査】			
・Fabbrica del Sole社(Hydro Lab Project)	公道埋設パイプラインに関し、漏えいに関する考え方や管理方法を調査。		
・StatoiHydro社(Hynor Project)	地下にタンクを埋設した次世代型70MPa水素STに関する調査		
・Infraserv Höchst 社(Zero Regio Pj.)	次世代型水素STと高圧水素供給設備の実証試験に関する調査		

66

23: 海外事例(欧州)

■ パイプラインによる水素供給に関わる事例調査結果の概要

調査項目	調査結果(全体的傾向)
設計思想および仕様	<ul style="list-style-type: none"> 日本では主に高圧パイプライン用として用いられているAPI規格のX材が多く用いられている。 日本の中・低圧供給に用いられるようなロースベック配管を用いている事例は見受けられなかった。
施工方法	<ul style="list-style-type: none"> 新設配管の敷設については日本と同様手法で実施。 既設配管からの分岐については、予め将来の需要家を想定し分岐バルブを先行設置して対応。(コストよりも施行を重視) 管内ガスの置換では、水素における一般的手法(窒素ガス等の不活性ガスによるパーージ)で実施。
保守管理状況 (設備維持管理、緊急対応を含む)	<ul style="list-style-type: none"> 水素漏えい検知については、各事例で異なる手法により実施されており、確実かつ安価な手法は見受けられなかった。 都市ガス同等の点検頻度、点検内容で実施されているが、経年劣化による水素脆化等に起因する漏えい、大きな不具合は発生していない様子。
設計・施工・維持管理のための運用法規および自主基準	<ul style="list-style-type: none"> 大規模供給事例(Air Liquide社)では、EIGA(欧州産業ガス協会)のとりまとめ資料、および体系的に整備された社内基準に基づいて取り組んでいる。 他の小規模プロジェクト(実証事業等)では、主に自国の都市ガス基準に基づいて取り組まれている。
水素利用機器の仕様、使用状況	<ul style="list-style-type: none"> 産業用大口需要家では、化学プラント原料および還元剤として利用。 小規模産業需要家では、ポンプ供給されていた金の宝飾品製造向け水素還元加工用ガスの一部をパイプラインで供給代替。 研究向けでは、水素タービン発電用燃料。 家庭向けでは、再生可能エネルギー発電(風力等)の余剰電力で製造された水素を特定地区へ供給し(Power to Gas)、燃料電池用として利用。(実証プロジェクト)
一般家庭への水素供給取組み状況	<ul style="list-style-type: none"> 家庭用供給の実証を行っている事例では、将来的に一般家庭への供給事業実施も視野に入れている。一般家庭、一般の集落で、85,000時間の再生可能エネルギー由来の水素によるエネルギー供給の実証実験で成功しているのはロラン市ヴェステンスコウの事例のみ。 小規模産業向け事例でも、同様に一般家庭向け供給事業を行う構想もある。 ただし両事業ともに、消費機器の主力となる家庭用燃料電池の価格や耐久性に課題があり、現時点ではまだ現実的な計画とはなっていないとの認識。

67

23: 海外事例(欧州)

■ パイプラインによる水素供給事例の比較

推進者 (実施エリア) パートナー企業等	イタリア(アレツツオ市プロジェクト) ファブリカ・デル・ツル社、トスカーナ州政府、アレツツオ市 SAPIO, COINGAS, EXERGY	ノルウェー (Hynorプロジェクト) StatoilHydro社	デンマーク (Lollandプロジェクト)	Air Liquide 社	
用途 (供給先)	金の宝飾品製造工業団地向けに水素還元炎加工用として供給(2008年5月～)	ノルウェー東部から西部への580kmの幹線道路に7カ所の水素ST設置を計画(実証プロジェクト)	風力発電余剰電力で製造した水素の一般家庭向け小規模水素供給実証(2011年～)	化学プラント等、広範囲の産業用大規模供給事業(1970～)	
設計	材質、管径	1インチ管、SUS304(耐圧0.5MPa、最高使用圧0.35MPa)、電気防食	製造工場～陸揚: フィヨルドの地下20mのトンネル内に2重管(外管に窒素封入) 陸揚～水素ST: SUS316L	API X42、1インチ管	
	延長	約1km			
	供給圧力	運用圧力0.3MPa、Max80m ³ /h	水素STでは0.5MPaで受入れ	0.4MPa	主に5MPa(最高圧力10MPa)
維持管理	埋設深さ	公道地下1.2m			道路脇埋設(深さ80cm)、トンネル配管、ラック配管、他工業ガスとの並行配管(45cm隔離)
	漏えい管理	シンプルな圧力検知(50m毎に圧力センサ設置) 付臭剤は未使用(理由: 影響が不明確、金加工には不適)	外管の窒素圧力モニタリングにより水素漏えいを検知 付臭剤は未使用(FCVへの影響を懸念)		

■ 欧州における水素導管に関する法令・規格

- ▶ 欧州には米国のDOT(日本の国交省に該当)のような域内全体を一元的に管理する主体がない
- ▶ 法令に関しては各国政府の担当官庁に委ねられる。殆ど国で一般のパイプラインに関する安全規格や法令はあるが、水素導管に限定した物は存在しない。
- ▶ 運用においては、一般パイプラインの法令の範囲内かつ、水素の特性を考慮した設計を敷設会社が行っているのが現状と考えられる。
- ▶ 規格については、EIGAがHydrogen RCSの一環として2004年に発行した「Hydrogen Transportation Pipelines - IGC Doc 121-04」という安全基準が水素導管に特化したものである。

68

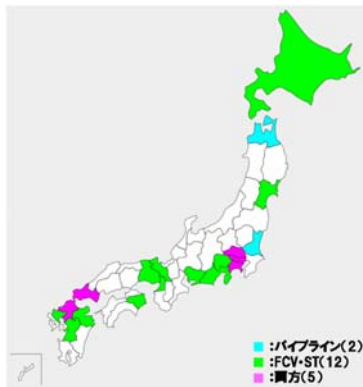
【その他】

24:国内事例(国内)

■ 国内における水素関連取り組み状況



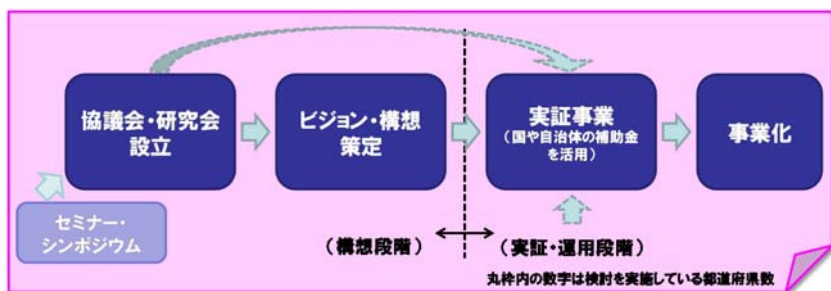
<水素の取り組みを実施・検討している都道府県>



<各都道府県での取り組み内容>

- ・都道府県別に水素関連の取り組み状況を整理すると、現状、半数以上の都道府県において水素関連の取り組みを実施・検討している
- ・取り組み内容について整理すると、現状では「燃料電池自動車 (FCV)・水素ステーション (ST)」に関連する取り組みが多い状況となっている。

■ 検討ステップ



- ・各自治体での水素に関する取り組み検討の多くは、「①協議会・シンポジウム」⇒「②ビジョン策定」⇒「③実証事業」⇒「④事業化」といったステップを踏んでいる。
- ・①協議会等において、自治体独自の②構想を策定し、モデルケースについて③実証事業を行っている。

【その他】

24:国内事例(国内)

■ 今後水素パイプライン供給を検討している事例

	ヒアリング先	概要	補助事業
青森県弘前市	都市環境部 スマートシティ推進室	下水処理施設にて製造した水素を近隣の工業団地へパイプライン供給し、定置用FCで利用。現在、実証事業計画を検討中。	—
埼玉県	—	下水処理施設にて製造した水素を近隣の物流倉庫へパイプライン供給し、定置用FCやFCフォークで利用。協議会において、実証事業化に向けた検討を実施。	—
東京都	—	東京オリ・パラにおける選手村にて水素パイプライン供給を検討。	—
神奈川県川崎市	総合企画局 スマートシティ戦略室	使用済プラスチックから得られる水素を精製し、パイプラインで輸送し、業務施設等の定置用FC等で利用する。水素パイプラインの仕様・ルートを検討中。	(環境省)地域連携・低炭素水素技術実証事業
山口県周南市	経済産業部 商工振興課	水素STに隣接する地方卸売市場に設置された定置用FCへ水素をパイプラインにて供給。パイプラインの仕様・ルートを検討中。	(環境省)地域連携・低炭素水素技術実証事業
福岡県北九州市	環境局 環境未来都市推進部 水素社会創造課	北九州水素タウンPJの後継事業を検討中。関連企業と意見交換会を実施し、今後の事業計画を策定。	—