令和元年度経済産業省委託事業

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

(地中及び大気中の水素拡散挙動調査)

調査報告書

令和2年3月

株式会社四国総合研究所

目 次

1. 調査の)概要
1.1 事業	目的
1.2 事業	的容
1.3 実施	;方法
1.4 実施	体制及びスケジュール
2. 調査方	疗法
2.1 試験	方法の概要と試験条件4
2.2 舗装	条件の決定
2.2.1	舗装の基本構造及び本調査における地中模擬層の構成6
2.2.2	地中模擬層の基本物性
3. 水素ガ	ブス計測手法
3.1 地中	水素ガス濃度の計測方法
3.1.1	センサの選定
3.1.2	気体熱伝導式ガスセンサによる地中水素濃度計測の性能評価13
3.2 大気	中水素ガス濃度の計測方法
3.2.1	計測原理
3.2.2	計測装置の構成
3.2.3	ガス濃度の定量化
4. 地質バ	ペラメータの計測
4.1 空隙	[*] 率の計測
4.1.1	空隙率の定義と算出方法
4.1.2	空隙率の計測点と計測結果
4.2 透気	係数の計測
4.2.1	透気係数の算出方法
4.2.2	真砂土・砕石の透気係数計測
4.2.3	アスファルトの透気係数計測
4.2.4	透気係数計測結果
4.3 拡散	:係数の計測
4.3.1	拡散係数計測装置の設計製作
4.3.2	拡散係数計測手法 ····································
4.4 地中	模擬層の地質パラメーター覧

5. 小規	模容器による基礎試験	
5.1 真視	沙土層における構造体の影響確認試験	
5.1.1	試験装置の設計製作	
5.1.2	実施方法	42
5.1.3	試験結果	45
5.1.4	考察	
5.2 \mathcal{T}	スファルト層における構造体の影響確認試験	
5.2.1	試験装置の設計製作	
5.2.2	実施方法	60
5.2.3	試験結果	60
5.2.4	考察	61
5.3 ま	とめ	61
6. 地中	及び大気中の水素濃度分布計測(実フィールド試験) …	62
6.1 実	フィールド試験装置の製作	62
6.1.1	地中模擬層及び気密ブースの設計製作	62
6.1.2	埋設導管の設計製作	66
6.1.3	安全対策	70
6.2 実	フィールド試験装置構成	78
6.3 実	フィールド試験における地中水素濃度分布計測	
6.3.1	水素センサの配置	
6.3.2	地中水素濃度分布計測結果	
6.3.3	考察	101
6.3.4	まとめ	109
6.4 実	フィールド試験における大気中水素濃度分布計測	
6.4.1	観測領域と水素濃度の算出	
6.4.2	大気中水素濃度分布計測結果	
6.4.3	考察	123
6.4.4	まとめ	126
6.5 供給	給停止後の地中における水素濃度分布計測	
6.5.1	試験方法	
6.5.2	試験結果	
6.5.3	考察	
6.5.4	まとめ	

7. シミ	ュレーション解析の基礎検討	140
7.1 概要	要	140
7.2 解材	所方法	140
7.2.1	基礎方程式	140
7.2.2	解析条件	140
7.3 平周	式 30 年度実フィールド試験再現解析	······142
7.3.1	解析対象	142
7.3.2	真砂土層空隙率再調査	······143
7.3.3	解析モデル	145
7.3.4	解析結果	······147
7.3.5	再現性の検証	149
7.3.6	地質パラメータ感度解析	151
7.3.7	まとめ	154
7.4 令利	和元年度実フィールド試験再現解析	$\dots 155$
7.4.1	解析対象	$\dots 155$
7.4.2	解析モデル	156
7.4.3	解析結果	158
7.4.4	再現性の検証	162
7.4.5	垂直構造体近傍の地質分布を想定したケーススタディ	······163
7.4.6	まとめ	$\dots 165$
7.5 地口	中障害物構造ケーススタディ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	166
7.5.1	解析対象	166
7.5.2	解析モデル	167
7.5.3	解析結果	169
7.5.4	地中深さ 50cm における水素濃度分布例	171
7.5.5	水素センサ設置位置と漏えい検出時間の関係	·····173
7.5.6	まとめ	·····174
7.6 シミ	ミュレーション解析の基礎検討まとめ	175
8. 成果(の活用	177
8.1 漏;	えい箇所の迅速な検知と漏えい箇所の特定	177
8.2 遮湖	新等の措置及び漏えい箇所の修理	
9. 総括		184

[付 録]

Ι.	実フィールド試験の地中水素濃度分布計測結果	192
$ \Pi .$	実フィールド試験の大気中水素濃度分布計測結果	230
Ш.	実フィールド試験の供給停止後の地中水素濃度分布計測結果	243

調査の概要

1.1 事業目的

「水素導管供給システムの安全性評価事業(総合調査)」では、近年中の実用化が想定 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 討することとしている。

このため本事業では、その想定される新設の中低圧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 を目的とする。

1.2 事業内容

万一、導管からガス漏えいが発生した場合には、「①漏えいを迅速に検知」⇒「②漏え い位置を的確に特定」⇒「③遮断等の措置」⇒「④漏えい箇所の修理」といった対応が必 要となる。

本調査では、「①漏えいを迅速に検知」、「②漏えい位置を的確に特定」、「③遮断等の措置」、「④漏えい箇所の修理」の措置を講じるための技術を対象とし、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た際の水素ガス漏えいを迅速に検知する 技術等を調査し、水素導管供給システムの維持管理における安全対策に係る知見を明ら かにすることとしている。

平成 28 年度及び平成 29 年度、平成 30 年度の調査では、一般的な道路構造(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した。令和元年度は、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および大気中(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を把握し、 漏えい検知を行う際の検知間隔等について整理する。

1.3 実施方法

(1) 小規模容器による基礎試験

下記(2)の実フィールド試験におけるデータ収集と(3)のシミュレーション解析に向けた条件の検討を目的とした基礎試験として、一般的な埋設土を充填した小規模容器 (直径 0.5 m)を用いて、障害物による水素ガスの拡散挙動を確認した。

試験に用いる土壌は一般的な埋設土とし、地中障害物は水素導管上への設置が想定 される一般的な道路占用物を模擬した構造体とした。

試験条件として、水素ガス漏えい位置(2パターン)を変化させ、水素ガスの拡散

挙動について整理した。

(2) 実フィールド試験

上記(1)の基礎試験結果を踏まえ、実フィールド試験として、地中及び大気中での水素の拡散挙動が確認できる規模(直径 7.0 m)の地中模擬層を用い、土砂部分 0.7 m、 舗装(路盤含む)0.5 mとし、深さ約 1.2 mからの漏えい水素の障害物影響による地 中の拡散挙動(濃度分布)及び大気(地表面近傍)への拡散挙動(濃度分布)につい て調査を実施した。

試験に用いる土壌は一般的な埋設土とし、舗装は一般的な道路構造部へ使用される 舗装とした。また、地中障害物は水素導管上への設置が想定される一般的な道路占用 物を模擬した構造体とした。

地中における深さ方向及び水平方向の濃度分布を計測するため、地中に水素センサの多点埋設(60点)を行った。また、大気中(地表面近傍)における拡散挙動の可視 化及び濃度分布の計測を行った。

試験条件として、水素ガス漏えい量(2パターン)を変化させ、地中及び大気中(地 表面近傍)への拡散挙動について立ち上がりからの経時変化を確認する。うち、1パ ターンで、水素供給停止後の挙動について、その傾向を確認した。

(3) シミュレーション解析の基礎検討

上記(2)で得られた水素の濃度変化をシミュレーションにより再現し、比較検証を行い、舗装を施した際の地中の拡散挙動及び大気への拡散挙動について、シミュレーションが可能かどうかについて検証した。

1.4 実施体制及びスケジュール

本事業実施体制を図 1-4-1 に、本調査の実施体制を図 1-4-2 に、実施スケジュールを表 1-4-1 にそれぞれ示す。



図 1-4-1 事業実施体制



図 1-4-2 調査実施体制

	実施項目			P9.54	w7	令和元年度									
大分類中分類		1993,940	363.]	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12 月	1月	2 月	3月		
1	実験条件の検討			R1.7	R1.9			:							
		(1)	実験装置設計·製作	R1.7	R1.9			:	:		:				
	小姐描绘吗!------------------------------------	(2)	透気係数·拡散係数計測	R1.9	R1.9										
2	小玩保谷語による荃啶試験	(3)	水素濃度分布計測	R1.9	R1.11										
			解析, 評価	R1.10	R1.11										
			実験装置設計·製作	R1.7	R1.12										
3	3 実フィールド試験	(2)	透気係数·拡散係数計測	R1.11	R1.12										
ľ		(3)	水素濃度分布計測	R1.12	R2.2										
		(4)	解析, 評価	R2.1	R2.2										
		(1)	解析条件検討	R1.7	R1.11			1							
4	シミュレーション 解析の基礎検討	(2)	シミュレーション 解析	R1.7	R2.2										
		(3)	再現性評価	R2.1	R2.2										
5	委員会				-			8/8				12/17		2/12	
6	総合調査受託者との連携会議				-		7/30		9/24		12/6	12/25		2/3	
7 報告書作成		R2.2	R2.3												

表 1-4-1 実施スケジュール

本事業の遂行に当たっては、学識経験者、ガス事業者等から構成される特別専門委員 会において、適宜、実施方針、進捗状況及び結果につき報告を行い、審議を受けると共 に、指摘事項を実務に反映させた。また総合調査受託者との連携会議において、試験条件 等の具体的内容につき助言を受けた。

2. 調査方法

2.1 試験方法の概要と試験条件

本調査では、地中及び大気中における水素拡散挙動について、一般的な埋設土、一般的 な道路舗装等に使用される舗装構造及び地中障害物として一般的な道路占用物を模擬し た構造体を用いて、実運用における地中及び大気中を模擬したフィールド試験装置を製 作し、試験による観測とシミュレーション解析の再現性評価を行った。

1.3 節に示した本調査の実施方法に基づき、具体的な実施内容を

- 小規模容器における地中及び大気中における水素拡散挙動計測(濃度計測)
- ② 実フィールドにおける地中及び大気中における水素拡散挙動計測(濃度計測)

③ 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 の3項目に分類した。各項目の実施内容は以下のとおりである。

- ① 土中における垂直構造体の水素拡散への影響を確認するため、地中及び大気空間を 模擬した小型容器を製作した。内径φ500 mm×高さ 500 mm の容器を垂直構造体を 模擬した仕切板により二分割し、片側に一般的な埋設土である真砂土を充填した。地 中模擬層の底板には配管の腐食漏えい等を想定した損傷に相当する直径φ1.0 mm の 放出口を、仕切板直近及び仕切板からの離隔距離 100 mm の 2 箇所施工し、所定の条 件にて水素を放出した。また、地中模擬層上に接続可能な幅 680 mm×奥行 680 mm ×高さ 280 mm の大気層を模擬する容器を製作した。製作した小規模容器により、地 中及び大気中における水素拡散挙動を水素濃度の変化として計測した。
- ② 実フィールド試験として水素導管の埋設環境を模擬した内径 \$7.0 m の地中模擬層 を製作した。地中模擬層の構成は、一般的な埋設土である真砂土を転圧充填し、真砂 土上に一般的な道路構造部へ使用される舗装を施し、土砂部分 0.7 m、路盤 0.35 m、 舗装 0.15 m とした。地中障害物として、導管上への設置が想定される防護板を模擬 した幅 1.0 m の水平構造体と、導管近傍に存在する可能性のある地中建築物の壁面を 模擬した垂直構造体を設置した。水素導管は、水平構造体下、垂直構造体からの離隔 距離 1.0 m 及び垂直構造体直近の 3 箇所に埋設し、水素放出位置が地表面から深さ 1.2 m となるよう設置した。導管には腐食漏えい等を想定した損傷に相当する直径 \$1.0 mm の放出口を施工し、水平構造体下を水素放出点 A、垂直構造体からの離隔距 離 1.0 m を水素放出点 B、垂直構造体直近を水素放出点 Cとして、それぞれの放出点 から所定の条件を再現し水素を放出した。地中模擬層の周囲には大気空間を模擬する 幅 8.0 m×奥行 8.0 m×高さ 3.0 m の気密ブースを製作した。製作したフィールド試 験装置により、地中及び大気中における水素拡散挙動を水素濃度の変化として計測し た。
- ③ CFD (Computational Fluid Dynamics)解析により、②の濃度計測と同一の条件 で計算を行い、試験結果に対する解析結果の再現性を評価することで舗装路下に地中

障害物がある場合の地中及び大気中における水素拡散挙動へのシミュレーション解 析の適用可能性を評価した。

本調査における試験及びシミュレーション解析条件を表 2-1-1 に示す。

項目	No.	土壌層構成 厚さ [mm]			損傷形状 (放出口)	放出位置	供給流量	濃度	供給 停止後の	③ CFD
		真砂土	砕石	アスファルト	し形状し		[L/min]	計測	挙動計測	解析
	1-(1)	500	_	_		仕切板直近	1.93	0	_	-
小規模	1-(2)	500		—		仕切板から 100 mm	1.93	0	-	
容器による	1-(3)	500 (仕切板から) 幅 30 mm 転圧なし		_		仕切板直近	1.93	0	_	
基礎試験	1-(4)	500 (仕切板から) 幅 30 mm 転圧なし	_	-	ピンホール	仕切板から 100 mm	1.93	0	_	_
	2-(1)	700	350	150	φ1.0 mm	水素放出点 A (水平構造体の影響確認)	1.93	0	_	0
② 実	2-(2)	700	350	150		水素放出点 B (垂直構造体の影響確認)	1.93	0	_	0
フィー	2-(3)	700	350	150		水素放出点 C (垂直構造体の影響確認)	1.93	0	_	0
ールド	2-(4)	700	350	150		水素放出点 A (水平構造体の影響確認)	5.54	0	0	-
試験	2-(5)	700	350	150		水素放出点 B (垂直構造体の影響確認)	5.54	0	_	_
	2-(6)	700	350	150		水素放出点 C (垂直構造体の影響確認)	5.54	0	0	_

表 2-1-1 試験及びシミュレーション解析条件

本調査では地中に3箇所の水素放出点を設置したが、水素供給量を圧力にて制御を行 う場合、放出口近傍の土壌の締め固まり具合により単位時間当たりの供給量にバラツキ が生じるため、水素供給量の制御は流量にて行い、中低圧での水素配管供給を想定し、① について1.93 L/min (供給圧力2.5 kPa相当)、②について1.93 L/min (供給圧力2.5 kPa相当)、5.54 L/min (供給圧力10.0 kPa相当)の2パターンとした。単位時間当た りの供給量を揃えて試験を実施することにより、放出点の異なる試験の結果の比較が容 易となることに加え、これらの流量は平成29年度以降の調査においてデータを蓄積して きた条件であるため、過去の調査との結果の比較が可能となる。

また、土壌試料及び舗装条件は平成 30 年度調査事業と同様仕様とした。なお、これらの試験条件は総合調査受託事業者との協議により決定した。

2.2 舗装条件の決定

2.2.1 舗装の基本構造及び本調査における地中模擬層の構成

本調査では、地中模擬層に一般的な道路構造部に使用される舗装を施し、実フィール ド試験を実施する。舗装の基本構造を図 2-2-1 に示す^[1]。



図 2-2-1 舗装の基本構造

舗装は、図 2-2-1 に示したとおり、下層路盤、上層路盤、基層、表層の 4 層により構成 され、真砂土や山砂等の路床の上に敷設される。

一般的な舗装はこのような基本構造を基に敷設されるが、交通量や目的により層の構成、各層の厚さ、用いる材料は様々であるのが実情である。砕石には主に単粒度砕石、クラッシャーラン、粒度調整砕石の3種があり、それらの各々に最大粒径が異なる複数の種類がある。図 2-2-2 は砕石層に比較的よく用いられる最大粒径 30 mm の砕石について、単粒度砕石、クラッシャーラン、粒度調整砕石のJIS で定められた骨材粒度分布を示したグラフである。骨材とは、砕石、砂利、砂、砕砂その他これに類似する材料である。



図 2-2-2 砕石の粒度分布(最大粒径 30 mm)

図 2-2-2 に示したとおり、単粒度砕石は粒度分布範囲が狭く、粒度の揃った骨材により 構成される。クラッシャーランは単粒度砕石より粒度分布範囲が広く、粒度調整砕石は 更に粒度範囲が広い。

基層及び表層は加熱アスファルト混合物が用いられる。加熱アスファルト混合物は、 結合剤であるアスファルトに骨材やフィラー(75 μm ふるいを通過する鉱物質粉末)を 組み合せて適切な配合とし、これを所定の温度条件で加熱混合して製造されるものであ る。アスファルト混合物は交通量、目的に加え、舗装する場所の気象条件等により、配合 設計される。図 2-2-3 は、標準的に用いられるアスファルト混合物の骨材粒度分布の例で ある。図中凡例の AS はアスファルトを表し、括弧内の数字は骨材の最大粒径を表す。



図 2-2-3 アスファルト混合物の骨材の粒度分布

図 2-2-3 に示したとおり、粗粒度や開粒度アスファルト混合物は粗骨材(2.36 mm ふ るいに止まる骨材)が多く配合されており、密粒度、細粒度の順に細骨材(2.36 mm ふ るいを通過し 75 µm ふるいに止まる骨材)やフィラーの配合量が多くなる。アスファル ト混合物はこれらの粒度分布を持つ骨材に 3~8%(混合物全量に対する質量百分率)の アスファルトを混合して製造される。

アスファルト混合物を敷設する際、路盤上に瀝青材料を薄く散布する。これをプライ ムコートと呼ぶ。プライムコートは路盤とその上に敷設するアスファルト混合物の付着 を良くする等の役割があり、粘度が比較的低く、路盤の中によく浸透するアスファルト 乳剤 PK-3 (カチオン乳剤)が一般的に用いられる。プライムコートの散布量は一般には 1.0~2.0 L/m²である。また、アスファルト舗装の基層と表層の間にも薄く瀝青材料を散 布する。これは、タックコートと呼ばれ、基層と表層のアスファルト混合物の付着性を高 める目的で散布される。タックコート用瀝青材料には、通常アスファルト乳剤 PK-4 (カ チオン乳剤)が用いられる。タックコートの散布量は一般には 0.3~0.6 L/m²である。 本調査においては、平成30年度に実施した地中障害物がない場合と水素拡散挙動を比較するため、平成30年度と同様に一般的な道路構造部へ使用される舗装として、図2-2-4に示す「車道舗装50型」に基づき実フィールドに舗装を施すこととした。「車道舗装50型」は東京都中央区における呼称であり、地域により「車道アスコン50型」等別名称の場合がある。



図 2-2-4 「車道舗装 50 型」の構造

図 2-2-4 に示したとおり、「車道舗装 50 型」舗装は路床上に再生クラッシャーランを 用いた 200 mm の下層路盤、その上に再生粒度調整砕石を用いた 150 mm の上層路盤、 路盤上に再生粗粒度アスファルト混合物を用いた 100 mm の基層と、再生密粒度アスフ ァルト混合物を用いた 50 mm の表層により構成されるが、本調査においては、

・ 砕石層とアスファルト層について、それぞれの基本的な拡散への影響を確認する。

・ 試験やシミュレーションの複雑化を避け、結果を理解し易くする。

の2点の目的から、路盤とアスファルトを単層化し、砕石層 350 mm、アスファルト層 150 mm とし、プライムコートは散布せずに試験を実施することとした。総合調査受託 事業者等からの助言に基づき、導管の埋設深さはアスファルト表面から 1.2 m とするた め、路床である真砂土層の放出口からの高さを 700 mm とした。

2.2.2 地中模擬層の基本物性

前項で述べたとおり、本調査における地中模擬層は、アスファルト層 150 mm、砕石層

350 mm、真砂土層 700 mm の 3 層により構成した。

アスファルト層に用いるアスファルト混合物は、表層の舗装に一般的に用いられる密 粒度アスファルト混合物 (13)を用いることとした。図 2-2-5 に、図 2-2-3 にて示した標 準配合の密粒度アスファルト (13)の粒度分布と本調査に用いる密粒度アスファルト (13) の粒度範囲の比較を示す。



図 2-2-5 密粒度アスファルト混合物(13)の標準配合と本調査使用分の 骨材粒度分布の比較

図 2-2-5 に示したとおり、本調査に用いた密粒度アスファルト混合物(13)は、標準配 合品と同様の骨材粒度分布である。

また、図 2-2-6 に、粒度調整砕石(M-30)の JIS で定められた骨材粒度分布と本調査 に用いた粒度調整再生砕石(RM-30)の骨材粒度分布の比較を示す。



図 2-2-6 粒度調整砕石(M-30)のJIS で定められた骨材粒度分布と 本調査使用分粒度調整再生砕石(RM-30)の骨材粒度分布の比較

図 2-2-6 に示したとおり、本調査に用いた粒度調整再生砕石(RM-30)は、JIS で定められた砕石とほぼ同様の骨材粒度分布である。

真砂土については、平成29年度に真砂土のみの条件下にて実施した試験結果及び平成 30年度に地中障害物なしの条件下にて実施した試験結果と本年度の結果を比べる際に、 土壌の性質がかけ離れていては比較が困難となるため、平成29、30年度と同等品を用 い、試験を実施することとした。図2-2-7は、本調査において用いた真砂土と平成29、 30年度調査で用いた真砂土の粒度分布の比較であり、平成29、30年度とほぼ同様の粒 度分布であることが確認された。



図 2-2-7 本調査において用いた真砂土と平成 29、30 年度調査で用いた真砂土の 粒度分布の比較

[参考文献]

[1] 小谷 昇,井田敏行,森田幸義:「図解土木講座 アスファルト混合物の知識(第三版)」, 技報堂出版株式会社

3. 水素ガス計測手法

3.1 地中水素ガス濃度の計測方法

3.1.1 センサの選定

地中における水素濃度計測は、水素センサを複数箇所に埋設し水素濃度の経時変化を 計測することで、小規模容器及び実フィールド試験装置の地中模擬層全体に亘る水素拡 散挙動を把握する。本調査においては、試験時の安全を確保するため、小規模容器による 基礎試験では容器内を、実フィールド試験では気密ブース内を窒素ガスで満たした状態 から水素を放出し、濃度計測を開始する。したがって、用いる水素センサは無酸素状態で 動作する必要がある。

一般的に用いられる接触式水素ガスセンサの検知原理と特徴を表 3-1-1 に整理した。

センサの名称	検知原理	特徵	出力の濃度依存性
熱線型半導体式 (CH)	 ○水素の金属酸化物半導体表面上で の酸化反応による伝導電子の増加 ○素子表面の「分子ふるい」効果による水素選択性発現 	○高感度・高選択性○温度・湿度依存性小○90%応答:~20秒	Δ V 0.1ppm <c<2vol%< td=""></c<2vol%<>
接触燃焼式 (CS)	○水素の触媒(Pd、Pt/Al₂O₃)燃焼に よる素子温度上昇	 ○水素感度は比較的高い が常温での選択性は無い ○温度・湿度依存性小 ○90%応答:5~10秒 	∆ V 1000ppm <c<4vol%< td=""></c<4vol%<>
気体熱伝導式 (CT)	○水素混合に伴う気体熱伝導率の変 化を加熱された素子の放熱量(温度) の変化としてみる	 ○低感度だが水素選択性 は比較的高い ○温度・湿度依存性小 ○90%応答:5~10秒 	∆ V 1vol% <c≪100vol%< td=""></c≪100vol%<>
Mg-Ni 反応式	○水素分子の吸着により変化した薄膜の光学的な光反射率、光透過率を レーザ照射により変化としてみる	 ○高感度・高選択性 ○温度・湿度依存性大 ○60%応答:3秒以下 	現時点では定量化が 困難

表 3-1-1 接触式水素ガスセンサの検知原理と特徴[1][2]

表 3-1-1 によれば、濃度計測に用いることができる水素ガスセンサは複数存在するものの、無酸素環境下の土壌試料内において使用できる検知原理は気体熱伝導式及び Mg-Ni薄膜反応式の2種のみである。また、Mg-Ni薄膜反応を用いた光学式センサ(水素可視化シート)は、薄膜を構成する分子への水素の吸着に伴う、薄膜の光透過率の上昇(反射率の減少)を用いて水素検知を行うものであり、水蒸気や繰返し使用による経時的な

薄膜成分の劣化や土壌試料の物理的な接触による薄膜成分の剥離など、濃度変化以外の 変動成分の影響により、濃度の定量化は困難である。

したがって、本調査では、地中における水素濃度計測については、気体熱伝導式ガスセンサを採用した。本調査で用いた気体熱伝導式ガスセンサの外観と寸法を図 3-1-1 に、ガスセンサの定格を表 3-1-2 示す。



図 3-1-1 気体熱伝導式ガスセンサの外観と寸法 (株式会社ネモトセンサエンジニアリング/NAP-21A)

表 3-1-2	気体熱伝導式ガスセンサの定格

項目	仕 様
印加電圧	DC1.8±0.1 V
消費電流	120~130 mA(1.8 V 印加)
使用時周囲温湿度	-10~+50℃、95%RH 以下
保管時周囲温湿度	-20~+60℃、99%RH 以下

本調査の検索範囲において、センサ素子単体で現在入手できる気体熱伝導式ガスセン サは、本製品のみであった。同製品は、二酸化炭素検知センサとして市販されている。電 極への気体分子の接触に伴う温度の低下によってガス濃度を計測する本センサは、対象 分子の比熱が大きいほど検出感度が向上する。したがって、二原子気体の水素を検出す る場合、多原子気体の二酸化炭素の場合と比較して感度良く、速い応答で検知すること ができる。

3.1.2 気体熱伝導式ガスセンサによる地中水素濃度計測の性能評価

一般に、気体熱伝導式ガスセンサは、対象ガス濃度を計測するセンサと共に、環境温度 による出力の変化を補正する参照用の素子(補償素子)を一対として使用し、濃度計測を 行う。本調査では、センサ素子を直接土壌試料内に埋設し水素濃度を計測するため、埋設 する物体の体積が小さいほど良く、環境温度変化の少ない条件において濃度計測を実施 する場合、補償素子の併設を省略することができる。本調査において、気密ブースは十分 に温調がなされた室内に配置されている。気密ブース内は、試験開始前に定められた時 間窒素パージを行い、その後所定の流量で水素ガスを導入するが、水素ガスは土壌試料 中を拡散するため、流れの速度は非常に緩やかであることが予測された。以上の検討に 照らし、各種水素放出条件において地中模擬層における真砂土内の温度を計測したとこ ろ、室温 22.0℃に対し 18.5℃でほぼ変化は見られなかった。したがって、本調査では、 補償素子を用いず、センサ素子単体を土壌試料中に埋設することとした。

小規模容器による基礎試験及びフィールド試験に先立ち、上記の用法に照らし、18.5℃の環境においてセンサを土壌に埋設した状態で水素濃度計測の検量線を取得した。図 3-1-2 に高濃度域までの検量線取得結果を、図 3-1-3 に低濃度域の検量線取得結果を示す。



図 3-1-2 気体熱伝導式水素ガスセンサ出力の水素濃度依存性 (高濃度域)



図 3-1-3 気体熱伝導式水素ガスセンサ出力の水素濃度依存性 (低濃度域)

図 3-1-2 に示すように、本センサは 0~100%までの広いダイナミックレンジで水素濃度計測が可能であるが、センサ出力と水素濃度の相関は、広範囲で見るとやや線形から 外れた特性を示す。したがって、本調査では、埋設する各センサごとに取得した検量線に 基づき、近似曲線の多項式を求め、水素濃度の計測を行った。

図 3-1-3 に示すように、本センサは限られた範囲で見るとセンサ出力と水素濃度は線 形の相関となる。

本センサの時間分解能は、計測値の出力時に行う平均化処理回数に依存し、これらは 計測値のバラツキに寄与することから、本センサの検出限界とトレードオフの関係とな る。本調査では、応答速度を 5 秒として平均化処理回数を設定し、この場合の水素検出 限界は S/N 比 2.0 として 0.1%であった。

3.2 大気中水素ガス濃度の計測方法

3.2.1 計測原理

本調査では、小規模容器による基礎試験及び実フィールド試験において、大気中の水 素ガス拡散挙動についても計測を行う。水素漏えい試験を実施するに当たっては、安全 上の観点から、小規模容器による基礎試験では大気模擬層の内部を、実フィールド試験 では気密ブースの内部を、窒素で完全に置換した状態で水素の拡散挙動を計測するため、 地中での水素濃度計測と同様、大気側においても、窒素雰囲気における水素濃度の計測 が必要となる。

本年度事業では、昨年度までと同様、レーザを光源とするラマン分光法により、大気模 擬層あるいは気密ブース内部の水素拡散挙動計測を行った。レーザラマン分光法は、計 測箇所に物理センサを配置することなく、ガスの濃度分布の非接触・遠隔計測が可能で あるため、本来の水素ガス拡散挙動を乱すことなく計測が可能である。

以下、大気中水素濃度計測の原理となるラマン効果の概要について述べる。



図 3-2-1 ラマン散乱の模式図

図 3-2-1 に模式的に示したように、光が物質を構成する分子に入射すると、光の散乱が 生じる。生じる光散乱の大部分は入射光と同一の波長をもつレイリー散乱と呼ばれる散 乱であるが、散乱光のごく一部の成分は、入射光と異なる波長をもつラマン散乱となる。 このラマン散乱の入射光波長からのずれ(ラマンシフト)は、分子の種類あるいは構造に よって決まった特定の値を取るため、ラマン散乱を分析することにより、物質の特定、或 いは、分子構造の決定が可能となる。入射光よりも長波長側に生じるラマン散乱をスト ークスラマン散乱、短波長側に生じるラマン散乱をアンチストークスラマン散乱と呼ぶ が、本調査では、ストークスラマン散乱を計測対象とする。

図 3-2-2 に水素及び窒素のラマンスペクトル計測事例を示す。また、表 3-2-1 に水素及 び窒素のラマンシフト及び本調査で使用した光源のレーザ波長(355 nm)に対するスト ークスラマン散乱の波長を示す。



図 3-2-2 水素及び窒素のラマンスペクトル計測事例

分子種	ラマンシフト [cm ⁻¹]	ラマン散乱波長 [nm] (355 nm 励起)	ラマン散乱断面積比(窒素:1)
水素 (H2)	4160	416.5	3.1
窒素 (N2)	2331	387.0	1

表 3-2-1 ラマン効果に関する水素、窒素の各種パラメータ[3]

一般に、ラマン散乱の強度は極めて弱いが、水素は、比較的強いラマン効果を示す物質 である。また、表 3-2-1、図 3-2-2 から分かるように、窒素と水素のラマン散乱波長は 30 nm 近く離れているため、半値幅 10 nm 程度の一般的な光学バンドパスフィルタを用い て容易に分離することができる。このため、本調査では、検出器となるカメラの内部に光 学フィルタを設置し、水素ガスによるラマン散乱光のみを選択的に検出した。

3.2.2 計測装置の構成

本調査では、前述のラマン散乱光を高感度カメラを用いて画像として捉えることにより、水素拡散挙動を可視化する。図 3-2-3 に本調査に用いるガス可視化・濃度分布計測方法を、表 3-2-2 に構成機器の仕様(実フィールド試験の場合)をそれぞれ示す。

大気中水素ガス拡散挙動の計測は、安全性を担保するため、窒素雰囲気に置換された 大気模擬層(気密ブース)内で行う。厳密には、真の大気開放とは異なる条件下での試験 となるが、安全性を優先させ、窒素 100%の雰囲気下でのみ水素放出試験を行った。

ラマン分光法による濃度計測の励起光源には、表 3·2-2 に示すように、Nd:YAG レー ザの第3高調波(波長355nm)を使用した。微弱なラマン散乱の強度を高めるため、ピ ークパワーの高いパルスレーザを採用した。レーザヘッドから射出したビームは、2枚の 光軸調整用高反射ミラーを経て、大気模擬層内部に水平に入射する。レーザの入射部に は、紫外波長域での透過率の高い合成石英製の窓を取り付けた。大気模擬層内のガス分 子と入射したレーザ光が相互作用することにより、レーザ光軸上でラマン散乱光が生じ る。発生したラマン散乱光は、大気模擬層前面の観測窓を透過し、検出器であるカメラま で到達する。アクリル窓の材質は、紫外域での透過性を考慮し選定した。カメラは、微弱 なラマン散乱光を高感度に検出するため、Princeton Instruments 社製 ICCD カメラを 使用した。カメラレンズの後段には、レーザ波長とそれ以下の波長の光を遮断するラマ ン分光用エッジフィルタ及び水素ガスのラマン散乱光のみを透過するバンドパスフィル タを取り付け、カメラ素子に光が入射する前段で波長選択を行った。ICCD カメラは、イ メージインテンシファイアによってカメラに入射する光子を増幅するとともに、カメラ のシャッタ(ゲート)を電子制御により精密に制御することが可能である。ガス分子がレ ーザによって励起されてからラマン散乱が生じるまでの時間は無視できるほど短いため、 レーザのパルスが大気模擬層内を通過する時間及び発生したラマン散乱光がカメラのレ ンズに届くまでの時間を考慮し、ICCD カメラのゲートを開くことにより、高い S/N 比 でラマン散乱光のイメージングが可能となる。本調査では、レーザ装置から取り出した トリガ信号を ICCD カメラに入力し、両者を同期させることによりゲート開放のタイミ ングを制御した。また、実フィールド試験では、2 台のレーザ装置により同時に高さの異 なる2光軸上のラマンイメージングを行ったため、デジタル遅延パルス発生器 (Stanford Research Systems / DG535)を使用して2台のレーザ装置の発振のタイミングを制御し、 レーザ装置2台とカメラ2台をすべて同期させて計測を行った。

ICCD カメラで取得した画像は、専用のソフトウェアを使って PC 上に記録し、解析を 行った。



図 3-2-3 大気中における水素ガス可視化・濃度分布計測方法

パルスレー	-ザ装置(実フィールド試験)
種別	フラッシュランプ励起 Nd:YAG レーザ
メーカ/型式	Quantel/Q-smart850
波長	355 [nm]
パルスエネルギ	230 [mJ] (Max)
パルス幅	5 [ns]
ビーム外径	9 [mm]
ビーム拡がり角	<0.5 [mrad]
繰返し周波数	10 [Hz]
	ICCD カメラ
メーカ/型式	Princeton Instruments/PI-MAX4:1024f
イメージセンサ	MPP フロントイルミネイテッド CCD
	1024×1024 [pixel]
CCD フォーマット	ピクセル/素子サイズ:
	$19 \times 19 \ [\mu m]/12.4 \times 12.4 \ [mm]$
インテンシファイア形式	18 mm-Gen III HBf
分解能	16 bit
	カメラレンズ
メーカ/型式	Nikon/Ai Nikkor 35 mm f/1.4S
焦点距離	35 [mm]
絞り(最大-最小)	f/1.4-f/16
水	素ガス用干渉フィルタ
メーカ/型式	Andover/415FS10-25
透過中心波長/半値全幅	415.9 [nm]/10 [nm]
5	マンエッジフィルタ
メーカ/型式	Semrock/LP02-355RU-25
レーザ光ブロッキング値	>99.9999 [%]
	号処理ソフトウェア
メーカ/型式	Princeton Instruments /Light Field
平滑化処理	ガウシアン 5×5

表 3-2-2 水素ガス可視化・濃度分布計測装置仕様

3.2.3 ガス濃度の定量化

本計測装置において、ICCD カメラに導入されるラマン散乱光強度 Pijは、

$$P_{ij} = \eta P_{0ij} K G_{ij} \Delta L N \frac{A}{r^2} \sigma e^{-2 \int_0^{\pi} [\alpha_L(r') + \alpha_H(r')] dr'}$$
(3.2.1)

で表される。ここで、

- η:検出器量子効率
- *Po*: レーザ光強度
- K:受光系透過効率
- G:幾何光学的結合効率
- △L:検出器が観測する空間領域
- A: 受光レンズ開口径
- r:離隔距離
- σ: ラマン散乱断面積
- N:分子密度
- *αL*: レーザ波長消散係数
- *αH*: ラマン波長消散係数

である。添字 *i、j* は ICCD カメラにおけるフォーマット i×j の CCD 検出器の単一素子 の座標を示す。

式(3.2.1)において、本調査では、観測領域やレーザの伝搬距離が数メートル程度の近距 離であるため、消散係数αを含む減衰項の寄与は極めて低い。したがって、減衰項の乗数 を0即ち、減衰項を1として差し支えない。また、他のパラメータは、試験時の容器材 質や可視化装置の配置、構成部品が決まれば、単一の CCD 素子に対しては全て定数とな る。しかし、主にレーザ光強度や、レンズの収差、CCD 素子感度の個体差等に依存して、 感度には空間的な分布が生じる。これを補正する手段として、本調査では、大気模擬層内 が完全に窒素で置換された状態で窒素ガスによるラマン画像を取得し、これと比較する ことにより、水素ガスの濃度を算出した。窒素ガスと水素ガスのラマン散乱断面積比は 既知(表 3-2-1)であるため、光学フィルタの透過率差による補正を加えることで、水素 ガス濃度を定量化できる。

また、本計測において、カメラレンズに導入されたラマン散乱光は ICCD カメラ内部 のイメージインテンシファイア(以下 I.I.)の光電面で電子に変換・増倍された後、蛍光 面において再度光に変換され CCD 素子によって検出される。ICCD カメラによる微弱光 の検出では、計測環境に関わらずこれらの検出過程において、離散的なノイズ成分が恒 常的に発生する。したがって、良好な可視化画像及び濃度分布の取得には、離散したノイ ズの影響を低減し、且つラマン散乱光の空間分解能及び輝度分解能を損なわないフィル タ処理方法が必要となる。そのため、I.I.によるノイズ成分を除去するために、取得画像 に空間的な平滑化処理として 5×5 ガウシアンフィルタを適用した。図 3-2-4 に用いたガ ウシアンフィルタのパラメータを示す。

<u>1</u> 256	4 256	<u>6</u> 256	4 256	<u>1</u> 256
4 256	<u>16</u> 256	<u>24</u> 256	<u>16</u> 256	4 256
<u>6</u> 256	<u>24</u> 256	<u>36</u> 256	<u>24</u> 256	<u>6</u> 256
4 256	<u>16</u> 256	<u>24</u> 256	<u>16</u> 256	4 256
<u>1</u> 256	4 256	<u>6</u> 256	4 256	<u>1</u> 256

図 3-2-4 5×5 ガウシアンフィルタマスクパラメータ

ガウシアンフィルタは各要素の和が1となるように重み付けされており、画像処理に おけるノイズ除去手法として一般的に用いられるものである。図3-2-5に水素ガスのラ マン散乱光画像へのガウシアンフィルタ適用画像例を示す。図3-2-5(a)についてみると、 背景領域においても離散化した輝点が確認される。これは前述のI.I.によるノイズ成分で あり、熱雑音により発生した光電子が増倍され、輝点として画像に反映されたものであ る。このノイズは、同様に水素ガスのラマン散乱光画像における水素ガス分布領域の輝 度にも重畳されている。これに対し、図3-2-5(b)についてみると、平滑化処理を適用する ことで離散した輝点が大きく減少し、輝度の分布をより連続的に観測できることがわか る。本調査では、取得した画像データに上記平滑化処理を施した後、水素濃度の定量化を 行った。実フィールド試験の場合、大気中水素ガス濃度分布計測の性能は、検出限界0.1%、 時間分解能 30 秒である。



(b) 水素ガスのラマン散乱光画像(フィルタ後)

図 3-2-5 水素ガスのラマン散乱光画像へのガウシアンフィルタ適用画像例

[参考文献]

- [1] 北口久雄:「水素用ガスセンサの現状と課題」,水素エネルギーシステム, Vol.30, No.2 (2005)
- [2] 石井博、他:「水素ガスセンサ」,水素エネルギーシステム, Vol.24, No.2 (1999)
- [3] R. M. Measures : "Laser Remote Sensing", John Wiley and Sons, New York, p.108 (1984)

4. 地質パラメータの計測

本章では、地中模擬層を構成する真砂土層、砕石層、アスファルト層の地質パラメータの計測方法及びその結果について述べる。

本調査では、地中模擬層を構成する各層の基本的な地質パラメータを計測し、その値 を反映させたシミュレーション解析を行うことにより、実フィールド試験における水素 拡散挙動実測結果の再現性評価を行う。従って、シミュレーション解析に必要な各種地 質パラメータをあらかじめ計測しておく必要がある。本調査では、地中模擬層を構成す る、真砂土、砕石、アスファルトの各層について、空隙率、透気係数、拡散係数の各地質 パラメータを計測し、シミュレーション解析におけるパラメータとして使用した。

4.1 空隙率の計測

4.1.1 空隙率の定義と算出方法

一般に、あらゆる土壌は、気相、液相、固相の3相から成る混合物であると考えることができる。気相とは空気やその他のガス、液相はその大部分が水分、固相とは土を構成する粒子そのものである。体積 Vの土壌を構成する気相、液相、固相の体積をそれぞれ Va, Vw, Vsとすると、次の関係式が成り立つ^[1]。

$$V = V_a + V_w + V_s \tag{4.1.1}$$

本調査では、気相の部分を土壌内の空隙と定義する。空隙率*ε*、すなわち土壌全体の体 積に占める空隙部分の割合は、

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V} = \frac{V - V_s - V_w}{V} \tag{4.1.2}$$

と表される。また、土壌中に含まれる水分量を表す含水比 w は、土壌試料の質量を m_a 、 乾燥質量を m_b とすると、

$$w = \frac{m_a - m_b}{m_b} \tag{4.1.3}$$

によって表される。

式(4.1.2)から明らかなように、土中の水分量が変化すると空隙率が変化する。そのため、 実フィールド試験に使用する土壌は、比較的乾燥した含水比の低いものを選定して使用 し、水分の蒸発による空隙率の変化が最小限になるよう配慮した。実フィールド試験に使 用した真砂土の自然含水比は、4.52%であった。 空隙率を算出するに当たっては、まず、JISA1214「砂置換法による土の密度試験」に よって土壌の密度(湿潤密度)を求めた後、JISA1202「土粒子の密度試験」によって土 粒子密度を、JISA1203「土の含水比試験」によって含水比及び乾燥密度を求めた。土粒 子密度を ρ_s 、土壌の湿潤密度を ρ 、乾燥密度を ρ' とすると、空隙率 ϵ は、次の式(4.1.4)に より計算される。

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_s}{V} - \frac{V_w}{V} = 1 - \frac{\rho'}{\rho_s} - (\rho - \rho')$$
(4.1.4)

真砂土層及び砕石層について、上記の方法により空隙率を算出した。なお、アスファル ト層に関しては、実際に用いたアスファルト混合物の配合設計書の値を用いた。

4.1.2 空隙率の計測点と計測結果

令和元年度実フィールド試験における、真砂土層及び砕石層の空隙率計測位置を図 4-1-1 に示す。計測は、真砂土層、砕石層の施工が完了した後、それぞれ上の層を施工開始 するまでの間に行った。図 4-1-1 に示した A, B, C (それぞれ直径約 1 m の範囲) 3 箇 所の土壌表面から各 3 点ずつ、合計 9 点で空隙率の計測を行い、9 点の平均値を最終的な 計測結果としてシミュレーション解析の地質パラメータに使用した。真砂土層の空隙率 計測現場試験状況を図 4-1-2 に示す。試料を採取した後は、真砂土または砕石を充填し、 転圧して採取前の状態に復帰させた。



図 4-1-1 実フィールド試験における真砂土層及び砕石層の空隙率計測位置



図 4-1-2 真砂土層の空隙率計測現場試験状況

上記の方法により計測した各土壌層の空隙率計測結果を、表 4-1-1 に示す。各計測点ご との空隙率のバラツキは、施工時の転圧の状況に起因するものと考えられる。局所的には 空隙率のバラツキは存在するものの、全体としてみれば、表 4-1-1 に示した平均値でシミ ュレーションすることにより、大局的な水素拡散挙動を把握できると考えられる。よって 本調査では、各土壌層が一様に上記の平均化されたパラメータをもつものとしてシミュ レーション解析を行い、試験結果との比較を行った。

また、参考のため真砂土を容積既知の容器に全く転圧せずに充填し、空隙率を計測した ところ、36.43%であった。本データは真砂土無転圧時の空隙率として、小規模容器によ る基礎試験及びシミュレーション解析に使用した。詳細は5章及び7章において述べる。

土壌の種類	計測点	空隙率 [%]	平均值 [%]
	A-1	24.29	
	A-2	24.21	-
-	A-3	22.70	-
真砂土	B-1	27.52	-
	B-2	28.00	25.72
	B-3	29.02	-
	C-1	24.58	-
	C-2	25.83	_
	C-3	25.36	-
- 砕石 - -	A-1	29.30	
	A-2	28.27	-
	A-3	18.47	-
	B-1	16.99	-
	B-2	23.04	23.94
	B-3	29.10	-
	C-1	14.29	-
	C-2	31.02	-
	C-3	24.96	-
アスファルト	 (配合設計書による)	3.8	3.8

表 4-1-1 空隙率計測結果

4.2 透気係数の計測

4.2.1 透気係数の算出方法

透気係数を求めるには、試料を透過するガスの流量と、透過前後でのガスの圧力差が 分かればよい。流量と圧力の値から、透気係数は以下の式により算出される。

$$K = -\frac{Q \cdot \mu}{A \cdot \frac{dp}{dx}}$$
 (4.2.1)
 $K : 透気係数 [cm2]$
 $Q : 流量 [cm3/s]$
 $\mu : ガス粘性係数 [Pa \cdot s]$
 $A : 試料断面積 [cm2]$
 $dp/dx : 圧力勾配 = 圧力差 [Pa] / 試料長さ [cm]$

4.2.2 真砂土・砕石の透気係数計測

真砂土及び砕石の透気係数計測は、4.1節「空隙率の計測」で求めた実フィールド試験 における土壌の密度(湿潤密度)と同じ密度になるよう、転圧しながら計測容器に試料を 充填し、実フィールドと同様の土壌の状態を再現することによって行った。計測装置の 構成を図 4-2-1 に、計測に用いた機器の仕様を表 4-2-1 に示す。



図 4-2-1 透気係数計測装置の構成(真砂土・砕石)

名称	ホ 型 式 (メーカー)	主な仕様	
流量計	8500MM-0-2-1/20SLM	流量レンジ : 0~20 L/min	
(水素用)	(KOFLOCK)	センサ方式:熱式巻線センサ	
		測定精度:±1.0%FS	
圧力センサ	KP15-17G	圧力レンジ:0~20 kPa	
	(長野計器)	センサ方式:感圧素子	
		測定精度 : ±0.35%FS	
データロガー	Midi LOGGER GL820	電圧測定範囲:20 mV~50 V、1-5 V/FS	
(データ収集)	(GRAPHTEC)		

表 4-2-1 透気係数計測に用いた機器の仕様

計測容器は SUS 製の配管を加工して製作し、容器接続部には、試料保持のための SUS メッシュ及びゴムパッキンを取り付けた。計測容器の前後にそれぞれ流量計と圧力計を 設置し、差圧を計測するとともに、透過前後でガス流量が一致することを確認し、ガスの リークがないことを確かめた上で計測を行った。

計測では、3段階程度流量を変化させながら流量及び差圧をデータロガーで記録し、それら各段階で算出した透気係数の平均値を最終的な透気係数の値とした。流量を変化させた後は、流量及び圧力が一定値となるまで一定時間が経過した後の値を採用した。真砂土及び砕石層の透気係数計測装置の外観を図 4-2-2 に示す。

計測終了後、一度計測容器内の試料を取り出して再充填し、複数回計測を行った。真砂 土、砕石のそれぞれについて5回ずつ計測を行い、透気係数の平均値を求めた。



図 4-2-2 真砂土・砕石の透気係数計測装置外観

4.2.3 アスファルトの透気係数計測

完成した実フィールド土壌層表面から図 4-2-3 に示す 3 点で直径 100 mm のアスファ ルトコアを採取し、アクリル製の計測容器に固定して透気係数を計測した。当初の予定 では、A、B、Cの3点でコアを採取し計測する予定であったが、A、Cの2つのコアが 破損したため、D、Eの位置にてコアを追加で採取し、B、D、Eの3点のコアを使用し て透気係数の計測を行った。計測は、各コアについてそれぞれ 3 回ずつ行った。なお、 アスファルト層表面のコアをくり抜いた箇所には変性シリコンコーキング剤を充填し、 水素ガスの流路とならないように封止した。

アスファルトコア透気係数計測試験装置外観を図 4-2-4 に示す。ガスを流した時に試料前後の 2 つの流量計の値が一致し、計測系全体が気密されていることを確認した後、 真砂土・砕石の場合と同様の方法で透気係数の計測を行った。計測に使用した機器の仕様は、表 4-2-1 に示した真砂土・砕石の場合と同じである。



図 4-2-3 透気係数計測用アスファルトコア採取位置



図 4-2-4 アスファルトコアの透気係数計測装置の外観

4.2.4 透気係数計測結果

実フィールド試験における地中模擬層を構成する各土壌層の透気係数計測結果を表 4-2-2 に示す。真砂土、砕石については 5 回の計測の平均値を、アスファルトについては B、C、Dの3つのコアの平均値を透気係数の代表値とし、シミュレーション解析のパラ メータとして使用した。

土壌の種類	計測回	透気係数	平均值		
	1回目	$9.233 imes 10^{-12} \mathrm{m}^2$			
	2回目	$1.715 imes 10^{-11} \mathrm{m}^2$			
真砂土	3回目	$1.879 imes 10^{-11} m^2$	$1.014 \times 10^{-11} \text{m}^2$		
	4回目	$5.753\! imes\!10^{\text{-}12}\mathrm{m}^2$			
	5回目	$4.947 \times 10^{-12} m^2$			
	1回目	$1.075\! imes\!10^{\text{-}11}\mathrm{m}^2$			
	2回目	$8.713 imes 10^{-12} m^2$			
砕石	3回目	$6.409 imes 10^{-12} \mathrm{m}^2$	$8.623 \times 10^{-12} \mathrm{m^2}$		
	4回目	$1.061 \times 10^{-11} m^2$			
	5 回目	$6.638 imes 10^{-12} \mathrm{m}^2$			
	1回目	$1.598\! imes\!10^{\text{-}11}\mathrm{m}^2$			
アスファルト B	2回目	$1.636 imes 10^{-11} \mathrm{m}^2$			
	3回目	$1.641 \times 10^{-11} \mathrm{m}^2$			
	1回目	$5.686 imes 10^{-12} m^2$			
アスファルト D	2回目	$5.635 imes 10^{-12} \mathrm{m}^2$	$1.199 imes 10^{-11} \mathrm{m^2}$		
	3回目	$5.675 imes 10^{-12} \mathrm{m}^2$			
	1回目	$1.393 \times 10^{-11} \mathrm{m}^2$			
アスファルトE	2回目	$1.410 \times 10^{-11} \mathrm{m}^2$			
	3回目	$1.413 \times 10^{-11} \mathrm{m}^2$			

表 4-2-2 诱気係数計測結果

4.3 拡散係数の計測

本節では、土壌試料の拡散係数の計測について述べる。計測装置及び拡散係数の算出 方法については、遅沢省子氏「土壌中のガスの拡散測定法とその土壌診断やガス動態解 析への応用」^[1]、川本健氏 他「Gas Transport Parameters in the Vadose Zone: Gas Diffusivity in Field and Lysimeter Soil Profiles」^[2]他^{[3] [4] [5] [6]}を参考に実施した。


図 4-3-1 拡散係数計測装置の構成



図 4-3-2 拡散係数計測装置の外観

拡散係数計測装置は窒素で置換した拡散容器と試料容器を接続し、拡散容器内にて、 試料を透過し拡散する酸素濃度を計測する構造とした。アクリル製の試料容器部、拡散 容器部、及びそれぞれの容器を遮断隔壁用プレートから成り、隔壁用プレートを引き抜 くことにより遮断されている試料容器と拡散容器を一体化させた。試料容器は円筒形で あり、真砂土、砕石用は内径 (100 mm、容器長 200 mm、アスファルト舗装用は内径 (120 mm、容器長 150 mm である。底部には土壌試料の落下防止のパンチングメッシュを敷 設し、リング状のステンレス金具によって固定した。拡散容器の内径はアスファルトコ ア径と同径の(100 mm であり、真空グリスを塗布後、上記の 2 つの容器の間に隔壁用プ レートを挟み、それぞれの容器内の空間を隔絶した状態でボルトにより固定した。

拡散容器には酸素ガスセンサと窒素置換用パージラインを設置した。窒素流出側には バルブの操作時間を確保するために、拡散容器への酸素の逆流を遅延させるため配管を 約5m接続した。酸素濃度センサには光明理化学工業製OC-6B(\$\phi2.0\times2.08 cm)を用い た。この計器はガルバニ電池式の酸素ガスセンサであり、計測範囲 0~100%、90%応答 が10秒以内である。表 4-3-1 に拡散係数計測装置に用いた機器の仕様を示す。

名称	型 式 (メーカー)	主な仕様
酸素ガスセンサ	OC-6B	検知範囲:0~100%
	(光明理化学工業)	センサ方式:ガルバニ電池式
		応答時間: 90%10 秒以内
		仕様温度範囲: -10℃~45℃
		本体寸法:20×20.8 mm
データロガー	Midi LOGGER GL820	電圧測定範囲:20 mV~50 V、1-5 V/FS
(データ収集)	(GRAPHTEC)	熱電対測定範囲: -200 <ts≦1370℃< td=""></ts≦1370℃<>
		湿度測定範囲:0~100%

表 4-3-1 拡散係数計測装置に用いた機器の仕様

4.3.2 拡散係数計測手法

- (1) 計測手順
 - 試料を試料容器に充填する。
 - ② 真空グリスを塗布した試料容器と拡散容器を、隔壁用プレートを容器間に挿入した状態で接続し、それぞれの容器を離隔する。
 - ③ 拡散容器内に窒素ガスを流入させ、酸素ガス濃度が 0%になるまで容器内を窒素 ガスで緩やかに置換する。
 - ④ 酸素ガス濃度が 0%となったことを確認後、拡散容器内圧と大気圧との間に差圧 が発生することを防ぐため、流出側を大気解放した状態で、窒素流入側のパージラ インを閉じ、その後、流出側の順にパージラインのバルブを閉じる。

- ⑤ 置換後、拡散容器内の気流が落ち着くまで待つ。
- ⑥ 隔壁用プレートを引抜き、試料を通過して拡散する酸素を拡散容器に接続したセンサにて計測する。
- ⑦ 酸素センサの濃度値が大気中の酸素濃度まで到達した時点、若しくは、解析に十分な点数のデータが取得できた時点で計測を終了する。

(2) 拡散係数の算出

拡散法により、拡散量 Nは式(4.3.1)で与えられる。

 $N = -D_e \frac{dC}{dZ}$ (4.3.1) D_e :自由大気中の拡散係数^[7] C: ガス濃度Z: 任意深度

土壌試料の上端における O_2 濃度が常に大気中に等しく、また拡散容器内ではガス は速やかに混合し濃度差が生じないと仮定すると、土壌試料の拡散係数 D_e を含む式 (4.3.2)が近似的に成り立つ。

$$\frac{C(t)-C_{i}}{C_{0}-C_{i}} = \frac{2\varepsilon}{L_{A}} \cdot \frac{exp(-D_{e}\alpha_{1}^{2} \cdot t/\varepsilon)}{L_{S}\{\alpha_{1}^{2}+(\varepsilon/L_{A})^{2}\}+\varepsilon/L_{A}}$$

$$C: 酸素濃度$$

$$C_{0}: 初期時間における拡散容器内の酸素濃度$$

$$C(t): 時刻 t における拡散容器内の酸素濃度$$

$$C_{i}: 大気中の酸素濃度$$

$$L_{S}: 試料容器の長さ$$

$$L_{A}: 拡散容器の長さ$$

$$\varepsilon: 土壌試料の気相率 (空隙率)$$

$$\alpha_{1}: 計算定数$$

$$(4.3.2)$$

 α_1 は式(4.3.3)を満たす α_n の1番目の正の根である^[8]。 $\alpha \tan(\alpha \cdot L_S) = \varepsilon/L_a$

式(4.3.2)は、両辺に自然対数を取ることで以下のように変換される。

$$\ln\frac{C(t)-C_i}{C_0-C_i} = \frac{-D_e \alpha_1^2}{\varepsilon} t + \ln\left[\frac{2\varepsilon}{L_A} \cdot \frac{1}{L_S\{\alpha_1^2 + (\varepsilon/L_A)^2\} + \varepsilon/L_A}\right]$$
(4.3.4)

(4.3.3)

式(4.3.4)の右辺第2項は時間変化しない定数項であるため、式(4.3.4)の左辺と時刻 tの間には勾配- D_{ea1} の直線関係が成立する。この勾配は任意の時刻 $t_1 \sim t_2$ ($t_1 < t_2$) 間の時間差と、それぞれの時刻における式(4.3.4)の左辺値の差から以下のように求め られる。

式(4.3.5)を *D*_eについて整理し、各パラメータに計測値を代入すれば、土壌試料の拡 散係数が求められる。

*D*eは温度や気圧、対象とするガスの種類などによって異なるため、試料中の拡散し やすさを表す指標としては一般に、同じ温度・気圧条件下での自由大気中の拡散係数 *D*aに対する比である相対拡散係数 *D*e /*D*a で示すことが多い。これを求めるため、*D*a を式(4.3.6)で求める。

$$D_e = D_0 \cdot \frac{1013}{P} \cdot \left(\frac{T}{273.15}\right)^n \tag{4.3.6}$$

Do:標準状態における自由大気中の拡散係数

*D*_a: 拡散係数(相互拡散係数)

P: 計測時の気圧

T:計測時の温度

実際の本装置による拡散係数の計測では、土壌試料と拡散容器が接続された瞬間からの拡散容器における酸素濃度の経時変化データが得られるが、最初期は隔壁用プレートの引き抜きによる拡散容器内への空気の流入が起こるため、正確な酸素濃度の上昇値を得ることが難しい。そのため、計測開始最初期のデータはサンプルから除外する。また、拡散容器中の酸素濃度が大気中の酸素濃度まで到達した場合は、到達直前以降のデータも併せて除外する。

得られた酸素濃度のデータから、ある2点の時間における酸素濃度の変化量をプロ ットし直線回帰を行い、その直線の勾配を求める。勾配を求めるに当たり、前述の除 外するデータ範囲を除いた状態で近似曲線を求める。直線回帰により求めた勾配と、 試料容器の長さ L_s 、拡散容器の長さ L_4 、試料の空隙率 e から、式(4.3.3)を用いて計 算定数 α_I を算出する。酸素の拡散係数 $D_e(O_2)$ は得られた計算定数 α_I と式(4.3.5)を用い て求めることが可能となる。算出した酸素の拡散係数と標準状態における自由大気中 の酸素の拡散係数 $D_d(O_2)$ から試料の相互拡散係数 D_e/D_0 を算出し、相互拡散係数と 自由大気中の水素の拡散係数 $D_d(H_2)$ より、対象の試料における水素の有効拡散係数 D_{ϵ} (H₂)を導出する。計算定数 α_1 は、陽解的に求めることができないため、収束計算を行って導出する。

大気圧環境下の自由大気中におけるガスの拡散係数の文献値の一例を表 4-3-2 に示 す。ここにおいて、 D_0 は 0°Cでの値、 D_{25} は本試験にて常温の値とみなしている 25°C での値である。

ガス種	$D_{0}[\mathrm{m^{2/s}}]$	$D_{25} [\mathrm{m^2/s}]$
水素	$0.61 imes 10^{-4}$	$0.71 imes 10^{-4}$
酸素	$0.18 imes 10^{-4}$	$0.21 imes 10^{-4}$
窒素	$0.18 imes 10^{-4}$	_

表 4-3-2 自由大気中におけるガスの拡散係数

4.4 地中模擬層の地質パラメーター覧

2節、3節にて示した計測手法を用いて、地中模擬層を構成する真砂土、砕石、アスフ アルト各土壌試料の地質パラメータを計測した。計測結果を表 4-4-1 に示す。有効拡散係 数については対象の試料における水素の有効拡散係数 *D*₆(H₂)を示す。

表 4-4-1 地中模擬層の地質パラメータ

土壤試料	透気係数[m ²]	有効拡散係数[m²/s]	空隙率[%]	含水比[%]
真砂土	1.01E-11	$1.07 imes 10^{-5}$	25.7	4.52
砕石(RM-30)	8.62E-12	$1.05 imes 10^{-5}$	23.9	9.00
アスファルト	1.20E-11	$6.97 imes 10^{-7}$	3.8	0.38

アスファルトの空隙率についてはアスファルト混合物配合設計書の数値を用いた。

また、参考のため真砂土を容積既知の容器に全く転圧せずに充填し、空隙率を計測した結果を表 4-4-2 に示す。

表 4-4-2 真砂土無転圧時の地質パラメータ

土壤試料	空隙率[%]
真砂土 (無転圧)	36.4

[参考文献]

- [1] ウィリアム・ジュリー、ロバート・ホートン:「土壌物理学」p.27
- [2] 遅沢省子氏「土壌中のガスの拡散測定法とその土壌診断やガス動態解析への応用」農 環研報, 15, pp.1-66(1998)
- [3] K. Kawamoto, P. Moldrup, P. Schjonning, B. V. Iversen, D. E. Rolston, and T. Komatsu : "Gas Transport Parameters in the Vadose Zone : Gas Diffusivity in Field and Lysimeter Soil Profiles", Published in Vadose Zone Journal, No.5, pp.1194-1204 (2006)
- [4] 赤木寛一 他:「ガスの土中での移動特性」,第45回地盤工学研究発表会,D-02,pp.867-868(2010)
- [5] 濱田洋平 他:「遅沢式拡散係数測定装置を用いた草地土壌のガス拡散係数の測定」, 筑波大学陸域環境研究センター報告, No.7, pp.71-86(2006)
- [6] MHK-工房 http://www.mhk-koubou.com/
- [7] 宮崎毅,西村拓:「土壤物理実験法」,東京大学出版会
- [8] 「化学便覧 基礎編Ⅱ」, 日本化学会
- [9] 大江修造:「物性推算法」,データブック出版社(2002)

5. 小規模容器による基礎試験

本章では、実フィールド試験におけるデータの収集とシミュレーション解析に向けた 条件の検討を目的として、実フィールド試験と同じ特性の真砂土またはアスファルトを 充填した小規模試験容器を製作し、構造体による水素ガスの拡散挙動への影響を確認す る基礎試験を行った。5.1節では真砂土層における垂直構造体の影響を、5.2節ではアス ファルト層における垂直構造体の影響をそれぞれ確認する試験を実施した。

5.1 真砂土層における構造体の影響確認試験

5.1.1 試験装置の設計製作

本試験において、真砂土層における地中障害物の有無が水素拡散挙動に及ぼす影響を 明らかにするための小規模試験装置を設計製作した。地中模擬層及び大気模擬層の構造 を図 5-1-1 に、水素放出機構の構造を図 5-1-2 に、装置外観を図 5-1-3 にそれぞれ示す。



図 5-1-1 地中模擬層及び大気模擬層の構造



図 5-1-2 水素放出機構の構造



図 5-1-3 小規模試験装置の外観

小規模容器は大気模擬層と地中模擬層から構成される。大気模擬層には石英窓を配置 し、石英窓を介して大気模擬層中にレーザ光を照射することにより、真砂土から染み出 す水素の拡散挙動の光計測を行う。内寸は縦 680 mm×横 680 mm×高さ 280 mm であ り、上面に排気用の配管を接続した。地中模擬層は内径 \$500 mm、高さ 500 mm の円筒 形のアクリル容器から成り、地中建築物の壁面等の垂直構造体を模擬した仕切板により 二分し、片側に真砂土を充填した。二分したもう一方の空間の上方開口部はアクリル板 により密封し、水素が流入しないよう配慮した。仕切板面には圧力センサ配管用開口3箇 所及び真砂土内に埋設する水素センサ用の貫通穴を7箇所設けた。また、真砂土を充填 した側の半円柱容器側面には水素センサ用の貫通穴 10 箇所を設け、これらを介し真砂土 内に計 20 点埋設した水素センサの出力をデータロガーにより収集した。垂直構造体と放 出口の離隔距離が水素拡散挙動に及ぼす影響を確認するために、底部には水素放出口(ピ ンホール \$1.0 mm)を仕切板直近 (Ph1)、及び仕切板から 100 mm 離れた位置 (Ph2) の2箇所に設け、土壌試料の粒がピンホールを塞ぐことのないよう、目開き0.28 mmの SUS304 製メッシュを取り付けた。放出口直近に流量計及び圧力計を配置した。放出口 直下には三方バルブを配置し、バルブの操作により水素、窒素の供給及び停止を行う。地 中模擬層と大気模擬層との接続は真空グリス及び固定治具を用いて気密する。

水素センサは真砂土層の上層、中間層、下層の水素濃度を確認するために、仕切板の鉛 直方向に7点(図 5-1-1 中①~⑦番号)、Ph2 を含む容器中央鉛直方向に7点(図 5-1-1 中⑧~⑭番号)、容器壁面鉛直方向に6点(図 5-1-1 中⑮~⑳番号)の計20点埋設した。 センサ埋設位置を図 5-1-4に示す。

図 5-1-5 に示すとおり、大気中濃度分布計測は仕切板に対しレーザ光軸が平行方向の 場合(0°)と、直交方向の場合(90°)について実施した。レーザ計測における各種設 定を変更することなく両者の計測を行うためには、レーザ光軸と ICCD カメラの視野の 位置関係を保持する必要がある。これを実現するため、地中模擬層を 90°回転可能な構造 とし、地中模擬層の向きを変更することで、平行方向、直行方向の 2 軸の大気中濃度分 布を計測した。

表 5-1-1 に小規模試験装置に用いた機器の仕様を示す。



図 5-1-4 センサ埋設位置(左:上面図、右:配置図)



図 5-1-5 大気計測方向

名称	型 式 (メーカー)	主な仕様	
レーザ(大気計測用)	CFR400	発振波長:355 nm	
	(Quantel)	発振周波数:30 Hz	
		パルスエネルギ:90 mJ	
		パルス幅:9ns	
		ビーム径:7mm (at waist、1/e²)	
検出器(カメラ)	PI-MAX4	電子冷却型 EM-ICCD(VIS)	
	(Princeton Instruments)		
エッジフィルタ	LP02-355RU-25	レーザ波長:355 nm	
	(Semrock)	レーザ波長遮断率 99.9999%以上	
バンドパスフィルタ	415FS10-25	透過中心波長: 415.9 nm	
	(Andover)	透過半値全幅:10 nm	
画像処理ソフトウェア	Light Field		
	(Princeton Instruments)	—	
レギュレータ	IR-1B	低圧水素用 1次側最高使用圧 0.5 MPa	
	(ヤマト産業)	2 次側最高使用圧 0.03 MPa	
流量計	8500MM-0-2-1/20SLM	流量レンジ : 0~20 L/min	
(水素用)	(KOFLOCK)	センサ方式:熱式巻線センサ	
		測定精度:±1.0% FS	
流量計	8500MM-0-2-1/60SLM	流量レンジ : 0~60 L/min	
(窒素用)	(KOFLOCK)	センサ方式:熱式巻線センサ	
		測定精度:±1.5% FS	
圧力センサ	KP15-17G	圧力レンジ:0~20 kPa	
	(長野計器)	センサ方式:感圧素子	
		測定精度:±0.35% FS	
温度センサ	КТбҮА	K熱電対	
	(CHINO)		
データロガー	Midi LOGGER GL840	電圧測定範囲: 20 mV~100 V、	
(データ収集)	Midi LOGGER GL240	ガス 1-5 V/FS	
	(GRAPHTEC)	熱電対測定範囲:-200 <ts≦1370℃< td=""></ts≦1370℃<>	
		湿度測定範囲: 0~100 %	

表 5-1-1 小規模試験装置に用いた機器の仕様

5.1.2 実施方法

小規模容器による基礎試験の実施条件を表 5-1-2 に示す。

No	土壌層構成 厚さ[mm]		損傷形状	故出位置	供給	
INO.	真砂土	砕石	アスファルト	(放出口形状)	成山匹邑	沉重 [L/min]
1-(1)	500	_	_		Ph1	
1-(2)	500	_	—		Ph2	
1-(3)	500 (仕切板から 幅 30 mm 転圧なし	_	_	ピンホール φ1.0 mm	Ph1	1.93
1-(4)	500 (仕切板から 幅 30 mm 転圧なし	_	_		Ph2	

表 5-1-2 小規模容器による基礎試験条件

表 5-1-2 に示した各条件について、地中水素濃度分布及び大気中水素濃度分布(直交方向及び平行方向)を計測した。

条件 1-(1)及び 1-(2)では、真砂土層が十分転圧された場合の垂直構造体の影響を評価す るため、実フィールド試験装置真砂土層と同一の土壌状態(表 4-1-1)となるよう調整し 真砂土を充填した。

条件 1-(3)及び 1-(4)では、垂直構造体近傍の転圧が不十分な場合を模擬し、仕切板から 30 mm の範囲を十分に転圧した状態から掘り返し、転圧することなく埋め戻して地中及 び大気中の水素ガスの濃度経時変化の計測を行った。掘り返し後の状況を図 5-1-5 に示 す。一般的に、土壌と垂直構造体との境界は、転圧機械が十分に寄ることができず、転圧 不足になり易い箇所であると考えられる。また、十分に転圧した場合と転圧なしの場合 の真砂土層の空隙率は表 5-1-3 の通りである。

表 5-1-3 土壌条件による空隙率の比較

条件	空隙率[%]	
十分に転圧した範囲		
(実フィールド試験真砂土層と同値)	25.7	
転圧なしの範囲		
(仕切板から 30 mm の範囲)	30.4	



図 5-1-5 仕切板近傍の真砂土層掘り返し後の状況

小規模試験における水素供給流量は、本年度実フィールド試験における水素放出量と同じ 1.93 L/min に統一して実施した。

試験の実施に当たっては、まず、容器内全体を窒素パージし、地中模擬層及び大気模擬 層がすべて窒素雰囲気となってから調整及び計測を行った。

具体的な試験実施方法は以下のとおりである。

- 容器内を窒素パージする。
- ② マスフロー流量計の指示値を試験条件の流量に設定し、水素が所定の流量で放 出されることを確認する。バルブを閉じて窒素に切り替え、容器内を窒素パージする。
- ③ 窒素パージを停止し、データロガーのデータ取得を開始する。(更新周期:200 ms)
- ④ バルブを開いて水素を放出すると同時に大気計測を開始し、15分間計測する。
- ⑤ 放出開始後15分でバルブを閉じる。
- ⑥ データロガー停止、計測終了。
- ⑦ 窒素パージする。

真砂土層内の水素濃度については、前述の埋設水素センサにより水素濃度経時変化デ ータを取得した。センサ出力を水素濃度に変換するに当たっては、各センサごとに事前 に取得した検量線データに基づいて計算を行った。

次に、大気中水素濃度計測の手法について述べる。小規模試験大気模擬層内における 水素拡散挙動の計測は、実フィールド試験同様、レーザを光源とするラマン分光法によ り行った。レーザは、表 5-1-1 に示したとおり、パルス Nd:YAG レーザの第3高調波(波 長 355 nm)を使用した。レーザの発振周波数は 30 Hz であり、パルス 30 shot をカメラ の CCD 上で積算して1フレームのデータとした。従って、小規模試験における大気計測 の更新周期は1 fps である。検出器である EM-ICCD カメラは、レーザ装置から出力さ れるトリガ信号を入力することにより、レーザパルスと同期して画像を取得できるよう、 ゲートのタイミングを調整した。カメラに到達した光は、ラマン分光用エッジフィルタ によりレーザ波長成分が除去され、水素ガスのストークスラマン散乱波長 416 nm に対 応するバンドパスフィルタを通過することにより、水素ガスによるラマン散乱光のみが 選択的に検出される。レーザ光は真砂土表層から高さ 20 mm の位置に照射した。カメラ 画像の解析に当たっては、レーザ光軸上の 10×10 ピクセルの部分の平均輝度を計算し、 それをもとに水素濃度を求めた。カメラの画素1ピクセル当たりの観測範囲は0.554mm であったので、大気濃度解析の空間分解能は、5.54 mm である。小規模試験における大 気中水素濃度解析範囲を、図 5-1-6 に示す。水素濃度は、大気模擬層内が窒素 100%の場 合に取得した窒素ラマン散乱の輝度をもとに算出した。



図 5-1-6 小規模試験大気解析範囲

5.1.3 試験結果

本項に示す試験結果においては、図 5-1-7 に示す通り、容器底面の円中心を原点とする 座標(単位:mm)を設定し、センサ埋設点の位置を表現することとする。



図 5-1-7 センサ埋設点の座標設定

(1) 真砂土層全体が十分に転圧されている場合(条件 1-(1)、1-(2))

Ph1 から水素放出した場合の地中水素濃度経時変化について、X=-125 断面のセン サ(①、③、⑥、⑧、⑩、③、⑤、⑦、⑨)の経時変化を図 5-1-8 に、X=125 断面の センサ(②、⑤、⑦、⑨、⑫、⑭、⑥、⑱、⑳)の経時変化を図 5-1-9 に、X=0 断面 のセンサ(④、⑪)の経時変化を図 5-1-10 にそれぞれ示す。



図 5-1-8 真砂土層全体が十分に転圧されている場合の地中水素濃度経時変化 (Ph1 から放出した場合、X=-125 断面)



図 5-1-9 真砂土層全体が十分に転圧されている場合の地中水素濃度経時変化 (Ph1から放出した場合、X=125 断面)



図 5-1-10 真砂土層全体が十分に転圧されている場合の地中水素濃度経時変化 (Ph1から放出した場合、X=0断面)

次に、Ph2 から水素放出した場合の地中水素濃度経時変化について、X= -125 断面 のセンサ(①、③、⑥、⑧、⑩、⑬、⑮、⑰、⑲)の経時変化を図 5-1-11 に、X= 125 断面のセンサ(②、⑤、⑦、⑨、⑫、⑭、⑯、⑱、⑳)の経時変化を図 5-1-12 に、X= 0 断面のセンサ(④、⑪)の経時変化を図 5-1-13 にそれぞれ示す。

また、水素放出開始から 200 秒後の仕切板に直交する方向及び平行な方向の大気中 水素濃度分布計測結果を図 5-1-14、図 5-1-15 に示す。



図 5-1-11 真砂土層全体が十分に転圧されている場合の地中水素濃度経時変化 (Ph2 から放出した場合, X=-125 断面)



図 5-1-12 真砂土層全体が十分に転圧されている場合の地中水素濃度経時変化 (Ph2 から放出した場合, X=125 断面)



図 5-1-13 真砂土層全体が十分に転圧されている場合の地中水素濃度経時変化 (Ph2 から放出した場合, X=0 断面)



図 5-1-14 大気中水素濃度分布(放出開始から 200 秒、直交方向、全転圧)



図 5-1-15 大気中水素濃度分布(放出開始から 200 秒、平行方向、全転圧)

(2) 仕切板近傍を無転圧とした場合(条件1-(3)、1-(4))

仕切板近傍 30 mm を無転圧とし、Ph1 から水素放出した場合の地中水素濃度経時 変化について、X=-125 断面のセンサ(①、③、⑥、⑧、⑩、⑬、⑮、⑰、⑲)の経時 変化を図 5-1-16 に、X= 125 断面のセンサ(②、⑤、⑦、⑨、⑫、⑭、⑯、⑱、⑳) の経時変化を図 5-1-17 に、X=0 断面のセンサ(④、⑪)の経時変化を図 5-1-18 にそ れぞれ示す。



図 5-1-16 仕切板近傍を無転圧とした場合の地中水素濃度経時変化 (Ph1 から放出した場合、X=-125 断面)



図 5-1-17 仕切板近傍を無転圧とした場合の地中水素濃度経時変化 (Ph1から放出した場合、X=125断面)



図 5-1-18 仕切板近傍を無転圧とした場合の地中水素濃度経時変化 (Ph1 から放出した場合、X=0 断面)

次に、仕切板近傍 30 mm を無転圧とし、Ph2 から水素放出した場合の地中水素濃 度経時変化について、X=-125 断面のセンサ(①、③、⑥、⑧、⑩、⑮、⑰、⑲) の経時変化を図 5-1-19 に、X=125 断面のセンサ(②、⑤、⑦、⑨、⑫、⑭、⑯、⑱、 ⑳)の経時変化を図 5-1-20 に、X=0 断面のセンサ(④、⑪)の経時変化を図 5-1-21 にそれぞれ示す。

また、水素放出開始から 200 秒後の仕切板に直交する方向及び平行な方向の大気中 水素濃度分布計測結果を図 5-1-22、図 5-1-23 に示す。



図 5-1-19 仕切板近傍を無転圧とした場合の地中水素濃度経時変化 (Ph2 から放出した場合、X=-125 断面)



図 5-1-20 仕切板近傍を無転圧とした場合の地中水素濃度経時変化 (Ph2 から放出した場合、X=125 断面)



図 5-1-21 仕切板近傍を無転圧とした場合の地中水素濃度経時変化 (Ph2 から放出した場合、X=0 断面)



図 5-1-22 大気中水素濃度分布(放出開始から 200 秒、直交方向、一部転圧なし)



図 5-1-23 大気中水素濃度分布(放出開始から 200 秒、平行方向、一部転圧なし)

5.1.4 考察

前項に示した試験結果を基に、真砂土層中の垂直構造体が水素拡散に及ぼす影響について考察する。

まず、地表面付近に配置したセンサに着目し、地中水素濃度計測結果を整理した結果 を図 5-1-24、図 5-1-25 に示す。仕切板直近の Ph1 から水素ガスを放出した場合と仕切 板からの離隔距離 100 mm の Ph2 から水素ガスを放出した場合について、放出開始から 400 秒後の濃度値を比較したところ、両者共、仕切板面近傍のセンサ(図中⑥、⑦)の濃 度値はその他の位置のセンサ(図中⑬、⑭、⑲、⑳)の濃度値と同レベルであり、仕切板 の近傍を優先的に水素ガスが流れる挙動は確認されなかった。土壌層全体を十分に転圧 した理想的な場合には、壁面に沿う方向に流路は形成されず、壁面を優先的に水素ガス が流れる現象は生じないものと考えられる。



図 5-1-24 地表面近傍の水素ガス濃度 (Ph1 から放出した場合、放出開始から 400 秒)



図 5-1-25 地表面近傍の水素ガス濃度 (Ph2 から放出した場合、放出開始から 400 秒)

次に、X= -125 断面上の 9 個のセンサに着目し、容器内の土壌全体を十分に転圧した 条件(全転圧)と、仕切板近傍の幅 30 mm を転圧しない条件(一部転圧なし)を比較し た結果を図 5-1-26~5-1-29 に示す。また、同一の放出口から水素放出した場合の、転圧 条件変更前後での大気計測結果の比較を、図 5-1-30 及び図 5-1-31 に示す。



図 5-1-26 X= -125 断面における水素濃度 (Ph1 から放出した場合、放出開始から 200 秒、全転圧)



図 5-1-27 X=-125 断面における水素濃度 (Ph2 から放出した場合、放出開始から 200 秒、全転圧)



図 5-1-28 X=-125 断面における水素濃度 (Ph1 から放出した場合、放出開始から 200 秒、一部転圧なし)



図 5-1-29 X=-125 断面における水素濃度 (Ph2 から放出した場合、放出開始から 200 秒、一部転圧なし)



図 5-1-30 大気中水素濃度分布 (Ph1 から放出した場合、放出開始から 200 秒、直交方向)





転圧なしの範囲に位置する Ph1 から水素ガスを放出した場合、容器全体を十分に転圧 した場合と比較して仕切板近傍に設置したセンサ濃度値が高くなり、それ以外の箇所の 濃度値が概ね低くなる傾向にあった。また、大気計測の結果からも、仕切板近傍が無転圧 の場合には、水素が仕切板近傍を優先的に拡散していることが分かる。

これらのことから、実現場において、垂直構造体近傍に転圧不足の範囲が生じた場合、 転圧不足の範囲を優先的に水素ガスが拡散する可能性がある。また、転圧不足の範囲で 水素漏えいが生じた場合、水素濃度が局所的に高くなる可能性が考えられる。

5.2 アスファルト層における構造体の影響確認試験

5.2.1 試験装置の設計製作

実フィールド試験における水素拡散挙動の観測へ向けた事前検討として、アスファル ト層における地中障害物の有無がガス拡散挙動に及ぼす影響の確認を目的とする小規模 試験装置を設計製作した。装置の構造を図 5-2-1 に、装置外観を図 5-2-2 にそれぞれ示 す。



図 5-2-1 アスファルト層における構造体の影響確認試験装置の構造



図 5-2-2 アスファルト層における構造体の影響確認試験装置の外観

試験装置はコンクリート壁で囲った円柱のアスファルト層から構成される。アスファ ルト層は直径 \$\operatorname{1.0} m、厚み 150 mm からなり、深さ 50 mm の穴を 10 点設けた。各穴に 垂直に SUS 管を配し、変性シリコンコーキングにて固定した。穴の位置はアスファルト 中心及び、中心から同心円状に \$\operatorname{250 mm}, \$\operatorname{375 mm}, \$\operatorname{490 mm} & 3 箇所ずつとした。 計測の際に計測点に配した SUS 管に流量計、圧力トランスミッタを接続した。計測対象 としない SUS 管にはエンドキャップを接続し、ガスが流れないように配慮した。

以上の試験装置を用いて、垂直構造体(コンクリート壁)の有無によるガス拡散挙動の 違いを確認する基礎試験を実施した。

5.2.2 実施方法

具体的な試験実施方法は以下のとおりである。

- ① 計測点のSUS管に流量計、圧力トランスミッタを接続する。計測対象としない SUS管にエンドキャップを接続し封止する。
- ② データロガーのデータ取得を開始する。(更新周期: 200 ms)
- ③ マスフロー流量計の指示値を所定の流量に設定し、バルブを開いて窒素ガスを アスファルト層内に流入させる。
- ④ 一定時間圧力データを取得後、水素の流量を変化させ同様にデータを取得する。 これを計3回行う。
- ⑤ データロガー停止、計測終了。

5.2.3 試験結果

前項に示した方法で取得したガス流量と圧力の関係から、各計測点でのガス透過性の 程度を評価した結果を、表 5-2-1 に示す。アスファルト層の中心である計測点⑩における ガス透過性を基準とし、その相対値をまとめた。相対値は大きい程ガスが透過しやすい ことを示す。

	中心からの距離[mm]	計測点⑩に対する相対値
\bigcirc		14.82
2	490	34.99
3		25.96
4		2.52
5	375	2.33
6		2.30

表 5-2-1 各計測点のガス透過特性の比較

$\overline{\mathcal{O}}$		4.70
8	250	2.37
9		1.62
10	0	1

コンクリート壁面近傍の計測点①、②、③の計測結果みると、他の各計測点と比べ、ガ スを透過し易い傾向であった。

5.2.4 考察

アスファルト層における構造体(垂直構造体)の影響確認試験においては、表 5-2-1 に 示す通り、壁面近傍(計測点①、②、③)とそれ以外の箇所では、計測点ごとにバラツキ は見られるものの、ガス透過性が概ね 10 倍程度変わる結果となった。このことから、垂 直構造体近傍すなわちアスファルト層とコンクリート壁の境界付近では、それ以外の場 所に比べ、ガスが透過しやすい状況となっていると考えられる。

実現場においても、基本的には本試験と同様の状態となっていると考えられ、道路の 目地や建築物の近傍等、アスファルト層の境界付近では、ガスの拡散が早まったり、流路 が形成されたりする可能性に留意する必要があると考えられる。

5.3 まとめ

本章では、地中及び大気中を模擬した小規模容器を製作し、真砂土層及びアスファル ト層における構造体による水素ガス拡散挙動への影響を確認する基礎試験を実施し、以 下の結果を得た。

- ・全体が十分に転圧された真砂土層においては、垂直構造体の壁面付近を優先的に水素 が流れる現象は確認されなかった
- ・ 垂直構造体近傍に転圧不足が生じると、転圧不足の範囲を優先的に水素が拡散する可 能性がある
- アスファルト層と垂直構造体の境界付近では、他の箇所に比べ、ガスが透過しやすくなっている場合があり、水素拡散挙動に影響を及ぼす可能性がある

本章の試験結果から考えると、土壌内の転圧不足の範囲内で水素漏えいが発生した場 合、水素濃度が局所的に高くなる可能性があることに留意が必要であると考えられる。6 章の実フィールド試験では、施工時に垂直構造体近傍を十分に締め固めたため、極端な 転圧不足の部分は存在しないと考えられることから、壁面近傍に特殊な条件を与えずに シミュレーション解析を実施することとした

6. 地中及び大気中の水素濃度分布計測(実フィールド試験)

6.1 実フィールド試験装置の製作

6.1.1 地中模擬層及び気密ブースの設計製作

本調査において設計製作した実フィールド試験装置の概要を図 6-1-1 に示す。設計に 当たり、計測方法に関する留意事項や総合調査受託事業者等からの助言を踏まえ、以下 の点に配慮した。

- 地中模擬層に用いる土壌は一般的な埋設土を用い、埋設土上に一般的な道路構造
 部へ使用される舗装を施した。
- ・ 埋設土については真砂土を用いるが、本調査においては水素の基礎的な拡散挙動 を計測し、シミュレーション解析の再現性を評価することが目的であるため、比較 的含水比の低い土壌を充填し水分の影響が少ない状態にて計測を実施した。
- ・ 舗装については 2.2 節 舗装条件の決定にて述べたとおり、実現場の舗装構造の多くは、2 層の路盤(下層路盤、上層路盤)の上に2 層のアスファルト(基層、表層)を施すが、本調査においては舗装を施した条件下における水素の基礎的な拡散挙動を計測し、シミュレーション解析の再現性を評価することが目的であることに加え、平成 30 年度に実施した地中障害物がない場合の試験結果と比較するため、平成 30 年度と同様に各層を単層化し、路盤1層、アスファルト1層として計測を実施した。
- ・ 地中模擬層の形状は転圧の際の強度保障の観点から円筒形とし、直径については、
 平成 29 年度に実施した真砂土のみ(舗装なし)の場合及び平成 30 年度に実施した
 地中障害物がない場合の試験結果を比較するため、平成 29、30 年度と同径の\$\phi7.0
 m とした。
- ・ 地中模擬層には、防護板等の水平障害物を模擬した水平構造体と、地中建築物等の壁面を模擬した垂直構造体を設置した。
- ・ 実運用で用いられている SUS 製の 32A 導管を、実運用のガス導管埋設の土壌層 深さを想定して、地表面から放出点までの埋設深さを 1.2 m として地中模擬層内に 設置した。
- ・ 導管には、外部から開閉可能な機構を有した \$1.0 mm のピンホール(水素放出口) を施工した。
- ・ 導管は計3本地中模擬層内に埋設し、水平構造体下、垂直構造体からの離隔距離 1.0 m 及び垂直構造体直近に放出点が位置するよう設置した。
- ・ 大気中を模擬する気密ブースは、水平方向寸法及び容積を地中模擬層より大きく 設定し、大気解放状態への水素拡散を模擬するよう考慮し、幅 8.0 m×奥行 8.0 m ×高さ 3.0 m として製作した。
- ・ 気密ブースは試験場へ水素が漏えいしないよう配慮し、前述したラマンイメージ ングにより大気中における水素濃度分布計測を実施するための、レーザ光の導入・

射出窓(石英製)を気密ブース側面に設けた。

- レーザ光照射により発生する水素のラマン散乱光をレーザ光軸に直交する方向からICCDカメラ(高感度カメラ)により計測するため、レーザ光導入・射出窓を施工した壁面に対し垂直な面に観測窓を施工した。
- ・ 観測窓は波長 355 nm のレーザ光を照射した場合の水素分子のラマン散乱波長 (416 nm)に対し高い透過特性を持つ必要があるため、観測波長において分光透過 特性が良い透明ガラス材を用いた。
- レーザ装置を2台、ICCDカメラを2台用い、それらを同期させ、地表面から高さ20mmと50mmの大気中水素濃度分布を計測した。



図 6-1-1 実フィールド試験装置概要

図 6-1-2 に地中模擬層の構成を示す。地中模擬層のコンクリート壁は内径 \$7.0 m×高 さ 1.35 m であり、真砂土層 0.7 m、砕石層 0.35 m、アスファルト層 0.15 m として、深 さ 1.2 m から水素を放出した。地中には図 6-1-2 に示すとおり、幅 1.0 m の水平構造体 と垂直構造体を設置した。これらの構造体の配置は、前年度までの調査結果及び事前シ ミュレーションに基づき設定した。水平構造体下に水素放出点 A、垂直構造体からの離 隔距離 1.0 m の位置に水素放出点 B、垂直構造体直近に水素放出点 C が位置するよう、 3 本の SUS 製 32A 導管を埋設した。水平構造体は水素放出点 A から高さは 0.3 m の位 置に設置した。導管には外部から開閉可能な直径 \$1.0 mm のピンホール(水素放出口) を施工した。埋設導管の構造に関する詳細は次節で述べる。



図 6-1-2 地中模擬層構成

図 6-1-3 に地中模擬層の製作工程を示す。実フィールド試験における安全性を確保す るため、地中模擬層及び気密ブースを窒素パージし、水素と酸素を混合させずに試験を 実施した。そのため、埋設導管に影響を及ぼさない地中模擬層底部に窒素パージライン を円筒形の中心から放射状に 16 本配置した(図 6-1-2(b))。



(a)

(b)





図 6-1-3 地中模擬層の製作工程 (a)垂直構造体施工後、(b)ガス導管敷設後、(c)水平構造体設置後 (d)真砂土敷設後、(e)砕石敷設後、(f)アスファルト施工後

また、気密ブースの外観を図 6-1-4 に示す。前述したとおり、気密ブースには 355 nm のレーザ光を照射した際の水素ラマン散乱波長(416 nm)において透過性が高く、カメ ラの視野を遮ることのないサイズ(幅 5.0 m×高さ 1.5 m)のガラス窓板を施工した。地 中模擬層内に 16 本の窒素パージラインを設けたが、大気側の窒素パージを速やかに行う ため、気密ブース壁面にも4箇所(4隅下方)の窒素パージロを設けた。



図 6-1-4 気密ブースの外観

6.1.2 埋設導管の設計製作

本調査における実フィールド試験において使用した水素放出機構の構造を図 6-1-5 に、 外観を図 6-1-6 に示す。

水素放出機構は、呼び径 32A の SUS 導管の内部に可動式のピストンが内蔵された構 造となっており、ピストン左右の空間の圧力差によってピストンを可動させることによ り、水素放出口の開閉を行う。左右の圧力差は、窒素ガスの導入もしくは真空ポンプによ る減圧により行った。この手法を用いることにより、水素ガスの着火源となりうる電気 的な機器を一切使用せずに水素の放出をコントロールできるため、万が一の場合の安全 性を高めることができる。

導管の破断を模擬した水素放出口は、∲1 mmのドリルで導管中央上面に穿孔し製作した。製作した水素放出口A、B、Cの外観を図 6-1-7 に示す。

製作した水素放出用導管を実フィールド試験土壌層へ埋設した。埋設状況を図 6-1-8 に、 放出口近傍の埋設概要を図 6-1-9 に示す。放出口が底板(鉄板)から高さ 150 mm に位 置し、かつ上方を向くよう、埋設導管を設置調整した。水素放出口の上部には、目詰まり 防止のため、目開き 0.28 mm の SUS304 製メッシュを取り付けた。


図 6-1-5 実フィールド試験水素放出機構





(c)

図 6-1-6 水素放出機構外観 (a)試験に用いた放出部(下からA、B、C)、(b)ピストン (c)メッシュ取付後の水素放出口近傍



(a)



(b)



(c)

図 6-1-7 水素放出口外観 (a)放出口 A、(b) 放出口 B、(c) 放出口 C



(a)



(b)
 図 6-1-8 水素放出導管の埋設状況
 (a)全体、(b) 垂直構造体近傍



図 6-1-9 埋設導管設置概要(放出口近傍)

6.1.3 安全対策

本調査は、水素を用いて試験を行う。水素は、着火エネルギが低く、爆発濃度範囲が広い可燃性ガスであるため、試験時の十分な安全対策が必要である。本節では、実フィール ド試験を安全に実施するために施した安全対策について述べる。

(1) 安全対策

ここでは、本調査において生じる事象に対し、燃焼の構成要件を照らし合わせ、確

実に安全性が確保できる方法を選定した。

① 可燃性物質:水素

試験の過程において、水素が燃焼(爆発)条件を満たす状態が頻繁に生じるもの と想定される。特に、地中における放出口近傍では常時水素濃度 4~75%の状態で あると予想される。

② 点火源:静電気放電等

地中模擬層内に真砂土、砕石、アスファルトを敷設し、地中模擬層内及び気密ブ ース内にはドライガスを常時流動させる。また、地中には水素センサが埋設されて いる。これらの条件で、静電気放電等の点火源の発生を完全に防止することは困難 である。

③ 支燃物質:酸素(空気)→窒素

地中模擬層及び気密ブース内を無酸素環境とすることで、水素及び点火源が存在 する状態においても着火を完全に防止することができる。即ち、地中模擬層及び気 密ブース内の初期状態を窒素ガス 100%とすることで、無酸素状態が実現でき、安 全性が確保できる。本調査の想定は大気環境下における水素拡散挙動であるが、大 気の約 80%は窒素分子で構成されており、分子量で比較しても、大気:28.8 g/mol、 窒素:28 g/mol であり、その差は僅かであることから、水素拡散挙動への影響は概 ね大気の場合と一致するものと考えることができる。

以上の検討に基づき、本調査では試験環境を窒素雰囲気とすることで安全性を確保 することとした。図 6-1-10 に実フィールド試験装置の安全設備概要を、図 6-1-11 に 試験場の安全設備概要を示す。また、図 6-1-12 に安全設備の外観を示す。

試験開始時における地中模擬層及び気密ブース内の無酸素状態の確認については、 図 6-1-10 に示す気密ブース天井部 3 箇所の酸素センサの指示値により無酸素状態を 確認した後、水素の導入を開始した。試験終了時は、水素供給停止後速やかに地中模 擬層及び気密ブース内を窒素パージし、気密ブース天井部 3 箇所及び排気口の水素セ ンサの指示値により水素が存在しないことを確認した後、次の条件における試験を実 施した。また、設置した計測器の確認等で気密ブースへ立ち入る必要のある場合は、 地中模擬層及び気密ブースを窒素パージした後、気密ブース天井部 3 箇所の水素セン サの指示値により水素が存在しないことを確認し、更に窒素パージロから大気を注入 して、酸素センサの指示値により気密ブース内が大気に置換されたことを確認してブ ースの出入り口を解放した。

加えて、万一の気密ブースからの水素又は窒素漏えい時の対策として、図 6-1-8 に 示す試験場の4箇所の排気口全てに水素センサ及び酸素センサを配置し、窒素パージ 時と試験時は常時監視を行った。また、試験場の押込通風機は常時運転状態とし、試 験場内を換気した。



図 6-1-10 実フィールド試験装置の安全設備概要



図 6-1-11 試験場の安全設備概要

9 577					APRESS.	
秋場		プース		正常動作	H B2	O B2
H M1	O M1	H B1	0 B1			
2.13 ppm	20.97 %	0.01 %	0.07 %	水素濃度モニタ表示 H B2 ・		
H M2	O M2	H B2	0 B2	0 B2 *		
0.03 ppm	20.97 %	0.00 %	0.00 %	データ収集中		
H M3	O M3	H B3	0 B3		0 00 %	0 00 %
-2.21 ppm	20.93 %	0.00 %	-0.01 %		0.00 /0	0.00 /0
H M4	O M4	H B4	0 B4			
-1.52 ppm	20.98 %	0.05 %	2.80 %			
				データ収集設定		
データ収集終了 警告警報発報 設定値 プース H2 20000 以上 0R 02 18:00 以下 プース H2 20000 以上 AND 02 500 以上			警报·警告先報道設定			
(-)					(1	.)
(a)					())/





(d)



図 6-1-12 安全設備の外観 (a)全センサ監視画面、(b)拡大表示モニタ、(c)パトライト、(d)信号処理部 (e)試験場内監視用ガスセンサ、(f)気密ブース内監視用ガスセンサ

図 6-1-13 に安全設備の警報発報条件を示す。気密ブース内は試験前に窒素パージを 行い、無酸素状態で試験を実施する。試験中はブース内の水素濃度が上昇するが、無 酸素状態であるため着火することはない。しかし、何らかの原因で気密ブースが大気 と繋がり、水素濃度と酸素濃度の両者が閾値を超過する状態になった場合、水素警報 器及び酸素警報器が警報を発報する。また、気密ブースやガス供給系から水素が漏え いし、試験場内の水素濃度が閾値を超過した場合には、水素警報器が警報を発報する。 試験場内に水素又は窒素が漏えいし、試験場内の酸素濃度が閾値未満となった場合、 酸素警報器が発報する。

水素警報器が発報した場合、安全設備からガス供給系の水素緊急遮断装置へ異常設 定信号が出力され、即座に水素の供給を遮断する。気密ブース内の異常であれば、速 やかに窒素パージを開始し、水素濃度及び酸素濃度が正常となるまで監視する。試験 場内の異常である場合、常時運転状態としている押込通風機により、試験場内が十分 に換気され、水素濃度が正常となるまで試験場には立ち入らない。

酸素警報器のみが発報した場合には、屋外のボンベ庫にてガスの供給を手動で停止 し、水素漏えいの場合と同様に常時運転状態としている押込通風機により、試験場内 が十分に換気され、酸素濃度が正常となるまで試験場には立ち入らない。



図 6-1-13 安全設備の警報発報条件

(2) ガス供給系

実フィールド試験のガス供給系の構成を図 6-1-14 に、ガス供給系の外観を図 6-1-15 に示す。

ガス供給系は、屋外に設置したボンベ庫、試験場内に設置したアウトレットユニットおよびガス放出点切換操作盤により構成される。アウトレットユニット(図 6-1-15(f))は、調圧器及びガス緊急遮断装置(ガスシャッタ接点)より成る。

ボンベ庫内には、液化窒素ボンベ3本×2系統と、半自動切換減圧弁付の水素ボン ベ2本を格納した(図 6-1-15(a))。窒素パージ中に液化窒素の系統の切換が必要な場 合は手動にて切換を行うが、水素については、試験中に水素ボンベの切換が必要とな った場合においても、速やかに予備ボンベから水素が供給されるよう配慮した。水素 及び窒素はボンベ庫内の圧力調整器を介し(図 6-1-15(c)、(e))、アウトレットユニッ トの圧力調整器にて所定の圧力まで減圧し気密ブース内へ導入する。パージ用の窒素 ガスは、図 6-1-15(d)に示した 20 個の流量計(地中模擬層内パージライン×16 個、気 密ブース壁パージロ×4 個)を介し放出した。また、水素の流量については、アウト レットユニットの圧力調整器の下流に配置した流量計により計測した(図 6-1-15(f))。

ガス緊急遮断装置は、気密ブース外壁に設置した地震計が異常を発報する又は前述 した安全設備の水素警報器が発報した場合、水素供給系に設置したエアー駆動弁に計 装用窒素ボンベから窒素が供給され、即座に水素供給を遮断する仕組みとした。



図 6-1-14 ガス供給系構成図



(a)

(b)



(c)

(d)



(e)



(f)



(a)ボンベ庫、(b)地震計、(c)窒素供給系、(d)流量計(パージ用窒素)、(e)水素供給系 (f) アウトレットユニット(圧力調整器・ガスシャッタ接点)及びガス放出点切替操作盤

(3) 水素の排気方法

気密ブース内への水素の放出に伴い、屋外排気口から窒素ベースの水素混合ガスが 流出する。本試験では、大気の揺らぎや風の影響がない理想的な状態における水素拡 散挙動を計測することを目的としているため、本来であれば、容器内への水素の導入 に伴って気密ブースから押し出される気体に外力を及ぼすことなく大気へ開放放出 することが理想的である。大気放出するに当たっては、水素濃度を爆発下限界である 4%以下に十分希釈する必要がある一方で、排気系への希釈用窒素の導入が、気密ブー ス内からの気体の放出を抑制或いは促進した場合、本来の水素拡散挙動が再現されな い。即ち、本試験では、気密ブースから放出される気体の流れに影響を与えない希釈 排気方法が必要である。ここでは、図 6-1-16 に示す手法を用いて、水素濃度を 2%以 下に希釈し、排気を行った。

気密ブースからの排気系を2分岐し、排気口を下流側とし、上流側から希釈用窒素 ガスを導入し、気密ブースから放出された水素と混合する。この時、ブース内は大気 圧に設定されているため、そのまま混合させると希釈用窒素ガスは排気系下流側へ流 れると共にブース内へも流入し、容器内圧を上昇させる。したがって、ここでは排気 系下流側に吸引放出器を配置し、上流側からの希釈用窒素の流れを下流側へ誘導した。 同様に吸引放出器の作用が気密ブース内に及んだ場合、容器内圧が低下する。これら の希釈排気系の影響は、いずれも気密ブース内圧力として確認することができること から、気密ブース壁面に微差圧計を設置し、大気圧との差圧を常時監視した。希釈用 窒素ガス流量は、本試験において最も水素濃度が上昇する供給流量 5.54 L/min の条 件において排気ガス中の水素濃度が 2%以下となるように設定した。これに対し、吸 引放出器の吸引量を気密ブース内圧力が大気圧を維持するように調節することで、水 素拡散挙動に影響を及ぼすことなく、排気する水素を希釈し、安全に排気できる希釈 排気方法を実現した。

また、図 6-1-17 に示すとおり、排気口直前にはフレームアレスタを組み込み、万一 の着火に備えた逆火防止機能を付加した。

77



図 6-1-16 本試験における水素希釈排気方法



図 6-1-17 フレームアレスタ内蔵排気口外観

6.2 実フィールド試験装置構成

3 章で述べた地中及び大気中の水素濃度計測装置及び前節に示した本調査における試験装置の各要素を統合した、全体の装置構成を図 6-2-1 に示す。気密ブース内に配置されるセンサは、

- 地中水素濃度計測用:気体熱伝導式ガスセンサ
- ・ 水素放出条件観測用: 圧力センサ、温度センサ
- ・ 保安監視用:酸素センサ、気体熱伝導式ガスセンサ(水素センサ)
- ・ 気密ブース内環境監視用:温度センサ、圧力センサ、湿度センサ

であり、これらの出力とガス供給に係る流量計の出力をデータロガーにより記録した。 用いたセンサ及び記録計の仕様を表 6-2-1 に整理した。また、ICCD カメラによる大気中 水素可視化画像は、専用の PC に画像として記録した。

実フィールド試験装置外観を図 6-2-2、大気中濃度計測表示部外観を図 6-2-3、地中濃 度計測装置表示部外観を図 6-2-4、レーザ装置外観を図 6-2-5、ICCD カメラ外観を図 6-2-6 にそれぞれ示す。



図 6-2-1 試験装置の全体構成

名 称	型 式 (メーカー)	主な仕様
流量計	8500MM-0-2-1/20SLM	流量レンジ : 0~20 L/min
(水素用)	(KOFLOCK)	センサ方式:熱式巻線センサ
		測定精度:±1.0%FS
流量計	RK20T-V-1/4-N2-50L/MIN	流量レンジ : 5~50 L/min
(窒素用)	(KOFLOK)	センサ方式:フロート式
		測定精度:±6.0%FS
圧力センサ	KP15-17G	圧力レンジ : 0~20 kPa
(水素供給圧力観測)	(長野計器)	センサ方式:感圧素子
		測定精度:±0.35%FS
圧力センサ	KP15-17G	圧力レンジ : ±50 kPa
(気密ブース内監視)	(長野計器)	センサ方式:感圧素子
		測定精度:±0.25%FS
圧力センサ	KP15-17G	圧力レンジ : -100~500 kPa
(ピストン移動用窒素)	(長野計器)	センサ方式:感圧素子
		測定精度:±0.25%FS
デジタル微差圧計	GC62	圧力レンジ : ±200 Pa
	(長野計器)	センサ方式:シリコン・キャパシタンス
		測定精度:±1.5%FS(差圧表示)
温度センサ	KT6YA	K熱電対
	(CHINO)	
酸素センサ	OC-6B	検知範囲:0~100%
	(光明理化学工業)	センサ方式:ガルバニ電池式
		応答時間:90%10秒以内
湿度センサ	HM1500LF	検知範囲:0~100 %RH
	(Measurement Specialties)	センサ方式:静電容量型
		測定精度:±5.0%RH
データロガー	GM10-1J0/C8/E1	電圧測定範囲:±1V、±6 V/FS
(データ収集)	GM90PS-1N1M0	熱電対測定範囲:-270 <ts≦1370℃< td=""></ts≦1370℃<>
	GX90XA-10-U2N-3N	湿度測定範囲:0~100%
	(横河電気)	

表 6-2-1 試験装置に用いた機器の仕様



ガス供給系 ICCDカメラ センサ出力収集ユニット ラマン画像取得PC 安全装置モニタ

図 6-2-2 実フィールド試験装置外観







図 6-2-4 地中濃度計測表示部外観



図 6-2-5 レーザ装置外観



図 6-2-6 ICCD カメラ外観

6.3 実フィールド試験における地中水素濃度分布計測

本節では、地中模擬層内の真砂土層及び砕石層中に 60 点埋設した気体熱伝導式水素センサによる地中水素濃度の計測結果を示すと共に、地中障害物が存在する条件下におい て漏えいした水素の地中における挙動について考察した。

6.3.1 水素センサの配置

本調査における地中水素濃度計測では、気体熱伝導式ガスセンサを直接真砂土中に埋設した。地中水素濃度計測における地中模擬層内におけるセンサ配置(側面図)を図 6-3-1に、センサ配置(上面図)を図 6-3-2に示す。

本試験では、地中水素濃度計測と同時に、大気中におけるレーザ計測による水素濃度 計測を行う。地中の水素濃度分布と大気中に染み出す水素濃度の関係性を確認するため、 レーザ光軸を含む面内(センサ埋設面)にセンサを埋設した。

図 6-3-1 に示すとおり、センサ埋設面へは 0.2 m 間隔のグリッド上に計測点として 54 点(センサ No. 1~54) センサを埋設した。加えて、図 6-3-2 に示すとおり、水平構造体 による奥行方向への水素拡散挙動の影響確認のため、水平構造体下の放出口からの高さ 0.2 m の位置に 2 点(センサ No. 55、56)、アスファルト層と砕石層の境界である放出口 からの高さ 1.05 m の位置に 4 点(センサ No. 57~60) センサを埋設し、合計 60 点のセ ンサにより地中水素濃度を計測した。

センサの配置は、センサ同士を水平面内或いは鉛直方向で互いに間隔をとって配置す ることにより水素拡散挙動への影響を抑制し且つ地中模擬層内全体を網羅できるよう配 慮した。



外径 42.7mm, 内径 35.5mm, 肉厚 3.6mm

図 6-3-1 地中水素濃度計測におけるセンサ配置(側面図)



図 6-3-2 地中水素濃度計測におけるセンサ配置(上面図)

6.3.2 地中水素濃度分布計測結果

本節では、図 6-3-1 及び図 6-3-2 に示したセンサ配置により表 2-1-1 に示した No. 2-(1) ~(6)の条件下において、水素放出開始から 24 時間実施した地中水素濃度計測結果について述べる。

(1) 水素放出点 A から放出した場合(水平構造体による影響確認)

本項では、水平構造体下に位置する水素放出点 A から水素を放出した場合について 述べる。表 2-1-1 に示した、No. 2-(1)(流量: 1.93 L/min)及び No. 2-(4)(流量: 5.54 L/min)の条件に該当する。

図 6-3-3 に水素放出点 A から 1.93 L/min で放出した場合の、放出開始から 1 時間、 2 時間、6 時間、12 時間、24 時間における地中水素濃度分布を示す。図 6-3-3 に示す コンター図は、放出口からの高さ 0 m の位置に埋設したセンサ点数が少ないことか ら、高さ 0 m の位置にセンサがなく、高さ 0.2 m の位置にセンサがある場合は、高さ 0.2 m の位置のセンサ出力値を高さ 0 m の位置に与えて描画した。以降に示す地中水 素濃度分布を表すコンター図は、同様の方法で描画したものである。



図 6-3-3 水素放出点 A から 1.93 L/min で放出した場合の地中水素濃度分布 (放出開始から 1 時間、2 時間、6 時間、12 時間、24 時間)

図 6-3-4 に水素放出点 A から放出した場合の地中水素濃度経時変化観測代表点を示 す。図 6-3-4 に示す観測代表点の流量 1.93 L/min の場合の水素濃度経時変化のうち、 放出口からの高さ 0.2 m 及び 0.4 m (真砂土層下層、中層)のセンサ No. 12、13、14、 23、24 を図 6-3-5 に、放出口からの高さ 0.6 m (真砂土層上層)のセンサ No. 30、 31、32 を図 6-3-6 に、放出口からの高さ 1.05 m (アスファルト層一砕石層境界)の センサ No. 45、46、47 を図 6-3-7 に示す。



図 6-3-4 水素放出点 A から放出した場合の地中水素濃度経時変化観測代表点



図 6-3-5 水素放出点 A から 1.93 L/min で放出した場合の 地中水素濃度経時変化 (センサ No. 12、13、14、23、24)



図 6-3-6 水素放出点 A から 1.93 L/min で放出した場合の 地中水素濃度経時変化 (センサ No. 30、31、32)



図 6-3-7 水素放出点 A から 1.93 L/min で放出した場合の 地中水素濃度経時変化 (センサ No. 45、46、47)

次に、図 6-3-8 に水素放出点 A から 5.54 L/min で放出した場合の、放出開始から 1 時間、2 時間、6 時間、12 時間、24 時間における地中水素濃度分布を示す。



図 6-3-8 水素放出点 A から 5.54 L/min で放出した場合の地中水素濃度分布 (放出開始から1時間、2時間、6時間、12時間、24時間)

図 6-3-4 に示した観測代表点の流量 5.54 L/min の場合の水素濃度経時変化のうち、 放出口からの高さ 0.2 m 及び 0.4 m (真砂土層下層、中層)のセンサ No. 12、13、14、 23、24 を図 6-3-9 に、放出口からの高さ 0.6 m (真砂土層上層)のセンサ No. 30、 31、32 を図 6-3-10 に、放出口からの高さ 1.05 m (アスファルト層ー砕石層境界)の センサ No. 45、46、47 を図 6-3-11 に示す。







図 6-3-10 水素放出点 A から 5.54 L/min で放出した場合の 地中水素濃度経時変化 (センサ No. 30、31、32)





図 6-3-3 及び図 6-3-8 の地中水素濃度分布に示したとおり、放出口上に水平構造体 がある場合、水平構造体により水素拡散が阻害され、構造体の下が高濃度となり、構 造体の両端から構造体上へ水素が回り込んでいく様子が確認された。

この挙動の特徴は、観測代表点における地中水素濃度経時変化について見ても明ら かである。図 6-3-5 及び図 6-3-9 では、構造体下のセンサ 12 について放出初期から急 激に濃度が上昇していることが分かる。図 6-3-6 及び図 6-3-10 では、真砂土層上層に おいて、水平構造体上に位置するセンサ 30 に比べ、水平構造端部付近上方に位置す るセンサ 31 の方が高濃度であること、また、図 6-3-7 及び図 6-3-11 では、アスファ ルト層-砕石層境界において、水平構造体上に位置するセンサ 45 と、水平構造端部 付近上方に位置するセンサ 46 がほぼ同等の濃度であることが確認された。

(2) 水素放出点 B から放出した場合(垂直構造体による影響確認)

本項では、垂直構造体から離隔距離 1.0 m に位置する水素放出点 B から水素を放出 した場合について述べる。表 2-1-1 に示した、No. 2-(2)(流量: 1.93 L/min)及び No. 2-(5)(流量: 5.54 L/min)の条件に該当する。

図 6-3-12 に水素放出点 B から 1.93 L/min で放出した場合の、放出開始から 1 時間、2 時間、6 時間、12 時間、24 時間における地中水素濃度分布を示す。



図 6-3-12 水素放出点 B から 1.93 L/min で放出した場合の地中水素濃度分布 (放出開始から1時間、2時間、6時間、12時間、24時間)

図 6-3-13 に水素放出点 B から放出した場合の地中水素濃度経時変化観測代表点を 示す。図 6-3-13 に示す観測代表点の流量 1.93 L/min の場合の水素濃度経時変化のう ち、放出口からの高さ 0.2 m(真砂土層下層)のセンサ No. 16、17、18、19、20、21 を図 6-3-14 に、放出口からの高さ 0.6 m(真砂土層上層)のセンサ No. 34、35、36、 37、38、39 を図 6-3-15 に、放出口からの高さ 1.05 m(アスファルト層 – 砕石層境界) のセンサ No. 49、50、51、52、54 を図 6-3-16 に示す。センサ No. 53 については、 不具合により濃度計測が不可能となったため、プロットから除外した。



図 6-3-13 水素放出点 B から放出した場合の地中水素濃度経時変化観測代表点



図 6-3-14 水素放出点 B から 1.93 L/min で放出した場合の 地中水素濃度経時変化 (センサ No. 16、17、18、19、20、21)







図 6-3-16 水素放出点 B から 1.93 L/min で放出した場合の 地中水素濃度経時変化 (センサ No. 49、50、51、52、54)

次に、図 6-3-17 に水素放出点 B から 5.54 L/min で放出した場合の、放出開始から 1時間、2時間、6時間、12時間、24時間における地中水素濃度分布を示す。



図 6-3-17 水素放出点 B から 5.54 L/min で放出した場合の地中水素濃度分布 (放出開始から1時間、2時間、6時間、12時間、24時間)

図 6-3-13 に示した観測代表点の流量 5.54 L/min の場合の水素濃度経時変化のうち、 放出口からの高さ 0.2 m(真砂土層下層)のセンサ No. 16、17、18、19、20、21 を 図 6-3-18 に、放出口からの高さ 0.6 m(真砂土層上層)のセンサ No. 34、35、36、 37、38、39 を図 6-3-19 に、放出口からの高さ 1.05 m(アスファルト層ー砕石層境界) のセンサ No. 49、50、51、52、54 を図 6-3-20 に示す。



図 6-3-18 水素放出点 B から 5.54 L/min で放出した場合の 地中水素濃度経時変化

(センサ No. 16、17、18、19、20、21)



図 6-3-19 水素放出点 B から 5.54 L/min で放出した場合の 地中水素濃度経時変化 (センサ No. 34、35、36、37、38、39)





図 6-3-12 及び図 6-3-17 に示した地中水素濃度分布のとおり、垂直構造体から離隔 距離 1.0 m の位置から水素を放出した場合、放出初期はほぼ同心円状に水素が拡散す るが、時間が経過すると水素が垂直構造体に到達し、それ以降は壁面近傍の濃度が 徐々に上昇することが明らかとなった。

図 6-3-14~図 6-3-16 の流量 1.93 L/min の地中水素濃度経時変化について見ると、 真砂土層では、試験時間内において、放出口上に位置するセンサ 18、36 の濃度が同 じ高さの他のセンサに比べ高い結果であった。アスファルト層一砕石層境界では、放 出開始から 15 時間程度は放出口上に位置するセンサ 51 の濃度が最も高かったが、時 間の経過とともに放出口上から垂直構造体方向へ 0.4 m 離隔したセンサ 52 とほぼ同 等の濃度となった。

図 6-3-18~図 6-3-20 の流量 5.54 L/min の地中水素経時変化について見ると、放出 初期は、放出口上に位置するセンサ 18、36、51 の濃度値が高いが、時間の経過と共 に近傍のセンサと同等の値となった。

(3) 水素放出点 C から放出した場合(垂直構造体による影響確認)

本項では、垂直構造体直近の水素放出点Cから水素を放出した場合について述べる。 表 2-1-1 に示した、No. 2-(3)(流量: 1.93 L/min)及び No. 2-(6)(流量: 5.54 L/min) の条件に該当する。

図 6-3-21 に水素放出点 C から 1.93 L/min で放出した場合の、放出開始から 1 時間、2 時間、6 時間、12 時間、24 時間における地中水素濃度分布を示す。



図 6-3-21 水素放出点 C から 1.93 L/min で放出した場合の地中水素濃度分布 (放出開始から 1 時間、2 時間、6 時間、12 時間、24 時間)

図 6-3-22 に水素放出点 C から放出した場合の地中水素濃度経時変化観測代表点を 示す。観測代表点は水素放出点 B から放出した場合と同点とした。図 6-3-22 に示す 観測代表点の流量 1.93 L/min の場合の水素濃度経時変化のうち、放出口からの高さ 0.2 m(真砂土層下層)のセンサ No. 16、17、18、19、20、21 を図 6-3-23 に、放出 口からの高さ 0.6 m(真砂土層上層)のセンサ No. 34、35、36、37、38、39 を図 6-3-24 に、放出口からの高さ 1.05 m(アスファルト層一砕石層境界)のセンサ No. 49、 50、51、52、54 を図 6-3-25 に示す。



図 6-3-22 水素放出点 C から放出した場合の地中水素濃度経時変化観測代表点



図 6-3-23 水素放出点 C から 1.93 L/min で放出した場合の 地中水素濃度経時変化 (センサ No. 16、17、18、19、20、21)



図 6-3-24 水素放出点 C から 1.93 L/min で放出した場合の 地中水素濃度経時変化

(センサ No. 34、35、36、37、38、39)



図 6-3-25 水素放出点 C から 1.93 L/min で放出した場合の 地中水素濃度経時変化 (センサ No. 49、50、51、52、54)

次に、図 6-3-26 に水素放出点 C から 5.54 L/min で放出した場合の、放出開始から 1時間、2時間、6時間、12時間、24時間における地中水素濃度分布を示す。



図 6-3-26 水素放出点 C から 5.54 L/min で放出した場合の地中水素濃度分布 (放出開始から1時間、2時間、6時間、12時間、24時間)

図 6-3-22 に示す観測代表点の流量 5.54 L/min の場合の水素濃度経時変化のうち、 放出口からの高さ 0.2 m(真砂土層下層)のセンサ No. 16、17、18、19、20、21 を 図 6-3-27 に、放出口からの高さ 0.6 m(真砂土層上層)のセンサ No. 34、35、36、 37、38、39 を図 6-3-28 に、放出口からの高さ 1.05 m(アスファルト層ー砕石層境界) のセンサ No. 49、50、51、52、54 を図 6-3-29 に示す。



図 6-3-27 水素放出点 C から 5.54 L/min で放出した場合の 地中水素濃度経時変化

(センサ No. 16、17、18、19、20、21)



図 6-3-28 水素放出点 C から 5.54 L/min で放出した場合の 地中水素濃度経時変化 (センサ No. 34、35、36、37、38、39)





図 6-3-21 及び図 6-3-26 に示した地中水素濃度分布のとおり、垂直構造体直近から 水素を放出した場合、放出開始初期から構造体近傍において高濃度の領域が形成され ることが確認された。

図 6-3-27~29 に示したとおり、流量 5.54 L/min の地中水素濃度経時変化について、 垂直構造体に設置したセンサ 21、39、54 は放出開始後から急激に濃度が上昇し、真 砂土層中では垂直構造体近傍のセンサの濃度値も急激に上昇することが分かる。流量 1.93 L/min の場合は、図 6-3-23~図 6-3-25 に示したとおり、流量 5.54 L/min の場合 より変化が緩やかではあるが、真砂土層、アスファルト層-砕石層境界のいずれにお いても構造体近傍の濃度が高く、真砂土層下層については、放出開始から急激に構造 体近傍の濃度が上昇することが確認された。

6.3.3 考察

前項に示した地中水素濃度計測結果に基づき、地中障害物がある場合の地中水素拡散 挙動について考察する。

(1) 水平構造体による地中水素拡散挙動への影響

図 6-3-30 に水平構造体がある場合とない場合の真砂土層上層(放出口からの高さ 0.6 m)とアスファルト層ー砕石層境界(放出口からの高さ1.05 m)の水素拡散範囲 について比較した結果を示す。水平構造体がない場合の水素拡散範囲は、平成 30 年 度調査において得られた成果を用いた。図 6-3-30 に示した濃度分布は流量1.93 L/min、 経過時間5時間における結果であり、本年度調査における水素放出点Aから放出した 水平構造体ありの場合において、地中模擬層のコンクリート壁(側壁)の影響の少な





水平構造体がある場合とない場合について水素拡散範囲を比較し、図 6-3-30 に示し たとおり、真砂土層上層及び水平構造体がある場合の方が水平方向への拡散が増加す る結果が得られた。放出口上(水平構造体上)の濃度は、構造体により水素拡散が阻 害されるため、構造体がある場合の方が低い結果であった。

参考として、真砂土層上層における平成 29 年度に実施した水平構造体なし、舗装 なしの条件下の結果について図 6-3-30 に示した。真砂土上に舗装を施さない場合、グ ラフを描画した 0.1 m 上方で大気層に繋がっており、舗装によるガスの閉じ込め効果 の影響を受けないため、舗装がある場合に比べ濃度が低い結果であった。

次に、水平構造体による奥行方向への水素拡散について考察する。図 6-3-31 に水放 出点 A (水平構造体下)から放出した場合の奥行方向への水素拡散挙動の比較点を示 す。奥行方向への水素拡散の確認用として、センサ埋設面からの離隔距離 2.0 m の位 置にも 3 点水素センサを埋設したが、ここでは、地中模擬層のコンクリート壁(側壁) の影響の少ない条件において比較をするため、センサ埋設面からの離隔距離 1.0 m の 位置に埋設したセンサ 55、57、59 と、センサ埋設面の水素放出点 A からの離隔距離
1.0 m の位置に埋設した、センサ 14、47 について、流量 1.93 L/min、放出開始から 5 時間迄の水素濃度経時変化に基づき議論する。



図 6-3-31 水素放出点 A (水平構造体下)から放出した場合の奥行方向への 水素拡散挙動の比較点

図 6-3-32 に、真砂土層(放出口からの高さ 0.2 m)において、センサ埋設面にて放 出口から 1.0 m 離隔したセンサ 14 と、センサ埋設面から 1.0 m 離隔した導管上のセ ンサ 55 の地中水素濃度経時変化を示す。センサ 55 は水平構造体下に位置する。

また、図 6-3-33 に、アスファルト層-砕石層境界(放出口からの高さ 1.05 m) に おいて、センサ埋設面にて放出口から 1.0 m 離隔したセンサ 47 と、センサ埋設面か ら 1.0 m 離隔した導管上のセンサ 57、センサ埋設面から 1.0 m 離隔し導管から 0.4 m 離隔したセンサ 59 の地中水素濃度経時変化を示す。センサ 57 及びセンサ 59 は水平 構造体上に位置する。







図 6-3-33 アスファルト層ー砕石層境界(放出口からの高さ 1.05 m)における
 センサ埋設面及び水平構造体上の地中水素濃度経時変化
 (水素放出点 A、1.93 L/min 放出した場合、経過時間 0~5 時間)

図 6-3-32 に示したとおり、センサ 14 に比ベセンサ 55 の濃度が高く推移しており、 放出口からの距離が等しい位置であっても、構造体により上方への拡散が阻害される ため、水平構造体下では濃度が高くなることが明らかとなった。また、図 6-3-33 に示 したセンサ 47 とセンサ 57 について見ると、放出口からの距離が等しい位置であって も、構造体により上方への拡散が阻害されるため、水平構造体上では濃度が低くなる ことが明らかとなった。水平構造体上、導管上のセンサ 57 と水平構造体上、導管か らの離隔距離 0.4 m のセンサ 59 はほぼ同等の濃度で推移した。

これらのことから、実現場において、水素漏えい位置上に水平構造体が存在する場合、以下の点に留意する必要がある。

- ・水平構造体により上方への拡散が阻害され、水平方向への拡散が進み、水素の高 濃度範囲が広がる可能性がある
- ・水素濃度のピーク位置と漏えい位置が異なるため、漏えい位置の特定は埋設位置 を考慮する必要がある
- ・防護板等の水平構造体の長手方向沿いの水平構造体下においては、水素拡散が早 くなり、危険範囲が広がる可能性がある
- 防護板等の水平構造体の長手方向沿いの水平構造体上においては、漏えい位置と 検知位置の距離に対し水素濃度値が低く検知される可能性があるため、漏えい位 置を特定する際には注意が必要である
- (2) 垂直構造体による地中水素拡散挙動への影響

図 6-3-34 に放出口から離隔距離 1.0 m の位置に垂直構造体がある場合とない場合 の真砂土層上層(放出口からの高さ 0.6 m)とアスファルト層一砕石層境界(放出口 からの高さ 1.05 m)の水素拡散範囲について比較した結果を示す。垂直構造体がない 場合については、前項と同様に平成 30 年度調査において得られた成果を用い、前項 において、流量 1.93 L/min、経過時間 5 時間において比較したため、本項においても 同条件における結果を比較することとした。



図 6-3-34 放出口から離隔距離 1.0 m の位置に垂直構造体がある場合とない場合の 真砂土層上層とアスファルト層-砕石層境界の水素拡散範囲の比較 (流量 1.93 L/min、経過時間 5 時間における比較)

放出口から 1.0 m の位置に垂直構造体がある場合とない場合について水素拡散範囲 を比較した結果、図 6-3-34 に示したとおり、真砂土層上層とアスファルト層-砕石層 境界の両者において垂直構造体がある場合の方が水平方向への拡散が増加する結果 が得られた。真砂土層上層については、図 6-3-30 と同様に、平成 29 年度調査におい て得られた垂直構造体なし、舗装なしの条件下の結果を参考として示した。

次に、垂直構造体直近に放出口がある場合について、壁面沿いの水素拡散の速さを 評価するため、流量 1.93 L/min での垂直構造体がある場合とない場合について、離隔 距離が等しい垂直方向及び水平方向の計測点における水素濃度及び水素濃度比を比 較した。垂直構造体がない場合は平成 30 年度調査の成果を用い、放出口から水平方 向に 0.6 m 離隔した計測点を H0.6、垂直方向に 0.6 m 離隔した計測点を V0.6 とし た。垂直構造体がある場合は本年度調査での水素放出点 C の試験結果であり、水平方 向に 0.6 m 離隔した計測点を H0.6'、垂直方向に 0.6 m 離隔した計測点を V0.6'とし た。H0.6、V0.6、H0,6'、 V0.6'の水素濃度経時変化と、各条件の水平方向に対する垂 直方向の濃度比(V0.6/H0.6 及び V0.6'/H0.6')の比較結果を図 6-3-35 に示す。



図 6-3-35 垂直構造体直近にある放出口がある場合とない場合の離隔距離が等しい 垂直方向及び水平方向の計測点における水素濃度及び水素濃度比の比較 (流量 1.93 L/min、経過時間 5 時間における比較)

図 6-3-35 に示した比較結果のうち、水素濃度について見ると、水平方向、垂直方向 のいずれについても垂直構造体がある場合の方が濃度が高い結果であった。水平方向 と垂直方向の水素濃度比について、水平方向と垂直方向への拡散範囲が等しければ V/H=1、水平方向への拡散が先行する場合 V/H<1、垂直方向への拡散が先行する場 合 V/H>1となる。垂直構造体がない場合については V/H の値が若干1より大きかっ たが、ほぼ水平方向と垂直方向の拡散が等しい結果であった。これに対し、垂直構造 体がある場合、V/H は垂直構造体がない場合より値が大きく、垂直方向がやや先行す る結果となった。

本試験条件下では、地中模擬層を製作する際に壁面近傍まで十分に転圧を施したため、水素拡散の垂直方向への顕著な先行は図 6-3-35 に示した程度であったが、実現場

において、施工状態や経時変化等により壁面付近の空隙率が高くなった場合、極端な 事例ではあるが、5.1.4節に示したように、垂直構造体沿いを水素拡散が先行するもの と考えられる。

また、水素放出点 B(垂直構造体から 1.0 m 離隔)から放出した場合と水素放出点 C(垂直構造体直近)から放出した場合の水素拡散範囲についても比較を行った。こ れまでと同様に、流量 1.93 L/min、放出開始から 5 時間における水素拡散範囲を比較 した結果を図 6-3-36 に示す。



図 6-3-36 放出口が垂直構造体直近にある場合と離隔距離 1.0 m にある場合の 真砂土層上層とアスファルト層-砕石層境界の水素拡散範囲の比較 (流量 1.93 L/min、経過時間 5 時間における比較)

図 6-3-36 に示したとおり、放出口が水素垂直構造体直近にある場合の方が、構造体 近傍の濃度が著しく高い結果であった。

以上のことから、実現場において、水素漏えい位置近傍に垂直構造体が存在する場 合、以下の点に留意する必要がある。

・垂直構造体により拡散が阻害され、垂直構造体がない場合と比べて水平方向に水

素の高濃度範囲が広がる可能性がある

・アスファルト層下部あるいは真砂土層上層において水素濃度のピーク位置と漏え い位置が一致しているため、漏えい位置と構造体の離隔距離が1.0m以上の場合、 地中濃度のピーク位置により漏えい位置の特定が可能である

また、実現場において、水素漏えい位置直近に垂直構造体が存在する場合、以下の 点に留意する必要がある。

- ・構造体により拡散が阻害され、濃度上昇が早くなるため、短時間で爆発範囲の領 域が形成される可能性がある
- アスファルト層下部あるいは真砂土層上層において水素濃度のピーク値と漏えい 位置が一致しているため、地中濃度のピーク位置により漏えい位置の特定が可能 である
- ・本試験条件下では壁近傍まで十分な転圧を施したため、垂直構造体沿いの水素拡 散は顕著ではなかったが、本試験よりも壁近傍の転圧が困難な実現場では転圧不 足により構造体近傍の空隙率が高くなり、構造体沿いの水素拡散が先行する可能 性があるため、注意が必要である

6.3.4 まとめ

地中に障害物がある場合の実現場を想定し、地中障害物を模擬した水平構造体及び垂 直構造体を設置した地中模擬層に気体熱電動式ガスセンサを 60 点配置し、各点における 水素ガス濃度の経時変化により、地中における水素拡散挙動を観測した結果、以下の結 論を得た。

【水平構造体による影響】

- ・水平構造体により上方への拡散が阻害され、水平方向への拡散が進み、水素の高濃度 範囲が広がる可能性がある
- ・水素濃度のピーク位置と漏えい位置が異なるため、漏えい位置の特定は埋設位置を考慮する必要がある
- ・防護板等の水平構造体の長手方向沿いの水平構造体下においては、水素拡散が早くな り、危険範囲が広がる可能性がある
- 防護板等の水平構造体の長手方向沿いの水平構造体上においては、漏えい位置と検知 位置の距離に対し水素濃度値が低く検知される可能性があるため、漏えい位置を特定 する際には注意が必要である

【垂直構造体による影響/垂直構造体近傍に漏えい位置がある場合】

- ・垂直構造体により拡散が阻害され、垂直構造体がない場合と比べて水平方向に水素の 高濃度範囲が広がる可能性がある
- アスファルト層下部あるいは真砂土層上層において水素濃度のピーク位置と漏えい位

置が一致しているため、漏えい位置と構造体の離隔距離が1.0m以上の場合、地中濃 度のピーク位置により漏えい位置の特定が可能である

【垂直構造体による影響/垂直構造体直近に漏えい位置がある場合】

- ・構造体により拡散が阻害され、濃度上昇が早くなるため、短時間で爆発範囲の領域が 形成される可能性がある
- ・アスファルト層下部あるいは真砂土層上層において水素濃度のピーク値と漏えい位置 が一致しているため、地中濃度のピーク位置により漏えい位置の特定が可能である
- ・本試験条件下では壁近傍まで十分な転圧を施したため、垂直構造体沿いの水素拡散は 顕著ではなかったが、本試験よりも壁近傍の転圧が困難な実現場では転圧不足により 構造体近傍の空隙率が高くなり、構造体沿いの水素拡散が先行する可能性があるため、 注意が必要である

6.4 実フィールド試験における大気中水素濃度分布計測

本節では、地中障害物を設置した地中模擬層内を通過し地表面から大気中に染み出し た漏えい水素の拡散について、気密ブース内の大気中(地表面近傍)において水素をレー ザラマンイメージングにより可視化し空間濃度分布を計測した結果を示し、地中障害物 がある場合の大気中における水素拡散挙動の基本的な特徴について考察する。

6.4.1 観測領域と水素濃度の算出

3.2 節に述べたとおり、本調査では、観測空間である大気模擬層内に波長 355 nm のレ ーザ光を照射し、水素分子から生じるラマン散乱光(波長 416 nm)を気密ブースの外部 から ICCD カメラにより撮像することにより、水素拡散挙動を可視化すると共に、得ら れた画像のラマン散乱光の輝度分布から水素濃度分布を計測する。本調査では、地中と 大気中の境界である地表面近傍に注目し、アスファルト表面から高さ 20 mm 及び 50 mm の位置で円形の土壌層の中心点を通るように水平に 2 本のレーザ光を照射し、水素の可 視化を行った。レーザの発振周波数は 10 Hz であり、300 shot をカメラの CCD 上で積 算して記録するため、大気計測の時間分解能は 30 s である。

土壌層上面から見た本試験における観測領域を、図 6-4-1 に示す。本試験には ICCD カ メラを 2 台用い、水素ラマン散乱光を撮像した。カメラのレーザ光軸からの水平方向の 離隔距離は 8.0 m,カメラ1台当たりのレーザ光軸上の視野は 2.96 m であり、2 台のカ メラの撮像範囲が不連続となるのを避けるため、光軸上で 2 台のカメラの視野が 0.5 m 分重なるように設置した。観測領域から計算したカメラの画素 1 ピクセル当たりの画角 は、2.89 mm/pixel である。解析では、記録した画像上でレーザ光軸上の 5×5 ピクセル の領域の平均輝度を求め、水素濃度の算出に使用した。よって本試験における大気計測 の空間分解能は、約 15mm となる。水素濃度は、気密ブース内が窒素で 100%置換され た状態の窒素ガスのラマン散乱光による信号強度をレファレンスとし、ラマン散乱断面 積比、フィルタ透過率を考慮して算出した。 本試験装置では、比較的大容量の気密ブースにより大気模擬層を形成しているが、排 気ロ、即ち外気との接触面が、天井部に配置された5箇所の排気口(直径 \$100 mm)の みである点が、実際の屋外環境と大きく異なる。したがって、大気側の観測は、水素濃度 が低い比較的初期の段階では屋外環境を良好に再現するが、時間の経過と共に、閉鎖空 間における挙動の特徴が顕著になっていくものと推察される。



図 6-4-1 大気中水素濃度分布計測の観測領域

6.4.2 大気中水素濃度分布計測結果

本項では、地中に障害物を設置した地中模擬層内を通過し大気中へ拡散した水素の地

表面から 20 mm 及び 50 mm の位置の濃度分布計測結果を示すと共に、地中障害物が存在する条件下において放出した水素の大気中での挙動について考察する。

図 6-4-2 に大気中濃度分布評価範囲を示す。本項では図 6-4-2 に桃色鎖線で示した、垂 直構造体からの距離-0.4 m~5.0 m の範囲における大気中濃度分布について評価した。



図 6-4-2 大気中水素濃度分布評価範囲

(1) 水素放出点 A から放出した場合(水平構造体による影響確認)

ここでは、水素放出点 A から水素を放出した場合について述べる。表 2-1-1 に示した、No. 2-(1)(流量:1.93 L/min)及び No. 2-(4)(流量:5.54 L/min)の条件に該当する。

流量 1.93 L/min の場合の大気中水素濃度分布について、放出開始から地表面から 6 時間、12 時間、24 時間における、地表面からの高さ 20 mm の分布を図 6-4-3 に、地表面からの高さ 50 mm の分布を図 6-4-4 に示す。



図 6-4-3 水素放出点 A から 1.93 L/min で放出した場合の 地表面からの高さ 20 mm における大気中水素濃度分布 (放出開始から 6 時間、12 時間、24 時間)





次に、流量 5.54 L/min の場合の大気中水素濃度分布について、放出開始から地表面 から 6 時間、12 時間、24 時間における、地表面からの高さ 20 mm の分布を図 6-4-5 に、地表面からの高さ 50 mm の分布を図 6-4-6 に示す。



図 6-4-5 水素放出点 A から 5.54 L/min で放出した場合の 地表面からの高さ 20 mm における大気中水素濃度分布 (放出開始から 6 時間、12 時間、24 時間)





図 6-4-7 に水素放出点 A から放出した場合の大気中水素濃度経時変化観測代表点を 示す。観測代表点は、放出口上から 0.4 m ピッチで 5 点設定し、地表面からの高さ 20 mm における経時変化を評価した。



図 6-4-7 水素放出点 A から放出した場合の 大気中水素濃度経時変化観測代表点

図 6-4-7 に示した観測代表点における地表面からの高さ 20 mm の大気中水素濃度 経時変化について、流量 1.93 L/min の場合を図 6-4-8 に、流量 5.54 L/min の場合を 図 6-4-9 に示す。



図 6-4-8 水素放出点 A から 1.93 L/min で放出した場合の 観測代表点における大気中水素濃度経時変化 (地表面からの高さ 20 mm)





水素放出点 A から放出した場合においては、図 6-4-3~図 6-4-6 に示したとおり、 大気中水素濃度分布について顕著なピークは確認されず、ほぼ一様の濃度分布であっ た。図 6-4-8 及び図 6-4-9 の観測代表点における水素濃度経時変化を見ても、全ての 代表点における経時変化がほぼ同等であった。

⁽²⁾ 水素放出点 B から放出した場合(垂直構造体による影響確認)

ここでは、垂直構造体から 1.0 m 離隔した水素放出点 B から水素を放出した場合に ついて述べる。表 2-1-1 に示した、No. 2-(2)(流量: 1.93 L/min)及び No. 2-(5)(流 量: 5.54 L/min)の条件に該当する。

流量 1.93 L/min の場合の大気中水素濃度分布について、放出開始から地表面から 6 時間、12 時間、24 時間における、地表面からの高さ 20 mm の分布を図 6-4-10 に、 地表面からの高さ 50 mm の分布を図 6-4-11 に示す。









次に、流量 5.54 L/min の場合の大気中水素濃度分布について、放出開始から地表面 から 6 時間、12 時間、24 時間における、地表面からの高さ 20 mm の分布を図 6-4-12 に、地表面からの高さ 50 mm の分布を図 6-4-13 に示す。



図 6-4-12 水素放出点 B から 5.54 L/min で放出した場合の 地表面からの高さ 20 mm における大気中水素濃度分布 (放出開始から 6 時間、12 時間、24 時間)



図 6-4-13 水素放出点 B から 5.54 L/min で放出した場合の
 地表面からの高さ 50 mm における大気中水素濃度分布
 (放出開始から 6 時間、12 時間、24 時間)

図 6-4-14 に水素放出点 B から放出した場合の大気中水素濃度経時変化観測代表点 を示す。観測代表点は、図 6-4-14 に示すとおり垂直構造体近傍に 6 点設定し、地表面 からの高さ 20 mm における経時変化を評価した。



図 6-4-14 水素放出点 B から放出した場合の 大気中水素濃度経時変化観測代表点

図 6-4-14 に示した観測代表点における地表面からの高さ 20 mm の大気中水素濃度 経時変化について、流量 1.93 L/min の場合を図 6-4-15 に、流量 5.54 L/min の場合を 図 6-4-16 に示す。流量 1.93 L/min の場合において、レーザ装置の出力低下に起因し、 放出開始から 17~19 時間(図 6-4-15 にて灰色塗りを施した時間帯)において水素濃 度値が低く計測されたため、当該時間帯については評価対象外とする。



図 6-4-15 水素放出点 B から 1.93 L/min で放出した場合の 観測代表点における大気中水素濃度経時変化 (地表面からの高さ 20 mm)





水素放出点 B から放出した場合においては、図 6-4-10~図 6-4-13 に示したとおり、 大気中水素濃度分布について、垂直構造体近傍に緩やかなピークが確認された。また、 図 6-4-12 より、流量が多い場合には地表面近傍にピークが確認された。図 6-4-15 及 び図 6-4-16 の観測代表点における水素濃度経時変化を見ると、観測点 f、g に比べ、 観測点 h、i、j、k の濃度が若干高く、濃度分布と一致した。

(3) 水素放出点 C から放出した場合(垂直構造体による影響確認)

ここでは、垂直構造体直近の水素放出点 C から水素を放出した場合について述べる。 表 2-1-1 に示した、No. 2-(3)(流量: 1.93 L/min)及び No. 2-(6)(流量: 5.54 L/min) の条件に該当する。

流量 1.93 L/min の場合の大気中水素濃度分布について、放出開始から地表面から 6 時間、12 時間、24 時間における、地表面からの高さ 20 mm の分布を図 6-4-17 に、 地表面からの高さ 50 mm の分布を図 6-4-18 に示す。









次に、流量 5.54 L/min の場合の大気中水素濃度分布について、放出開始から地表面 から 6 時間、12 時間、24 時間における、地表面からの高さ 20 mm の分布を図 6-4-19 に、地表面からの高さ 50 mm の分布を図 6-4-20 に示す。









図 6-4-21 に水素放出点 C から放出した場合の大気中水素濃度経時変化観測代表点 を示す。観測代表点は、水素放出点 B から放出した場合と同箇所の垂直構造体近傍の 6 点とした。





図 6-4-21 に示した観測代表点における地表面からの高さ 20 mm の大気中水素濃度 経時変化について、流量 1.93 L/min の場合を図 6-4-22 に、流量 5.54 L/min の場合を 図 6-4-23 に示す。



図 6-4-22 水素放出点 C から 1.93 L/min で放出した場合の 観測代表点における大気中水素濃度経時変化 (地表面からの高さ 20 mm)



図 6-4-23 水素放出点 C から 5.54 L/min で放出した場合の 観測代表点における大気中水素濃度経時変化 (地表面からの高さ 20 mm)

水素放出点 C から放出した場合においては、図 6-4-17~図 6-4-20 に示したとおり、 大気中水素濃度分布について、垂直構造体近傍に顕著なピークが確認された。図 6-4-22 及び図 6-4-23 の観測代表点における水素濃度経時変化を見ると、垂直構造体直近 の観測点 j、k の濃度が高く、濃度分布と一致した。

6.4.3 考察

前項に示した大気中水素濃度計測結果を基に、地中に障害物がある場合の大気中にお ける水素拡散挙動の基本的な特徴について考察する。

本節では、各条件の大気中水素濃度分布について比較を行うが、代表として流量 1.93 L/min、放出開始から 12 時間の濃度分布に基づき議論する。一部、水素放出点 B の結果 の比較については、流量 5.54 L/min の結果も用いた。

(1) 水平構造体による大気中水素拡散挙動への影響

図 6-4-24 に水素放出点 A から放出した場合の地表面からの高さ 20 mm と 50 mm の大気中水素濃度分布の比較結果を示す。



図 6-4-24 水素放出点 A から 1.93 L/min で放出した場合の水素濃度分布 (地表面から 20 mm 及び 50 mm、放出開始から 12 時間)

地中に水平構造体が存在する場合においては、大気中濃度分布に顕著なピークは確認されなかった。地表面からの高さ20mmと50mmの濃度値については、ほぼ同等であった。

これらのことから、実現場において、水素漏えい位置上に水平構造体が存在する場合、以下の点に留意する必要がある。

- ・大気中水素濃度分布に顕著なピークが確認されないため、大気中の濃度分布から 漏えい位置の特定は困難である
- (2) 垂直構造体による大気中水素拡散挙動への影響

図 6-4-25 に垂直構造体近傍の水素放出点 B から放出した場合の、地表面からの高 さ 20 mm と 50 mm の大気中水素濃度分布の比較結果を示す。水素放出点 B から放 出した場合については、流量 1.93 L/min と流量 5.54 L/min の結果の特徴が若干異な っていたため、流量 5.54 L/min の地表面からの高さ 20 mm の結果についても比較対 象とした。



図 6·4·25 水素放出点 B から放出した場合の水素濃度分布 (流量 1.93 L/min の地表面から 20 mm 及び 50 mm、流量 5.54 L/min の 地表面から 20 mm、放出開始から 12 時間)

放出口近傍に垂直構造体が存在する場合、図 6-4-25 に示した結果のうち、1.93 L/min の結果については、垂直構造体近傍に緩やかなピークが確認された。ピークの 強度は地表面からの高さ 20 mm の方が強かった。また、流量が多い場合には、垂直 構造体直近にピークが確認された。

次に、図 6-4-26 に垂直構造体直近の水素放出点 C から放出した場合の、地表面からの高さ 20 mm と 50 mm の大気中水素濃度分布の比較結果を示す。



図 6-4-26 水素放出点 C から 1.93 L/min で放出した場合の水素濃度分布 (地表面から 20 mm 及び 50 mm、放出開始から 12 時間)

放出口直近に垂直構造体が存在する場合、図 6-4-26 に示したとおり、垂直構造体直 近に顕著なピークが確認された。また、ピーク強度については、地表面からの高さ 50 mm に対し、20 mm の方が強いピークが確認された。放出口直近に垂直構造体がある 場合の地中水素拡散挙動について、図 6-3-35 で示したとおり、垂直方向の拡散がやや 先行する程度であったことから、大気中における垂直構造体直近の急峻なピークにつ いては、アスファルト層と垂直構造体の境界付近の状態が影響している可能性が考え らる。

以上のことから、実現場において、水素漏えい位置近傍及び直近に垂直構造体が存 在する場合、以下の点に留意する必要がある。

- ・大気中濃度分布について濃度のピークが確認できたものの、実現場においては絶 えず空気に流れがあることが想定されるため、大気中の濃度分布から漏えい位置 の特定は困難である
- ・アスファルトと構造体の境界の状態によっては、垂直構造体直近から大気中へ水 素が拡散し易い状態になるため注意が必要である

6.4.4 まとめ

レーザラマンイメージングにより、地中に障害物がある場合について大気中における 水素可視化及び空間濃度分布計測を行った結果、以下の結論を得た。

【水平構造体による影響】

 ・大気中水素濃度分布に顕著なピークが確認されないため、大気中の濃度分布から漏え い位置の特定は困難である

【垂直構造体による影響/垂直構造体近傍又は直近に漏えい位置がある場合】

- ・大気中濃度分布について濃度のピークが確認できたものの、実現場においては絶えず
 空気に流れがあることが想定されるため、大気中の濃度分布から漏えい位置の特定は
 困難である
- アスファルトと構造体の境界の状態によっては、垂直構造体直近から大気中へ水素が 拡散し易い状態になるため注意が必要である

ただし、実際の屋外環境においては、大気層は風や擾乱、物体の移動等により絶えず流 れが発生しており、本調査における漏えい量の条件下で、%オーダの濃度の水素が滞留す る可能性は極めて低いものと考えられる。

6.5 供給停止後の地中における水素濃度分布計測

本節では、地中に障害物がある場合において、埋設導管の損傷による水素漏えいが生 じた際に、当該導管への水素供給を停止した場合を想定し、地中に拡散した水素が消散 していく際の挙動を明らかにしたので、その試験方法及び結果について述べる。

6.5.1 試験方法

前述の実フィールド試験装置を用いて、図 6-5-1 に示す手順により、供給停止後の地中 における水素濃度分布の計測を行った。

水素放出点 A 及び水素放出点 C から供給流量 5.54 L/min の条件下において 24 時間 の実フィールド試験を実施後水素供給を停止した状態を初期状態として供給停止後の水 素拡散挙動を計測した。この時、気密ブース内の大気層側は数千 ppm~数%オーダの水 素が存在する状態にある。実際の屋外環境を想定し、大気層側のみ窒素パージを開始し、 大気層側の水素を試験装置外に放出する。この時、地中における水素濃度がどのように 推移するかを計測した。窒素パージ量は 40 L/min に設定した。



【供給停止直後】

図 6-5-1 供給停止後の地中における水素濃度分布の計測方法

6.5.2 試験結果

本項では、水素放出点A及び水素放出点Cから流量5.54L/minで24時間試験を実施 した後の供給停止後の地中水素濃度分布計測結果について述べる。

(1) 水素放出点 A の試験後供給停止した場合(水平構造体による影響確認)

ここでは、水平構造体下に位置する水素放出点 A から 5.54 L/min で 24 時間試験を 実施した後、水素供給を停止し、試験終了時を初期状態として供給停止後の地中水素 濃度経時変化について述べる。表 2-1-1 に示した、No. 2-(4)(流量: 5.54 L/min)の 供給停止後の挙動確認に該当する。 図 6-5-2 に供給停止から 0 時間、1 時間、3 時間、5 時間の、図 6-5-3 に供給停止か ら 10 時間、20 時間、30 時間、40 時間の、図 6-5-4 に供給停止から 50 時間、70 時 間、90 時間の地中水素濃度分布を示す。図 6-5-2 及び図 6-5-3 に示した 40 時間迄の 濃度分布は 0~100%の濃度範囲を凡例のとおり色付けして描画し、図 6-5-4 に示した 50 時間以降の濃度分布は 0~10%の濃度範囲を凡例のとおり色付けして描画した。



 図 6-5-2 水素放出点 A から 5.54 L/min で 24 時間試験を実施した後 供給を停止した場合の地中水素濃度分布 (供給停止から 0 時間、1 時間、3 時間、5 時間)







図 6-5-4 水素放出点 A から 5.54 L/min で 24 時間試験を実施した後 供給を停止した場合の地中水素濃度分布 (供給停止から 50 時間、70 時間、90 時間)

次に、図 6-3-1、図 6-3-2 に示した 60 点の計測点のうち、地中模擬層全体の濃度推移の傾向を確認するため、5 の倍数の番号のセンサを代表とし、センサ 5、10、15、20、25、30、35、40、45、50、55、60 の地中水素濃度経時変化を図 6-5-5 に示す。



図 6-5-5 水素放出点 A から 5.54 L/min で 24 時間試験を実施した後 供給を停止した場合の地中水素濃度経時変化 (センサ 5、10、15、20、25、30、35、40、45、50、55、60)

図 6-5-2~図 6-5-4 の地中水素濃度分布を見ると、供給停止から時間の経過ととも に、徐々に地中を水素が拡散し、濃度が低下していく様子が分かる。図 6-5-5 の代表 点として抽出したセンサの濃度値についても、供給停止直後から徐々に濃度が下がり、 同じ値に収束していく様子が確認できる。初期濃度が低いセンサについては、供給停 止から若干濃度が上昇し、その後、濃度が徐々に低下した。本試験の条件下において は、89 時間 59 分後に全てのセンサの濃度値が 4%以下となった。

(2) 水素放出点 C の試験後供給停止した場合(水平構造体による影響確認)

ここでは、水平構造体下に位置する水素放出点 C から 5.54 L/min で 24 時間試験を 実施した後、水素供給を停止し、試験終了時を初期状態として供給停止後の地中水素 濃度経時変化について述べる。表 2-1-1 に示した、No. 2-(6)(流量: 5.54 L/min)の 供給停止後の挙動確認に該当する。

図 6-5-6 に供給停止から 0 時間、1 時間、3 時間、5 時間の、図 6-5-7 に供給停止から 10 時間、20 時間、30 時間の、図 6-5-8 に供給停止から 40 時間、50 時間、70 時間、90 時間の地中水素濃度分布を示す。図 6-5-6 及び図 6-5-7 に示した 30 時間迄の 濃度分布は 0~100%の濃度範囲を凡例のとおり色付けして描画し、図 6-5-4 に示した 40 時間以降の濃度分布は 0~10%の濃度範囲を凡例のとおり色付けして描画した。







図 6-5-7 水素放出点 C から 5.54 L/min で 24 時間試験を実施した後 供給を停止した場合の地中水素濃度分布 (供給停止から 10 時間、20 時間、30 時間)



図 6-5-8 水素放出点 C から 5.54 L/min で 24 時間試験を実施した後 供給を停止した場合の地中水素濃度分布 (供給停止から 40 時間、50 時間、70 時間、90 時間)

次に、水素放出点Aの場合と同様に、地中模擬層全体の濃度推移の傾向を確認する ため、5の倍数の番号のセンサを代表とし、センサ5、10、15、20、25、30、35、40、 45、50、55、60の地中水素濃度経時変化を図6-5-9に示す。



図 6-5-9 水素放出点 C から 5.54 L/min で 24 時間試験を実施した後 供給を停止した場合の地中水素濃度経時変化 (センサ 5、10、15、20、25、30、35、40、45、50、55、60)

図 6-5-6~図 6-5-8 の地中水素濃度分布を見ると、水素放出点 A の場合と同様に供 給停止から時間の経過とともに、徐々に地中を水素が拡散し、濃度が低下していく様 子が分かる。図 6-5-9 の代表点として抽出したセンサの濃度値についても、供給停止 直後から徐々に濃度が下がり、やがて同じ値に収束していく様子が確認できる。図 6-5-5 に示した水素放出点 A の場合と同様に、初期濃度が低いセンサについては、供給 停止から若干濃度が上昇し、その後、濃度が徐々に低下した。本試験の条件下におい ては、80 時間 40 分後に全てのセンサの濃度値が 4%以下となった。

6.5.3 考察

前項に示した供給停止後の地中水素濃度計測結果に基づき、地中障害物がある場合の 地中水素の消散挙動について考察する。

(1) 水平構造体による地中水素消散挙動への影響

地中に水平構造体が存在する場合、水素の供給を停止した後、水平構造体が水素の 上方への拡散を阻害することにより、水平構造体下に水素が残留することが懸念され る。このため、水平構造体の供給停止後の地中水素拡散挙動への影響確認代表点とし て図 6-5-10 に示す水平構造体近傍のセンサ 12、13、23、24 について、地中水素濃度 経時変化を確認した。図 6-5-10 に示したセンサのうち、センサ 12 のみが水平構造体 下に位置する。



図 6-5-10 水平構造体の供給停止後の地中水素拡散挙動への影響確認代表点

図 6-5-10 に示したセンサ 12、13、23、24 の地中水素濃度経時変化を図 6-5-11 に 示す。



図 6-5-11 水平構造体の供給停止後の地中水素拡散挙動への 影響確認代表点における地中水素濃度経時変化 (センサ12、13、23、24)

図 6-5-11 において、4 点のセンサはいずれも初期濃度が 80%以上と高濃度であった。供給停止から水素濃度が徐々に低下し、20%を程度を境目に変化が緩やかになった。水平構造体下のセンサ 12 の経時変化は上に構造体のないセンサ 13、23、24 とほぼ同様の変化を示しており、水平構造体下に水素が残留することなく地中を拡散し、 濃度が低下していくことが確認された。

前述のとおり、本試験条件下では爆発下限の4%以下になるまで3日以上を要した ことから、危険な時間が長時間持続するため、漏えい後の復旧の際には注意が必要で ある。 これらのことから、実現場において、水素漏えい位置上に水平構造体が存在する場合の供給停止後の拡散挙動について、以下のことが明らかとなった。

- ・水素供給停止後から水素濃度が低下し、徐々に同じ値に収束する
- ・供給停止直後の濃度が低い位置では、水素供給を停止していても濃度が若干上昇 する場合もあるため注意が必要である
- ・水平構造体下に水素が残留することなく全体の濃度が低下する
- ・爆発範囲の領域が長時間維持されるため、漏えい後の復旧の際には注意が必要で ある
- (2) 垂直構造体による地中水素消散挙動への影響

地中に垂直構造体が存在する場合、水素の供給を停止した後、アスファルト層と垂 直構造体の境界から水素が優先的に大気へ拡散することが懸念される。このため、垂 直構造体の供給停止後の地中水素拡散挙動への影響確認代表点として図 6-5-12 に示 すアスファルト層-砕石層境界の垂直構造体近傍のセンサ 50、51、52、54 について、 地中水素濃度経時変化を確認した。図 6-5-12 に示したセンサのうち、センサ 54 が垂 直構造体壁面に位置する。



図 6-5-12 垂直構造体の供給停止後の地中水素拡散挙動への影響確認代表点

図 6-5-12 に示したセンサ 50、51、52、54 の地中水素濃度経時変化を図 6-5-13 に 示す。



図 6-5-13 水平構造体の供給停止後の地中水素拡散挙動への 影響確認代表点における地中水素濃度経時変化 (センサ 50、51、52、54)

図 6-5-13 において、4 点のセンサはいずれも初期濃度が 60%以上と高濃度であっ た。供給停止から水素濃度が徐々に低下し、図 6-5-11 に示した水平構造体近傍のセン サと同様に 20%を程度を境目に変化が緩やかになった。アスファルト層と垂直構造体 の境界から優先的に水素が大気中へ拡散する場合、垂直構造体壁面に設置したセンサ 54 の濃度値が他のセンサ(センサ 50、51、52)よりも高い濃度値で推移することが 予想されるが、センサ 54 の濃度値は他のセンサと同等の濃度で推移しており、アス ファルト層と垂直構造体の境界から優先的に水素が大気中に拡散することなく、全体 の濃度が徐々に低下していることが確認された。

前述のとおり、本試験条件下では爆発下限の4%以下になるまで3日以上を要した ことから、危険な時間が長時間持続するため、漏えい後の復旧の際には注意が必要で ある。

これらのことから、実現場において、水素漏えい位置近傍に垂直構造体が存在する場合の供給停止後の拡散挙動について、以下のことが明らかとなった。

- ・水素供給停止後から水素濃度が低下し、徐々に同じ値に収束する
- ・供給停止直後の濃度が低い位置では、水素供給を停止していても濃度が若干上昇 する場合もあるため注意が必要である
- ・アスファルト層と垂直構造体の境界から優先的に水素が大気中に拡散することな く、全体の濃度が徐々に低下する
- ・爆発範囲の領域が長時間維持されるため、漏えい後の復旧の際には注意が必要で ある
6.5.4 まとめ

地中埋設導管の損傷による水素漏えい時に、水素供給を停止した場合を想定し、地中 に拡散した水素の空間濃度分布の経時変化を計測し、地中に障害物がある場合の水素の 拡散挙動として以下の結果を得た。

【水平構造体による影響】

- ・水素供給停止後から水素濃度が低下し、徐々に同じ値に収束する
- ・供給停止直後の濃度が低い位置では、水素供給を停止していても濃度が若干上昇する 場合もあるため注意が必要である
- ・水平構造体下に水素が残留することなく全体の濃度が低下する

【垂直構造体による影響】

- ・水素供給停止後から水素濃度が低下し、徐々に同じ値に収束する
- ・供給停止直後の濃度が低い位置では、水素供給を停止していても濃度が若干上昇する 場合もあるため注意が必要である
- アスファルト層と垂直構造体の境界から優先的に水素が大気中に拡散することなく、
 全体の濃度が徐々に低下する

また、両者に共通して、爆発下限の4%以下になるまで3日以上を要しており、爆発範囲の領域が長時間維持されるため、漏えい後の復旧の際には十分に注意する必要がある。

7. シミュレーション解析の基礎検討

7.1 概要

本章において、実フィールド試験で得られた水素の濃度変化をシミュレーションによ り再現し、比較検証を行い、舗装を施した際の地中の拡散挙動及び大気への拡散挙動に ついて、シミュレーションが可能かどうかについて検証した。具体的には、平成 30 年度 事業で実施された地中障害物含まない実フィールド試験および第 6 章で実施された地中 障害物含む実フィールド試験を対象としたシミュレーション解析と試験結果の比較検証、 さらに地質パラメータや地中障害物形状による地中水素拡散挙動への影響評価を実施し た。これら検証・影響評価の結果、地質パラメータなどの入力条件が適切であれば、シミ ュレーション解析による地中及び大気(地表面近傍)の水素拡散挙動の再現性は高いこ とが示された。

7.2 解析方法

7.2.1 基礎方程式

本調査におけるシミュレーション解析の基礎方程式(質量保存則、運動量保存則、化学 種 *i* の輸送方程式)を以下に示した。対象となる系の化学種は水素と窒素の2種で、流 動様式は層流とし、地中内については多孔質媒体中の物質拡散として扱った^{[1],[2]}。

$$\varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = Q \tag{7.1.1}$$

$$\rho\left(\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon^2}\vec{v}\cdot\vec{\nabla}\right)\vec{v} = -\vec{\nabla}p + \vec{\nabla}(\mu\vec{\nabla}\cdot\vec{v}) - \frac{\mu}{K}\vec{v} + \rho\vec{g}$$
(7.1.2)

$$\varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = \nabla \cdot (\varepsilon \rho D \nabla Y_i) + Q$$
(7.1.3)

ここで、 ρ [kg/m³] はガス密度、 \vec{v} [m/s] は速度ベクトル、p [Pa] は静圧、 μ [Pa·s] は ガス粘性係数、D [m²/s] は有効拡散係数、 Y_i は化学種 i の質量分率、Q [kg/s] は水素 ガス放出量、t [s] は時間、 \vec{g} [m/s²] は重力ベクトルを示す。また、 ε は空隙率、K [m²] は透気係数で、多孔質媒体の特性を示す。本シミュレーション解析においては基本的に SI 単位系を使用するが、試験との比較のため水素ガス放出量については体積流量に換算 して単位 L/min にて表記した。

7.2.2 解析条件

本調査における解析条件を表 7-2-1 に示した。解析コードとして汎用数値流体解析ソフトウェア ANSYS Fluent 2019 R1 (Ver.19.3)を使用し、流体物性は水素と窒素の混合ガスとし、ガス密度 ρ は理想気体の法則を、ガス粘性係数 μ は温度依存の混合ガス式を用いた。境界条件としては、導管水素ガス放出口(流入口)に水素ガス放出量 Q(試験値)を設定し、気密ブース排気口(流出口)に大気開放条件を与え、壁面上の運動量保

存則に Non-Slip 条件および全ての化学種についてゼロ勾配条件を与えた。温度は試験値 を与え、解析領域内の温度を一定として扱った。また、本調査においては地中における空 隙率 ε , 透気係数 K, 有効拡散係数 D を地質パラメータと呼ぶこととし、各層の実測 値を与えた。

本調査において、地質パラメータやガス物性の一部設定に解析コードのカスタマイズ 機能^[3]を用いたが、特殊な物理モデルは使用しなかった。

項目	仕様・設定
解析コード	ANSYS Fluent 2019 R1 (Ver.19.3)
流体	混合ガス(水素・窒素)
流動様式	層流
ガス密度	理想気体の法則
ガス粘性係数	混合ガス式
温度	一定(試験値)
重力	考慮
流入口境界条件	質量流量(水素ガス放出量試験値)
流出口境界条件	大気開放
壁面境界条件	Non-Slip 条件, ゼロ勾配条件
地質パラメータ	各層の空隙率,透気係数,有効拡散係数 (実測値)

表 7-2-1 解析条件

7.3 平成 30 年度実フィールド試験再現解析

平成 30 年度事業で実施された地中障害物を含まない実フィールド試験を対象とした シミュレーション解析^[4]において、一部試験値との乖離がみられた要因を調査した。同 試験装置の真砂土層空隙率を再調査した結果、局所的な空隙率のバラツキが想定以上で あることを確認した。再調査結果を踏まえた再現解析および地質パラメータ感度解析の 結果、局所的には地質パラメータのバラツキの影響を受けるが、地中および大気(地表面 近傍)の水素拡散挙動については概ね良好に再現できることを確認した。

7.3.1 解析対象

解析対象となる地中模擬層を図 7-3-1 に示した。地中模擬層は、気密ブース(8.0m× 8.0m×3.0m^H)内に製作され、内径 7.0m、高さ 1.35mの円柱構造を有し、舗装 0.5m(ア スファルト層 0.15m+砕石層 0.35m)と真砂土層 0.85mで構成された。内部には、地表 から深さ 1.2mに水素放出口(φ1 mm ピンホール)を有する水素導管が埋設された。

地中模擬層および気密ブース内を 100%窒素ガスに置換した状態を初期状態とし、放出 口から一定流量の水素ガスを 24 時間放出し、地中埋設センサ 40 点による水素濃度計測 (うち1点はセンサ異常のため欠測)、ならびに、地表 20mm 高の光学的水素濃度分布 計測による水素拡散挙動調査が実施された。平成 30 年度事業でシミュレーション解析対 象であった水素放出量 3.37 L/min 条件の 1 ケースを解析対象として選定した(表 7-3-1)。



図 7-3-1 地中模擬層の構成

水素放出量	水素放出試験	供給停止後の挙動確認
1.93 L/min	0	_
3.37 L/min (2.5kPa)	0	_
5.54 L/min		0
7.84 L/min (10kPa)	0	0

表 7-3-1 試験条件および解析対象(着色部)

7.3.2 真砂土層空隙率再調查

平成 30 年度事業におけるシミュレーション解析における一部試験値とのデータ乖離 要因調査の一環として、真砂土層空隙率を再調査した。調査範囲を表 7-3-2 に、測定部位 および再調査状況を図 7-3-2 に、測定結果を図 7-3-3 に示した。再調査の結果、

- 特定領域の空隙率に偏りはみられないこと
- ・ 近接領域でも空隙率10%程度のバラツキが含まれること
- 試験前平均値23.6%に対し、再調査後全21点における平均値27.4%、最小値21.7%、 最大値35.1%となったこと

が示された。

	試験前(平成 30 年度)	試験後 (再調査)
測定部位	放出口から 650mm 上	放出口から 150mm 上および 600mm 上
測定個所数	3個所(1~3)	6個所(①~⑥)
測定点数	1点/個所(全3点)	3 点/個所(全 18 点)

表 7-3-2 真砂土層空隙率調查範囲



①~⑥:試験後測定個所(3点/個所) mm数値は水素放出口からの高さを示す





図 7-3-3 真砂土層空隙率測定結果

7.3.3 解析モデル

解析モデルを図 7-3-4 および図 7-3-5 に示した。解析範囲は、地中模擬層を含む気密ブ ース内に気密ブース天井面中央および四隅付近の計 5 か所に接続された集合排気管を加 えた領域とし、約 50 万セルの計算格子を作成した。地中模擬層については、図 7-3-1 に 示した舗装構造を再現した。水素導管については矩形構造に簡易化し、計算格子削減、計 算時間短縮化をはかった。なお、流入口境界条件として質量流量を与える場合には水素 放出口の寸法、形状による地中内水素拡散挙動に与える影響は小さいことを事前確認し たうえで、水素導管・流入口形状の簡略化を施した。

地質パラメータを表 7-3-3 に示した。基本的には平成 30 年度事業におけるシミュレー ション解析で使用された値としたが、真砂土層空隙率については 7.3.2 項の再調査結果を 反映した。

計算条件を表 7-3-4 に示した。水素放出量は試験データを合わせ、試験温度は物性値 (ガス密度、ガス粘性係数)の設定に用いた。



図 7-3-4 解析モデル(全域,約50万格子)





表 7-3-3 地質パラメータ

	空隙率	透気係数	有効拡散係数
	Е	$K[{ m m}^2]$	$D\left[\mathrm{m}^{2}\mathrm{/s} ight]$
アスファルト層	6.9%	$6.03 imes 10^{-12}$	$1.21 imes 10^{-6}$
砕石層	23.2%	$2.59\! imes\!10^{\text{-}11}$	$9.49 imes 10^{-6}$
真砂土層	27.4%	$2.77 imes 10^{-11}$	$8.30 imes 10^{-6}$

表 7-3-4	計算条件
水素放出量	試験温度
3.37 L/min	19.0 °C

7.3.4 解析結果

(1) 地中水素濃度分布

地中代表断面水素濃度分布図を図 7-3-6 に示した。ここで、左側半分に試験、右側半分 に解析で得られた1時間後、2時間後、6時間後、12時間後、24時間後の水素濃度分布 コンター図を並べた。全体的に同心円状に等方的に広がる水素拡散挙動は類似しており、 シミュレーション解析により地中の水素拡散挙動を定性的に再現できることを確認した。 また、シミュレーション解析結果に着目すると、アスファルト層がない場合と比べて、空 隙率の小さいアスファルト層により垂直(上)方向への水素拡散が抑制された結果、砕石 層および真砂土層において水平方向への水素拡散が促進される様子が確認された。試験 と解析の結果比較にて一部データ乖離がみられる要因には、地質パラメータのバラツキ による影響等が考えられた。



(2) アスファルト層および大気中における水素拡散挙動

アスファルト層における水素放出 12 時間後の水平方向水素濃度分布を図 7-3-7 に示した。ここで、地表面からの高さを y 座標で表し、y=0.000 は地表面、y=-0.150 は地中の アスファルト層と砕石層の境界面に位置する。アスファルト層においては水素拡散が抑 制され、水素放出口直上の水素濃度ピークは約 50%から地表面では約 2.4%に低下した。

大気中(地表面、地表高 20mm、地表高 50mm、地表高 1m)における水素放出 12 時間後の水平方向水素濃度分布を図 7-3-8 に示した。ここで、大気中における水素濃度解析値の変動が大きかったため、時間平均処理後のデータを使用した。大気中ではガス密度差に伴う自然対流が発生し、速やかに水素濃度が(気密ブース内全体で)均等化する傾向があり、水素放出口直上の水素濃度ピークが目立たなくなった。この水素濃度均等化については気密ブース内という試験上の制約を受けたもので、開放空間において発生する可能性は低いと考えられた。



図 7-3-7 アスファルト層における水平方向水素濃度分布(12時間後)



図 7-3-8 大気中における水平方向水素濃度分布(12時間後)

7.3.5 再現性の検証

水素放出口直上の大気中水素濃度および地中埋設センサ点における水素濃度経時変化 比較を図 7-3-9 に示した。一部データ乖離がみられるが、各点の試験と解析の水素濃度経 時変化について定性的に一致していることを確認した。



図 7-3-9 水素放出口直上大気中水素濃度および地中埋設センサ点水素濃度経時変化

地中埋設センサ点における水素放出 12 時間後の水素濃度試験値と解析値の比較図を 図 7-3-10 に示した。ここで、解析値/試験値=1.0 を一点鎖線で、解析値/試験値=0.8, 1.2 を 2 本の点線で示した。ほとんどのデータは点線で挟まれる相対比±2 割の範囲内に あることを確認した。地質パラメータなどの入力条件が適切であれば地中の水素拡散挙 動の再現性は高いと考えられた。



図 7-3-10 地中水素濃度全点比較(12時間後)

7.3.6 地質パラメータ感度解析

7.3.2 項の真砂土層空隙率再調査において真砂土層空隙率に 10%強のバラツキがみら れたこと、7.3.4 項および 7.3.5 項において地質パラメータが水素拡散挙動の再現性に影 響を与えると推定されたことを踏まえ、7.3.3 項の解析モデルを使用して地質パラメータ 感度解析による影響度の評価を試みた。

地質パラメータ感度解析における真砂土層地質パラメータを表 7-3-5 に示した。空隙 率実測値を基準に 3 ケースを設定し、透気係数については Ergun の関係式^[5] (7.3.1)、 有効拡散係数については Millington & Quirk の関係式^[6] (7.3.2)を用いて推定した。こ こで、式 (7.3.1)の平均粒子径 d_p および式 (7.3.2)の大気中のガス拡散係数 D_0 につ いては ϵ , K, Dの実測値から逆算して求めた。また、表 7-3-5の空隙率実測最大値 36.4% については真砂土層無転圧時の実測値(表 4-4-2)を使用した。

$$K = \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{150(1-\varepsilon)^2}, \quad d_p = 3.27 \times 10^{-4} [\text{m}]$$
(7.3.1)

$$\frac{D}{D_0} = \varepsilon^{\frac{4}{3}}, \qquad D_0 = 4.7 \times 10^{-5} [\text{m}^2/\text{s}]$$
 (7.3.2)

地質パラメータ感度解析結果を図 7-3-11 に示した。ここで、水素放出口から高さ方向 と水平方向の 2 本の検査線(検査線 V,検査線 H)を定義し、検査線上の水素濃度分布 を 2 つのグラフに示した。真砂土層空隙率により、水素放出口から 0.4~1m 程度離れた 領域で最大±20%程度の影響がみられるが、水素放出口から離れるほど地質パラメータ の影響が小さくなる傾向を確認した。

地中埋設センサ点における感度解析結果比較を図 7-3-12 に示した。基準の空隙率 ε =27.4%条件時の解析結果と比較して、空隙率 ε =36.4%条件で相対的に最大 2 割程度の 影響が確認された。また、グラフ中水素濃度 10%以下の範囲のプロットに着目すると、 比較的感度が小さくなっており、図 7-3-12 においても水素放出口から離れるほど地質パ ラメータの影響が小さくなる傾向を確認した。

参考までに、水素放出量一定条件での感度解析において空隙率大にて水素濃度低となる 直感的な感覚と逆の傾向が示されたが、水素供給圧力一定条件での感度解析において 空隙率大にて水素放出量大、水素濃度高となることを別途確認したことを付記する。

表 7-3-5 地質パラメータ感度解析条件(真砂土層)					
	空隙率	透気係数	有効拡散係数		
	Е	$K[m^2]$	$D \left[\mathrm{m}^{2} \mathrm{/s} \right]$		
空隙率実測最低值	21.7%	$1.18 imes 10^{-11}$	$6.08 imes 10^{-6}$		
空隙率実測平均値	27.4%	$2.77 imes 10^{-11}$	$8.30 imes 10^{-6}$		
空隙率実測最大値	36.4%	$8.54 imes 10^{-11}$	$1.22 imes 10^{-5}$		

100% 80% 水素濃度 60% - ε=21.7% 40% ε=27.4% 20% •• ε=36.4% 0% 0.0 0.3 0.6 0.9 1.2 (検査線V)水素放出口からの距離[m] 100% ε=21.7% 80% ε=27.4% 水素濃度 60% •• ε=36.4% 40% 20% 0% 0.5 1.5 2.0 2.5 0.0 1.0 3.0 3.5 (検査線H)水素放出口からの距離[m] 検査線V 検査線H 小素放出

図 7-3-11 地質パラメータ感度解析結果(12時間後)

3.37 L/min



図 7-3-12 地中埋設センサ点における感度解析結果比較(12時間後)

7.3.7 まとめ

舗装を施した地中障害物を含まない平成 30 年度実フィールド試験の再現解析により、 以下の知見が得られた。

- 地中及び大気(地表面近傍)の水素拡散挙動について定性的に再現可能であった。
 定量的には水素濃度試験値と比較して±2割の範囲内になることが確認された。
- 地質パラメータ再調査により、地中模擬層の真砂土層の空隙率には近接でも10%
 程度のバラツキが含まれており、局所的な水素拡散挙動に影響を与えることが確認された。
- 地質パラメータ感度解析により、地質パラメータの影響は水素放出口から0.4~
 1.0m程度離れた領域で最大2割程度の影響がみられるが、水素放出口から離れる ほど影響は小さくなる傾向が示された。
- 水素放出口に近いほど局所的な地質パラメータのバラツキの影響を受けるものの、「地質パラメータ分布把握の制約」および「地質パラメータ感度」により生じる誤差を踏まえた解析を実施することで、地中および大気(地表面近傍)の水素拡散挙動を評価可能であることを確認した。

7.4 令和元年度実フィールド試験再現解析

第6章で実施された実フィールド試験の一部を対象としたシミュレーション解析により、地中障害物による地中及び大気中(地表面近傍)への水素拡散挙動を再現した。さらに、垂直構造体近傍の地質パラメータ分布を考慮したケーススタディを実施した。

7.4.1 解析対象

解析対象となる地中模擬層を図 7-4-1 に示した。地中模擬層は、気密ブース(8.0m×8.0m×3.0m^H)内に製作され、内径 7.0m、高さ 1.35mの円柱構造を有し、舗装 0.5m(アスファルト層 0.15m+砕石層 0.35m)と真砂土層 0.85mで構成された。地中模擬層内部には、地中障害物として水平構造体および垂直構造体が設置され、地表から深さ 1.2mに水素放出口(ϕ 1 mm ピンホール)を有する 3 本の水素導管(A,B,C)が埋設された。

地中模擬層および気密ブース内を100%窒素ガスに置換した状態を初期状態とし、放出 ロから一定流量の水素ガスを24時間放出し、地中埋設センサ60点による水素濃度計測 (うち1点はセンサ異常のため欠測)、ならびに、地表20mmおよび50mm高の光学的 水素濃度分布計測による水素拡散挙動調査が実施された。各試験のうち、水素放出点に おける水素放出量1.93 L/min条件の3ケースを解析対象として選定した(表7-4-1)。



水素	水素加	汝出量	供給停止後の挙動確認
放出点	1.93 L/min 5.54 L/min		(5.54 L/min 試験後)
А	0	0	0
В	0	0	_
С	0	0	0

表 7-4-1 試験条件および解析対象(着色部)

7.4.2 解析モデル

解析モデルを図 7-4-2 および図 7-4-3 に示した。解析範囲は、地中模擬層を含む気密ブース内に気密ブース天井面中央および四隅付近の計 5 か所に接続された集合排気管を加 えた領域とし、約 100 万セルの計算格子を作成した。地中模擬層については、図 7-4-1 に 示した舗装構造、水素導管、水平構造体、垂直構造体の形状、寸法を再現した。

使用した地質パラメータを表 7-4-2 に示した。アスファルト層、砕石層、真砂土層にお ける地質パラメータを各層一様と仮定し、実測値(表 4-4-1)を使用した。

計算条件を表 7-4-3 に示した。各ケースにおいて、水素放出点は異なり、水素放出量は 共通となる。試験温度は物性値(ガス密度、ガス粘性係数)の設定に用いた。



図 7-4-2 解析モデル(全域,内部可視化処理,約 100 万格子)



図 7-4-3 解析モデル(代表断面)

表 7-4-2 地質パラメータ

	空隙率	透気係数	有効拡散係数
	Е	$K[{ m m}^2]$	$D \left[\mathrm{m^{2/s}} \right]$
アスファルト層	3.8%	$1.20 imes 10^{-11}$	$6.97 imes 10^{-7}$
砕石層	23.9%	$8.62 imes 10^{-12}$	$1.05 imes 10^{-5}$
真砂土層	25.7%	1.01×10^{-11}	$1.07 imes 10^{-5}$

表 7-4-3 計算条件

	水素放出点	水素放出量	試験温度
case A	放出口 A	1.93 L/min	19.9 °C
case B	放出口 B	1.93 L/min	20.4 °C
case C	放出口 C	1.93 L/min	$21.5~^\circ\!\mathrm{C}$

7.4.3 解析結果

(1) 地中水素濃度分布

各ケースの地中代表断面水素濃度分布(左側:試験,右側:解析)および代表センサ点 水素濃度経時変化グラフを図 7-4-4~9に示した。いずれのケースにおいても、試験結果 と定性的に概ね一致したが、定量的には地中水素濃度を過小評価する傾向がみられた。 6.3.3 (2) で考察された case C における垂直構造体沿いの水素拡散がやや先行する傾向 について、本解析(図 7-4-8) では確認されなかった。



図 7-4-4 地中代表断面水素濃度分布 (case A)



図 7-4-5 代表センサ点水素濃度経時変化 (case A)



図 7-4-6 地中代表断面水素濃度分布 (case B)



図 7-4-7 代表センサ点水素濃度経時変化 (case B)



図 7-4-8 地中代表断面水素濃度分布 (case C)



図 7-4-9 代表センサ点水素濃度経時変化 (case C)

(2) 大気中水素濃度分布

各ケースの大気中(地表+20mm)における水素放出 12 時間後の水平方向水素濃度分 布を図 7-4-10 に、代表点水素濃度経時変化を図 7-4-11 に示した。ここで、試験値、解析 値とも水素濃度の変動が大きかったため、平均処理後のデータを使用した。case A およ び case B における大気中水素濃度については試験値と解析値が概ね一致することを確認 した。case C における解析値はやや過小となるが、定性的に一致することを確認した。



図 7-4-10 大気中水平方向水素濃度分布(12時間後)



図 7-4-11 大気中代表点水素濃度経時変化(代表点:地表+20mm, コンター図▼印)

7.4.4 再現性の検証

各ケースの地中埋設センサ点における水素放出 12 時間後の水素濃度試験値と解析値 の比較図を図 7-4-12 に示した。ここで、解析値/試験値=1.0 を一点鎖線で、解析値/試 験値=0.8, 1.2 を 2 本の点線で示した。全体的には、解析値/試験値=0.8 の点線近くにプ ロットされるデータが多く、試験値と比べて概ね 2 割程度低めの過小評価となった。7.3.2 項の真砂土層空隙率再調査結果および 7.3.6 項の地質パラメータ感度解析結果を踏まえ ると、地質パラメータなどの入力条件を見直すことで、水素拡散挙動の再現性改善が期 待された。



図 7-4-12 地中水素濃度全点比較(12時間後)

7.4.5 垂直構造体近傍の地質分布を想定したケーススタディ

7.4.3 項 case C の解析においては、6.3.3 (2) で考察された「垂直構造体沿いの水素拡 散がやや先行する傾向」が示されなかった。このため、地中模擬層製作時における垂直構 造体近傍の真砂土転圧が不均一だったと仮定し、図 7-4-13 および表 7-4-4 に示すケース スタディを試みた。具体的には、垂直構造体近傍幅約 70mm の真砂土空隙率を ε_{m1} 、そ れ以外の真砂土空隙率を ε_m とし、case C1~C3 の ε_{m1} に無転圧時の真砂土空隙率 36.4% を設定、case C2 の ε_m に平成 30 年度実フィールド試験の真砂土空隙率最低値 21.7%を 設定、case C3 の ε_m に先行調査研究^[7] における山砂空隙率最低値 18.1%を設定した。な お、透気係数および有効拡散係数については式 (7.3.1)、(7.3.2) の経験式を用いて設定 した。

ケーススタディ解析結果として、水素放出 12 時間後の地中代表断面水素濃度分布を図 7-4-14 に、代表センサ点を含む水平方向水素濃度分布を図 7-4-15 に示した。垂直構造体 近傍における地質パラメータなどの入力条件を見直すことで、地中における水素拡散挙 動の再現性を改善可能と考えられた。



図 7-4-13 垂直構造体近傍地質分布想定

表 7-4-4 垂直構造体近傍地質分布想定における真砂土層空隙率設定

	\mathcal{E}_m	<i>E</i> m1 (壁面約 70mm)
case C	25.7%	25.7%
case C1	25.7%	36.4%
case C2	21.7%	36.4%
case C3	18.1%	36.4%



⊕:代表センサ点

図 7-4-14 地中代表断面水素濃度分布 (12 時間後)



図 7-4-15 代表センサ点水平方向水素濃度分布(12時間後)

7.4.6 まとめ

舗装を施した地中障害物を含む令和元年度実フィールド試験の再現解析により、以下の知見が得られた。

- 地中の水素拡散挙動について定性的に再現可能であった。定量的には水素濃度試験値と比較しては概ね2割程度の過小評価となった。試験で確認された垂直構造体近傍沿いをやや先行する傾向については、地質パラメータの分布を考慮することで再現性の改善が可能なことを示した。
- 大気(地表面近傍)の水素拡散挙動について定性的に再現可能であった。定量的にはやや過小評価となるケースもあったが実用レベルの再現性と考えられた。

7.5 地中障害物構造ケーススタディ

第6章の実フィールド試験における地中障害物(水平構造体)の寸法は、障害物が水 素拡散挙動に与える影響を確認する目的で、予備解析結果にもとづき幅1mに設定され た。ここでは、実際の埋設ガス導管の上方に設置される可能性のある防護鉄板や小型ボ ックスカルバートを想定したケーススタディを実施し、水素センサ設置位置と漏えい検 出時間の関係を整理した。

7.5.1 解析対象

地中障害物の構造想定ケースを図 7-5-1 に示した。障害物がない条件として case 0、 7.4 節の case A と同様な幅 1m の水平構造体を想定した case 1、掘削等による埋設ガス 導管損傷対策に設置される防護鉄板(幅 400mm)を想定した case 2、電線等の収容に用 いられる小型ボックスカルバート(断面 400mm×400mm)を想定した case 3、防護鉄 板の傾斜角度 5 度を想定した case 4 の計 5 ケースを解析対象として設定した。



図 7-5-1 地中障害物構造想定ケース

7.5.2 解析モデル

実フィールド試験条件を踏まえたうえ、管路方向の地中水素拡散挙動評価を目的とし て図 7-5-2 に示す矩形の解析モデルを作成した。舗装・土砂条件としては、舗装 0.5m(ア スファルト層 0.15m+砕石層 0.35m)と真砂土層 0.85m で構成、水素導管埋設深さ 1.2m、 地下水位相当深さ 1.35m とし、実フィールド試験条件と揃えた(図 7-5-1,図 7-5-3)。 幅方向は水素導管から左右 3.5m ずつ、水素導管管路方向は水素放出口から前後 7m ずつ を解析範囲とし、側壁は壁面で囲われているものとした。大気層においても実フィール ド試験同様の気密ブースを想定した閉空間とし、天井部に排気口 1 点を設けた。実際の 大気層は風等、環境の影響を受ける開空間であるため、本ケーススタディにおいては、水 素拡散挙動の評価範囲を地中から地表面までに限定することとした。また、計算領域に ついては対称性を考慮し、case 0~3 については 1/4 領域(約 50 万格子)、case 4 につい ては 1/2 領域(約 100 万格子)とした。



図 7-5-2 解析モデル (case 2, 1/4 計算領域をカラー表示,約 50 万格子)

代表断面における解析モデルを図 7-5-3 に示した。水素放出口直上の地表面を座標の 原点とし、水素放出口(水素導管上面)を座標(0,-1.200,0)、排気口を座標(0,1.000, 0)に設定、水素放出口の直上に水素濃度経時変化モニター用の検査点A,B,Cを定義し た。検査点Aは砕石層と真砂土層の境界で地表深さ0.5mに、検査点Bはアスファルト 層と砕石層の境界で地表深さ0.15mに、検査点Cは地表面(座標原点)に位置する。



図 7-5-3 解析モデル(case 2,代表断面,図中カッコ内数値は x,y,z 座標を示す)

流体物性については実フィールド試験同様に水素と窒素の混合ガスとし、地質パラメ ータについても表 7-4-2 と同じ設定とした。

計算条件を表 7-5-1 に示した。解析領域全体を 100%窒素ガスに置換した状態を初期状態とし、放出口から一定流量の水素ガスを 24 時間放出するものとした。水素放出量としては 7.4 節と同条件 1.93L/min と、その 4 倍の 7.72L/min に設定した。ただし、case 4 については case 2 との比較を目的とし、水素放出量 1.93L/min 条件のみとした。

	障害物形状	水素放出量	温度
case 0	障害物なし	1.93L/min, 7.72L/min	20.0 °C
case 1	水平構造体	1.93L/min, 7.72L/min	$20.0~^\circ \mathrm{C}$
case 2	防護鉄板	1.93L/min, 7.72L/min	20.0 °C
case 3	小型ボックスカルバート	1.93L/min, 7.72L/min	20.0 °C
case 4	防護鉄板(傾斜角5度)	1.93 L/min	20.0 °C

表 7-5-1 想定ケースおよび計算条件

7.5.3 解析結果

水素放出量 1.93L/min 条件における水素放出 12 時間後の各ケース地中代表断面水素 濃度分布を図 7-5-4 に示した。水素は障害物を回り込みながら概ね等方的に拡散する挙 動が確認された。検査点 A,B,C における水素濃度経時変化を図 7-5-5 に示した。ここで、 検査点 C における水素濃度の変動が大きかったため、時間平均処理後のデータを使用し た。各検査点における水素濃度は、case 0, case 2 (case 4), case 3, case 1 の順に高く、 24 時間後の地表面 (検査点 C) での水素濃度は、1.5~1.9%であった。水平に設置された 防護鉄板 (case 2) と傾斜角 5 度で設置された防護鉄板 (case 4) における水素拡散挙動 の差異は小さいことを確認した。



図 7-5-4 地中代表断面水素濃度分布(1.93L/min, 12 時間後)





水素放出量 7.72L/min 条件における水素放出 3 時間後の地中代表断面水素濃度分布を 図 7-5-6 に示した。図 7-5-4 (1.93L/min, 12 時間後)と同じ総水素放出量 (1389.6L) となるが、7.72L/min 条件では地中内に高濃度の水素が蓄積され、地表の水素濃度ピー ク値は 10%を超えた。検査点 A,C における水素放出量 7.72L/min および 1.93L/min 条 件の水素濃度経時変化を合わせて図 7-5-7 に示した。ここで、検査点 C における水素濃 度の変動が大きかったため、時間平均処理後のデータを使用した。検査点 A (y=-0.500) においては、水素放出量 1.93L/min から 4 倍の 7.72L/min になると水素濃度が 2~3 倍 程度となった。水素放出量 7.72L/min 条件における地表面の検査点 C (y= 0.000) にお いては、いずれのケースでも 30~50 分程度で水素濃度 4%を超過する結果となった。



図 7-5-6 地中代表断面水素濃度分布 (7.72L/min, 3 時間後)



図 7-5-7 検査点水素濃度経時変化(7.72L/min, 1.93L/min)

7.5.4 地中深さ 50cm における水素濃度分布例

日本ガス協会発行の本支管指針(維持管理編)^[8]によると、導管の漏えい箇所の調査 において、「管路上を中心にボーリングし、臭気管を立て、ガス検知器または臭気により 漏えいの有無を調査する。」とあり、ボーリング調査概念図においてボーリング孔の深さ 50cm と示されていた。ここでは、各ケースの地中深さ 50cm における水素濃度分布例を 図 7-5-8, 図 7-5-9 に参考として示した。



図 7-5-8 地中深さ 50cm 断面水素濃度分布(1.93L/min, 12 時間後)



図 7-5-9 地中深さ 50cm 断面水素濃度分布 (7.72L/min, 3時間後)

7.5.5 水素センサ設置位置と漏えい検出時間の関係

本ケーススタディにおける水素センサ設置位置と漏えい検出時間の関係を表 7-5-2 に まとめた。ここで、地中水素センサの検出限界を 500ppm と仮定し、水素導管直上のア スファルト層直下への水素センサ埋設(x=0.000, y=-0.150)を想定した。

想定水素センサ埋設深さにおける 500ppm 水素漏えい検知時間は、水素放出量 1.93L/min 条件の場合に最短 12 分~30 分程度、水素放出量 7.72L/min 条件の場合に最 短 8~19 分程度であった。漏えい検知を行う際の検知間隔等について、第 8 章で検討す る。

表 7-5-2 アスファルト層直下水素センサ位置と漏えい検出時間の関係

(a) 水素放出量1.93L/min条件における500ppm水素漏えい検知時間(単位:分)

管路方向距離(m)	z=0.0	z=0.5	z=1.0	z=1.5	z=2.0	z=2.5	z=3.0
case 0	11.9	15.2	24.8	41.6	65.8	98.3	138.2
case 1	29.2	32.7	42.9	60.1	84.2	115.5	154.0
case 2	15.4	18.8	28.7	45.3	69.2	100.9	140.3
case 3	17.1	20.6	30.7	47.6	71.7	103.3	142.1
case 4	15.6	18.9	28.8	45.4	69.3	101.1	140.6

(b) 水素放出量7.72L/min条件における500ppm水素漏えい検知時間(単位:分)

管路方向距離(m)	z=0.0	z=0.5	z=1.0	z=1.5	z=2.0	z=2.5	z=3.0
case 0	8.0	10.3	17.2	29.3	47.5	71.8	100.1
case 1	19.1	21.5	28.8	41.1	58.8	82.1	110.3
case 2	10.2	12.6	19.6	31.8	49.6	73.4	101.8
case 3	11.2	13.6	20.8	33.0	50.9	74.7	102.5

7.5.6 まとめ

埋設ガス導管の上方に設置される可能性のある防護鉄板や小型ボックスカルバートを 想定したケーススタディにより、以下の知見が得られた。

- 令和元年度の実フィールド試験と同じ地質パラメータ条件の下、水素放出量1.9 3L/min条件では24時間後の地表の水素濃度は1.5~1.9%であった。また、水素放出量7.72L/min条件では30~50分程度で水素濃度4%を超過する結果となった。
- 防護鉄板(幅400mm)の傾斜による水素拡散挙動への影響は小さいことを確認 した。
- 各ケースにおける水素センサ設置位置と漏えい検出時間の関係を整理した。
7.6 シミュレーション解析の基礎検討まとめ

実フィールド試験で得られた水素の濃度変化をシミュレーションにより再現し、比較 検証した結果、以下の結論が得られた。

- 特殊な物理モデルを使用することなく、地中及び大気(地表面近傍)の水素拡散
 挙動を再現するシミュレーションは可能。
- 地質パラメータなどの入力条件が適切であれば、水素拡散挙動の再現性は高い。

詳細な地質パラメータ分布の把握には制約があることから、シミュレーション解析にお ける地質パラメータについては各層一様と仮定した設定等が現実的と考えられる。その ため、シミュレーション解析においては、地質パラメータ設定が地中水素濃度に与える 影響(本調査範囲では2割程度の誤差)を踏まえた検討が望まれる。本調査の範囲にお いて地質パラメータの影響は水素濃度2割程度に相当することを確認した。その一方で、 地表付近の水素拡散挙動の再現性は高いことを確認した。 [参考文献]

- [1] ANSYS Inc. : "Fluent Theory Guide", Fluent Release 2019 R1 (2019)
- [2] ANSYS Inc. : "Fluent User's Guide", Fluent Release 2019 R1 (2019)
- [3] ANSYS Inc. : "Fluent Customization Manual", Fluent Release 2019 R1 (2019)
- [4] 四国総合研究所:平成 30 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(地中及び大気中の水素拡散挙動調査)」調査報告書, pp.125-133, (2019)
- [5] Ergun, S. : "Fluid Flow Through Packed Columns", Chemical Engineering Pogress, Vol.48, No.2, pp.89-94, (1952)
- [6] Millington R. J., Quirk J. P.: "Permeability of Porous Solids", Transactions of the Faraday Society, Vol.57, pp.1200-1207, (1961)
- [7] 岡本英樹, 五味保城, 赤木寛一:「水素ガスの地中での移動特性とその検知」, 土木 学会論文集 F, Vol.66, No.1, pp.146-157, (2010)
- [8] 日本ガス協会:「本支管指針(維持管理編)」(JGA 指-203-16), pp.136-141, (2016)

8. 成果の活用

本調査では、平成28年度から本年度に亘る4年間を経て、前章までに述べたとおり、 埋設導管の微小な損傷に伴う水素漏えい事象が発生した場合を想定した、地中及び大気 中における水素ガスの基本的な拡散挙動を実験的に明らかにすると共に、これらの現象 が、地中構造物が存在するなど、比較的実践的な条件下においてもシミュレーション解 析によって定性的な再現が可能であること、適切な地質パラメータを設定することによ って定量的にも良好な再現性が得られることを示した。

これらの成果は、今後、ガス関連事業者がこれまでに培った技術・経験・ノウハウと融 合し、水素導管供給システムの維持管理における安全対策に係る技術基準等の整備にお いて活用されるものと考えられる。

本章では、万一、導管からガス漏えいが発生した場合になされる「①漏えいを迅速に検 知」→「②漏えい位置を的確に特定」→「③遮断等の措置」→「④漏えい箇所の修理」の 措置の検討における、本成果の具体的な活用事例について述べる。

8.1 漏えい箇所の迅速な検知と漏えい箇所の特定

実運用において埋設導管からの水素漏えいを監視する手法は、幾つかの候補が挙げら れているものの、現時点では定められていない。ここでは、漏えい監視方法として、水素 検知警報器(以下水素センサ)を用いる場合を例示する。

センサを用いて漏えい監視を行う上でその設置箇所の選定は極めて重要である。一般 的な水素関連施設において、水素センサを用いた受動的な漏えい監視を行う場合、通常 はある区画された空間の天井など上方の代表点にセンサが配置されている。これは水素 分子の大気成分に対し比重が軽いという特性に照らし、設置箇所が検討された結果であ る。これと同様に、地中埋設導管からの水素漏えい監視についても、本調査で得られた地 中及び大気中における水素の基本的な拡散挙動に合わせて、設置箇所を検討する。

本調査において、アスファルト層を介し地中から大気中に拡散する水素の空間濃度分 布は、わずかにピークが確認できる場合があるものの、概ね一様な分布を示し、濃度の絶 対値も数%程度の低い値に留まった。また、土壌層が真砂土のみの場合においては、比較 的明確なピークが確認できるものの、ピーク点とその他の点との濃度差は 1~2%程度で あった。現実の屋外環境では風や物体の移動などにより、大気は常に流動しているため、 地中から大気中に拡散した水素は瞬時に大気成分と混合し濃度が低下すると共に、濃度 分布のわずかな特徴は消滅するものと考えられる。また、漏えい開始から長時間が経過 すれば、大気の流動の影響を受けながらも水素検知ができる可能性はあるが、その段階 では、既に地中における高濃度領域が広範囲に広がっている。したがって、迅速な検知や 漏えい箇所の特定という観点から大気中において水素漏えい監視を行うことは困難であ ると言える。 一方、地中における水素の拡散は、放出口を中心に概ね放射状に広がる結果が得られ ている。また、水素濃度も比較的早期に高濃度に達することから、漏えい事象の迅速な検 知には地中への水素センサの配置が妥当であるものと考えられる。更に迅速性を高める には、水素センサを埋設導管のより近傍に配置することが有効である。しかしながら、真 砂土層への水素センサの埋設は、導管の埋設工程の大幅な煩雑化に繋がることが予想さ れる。これらの状況から、ここでは図 8-1-1 に示すとおり、センサの設置箇所を埋設導管 直上のアスファルト層と砕石層の境界に設定する。



図 8-1-1 地中における水素センサ設置箇所事例

水素センサの多点配置によって漏えい監視を行う場合、漏えい検知の迅速性と漏えい 箇所を特定する能力は密接に関連しており、図 8-1-1 に示す設置間隔 L がこれらの性能 に寄与する。



図 8-1-2 センサの発報と漏えい位置との関係

図 8-1-2 に、センサの発報と漏えい位置との関係の概念を示す。水素漏えい開始から、 センサの発報までの時間が最も短い場合は、損傷箇所直上にセンサが配置されていた場 合(図 8-1-2 損傷箇所 A、以下ケース A)である。反対に、発報までに最も長時間を要す る場合は、損傷箇所直上が、2 つのセンサの中央に位置する場合(図 8-1-2 損傷箇所 C、 以下ケース C) であり、損傷箇所 B (以下ケース B) はケース A と C 以外の場合である。 設置間隔Lが短いほど、ケースCの位置関係が生じる確率が低くなり、より迅速な検知 が可能となる。また、Lが短いほど、濃度分布計測における空間分解能が高くなり、より 正確な漏えい箇所の特定が可能となる。一方、当然のことながら、L を短くするために は、センサの点数を増やす必要があるため、漏えい監視に係るコストは増加し、施工工程 も煩雑化する。これらの状況を踏まえ、具体的な設置間隔の値については今後実運用に おける諸事情を反映し、漏えい監視方法も含めて検討がなされるべきであると考えられ るが、ここでは、一例として、図 8-1-3 に示すようにセンサの設置間隔 L=0.5 m とした 場合の漏えい開始から警報発報に要する時間について考える。センサの検出限界(警報 発報閾値)は500 ppm(市販の水素検知警報器における閾値の一例から設定)とし、用 いるデータは前章 7.5.5 項ケーススタディにおける「表 7-5-2 アスファルト層直下水素 センサ位置と漏えい検出時間の関係」に示す値とする。



図 8-1-3 漏えい開始から警報発報に要する時間の検討に使用するモデル

表 8-1-1	アスファルト層直下水素センサ位置と漏えい検出時間の関係
	(表 7-5-2 より抜粋)

						単	鱼位 [分]
漏えい箇所からの距離 [m]	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
漏えい量 1.93 L/min	11.9	15.2	24.8	41.6	65.8	98.3	138.2
漏えい量 7.72 L/min	8.0	10.3	17.2	29.3	47.5	71.8	100.1



図 8-1-4 アスファルト層直下水素センサ位置と漏えい検出時間の関係

表 8-1-1 及び図 8-1-4 に示すとおり、漏えい量 1.93 L/min の場合では、損傷箇所直 上にセンサが配置されていた場合に漏えい検知に要する時間は約 12 分、漏えい箇所から 0.5 m 外れていた場合約 15 分となっており、さらに距離が離れるに従い、検知に要する 時間は指数関数的に増加していく傾向にある。このように、センサの配置間隔によって、 漏えい監視において実現できる性能が大幅に変化することがわかる。

このような特性に実運用上の様々な条件を併せ、漏えい検知方法の妥当性や水素セン サの設置条件を設定することが重要であると考えられる。

また、導管上に構造物が埋設されている場合、表 7-5-2 に示したとおり、水素漏えい検知に時間遅れが生じる。特に埋設物の面積が大きい幅1メートルの防護鉄板を想定した事例(表 7-5-2 case1)では、漏えい箇所直上において漏えい検知までに2倍以上の時間を要する。したがって、実現場において導管上に埋設されている物体を把握しておくことが重要である。

以上が、本成果を用いた水素センサの設置箇所及び設置間隔の検討の一例であるが、 本調査においては、シミュレーション解析により概ね良好な再現性が得られているもの の、濃度の絶対値としては試験値に対し 20%程度の乖離が生じている場合がある。した がって、実運用上では、解析条件に一定の幅をもたせる、或いは安全サイドにシフトさせ た解析条件を用いた計算結果に基づき、検討を進める必要があるものと考えられる。

8.2 遮断等の措置及び漏えい箇所の修理

埋設導管からの水素漏えいが検知されると、その後遮断等の措置及び漏えい箇所の修

理へと移行する。その際、警報発報の段階で、地中及び大気中における水素の分布がどの ような状態にあるか、また特に地中においてその後水素濃度分布がどのような経過を辿 るかについて、実現場において推定できることが極めて重要であると考えられる。特に、 漏えい箇所の修理を安全に行うためには、少なくとも地中水素濃度が爆発化限界以下に 低下してから作業を行う必要がある。本調査においては、第6章に示すように、種々の 条件下における水素の拡散挙動を実験的に明らかにすると共に、供給停止後の地中水素 濃度分布の変化を明らかにしており、これらの成果が一つの参考となる。また、これに加 えシミュレーション、感度解析などにより、地中及び大気中における水素拡散挙動とし て、次の特徴が明らかになっている。

- (1) 真砂土層・砕石層
 - 障害物がない場合、水素は概ね放射状に水平・鉛直方向ともに同等に拡散する。
 - ・ 垂直構造体がある場合、真砂土との境界付近も十分に転圧がなされるなど、適切 に施工がなされている場合には、構造体境界付近において水素が優先的に透過する などの特異な現象は生じない。
 - 実現場では、垂直構造体近傍は重機の使用が困難であるため、真砂土との境界付近に他の領域と比較して空隙率が高い領域が形成される場合がある。大幅に空隙率が高い領域が存在し、特に垂直構造体近傍から水素が漏えいした場合、構造体近傍を水素が優先的に透過する現象が生じる。
 - ・ 水平構造体の存在は、水素の拡散領域を水平方向に拡大する作用がある。
- (2) アスファルト層
 - ・ 全体としては真砂土層よりも気体を通しにくく、土壌層全体における気体の透過 を抑える方向に作用するため、真砂土のみの場合と比較して、地中に高濃度の領域 が形成され易い。
 - ・ 真砂土からアスファルトを透過した水素は、緩やかに拡散し、ピークなどの空間
 分布的な特徴を潜在化させる。
 - 構造体との境界において、他の領域と比較して 10 倍以上気体が透過しやすい層 が形成される場合がある。
- (3) 大気層
 - 実現場においては、アスファルトが施工されている場合、損傷箇所直上における
 濃度のピークの観測が困難である。
 - 構造体との境界直上において周辺より濃度が高くなる場合がある。

これらの各層のうち、特に真砂土層における水素濃度分布の状態が現場の環境に最も 大きく影響を受ける。したがって、修理等の措置を安全に行うための一つの方策として、 導管埋設箇所付近における地質パラメータを事前に計測し、データベース化しておくこ とが有効であると考えられる。各現場で使用される土壌試料や、気候条件等を勘案し、デ ータベース化する空隙率範囲を設定すると共に、空隙率と含水比・湿潤密度など現場で 計測することができるパラメータとの紐づけも重要である。

一方で、地質パラメータは天候や環境条件によって経時的に変化する。このため、現場 において漏えい事象発生時における時間的、空間的な環境の変化に合わせ、本調査の成 果をベースに、真砂土層においてどのような水素の分布が形成されるかについて、定性 的に推定できることが重要である。そのために、真砂土層における水素拡散挙動と地質 パラメータの関係に関する基本的な概念を以下に示す。

図 8-2-1 は、本試験に用いた真砂土の乾燥密度と含水比の関係の一例を示している。真砂土は、最適に締め固まる条件において乾燥密度が最大値をとり、最大乾燥密度と呼ばれている。また、その際の含水比は最適含水比と呼ばれ、両者の条件が実現された状態、即ち最適含水比状態の土壌試料を最適に締め固めた際に、用いた土壌試料の強度が最も高くなる。本事例では、最適含水比が約 12%、最大乾燥密度は約 1.925 g/cm³である。



図 8-2-1 土壌試料の乾燥密度と含水比の関係の一例

通常、適切に施工された完成直後の真砂土層は、概ね最大乾燥密度を示す状態に締め 固められている。この状態から経時的な環境の変化や天候によって含水比が変化し、こ れに伴い水素拡散に寄与する空隙率並びに透気係数、拡散係数が変化すると考える。

大気の乾燥状態が継続するなど地中の水分が低下する条件では、真砂土層内の空隙が 徐々に増加し、透気係数、拡散係数が大きくなるため、地中における水素の拡散はより速 く進行する。また、供給圧力、損傷部の面積(水素放出口径に相当する値)が同一である 場合、真砂土層の空隙率が高いほど放出流量が増加する。即ち空隙率の増加は、導管の損 傷により放出される水素の流量を増加させると共に、地中における水素拡散の進行を速 める方向に作用する。

他方、雨天が継続するなど、地中の水分が増加する条件では、真砂土層内の空隙が減少

する方向に推移する。これに伴い、水素拡散の進行は緩やかになり、また、同一条件下に おける水素放出流量も低下する。

これらの定性的な特性を、本調査において得られた試験データやシミュレーション解 析結果と併せることにより、地中の水素拡散挙動の推定が可能であると考えられる。

正確には、現場における地質パラメータを実測結果から求め、シミュレーション解析 を行うことが妥当であると考えられるが、特に漏えい箇所の修理における安全性確保の 観点では、実際に作業を行う者が、目に見えない地中の水素濃度分布を一定の水準で推 定することができ、常にワーストケースを想定しながら措置に当たることも重要な要素 であるものと考えられる。本調査の成果は、これらの感覚を養うための基本的な知見の 獲得に寄与するものである。

9. 総括

本調査では、地中埋設導管からの水素漏えい時における対応措置を検討するために、 実運用時を模擬したスケールでの地中及び大気中(地表面近傍)における水素拡散挙動 を確認することを目的として、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 ルド試験及びシミュレーションを行い、地中障害物による水素ガスの拡散挙動を把握、 整理した。得られた結果は以下のとおりである。

(1) 小規模容器による基礎試験

下記(2)の実フィールド試験におけるデータ収集と(3)のシミュレーション解析に向けた条件の検討を目的とした基礎試験として、一般的な埋設土を充填した小規模容器 (直径 0.5 m)を用いて、障害物による水素ガスの拡散挙動を確認した。

試験に用いる土壌は一般的な埋設土とし、地中障害物は水素導管上への設置が想定 される一般的な道路占用物を模擬した構造体とした。

試験条件として、水素ガス漏えい位置(2パターン)を変化させ、水素ガスの拡散 挙動について整理した。

具体的には、土中における垂直構造体の水素拡散への影響を確認するため、地中及 び大気空間を模擬した小型容器を製作した。内径φ500 mm×高さ 500 mm の容器を 垂直構造体を模擬した仕切板により二分割し、片側に一般的な埋設土である真砂土を 充填した。地中模擬層の底板には配管の腐食漏えい等を想定した損傷に相当する直径 φ1.0 mm の放出口を、仕切板直近及び仕切板からの離隔距離 100 mm の 2 箇所施工 し、所定の条件にて水素を放出した。また、地中模擬層上に接続可能な幅 680 mm× 奥行 680 mm×高さ 280 mm の大気層を模擬する容器を製作した。製作した小規模容 器により、地中及び大気中における水素拡散挙動を水素濃度の変化として計測した。

小規模容器による基礎試験の結果として次の成果を得た。

- ・全体が十分に転圧された真砂土層においては、垂直構造体の壁面付近を優先的に水 素が流れる現象は確認されなかった
- ・ 垂直構造体近傍に転圧不足が生じると、転圧不足の範囲を優先的に水素が拡散する 可能性がある
- ・土壌内の転圧不足の範囲内で水素漏えいが発生した場合、水素濃度が局所的に高く なる可能性があることに留意が必要である
- ・アスファルト層と垂直構造体の境界付近では、他の箇所に比べ、ガスが透過しやす くなっている場合があり、水素拡散挙動に影響を及ぼす可能性がある
- (2) 実フィールド試験(地中及び大気中(地表面近傍)の水素濃度分布計測) 上記(1)の基礎試験結果を踏まえ、実フィールド試験として、地中及び大気中での水

素の拡散挙動が確認できる規模(直径 7.0 m)の地中模擬層を用い、土砂部分 0.7 m、 舗装(路盤含む)0.5 m とし、深さ約 1.2 m からの漏えい水素の障害物影響による地 中の拡散挙動(濃度分布)及び大気(地表面近傍)への拡散挙動(濃度分布)につい て調査を実施した。

試験に用いる土壌は一般的な埋設土とし、舗装は一般的な道路構造部へ使用される 舗装とした。また、地中障害物は水素導管上への設置が想定される一般的な道路占用 物を模擬した構造体とした。

地中における深さ方向及び水平方向の濃度分布を計測するため、地中に水素センサの多点埋設(60点)を行った。また、大気中(地表面近傍)における拡散挙動の可視 化及び濃度分布の計測を行った。

試験条件として、水素ガス漏えい量(2パターン)を変化させ、地中及び大気中(地 表面近傍)への拡散挙動について立ち上がりからの経時変化を確認する。うち、1パ ターンで、水素供給停止後の挙動について、その傾向を確認した。

具体的には、実フィールド試験として水素導管の埋設環境を模擬した内径φ7.0 mの 地中模擬層を製作した。地中模擬層の構成は、一般的な埋設土である真砂土を転圧充 填し、真砂土上に一般的な道路構造部へ使用される舗装を施し、土砂部分 0.7 m、路 盤 0.35 m、舗装 0.15 m とした。地中障害物として、導管上への設置が想定される防 護板を模擬した幅 1.0 m の水平構造体と、導管近傍に存在する可能性のある地中建築 物の壁面を模擬した垂直構造体を設置した。水素導管は、水平構造体下、垂直構造体 からの離隔距離 1.0 m 及び垂直構造体直近の 3 箇所に埋設し、水素放出位置が地表面 から深さ 1.2 m となるよう設置した。導管には腐食漏えい等を想定した損傷に相当す る直径φ1.0 mm の放出口を施工し、水平構造体下を水素放出点 A、垂直構造体からの 離隔距離 1.0 m を水素放出点 B、垂直構造体直近を水素放出点 Cとして、それぞれの 放出点から所定の条件を再現し水素を放出した。地中模擬層の周囲には大気空間を模 擬する幅 8.0 m×奥行 8.0 m×高さ 3.0 m の気密ブースを製作した。製作したフィー ルド試験装置により、地中及び大気中における水素拡散挙動を水素濃度の変化として 計測した。

実フィールド試験の結果として、次の成果を得た。

地中における水素拡散挙動

【水平構造体による影響】

- ・水平構造体により上方への拡散が阻害され、水平方向への拡散が進み、水素の高 濃度範囲が広がる可能性がある
- ・水素濃度のピーク位置と漏えい位置が異なるため、漏えい位置の特定は埋設位置
 を考慮する必要がある
- ・防護板等の水平構造体の長手方向沿いの水平構造体下においては、水素拡散が早 くなり、危険範囲が広がる可能性がある

- 防護板等の水平構造体の長手方向沿いの水平構造体上においては、漏えい位置と 検知位置の距離に対し水素濃度値が低く検知される可能性があるため、漏えい位 置を特定する際には注意が必要である
- 【垂直構造体による影響/垂直構造体近傍に漏えい位置がある場合】
 - ・垂直構造体により拡散が阻害され、垂直構造体がない場合と比べて水平方向に水 素の高濃度範囲が広がる可能性がある
 - ・アスファルト層下部あるいは真砂土層上層において水素濃度のピーク位置と漏え い位置が一致しているため、漏えい位置と構造体の離隔距離が1.0m以上の場合、 地中濃度のピーク位置により漏えい位置の特定が可能である
- 【垂直構造体による影響/垂直構造体直近に漏えい位置がある場合】
 - ・構造体により拡散が阻害され、濃度上昇が早くなるため、短時間で爆発範囲の領 域が形成される可能性がある
 - ・アスファルト層下部あるいは真砂土層上層において水素濃度のピーク値と漏えい 位置が一致しているため、地中濃度のピーク位置により漏えい位置の特定が可能 である
 - ・本試験条件下では壁近傍まで十分な転圧を施したため、垂直構造体沿いの水素拡 散は顕著ではなかったが、本試験よりも壁近傍の転圧が困難な実現場では転圧不 足により構造体近傍の空隙率が高くなり、構造体沿いの水素拡散が先行する可能 性があるため、注意が必要である
- ② 大気中における水素拡散挙動
- 【水平構造体による影響】
 - ・大気中水素濃度分布に顕著なピークが確認されないため、大気中の濃度分布から 漏えい位置の特定は困難である
- 【垂直構造体による影響/垂直構造体近傍又は直近に漏えい位置がある場合】
 - ・大気中濃度分布について濃度のピークが確認できたものの、実現場においては絶 えず空気に流れがあることが想定されるため、大気中の濃度分布から漏えい位置 の特定は困難である
 - ・アスファルトと構造体の境界の状態によっては、垂直構造体直近から大気中へ水 素が拡散し易い状態になるため注意が必要である
- ただし、
- 実際の屋外環境においては、大気層は風や擾乱、物体の移動等により絶えず流れが発生しており、本調査における漏えい量の条件下で、%オーダの濃度の水素が滞留する可能性は極めて低いものと考えられる
- ③ 供給停止後の地中における水素拡散挙動
- 【水平構造体による影響】
 - ・水素供給停止後から水素濃度が低下し、徐々に同じ値に収束する

- ・供給停止直後の濃度が低い位置では、水素供給を停止していても濃度が若干上昇 する場合もあるため注意が必要である
- ・水平構造体下に水素が残留することなく全体の濃度が低下する

【垂直構造体による影響】

- ・水素供給停止後から水素濃度が低下し、徐々に同じ値に収束する
- ・供給停止直後の濃度が低い位置では、水素供給を停止していても濃度が若干上昇 する場合もあるため注意が必要である
- ・アスファルト層と垂直構造体の境界から優先的に水素が大気中に拡散することなく、全体の濃度が徐々に低下する
- また、両者に共通し、
- ・爆発下限の4%以下になるまでの間、爆発範囲の領域が長時間維持されるため、 漏えい後の復旧の際には十分に注意する必要がある
- (3) シミュレーション解析の基礎検討

上記(2)で得られた水素の濃度変化をシミュレーションにより再現し、比較検証を行い、舗装を施した際の地中の拡散挙動及び大気への拡散挙動について、シミュレーションが可能かどうかについて検証した。

具体的には、CFD (Computational Fluid Dynamics)解析により、②の濃度計測 と同一の条件で計算を行い、試験結果に対する解析結果の再現性を評価することで舗 装路下に地中障害物がある場合の地中及び大気中における水素拡散挙動へのシミュ レーション解析の適用可能性を評価した。

シミュレーション解析の基礎検討の結果として、次の成果を得た。

- ・特殊な物理モデルを使用することなく、地中及び大気(地表面)の水素拡散挙動を 再現するシミュレーションは可能
- ・地質パラメータなどの入力条件が適切であれば、水素拡散挙動の再現性は高い

詳細な地質パラメータ分布の把握には制約があることから、シミュレーション解析 における地質パラメータについては各層一様と仮定した設定等が現実的と考えられ るが、本調査の範囲において地質パラメータの影響は水素濃度2割程度に相当するこ とを確認した。その一方で、地表付近の水素拡散挙動の再現性は高いことを確認した。

本調査は、「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 (地中及び大気中の水素拡散挙動調査))」として、平成28年度から30年度の3箇年に 亘って実施した調査を基に、「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(地中及び大気中の水素拡散挙動調査))」として実施した。4箇年 の調査において、初期に極めて理想的な条件から水素拡散挙動の把握を進め、昨年度、実 現場を模擬した条件下における水素拡散挙動の調査を実施し、本年度は昨年度の知見を 更に発展させ、地中障害物の水素拡散への影響を調査した。各年度の調査で得られた知 見は下記のとおりである。

【平成 28 年度】

理想的な条件下における水素拡散挙動を明らかにするために、土壌試料としてガラス ビーズを用い直径 \$\mphi1 m の地中模擬層にて試験を実施し、水素が地中模擬層において同心 円状に拡散することや、大気中へ拡散する水素濃度について放出口直上が最も高い正規 分布状の空間分布なること等、基本的な水素拡散挙動の特徴を実験的に明らかにした。

また、試験装置構成を反映した3次元軸対称モデルを作製し、解析パラメータとして、 水素放出条件(供給圧力、流量等)や地質パラメータ(透気係数、拡散係数、空隙率等) を与え、CFD 解析を実施し、シミュレーション解析により理想的な条件下における水素 拡散挙動の再現が可能であることを明らかにした。

【平成 29 年度】

平成28年度の調査内容を踏まえ、一般的な埋設土である真砂土を用いた実フィールド 規模の試験を実施し、真砂土を用いた場合においても地中模擬層において水素が同心円 状に拡散することや、その拡散挙動の漏えい量依存性を明らかにした。大気中へ拡散す る水素についても、ガラスビーズを用いた場合と同様に放出口直上が最も高い正規分布 状の空間濃度分布となることを確認し、その拡散挙動の漏えい量依存性を明らかにした。 供給停止後の水素拡散挙動についても確認し、真砂土中に拡散した水素の濃度が徐々に 低下する経時変化を明らかにした。

また、実フィールド試験装置の構成を反映した 3 次元軸対称モデルを作製し、解析パ ラメータとして、水素放出条件(供給圧力、流量等)、地質パラメータ(透気係数、拡散 係数、空隙率等)を与え、CFD解析を実施した。地質パラメータのうち、透気係数と拡 散係数について、平成 28 年度はガラスビーズの粒径から算出した計算値を用いたが、平 成 29 年度は透気係数計測装置と拡散係数計測装置をそれぞれ設計、製作し、実際に用い た真砂土の透気係数及び拡散係数を実験的に求め、それらを用いて CFD 解析を実施し、 シミュレーション解析により実際の土壌を用いた場合においても水素拡散挙動の再現が 可能であることを明らかにした。

【平成 30 年度】

前年度までの調査内容を踏まえ、真砂土上に一般的な道路構造部に使用される舗装を 施し、より実運用に近い条件下における水素拡散挙動について調査した。その結果、地中 においてはガラスビーズや真砂土の場合と同様に水素が同心円状に拡散することが確認 された。大気中への水素拡散については、舗装を施した場合、ガラスビーズや真砂土の場 合とは大きく特徴が異なり、放出口上を原点とした直径�5mの範囲内の地表面付近では 一様の濃度分布となることを明らかにした。供給停止後の水素拡散挙動についても確認 し、舗装を施した土壌中に拡散した水素の濃度が徐々に低下する経時変化を観測し、舗 装が無い場合に比べ長時間水素が地中に留まることを明らかにした。

また、実フィールド試験装置の構成を反映した 3 次元軸対称モデルを作製し、解析パ ラメータとして、水素放出条件(供給圧力、流量等)、真砂土層、砕石層、アスファルト 層の各層の地質パラメータ(透気係数、拡散係数、空隙率等)を与え、CFD 解析を実施 した。各層の地質パラメータのうち、透気係数と拡散係数は、平成 29 年度と同様に実験 的に求めた値を反映し、シミュレーション解析により舗装を施した場合においても水素 拡散挙動の再現が可能であることを明らかにした。

【令和元年度】

前年度までの調査内容を踏まえ、舗装路下の地中障害物による水素拡散挙動について、 水平構造体及び垂直構造体を地中に設置し調査した。

地中における拡散挙動について、水平構造体がある場合については、水平方向への拡 散が進み易いこと、水素濃度のピーク値と漏えい位置が異なること等を明らかにした。 垂直構造体がある場合については、漏えい位置が構造体近傍にある場合と直近にある場 合について調査した。漏えい位置が垂直構造体近傍にある場合は、構造体により拡散が 阻害され、水平方向への拡散が進み易いこと、漏えい位置と構造体が 1.0 m 以上離隔し ていれば濃度のピーク値と漏えい位置が一致することを明らかにした。また、漏えい位 置が垂直構造体直近にある場合は、構造体により拡散が阻害され、壁面近傍の濃度が急 激に上昇すること等を明らかにした。

大気中への拡散挙動については、水平構造体がある場合については、平成 30 年度の結果と同様であり、水素濃度分布を評価した地表面上 20 mm と 50 mm の放出口上を含む 5.4 m の範囲ではほぼ一様の濃度分布であった。

漏えい停止後の水素拡散挙動についても確認し、地中に障害物がある場合においても 平成 30 年度の結果と同様に地中模擬層内全体の濃度が徐々に低下することを明らかに した。

また、地中障害物を設置した実フィールド試験装置の構成を反映した解析モデルを作 製し、解析パラメータとして、水素放出条件(供給圧力、流量等)、真砂土層、砕石層、 アスファルト層の各層の地質パラメータ(透気係数、拡散係数、空隙率等)を与え、CFD 解析を実施した。各層の地質パラメータのうち、透気係数と拡散係数は、平成 29 年度、 平成 30 年度と同様に実験的に求めた値を反映し、シミュレーション解析により舗装路下 に地中障害物がある場合においても水素拡散挙動の再現が可能であることを明らかにし た。

これらの4箇年の調査を通じて得られた成果は、万一ガス漏えいが発生した場合の「①

漏えいを迅速に検知」→「②漏えい位置を的確に特定」→「③遮断等の措置」→「④漏え い箇所の修理」といった対応への活用がなされる。以下にその一例を示す。

・ 漏えいの迅速な検知

埋設導管の損傷による水素漏えいを迅速に検知するための手法のひとつとして、 水素センサの設置が有効であると考えられる。水素センサの配置箇所や配置間隔は、 漏えい検知の迅速性を大きく左右するため、様々な条件における水素拡散挙動に照 らし、総合的に検討されるべきであると考えられる。

本調査では、土壌や舗装が空間的に均質である理想的な条件下において、水素拡 散挙動がシミュレーション解析によって良好に再現できることを示した。更に埋設 導管上に地中障害物が存在する比較的実践的な条件においても、同様に再現できる ことを示した。したがって、本調査において用いたシミュレーション解析手法をベ ースとして、各種漏えい条件下における基本的な水素拡散挙動を推定することで、 水素センサの配置箇所や配置間隔等の最適化に役立つものと考えられる。

漏えい位置の特定

地中における水素漏えい位置を特定するためには、地中、特にアスファルト層よ りも深い層に水素センサを埋設配置する方法が現実的であると考えられる。本調査 における試験結果等によると、地中障害物がない場合、地中の複数点における水素 濃度経時変化の相対的な比較から、漏えい位置の推定が可能であると考えられる。 地中障害物がある場合、特に水平構造体がある場合は、地中水素濃度のピーク位置 が漏えい位置直上と異なるため、地中障害物の存在を把握しておくことが重要であ る。

また、一般的に用いられる吸引式水素センサを用いて、舗装のある実現場におい て、地表面付近の水素濃度から漏えい位置を特定することは困難である。本調査の 試験結果等によると、アスファルトの影響により、地表面付近では水素濃度分布の コントラストが著しく低下することが明らかになっており、加えて風や大気の擾乱 等によって大気との混合が促進されるためである。真砂土層の転圧状態やアスファ ルト層の施工状態により、垂直構造体近傍に水素を透過しやすい領域が生成され、 大気中において水素濃度分布にピークが確認できる場合があるが、上記と同様に、 屋外環境においてこれを捉えることは困難であると考えられる。

このため、地表面付近の水素濃度から漏えい位置を推定するためには、広範囲に 亘る地表面上の水素濃度の2次元空間分布を高感度に計測する必要があると考えら れる。本調査における大気中水素濃度分布計測に用いたレーザ計測手法と原理的に は同一であるが、LIDAR(Light Detection and Ranging:光による検知と測距)技 術によって水素のラマン散乱光を遠隔から検知する技術を用いることで、地表面上 における漏えい水素の2次元空間分布計測が原理的には可能であり、このようなリ モートセンシング技術を進化させることで、将来的に地上において地中のガス漏え い位置の特定が実現できる可能性があるものと考えられる。

遮断及び漏えい箇所の修理等の措置

本調査により、漏えい停止後も地中に水素が滞留する状況が明らかになった。特 に、アスファルト舗装のある環境では、比較的長時間に亘り地中における水素は危 険濃度範囲にあることを示した。漏えい検知時の水素供給の遮断は当然迅速になさ れる必要があるが、その後の修理等の措置へ移行する際は、安全に作業を開始する ために必要な待機時間の検討材料として、本調査の成果を活用することができる。 また、修理等の措置の際、実現場において指揮を執る、或いは作業に当たるオペレ ータが、目に見えない地中の水素濃度分布の状態を推定し、ワーストケースを念頭 に措置を進めることが重要である。本調査において示した、周囲の環境や気象条件 が土壌の状態と水素拡散挙動に及ぼす影響はその検討材料として活用することが できる。加えて、地中水素濃度を素早く低下させる構造や安全な工法の検討の際に、 水素漏えい停止後の基本的な拡散挙動として活用することができる。

なお、これらの措置には漏えい箇所の的確な特定が必要不可欠であるが、前述の ように、センサ配置の最適化等によって安全かつ効率的な遮断、修理等の措置が可 能となる。

以上のとおり、本調査の成果活用事例について示した。

このように、本調査では、大規模実フィールド試験装置の構築、レーザ等を用いた各種 計測技術およびシミュレーション解析手法により、平成28年度以降段階を経て地中及び 大気中における水素拡散挙動について従来にない極めて貴重なデータを蓄積することが できた。前述の事例に限ることなく、本成果が広く有効活用され、将来の水素エネルギ利 用社会における安全性の向上に資することができれば幸いである。

最後に、調査の遂行に際し、様々な視点から調査方法の妥当性や成果のまとめ方について審議いただいた委員の皆様、実現場を取り巻く環境に基づき様々な助言をいただいた日本ガス協会殿、弊社における試験実施に携わっていただいた全ての皆様に感謝いたします。

[付 録]試験結果

I. 実フィールド試験の地中水素濃度分布計測結果

表 No.	供給流量	水素放出点	計測点
I -1			$1 \sim 20$
I -2		А	$21 \sim 40$
I -3			41~60
I -4			$1 \sim 20$
I -5	1.93 L/min	В	21~40
I -6			41~60
I -7			$1 \sim 20$
I -8		С	$21 \sim 40$
I -9			41~60
I -10			$1 \sim 20$
I -11		А	$21 \sim 40$
I -12			41~60
I -13			$1 \sim 20$
I -14	5.54 L/min	В	$21 \sim 40$
I -15			41~60
I -16			1~20
I -17		С	$21 \sim 40$
I -18			41~60

表 I-(1) 表番号と試験条件一覧表

表 I-1 供給流量 1:93 L/min の地中の水素濃度計測値(水素放出点 A、1 時間ごと、計測点 1~20)

	20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0	2.4	2.7	3.0	3.4	3.7	4.0	4.3	4.7	5.0	5.3
	19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	1.1	1.4	1.8	2.2	2.5	3.0	3.4	3.7	4.1	4.5	4.9	5.3	5.6	6.0	6.3	6.6
	18	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.7	1.1	1.5	2.0	2.5	3.0	3.4	3.9	4.4	4.8	5.3	5.7	6.1	6.5	6.9	7.2	7.6	7.9	8.3
	17	0.0	0.0	0.2	0.5	1.0	1.6	2.3	3.0	3.7	4.3	5.0	5.6	6.1	6.7	7.2	7.7	8.2	8.6	9.0	9.4	9.8	10.2	10.5	10.9
	16	0.0	0.2	0.8	1.6	2.7	3.8	4.8	5.8	6.8	7.7	8.5	9.2	9.9	10.6	11.2	11.7	12.3	12.7	13.2	13.6	14.1	14.5	14.8	15.2
	15	0.2	2.0	4.7	7.3	9.7	11.7	13.4	15.0	16.3	17.5	18.6	19.5	20.4	21.1	21.8	22.5	23.1	23.6	24.1	24.6	25.1	25.5	25.9	26.3
	14	4.3	12.9	18.6	22.5	25.5	27.8	29.6	31.2	32.5	33.7	34.6	35.5	36.3	36.9	37.5	38.1	38.6	39.1	39.5	39.9	40.3	40.7	41.0	41.4
	13	23.0	36.4	43.2	47.4	50.4	52.6	54.4	56.0	57.2	58.2	59.1	59.9	60.5	61.0	61.6	62.1	62.6	63.0	63.3	63.7	64.0	64.4	64.7	65.0
	12	74.8	86.6	90.9	93.0	94.3	95.2	95.9	96.5	97.0	97.3	97.6	97.9	98.1	98.2	98.5	98.8	98.9	99.0	99.2	99.3	99.4	99.6	99.7	99.9
濃度[%]	11	75.2	86.6	90.6	92.7	93.9	94.7	95.4	96.0	96.5	96.9	97.2	97.5	97.7	98.0	98.3	98.6	98.8	98.9	99.1	99.2	99.4	99.6	99.7	99.9
ド素ガス }	10	21.9	35.4	42.3	46.6	49.5	51.9	53.9	55.6	57.0	58.3	59.5	60.5	61.4	62.2	63.1	63.9	64.6	65.2	65.8	66.3	66.8	67.3	67.8	68.3
Д	9	3.3	11.0	16.6	20.7	23.8	26.4	28.6	30.6	32.4	34.0	35.5	36.9	38.1	39.3	40.4	41.4	42.3	43.2	44.0	44.8	45.5	46.2	46.9	47.5
	8	0.2	1.9	4.5	7.2	9.8	12.2	14.4	16.5	18.4	20.2	21.9	23.4	24.9	26.3	27.5	28.7	29.8	30.9	31.8	32.8	33.6	34.4	35.2	35.9
	7	0.0	0.2	1.2	2.7	4.6	6.6	8.6	10.5	12.4	14.2	15.8	17.3	18.8	20.1	21.4	22.5	23.6	24.7	25.6	26.5	27.4	28.2	28.9	29.6
	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0	2.3	2.7	3.0	3.4	3.7	4.0	4.3	4.7	5.0	5.3
	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0	1.3	1.6	1.9	2.3	2.7	3.0	3.4	3.8	4.1	4.5	4.8	5.2	5.5	5.8	6.1
	4	0.0	0.1	0.7	1.6	2.6	3.7	4.7	5.7	6.7	7.6	8.4	9.1	9.9	10.5	11.1	11.7	12.3	12.8	13.2	13.7	14.1	14.5	14.9	15.3
	3	5.0	13.8	19.5	23.3	26.1	28.4	30.2	31.7	33.0	34.1	35.1	35.9	36.6	37.3	37.9	38.5	39.0	39.4	39.8	40.2	40.6	40.9	41.3	41.6
	2	3.2	11.0	16.8	20.7	23.8	26.3	28.5	30.4	32.2	33.8	35.2	36.7	38.0	39.1	40.1	41.2	42.0	42.8	43.6	44.4	45.1	45.7	46.4	47.0
	1	0.0	0.2	0.9	2.2	3.9	5.7	7.6	9.5	11.3	13.1	14.7	16.3	17.8	19.2	20.4	21.6	22.8	23.8	24.8	25.7	26.6	27.4	28.2	28.9
時間	[h]	1	2	3	4	ភ	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

計測点 21~40)
1 時間ごと、
(水素放出点A、
)地中の水素濃度計測値
供給流量 1.93 L/min の
表 I -2

	40	0.0	0.0	0.3	1.0	1.9	3.0	4.2	5.5	6.7	7.8	8.9	10.0	10.9	11.9	12.8	13.6	14.4	15.1	15.9	16.5	17.1	17.7	18.2	
	39	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.5	2.8	3.1	3.4	3.7	4.0	4.3	4.6	
	38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0	1.3	1.6	1.9	2.2	2.5	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.5	4.8	7
	37	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.4	0.7	1.0	1.3	1.6	2.0	2.3	2.7	3.0	3.4	3.8	4.1	4.5	4.8	5.1	5.5	5.8	¢
	36	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.6	1.0	1.4	1.9	2.4	2.9	3.3	3.8	4.2	4.7	5.1	5.5	5.9	6.3	6.7	7.0	7.4	7.7	0
	35	0.0	0.0	0.1	0.4	0.9	1.5	2.1	2.8	3.5	4.1	4.8	5.4	5.9	6.5	7.0	7.5	8.0	8.4	8.8	9.2	9.6	10.0	10.3	
	34	0.0	0.1	0.6	1.4	2.4	3.5	4.6	5.6	6.5	7.4	8.2	9.0	9.7	10.3	10.9	11.5	12.0	12.5	12.9	13.3	13.7	14.1	14.5	
	33	0.1	1.2	3.5	5.9	8.1	10.1	11.9	13.4	14.8	16.0	17.0	18.0	18.8	19.6	20.3	20.9	21.5	22.0	22.5	23.0	23.4	23.8	24.2	0,00
	32	1.3	6.3	11.1	14.9	18.0	20.4	22.4	24.1	25.6	26.8	27.9	28.8	29.6	30.3	31.0	31.6	32.1	32.6	33.1	33.5	33.9	34.3	34.6	0 H C
農度[%]	31	4.5	12.1	17.9	22.3	25.8	28.6	31.0	33.0	34.7	36.1	37.3	38.4	39.4	40.2	40.9	41.6	42.3	42.8	43.3	43.9	44.3	44.7	45.2	с 1
κ素ガス¦	30	1.4	6.6	11.9	16.4	20.2	23.3	25.9	28.1	30.0	31.6	33.0	34.2	35.2	36.1	37.0	37.7	38.5	39.1	39.7	40.2	40.7	41.2	41.7	101
Я	29	1.5	6.9	12.2	16.8	20.6	23.7	26.4	28.6	30.6	32.2	33.7	34.9	36.1	37.1	38.0	38.9	39.6	40.4	41.0	41.7	42.3	42.8	43.3	0 0 1
	28	3.7	11.1	16.9	21.4	25.0	28.0	30.5	32.7	34.5	36.2	37.7	39.0	40.2	41.3	42.3	43.2	44.1	44.9	45.7	46.3	47.0	47.6	48.2	L 0 1
	27	0.9	4.9	9.2	13.0	16.2	18.8	21.1	23.2	25.0	26.6	28.1	29.5	30.7	31.8	32.9	33.9	34.8	35.7	36.5	37.3	37.9	38.6	39.2	0.06
	26	0.1	1.1	3.1	5.5	7.9	10.2	12.3	14.3	16.2	17.9	19.5	21.0	22.4	23.7	24.9	26.1	27.1	28.1	29.0	29.9	30.7	31.5	32.2	0.00
	25	0.0	0.1	0.8	2.0	3.7	5.5	7.3	9.1	10.9	12.6	14.2	15.6	17.0	18.3	19.5	20.6	21.7	22.7	23.6	24.5	25.3	26.1	26.8	ы С
	24	6.4	14.5	20.3	24.6	28.1	30.8	33.1	35.0	36.6	38.1	39.2	40.3	41.1	41.9	42.6	43.2	43.8	44.3	44.8	45.3	45.7	46.1	46.5	0.01
	23	1.3	6.6	11.9	16.4	20.2	23.3	25.8	28.0	29.8	31.4	32.8	34.0	35.0	36.0	36.8	37.6	38.3	39.0	39.5	40.1	40.6	41.1	41.6	0.01
	22	6.1	14.0	19.5	23.8	27.2	30.0	32.3	34.3	36.0	37.5	38.8	39.9	40.9	41.8	42.7	43.5	44.2	44.9	45.5	46.1	46.6	47.1	47.6	10.01
	21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0	1.3	1.6	2.0	2.3	2.7	3.0	3.3	3.7	4.0	4.3	4.7	5.0	C L
時間	[h]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	10

計測点 41~60)
1 時間ごと、
(水素放出点A、
也中の水素濃度計測値
共給流量 1.93 L/min の 1
表 I-3 作

	60	0.0	0.0	0.2	0.6	1.2	2.0	2.8	3.6	4.5	5.2	6.0	6.7	7.3	8.0	8.6	9.2	9.7	10.3	10.8	11.3	11.7	12.2	12.6	13.0
	59	0.0	0.6	2.2	4.1	6.1	7.9	9.5	10.9	12.1	13.2	14.1	15.0	15.7	16.4	17.0	17.6	18.1	18.6	19.1	19.5	19.9	20.3	20.6	21.0
	58	0.0	0.0	0.2	0.7	1.4	2.3	3.2	4.2	5.2	6.1	7.0	7.8	8.6	9.3	10.0	10.5	11.2	11.8	12.4	12.9	13.5	14.0	14.4	14.9
	57	0.0	0.5	2.0	4.1	6.2	8.2	10.1	11.7	13.1	14.3	15.4	16.4	17.3	18.1	18.8	19.5	20.1	20.7	21.3	21.9	22.3	22.8	23.2	23.6
	56	0.0	0.4	1.5	3.2	4.8	6.4	7.7	9.0	10.2	11.3	12.3	13.3	14.2	15.1	15.9	16.7	17.4	18.1	18.8	19.4	20.0	20.6	21.1	21.6
	55	5.6	17.0	24.2	28.7	31.7	34.0	35.7	37.2	38.5	39.6	40.5	41.4	42.2	42.9	43.5	44.2	44.8	45.4	45.9	46.3	46.8	47.2	47.7	48.1
	54	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8
	53												ı												
	52	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.3	1.5	1.8	2.1	2.3	2.6	2.9	3.1	3.4	3.6	3.9	4.1	4.4
農度[%]	51	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0	2.3	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4	4.6	4.9	5.1	5.4
く素ガスネ	50	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.8	1.3	1.7	2.2	2.7	3.1	3.6	4.0	4.4	4.8	5.2	5.6	5.9	6.2	6.6	6.9	7.2	7.4	7.7
Л	49	0.0	0.0	0.2	0.7	1.4	2.2	3.0	3.9	4.7	5.4	6.1	6.8	7.4	7.9	8.5	8.9	9.4	9.8	10.3	10.7	11.0	11.4	11.7	12.0
	48	0.0	0.4	1.5	3.1	4.7	6.2	7.6	8.9	9.9	10.9	11.7	12.5	13.1	13.7	14.3	14.8	15.2	15.6	16.1	16.4	16.8	17.1	17.4	17.7
	47	0.0	1.6	4.9	7.7	10.3	12.4	14.2	15.7	17.1	18.4	19.3	19.9	20.6	21.3	21.7	22.4	22.2	23.7	23.5	23.9	24.5	24.8	25.1	24.9
	46	0.3	2.9	6.9	10.8	14.2	17.0	19.3	21.3	23.0	24.4	25.6	26.7	27.6	28.4	29.1	29.8	30.4	30.9	31.5	32.0	32.4	32.8	33.2	33.6
	45	0.2	2.3	6.1	10.0	13.5	16.5	19.0	21.1	22.9	24.4	25.7	26.8	27.8	28.6	29.4	30.2	30.8	31.4	32.0	32.5	33.0	33.4	33.8	34.2
	44	0.1	2.3	6.0	9.8	13.3	16.2	18.7	20.8	22.5	24.1	25.4	26.6	27.6	28.5	29.3	30.1	30.8	31.5	32.1	32.7	33.2	33.7	34.1	34.5
	43	0.2	2.5	5.9	9.4	12.3	14.9	17.0	18.8	20.4	21.8	23.0	24.1	25.0	25.9	26.7	27.4	28.1	28.8	29.4	30.0	30.5	30.9	31.4	31.8
	42	0.1	1.9	5.0	8.2	11.0	13.4	15.5	17.4	19.1	20.5	21.9	23.0	24.1	25.1	26.0	26.9	27.7	28.4	29.2	29.8	30.4	31.0	31.5	32.0
	41	0.0	0.3	1.5	3.1	4.8	6.6	8.3	9.9	11.4	12.8	14.1	15.3	16.4	17.5	18.4	19.3	20.2	21.0	21.7	22.4	23.1	23.7	24.3	24.8
睛铜	[h]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

表 I-4 供給流量 1.93 L/min の地中の水素濃度計測値(水素放出点 B、1時間ごと、計測点 1~20)

時間									7,	ド素ガス	農度[%]									
[H]	1	2	3	4	5	9	7	∞	6	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0.0	0.0	0.0	13.5	40.7	10.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	9.6	32.4	68.7	30.2	8.1
2	0.0	0.0	0.3	24.0	50.4	21.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	3.2	19.5	43.3	74.2	41.1	19.1
3	0.0	0.0	1.1	30.0	55.8	29.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	1.1	6.6	25.5	48.9	76.9	47.4	27.0
4	0.0	0.0	2.3	34.1	59.6	35.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.9	2.3	9.7	29.7	52.6	78.6	52.0	33.0
ъ С	0.0	0.0	3.5	37.3	62.5	39.4	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.6	1.7	3.6	12.3	33.0	55.3	79.9	55.6	37.7
9	0.0	0.0	4.8	39.8	64.9	42.9	0.0	0.1	0.1	0.1	0.4	1.1	2.5	5.0	14.6	35.6	57.4	80.9	58.4	41.5
7	0.0	0.0	6.1	41.9	66.7	45.7	0.0	0.1	0.1	0.2	0.7	1.6	3.4	6.3	16.6	37.8	59.2	81.7	60.7	44.5
8	0.0	0.1	7.3	43.7	68.3	48.0	0.1	0.1	0.2	0.5	1.0	2.2	4.3	7.5	18.3	39.6	60.6	82.5	62.6	47.0
6	0.0	0.1	8.3	45.3	69.6	49.9	0.1	0.1	0.3	0.7	1.4	2.7	5.2	8.7	19.9	41.1	61.8	83.0	64.2	49.0
10	0.0	0.2	9.3	46.6	70.7	51.4	0.1	0.2	0.4	0.9	1.8	3.3	6.0	9.7	21.3	42.5	62.8	83.5	65.5	50.7
11	0.1	0.3	10.3	47.8	71.6	52.7	0.2	0.3	0.5	1.1	2.2	3.9	6.8	10.7	22.5	43.7	63.7	83.9	66.5	52.2
12	0.1	0.4	11.1	48.9	72.3	53.8	0.2	0.3	0.6	1.3	2.6	4.5	7.5	11.6	23.6	44.7	64.5	84.3	67.5	53.4
13	0.2	0.5	11.9	49.8	73.0	54.8	0.3	0.4	0.8	1.5	3.0	5.1	8.2	12.4	24.6	45.7	65.2	84.6	68.3	54.4
14	0.2	0.6	12.7	50.7	73.6	55.6	0.4	0.5	1.0	1.8	3.4	5.6	8.9	13.2	25.5	46.5	65.9	84.8	69.0	55.3
15	0.3	0.8	13.4	51.4	74.1	56.3	0.5	0.6	1.1	2.0	3.8	6.1	9.5	13.9	26.4	47.3	66.4	85.1	69.6	56.1
16	0.4	0.9	14.0	52.1	74.5	56.9	0.6	0.8	1.3	2.3	4.2	6.6	10.1	14.6	27.1	48.0	66.9	85.3	70.1	56.8
17	0.5	1.0	14.6	52.8	74.9	57.5	0.7	0.9	1.5	2.5	4.6	7.1	10.6	15.2	27.8	48.6	67.3	85.5	70.6	57.4
18	0.5	1.2	15.1	53.3	75.1	57.9	0.8	1.1	1.7	2.8	4.9	7.6	11.1	15.7	28.5	49.2	67.7	85.6	70.9	57.8
19	0.7	1.3	15.6	53.8	75.3	58.3	1.0	1.2	1.9	3.0	5.3	8.0	11.6	16.2	29.1	49.7	68.0	85.6	71.1	58.2
20	0.8	1.4	16.0	54.4	75.6	58.7	1.1	1.4	2.1	3.2	5.7	8.5	12.1	16.7	29.7	50.3	68.3	85.7	71.5	58.7
21	0.9	1.6	16.5	54.9	75.9	59.1	1.3	1.6	2.3	3.5	6.0	8.9	12.5	17.2	30.2	50.8	68.7	85.9	71.8	59.1
22	1.0	1.8	16.9	55.4	76.1	59.5	1.4	1.8	2.5	3.8	6.3	9.3	12.9	17.7	30.8	51.2	69.0	86.0	72.1	59.5
23	1.1	1.9	17.4	55.8	76.3	59.8	1.6	1.9	2.7	4.0	6.7	9.7	13.3	18.1	31.3	51.6	69.3	86.1	72.4	59.9
24	1.3	2.1	17.8	56.2	76.5	60.1	1.8	2.1	2.9	4.3	7.0	10.0	13.7	18.5	31.7	52.0	69.5	86.2	72.6	60.2

表 I-5 供給流量 1.93 L/min の地中の水素濃度計測値(水素放出点 B、1時間ごと、計測点 21~40)

時間									7,	ド素ガス。	濃度[%]									
[h]	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
ſ	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	4.6	14.5	20.9	12.0	3.6	2.5	0.1
64	16.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	2.1	13.4	26.7	33.4	23.7	13.0	11.1	0.1
	3 24.2	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.9	5.1	19.8	34.0	40.7	31.5	21.1	18.8	0.1
4	t 30.1	0.0	0.2	0.5	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.8	1.9	8.1	24.4	39.1	45.8	37.3	27.4	25.0	0.1
	34.8	0.1	0.3	0.9	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.5	1.5	3.1	10.8	28.0	42.9	49.6	41.9	32.4	30.0	0.1
6	3 38.4	0.2	0.6	1.4	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.9	2.2	4.4	13.0	30.9	45.8	52.5	45.6	36.4	34.0	0.1
	7 41.4	0.4	0.9	2.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.6	1.3	3.1	5.6	15.1	33.3	48.3	55.0	48.6	39.7	37.3	0.1
30	3 43.9	0.6	1.3	2.7	0.1	0.1	0.2	0.4	0.9	1.8	3.9	6.8	16.8	35.3	50.3	56.9	51.0	42.4	40.0	0.2
0,	45.9	0.8	1.7	3.4	0.2	0.2	0.2	0.6	1.2	2.3	4.7	7.9	18.3	37.1	51.9	58.5	53.0	44.6	42.2	0.2
1(47.5	1.1	2.1	4.0	0.2	0.2	0.3	0.8	1.6	2.8	5.5	8.9	19.7	38.5	53.3	59.9	54.7	46.4	44.1	0.2
11	48.9	1.4	2.5	4.7	0.2	0.3	0.4	1.0	1.9	3.3	6.3	9.8	20.9	39.8	54.6	61.0	56.1	48.0	45.6	0.3
12	2 50.1	1.7	3.0	5.3	0.3	0.4	0.5	1.2	2.3	3.8	7.0	10.6	22.0	41.0	55.6	62.0	57.4	49.3	47.0	0.3
16	3 51.1	2.0	3.4	5.9	0.3	0.4	0.6	1.5	2.6	4.3	7.7	11.4	22.9	42.0	56.6	62.9	58.4	50.5	48.1	0.4
14	1 52.0	2.3	3.8	6.4	0.4	0.5	0.8	1.7	3.0	4.8	8.3	12.2	23.8	42.9	57.4	63.6	59.3	51.5	49.1	0.5
15	52.7	2.6	4.2	7.0	0.5	0.7	0.9	2.0	3.3	5.2	8.9	12.8	24.6	43.7	58.1	64.3	60.1	52.3	49.9	0.5
16	53.4	2.9	4.6	7.5	0.6	0.8	1.1	2.3	3.7	5.7	9.4	13.5	25.4	44.5	58.8	64.9	60.8	53.1	50.7	0.6
17	7 53.9	3.2	5.0	7.9	0.7	0.9	1.2	2.5	4.0	6.1	9.9	14.0	26.1	45.1	59.4	65.4	61.4	53.7	51.3	0.7
18	3 54.4	3.5	5.3	8.4	0.8	1.0	1.3	2.7	4.4	6.5	10.4	14.5	26.7	45.7	59.8	65.8	61.9	54.2	51.9	0.8
16	54.7	3.8	5.7	8.8	0.9	1.1	1.5	3.0	4.7	6.9	10.9	15.0	27.2	46.2	60.2	66.2	62.3	54.7	52.3	0.9
2(55.2	4.1	6.1	9.2	1.0	1.3	1.6	3.2	5.0	7.3	11.4	15.5	27.8	46.7	60.7	66.6	62.8	55.2	52.9	0.9
2]	55.6	4.3	6.4	9.6	1.1	1.4	1.8	3.5	5.4	7.6	11.8	16.0	28.3	47.3	61.2	67.0	63.2	55.7	53.3	1.0
22	3 56.0	4.6	6.7	10.0	1.3	1.6	2.0	3.7	5.7	8.0	12.2	16.4	28.8	47.8	61.6	67.3	63.6	56.1	53.8	1.1
25	3 56.3	4.9	7.0	10.4	1.4	1.8	2.2	4.0	6.0	8.3	12.6	16.8	29.3	48.2	62.0	67.7	64.0	56.5	54.1	1.2
2_4	56.6	5.2	7.3	10.7	1.6	1.9	2.3	4.3	6.3	8.6	13.0	17.2	29.7	48.6	62.3	68.0	64.3	56.8	54.5	1.3

表 I-6 供給流量 1.93 L/min の地中の水素濃度計測値(水素放出点 B、1 時間ごと、計測点 41~60)

	60	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9	1.2	1.4	1.7	1.9	2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.3	
	59	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0	2.3	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.0	4.3	4.5	4.8	5.0	5.2	
	58	0.0	0.3	0.2	0.0	0.0	0.2	0.2	0.1	0.2	0.4	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	2.0	2.3	2.5	2.7	2.7	3.0	(
	57	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	1.7	2.0	2.2	2.5	2.7	2.9	3.1	3.3	3.5	3.8	4.0	
	56	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.1	1.4	1.6	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.2	4.5	4.8	(
	55	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0	1.3	1.7	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	4.3	4.7	5.0	5.4	5.7	6.1	6.4	i c
	54	0.4	4.3	10.1	15.6	20.1	23.8	26.9	29.5	31.5	33.2	34.7	36.0	37.1	38.0	38.7	39.5	40.0	40.6	41.0	41.6	42.1	42.4	42.8	0
	53																								
	52	1.6	9.3	17.0	23.0	27.9	31.8	35.0	37.6	39.8	41.6	43.1	44.5	45.7	46.7	47.6	48.4	49.1	49.7	50.2	50.8	51.3	51.7	52.1	
濃度[%]	51	2.6	12.1	20.1	26.0	30.4	33.9	36.7	39.1	40.9	42.5	43.9	45.1	46.1	47.0	47.8	48.5	49.1	49.6	50.1	50.6	51.1	51.5	51.8	
ド素ガス	50	1.8	9.6	17.0	22.3	26.4	29.6	32.2	34.3	36.1	37.6	38.9	40.0	41.0	41.8	42.6	43.3	43.9	44.4	44.9	45.4	45.9	46.3	46.7	i I
7	49	0.5	4.9	10.7	15.5	19.4	22.5	25.0	27.1	28.9	30.4	31.7	32.9	33.9	34.8	35.6	36.4	37.1	37.6	38.1	38.7	39.2	39.7	40.1	1
	48	0.1	0.9	2.8	5.1	7.3	9.2	10.9	12.4	13.6	14.8	15.8	16.6	17.4	18.1	18.8	19.4	19.9	20.4	20.9	21.3	21.7	22.1	22.5	0
	47	0.2	0.4	0.6	1.3	2.2	3.1	4.1	5.0	6.0	6.8	7.5	8.2	8.9	9.4	10.0	10.5	11.0	11.4	11.8	12.1	12.5	12.8	13.2) (
	46	0.0	0.1	0.2	0.4	0.8	1.4	2.0	2.6	3.2	3.8	4.4	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.4	7.8	8.2	8.6	8.9	9.3	9.6	0
	45	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	1.3	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	4.4	4.7	5.0	5.3	5.6	5.9	6.2	6.5	C
	44	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.9	1.1	1.4	1.6	1.9	2.2	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.7	4.0	4.2	4.4	t
	43	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.9	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.1	2.3	2.5	2.6	2.8	0
	42	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.8	1.9	2.1	2.2	
	41	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	,
時間	[h]	1	2	3	4	5	6	7	8	6	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	

表 I-7 供給流量 1.93 L/min の地中の水素濃度計測値(水素放出点 C、1時間ごと、計測点 1~20)

d		c	_	-	-		t	c		く素ガス	濃度[%]	c T	¢	Ţ	1	ç	t	ç	ç	00
2 3 4 5	3 4 5	4 5	5			9	1	x	6	10	ΤT	12	13	14	15	16	L7	18	19	20
0.0 0.0 0.1 37.2	0 0.0 0.1 37.2	0.1 37.2	1 37.2	.2	S S	88.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.9	6.5	32.7	78.7
0.0 0.0 1.9 51.1 9	0 0.0 1.9 51.1 9	0 1.9 51.1 9	9 51.1 9	.1 9	-	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.6	6.1	17.3	48.0	85.1
0.0 0.0 5.0 57.6 95	0 0.0 5.0 57.6 95	0 5.0 57.6 95	0 57.6 95	.6 9:	<u> </u>	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.7	4.6	11.5	24.6	55.5	87.6
0.0 0.2 8.4 61.7 9:	0 0.2 8.4 61.7 9:	2 8.4 61.7 9;	4 61.7 9:	.7 95		3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	1.7	7.7	16.0	29.8	60.1	89.0
0.0 0.6 11.4 64.5 95	0 0.6 11.4 64.5 95	3 11.4 64.5 95	4 64.5 95	1.5 95	-	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.6	3.0	10.7	19.7	33.8	63.3	89.9
0.0 1.1 14.1 66.7 94	0 1.1 14.1 66.7 94	$\begin{bmatrix} 1 & 14.1 & 66.7 & 94 \end{bmatrix}$	1 66.7 94	3.7 94	7	.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	1.1	4.4	13.3	22.7	36.9	65.7	90.6
0.0 1.7 16.5 68.3 94	$0 1.7 16.5 68.3 9_4$	7 16.5 68.3 94	5 68.3 94	3.3 94	4	t. 5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.8	1.7	5.9	15.6	25.3	39.4	67.5	91.0
0.0 2.3 18.6 69.6 94	$0 2.3 18.6 69.6 9_4$	3 18.6 69.6 94	6 69.6 94).6 9 ₄	7	ł.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	1.3	2.4	7.3	17.6	27.5	41.4	68.9	91.4
0.0 3.0 20.4 70.7 94	0 3.0 20.4 70.7 94	0 20.4 70.7 94	4 70.7 94	.7 94	4	×.	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.8	1.7	3.2	8.6	19.4	29.3	43.1	70.0	91.7
0.0 3.7 22.0 71.6 94.	0 3.7 22.0 71.6 94.	7 22.0 71.6 94.	0 71.6 94.3	.6 94.	4.	6	0.0	0.0	0.1	0.2	0.5	1.1	2.2	3.9	9.9	21.0	30.9	44.6	71.0	91.9
0.0 4.4 23.5 72.3 95.	0 4.4 23.5 72.3 95.	1 23.5 72.3 95.	5 72.3 95.	2.3 95.	5.	0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.7	1.4	2.8	4.6	11.0	22.3	32.3	45.8	71.8	92.1
0.1 5.1 24.8 73.0 95.	1 5.1 24.8 73.0 95.	1 24.8 73.0 95.	8 73.0 95.	3.0 95.	5.	-	0.0	0.1	0.1	0.4	0.9	1.8	3.3	5.3	12.1	23.6	33.5	46.9	72.5	92.3
0.1 5.7 25.9 73.6 95.5	1 5.7 25.9 73.6 95.9 5.1	7 25.9 73.6 95.5	9 73.6 95.1	3.6 95.5	5.5	0	0.0	0.1	0.2	0.5	1.1	2.2	3.9	6.0	13.0	24.7	34.6	47.9	73.1	92.4
0.1 6.4 26.9 74.0 95.	1 6.4 26.9 74.0 95.	1 26.9 74.0 95.	9 74.0 95.	1.0 95.	5.	2	0.0	0.2	0.3	0.6	1.4	2.5	4.4	6.7	13.9	25.7	35.6	48.7	73.5	92.4
0.2 7.0 27.8 74.4 95.	2 7.0 27.8 74.4 95.) 27.8 74.4 95.	8 74.4 95.	1.4 95.	5.	5	0.1	0.2	0.4	0.8	1.7	2.9	4.9	7.3	14.8	26.6	36.4	49.4	74.0	92.5
0.3 7.5 28.7 74.7 95.	3 7.5 28.7 74.7 95.	5 28.7 74.7 95.	7 74.7 95.	1.7 95.	5	3	0.1	0.3	0.5	0.9	1.9	3.3	5.4	7.9	15.5	27.4	37.2	50.0	74.3	92.6
0.4 8.1 29.4 75.0 95	4 8.1 29.4 75.0 95	1 29.4 75.0 95	4 75.0 95	5.0 95 5.0	10	33	0.2	0.4	0.6	1.1	2.2	3.7	5.9	8.5	16.2	28.1	37.9	50.6	74.7	92.7
0.5 8.6 30.1 75.2 95	5 8.6 30.1 75.2 95	3 30.1 75.2 95	1 75.2 95	5.2 95	5	5	0.3	0.5	0.8	1.3	2.5	4.1	6.3	9.0	16.9	28.8	38.5	51.0	74.9	92.6
0.6 9.1 30.7 75.4 95	6 9.1 30.7 75.4 95	1 30.7 75.4 95	7 75.4 95	6.4 95	50	.3	0.4	0.6	0.9	1.5	2.8	4.4	6.8	9.5	17.5	29.4	39.0	51.4	75.0	92.7
0.7 9.5 31.3 75.6 95	7 9.5 31.3 75.6 95	5 31.3 75.6 95	3 75.6 95	6 95	50	.4	0.4	0.7	1.1	1.7	3.1	4.8	7.2	10.0	18.0	29.9	39.5	51.8	75.3	92.7
0.8 10.0 31.8 75.8 95	8 10.0 31.8 75.8 95	0 31.8 75.8 95	8 75.8 95	5.8 95	5	.4	0.5	0.8	1.2	1.8	3.3	5.1	7.6	10.4	18.5	30.4	39.9	52.1	75.5	92.8
0.9 10.3 32.2 76.0 90	9 10.3 32.2 76.0 91	3 32.2 76.0 94	2 76.0 94	3.0 94		5.4	0.7	0.9	1.4	2.0	3.6	5.5	7.9	10.9	19.0	30.8	40.3	52.4	75.7	92.9
1.0 10.7 32.7 76.2 98	0 10.7 32.7 76.2 91	7 32.7 76.2 98	7 76.2 91	3.2 94	č	5.4	0.8	1.0	1.5	2.2	3.9	5.8	8.3	11.2	19.4	31.2	40.7	52.7	75.8	92.9
1.1 11.1 33.0 76.3 95	1 11.1 33.0 76.3 95	1 33.0 76.3 95	0 76.3 95	3.3 95	<u> </u>	4	0.9	1.2	1.7	2.4	4.1	6.1	8.6	11.6	19.8	31.6	41.0	53.0	76.0	92.9

表 I-8 供給流量 1.93 L/min の地中の水素濃度計測値(水素放出点 C、1時間ごと、計測点 21~40)

	40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	t 0.0	0.0	1 0.0	0.0	0.0	0.0	5 0.1	7 0.1) 0.2	0.2	3 0.2	t 0.3	5 0.4	5 0.4	3 0.5	3 0.6	0.6	3 0.7	_
	39	44.1	62.0	69.5	74.C	76.6	78.4	79.6	80.4	81.5	81.7	82.1	82.5	82.7	82.5	83.1	83.5	83.4	83.5	83.5	83.6	83.6	83.8	83.6	-
	38	38.0	56.3	64.8	69.5	72.5	74.5	76.0	77.0	77.9	78.6	79.1	79.6	80.0	80.2	80.5	80.7	80.9	81.0	81.0	81.2	81.3	81.4	81.5	
	37	16.3	33.5	43.5	49.8	54.2	57.4	59.7	61.6	63.0	64.3	65.3	66.1	66.9	67.4	68.0	68.4	68.9	69.2	69.4	69.7	69.9	70.1	70.3	
	36	3.5	13.8	21.8	27.8	32.3	35.8	38.6	40.9	42.8	44.3	45.6	46.8	47.8	48.7	49.5	50.1	50.7	51.3	51.7	52.0	52.4	52.7	53.0	
	35	0.5	4.8	10.3	15.1	19.1	22.5	25.2	27.5	29.5	31.2	32.6	33.9	35.1	36.1	37.0	37.7	38.5	39.1	39.6	40.1	40.6	41.0	41.4	
	34	0.0	1.2	3.9	7.1	10.1	12.8	15.1	17.1	18.9	20.5	21.8	23.1	24.2	25.1	26.0	26.8	27.6	28.2	28.8	29.3	29.8	30.2	30.6	
	33	0.0	0.0	0.4	1.3	2.5	3.8	5.2	6.6	7.8	9.0	10.1	11.1	12.1	12.9	13.7	14.4	15.1	15.7	16.3	16.8	17.3	17.8	18.2	
	32	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.9	1.5	2.1	2.8	3.4	4.1	4.8	5.4	6.0	6.6	7.1	7.7	8.2	8.6	9.1	9.5	9.9	10.2	-
農度[%]	31	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	1.1	1.6	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.4	5.8	6.2	6.6	7.0	7.4	7.7	_
素ガス湖	30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.4	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.5	2.8	3.1	3.4	3.8	4.1	4.4	4.6	4.9	
¥	29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0	1.3	1.5	1.7	2.0	2.3	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5	-
	28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	1.0	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	
	27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.1	1.2	-
	26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	0.9	1.0	
	25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	
	24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.5	0.7	1.0	1.4	1.8	2.2	2.6	3.0	3.4	3.8	4.2	4.5	4.9	5.3	5.6	5.9	6.2	
	23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.9	1.1	1.4	1.6	1.9	2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.9	4.1	
	22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1	2.4	2.6	2.8	
	21	93.0	95.0	95.7	96.0	96.3	96.4	96.5	96.6	96.7	96.7	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.9	96.8	96.9	96.7	
時間	[H]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	

計測点 41~60)
1 時間以と、
(水素放出点 C、
//min の地中の水素濃度計測値
供給流量 1.93 L/
表 I -9

時間									7.	水素ガス	濃度[%]									
[h]	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	2.7	'	14.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.5	5.9	15.9		35.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	1.7	5.2	13.2	27.1		47.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.8	4.0	9.2	19.2	34.8		54.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	1.6	6.4	12.8	23.7	40.0		58.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.6	2.6	8.8	15.8	27.2	43.9		61.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	1.0	3.6	11.0	18.3	30.0	46.7		63.7	0.1	0.0	0.1	0.0	0.2	0.1
8	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.7	1.5	4.6	12.9	20.3	32.1	48.9		65.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1
6	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.9	2.0	5.6	14.6	22.1	34.0	50.7		66.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2
10	0.0	0.1	0.1	0.3	0.6	1.3	2.6	6.5	16.1	23.7	35.6	52.1		67.3	0.5	0.3	0.3	0.3	0.6	0.3
11	0.1	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.1	7.4	17.4	24.9	36.8	53.2		67.9	0.7	0.4	0.4	0.3	0.8	0.5
12	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.5	8.2	18.6	26.0	37.8	54.2		68.4	0.9	0.5	0.5	0.4	0.9	0.6
13	0.1	0.2	0.4	0.7	1.3	2.3	4.1	8.9	19.5	26.9	38.5	54.9		68.4	1.2	0.7	0.7	0.5	1.1	0.8
14	0.2	0.3	0.5	0.9	1.5	2.7	4.4	9.5	20.4	27.6	39.2	55.4		68.7	1.4	0.9	0.8	0.7	1.3	1.0
15	0.2	0.4	0.6	1.0	1.8	3.0	5.0	10.2	21.3	28.5	40.1	56.2		69.3	1.7	1.1	1.0	0.9	1.6	1.2
16	0.3	0.5	0.7	1.2	2.0	3.4	5.4	10.8	22.0	29.2	40.7	56.7		69.7	2.0	1.4	1.2	1.1	1.8	1.4
17	0.4	0.6	0.8	1.4	2.3	3.7	5.7	11.3	22.7	29.8	41.2	57.1		69.7	2.2	1.6	1.3	1.1	2.0	1.6
18	0.4	0.7	1.0	1.6	2.5	4.1	5.9	11.8	23.2	30.3	41.6	57.4		69.9	2.6	1.8	1.5	1.4	2.2	1.8
19	0.5	0.8	1.1	1.8	2.8	4.4	6.3	12.2	23.8	30.8	42.1	57.8		70.0	2.8	2.1	1.7	1.5	2.4	2.0
20	0.6	0.9	1.2	2.0	3.0	4.7	6.5	12.6	24.3	31.3	42.5	58.1		70.1	3.1	2.4	1.9	1.7	2.6	2.3
21	0.7	1.1	1.4	2.2	3.3	5.0	6.8	13.0	24.8	31.6	42.7	58.3		70.1	3.4	2.6	2.0	1.9	2.8	2.5
22	0.8	1.2	1.5	2.4	3.5	5.3	7.3	13.4	25.2	31.9	43.0	58.5		70.2	3.6	2.9	2.2	2.2	3.0	2.7
23	0.9	1.3	1.7	2.5	3.7	5.5	7.5	13.6	25.5	32.2	43.2	58.6		70.0	3.9	3.2	2.4	2.3	3.2	2.9
24	1.0	1.4	1.8	2.7	3.9	5.8	7.8	14.0	25.8	32.5	43.5	58.8		70.3	4.2	3.4	2.5	2.7	3.4	3.1

表 I-10 供給流量 5.54 L/min の地中の水素濃度計測値(水素放出点 A、1時間ごと、計測点 1~20)

	20	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.5	1.0	1.6	2.2	3.0	3.8	4.7	5.5	6.4	7.2	8.1	8.9	9.7	10.4	11.1	11.8	12.5	13.2	((,
	19	0.0	0.0	0.0	0.2	0.6	1.2	2.0	2.9	3.8	4.8	5.8	6.8	7.8	8.8	9.7	10.6	11.4	12.2	13.0	13.8	14.5	15.2	15.9	1
	18	0.0	0.0	0.2	0.9	1.8	3.0	4.3	5.6	6.8	8.1	9.3	10.4	11.5	12.5	13.4	14.3	15.1	15.9	16.7	17.4	18.1	18.8	19.4	0
	17	0.0	0.1	0.9	2.4	4.2	6.1	8.0	9.7	11.3	12.8	14.2	15.4	16.6	17.7	18.7	19.6	20.5	21.3	22.1	22.9	23.6	24.2	24.9	1
	16	0.1	1.0	3.6	6.7	9.8	12.6	15.2	17.4	19.4	21.2	22.8	24.2	25.5	26.7	27.8	28.8	29.7	30.6	31.4	32.1	32.8	33.5	34.2	0
	15	1.4	9.6	17.7	24.2	29.4	33.7	37.2	40.2	42.7	44.8	46.7	48.3	49.7	51.0	52.1	53.1	54.1	54.9	55.7	56.4	57.1	57.8	58.4	0
	14	21.5	41.4	51.4	57.6	61.9	65.1	67.5	69.5	71.0	72.3	73.4	74.2	75.0	75.7	76.3	76.8	77.3	77.7	78.1	78.4	78.7	79.0	79.3	c L
	13	67.5	83.1	88.5	91.4	93.3	94.6	95.5	96.3	96.9	97.4	97.7	98.1	98.3	98.6	98.8	99.0	99.1	99.3	99.4	99.5	99.6	99.7	99.7	
	12	96.6	98.1	98.4	98.6	98.7	98.8	98.8	98.9	98.9	99.0	99.1	99.1	99.2	99.2	99.3	99.3	99.3	99.3	99.3	99.3	99.3	99.3	99.3	000
農度[%]	11	96.9	98.6	98.9	99.0	99.1	99.2	99.3	99.4	99.4	99.5	99.5	99.6	99.7	99.7	99.8	99.8	99.8	99.9	99.9	99.8	99.9	99.8	99.8	
く素ガス	10	63.8	79.3	84.7	87.8	89.9	91.4	92.7	93.7	94.5	95.3	95.9	96.5	97.1	97.5	98.0	98.3	98.6	98.9	99.2	99.3	99.5	99.6	99.6	0
7	9	18.0	38.8	50.1	57.6	63.3	67.8	71.6	74.9	77.9	80.5	82.8	84.9	86.7	88.4	89.9	91.2	92.4	93.5	94.4	95.2	95.9	96.6	97.2	
	8	1.5	9.9	18.4	25.7	32.0	37.8	43.0	47.8	52.2	56.2	59.9	63.2	66.2	69.0	71.5	73.7	75.7	77.5	79.2	80.6	82.0	83.2	84.3	
	7	0.1	1.8	6.0	11.5	17.2	22.6	27.7	32.4	36.8	40.9	44.6	48.1	51.2	54.1	56.7	59.1	61.2	63.2	64.9	66.5	67.9	69.2	70.4	ı E
	6	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	1.0	1.6	2.2	3.0	3.8	4.7	5.5	6.4	7.3	8.1	8.9	9.7	10.5	11.2	12.0	12.7	13.3	
	5	0.0	0.0	0.1	0.2	0.6	1.1	1.8	2.6	3.5	4.4	5.4	6.4	7.3	8.2	9.1	10.0	10.9	11.7	12.4	13.2	13.9	14.6	15.3	C L
	4	0.0	1.0	3.5	6.6	9.7	12.5	15.1	17.3	19.3	21.2	22.8	24.2	25.6	26.8	27.9	28.9	29.9	30.7	31.6	32.4	33.1	33.8	34.5	0
	3	24.2	44.4	54.1	59.9	63.9	66.7	69.0	70.7	72.1	73.2	74.2	75.1	75.8	76.4	76.9	77.4	77.8	78.2	78.6	78.8	79.1	79.4	79.6	
	2	19.8	41.2	52.2	59.3	64.6	68.9	72.5	75.7	78.5	81.0	83.2	85.2	87.0	88.6	90.0	91.3	92.4	93.5	94.3	95.1	95.9	96.5	97.0	
	1	0.1	1.5	5.3	10.6	16.3	21.8	27.0	31.8	36.3	40.4	44.3	47.7	50.9	53.8	56.5	58.9	61.0	63.0	64.8	66.3	67.8	69.1	70.3	Ē
時間	[h]	1	2	3	4	Q	6	7	8	6	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	10

(40)
計測点 21~
1 時間 どと、
(水素放出点A、
)水素濃度計測値
./min の地中の
供給流量 5.54]
表 I -11

	40	0.0	0.3	2.3	5.8	10.0	14.3	18.5	22.3	25.9	29.1	32.2	34.8	37.4	39.8	41.8	43.8	45.5	47.2	48.5	50.0	51.3	52.6	53.3	54.3
	39	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.5	0.8	1.4	2.0	2.7	3.4	4.2	5.0	5.8	6.6	7.3	8.1	8.8	9.5	10.2	10.9	11.5	12.1	12.7
	38	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.5	0.9	1.5	2.1	2.8	3.6	4.5	5.3	6.1	6.9	7.7	8.5	9.3	10.0	10.7	11.4	12.1	12.8	13.4
	37	0.0	0.0	0.1	0.2	0.6	1.1	1.8	2.6	3.5	4.4	5.4	6.3	7.2	8.2	9.0	9.9	10.7	11.5	12.3	13.0	13.7	14.4	15.0	15.7
	36	0.0	0.0	0.2	0.7	1.6	2.7	4.0	5.3	6.5	7.8	8.9	10.1	11.1	12.1	13.1	14.0	14.8	15.6	16.4	17.2	17.9	18.5	19.2	19.8
	35	0.0	0.1	0.8	2.1	3.9	5.8	7.7	9.5	11.1	12.7	14.1	15.4	16.6	17.7	18.8	19.7	20.6	21.4	22.2	23.0	23.7	24.4	25.1	25.7
	34	0.0	0.7	2.9	6.0	9.2	12.1	14.7	17.0	19.0	20.8	22.4	23.9	25.2	26.4	27.4	28.4	29.3	30.2	31.0	31.7	32.4	33.1	33.8	34.4
	33	0.6	6.7	14.4	21.1	26.5	30.9	34.6	37.6	40.1	42.3	44.2	45.8	47.2	48.4	49.5	50.5	51.3	52.2	52.9	53.6	54.3	54.9	55.4	56.0
	32	8.5	25.3	36.1	43.7	49.1	53.2	56.4	58.9	60.8	62.4	63.8	64.9	65.9	66.7	67.4	68.0	68.6	69.1	69.6	69.9	70.3	70.6	71.0	71.3
農度[%]	31	21.0	41.4	54.0	62.7	69.0	73.6	77.1	79.7	81.8	83.4	84.7	85.8	86.7	87.5	88.2	88.8	89.3	89.7	90.1	90.5	90.8	91.2	91.4	91.7
く素ガス	30	8.2	25.2	38.8	49.2	57.1	63.0	67.6	71.1	73.8	76.0	77.8	79.2	80.5	81.6	82.5	83.3	83.9	84.6	85.1	85.6	86.1	86.5	86.9	87.2
Д	29	8.5	25.6	39.3	49.9	58.0	64.2	69.0	72.7	75.7	78.1	80.1	81.8	83.2	84.5	85.5	86.5	87.3	88.0	88.7	89.3	89.8	90.3	90.7	91.1
	28	18.8	39.2	52.1	61.2	68.0	73.1	77.1	80.3	83.0	85.2	87.2	88.8	90.3	91.6	92.7	93.7	94.6	95.4	96.1	96.6	97.2	97.7	98.1	98.5
	27	6.1	22.5	34.1	42.4	48.8	54.0	58.3	62.0	65.2	68.1	70.6	72.9	74.9	76.8	78.4	79.8	81.1	82.3	83.4	84.2	85.1	85.8	86.5	87.1
	26	0.6	6.4	14.2	21.4	27.6	33.2	38.3	42.9	47.1	50.9	54.4	57.6	60.5	63.1	65.5	67.6	69.5	71.3	72.9	74.3	75.6	76.8	77.8	78.8
	25	0.0	1.1	4.6	9.8	15.3	20.6	25.7	30.3	34.6	38.6	42.3	45.7	48.8	51.6	54.1	56.5	58.6	60.5	62.2	63.8	65.2	66.5	67.6	68.7
	24	26.1	44.3	55.3	63.0	68.6	72.7	75.8	78.1	79.9	81.4	82.6	83.6	84.4	85.1	85.7	86.2	86.6	87.0	87.4	87.7	88.0	88.3	88.5	88.7
	23	7.5	24.4	37.6	47.7	55.4	61.2	65.6	69.0	71.7	73.9	75.7	77.2	78.4	79.5	80.5	81.2	82.0	82.6	83.2	83.7	84.1	84.6	84.9	85.2
	22	25.2	43.0	54.0	61.7	67.3	71.4	74.6	77.1	79.1	80.7	82.1	83.3	84.4	85.3	86.0	86.7	87.3	87.8	88.3	88.6	89.0	89.3	89.6	89.9
	21	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.5	0.9	1.5	2.2	2.9	3.7	4.6	5.4	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.2	10.9	11.6	12.3	12.9	13.6
時間	[h]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

表 I-12 供給流量 5.54 L/min の地中の水素濃度計測値(水素放出点 A、1 時間ごと、計測点 41~60)

	60	0.0	0.1	1.1	3.1	5.7	8.4	11.0	13.5	15.7	17.8	19.6	21.3	22.9	24.4	25.7	27.0	28.1	29.3	30.3	31.4	32.4	33.4	34.2	35.0
	59	0.2	4.4	11.8	19.2	25.3	30.3	34.3	37.5	40.2	42.3	44.2	45.6	47.1	48.3	49.2	50.2	50.9	51.8	52.4	53.1	53.8	54.5	54.7	55.3
	58	0.3	0.3	2.0	4.1	7.0	10.4	13.2	15.5	18.2	20.6	23.1	24.7	26.8	28.7	30.2	31.2	32.5	33.9	35.0	36.7	37.5	38.6	39.5	40.8
	57	0.1	3.5	11.0	18.8	25.7	31.3	35.9	39.7	42.9	45.5	47.8	49.6	51.5	53.0	54.2	55.5	56.5	57.6	58.4	59.3	60.1	61.0	61.4	62.0
	56	0.1	3.1	8.5	13.6	17.7	21.0	23.9	26.5	28.8	30.9	32.9	34.8	36.6	38.3	39.8	41.3	42.6	43.9	45.1	46.2	47.3	48.3	49.2	50.2
	55	25.1	50.0	61.1	67.0	70.6	73.1	75.0	76.5	77.8	78.9	79.9	80.8	81.6	82.3	83.0	83.6	84.1	84.7	85.1	85.5	85.9	86.2	86.5	86.9
	54	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0	1.4	1.9	2.3	2.8	3.4	3.9	4.4	4.9	5.4	5.9	6.4	6.9	7.4	7.8	с; Х
	53	'																'							
	52	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.6	1.1	1.6	1.9	2.6	3.3	4.0	4.8	5.5	6.2	6.9	7.6	8.2	8.8	9.5	10.1	10.6	11.2	11.7
濃度[%]	51	0.0	0.0	0.1	0.3	0.8	1.4	2.2	3.1	4.0	4.9	5.8	6.6	7.5	8.3	9.0	9.7	10.4	11.1	11.7	12.3	12.9	13.5	14.0	14.6
大素ガス	50	0.0	0.0	0.3	1.0	2.2	3.6	5.0	6.5	7.8	9.1	10.3	11.3	12.3	13.3	14.1	14.9	15.6	16.4	17.0	17.7	18.3	18.9	19.4	20.0
7	49	0.0	0.2	1.4	3.6	6.3	9.0	11.5	13.8	15.8	17.5	19.1	20.4	21.7	22.8	23.8	24.7	25.5	26.3	27.0	27.8	28.4	29.1	29.6	30.2
	48	0.1	2.5	7.9	13.5	18.1	21.9	24.9	27.4	29.4	31.1	32.6	33.7	34.8	35.8	36.5	37.3	37.9	38.5	39.0	39.6	40.1	40.6	40.9	41.3
	47	1.2	11.0	21.2	29.2	35.3	39.4	42.8	45.3	47.4	49.2	50.5	51.6	52.4	52.8	53.7	54.4	55.1	55.5	55.7	56.1	56.5	56.9	57.1	57.7
	46	2.2	15.5	28.7	39.0	46.8	52.7	57.2	60.7	63.4	65.5	67.3	68.6	69.9	70.9	71.7	72.4	73.0	73.6	74.1	74.6	75.0	75.4	75.7	76.0
	45	1.3	12.4	25.5	36.2	44.4	50.7	55.5	59.1	62.0	64.3	66.1	67.6	68.9	70.0	70.8	71.7	72.3	73.0	73.5	74.0	74.5	74.9	75.2	75.5
	44	1.2	12.0	24.8	35.3	43.4	49.7	54.5	58.3	61.3	63.8	65.8	67.5	69.0	70.3	71.3	72.3	73.1	74.0	74.6	75.2	75.7	76.2	76.6	77.0
	43	1.9	13.9	26.0	35.4	42.6	48.0	52.3	55.7	58.6	60.9	62.9	64.5	66.1	67.4	68.5	69.5	70.3	71.3	71.9	72.6	73.2	73.8	74.0	74.5
	42	1.1	11.4	22.8	31.8	38.7	44.2	48.6	52.3	55.6	58.3	60.8	62.9	64.9	66.6	68.1	69.5	70.6	71.8	72.7	73.7	74.5	75.3	75.7	76.4
	41	0.0	2.4	8.1	14.2	19.8	24.7	29.0	32.9	36.4	39.6	42.5	45.1	47.6	49.8	51.8	53.6	55.2	56.8	58.1	59.3	60.5	61.6	62.4	63.2
時間	[h]	1	2	3	4	บ	6	7	8	6	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

$\sim 20)$
計測点 1
1 時間ごと、
(水素放出点 B、
1の地中の水素濃度計測値
供給流量 5.54 L/min
表 I -13

	20	25.7	49.1	63.2	72.2	78.0	81.8	84.3	86.1	87.2	88.1	88.8	89.3	89.6	90.0	90.2	90.4	90.6	90.7	90.8	90.9	91.0	91.0	91.1	91.2
	19	67.5	80.7	87.1	91.0	93.5	95.2	96.3	97.0	97.6	98.0	98.3	98.6	98.8	99.0	99.1	99.2	99.3	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4
	18	97.1	98.0	98.5	98.7	98.9	99.1	99.2	99.4	99.4	99.5	99.6	99.7	99.7	99.8	99.8	99.8	99.9	99.9	99.9	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8
	17	76.6	87.6	91.6	93.7	95.0	95.9	96.6	97.1	97.6	97.9	98.2	98.5	98.7	98.9	99.1	99.2	99.4	99.4	99.5	99.5	99.6	99.6	99.6	7.66
	16	34.0	55.5	65.9	72.0	76.0	78.9	81.1	82.8	84.2	85.4	86.3	87.1	87.8	88.5	89.0	89.5	89.9	90.3	90.7	91.0	91.3	91.5	91.8	92.0
	15	2.7	13.6	23.1	30.5	36.4	41.1	44.9	48.1	50.8	53.1	55.1	56.8	58.3	59.7	60.9	62.0	63.0	63.9	64.8	65.5	66.3	66.9	67.6	68.2
	14	0.0	1.7	5.3	9.4	13.3	16.7	19.7	22.2	24.4	26.4	28.1	29.6	31.0	32.2	33.3	34.3	35.3	36.1	36.9	37.6	38.4	39.0	39.7	40.3
	13	0.0	0.3	1.7	3.9	6.4	8.9	11.3	13.4	15.3	17.1	18.6	20.1	21.4	22.6	23.7	24.7	25.7	26.6	27.4	28.2	29.0	29.7	30.4	31.1
	12	0.0	0.0	0.4	1.3	2.6	4.1	5.8	7.4	8.9	10.4	11.8	13.0	14.2	15.3	16.4	17.3	18.2	19.1	19.9	20.7	21.4	22.1	22.8	23.4
農度[%]	11	0.0	0.0	0.1	0.4	0.9	1.7	2.6	3.6	4.7	5.7	6.8	7.8	8.7	9.6	10.5	11.3	12.2	12.9	13.6	14.3	15.0	15.7	16.3	16.9
く素ガス	10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.8	1.3	1.9	2.5	3.2	3.8	4.5	5.2	5.8	6.4	7.1	7.7	8.3	8.9	9.6	10.1	10.7	11.2
7	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.5	0.8	1.1	1.5	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	4.4	4.9	5.4	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0	1.3	1.7	2.0	2.4	2.8	3.2	3.7	4.1	4.6	5.1	5.5	6.0
	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.7	0.9	1.2	1.5	1.8	2.2	2.5	2.9	3.4	3.8	4.2	4.7	5.1
	6	31.2	53.0	65.7	73.7	78.9	82.2	84.4	85.9	86.9	87.6	88.2	88.6	88.9	89.2	89.4	89.5	89.6	89.8	89.8	89.9	90.0	90.0	90.1	90.1
	5	80.9	88.7	92.5	94.7	96.1	97.0	97.7	98.1	98.4	98.7	98.9	99.0	99.2	99.3	99.4	99.4	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.4	99.4	99.4
	4	45.0	65.6	74.9	80.4	84.1	86.7	88.8	90.4	91.7	92.8	93.7	94.5	95.2	95.8	96.4	96.8	97.3	97.6	97.9	98.2	98.5	98.7	99.0	99.2
	3	0.0	1.7	5.2	9.1	12.8	16.1	18.9	21.4	23.6	25.5	27.2	28.7	30.0	31.3	32.4	33.4	34.4	35.2	36.0	36.8	37.5	38.1	38.8	39.4
	2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	1.0	1.4	1.7	2.1	2.5	2.9	3.3	3.7	4.2	4.6	5.1	5.6	6.0	6.5
	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.3	1.6	1.9	2.2	2.6	2.9	3.3	3.7	4.1
時間	[H]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

$\sim 40)$
、計測点 21~
1時間バと、
(水素放出点B、
水素濃度計測値
min の 地中の
供給流量 5.54 L/r
表 I -14

	40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	1.0	1.2	1.5	1.7	2.0	2.3	2.5	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1
	39	10.3	33.4	50.8	62.7	70.7	76.1	79.7	82.1	83.8	85.1	86.0	86.7	87.2	87.7	88.0	88.3	88.5	88.8	88.9	89.1	89.2	89.3	89.3	89.4
	38	13.9	37.5	54.2	65.5	73.1	78.2	81.7	84.1	85.8	87.0	87.9	88.6	89.2	89.6	90.0	90.3	90.5	90.7	90.9	91.0	91.1	91.2	91.3	91.4
	37	35.5	59.5	72.7	80.8	86.0	89.5	91.9	93.5	94.7	95.6	96.3	96.8	97.2	97.5	97.8	98.0	98.2	98.4	98.5	98.6	98.7	98.7	98.8	98.8
	36	56.8	76.9	85.3	89.8	92.6	94.4	95.7	96.6	97.2	97.8	98.2	98.5	98.8	99.0	99.2	99.4	99.5	99.6	99.7	99.8	99.8	99.9	100.0	100.0
	35	45.9	69.9	80.3	85.8	89.1	91.3	92.9	94.1	95.0	95.8	96.4	96.9	97.3	97.7	98.0	98.3	98.6	98.7	98.9	99.0	99.2	99.3	99.4	99.5
	34	19.2	42.6	56.3	64.5	69.9	73.7	76.4	78.5	80.2	81.6	82.7	83.7	84.5	85.3	85.9	86.5	86.9	87.4	87.8	88.1	88.4	88.7	89.0	89.3
	33	1.2	10.2	19.9	27.6	33.7	38.5	42.3	45.5	48.1	50.3	52.2	53.9	55.4	56.7	57.9	58.9	59.8	60.7	61.5	62.2	62.9	63.5	64.1	64.7
	32	0.0	1.2	4.4	8.4	12.3	15.7	18.6	21.2	23.4	25.3	27.0	28.5	29.8	31.0	32.1	33.1	34.0	34.8	35.6	36.3	37.0	37.6	38.3	38.8
農度[%]	31	0.0	0.2	1.4	3.5	5.9	8.4	10.8	12.9	14.8	16.6	18.2	19.6	20.9	22.1	23.2	24.3	25.2	26.1	26.9	27.7	28.5	29.2	29.8	30.5
ヾ素ガス}	30	0.0	0.0	0.3	1.0	2.1	3.5	5.0	6.4	7.9	9.2	10.5	11.6	12.7	13.8	14.7	15.6	16.4	17.2	18.0	18.7	19.4	20.0	20.6	21.2
ス	29	0.0	0.0	0.1	0.3	0.8	1.5	2.3	3.3	4.2	5.2	6.2	7.1	8.0	8.9	9.7	10.4	11.2	11.9	12.6	13.2	13.9	14.5	15.0	15.6
	28	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.5	0.9	1.4	2.0	2.6	3.2	3.9	4.6	5.3	5.9	6.6	7.2	7.8	8.4	9.0	9.6	10.2	10.8	11.3
	27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.9	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.1	4.5	5.0	5.5	5.9	6.4	6.9
	26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.6	3.0	3.4	3.8	4.2	4.7	5.1	5.6
	25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0	2.3	2.7	3.1	3.5	3.9	4.3	4.7
	24	0.0	0.1	0.7	2.0	3.7	5.6	7.5	9.3	11.0	12.5	14.0	15.3	16.5	17.6	18.6	19.6	20.5	21.3	22.1	22.8	23.5	24.1	24.8	25.4
	23	0.0	0.0	0.1	0.6	1.3	2.3	3.4	4.7	5.8	7.0	8.1	9.2	10.1	11.1	11.9	12.8	13.5	14.3	15.0	15.6	16.3	16.9	17.5	18.0
	22	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.8	1.4	2.2	2.9	3.7	4.5	5.3	6.1	6.9	7.6	8.3	9.0	9.6	10.3	10.9	11.5	12.1	12.6	13.2
	21	19.2	43.3	58.5	68.2	74.4	78.5	81.2	82.9	84.1	85.0	85.6	86.1	86.4	86.7	86.9	87.1	87.2	87.4	87.4	87.6	87.7	87.7	87.7	87.8
時間	[h]	1	2	3	4	Q	9	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

計測点 41~60)
■、77101111111111111111111111111111111111
(水素放出点B、
k素濃度計測値
./min の地中の7
供給流量 5.54 I
表 I -15

	60	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.7	1.2	1.8	2.4	3.1	3.8	4.5	5.2	5.9	6.6	7.3	8.0	8.7	9.3	10.0	10.6	11.3	11.9	и С Г
	59	0.0	0.0	0.1	0.5	1.2	2.0	2.9	3.9	4.8	5.7	6.6	7.4	8.2	9.0	9.7	10.4	11.0	11.6	12.3	12.9	13.4	13.9	14.5	14.9
	58	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.9	1.3	2.0	2.5	3.1	3.7	4.3	4.9	5.5	6.2	6.8	6.7	8.0	8.5	9.1	9.8	10.3
	57	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.9	1.4	2.0	2.7	3.4	4.1	4.8	5.4	6.1	6.7	7.3	7.9	8.5	9.0	9.6	10.1	10.7	11.2	11.7
	56	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.6	1.0	1.5	2.1	2.8	3.5	4.2	5.0	5.8	6.5	7.3	8.1	8.9	9.6	10.4	11.1	11.8	12.5	13.2
	55	0.0	0.0	0.1	0.4	0.9	1.6	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.4	8.4	9.3	10.1	10.9	11.7	12.5	13.2	13.9	14.6	15.3	15.9	16.6
	54	2.5	20.8	38.9	52.3	61.8	68.5	73.1	76.3	78.6	80.2	81.5	82.5	83.1	83.7	84.2	84.6	84.8	85.1	85.3	85.6	85.7	85.8	85.9	86.0
	53																								,
	52	8.8	34.9	55.3	68.7	77.5	83.5	87.7	90.5	92.6	94.1	95.2	96.1	96.8	97.3	97.6	98.1	98.3	98.2	98.9	99.1	99.3	99.4	99.5	9.66
濃度[%]	51	14.5	45.8	65.0	76.1	82.8	87.3	90.2	92.4	93.9	95.0	95.9	96.7	97.2	97.7	98.1	98.4	98.7	99.0	99.2	99.4	99.5	99.6	99.7	7.66
ド素ガス	50	10.3	38.2	56.9	67.9	74.8	79.3	82.4	84.7	86.4	87.8	88.9	89.8	90.5	91.2	91.7	92.3	92.6	93.0	93.4	93.7	93.9	94.1	94.3	94.4
7	49	3.4	22.6	39.4	51.0	58.9	64.3	68.3	71.3	73.7	75.6	77.1	78.5	79.6	80.6	81.4	82.2	82.9	83.5	84.0	84.5	85.0	85.4	85.7	86.0
	48	0.2	5.0	13.4	20.7	26.2	30.3	33.5	36.1	38.2	39.9	41.4	42.7	43.7	44.7	45.6	46.4	47.1	47.7	48.3	48.9	49.4	49.9	50.3	50.7
	47	0.0	0.6	2.7	5.8	9.1	12.1	14.7	16.9	18.6	20.5	21.9	23.1	24.2	25.0	26.0	27.1	27.9	28.6	29.3	29.9	30.5	31.0	31.5	32.1
	46	0.0	0.1	0.6	2.0	3.8	5.8	7.8	9.7	11.4	13.0	14.4	15.7	16.9	17.9	18.9	19.9	20.7	21.5	22.2	23.0	23.6	24.3	24.8	25.4
	45	0.0	0.0	0.1	0.6	1.4	2.4	3.6	4.8	5.9	7.1	8.2	9.2	10.2	11.1	12.0	12.7	13.5	14.2	14.9	15.5	16.1	16.7	17.3	17.8
	44	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.9	1.6	2.3	3.0	3.8	4.6	5.3	6.1	6.8	7.5	8.2	8.8	9.4	10.0	10.6	11.1	11.7	12.2	12.7
	43	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.6	1.0	1.4	1.9	2.3	2.8	3.3	3.8	4.3	4.8	5.3	5.8	6.3	6.7	7.2	7.6	8.1	с У
	42	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.1	1.5	1.8	2.2	2.6	3.1	3.5	3.9	4.4	4.8	5.2	5.7	6.1	6.5	7.0
	41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.4	0.5	0.7	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.5	2.8	3.1	3.5	3.9	4.3	4.6	5.0
時間	[h]	1	2	3	4	5	6	7	8	6	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	2.4

間扫										ド麦ガス	鷹度[%]									
<u>त</u> ्त्	1	2	3	4	ю	6	7	×	6	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0.0	0.0	0.0	1.1	81.5	98.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	6.0	25.6	75.9	98.6
2	0.0	0.0	0.0	9.2	90.7	98.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	8.0	22.1	48.0	88.8	99.1
3	0.0	0.0	0.3	18.1	93.7	98.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	3.3	16.6	34.0	59.4	92.9	99.3
4	0.0	0.0	1.2	25.6	95.2	99.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	1.3	6.8	23.9	42.4	66.1	94.9	99.4
5	0.0	0.0	2.5	31.7	96.2	99.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	1.1	2.6	10.6	29.9	48.7	70.6	96.2	99.4
6	0.0	0.0	4.1	36.7	96.8	99.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.7	2.0	4.3	14.1	34.9	53.5	73.7	97.0	99.5
7	0.0	0.0	5.9	40.9	97.2	99.3	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5	1.3	3.1	6.2	17.4	39.0	57.3	76.1	97.5	99.5
8	0.0	0.0	7.6	44.4	97.5	99.4	0.0	0.1	0.1	0.3	0.9	2.0	4.4	8.0	20.3	42.4	60.3	77.9	98.0	99.6
9	0.0	0.1	9.3	47.4	97.8	99.4	0.0	0.1	0.2	0.5	1.3	2.8	5.6	9.8	23.0	45.4	62.8	79.3	98.3	99.6
10	0.0	0.1	10.9	50.0	98.0	99.4	0.1	0.2	0.3	0.7	1.8	3.7	6.9	11.5	25.3	47.9	64.8	80.4	98.6	99.6
11	0.0	0.3	12.4	52.2	98.2	99.4	0.1	0.3	0.5	1.0	2.4	4.6	8.1	13.0	27.4	50.0	66.5	81.4	98.8	99.6
12	0.1	0.4	13.8	54.2	98.3	99.5	0.2	0.4	0.7	1.3	3.0	5.4	9.3	14.5	29.4	51.9	68.0	82.2	99.0	99.6
13	0.2	0.5	15.1	55.9	98.4	99.5	0.3	0.6	0.9	1.7	3.6	6.3	10.4	15.8	31.1	53.6	69.3	82.9	99.1	99.7
14	0.3	0.7	16.3	57.5	98.5	99.5	0.5	0.7	1.2	2.1	4.3	7.2	11.4	17.1	32.7	55.1	70.4	83.5	99.3	99.7
15	0.4	0.9	17.4	58.9	98.6	99.5	0.7	0.9	1.4	2.5	4.9	8.1	12.4	18.2	34.2	56.4	71.4	84.0	99.4	99.7
16	0.5	1.2	18.5	60.1	98.7	99.5	0.8	1.1	1.7	2.9	5.5	8.9	13.4	19.3	35.5	57.6	72.2	84.4	99.5	99.7
17	0.7	1.4	19.4	61.2	98.7	99.5	1.0	1.4	2.1	3.4	6.2	9.7	14.3	20.3	36.7	58.6	72.9	84.8	99.5	99.7
18	0.9	1.7	20.4	62.2	98.7	99.5	1.3	1.6	2.4	3.8	6.8	10.4	15.1	21.2	37.9	59.6	73.6	85.1	99.6	99.7
19	1.0	1.9	21.2	63.1	98.7	99.5	1.5	1.9	2.7	4.2	7.4	11.2	15.9	22.1	38.9	60.5	74.2	85.4	99.6	99.7
20	1.3	2.2	22.0	63.9	98.7	99.5	1.8	2.3	3.1	4.7	8.0	11.9	16.7	22.9	39.9	61.2	74.7	85.7	99.6	99.6
21	1.5	2.5	22.7	64.7	98.7	99.4	2.0	2.6	3.5	5.1	8.6	12.6	17.4	23.7	40.8	62.0	75.2	85.9	99.6	99.6
22	1.7	2.8	23.5	65.4	98.7	99.4	2.3	2.9	3.9	5.6	9.2	13.2	18.1	24.4	41.7	62.6	75.7	86.1	99.6	99.6
23	2.0	3.1	24.1	66.1	98.8	99.4	2.7	3.2	4.3	6.0	9.7	13.9	18.8	25.1	42.5	63.3	76.1	86.3	99.7	99.6
24	2.2	3.5	24.8	66.7	98.8	99.4	3.0	3.6	4.7	6.5	10.3	14.5	19.4	25.7	43.2	63.9	76.5	86.5	99.7	99.6

表 I-16 供給流量 5.54 L/min の地中の水素濃度計測値(水素放出点 C、1 時間ごと、計測点 1~20)

表 I-17 供給流量 5.54 L/min の地中の水素濃度計測値(水素放出点 C、1 時間ごと、計測点 21~40)

	40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.6	2.8	
	39	92.0	97.4	98.6	99.0	99.3	99.4	99.5	99.5	99.6	99.6	99.6	99.6	99.7	99.7	99.7	99.7	99.7	99.7	99.6	99.6	99.6	99.5	99.5	
	38	83.9	94.1	96.7	97.8	98.3	98.7	98.9	99.1	99.2	99.3	99.4	99.4	99.5	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.5	99.6	99.5	99.5	
	37	50.7	76.4	85.6	90.0	92.6	94.2	95.4	96.2	96.9	97.4	97.8	98.2	98.5	98.8	99.0	99.2	99.3	99.4	99.5	99.6	99.7	99.7	99.8	
	36	16.8	41.8	56.2	64.8	70.3	74.1	77.0	79.1	80.8	82.2	83.3	84.2	85.1	85.8	86.4	86.9	87.3	87.7	88.0	88.3	88.7	88.9	89.2	
	35	3.7	19.4	32.5	42.2	49.2	54.5	58.6	61.8	64.5	66.6	68.5	70.0	71.4	72.6	73.6	74.5	75.3	76.0	76.6	77.2	77.7	78.1	78.6	
	34	0.4	6.5	15.2	22.8	29.1	34.3	38.6	42.1	45.2	47.7	49.9	51.9	53.6	55.1	56.4	57.6	58.6	59.6	60.4	61.2	62.0	62.6	63.2	
	33	0.0	0.4	2.5	5.9	9.5	13.1	16.3	19.2	21.8	24.1	26.2	28.0	29.7	31.2	32.6	33.9	35.0	36.1	37.1	38.0	38.9	39.6	40.4	
	32	0.0	0.0	0.3	1.1	2.3	3.9	5.6	7.3	9.0	10.6	12.1	13.5	14.9	16.0	17.2	18.2	19.1	20.0	20.9	21.6	22.4	23.1	23.7	1
濃度[%]	31	0.0	0.0	0.1	0.4	0.9	1.8	2.9	4.0	5.2	6.4	7.6	8.8	9.9	10.9	11.9	12.8	13.7	14.5	15.3	16.1	16.8	17.5	18.1	
く素ガス	30	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.6	1.1	1.7	2.4	3.2	3.9	4.7	5.5	6.3	7.1	7.8	8.5	9.2	9.9	10.5	11.1	11.7	12.3	
7	29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.5	0.8	1.2	1.7	2.2	2.8	3.4	3.9	4.5	5.1	5.7	6.3	6.9	7.4	8.0	8.5	9.0	
	28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.1	1.4	1.8	2.2	2.6	3.0	3.5	3.9	4.4	4.8	5.3	5.7	6.2	1
	27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.7	2.0	2.3	2.6	2.9	3.2	3.5	
	26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0	-
	25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	2.0	2.2	2.5	-
	24	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	1.1	1.8	2.7	3.6	4.6	5.6	6.6	7.5	8.4	9.3	10.2	11.0	11.7	12.5	13.2	13.8	14.5	15.1	-
	23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.7	1.2	1.7	2.3	3.0	3.6	4.3	5.0	5.6	6.3	6.9	7.6	8.2	8.8	9.4	9.9	10.4	-
	22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	1.1	1.5	2.0	2.4	2.9	3.4	3.9	4.4	4.9	5.4	6.0	6.4	6.9	7.4	
	21	99.4	99.4	99.5	99.6	99.6	99.7	99.7	99.7	99.7	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.7	99.7	99.7	99.6	99.6	
時間	[h]	1	2	3	4	22	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	

表 I-18 供給流量 5.54 L/min の地中の水素濃度計測値(水素放出点 C、1 時間ごと、計測点 41~60)

	60	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.1	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.6	5.1	5.7	6.2	6.8	7.3	7.8	8.3	8.8 8
	59	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	0.9	1.3	1.8	2.3	2.8	3.4	3.9	4.5	5.0	5.6	6.1	6.6	7.1	7.6	8.1	8.5	9.0	9.5
	58	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.6	0.9	1.2	1.5	1.9	2.4	3.1	3.8	3.8	4.1	4.5	5.0	5.5	5.9	6.4	6.9
	57	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.4	1.7	2.2	2.6	3.0	3.5	3.9	4.4	4.8	5.3	5.7	6.2	6.6	7.0	7.4
	56	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.4	0.7	1.1	1.5	1.9	2.4	2.9	3.5	4.0	4.6	5.2	5.8	6.4	7.0	7.6	8.2	8.8
	55	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.5	0.9	1.3	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.9	5.5	6.1	6.7	7.4	7.9	8.6	9.1	9.7	10.3
	54	68.6	90.3	95.3	97.1	98.1	98.7	99.0	99.3	99.5	99.6	99.7	99.8	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9
	53		ı				ı										ı						ı		
	52	17.1	53.5	72.1	81.3	86.4	89.7	91.9	93.4	94.6	95.7	96.4	97.1	97.8	98.3	98.6	99.3	98.9	99.1	99.2	99.4	99.5	99.5	99.7	99.8
濃度[%]	51	3.9	26.1	43.9	55.2	62.5	67.6	71.3	74.1	76.2	78.0	79.4	80.6	81.6	82.5	83.2	83.9	84.6	85.0	85.4	85.9	86.2	86.4	86.7	87.0
大素ガス	50	0.4	9.0	21.4	31.2	38.6	44.3	48.7	52.2	55.1	57.5	59.4	61.1	62.6	63.9	65.0	66.0	67.0	67.7	68.4	69.1	69.6	70.1	70.6	71.0
7	49	0.0	2.3	8.9	16.3	22.8	28.1	32.5	36.1	39.2	41.8	44.1	46.0	47.8	49.3	50.6	51.9	53.0	54.0	54.9	55.7	56.5	57.1	57.8	58.4
	48	0.0	0.2	1.4	3.8	6.8	9.8	12.5	15.0	17.1	19.0	20.7	22.2	23.5	24.7	25.8	26.8	27.7	28.5	29.3	30.0	30.6	31.2	31.8	32.3
	47	0.0	0.0	0.1	0.6	1.5	2.7	4.0	5.4	6.7	8.0	9.2	10.3	11.4	12.4	13.2	14.1	14.9	15.7	16.4	17.1	17.7	18.3	18.8	19.4
	46	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	1.1	1.8	2.7	3.6	4.5	5.5	6.4	7.3	8.2	9.0	9.8	10.6	11.3	12.0	12.7	13.3	13.9	14.5	15.0
	45	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.8	1.2	1.8	2.3	3.0	3.6	4.2	4.9	5.5	6.1	6.8	7.3	7.9	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5
	44	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	1.3	1.7	2.1	2.5	3.0	3.5	4.0	4.4	4.9	5.4	5.8	6.3	6.7	7.2	7.6
	43	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0	1.3	1.6	1.9	2.3	2.6	2.9	3.3	3.6	4.0	4.3	4.7	5.1	5.4
	42	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.9	1.2	1.4	1.7	2.0	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.2	4.5
	41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.1	2.3	2.6	2.8	3.1	3.4
時間	[h]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
🗵 No.	供給流量	水素放出点	時間																						
-------	------------	-------	-------------------------------------																						
I -1			10 min∼4 h																						
I -2		А	$5 \mathrm{h}{\sim}10 \mathrm{h}$																						
I -3			$12 \text{ h}{\sim}24 \text{ h}$																						
I -4			10 min∼4 h																						
I -5	1.93 L/min	В	5 h~10 h																						
I -6			$12 \text{ h}{\sim}24 \text{ h}$																						
I -7			10 min∼4 h																						
I -8		С	5 h~10 h																						
I -9			$12 \text{ h}{\sim}24 \text{ h}$																						
I -10			10 min∼4 h																						
I -11		А	5 h~10 h																						
I -12			$12 \mathrm{h}{\sim} 24 \mathrm{h}$																						
I -13			10 min∼4 h																						
I -14	5.54 L/min	В	5 h~10 h																						
I -15			$12 \text{ h}{\sim}24 \text{ h}$																						
I -16			10 min~4 h																						
I -17		С	5 h~10 h																						
I -18			$12 \text{ h}{\sim}24 \text{ h}$																						

表 I-(2) 図番号と試験条件一覧表



(供給流量 1.93 L/min、水素放出点 A、10 min~4 h)







(供給流量 1.93 L/min、水素放出点 B、10 min~4 h)







(供給流量 1.93 L/min、水素放出点 C、10 min~4 h)







(供給流量 5.54L/min、水素放出点 A、10 min~4 h)







(供給流量 5.54L/min、水素放出点 B、10 min~4 h)











(供給流量 5.54 L/min、水素放出点 C、5 h~10 h)



Ⅱ. 実フィールド試験の大気中水素濃度分布計測結果

図 No.	供給流量	地表面からの 高さ	水素 放出点	時間
∏-1			А	
П-2		20 mm	В	
∏-3	1.02 I./		С	
П-4	1.93 L/min		А	
П-5		50 mm	В	
П-6			С	2 h o .94 h
II -7			А	5 n ² 24 n
П-8		20 mm	В	
П-9	5 54 T /min		С	
П-10	ə.ə4 L/min		А	
П-11		50 mm	В	
П-12			С	

表Ⅱ-(1) 図番号と試験条件一覧表

図Ⅱ-1~図Ⅱ-12に示す大気中水素濃度分布は、視認性を向上させるため、横方向に対し、縦方向を5倍拡大して表示した。



図Ⅱ-1 大気中の水素濃度経時変化

⁽供給流量 1.93 L/min、地表面からの高さ 20 mm、水素放出点 A、3 h~24 h)



図Ⅱ-2 大気中の水素濃度経時変化

⁽供給流量 1.93 L/min、地表面からの高さ 20 mm、水素放出点 B、3 h~24 h)



図Ⅱ-3 大気中の水素濃度経時変化

⁽供給流量 1.93 L/min、地表面からの高さ 20 mm、水素放出点 C、3 h~24 h)



図Ⅱ-4 大気中の水素濃度経時変化

⁽供給流量 1.93 L/min、地表面からの高さ 50 mm、水素放出点 A、3 h~24 h)



図Ⅱ-5 大気中の水素濃度経時変化

⁽供給流量 1.93 L/min、地表面からの高さ 50 mm、水素放出点 B、3 h~24 h)



図Ⅱ-6 大気中の水素濃度経時変化

⁽供給流量 1.93 L/min、地表面からの高さ 50 mm、水素放出点 C、3 h~24 h)



図Ⅱ-7 大気中の水素濃度経時変化

(供給流量 5.54 L/min、地表面からの高さ 20 mm、水素放出点 A、3 h~24 h)



図Ⅱ-8 大気中の水素濃度経時変化

⁽供給流量 5.54 L/min、地表面からの高さ 20 mm、水素放出点 B、3 h~24 h)



図Ⅱ-9 大気中の水素濃度経時変化

⁽供給流量 5.54 L/min、地表面からの高さ 20 mm、水素放出点 C、3 h~24 h)



図II-10 大気中の水素濃度経時変化 (供給流量 5.54 L/min、地表面からの高さ 50 mm、水素放出点 A、3 h~24 h)



図II-11 大気中の水素濃度経時変化 (供給流量 5.54 L/min、地表面からの高さ 50 mm、水素放出点 B、3 h~24 h)



図Ⅱ-12 大気中の水素濃度経時変化 (供給流量 5.54 L/min、地表面からの高さ 50 mm、水素放出点 C、3 h~24 h)

Ⅲ. 実フィールド試験の供給停止後の地中水素濃度分布計測結果

表 No.	供給流量	水素放出点	計測点
Ⅲ-1			$1 \sim 20$
Ⅲ-2		А	$21 \sim 40$
Ш-3	E E 4 T /min		41~60
Ⅲ-4	ə.ə4 L/min		$1 \sim 20$
Ⅲ-5		С	$21 \sim 40$
Ш-6			41~60

表Ⅲ-(1) 表番号と試験条件一覧表

	20	14.3	15.1	15.7	16.0	14.4	12.2	10.0	8.0	5.0	3.9	3.1
	19	17.0	17.6	17.9	17.8	15.7	13.2	10.9	8.8	5.6	4.4	3.5
	18	20.3	20.5	20.4	19.2	16.2	13.4	10.9	8.8	5.6	4.3	3.5
	17	25.5	25.0	24.1	21.7	17.4	14.0	11.3	9.0	5.6	4.3	3.4
	16	34.1	32.2	30.1	25.6	19.4	15.3	12.0	9.5	5.8	4.4	3.5
	15	55.0	47.9	42.4	32.9	22.8	17.1	13.2	10.2	6.1	4.7	3.7
	14	69.2	57.2	49.1	36.7	24.5	17.8	13.3	10.1	5.8	4.4	3.4
	13	83.9	67.5	56.8	40.9	26.2	18.7	13.9	10.5	6.2	4.7	3.7
	12	88.3	70.5	59.2	43.0	27.5	19.3	14.1	10.5	6.1	4.5	3.5
濃度[%]	11	90.8	73.6	62.2	45.4	28.7	19.9	14.4	10.6	6.1	4.6	3.6
ド素ガス	10	88.8	75.1	64.8	47.7	29.6	19.9	14.0	10.1	5.7	4.4	3.4
7	6	90.1	78.8	69.3	51.9	32.0	21.4	15.0	10.8	6.0	4.5	3.5
	8	83.2	76.3	69.0	53.3	32.9	21.7	15.1	10.8	6.0	4.4	3.4
	7	71.0	67.1	62.0	49.2	31.1	20.7	14.5	10.4	5.8	4.4	3.4
	9	14.4	15.3	15.8	16.1	14.5	12.2	10.0	8.1	5.1	3.9	3.1
	5	16.3	17.0	17.3	17.2	15.0	12.5	10.2	8.2	5.1	3.9	3.1
	4	34.3	32.5	30.5	26.1	19.8	15.6	12.2	9.6	5.8	4.4	3.5
	3	68.1	56.1	48.2	35.8	23.6	17.1	12.7	9.6	5.6	4.2	3.3
	2	88.9	77.2	67.6	50.3	30.2	19.5	13.1	9.0	4.6	3.4	2.5
	1	70.9	67.1	61.9	49.0	30.4	19.8	13.4	9.3	5.0	3.7	2.8
時間	[h]	1	3	ŋ	10	20	30	40	50	70	80	90

計測点 1~20)
(水素放出点A、
0水素濃度計測値
供給停止後の地中の
供給流量 5.54 L/min
表Ⅲ-1

時間									7	ド素ガス 。	濃度[%]									
[h]	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
1	14.0	83.3	81.5	80.4	67.2	76.6	81.8	91.2	86.8	82.3	82.6	65.0	53.0	33.8	25.8	20.1	16.1	13.8	13.1	44.4
3	14.8	71.7	69.7	67.0	62.8	70.1	71.6	78.2	74.3	69.5	67.8	54.0	46.1	31.8	25.2	20.3	16.7	14.6	13.9	40.9
5	15.4	61.9	59.4	56.8	58.0	63.5	62.9	67.3	63.3	58.7	56.9	46.3	40.5	29.6	24.3	20.2	17.1	15.1	14.4	37.8
10	15.7	45.3	42.6	41.0	46.2	49.4	47.0	48.8	45.2	41.7	40.4	34.3	31.3	25.0	21.7	19.0	16.9	15.4	14.8	30.5
20	14.4	28.3	26.6	26.1	29.1	30.7	28.8	29.8	27.8	25.9	25.6	22.7	21.7	19.0	17.3	16.0	14.8	14.0	13.6	19.6
30	12.3	19.4	18.5	18.4	19.2	20.3	18.8	20.1	19.3	18.1	18.2	16.4	16.3	14.9	14.0	13.1	12.4	11.8	11.6	13.1
40	10.1	14.0	13.5	13.6	13.4	14.1	12.9	14.2	14.0	13.2	13.5	12.3	12.5	11.8	11.2	10.7	10.2	9.7	9.6	9.2
50	8.2	10.3	10.1	10.1	9.5	10.0	9.0	10.3	10.4	9.8	10.2	9.2	9.6	9.3	8.9	8.6	8.2	7.8	7.8	6.6
70	5.2	6.0	5.9	5.8	5.3	5.5	4.8	5.8	6.1	5.6	6.0	5.3	5.8	5.8	5.5	5.4	5.1	4.9	5.0	3.9
80	4.0	4.5	4.5	4.4	4.0	4.1	3.6	4.4	4.6	4.2	4.6	4.0	4.4	4.5	4.3	4.2	4.0	3.8	3.8	2.9
90	3.1	3.5	3.5	3.4	3.1	3.1	2.7	3.4	3.6	3.3	3.6	3.1	3.5	3.5	3.4	3.4	3.2	3.0	3.1	2.4

	•
\sim	5
Ľ	,
4	1
(
_	ļ
	í
5	l
117	,
-113	
_	
涱	1
1	
1	
1]11⊏	1
	1
_	1
\sim	ł
1π2	2
1	1
- E	,
- . [×	ς
+5	2
111	,
4164	
11/1	١
Ċ,	,
×	
	ζ
\sim	
4	1
_ <u></u>	•
~	
=	1
Ē	ί
1	
+	
_1111 <i>m</i>	1
14	1
내	Į
±٢	1
	1
1112	5
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	
410	
11142	
11/11	١
Ċ,	,
~	
1	`
$\cap$	
0	١
0	•
Р	\
0	
0 中 i	
を中し	
地中の	
も年の	
の装中の	
の独中の	
の地中の	
後の地中の	
後の地中の	
-後の地中の	
上後の地中の	
止後の地中の	
算止後の独中の	
○二次の地中の	
停止後の地中の	
今年上後の地中の	
給停止後の地中の	
:給停止後の地中の	
は給停止後の地中0	
供給停止後の地中の	
供給停止後の地中の	
・供給停止後の地中の	
n供給停止後の地中の	
in供給停止後の地中の	
nin 供給停止後の地中の	
min 供給停止後の地中の	
/min供給停止後の地中の	
Jmin 供給停止後の地中の	
1./min 供給停止後の地中の	
I/min供給停止後の地中の	
4 I./min 供給停止後の地中の	
54 I./min 供給停止後の地中の	
541/min 供給停止後の地中の	
、54 L/min 供給停止後の地中の	
5.54 L/min 供給停止後の地中の	
5.54 L/min 供給停止後の地中の	
₹2.54 1/min 供給停止後の地中の	
■ 5.54 L/min 供給停止後の地中0	
'量5.54 L/min 供給停止後の地中の	
位量 5.54 1./min 供給停止後の地中∂	
流量 5.54 I./min 供給停止後の地中∂	
·流量 2.54 1/min 供給停止後の地中の	
合流量 5.54 L/min 供給停止後の地中 0	
給流量 5.54 I./min 供給停止後の地中∂	
:給流量 5.54 L/min 供給停止後の地中の	
#給流量 5.54 Ⅰ./min 供給停止後の地中の	
供給流量 5.54 L/min 供給停止後の地中の	
供給流量5.541/min供給停止後の地中0	
供給流量 2.54 L/min 供給停止後の地中の	
供給流量5.54 L/min 供給停止後の地中の	
2 供給流量 2.54 L/min 供給停止後の地中の	
2 供給流量 5.54 L/min 供給停止後の地中0	
2 供給流量 5.54 L/min 供給停止後の地中の	
II-2 供給流量 5.54 L/min 供給停止後の地中の	
Ⅲ-2 供給流量5.541/min 供給停止後の地中0	
■11-5 供給流量 5.54 L/min 供給停止後の地中の	
専Ⅲ-5 供給流量 5.54 L/min 供給停止後の地中の	
表Ⅲ-5 供給流量 2.54 L/min 供給停止後の地中の	

時間									7.	火素ガス	濃度[%]									
[h]	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
1	57.8	66.1	63.5	71.1	69.0	67.7	50.0	37.9	29.2	19.5	14.5	12.5		8.5	76.9	48.4	52.9	37.7	45.3	33.0
3	52.3	57.5	54.0	60.5	58.0	55.5	41.9	33.2	27.3	19.1	14.8	13.1		9.1	64.2	45.4	45.5	35.8	38.5	31.4
5	47.4	50.4	46.3	51.3	48.8	46.3	35.3	29.3	25.3	18.5	14.8	13.4		9.5	55.9	42.7	39.4	33.7	33.2	29.6
10	37.1	37.8	33.7	36.5	34.5	32.8	26.1	22.9	21.3	16.6	14.1	13.4		10.0	42.8	36.7	29.4	28.6	24.9	25.4
20	23.6	23.7	21.0	22.6	21.5	20.8	17.1	16.2	16.1	13.5	12.1	12.2		9.4	28.4	27.0	19.3	22.2	16.7	19.0
30	15.8	16.0	14.3	15.5	14.9	14.7	12.6	12.2	12.6	10.9	10.1	10.4		8.0	20.1	20.1	13.6	16.2	12.1	14.3
40	11.1	11.3	10.2	11.2	10.8	10.8	9.5	9.4	9.9	8.8	8.2	8.5		6.6	14.7	15.0	10.0	11.7	9.0	10.9
50	8.0	8.2	7.5	8.2	8.0	8.0	7.1	7.3	7.8	6.9	6.5	6.9		5.3	10.9	11.3	7.4	8.7	6.7	8.3
70	4.6	4.8	4.4	4.8	4.7	4.7	4.0	4.5	4.9	4.4	4.3	4.6		3.5	6.2	6.6	4.4	5.0	4.1	5.1
80	3.5	3.7	3.4	3.7	3.6	3.6	2.7	3.4	3.8	3.5	3.3	3.6		2.7	4.6	5.0	3.4	3.7	3.1	3.9
90	2.9	3.0	2.7	3.0	2.9	2.9	1.5	2.8	3.1	2.9	2.8	3.1		2.2	3.6	3.8	2.8	2.9	2.6	3.2

供給流量 5.54 L/min 供給停止後の地中の水素濃度計測値(水素放出点 A、計測点 41~60) 表Ш-3
	20	90.9	73.5	60.7	40.5	22.2	14.2	9.9	7.3	5.5	4.3	3.5	2.9
	19	90.4	73.5	60.8	40.8	22.8	14.9	10.5	7.8	6.0	4.7	3.9	3.2
	18	78.4	65.4	55.1	38.0	21.7	14.3	10.2	7.6	5.9	4.6	3.8	3.1
	17	70.3	59.9	51.4	36.5	21.3	14.2	10.2	7.6	5.9	4.6	3.8	3.1
	16	59.8	52.5	46.2	34.4	21.0	14.2	10.3	7.7	6.0	4.7	3.8	3.2
	15	41.8	38.7	35.7	28.9	19.4	13.8	10.2	7.8	6.1	4.8	4.0	3.3
	14	25.6	25.1	24.2	21.6	16.3	12.3	9.4	7.3	5.7	4.5	3.7	3.0
	13	19.7	19.8	19.7	18.5	15.1	12.0	9.6	7.6	6.1	4.9	4.1	3.3
	12	14.9	15.5	15.8	15.8	14.0	11.6	9.4	7.6	6.1	4.8	4.0	3.3
農度[%]	11	10.7	11.5	12.1	12.8	12.3	10.7	8.9	7.3	5.9	4.7	3.9	3.2
ヾ素ガス}	10	6.9	7.7	8.4	9.6	10.2	9.3	8.0	6.6	5.4	4.2	3.5	2.8
Л	6	5.1	5.8	6.5	7.9	9.1	8.7	7.7	6.4	5.3	4.2	3.5	2.8
	8	3.9	4.7	5.3	6.8	8.3	8.3	7.4	6.3	5.2	4.2	3.5	2.9
	7	3.3	4.0	4.7	6.1	7.8	7.9	7.2	6.2	5.1	4.2	3.5	2.8
	9	88.0	70.9	58.8	39.9	22.3	14.3	9.9	7.2	5.5	4.2	3.5	2.8
	5	87.9	71.3	59.1	39.9	22.2	14.2	9.9	7.2	5.5	4.2	3.5	2.8
	4	61.9	54.2	47.8	35.5	21.7	14.6	10.5	7.8	6.0	4.7	3.9	3.2
	3	24.7	24.2	23.4	20.8	15.6	11.7	9.0	6.9	5.4	4.3	3.5	2.8
	2	3.8	4.5	5.1	6.4	7.5	7.2	6.2	5.1	4.1	3.2	2.6	2.1
	Ч	2.5	3.1	3.8	5.1	6.6	6.8	6.1	5.2	4.3	3.4	2.8	2.3
時間	[h]	1	3	ŋ	10	20	30	40	50	60	70	80	90

<b>+</b> 測点 1~20)
水素放出点C、副
水素濃度計測值(
給停止後の地中の
t給流量 5.54 L/min 供
表Ш-4 (

	40	3.3	3.7	4.0	4.7	5.5	5.5	4.9	4.2	3.5	2.9	2.4	2.1
	39	89.5	71.8	58.5	38.4	21.1	13.7	9.6	7.1	5.5	4.3	3.5	2.9
	38	92.6	74.0	60.0	39.4	21.6	13.9	9.7	7.1	5.4	4.2	3.4	2.8
	37	92.6	74.8	61.0	40.0	21.8	14.0	9.8	7.3	5.6	4.4	3.6	2.9
	36	82.7	68.4	56.9	38.5	21.6	14.1	10.0	7.4	5.7	4.5	3.7	3.0
	35	73.6	62.3	52.9	37.1	21.4	14.1	10.1	7.5	5.8	4.6	3.7	3.1
	34	60.2	52.5	45.9	33.7	20.6	14.0	10.2	7.7	6.0	4.7	3.9	3.2
	33	39.8	36.7	33.8	27.3	18.4	13.1	9.7	7.5	5.8	4.6	3.8	3.1
	32	24.2	23.6	22.7	20.1	15.0	11.3	8.6	6.7	5.3	4.1	3.4	2.8
★素ガス濃度[%]	31	19.0	19.0	18.8	17.7	14.4	11.4	9.0	7.2	5.8	4.6	3.8	3.2
	30	13.2	13.7	13.9	13.9	12.2	10.1	8.2	6.6	5.3	4.3	3.6	2.9
7,	29	10.0	10.6	11.1	11.7	11.3	9.9	8.3	6.8	5.6	4.5	3.8	3.1
	28	7.1	7.8	8.5	9.6	10.0	9.1	7.8	6.5	5.3	4.3	3.5	2.9
	27	4.2	4.9	5.5	6.7	7.7	7.3	6.4	5.3	4.3	3.4	2.8	2.3
	26	3.7	4.4	5.0	6.4	7.8	7.8	6.9	5.9	4.9	3.9	3.3	2.6
	25	3.1	3.8	4.4	5.6	7.1	7.2	6.5	5.6	4.7	3.8	3.2	2.6
	24	16.0	16.3	16.4	15.9	13.4	10.8	8.7	6.9	5.6	4.4	3.7	3.0
	23	11.4	12.0	12.4	12.7	11.6	9.9	8.2	6.7	5.4	4.3	3.6	3.0
	22	8.3	9.0	9.6	10.5	10.5	9.4	8.0	6.6	5.4	4.4	3.7	3.0
	21	84.6	69.0	57.6	39.1	22.0	14.3	10.1	7.4	5.7	4.4	3.6	3.0
睛铜	[h]	1	3	ъ	10	20	30	40	50	60	70	80	90

(0)
Ž
21
長
「剣
11111
Ú
屯
Ë
表法
ま 水
· · ·
画
干通
吏
濃
素
7
Ŧ
払
З С
H گ
鈩
に約
۲ ج
mii
Ľ
54
副
給汤
蛍
ي د
Ē
表

	60	9.2	9.8	10.3	11.0	10.5	9.0	7.4	6.0	4.9	3.9	3.3	2.8
	59	9.5	9.9	10.1	10.2	9.0	7.5	6.2	5.0	4.1	3.3	2.7	2.3
	58	7.3	8.0	8.6	9.6	9.6	8.6	7.2	6.1	4.7	3.8	3.4	2.6
	57	7.7	8.2	8.6	9.1	8.7	7.5	6.3	5.2	4.3	3.4	2.8	2.4
	56	9.3	10.3	11.1	12.4	12.6	11.2	9.3	7.5	6.1	4.8	4.0	3.2
	55	10.7	11.5	12.1	12.8	12.3	10.6	8.8	7.1	5.7	4.5	3.7	3.0
	54	74.9	55.9	43.7	27.6	14.7	9.4	6.6	4.9	3.8	3.0	2.4	2.1
	53	,	,										
	52	84.2	64.8	50.9	32.3	17.3	11.2	7.9	5.9	4.8	3.5	2.9	2.5
<素ガス濃度[%]	51	70.8	56.2	45.4	29.8	16.5	10.8	7.7	5.8	4.5	3.6	2.9	2.5
	50	61.0	50.3	42.0	28.9	16.8	11.2	8.1	6.1	4.8	3.7	3.1	2.6
7.	49	53.3	45.9	39.7	29.0	17.5	11.9	8.6	6.5	5.1	4.0	3.3	2.7
	48	30.3	27.9	25.6	20.8	14.0	10.0	7.5	5.8	4.6	3.6	3.0	2.5
	47	18.9	18.2	17.6	15.7	11.9	9.1	6.9	5.3	4.2	3.1	2.4	2.2
	46	15.0	15.1	15.0	14.2	11.6	9.2	7.3	5.8	4.6	3.7	3.0	2.5
	45	10.7	11.2	11.4	11.4	10.1	8.4	6.9	5.6	4.5	3.6	3.0	2.5
	44	7.9	8.5	8.9	9.5	9.1	8.0	6.7	5.5	4.5	3.6	3.0	2.5
	43	5.7	6.3	6.7	7.4	7.6	6.9	6.0	5.0	4.1	3.3	2.8	2.3
	42	4.8	5.4	5.9	6.8	7.5	7.1	6.3	5.3	4.4	3.5	2.9	2.5
	41	3.7	4.2	4.7	5.7	6.7	6.6	5.9	5.0	4.2	3.4	2.9	2.4
時間	[h]	1	3	ъ	10	20	30	40	50	60	70	80	90

$\sim$	`
$\sim$	١
$\sim$	:
9	)
1	
(	,
	1
	1
4	
1=	2
-113	
_	;
Ē	ć
1	`
+	
1111	1
	1
7	)
<u> </u>	
1	,
-413	
	•
1	I
1	1
12	'
Ť	;
1	Ś
ЩŴ	<u></u>
Π	١
V	•
Ŕ	,
<u>`</u> `	2
$\sim$	
100	1
ŢШ	•
-	
Ē	ł
1	<u>&gt;</u>
4	
1111	Ť
11	ļ
-14-15	Į
<u><u></u>#r</u>	)
	)
して見ていて	)
17	1
_11K/	1
TM	١
- 0	•
~	,
1	•
6	١
6	
6	
6	\
€ ⊕	
本中の	) 1
地中の	) 
い地中の	) 
の妻中の	
の地中の	
後の掛中の	
後の独中の	
ト後の独中の	
止後の独中の	
1 一後の地中の	
専止後の地中の	
停止後の地中の	
合停止後の地中の	
給停止後の地中の	
は給停止後の批中の	
世給停止後の地中の	
供給停止後の地中の	
・供給停止後の独中の	
in供給停止後の地中の	
uin 供給停止後の批中の	
min 供給停止後の抽中の	
/min 供給停止後の地中の	
./min 供給停止後の抽中の	
I/min 供給停止後の抽中の	
i I./min 供給停止後の抽中の	
4 I /min 供給停止後の地中の	
54 I./min 供給停止後の地中の	
54 I /min 供給停止後の地中の	
5.54.1./min 供給停止後の地中の	
5.54 1/min 供給停止後の地中の	
₹5.54 L/min 供給停止後の掛中の	
量 5.54 L/min 供給停止後の抽中の	
○書5541/min供給停止後の地中の	
荒量 2.54 1/min 供給停止後の地中の	
流量 2 24 1/min 供給停止後の地中の	
⇒流量5541/min供給停止後の地中の	
絵流量 5.54 1./min 供給停止後の地中の	
:絵流量 5.54 L/min 供給停止後の地中の	
共給流量 5.54 L/min 供給停止後の地中の	
供給流量 2.54 I./min 供給停止後の地中の	
供給流量 5.54 L/min 供給停止後の地中の	
供給流量 5.54 L/min 供給停止後の地中の	
3 供給流量 5.54 I/min 供給停止後の掛中の	
·6 供給流量 5.54 L/min 供給停止後の妝中の	
1-6 供給流量 2 24 1/min 供給停止後の掛中の	
Ⅱ-6 供給流量5.54 I/min 供給停止後の妝中の	
- III-6 供給流量 5.54 I / min 供給停止後の地中の	
€Ⅲ-6 供給流量 5.54 I./min 供給停止後の批中の	
表Ⅲ-6 供給流量 2 24 1/min 供給停止後の地中の	
表Ⅲ-6 供給流量 2.54 I/min 供給停止後の地中の	

図 No.	供給流量	水素放出点	経過時間		
Ⅲ-1			$0~{ m min}{\sim}5~{ m h}$		
Ⅲ-2		А	10~40 h		
Ш-3	5.54 L/min		50~90 h		
Ш-4		C	0 min∼30 h		
Ⅲ-5		C	40~90 h		

表Ⅲ-(2) 図番号と試験条件一覧表













