平成27年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査 (配管における水素置換挙動調査)

調查報告書

平成28年3月

株式会社四国総合研究所

目 次

1.		調査の	の概要 ······	$\cdots 1$
	1.1	事美	巻目的 ·········	1
	1.2	事美	美内容	1
	1.3	実別		1
	1.4	実加	塩体制及びスケジュール	2
2		調査	方法	4
	2.1	調金	を対象と試験条件 ·····	4
	2.2	ガン	ス可視化・濃度計測手法	7
	2.	.2.1	計測原理	7
	2.	.2.2	ガス可視化・濃度計測装置の構成	10
	2.	2.3	ガス濃度の定量化	14
	2.3	模撛	疑配管の構造と管内ガス制御	$\cdots 17$
	2.	.3.1	模擬配管の構造	17
	2.	3.2	管内ガスと計測のタイミング制御	31
	2.4	配管	管内ガス置換挙動のシミュレーション解析	35
3		試験網	結果	37
	3.1	流和	nを伴わない場合の境界におけるガス挙動の可視化 ·····	37
	3.	.1.1	窒素との境界層における水素ガスの挙動	37
	3.	.1.2	窒素との境界層における酸素ガスの挙動	39
	3.2	要素	素配管におけるガス置換挙動の可視化	41
	3.	2.1	縮拡径管におけるガス置換挙動の可視化	41
	3.	.2.2	L 字管におけるガス置換挙動の可視化	43
	3.	.2.3	下向き流れにおけるガス置換挙動の可視化	49
	3.3	複合	合配管内ガス置換挙動の可視化	·····53
	3.	.3.1	主管方向流れにおけるガス置換挙動の可視化	····53
	3.	.3.2	枝管方向流れにおけるガス置換挙動の可視化	57
	3.4	まと	<u>'</u> b	60
4			ュレーション解析と再現性の評価	
	4.1		斤方法と解析条件	
	4.	.1.1	直管内におけるガス置換挙動のシミュレーション解析	62
	4.	1.2	縮拡径管内におけるガス置換挙動のシミュレーション解析	65

4.1.3	L 字管内におけるガス置換挙動のシミュレーション解析 $\cdots \cdots 65$	
4.2 複	合配管内におけるガス置換挙動のシミュレーション解析68	
4.2.1	主管方向流れ68	
4.2.2	枝管方向流れ70	
4.3 再	現性の評価72	
4.4 ま	とめ75	
	内ガス置換挙動の評価77	
5.1 評价	価 方法 ·······77	
5.2 流流	れを伴わない場合における水素混合層の発達挙動78	
5.2.1	重力方向に沿い界面が形成された場合における水素混合層の挙動78	
5.2.2	重力方向を法線として界面が形成された場合における水素混合層の挙動 …81	
5.3 流流	れを伴う場合における流れ方向の水素混合層の発達挙動84	
5.3.1	直管内流れにおける混合層長の見積り86	
5.3.2	曲管内流れにおける混合層長の見積り89	
5.4 流流	れを伴う場合における分岐(閉止)方向の混合層発達挙動91	
5.4.1	水平方向が閉止されている場合91	
5.4.2	鉛直方向が閉止されている場合93	
5.5 シ	ミュレーション解析による集合配管の置換挙動評価95	
5.5.1	集合配管モデルの設定95	
5.5.2	解析条件及び解析モデル97	
5.5.3	解析結果99	
5.6 ま	とめ102	
6. 総括	104	
	106	
付録 I	実験結果一覧 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
付録Ⅱ	シミュレーション解析結果一覧142	
付録Ⅲ	集合配管における水素置換挙動のシミュレーション解析結果157	
付録IV	実験装置外観168	

1. 調査の概要

1.1 事業目的

一般需要家向けの水素パイプライン供給に際して、保安確保のために必要となる導管等のガス工作物について、そのネットワークとしての運用に係る安全基準や配管の設置・維持管理方法等の具体的措置を明確化するため、これに有用な基盤技術、知見を整理し、当該調査の成果を将来的にガス事業法の技術基準等の見直しに反映させることで、水素ネットワーク社会構築における保安確保を図ることを目的とする。

1.2 事業内容

一般集合建物内へ水素配管供給を想定した際のガス開通作業時において、配管内で水素と空気の混合をさせずに安全に置換作業を行える条件や、気体挿入口の取付け位置等配管の構造の検証を行うため、試験用模擬配管を用いて、不活性ガスを介して空気から水素へ置換する際の管内挙動(濃度分布)について調査を実施する。また、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、試験結果との比較検証を実施する。

1.3 実施方法

- (1) 水素置換挙動調査試験
 - ① 都市ガスの供給に使用されている建物内配管を想定し、口径 32A 管相当の直管、L字曲管、T字分岐管及び、口径 32A 相当から口径 20A 相当へ変換する縮拡径管の各形態について、光学的手法を用いた配管内における水素濃度分布の確認を行うための石英製模擬配管を製作した。これらを用いて、不活性ガス(本調査では窒素ガスとした)を介して配管内のガスを空気から水素に置換させた場合における管内挙動状況を、水素及び酸素濃度分布の経時変化を計測することによって確認した。各配管形態について、流速条件として Re 数(水素)100、200 を含む 2 パターン以上、配管の配置方向として水平、鉛直など複数パターン変化させ試験を実施した。
 - ② 32A 直管及び 32AT 字管それぞれにおける鉛直下向き方向の水素挙動を確認した。 確認に際し、流速条件 Re 数(水素)100、200 を含む 2 パターン以上変化させて試験 を実施した。

これらの管内挙動の確認方法については、管内全体の濃度分布が把握できる手法として、レーザラマン分光法に基づくガス可視化・濃度分布計測技術を用いた。これにより、それぞれの条件下における管内ガス挙動等の確認を行うと共に、直管の水平方向をはじめとする各試験結果に基づき、混合気体が形成されない条件や、流速との関連性等について調査を行った。

- (2) シミュレーションによる比較検証
 - (1)の試験における濃度変化をシミュレーションにより再現し、比較検討を行うと共

に、流速条件を変化させた場合における拡散挙動の確認を行った。あわせて平成 26 年度事業において行った試験結果及び本年度事業成果を組み合わせた条件として、複合配管等の条件についてシミュレーションを実施して管内水素挙動の把握を行った。

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。

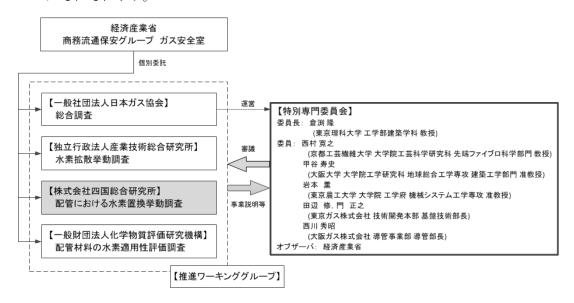


図 1-4-1 事業実施体制

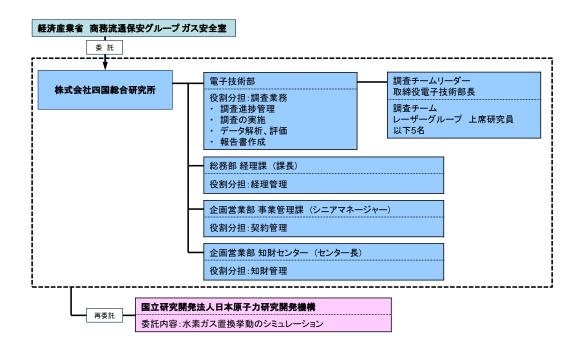


図 1-4-2 調査実施体制

本事業の遂行にあたっては、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、コメント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。

本調査は、当社を主体として、水素ガス置換挙動のシミュレーション解析について国立 研究開発法人日本原子力研究開発機構への再委託とする体制の下実施した。

平成27年度 実施項目 開始 終了 6月 7月 8月 9月 10月 11月 12月 1月 2月 3月 大分類 中分類 (1) 制御系の設計 H27.7 模擬配管の製作 配管部品購入 (2) H27.8 H27.9 ガス制御機能確認 (3) H27.10 H27.10 装置設計 H27.7 H27.8 2 ガス濃度分布計測装置の製作 (2) 部品購入 H27.8 H27.9 (3) 濃度計測機能確認 H27.9 H27.10 (1) 測定条件の検討 H27.7 H27.9 3 配管内水素濃度分布の計測 (2) 配管内ガス濃度計測 H28.2 H27.10 シミュレーション条件検討 H27.10 (1) H27.8 H28.1 4 シミュレーションによる比較検証 要素条件の解析 H27.11 複合条件の解析 (3) H27.12 H28.2 5 配管における水素置換挙動の解析・評価 (1) データ解析.評価 H27.12 H28.2 委員会 7/21 11/19 2/16 総合調査受託者との会議 2/2, 28 報告書作成 H28.2 H28.3.16

表 1-4-1 実施スケジュール

2. 調査方法

2.1 調査対象と試験条件

本調査において、総合調査受託者やガス事業者との協議に基づき設定した集合住宅への水素配管供給を行うための内管モデルを図 2-1-1 に示す。

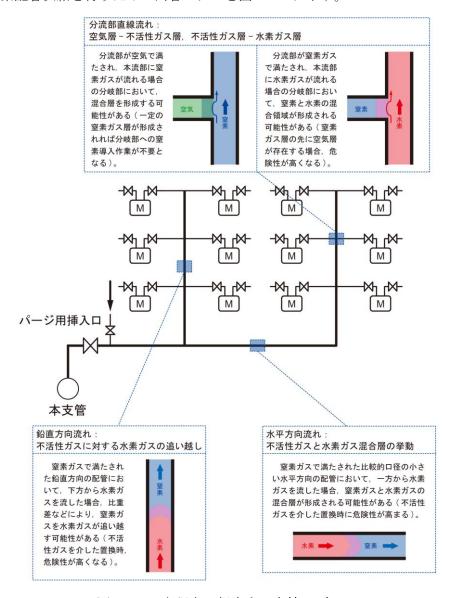


図 2-1-1 本調査で想定する内管モデル

同図中に置換作業に伴う管内におけるガスの挙動について、水素ガスを用いることによって生じる特異現象等から予測される懸念事項の一例を示したが、管内におけるガス置換挙動を明らかにすることによって、このように予測されている、或いは予測されていない未知のリスクを回避し、安全な置換作業を検討するための指標とすることができる。

図 2-1-2 に内管モデルをより具体的に再現し、これを構成する配管の要素形態を抽出した内管モデルの要素配管構成を示す。

図 2-1-2 内管モデルの要素配管構成

図 2-1-2 において、点線枠で囲まれた要素形態における管内ガス挙動を明らかにすることにより、様々な要素形態の組み合わせからなる内管全体についてガス置換挙動を把握することができる。本事業ではこれまでに、図 2-1-2 における黒点線枠で示された要素形態について、調査が実施されている。したがって、本調査では赤点線枠で示した

- ① 縮拡径管(水平配置)
- ② 縮拡径管(鉛直配置)
- ③ L字管(水平→鉛直配置)
- ④ L字管(鉛直→水平配置)
- ⑤ L字管(水平→水平配置)

の各要素形態について管内ガス置換挙動を明らかにする。これにより、内管モデルを 構成する全ての要素形態における調査が完了する。また、これまでの調査において、 水素ガスの挙動にとりわけ重力の効果による特異現象が散見されていることに照ら し、別途

⑥ 直管(鉛直配置、下向き流れ)

⑦ T字管(主管鉛直・枝管水平配置、主管下向き流れ)

について調査を実施する。

また、これらの要素配管形態を組み合わせたより実用に近い形態の配管構造として

⑧ 複合配管

直管水平配置、曲管、直管鉛直配置、分岐管を含む複合構造にお ける分岐部の置換挙動

についても調査を行う。

これらの配管形態について、以下の基本方針に基づき、配管条件と流速条件等を設定した。

- ・ 窒素ガスから水素ガスへの置換挙動と空気から窒素ガスへの置換挙動を 個別に観測する。
- 配管口径については、32A 相当をベースとし、異径管については 32A 相当から 20A 相当への変換とする。
- ・ 流速条件は、各配管条件において層流域の流速 2 パターンとして Re100 及び 200 を設定し、導入初期の置換挙動を中心に基礎的なデータを蓄積する。加えて適宜、移流を伴わない場合におけるガスの挙動として、流速 0 の条件を実施する。
- · 温度条件は室温(20°C、一定)とする。

以上を整理し、委員会におけるコメント、総合調査受託者やガス事業者との協議に基づき設定した、本調査における配管条件を表 2-1-1 に、流速条件を表 2-1-2 にそれぞれ示す。なお、空気から窒素への置換挙動においては、窒素の流速を水素 Re 数 100 及び 200 の条件に一致させるため、窒素 Re 数はそれぞれ約 700 及び 1400 となる。

表 2-1-1 配管条件

※No.は図 2-1-2 の各形態に対応

No.	配管形態	流れ方向	初期状態	導入ガス	管径	模式図
1	縮拡径管	水平	窒素	水素		
	水平配置	水平	空気(酸素)	窒素	32A	
	縮拡径管	鉛直	窒素	水素	↓ 20A	•
2	鉛直配置	上方	空気(酸素)	窒素		
	L 字管	水平	窒素	水素	22.4	重力
3	水平→鉛直配置	↓ 鉛直上方	空気(酸素)	窒素	32A	

	L字管	鉛直上方	窒素	水素	± ±
4	鉛直→水平配置	→ 水平	空気(酸素)	窒素	重力
5	L字管	水平	窒素	水素	重力
3)	水平→水平配置	水平	空気(酸素)	窒素	⊗
6	直管鉛直配置	鉛直下方	窒素	水素	
7	T 字管 主管鉛直 枝管水平配置	主管 鉛直下方	窒素	水素	<u> </u>
	複合配管	主管	窒素	水素	†
	直管水平配置	鉛直上方	空気(酸素)	窒素	
8	L 字管、T 字管 直管鉛直配置	枝管	窒素	水素	
	(観測箇所:分岐部)	水平	空気(酸素)	窒素	

表 2-1-2 流速条件

配管口径	水素レイノルズ数	流量	流速
田田田田	$\mathrm{Re}_{\mathrm{H2}}$	Q[L/min]	u[m/s]
	100	16.7	0.30
32A	200	33.4	0.60
	0	0	0

2.2 ガス可視化・濃度計測手法

2.2.1 計測原理

本調査では、管内の空間的なガス濃度分布が把握できる手法を用いて、配管内部におけるガスの置換挙動を明らかにする。

ガス濃度計測において、一般的には、熱線型半導体式、接触燃焼式等のガスセンサが用いられる場合が多い。これらは主に、センサ素子に対象成分が直接接触することに伴う素子の物性変化を捉えガス濃度を計測するものであるため、1個のセンサは配置された1点のみにおけるガス濃度を計測する。したがって空間的なガス濃度

分布を捉えるためには、配管構造の内部にセンサを複数個配置する必要があり、気体がセンサ構造体へ接触することによって、観測する流れの状態に影響を及ぼす可能性がある。

一方、レーザ光を用いた光学的計測技術には非接触でガスの流れを可視化する手法がある。これらは、ガス分子による散乱光や蛍光等を捉えるものであり、流れの状態に影響を及ぼすことはない。表 2-2-1 に、光学的に流れを可視化する代表的な手法を挙げる。

次 2 2 1 元 中国 (大元 1 大元				
計測手法・原理		対象物理量	特徵	
シャドウグラフ法		温度・圧力	装置構成が容易 密度変化の輪郭の可視化	
レーザ誘起蛍光法:		温度・濃度	低濃度計測が可能	
LIF(Laser Induced I	Fluorescence)	血及 • 	衝突失活の影響がある	
レーザドップラ流速測定法:		流速	流速の二次元分布測定が可能	
LDV(Laser Doppler Velocimeter)		piaze.	NWT	
粒子画像流速測定法(粒子画像流速測定法(ミー散乱):		微小粒子の混合技術が必要	
PIV(Particle Image	Velocimetry)	流速	粒子混合による影響がある	
レイリー散乱		温度・濃度	雰囲気ガス分子の影響がある	
レイリー飲品		血及 • 	ミー散乱の影響がある	
	ストークス	温度・濃度	分子種の特定が可能	
三一、批打	ストークス	● 人	信号が微弱	
ラマン散乱	アンチスト	泪 产 . 满产	S/N 比が大きい	
	ークス	温度・濃度	観測領域に制限がある	

表 2-2-1 光学計測によるガス流の可視化手法

本調査においては2成分のガス混合状態を評価する必要があり、

- ① 物理量としてガス濃度が計測できる
- ② 水素ガスと窒素ガスおよび窒素ガスと酸素ガスの濃度が分離して計測できる機能が要求される。このため本調査では、ガス分子のラマン散乱光を捉えるレーザラマン分光法を用いて流れの可視化及び空間濃度分布計測を行った。本手法は、レーザ光照射部及び観測部が光学的に透明であれば、配管等の構造体内部の観測が可能であるため、本調査における計測用配管系のレーザ光導入部に石英窓を配置し、観測部模擬配管の材質を石英とすることにより、配管系の外部から管内のガス挙動を可視化することができる。

本計測手法の原理となるラマン散乱の概念を図 2-2-1 に示す。

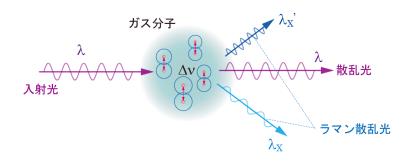


図 2-2-1 ラマン散乱の概念

ラマン散乱は分子による光の非弾性散乱の一種であり、入射光のエネルギが分子の内部エネルギに奪われることによって、入射した光の波長と異なった波長の光が散乱する現象である。内部エネルギは分子種ごとに固有の値を有し、したがって、ある特定波長の光の入射に伴い、分子種毎に異なった波長の光が散乱される。ガス検知においては、一般的に分子の振動エネルギ Δ Eに対応するラマンシフト Δ v= Δ E/h (h:プランク定数)に応じて、入射光波長 λ に対して長波長側に発生する1次ストークス光を利用する。表 2-2-2 に本調査において配管系内に存在する水素、窒素、酸素のラマン散乱に関する各種パラメータを、図 2-2-2 に水素、窒素、酸素のラマン散乱スペクトル例をそれぞれ示す。

表 2-2-2、図 2-2-2 に示すように、ラマン散乱光は入射レーザ光波長(355nm)に対して分子ごとに 10nm 以上離れた波長に生じる。このため、それぞれのガス種のラマン散乱光波長にあった光学バンドパスフィルタを用いて観測すれば、3 種のガスを分離して検出することができる。

また、ストークス光強度は分子密度に比例するため、検出されたラマン散乱光の輝度から分子密度を計測することができる。一般に、気体のラマン散乱光強度は極めて微弱であるが、水素及び酸素は比較的強いラマン効果を示す分子種である。

表 2-2-2	ラマン効果に関す	る水素、	窒素、	酸素の各種パラメー	ータ
---------	----------	------	-----	-----------	----

分子種	ラマンシフト	ラマン散乱波長	ラマン散乱断面積比
X	Δν[cm ⁻¹]	$\lambda_{\rm X}[{ m nm}]$	(窒素:1)
水素(H ₂)	4160	416.5	2.49
窒素(N2)	2331	387.0	1
酸素(O2)	1556	375.8	0.94

※ラマン散乱波長は入射波長λ=355nm とした場合

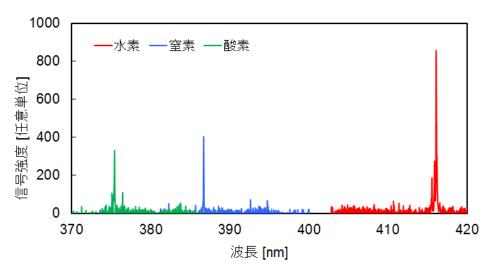


図 2-2-2 同じ密度の水素、窒素、酸素のラマンスペクトル例

2.2.2 ガス可視化・濃度計測装置の構成

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、配管内におけるガスの挙動を可視化する。図 2-2-3 に本調査に用いるガス可視化・濃度分布計測装置の構成を、表 2-2-3 に構成機器の仕様をそれぞれ示す。

光源に Nd:YAG レーザ第 3 高調波(波長 355nm)を用い、シート状にしたレーザ光を模擬配管の観測領域に照射して、配管の外部からラマン散乱光を撮像した。ラマン散乱光はレーザ照射光軸に対して直角方向から広角カメラレンズにより集光し、ICCD カメラで画像として検出した。本装置によるガスの可視化領域は、ICCD カメラの視野内にあるレーザ光照射領域である。したがって、シート光を拡大しレーザ光照射領域を広く取ることで、可視化領域が拡大することになるが、シート光の拡大はレーザ光のエネルギ密度を低下させ、これに伴いラマン散乱光強度が低下する。このように、本計測手法では可視化領域の拡大と計測の感度がトレードオフの関係となるため、観測対象に合わせ照射ビーム外形の最適化が必要である。ここでは、焦点距離 f = ・200mm のシリンドリカル平凹レンズと、f=700mm のシリンドリカル平凸レンズにより、レーザ光を 20×7mm のシート状に整形し、観測部へ照射した。従って、本装置によって一回の計測により可視化される領域は、レーザ光軸に対し鉛直方向に 20mm となり、レーザ光軸方向については ICCD カメラの視野によって決まる値となる。また、撮像面に対し垂直方向については、レーザシート光の厚み7mm の領域で生じたラマン散乱光が積算された値となる。

ラマン散乱光は極めて微弱であるため、計測の際、太陽光や照明光などの外乱光と レーザの散乱光を抑制する必要がある。また、本調査で計測する水素ガス及び大気 中の酸素ガスのラマン散乱光を窒素ガスのラマン散乱光とそれぞれ分離する必要が ある。ここでは、水素ガスについて中心波長 416.1nm、半値全幅 2.0nm、酸素ガスについて中心波長 375.4nm 半値全幅 2.0nm の光学バンドパスフィルタを使用することでガス種を選択し、ラマンエッジフィルタを用いてレーザ光の散乱光を遮断した。また、外乱光の影響を低減するために、 ICCD カメラのシャッタ開放のタイミングをレーザ光のパルス発振と同期させ、ICCD カメラの露光時間をレーザパルスと同程度の 7ns とした。ラマン散乱光は励起レーザ光の電場の振動方向に対して直角に強く放射される。したがってレーザ光の偏波面は観測面内において垂直となるよう調整した。

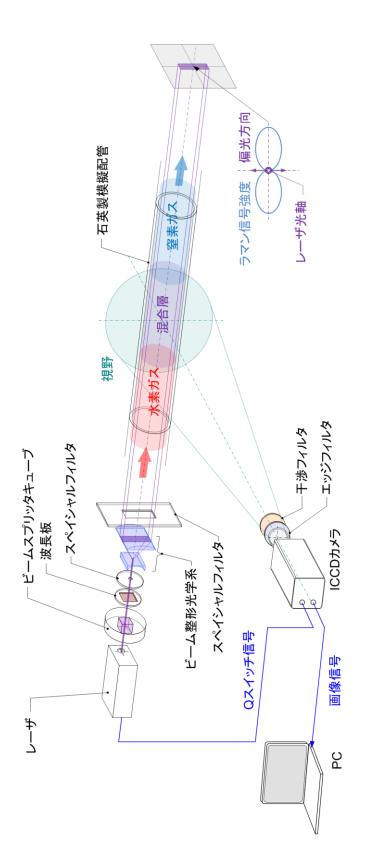


図 2-2-3 ガス可視化濃度分布計測装置の構成

表 2-2-3 ガス可視化濃度分布計測装置仕様

パルスレーザ装置			
種別	フラッシュランプ励起 Nd:YAG レーザ		
メーカ/型式	Quantel/CFR400		
波長	355 [nm]		
パルスエネルギ	80[mJ](Max)		
パルス幅	7[ns]		
ビーム外径	6.0[mm]		
ビーム拡がり角	<3.5[mrad]		
繰返し周波数	30 [Hz]		
IC	CCD 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	18mm-Gen III HBf		
分解能	16bit		
カ	メラレンズ		
メーカ/型式	Nikon/Ai Nikkor 50mm f/1.2S		
焦点距離	50 [mm]		
絞り(最大-最小)	f/1.2-f/16		
水素ガブ	ス用干渉フィルタ		
メーカ/型式	Andover/020FC06-25 4161		
透過中心波長/半値全幅	416.1[nm]/2.0[nm]		
酸素ガス	ス用干渉フィルタ		
メーカ/型式	Andover/020FC04-25 3754		
透過中心波長/半値全幅	375.4[nm]/2.0[nm]		
ラマン	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[%]		
信号処	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		

2.2.3 ガス濃度の定量化

図 2-2-3 に示す計測系において、ICCD カメラに導入されるラマン散乱光強度 P_R は、水素分子の場合の例として添字 H を付し、

$$P_{H_{ij}} = \eta_H P_{0ij} K_H G_{ij} \Delta L N_H \frac{A}{r^2} \sigma_H e^{-2 \int_0^r [\alpha_L(r') + \alpha_H(r')] dr'}$$
 (2.2.1)

で表される。ここで、

η:検出器量子効率

 P_0 : レーザ光強度

K: 受光系透過効率

G: 幾何光学的結合効率

AL: 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

T(r): 大気透過率

αL: レーザ波長消散係数

αμ: 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 CCD 検出器の単一素子の座標を示す。式(2.2.1)において、本調査では、観測領域やレーザの伝搬距離がメートルオーダ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と置くことができる。また、他のパラメータは、試験時の模擬配管と可視化装置の配置や構成部品が決まれば全て定数となる。したがって、事前に既知濃度のガスによる検量線を取得しておくことによって、計測された画像の輝度 P_{Hij} から水素分子の密度が計測され、ガス濃度を求めることができる。本調査では、事前に水素ガス100%画像及び空気100%(酸素21%)画像を取得し、検量線とすることでガス濃度を求めた。

図 2-2-4 に本装置により取得した石英管内に濃度 100%及び 4%の水素ガスまたは空気(酸素ガス 21%と想定)を充填した場合におけるラマン画像を、図 2-2-5 に同画像により取得した水素ガス及び酸素ガス濃度の検量線の一例を、それぞれ示す。

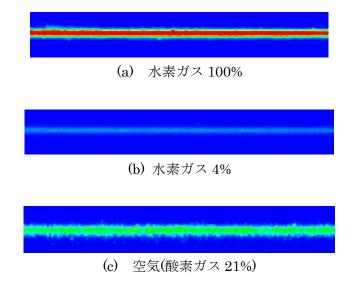


図 2-2-4 ラマン画像例

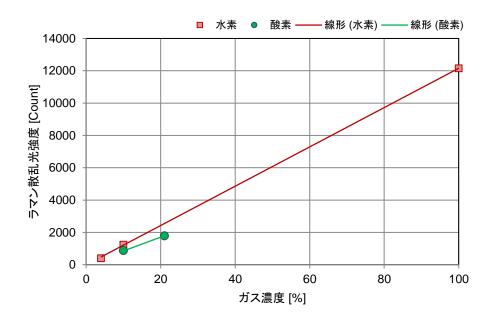


図 2-2-5 検量線例

図 2-2-5 の計測値は、図 2-2-4 に示す画像中央 5×5pixel の平均値である。水素についてみると、前述のとおりラマン散乱画像の輝度と濃度が線形の相関を示し、これはガス種に依らず共通の特性である。また、水素と酸素では、酸素の検量線の勾配が小さい。これは、ガス種ごとにラマン散乱断面積が異なるためである。このように、ガス種ごとに取得した検量線から各ガスの濃度を判定することができる。なお、本手法では、観測対象や装置構成の変化に伴い、検量線が変更される。本調査

では、配管形態の変更と共に、レーザ光と ICCD カメラの位置関係が変わるため、これに伴い検量線が変化する。したがって、試験配置及び計測条件の変更ごとに既知濃度での検量線を取得し、濃度計測に反映させた。

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、計測環境にかか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、かつラマン散乱光の空間分解能およ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。

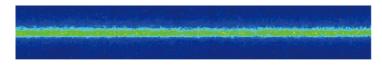
ここでは以下の手法により水素ガスの空間濃度分布を評価した。まず、I.I.による ノイズ成分を除去するために、取得画像に空間的な平滑化処理として 5×5 ガウシア ンフィルタを適用した。図 2-2-6 に用いたガウシアンフィルタのパラメータを示す。

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

図 2-2-6 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 2-2-7 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 2-2-7(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 2-2-7(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。

以上の手法を用いて、ガスのラマンイメージから濃度分布の定量化を行った。これによる本試験における濃度分布計測の性能は、検出限界(水素)0.4%、時間分解能 0.03 秒(30Hz)である。



(a) 水素ガスのラマン散乱光画像 (フィルタ前)



(b) 水素ガスのラマン散乱光画像(フィルタ後)

図 2-2-7 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

2.3 模擬配管の構造と管内ガス制御

2.3.1 模擬配管の構造

模擬配管の構造は、各試験条件に設定されたガス条件を設定するための供給系と、流れを安定させるための助走管及び各ガスのラマン散乱光挙動を撮影する石英管から成る試験系と、ガスを排出するための排気系から構成される。供給系及び排気系は全試験条件において共通のものを用い、試験系は、所定の配管条件に伴い組み替えることによって、各試験条件における模擬配管を構築した。

図 2-3-1 に本調査で用いた模擬配管全体の構成図を示す。

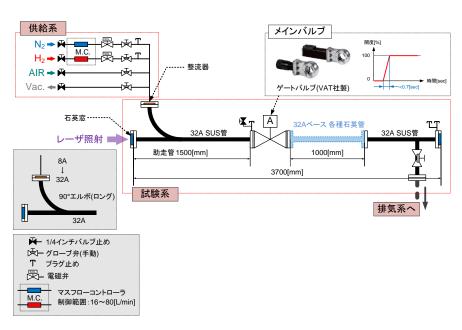


図 2-3-1 模擬配管構成図

石英部を除き、全配管系は SUS304 管により製作した。各部位はフランジ接続ま たは溶接接続によって接続されている。窒素から水素への置換の場合を例に挙げる と、供給系から導入される水素および窒素の各ガスは 8A 配管から整流器を通過し、 32 A 助走管に接続される構造となっている。ここで水素導入弁を VH、窒素導入弁 を V_Nと呼称する。V_H及び V_Nは、ガスの導入に対する計測系の精密なタイミング 制御のため電磁弁(防爆仕様)を採用した。助走管は 1500mm の延長とし、観測部へ ガスの導入を操作するメインバルブへ接続する。ここで、本調査では、試験結果に よりシミュレーション解析の再現性評価を行うため、メインバルブ開放時に界面を 崩すことなく計測を開始することが重要なポイントとなる。即ち、開閉機構と開閉 の応答速度に注目し最適なバルブを適用する必要がある。ここでは、VAT 社製ゲー トバルブをメインバルブに採用した。ゲートバルブは上下摺動によりバルブの開閉 を行う機構となっており、バルブの開放開始から完了までの時間は 0.7 秒以下であ る。また、試験における初期状態の調整に必要なガス置換操作を行うために、導入 管及び助走管に大気圧調整ラインと真空引きラインをそれぞれ設置し、また、導入 管内のガス温度、圧力及びガス濃度をモニタするためのセンサを接続した。空気か ら窒素への置換の場合、窒素導入ラインを空気導入ラインへ水素導入ラインを窒素 導入ラインに変更し、その他を同様の構造とした。

観測部は、配管内にレーザ光を照射し、ガス分子により生じるラマン散乱光を撮影するため、水素及び酸素のラマン散乱波長域において高い透過率を示し、且つレーザ光の照射に伴う蛍光が生じにくい材料として石英を選定した。本調査では、直管、縮拡径管、L字管、T字管について、配管口径 32A をベースに調査を行うため、規格に示される配管内径に対し最も近い寸法の石英標準管を選定した。また、直管以外の形態については、口径 32A 及び 20A 相当の石英管を切断、溶接することにより製作した。用いた標準石英管寸法を表 2-3-1 に、縮拡径管、L字管、T字管の寸法を図 2-3-2 から図 2-3-4 にそれぞれ示す。

表 2-3-1 石英標準管寸法

第1 65 m5 6▼	内径及び公差	ガス管規格内径
配管呼径	[mm]	[mm]
20A	21.0±1.0	21.6
30A	34.5 ± 1.5	35.7

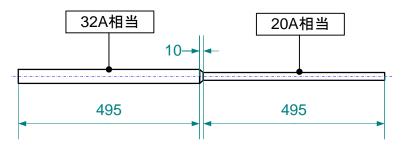


図 2-3-2 石英製縮拡径管寸法

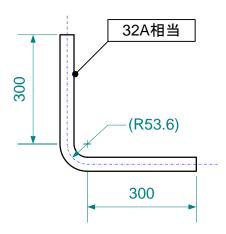


図 2-3-3 石英製 L 字管寸法

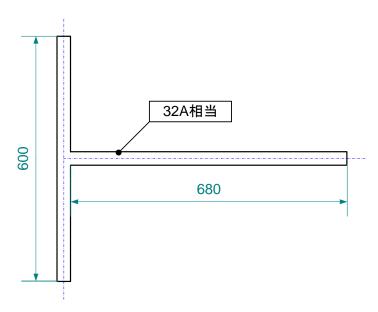


図 2-3-4 石英製 T 字管寸法

観測部下流は、フランジ接続により排気部へ結合される。排気部にはガス温度、 圧力を計測するセンサと、初期状態における観測部内のガス濃度をモニタするため のガスセンサを配置した。これらの配管系に対しレーザ光は、高反射ミラーを用い て照射光軸を調整し、各試験配置に合わせ必要な位置に配置された石英窓を介し、管内に導入した。ここに述べた基本構造に基づき本調査で製作した模擬配管(試験系)の構造とレーザ光軸との位置関係について、表 2-1-1 に示した各条件の事例を図 2-3-5 から図 2-3-13 にそれぞれ示す。なお、装置外観については、本報告書末尾の付録IVに添付する。また、模擬配管に用いたセンサー覧を表 2-3-2 に示す。

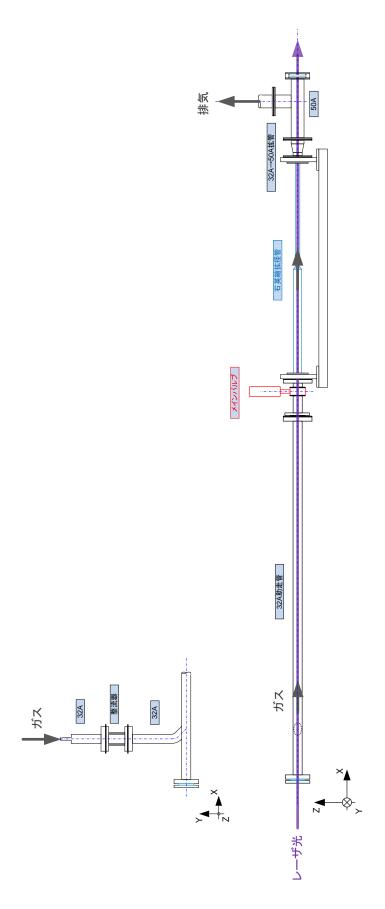


図 2-3-5 縮拡径管水平配置における試験装置構成

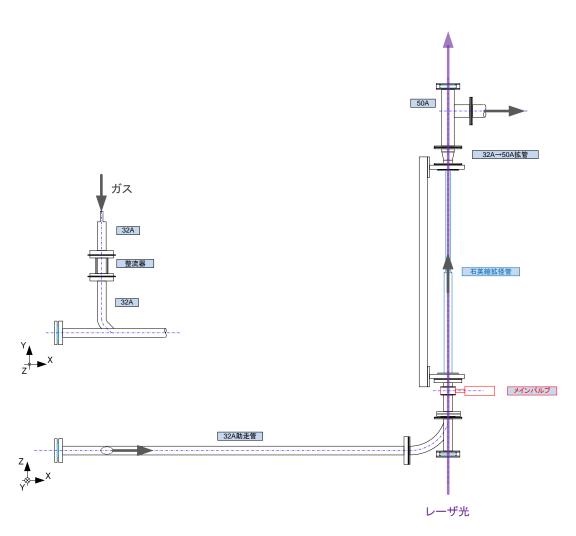


図 2-3-6 縮拡径管鉛直配置における試験装置構成

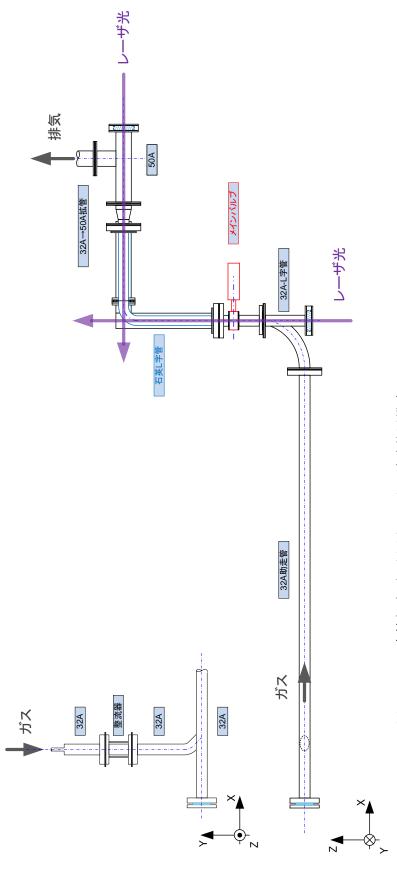


図 2-3-7 L字管鉛直-水平配置における試験装置構成

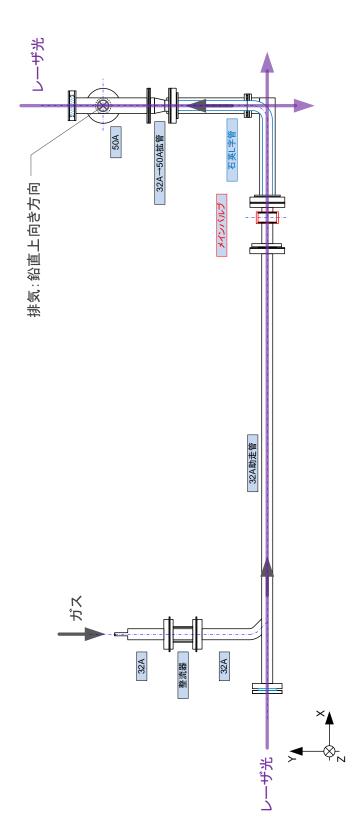


図 2-3-8 L字管水平-鉛直配置における試験装置構成

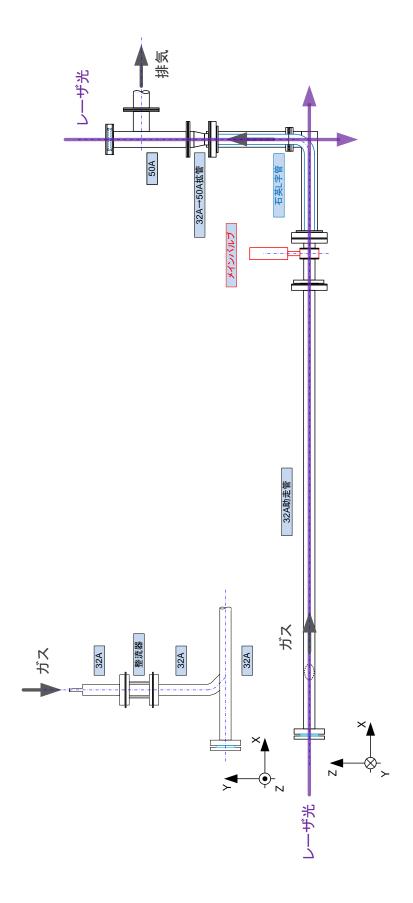


図 2-3-9 L字管水平-水平配置における試験装置構成

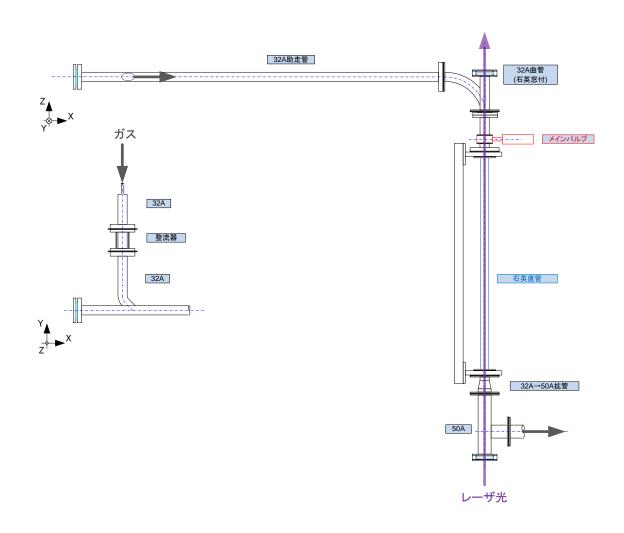


図 2-3-10 直管鉛直配置(下向き流れ)における試験装置構成

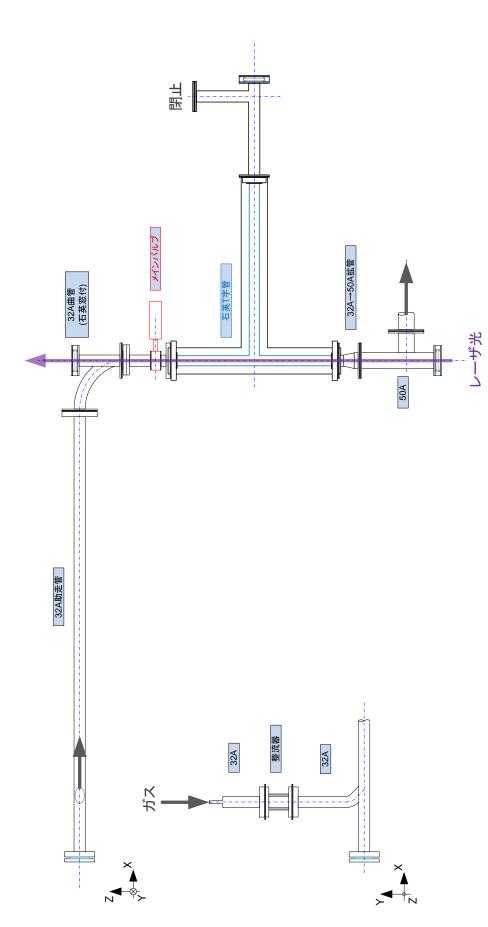


図 2-3-11 T 字分岐管下向き流れにおける試験装置構成

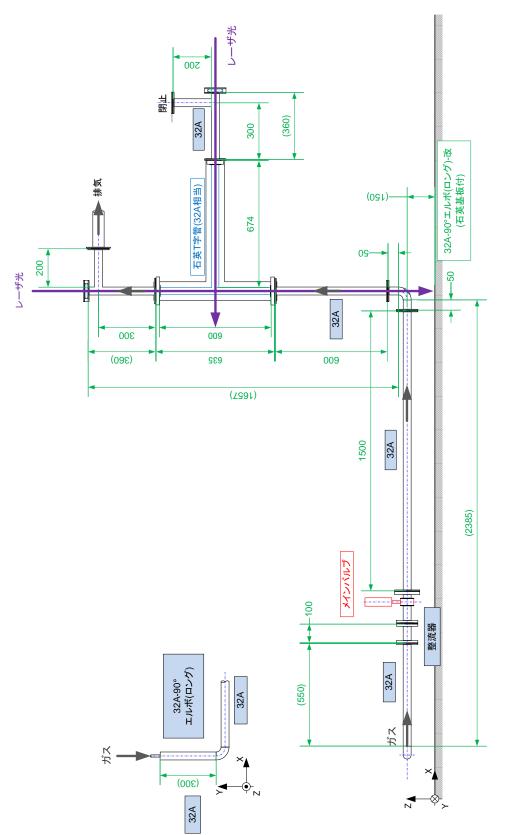


図 2-3-12 複合配管主管(鉛直)方向流れにおける試験装置構成

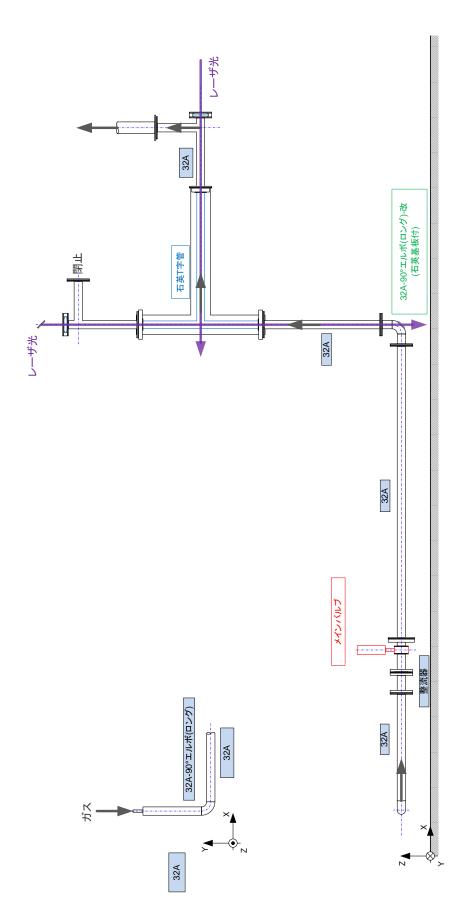


図 2-3-13 複合配管枝管(水平)方向流れにおける試験装置構成

表 2-3-2 センサー覧

品名	メーカ	型番等	仕様
圧力トランス ミッタ	長野計器	KP-15-17G-L4W1x74xxx1	圧力レンジ: -50kpa~50kpa 精度:±0.25%FS
マスフローコントローラ	アズビル	MQV0200	流体:H ₂ レンジ:0~200L/min 精度:±0.5~2.0%FS
		MQV0200	流体: N ₂ レンジ: 0~200L/min 精度: ±0.5~1.5%FS
シース熱電対	チノー	1SCHS1-0K02006132 VXI005AY	K 熱電対 測定レンジ: -200~1050℃ 精度: ±2.5%
高濃度水素 ガス検知器	新コスモス電機	XP-3140-H2	測定レンジ 0~100vol% 精度 H レンジ±5vol% L レンジ±10%
酸素ガス 濃度計	新コスモス 電機	XP-3180-O2	測定レンジ 0~25vol% 精度±0.3vol%

図 2-3-5 に示すように、縮拡径管水平配置では、助走管端部に石英窓を配置し、レーザ光を観測部へ照射した。石英部の長さは 1m であり、置換挙動の観測に際しては、1回の撮像により石英製縮拡径管部の全域が視野に可視化される。

図 2-3-6 に示すように、縮拡径管鉛直配置の模擬配管は、導入部から曲管を経由して観測部の石英管へ接続する構造とした。レーザ光は曲管に分岐部を設け石英窓を配置し、上方に向け観測部へ照射した。石英管の観測部長は同じく 1m である。

図 2-3-7 から図 2-3-9 に示すように、L 字管の模擬配管については、ガス導入側が水平配置の場合、助走管からメインバルブを経て接続する構造、導入側が鉛直配置の場合、助走管から曲管を経てメインバルブへと接続する構造とした。また、レーザ光の入射は屈曲部を基準に上流と下流の 2 方向について個別に照射し、観測を行った。本試験系では、後述のとおり系全体の動作が時限装置により精密に制御されるため、個別の試験結果を合成し、屈曲部前後のガス置換挙動を連続的に確認することができる。

図 2-3-10、図 2-3-11 に示すとおり、直管鉛直配置、T 字分岐管における下向き流れの模擬配管は、上方に助走管を水平配置し、曲管を経てメインバルブおよび石英管へ接続する構造とした。レーザ光は石英管下流側端部に配置された石英窓から上方に向け管内に照射した。流れに対しレーザは反対方向に照射するが、レーザ光は光速で伝搬するため、観測のタイミングに影響はない。

図 2-3-12、図 2-3-13 に示すとおり、複合配管における分岐部の観測では、ガス導入後、初段に整流器を配置し、メインバルブへ接続する。続いて助走管を配置し、汎用の L 字管により鉛直方向へ曲げ、観測部となる石英製 T 字分岐管へと至る構造

とした。主管方向(鉛直方向)流れと枝管方向(水平方向)流れとの切替えは、T字分岐管の排気部と閉止部を入れ替えることによって行った。また、これらの排気、閉止系に至る部品を含め、石英部を除く系全体を32A汎用配管部品により製作した。これらは、後述するシミュレーションによる再現性の評価を念頭に置いた設計となっている。管内置換挙動の観測については、L字管の場合と同様に、鉛直及び水平方向の挙動を個別に実施し、合成することによって分岐管全域の置換挙動を把握した。

2.3.2 管内ガスと計測のタイミング制御

前述の模擬配管系では、置換挙動の計測に際し、観測部を初期状態のガスで満たし、助走管を置換ガスに入れ替えた後、メインバルブの開放によりガスの置換を開始する。一般的に、バルブは動作機構や口径により開閉の応答速度が異なり、また、動作中は必然的に管内の開口面積が変化する。このとき、助走管内にガス導入に伴う圧力が作用していると、バルブ開動作の間、開口面積の変化に応じ流速が変化し、ガスの境界面が大きく乱れるため、計測結果から各ガスの物性そのものに由来する置換挙動を解析することが困難となる。したがって、本調査における模擬配管では、管内ガス制御において、初期状態におけるガス界面の乱れを最小限に抑えることに留意し、部品の選定やガス制御手法の検討を行った。

本調査でメインバルブとして用いるゲートバルブは、バルブ開動作開始から完了までの経過時間がわずか 0.7 秒であり、応答が非常に速い。また、開閉動作は上下摺動によるため、ガス界面に与える物理的な作用は各種バルブの動作機構の中では最も少ないと考えられ、本調査におけるメインバルブに適している。

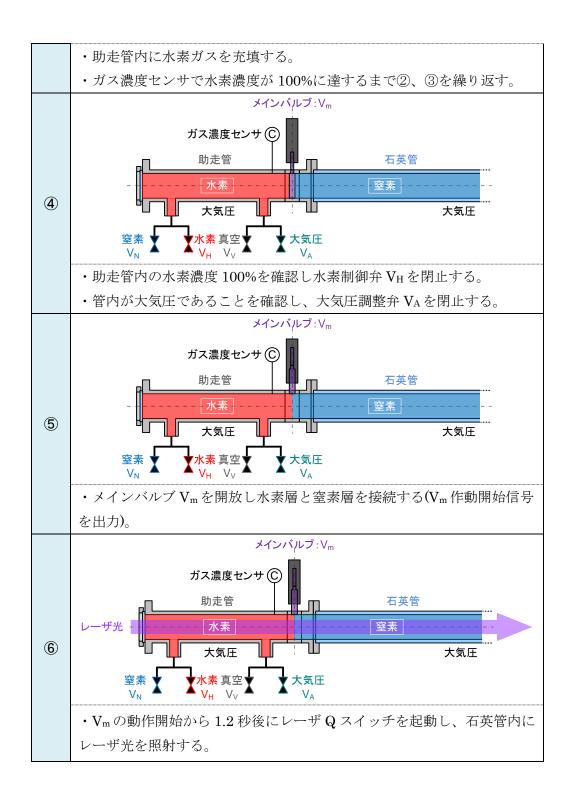
管内ガス置換に至るガス制御手法については、本試験装置では、観測部にレーザ光を照射する必要があるが、メインバルブを閉止した状態でレーザ光を導入すると、バルブにレーザ光が照射されることによりシール面の表面状態が悪化し、気密性能が低下する、或いはシール材の変質や、これに伴う微粒子の生成が計測に悪影響を及ぼすことが懸念された。

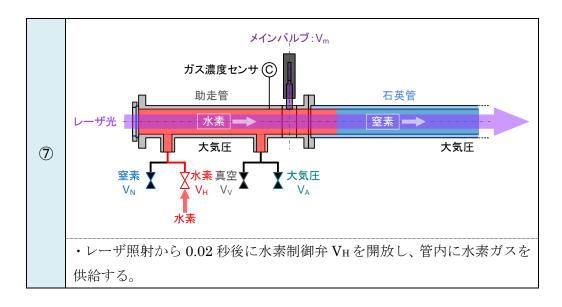
したがって、本調査ではこれらを総合的に考慮し、表 2-3-3 に示す手順により、導入部のガスを置換し、メインバルブの開放及び計測を行うこととした。表 2-3-3 の手順は、窒素から水素へ置換する場合の例であり、空気から窒素へ置換する場合も、同一の手順を用いた。

はじめに、助走管及び石英管を含め、模擬配管全域を窒素に置換する(①)。このとき、模擬配管の最下流は大気開放されている。次にメインバルブを閉止し、助走管と石英管の接続を遮断すると共に、助走管内のガスを排出し真空状態にする(②)。十分に真空度が確保されていることを確認し、助走管内に水素ガスを導入する(③)。このとき、水素ガス濃度センサの指示により、助走管内の水素濃度をモニタリングし、100%に至るまで②、③を繰り返す。水素濃度 100%に至ると、助走管内への水素供

給を停止し、同管内圧力が大気圧であることを確認の上、排気系のバルブを全て閉 止する(④)。これまでが試験の準備段階となる。続いてメインバルブを開放し、水素 ガス及び窒素ガスを接続する(⑤)、メインバルブ開放から 1.2 秒後にレーザ Q スイ ッチを起動し、管内にレーザ光を照射する(⑥)。Q スイッチ起動から 0.02 秒後に水 素制御バルブを開放し、管内に水素ガスを供給する(⑦)。

表 2-3-3 ガス導入の手順 メインバルブ:V_m ガス濃度センサ(C) 助走管 石英管 1 大気圧 大気圧 水素 真空 大気圧 窒素 ・助走管、石英管全域を窒素ガスに置換する。 メインバルブ:V_m ガス濃度センサ(C) 助走管 石英管 真空 窒素 大気圧 2 ・メインバルブ Vm を閉じ、助走管と石英管を遮断する。 ・助走管内の窒素ガスを排気する。 メインバルブ:V_m ガス濃度センサ(C) 助走管 石英管 窒素 3 大気圧 大気圧 大気圧 水素 水素





これらの一連の手順により、レーザ光の照射によるメインバルブの損傷を防ぎ、また、バルブ開放に伴う両ガスの界面の乱れを抑えた上で置換挙動を可視化することが可能となった。

本試験装置では、2.2.2 項にて述べたように、ICCD カメラの撮像のタイミングがレーザ装置の Q スイッチ信号と同期している。レーザパルスの繰返し周期 30Hz で計測する場合を例にとると、バルブ開放のタイミングによって、計測ごとに現象に対する撮像の起点が最大 0.03 秒程度の範囲でずれることになる。本試験装置では、図 2-3-14 のチャートに示すようにバルブの駆動とシャッタの開放のタイミングを制御する時限装置を製作し、計測結果の正確な再現性を確保した。

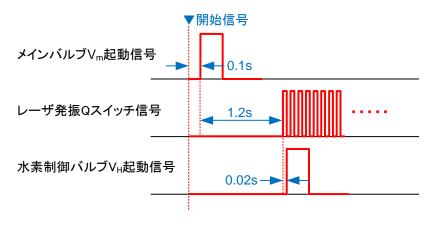


図 2-3-14 計測のタイミングチャート

時限装置では、計測開始スイッチを押下後、0.1 秒後にメインバルブ起動信号が出力される。これを基準として 1.2 秒後にレーザ Q スイッチが起動し、レーザのパルス照射が開始されると共に、ICCD カメラによる撮像が同時に開始される。更にそ

の 0.02 秒後に管内への水素導入が開始され、管内置換挙動の観測が行われる。本制御装置の時間的なバラつきは 1 ミリ秒以下である。したがって、試験ごとの撮像の起点が高精度に保たれ、同一条件における複数回の試験結果に対し極めて良好な再現性を確保することが可能となった。

2.4 配管内ガス置換挙動のシミュレーション解析

本調査では、配管内ガス挙動の可視化・濃度分布計測試験と共に、ガス配管内の置換挙動を流体数値シミュレーション(以下、CFD解析)により再現する。なお、CFD解析は3次元体系で行う。各CFD解析の実施ケースを表2-4-1に示す。

No	配管形状	配置方向	流れ方向	初期ガス	供給ガス	Re
INO						(流速[m/s])
1	直管	水平	-	窒素	水素	0
2						100
3						200
4				空気	窒素	(0.3)
5		鉛直	上向き	窒素	水素	100
6			下向き	窒素	水素	100
7	縮径管	水平	32A→20A	窒素	水素	100
8				窒素	水素	200
9	L字管	水平→		窒素	水素	100
10		鉛直上向き		空気	窒素	(0.3)
11		鉛直上向き →水平		窒素	水素	100
12				空気	窒素	(0.3)
13		水平→水平		窒素	水素	100
14				空気	窒素	(0.3)
15	複合配管	主管鉛直 水平分岐	主管方向	窒素	水素	100
16				空気	窒素	(0.3)
17			枝管方向	窒素	水素	100
18				空気	窒素	(0.3)

表 2-4-1 CFD 解析実施ケース

解析条件は、表 2-4-2 に示すとおりである。解析には ANSYS 社の汎用流体解析コード FLUENT を用い、解析モデルは、各配管形状とも、試験系と合わせたモデルとしており、管径は 32A を基本としている。なお、鋼管と試験計測領域に使用される石英管は、同じ 32A 相当のサイズにおいても、その規格から実際には管径に微少な相違が存在するが、本解析ではこれらの相違も再現している。モデルに使用した管径は以下のとおりである。

【鋼管】

 $20A: \phi 21.6 \text{ mm}$ $32A: \phi 35.7 \text{ mm}$ $50A: \phi 52.9 \text{ mm}$

【石英管】

#33 (32A 相当): : φ34.5 mm #20 (20A 相当): : φ21.0 mm

また、試験における観測領域前後の配管形状等の影響(上流側の流れの発達状況、 後流区間の上流側への影響等)を考慮し、メインバルブまでの観測領域上流の助走区 間ならびに観測領域後流の排気配管も再現したモデルを用いて解析を実施した。なお、 メインバルブの開放は瞬時に行われるものとした。

表 2-4-2 解析条件

	<u>衣 2-4-2</u>
model	
コード	FLUENT Ver16.2
物性	密度:理想気体 粘度:混合ガス物性 拡散係数:動力学的理論
乱流モデル	層流
時間刻み	1e-3[sec]
移流項補間	二次風上差分
時間積分法	二次陰解法
境界条件	
下流側	大気開放条件
配管壁面	断熱/すべり無
配管板厚	考慮しない

3. 試験結果

本章では、本調査において得られたガス管内ガス置換おけるガス濃度分布の時間変化を示す。これらの画像は水素または酸素によるラマン散乱光の輝度分布から得られたものであり、各ガスの定性的な濃度分布の経時変化を視覚的に捉えることができる。本調査における一連の試験により得られた全てのガス可視化画像は本報告書末尾の試験結果一覧に示し、ここでは代表的な事例を取り上げて解説する。可視化画像は濃度が高いほど彩度が高く表示される。可視化画像に基づくガス濃度の定量的な評価については第5章において述べるが、定性的な変化は以下に示す画像の彩度の変化として確認することができる。

3.1 流れを伴わない場合の境界におけるガス挙動の可視化

ここでは、前章における表 2-3-3 に示した①~⑦の手順により、水素ガスと窒素ガス、 或いは窒素ガスと空気の界面を形成し、その後ガスを導入しない場合について、界面の 経時変化を可視化画像により示す。本条件は、移流による混合がない場合、即ち分子拡 散や重力の作用のみによる両ガスの境界における混合を可視化することに相当する。

本調査では、ボールバルブにより両ガス層を接続し、バルブが完全に開放された直後からレーザの照射を開始するため、バルブの動作開始のタイミングから起算すると、1.22 秒後に1フレーム目の画像が取得される。したがって、以下で示す画像における0秒は、バルブ開の動作開始から約1.22 秒後の状態である。また、本試験で用いる模擬配管では、構造上バルブ中心軸から観測領域となる石英管の端部までに83mmのブラインドエリア(不可視領域)が存在するため、距離ゲージの0点はバルブ中心軸から83mmの位置を表す。これらは、本章における濃度分布画像について共通の設定とする。

3.1.1 窒素との境界層における水素ガスの挙動

図 3-1-1 に流速 0 の場合の直管水平配置における窒素・水素層の挙動を、図 3-1-2 に直管鉛直配置における挙動をそれぞれ示す。

図 3-1-1、図 3-1-2 により、いずれの条件においても窒素と水素の界面が形成されると、流れがない場合でも水素が窒素層へ混合していく状況が確認できる。特に注目すべき特徴は、例えば図 3-1-1 について、観測開始から 0.03 秒(バルブ開放から 1.25 秒後)において既に約 200mm まで水素が進行している。これはブラインドエリアを含むと約 280mm 進行していることになり、その後の経時変化の速度と比較すると著しく速いことがわかる。鉛直方向の配置についても同様の傾向を示しているが、若干水素の進行が抑えられていることが確認される。また、水平配置では、水素が配管の上方でより発達が促進されている一方で、鉛直方向では管径方向の顕著な濃度勾配は見られない。これらの特徴は、水素と窒素の比重差に伴う、配管の配置方向と重力の作用として理解することができる。即ち、両ガスの境界が形成され

ると同時に界面に重力分布が生じ、比重が軽い水素が窒素側上方へ、比重が重い窒素は水素側下方へ流れ込むことでこれらの挙動が説明できる。流れを伴わない場合の水素の挙動は、時間の経過と共に徐々に減衰するが、本調査の範囲では平衡状態に達することはなく、発達が継続された。観測開始から10秒後におけるバルブ付近の水素濃度は50%以上で推移している。

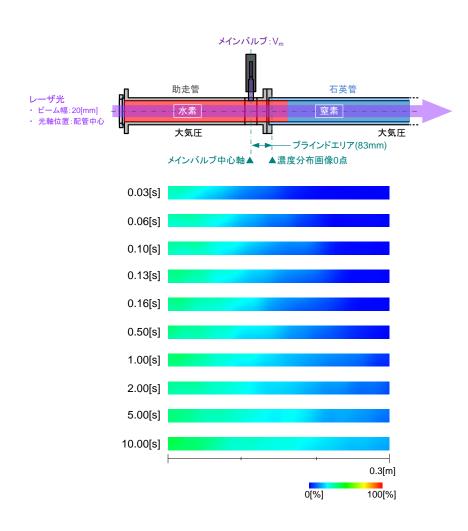


図 3-1-1 流速 0 における水平管内の水素ガス置換挙動

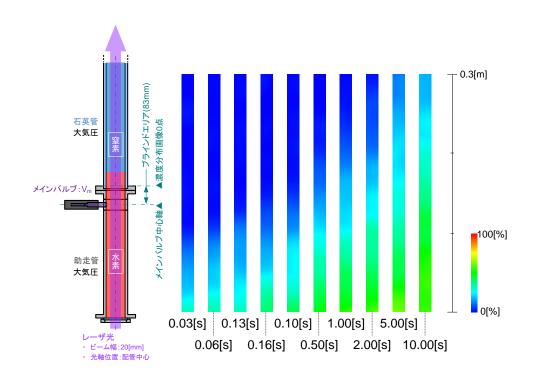


図 3-1-2 流速 0 における鉛直管内の水素ガス置換挙動

3.1.2 窒素との境界層における酸素ガスの挙動

ここでは、上述した水素と窒素の混合層形成と比較するために、流速 0 における空気と窒素による界面付近の挙動を可視化した。図 3·1·3 に流速 0 場合の直管水平配置における窒素・空気層の挙動を、図 3·1·4 に直管鉛直配置における挙動をそれぞれ示す。

図 3-1-3、図 3-1-4 によると、窒素、空気の界面では、水素の場合ほど顕著な状態の変化は認められないことがわかる。濃度分布画像は酸素濃度を示しているため、窒素層の発達は彩度の低下として現れる。しかしながら、観測開始から 0.5 秒後まではいずれの場合も変化は殆ど認められず、比較的長時間経過後となる 2 秒後以降においてバルブ付近の濃度の低下が視覚的に判別できる程度である。また、水平配置と鉛直配置を比較すると、幾分鉛直配置において窒素の混合が促進されている。これらの現象は、前述の水素の挙動に照らしても整合する。即ち、窒素ガスと空気では、両者の比重差が小さいため、重力の作用による混合の促進が水素の場合と比較して小さくなっているものと考えられる。

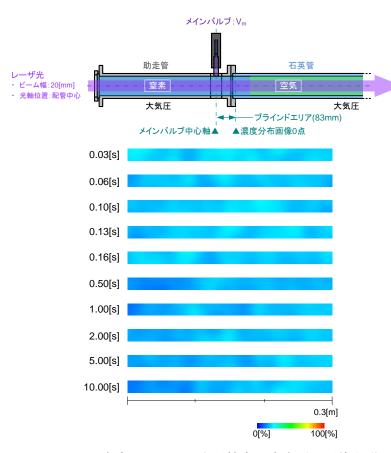


図 3-1-3 流速 0 における水平管内の窒素ガス置換挙動

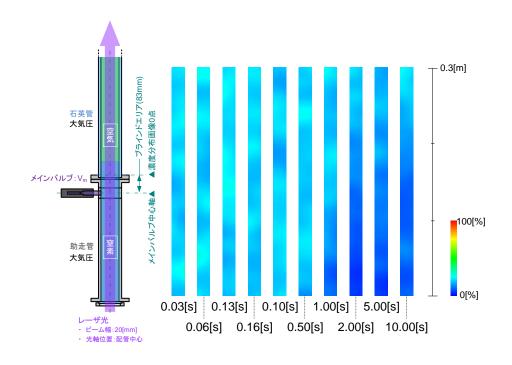


図 3-1-4 流速 0 における鉛直管内の窒素ガス置換挙動

3.2 要素配管におけるガス置換挙動の可視化

3.2.1 縮拡径管におけるガス置換挙動の可視化

(1) 水平配置におけるガス置換挙動

縮拡径管水平配置における窒素から水素への置換挙動の可視化結果の例を、図 3-2-1(Re=100)、空気から窒素への置換挙動の可視化事例を図 3-2-2(u=0.3m/s)にそれぞれ示す。これらの画像は、水平方向 0m~1m の範囲を可視化したものであり、計測開始から 1 秒ごとの変化を抽出したものである。また、本試験におけるレーザビーム幅は、縮径後の配管管壁によるレーザ光の反射を回避するために 10mm としているが、可視化画像は視認性を確保するために、管径方向を拡大表示している。

図 3-2-1 に示すとおり縮拡径管では、配管中央の 20A への縮径部から、流速が上昇し、水素層の進行が速くなっている。しかしながら、流速の変化による水素層の発達を除いては、直管の場合と比較して配管口径の縮小による特異な挙動は認められず、約 4 秒程度で管内全域が置換される。これらの挙動の特徴は、空気から窒素への置換においても同様である。

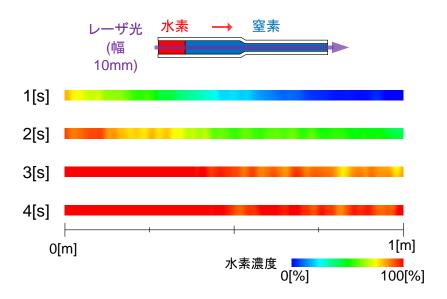


図 3-2-1 縮拡径管水平配置(H₂、Re=100)

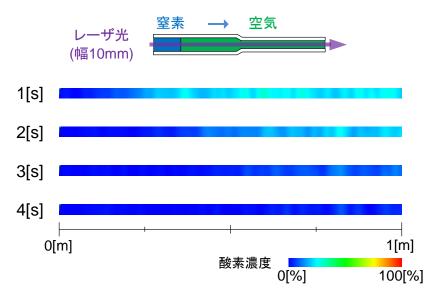


図 3-2-2 縮拡径管水平配置(AIR、u=0.3m/s)

(2) 鉛直配置におけるガス置換挙動

縮拡径管鉛直配置における窒素から水素への置換挙動の可視化結果の例を、図 3-2-3(Re=100)、空気から窒素への置換挙動の可視化事例を図 3-2-4(u=0.3m/s)にそれぞれ示す。

図 3-2-3 に示すとおり、水平配置の場合と同様に鉛直配置についても、配管中央の 20A への縮径部から、流速が上昇し、水素層の進行が速くなっている。流速の変化 による水素層の発達を除いては、直管の場合と比較して配管口径の縮小による特異 な挙動は認められず、約 4 秒程度で管内全域が置換される。これらの特徴は、空気 から窒素への置換においても同様である。

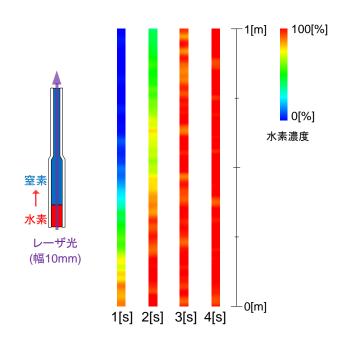


図 3-2-3 縮拡径管鉛直配置(H₂、Re=100)

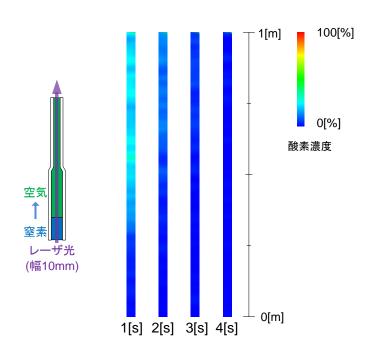


図 3-2-4 縮拡径管鉛直配置(AIR、u=0.3m/s)

3.2.2 L字管におけるガス置換挙動の可視化

ここでは、L字管における各ガスの置換挙動を示す。L字管の場合、曲部を基準に 直角 2 方向へ配管が延びているため、ここではそれぞれの方向について個別に取得 した濃度分布画像を合成し、L 字管内全域の置換挙動を示した。黒線枠は本試験に 用いた石英 L 字管の内径寸法を示し、レーザの照射領域に可視化画像を挿入している。

(1) 鉛直-水平配置におけるガス置換挙動

図 3-2-5 に L 字管鉛直・水平配置について、窒素から水素置換した場合における可視化画像を、図 3-2-6 に同配管条件において空気から窒素置換した場合の可視化画像をそれぞれ示す。流速条件は、水素について Re=100、窒素について u=0.3m/sである。なお、画像中において離散的に生じている高輝度の点は配管内で生じた粉塵等による強い散乱光であり、対象成分の分布を示すものではない。

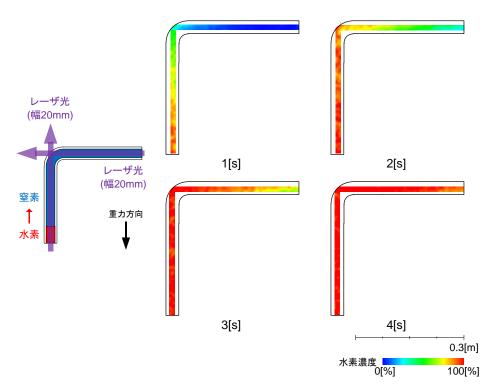


図 3-2-5 L 字管鉛直-水平配置(H2、Re=100)

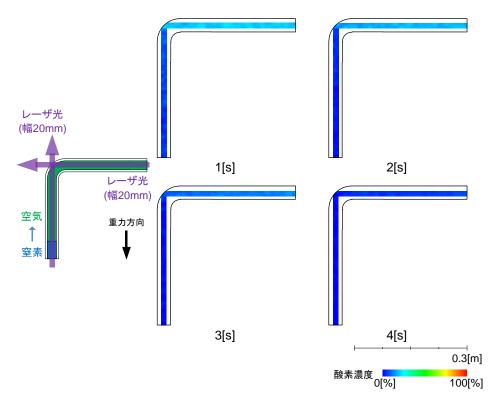


図 3-2-6 L 字管鉛直-水平配置(AIR、u=0.3m/s)

図 3-2-5 によると、初期挙動は直管鉛直配管の場合と同様であるが、水素が屈曲部に到達し水平方向の流れに至ると、直管水平配置の場合と同様に、管上方が先行して発達し進行している状況が確認できる。その後は直管の場合と同様の挙動を示し、約 4 秒で管内全域が置換される。可視化画像によって、屈曲部に窒素層が残存するなどの特異現象は生じないことがわかるが、全域置換完了までに直管の場合と比較して若干時間を要している。これは屈曲部における流れの状態の変化に起因するものであると推察されるが、詳細は後述の解析結果において述べる。図 3-2-6 についてみると、空気から窒素への置換の場合についても、水素の場合と概ね同様の挙動を示すことがわかる。屈曲部への空気(酸素)の残存も認められず、約 4 秒程度で全域が窒素に置換されている。

(2) 水平-鉛直配置におけるガス置換挙動

図 3-2-7、図 3-2-8に L 字管水平-鉛直配置について、窒素から水素置換した場合における Re=100 及び Re=200 の可視化画像を、図 3-2-9 に同配管条件において u=0.3m/s にて空気から窒素置換した場合の可視化画像をそれぞれ示す。なお、画像中において離散的に生じている高輝度の点は配管内で生じた粉塵等による強い散乱光であり、対象成分の分布を示すものではない。

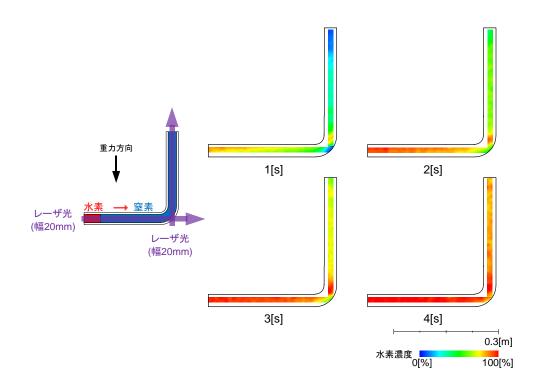


図 3-2-7 L字管水平-鉛直配置(H₂、Re=100)

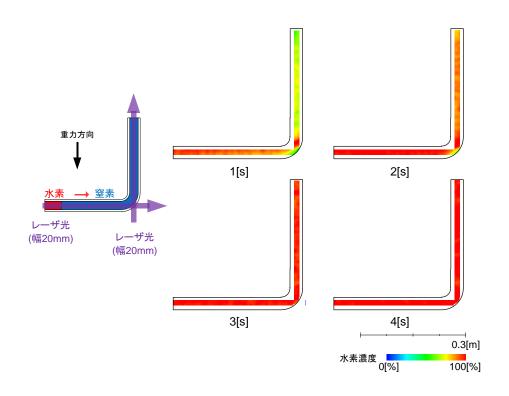


図 3-2-8 L字管水平-鉛直配置(H2、Re=200)

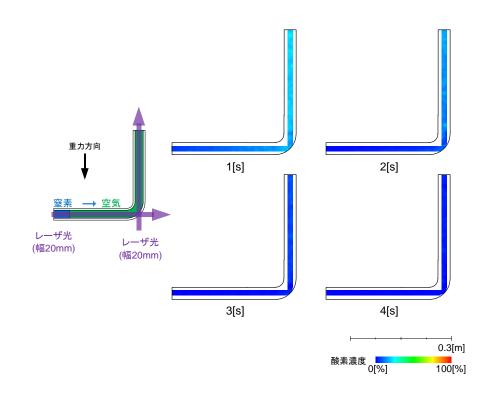


図 3-2-9 L 字管水平-鉛直配置(AIR、u=0.3m/s)

図 3-2-7 によると、水素導入から屈曲部までの間は直管水平配置の場合と同様の挙動を示すが、屈曲部において水平管上方に先行していた水素層が、鉛直配管の外周側へ大きく回り込み剥離する挙動が確認される。この挙動は、時間の経過と共に管内全域の濃度が上昇しても高濃度域として確認される顕著な特徴である。また、これは図 3-2-8 に示した Re=200 の場合についても確認される。水平-鉛直配置では、この挙動が比較的強く影響し、屈曲部において若干窒素が残存する時間帯が生じ、それに伴い、4 秒後でも全域が水素に置換された状態には至っていない。しかしながら、初期にこのような遅延効果は生じるものの、その後は速やかに管内全域が水素に置換される。

(3) 水平-水平配置におけるガス置換挙動

図 3-2-10 に L 字管水平-水平配置について、窒素から水素に置換した場合における Re=100 の可視化画像を、図 3-2-11 に同配管条件において u=0.3m/s にて空気から 窒素置換した場合の可視化画像をそれぞれ示す。なお、画像中において離散的に生じている高輝度の点は配管内で生じた粉塵等による強い散乱光であり、対象成分の分布を示すものではない。

図 3-2-10 によると、水平-水平配置の場合、鉛直方向流れを含む場合の挙動と比較 して屈曲部においても、窒素層の残存などの顕著な特異現象は認められない。全域 の置換については、他の配置条件と同様に直管の場合と比較して若干遅延が認めら れ、観測開始 4 秒後の段階では全域が水素 100%には至っていない。しかしながら、その後速やかに全域水素置換へと至ることを確認した。図 3-2-11 に示す空気から窒素への置換挙動についても同様の挙動であった。

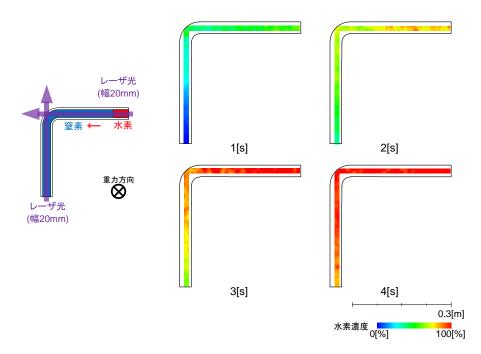


図 3-2-10 L字管水平-水平配置(H₂、Re=100)

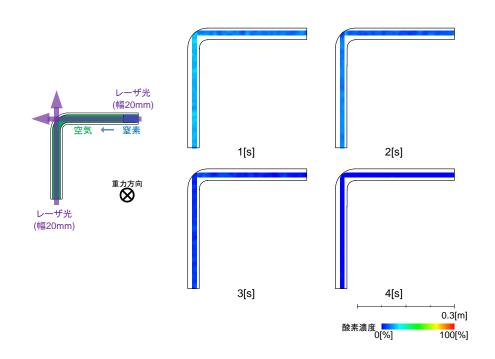


図 3-2-11 L字管水平-水平配置(AIR、u=0.3m/s)

3.2.3 下向流れにおけるガス置換挙動の可視化

(1) 直管鉛直配置(下向き流れ)におけるガス置換挙動

ここでは、直管鉛配置について重力方向へ水素を導入した場合における置換挙動の可視化結果を示す。比較のため、図 3-2-12 に直管鉛直配置(上向き流れ)における、水素の置換挙動可視化結果を示す。

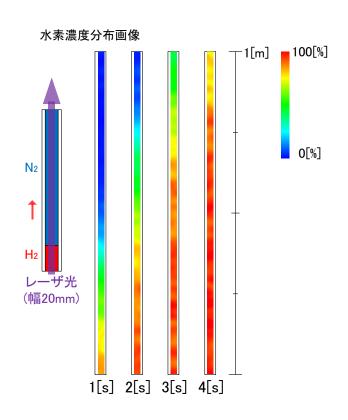


図 3-2-12 直管鉛直配置上向き流れ(H₂、Re=100)

図 3-2-12 に示すとおり、直管鉛直配置における上向きの流れでは、初期に上方へ広く水素層が発達し高濃度域は観測開始から 3 秒程度遅れて進行する状況が確認できる。これは、前述の流れを伴わない場合における界面の挙動として現れた現象に起因する。即ち、界面の形成に伴い、水素が窒素側へ浮上すると共に、水素側へ窒素が一定量降沈する。このため、初期段階では観測部側へ流入するガスは水素と窒素の混合ガスとなっており、高濃度水素層の進行までに一定の時間を要することになる。

次に、図 3-2-13 に直管鉛直配置における下向き流れの可視化画像を示す。図 3-2-13 よると、下向き流れでは、初期の水素層の発達が極めて少なく、水素層先端から水素高濃度層までの長さが縮小されている。時間の経過に伴う混合層長の発達も著しく小さく、極めて安定した混合層が生成されていることがわかる。このように、上

向き流れに対し混合層の発達が抑えられた極めて安定な流れとなることが確認された。これは、水素と窒素の比重差が重量方向と逆向きに作用していることに起因しており、ここに現れた混合層の発達量は、分子拡散と移流に伴う混合現象が抽出されているものとして理解できる。また、全域の置換については、いずれの場合も速やかに完了していることが確認された。

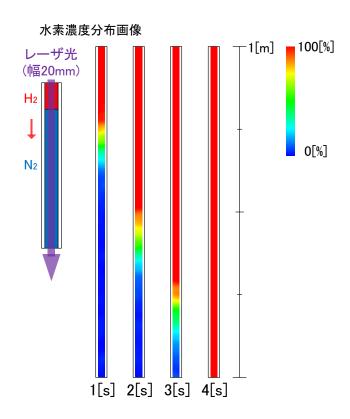


図 3-2-13 直管鉛直配置下向流れ(H₂、Re=100)

図 3-2-14、図 3-2-15 に直管鉛直配置における空気から窒素へ置換する場合の上向き流れの挙動及び下向き流れの挙動をそれぞれ示す。

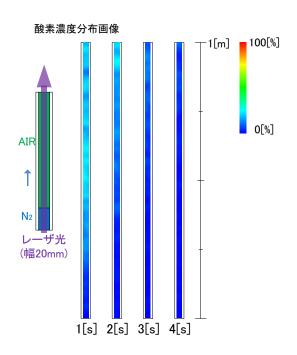


図 3-2-14 直管鉛直配置上向き流れ(AIR、u=0.3m/s)

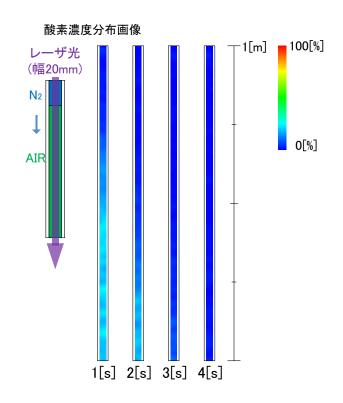


図 3-2-15 直管鉛直配置下向き流れ(AIR、u=0.6m/s)

図 3-2-14、図 3-2-15 によると、空気から窒素の置換においては、流れ方向による顕著な挙動の差異は認められず、速やかに全域が置換されていることが確認できる。

これは、両ガスの比重差が少なく、水素の場合と比較して混合層の発達が少ないこと、また同様に重力方向との関係による作用も少ないことによる結果として理解できる。

(2) T字分岐管(下向き流れ)におけるガス置換挙動

図 3-2-16 に T 字分岐管(主管鉛直、枝管水平配置)における鉛直下向き流れの可視 化画像を示す。

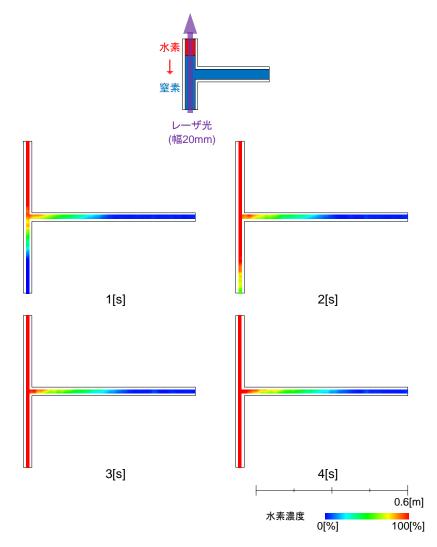


図 3-2-16 T字分岐管主管鉛直枝管水平配置下向流れ(H₂、Re=100)

図 3-2-16 に示すように、T字分岐管の場合、分岐部までの初期挙動は直管下向き流れの場合と同様であり、極めて安定した混合層が生成されていることがわかる。主管中央の分岐部以降は、混合層の発達速度が若干上昇する。これは、分岐部(閉止部)への水素の流入に伴う現象であり、詳細は後述する。これにより、置換挙動の観点からみると、混合層の発達が比較的抑えられた安定な流れとなることが確認され

た。全域の置換については、可視化画像によると速やかに完了していることがわかる。ただし、T字分岐管では、閉止方向に向けても徐々に水素が進行するため、これに伴い分岐部から排出される窒素ガスが主管の分岐部下流側の流れへ少量ずつ混合する。したがって、画像上はほぼ100%に至っているが、定量的には95~98%で推移し、分岐管内が完全に水素に置き換わるまで厳密には100%には至らない。この点についても詳細は後述する。

3.3 複合配管内ガス置換挙動の可視化

本節では、前章図 2-3-13 に示した、水平、鉛直の各方向の直管、L字管及び T字分岐管が複合的に組み合わされた複合配管系について、ガス置換挙動の可視化結果について解説する。ここでは、総合調査受託者やガス事業者との協議に基づき、複合配管系における置換挙動として最も重要なポイントとして、T字分岐部に焦点を当て、管内ガス挙動の可視化を行った。また、分岐部の可視化は、鉛直方向と水平方向を個別に計測し、これらを組み合わせることで管内全域の挙動を明らかにした。本節の各図中における黒線枠は、本試験で用いた石英 T字管の内径を示し、レーザ照射領域に可視化画像を挿入することで管内のガス濃度分布を表示した。また、T字分岐部について鉛直方向を主管、分岐する水平方向を枝管と呼称する。

3.3.1 主管方向流れにおけるガス置換挙動の可視化

図 3-3-1、図 3-3-2 に複合配管主管流れについて、Re=100 及び Re=200 の流速条件で窒素から水素へ置換した場合における管内置換挙動の可視化画像をそれぞれ示す。

図 3-3-1 について見ると、観測開始から約 6 秒後に分岐部付近に水素層が到達する。9 秒後には主管内が水素濃度 50%以上の混合層で満たされるが、100%程度の高濃度領域は到達していない。経過時間が 15 秒に至ると、主管上流側に高濃度水素層が確認できることがわかる。これは、メインバルブ下流の長い配管延長を通過する中で、水素混合層が徐々に発達した結果、広範囲にわたり水素が分布する状態に至っているものと考えられる。一方、枝管方向に注目すると、9 秒の画像から徐々に閉止方向へ水素層が発達していることがわかる。水素層は管上方が先行して発達し、15 秒の段階でも進行している。図 3-2-2 により、これらの挙動の流速依存性が確認できる。流速の上昇に伴い、主管流れにおける置換は促進され、9 秒の段階で主管内はほぼ全域が 80%以上の高濃度水素により満たされる。枝管方向についてみると、Re=100 の場合と比較して閉止側への水素の進行も同様に促進されていることが確認できる。また、主管における分岐部より下流側については、9 秒以降の段階でほぼ全域が 80%以上の高濃度水素により満たされるが、その後、前述の分岐部への水素の進行に伴い主管側へ排出された窒素が流れに混合し続けるため、厳密に 100%

に到達するまでには、枝管側が水素 100%に至り、排出される窒素ガスがなくなるまでの長い時間を要する。

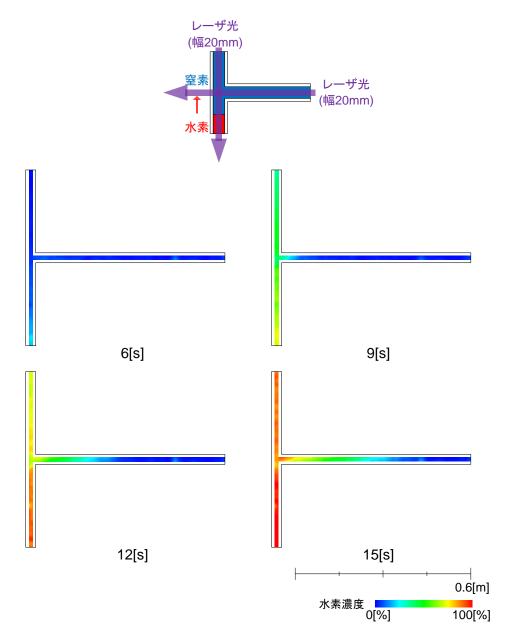


図 3-3-1 複合配管主管流れ(H₂、Re=100)

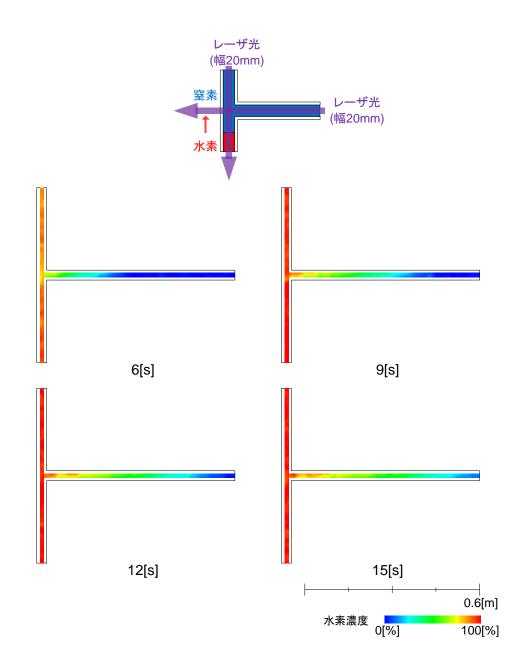


図 3-3-2 複合配管主管流れ(H₂、Re=200)

図 3-3-3、図 3-3-4 に複合配管主管流れについて、u=0.3m/s 及び 0.6m/s の流速条件で空気から窒素へ置換した場合における管内置換挙動の可視化画像をそれぞれ示す。

図 3-3-3 について見ると、観測開始から約 12 秒で主管のほぼ全域が窒素に置換されていることが確認できる。一方、枝管方向についてみると、分岐部付近に若干の窒素層の進行が見られるものの顕著な時間変化は認められず、この点が、水素置換の場合と大きく異なる。図 3-2-4 により、これらの挙動の流速依存性が確認できる。流速の上昇に伴い、主管流れにおける置換は促進され、6 秒の段階で主管内はほぼ

全域が窒素により置換されている。枝管方向についてみると、u=0.3m/s の場合と比較して閉止側への窒素の進行が幾分促進されていることが確認できる。しかしながら、水素置換の場合と比較すると程度は小さい。主管における分岐部より下流側については、分岐部への置換ガスの進行に伴い、この場合は酸素が窒素に混合する状態となる。しかしながら、その量は枝管側への窒素の進行の程度からみると極微量であると考えられる。

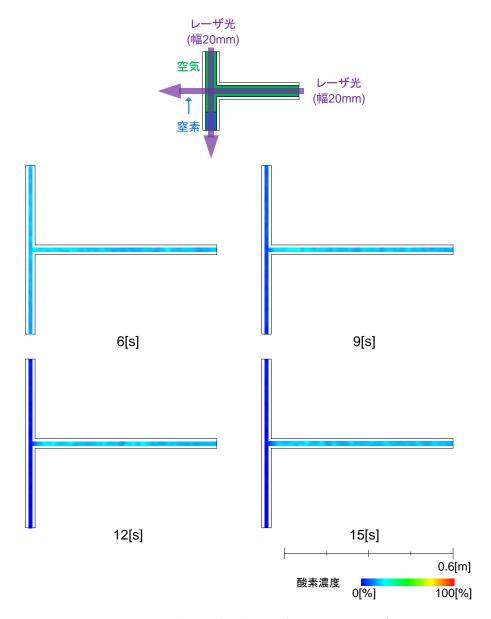


図 3-3-3 複合配管主管流れ(AIR、u=0.3m/s)

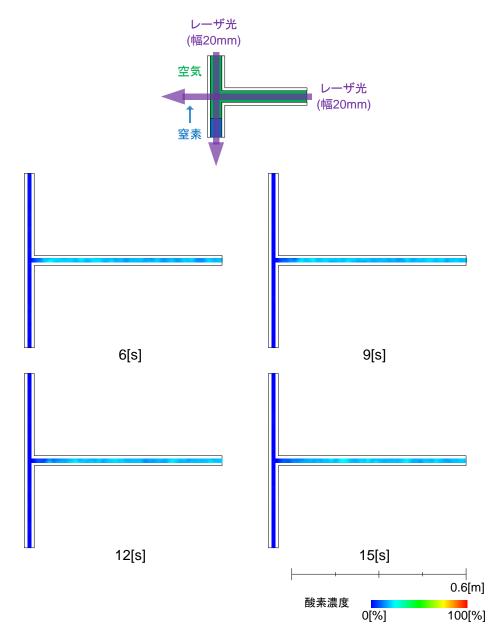


図 3-3-4 複合配管主管流れ(AIR、u=0.6m/s)

3.3.2 枝管方向流れにおけるガス置換挙動の可視化

図 3-3-5 に複合配管主管流れについて、Re=100 の流速条件で窒素から水素へ置換した場合を、図 3-3-6 に同様に u=0.3m/s の流速条件で空気から窒素に置換した場合の管内ガス置換挙動の可視化画像をそれぞれ示す。

図 3-3-5 について見ると、観測開始から約 6 秒後に分岐部付近に水素層が到達している。9 秒後には主管分岐部から上流側が水素濃度 50%以上の混合層で満たされるが、枝管末端付近は 20%程度に留まっている。経過時間が 15 秒に至ると、主管上流側及び枝管内が高濃度水素層で満たされることがわかる。一方、主管の分岐部上方(閉止側)

に注目すると、9 秒の画像から徐々に閉止方向へ水素層が発達していることがわかり、 管径方向の顕著な濃度分布は認められない。

図 3-2-6 についてみると、空気から窒素への置換の場合、観測開始から 15 秒の段階で、主管上流側と枝管内がほぼ窒素に置換されていることがわかる。一方、主管の分岐部上方(閉止側)についてみると、空気層への窒素の進行が比較的顕著に認められる。主管方向流れの場合と比較して、深くまで窒素が進行していることがわかる。この挙動は、界面が生成される方向と流れのベクトルの関係による差異であると推測されるが、詳細は後述の解析において述べる。

本条件についても、主管流れの場合と同様に、閉止方向への置換ガスの進行に伴い 排出されたガスが、流れに混合し、水素、或いは窒素の濃度を低下させる方向に作用 する。

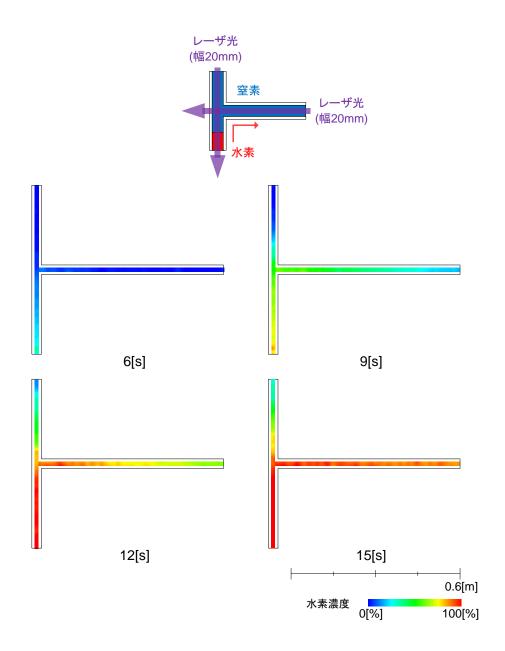


図 3-3-5 複合配管枝管流れ(H₂、Re=100)

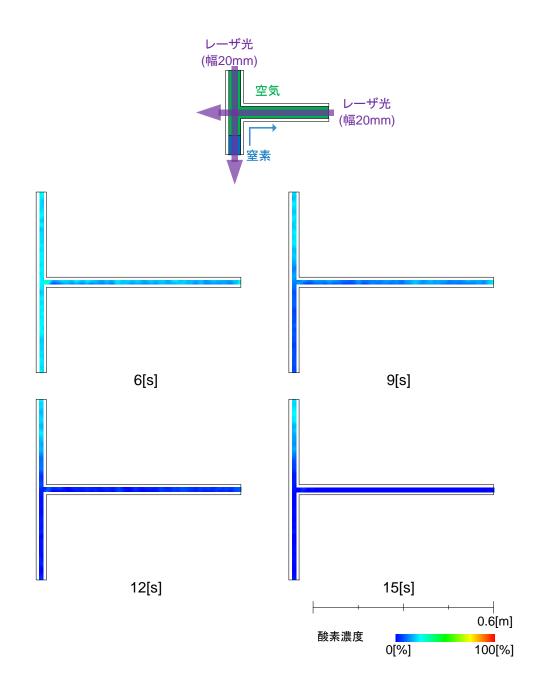


図 3-3-6 複合配管枝管流れ(AIR、u=0.3m/s)

3.4 まとめ

本章では、各種要素形態の配管及び複合配管について、管内のガス置換挙動をレーザラマン分光法を用いた空間濃度分布計測により可視化し、以下の挙動が明らかになった。

(1) 流れを伴わず界面のみが形成された場合、水素は窒素層へ瞬間的に流入し、その 後発達速度は緩やかになるものの、徐々に窒素層への進行を継続する。これに対し 空気層への窒素の流れ込みは極めて小さく、経時変化も微量である。

- (2) 縮拡径管では、管径の縮小に伴い流速が上昇することを除き、直管の場合に対し 特異な挙動は認められない。
- (3) L字管では、屈曲部通過時に配置方向によって特徴的な挙動が認められ、特に水平-鉛直配置における水素層の剥離が顕著に確認された。また、いずれの配置についても、屈曲部通過時に前後の挙動に対し水素層の発達が遅延する傾向にある。
- (4) 下向き流れでは、上向き流れに対し水素の混合が大きく抑制され、他の条件と比較して極めて安定な水素層の移動が実現される。
- (5) 複合配管では、配管延長の拡大に伴い、混合層が長距離に亘り発達した状態で分岐部に侵入する。水素置換の場合、流れ方向については、15秒から18秒程度で全域がほぼ水素に置換される。ただし、流れ以外の閉止方向へも水素が進行し、本試験の範囲では閉止側における水素濃度は上昇を続けることが確認された。また、これに伴い閉止側から排出された窒素ガスが微量ではあるが流れ方向に混合し、閉止方向における現象が完了するまでの間、流れ方向においても厳密には水素濃度が100%には至らない。空気から窒素への置換においても、これらの現象が認められたが、その効果は極めて少ない。

以上により、集合住宅への水素配管供給を想定した際に、配管系を構成する各要素形態と、これらを組み合わせた複合配管における管内ガス置換挙動が確認され、流れ方向については、いずれも管内全域が置換ガスにより満たされることが確認された。T字分岐管の場合のみ、閉止方向への特異現象の影響により厳密な全置換に至るまでに比較的長時間を要することに留意が必要である。これらの試験結果に基づき、第5章において管内ガス置換挙動の定量的な評価を行う。

4. シミュレーション解析と再現性の評価

本章では、第 2 章 2.4 節に示した手法を用いて、昨年度までに実施された条件を含む配管条件、流速条件における管内ガス置換挙動のシミュレーション解析結果について述べる。全解析条件については同 2.4 節に示したとおりであり、個別には付録 Π に列挙し、ここではその一部について解説する。

また、本解析結果と第3章に示した可視化試験結果を比較し、シミュレーションの再現性について評価する。

4.1 要素配管内におけるガス置換挙動のシミュレーション解析

4.1.1 直管内におけるガス置換挙動のシミュレーション解析

(1) 水平配置における解析結果

図 4-1-1 に直管水平配置の解析格子、図 4-1-2 に流速条件 Re=100、Re=200、 水素置換における水素濃度分布を時系列で示す。解析格子のメッシュ数は約 63 万である。なお、本項以降の水素濃度分布図は、試験との比較の観点から計測領域(石英管部分)のみ、いずれも配管中央断面の分布を示す。

解析結果から、窒素中に供給された水素は密度差に起因する浮力により配管上方に 濃度の高い領域を形成しながら混合・進行していくことがわかる。また、各流速条件における初期挙動をみると、瞬間的に大きく窒素側へ水素が進行し、混合していることがわかる

$\phi 35.7 \rightarrow \phi 34.5 \rightarrow \phi 35.7$



図 4-1-1 解析モデル(直管水平配置)

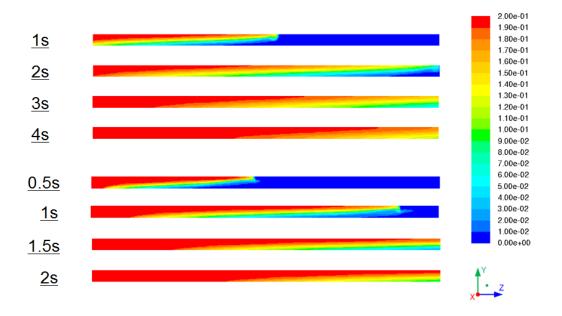
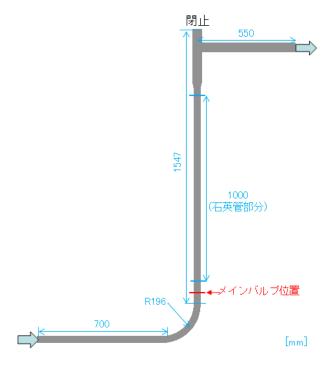


図 4-1-2 解析結果(直管水平配置、上:Re=100、下:Re=200)

(2) 鉛直配置における解析結果

図 4-1-3 に直管-鉛直配置の解析格子、図 4-1-4 に流速条件を Re=100 とし多場合の上向き及び下向き流れにおける水素濃度分布を時系列で示す。解析格子のメッシュ数は約 99 万である。本解析では、鉛直上向き、鉛直下向きの 2 種類の流れ方向に対して解析を実施した。このとき解析格子は同じモデルを使用し、重力方向条件の設定を変更することで流れ方向の違いを再現している。解析結果から、上向き流れと下向き流れでその様相に大きな違いが生じることが確認できる。上向き流れでは、混合界面においてゆらぎを伴い、比較的長い混合層長を呈するのに対し、下向き流れでは、極めて短い混合層を伴いながら進んでいく様相が確認できる。



 $\scriptstyle \varphi35.7 \rightarrow \varphi34.5 \rightarrow \varphi35.7 \rightarrow \varphi52.9 [mm]$

図 4-1-3 解析モデル(直管鉛直配置)

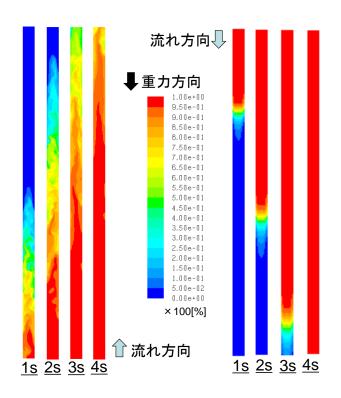


図 4-1-4 解析結果(直管鉛直配置、左:上向き流れ、右:下向き流れ)

4.1.2 縮拡径管内におけるガス置換挙動のシミュレーション解析

図 4-1-5 に縮径管水平配置の解析格子、図 4-2-6 に Re=100 の流速条件における水素濃度分布を時系列で示す。解析格子のメッシュ数は約 40 万である。縮径管は、#33 (32A 相当) から#20 (20A 相当) に縮小する直縮径管をモデルとしている。解析結果から、直管の水平配置のケースと同様に配管内で浮力の効果が現れ、配管上方に濃度の高い領域を形成しながら水素が混合・進行していくことがわかる。一方で、管が縮小することで流速が増加するため、混合層の進行は直管に比べわずかに早い。

$\phi 35.7 \rightarrow \phi 34.5 \rightarrow \phi 21.0 \rightarrow \phi 35.7$

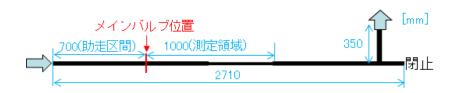


図 4-1-5 解析モデル(縮拡径管水平配置)

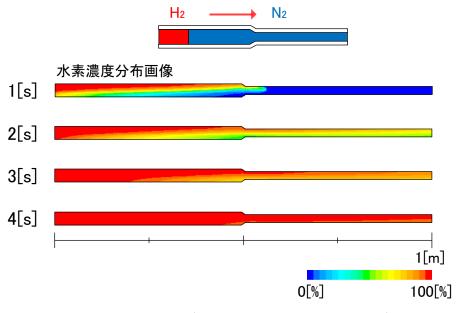


図 4-1-6 解析結果(縮拡径水平配置、H₂、Re=100)

4.1.3 L字管内におけるガス置換挙動のシミュレーション解析

(1) 鉛直-水平配置

図 4-1-7 に L 字管鉛直-水平配置の解析格子、図 4-1-8 に流速条件を Re=100 とした場合の水素濃度分布を時系列で示す。解析格子のメッシュ数はそれぞれ約 96 万である。解析結果から、鉛直上向きから水平に設置されるケースでは、屈曲の

外側に沿って混合層が進行するのが特徴的である。

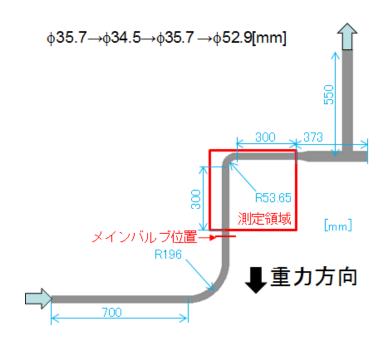


図 4-1-7 解析モデル(L 字鉛直-水平配置)

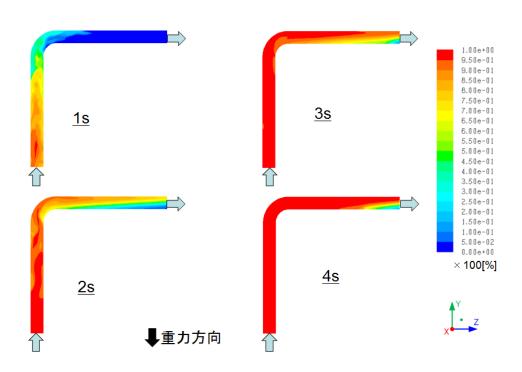


図 4-1-8 解析結果(L 字鉛直-水平配置、H2、Re=100)

(2) 水平-鉛直配置

図 4-1-9 に L 字管水平-鉛直配置の解析格子、図 4-1-10 に流速条件を Re=100

とした場合の水素濃度分布を時系列で示す。解析格子のメッシュ数は約 122 万、96 万である。解析結果から、水平から鉛直上向きに設置されるケースでは、屈曲部直後に弓なりの濃度分布を呈する。これは、図 4-1-11 の速度分布に示すように屈曲内側に二次流れによる渦を形成して旋回流が発生したことに起因すると考えられる。この現象は、供給ガスが水素、窒素いずれの場合にも確認できるが、水素供給時はより際立つ。また、とくに水素供給時は、屈曲外側に比較的低濃度の領域が形成されるが、時間の経過とともに濃度勾配は低減しており、長時間にわたり維持されることはない。

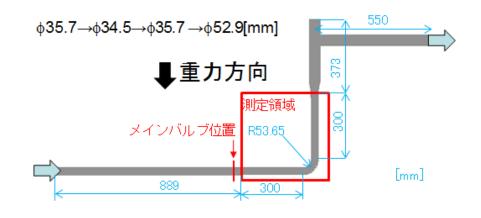


図 4-1-9 解析モデル(L 字水平-鉛直配置)

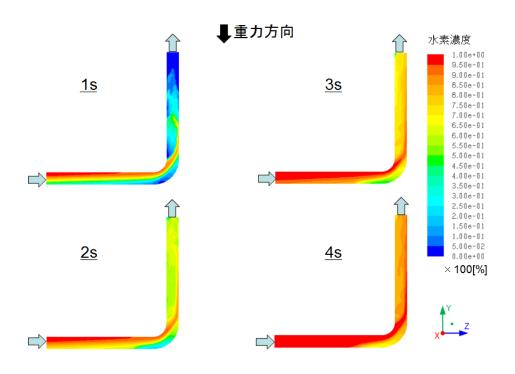


図 4-1-10 解析結果(L 字水平-鉛直配置、H₂、Re=100)

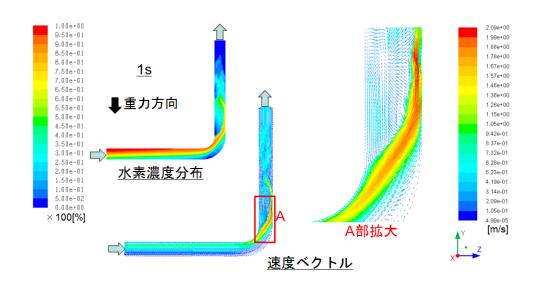


図 4-1-11 解析結果(L 字水平-鉛直配置、H₂、Re=100、流速分布可視化)

4.2 複合配管内におけるガス置換挙動のシミュレーション解析

複合配管モデルは、一般集合建物への水素配管供給を想定するため、前項までに示した要素配管モデルに比べ全長が長く、観測部に分岐を有することが特徴である。本解析では、分岐(T字管)の主管が鉛直に、枝管が水平となる配置とし、出口境界をいずれかに設定した計2種類のモデルについて解析を実施した

4.2.1 主管方向流れ

図 4-2-1、に複合配管主管方向流れの解析格子、図 4-2-2、4-2-3 に流速条件 Re=100 における水素濃度分布を時系列で示す。解析格子のメッシュ数は約 106 万、枝管出口モデルが約 116 万である。解析結果から、流れ方向のみならず、閉止側にも水素ガスが拡散していく様子が再現されている。

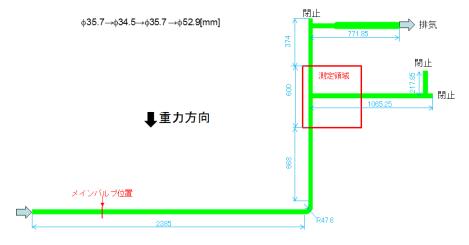


図 4-2-1 解析モデル(複合配管主管流れ)

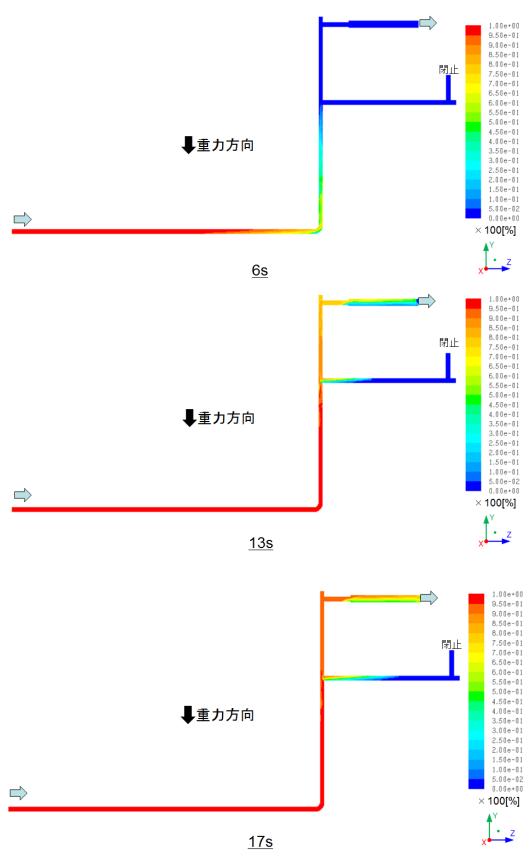


図 4-2-2 解析結果(複合配管主管流れ、全景)

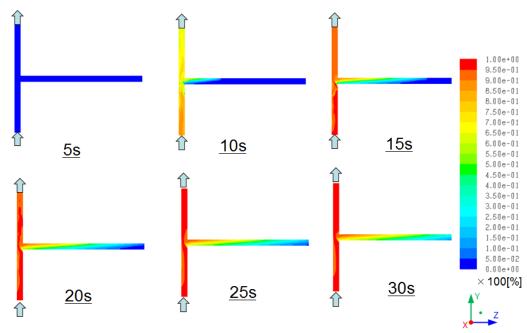


図 4-2-3 解析結果(複合配管主管流れ、分岐部)

4.2.2 枝管方向流れ

図 4-2-4 に複合配管枝管方向流れの解析格子、図 4-2-5、4-2-6 に流速条件 Re=100 の水素濃度分布を時系列で示す。解析格子のメッシュ数は、約 116 万である。

解析結果から、枝管方向のみならず、閉止側にも水素ガスが拡散していく様子が再現されている。主管方向流れにおける閉止方向への挙動と比較すると、浮力の影響により水平側と鉛直側では拡散の様相が異なり、鉛直側の濃度上昇がより早く進行する傾向が認められる。

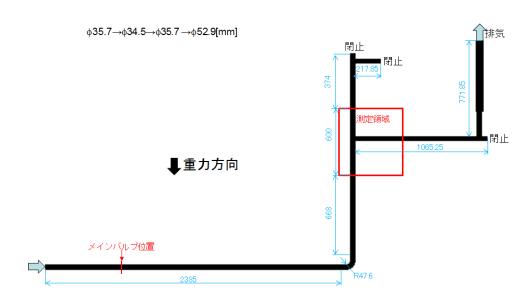


図 4-2-4 解析モデル(複合配管枝管流れ)

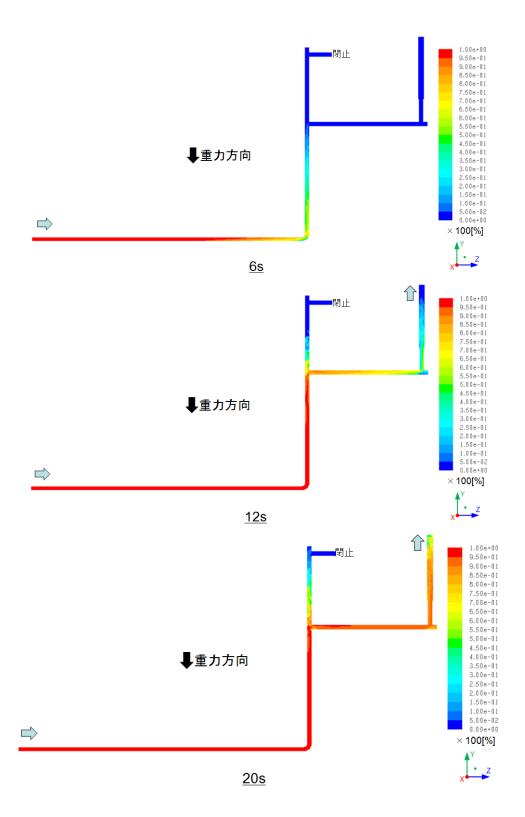


図 4-2-5 解析結果(複合配管枝管流れ、全景)

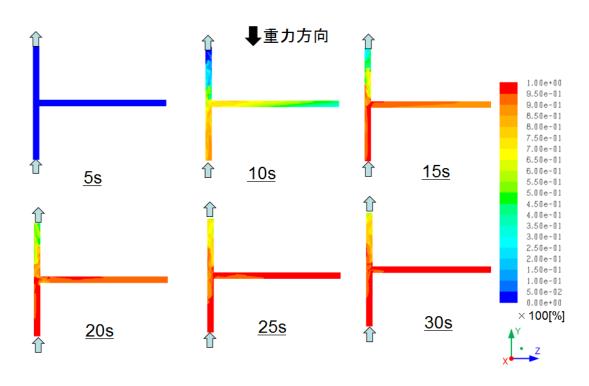


図 4-2-6 解析結果(複合配管枝管流れ、分岐部)

4.3 再現性の評価

本項では、本調査において得られた管内ガス挙動の可視化画像と、前項までに述べたシミュレーション解析の比較事例を示し、シミュレーションの再現性について評価する。

図 4-3-1 に直管鉛直配置(上向き流れ)、図 4-3-2 に同(下向き流れ)について比較した 結果を示す。

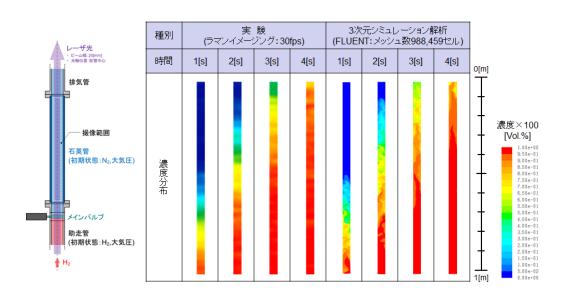


図 4-3-1 再現性評価(直管鉛直配置、上向き流れ、Re=100)

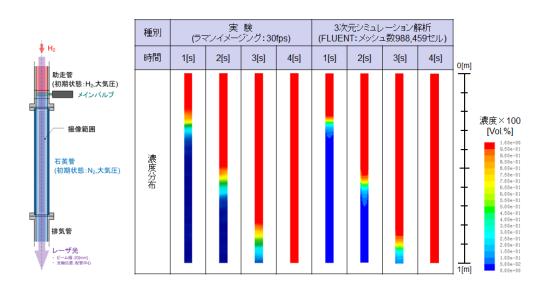


図 4-3-2 再現性評価(直管鉛直配置、下向き流れ、Re=100)

図 4-3-1 について見ると、濃度分布の推移が両者間で良好に一致していることがわかる。また、シミュレーションでは、発達する水素ガスの揺らぎなど、微小な挙動が詳細に再現されている。一方で、試験結果では比較的平滑な分布で推移している。これは、本調査における計測手法が、多数回の瞬時濃度分布計測結果の重ね合わせにより可視化画像を取得していることに起因する。これにより、試験結果は、偶発的要素を含む挙動や、バルブの開閉動作のジッタ等に伴う微小な変化が平滑化される一方で、定常的に生じる現象が顕在化され、取得される。図 4-4-2 についても同様の結果であり、上向き流れに対し、管内水素ガスの挙動そのものが安定しているため、より良好な一致を示している。

図 4-3-3、図 4-3-4に L字管鉛直-水平配置及び水平-鉛直配置の比較を示す。

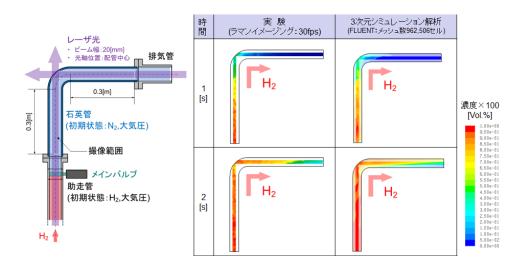


図 4-3-3 再現性評価(L字管鉛直-水平配置、Re=100)

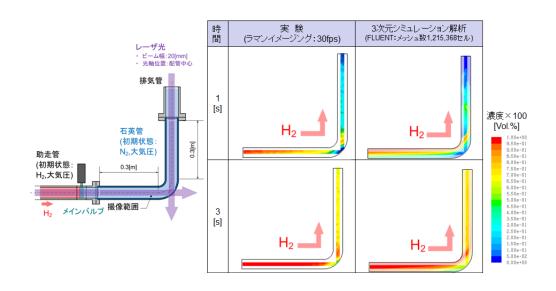


図 4-3-4 再現性評価(L 字管鉛直水平配置、Re=100)

図 4-3-3 によると、管内における水素濃度分布の推移及び、水素層が鉛直方向から水平方向に至り、管上方に沿い先行して流れる挙動共に極めて良好に一致していることがわかる。図 4-3-4 においては、L 字管の屈曲部から鉛直配管に至る水素層の剥離を伴う流れが明確に再現されているとともに、濃度分布の推移も良好に一致していることがわかる。

ここでは特に水素置換の場合について、特徴的な挙動を示す事例を選択的に比較したが、要素配管ではいずれの形態においても、また、いずれの流速条件や、置換ガス種についても、試験結果がシミュレーション解析によって極めて良い一致で再現されることを検証した。

これらの要素形態が組み合わされた場合として、複合配管における再現性を評価する。 図 4-3-5、図 4-3-6 に複合配管における主管方向流れ及び枝管方向流れに関する試験結果とシミュレーション解析の比較をそれぞれ示す。

図 4-3-5 及び図 4-3-6 に示すように、いずれの条件においても、両者が良好に一致し、シミュレーションにより、管内の水素ガスの挙動が良好に再現されていることがわかる。 濃度分布の推移はもとより、閉止方向への水素の進行についても良い一致で再現されていることがわかる。詳細にみると、シミュレーション解析結果が若干試験結果に先行する。これは、配管系の規模の拡大に伴い、模擬配管と解析モデルのわずかな違いや試験時のバルブ動作のジッタなどの誤差要因が、経過時間と共に顕在化した結果であると考えられる。しかしながら、数十秒に亘る置換挙動の時間スケールに対し遅延時間は 0.5 秒以下であり、いずれにしても良好に再現されていると言える。

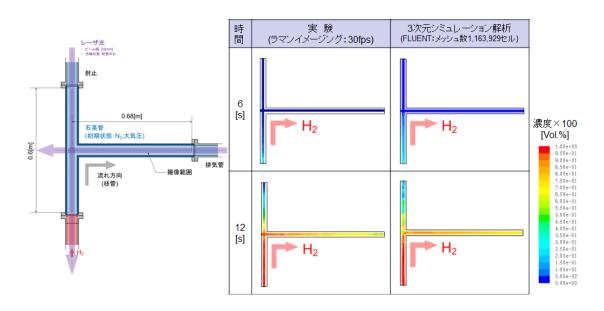


図 4-3-5 再現性評価(複合配管枝管方向流れ、Re=100)

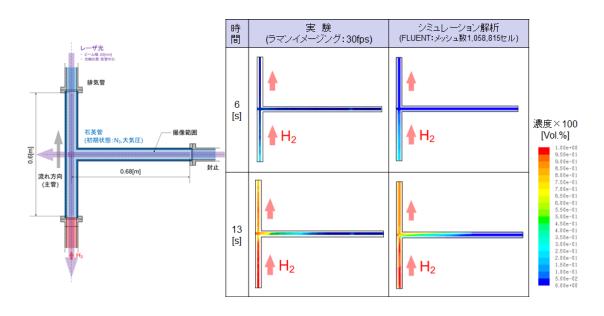


図 4.-3-6 再現性評価(複合配管主管方向流れ、Re=100)

4.4 まとめ

本章では、本調査において実施した配管内ガス挙動のシミュレーション解析結果を示した。また、試験結果との比較により、シミュレーション解析結果の再現性を評価し、以下の成果を得た。

(1) 本調査にて用いたシミュレーション手法により、各種要素配管内におけるガス置

換挙動が再現され、いずれの条件についても試験結果との極めて良好な一致を確認 した。管内全域の水素濃度の推移をはじめ、直管鉛直配置における水素層発達の抑 制や、L 字管屈曲部による水素層の剥離など、水素の特徴的な置換挙動が細部に至 るまで鮮明に再現されることを検証した。

(2) 要素配管を組み合わせた複合配管についても、本シミュレーション手法により、 良好に再現されることを検証した。

これらの成果は、本シミュレーション手法を用いることで、様々な要素配管や他の組合せから成る複合配管の管内全域について、ガス置換挙動を解析し評価することができることを示している。また、必要に応じ本調査で実施したように、局所的な管内ガス濃度分布を可視化し、解析結果の再現性を確認することで、従来にない極めて信頼性の高いシミュレーション解析手法として幅広い用途に適用することができるものと考えられる。

また、副次的ではあるが、物体内部のガスの挙動について、水素濃度分布を物理量として、試験結果とシミュレーション解析結果を画像として比較し、極めて良い一致が得られたことは、計測技術の進歩という観点においても非常に大きな成果であると言える。

5. 配管内ガス置換挙動の評価

本節では、試験結果に基づき、各種配管内の水素混合層の挙動を定量的に評価し、その特性を明らかにすると共に、配管における水素混合層の発達量を簡易的に見積もる手法について述べる。また、集合建物への水素配管供給を想定した集合配管モデルについて、本調査にて用いたシミュレーション手法により水素置換挙動を解析した結果について例示する。

5.1 評価方法

本調査では、内管の運用開始に伴い、空気で満たされた配管内に水素を導入する際に、空気層と水素層の間に不活性ガス(ここでは窒素を想定)層を挟むことで、水素と空気の混合を防ぎ、内管全域を安全に水素へ置換する作業手順を想定している。ここでは、具体的な考察へ移る前に、置換挙動評価方法の概念について述べる。

図 5-1-1 に本置換作業手順を用いた場合における配管内ガスの経時変化を模式的に示す。

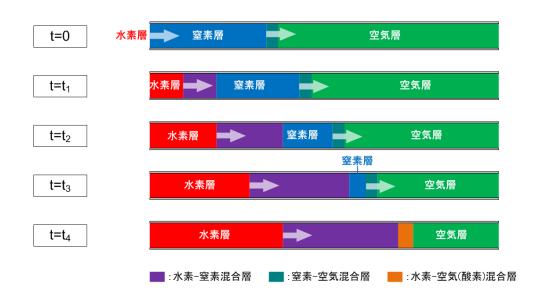


図 5-1-1 窒素層を導入し水素に置換する場合の配管内ガスの経時変化

図 5-1-1 に示すとおり、時刻 t=0 の初期状態における配管内は空気層と窒素層で満たされている。両者の境界面では、厳密にみると僅かながら重力や分子拡散による窒素 - 空気(酸素)混合層が形成された状態となっている。水素の導入が開始されると、上流側からの水素の流れに連動し、窒素層及び空気層の流れが生じる。この時、水素と窒素の境界では、水素 - 窒素混合層が形成される。水素 - 窒素混合層は水素層の移動或いは時

間の経過に伴い、徐々に下流側へ向けて発達し、一方で、窒素層は水素混合層の浸食によって徐々に縮小してゆく。さらに時間が経過し、水素一窒素混合層の発達が窒素一空気混合層へ達した瞬間から、配管内において水素と酸素が混合し、爆発濃度条件を満たす層が存在する状態へ至る。

即ち、水素導入開始からの経過時間、または水素の移動距離に対する水素-窒素混合層の発達挙動を定量的に明らかにすることで、本置換手法を適用する場合に必要となる窒素層長(窒素ガスの体積)を見積もる、或いは適用そのものの可否判断に資することができる。

混合層の挙動は、管内における物質輸送の概念に照らせば、

①移流:流体自身の流れによる移動

②拡散:濃度勾配に由来する物質自身の移動、分子拡散

③重力:比重差による垂直移動、浮上、沈降

の要素が複合的に作用した結果として現れる。中でも水素ガスと他の可燃性ガスにおいて最も顕著な違いは比重であるため、水素混合層は、特に重力作用に注目して評価する 必要がある。

ここでは、水素混合層について

- ○流れを伴わない場合における発達挙動
- ○流れを伴う場合における流れ方向の発達挙動
- ○流れを伴う場合における分岐(閉止)方向の発達挙動

に分類する。

実際の置換作業では、様々な配管延長及び要素配管の組合せが考えられ、また流れの 方向や切替え方法も現時点では定められていない。したがって、上記のとおり分類した 発達挙動を条件に応じて組み合わせることによって、個別の場合における水素混合層の 発達挙動を見積もり、置換方法の検討に向けた判断材料とすることができる。

5.2 流れを伴わない場合における水素混合層の発達挙動

ここでは、流れを伴わない場合、即ち、移流のない静止状態において水素ガスと窒素ガスの界面が形成された場合における水素混合層の挙動について述べる。これは本来の置換作業の過程において水素導入時のバルブ開放直後のみに生じる現象ではあるが、拡散と重力の作用による水素ガスの特徴的な挙動が顕著に現れており、また、いかなる条件においても界面の生成に伴い瞬間的に生じる現象であるため、どのような置換方法を用いる場合でも、その初期挙動に大きく寄与する。したがって、配管内における水素ガスの挙動を把握する上で押さえておくべき重要な現象である。

5.2.1 重力方向に沿い界面が形成された場合における水素混合層の挙動

図 5-2-1 に本解析に係る試験方法の模式図を示す。図 5-2-1 に示すとおり、配管系を水平方向に配置し、メインバルブから上流側(助走管内)を水素、下流側(石英管)を窒

素で満たした後、いずれも大気圧の状態から圧力をかけずにメインバルブを開放した場合について、水素混合層の発達挙動を解析した。本条件により、流れを伴わない水素分子の移動、即ち窒素層に対し、分子拡散と重力効果のみによって生じる水素層の作用を明らかにすることができる。ここでは、メインバルブ中心軸を基準に、水素ガス濃度 4%(管径方向の断面平均)の位置までの距離を水素混合層長 LHとし、LHの時間的な推移を解析した。

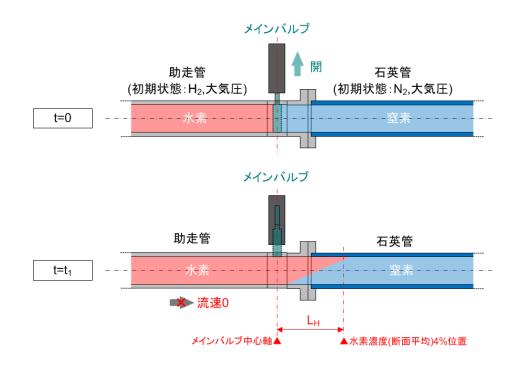


図 5-2-1 試験方法の模式図(流速 0 、直管水平配置)

図 5-2-2、5-2-3 にバルブ開放後の L_H の経時変化を示す。グラフにおける時刻 0 はメインバルブ開放の完了時刻を示し、本試験に用いた模擬配管と計測装置の仕様により、1 点目のデータ取得はメインバルブ開放完了から 0.5 秒後となる。また、模擬配管の構造上、メインバルブ中心軸から石英管のメインバルブ側観測端面までの 86.5mm の間がブラインドエリアとなる。以降のデータはこれらを反映させた結果である。

図 5-2-2 に示すとおり、バルブ開放後約 0.8 秒の時点で、水素が窒素層へ約 330mm 進行している。これは、水素層と窒素層が接続された瞬間、界面に作用する重力分布により、比重が軽い水素が上方へ、比重が重い窒素が下方へと移動しているものと考えられる。したがってこの初期に起こる挙動は比較的速い現象となり、0点と 1点目の計測値の関係から指数関数的な変化を辿っているものと推察される。水素の移動速度はその後緩和され、緩やかな進行へと移行する。図 5-2-3 に示すとおり、長時間の

変化をみると、時間に対し発達量が減衰する。これは、初期の水素層の流れ込みの後、エントロピ増大に向けた推移、即ち、継続する重力や分子拡散に由来する分子の移動により、水素層の進行と同時に管内の状態がガス濃度分布を均一にする変化へと移行するためである。これらの定性的な特徴は、移流を伴わない場合における水素混合層の発達量が経過時間に対し減衰する累乗関数により良好に表すことができることを示唆する。

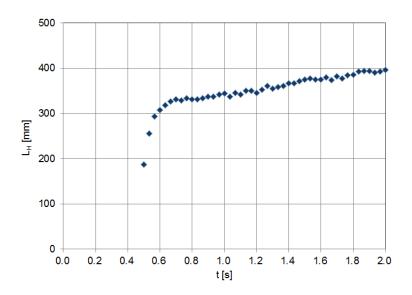


図 5-2-2 重力に沿う方向に界面が形成された場合の 水素混合層 LHの経時間変化 (メインバルブ開放完了後 0 から 2.0s)

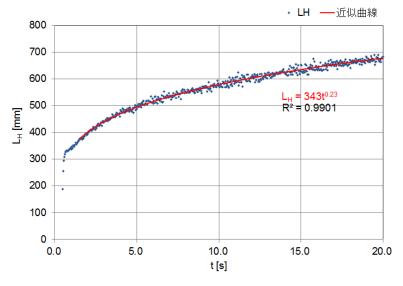


図 5-2-3 重力に沿う方向に界面が形成された場合の 水素混合層 L_H の経時間変化

(メインバルブ開放完了後 0 から 20.0s)

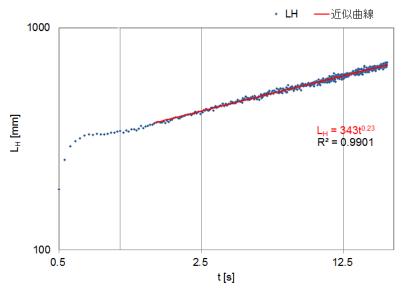


図 5-2-4 重力に沿う方向に界面が形成された場合の 水素混合層 LHの経時間変化 (メインバルブ開放完了後 0 から 20.0s、対数表示)

図 5-2-3 において計測結果から得られる近似曲線を赤線で示す。また、図 5-2-4 に図 5-2-3 の結果を両対数軸で表した場合のグラフを示す。ここで、近似曲線の適用範囲はバルブ開放後 2.0 秒以降の結果を用いた。これは、バルブ開放直後の急峻な変化から勾配が変曲し、安定するまでの時間を計測結果の挙動から 2.0 秒と見積もったためである。両者から、流れを伴わない重力に沿う方向に界面が形成された場合における水素混合層の長さ L_H は、バルブ開放からの経過時間を t として

$$L_H = 343 \cdot t^{0.23} [mm] \quad (t \ge 2.0)$$
 (5.2.1)

により見積もることができる。

5.2.2 重力方向を法線として界面が形成された場合における水素混合層の挙動 図 5-2-5 に本解析にかかる試験方法の模式図を示す。

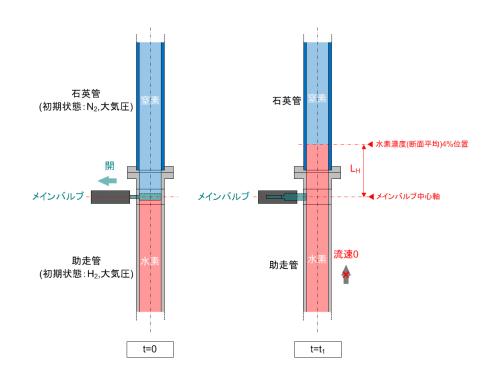


図 5-2-5 試験方法の模式図(流速 0、直管鉛直配置)

図 5-2-5 に示すとおり、図 5-2-1 の試験系を鉛直方向に配置し、同様に定義した水素混合層長 L_H の経時変化を解析した。この場合、重力方向を法線とする界面が形成されるため、図 5-2-1 の配置に対し界面に対し均一に重力が作用する点が大きく異なる。解析結果を図 $5-2-6\sim5-2-8$ にそれぞれ示す。

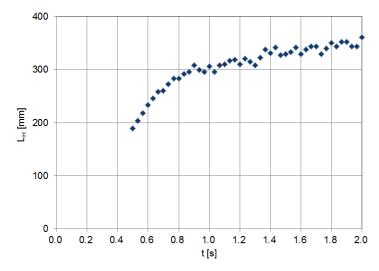


図 5-2-6 重力方向を法線として界面が形成された場合の 水素混合層 LHの経時間変化 (メインバルブ開放完了後 0 から 2.0s)

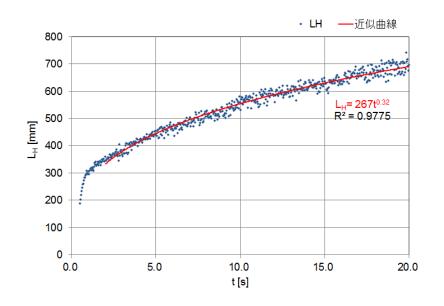


図 5-2-7 重力方向を法線として界面が形成された場合の 水素混合層 LHの経時間変化 (メインバルブ開放完了後 0 から 20.0s)

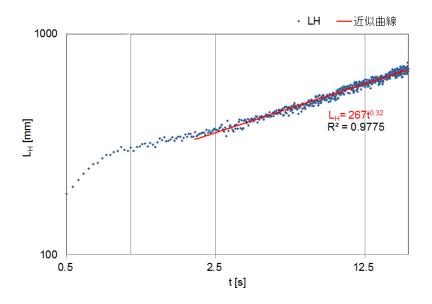


図 5-2-8 重力方向を法線として界面が形成された場合の 水素混合層 LHの経時間変化 (メインバルブ開放完了後 0 から 20.0s、対数表示)

図 5-2-6 に示すとおり、重力方向を法線として界面が形成される場合におい

ても、初期に窒素側への比較的速い水素の進行が、バルブ開放後約 0.8 秒時点における変曲点までの挙動として認められる。この場合、界面にかかる重力分布は均一であるため、比重による水素の移動の作用は界面において一様に生じる。また、初期挙動は 0 点と 1 点目以降の計測値の関係から、勾配は急峻ではあるものの概ね線形の相関で推移しているものと推察される。以降、図 5-2-7、5-2-8 に示すように、重力に沿う方向に界面が形成された場合と同様に、混合層の発達速度は緩和され、減衰する方向へと推移するが減衰の程度は若干緩やかである。計測結果から得られた近似曲線により、重力方向を法線として界面が形成された場合の水素混合層 LH は

$$L_H = 267 \cdot t^{0.32} [mm] \quad (t \ge 2.0)$$
 (5.2.2)

により、見積もることができる。

実際の置換作業にあてはめると、バルブの開放に伴い、圧力印加の有無、配置方向にかかわらず、水素が瞬間的に窒素側へ 300mm 程度流入する。本調査においてメインバルブとして用いたゲートバルブは、実作業で想定されるボールバルブ等と比較すると開閉機構が異なっており、汎用的に用いられるボールバルブでは開閉時に摺動による効果が加わるなど、厳密には本調査における両ガス層の接続条件との差異がある。しかしながら、この初期挙動は水素と窒素の比重差による比較的強い作用であるため、摺動等に伴い他の外力が加わった場合でも概ね一致する結果を示すものと考えられる。更に、初期挙動の後流れがない状態においても、混合層が生成され、接続後の経過時間に対し、界面と重力方向の関係によりそれぞれ式(5.2.1)及び式(5.2.2)に示す長さまで発達する。これらの挙動は、窒素から水素への置換であるがために顕著に生じる特異な現象であり、特に、配管延長が短い配管系においては、十分考慮し、置換作業の運用方法へと反映する必要がある。

5.3 流れを伴う場合における流れ方向の水素混合層の発達挙動

ここでは、移流を伴う場合における流れ方向の水素混合層の発達挙動について述べる。前提として、流れ方向における水素混合層の基本的な発達挙動の特徴を示し、混合層の定義について押さえておくために、図 5-3-1 に直管水平配置、Re=100 の条件にて窒素から水素に置換した場合の水素 4%及び水素 75%位置の時間変化を示す。また、比較のため、移流を伴わない場合(流速 0)における水素 4%位置の時間変化と平均流速×時間により求まる基準面の位置を併記する。基準面の位置は、水素層と窒素層の理想的な界面を仮定し、この界面が、平均流速のみに依存して管内を進行した場合の位置を示す。

図 5-3-1 に示すとおり、水素濃度 4%の位置についてみると、初期挙動は流速 0 の場

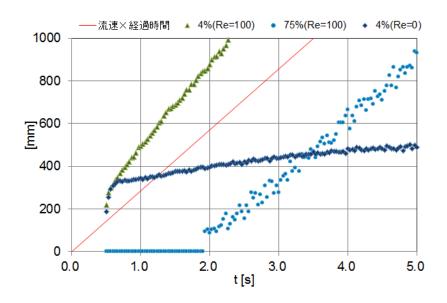


図 5-3-1 水素置換時における配管ガスの基本挙動(直管水平配置、Re=100)

合の挙動とほぼ一致している。これは、移流による混合層の発達と比較して、重力や分子拡散による混合が支配的に作用していることを示している。その後初期挙動の寄与が薄れ、比較的緩やかな発達へと移行する。その勾配は、流速から求まる基準面の勾配と比較して急峻になっている。一方、水素濃度 75%の位置についてみると、バルブ開放から進行開始までに 2.0 秒程度の時間遅れが認められる。これは、初期挙動に伴いバルブ上流の水素側に窒素が逆流し、水素濃度が低い領域が一定量形成されるために生じている。その後、75%層の進行が開始されると、その勾配は流速から求まる基準面の勾配とほぼ一致する。これらの挙動から、水素混合層の基本的な発達挙動について、バルブの開放に伴い、初期挙動によって水素 4%位置の急激な進行や窒素の逆流による 75%位置の進行の遅れなど特異な現象が生じるが、これらの作用が収まると、混合層はある基準面(ここでは水素 75%位置)に対し進行方向に向けて発達するものと理解することができる。

これらの基本的な挙動を踏まえ、水素混合層の見積りに向けた解析を行うが、実用に当たり、配管内における混合層の位置を示す何らかの基準が必要である。流速0の場合の例に従い、メインバルブ中心軸を基準としてもよいが、時間の経過に伴い、水素層長が延びる程、水素層の全長に占める混合層長の割合が低下し、解析結果における混合層そのものの発達挙動が潜在化する。したがって、ここでは図5-3-2に示すとおり、混合層 L_H を定義する。即ち、平均流速と時間の積により求められる位置を基準面 X とし、混合層長 L_H を X と水素濃度 4%位置間の距離と定義する。これにより、実用では、設定された平均流速とバルブ開放後の経過時間により X の位置が求められ、X より下流側に距離 L_H 分水素混合層が発達しているという形で、水素濃度 4%の位置を見積もる

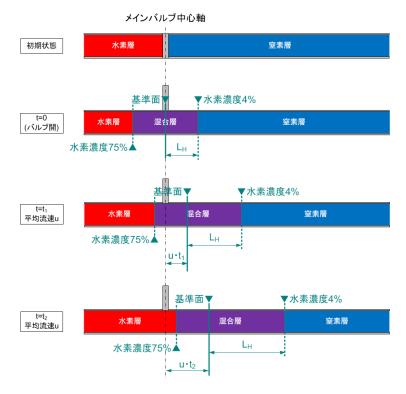


図 5-3-2 混合層長 L_Hの定義

ことができる。一方、前述

のとおり、初期挙動によりメインバルブ上流側への窒素の逆流が生じるため、Xより上流側にも混合層が存在する。しかしながら、図 5-3-1 に示したとおり、水素濃度 75%位置は水素の導入に伴い一定時間の遅れはあるものの、流速と一致する速度で進行することが検証されているため、例えば図 5-3-1 の事例では X の約 2.0 秒遅れで追従するという認識で十分である。必要に応じ水素 4%から 75%間の距離を見積もることもできる。これらの定義にしたがい、以下、水素混合層の発達挙動解析と混合層長の見積りを行う。

5.3.1 直管内流れにおける混合層長の見積り

(1) 水平方向流れ

図 5-3-3 に、Re 数 50 から 200 までの各条件における水素濃度 4%位置の時間変化を示す。

前述のとおり、初期時間変化は急峻であり、変曲点を経た後、時間に対し線形に比較的緩やかな発達へと移行する。初期挙動は短時間に生じるため、いずれの条件でも概ね一致し、約 250mm まで発達している。緩和後の発達勾配は、Re 数ごとに異なっているが、これらの特徴は、 L_H が時間 t の一次関数として L_H =At+B で表されることを示唆している。図 5-3-4 に混合層長 L_H について変曲点以降の挙動に対し線形近似を施した結果を示す(近似式は切片を無視し勾配のみを示している)。図 5-3-5 に各近似式から

得られる勾配(発達勾配)と流速(Re 数)の相関を示す。図 5-3-4 に示すとおり、本調査の範囲において、発達勾配と Re 数は良好な線形の相関を示す。相関係数は 0.93 以上である。これらの結果により、直管水平配置における混合層長 L_H は

$$L_H = 328u \cdot t + 250 [mm] \quad (t \ge 1.0)$$
 (5.3.1)

として見積もることができる。

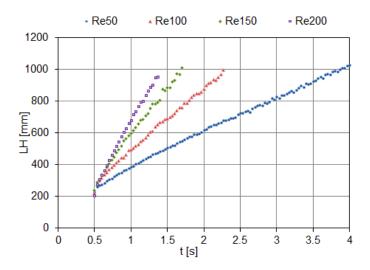


図 5-3-3 変曲後の発達挙動(直管水平配置)

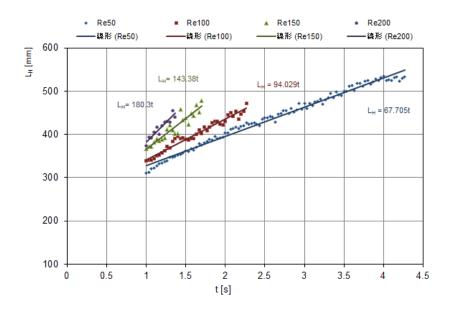


図 5-3-4 変曲後の発達挙動の線形近似(直管水平配置)

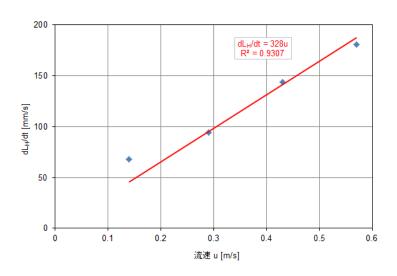


図 5-3-5 発達勾配の流速(Re 数)依存性(直管水平配置)

(2) 鉛直方向流れ

同様の解析を鉛直方向の流れに対し適用した結果を図5-3-6、5-3-7にそれぞれ示す。

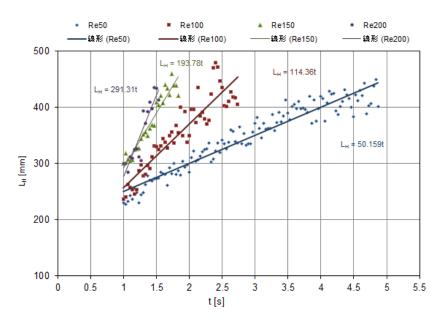


図 5-3-6 変曲後の発達挙動の線形近似(直管鉛直配置)

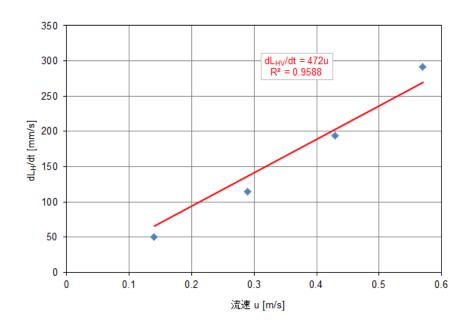


図 5-3-7 発達勾配の流速(Re 数)依存性(直管鉛直配置)

直管の場合も同様に、発達勾配と Re数は良好な線形の相関を示す。相関係数は 0.95 以上である。これにより、直管鉛直配置における混合層長 L_H は

$$L_H = 472u \cdot t + 250 \ [mm] \ \ (t \ge 1.0) \eqno(5.3.2)$$

として見積もることができる。

5.3.2 曲管内流れにおける混合層長の見積り

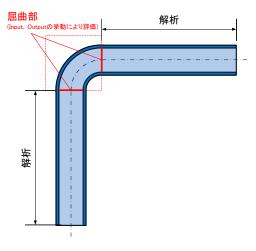


図 5-3-8 曲管内流れの解析方法

図 5-3-8 に示すように曲管については、水素濃度 4%の位置の推移を配置方向に毎に解析し、それぞれ直管水平配置、鉛直配置における挙動と比較する。屈曲部については、4%濃度位置の解析が煩雑となるため、ここでは屈曲部を除く直管部について解析し、屈曲部による効果は、屈曲部のインプット及びアウトプットデータから考察する。図 5-3-9 に曲管(鉛直→水平配置)内流れにおける水素濃度 4%位置の推移(Re=100)と直管水平、鉛直配置の場合を比較した結果を、図 5-3-10 に同曲管(水平→鉛直配置)の結果をそれぞれ示す。

図 5-3-9 に示すとおり、鉛直→水平配置において、屈曲部に至るまでの挙動は直管 鉛直配置と一致する。その後屈曲部を通過後水平方向流れへと変化する。この時、曲りの無い直管内流れと比較して、4%位置の移動が減速する。図中の点線部がこれを示しており、この事例では屈曲部(直線換算にて 84.3mm)の通過に約 0.4 秒を要していることを意味している。これは、試験結果やシミュレーション解析結果により示したとおり、屈曲部において旋回流が生じ、渦状の流れ場が生成されることにより、流れの推進力の一部が、屈曲部における混合作用に移るためであると考えられる。屈曲部通過後の挙動は、この時間遅れ分を除けば直管水平配置の場合と一致することが確認された。図 5-3-10 についても同様であるが、水平→鉛直配置の場合、屈曲部の通過に更に時間を要し、この事例では 0.7 秒を要している。これは、配置方向により、旋回流の影響がより強く作用しているためであると考えられる。

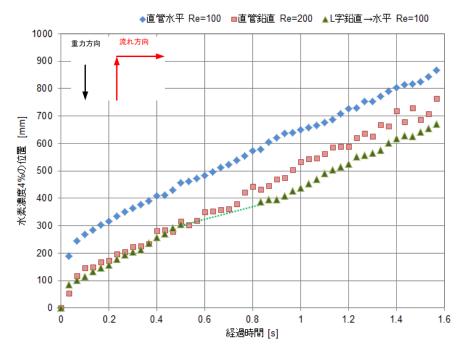


図 5-3-9 曲管内における水素 4%位置の挙動(鉛直→水平配置)

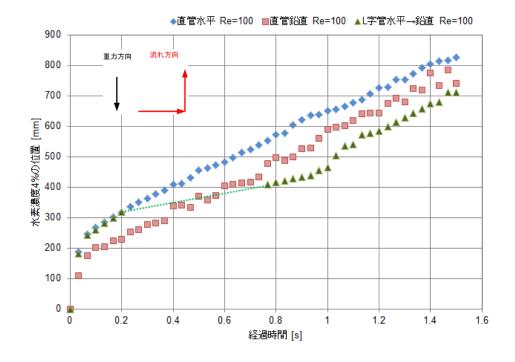


図 5-3-10 曲管内における水素 4%位置の挙動(水平→鉛直配置)

したがって、配管構成に曲管を含む場合、屈曲部を通過するごとに、4%位置の見積りに対し時間遅れを加味することで曲管の効果を反映させることができる。前述のとおり、遅延時間は鉛直→水平配置について約0.4秒、水平→鉛直配置について0.6秒、水平→水平配置について0.4秒である。また、これらの影響は、配管の規模が比較的大きい場合、全体の時間スケールに対し比較的影響が小さく、遅延方向の効果は混合層の発達の観点で安全サイドとなるため、屈曲部の直管相当長を配管延長に加えるのみとし、考慮しなくても良い。

5.4 流れを伴う場合における分岐(閉止)方向の混合層発達挙動

閉止された分岐への水素の進行は、水素の特徴的な挙動が最も顕著に現れる条件の一つであり、置換作業の検討を行う上で最も留意すべき挙動である。水素は、流速 0 の事例で示したとおり、窒素との界面が形成された瞬間から窒素層へ進行する。このことから、分岐管において、流れ方向以外の閉止部へ水素が進行することは容易に想像できるが、流速 0 の条件との大きな違いは、界面に絶えず高濃度の水素が供給され続ける点である。ここでは、閉止方向への水素混合層の発達について、各条件について定量的に評価する。

5.4.1 水平方向が閉止されている場合

図 5-4-1 に、水平方向が閉止されている場合の混合層長 L_Hの定義を示す。

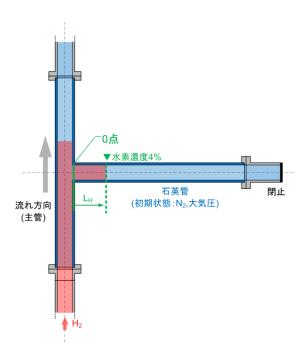


図 5-4-1 水平方向が閉止されている場合の混合層長 LH

図 5-4-1 に示すとおり、鉛直方向を主管、分岐された水平方向を枝管とし、水素の流れは主管方向である。枝管部は下流側先端が閉止されている。この配管条件において、主管に流れる水素により窒素層との界面が形成される主管と枝管の接続部を 0 点とし、枝管方向に発達する水素 4%位置までの距離を混合層長 L_H と定義した。

図 5-4-2 に Re=100 及び 200 の主管方向流れに対する L_H の時間変化を示す。時間 軸の 0 点は L_H の発達開始時刻とした。

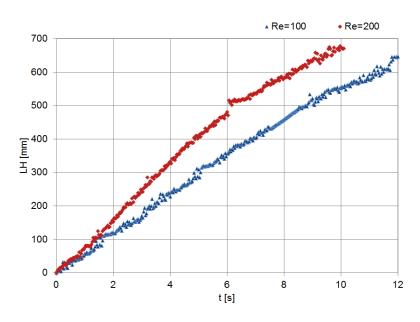


図 5-4-2 水平方向に分岐する場合の混合層長 LH の時間変化

図 5-4-2 に示すとおり、閉止水平方向において L_H の発達は、時間の経過に対し初期は線形の相関を示し、長期でみると徐々に減衰する挙動となる。この挙動は、主に分子拡散による効果であると考えられ、したがって、管内全域の水素分子の分布を均一にする方向に作用する。これは、主管方向に水素を流し続ける限り、分岐管内の水素濃度は上昇を続け、最終的には 100%に至ることを意味する。また、分岐管への水素の侵入に伴い、侵入した水素に相当する量の窒素が主管側へ排出され、主管流れに混合する。したがって、主管流れにおける分岐部より下流側の領域は、 L_H が分岐方向へ発達を続ける限り、少量ではあるが窒素が含まれるため、厳密に水素 100%に至ることがない点にも留意が必要である。

 L_H の Re 数に対する相関について考察すると、Re 数の増大に伴い、 L_H 層の発達量も促進されることがわかる。

図 5-4-3 に、図 5-4-2 の結果を両対数表記し、累乗近似を施した結果を示す。いずれの条件についても、時間の経過に従い、近似曲線と高い相関を示しており、1 秒付近において特性が変化していることがより顕著に現れている。また、近似式の指数はいずれも 0.96 であり、等しい値をとる。いずれの条件もその減衰の程度は小さく、本調査における観測の範囲では、時間に対し線形に近い勾配で L_H の発達が推移していることがわかる。このように、試験結果から得られた累乗近似関数により、水平方向に分岐する場合の混合層長 L_H について見積ることができる。ただし、その適用範囲は、本調査にて実施した条件の範囲に限られることに留意が必要である。

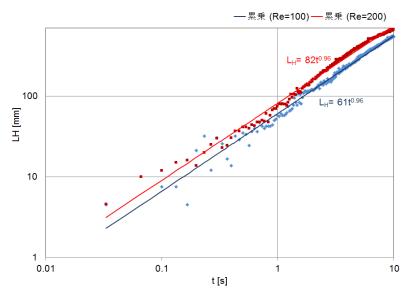


図 5-4-3 水平方向に分岐する場合の混合層長 LHの時間変化(両対数表示)

5.4.2 鉛直方向が閉止されている場合

図 5-4-4 に鉛直方向が閉止されている場合における水素混合層 L_Hの定義を示す。

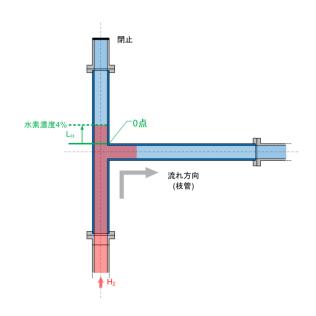


図 5-4-4 鉛直方向が閉止されている場合の混合層長 LH

この場合、水素は主管中央の分岐部から枝管方向へ流れており、主管の分岐部より下流側は閉止されている。流速 0 の挙動から図 5.4.4 の場合についても閉止側へ水素混合層が発達することが容易に予測される。ここでは水素層と窒素層の界面が形成される主管と枝管の接続部上方を 0 点とし、閉止側に向け進行する水素 4%の位置までの距離を水素混合層 L_H とした。

図 5-4-5 に、鉛直方向が閉止されている場合の混合層長 LHの時間変化を示す。

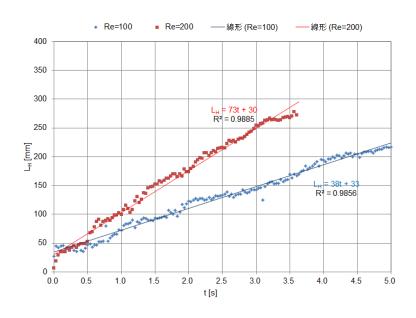


図 5-4-5 鉛直方向が閉止されている場合の混合層長 LH

図 5-4-5 によると、鉛直方向が閉止されている場合の LHは、初期に急峻な発達を示 し、その後時間に対し線形に推移しており、水平方向が閉止されている場合とは異な る挙動を示すことがわかる。したがって、LHの時間変化は、切片をもつ一次関数の形 式で表すことができ、初期の急峻な Ln の発達量は切片により、その後の緩やかな発 達量はtの係数で表される。Re 数に対する相関をみると、切片の数値がほぼ等しいこ とから、初期挙動に対する Re 数の依存性は低いものと考えられ、これは、前述の流 れ方向における L_H の発達挙動に準ずる傾向である。また、単調増加に変曲した後に ついては、係数と Re 数に相関が認められる。この点についても流れ方向における Ln の発達挙動と同様の特徴である。これは、流れ方向が界面の法線と一致する点で両者 の位置関係が共通していることから、類似の傾向を示すものと考えられる。一方、切 片や係数の数値を比較すると、上方が閉止されている分、LHの発達が抑制され、値が 小さくなっている。これらの結果から、垂直方向が閉止されている場合の LH につい ては、上述の近似式により見積もることができ、流れ方向における Lн の発達挙動と 同様に、線形近似関数における切片が Re 数によらず一定値をとり、係数は Re 数と線 形の相関を有することが推定される。ただし、本結果を基に外挿見積もりを行う場合 には、何らかの形で検証を行う必要がある。

5.5 シミュレーション解析による集合配管の置換挙動評価

前項までに、配管内における水素混合層の発達量を簡易的に見積もる手法について例示した。これらの手法は、短時間で容易に見積もりができる一方で、延長が長い複合的な構造を有する配管を対象とする場合には適用が煩雑となる。このような比較的大規模な配管系内全域のガス置換挙動を可視化、或いは濃度分布の変化を評価する場合は、シミュレーション解析による評価が有効である。前節では、本調査において用いたシミュレーション手法により、試験的に得られた配管内におけるガス置換挙動が極めて良好に再現できることを検証した。ここでは、同シミュレーション解析手法を用いて、集合建物への水素配管供給を模擬した配管系(以下集合配管と呼称する)について、空気から窒素を介して水素へ置換する場合における管内全域のガス置換挙動の評価事例について紹介する。

5.5.1 集合配管モデルの設定

本事例では、3 階建て集合住宅への水素配管供給を想定し、図 5.5.1 に示す集合 配管モデルを設定した。

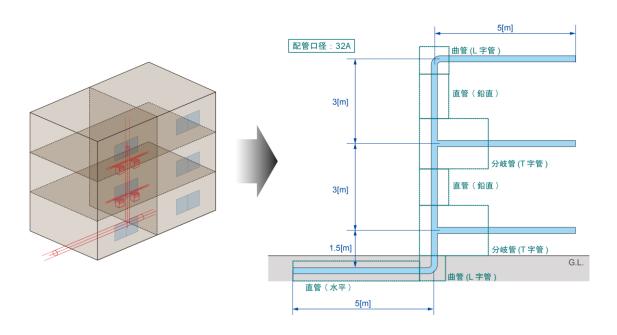
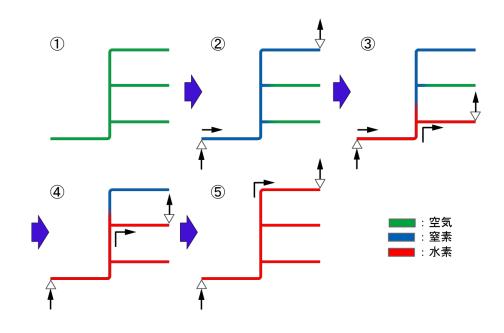


図 5-5-1 集合配管モデル

図 5-5-1 に示したモデルは、外管から 32A の直管へ水素供給がなされ、5m の延長を経て曲管により上方へ流れた後、分岐管により各階へ至る構造である。

同集合配管モデルについて、本事例において適用した水素置換方法を図 5-5-2 に示す。



- ① 初期状態(管内全域が空気 100%)
- ② 主管部(鉛直部)に窒素を供給
- ③ 1階層を水素に置換

- ④ 2階層を水素に置換
- ⑤ 3階層を水素に置換(全域水素 100%)

図 5-5-2 水素置換方法

図 5-5-2 に示すとおり、本事例では初期状態(全域が空気 100%)から主管部へ窒素を導入した後、各階層を順次水素へ置換する手順となっている。この時、各階層への分岐管内に残存する空気と供給される水素の間に一定量の窒素層が存在するため、理想的には水素と空気が混合することなく全域の水素置換が完了する想定である(これらの集合配管モデル及び置換方法については、総合調査受託者、ガス事業者の指導、助言に基づき設定した)。

5.5.2 解析条件及び解析モデル

前述の条件に対するシミュレーション解析に先立ち、解析条件と集合配管の解析 モデルを設定した。解析条件を表 5-5-1 に、集合配管の解析モデルを図 5-5-3 にそれぞれ示す。また、図 5-5-2 の置換手順に基づき、設定した 4 ステップの解析の手順を表 5-5-2 に示す。

表 5-5-1 に示すとおり、解析条件については、概ね前節と同じであり、配管系の空間的、時間的規模の拡大に合わせ、計算の時間刻み、移流項補完、時間積分法を調整している。図 5-5-3 に示すとおり、解析モデルについては集合配管モデルの構造と同一である。本解析では、表 5-5-2 における解析手順のステップを移る際、配管系の流れ方向の末端部(図中▽部)における濃度により手順切り替えの判定(ここでは水素濃度 99%)を行い、各手順間の時間ロスは 0 秒としている。この時、濃度判定箇所を配管系末端部とすると、大気の逆流等による影響が生じるため、解析モデルでは各階層とも判定箇所を配管末端部から 0.5m 上流側に設定している。また、3 階層の圧力境界は、境界面に均一に圧力分布が生じる条件として、鉛直方向の配管で終端している。

表 5-5-1 解析条件

model	
コード	FLUENT Ver16.2 及び Ver15.0
物性	密度: 理想気体 粘度: 混合ガス物性 拡散係数: 動力学的理論
乱流モデル	層流
時間刻み	1e-3[sec] ~1e-2[sec](集合配管モデル)
移流項補間	二次風上差分
時間積分法	二次陰解法
境界条件	
下流側	大気開放条件
配管壁面	断熱/すべり無
配管板厚	考慮しない

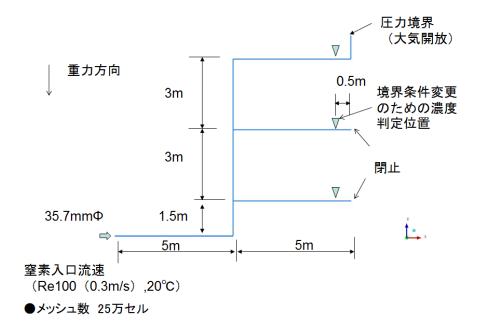


図 5-5-3 集合配管の解析モデル

表 5-5-2 集合配管の解析手順





5.5.3 解析結果

集合配管におけるガス置換挙動のシミュレーション解析結果について、表 5-5-2 に示した各ステップのデータについては付録Ⅲとして添付する。ここでは、注目すべき事例を抽出し、考察を加える。

図 5-5-4 にステップ 1 における 75 秒後の解析結果(窒素濃度分布)を示す。なお、以下図のキャプションにおける経過時間の表記については、各ステップの開始時刻を基準とし、0内はステップ 1 開始時刻を基準とした累積経過時間を示す。

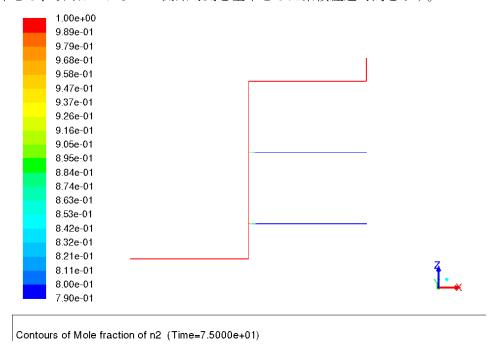
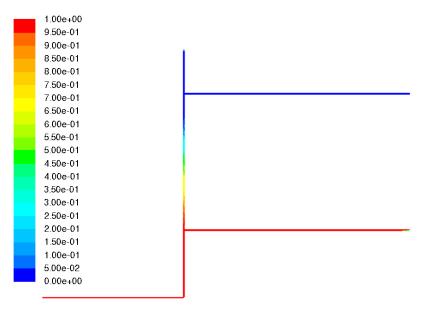


図 5-5-4 ステップ 1 t=75s 窒素濃度分布

図 5-5-4 は全域が空気の状態から主管部への窒素ガス導入が完了した状態である。 各階の分岐部に注目すると、下流側への窒素の進行は極僅かであり、これまでに本 調査にて得られている試験結果と一致していることがわかる。

図 5-5-5 にステップ 2 における 207.5 秒後の解析結果(水素濃度分布) を示す。



Contours of Mole fraction of h2 (Time=2.8250e+02)

図 5-5-5 ステップ 2 t=207.5s(282.5s) 水素濃度分布

図 5-5-5 はステップ 2 において 1 階部分へ水素の置換が完了した状態である。1 階への分岐部に注目すると、上方へ延びる主管側が閉止されているにもかかわらず、水素混合層が発達する状況が確認できる。

図 5-5-6 にステップ 3 における 10 秒後の解析結果(水素濃度分布)を示す。

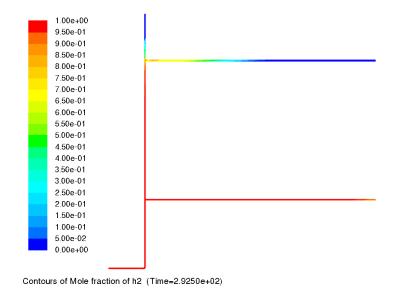
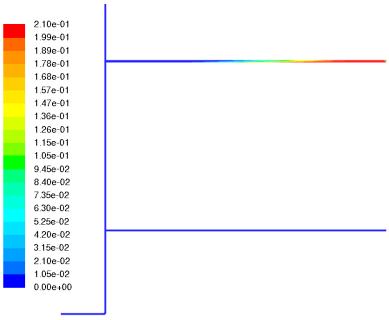


図 5-5-6 ステップ 3 t=10s(292.5s) 水素濃度分布

図 5-5-6 は図 5-5-5 に示した 1 階層への水素置換が完了し、2 階層への水素置換開始から 10 秒後の状態であるが、1 階への水素置換時に生じた主管鉛直方向への水素混合層の発達に伴い 2 階分岐部から枝管方向への水素混合層の発達が大きく進ん

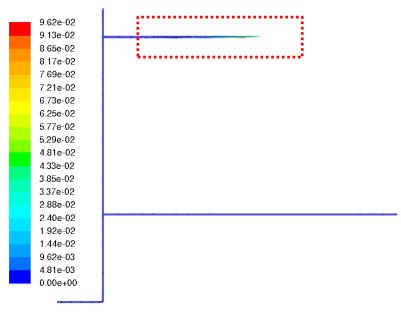
でいることがわかる。また、同時に主管鉛直方向への水素混合層の発達が開始されている。

図 5-5-7 に図 5-5-6 の状態における管内の酸素濃度分布を、図 5-5-8 に両者を合わせ、図 5-5-6 における水素濃度 4%以上の領域における酸素濃度分布をそれぞれ示す。



Contours of Mole fraction of o2 (Time=2.9250e+02)

図 5-5-7 ステップ 3 t=10s(292.5s) 酸素濃度分布



Contours of Mole fraction of o2 (Time=2.9250e+02)

図 5-5-8 ステップ 3 t=10s(292.5s)

水素濃度 4%以上の領域における酸素濃度分布

図 5-5-7 において、2 階層への水素置換が開始されたことに伴い、空気層の排出が開始される。しかし、酸素濃度分布上流側の形状からわかるとおり、この時既に水素混合層が発達し、空気層へ到達している。図 5-5-8 においてこれを確認することができ(赤点線部)、2 階への分岐枝管の中央付近に水素 4%以上と酸素の混合層が形成されている。この場合の酸素濃度の最高値は 9%であり、可燃混合比領域が生じていることが確認された。個別には付録にて図示するが、本事例ではこのようにステップ 3 において水素 4%以上、酸素 5%以上の混合層が生じる可能性が十分にあると結論付けられる。

5.6 まとめ

本章では、以下のとおり試験結果に基づき、配管内における水素混合層の発達挙動 を明らかにし、簡易的に混合層の発達量を見積もる手法を示した。

- (1) 流れを伴わない場合における水素混合層の発達挙動として、重力方向に沿った界面が形成される場合と、重力方向を法線として界面が形成される場合のそれぞれについて定量的に解析し、明らかにした。いずれの場合も初期に重力の作用による瞬間的な発達が生じ、その後発達勾配が変曲し、時間に対し減衰する緩やかな挙動へと移行する。試験結果に基づき、経過時間に対する水素混合層の発達量を累次関数で表すことができ、これによって、水素混合層の発達量を求めることができることを示した。
- (2) 流れを伴う場合における流れ方向における水素混合層の発達挙動として、水平方向、鉛直方向、曲管のそれぞれについて解析し、定量的に明らかにすると共に、混合層長の発達量を見積もる手法を示した。流れ方向の水素混合層の発達は、初期に上記(1)の効果による急峻な進行が見られ、その後時間に対しに緩やかに単調増加する挙動に移行する。また、これらの発達挙動は切片を有する一次関数として表すことができ、このとき、近似式の係数が流速(Re数)に対し線形の相関を示すことを明らかにした。これにより、水素混合層の発達量を見積もることができる。

曲管では、屈曲部の通過に伴い、混合層の発達がわずかではあるが抑制されることを示した。

(3) 流れを伴う場合における分岐(閉止)方向における水素混合層の発達挙動について、水平方向が閉止される場合と、鉛直方向が分岐される場合のそれぞれについて、定量的に解析し、明らかにした。いずれの場合も、流れ方向に水素が供給される限り、混合層が発達し、閉止側の水素濃度は 100%に向けて増加していくことを示した。また、水平方向については時間に対する累次関数の形態、鉛直方向については、切片を有する一次関数の形態で、水素混合層の発達挙動を表すことができることを示

した。

また、本調査で用いたシミュレーション手法を用いて、集合住宅への水素配管供給 を模擬した集合配管モデルについて、空気から窒素を介し水素へと置換する場合にお ける管内全域のガス置換挙動解析し、その結果を例示した。

これらの成果は、置換作業の安全性を評価における一つの指標として用いることができる。総括すると、水素置換の場合、分岐部を含まない配管系であれば、条件により、一定の不活性ガスを介することで水素と空気を混合させずに置換することが可能であると考えられる。分岐部を含む配管系の場合についても、本成果を用いて水素と空気の混合層が生成されないプロセスを見出すことは可能であると考えられる。しかしながら、いずれのプロセスにおいても、閉止方向への水素混合層の挙動に照らせば、必然的に作業時の経過時間を管理制限する必要が生じるため、不活性ガスによる全置換、または分岐部への遮断弁の設置がより安全な方策であると考えられる。

なお、本成果に基づき、本調査において実施した条件から外れた、他の置換条件における水素混合層の基本的な挙動や発達量を推定することは可能である。しかしながら、実用に当たっては、何らかの形で検証試験を経た上で適用する必要がある。また、本調査における実施条件の範囲内においても、安全性や経済性を考慮した適当な安全率を付加し、適用する必要があることに留意が必要である。

6. 総括

本調査では、一般集合建物内へ水素配管供給を想定し、要素形態として縮拡径管、L 字管、直管鉛直配置(下向き流れ)、T 字分岐管(下向き流れ)のそれぞれについて、また要素形態を組み合わせた複合配管について、水素の Re 数を 100、200 の 2 パターン以上とし、窒素から水素へ置換した場合における水素ガスの挙動、並びに空気から窒素へ置換した場合における空気(酸素ガス)の挙動を可視化した。その結果、いずれの要素形態についても、管内全域が置換ガスで満たされることが確認されると共に、以下の知見が得られた。

- (1) 流れを伴わず界面のみが形成された場合、水素は窒素層へ瞬間的に流入し、その後発達速度は緩やかになるものの、徐々に窒素層への進行を継続する。これに対し空気層への窒素の流れ込みは極めて小さく、経時変化も微量である。
- (2) 縮拡径管では、管径の縮小に伴い流速が上昇することを除き、直管の場合に対し特異な挙動は認められない。
- (3) L 字管では、屈曲部通過時に配置方向によって特徴的な挙動が認められ、特に水平-鉛直配置における水素層の剥離が顕著に確認された。また、いずれの配置についても、 屈曲部通過時に前後の挙動に対し水素層の発達が遅延する傾向にある。
- (4) 下向き流れでは、上向き流れに対し水素の混合が大きく抑制され、他の条件と比較して極めて安定な水素層の移動が実現される。
- (5) 複合配管では、配管延長の拡大に伴い、混合層が長距離に亘り発達した状態で分岐部に侵入する。水素置換の場合、流れ方向については、15 秒から 18 秒程度で全域がほぼ水素に置換される。ただし、流れ以外の閉止方向へも水素が進行し、本試験の範囲では閉止側における水素濃度は上昇を続けることが確認された。また、これに伴い閉止側から排出された窒素ガスが微量ではあるが流れ方向に混合し、閉止方向における現象が完了するまでの間、流れ方向においても厳密には水素濃度が 100%には至らない。空気から窒素への置換においても、これらの現象が認められたが、その効果は極めて少ない。また、昨年度までに実施された条件を含め、各種要素形態について管内ガス置換挙動
 - また、昨年度までに美施された条件を含め、各種要素形態について管内ガス直換季動のシミュレーション解析を行った。試験結果とシミュレーション解析結果を比較し、以下の成果を得た。
- (6) 本調査にて用いたシミュレーション手法により、各種要素配管内におけるガス置換挙動が再現され、いずれの条件についても試験結果との極めて良好に一致することを確認した。管内全域の水素濃度の推移をはじめ、直管鉛直配置における水素層発達の抑制や、L字管屈曲部による水素層の剥離など、水素の特徴的な置換挙動が細部に至るまで鮮明に再現されることを検証した。
- (7) 要素配管を組み合わせた複合配管についても、本シミュレーション手法により、良好 に再現されることを検証した。

試験結果に基づき、水素混合層の発達挙動を定量評価し、各種配管形態や流速条件に

対する混合層の発達量を明らかすると共に、本調査におけるシミュレーション手法を用いて集合配管における管内ガス置換挙動を評価し、以下の成果を得た。

- (8) 流れを伴わない場合における水素混合層の発達挙動として、重力方向に沿った界面が 形成される場合と、重力方向を法線として界面が形成される場合のそれぞれについて定 量的に解析した。いずれの場合も初期に重力の作用による瞬間的な発達が生じ、その後 発達勾配が変曲し、時間に対し減衰する緩やかな挙動へと移行する。試験結果に基づき、 経過時間に対する水素混合層の発達量を累次関数で表すことができ、これによって、水 素混合層の発達量を求めることができることを示した。
- (9) 流れを伴う場合における流れ方向における水素混合層の発達挙動として、水平方向、 鉛直方向、曲管のそれぞれについて解析し、定量的に明らかにすると共に、混合層長の 発達量を見積もる手法を示した。流れ方向の水素混合層の発達は、初期に流速 0 の場合 における効果による急峻な進行が見られ、その後時間に対しに緩やかに単調増加する挙 動に移行する。また、これらの発達挙動は切片を有する一次関数として表すことができ、 このとき、一次関数の係数が流速(Re 数)に対し線形の相関を示すことを明らかにした。 これにより、水素混合層の発達量を見積もることができることを示した。曲管では、屈 曲部の通過に伴い、混合層の発達がわずかではあるが抑制されることを示した。
- (10) 流れを伴う場合における分岐(閉止)方向における水素混合層の発達挙動について、水平方向が閉止される場合と、鉛直方向が分岐される場合のそれぞれについて、定量的に明らかにした。いずれの場合も、流れ方向に水素が供給される限り、混合層が発達し、閉止側の水素濃度は100%に向けて増加していくことを示した。また、水平方向については時間に対する累乗関数の形態、鉛直方向については、切片を有する一次関数の形態で、水素混合層の発達挙動を表すことができることを示した。
- (11) 本調査で用いたシミュレーション手法を用いて、集合住宅への水素配管供給を模擬した集合配管モデルについて、空気から窒素を介し水素へと置換する場合における管内全域のガス置換挙動を解析した。本事例において設定した置換条件では、水素と空気が混合する状態が生じることを例示し、管内ガス置換挙動の評価において、本シミュレーション手法の適用が有効であることを示した。

本調査により、配管の各種要素形態や複合配管におけるガス置換挙動が、可視化技術を用いて網羅的に示されたことは、重要な成果である。また、シミュレーション解析の再現性が試験により検証されたことで、本調査で用いたシミュレーション手法を、従来にない極めて信頼性の高い解析手法として位置付けることができ、今後水素エネルギ利用に向けた取組みが本格化する中で、様々な配管内ガス置換挙動解析等への適用が期待できる。合わせて、可視化試験とシミュレーション解析による相互補完的な評価手法の有効性が示されたことは、幅広い将来性を想起させる本調査の重要な成果である。

これらの成果が、水素配管供給の実運用、延いては水素エネルギ社会の実現への一助となれば幸いである。

付 録

I. 実験結果一覧

表 I 図表番号と実験条件一覧表

図表番号	配管形態	流れ方向	初期状態	見び 単入ガス	管サイズ	流速条件
		MINA OND INT				
I -1-1	直管水平	-	窒素	水素	32A	流速 0
I -1-2	直管水平	-	窒素	水素	32A	Re100
I -1-3	直管水平	-	窒素	水素	32A	Re200
I -1-4	直管水平	-	空気	窒素	32A	流速 0
I -1-5	直管水平	-	空気	窒素	32A	0.30m/s
I -1-6	直管水平	-	空気	窒素	32A	0.60m/s
I -2-1	直管水平	上方向	窒素	水素	32A	Re100
I -2-2	直管水平	上方向	窒素	水素	32A	Re200
I -2-3	直管水平	上方向	空気	窒素	32A	0.30m/s
I -2-4	直管水平	上方向	空気	窒素	32A	0.60m/s
I -3-1	直管水平	下方向	窒素	水素	32A	Re100
I -3-2	直管水平	下方向	窒素	水素	32A	Re200
I -3-3	直管水平	下方向	空気	窒素	32A	0.30m/s
I -3-4	直管水平	下方向	空気	窒素	32A	0.60m/s
I -4-1	縮拡径管水平	-	窒素	水素	32A→20A	Re100
I -4-2	縮拡径管水平	-	窒素	水素	32A→20A	Re200
I -4-3	縮拡径管水平	-	空気	窒素	32A→20A	0.30m/s
I -4-4	縮拡径管水平	-	空気	窒素	32A→20A	0.60m/s
I -5-1	縮拡径管鉛直	上方向	窒素	水素	32A→20A	Re100
I -5-2	縮拡径管鉛直	上方向	窒素	水素	32A→20A	Re200
I -5-3	縮拡径管鉛直	上方向	空気	窒素	32A→20A	0.30m/s
I -5-4	縮拡径管鉛直	上方向	空気	窒素	32A→20A	0.60m/s
I -6-1	L 字管(鉛直-水平)	上→水平方向	窒素	水素	32A	Re100
I -6-2	L 字管(鉛直-水平)	上→水平方向	窒素	水素	32A	Re200
I -6-3	L字管(鉛直-水平)	上→水平方向	空気	窒素	32A	0.30m/s
I -6-4	L 字管(鉛直-水平)	上→水平方向	空気	窒素	32A	0.60m/s
I -7-1	L 字管(水平-鉛直)	水平→上方向	窒素	水素	32A	Re100

I -7-2	L字管(水平-鉛直)	水平→上方向	窒素	水素	32A	Re200
I -7-3	L 字管(水平-鉛直)	水平→上方向	空気	窒素	32A	0.30m/s
I -7-4	L 字管(水平-鉛直)	水平→上方向	空気	窒素	32A	0.60m/s
I -8-1	L字管(水平-水平)	-	窒素	水素	32A	Re100
I -8-2	L 字管(水平-水平)	-	窒素	水素	32A	Re200
I -8-3	L 字管(水平·水平)	-	空気	窒素	32A	0.30m/s
I -8-4	L 字管(水平·水平)	-	空気	窒素	32A	0.60m/s
I -9-1	T字管 (主管鉛直-枝管水平)	下方向	窒素	水素	32A	Re100
I -9-2	T字管 (主管鉛直-枝管水平)	下方向	窒素	水素	32A	Re200
I -9-3	T字管 (主管鉛直-枝管水平)	下方向	空気	窒素	32A	0.30m/s
I -9-4	T字管 (主管鉛直-枝管水平)	下方向	空気	窒素	32A	0.60m/s
I -10-1	複合配管 (主管鉛直-枝管水平)	主管方向	窒素	水素	32A	Re100
I -10-2	複合配管 (主管鉛直-枝管水平)	主管方向	窒素	水素	32A	Re200
I -10-3	複合配管 (主管鉛直-枝管水平)	主管方向	空気	窒素	32A	0.30m/s
I -10-4	複合配管 (主管鉛直-枝管水平)	主管方向	空気	窒素	32A	0.60m/s
I -11-1	複合配管 (主管鉛直-枝管水平)	枝管方向	窒素	水素	32A	Re100
I -11-2	複合配管 (主管鉛直-枝管水平)	枝管方向	窒素	水素	32A	Re200
I -11-3	複合配管 (主管鉛直-枝管水平)	枝管方向	空気	窒素	32A	0.30m/s
I -11-4	複合配管 (主管鉛直-枝管水平)	枝管方向	空気	窒素	32A	0.60m/s

I.1 直管水平配置

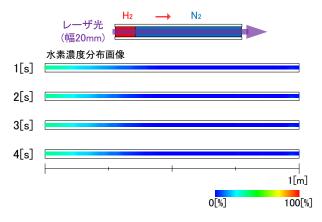


図 I-1-1 32A 直管水平配置、流速 0 における水素ガス置換挙動

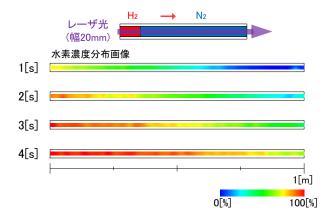


図 I -1-2 32A 直管水平配置、水素 Re=100 における水素ガス置換挙動

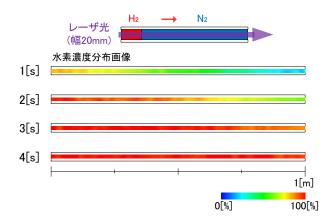


図 I -1-3 32A 直管水平配置、水素 Re=200 における水素ガス置換挙動

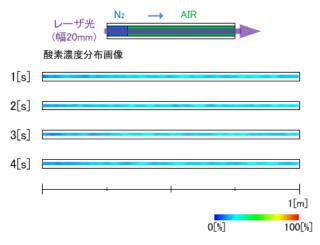


図 I-1-4 32A 直管水平配置、流速 0 における窒素ガス置換挙動

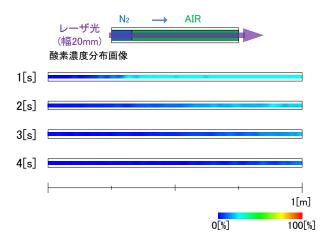


図 I -1-5 32A 直管水平配置、流速 0.30m/s における窒素ガス置換挙動

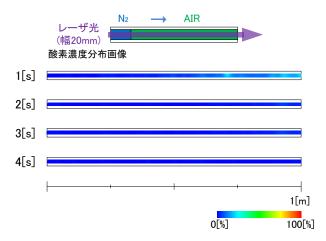


図 I-1-6 32A 直管水平配置、流速 0.60m/s における窒素ガス置換挙動

I.2 直管鉛直配置上向き流れ

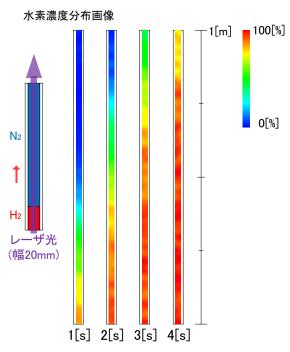


図 I-2-1 32A 直管鉛直配置上向き流れ、水素 Re=100 における水素ガス置換挙動

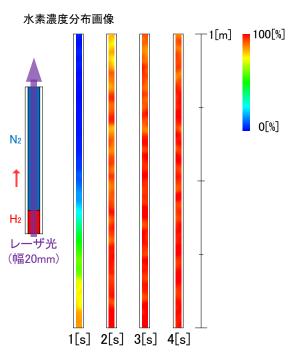


図 I-2-2 32A 直管鉛直配置上向き流れ、水素 Re=200 における水素ガス置換挙動

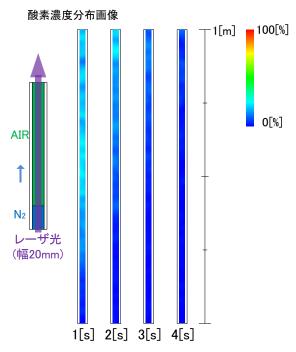


図 I -2-3 32A 直管鉛直配置上向き流れ、流速 0.30m/s における窒素ガス置換挙動

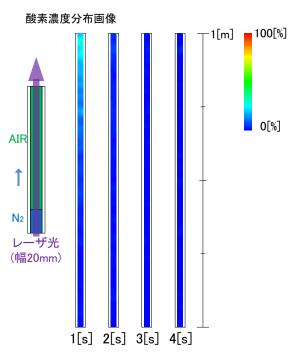


図 I -2-4 32A 直管鉛直配置上向き流れ、流速 0.60m/s における窒素ガス置換挙動

I.3 直管鉛直配置下向き流れ

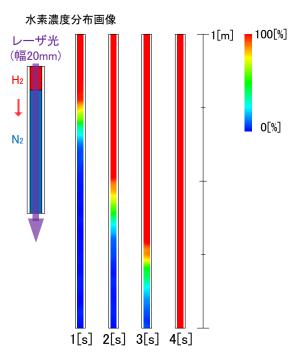


図 I -3-1 32A 直管鉛直配置下向き流れ、水素 Re=100 における水素ガス置換挙動

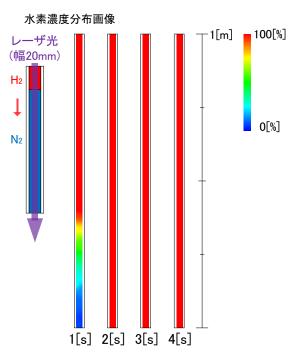


図 I -3-2 32A 直管鉛直配置下向き流れ、水素 Re=200 における水素ガス置換挙動

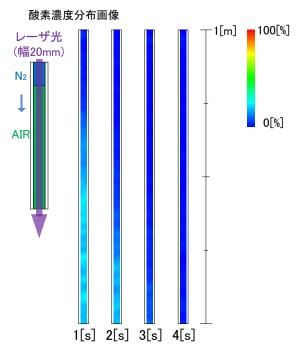


図 I -3-3 32A 直管鉛直配置下向き流れ、流速 $0.30 \,\mathrm{m/s}$ における窒素ガス置換挙動

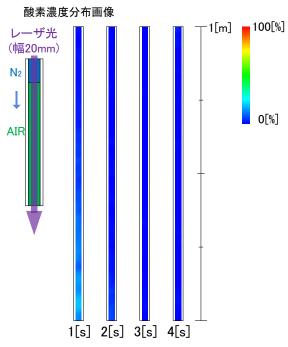


図 I -3-4 32A 直管鉛直配置下向き流れ、流速 0.60m/s における窒素ガス置換挙動

I.4 縮拡径管水平配置

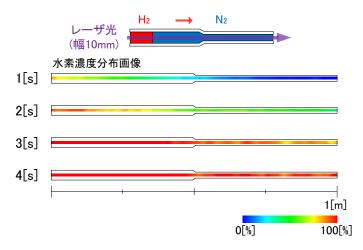


図 I-4-1 縮拡径管水平配置、水素 Re=100 における水素ガス置換挙動

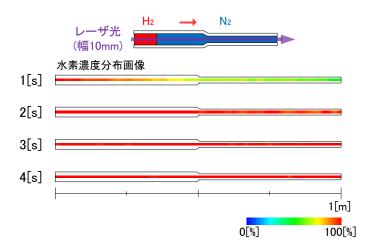


図 I-4-2 縮拡径管水平配置、水素 Re=200 における水素ガス置換挙動

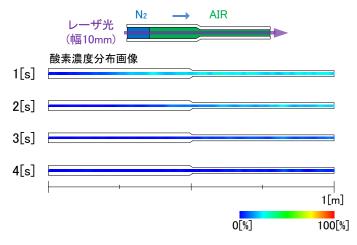


図 I -4-3 縮拡径管水平配置、流速 0.30m/s における窒素ガス置換挙動

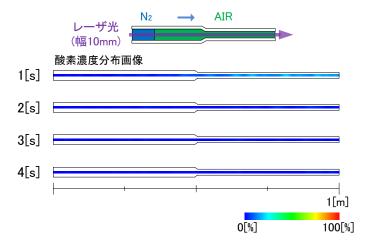


図 I -4-4 縮拡径管水平配置、流速 0.60m/s における窒素ガス置換挙動

I.5 縮拡径管鉛直配置上向き流れ

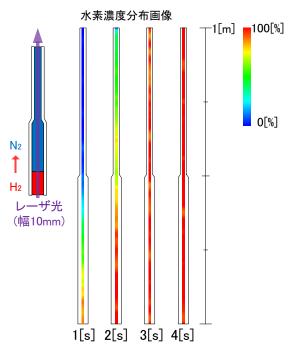


図 I-5-1 縮拡径管鉛直配置上向き流れ、水素 Re=100 における水素ガス置換挙動

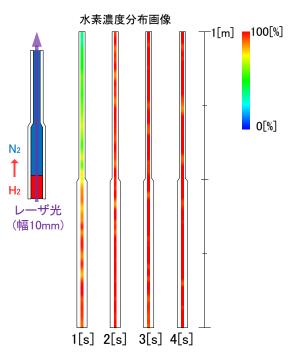


図 I -5-2 縮拡径管鉛直配置上向き流れ、水素 Re=200 における水素ガス置換挙動

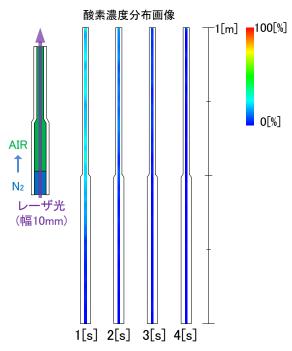


図 I -5-3 縮拡径管鉛直配置上向き流れ、流速 $0.30 \mathrm{m/s}$ における窒素ガス置換挙動

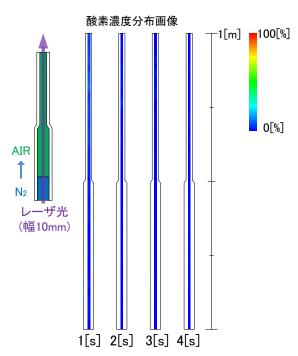


図 I -5-4 縮拡径管鉛直配置上向き流れ、流速 0.60m/s における窒素ガス置換挙動

I.6 L字管鉛直-水平配置

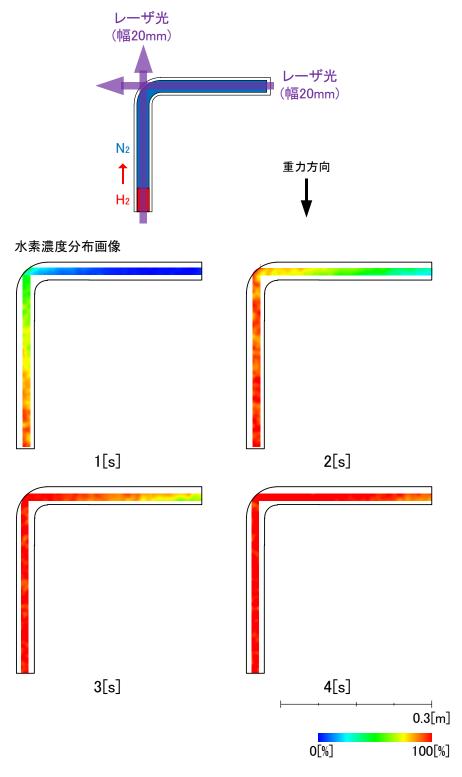


図 I-6-1 L字管鉛直-水平配置、水素 Re=100 における水素ガス置換挙動

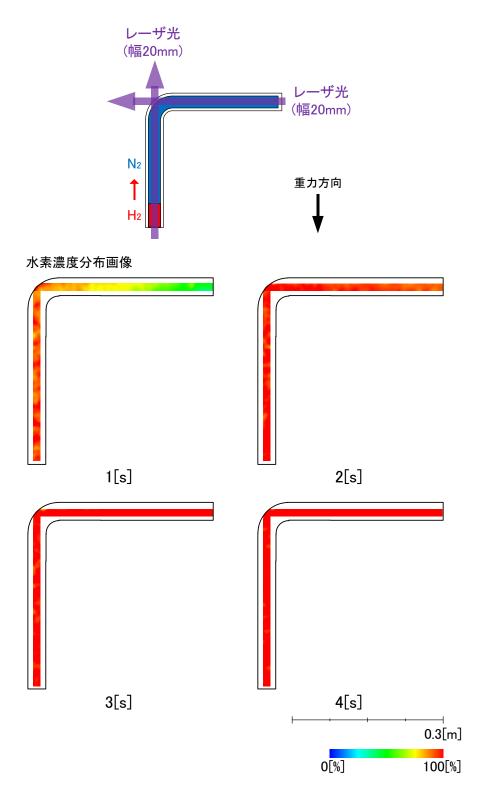


図 I-6-2 L字管鉛直-水平配置、水素 Re=200 における水素ガス置換挙動

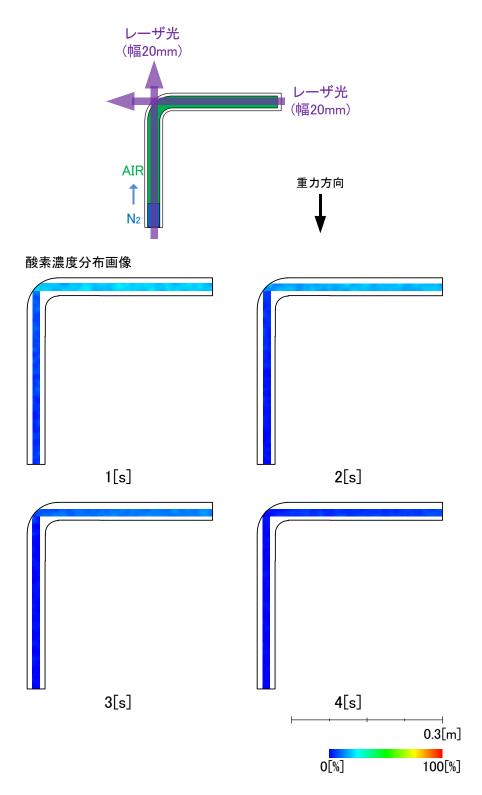


図 I -6-3 L 字管鉛直-水平配置、流速 $0.30 \,\mathrm{m/s}$ における窒素ガス置換挙動

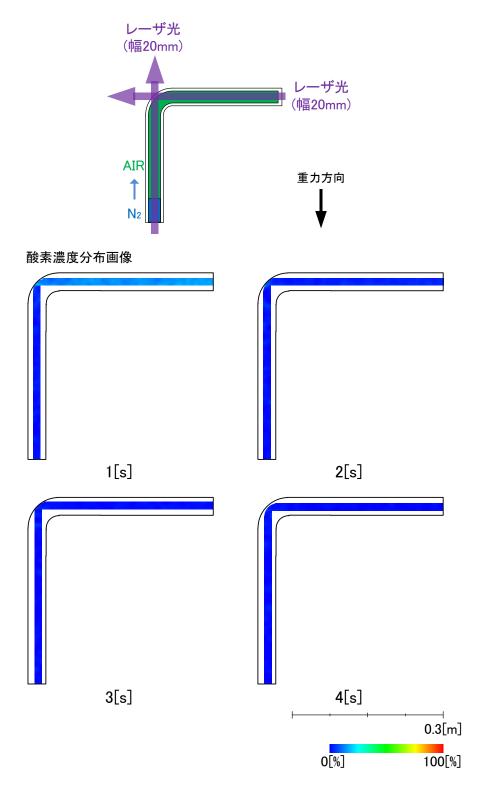


図 I -6-4 L 字管鉛直-水平配置、流速 $0.60 \,\mathrm{m/s}$ における窒素ガス置換挙動

I.7 L字管水平-鉛直配置

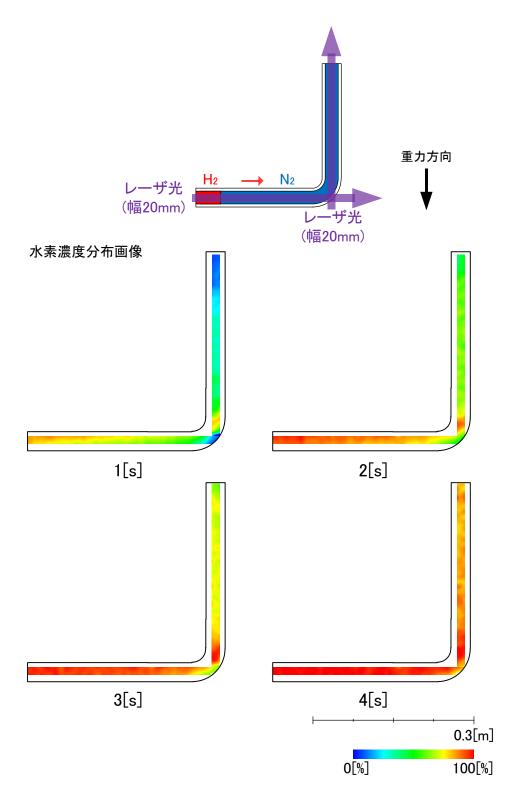


図 I -7-1 L 字管水平-鉛直配置、水素 Re=100 における水素ガス置換挙動

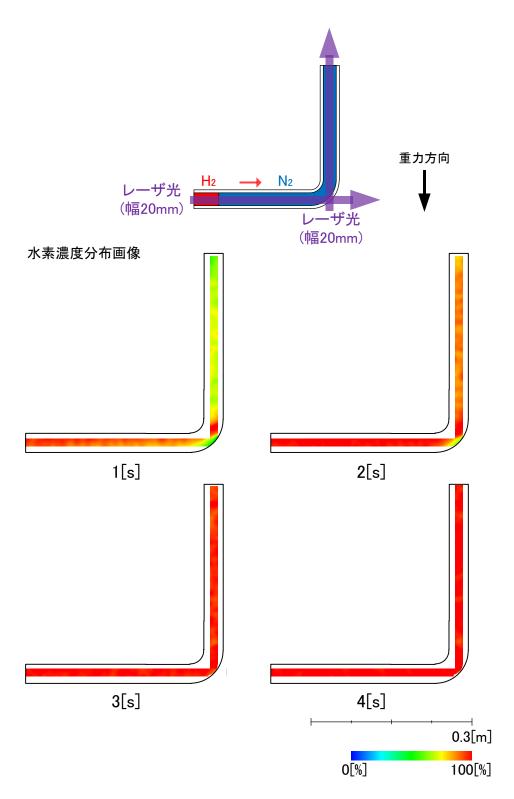


図 I -7-2 L 字管水平-鉛直配置、水素 Re=200 における水素ガス置換挙動

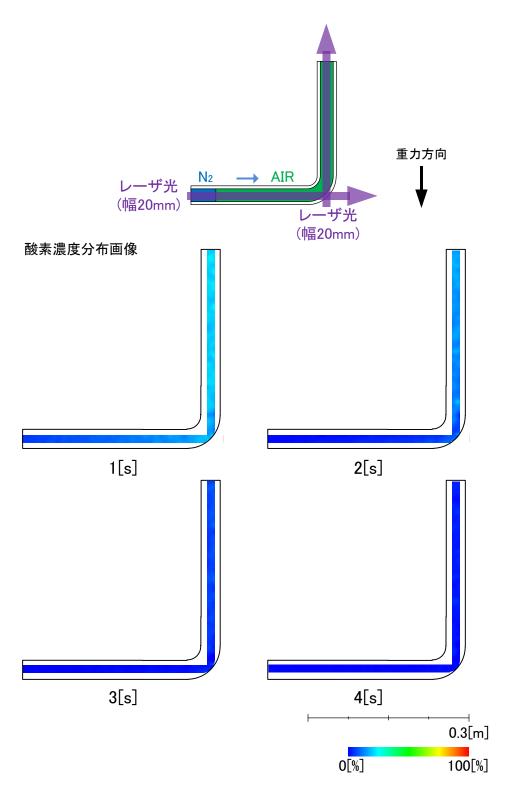


図 I -7-3 L 字管水平-鉛直配置、流速 0.30m/s における窒素ガス置換挙動

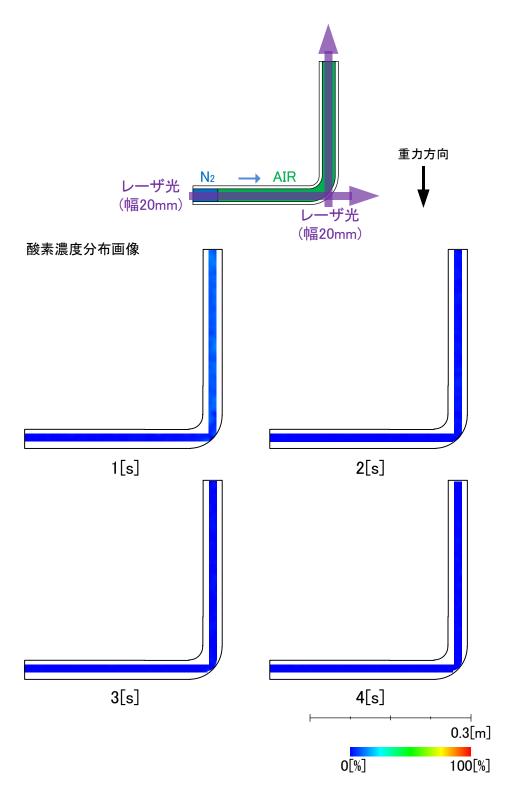


図 I -7-4 L 字管水平-鉛直配置、流速 0.60m/s における窒素ガス置換挙動

I.8 L字管水平-水平配置

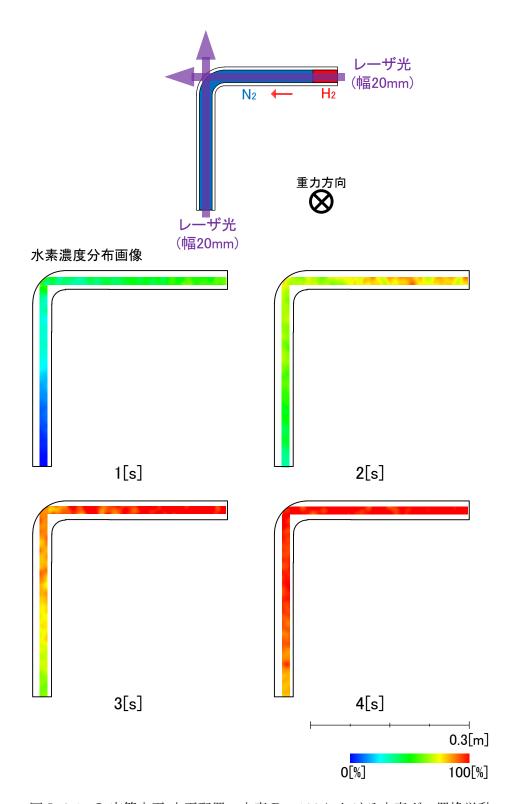


図 I-8-1 L字管水平-水平配置、水素 Re=100 における水素ガス置換挙動

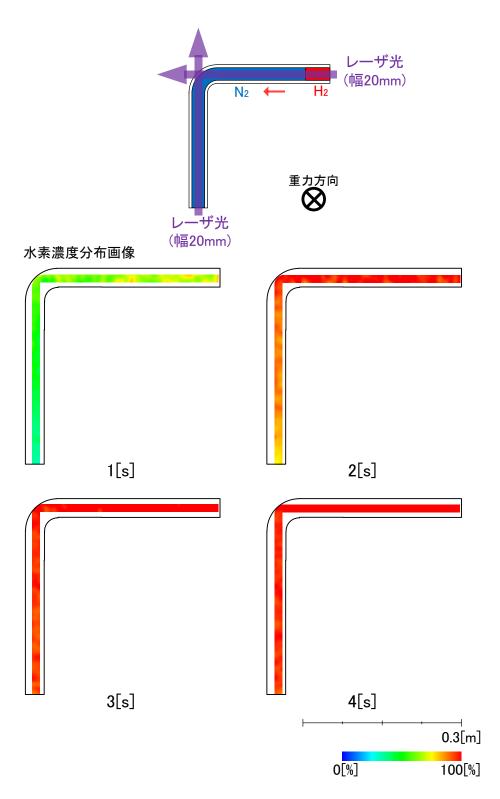


図 I-8-2 L字管水平-水平配置、水素 Re=200 における水素ガス置換挙動

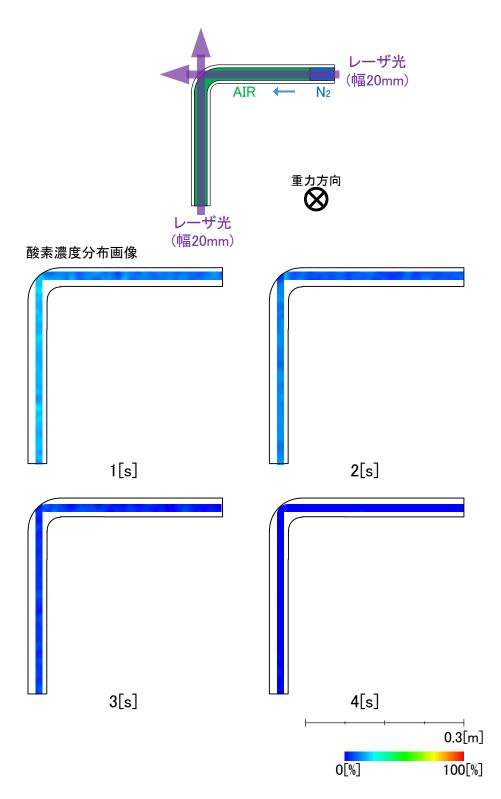


図 I -8-3 L 字管水平-水平配置、流速 $0.30 \,\mathrm{m/s}$ における窒素ガス置換挙動

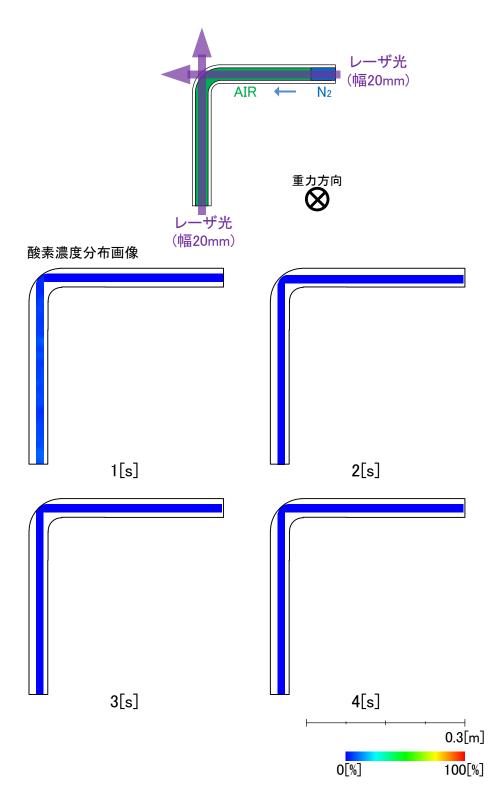


図 I -8-4 L 字管水平-水平配置、流速 0.60m/s における窒素ガス置換挙動

I.9 T字管主管鉛直-枝管水平配置下向き流れ

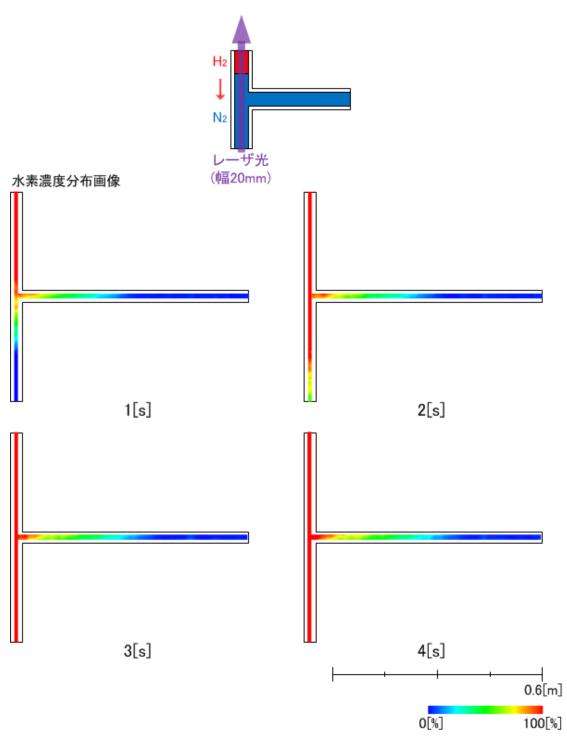


図 I -9-1 T 字管主管鉛直-枝管水平配置下向き流れ、水素 Re=100 における水素ガス置 換挙動

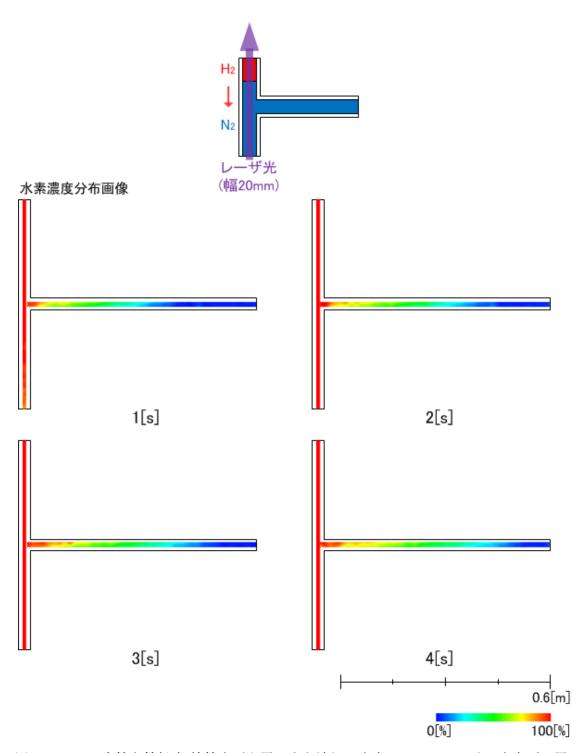
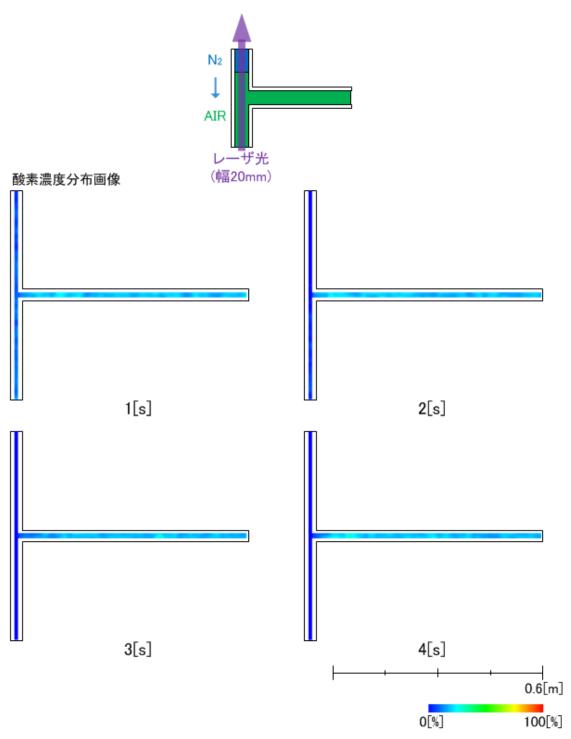
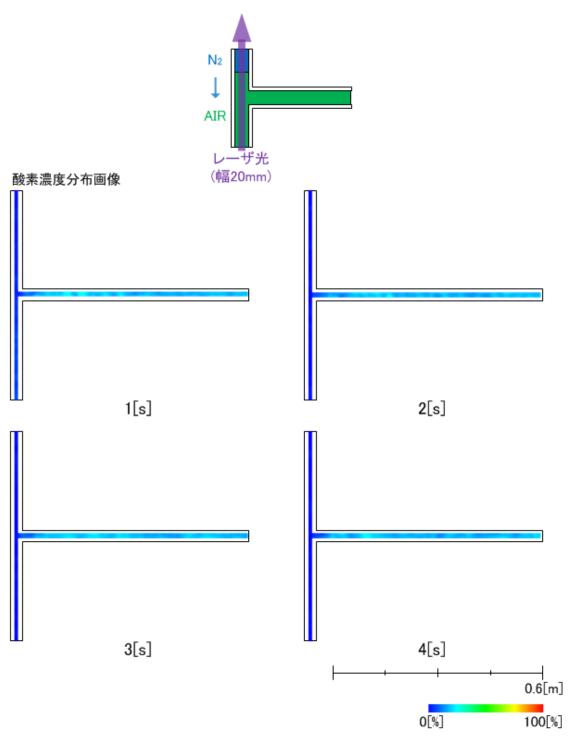


図 I -9-2 T 字管主管鉛直-枝管水平配置下向き流れ、水素 Re=200 における水素ガス置 換挙動





I.10 複合配管主管方向流れ

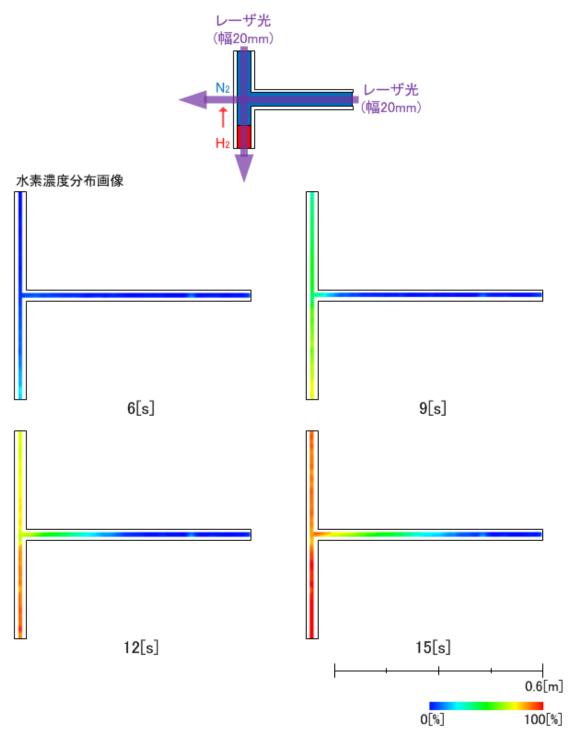


図 I -10-1 複合配管主管方向流れ、水素 Re=100 における水素ガス置換挙動

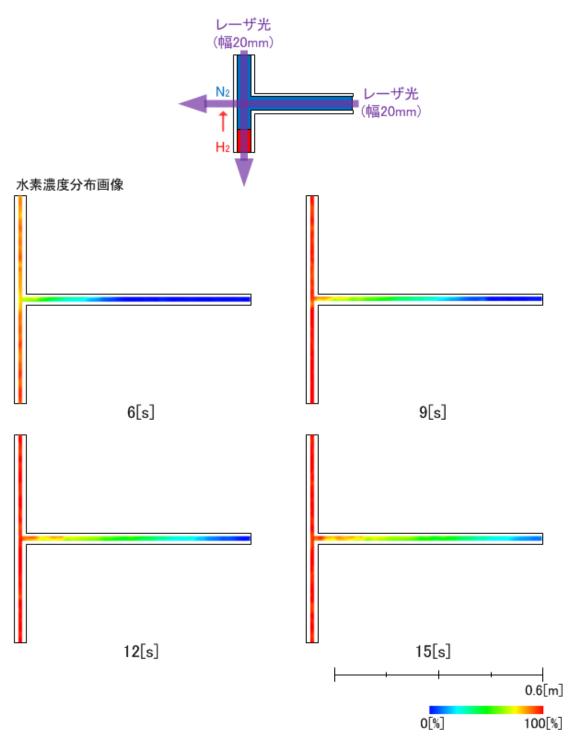


図 I -10-2 複合配管主管方向流れ、水素 Re=200 における水素ガス置換挙動

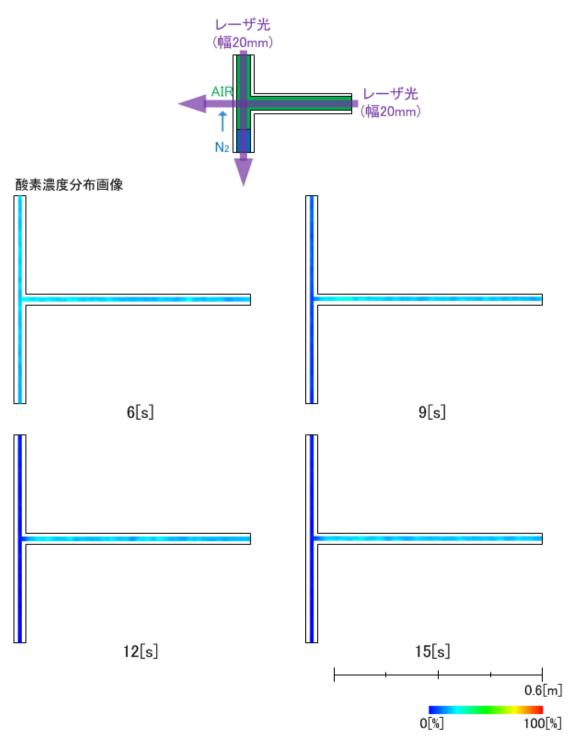


図 I -10-3 複合配管主管方向流れ、流速 0.30m/s における窒素ガス置換挙動

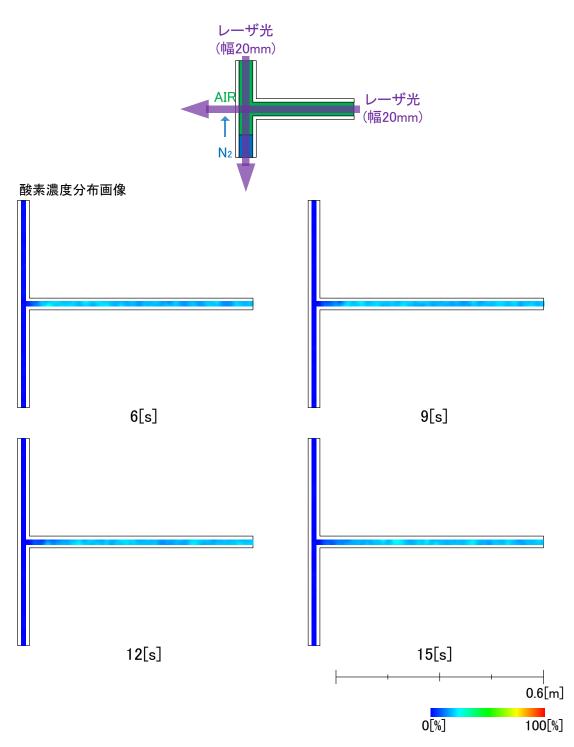


図 I -10-4 複合配管主管方向流れ、流速 0.60m/s における窒素ガス置換挙動

I.11 複合配管枝管方向流れ

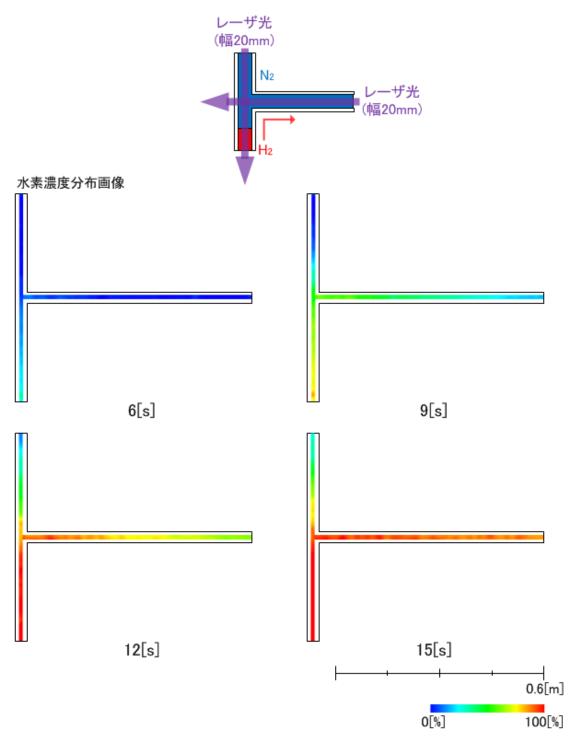


図 I -11-1 複合配管枝管方向流れ、水素 Re=100 における水素ガス置換挙動

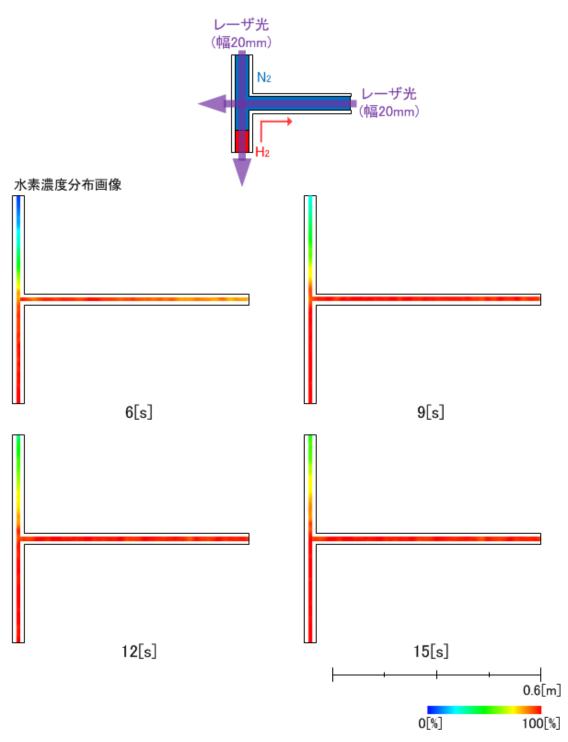


図 I -11-2 複合配管枝管方向流れ、水素 Re=200 における水素ガス置換挙動

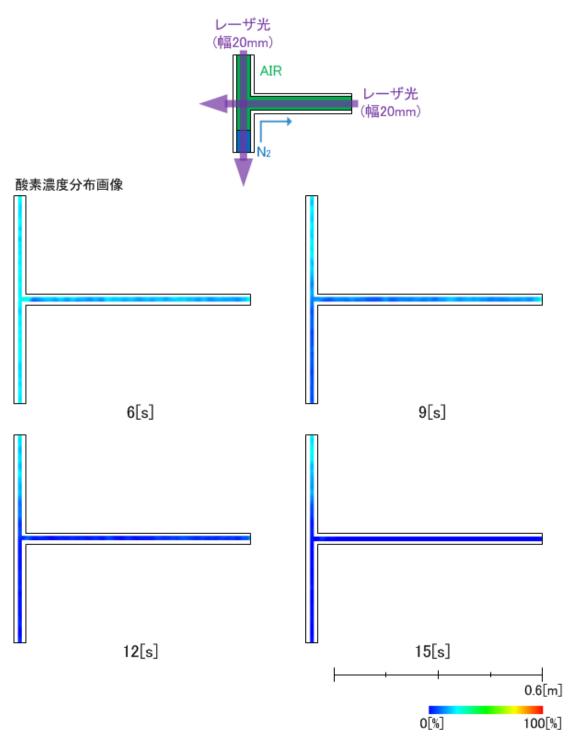


図 I -11-3 複合配管枝管方向流れ、流速 0.30m/s における窒素ガス置換挙動

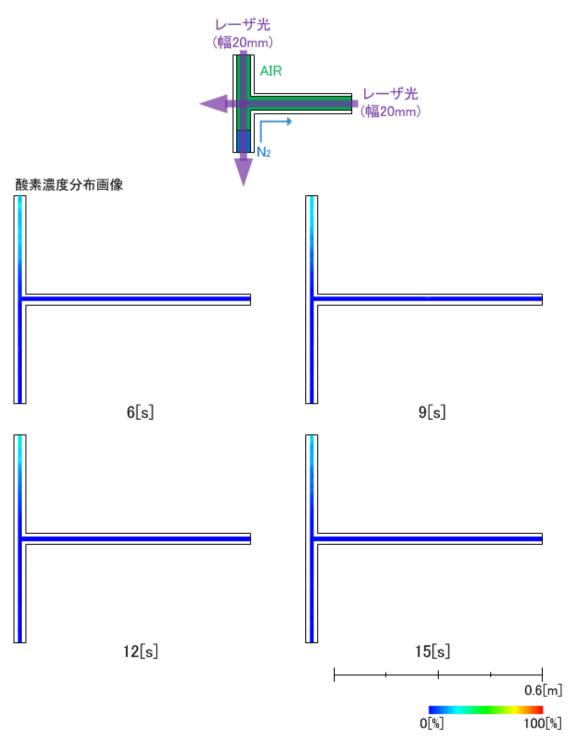


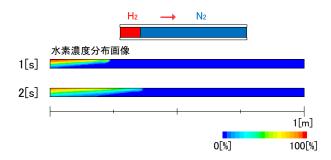
図 I -11-4 複合配管枝管方向流れ、流速 $0.60 \mathrm{m/s}$ における窒素ガス置換挙動

Ⅱ. シミュレーション解析結果一覧

表Ⅱ 図表番号とシミュレーション解析条件一覧表

		, , , , , , , , , , , , , , , , , ,				
図表番号	配管形態	流れ方向	初期状態	導入ガス	管サイス゛	流速条件
∏-1-1	直管水平	-	窒素	水素	32A	流速 0
∏-1-2	直管水平	-	窒素	水素	32A	Re100
I I -1-3	直管水平	-	窒素	水素	32A	Re200
П-1-4	直管水平	-	空気	窒素	32A	0.30m/s
Ⅱ-2-1	直管鉛直	上方向	窒素	水素	32A	Re100
Ⅱ-2-2	直管鉛直	下方向	窒素	水素	32A	Re100
Ⅱ-3-1	縮拡径管水平	-	窒素	水素	32A	Re100
Ⅱ-3-2	縮拡径管水平	-	窒素	水素	32A	Re200
Ⅱ-4-1	L 字管(鉛直-水平)	上→水平方向	窒素	水素	32A	Re100
Ⅱ -4-2	L 字管(鉛直-水平)	上→水平方向	空気	窒素	32A	0.30m/s
Ⅱ-5-1	L 字管(水平-鉛直)	水平→上方向	窒素	水素	32A	Re100
Ⅱ-5-1	L字管(水平-鉛直)	水平→上方向	空気	窒素	32A	0.30m/s
Ⅱ-6-1	L字管(水平-水平)	-	窒素	水素	32A	Re100
Ⅱ-6-1	L 字管(水平-水平)	-	空気	窒素	32A	0.30m/s
II -7-1	複合配管(主管鉛直-枝管水平)	主管方向	窒素	水素	32A	Re100
П-7-2	複合配管(主管鉛直-枝管水平)	主管方向	空気	窒素	32A	0.30m/s
II -8-1	複合配管(主管鉛直-枝管水平)	枝管方向	窒素	水素	32A	Re100
II -8-2	複合配管 (主管鉛直-枝管水平)	枝管方向	空気	窒素	32A	0.30m/s

Ⅱ.1 直管水平配置



図Ⅱ-1-1 32A 直管水平配置、流速 0 における水素ガス置換挙動解析結果

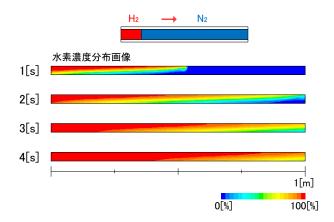
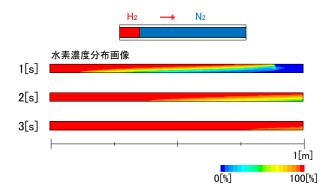


図 II-1-2 32A 直管水平配置、水素 Re=100 における水素ガス置換挙動解析結果



図Ⅱ-1-3 32A 直管水平配置、水素 Re=200 における水素ガス置換挙動解析結果

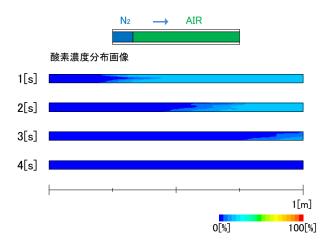


図 II -1-4 32A 直管水平配置、流速 0.30m/s における窒素ガス置換挙動解析結果

Ⅱ.2 直管鉛直配置

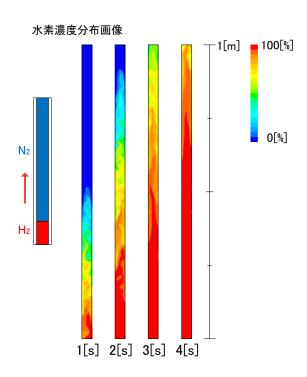


図 II -2-1 32A 直管鉛直配置上向き流れ、水素 Re=100 における水素ガス置換挙動解析結果

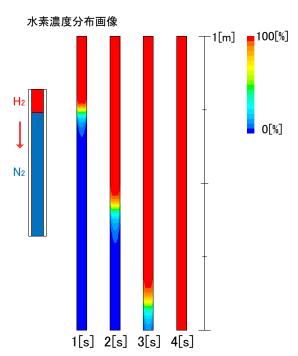
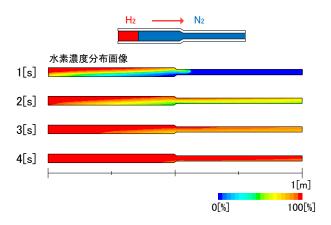
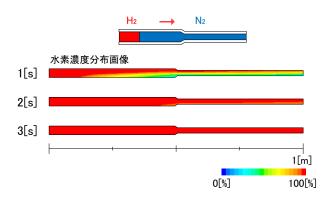


図 II -2-2 32A 直管鉛直配置下向き流れ、水素 Re=100 における水素ガス置換挙動解析結果

Ⅱ.3 縮拡径管水平配置



図Ⅱ-3-1 32A縮拡径管水平配置、水素 Re=100における水素ガス置換挙動解析結果



図II-3-2 32A縮拡径管水平配置、水素 Re=200 における水素ガス置換挙動解析結果

Ⅱ.4 L字管鉛直-水平配置

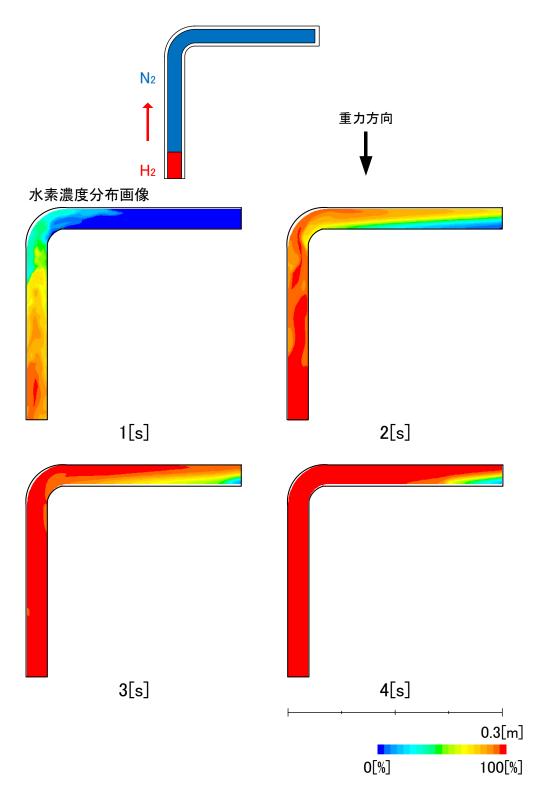


図 II -4-1 L 字管鉛直-水平配置、水素 Re=100 における水素ガス置換挙動解析結果

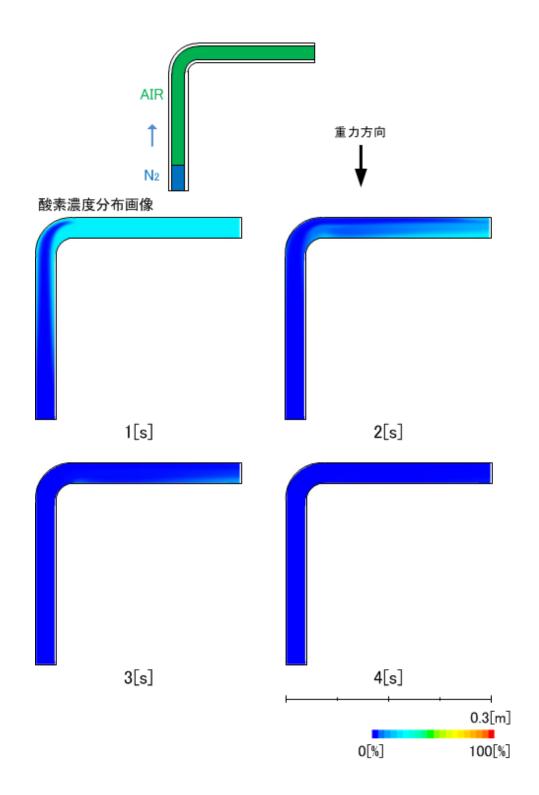
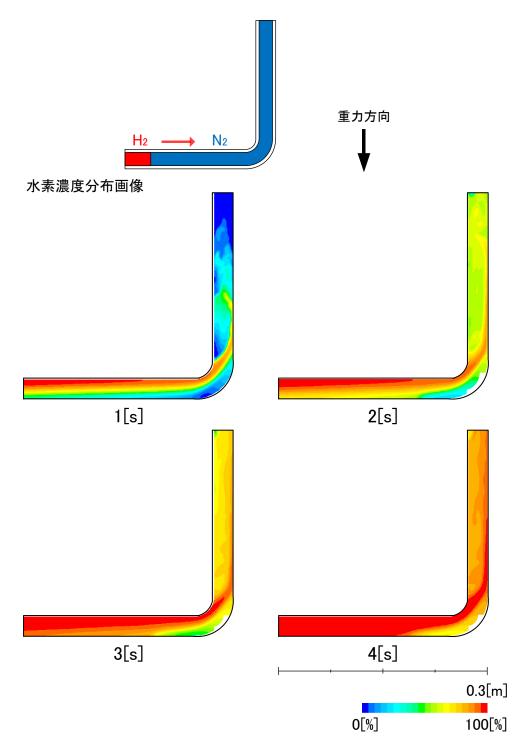
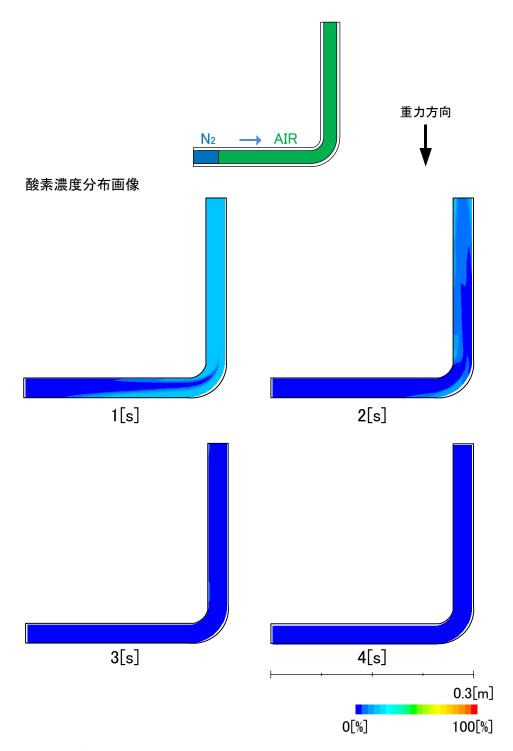


図 II - 4-2 L 字管鉛直-水平配置、流速 $0.30 \, \mathrm{m/s}$ における窒素ガス置換挙動解析結果

Ⅱ.5 L字管水平-鉛直配置

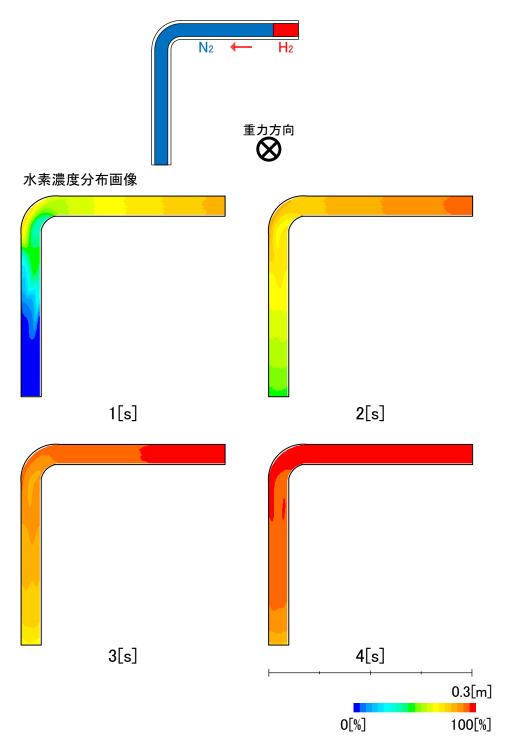


図Ⅱ-5-1 L字管水平-鉛直配置、水素 Re=100 における水素ガス置換挙動解析結果

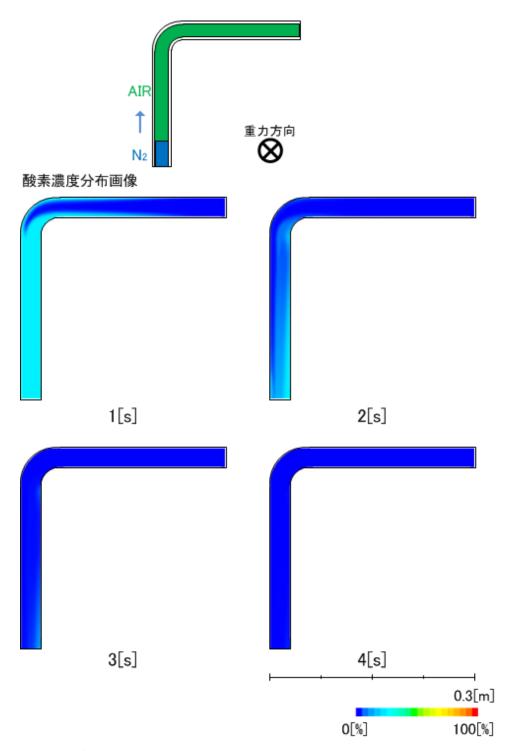


図II-5-2 L字管水平-鉛直配置、流速 0.30m/s における窒素ガス置換挙動解析結果

Ⅱ.6 L字管水平-水平配置

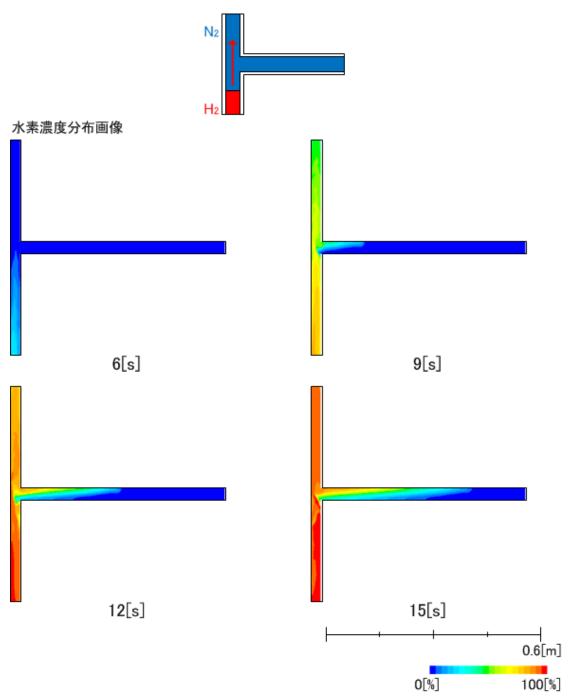


図Ⅱ-6-1 L字管水平-水平配置、水素 Re=100 における水素ガス置換挙動解析結果

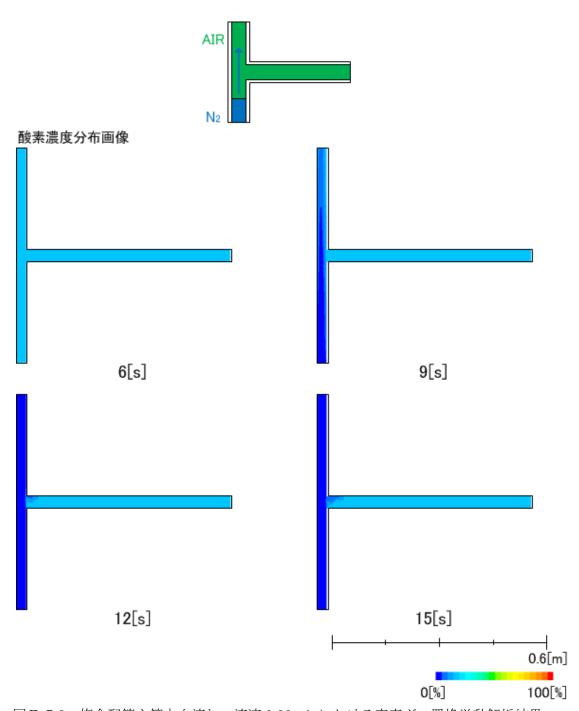


図II-6-2 L字管水平-水平配置、流速 0.30m/s における窒素ガス置換挙動解析結果

Ⅱ.7 複合配管主管方向流れ

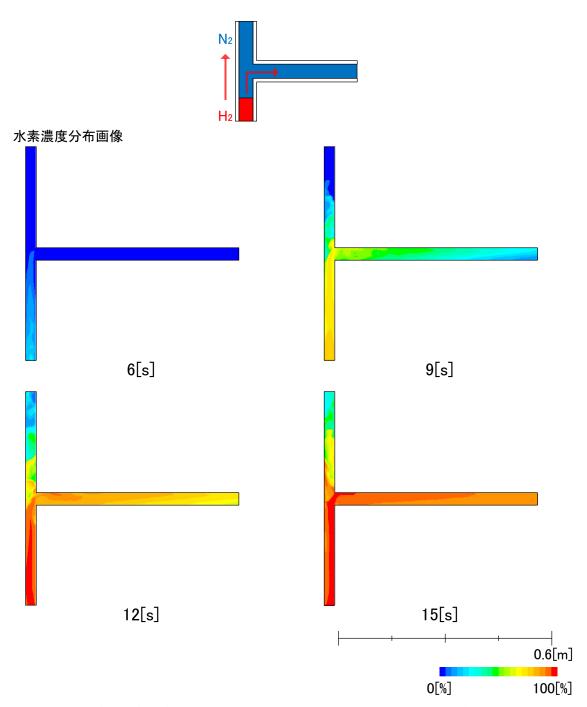


図Ⅱ-7-1 複合配管主管方向流れ、水素 Re=100 における水素ガス置換挙動解析結果

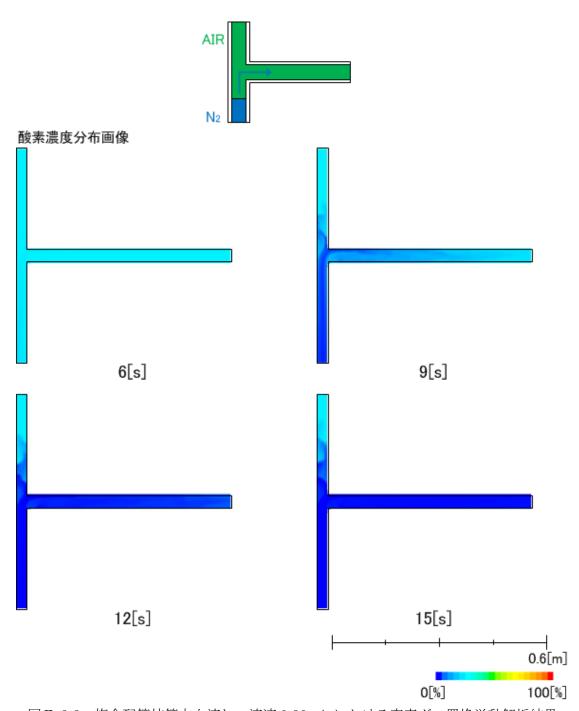


図II-7-2 複合配管主管方向流れ、流速 $0.30 \mathrm{m/s}$ における窒素ガス置換挙動解析結果

Ⅱ.8 複合配管枝管方向流れ



図Ⅱ-8-1 複合配管枝管方向流れ、水素 Re=100 における水素ガス置換挙動解析結果

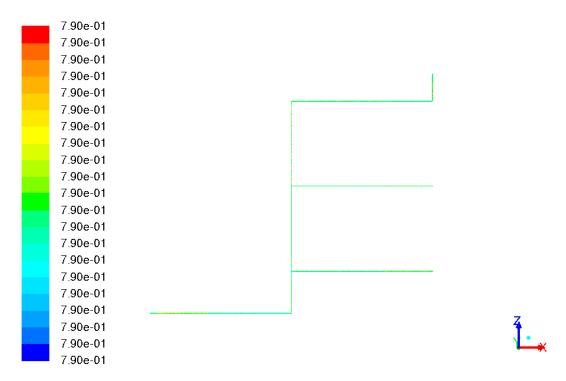


図II-8-2 複合配管枝管方向流れ、流速 $0.30 \mathrm{m/s}$ における窒素ガス置換挙動解析結果

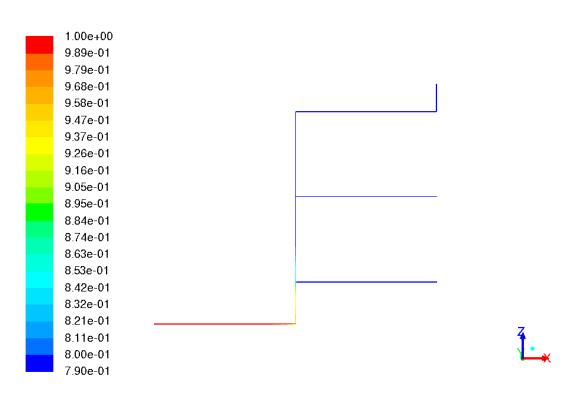
Ⅲ. 集合配管における水素置換挙動のシミュレーション解析結果

表Ⅲ 図表番号と集合配管におけるシミュレーション解析結果一覧表

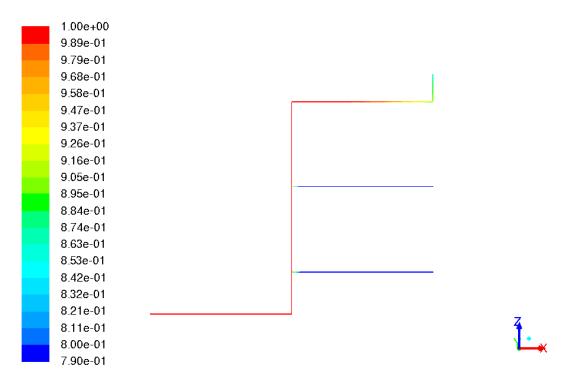
衣Ⅲ 因衣留方と集合配官にわけるシミュレーション脾析結果一見衣							
	濃度表示	経過時間[秒]					
図表番号	対象ガス	窒素注入	水素注入	ガス管解放部変更	ガス管解放部変更		
		開始から	開始から	【1F→2F】から	【2F→3F】から		
Ⅲ -1-1	窒素	0	-	-	-		
Ⅲ-1-2	窒素	20	-	-	-		
Ⅲ-1- 3	窒素	60	-	-	-		
Ⅲ-1-4	窒素	75	-	-	-		
Ⅲ-1-5	水素	75	0	-	-		
Ⅲ-1-6	水素	87.5	12.5	-	-		
П-1-7	水素	109.5	34.5	-	-		
Ⅲ-1-8	水素	282.5	207.5	-	-		
Ⅲ-1-9	水素	292.5	217.5	10	-		
Ⅲ-1-10	水素	302.5	227.5	20	-		
Ⅲ-1-11	水素	447.5	372.5	165	-		
Ⅲ-1-12	酸素	292.5	217.5	10	-		
Ⅲ -1-13	酸素	302.5	227.5	20	-		
Ⅲ-1-14	酸素	447.5	372.5	165	-		
	酸素						
Ⅲ-1-15	(水素濃度 4%以上	292.5	217.5	10	-		
	の領域のみ表示)						
	酸素						
Ⅲ-1-16	(水素濃度 4%以上	302.5	227.5	20	-		
	の領域のみ表示)						
	酸素						
Ⅲ-1-17	(水素濃度 4%以上	447.5	372.5	165	-		
	の領域のみ表示)						
II -1-18	水素	457.5	382.5	175	10		
Ⅲ-1-19	水素	467.5	392.5	185	20		
Ⅲ-1-20	水素	477.5	402.5	195	30		



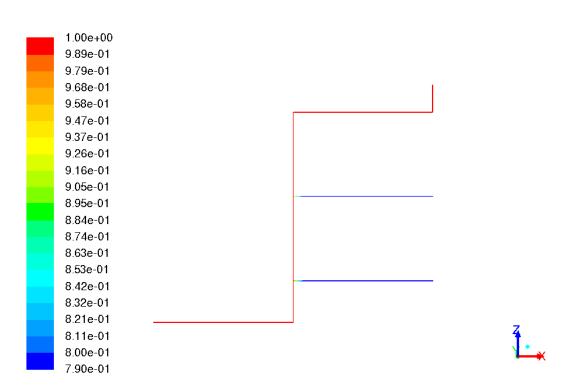
図Ⅲ-1-1 窒素濃度分布(初期状態)



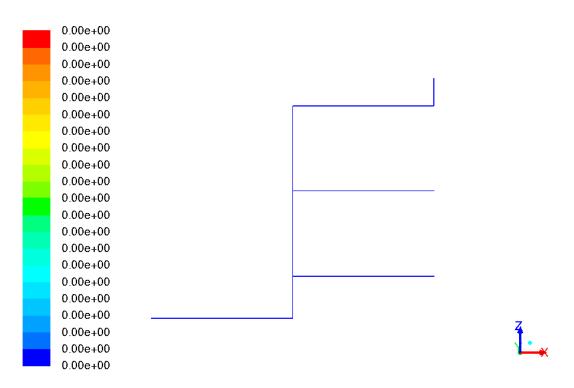
図Ⅲ-1-2 窒素濃度分布(窒素注入開始から20秒後)



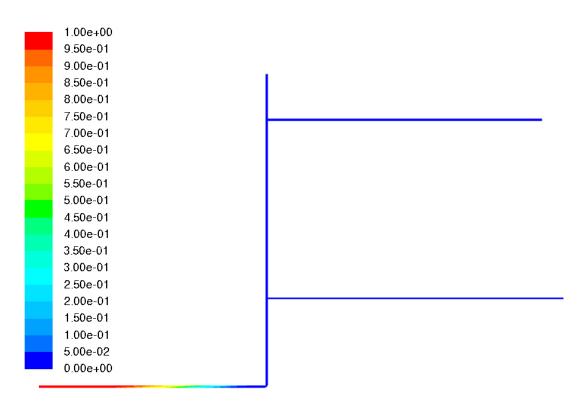
図Ⅲ-1-3 窒素濃度分布(窒素注入開始から60秒後)



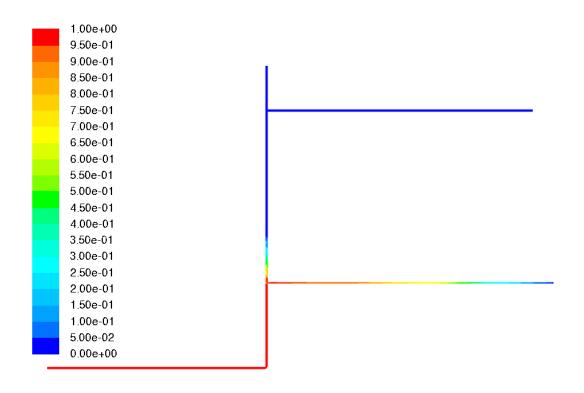
図Ⅲ-1-4 窒素濃度分布(窒素注入開始から75秒後)



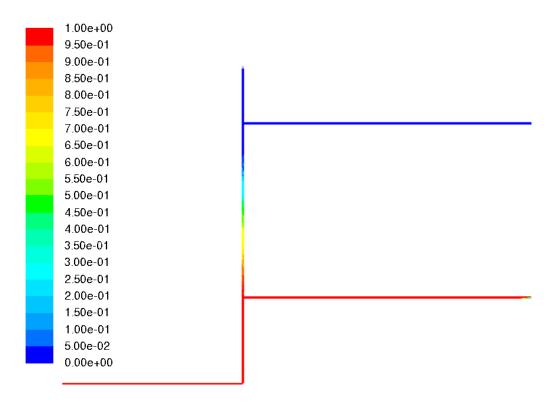
図Ⅲ-1-5 水素濃度分布(窒素注入開始から75秒、水素注入開始から0秒後)



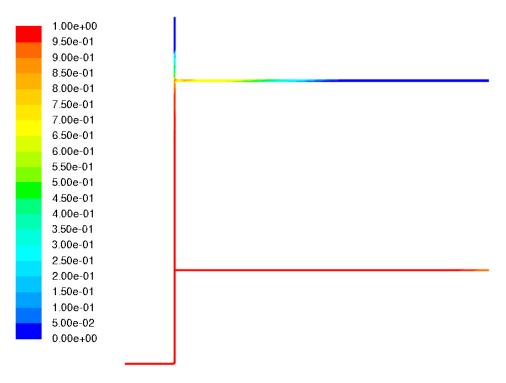
図Ⅲ-1-6 水素濃度分布(窒素注入開始から87.5秒、水素注入開始から12.5秒後)



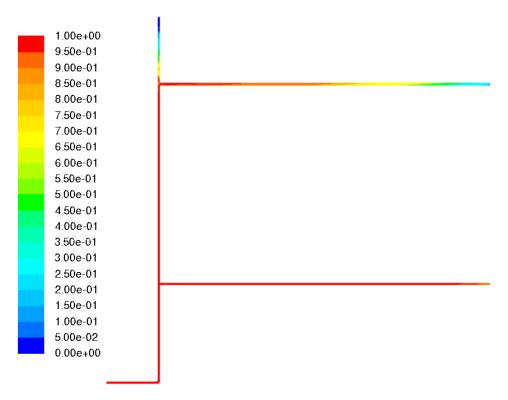
図Ⅲ-1-7 水素濃度分布(窒素注入開始から109.5秒、水素注入開始から34.5秒後)



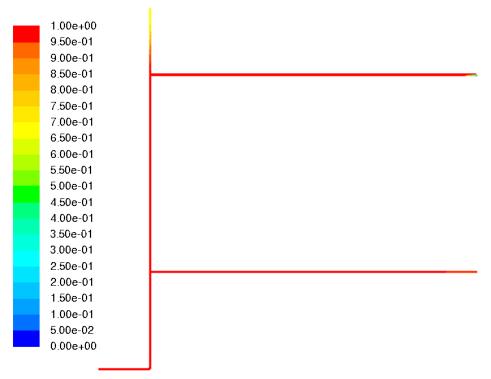
図Ⅲ-1-8 水素濃度分布(窒素注入開始から282.5秒、水素注入開始から207.5秒後)



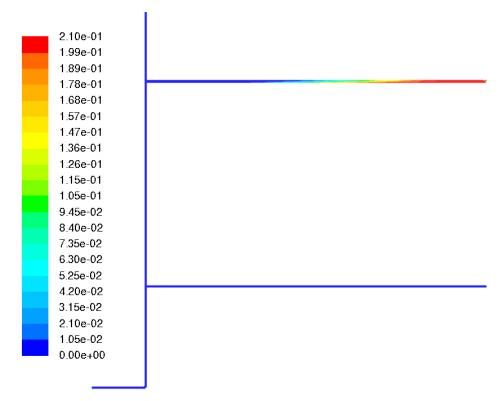
図Ⅲ-1-9 水素濃度分布 (窒素注入開始から 292.5 秒、水素注入開始から 217.5 秒、ガス 管解放部変更【1F→2F】から 10 秒後)



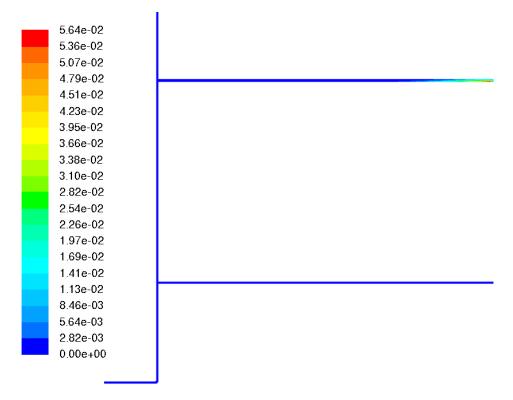
図Ⅲ-1-10 水素濃度分布(窒素注入開始から 302.5 秒、水素注入開始から 227.5 秒、ガス 管解放部変更【1F→2F】から 20 秒後)



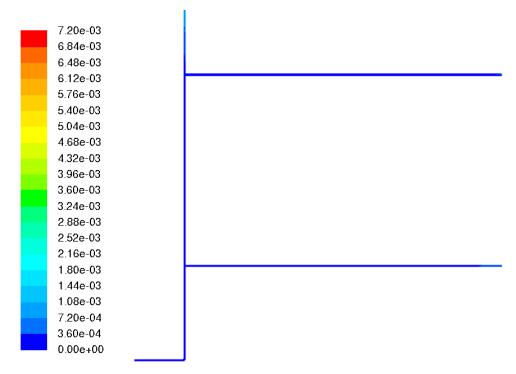
図Ⅲ-1-11 水素濃度分布(窒素注入開始から 447.5 秒、水素注入開始から 372.5 秒、ガス 管解放部変更【1F→2F】から 165 秒後)



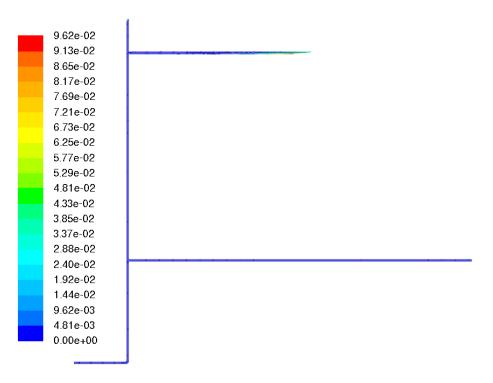
図Ⅲ-1-12 酸素濃度分布 (窒素注入開始から 292.5 秒、水素注入開始から 217.5 秒、ガス 管解放部変更【1F→2F】から 10 秒後)



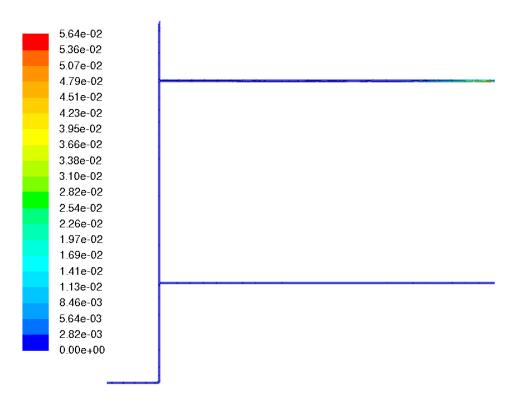
図Ⅲ-1-13 酸素濃度分布 (窒素注入開始から 302.5 秒、水素注入開始から 227.5 秒、ガス 管解放部変更【1F→2F】から 20 秒後)



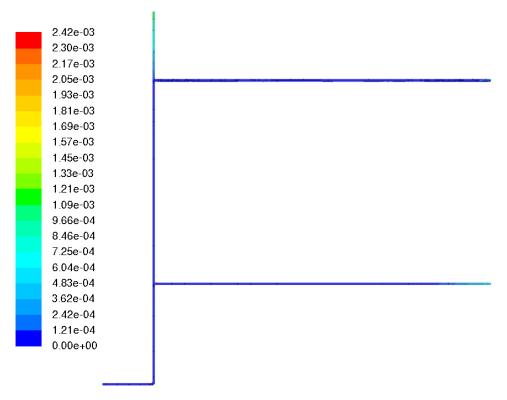
図Ⅲ-1-14 酸素濃度分布(窒素注入開始から 447.5 秒、水素注入開始から 372.5 秒、ガス 管解放部変更【1F→2F】から 165 秒後)



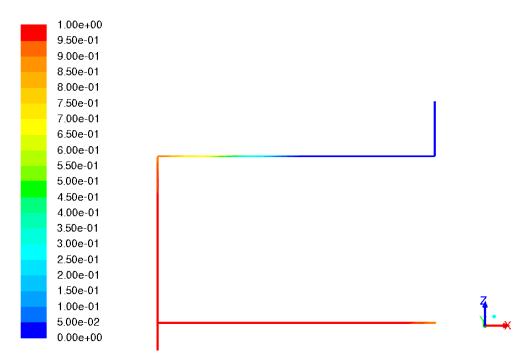
図Ⅲ-1-15 水素濃度 4%以上の領域における酸素濃度分布(窒素注入開始から 292.5 秒、水素注入開始から 217.5 秒、ガス管解放部変更【1F→2F】から 10 秒後)



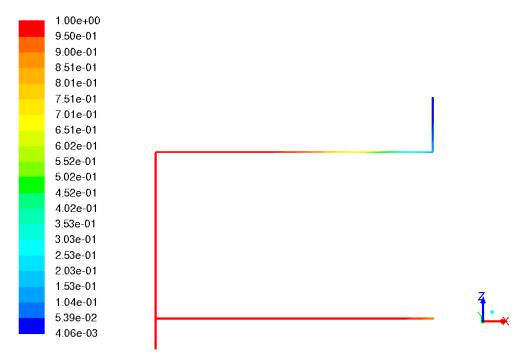
図III-1-16 水素濃度 4%以上の領域における酸素濃度分布(窒素注入開始から 302.5 秒、水素注入開始から 227.5 秒、ガス管解放部変更【 $1F\rightarrow 2F$ 】から 20 秒後)



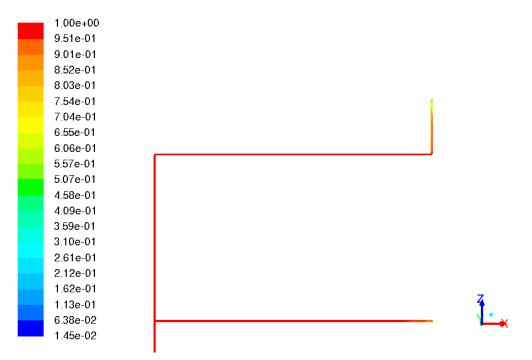
図Ⅲ-1-17 水素濃度 4%以上の領域における酸素濃度分布(窒素注入開始から 447.5 秒、水素注入開始から 372.5 秒、ガス管解放部変更【1F→2F】から 165 秒後)



図Ⅲ-1-18 水素濃度分布(窒素注入開始から 457.5 秒、水素注入開始から 382.5 秒、ガス管解放部変更【 $1F\rightarrow 2F$ 】から 175 秒後、ガス管解放部変更【 $2F\rightarrow 3F$ 】から 10 秒後)

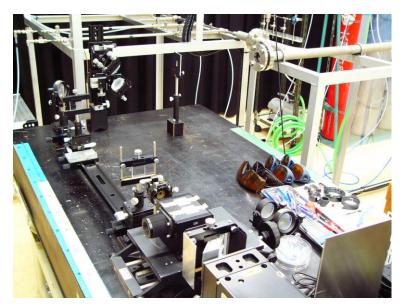


図Ⅲ-1-19 水素濃度分布(窒素注入開始から 467.5 秒、水素注入開始から 392.5 秒、ガス 管解放部変更【 $1F\rightarrow 2F$ 】から 185 秒後、ガス管解放部変更【 $2F\rightarrow 3F$ 】から 20 秒後)



図Ⅲ-1-20 水素濃度分布 (窒素注入開始から 477.5 秒、水素注入開始から 402.5 秒、ガス 管解放部変更【1F→2F】から 195 秒後、ガス管解放部変更【2F→3F】から 30 秒後)

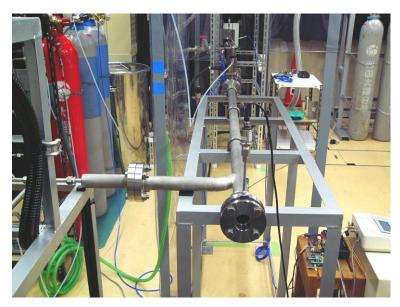
Ⅳ. 実験装置外観



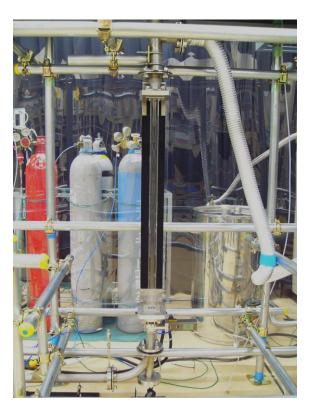
図IV-1-1 レーザ装置およびレーザ照射光学系



図IV-1-2 ガス制御装置



図Ⅳ-1-3 模擬配管:導入管及び助走管



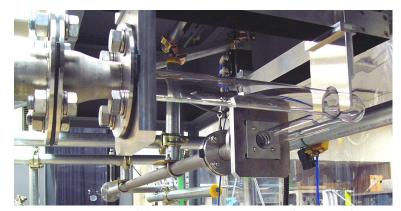
図IV-1-4 直管鉛直配置石英管(32A 相当)



図IV-1-5 縮拡径管水平配置石英管(32A→20A 相当)



図IV-1-6 L字管水平-鉛直配置石英管(32A相当)



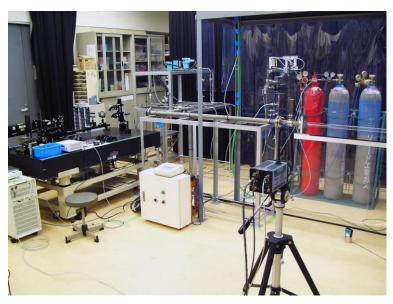
図IV-1-7 L字管水平-水平配置石英管(32A相当)



図IV-1-8 T字管主管鉛直-枝管水平配置石英管(32A相当)



図IV-1-9 複合配管(観測部: T字分岐部、32A相当)



図IV-1-10 撮影状況