

平成 25 年度 経済産業省委託費

水素ネットワーク構築導管保安技術調査

(水素置換挙動調査)

報告書

平成 26 年 3 月

独立行政法人産業技術総合研究所

目次

1. 調査研究の目的等	1
1.1 調査研究の目的	1
1.2 調査研究の概要	1
2. 調査研究の結果・評価	3
2.1 野外実験場及び設備の概要	3
2.2 実験方法	13
2.3 実験結果	25
3. まとめと考察	62
付録	64

1. 調査研究の目的等

1.1 調査研究の目的

本調査研究の目的は、一般需要家向けの水素の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工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、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である。

1.2 調査研究の概要

水素は、燃焼や燃料電池での酸化反応によりエネルギーを放出する際、生成物として水のみを排出するクリーンな燃料としてその普及が期待されている。水素の物性は古くからよく研究・報告されており、近年では最小着火エネルギー、火炎伝播速度、予混合爆発における爆風圧、爆轟遷移転移距離等、燃焼爆発に関する危険性を評価するための実験的データも多く報告されている。しかしながら新たなシステムを用いて可燃性ガスを供給・使用するにあたっては、そのシステム全体の安全性の確認が必要であり、そのためには新たなシステムで起こりうる事故の発生頻度と被害程度が許容できる程度かを調査し、必要な場合には許容可能な範囲に収めるための対策をとる必要がある。

平成 23 年度から平成 24 年度の 2 年間、同様のテーマにおいて、中低圧の水素導管を対象とし、漏えい時の水素の拡散・着火挙動調査（平成 23 年度及び平成 24 年度）、及び径の小さな導管における空気から水素への置換挙動調査（平成 24 年度）などを行ってきた。平成 25 年度は、これらの実施内容を踏まえ、3 年事業の最終年度として導管における水素への置換挙動の詳細な調査を目的とした研究を実施した。具体的には、中低圧の水素導管供給及び水素導管工事を想定した場合に必要となる、ガス開通時等で導管内のガスを置換（空気から水素等へ）する際に、水素に先行して窒素を導入する方法を念頭に置き、窒素及び水素の流通によって生じる窒素と水素の挙動について調査を実施し、管内ガス置換作業時に水素と空気の混合気体が形成されない条件や口径と管内流速（レイノルズ数、Re 数）による法則性の確認を目標とした。

調査に当たっては、平成 25 年度水素ネットワーク構築導管保安技術調査の他の受託者やパイプラインガス供給事業者等と連携し、適切な想定を十分吟味した。その結果、以下のように実験条件を設定した。

- ・調査対象は直管のみ
- ・管として鋼管を用いる

- ・実際に行われる施工を考慮し、調査対象とする導管延長は 80m 程度
- ・調査対象の導管口径は 25A、50A、100A、及び 150A の 4 通り
- ・同一の口径の管において、水素の流速を 3 パターン以上変化させる
- ・上記の流速条件下において、不活性ガスとしての窒素の量を変化させる

調査事業を遂行するにあたっては、扱う水素が大量となり最終的には大気に放出せざるを得ないため、安全に十分配慮した上で野外実験において行うこととした。また、最終的なデータの整理を行う上で気体流量から得られるレイノルズ数が重要であるため、精度よく水素の流量が測定できる流量計、及び管内の圧力を測定できる圧力計を用いるよう配慮した。

2. 調査研究の結果・評価

2.1 野外実験場及び設備の概要

実験に際しては、茨城県 日立セメント株式会社 太平田鉱山（日立市諏訪町 1233）の旧堆積場を借用し、平成 25 年 11 月 25 日～11 月 29 日、12 月 2 日～12 月 6 日の 2 週間、合計 10 日間に渡って行った。野外実験場の配置については図 2.1.1 に示す。民家までの距離は最短で約 1km である。実験の実施にあたっては、可燃性のガスを扱うために事前に日立市役所、多賀消防署等への説明、届出を行った。

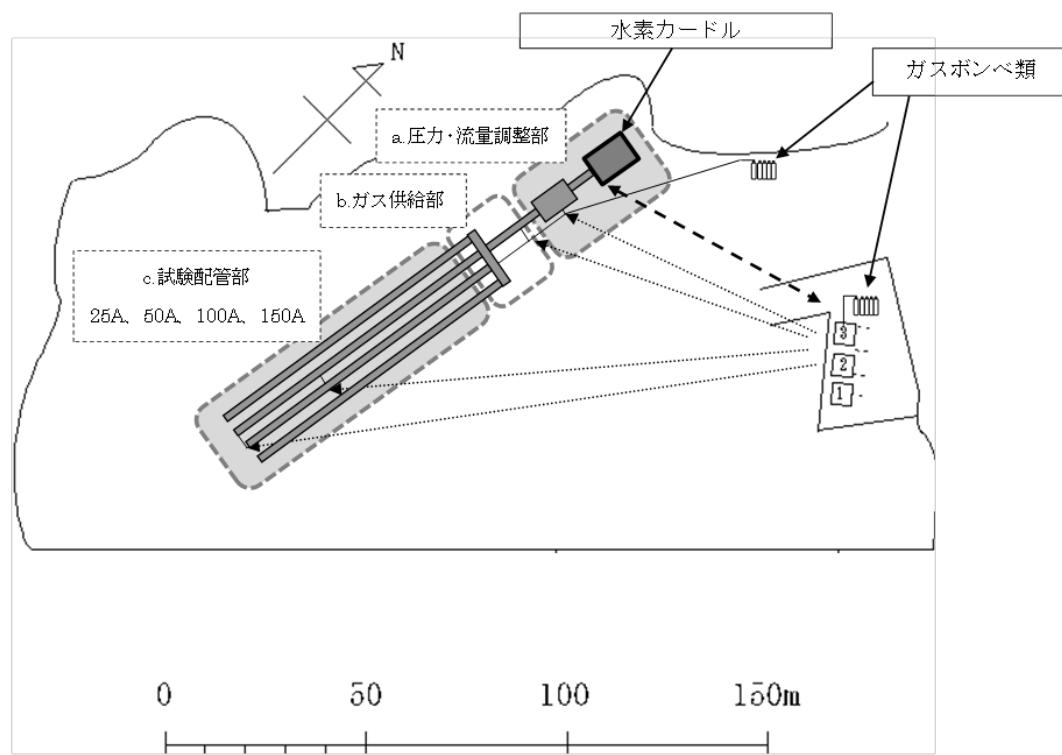


図 2.1.1 野外実験場内設備配置概略図

設置した実験設備の概要は図 2.1.2 の通りである。水素は充填圧 20MPa 未満のカードルを用いた。実験開始から終了まで用いたカードルは合計で 3 基である。窒素は充填圧 14.7MPa 未満の 47L ボンベ 5 本を簡易マニホールドで連結し供給した。空気も窒素同様充填圧 14.7MPa 未満の 47L ボンベ 5 本を簡易マニホールドで連結し供給した。配管で連結されたガスは常に合計で 300m³ 未満であり、また予備の水素カードル並びに各ボンベも 30m 以内の距離に設置した合算の容量が常に 300m³ を超えないように配慮した。安全のため水素が配管内に供給されている状態では、全ての人員は常に防護壁を備えた観測所及びガス供給設備内に退避の上操作・計測を行い、水素の存在する全ての設備から人員の退避した観測所までは常に 70m 以上を確保するよう配慮した。

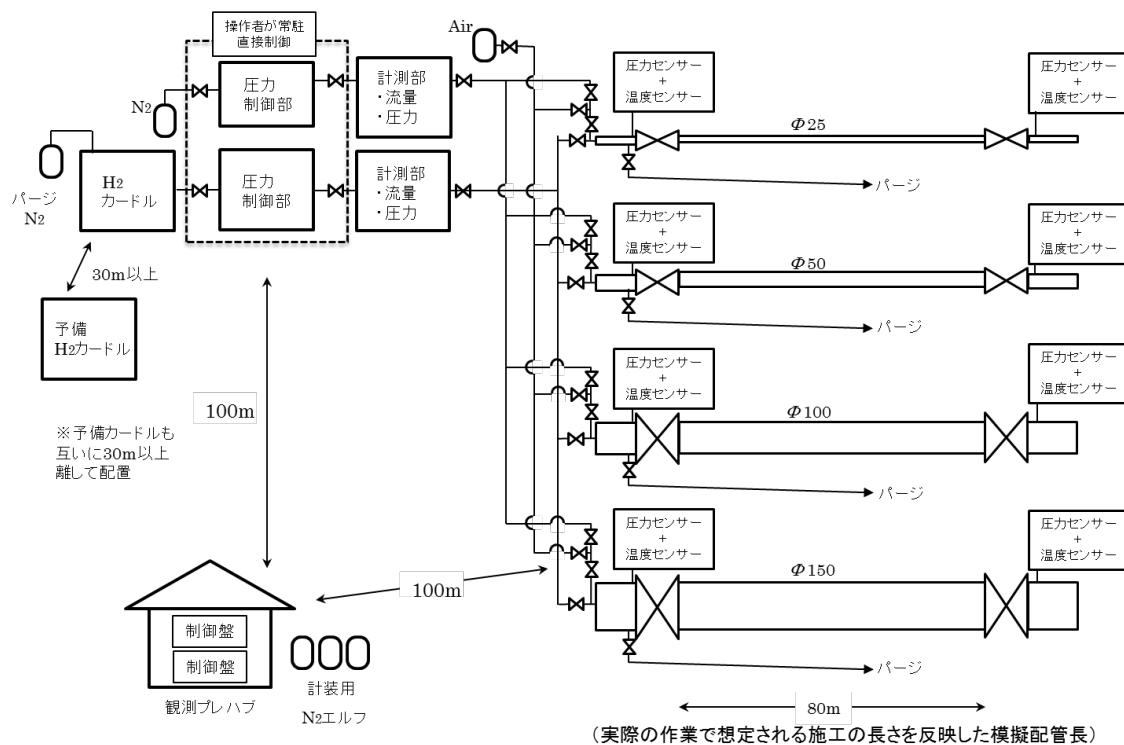


図 2.1.2 実験設備の配置図

実験設備を構成する圧力・流量調整部、ガス供給部、及び試験配管部については以下の通りである。

- ・圧力・流量調整部

圧力・流量調整部の概略は図 2.1.3 の通りである。大別して圧力調整器、圧力計、マスフローメーター式流量計並びにバルブ類によって構成されており、これらを 25A 管によって接続した流路を為している。測定する試験配管（導管）の口径や流速によって圧力及び流量のレンジが異なるため、複数の圧力調整器、圧力計及びマスフローメーター式流量計を互いに組み合わせることによって目標とする流量を確保する構造となっている。目標の流量に対する調整は圧力調整器によって大まかに定めたのちにバタフライ弁の開口の程度を変化させることによって行った。

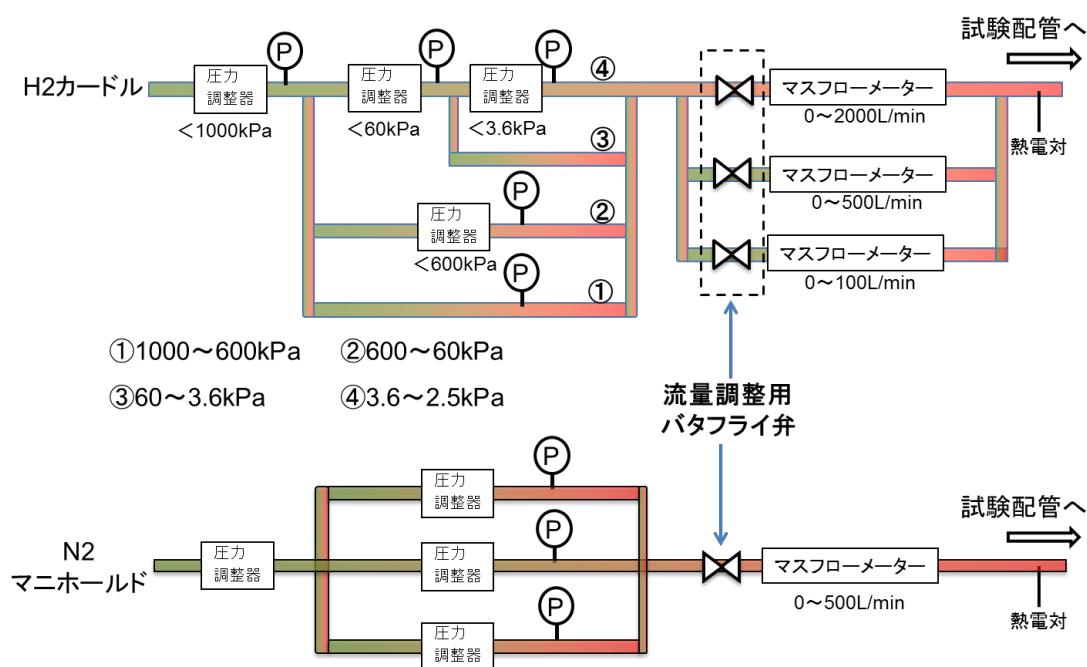


図 2.1.3 圧力・流量調整部概略

・ガス供給部

ガス供給部として、圧力・流量調整部から試験配管部までの配管を設置した。水素の供給のための配管には 25A 管を、窒素及び空気の供給のための配管には 1/2 インチ管を用いた。ガス供給部は、圧力・流量調整部に常駐する人員の安全確保のために、圧力・流量調節部の出口と試験配管部の入口との間の距離を 50m 設けるための役目も兼ねている。

・試験配管部

試験配管部の概略を図 2.1.4 に示す。試験配管（導管）としては 25A、50A、100A、並びに 150A の 4 種の径の導管を実験場内に並列・水平に配置した。試験配管（導管）の長さはガス事業者との議論を通じ実際に施工に用いられる可能性のある長さとして 80m を設定した。

試験配管（導管）は 5.5m の JIS G 3452 管、並びに同径・同肉厚の SUS 管を組み合わせて全長で 80m の長さとした。各々の管の接続はフランジ接続とねじ込み接続の併用となっている。試験配管（導管）の入口と出口には導管と等しい内径を有するフルボア式ボールバルブを設置した。以下、入口側のバルブを AV1、出口側のバルブを AV2 と呼称する。試験配管（導管）の上流には、ガス供給部からの流れを安定させるための試験配管（導管）と同径の助走管が接続されている。助走管は、試験配管（導管）にガスを供給する際にページ作業によって窒素、水素を充填するためのページ管の役割も兼ねている。また、AV2 の後流にも試験配管（導管）と同径の予備管が設けてあり、さらにダクトを接続して安全な位置にガスの放散を行うようにした。

試験配管（導管）には、圧力計、熱電対、並びにガス濃度計のキャピラリーを接続した。圧力計及び熱電対は AV1 の直前の助走管内、及び AV2 の直後の予備管に設置した。ガス濃度計については、濃度変化の導管延長方向依存性、及び導管内部での鉛直方向位置依存性を調査するために合計で 7 台用いて同時に測定を行った。各々の配置については、AV1 から 20m の位置に 3 台、さらに 30m (AV1 から 50m) の位置に 1 台、さらに 30m (AV1 から 80m、AV2 の直前) に 3 台接続した。3 台接続する際 (20m 地点、80m 地点) は導管の上部 (U)・中央 (M)・下部 (L) の 3 か所をキャピラリーの吸引口とした。管中央部にキャピラリーを設置する際には 1/8 インチ SUS 管を挿入することで位置の調整を行った。1 台のみ設置する際 (50m 地点) には導管中央 (M) とした。以下、各々の濃度計による測定結果は、

20m-U、20m-M、20m-L

50m-M

80m-U、80m-M、80m-L

と呼称し区別する。

今回は遠隔から操作するための空圧作動弁を用いており、開閉の操作を行ってから実際にバルブが動作するまでタイムラグが生じる。そのため、監視用根とワークカメラを複数

個設置し、実時間との整合をとりながら実際のバルブの動作を確認・録画保存した。

実験に際し用いた各種センサーの諸元は以下の通りである。

- ・圧力計 MKS バラトロン 静電容量式マノメーター

25A	133.3kPa F.S.
50A	266.6kPa F.S.
100A	666.6kPa F.S.
150A	1333kPa F.S.

 分解能 : 0.001%F.S. 精度 : 0.12%R.O.
- ・温度計 T型シーズ熱電対 Φ1.6mm
- ・流量計 热式マスフローメーター

H₂ : 100L/min、500L/min、2000L/min F.S.
精度 : 5% R.O.

N₂: 500L/min F.S.
精度 : 5% R.O.
- ・ガス濃度計 ビー・ティー・エス製 SX シリーズ 質量分析器型
濃度分解能 : 0.1% 時間分解能 : 0.2sec

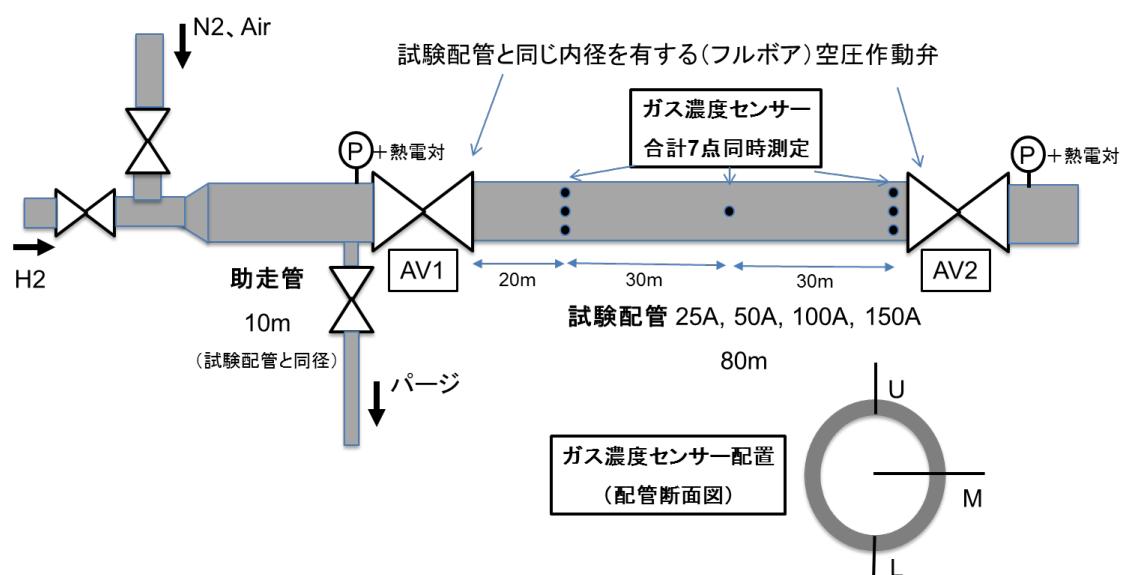


図 2.1.4 試験配管（導管）部概略



2013/11/28



2013/11/28



図 2.1.5 圧力流量調整装置



図 2.1.6 供給配管、助走管、試験配管（導管）



図 2.1.7 試験配管（導管）末端部



図 2.1.8 ガス濃度計



図 2.1.9 圧力計、熱電対、流量計

2.2 実験方法

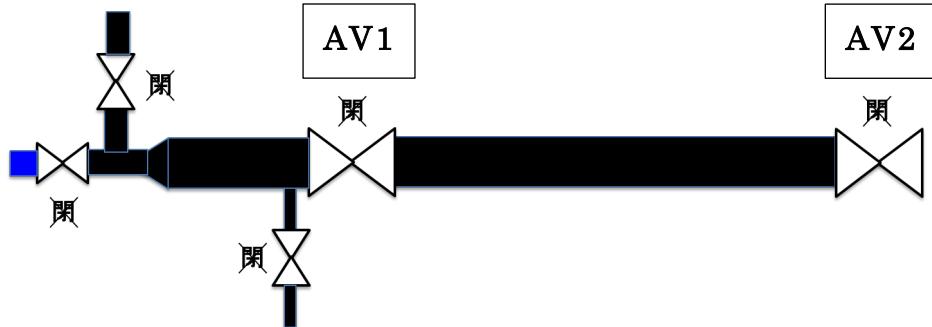
実験方法に係る手順について、管内の模式図と共に図 2.2.1～2.2.6 に示す。実際の操作の手順は以下の通りである。

- ① 初期状態、水素の助走管、試験配管（導管）全てが空気で充満
- ②～④ 助走管の空気を窒素でページ
- ⑤ AV2 の開操作、AV2 が完全に開いたことを確認してから AV1 の開操作、試験配管（導管）への窒素供給の開始
- ⑥ 目標とする量だけ窒素を供給できるように AV1 の閉操作、続いて AV2 を閉操作
- ⑦～⑧ 助走管の窒素を水素でページ
- ⑨ AV2 の開操作、AV2 が完全に開いたことを確認してから AV1 の開操作、試験配管（導管）への水素供給の開始
- ⑩～⑫ 末端までの水素の到達を確認し、AV1 の閉操作、続いて AV2 の閉操作、水素供給停止
- ⑬～⑭ 助走管の水素を窒素でページ
- ⑮ 試験配管（導管）の水素を窒素でページ
- ⑯～⑰ 試験配管（導管）全体を空気に置換 → ①に戻り、次の実験

実際に行った実験の番号と条件を表 2.2.1～2.2.3 に示す。また、実際の測定波形の代表例を図 2.2.7～2.2.8 に示す。これらの測定波形を基に、目標とした精度を満足するデータを得ることができた。但し、窒素の導入手順には遠隔操作の空圧バルブの開閉に伴う誤差が大きく、表 2.2.1 に示された窒素の長さ及び体積は必ずしも現実の窒素の長さや体積とは一致せず目安に過ぎないことは注意を要する。管内に存在する実際の窒素量は、濃度計による測定と流量計の値を基に判断され、解析及び考察はそれに基づく。

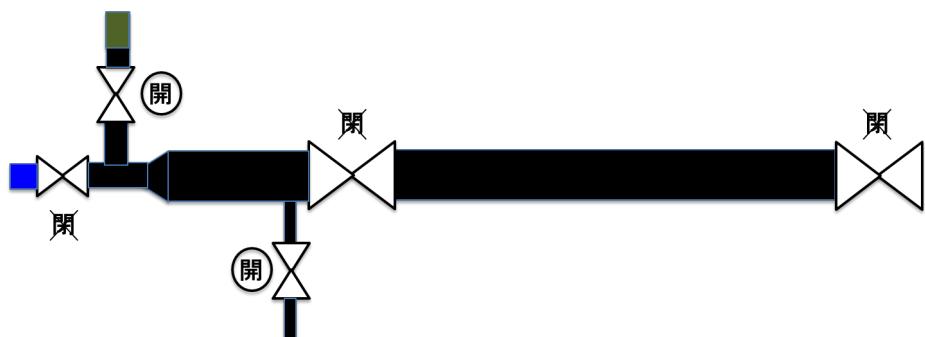
実験手順 ① 初期状態(空気充满)

■	H2
■	N2
■	Air



実験手順 ② 助走管窒素置換開始

■	H2
■	N2
■	Air



実験手順 ③ 助走管窒素置換中

■	H2
■	N2
■	Air

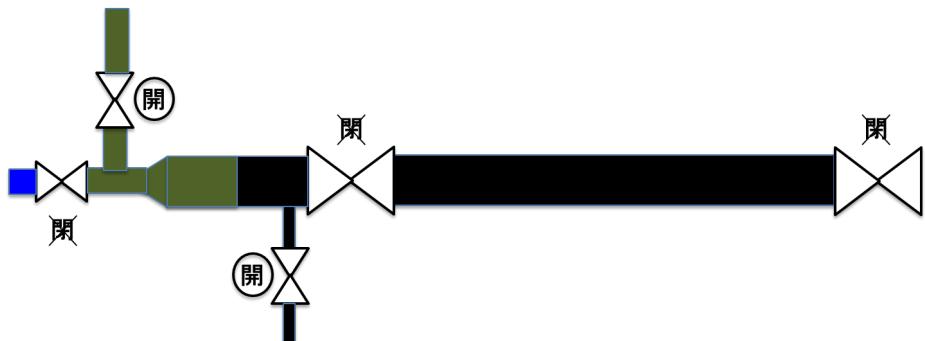
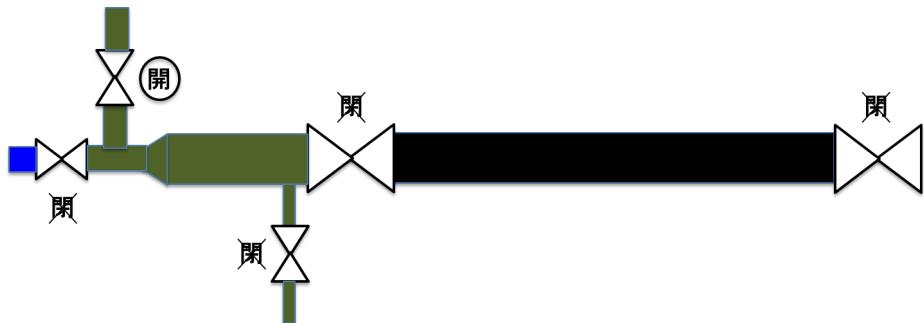


図 2.2.1 実験手順 (1 / 6) 手順①～手順③

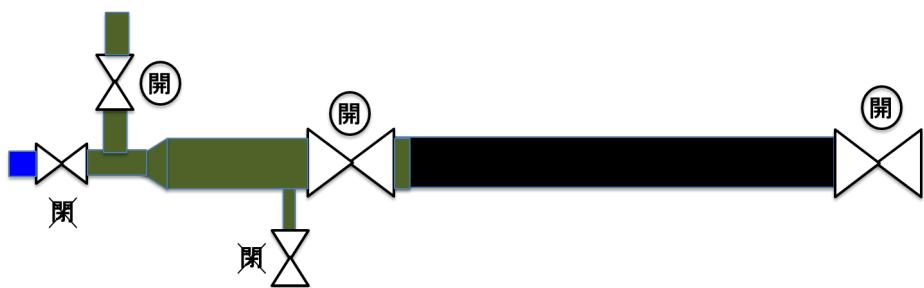
実験手順 ④ 助走管窒素置換完了

■	H2
■	N2
■	Air



実験手順 ⑤ 窒素層導入開始

■	H2
■	N2
■	Air



実験手順 ⑥ 窒素層導入停止

■	H2
■	N2
■	Air

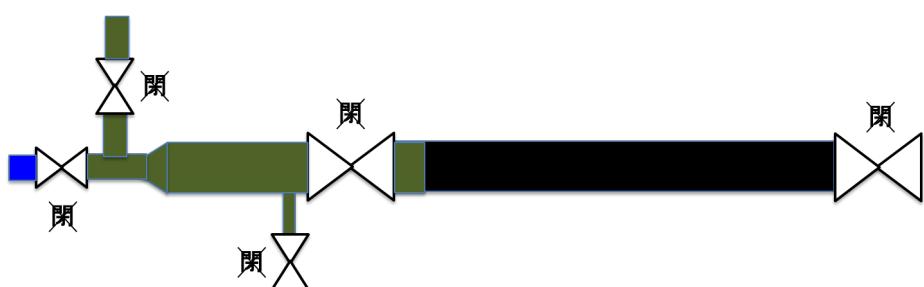
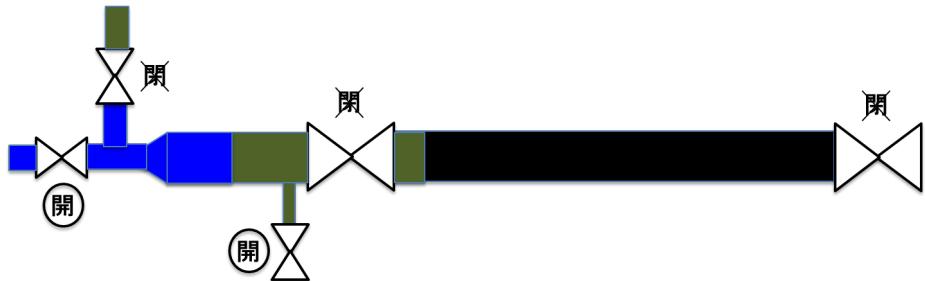


図 2.2.2 実験手順 (2 / 6) 手順④～手順⑥

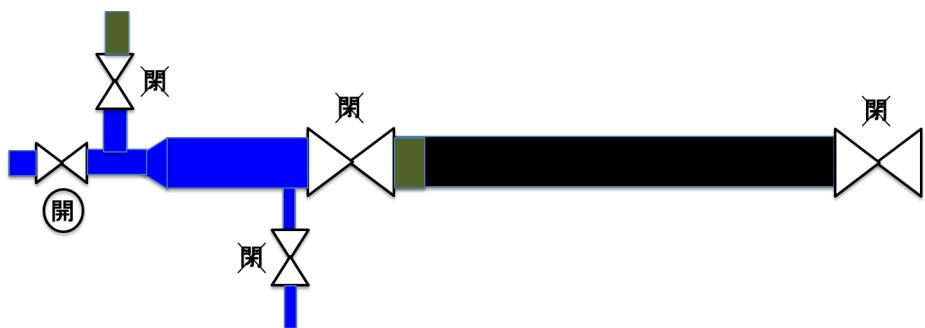
実験手順 ⑦ 助走管水素置換開始

■	H2
■	N2
■	Air



実験手順 ⑧ 助走管水素置換完了

■	H2
■	N2
■	Air



実験手順 ⑨ 試験配管水素置換開始

■	H2
■	N2
■	Air

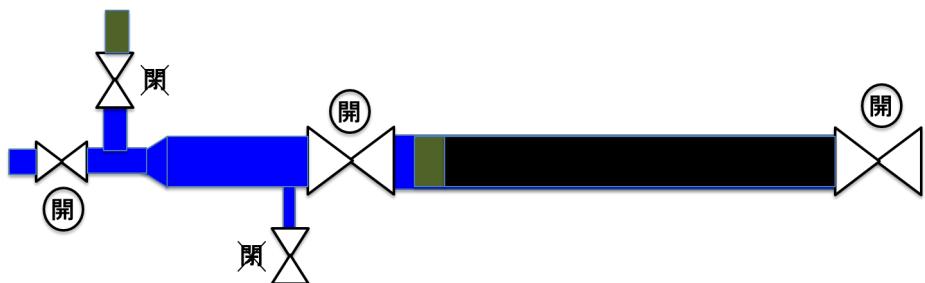
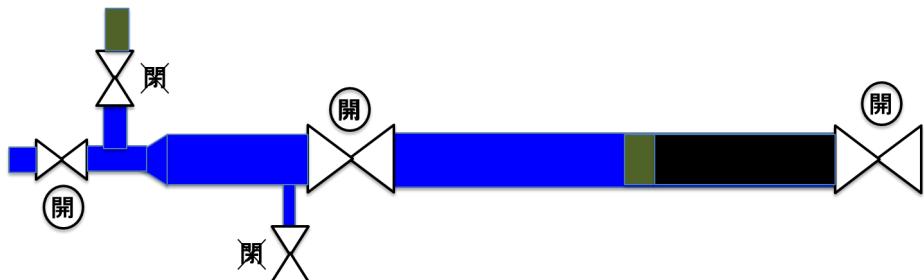


図 2.2.3 実験手順 (3 / 6) 手順⑦～手順⑨

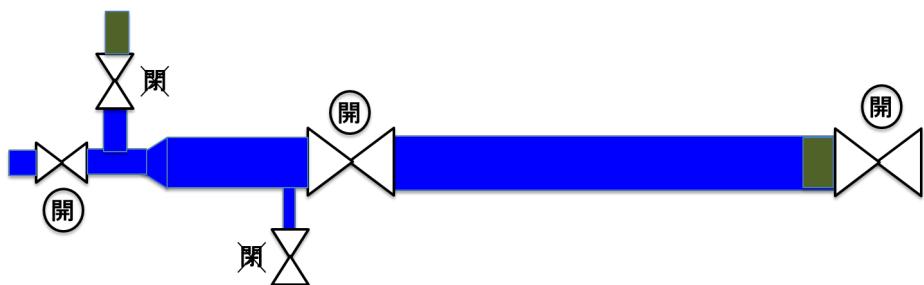
実験手順 ⑩ 水素置換中

■	H2
■	N2
■	Air



実験手順 ⑪ 窒素層末端到達

■	H2
■	N2
■	Air



実験手順 ⑫ 水素置換完了

■	H2
■	N2
■	Air

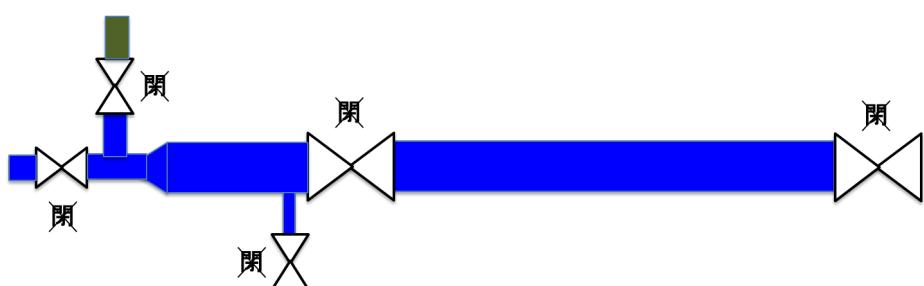
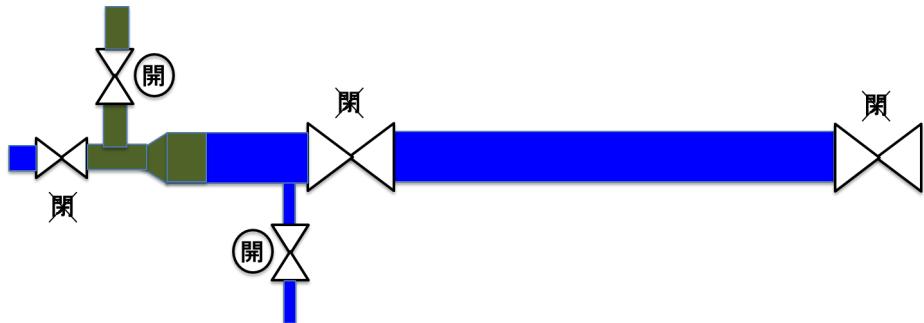


図 2.2.4 実験手順 (4 / 6) 手順⑩～手順⑫

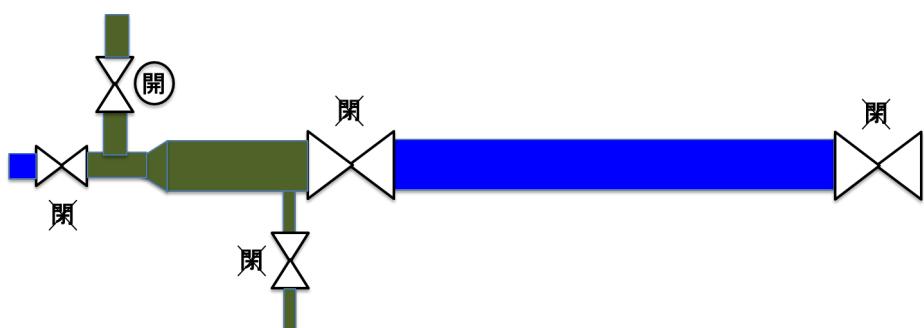
実験手順 ⑬ 助走管窒素パージ開始

■	H2
■	N2
■	Air



実験手順 ⑭ 助走管窒素パージ完了

■	H2
■	N2
■	Air



実験手順 ⑮ 試験配管窒素パージ完了

■	H2
■	N2
■	Air

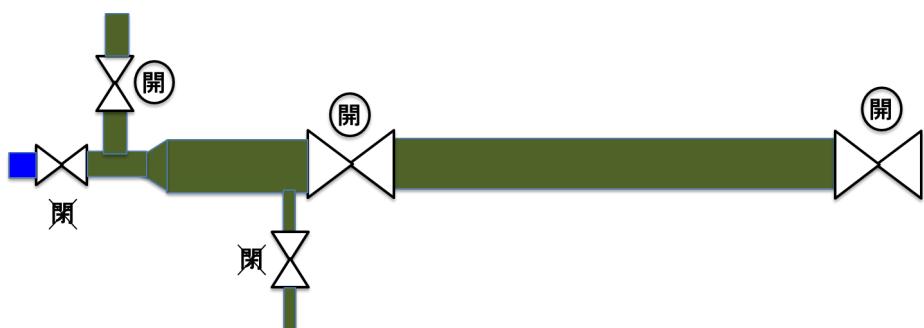
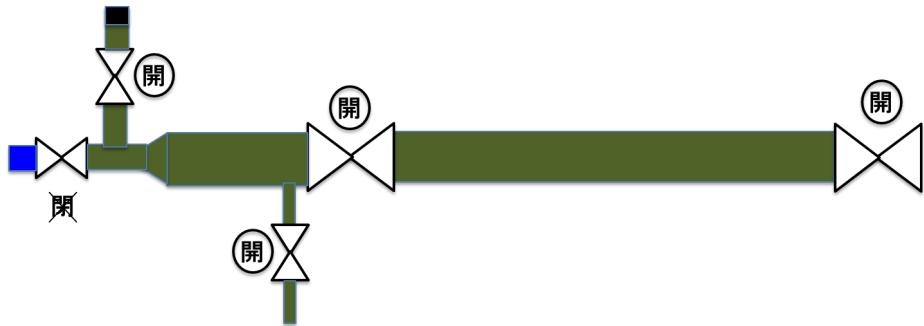


図 2.2.5 実験手順 (5 / 6) 手順⑬～手順⑮

実験手順 ⑯ 空気置換開始

■	H2
■	N2
■	Air



実験手順 ⑰ 空気置換完了 → 初期状態

■	H2
■	N2
■	Air

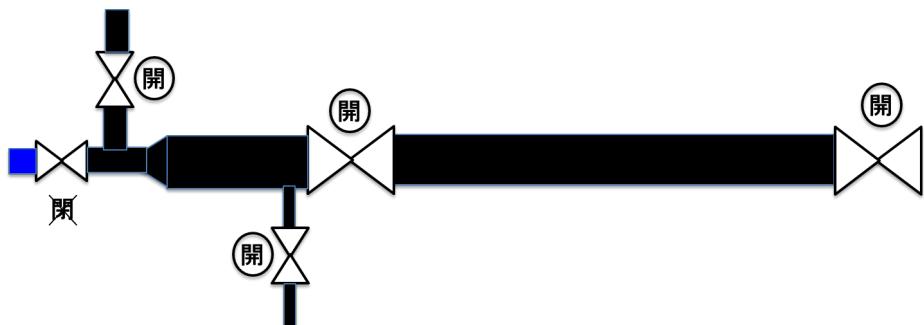


図 2.2.6 実験手順 (6 / 6) 手順⑯～手順⑰

表 2.2.1 管内ガス置換実験番号と条件

	窒素				水素			
	N ₂ 流量 (L/m in)	流速 (m/sec)	N ₂ 層長さ (m)	N ₂ 層体積 (m ³)	H ₂ 流量 (L/m in)	流速 (m/sec)	概算Re H ₂	概算Re N ₂
25A-1	39	1.1	13	0.0078	50	1.4	360	2600
25A-2	39	1.1	11	0.0066	40	1.1	290	2000
25A-3	58	1.6	32	0.019	80~90	2.2~2.5	570~650	4000~4600
25A-4	58	1.6	10	0.0060	80~90	2.2~2.5	570~650	4000~4600
25A-5	58	1.6	18	0.012	80~90	2.2~2.5	570~650	4000~4600
25A-6	58	1.6	34	0.020	130~140	3.6~3.9	940~1000	6600~7100
25A-7	58	1.6	10	0.0068	130~140	3.6~3.9	940~1000	6600~7100
25A-8	58	1.6	21	0.013	130~140	3.6~3.9	940~1000	6600~7100
50A-1	25	0.19	全置換		90	0.68	340	2400
50A-2	25	0.19	19	0.043	90	0.68	350	2400
50A-3	25	0.19	22	0.049	150	1.1	570	4000
100A-1	90	0.17	3	0.057	160	0.31	300	2100
100A-2	90	0.17	26	0.23	160	0.31	300	2100
100A-3	90	0.17	27	0.23	320	0.61	600	4300
100A-4	90	0.17	19	0.17	320	0.61	600	4300
100A-5	90	0.17	28	0.24	600	1.1	1100	8000
100A-6	90	0.17	25	0.22	600	1.1	1100	8000
150A-1	440	0.39	全置換		450	0.40	580	4100
150A-2	440	0.39	19	0.35	480	0.42	620	4400
150A-3	440	0.39	18	0.34	720	0.63	930	6500
150A-4	440	0.39	9	0.17	720	0.63	930	6500
150A-5	440	0.39	9	0.18	1200	1.1	1500	11000
150A-6	440	0.39	7	0.12	1200	1.1	1500	11000
150A-7	440	0.39	9	0.16	1560	1.4	2000	14000
150A-8	440	0.39	7	0.12	1560	1.4	2000	14000

※全置換の場合は窒素濃度 100%層の長さ・体積に関する解析は行っていない

※窒素の体積、及び長さは、表 2.2.3 におけるバルブ開閉時間に基づき

「窒素流量」 × 「{AV1 全開 + (AV1 閉→開 + AV1 開→閉) ÷ 2 } の時間」

によって算出

表 2.2.2 管内温度・圧力に関する測定値

実験番号 [H ₂ 流速 (m/sec)]	試験配管入口		試験配管出口	
	ガス温度 K	ゲージ圧 kPa	ガス温度 K	ゲージ圧 kPa
25A-1 [1.4]	285	0.16以下	285	0.16以下
25A-2 [1.1]	284	0.16以下	284	0.16以下
25A-3 [2.2~2.5]	290	0.16以下	290	0.16以下
25A-4 [2.2~2.5]	289	0.16以下	289	0.16以下
25A-5 [2.2~2.5]	287	0.16以下	287	0.16以下
25A-6 [3.6~3.9]	288	0.16以下	288	0.16以下
25A-7 [3.6~3.9]	288	0.16以下	288	0.16以下
25A-8 [3.6~3.9]	287	0.16以下	287	0.16以下
50A-1 [0.68]	288	0.32以下	288	0.32以下
50A-2 [0.68]	288	0.32以下	288	0.32以下
50A-3 [1.1]	287	0.32以下	287	0.32以下
100A-1 [0.31]	291	0.8以下	291	0.8以下
100A-2 [0.31]	290	0.8以下	290	0.8以下
100A-3 [0.61]	290	0.8以下	290	0.8以下
100A-4 [0.61]	288	0.8以下	288	0.8以下
100A-5 [1.1]	285	0.8以下	285	0.8以下
100A-6 [1.1]	289	0.8以下	289	0.8以下
150A-1 [0.40]	289	1.6以下	289	1.6以下
150A-2 [0.42]	290	1.6以下	290	1.6以下
150A-3 [0.63]	290	1.6以下	290	1.6以下
150A-4 [0.63]	288	1.6以下	288	1.6以下
150A-5 [1.1]	297	1.6以下	297	1.6以下
150A-6 [1.1]	298	1.6以下	298	1.6以下
150A-7 [1.4]	297	1.6以下	297	1.6以下
150A-8 [1.4]	293	1.6以下	293	1.6以下

※温度・圧力共に大気との差が測定分解能以下であった

表 2.2.3 AV1 開操作に関する時間

	N2導入時			H2導入時 AV1閉→開
	AV1閉→開	AV1全開	AV1開→閉	
25A-1	2	10	1	2
25A-2	1	9	1	2
25A-3	2	18	2	2
25A-4	2	4	1	2
25A-5	2	9	2	2
25A-6	2	19	2	1
25A-7	1	4	2	2
25A-8	2	11	1	2
50A-1	2	全置換	3	3
50A-2	2	99	4	3
50A-3	3	115	3	3
100A-1	8	29	10	8
100A-2	8	142	10	9
100A-3	8	147	10	9
100A-4	9	100	11	9
100A-5	7	153	9	9
100A-6	6	139	7	6
150A-1	12	全置換	カメラ不調	カメラ不調
150A-2	13	34	14	12
150A-3	12	34	11	12
150A-4	12	10	13	12
150A-5	12	11	13	11
150A-6	9	6	12	11
150A-7	13	6	18	12
150A-8	13	3	15	12

※全置換の場合は窒素層の長さ・体積に関する解析は行われていない

※水素導入時の AV1 開閉時間は解析に影響を及ぼさない

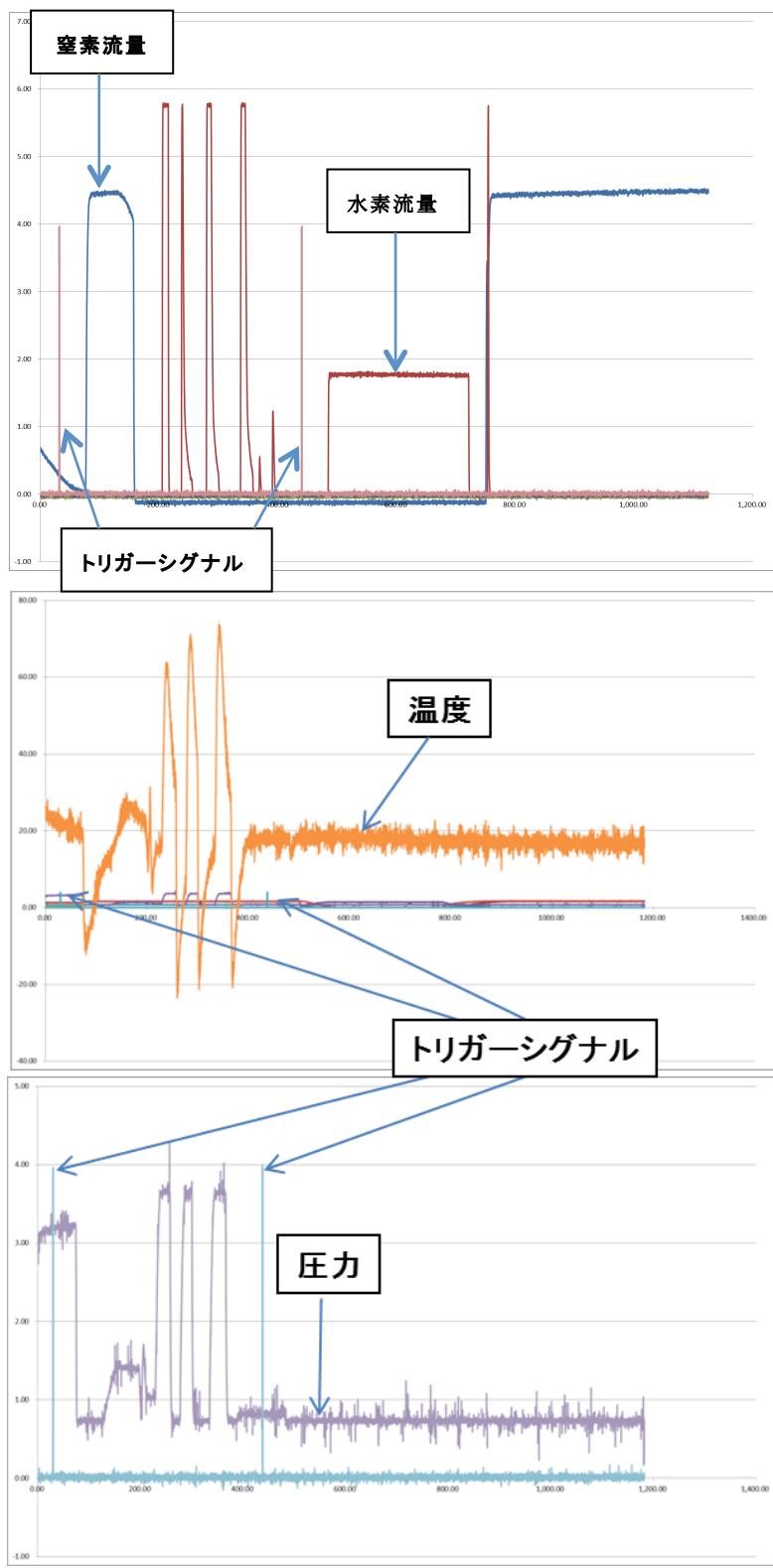


図 2.2.7 代表的な測定波形（流量、入口温度、入口圧力）

実験番号 150A-3 (N₂層長さ 18m、H₂流量 720L/min、流速 0.63m/sec)

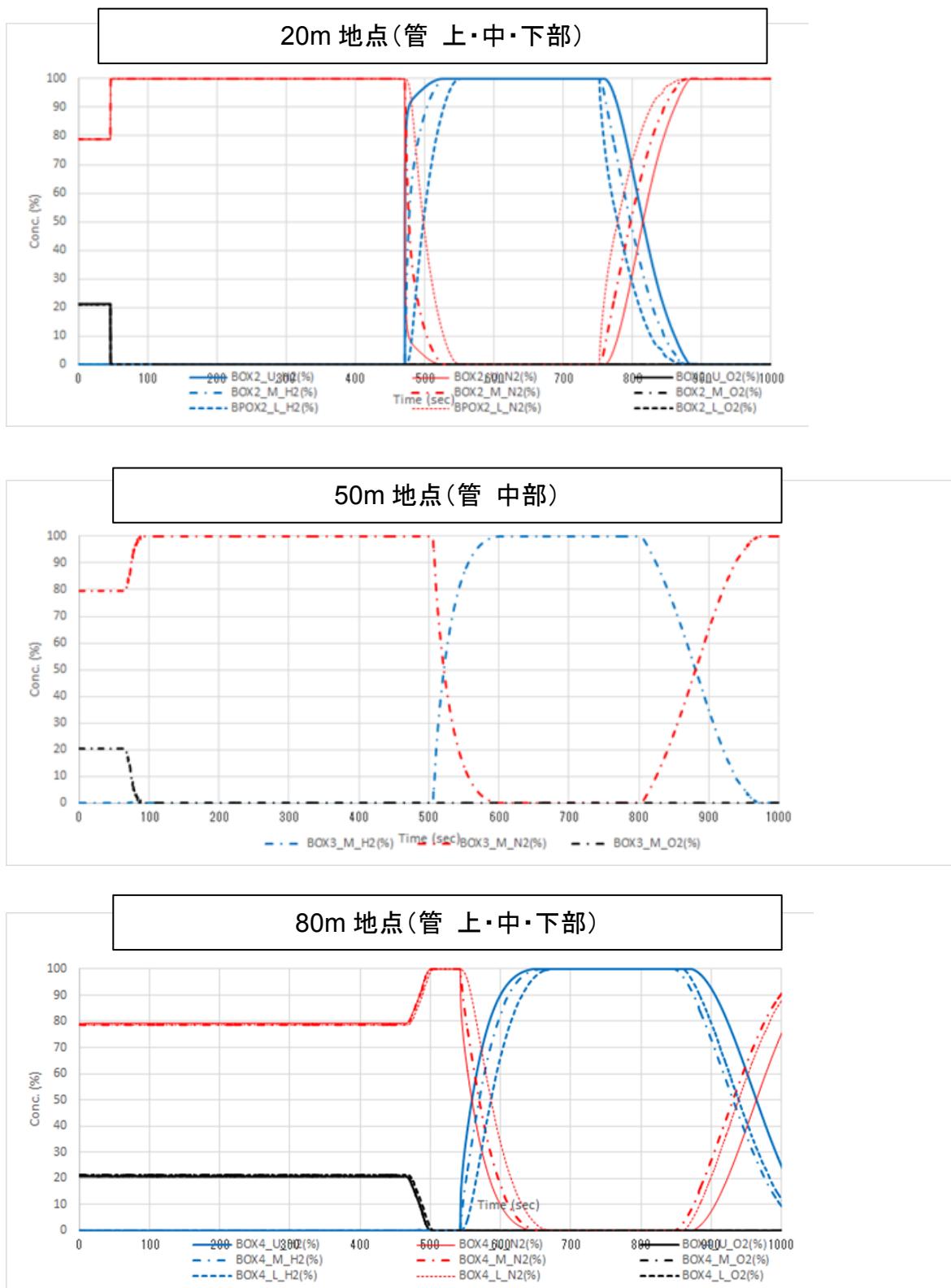


図 2.2.8 代表的な測定波形（ガス濃度）

実験番号 150A-3 (N₂層長さ 18m、H₂流量 720L/min、流速 0.63m/sec)

2.3 実験結果

(1) 解析方針

現象を解析しまとめるにあたり、いくつかの方針立てと必要な定義を行った。概略を図 2.3.1 に示す。

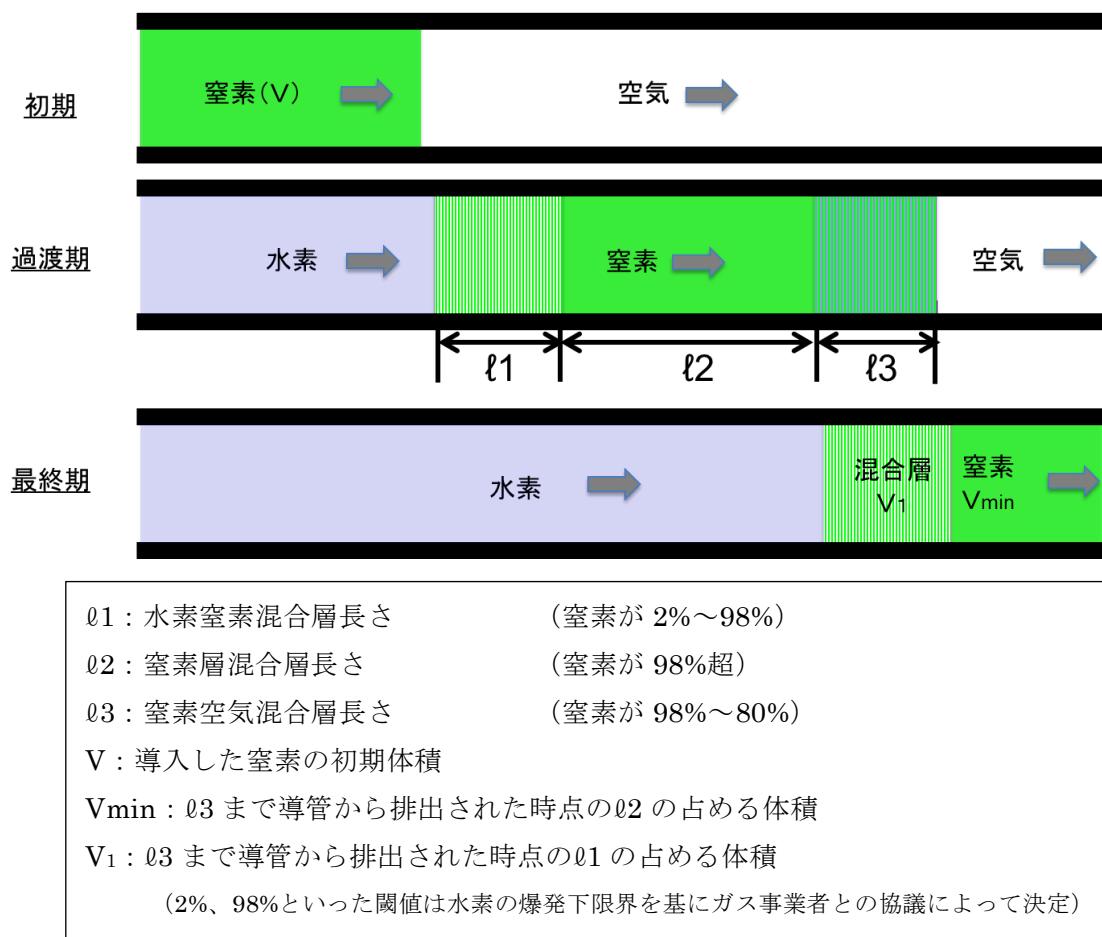


図 2.3.1 解析の方針の概略と各定義

各気体の界面で一切の混合が生じなければ初期に導入した窒素層 V がその長さを有したまま導管の末端まで移動することになるが、現実には必ず気体分子の拡散に伴う混合が生じる。その結果、 ℓ_1 及び ℓ_2 が気体の進行と共に増加し逆に ℓ_2 が減少する。この現象と本事

業の主眼である「水素と空気中の酸素が混合しない条件を見出す」ことは、目標とする導管延長（本事業では 80m）において酸素が排出された時点、即ち空気と ℓ_3 が完全に排出された時点で管内の ℓ_2 が残存している条件を見出すことに等しい。 ℓ_2 の残存は ℓ_1 及び ℓ_3 の増加と不可分の関係にあるため、測定を行った条件において ℓ_1 、 ℓ_2 、 ℓ_3 がいかなる挙動を示すか解析を行えばよいことになる。

上記の方針に従い、解析を行った。なお、表 2.2.2 に示した管内圧力の測定から本事業の調査範囲では試験配管（導管）の入口と出口で大気圧に対しほぼ差圧は観測されず、従つて管内の気体体積に基づく流速は導管延長距離に関わらずほぼ一定であると考えて良い。一方、検討に要するレイノルズ数は管内の気体の流速が等しくても水素と窒素で大きく異なり、窒素のレイノルズ数は水素のレイノルズ数の約 7 倍となる。本実験では水素の供給に伴う気体の移動と ℓ_1 、 ℓ_2 、 ℓ_3 の変化が解析対象となるため、解析に用いるレイノルズ数は水素のレイノルズ数 (ReH_2) を中心とする。

(2) 各濃度計への水素の到達時間

まず、起点を「AV1 開操作を開始した時間」とした、水素が各濃度計に到達する時間をまとめたものを表 2.3.1 に示す。ここで水素が濃度計に到達する時間とは図 2.3.1 における ℓ 1 の右端が各濃度計の位置に到達した時間のことであり、これは濃度計の示す水素濃度が 2%を超える時間によって判断される。

表 2.3.1 水素が各濃度計に到達する時間

実験番号	25A-1	25A-2	25A-3	25A-4	25A-5	25A-6	25A-7	25A-8
流速 m/s	1.4	1.1	2.3	2.3	2.3	3.7	3.7	3.7
Re H2	360	290	570~650	570~651	570~652	940~1000	940~1000	940~1000
Re N2	2600	2000	4000~4600	4000~4601	4000~4600	6600~7100	6600~7100	6600~7100
25m-U	30	21	20	20	20	21	20	21
25m-M	30	21	20	20	20	21	20	20
25m-L	30	21	20	20	20	21	20	20
50m-M	53	45	25	25	24	29	28	28
80m-U	75	69	30	30	29	37	36	37
80m-M	75	69	30	30	29	37	37	37
80m-L	75	69	30	30	29	37	36	37
実験番号	50A-1	50A-2	50A-3					
流速 m/s	0.682	0.682	1.14					
Re H2	340	350	570					
Re N2	2400	2400	4000					
25m-U	46	46	36					
25m-M	46	46	36					
25m-L	48	47	36					
50m-M	87	86	60					
80m-U	128	127	85					
80m-M	129	127	85					
80m-L	130	129	85					
実験番号	100A-1	100A-2	100A-3	100A-4	100A-5	100A-6		
流速 m/s	0.306	0.306	0.612	0.612	1.15	1.15		
Re H2	300	300	600	600	1100	1100		
Re N2	2100	2100	4300	4300	8000	8000		
25m-U	70	69	53	50	41	39		
25m-M	71	70	53	50	41	39		
25m-L	75	73	55	52	42	39		
50m-M	149	149	92	89	63	59		
80m-U	234	234	131	128	86	82		
80m-M	236	236	132	129	86	82		
80m-L	242	242	136	133	87	83		
実験番号	150A-1	150A-2	150A-3	150A-4	150A-5	150A-6	150A-7	150A-8
流速 m/s	0.397	0.423	0.635	0.635	1.06	1.06	1.38	1.38
Re H2	580	620	930	930	1500	1500	2000	2000
Re N2	4100	4400	6500	6500	11000	11000	14000	1400
25m-U	68	67	63	63	56	56	55	55
25m-M	68	68	63	63	56	56	55	55
25m-L	74	74	68	69	58	59	56	56
50m-M	118	117	98	97	76	77	71	72
80m-U	172	171	134	134	98	98	88	89
80m-M	172	172	135	135	98	98	88	89
80m-L	182	181	142	141	100	100	89	90

この結果から導管内を進行する水素の流速の鉛直方向位置依存性がわかる。概して、上部または中央の到達時間が短く、下部の到達時間が長い。更に、導管の口径大きく流速が遅いほど

$$\begin{array}{ll} \text{到達時間 (sec)} & \text{上} \leq \text{中} < \text{下} \\ \text{水素の流速} & \text{速い} \longleftrightarrow \text{遅い} \end{array}$$

の傾向が顕著になる。

この結果は、水素と窒素の密度差に由来する浮力の影響に由来するものであると考えられ、窒素と水素の界面では浮力の影響が無視できないことを示している。

(3) ℓ_1 解析結果

ℓ_1 について解析を行った結果を図 2.3.2～2.3.7 に示す。まず、濃度計の測定波形と水素の流速から ℓ_1 を距離として換算した結果が図 2.3.2～図 2.3.4 である。ここで ℓ_1 は水素濃度が 2%から 98%に至るまでの時間に水素の流速を乗じて求めている。測定点 (U・M・L)、導管口径、水素レイノルズ数のいずれにも依存して変化する値となっており、グラフごとに水素レイノルズ数に対し増加または減少の傾向は見て取れるものの統一的な傾向の判断は困難である。

そこで、 ℓ_1 を導管口径 d で除した無次元距離 ℓ_1/d によって整理を行ったものが図 2.3.5～2.3.7 である。結果として、50A、100A 及び 150A については測定点ごとに水素レイノルズ数への依存性のみに集約され、水素レイノルズ数に対する 1 次関数の形で示すことができる。このことは、鉛直方向の窒素に対する水素の拡散はほぼ距離に比例して生じていることを示していると考えられる。また、窒素の導入状態の違いに関わらず、水素レイノルズ数が等しければ測定点ごとの ℓ_1/d の結果も等しくなることは、水素と窒素の界面に関わる現象は水素に先行する窒素、並びに空気の状態には無関係であることも示されている。このことは空気はその組成の大部分が窒素から成ること、並びに窒素と酸素の間では粘性や拡散速度等の輸送現象物性に大きな差が無いことから自明である。

それに対し、25A についてはバラつきが大きくまとまりの無い結果となっており、25A についてはより大きな口径の導管と現象が異なっていることが示唆されている。25A のような口径の小さい導管における置換の現象と作業は他と別に考える必要がある。

等しい距離 (20m、80m) における U・M・L ごとの差に着目すると顕著な差が見てとれる。導管の上部 (U) では水素レイノルズ数の増大に伴い ℓ_1/d は減少するのに対し、導管の下部 (L) では逆に水素レイノルズ数の増大に伴い ℓ_1/d は増加するという逆の傾向を示す。導管中央 (M) の結果はその間の傾向を示す。 ℓ_1/d の減少は窒素に対する水素の拡散の抑

制を意味し、逆に ℓ_1/d の増加は水素の拡散の促進を意味する。一般に気体のレイノルズ数の増加に伴い気体の拡散は抑制を受けるとされ、上部での結果はそれに従うが下部での結果はその逆となっている。拡散が促進を受けることは乱流輸送よりも粘性と導管壁との摩擦の支配する現象化にあり、導管下部では管壁の摩擦を強く受けながら流れが進行していると考えられる。上部と下部で顕著に現象上の差が生じるのは窒素に対する水素の密度差に由来する浮力の影響と考えられ、管上部では浮力の影響を強く受けてピストン流れの界面が強化を受け、管下部では逆に界面が緩和を受けているものと結論できる。このことは表 2.3.1 に示された水素の到達時間の傾向と一致している。

一方で $U \cdot M \cdot L$ ごとに導管延長方向の変化をみると、延長方向の距離が長くなればなるほど ℓ_1/d は増加し、本調査事業の水素レイノルズ数の範囲では気体の進行に伴う拡散は避けることができないことがわかる。

必要な窒素の量を求めるにあたっては、安全対策の観点から ℓ_1/d は $U \cdot M \cdot L$ のうち最も大きな値を示す L の値を採用するのが妥当と考える。本事業で調査を行った、水素のレイノルズ数 $ReH_2 \leq 2000$ (窒素の示すレイノルズ数 $ReN_2 \leq 14000$) の範囲において、 $50A$ 以上の口径の導管では以下の形で示すことができる。

$L \leq 20$	$20 < L \leq 80$	$L : \text{導管延長 } d : \text{導管口径}$
$\ell_1 = (0.0227 ReH_2 + 202) \cdot d$	$\ell_1 = (0.0833 ReH_2 + 328) \cdot d$	

25A 管の場合はまた別途議論するべきである。

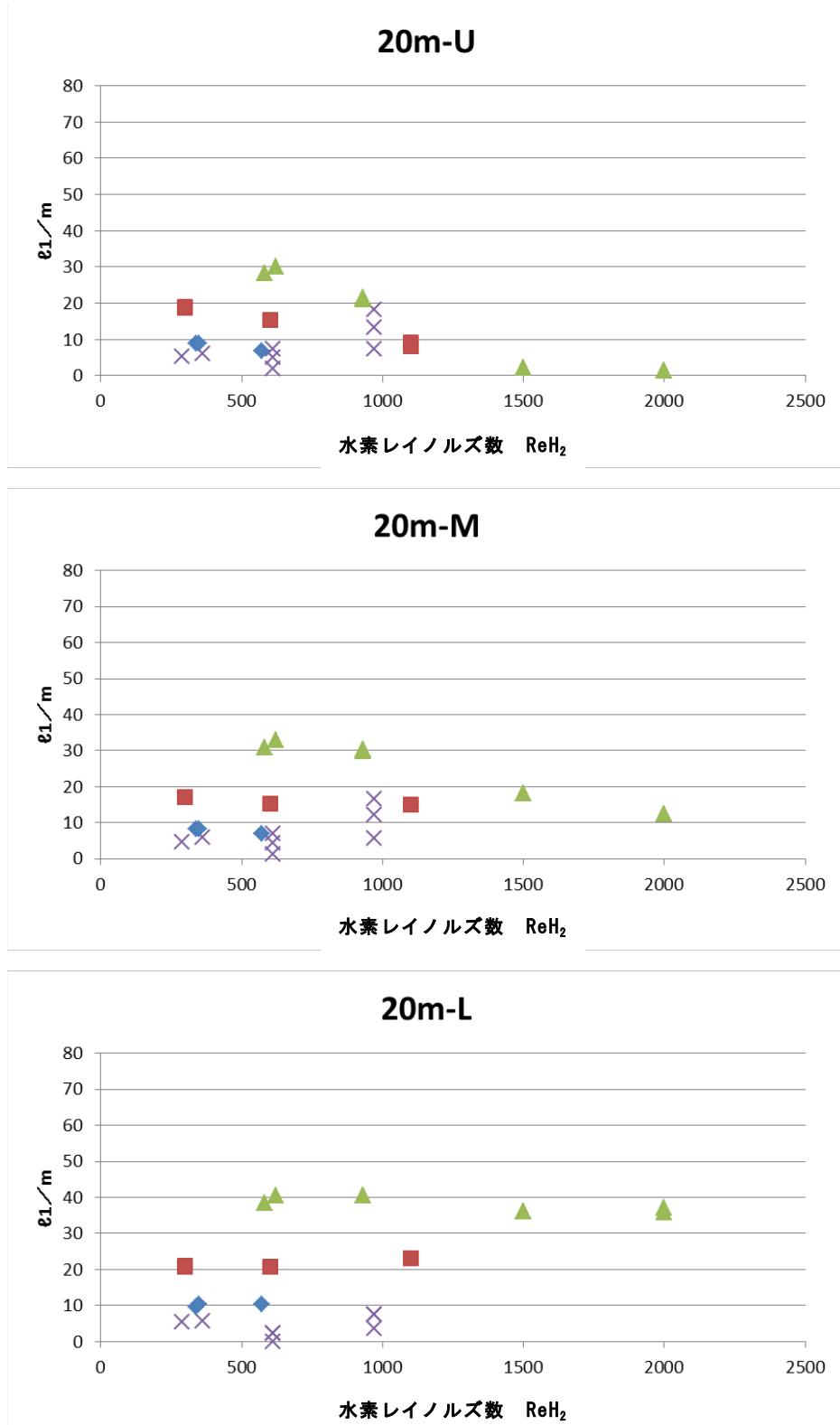


図 2.3.2 20m 地点での $\varnothing 1$ の導管口径／水素レイノルズ数依存性
測定点：導管上部 (U)・中央 (M)・下部 (L)

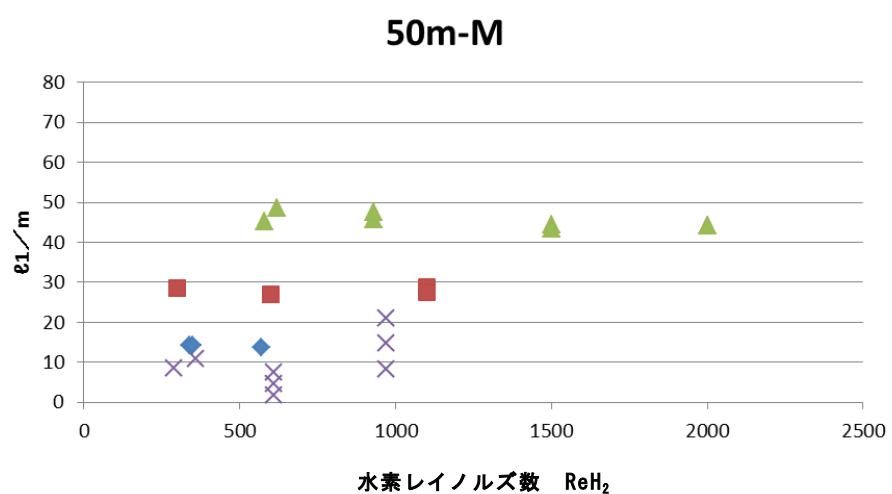


図 2.3.3 50m 地点での ℓ_1 の導管口径／水素レイノルズ数依存性
測定点：導管中央 (M)

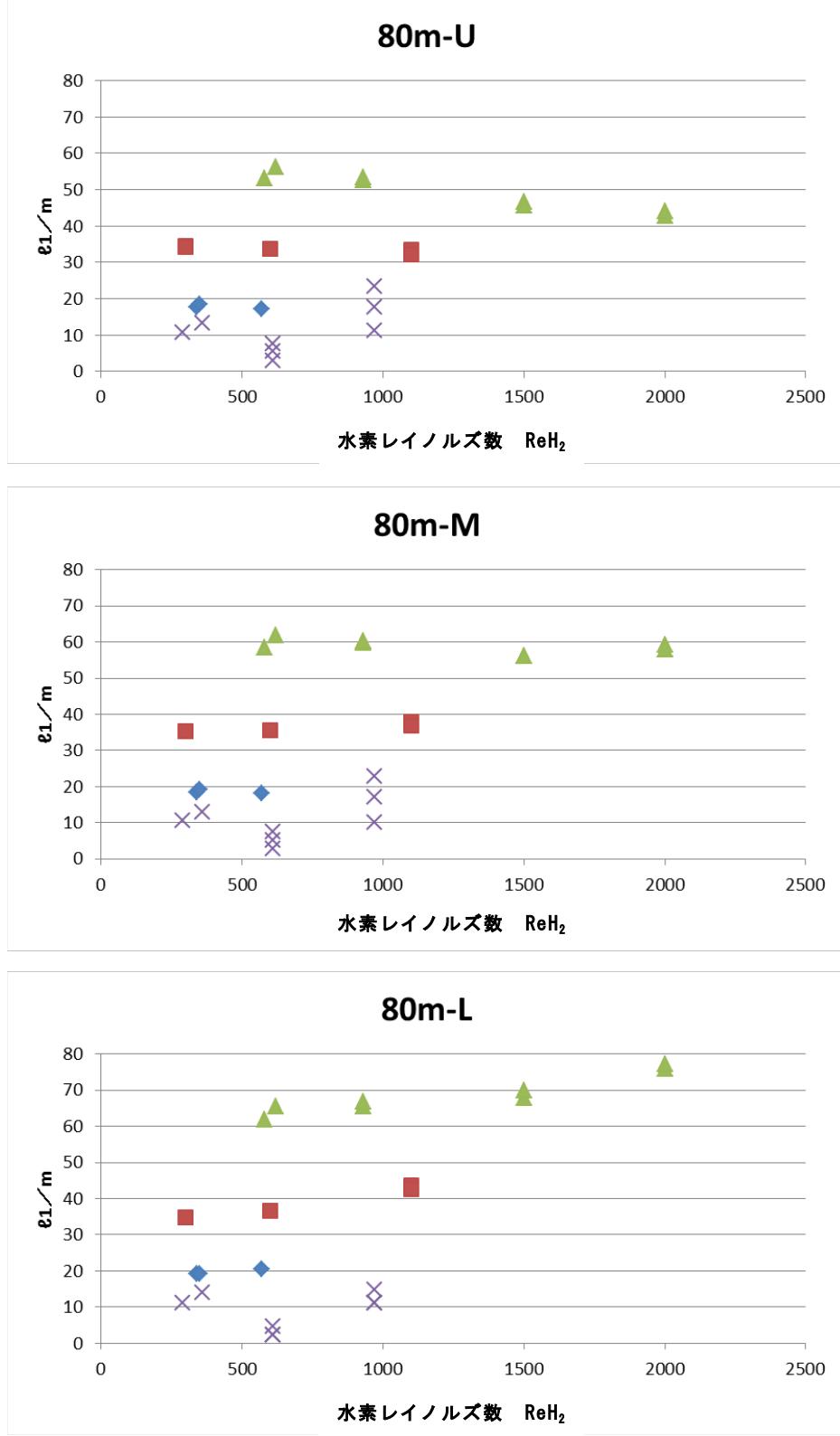


図 2.3.4 80m 地点での ℓ_1 の導管口径／水素レイノルズ数依存性

測定点：導管上部 (U)・中央 (M)・下部 (L)

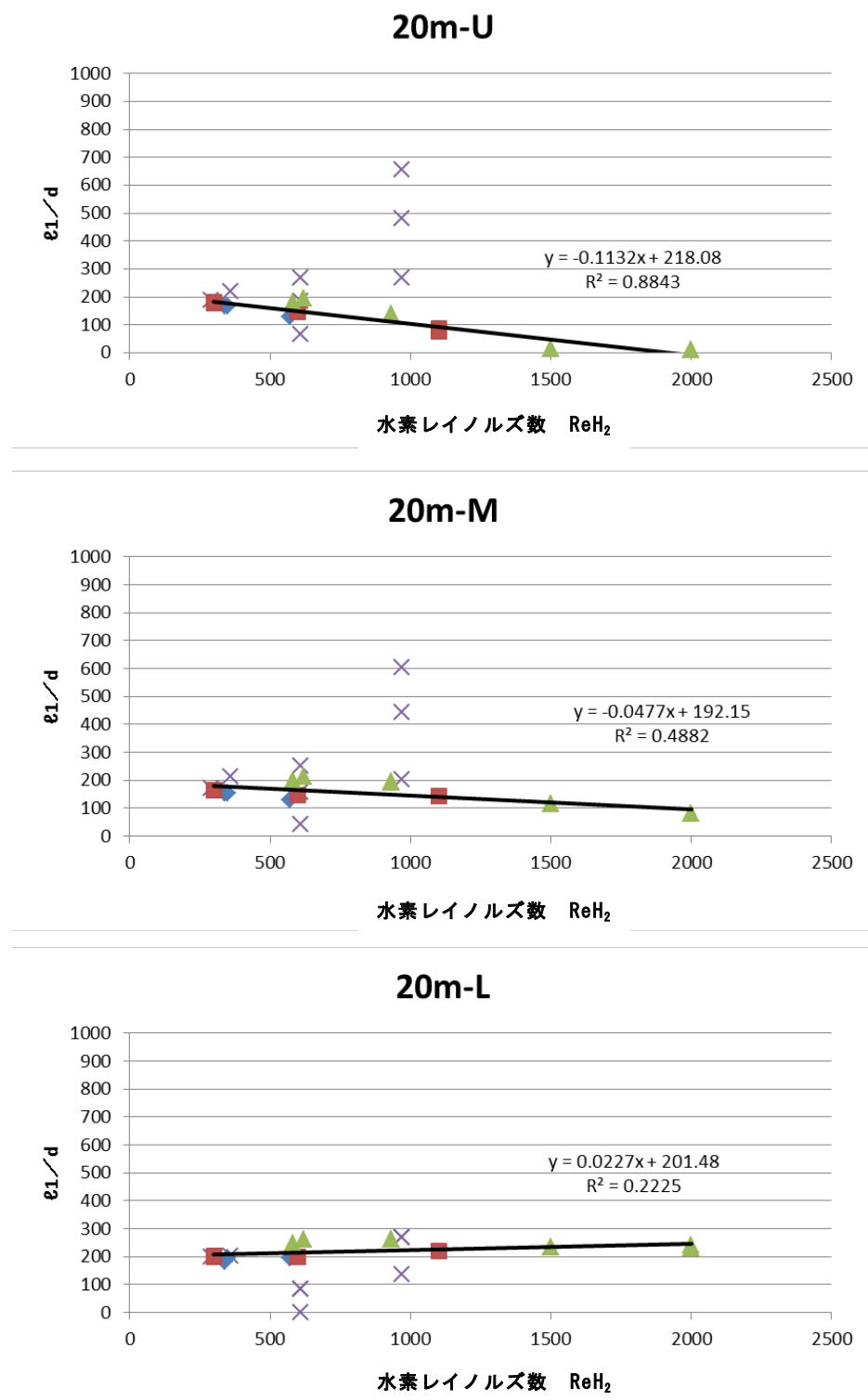


図 2.3.5 20m 地点での無次元距離 ℓ_1/d の導管口径／水素レイノルズ数依存性
測定点：導管上部 (U)・中央 (M)・下部 (L)

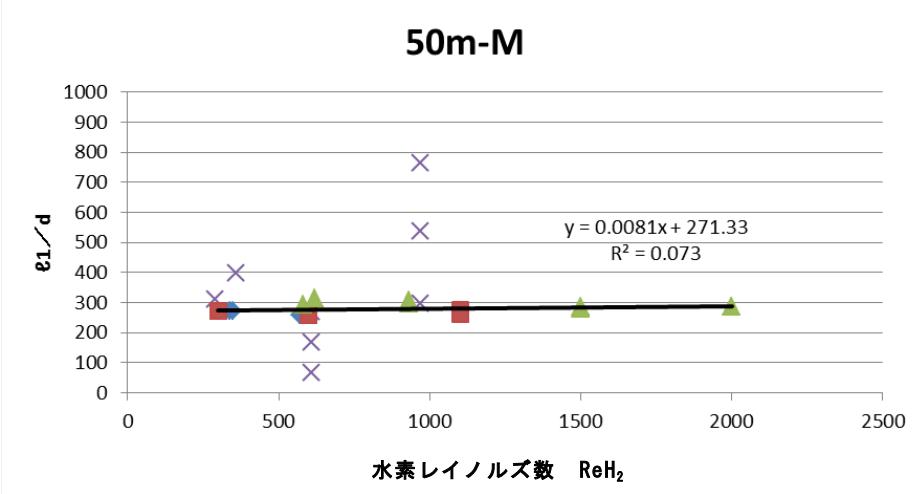


図 2.3.6 50m 地点での無次元距離 d_1/d の導管口径／水素レイノルズ数依存性
測定点：導管中央 (M)

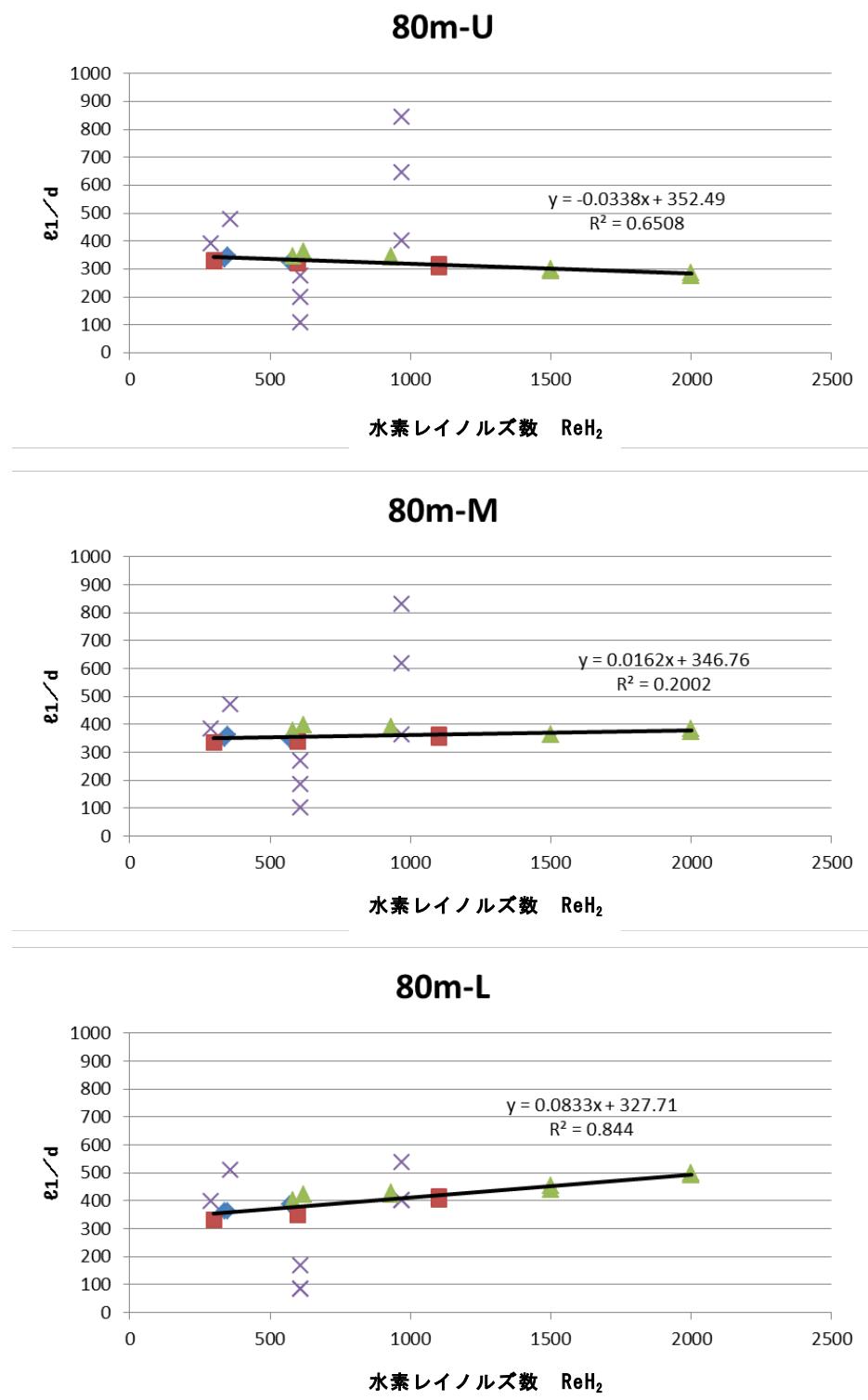


図 2.3.7 80m 地点での無次元距離 ℓ_1/d の導管口径／水素レイノルズ数依存性
測定点：導管上部 (U)・中央 (M)・下部 (L)

(4) ℓ_2 解析結果

ℓ_2 について解析を行った結果が図 2.3.8～2.3.13 である。 ℓ_2 は導入した窒素の量に依存するため、 ℓ_1 のような d で除する解析は無意味であり掲載していない。また、多くの実験条件において窒素は導入時点で 20m 地点に到達してしまっており、20m で得られた測定結果は僅かとなっている。図 2.3.8～2.3.10 は導管延長距離及び U・M・L ごとに分類、図 2.3.11～2.3.12 は導管延長距離と導管口径ごとに分類した結果である。また、距離の進行に従つた ℓ_2 の減少の程度 $\Delta \ell_2$ についてまとめたものが図 2.3.13 である。データ数が少ないこともあり、いざれも系統だった結論は得られないが、重要な示唆として U・M・L による依存性が比較的小さいことが挙げられる。 ℓ_1 の場合は浮力の影響もあり U での値が小さく L での値が大きくなるという顕著な傾向があるが、図 2.3.8～2.3.10 に示される結果は統一性がなくバラつきの範囲に収まっていると言える。

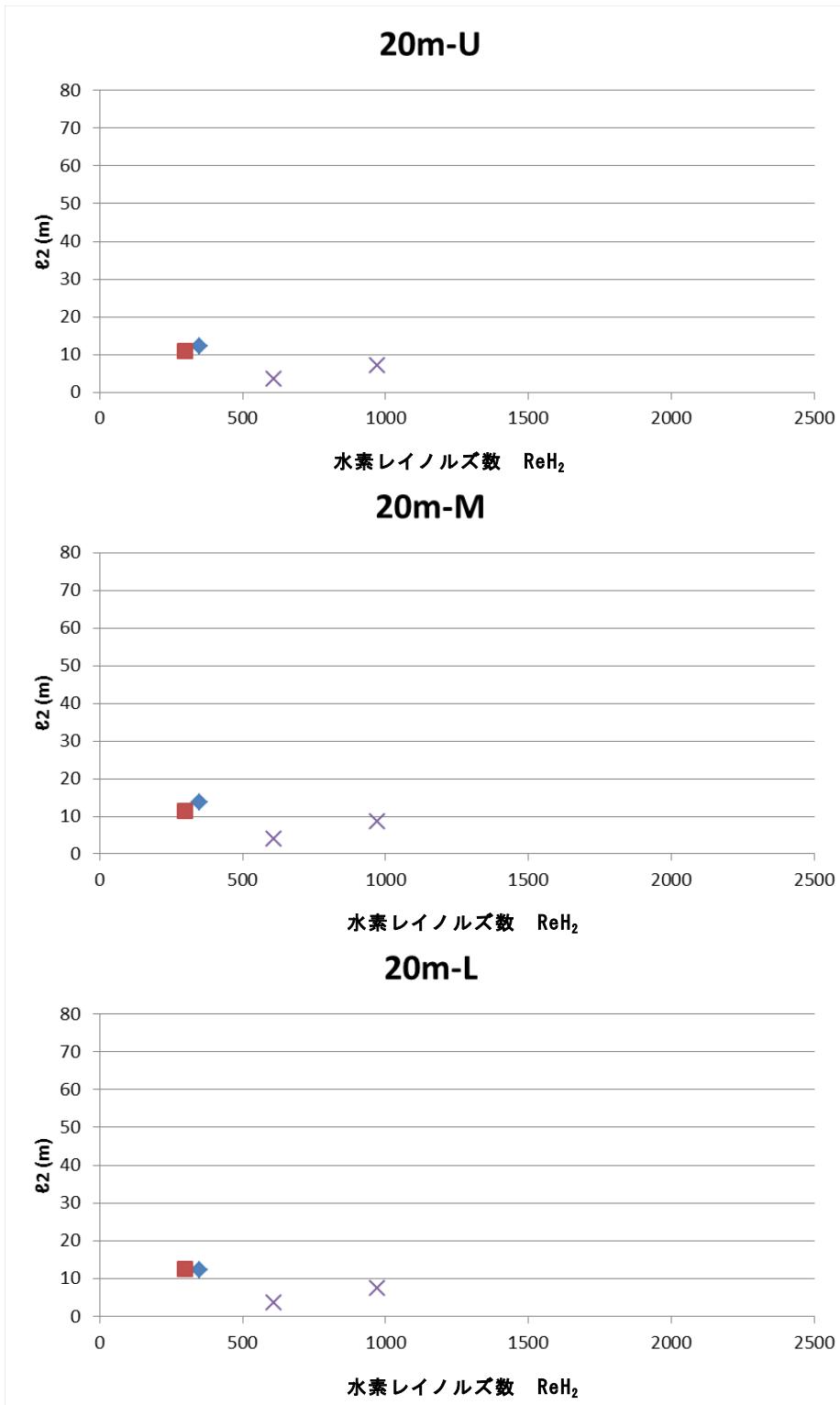


図 2.3.8 20m 地点での ℓ_2 の導管口径／水素レイノルズ数依存性
測定点：導管上部 (U)・中央 (M)・下部 (L)

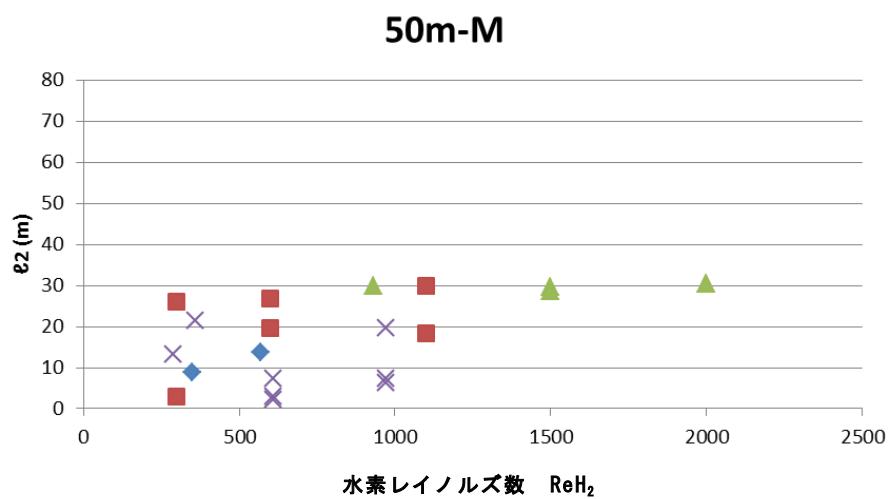


図 2.3.9 50m 地点での d_2 の導管口径／水素レイノルズ数依存性
測定点：導管中央 (M)

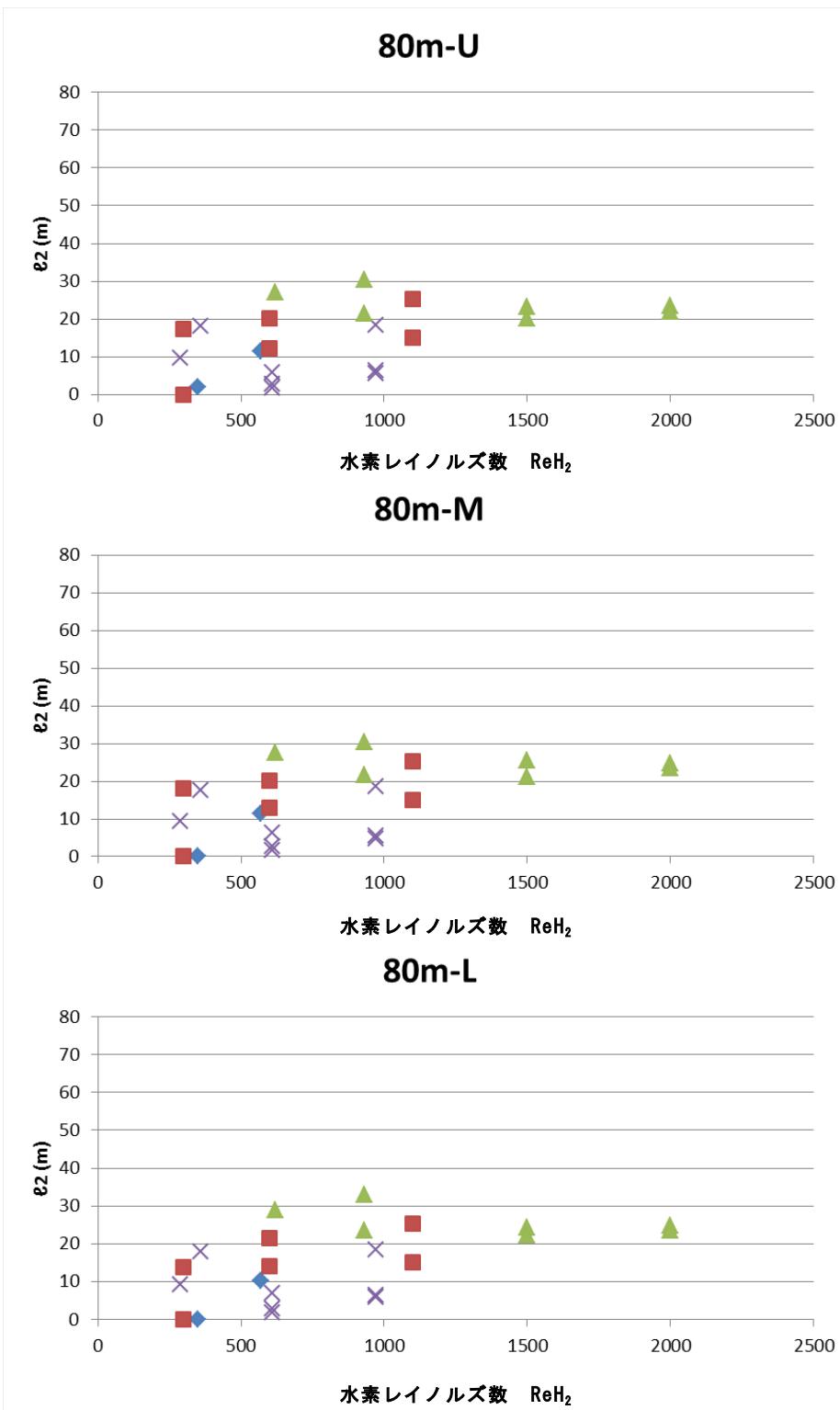


図 2.3.10 80m 地点での ℓ_2 の導管口径／水素レイノルズ数依存性
測定点：導管上部 (U)・中央 (M)・下部 (L)

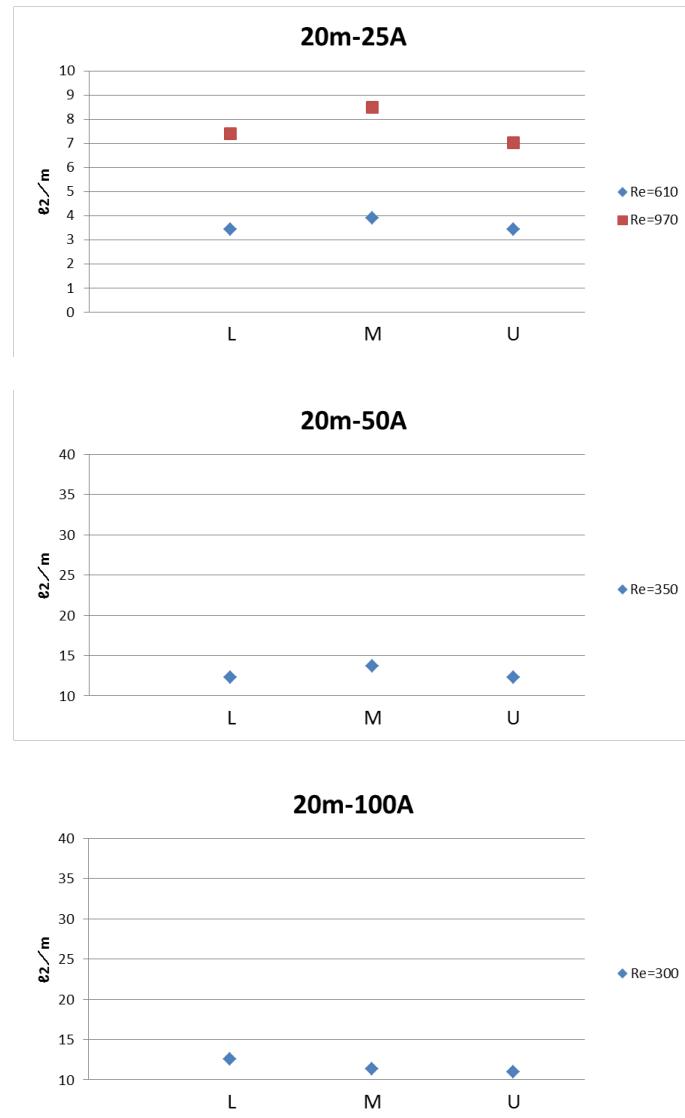


図 2.3.11 20m 地点での導管口径ごとの θ_2

測定点：導管上部 (U)・中央 (M)・下部 (L)

レイノルズ数は水素の値

※150A は水素導入時点で窒素が 20m 地点に到達しており測定不可能

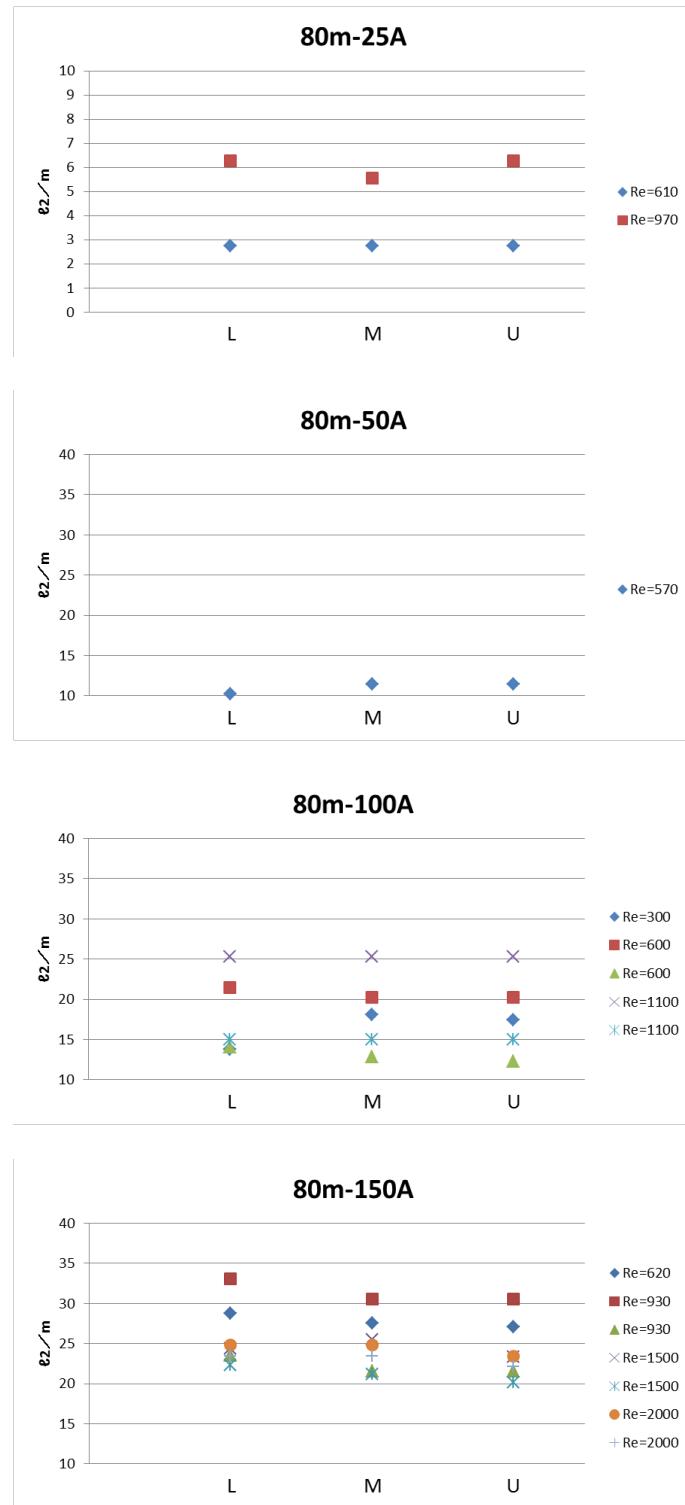


図 2.3.12 20m 地点での導管口径ごとの ℓ_2
測定点：導管上部 (U)・中央 (M)・下部 (L)
レイノルズ数は水素の値

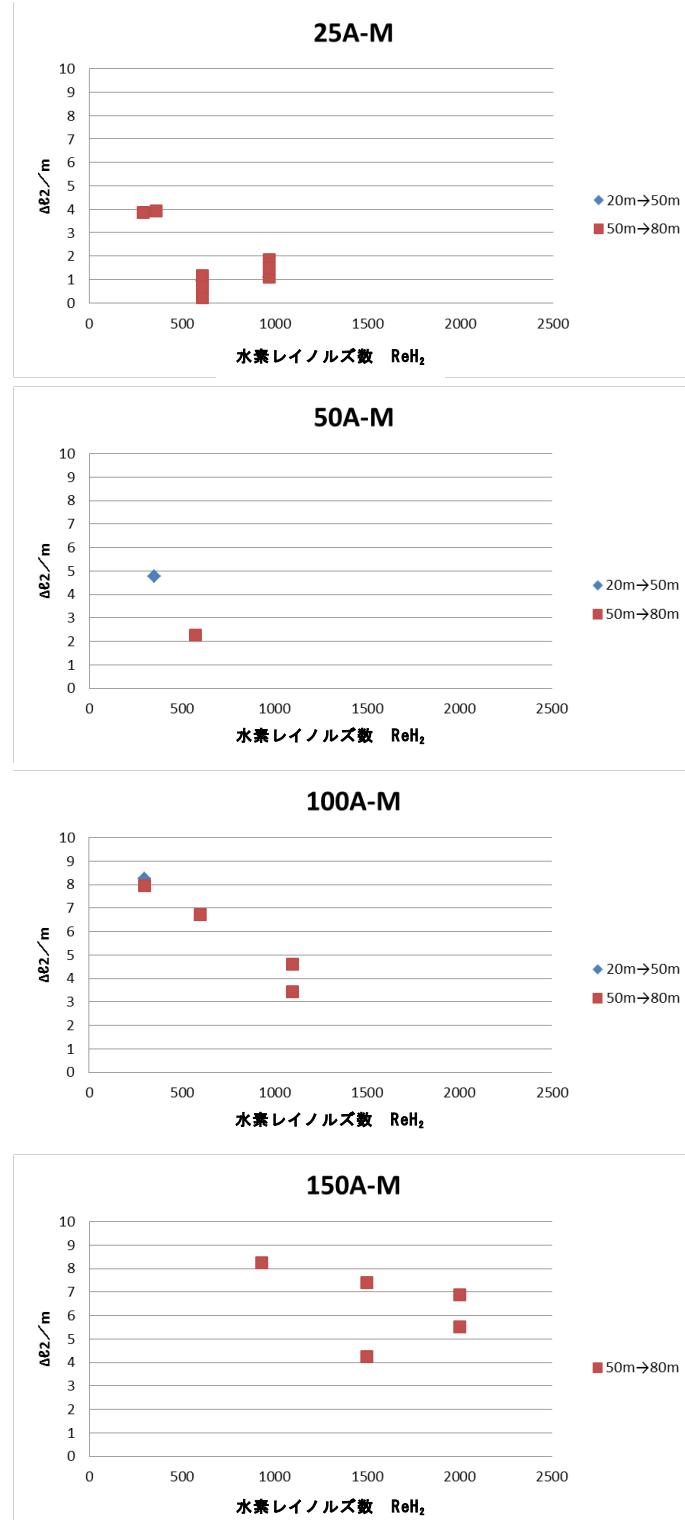


図 2.3.13 θ_2 の減少の割合 $\Delta \theta_2$

測定点：導管中央 (M)

ℓ_2 に関する解析結果を模式的に示すと、図 2.3.14 のようになる。即ち、 ℓ_2 については頗著な導管の上部・中部・下部での差異は認められないことから、残存窒素の層の厚みは管の上部～下部で極端な差は生じないと言える。このことは、例え導管上部での水素の速度が相対的に速くても、上部の水素のみが窒素層を突き抜けてしまう事態が生じる恐れは本調査の範囲では低いことを示している。

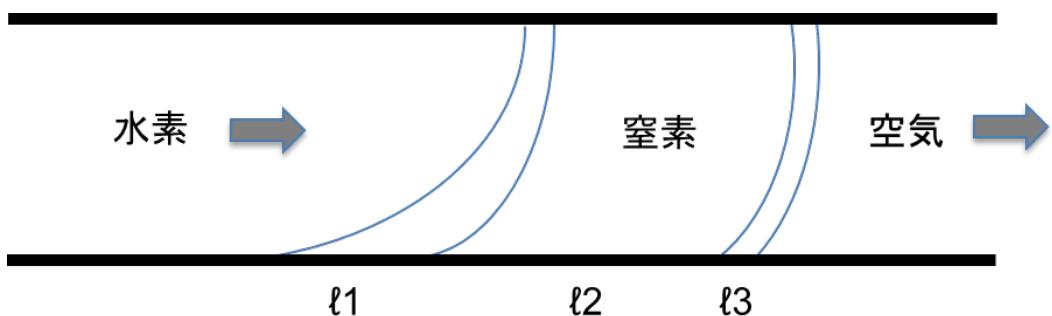


図 2.3.14 ℓ_2 の層厚みに対する模式図

(5) ℓ_3 解析結果

ℓ_3 について、 ℓ_1 に行ったのと同様な解析を施した結果が図 2.3.15～2.3.20 である。図 2.3.15～2.3.17 が ℓ_3 の直の算出値ごと、図 2.3.18～2.3.20 が ℓ_3 を導管口径 d で除した無次元長さ ℓ_3/d ごとにまとめてある。窒素が導入時に 20m 地点、条件によって 50m 地点まで達てしまっている場合があり、 ℓ_2 の場合以上にデータが少ないが、80m 地点での測定結果を比較すると $U \cdot M \cdot L$ の依存性は非常に小さいことがわかる。これは窒素に先行する空気の組成はほとんどが窒素であること、及び窒素と酸素の間で輸送物性は差が小さいことから自明である。一方で全体を通じて系統だった傾向は見てとることができず、バラつきが大きい。

最終的に安全な置換を行うための窒素の量を求めるにあたって、 ℓ_3 は窒素層 ℓ_2 の減少を意味するため無視できない。図 2.3.15～2.3.17 のようにバラつきが大きいと、窒素の導入の仕方ごとに ℓ_3 で消費される窒素量が異なり場合によっては十分な ℓ_2 が確保できなくなる懸念が残る。そこで、すべての実験条件における ℓ_3 と ℓ_1 の関係を図示したものが図 2.3.21 である。グラフ上の一つの点はある実験条件のある測定点で得られる ℓ_1 と ℓ_3 を示している。 ℓ_1 の解析結果で示されたように、条件によっては ℓ_1 は最長で 80m 近くにまで達する。その一方で、 ℓ_3 はバラつきはあるものの多くの場合 20m 以下で頭打ちとなっており、最長でも 30m に満たない。即ち、種々の影響で水素と窒素の界面での混合が促進されるような状態でも窒素と空気の混合は殆ど進まないことを意味している。逆に言えば表 2.2.1 及び 2.2.3 に示されるような窒素の流量とバルブの開閉操作を同等の条件に揃えた場合でもバラつきは避けることができないことを意味するが、本調査で行った窒素の流速及びバルブの開閉操作の範囲内では ℓ_3 としては 30m 未満を見積もっておけば良いと考えられる。

上述の通り ℓ_3 のバラつきは窒素導入時のバルブ開閉に伴うバラつきに起因すると考えられ、レイノルズ数を増大させても ℓ_3 が増大するような顕著な傾向は無く、統一性は欠くもののむしろ減少傾向にあるといえ、これは既往の置換時のガス界面の知見と一致する。

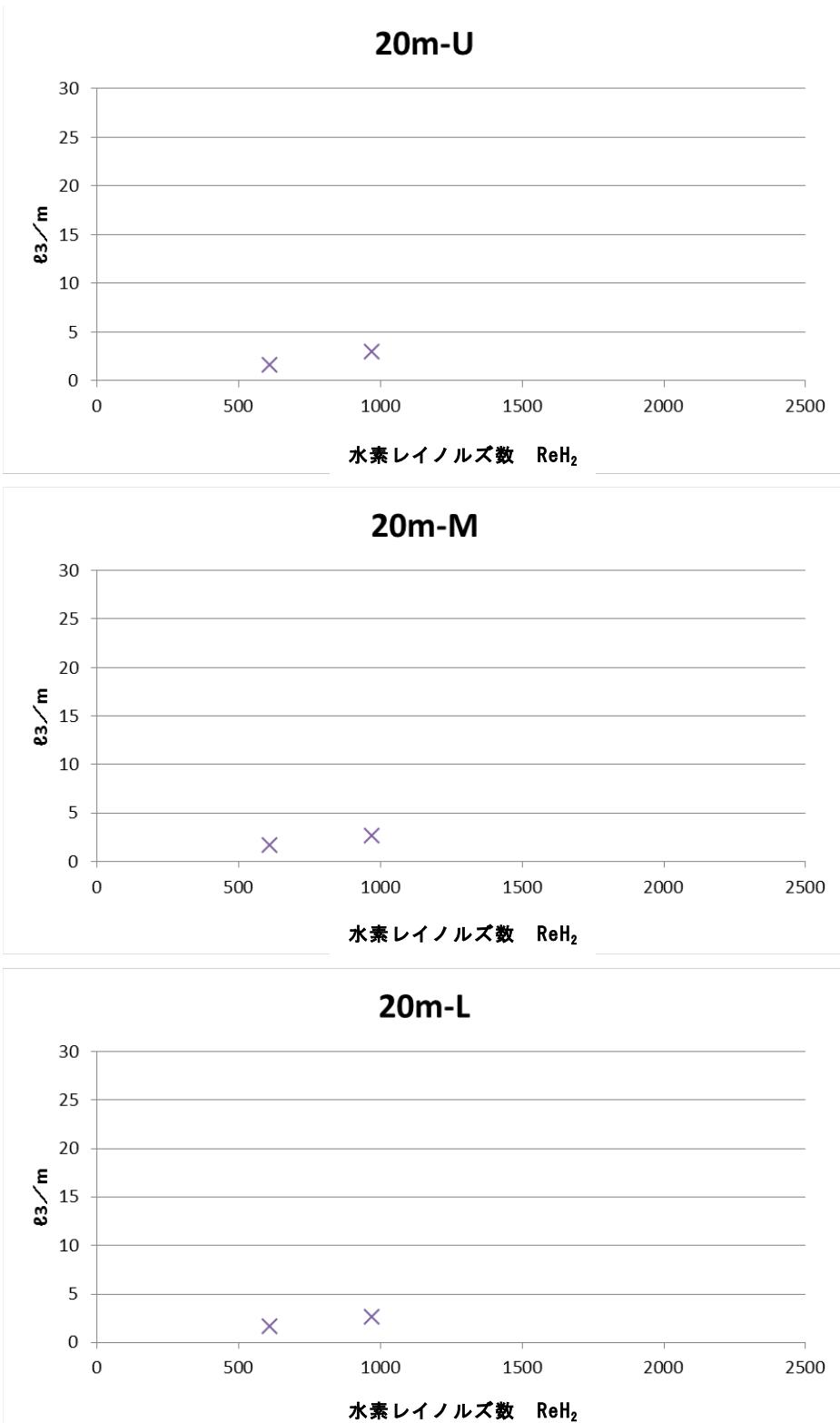


図 2.3.15 20m 地点での ℓ_3 の導管口径／水素レイノルズ数依存性
測定点：導管上部 (U)・中央 (M)・下部 (L)

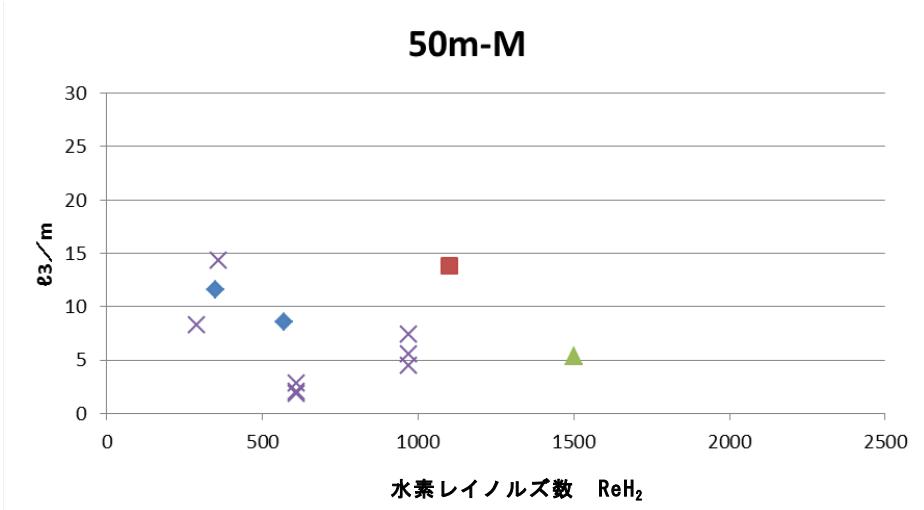
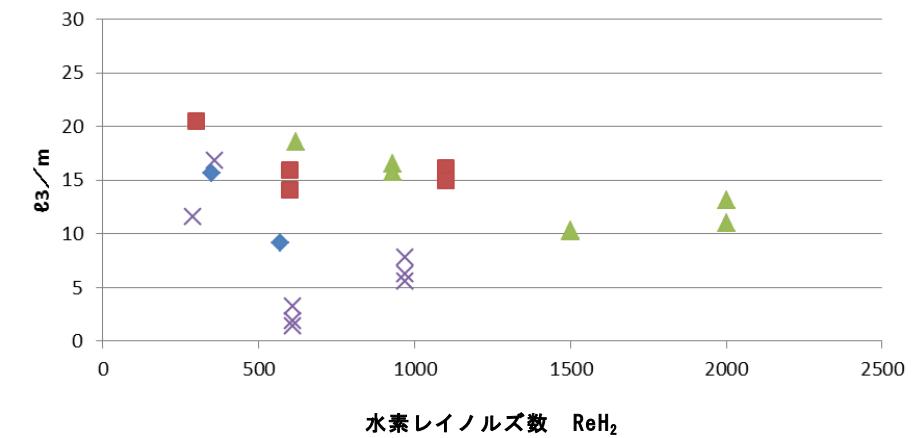
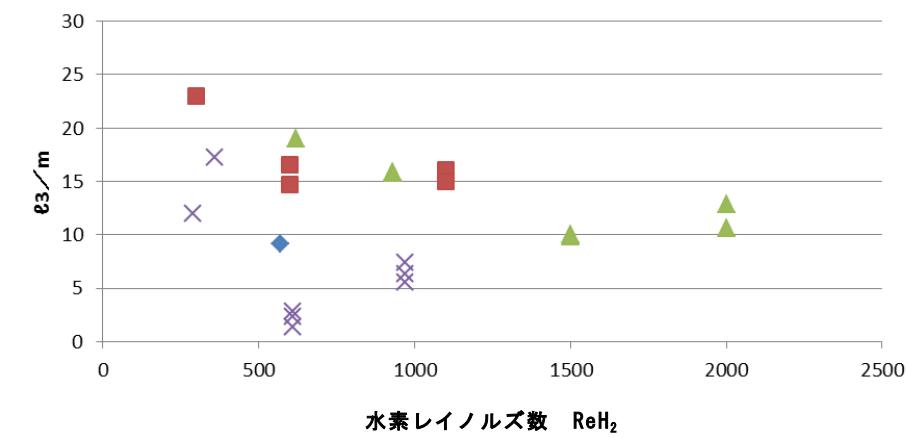


図 2.3.16 50m 地点での d_3 の導管口径／水素レイノルズ数依存性
測定点：導管中央 (M)

80m-U



80m-M



80m-L

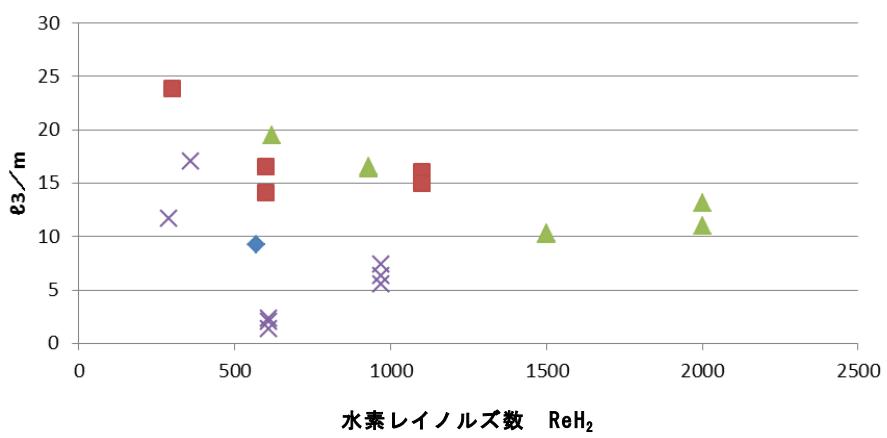


図 2.3.17 80m 地点での ℓ_3 の導管口径／水素レイノルズ数依存性

測定点：導管上部 (U)・中央 (M)・下部 (L)

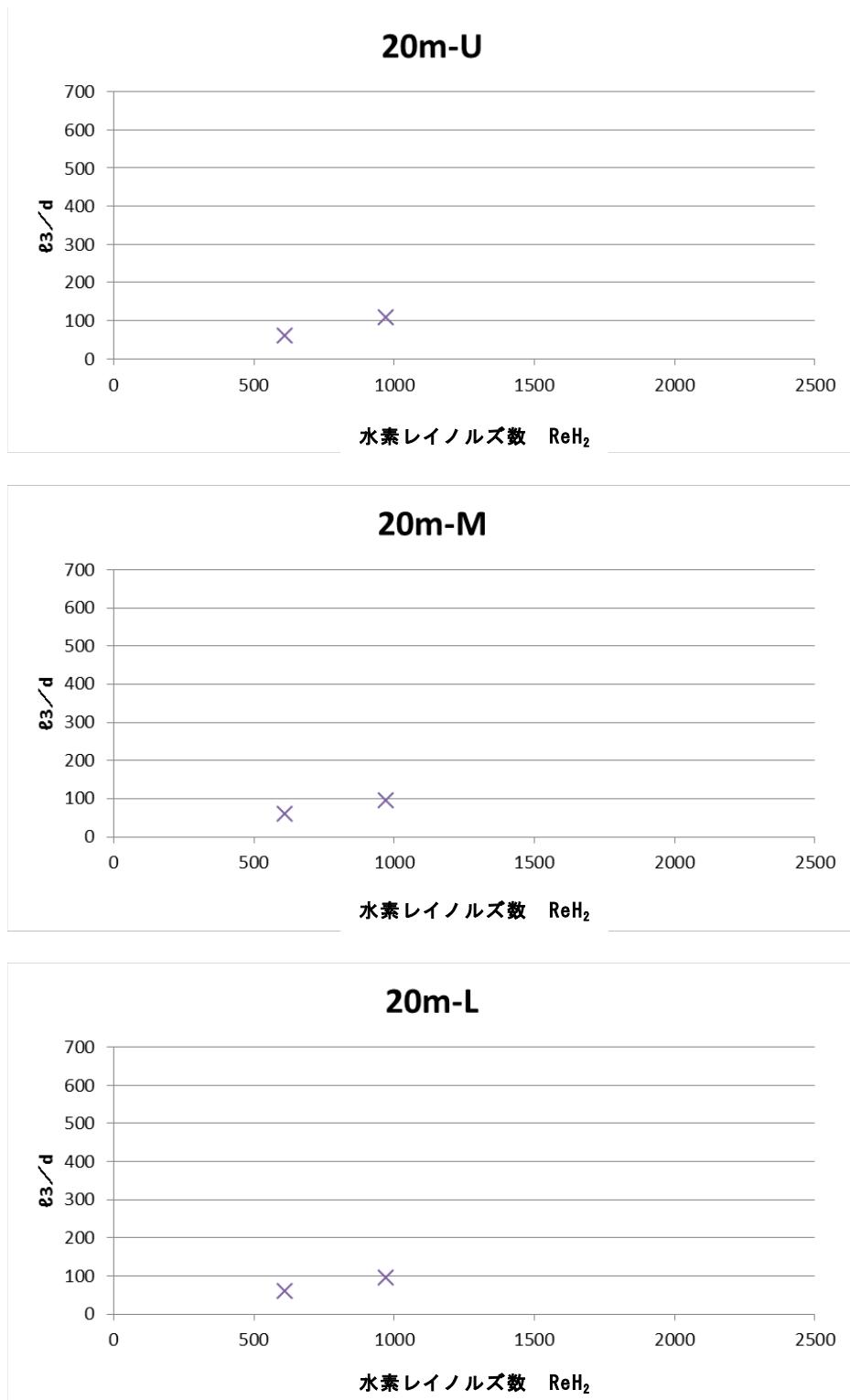


図 2.3.18 20m 地点での無次元距離 ℓ_3/d の導管口径／水素レイノルズ数依存性
測定点：導管上部 (U)・中央 (M)・下部 (L)

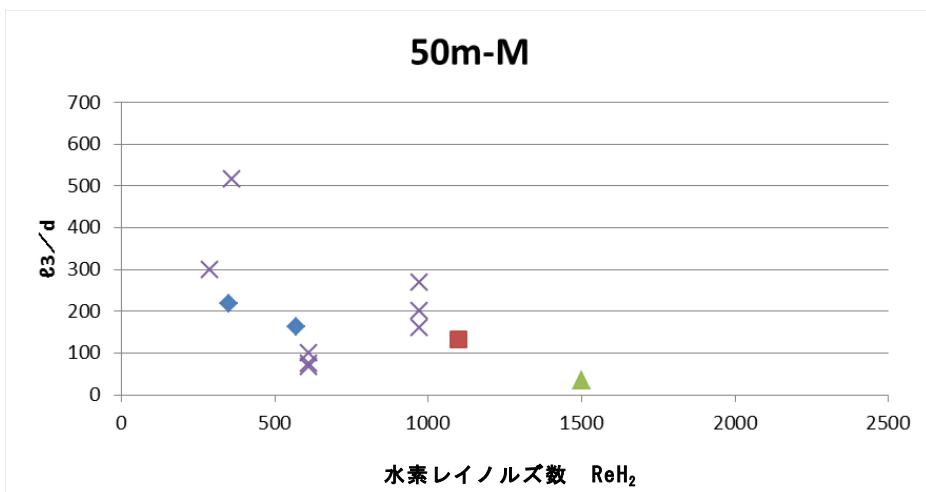
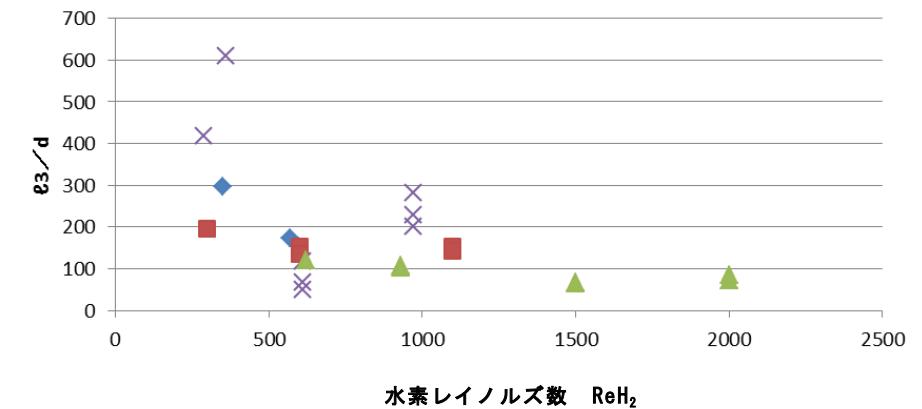
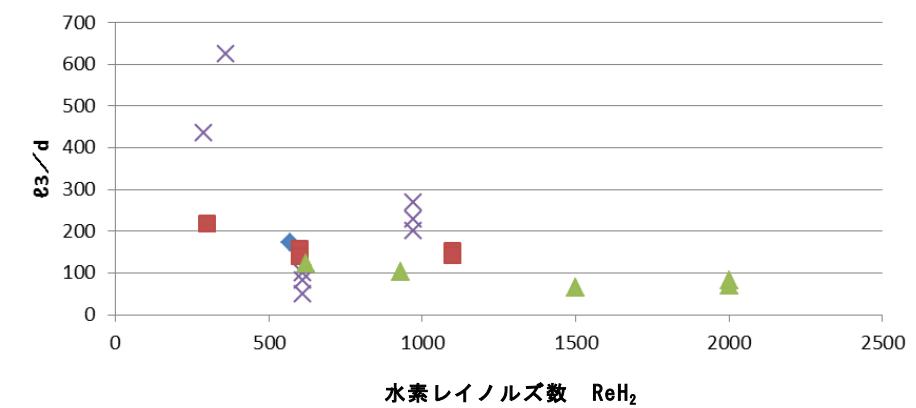


図 2.3.19 50m 地点での無次元距離 l_3/d の導管口径／水素レイノルズ数依存性
測定点：導管中央 (M)

80m-U



80m-M



80m-L

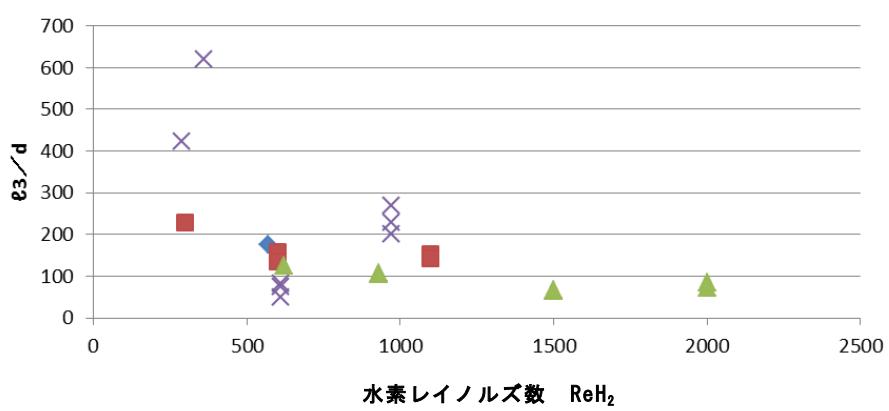


図 2.3.20 80m 地点での無次元距離 ℓ_3/d の導管口径／水素レイノルズ数依存性
測定点：導管上部 (U)・中央 (M)・下部 (L)

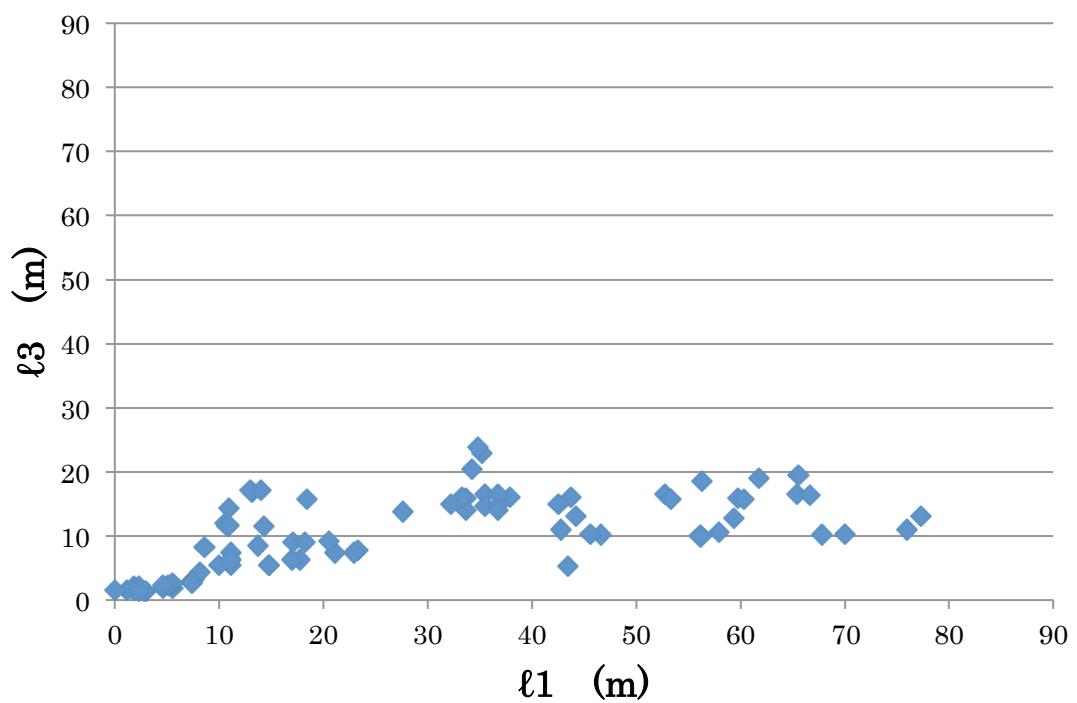


図 2.3.21 すべての実験条件における ℓ_3 と ℓ_1 の関係

(6) 25A 管における特異的現象

25A 管の濃度測定の波形から伺える特異的な現象として、渦の発生に由来すると考えられる結果が全ての実験条件において観測されている。図 2.3.22 に一例を示す。この場合、窒素が 98%以上に到達した後に再び酸素が観測され、その後に再び窒素が 98%以上となっている。すなわち、窒素 98%以上の領域の後方に酸素が存在する領域が再び生じていることになる。この現象は 50A 管より口径の大きな導管においては観測されていない。これは気体界面において生じる渦の影響に帰結して考えられる。窒素及び酸素が管内を進行する際には絶えず渦を生じながら進行しており、渦のスケールが導管の口径に対し十分小さいときは絶えず発生と消滅を繰り返しながら急峻な界面を保持して流れが進行するが、25A 管の場合は本調査の範囲では渦のスケールが導管口径のスケールに接近した場合に酸素の渦内での残存が濃度計でとらえることのできる時間内に生じることを示しているものと考えるのが妥当である。特に、25A 管では管中央部 (20m·M、50m·M、80m·M) の濃度計でもこのような現象が観測されていることは注目すべきであり、このことからも渦のスケールは導管口径に接近しており管壁近傍のみに影響がとどまっていると考察できる。

25A 管の場合、水素の流量の測定波形についても特異的な現象が観測されている。図 2.3.23 に示すように、水素流速が 2.2m/sec 超の実験条件 (実験番号 25A-3~25A-8) においては水素流量は空気及び窒素の排出に伴いほぼ直線的に増加していき、管末端まで水素が到達した時点で一定値となる。これは管内に水素に先行する空気及び窒素が存在する期間はその粘性の影響を強く受けるためと考えられる。表 2.2.1 において 25A の水素流量が 80~90L/min などと示されているのはそのためである。このような現象は 50A、100A 及び 150A 管では見られない。

以上のように、25A 管の場合導管の口径が小さいために、窒素及び空気の粘性、及びそれによって生じる渦などの影響が置換挙動に影響を与えてることがわかる。 $\ell 1/d$ の解析において 25A の結果にバラつきが大きく統一性を欠くのは、これらの現象が影響しているものと考えられる。

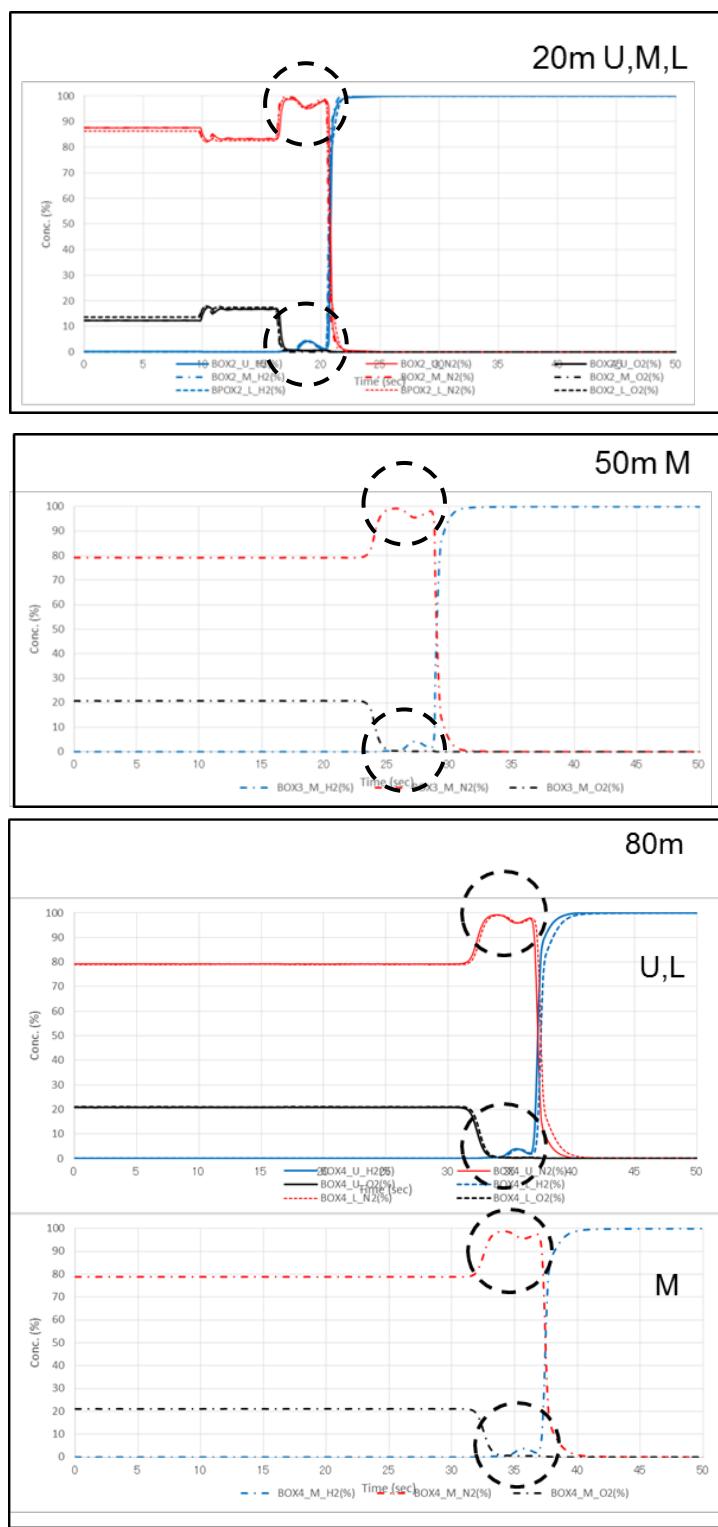


図 2.3.22 25A 管において観測される窒素後方の酸素領域

実験番号 25A-8 水素流速 : 3.6~3.9m/sec

窒素レイノルズ数 6600~7100、水素レイノルズ数 940~1000

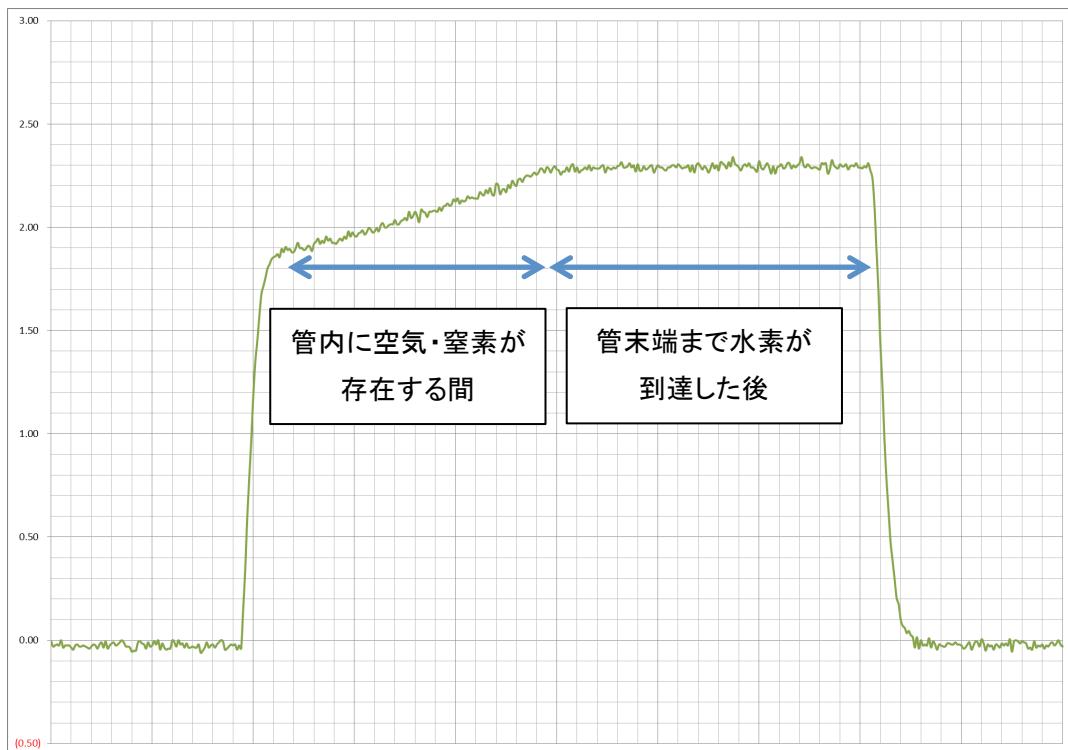


図 2.3.23 25A 管において観測される水素流量の変化の挙動

実験番号 25A-5 水素流速 : 2.2~2.5m/sec

窒素レイノルズ数 4000~4600、水素レイノルズ数 570~650

(7) 100A、150A 管における特異的現象

100A、150A 管の場合、窒素と水素の界面において図 2.3.24 に示すような波形が観測される実験条件が存在する。これは窒素層に水素が渦によって混入し、その結果窒素及び水素の濃度波形が影響を受けているものと考えられる。このような現象は導管の下部 (L) において最も顕著であり、次いで中央 (M) において観測されやすい。対して導管上部 (U) では観測されないか、現れても微小である。25A 管の場合空気と窒素の界面において渦の影響とおぼしき現象が観測されるとの対照的である。これは 100A 及び 150A 管のうち、水素の流速が大きいときにのみ観測される。表 2.2.1 に示される実験条件のうち、このような現象が観測されたのは

100A-5、100A-6

150A-5、150A-6、150A-7、150A-8

の 6 つである。一方で、25A の場合と異なり、 ℓ_1 、 ℓ_2 、 ℓ_3 の解析結果を見る限りこれらの現象は置換の現象において顕著な影響は及ぼしていない。

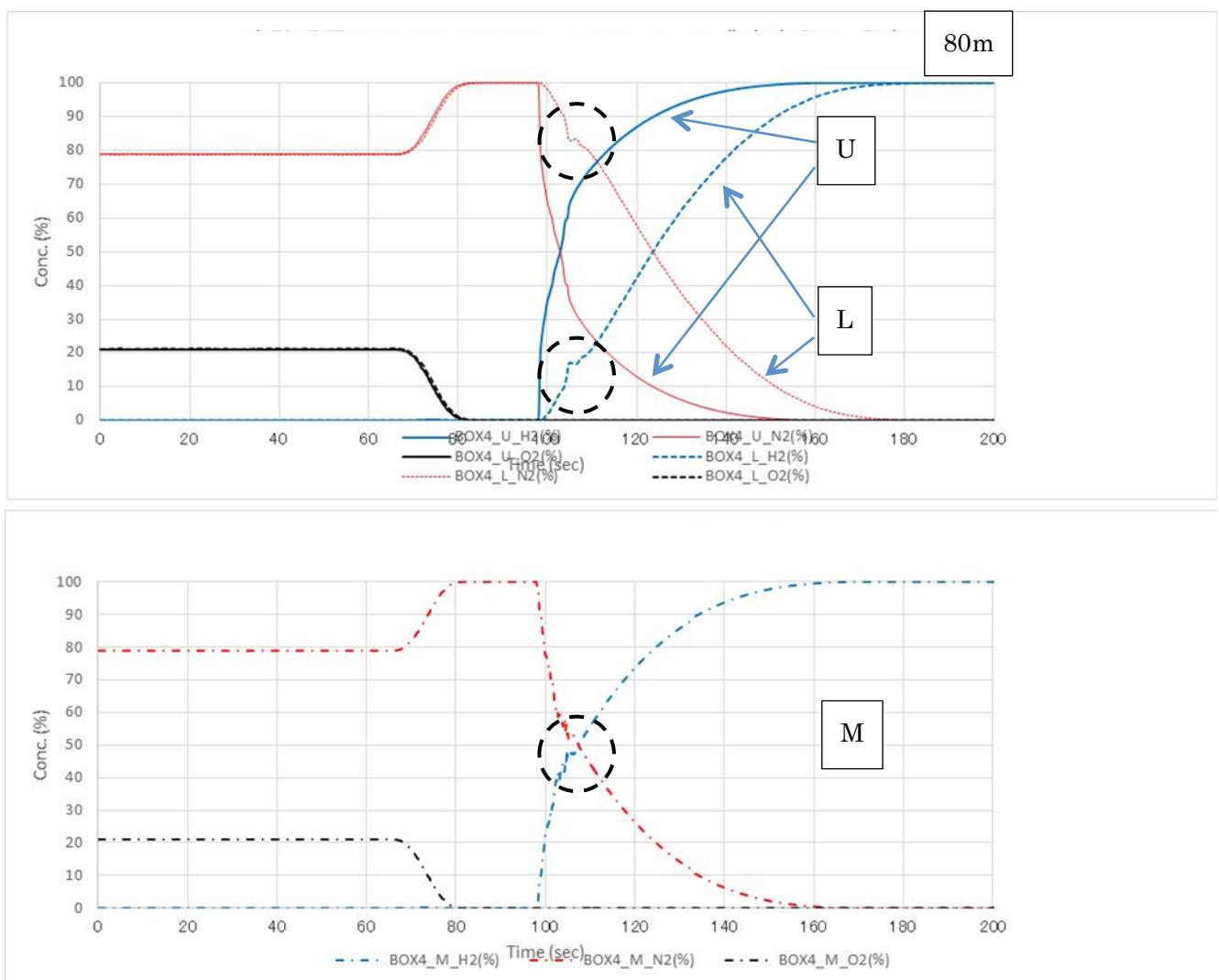


図 2.3.24 窒素と水素の界面で発生する渦

実験番号 150A-6 水素レイノルズ数 1500、窒素レイノルズ数 11000

(8) 実用に供するにあたって：体積への換算

ℓ_1 、 ℓ_2 、 ℓ_3 の解析を通じて、安全な導管置換を行う上での有用な知見が得られた。安全な置換に必要な窒素量を算出するには、まず ℓ_1 を目標とする導管口径や水素流量（水素レイノルズ数）に対して導く必要がある。 ℓ_1 は最初に導入した窒素が消費される目安となるので、窒素量は必ず ℓ_1 によって減少する量よりも大きくなければならない。 ℓ_1 の評価については、50A 以上の場合と 25A の場合で分けて考える必要がある。

・50A 以上の場合

ℓ_1 の算出については、本調査の範囲においては 50A 以上の導管口径において以下の式が適用できる。

$L \leq 20$	$20 < L \leq 80$	L : 導管延長 d : 導管口径
$\ell_1 = (0.0227ReH_2 + 202) \cdot d$ ①	$\ell_1 = (0.0833ReH_2 + 328) \cdot d$ ②	

ただし、 $ReH_2 \leq 2000$ の範囲に限る

②式は①式で示される範囲を含んでおり、①式はより限定的であって 20m 以下の延長の導管にしか用いることができない。

上記の式で導くことのできる ℓ_1 で消費されると予想される窒素に、更に十分に安全と考えられる ℓ_2 を構成するための窒素量を、 ℓ_3 によって失われる量も考慮に入れながら加える必要がある。

ここで、 ℓ_1 として示されるのは水素と窒素が混合した層の長さであり、実際には窒素の体積に換算する必要がある。そこで、 ℓ_1 から更に窒素の体積へと換算することについて考える。

まず、 ℓ_1 を構成する水素窒素混合層において、実際に窒素が占める体積の評価を行った。結果を表 2.3.2 に示す。 ℓ_1 としては最も大きな値を示し、安全対策上も有用と考えられる 80m 地点での導管下部 (L) での実測値を採用している。図 2.3.1 で定義した通り、 ℓ_1 を構成する円筒の体積は V_1 であり、このうちに占める窒素の体積を $V_{1,N2}$ と呼称している。 V_1 、 N_2 の実測値については最も多い窒素量を示す濃度波形から台形積分によって求めた。 V_1 と $V_{1,N2}$ の関係を整理し図示したのが図 2.3.25 である。 ℓ_1 を表現する窒素の濃度波形が下に凸であることからも自明の通り、 $V_{1,N2}/V_1$ は常に 0.5 を下回る。すなわち、 V_1 を構成する

窒素の体積は V_1 の半分を下回る。 V_1 を構成する窒素の必要量を推算するにあたって、 V_1 の半分の体積が窒素体積であるとみなせば常に過大評価となって安全対策上好ましいと考えられる。

以上より、 V_1 を構成するための窒素量 $V_{1,N2}$ を推算するにあたって、

$$V_{1,N2} = C \times \ell_1 \times \pi \times (d/2)^2 \quad (3)$$

$$C = 0.5$$

とするのが妥当であると結論づけられる。

表 2.3.2 V_1 及び $V_{1,N2}$ 実測値

	窒素				水素				80m 地点での測定値	
	N2流量 (L/mn)	流速 (m/sec)	N2層長さ (m)	N2層体積 (m³)	H2流量 (L/mn)	流速 (m/sec)	概算Re H_2	概算Re N_2	$V_{1,N2}$ Q1中窒素体積 濃度波形に基づく実測値 (m³)	V_1 Q1から管下部の値 (m³)
25A-1	39	1.1	13	0.0078	50	1.4	360	2600	0.00399	0.008372
25A-2	39	1.1	11	0.0066	40	1.1	290	2000	0.00333	0.006578
25A-3	58	1.6	32	0.019	80~90	2.2~2.5	570~650	4000~4600	0.00330	0.0013754
25A-4	58	1.6	10	0.0060	80~90	2.2~2.5	570~650	4000~4600	0.000621	0.0013754
25A-5	58	1.6	18	0.012	80~90	2.2~2.5	570~650	4000~4600	0.00199	0.0027508
25A-6	58	1.6	34	0.020	130~140	3.6~3.9	940~1000	6600~7100	0.00957	0.0066378
25A-7	58	1.6	10	0.0068	130~140	3.6~3.9	940~1000	6600~7100	0.00247	0.0088504
25A-8	58	1.6	21	0.013	130~140	3.6~3.9	940~1000	6600~7100	0.00625	0.0066378
50A-1	25	0.19	全置換		90	0.68	340	2400	0.0208	0.0420112
50A-2	25	0.19	19	0.043	90	0.68	350	2400	0.0204	0.0420112
50A-3	25	0.19	22	0.049	150	1.1	570	4000	0.0172	0.045144
100A-1	90	0.17	3	0.057	160	0.31	300	2100	0.133	0.30383964
100A-2	90	0.17	26	0.23	160	0.31	300	2100	0.137	0.30383964
100A-3	90	0.17	27	0.23	320	0.61	600	4300	0.139	0.3198312
100A-4	90	0.17	19	0.17	320	0.61	600	4300	0.140	0.3198312
100A-5	90	0.17	28	0.24	600	1.1	1100	8000	0.128	0.380627
100A-6	90	0.17	25	0.22	600	1.1	1100	8000	0.123	0.3706105
150A-1	440	0.39	全置換		450	0.40	580	4100	0.466	1.1705148
150A-2	440	0.39	19	0.35	480	0.42	620	4400	0.494	1.2391785
150A-3	440	0.39	18	0.34	720	0.63	930	6500	0.419	1.2361545
150A-4	440	0.39	9	0.17	720	0.63	930	6500	0.502	1.2601575
150A-5	440	0.39	9	0.18	1200	1.1	1500	11000	0.521	1.282176
150A-6	440	0.39	7	0.12	1200	1.1	1500	11000	0.515	1.322244
150A-7	440	0.39	9	0.16	1560	1.4	2000	14000	0.492	1.43451
150A-8	440	0.39	7	0.12	1560	1.4	2000	14000	0.512	1.460592

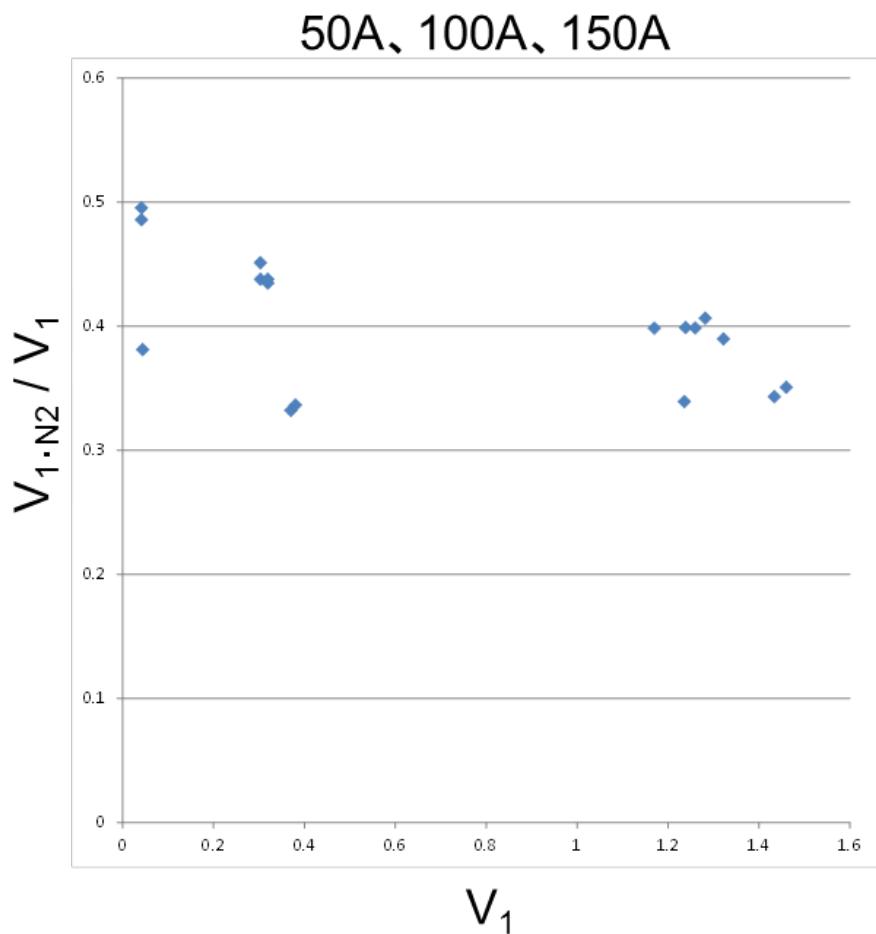


図 2.3.25 V_1 と $V_{1 \cdot N2}$ (実測値) の関係 (50A、100A、150A)

- ・25A の場合

表 2.3.2においては、25A の場合の V_1 及び $V_{1,N2}$ の値を同時に示してある。25A の場合は 50A 以上の場合と異なり、必ずしも導管下部の ℓ_1 が最大とはならないことがあり、導管下部の ℓ_1 に基づいて窒素量を検討すると実際に必要な窒素量を下回ってしまうことがあるので注意が必要である。このことをより明確に示したのが図 2.3.26 である。概算値を基に判断すると、実際に必要な窒素量の半分以下となってしまう場合もあり非常に危険である。よって、25A の倍は ℓ_1 に基づいた評価は適当ではない。

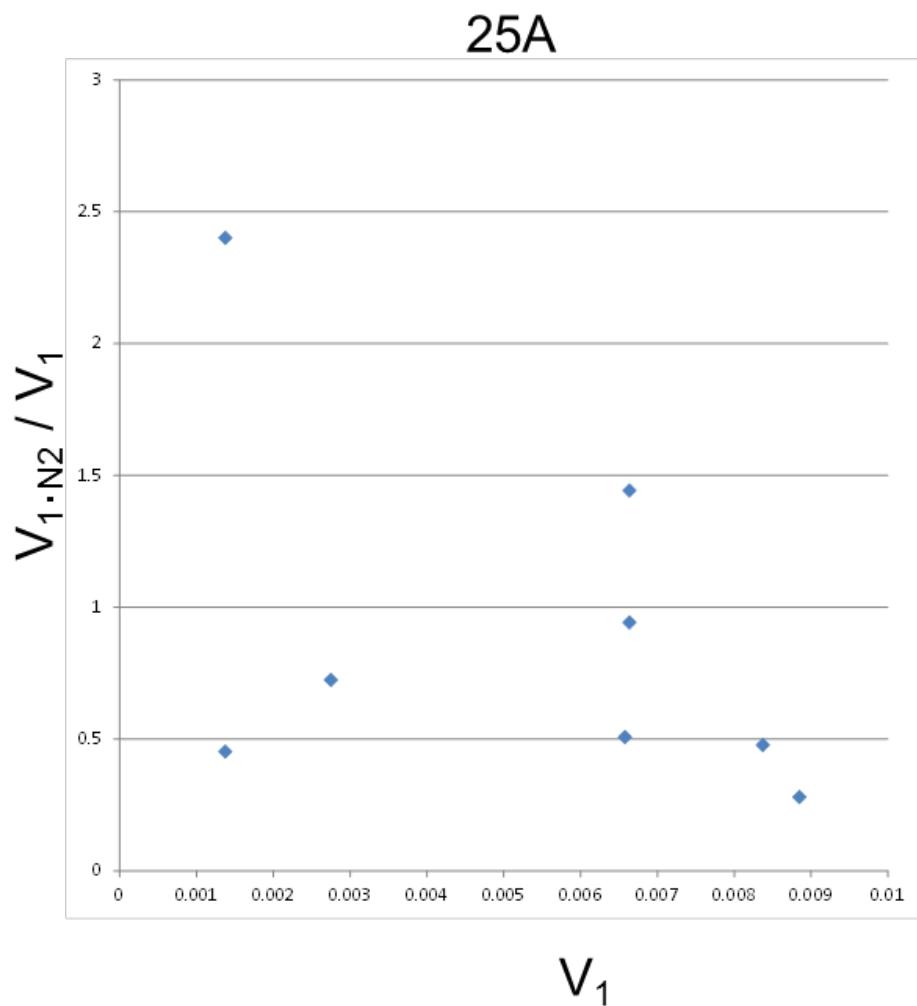


図 2.3.26 V_1 と $V_{1,N2}$ (実測値) の関係 (25A)

一方、25A の場合は導管口径が小さく、置換を行う際に必要な窒素の体積は相対的に少ない。表 2.3.2 に示されるように、本調査の範囲では

$$V_{1, N_2} \text{ (実測値)} < 0.01 m^3$$

となっている。実際の実験においても、25A の場合は速やかに窒素による全置換に至る。このことから、25A の場合は 80m 以下の導管延長であれば導管全てを窒素で置換できるだけの量を供給するのが妥当であると考えられる。

以上の検討に基づき、実際に評価するまでの例を巻末の「付録」に記載してあるので参考されたい。

3. まとめと考察

本事業で調査した現象は「移流拡散」の領域に位置するものである。一般的には

$$[\text{現象}] = [\text{時間と共に変化する分子の輸送}] + [\text{位置のみによって定まる分子の輸送}]$$

という形で定式化される。レイノルズ数は時間を含まない、即ち上記の式でいえば右辺第2項を支配する無次元数である。右辺第1項の影響が小さいほど現象は右辺第2項の支配が強くなり、その極限は時間による変動を伴わず右辺第1項が0となる定常状態に相当する。

置換作業においては必ず2種のガスの界面が存在し、そこでは時間とともに変化する拡散現象が存在するため決して定常状態にはならず、レイノルズ数の影響は相対的に現象に対して大きいか小さいかにとどまる。

一般に都市ガス等の置換作業においてはレイノルズ数のみを念頭において議論が散見される。これは

- ・都市ガスを構成する気体分子の分子量・粘性・拡散速度は窒素や酸素の分子量・粘性・拡散速度と大きくは異ならない
- ・レイノルズ数を大きくとるほど上記の式の右辺第2項の支配が増大し拡散混合を抑制することができる

ことに由来している。

一方、窒素と水素の間には分子量・粘性・拡散速度において大きな隔たりがあり、置換作業での窒素と水素が接した界面では拡散混合の影響が無視できなくなる可能性が当初から考えられていた。また、中低圧の導管の置換作業時には水素の流速、ひいては水素のレイノルズ数には制約が生じるので極端に大きくすることは現実的ではない。本調査事業で行った範囲では水素のレイノルズ数は層流域～遷移領域であって、管壁との摩擦による混合が無視できない範囲である。よって、置換作業において窒素の導入方法を定める場合には拡散混合の影響を十分に考慮する必要がある。

窒素と水素の界面における拡散混合、即ち ℓ_1 、については図2.3.5～2.3.7で示された通り非常に有意義かつ興味深い結果が得られた。水素のレイノルズ数の依存性については存在するものの、管の上部・中部・下部で傾向が大きく異なる。また、いずれの場合においても決してその寄与は大きくはない。 ℓ_1 は導管の径 d に対する依存性が顕著であるが、 ℓ_1 を d で除した無次元長さ ℓ_1/d によって管の上・中・下部ごとに一次関数の形で整理できる。導管の上・中・下部で大きく傾向が異なるのは窒素と水素の密度差に由來した浮力の影響によるものと考えて差支えない。

種々の解析を通じて、 ℓ_1 を構成する、即ち水素との混合によって失われる窒素の体積を推算するための重要な知見が得られた。置換作業における窒素を導入した後に水素を通じる、という手順においては、推算される ℓ_1 を基本とし、更に安全率を加味した十分な体積の窒素（導管内の窒素層長さ）を入れることが重要である。入れるべき窒素の量は

$$V_{1,N2} + V_{min}$$

の形で評価される。但し、 V_1 及び V_{min} は図 2.3.1 における定義の通りであり、 $V_{1,N2}$ は V_1 を構成する窒素の体積である。 V_1 の評価手順については前章（7）で述べたとおりである。これに V_{min} を加算する必要があるが、 V_{min} としては ℓ_3 、すなわち空気と窒素の混合によって失われる窒素量を考慮した上で、「安全率」の考え方立脚して考えなければならない。

ℓ_3 については、本調査を通じ、表 2.3.1 及び 2.3.2 に示される窒素流速やバルブ開閉方法に準じるという制限つきで、

$$\ell_3 \leq 30(m)$$

という例示が得られたので参考にされたい。

安全率の算定の方法は一意的に定めることは困難である。実際には現象における不随意の変動は避けられず、窒素供給系を含む導管状況は千差万別であり、なおかつ人為的な作業に由来するバラつきは決して排除できないからである。よって、最小値である ℓ_1 の算出に基づき如何に安全率を設けるか、例えば予想される ℓ_3 を何倍にするか、更にそれを考慮した上で ℓ_2 をどれだけの長さ設けるかについては慎重に検討を要する。これらの安全率の算出については各事業者の蓄積している知見、及び類似の現象を扱った作業に基づき事業者ごと、更にケース・バイ・ケースで判断するべきである。安全性についてはぎりぎりとなる条件を求ることは不可能であり、常に過剰と思われる程度のマージンが必要であることを強調して結びと変えたい。

付録

以下に窒素量の検討例をいくつか示す。

【例 1】 50A、70m の新設導管、置換する水素のレイノルズ数 500

窒素の導入速度は 25L/min とする

水素-窒素の混合が生じる可能性のある距離 ℓ_1 は、P.57 ②式より

$$\ell_1 = (0.0833 \text{ReH2} + 328) \cdot d, \quad \text{ReH2} = 500, \quad d = 0.0529 \text{ (m)} \quad \text{として}$$

$$\ell_1 = 19.6 \text{ (m)}$$

この距離を形成するのに必要な窒素の目安としての体積は、P.58 ③式より

$$V_{1, N2} = C \times \ell_1 \times \pi \times (d / 2)^2, \quad C = 0.5 \quad \text{として}$$

$$V_{1, N2} = 0.022 \text{ (m}^3\text{)}$$

(これは $C \times \ell_1 = 9.8 \text{ (m)}$ の長さの窒素に相当する)

置換に必要な窒素の体積 V (m^3) は

$$V = 0.022 + V_{min}$$

V_{min} は絶対に水素と空気が混合しないように窒素で隔離できるだけの安全を確保するための安全率としての窒素であり、十分に検討し定めること。過剰寄りの評価が望ましい。

【例 2】 100A、80m の新設導管、置換する水素のレイノルズ数 1000

窒素の導入速度は 100L/min とする

水素-窒素の混合が生じる可能性のある距離 ℓ_1 は、P.57 ②式より

$$\ell_1 = (0.0833 \text{ReH2} + 328) \cdot d, \quad \text{ReH2} = 1000, \quad d = 0.105 \text{ (m)} \quad \text{として}$$

$$\ell_1 = 43.2 \text{ (m)}$$

この距離を形成するのに必要な窒素の目安としての体積は、P.58 ③式より

$$V_{1, N2} = C \times \ell_1 \times \pi \times (d / 2)^2, \quad C = 0.5 \quad \text{として}$$

$$V_{1, N2} = 0.19 \text{ (m}^3\text{)}$$

(これは $C \times \ell_1 = 21.6 \text{ (m)}$ の長さの窒素に相当する)

置換に必要な窒素の体積 V (m^3) は

$$V = 0.19 + V_{min}$$

V_{min} は絶対に水素と空気が混合しないように窒素で隔離できるだけの安全を確保するための安全率としての窒素であり、十分に検討し定めること。過剰寄りの評価が望ましい。

【例3】100A、80m の新設導管、置換する水素のレイノルズ数 3000

本事業の調査範囲である $Re \leq 2000$ を超えており、本事業の調査結果は適用できない。水素のレイノルズ数を 2000 以下にするか、窒素による全置換を検討するべきである。

【例4】150A、100m の新設導管、置換する水素のレイノルズ数 1000

本事業の調査範囲である導管延長 80m を超えており、本事業の調査結果は適用できない。80m 以下の導管とするか、窒素による全置換を検討するべきである。

【例5】150A、18m の新設導管、置換する水素のレイノルズ数 1000

20m 以下なので、P.57 の①式、②式のいずれもが適用できる。

窒素の導入速度は 450L/min とする

P.57①式を用いた場合、水素－窒素の混合が生じる可能性のある距離 ℓ_1 は

$$\ell_1 = (0.0227ReH2 + 202) \cdot d, \quad ReH2 = 1000, \quad d = 0.155 \text{ (m)} \quad \text{として} \\ \ell_1 = 34.8 \text{ (m)}$$

P.57②式を用いた場合、水素－窒素の混合が生じる可能性のある距離 ℓ_1 は

$$\ell_1 = (0.0833ReH2 + 328) \cdot d, \quad ReH2 = 1000, \quad d = 0.155 \text{ (m)} \quad \text{として} \\ \ell_1 = 63.7 \text{ (m)}$$

安全のためには②式を用いた結果が推奨される。②式で得られた距離 63.7m を形成するのに必要な窒素の目安としての体積は、P.58 ③式より

$$V_{1.N2} = C \times \ell_1 \times \pi \times (d / 2)^2, \quad C = 0.5 \quad \text{として}$$

$$V_{1.N2} = 0.60 \text{ (m}^3\text{)}$$

(これは $C \times \ell_1 = 31.9 \text{ (m)}$ の長さの窒素に相当する)

置換に必要な窒素の体積 V (m^3)は

$$V = 0.60 + V_{min}$$

V_{min} は絶対に水素と空気が混合しないように窒素で隔離できるだけの安全を確保するための安全率としての窒素であり、十分に検討し定めること。過剰寄りの評価が望ましい。

【例 6】25A、70m の新設導管の場合

水素のレイノルズ数に関わらず、25A 管の場合は窒素による全置換を検討するべきである。全置換を行うのに必要な最低窒素量 $V(m^3)$ は、導管延長 $L=70m$ 、導管口径 $d=0.0276m$ 、
 $V_{min} = L \times \pi \times (d / 2)^2$ より

$$V = 0.04$$

置換に必要な窒素の体積 V (m^3)は

$$V = 0.04 + V_{min}$$

V_{min} は絶対に水素と空気が混合しないように窒素で隔離できるだけの安全を確保するための安全率としての窒素であり、十分に検討し定めること。過剰寄りの評価が望ましい。