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

(水素導管の大規模損傷リスク評価))

調査報告書

令和2年3月

国立研究開発法人産業技術総合研究所

目次

1.	調査研究の目的等		3
	1.1	調査研究の目的	3
	1.2	調査研究の概要	3
2.	実施方法		4
	2.1	実験の概要	4
	2.2	実験設備と装置	4
	2.3	実験方法と実験条件	9
	2.4	数值解析手法	10
3.	結果		12
	3.1	孔径 10 mm での大気混入挙動	12
	3.2	孔径 10 mm での火炎挙動	22
	3.3	孔径 50 mm での大気混入挙動	34
	3.4	孔径 50 mm での火炎挙動	43
	3.5	全破断での大気混入挙動	56
	3.6	全破断での火炎挙動	62

4. まとめ

72

1. 調査研究の目的等

1.1 調査研究の目的

「水素導管供給システムの安全性評価事業」では、近年中の実用化が想定される水素導 管の供給形態を見据え、想定される新設の中低圧水素導管供給システムを構成する要素を 整理し、その安全を確保するための手法や保安のレベルのあり方を検討することとしてい る。このため本事業では、その想定される新設の中低圧水素導管供給システムを実際に運 用していく際の維持管理上の課題について、技術調査等を通じて安全かつ合理的な維持管 理方法を明らかにすることにより、水素ガスの工作物の技術基準の整備に資することを目 的としている。

本事業における「水素導管の大規模損傷リスク評価」では、水素導管供給システムにお いて、大規模事故シナリオ(リスクシナリオ)の設定をもとに、事故発生時の周囲影響の 定性的・定量的評価及びそれを踏まえたリスク対策(対応措置や外部影響の緩和策等の提 言)に資する技術的知見を得ることとしている。平成28~30年度の当該事業では、人 為もしくは自然災害等で水素導管が損傷し開放空間あるいは掘削坑内に水素が漏えいした 場合を想定し、漏えい水素に着火した場合の火炎や爆風圧等の周囲影響を調査した。影響 項目ごとに調査結果を整理し、漏えい条件毎に影響範囲を評価するためのモデルが提案さ れた。さらに、特に影響が広範囲に及ぶ掘削坑内での着火爆発現象について、水素供給遮 断後の管内圧の経時変化による爆風圧の変化を調査し、遮断による爆風影響の低減効果を 整理した。

また、これらの調査の過程において、漏えい孔から放出された水素が着火し、管外に火 炎が形成された状態で水素供給を停止すると管外にて観察される火炎は消失したが、その 後配管に窒素ガスを供給すると火炎が再出現する現象がみられた。これは、管内において 水素火炎が持続していたことが原因であると考えられる。このようなガス供給停止後の火 炎の持続は、導管損傷時の復旧動作においても潜在的なリスクとして考えられる。従って 令和元年度の当調査では、損傷によって漏えいした水素に着火し火炎が形成された後に供 給停止した場合の、火炎の持続挙動や管内側への火炎伝播挙動を調査した。また、火炎挙 動の考察に必要な管内への大気混入挙動も併せて調査した。

1.2 調査研究の概要

本調査研究では、水素導管及びその損傷を模擬した孔を有する配管を用い、当該孔から 放出された水素に着火した後に水素の供給を遮断した場合の火炎の伝播挙動を温度計測及 び可視化観測によって調査した。また、放出後未着火の状態において同様に水素の供給を 遮断した場合の、管内への大気の混入挙動を濃度計測と数値解析によって調査した。

2. 実施方法

2.1 実験の概要

水素導管を模擬した呼び径 150A 及び 50A の鋼管(以下、試験配管と記す)を設置し、鋼 管に設けられた漏えい孔から水素を放出させた。漏えい孔としては、直径 10 又は 50 mm の 円形貫通穴を管側面に設けたもの、あるいは管の全破断を想定し片側を切り落とした管を 用いた。試験配管の全長は 10 m とし、全破断については中央での破断を模擬し片側 5 m の みを用いた。また、一部の可視化実験においては、管内部での火炎を観察するため試験配 管の一部を石英管に交換した。

大気混入挙動の調査においては、試験配管に供給する水素を停止した後に管内へ大気が 混入する挙動を、管内壁に設置した酸素濃度計を用いて測定した。火炎伝播挙動の調査で は、放出する水素に着火し火炎が形成された後に水素を停止し、その後の火炎の挙動を管 内壁に取り付けた熱電対を用いた温度測定と可視化用カメラを用いた火炎撮影により調査 した。

2.2 実験設備と装置

実験は産業技術総合研究所つくば西事業所の爆発実験場内にある可燃性ガス風洞設備内 で行った。当設備は内寸が長さ20m、幅3.6m、高さ1.8mの風洞であり、下流側に取り付 けられたファンの制御により無風から4m/sまで風速を調整可能である。本調査における実 験では、外気の影響を排除した無風状態での実施を目的として本風洞を用いた。また、実 験前後の管内のガス置換作業においては多量の可燃性ガスが管外に放出されるため、当該 作業時には可燃性混合気の滞留を防ぐ必要がある。後述の実験手順に記す通り、滞留防止 のため風洞の風速を制御可能なことも当該設備を用いた理由である。

風洞内に設置した実験装置の模式図を図2.1に示す。試験配管は燃焼実験により生成 する水分による錆を防ぐためステンレス鋼製としたが、その内寸は呼び径150A及び50Aの SGP 管と同じくそれぞれ内径155.2 mm 及び52.9 mm のものを用いた。長さ2mの鋼管5本 を、フランジを用いて接続することにより全長10mの試験配管とした。中央の鋼管の中央 部に円形の孔を設けた。設置された試験配管の外観を図2.2に例示する。150A 管では孔 径は10 mm 及び50 mm、50A 管では孔径10 mm とした。孔の向きは鉛直上方あるいは水平 方向とした。また、全破断の実験では当該鋼管2本と、長さ1mの片側切り落とし管からな る長さ5mの試験配管を用いた。管内部での火炎可視化実験においては、試験配管の一部を、 内寸155 mm (150A)又は54 mm (50A)、肉厚3 mm の石英管とした。石英管は、図2.2(下) に示すようなアダプターを介してフランジ接続にて鋼管と接続した。アダプターと石英管 の接続部では、石英管の外周に装着された O リングがアダプターにより圧縮されることに より、石英管が保持・シールされる構造となっている。試験配管は地面に対し水平に設置 したが、傾斜した管における現象の変化を検討するため、一部の実験では 10%の勾配(紙 面右側が上方)をつけて設置した。 試験配管両端のフランジ(全破断の場合は片端のみ)には、ガス供給のための呼び径 3/8 インチのステンレス管が溶接されている。水素ガス及び管内置換のための窒素ガスは風洞 設備の屋外に設置したガスボンベから、それぞれ、逆止弁、マスフローコントローラ(ア ズビル MQV0200 及び MQV0050)、及び空気圧作動式ボール弁(Swagelok, SS-44S6-33C) を介し、フランジ部に供給される。空気圧作動式ボール弁の開閉及びマスフローコントロ ーラの制御は、図2.1に示す風洞外の側室より遠隔で行った。試験配管内圧力は片端の フランジ近くに設置した圧力計(MKS Baratron 226A)により測定した。

大気混入挙動実験における計測では、試験配管にガルバニ電池式酸素濃度計(イチネン ジコー JKO-O2LJD3)を設置した。本酸素濃度計はセンサーヘッド部に M16P1 ネジが切ら れているため、配管側面に対応するメネジを有するポートを溶接することにより当該濃度 計を接続した。取り付け位置は図2.3に示す。

火炎伝播挙動実験では、試験配管に K 型シース熱電対(シース径 φ0.5 mm)を挿入し温 度を測定した。試験配管への接続にはコンプレッションフィッティングを用いフェルール により締め付けた。この際、シースの先端が配管内壁から管内部に 2 mm の位置となるよう 取り付けた。また、火炎の可視化には、近赤外撮影及び紫外撮影を用いた。近赤外撮影に は、波長 950 から 1750 nm の近赤外領域に感度を有する InGaAs カメラ(浜松ホトニクス C14041-10U)と近赤外用カメラレンズを用い、水素火炎に含まれる高温の水分子に由来す る近赤外発光を撮影した。紫外撮影には裏面照射型 CMOS カメラ(Oxford Instruments, Andor Marana 4.2B-11)を用いた。紫外用カメラレンズと紫外光のみを通すバンドパスフィルタを 装着し、水素火炎に含まれる励起 OH ラジカルからの紫外発光を撮影した。

水素への点火には、漏えい孔付近に設置した点火用電極を用いた。ネオン管用変圧器を 用いて、AC100V(50Hz)電源からの入力を15 kV に昇圧し、電極に印加することにより火花 放電を発生させて点火を行った。電極には径 φ 0.8 mm のタングステン線2本を使用した。 2本のタングステン線は先端部にて約3 mm のギャップを有し、先端部以外は石英管によっ て絶縁した。

酸素濃度計、熱電対、マスフローコントローラ、圧力計等の各種センサー類の出力はデ ータロガー及びオシロスコープを用いてモニター・記録した。また、安全確認のため風洞 内には複数個所に水素濃度計を設置し、その指示値はデータロガーによってモニターした。 風洞内の風速は熱線式風速計により測定した。

5









図2.2 設置された試験配管の外観 (上:150A 鋼管、中:50A 鋼管全破断、下:150A 石英管)



図2.3 酸素濃度計取り付け位置(●)及び放出孔位置(側面放出:○、全破断:管端) (a:上方放出、b:水平放出、c:全破断、数字は酸素濃度計のセンサー番号及び寸法(単位 mm)を表す)



図2.4 熱電対取り付け位置(●)及び放出孔位置(側面放出:○、全破断:管端) (a:上方放出、b:水平放出、c:全破断、数字は熱電対のセンサー番号及び寸法(単位 mm) を表す)

2.3 実験方法と実験条件

実験手順は下記の通りである。まず、水素ガスを試験配管内に供給する前に、安全のた め管内を不活性ガスである窒素で置換する。両端にフランジ部(全破断実験では片端)か ら窒素ガスをそれぞれ 50 L/min の流量で供給した。次に管内にフランジ部から水素をそれ ぞれ 50 から 200 L/min の流量で供給し、管内を水素で置換した。置換時には風洞内でのガ スの滞留を防ぐため風速を 0.5 m/s 以上に設定した。それぞれの置換に要する時間について は、大気混入挙動の実験では試験配管に酸素濃度計が取り付けられているため、その計測 値により置換に必要な時間を確認した。火炎伝播挙動実験においても同じ時間供給を行い、 置換を行った。大気混入挙動の実験では、水素置換が完了した後、滞留を防ぐために水素 の供給流量を低下させ、風洞の風を停止させ無風状態とした後、水素の供給を完全に停止 し、計測を開始した。火炎伝播挙動実験では、水素置換が完了した後、同じく滞留を防ぐ ために水素の供給流量を低下させた後、漏えいする水素に着火した。火炎の形成が確認さ れた後、風洞の風を停止させ、その後水素の供給を完全に停止し、計測を開始した。いず れの実験においても水素の供給を完全に停止した時点で直ちに試験配管内の圧力はほぼ大 気圧(大気との差圧が1 Pa 未満)となった。大気混入挙動実験は最大3時間、火炎伝播挙 動実験は最大 90 分間計測を行った。計測終了後、風洞の風速を 0.5 m/s 以上に設定した後、 安全のため窒素を供給し試験配管内を窒素で置換した。

実験条件は、漏えい孔と配管の条件によって下記の通りとした。

- 孔径 10 mm, 150A 配管, 上方放出
- 孔径 10 mm, 150A 配管, 水平放出
- 孔径 10 mm, 150A 配管傾斜設置, 上方放出
- 孔径 10 mm, 50A 配管, 上方放出
- 孔径 10 mm, 50A 配管, 水平放出
- 孔径 10 mm, 50A 配管傾斜設置, 上方放出
- 孔径 50 mm, 150A 配管, 上方放出
- 孔径 50 mm, 150A 配管, 水平放出
- 孔径 50 mm, 150A 配管傾斜設置, 上方放出
- 全破断,50A 配管
- 全破断, 50A 配管傾斜設置

それぞれの条件において大気混入挙動と火炎伝播挙動の実験を行った。傾斜設置を除く条件については石英管を用いた火炎可視化実験も行った。また、150A 配管の全破断条件については、本設備では試験配管内の置換が不十分であったため、計測は行わなかったが、置換が不十分な状態から大気が混入する挙動を測定した。

2. 4 数值解析手法

水素の供給を遮断した状態において、未着火の状態で水素を放出した場合における管内 への大気の混入挙動を把握するために、数値解析を実施した。

基礎方程式には、多成分気体において圧力ベースで表される、混合気の質量保存式、混 合気の運動量保存式、混合気のエネルギー保存式、各化学種の質量保存式、熱的完全気体 の状態方程式を用い、外力項に重力効果を付加する。気体成分は、H₂、O₂、N₂の3化学種 とし、理想気体の状態方程式に従うものとして取り扱う。ここで、系内の圧力及び温度は ほぼ一定であるため、圧力拡散とSoret効果(温度勾配によって物質が移動する現象)は無 視する。数値解析手法には、有限体積法に基づく圧力と速度の連成解法を用い、QUICK法

(Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics 法、上流側に重みを付けた補間に よって計算格子境界における物理量を求める手法)により空間を高次で離散化することで、 陰的に解いた。

数値解析条件は漏えい孔径 50 mm(上方放出)の150A 鋼管とし、配管軸と漏えい孔中心 軸を通る断面の2次元でモデル化した。2次元モデルでは、3次元の大気混入を過大に見積 もってしまうが、配管内大気混入の定性的な挙動の把握が可能である。解析における時間 刻みは40 ms、最小格子サイズは1.0 mmとした。計算領域及び格子を図2.5に示す。解 析領域は管内領域(Zonel)と管外領域(Zone2)の2つの領域から直交格子によって構成 され、漏えい孔の中心軸を対象境界とした。管内領域では、50 mm径の漏えい孔部以外の 境界を滑無壁境界とし、漏えい孔部において管外領域へと接続する。管外領域では、配管 に接する境界を滑無壁境界、左側及び上側の境界を自由境界とした。両領域の接触面(漏 えい孔部)において格子点を接合し、最も密に格子を配置した。それぞれの領域における 格子は孔から離れるほど大きくし、解に影響のない程度で計算コストの削減を図った。格 子サイズの収束性は予備計算にて確認した。



図2.5 大気混入挙動解析(孔径 50 mm, 150A 配管,上方放出)における解析領域と酸素濃度測定位置(数字は酸素濃度計のセンサー番号及び寸法(単位 mm)を表す)

3. 結果

孔径別に、大気混入挙動と火炎伝播挙動の実験結果を記す。

3.1 孔径 10 mm での大気混入挙動

孔径 10 mm における大気混入挙動実験の結果として、まず 150A 配管からの上方放出時 における水素供給停止後の管内酸素濃度の時間履歴を図3.1.1に示す。図の時間原点 は水素の供給停止時点とした(以下同様)。濃度の番号は図2.3の濃度計取り付け位置を 表す。空気中の水素の可燃濃度範囲は4から75 vol%であり、対応する酸素濃度は5.3から 20 vol%である。この実験条件では、3時間の計測時間内においては管内に可燃性混合気の 形成は確認されなかった。放出孔の対面である管底面に設置した酸素濃度計4の指示値が 最も高く、3時間経過後の指示値は3.9 vol%であった。空気中の酸素濃度21 vol%から、こ の酸素濃度に対応する水素濃度は81 vol%と計算される。軸方向のどの地点においても、管 内底面は上面に比較して酸素濃度がやや高い傾向にあった。その差は約0.1 から0.2 vol%で あり、水素濃度差に換算すると0.5 から1 vol%に相当する。また、管軸方向への酸素濃度の 勾配は1mあたり約0.2 vol%であった。これらのことから、径10 mmの漏えい孔から侵入 する空気は、軸方向へ速く拡散し、管内では均一に近い濃度分布が形成されることが確認 される。

次に、150A 配管から水平方向に漏えいした場合の水素供給停止後の管内酸素濃度の時間 履歴を図3.1.2に示す。この場合も、上方放出時と同様に、3時間の計測時間内におい ては可燃濃度範囲には到達しないことが確認された。放出孔と同じ軸方向位置における管 底面に設置した酸素濃度計3の指示値が最も高く、3時間経過後の酸素濃度は4.8 vol%(水 素濃度77%に相当)であった。いずれの軸方向位置においても、上方放出の場合に比べ、 酸素濃度はやや高い傾向にあった。これは孔が水平方向を向いているため、気体の比重差 により、管から流出する低密度の気体(水素)は孔の上部を通りやすく、管に流入する高 密度の気体(空気)は孔の下部を通りやすくなったためであると考えられる。管軸方向へ の酸素濃度の勾配は1m あたり0.05 vol%未満であり、上方放出時に比べ軸方向への拡散が 促進されていると考えられる。

また、図3.1.2に示すように酸素濃度計3の指示値には断続的な乱れが生じている。 これは、他の位置の濃度計ではこのような乱れは観測されなかったことから、放出孔付近 による外乱の影響によるものであると考えられる。計測中は風洞内空間は無風状態に保た れているが、用いた熱線式風速計の指示下限値である0.05 m/s 未満の微小な外乱の可能性は 排除できない。ただし、記録された指示値の時間履歴についてスムージングを行うと滑ら かな曲線として推移するため、これらの乱れが現象に与える影響は限定的なものであると 考えられる。

150A 配管を傾斜して設置した場合の、上方放出時における水素供給停止後の管内酸素濃度の時間履歴を図3.1.3に示す。水平設置時(図3.1.1)に比べ、酸素濃度の値

や上昇速度に大きな差はなく、3時間経過後の酸素濃度の最大値は、酸素濃度計4において 3.7 vol%(水素濃度 82 vol%に相当)であった。管内の上面と底面の酸素濃度の差は約0.2 vol% (水素濃度差約1%)であり、これも水平設置時と同様である。管軸方向への濃度勾配は水 平設置時よりやや大きく、1 m あたり0.2 から0.4 vol%程度である。水素と空気の密度差に より、鉛直上方ほど空気の混入が遅れるためであると考えられ、最も高い位置にある酸素 濃度計9の指示値は、水素供給停止後3時間の時点で水平設置時に比べ0.25 vol%低下した。 しかしこれは当該濃度計による酸素濃度の測定値3.1 vol%に対し1割未満の差であるため、 傾斜により軸方向の勾配がやや大きくなる傾向にあるが、その効果は限定的であることが 確認された。

配管径 50A における直径 10 mm の漏えい孔からの大気混入挙動実験の結果を図3.1. 4から3.1.6に示す。150A 配管の場合と同様に、上方放出時には酸素濃度計4が、水 平放出時には酸素濃度計3がそれぞれ最大の酸素濃度を示した。水平設置時の上方放出(図 3.1.4)では、水素供給停止後6分の時点で酸素濃度計4の指示値が5.3 vol%(水素濃 度75 vol%に相当)を示し、当該位置に可燃性混合気が形成された。また、最も上昇の遅い 酸素濃度計9の指示値についても水素供給停止24分後に可燃濃度範囲への到達が確認され た。水平放出時の大気混入は上方放出時に比べて速く、水素供給停止後35秒で酸素濃度計 3が、停止後17分の時点で全ての酸素濃度計において、可燃濃度範囲となる酸素濃度を示 した。配管を傾斜させた場合の上方放出では、放出孔近傍の酸素濃度は水平設置時とほぼ 同様に推移し、水素供給停止後6分で酸素濃度計4の設置位置が可燃濃度に到達したが、 放出孔から遠方であり高い位置に設置した酸素濃度計の指示値の上昇はやや遅れ、酸素濃 度計9が可燃濃度に到達したのは水素供給停止後30分の時点であった。

配管径 50A での各実験条件において、各酸素濃度計における濃度指示値が可燃濃度に到 達した時間と酸素濃度計設置位置の関係を図3.1.7から3.1.9に示す。設置位置 は漏えい孔からの管軸方向距離で表し、紙面右側(酸素濃度計9,10側)を正とした。いず れの条件においても到達時間は管軸方向距離に対して単調に増加している。これらの図か ら、可燃濃度範囲の管軸方向への拡大速度を計算すると、水平設置の上方放出と水平放出 時にはそれぞれ 6.5 及び 7.5 cm/min であり、傾斜設置時の上方放出においては上昇方向へは 4.1 cm/min、下降方向には 7.7 cm/min であった。

水素供給停止後3時間経過後の各酸素濃度計の指示値は、水平設置の上方放出時は11.5 から13.1 vol%、水平放出時は13.2 から15.1 vol%、傾斜設置の方法放出時は11.2 から13.2 vol%であり、水素濃度に換算すると28 から47 vol%であり、化学量論組成付近の可燃濃度 範囲内であった。

13



図3.1.1 大気混入挙動実験結果(孔径10mm,150A配管,上方放出)



図3.1.2 大気混入挙動実験結果(孔径10mm,150A配管,水平放出)



図3.1.3 大気混入挙動実験結果(孔径10mm,150A配管傾斜設置,上方放出)



図3.1.4 大気混入挙動実験結果(孔径10mm,50A配管,上方放出)



図3.1.5 大気混入挙動実験結果(孔径10mm,50A配管,水平放出)



図3.1.6 大気混入挙動実験結果(孔径10mm,50A配管傾斜設置,上方放出)



図3.1.7 大気混入挙動実験(孔径10mm,50A配管,上方放出)における酸素濃度計 設置位置毎の可燃濃度範囲到達時間(丸:酸素濃度計奇数番号、四角:酸素濃度計偶数番号)



図3.1.8 大気混入挙動実験(孔径10mm,50A配管,水平放出)における酸素濃度計 設置位置毎の可燃濃度範囲到達時間(丸:酸素濃度計奇数番号、四角:酸素濃度計偶数番号)



図3.1.9 大気混入挙動実験(孔径10mm,50A配管傾斜設置,上方放出)における酸素濃度計設置位置毎の可燃濃度範囲到達時間(丸:酸素濃度計奇数番号、四角:酸素濃度計 偶数番号)

3. 2 孔径 10 mm での火炎挙動

孔径 10 mm における火炎伝播挙動の観察結果として、まず 150A 鋼管からの上方放出時 及び水平放出時における近赤外カメラによる撮影画像を図3.2.1及び3.2.2にそ れぞれ示す。いずれの実験においても、水素流量 20 L/min において火花放電により着火し 火炎が形成された(図中 a)。風洞の風を停止すると火炎が鉛直方向に伸び(図中 b)、その 状態で水素供給を停止(図中 c) すると、漏えい孔近傍で定在的な火炎が形成された(図中 d)。その後 90 分間観察を続けたが、この火炎は定常的に持続した(図中 e,f)。90 分経過後、 管内を窒素で置換するために流量 20 L/min の窒素ガスを供給すると管内の水素が押し出さ れることにより火炎が再び拡大した。その後水素の残留が無くなると火炎は消失した。こ の挙動は 50A 鋼管、及び鋼管を傾斜設置した場合も同様であった(図3.2.3)。また、 150A 及び 50A の石英管を用いた撮影においても、火炎は漏えい孔に定在していることが確 認された(図3.2.4)。従って全ての実験条件において、10 mm の漏えい孔から放出さ れた水素に着火し、火炎が形成された後に水素供給を停止した場合、漏えい孔にて火炎が 少なくとも 90 分以上持続する。窒素置換時に再拡大した火炎は数分間以上持続したことか ら、90 分経過時点においても管内には多量の水素が残留していたと考えられる。

各実験条件において、管内壁に設置した熱電対によって取得した、水素供給停止後の温 度履歴の測定結果を図3.2.5から3.2.10に示す。図中の番号は図2.4の熱電 対取付位置に対応している。

まず、150A 鋼管からの上方放出実験(図3.2.5)では、漏えい孔近傍に設置された 熱電対5,6,7が10℃程度の温度上昇を示し、他の熱電対には有意な反応な見られなか った。最も温度の高い熱電対6においても最大到達温度は28℃であり、火炎が管内に侵入 していたとは言えない。これは上記の可視化撮影の結果とも対応する。これらの温度上昇 か火炎の熱が鋼管壁を伝わったもの、及び燃焼後の加熱された既燃ガスが管内に流れ込ん だことによるものである。特に、漏えい孔対面の管底面部に設置された熱電対6における 温度が最も高いことから、既燃ガスが管内に流入し底面に達したことが考えられる。既燃 ガスは窒素と水蒸気であり、多少高温であっても水素に比べ密度が高い状態になり得るた め、底面の温度上昇が観測されたと考えれられる。一方で熱電対5及び7は、火炎が定在 する漏えい孔に最も近い位置に設置されており、それらの温度上昇には鋼管壁での伝熱も 寄与していると考えられる。

水平方向への放出(図3.2.6)においても、有意な温度上昇は漏えい孔近傍の熱電 対(特に熱電対5,6,7,8,9)のみで観測され、最大温度は熱電対5における27℃ であった。上方放出時と同様に、これらの温度上昇は管壁での伝熱と既燃ガスによるもの であると考えられる。上方放出時に比べ温度上昇がみられる範囲がやや広がっている。こ れは大気混入挙動の場合と同様に、孔が水平方向を向いているため、比重差による気体の 流出と流入が上方放出時に比べ促進され、その結果管内に既燃ガスが流入し易くなったこ とが考えられる。 150A 配管を傾斜して設置した場合の上方放出実験での温度測定結果(図3.2.7)は、 水平設置した場合の結果とほぼ同様であり、熱電対5,6,7のみが有意な温度上昇を示 した。また、熱電対6のみ数か所に温度上昇のピークがみられた。このピークの原因は不 明であるが、直ちに元の値に復帰していることから、微小外乱によって既燃ガスが管内底 面に向かう流れが一時的に発生したことが考えられる。現象は一時的なものであり、その 後の火炎挙動に影響はない。

50A 鋼管を用いた実験では、どの実験条件においても 150A 鋼管を使用した場合に比べ温 度上昇がやや高い傾向にあった。まず、上方放出実験(図3.2.8)では熱電対3から 12までが有意な温度上昇を示し、特に熱電対5と6はそれぞれ 39℃及び 30℃まで到達し た。管内への火炎の侵入はないことから、150A 鋼管の場合と同様に管壁での伝熱と燃焼後 のガスの流入が温度上昇をもたらしている。管径が小さいことと管内の容積が小さいこと から、150A の場合に比べ相対的に温度上昇し易いと言える。水平放出の場合(図3.2. 9)はやはり温度上昇がより促進され、熱電対5は 65℃に達し、熱電対6と7もそれぞれ 最大 39℃及び 46℃を示した。また、傾斜設置した 50A 鋼管を用いた上方放出実験の結果(図 3.2.10)は、水平設置時とほぼ変わらず、150A での結果と合わせ、10%の勾配で傾 斜して設置した場合でも現象は水平設置とほぼ同様であることが確認された。



図3.2.1 火炎の近赤外撮影(孔径10mm,150A鋼管,上方放出)(a: 点火直後、b: 風停止後、c: 水素供給停止直後、d: 供給停止後5秒、e: 供給停止後3分、f: 供給停止後90 分、g: 窒素置換開始直後、h 窒素置換開始8分後)



図3.2.2 火炎の近赤外撮影(孔径 10 mm, 150A 鋼管,水平放出,斜め方向から撮影)
(a: 点火直後、b: 風停止後、c: 水素供給停止直後、d: 供給停止後 5 秒、e: 供給停止後 3 分、f: 供給停止後 90 分、g: 窒素置換開始直後、h 窒素置換開始 6 分後)



図3.2.3 孔径 10 mm 鋼管における供給停止後 10 分時点での火炎の近赤外撮影画像 (a:50A 上方放出、b:50A 水平放出、c:150A 傾斜設置上方放出、d:50A 傾斜設置上方放出)



図3.2.4 孔径 10 mm 石英管における供給停止後 10 分時点での火炎の近赤外撮影画像 (a:150A 上方放出、b:150A 水平放出、c:50A 上方放出、d:50A 水平放出)



図3.2.5 火炎伝播挙動実験における温度測定結果(孔径 10 mm, 150A 配管, 上方放出)



図3.2.6 火炎伝播挙動実験における温度測定結果(孔径 10 mm, 150A 配管,水平放出)



図3.2.7 火炎伝播挙動実験における温度測定結果(孔径 10 mm, 150A 配管傾斜設置,上 方放出)



図3.2.8 火炎伝播挙動実験における温度測定結果(孔径10mm,50A配管,上方放出)



図3.2.9 火炎伝播挙動実験における温度測定結果(孔径10mm, 50A配管,水平放出)



図3.2.10 火炎伝播挙動実験における温度測定結果(孔径 10 mm, 50A 配管傾斜設置, 上方放出)

3.3 孔径 50 mm での大気混入挙動

漏えい孔径 50 mm の 150A 鋼管を用いた大気混入挙動実験の結果を図3.3.1 から3. 3.3に示す。上方放出、水平放出、傾斜設置の全ての条件で、10分以内に全ての酸素 濃度計の指示値が可燃濃度範囲に到達した。計測は水素供給停止後30分間行った。

まず、上方放出(図3.3.1)の場合、水素供給停止直後から直ちに空気が管内の混入し、底面部に拡がった。漏えい孔対面に設置した酸素濃度計4の指示値は、水素供給停止後1秒で可燃範囲となる5.3 vol%(水素濃度75 vol%に相当)を超え、10秒以内に約10 vol%

(水素濃度約50 vol%に相当)に達した。その後は緩やかに上昇し、30 分経過時点で酸素濃 度約16 vol%、水素濃度約25 vol%となった。他の管軸方向距離に設置した酸素濃度計にお いても、管底面部では、水素供給停止直後に酸素濃度が数 vol%上昇し、その後上昇を続け、 2 分以内に可燃濃度に達した。一方で管内上部に設置した酸素濃度計の指示値は底面に比べ やや遅れて立ち上がり、軸方向距離に依存せずほぼ同じ曲線で滑らかに推移し、約6分経 過した時点で5.3 vol%に達した。30分経過後は管内上下の濃度差はやや小さくなり、底面 の酸素濃度は14.5 から15.7 vol%(水素濃度25から31 vol%に相当)、上面ではほぼ場所に 依らず13.8 vol%(水素濃度34 vol%に相当)であった。それぞれの酸素濃度が可燃濃度範囲 に達した時間を図3.3.4 に示す。上面と底面で空気混入による濃度変化挙動が明確に 異なる。50 mmの開口から空気が混入した場合、空気と水素の密度差により、空気が管内 底面に沿って拡がる密度流が発生し、これが水素供給停止直後における底面部での酸素濃 度の急上昇をもたらす。次に底面に拡がった空気の層が拡散し、管内の上下の密度差が緩 和することにより、管内上面の酸素濃度が上昇する。これが、管内上面では軸方向距離に ほぼ依存しない濃度の時間履歴が観測された原因である。

水平放出では、図3.3.2に示すように水素供給停止直後に酸素濃度計3の指示値が 急上昇し、直ちに約17 vol%(水素濃度約18 vol%に相当)に達した。管内側面に取り付け られたその他の濃度計はいずれも同じ挙動を示し、水素供給停止後約2分で可燃濃度範囲 に入った。可燃濃度範囲に達した時間を図3.3.5に示す。30分経過後の酸素濃度は酸 素濃度計3で19.2 vol%(水素濃度8.6 vol%に相当)、その他の酸素濃度計で17.0 vol%(水 素濃度32 vol%に相当)であった。漏えい孔径10 mmの場合と同様に、水平放出では上方放 出に比べ大気混入が促進されることが確認された。

傾斜設置での上方放出(図3.3.3)の場合、水平に設置した場合に比べ傾斜の上方 に取り付けた酸素濃度計9,10では酸素濃度の上昇が遅くなる傾向にあった。しかし濃 度計1から8についてはいずれも水平設置時よりも酸素濃度の上昇が速く、傾斜によって 大気混入が促進される結果となった。傾斜による高低差が気体の流入出を促進していると 考えられる。可燃濃度への到達時間を図3.3.6に示す。酸素濃度計1から6では可燃 濃度に達した時間は水平設置時より短いが、傾斜の上方遠方に位置する酸素濃度計9,1 0では到達時間はやや長くなった。水素供給停止から30分経過した時点では管底面の酸素 濃度は16.3から17.1 vol%(水素濃度18から22 vol%に相当)、上面では13.0から16.6 vol% (水素濃度 21 から 38 vol%に相当)であった。水平設置時に、比べ底面での酸素濃度はや や高く、上面も酸素濃度計9を除き高くなった。従って漏えい孔径 50 mm では傾斜により 大気混入はやや促進され、また特に管内上面の濃度分布は管軸方向に勾配を持つことが確 認された。

漏えい孔径 50 mm での上方放出については数値解析も実施した。計算された配管内酸素 濃度の時間変化を図3.3.7に示す。図中の数字は、実験結果と同様に、図2.6.2 に示される計測地点に対応する。実験結果(図3.3.1)と比較し、管内酸素濃度が2 割程度高い傾向にあるが、これは3次元の現象を2次元でモデル化していることに起因す ると考えられる。大気混入挙動解析による管内酸素濃度分布の時間変化を図3.3.8に 示す。図より、管内に混入した空気は、管の底部を沿って拡がることが確認でき、これに より観測された濃度変化の傾向を説明できる。



図3.3.1 大気混入挙動実験結果(孔径 50 mm, 150A 配管,上方放出)


図3.3.2 大気混入挙動実験結果(孔径 50 mm, 150A 配管,水平放出)



図3.3.3 大気混入挙動実験結果(孔径 50 mm, 150A 配管傾斜設置, 上方放出)



図3.3.4 大気混入挙動実験(孔径 50 mm, 150A 配管,上方放出)における酸素濃度計 設置位置毎の可燃濃度範囲到達時間(丸:酸素濃度計奇数番号、四角:酸素濃度計偶数番号)



図3.3.5 大気混入挙動実験(孔径 50 mm, 150A 配管,水平放出)における酸素濃度計 設置位置毎の可燃濃度範囲到達時間(丸:酸素濃度計奇数番号、四角:酸素濃度計偶数番号)



図3.3.6 大気混入挙動実験(孔径 50 mm, 150A 配管傾斜設置,上方放出)における酸素濃度計設置位置毎の可燃濃度範囲到達時間(丸:酸素濃度計奇数番号、四角:酸素濃度計 偶数番号)



酸素濃度時間変化(数字は各計測点に対応する)



図3.3.8. 大気混入挙動の数値解析(孔径 50 mm, 150A 配管,上方放出)における 管内酸素濃度分布の時間変化

3. 4 孔径 50 mm での火炎挙動

150A 管を用いた漏えい孔径 50 mm での火炎伝播挙動実験では、水素供給停止後 40 から 60 分以内に火炎が消失する様子が観察された。鋼管を用いた実験における近赤外カメラで の撮影画像を図3.4.1から3.4.3に示す。いずれの連続写真も、火花放電により 着火し火炎が形成され(図中 a)、風洞の風を停止し(図中 b)、水素供給を停止(図中 c) した後、火炎が消失するまでの火炎の様子(図中dからg)を写している。管の上方に漏え い孔を設けた場合、試験配管を水平に設置あるいは傾斜をつけた設置した場合のいずれに おいても、水素供給停止後約 54 分で視野から火炎が消失している。消失するまでの間は、 供給停止直後は孔の外側に火炎が形成されており(図3.4.1の写真 c,d)、数分経過した 後からは火炎の大部分は管内に侵入したとみられ、外からの観察では火炎の穂先を捉えて いる(同 e,f,g)。試験配管の漏えい孔付近を石英管に置き換え、近赤外撮影及び紫外撮影に より可視化した火炎の様子を図3.4.4及び3.4.5にそれぞれ示す。水素供給停止 直後は漏えい孔から上方に向かう火炎が形成されている(図中 a)が、数分経過(図中 b) 以降は火炎は主に管内に定在している。特に、55 分経過後の画像(図中 d)では火炎は管 内のみに存在しており、鋼管での撮影では視野から火炎が消失していた時間においても、 管内には火炎が持続していたことが示されている。これは後述の温度測定結果でも同様で ある。管内に火炎が持続している間、火炎は伸縮を繰り返しており、管軸方向に断続的に 10から20 cm 程度拡がる挙動を示した。また、管内において火炎が消失する様子の連続写 真を図3.4.4中の写真eからhに示す。火炎は消失直前に、管内の上面を伝い管軸方向 にやや拡がった後に消失していることが分かる。この時、火炎は管軸方向に約 30 cm 伝播し た。

水平方向に漏えい孔を設けた場合は供給停止後約 41 分において同様に視野から火炎が消 失した。この場合、供給停止直後は漏えい孔の外側で上方に火炎が伸びる様子が捉えられ た(図3.4.2の写真 c,d,e)が、その後消失するまでの間は火炎が管内の上方に存在す る様子が観察されている(同 f,g)。石英管を用いた可視化撮影の結果を図3.4.6及び3. 4.7に示す。火炎は伸縮を繰り返しながら、主に管内の上面付近に定在していた。上方 放出時のように消失前に軸方向に伝播する挙動は観測されなかった。

次に、水平に設置した 150A 鋼管を用いた上方放出における温度測定の結果を図3.4. 8に示す。火炎形成後、水素供給を停止した時点でまず熱電対6の指示値が100℃近くまで 一時的に上昇した後、熱電対5の温度が増加し、約3分後にピーク値として 253℃まで達し た。この間熱電対8も100℃を超える温度を記録している。その後、漏えい孔の隣にある熱 電対7の指示値が増加し約200℃に達したが、その他の熱電対は100℃未満となった。約2 0分経過後から、互いに対称な位置にある熱電対3及び10の温度が増加し始めた。その 後約50分に至るまで、熱電対13、15、17、19が順次増加し始めた。これらは全 て管内上面に位置する熱電対であり、漏えい孔部から管軸方向に向けて温度上昇が推移し ている。この温度履歴のデータは図3.4.1の撮影と同一の実験のものであるが、撮影 視野から火炎が消失した 54 分の時点ではまだ高温は持続しており、その後の 56 分 20 秒時 点にて温度低下が始まった。石英管を用いた可視化撮影の結果と合わせ、この間は管内に は火炎が持続していたと考えられる。最高温度は熱電対7における 422℃であり、熱電対3 及び10においても 200℃を超える温度を観測している。石英管での可視化撮影画像から、 漏えい孔から軸方向 10 から 20 cm の位置までは断続的に火炎が伸縮し到達しており、熱電 対7 の高温は火炎によるものだと考えられる。熱電対3及び10も一時的に火炎が到達す る瞬間があり、特に 40 分経過以後の高温は火炎の熱が寄与していると考えられる。その他 の位置には火炎は到達しておらず、高温の測定値は燃焼後の高温ガスが管内に拡がったこ とを反映していると考えられる。また、温度が減少する直前に多くの熱電対において急激 な温度上昇が観測されているが、これは石英管での可視化撮影画像の通り、火炎が消失す る直前に管軸方向に拡がり、火炎やその燃焼ガスが到達したと考えられる。有意な温度上 昇は熱電対 19 まで観測されたが、火炎の消失により多くの熱電対の温度が低下する時間に おいて、熱電対 21 の温度がやや上昇している。これは前述の管軸方向への伝播により管内 軸方向に流れが生じ、温度の高い気体が移動してきたことを反映していると考えられる。

水平方向に漏えい孔を設けた場合の温度測定結果を図3.4.9に示す。水素供給停止 後数分以内に熱電対6及び7の温度が一時的に上昇し、それぞれピーク値で416℃及び 660℃を記録した。その後、熱電対5の指示値が200℃以上で推移し、熱電対8も200℃付 近を示した。その後、上方放出時と同様に、時間経過により熱電対3,10,13,15, 17、19が順次温度上昇を記録した。水素供給停止後42分50秒の時点で温度低下が始 まり、火炎が消失したと考えられる。これは鋼管での火炎撮影(図3.4.2)において 視野から火炎が消失した約2分後であり、この間は管内上面付近にて火炎が持続していた と考えられる。また、石英管による可視化撮影結果から、熱電対5と8は断続的に火炎に さらされているが、その他の位置の熱電対の温度上昇は既燃ガスの流入によるものである。

傾斜して設置した 150A 鋼管を用いた上方放出実験(図3.4.10)では、水平設置時 と同様にまず熱電対6が一時的に高温(276℃)になった後、熱電対5及び8が一時的な温 度上昇(約100℃)を示し、その後熱電対7が高温を示した。その後、やはり管内上面で、 漏えい孔から近い順に熱電対3、10、13、15、17、19が順次温度上昇を記録し た。その後54分10秒において温度低下が始まり、火炎が消失したことを示唆している。 水平設置時と同様に消失直前に急激な温度上昇を観測したが、傾斜設置では水平設置時と 比べ温度上昇幅が大きく、熱電対17まで200℃を超える温度を示し、また。熱電対23に おいても50℃以上の温度上昇を記録している。本調査で用いた石英管の接続用アダプター は傾斜設置には対応しておらず、傾斜した石英管での可視化実験は行っていないが、温度 測定の結果から、傾斜設置では火炎消失直前の軸方向への伝播がより長距離まで拡がった と考えられる。また、温度低下から数分後に遠方の熱電対26から28において若干の温度 上昇を記録しているが、これはこの時間において実験終了動作の準備として風洞のファン の運転を始めたことにより気体の流れが生じたためである。なお、水平設置及び傾斜設置 での漏えい孔径 50 mm の上方放出での実験はそれぞれ 2 回ずつ実施しており、ここではい ずれも 1 回目の結果を示してあるが、2 回目もほぼ同じ温度履歴の結果を得ており、また、 温度が減少し始めるまでの経過時間の差はいずれも 2 分以内であったことから、これらの 現象が再現性を持つことを確認した、



図3.4.1 火炎の近赤外撮影(孔径 50 mm, 150A 鋼管,上方放出)(a: 点火直後、b: 風 停止後、c: 水素供給停止直後、d: 供給停止後 30 秒、e: 供給停止後 3 分、f: 供給停止後 30 分、g: 供給停止後 50 分、h 供給停止後 54 分)



図3.4.2 火炎の近赤外撮影(孔径 50 mm, 150A 鋼管,水平放出)(a: 点火直後、b: 風停止後、c: 水素供給停止直後、d: 供給停止後 30 秒、e: 供給停止後 3 分、f: 供給停止後 30 分、g: 供給停止後 40 分、h 供給停止後 42 分)



図3.4.3 火炎の近赤外撮影(孔径 50 mm, 150A 鋼管傾斜設置, 上方放出)(a: 点火直後、b:風停止後、c: 水素供給停止直後、d: 供給停止後 30 秒、e: 供給停止後 3 分、f: 供給停止後 30 分、g: 供給停止後 50 分、h 供給停止後 54 分)



図3.4.4 火炎の近赤外可視化撮影(孔径 50 mm, 150A 石英管,上方放出,画像幅約1m, 写真中の直線は石英管の位置を示す)(a:水素供給停止直後、b:供給停止後5分、c:供給 停止後30分、d:供給停止後55分、eからh:火炎消失時の挙動(0.2秒/コマ))



図3.4.5 火炎の紫外可視化撮影(孔径 50 mm, 150A 石英管,上方放出,画像幅約 1.6 m, 写真中の直線は石英管の位置を示す)(a:水素供給停止直後、b:供給停止後 5 分、c:供給 停止後 30 分、d:供給停止後 55 分)



図3.4.6 火炎の近赤外可視化撮影(孔径 50 mm, 150A 石英管,上方放出,画像幅約1m, 写真中の直線は石英管の位置を示す)(a:水素供給停止直後、b:供給停止後 5 分、c:供給 停止後 30 分、d:供給停止後 39 分、e からh:火炎消失時の挙動(0.2 秒/コマ))



図3.4.7 火炎の紫外可視化撮影(孔径 50 mm, 150A 石英管,上方放出,画像幅約 1.6 m, 写真中の直線は石英管の位置を示す)(a:水素供給停止直後、b:供給停止後 5 分、c:供給 停止後 30 分、d:供給停止後 39 分)



図3.4.8 火炎伝播挙動実験における温度測定結果(孔径 50 mm, 150A 配管, 上方放出)



図3.4.9 火炎伝播挙動実験における温度測定結果(孔径 50 mm, 150A 配管,水平放出)



図3.4.10 火炎伝播挙動実験における温度測定結果(孔径 50 mm, 150A 配管傾斜設置,上方放出)

3.5 全破断での大気混入挙動

まず 50A 鋼管を水平設置した場合の、全破断時に水素供給を停止した場合の酸素濃度の 時間履歴を図3.5.1に示す。切り落とし端面から10 cm 及び20 cm の位置で管内底部の 酸素濃度計2と4は、水素供給停止後直ちに空気混入し、2秒以内に可燃濃度範囲に到達 し、5秒で酸素濃度は約20 vol%となった。より奥の酸素濃度計6、8、及び10について も、5秒以内に可燃濃度範囲に入り、10秒経過時点の酸素濃度はそれぞれ18 vol%、15 vol%、 及び13 vol%であった(それぞれ水素濃度14 vol%、29 vol%、38 vol%に相当する)。管内上 部の酸素濃度計で測定された酸素濃度の増加は、底部に比べ遅れて立ち上がるが、供給停 止後8から17秒にかけて切り落とし部に近い位置から順に可燃濃度範囲に達した。供給停 止後8から17秒にかけて切り落とし部に近い位置から順に可燃濃度範囲に達した。供給停 止後8から17秒にかけて切り落とし部に近い位置から順に可燃濃度範囲に達した。供給停 止後8から17秒にかけて切り落とし部に近い位置から順に可燃濃度範囲に達した。供給停

50A 鋼管を傾斜設置した場合の全破断における酸素濃度履歴を図3.5.2に示す。切り 落とし端面から管内に向けて正の勾配がつけられており、水平設置に比べ空気混入が遅れ る傾向にあった。各酸素濃度計の指示値が可燃濃度範囲に到達した時間を図3.5.4に 示す。底面部では供給停止後30秒以内に全ての酸素濃度計において可燃濃度に達したが、 管上部最奥の酸素濃度計9が可燃濃度に到達するまでには75秒要した。その後の管軸方向 への濃度分布も水平設置時比べやや大きく、30分経過時点での酸素濃度は管内底部で16.9 から20.6 vol%、上部で15.8 から19.4 vol%であった。可燃濃度への到達時間を水平設置時と 比較すると、特に切り落とし端面から軸方向距離が60 cm 以上の酸素濃度計7から10につ いて、底面、上面ともに大きく送れている。50A 試験配管の内径は52.9 mm であり、勾配 10%の傾斜がつけられた場合、軸方向距離52.9 cm 以遠では底面部が切り落とし端面の開口 上端にくらべ上方に位置することになる。このため、比重差によって空気が底面に沿い侵 入する密度流が抑制され、酸素濃度の増加が遅れたと考えられる。

150Aの試験配管を用いた全破断では、本調査で使用したガス供給系統では管内を水素で 置換することができなかったため、参考データとして置換が不十分な状態からの大気混入 挙動を測定した。この測定では、水素を管内に 200 L/min の流量で供給し、酸素濃度が定常 となった時点で風洞のファンを停止させ、風速の低下を確認した時点で水素供給を停止し た。ファンの停止動作から風の停止までには約 10 秒の時間を要するが、上記手順では風洞 空間内に可燃下限界の 1/4 である 1 vol%以上の水素が残留することはなかった。酸素濃度計 で測定された酸素濃度の推移を図3.5.5 に示す。図の時間原点以前では 200 L/min の流 量で水素を供給し続けているが、管内底部及び上部における酸素濃度はそれぞれ約 18 vol% 及び約 4 vol%でほぼ定常となっており、管内を水素で完全に置換することはできず、開口 部から混入する大気を含む定常的な濃度分布が形成されている。水素供給を停止するとほ ぼ同時に管内底部に空気が侵入し、4 秒以内に最奥の酸素濃度計 10 まで 20 vol%以上の酸素 濃度に達した。管内上部の酸素濃度は、底部に比べ約 10 秒遅れて増加を始め、水素供給停 止後 13 秒の時点で全て可燃濃度範囲となる 5.3 vol%を超え、30 秒経過時点で約 14 vol%(水 素濃度約 33 vol%に相当する)の化学量論組成に近い値となった。管内上部の酸素濃度の時 間履歴には軸方向距離に対する依存性がほぼみられないことから、50A の場合と同様に空気 は底面に沿って侵入し、その後管内で上部に拡散したと考えられる。上部酸素濃度の立ち 上がりの遅れが約 10 秒であるため、この拡散も同程度の時間スケールで進行する推測され る。また、150A の全破断条件では上記の通り管内を水素で置換することができず空気を含 む濃度分布が形成されたことから、安全のため着火実験は行っていない。



図3.5.1 大気混入挙動実験結果(50A 配管,全破断)(右下図は水素供給停止直後に おける全酸素濃度計の指示値推移の拡大図)



図3.5.2 大気混入挙動実験結果(50A 配管傾斜設置,全破断)(右下図は水素供給停 止直後における全酸素濃度計の指示値推移の拡大図)



図3.5.3 大気混入挙動実験(50A 配管, 全破断)における酸素濃度計設置位置毎の可 燃濃度範囲到達時間(丸:酸素濃度計奇数番号、四角:酸素濃度計偶数番号)



図3.5.4 大気混入挙動実験(50A 配管傾斜設置,全破断)における酸素濃度計設置位 置毎の可燃濃度範囲到達時間(丸:酸素濃度計奇数番号、四角:酸素濃度計偶数番号)



図3.5.5 大気混入挙動実験結果(150A 配管,全破断)(右下図は水素供給停止前後に おける全酸素濃度計の指示値推移の拡大図)

3.6 全破断での火炎挙動

50A 鋼管の全破断条件での火炎伝播挙動の近赤外撮影結果を図3.6.1及び3.6.2 に示す。前者は管の側方から、後者は管の正面方向からの撮影であり、それぞれ別の実験 での結果である。水素供給を停止した後、約 5 秒で側方からの撮影画像から火炎が消失し た。一方で正面からの撮影では5秒経過後も管内にて火炎が伝播している様子が観察され、 34 秒経過時点で火炎が消失した。50A 鋼管を傾斜設置した場合(図3.6.2及び3.6. 4) も類似の挙動を示し、側方からの撮影では約4秒、正面からの撮影では約31秒で火炎 が消失した。水平設置した石英管を用いた近赤外及び紫外可視化撮影の結果を図3.6. 5及び3.6.6に示す。供給停止直後から火炎が管内に侵入する様子が観察された。火 炎は管内の底部を沿うように伝播しているが、これは空気が底面付近から流入し火炎面に 供給されるためであると考えられる。火炎は約 5 秒で管端から約 30 cm の距離まで伝播した 後、管軸方向に伸縮を繰り返しながら脈動して伝播を続け、32 秒経過時点で消失した。管 端からの到達距離は最大で80 cm であった。この距離は全破断実験における試験配管の全長 である 5 m に比べ短いため、火炎消失時点では管内の閉端側に水素が残留していた可能性 がある。 燃焼後の既燃ガスには水蒸気と窒素が含まれる。 水蒸気は管内で水に凝縮するが、 窒素は管内に取り残されるため、この既燃ガスにより管内の残留水素と大気の混合が抑制 された結果火炎が消失したと推測される。

水平設置した鋼管を用いた実験における温度履歴を図3.6.7に示す。水素供給停止 時においては管底面部の熱電対5がまず反応し、続き隣の熱電対8の温度が増加している。 これは底面部より火炎が侵入していることに対応する。底面部から数秒遅れて管内上部の 熱電対3や6が温度上昇を示している。その後も同様に、熱電対11の後に9が、14の 後に13が、16の後に15が、それぞれ底面が先行するように温度上昇を示した。一般 的に底面よりも上面部に設置された熱電対のほうがより高温を示した。これは、底面では 火炎が通過した直後に大気の流れがあり熱電対が直ぐに冷却されるのに対し、上面付近で は燃焼後の高温ガスにある程度の時間さらされ続けることによると考えられる。温度の指 示値は熱電対のシース内にある接点の温度であり、必ずしも気体の温度を直接反映しない。 本調査ではシース径 0.5 mmの細いシース熱電対を使用したが、特に短時間で火炎が通過し た底面部では火炎帯の温度を反映していない。その後、火炎の通過した後の熱電対の指示 値は下降するが、約 30 秒の時点で熱電対 9 ,10,12,13,16が再び一時的な温度 上昇を示した後、温度が一斉に低下した。この約 30 秒の時点で火炎が消失したと考えられ る。これは正面から火炎を撮影した結果や、石英管を用いた可視化撮影の結果とも一致す る。最期の一時的な温度上昇は、脈動する火炎が消失直前にやや拡がったためであると考 えられる。この時、管端から 80 cm の距離にある熱電対18も若干の温度上昇を示している ことから、この距離まで火炎が到達したと考えられる。これも石英管による可視化撮影と 良く対応する結果である。また、熱電対20も約32秒でやや温度が上昇しているが、他 の位置に比べてやや遅れていることと、上昇幅が微小(約7℃)であることから、火炎消

失時の気体の流れにより温度の高い既燃ガスが流入した結果である可能性がある。この温 度測定実験は3回行いほぼ同様の結果を得たことから、火炎の持続時間と伝播距離には再 現性があることを確認した。

鋼管を傾斜設置した場合の温度測定結果を図3.6.8に示す。水平設置時と同様に、 管端から底面が先行して温度上昇を検知し、火炎の伝播を確認した。ただし水平設置時と 比ベ火炎の伝播速度は遅く、例えば熱電対14が温度上昇を開始し始める時間は水平設置 時が約9秒時点であったのに対し傾斜設置時は約20秒であった。これは、大気混入挙動 の実験結果と同じように、傾斜により空気の侵入が遅れたためであると考えられる。約2 6秒経過後にやはり一時的な温度上昇を示した後、温度が一斉に低下した。管端からの距 離60 cm に位置する熱電対14及び15まで有意な温度上昇を示し、距離80 cm にある熱電 対16の温度上昇はやや微小であり遅れていたことから、火炎は管端から60 から80 cm ま での距離まで到達したと考えられる。水平設置時に比べ持続時間と到達距離が共にやや短 いのは、傾斜により水素と空気の混合が抑制されたためであると考えられる。



図3.6.1 火炎の近赤外可視化撮影(50A 鋼管,全破断,側方から撮影)(a:水素供給 停止直後、bからj:供給停止後1,2,3,4,5,10,20,30,35秒)



図3.6.2 火炎の近赤外可視化撮影(50A 鋼管,全破断,正面から撮影)(a:水素供給 停止直後、bからj:供給停止後1,2,3,4,5,10,20,30,35 秒)



図3.6.3 火炎の近赤外可視化撮影(50A 鋼管傾斜設置, 全破断, 側方から撮影)(a:水 素供給停止直後、bからj:供給停止後1,2,3,4,5,10,20,30,35秒)



図3.6.4 火炎の近赤外可視化撮影(50A 鋼管傾斜設置,全破断,正面から撮影)(a:水 素供給停止直後、bからj:供給停止後1,2,3,4,5,10,20,30,35秒)



図3.6.5 火炎の近赤外可視化撮影(50A 石英管,全破断,画像幅約1m,直線は石英 管の位置を示す)(a:水素供給停止直後、bからj:供給停止後1,2,3,4,5,10,20,30,35秒)



図3.6.6 火炎の紫外可視化撮影(50A 石英管,全破断,画像幅約1.4m,直線は石英管の位置を示す)(a:水素供給停止直後、bからj:供給停止後1,2,3,4,5,10,20,30,35秒)



図3.6.7 火炎伝播挙動実験における温度測定結果(50A 配管,全破断)



図3.6.8 火炎伝播挙動実験における温度測定結果(50A 配管傾斜設置,全破断)

4. まとめ

水素導管供給システムにおける大規模損傷シナリオを想定した場合に考慮すべき事項と して、他工事等により掘削坑中において埋設導管が損傷することが想定される。導管が損 傷し水素が漏えいした後の水素供給停止措置における潜在的なリスクの評価及びその対策 に資する技術的知見を得ることを目的として、管内への大気混入挙動と、火炎が形成され た後に供給停止した場合の火炎伝播挙動を調査した。主要な結果を以下に記す。

10 mm 径の漏えい孔からの大気混入については、150A の試験配管を用いた計測では、漏 えい方向や配管の傾斜に関わらず、3 時間の計測時間内に管内に可燃性混合気の形成は確認 されなかった。一方、配管径 50A の場合は水素供給を停止した数分経過後から管内に可燃 性濃度の混合気が形成された。可燃となる混合気の管軸方向への拡大速度は、漏えい方向 や配管の傾斜に依存して 4.1 から 7.7 cm/min であった。また、3 時間経過後も管内の混合気 は可燃濃度範囲に留まっており、可燃性雰囲気は長時間持続することが確認された。

漏えい孔径が 50 mm の 150A 配管の場合、水素の供給を停止した時点で直ちに空気が管 内に流入し、管内の底面部を沿うように管軸方向に拡がった後、管内の上方に拡散するこ とで、数分後には少なくとも軸方向距離 80 cm までの全域が可燃性混合気で満たされた。 漏えい方向は上方よりも水平方向のほうが、また配管が水平に設置されている場合よりも 傾斜して設置された場合のほうが、それぞれ大気の混入がやや促進される傾向にあった。 また、30 分経過後においても管内には可燃濃度の混合気が滞留していることを確認した。

50A 管の全破断においては、水素供給停止とほぼ同時に管内の底面から空気が混入し、その後数秒遅れて管内上面付近にも空気が到達した。全破断においては、端面から管内に向けて正の勾配の傾斜をつけると水平設置時に比べ空気の混入が遅くなる傾向にあったが、約30 秒で軸方向距離 80 cm の位置まで可燃範囲に到達しており、150A 管に 50 mm の漏えい孔を設けた場合よりも空気の混入が速いことを確認した。150A 管の全破断実験は試験装置の制限のため、水素の置換が不十分な状態から測定を行ったが、管内底部は数秒以内に空気に置換され、約10 秒遅れて管内上部も空気と混合した。

次に、着火後の火炎挙動について、10 mm 径の漏えい孔では、管径、傾斜、及び漏えい 方向に関わらず、着火後水素供給を停止した後、少なくとも 90 分以上は放出孔近傍で火炎 が持続した。温度測定と可視化撮影のいずれにおいても火炎の管内への侵入は観測されて いない。

150Aの試験配管に 50 mm 径の漏えい孔を設けた着火実験では、水素供給を停止した後、 上放出時は約 56 分、水平放出時は約 43 分で火炎が消失した。火炎は主に漏えい孔近傍で 持続した。漏えい孔からの軸方向距離 10 及び 20 cm 地点の熱電対指示値は 200℃を超えて いた。可視化実験の結果から、これらの値は火炎による熱によるものであると考えられる。 また、軸方向距離 1 m 以上の熱電対まで温度上昇を観測したが、これらは火炎によるもの ではなく、燃焼後の高温ガスが管内に流入したことを反映している。配管の傾斜により温 度の履歴はやや異なるが、高温の到達距離や火炎消失の時期はほぼ変わらないことを確認
した。

50A 全破断での着火実験では、水素供給を停止した後火炎は管内に侵入し、脈動しながら 伝播を続け約 30 秒で火炎が消失する。温度計測と可視化実験の結果から、火炎は放出孔か ら約 80 cm の距離まで侵入したことを確認した。端面から管内に向けて正の勾配の傾斜をつ けた場合、水平設置時に比べ、火炎の持続時間と到達距離はやや小さくなることが確認さ れた。

以上の調査結果を総括すると、大気混入挙動では、導管損傷時に着火していない状態で 水素供給を停止した場合、配管径に比べ漏えい孔径が十分に小さい場合を除き、管内には 大容量の可燃性混合気が存在することとなる。損傷が大きい場合、管軸方向への空気の混 合は速く、損傷部付近のみではなく遠方の管内まで可燃性組成が到達する。水素と空気の 混合気の可燃濃度範囲は広いため、損傷部付近も長時間可燃性組成が保たれることとなり、 やはり大容量の可燃性混合気が形成される。これらの可燃性混合気に着火した場合は管内 での予混合爆発が発生する可能性があり、従って不活性ガスへの置換が完了するまでは潜 在的なリスクが生じている状況が持続する。また、管軸方向への混入は空気と水素の比重 差に起因する密度流によって駆動されており、水素を用いる導管特有の現象であると考え られる。

導管が損傷し漏えい水素が着火した際には、水素供給停止後も長時間火炎が持続する可 能性がある。この要因としては水素の可燃濃度範囲が広いこと、拡散しやすく空気と混合 しやすいことが挙げられる。屋外では水素火炎は視認できないため、目視で火炎が確認さ れない場合でも損傷部付近で火炎が存在し得る。また、損傷が大きい場合には管内に火炎 が伝播するため、管外から火炎を検知できない場合でも火炎が持続している可能性がある。 従ってこれらの状況では不活性ガス置換時に火炎が管外に流出し残留水素が空気と混合す ると、火炎が再噴出する可能性があり、やはり不活性ガスへの置換が完了するまではリス クが残存すると言える。

上記の結果は、導管損傷後の水素ガス供給停止時における潜在的な危険性を示唆してい る。特に、管内に可燃性混合気が形成される可能性や、視認あるいは検知不可能な火炎が 持続する可能性は、復旧作業の現場において予混合爆発や火炎の噴出が発生し得ることを 示している。従って、これらの可能性を踏まえた予防策や作業手順を設定することが望ま しい。

当事業「水素導管の大規模損傷リスク評価」の平成28年度調査では、大規模損傷により 開放空間に水素が放出し着火した場合に火炎による影響、平成29年度調査では掘削坑内へ の水素放出時に着火した際の爆風圧による影響、平成30年度調査では水素ガスの遮断によ る管内圧の減圧過程における爆風圧の経時変化をそれぞれ評価した。火炎による影響は管 内圧と損傷孔径で決まる放出流量により整理し、掘削坑内での着火時の爆風圧は放出条件 により異なるモデルを用いて表し、同モデルの適用範囲を整理した。令和元年度の本調査 では、水素供給停止後の現象を整理したが、これは開放空間あるいは掘削坑内での損傷の いずれの場合にも適用されるものである。当該事業で評価した導管損傷による水素漏えい 時のリスクをまとめると、漏えいした水素に着火した際に形成される火炎によるもの、滞 留した漏えい水素に着火した際の爆風圧、及び水素供給停止後の火炎の持続性及び可燃性 混合気形成による爆発の可能性である。これらの結果は各評価において想定した条件下の 結果であり、必ずしも水素の安全性検討を網羅するものではないが、リスクの把握とそれ に対する対策の検討に資するものである。これら調査結果の活用例としては、損傷の防止 に向けた保全の取り組みに加え、水素導管損傷時の離隔距離等を含む避難計画の設定、水 素噴出や着火爆発等のリスク低減に向けたガス遮断装置や安全弁の設置等の配管設計、な らびに供給停止及びガス置換方法と手順の設定等が挙げられる。