

## 第2章 水素配管を敷設した建物等空間の安全性の検討

### 2.1 目的

本章では、水素配管を敷設した建物等空間の安全性について検討を行い、水素配管を敷設した建物等空間の安全性を確保するために必要な事項(対策)を整理することを目的とする。また、国内における水素等配管等の材料・施工コストに関する情報を整理し、既存共同溝に水素配管を敷設して燃料電池に供給消費することで都市内に水素を供給する際の安全性を確認することを目的とする。

まず、水素を含む新エネルギー開発状況、事故事例、水素関連法令・基準、水素パイプライン・水素供給に関する研究開発・実証試験の動向、水素の貯蔵・搬送に係る建設・設備技術、国内における水素等配管等の材料・施工コスト等の調査を行い、水素配管を敷設した建物等空間の安全性を確保するために必要な事項(対策)を検討する上での前提条件を整理する。

次に、この前提条件に基づいて、建物に敷設された水素配管に及ぼす外力を想定し、数値計算、実験に基づく以下の検討を行い、水素配管を敷設した建物等空間の安全性を確保するために必要な事項(対策)を数値計算あるいは実験により整理する。

本章における検討内容は、以下の通りである。

- ・ 水素の安全性および水素配管敷設に関する基準等の調査
- ・ 建物内空間(パイプシャフト)で漏洩した水素の廊下での拡散性状
- ・ 建物内空間(居室等)で漏洩した水素の拡散性状
- ・ 屋外空間(バルコニー等)で漏洩した水素の拡散性状
- ・ 建築基礎を貫通するガス配管の耐震性能
- ・ 室内敷設配管の火災加熱による延焼防止性能
- ・ 都市内に水素を供給する際の安全性を確認するための実証実験
- ・ 建築空間、共同溝における水素供給の安全対策

## 2.2 水素配管を敷設した建物等空間の安全性についての検討

### 2.2.1 水素配管を敷設した建物等空間の安全性に関する検討の前提条件・想定外力

#### (1) 前提条件について

水素配管を敷設した建物等空間の安全性に関する検討を行うために、以下の項目を前提とした。

##### 1) 漏洩感知や緊急遮断等の安全対策

現在の都市ガス等と同様に、漏洩・長時間使用・地震・圧力不足に対する安全対策を備えた水素用マイコンメータが開発されることを想定する。

##### 2) 水素への付臭

都市ガス等と同様に、臭気による漏洩の検出を想定する。また、ガスが漏洩した場合には、付臭剤は水素中に均一に混合するものとする。

##### 3) 水素消費設備

水素消費設備には、家庭用又はオンサイト型コージェネレーションシステム用の燃料電池を想定する。水素を直接燃焼させる機器は、安全確保及び必要供給量の面を鑑みて、検討対象から除外する。

##### 4) 既存ガス配管を利用した水素ガスの供給(都市ガスから水素ガスへの置換)

新規の水素配管は屋外に設置することを原則とする。しかし、以下の理由から、既存の屋内ガス配管の利用や既存パイプシャフト内に配管の一部を設けて水素ガスを供給する場合は、必要な安全対策を行った上で、現在供給している燃料ガス(都市ガス等)から水素に完全に置き換わる場合を想定する。

- ・都市ガス等を改質すれば水素が生成できるため、新規水素配管の必要性がない
- ・燃料電池以外に水素を使用する設備が具体的に想定できない
- ・都市ガス等と水素を同一空間に配管する場合は、相互のリスク評価が容易でない

#### (2) 想定外力について

水素配管を敷設した建物等空間の安全性を検討するために、以下の外力を想定し、数値計算、実験による検討を行う。

- ・配管の腐食等
- ・建築基礎を貫通するガス配管の地震による変形
- ・建物内敷設配管の火災による加熱

共同溝については、既存共同溝に水素配管を敷設して燃料電池に水素供給することで都市内に水素を供給する際の安全性を確認する。これらの想定した外力に対する安全性を検

討する建物部分等の概念図を図2.1に示し、以下に検討項目を示す。

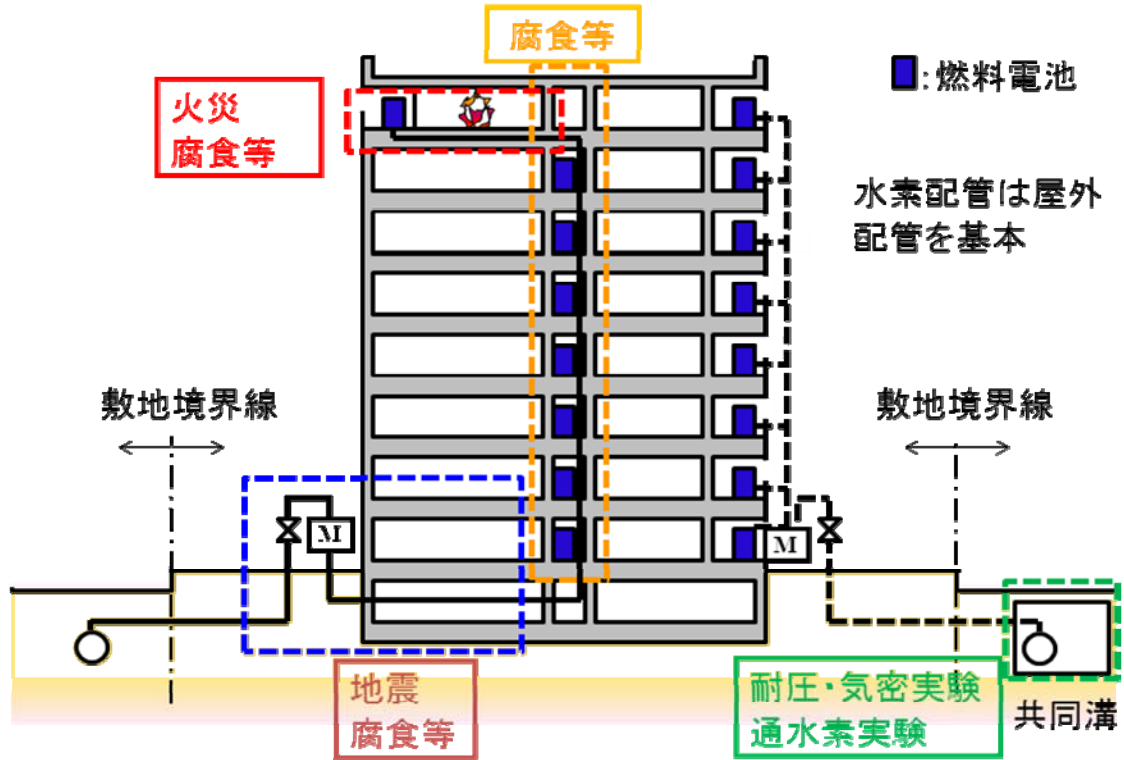


図 2.1 想定した外力に対する安全性を検討する建物部分等の概念図

## 2.2.2 水素の安全性および水素配管敷設に関する基準等の調査

水素の安全性および基準等に関する現状を把握し、水素配管を敷設した建物等空間の安全性を確保するために必要な事項(対策)を検討する上での前提条件を整理し、国内における水素等配管等の材料・施工コストに関する情報を整理するため、以下の調査を行う。

- (1) 一般燃料ガスの漏出事例及び漏出検知に関する調査
- (2) 水素配管敷設に関する基準等の調査
- (3) 国内における水素等配管等の材料・施工コスト

### (1) 一般燃料ガスの漏出事例及び漏出検知に関する調査

#### 1) 漏出事例の調査結果

既存建物の一般燃料ガス配管からのガス漏出事例等をもとに一般燃料ガスの漏出量、漏出箇所を調査するものとした。ガス漏出事例は原子力安全・保安院のホームページ等を参照し、建物内の一般燃料ガス配管におけるガス漏出の危険性が高い箇所を抽出するとともに、漏出性状の特徴について、漏出したガスの種類・漏出した器具、位置・配管敷設の経年等のデータ及び事故概要を読み込むことで、漏出の要因と特徴をまとめた。

原子力安全・保安院でまとめられているガス漏出の例として、以下のようなものがある。

- \* 一般集合住宅 ガス管近傍の排水管の接続部が外れ、ガス管が排水に浸けられる状態となり、管の腐食が進行。腐食孔が生じ漏出。1998 福岡
- \* 一般集合住宅 灯外内管の腐食孔からガス漏出。1999 千葉
- \* 一般業務用建物 他工事業者が灯外内管を損傷し、ガス漏出。2004 東京

ガス漏出事例は、以下の経済産業省原子力安全・保安院のホームページのガス消費機器に関する事故報告を調査した。ガス事故・トラブルの発生状況を、表 2.1 に示す。事故発生した位置(接続部 or 継ぎ手 or 配管)や漏れた要因(腐食・劣化等の自然発生するもの、施工不良等の人的なもの)により分類した。

#### 2) 漏出検知の調査結果

漏出検知についての調査は、一般燃料ガス配管設置に関する実務指針等を参考にしつつ、マイコンメータや付臭による漏出検知手法についてまとめるものとした。一般燃料ガスの配管供給における代表的な検知手段である付臭に関しては、市場に出回っている付臭剤の種類、特徴等の実態調査もあわせて推進するものとした。また、漏出時の対策について、ガス遮断装置やガス警報機、ガスメータに関する情報を収集するとともに、漏出開始から検知までの時間について調査した。

表2.1 ガス事故・トラブルの発生状況 (2000~2010)

	選 択 件 数	発生位置			要因		
		接続部	継手	配管	自然	人為	不明
2000	1	1				1	
2001	0						
2002	3	2		1		2	1
2003	5	4		1	1	4	
2004	2	2				2	
2005	1			1		1	
2006	9	8		1	1	6	2
2007	14	6		8	4	8	2
2008	8	6		2	1	6	1
2009	3	1		2	2	1	
2010	13	7	1	5	4	5	4
合計	59	37	1	21	13	36	10

漏出量を推定する方法としては、漏出開始から検知までの時間と、検知後の対応状況から供給量から推定を行うものとした。具体的には、以下についてまとめた。

- ・ マイコンメータが地震検知、供給量の急激な変動等をどのタイミングで検知し遮断を行うか、その仕様を調査することにより、漏出量推定の手掛かりが得られるものかどうかを調査する。
- ・ 付臭による検知により、どのようなプロセスで、遮断が行われるか。

調査は、ガス事業法令、通達、解釈例、その他関係法令、及び業界自主基準の内容の確認を行った。漏出検知の方法として考えられるマイコンメータ及び付臭剤を対象とした。

#### I)マイコンメータ

マイコンメータは、ガスメータ内にガス流量センサー、ガス遮断弁及び異常事態判断基準を記憶させたマイコン制御部を設け、これらの働きで常にガスの流れを監視し、ガスの流れが異常の時、ガスを遮断するものである。異常状態としては、流量オーバー・継続使用时间オーバー・感震・圧力低下・外部信号入力・電池電圧低下・内管漏洩検知がある。

マイコンメータについては、次の事項が確認されている。

- ・ ガス工作物技術基準の解釈例（漏洩検知装置の規格及びその設置方法）第 114 条

- i) 漏洩検知装置を設置した箇所からガス栓までの部分(以下「被検知部分」という)におけるガスの圧力の変化若しくは被検知部分へのガスの流入の状況によりガスの漏洩を有効に検知し、ガスの使用者若しくはその他の建物の関係者に音響若しくは表示により警報すること 又は被検知部分へのガスの供給を自動的に遮断すること。
- ii) 漏洩検知装置の検知可能な最小のガス漏洩量は  $0.005\text{m}^3/\text{h}$  を超えるものでないこと。

マイコンメータが異常を判定して動作する例として、使用最大流量が  $6\text{m}^3/\text{h}$ (家庭用最大値)のメータの場合は下記の通りである。

**①合計流量遮断：**

合計流量遮断値  $10.9[\text{m}^3/\text{h}]$ で設定されており、約1分以内に遮断される。この時の流量は  $181.67[\text{l}/\text{min}]$ となる。

**②圧力低下：**

ガス使用中に、供給圧力が  $0.3 [\text{kPa}]$  以下になった時に遮断される。都市ガスの場合  $2.5 \sim 1.0[\text{kPa}]$ で供給されている。

**③内部漏洩感知：**

計量体積が  $1.7[\text{l}]$ であり、30日間連続してガスの流れが認められ、メータがわずかでも動いている場合に警報が出される。

## II) 付臭剤

付臭については、付臭剤の種類とその特性を調べるとともに、臭気の確認下限値を確認した。以下のような特性を持った付臭剤を組み合わせたものをガスに添加し、臭覚でガスの漏洩を検知するものである。燃料用の付臭剤の例としては、以下のものがある。

**①ターシャリーブチルメルカプタン (TBM: tertiary-butylmercaptan)**

化学式「 $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{S}$ 」：有機硫黄化合物の一種で、臭気が強く、燃焼すると二酸化炭素、水、硫黄酸化物になる。タマネギが腐ったような臭い。

**②テトラヒドロチオフェン (THT:tetrahydro thiophene)**

化学式「 $\text{C}_4\text{H}_8\text{S}$ 」)：揮発性の無色透明の液体で、強い不快臭を持つ。ガス管および弁への腐食性が無い、嗅覚の習慣的非活性化を起こさない、喉や目への刺激および頭痛を引き起こさないなどの特徴を持つ。石炭ガスのような臭い。

**③ジメチルサルファイド (DMS:dimethyl sulfide)**

化学式「 $\text{C}_2\text{H}_6\text{S}$ 」：有機硫黄化合物の一種で、燃焼すると二酸化炭素、水、硫黄酸化物になる。悪臭防止法に特定されている物質。濃度が高いと危険性の高い物質であり、条例

で使用禁止を定めている都道府県もある。ニンニクのような臭い。

④エチルメルカプタン (ethylmercaptan)

化学式「 $C_2H_6S$ 」：有機硫黄化合物の一種で、燃焼すると二酸化炭素、水、硫黄酸化物になる。悪臭防止法に特定されている物質。強い刺激臭を持つ。極めて引火性が高く、また、体内に吸入すると有害である。

⑤シクロヘキセン (ethylmercaptan)

化学式「 $C_6H_{10}$ 」：硫黄を含まず、燃焼すると二酸化炭素と水になり、硫黄酸化物が発生しない。化審法の第3種監視化学物質※に指定されており、高蓄積性がなく比較的リスクの低い化学物質。石油に似た強い特有の悪臭を持つ。

燃料電池用の付臭剤の例としては、以下のものがある。

①上記燃料用の付臭剤に脱硫処理を施したもの

②5-エチリデンノルボルネンと2-アルキル-3-アルコキシピラジンの混合付臭剤

③ジエチルスルフィド

化学式「 $(CH_3)_2S$ 」：常温で液体、水に難溶の有機硫黄化合物。ジメチルエーテルの酸素を硫黄に置き換えた構造。キャベツが腐った臭い。

付臭剤については、含まれる硫黄成分を減らす目的で、下記のように付臭剤の成分を変更する動きがある。

i) 東京ガス株式会社の場合、

「これまでの付臭剤の成分は、「ターシャリーブチルメルカプタン(以下「TBM」)」と「ジメチルスルファイド(以下「DMS」)」を混合していましたが、今後は、TBM と「シクロヘキセン(以下「CH」)」を混合した成分に変更します。これにより、都市ガスに含まれている硫黄分を約半分に削減でき、環境性をより高めることができます。なお TBM と CH を混合した新しい付臭剤は、これまでの都市ガス特有の臭いと変わらず、都市ガスの付臭剤として必要な特徴を備えています。{ TBM+DMS → TBM+シクロヘキセン(CH) }」

東京ガス株式会社のプレスリリース<sup>1)</sup>：

<http://www.tokyo-gas.co.jp/Press/20090316-01.html>

ii) 宮崎ガス株式会社の場合、

「付臭剤に含まれている硫黄分を減らし環境性を高める目的で、付臭剤の成分を変更致します。」

{ THT → TBM+THM+シクロヘキセン(CH) } TBM : 8%, THM : 0.8%, CH : 91.2%

宮崎ガス株式会社のプレスリリース<sup>2)</sup>：

<http://www.miyazakigas.co.jp/info/osirase/20100428a.pdf>

臭気については、次の事項が確認されている。

i) ガス工作物の技術上の基準を定める省令（付臭措置）第 22 条

ガスの使用者及びガスを供給する事業を営む者に供給されるガス(ガスを供給する事業を営む者に供給されるものにあつては、低圧に供給されるものに限る。)は、容易に臭気によるガスの感知ができるように、付臭されていなければならない。

ii) ガス工作物技術基準の解釈例（臭気の確認）第 77 条

省令第 22 条に規定する「容易に臭気によるガスの感知ができる」及び「臭気の有無が感知できる」とは、次の各号のいずれかに掲げる方法及び頻度等で測定し、ガスの空気中の混合容積比率が容量で 1000 分の 1 でおおいが確認できることをいう。

- 一 パネル法においては、試料気体の調整法により希釈ガスを作成し、あらかじめ選定された正常なきゅう覚を有する臭気の判定者(パネル)4 名以上によるおおいの有無を判定し、感知できた希釈倍数から各パネルの感知希釈倍数を求め、ガスの臭気濃度を求めること。ただし、各パネルの希釈倍数の相加平均値を求め、その相加平均値の 10 分の 1 以下又は 10 倍以上のデータがある場合は採用しない。
- 二 付臭剤濃度測定法においては、測定したガス中の付臭剤濃度(mg/m<sup>3</sup>を単位とする。)から、換算式を用いてガスの臭気濃度を求めること。この方法における臭気濃度の管理値は、2000 倍(ガスの空気中の混合容積比率が 2000 分の 1 でおおいが確認できること)以上とすること。

3) 漏出時の対策

ガス事業法令、通達、解釈例、その他関係法令、及び業界自主基準の内容の確認を行った。ガス遮断装置及びガス警報機を対象とした。

ガス遮断装置としては、使用目的により一般的には以下の 4 種類がある。

i) 引込管ガス遮断装置

引込管に設置（敷地境界近傍）し、緊急時に操作しガスの供給を遮断する。

ii) 緊急ガス遮断装置

建物への引込管の外壁貫通部付近に設置し、緊急時に防災センター等からの遠隔操作等により建物へのガスの供給を遮断する。

iii) 分岐バルブ

配管の分岐部付近に設置し、検査時・施行時及び長期不使用時等に操作しガスを遮断する。

iv) 業務用ガス遮断装置



業務用厨房等に設置し、手動又は都市ガス警報器からのガス漏れ信号等でガスの供給を遮断する。

ガス警報器等のシステムとしては、以下のようなものに分類される。

i) ガス漏れ警報設備

施行規則の規定に基づき、特定地下街等・特定地下室等で検知器を燃焼機器のある箇所、及び配管の外壁貫通部等に設置するとともに、その作動状況を中央管理室等で集中管理する設備であり、音声警報装置によりガス漏れの発生を知らせる。

ii) 都市ガス警報器（単体型）

都市ガス警報器を単体で燃焼機器のある箇所等に個別に設置する方式で、戸外ブザーと連動させることも可能である。

iii) 都市ガス警報器（集中監視型）

建物内の各箇所に設置されている都市ガス警報器と管理人室等に設置した監視盤を接続し、各警報機の作動状況を1箇所で監視するシステムである。

iv) 自動ガス遮断装置

ガスの流量、圧力等の異常、又はガスの漏えいを検知し、自動的にガスを遮断する機能を有する装置を言い、実用化されているものとしては「マイコンメータ」と「業務用ガス遮断装置（都市ガス警報器連動）」とがある。

4) 引込管ガス遮断装置

①引込管ガス遮断装置の選定

**[遵守事項]**

- i) 引込管ガス遮断装置は、ボールバルブ、プラグバルブ等のガスを速やかに確実に遮断することができる機能を有するものを選定する。**【遵守】**
- ii) 引込管ガス遮断装置の主要部の材料は、供給管・内管に用いる配管材料企画に適合するもの、又はこれと同等以上の機械的性質を有するものとする。**【遵守】**
- iii) 引込管ガス遮断装置は、使用中の荷重並びに最高使用温度及び最低使用温度における最高使用圧力に対し、設備の種類、規模に応じて適切な構造であるものを選定する。**【遵守】**

**[関連条項]**

- ・省令 第14条(材料)、第15条(構造等)、第49条(ガス遮断装置)第3項、第4項
- ・解釈例 第14条(導管等の材料)、第108条(引込管に設けるガス遮断装置)、第109条(地下室等のガス遮断装置)

## ②引込管ガス遮断装置の設置対象及び設置場所

### [遵守事項]

i) 引込管ガス遮断装置は、次の引込管に設置する。【遵守】

- (a) 特定地下街等への引込管
- (b) 特定地下室等への引込管
- (c) 超高層建物への引込管
- (d) 特定大規模建物への引込管
- (e) 高層建物への引込管
- (f) 内径が 70mm 以上の引込管
- (g) 地下室・地下街その他地下であってガスが充満するおそれのある場所への引込管
- (h) その他必要な建物への引込管

なお、ガスを使用する建物ごとの区分を定める件（昭和 60 通商産業省告示第 461 号第 1 条）より、「特定地下街等」は延べ面積が 1,000m<sup>2</sup>以上のもの、「特定地下室等」は地階で床面積が 1,000m<sup>2</sup>以上のもの、「超高層建物」は高さが 60m を超えるもの、「特定大規模建物」は劇場、映画館などでガスメータの号数が一定規模以上のもの、「高層建物」は高さが 31m を超えるものを指す。

ii) 設置場所は、危急時に地上から容易に操作でき維持管理しやすい場所とする。【遵守】

### [勧告事項及び推奨事項]

i) 土中埋設部に引込管ガス遮断装置を設置する場合は、プロテクタ等を設ける。【勧告】

ii) 露出部に引込管ガス遮断装置を設置する場合は、部外者によるいたずら等への防止策を講ずる。【推奨】

### [関連条項]

- ・省令 第 49 条(ガス遮断装置) 第 3 項、第 4 項
- ・解釈例 第 108 条(引込管に設けるガス遮断装置)、第 109 条(地下室等のガス遮断装置)
- ・昭和 60 年通産省告示 第 461 号(ガスを使用する建物ごとの区分を定める件)

## 5) 緊急ガス遮断装置

### ①緊急ガス遮断装置の選定

#### [遵守事項]

i) 緊急ガス遮断装置は、当該建物内におけるガス漏れ等の情報を把握できる適切な場所から直ちに遮断できる機能を有するものを選定する。【遵守】

ii) 緊急ガス遮断装置のバルブ本体は、ボールバルブ、プラグバルブ等のガスを速やか

に確実に遮断することができる機能を有するものを選定する。【遵守】

iii) 緊急ガス遮断装置の主要部の材料は、供給管・内管に用いる配管材料企画に適合するもの、又はこれと同等以上の機械的性質を有するものとする。【遵守】

iv) 緊急ガス遮断装置は、使用中の荷重並びに最高使用温度及び最低使用温度における最高使用圧力に対し、設備の種類、規模に応じて適切な構造であるものを選定する。

【遵守】

[関連条項]

・省令 第 14 条(材料)、第 15 条(構造等)、第 49 条(ガス遮断装置)第 5 項

・解釈例 第 14 条(導管等の材料)、第 110 条(緊急ガス遮断装置)

## ②緊急ガス遮断装置の設置対象及び設置場所

[遵守事項]

i) 緊急ガス遮断装置は、次の建物の外壁を貫通する箇所の付近に設置する。【遵守】

(a) 特定地下街等

(b) 特定地下室等

(c) 超高層建物

(d) 特定大規模建物

ii) 緊急ガス遮断装置の操作器は、当該建物内におけるガス漏れ等の情報を把握できる適切な場所に設置する。【遵守】

[関連条項]

・省令 第 49 条 (ガス遮断装置) 第 5 項

・解釈例 第 110 条 (緊急ガス遮断装置)

## 6) 分岐バルブ

### ①分岐バルブの選定

[遵守事項]

i) 分岐バルブは、ボールバルブ、プラグバルブ等のガスを速やかに確実に遮断することができる機能を有するものを選定する。【遵守】

ii) 分岐バルブの主要部の材料は、供給管・内管に用いる配管材料企画に適合するもの、又はこれと同等以上の機械的性質を有するものとする。【遵守】

iii) 分岐バルブは、使用中の荷重並びに最高使用温度及び最低使用温度における最高使用圧力に対し、設備の種類、規模に応じて適切な構造であるものを選定する。【遵守】

### ②分岐バルブの設置対象及び設置場所

[遵守事項]

i) 設置場所は、バルブの操作に支障のない場所とする【遵守】

[推奨事項]

- i) 分岐バルブは、次のような場所に設置する。【推奨】
  - (a) 集合住宅の共用配管の分岐部
  - (b) ビル内配管の各階・各区画の分岐部
  - (c) 用途の異なる使用場所、及び季節を限定して使用する場所への分岐部
- ii) 設置場所は、分岐部下流側付近とする。【推奨】

## 7) 業務用ガス遮断装置の選定

### ①業務用ガス遮断装置の選定

#### [遵守事項]

- i) 業務用ガス遮断装置は、手動又は都市ガス警報器のガス漏れ信号等でガスを速やかに確実に遮断することができる機能を有するものを選定する。【遵守】
- ii) 業務用ガス遮断装置は、(財)日本ガス機器検査境界の自主検査適合品を選定する。

#### 【遵守】

#### [関連条項]

- ・省令 第 52 条 (導管の設置場所) 第 2 項
- ・施行規則 第 108 条 (消費機器の技術上の基準) 第 10 号
- ・解釈例 第 118 条 (自動ガス遮断装置及びガス漏れ警報器)

### ②業務用ガス遮断装置の設置対象及び設置場所

#### [推奨事項]

- i) 業務用ガス遮断装置は、次のような場合に設置する。【推奨】
  - (a) フード等用簡易自動消化装置と連動してガス供給停止を行う場合
  - (b) 都市ガス警報器と連動してガス供給停止を行う場合
- ii) 業務用ガス遮断装置は、次の条件を満足する位置に設置する。【推奨】
  - (a) 作動状況を容易に識別できること
  - (b) 点検・操作が容易にできること
  - (c) ガスの使用場所ごと(店舗ごと等)にガスを遮断できること
- iii) ガスメータの下流側に設置する。【推奨】

#### [関連条項]

- ・省令 第 52 条 (導管の設置場所) 第 2 項
- ・施行規則 第 108 条 (消費機器の技術上の基準) 第 10 号
- ・解釈例 第 118 条 (自動ガス遮断装置及びガス漏れ警報器)
- ・平成 12 年通産省告示 第 578 号 (ガス漏れ警報器の規格及び設置方法を定める件)
- ・火災予防条例(例) 第 3 条の 2 (厨房設備)
- ・消防法施行規則 第 24 条の 2 の 3 (ガス漏れ火災警報設備に関する基準の細目)

## 8) 都市ガス警報器等

### [基本的な考え方]

ガス設備の安全対策は、ガスを漏洩させないことを基本としているが、同時に万一ガスの漏洩が発生した場合に、それを速やかに検知し事故を未然に防ぐ措置を講ずることが重要である。そのため法令に基づき、建物区分に応じた適切な都市ガス警報器等を適切な方法で設置する。ただし、法令上設置義務のない需要家にあっても、安全対策を推進することが望ましい。

### [関連条項]

- ・省令 第 52 条(導管の設置場所) 第 2 項
- ・施行規則 第 108 条(消費機器の技術上の基準) 第 8 号, 第 10 号
- ・昭和 56 年通産省告示 第 263 号(ガス漏れ警報設備の規格及びその設置方法を定める告示)
- ・平成 12 年通産省告示 第 578 号(ガス漏れ警報器の規格及びその設置方法を定める件)
- ・昭和 60 年通産省告示 第 461 号(ガスを使用する建物ごとの区分を定める件)
- ・消防法施行令 第 21 条の 2(ガス漏れ火災警報設備に関する基準)  
第 36 条の 2(消防設備士でなければ行ってはならない工事又は整備)
- ・消防法施行規則 第 24 条の 2 の 3(ガス漏れ火災警報設備に関する基準の細目)

### ①都市ガス警報器等の選定

#### [遵守事項]

- i) ガス漏れ警報設備のうち、検知器については、(財)日本ガス機器検査協会の自主検査認証品を、中継器、受信機については、日本消防検定境界の検定合格品を選定する。【遵守】
- ii) 都市ガス警報器は、(財)日本ガス機器検査協会の自主検査認証品を選定する。【遵守】
- iii) 自動ガス遮断装置は、(財)日本ガス機器検査協会の自主検査認証品を選定する。【遵守】

#### [関連条項]

- ・省令 第 52 条(導管の設置場所) 第 2 項
- ・解釈例 第 117 条(ガス漏れ警報設備)、第 118 条(自動ガス遮断装置及びガス漏れ警報器)
- ・昭和 56 年通産省告示 第 263 号(ガス漏れ警報設備の規格及びその設置方法を定める告示)

- ・平成 12 年通産省告示 第 578 号(ガス漏れ警報器の規格及びその設置方法を定める件)
- ・消防法施行令 第 21 条の 2(ガス漏れ火災警報設備に関する基準)  
第 37 条(検定対象機械器具等の範囲)
- ・消防法施行規則 第 24 条の 2 の 3(ガス漏れ火災警報設備に関する基準の細目)

## ②都市ガス警報器等の設置対象及び設置場所

### [遵守事項]

- i) 特定地下街等、特定地下室等には、ガス漏れ警報設備を設置する。なお、検知器は導管が外壁を貫通する付近及び燃焼機器が設置されている箇所の所定の位置に設置する。【遵守】
- ii) 超高層建物及び特定大規模建物には、都市ガス警報器又は自動ガス遮断装置のいずれかを次に従い設置する。【遵守】
  - (a) 超高層建物に都市ガス警報器を設置する場合は、燃焼機器のある箇所の所定の位置に設置する。ただし、住居用の部分については調理室に設置する。
  - (b) 特定大規模建物に都市ガス警報器を設置する場合は、特定業務用とのために使用されている燃焼機器が設置されている箇所の所定の位置に設置する。
  - (c) 自動ガス遮断装置を設置する場合は、作動状況を識別でき、点検・操作が容易な場所で、かつガス使用箇所へのガス遮断が適切に行える場所に設置する。

### [関連条項]

- ・省令 第 52 条(導管の設置場所) 第 2 項
- ・施行規則 第 108 条(消費機器の技術上の基準) 第 8 号, 第 10 号
- ・解釈例 第 117 条(ガス漏れ警報設備)、第 118 条(自動ガス遮断装置及びガス漏れ警報器)
- ・昭和 56 年通産省告示 第 263 号(ガス漏れ警報設備の規格及びその設置方法を定める告示)
- ・平成 12 年通産省告示 第 578 号(ガス漏れ警報器の規格及びその設置方法を定める件)
- ・昭和 60 年通産省告示 第 461 号(ガスを使用する建物ごとの区分を定める件)
- ・消防法施行令 第 21 条の 2 (ガス漏れ火災警報設備に関する基準)、  
第 36 条の 2 (消防設備士でなければ行ってはならない工事又は整備)
- ・消防法施行規則 第 24 条の 2 の 3 (ガス漏れ火災警報設備)

## 9) まとめ

建物内における水素配管を安全に設置するための技術基準検討の基礎資料とするため、

建物内水素配管からの漏出事例及び検知についての資料収集整理を行った。

一般燃料ガスの漏出事例及び検知に関する調査は、業界実務指針、自主基準を把握し、それを踏まえて実施した。

2000年から2010年までのガス漏出事事故事例を調査した結果、事故発生箇所としては、ガス機器と配管（特に、可とう管・フレキ管）との接続部が多く、事故原因としては、施工中・工事中・点検中における人為的なミスによる配管等の損傷が最も多かった。他にも、腐食・劣化等の自然発生的な配管の損傷に起因する事故も少なからずあった。

ガス漏出検知対策として、マイコンメータと付臭剤について調査した。マイコンメータによりガス供給が遮断されるガス流量は約180 l/minであり、通常の家での使用量を大幅に超えないとガス供給が遮断されず、多量のガスが建物内に漏出する可能性がある。

付臭剤は、いくつかの化学物質が用いられているが、いずれのものもガスの空気中の混合容積比率が容量1000分の1で臭いが確認できるものと規定されている。また、ガス漏出時の対策として、建物近傍に設置が予想されるガス遮断装置の種別ごとに機能や設置基準等を整理した。

## (2) 水素配管敷設に関する基準等の調査

中層規模の建物での一般燃料ガス配管設置に関するガス事業法令、通達、解釈例、その他関係法令、及び業界自主基準である、一般財団法人日本ガス機器検査協会「ガス機器の設置基準及び実務指針（前編）・（後編）・（追補版）」、および、一般社団法人日本ガス協会「供給管・内管指針（設計編）・（工事編）・（中圧設計・工事編）」、「中低圧ガス導管耐震設計指針」の中から、以下の各項目について、基本的な考え方、遵守の必要性に応じた遵守・勧告・推奨のグレードを記入した。

- ・配管経路・位置      ・貫通部      ・電気配線との離隔距離      ・配管支持
- ・ガスメータ      ・ガス遮断装置

ここで、基本的な考え方、遵守の必要性に応じた遵守・勧告・推奨のグレード、関連条項の定義は以下のとおりである。

**基本的な考え方：**各項目において規定する内容について、法令の遵守・品質及び保安の確保を図る上で常に心がけるべき“基本的な考え方”を示す。

**遵守・勧告・推奨グレード：**上記“基本的な考え方”に沿った具体的な設計・施行方法について記述し、その遵守の必要性に応じて、以下のように分類する。

**遵守事項：**ガス事業法令、通達、解釈例、その他関係法令に規定されている事項、及び委員会が保安上必要であると判断された事項で、最低限守らなければならない絶対厳守事項。

**勧告事項：**ガス事業法令、通達、解釈例、その他関係法令に規定されていないが、委員会が保安上配慮を要すると判断した事項で、本来遵守事項として遵守義務を期待するものであるが、例外としてある程度の応用動作が認められても良い事項。

**推奨事項：**ガス事業法令、通達、解釈例、その他関係法令に規定されていないが、保安上、美観上、経済上、あるいはその他の観点から推奨する事項で、作業する場合に守ることが望ましい事項。

**関連条項：**「基本的な考え方」、及び「遵守事項」の内容の拠り所となるガス事業法令、通達、解釈例、その他関係法令、及び「勧告事項」、「推奨事項」の内容に関連性を有するガス事業法令、通達、解釈例、その他関係法令等を記述する。



## 1) 配管経路・位置

### [基本的な考え方]

配管経路・位置は、安全性、施工性、将来計画、建築設備との調和、経済性、及び維持管理の容易性等を考慮し決定する。

配管・位置については、以下の遵守・勧告・推奨事項が確認された。

配管をしてはならない場所【遵守】

配管を避ける場所【勧告】・【推奨】

## ①屋内配管

### [遵守事項]

- i) 他設備との間には必要な離隔距離を確保する。【遵守】
- ii) 建物の床下露出部に配管する場合は、塗覆装を講ずる。【遵守】
- iii) 被覆鋼管の場合、管材料の使用温度を超える熱の影響を受けるおそれのある場所に配管してはならない。【遵守】
- iv) 電線、電気開閉器、その他電気設備を施設しているパイプシャフト内又はピット内、その他漏れたガスが滞留するおそれのある場所に配管する場合は、換気口を設けるか、電気設備に防爆工事等の安全措置を講ずる。【遵守】

### [勧告事項及び推奨事項]

- i) 屋内配管をパイプシャフト内、ピット内、天井裏及び床下等隠ぺい部に配管する場合で、特別な維持管理が必要な箇所には、点検口を設ける。【勧告】
- ii) 漏れたガス等が滞留するおそれのあるパイプシャフト内、ピット内等の隠ぺい部に配管を行う場合は、点検口を設ける。【勧告】
- iii) フレキ管で配管する場合、管が釘打ち等によって損傷するおそれのある箇所には、防護板等により防護措置を講ずる。【勧告】
- iv) 建物の柱、梁等と平行に配管する。【推奨】
- v) 共用配管は、建物の共用部分に配管する。【推奨】

### [関連条項]

- ・省令 第 47 条(防食措置)
- ・解釈例 第 103 条(防食措置)
- ・火災予防条例(例) 第 3 条 (炉) 18 号の 3

## ②露出部における特殊箇所

- i) 建物のエキスパンションジョイント部を通過する配管【遵守】・【勧告】・【推奨】
- ii) 免震構造建物の免震層を通過する配管【遵守】・【勧告】・【推奨】
- iii) 高温の影響を受ける場所への配管【遵守】
- iv) 配管のたわみ性による吸収(ループ配管)【遵守】

## 2) 配管材料と接合方法

### [基本的な考え方]

材料及び接合方法は、設置環境、施工性、耐震性、維持管理及び経済性について十分考慮し決定する。

### [遵守事項]

- i) 配管材料は、最高使用温度及び最低使用温度において材料に及ぼす化学的及び物理的影響に対し、設備の種類、規模に応じて安全な器秋の性質を有するものでなければならない。【遵守】
- ii) 配管の接合部は、使用中の荷重並びに最高使用温度及び最低使用温度における最高使用圧力に対し、適切な構造でなければならない。【遵守】

### [関連条項]

- ・省令 第 14 条(材料)、第 15 条(構造等)、第 16 条(溶接部分)
- ・解釈例 第 12 条(材料)、第 14 条(導管等の材料)、第 18 条(構造)、第 41 条(導管の構造) 第 2 項、第 3 項、第 52 条(溶接一般)

## 3) 配管の分岐方法の種類と選定

### [基本的な考え方]

既設配管からの分岐取出しは、ガスを遮断して行うことを最優先とし、元管の管種・管径及び分岐管径に応じた適切な分岐方法を選定する。

### ①配管の分岐方法

#### [遵守事項]

- i) 供給管の分岐部は、使用中の荷重並びに最高使用温度及び最低使用温度における最高使用圧力に対し、適切な構造でなければならない。【遵守】

#### [関連条項]

- ・省令 第 15 条 (構造等)、第 16 条 (溶接部分)
- ・解釈例 第 18 条 (構造)、第 41 条 (導管の構造)、第 52 条 (溶接一般)

### ②内管の分岐

#### [遵守事項]

- i) 内管の分岐部は、使用中の荷重並びに最高使用温度及び最低使用温度における最高使用圧力に対し、適切な構造でなければならない。【遵守】

#### [勧告事項]

- i) 露出内管の場合は、プラグ止め等の箇所が適切な位置にあるときは当該場所から取り出すこととし、プラグ止め等の箇所が適切な箇所でない場合は、直管部から管種、

施工条件などを考慮して取り出すこと。【勧告】

**[関連条項]**

- ・省令 第 15 条(構造等)
- ・解釈例 第 18 条(構造)、第 41 条(導管の構造)

4) 貫通部

**[基本的な考え方]**

- i) 建物を貫通する配管は、建物構造物の耐力上支障を生じないように貫通するとともに、法令に定められた方法で確実に施工する。
- ii) 建物の外壁を貫通する配管は、地盤沈下や地震等の際に埋設管にかかる応力を屋内側配管に伝えないため、貫通部において建物に堅固に固定する。

**[遵守事項]**

- i) 貫通部の配管には、塗覆装を施す。【遵守】
- ii) 防火区画を貫通する場合には、その間隙をモルタル等の不燃材料で埋めるものとする。ただし、上記区画のうち、共住区画の貫通については、消防法で定められた工法で施工する。【遵守】
- iii) 消防法施行令第 8 条に規定する区画は、配管を貫通させてはならない。【遵守】

**[勧告事項及び推奨事項]**

- i) 建物外壁、梁等のコンクリート貫通部内には、配管の接合部を設けない。【勧告】
- ii) 防水処理を施す部分を貫通する場合には、建築関係者と協議する。【推奨】
- iii) コンクリート躯体貫通部には、コンクリート打設前にスリーブを挿入する。【推奨】

**[関連条項]**

- ・建築基準法施行令 第 112 条(防水区画)第 15 項、第 129 条の 2 の 5 (給水、排水その他の配管設備の設置及び構造)第 1 項第 7 号
- ・消防法施行令 第 8 条 (通則) 、第 29 条の 4 (必要とされる防火安全性能を有する消防の用に供する設備等に関する基準)
- ・総務省令 第 40 号 (特定共同住宅等における必要とされる防火安全性能を有する消防の用に供する設備等に関する省令)
- ・消防庁予防課通知 平成 7 年消防予第 53 号「令 8 区画及び共住区画の構造並びに当該区画を貫通する配管等の取扱いについて」
- ・消防庁告示 第 2 号「特定共同住宅等の位置、構造及び設備を定める件」、第 3 号「特定共同住宅等の構造類型を定める件」

なお、「特定共同住宅等における必要とされる防火安全性能を有する消防の用に供する設備等に関する省令」では、建物構造、二方向避難、開放性等の一定条件を満たす防火対象

物を「特定共同住宅等」と定めている。

#### 5) 配管支持

##### [基本的な考え方]

配管は自重、地震及び熱伸縮等の影響を考慮して、適切な箇所を支持材により支持しなければならない。

##### ①立て配管

##### [基本的な考え方]

立て配管の支持箇所は、建築物及び配管の状況に応じて、自重・地震荷重及び地震時の層間変位などを考慮し、決定する。

##### [勧告事項]

##### i) 立て配管の自重支持

立て配管の自重支持は、配管の自重を考慮した適切な場所に設置する。【勧告】

##### ii) 立て配管の地震支持

立て配管は、地震による管軸直角方向の過大な変形を抑制し、かつ建物の層間変位に追従するように耐震支持を行う。【勧告】

##### [関連条項]

- ・省令 第 15 条 (構造等)
- ・解釈例 第 46 条 (導管の支持) 第 2 項
- ・建築基準法 第 36 条 (この章の規定を実施し、又は補足するため必要な技術的基準)
- ・建築基準法施行令 第 129 条の 2 の 4 (建築設備の構造強度) 第 2 号、  
第 129 条の 2 の 5 (給水、排水その他配管設備の設置及び構造)
- ・平成 12 年建設省告示 第 1388 号 (建築設備の構造耐力上安全な構造方法を定める件)  
第 4 第 4 項

##### ②特定箇所

##### [勧告事項]

i) ガスメータ、バルブ等の重量物を設置する場合の支持箇所は、その重量や取替え作業を考慮して決定する。【勧告】

ii) ガスメータ、バルブ等を懸垂設置する場合には、ガスメータ及びバルブ近傍の配管を建物外壁等に支持する。【勧告】

##### [関連条項]

- ・省令 第 15 条 (構造等)
- ・解釈例 第 46 条 (導管の支持) 第 2 項
- ・建築基準法 第 36 条 (この章の規定を実施し、又は補足するため必要な技術的基準)
- ・建築基準法施行令 第 129 条の 2 の 4 (建築設備の構造強度) 第 2 号、

第 129 条の 2 の 5 (給水、排水その他配管設備の設置及び構造)

- ・平成 12 年建設省告示 第 1388 号 (建築設備の構造耐力上安全な構造方法を定める件)  
第 4 第 4 項

6) 電気配線

**[遵守事項]**

- i) 配管と電灯線、電気機器のアース及びその他電気工作物では、離隔距離が必要である(がいし引き工事: 10cm 以上(低圧・絶縁電線)、30cm 以上(低圧・裸電線)、15cm 以上(高圧・絶縁電線)、30cm 以上(高圧・裸電線)、ケーブル工事: 接触しないこと(低圧)、30cm 以上(高圧))。ただし、がいし引き工事又はケーブル工事において、やむを得ず規定の離隔距離が確保できない場合は配管に硬質ビニル管等により絶縁措置を施す。【遵守】

**[関連条項]**

- ・電気設備に関する技術基準を定める省令

第 29 条 (電線による他の工作物等への危険の防止)、

第 30 条 (地中電線等による他の電線及び工作物への危険の防止)、

第 59 条 (電気使用場所に施設する電気機械器具の感電、火災等の防止)、

第 62 条 (配線による他の配線等又は工作物への危険の防止) 第 2 項

- ・電気設備の技術基準の解釈

第 92 条、94 条、139 条、189 条、199 条、202 条、204 条、205 条、  
207 条、208 条、211 条、228 条、229 条、237 条

7) ガスメータ

**[基本的な考え方]**

ガスメータは、適正な計量を行うために、供給ガスの種類、圧力、流量及び使用形態に適合したものを選定し、適切な方法で設置しなければならない。

**①ガスメータの種類と選定**

**[遵守事項]**

- i) 取引用のガスメータは、計量法に定める計量器の検定検査に合格したものでなければならない。ただし、適用除外を受けたものはこの限りではない。【遵守】
- ii) 使用最大流量が 16m<sup>3</sup>/h 以下のガスメータ(4kPa 以下及び口径 250mm 以下のものに限る)は、省令に適合したマイコンメータを設置する。ただし、設置除外要件に該当する場合はこの限りではない。【遵守】
- iii) ガスメータは、設計流量を通過させ得る計量能力を有する最小の Q<sub>max</sub> のものを選

定する。【遵守】

**[勧告・推奨事項]**

- i) 膜式メータを並列設置する場合（ガスメータの2次側で配管が再度合流する設置方式）は同形式のガスメータを使用し、マイコンメータを用いない。【勧告】
- ii) 住宅用の小計量の計量には膜式メータ等を、工業用等の大流量の計量には回転子式メータ等を用いる。【推奨】

**[関連条項]**

- ・計量法 第2条(定義等)、第16条(使用の制限)、第18条(使用方法等の制限)、第71条(検定の合格条件)、第72条(検定認証)
- ・計量法施行令 第2条(特定計量器)、第5条(使用の制限の特定に係る特定計量器)、第18条(検定認証等の有効期間のある特定計量器)
- ・省令 第50条(ガス遮断機能を有するガスメータ)、第51条(漏洩検査)
- ・解釈例 第112条 (ガス遮断機能を有するガスメータの機能)、  
第113条 (漏洩検査等の方法)、  
第114条 (漏洩検知装置の規格及びその設置方法)、  
第118条 (自動ガス遮断装置及びガス漏れ警報器)

**②ガスメータの設置**

**[遵守事項]**

- i) ガスメータは、1需要家につき1個設置する。【遵守】
- ii) ガスメータは水平に設置する。【遵守】
- iii) ガスメータの設置場所は、検針、維持管理の容易な場所とする。【遵守】
- iv) ガスメータに悪影響を及ぼすおそれのある場所には設置しない。【遵守】
- v) 電気設備との離隔距離については、「電気設備に関する技術上の基準を定める省令」「電気設備に関する技術基準の解釈」及び自治体の「火災予防条例」による。【遵守】
- vi) 電線、電気開閉器、その他の電気設備が施設してあるパイプシャフト内、又はピット内その他漏れたガスが滞留するおそれのある場所にガスメータを設置する場合は、換気口を設けるか、電気設備に防爆工事等の安全措置を講ずる。【遵守】

**[勧告事項]**

- i) 膜式メータを懸垂設置する場合は建物等に配管支持を行う。また、据置設置する場合は十分な強度の台上に設置する。【勧告】
- ii) 回転子式メータを設置する場合には、メータ本体に応力が加わらないよう前後の配管支持を確実にを行う。【勧告】
- iii) 積雪地及び寒冷地域では、雪や凍結に対する防護措置を講ずる。【勧告】

iv) 回転子メータは、器具ガバナを有しないボイラー等大流量燃焼機器の直前には設置しない。【勧告】

#### [関連条項]

- ・電気設備に関する技術基準を定める省令 第10条、11条、56条、57条、58条、59条、62条、63条、66条、67条、72条、73条
- ・電気設備に関する技術基準の解釈 第178条、187条
- ・建築基準法施行令（避難階段及び特別避難階段の構造）
- ・火災予防条例(例)（炉）14号のイ

パイプシャフト内に設置する場合の上部換気口及び下部換気口は、下記の条件を満たす必要がある。

上部換気口：有効開口面積 100cm<sup>2</sup>以上

下部換気口：有効開口面積 100cm<sup>2</sup>以上

鋼製の扉等：板厚 $\geq$ 0.8mm

地震対策上、以下のように規定している自治体もある。

- ・上下の開口部の面積は、各々パイプシャフト正面の面積の5%又は500cm<sup>2</sup>の大きいほうとする。
- ・パイプシャフト上部に排気だまり防止の通気口が必要となる場合がある。

#### ③ガスメータの付属設置

- i) メータガス栓は、ガスメータ上流側のガスメータ近傍で、操作しやすいところに取り付ける。【遵守】

#### 8) 検査

##### [基本的な考え方]

工事中の適切な時期及び工事完了後に、適切な検査を行い、関連法規、本指針、設計図書等との適合性を確認するとともに、検査が適正に行われたことを確認し、安全性と利便性を確保する。

#### 9) 気密試験

##### [遵守事項]

- i) ガスを通ずる部分は、最高使用圧力以上の圧力で圧力保持による気密試験を行い、漏洩がないことを確認する。ただし、取出部近傍の接合箇所等は、試験圧力を通ずるガスの圧力とすることができる。【遵守】

ii) 気密試験に合格したものでなければ、供給を開始してはならない。【遵守】

**[関連条項]**

- ・省令 第 15 条 (構造等) 第 3 項
- ・解釈例 第 51 条 (気密試験)

**①圧力保持による気密試験・試験方法**

**[遵守事項]**

i) 圧力保持による気密試験は、圧力測定器具、被試験部分の容積及び最高使用圧力に応じて規定された保持時間以上圧力を保持し、試験の始めと終わりの測定圧力差の有無を確認する方法により行う。【遵守】

**②圧力保持による気密試験・判定及び記録**

**[遵守事項]**

i) 気密試験の開始時と終了時の測定圧力差が圧力測定器具の許容誤差内にある場合、合格とする。【遵守】

ii) 気密試験に不合格となった場合は、不合格箇所を補修し、再度気密試験を行う。【遵守】

iii) 気密試験の結果を記録する。【遵守】

**③発泡液による気密試験・試験方法**

**[遵守事項]**

i) 発泡液による気密試験は、発泡液を継手部に塗布し、泡が認められるか否かを確認することにより行う。【遵守】

ii) 発泡液による気密試験は、露出している部分に限って行う。【遵守】



#### ④発泡液による気密試験・判定及び記録

##### [遵守事項]

- i) 発泡液による気密試験を行い、泡が認められない場合、合格とする。【遵守】
- ii) 気密試験に不合格となった場合は、不合格箇所を補修し、再度気密試験を行う。【遵守】
- iii) 気密試験の結果を記録する。【遵守】

#### ⑤ガス検知器による気密試験・試験方法

##### [遵守事項]

- i) ガス検知器による気密試験は、ガスの濃度が 0.2%以下で作動するガス検知器を使用し、ガス検知器が作動しないことを確認することにより行う。【遵守】

#### ⑥ガス検知器による気密試験・判定及び記録

##### [遵守事項]

- i) ガス検知器が作動しない場合、合格とする。【遵守】
- ii) 埋設された供給管・内管にあつては、試験のためにガスを封入して 12 時間経過した後判定を行う。【遵守】
- iii) 気密試験に不合格となった場合は、不合格箇所を補修し、再度気密試験を行う。【遵守】
- iv) 気密試験の結果を記録する。【遵守】

## 10) まとめ

一般燃料ガス配管の設置基準を調査した結果、配管は、安全性、施工性、将来計画、建築設備との調和、経済性、及び維持管理の容易性等を考慮して、経路や材料選定等を決定するとともに、地震による応力を建物内管に伝達しないような支持を設けている。しかし、火災による熱に対しては、防火区画貫通時の埋め戻しや消防法施行令第8条に規定する区画の貫通禁止が示されているのみであり、熱による損傷に対する配慮は地震と比べて小さい。また、ガス漏洩に対する方策として、接合方法や材料選定の他に、ガスメータによる検知、気密試験による配管劣化の早期発見、電気設備の防爆処理等が実施されている。

### (3) 国内における水素等配管等の材料・施工コスト

国内における水素等配管及び配管付属品の材料・施工に係るコストについては、低圧は現在のガス管を設置する前提として配管等の材工コストを調査した結果を報告する。

#### 1) 調査方法

一般財団法人 建設物価調査会が調査し発行している価格情報掲載雑誌「建設物価（通称：物価本）」<sup>3)</sup>および同 Web 版の平成 23 年 2 月現在の掲載されているコスト、およびメーカーのカタログに記載の設計単価を調査した。

材料についてはメーカー設計単価もしくは東京における小口価格とし、施工コストについては、ガス会社が専門に業者に依頼する価格が単価にし辛い特殊な契約となっているため、類似の施工・検査を行う水道工事の価格を掲載することにより、今後の一般的な価格設定の参考とした。

#### 2) 材料コスト

材料コストは、ステンレスパイプの場合、樹脂（ポリエチレンパイプ）の場合、および鋼管の場合の材料コストをそれぞれ示した。調査対象は、直管の黒ガス管、白ガス管を対象にした。

例えば 25A の管径の配管を想定した場合、ステンレスパイプのフレキシブル管は 1m あたり 2073 円（税抜き）に対し、樹脂（ポリエチレンパイプ）のコイル管の場合は約 1/5（416 円）、直管の場合は約 2/11（379 円）、黒ガス管の直管は約 4/5（1643 円）、白ガス管の直管は約同価（2095 円）となっている。

#### 3) 施工コスト

施工コストは、建設物価調査会の「建設物価」平成 23 年 3 月号<sup>3)</sup>に記載のコスト、および大阪ガス株式会社が公表している木質系建物およびコンクリート系建物への施工単価表を参照してまとめた。ただし、施工コストについては、ガスの場合、専用契約となっており、建築物価調査会資料でもその旨特記されていることから汎用性がないため、類似の施工工程および検査を行う水道管を代替施工コストとしてまとめた。この点は現在実施例が少ないため、今後の標準コスト算定の場合に再査定を要する。

例えば、25A の管径の配管を想定した場合、鋼管（溶接接合）1 m あたり 2310 円に対して、鋼管（ネジ接合）は溶接接合の約 7/8（2020 円）、ポリ塩化ビニル管（冷間接着接合）は鋼管（溶接接合）の約 1/2（1210 円）となっている。

## 2.2.3 水素漏出時の建物内および周辺での水素蓄積性状及び対策の検討

### (1) 目的

建物のパイプシャフト内に敷設されたガス配管から水素ガスが漏洩した場合を想定し、隣接する廊下での拡散性状をもとにした漏洩検知対策を検討することを目的として、数値計算及び実験による検討を行う。検討を行う前に、既存建物のパイプシャフトの寸法や利用状況について調査を行い、検討の条件を整理する。

### (2) 検討項目

水素は濃度 4～75Vol%で爆発するが、爆発エネルギーは非常に大きく、爆発による被害の程度を建築物あるいは設備により制御することは困難である。そのため、早期検知による供給遮断及び火気使用制限が最も効果的な爆発防止策であるといえる。

本章では、水素の漏洩開始から検知までの時間を求めること、並びに検知方策に要求される仕様を決定することを目的とし、パイプシャフト内での水素漏洩時における水素の拡散性状について検討する。

### (3) 水素漏洩シナリオ

現在、建物内における水素需要に関しては、直接水素を燃焼させる機器の使用ではなく、燃料電池による発電が主用途として想定されている。燃料電池は屋外又はベランダ等の屋外と同等と見なせる空間に置かれることが予想されるので、燃料電池と水素配管との接続部から水素が漏洩したとしても、外気風等により拡散が早いこと、スラブ下等に蓄積したとしても着火源がないことから爆発の危険性は小さいと思われる。従って、爆発の危険が最も高いのは建物内を通る燃料電池までの配管からの漏洩であり、特に横引き配管との分岐があるパイプシャフト内であると推測される。

シャフト内で水素が漏洩する場合、過去の一般燃料ガスの事故事例の調査結果より、継ぎ手や分岐が脱落し、多量のガスが漏れることは想定しづらく、何かしらの原因で亀裂やピンホール等の微小な空隙から漏洩するものと考えられる。

建物内配管を通じた水素需要がある用途としては、所有区分ごとに燃料電池が設置され、ある程度の熱（温水）を使用するものが考えられ、事務所及び共同住宅が当てはまる。事務所での主な熱（温水）の利用はほとんど空調であり、事務所の電力需要に併せて発生する熱（温水）に比べて僅かであるため、熱の無駄が生じる。一方、共同住宅では熱（温水）は炊事や入浴にも効率的に利用され、事務所と比較して普及が早まることが予想される。

そこで、共同住宅における水素漏洩時の検知時間について検討するものとし、調査結果を受けて、漏洩開始からガス供給遮断に至るまでのシナリオとして以下のものが考えられる。

### 【配管からの漏洩】

配管からのガス漏洩事故事例をみると、接続部や継ぎ手に亀裂が発生することによる漏洩が大半を占める。配管そのものが脱落するような事故はなく、ピンホール等の微小な亀裂からの漏洩に対して何らかの方策を検討することが妥当である。実際に発生する亀裂の大きさは不明ではあるが、漏洩流量を大きく見積もるため、通常の亀裂よりも面積が大きい  $\phi 5\text{mm}$  の孔が縦配管に生じるものとしてシャフト内及びシャフトに面する廊下での水素拡散性状を検討する。

漏洩の可能性が比較的高い接続部はシャフト内のメータや機器の近くに設けられることが予想される。しかし、配管継ぎ手が設けられる箇所は予想しづらい。シャフト内及び外部空間での漏洩性状を把握することが目的であるので、シャフト外への水素の流出開始時間が最も長くなる条件として、床上 400mm の配管に孔を想定する（床レベルで吹き出すものとする、シャフト扉の下スリットから流出する可能性が高いため）。ただし、床上 400mm からの漏洩でも下スリットから廊下に漏出する場合には、床上 1000mm に漏出箇所を設定する。また、参考として、天井 400mm に孔が発生した場合の比較も行う。

一般建物内のガス配管内圧力は、ガス事業法により 1~2.5kPa と定められている。水素は都市ガスと比べ保有する熱量が低く、都市ガスが水素に置き換わった場合には電力による補完が必要ではあるが、現状のガス事業法の範囲内で運用されるという前提のもと、最大で 2.5kPa の管内圧力を想定した漏洩性状を検討する。

### 【覚知・供給遮断】

覚知から供給遮断に至るまでのシナリオとしては以下のものが考えられる。

#### 1) マイコンメータによる過剰流量（約 180 l/min）検知後、自動遮断

配管の接続部や継ぎ手においては大きな亀裂や脱落が考えにくく、また、マイコンメータにより早期に供給遮断されるため、このシナリオが発生する確率はごく小さいものと考えられる。従って、このシナリオの検討は除外する。

#### 2) 人による検知後、人による供給遮断

パイプシャフト内で漏洩したガスがスリットや隙間を通じて外部空間に漏れ出し、添加された付臭剤により人が検知するシナリオである。従って、パイプシャフト内での漏洩性状に加え、廊下等の外部空間でのガス流動性状を検討する必要がある。

#### 3) センサーによる検知後、人による供給遮断

パイプシャフト内での漏洩性状は上記 2) と同様である。しかし、付臭剤の水素への追従性が不明であること、水素はパイプシャフト内で検知することが望ましい。従って、パイプシャフト内のガス濃度から検知を判断し、人為的な供給遮断がなされるまでの時間で

の拡散性状を検討する。

#### (4) 検討方法

建物内での水素拡散性状を検討するため、非定常 3 次元流体数値解析を行う。計算条件には、一般燃料ガス・水素供給における事故事例調査の結果を反映し、既存建物における一般燃料ガス配管設置状況の調査を行って、時間ごとの水素の拡散範囲及び水素濃度を計算することにより、漏洩検知時間及び検知方策の妥当性の検討を行う。

##### 1) 既存建物における一般燃料ガス配管設置状況の調査

水素配管が将来敷設される可能性のあるシャフトやピット等の典型的な空間の形状及び配管の敷設方法を既存建物において調査するものとした。中層規模の共同住宅及びテナント型事務所ビルをそれぞれ 5 棟選定し調査を行った。建物の選定は、大阪ガス株式会社からの紹介により、築年数・階数・床面積に応じて、調査を行った。

調査にあたっては中層規模の建物での一般燃料ガス配管設置に関する実務指針等を確認した上で、配管シャフト等の形状や配管敷設の実態を調査した。

###### 【現地調査の項目】

- ・配管シャフト等の形状や配管敷設の実態
- ・内部にあるガス配管以外の配管（水道管・排水管等）の管径と配置
- ・その他障害物の有無
- ・換気の状態（換気口の配置、大きさ等）

共同住宅及びテナント型事務所ビルについて、以下に示す項目の現地調査を行った。

###### 【調査項目 一覧】

建物概要：所在地・階数・築年数・延べ床面積

シャフト：シャフト空間寸法（幅・高さ・奥行き）

換気の状態（開口の状態）

配管：管径・配置・種別

内容物：給湯器・ガスメータ・水道メータ・電力メータ etc

各部の写真

###### 【調査方法】

建物選択方法：共同住宅は、社宅の専有部 4 件及び分譲引渡し前の物件を、テナント型事務所ビルについては、大阪ガス株式会社の紹介による、京都・大阪の物件を調査した。

###### 【調査結果】

調査結果の概略を表 2.2 に示す。

テナント型事務所ビルの場合、ガス配管はシャフトの奥に位置していることが多かった。これは、敷設後は、ほとんどメンテナンスの必要が無いためのことであった。階によって管の分岐部・繋ぎ部が設けられていた。

シャフト内に強制換気の機構は無く、入口にも開口部(換気口)は設けられておらず、ほとんど無風状態であった。施設の設備に依存した給水・温水配管が多数設けられていた。

共同住宅の場合、ガス配管は、シャフト内の左右どちらかに位置しており、分岐部からメータガス栓・ガスメータへと繋がり、給湯器及び室内のガスコンロ・ガスコンセントに繋がる配管が設けられていた。点検扉の上部及び下部に開口部が設けられており、その面積は各々100cm<sup>2</sup>となっていた。内容物としては、給湯器・メータ類(ガス・水道・電気)・配管(ガス・水道・汚水)があった。

表 2.2(1) 既存建物における一般燃料ガス配管設置状況の調査 実例(1/2)

(事務所ビル)

No	所在地	階数	築年数	延床面積 [m <sup>2</sup> ]	外形 [m]			開口		換気 設備	内容物	給湯器	メータ ガス・水 道・電力
					幅	高さ	奥行	上部	下部				
1	大阪	15	15	不明	1.8	4.0	4.0	無し	無し	自然換 気口 100φ	温水管(170A) 高温水管(200A) 冷水管(270A) ガス配管(150A⇒100A)	無し	無し
2	大阪	8	44	不明	1.5	全階 通し	3.0	無し	無し	無し	水道管(80A) 下水道管(175A) 汚水通気管(120A) ガス配管(100A)	無し	無し
3	大阪	13	7	不明	4.0	3.9	0.7	無し	無し	無し	冷却水管(200A) 膨張管(150A) 冷水管(150A) 水道管(100A) ガス配管(80A)	無し	無し
4	京都	7	1	24,011	3.5	3.5	4.3	無し	無し	無し	給水管(160A) 排水管(120A) 通気管(100A) ガス配管(160A)	無し	無し
					1.6	3.5	2.8	無し	無し	無し	給水管(120A) 排水管(120A) 通気管(130A) ガス配管(150A)	無し	無し
5	京都	4	9	8,095	2.8	3.5	2.0	無し	無し	無し	給水管(120A) 汚水管(120A) 温水管(150A) 冷水管(240A) ガス配管(60A)	無し	無し



表 2.2 (2) 既存建物における一般燃料ガス配管設置状況の調査 実例 (2/2)

(共同住宅)

No	所在地	階数	築年数	延床面積 [m <sup>2</sup> ]	外形 [m]			開口 [cm <sup>2</sup> ]		内容物	給湯器	メータ ガス・水 道・電力	
					幅	高さ	奥行	換気 設備	上部				下部
1	兵庫	5	3	2,941	1.7	1.9	0.4	無し	100	100	給水管(50A) 温水管(150A) ガス配管(30A)	PS 設置 前方排気型	有り
2	兵庫	20	6	不明	1.2	2.0	0.6	無し	200	200	給水管(55A) ガス配管(50A)	PS 設置 上方排気型	有り
3	兵庫	25	0	29,667	1.7	2.9	0.7	無し	120	120	給水管(100A) 汚水管(80A) ガス配管(50A)	無し ペラントダ設置	有り
4	京都	1	14	不明	0.7	1.8	0.7	無し	145	190	給水管(60A) 汚水管(65A) ガス配管(55A)	PS 設置 前方排気型	有り
5	大阪	5	不明	不明	0.6	1.9	0.8	無し	125	116	給水管(50A) ガス配管(50A)	PS 設置 上方排気型	有り

## 2) 計算モデル

水素の漏出箇所、漏出条件による影響を調べるため、数値計算を実施した。標準となる計算モデルについては、以下の解析条件を設定した。

### i) 空間形状・空間メッシュ

空間メッシュは 100 万程度を基本条件とし、計算精度確認のための細分化メッシュでの計算を数ケース実施した。

### ii) 配管経路・位置

### iii) 配管口径

### iv) ガス栓と接続具

### v) 接合方法

上記計算モデルを用いて、水素の漏出箇所、漏出条件を計算パラメータとする。シミュレーション結果の出力形式としては、特定断面での風速ベクトル分布および漏出ガス濃度コンターとする。

本解析においては、水素の局所的な非定常の濃度分布を求めることではなく、系全体での拡散状況を求めることを主目的としている。乱流の効果を、代表する量（乱流エネルギー  $k$  と乱流消失率  $\varepsilon$ ）を用いて表す標準  $k-\varepsilon$  モデルは、適用例も多く、実用的な計算時間で解が得られることから、標準  $k-\varepsilon$  モデルを使用するものとした。

解析に使用するソフトウェアは、汎用 3 次元流体解析ソフトウェア「STREAM」（株式会社ソフトウェアクレイドル製）とした。「STREAM」では乱流モデルに標準  $k-\varepsilon$  モデルを採用し、流体質量の保存、流体運動量の保存、流体・固体のエネルギーの保存、並びに乱流エネルギーと乱流消失率の移流拡散・生成消滅に関する方程式を連立して解くことで、空間内の流体解析を行っている。

これらの方程式を次に示す。

$$\text{質量の保存式} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i = 0 \quad (2.1)$$

$$\text{運動量の保存式} \quad \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2.2)$$

( $i=1\sim 3$ )

$$\text{エネルギーの保存式} \quad \frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho H}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u_i p}{\partial x_i} + \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} K \frac{\partial T}{\partial x_j} + \dot{q} \quad (2.3)$$

$$\text{乱流エネルギー} \quad \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_s - G_{s1} - G_{s2} - G_{s3} - \rho \varepsilon \quad (2.4)$$

乱流消失率の式

$$\text{(k-ε方程式)} \quad \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_s - G_{s1} - G_{s2} - G_{s3}) - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (2.5)$$

$$G_s = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$G_{s1} = \frac{2}{3} \rho k D$$

$$G_{s2} = \frac{2}{3} \mu_t D^2$$

$$G_{s3} = \frac{1}{\rho^2} \frac{\mu_t}{P_{rt}} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \frac{\partial p}{\partial x_i}$$

$$D = \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$

拡散物質の保存式 
$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho C}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \rho D_m \frac{\partial C}{\partial x_j} + \rho \dot{d} \quad (2.6)$$

状態方程式 
$$p = \rho RT \quad (2.7)$$

これらの式に現れる変数の意味は以下のとおりである。なお、式中の添字には Einstein の総和規則が適用される。

$X_i$ :	位置座標	[m]	$k$ :	乱流エネルギー	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$U_i$ :	$X_i$ 方向の流体速度	[m/s]	$\varepsilon$ :	乱流消失率	[m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$t$ :	時間	[s]	$C$ :	拡散物質の濃度	[-]
$\rho$ :	流体又は固体の密度	[kg/m <sup>3</sup> ]	$D_m$ :	拡散係数	[m <sup>2</sup> /s]
$p$ :	流体の圧力	[N/m <sup>2</sup> ]		(H <sub>2</sub> : 6.670 × 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s)	
$\mu$ :	粘性係数 (=1.853 × 10 <sup>-5</sup> )	[Pa · S]		(13A : 1.710 × 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s)	
$\sigma_{ij}$ :	応力テンソル	[Pa · S]	$\dot{d}$ :	拡散物質の発生項	[1/s]
	$= \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \left( p + \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \sigma_{ij}$		$R$ :	ガス定数	[J/(kg · K)]
$H$ :	比エンタルピー	[J/kg]			
$g_i$ :	加速度	[m/s <sup>2</sup> ]			
$\beta$ :	体膨張率	[1/K]			
$T$ :	流体又は固体の温度	[K]			
$T_0$ :	流体の基準温度 (=298)	[K]			
$C_p$ :	定圧比熱 (=1007)	[J/(kg · K)]			
$K$ :	熱伝導率 (=0.02599)	[J/(m · s · K)]			
$\dot{q}$ :	発熱量	[J/(m <sup>3</sup> · s)]			

### 3) 計算条件

解析対象は集合住宅のパイプシャフトを想定した矩形空間及びパイプシャフトに隣接する廊下空間とした。パイプシャフト内については、1,200 (W) x 600 (D) x 3,000 (H)の空間とした。また、廊下は 20,000 (W) x 1,700 (D) x 2,500 (H)を想定したが、パイプシャフト内でのみの解析時には計算時間短縮のため、奥行き 1m・幅 1.4m (シャフト扉と同じ幅)の領域のみを計算対象とした。

パイプシャフト内には給湯器、ガスメータ、水道メータ、ガス配管、水道配管を配置するものとした。これらの設備の表面温度は常温 (25℃) とし、それぞれの寸法は下記の通りである。

給湯器 : 470 (W) x 250 (D) x 600 (H)

ガスメータ : 195 (W) x 156 (D) x 324 (H)

水道メータ : 50(R) x 100(H)

水道管 : 50(φ)

ガス管 : 50(φ)

パイプシャフト内と外部との空気の出入りは、上部スリット・下部スリット (500 (W) x 20 (H)の開口が上下2つずつ) の2箇所とする。廊下における自然風の風速は 0.1m/s を設定するものとする。

パイプシャフト内の解析時の計算領域を図 2.2 に、廊下での解析時の計算領域を図 2.3 に示す。

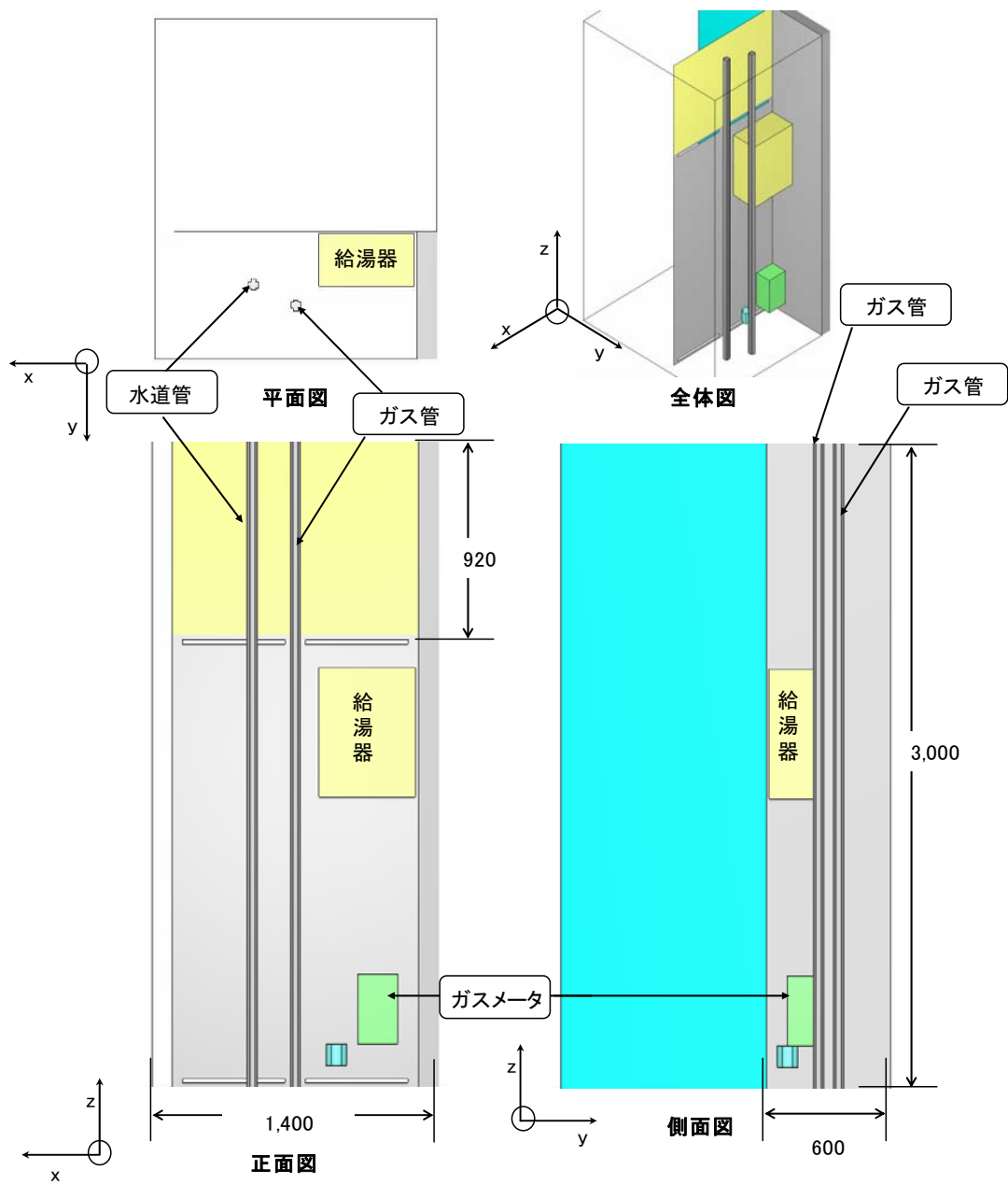


図 2.2 パイプシャフト内の解析時の計算領域

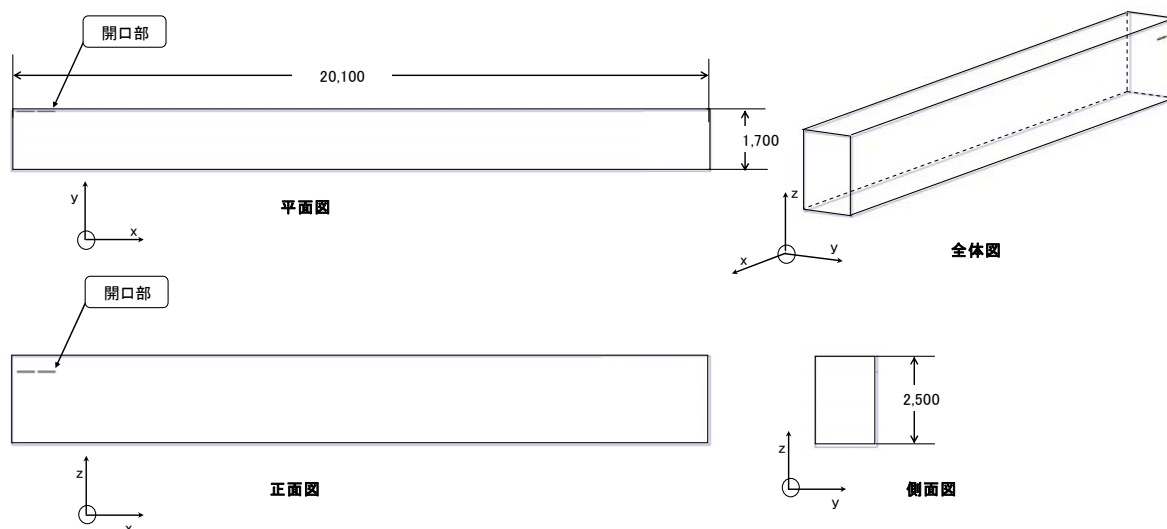


図 2.3 廊下での解析時の計算領域

空間メッシュについては、100万メッシュを基本とし、1.5倍、2.0倍のメッシュ数のモデルで比較検討を行った。

#### 4) 漏出条件

ガス漏洩位置は、パイプシャフト内のガス配管の床上400mmの高さを基本条件とし、下部スリットからの漏洩が認められる場合には床上1000mmに変更した。また、天井下400mmの高さで漏洩した場合のパイプシャフト内濃度の解析も比較のため行った。

漏洩するガス種は水素あるいは都市ガス(13A)とし、管内圧力はガス事業法で定められている低圧配管の圧力範囲内である2.5kPa、1.3kPaの2通りを設定した(参考として、ガス種:水素、管内圧力:143Paのケースも計算条件に加えた)。

上記の管内圧力における漏洩流量をオリフィスの流量計算に用いられる次式を用いて計算した。

$$Q = C \pi D^2 / 4 * \sqrt{2 / \rho * \Delta P} \quad (2.8)$$

ここで、 $C$ :オリフィスの流量係数(=0.64)[-]、 $D$ :オリフィス直径(孔径)[m]、 $\rho$ :流体密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $\Delta P$ :オリフィス前後での差圧[Pa]である。計算結果を表2.3に示す。

管内圧力が2.5kPaで水素が漏洩する場合(以降、「H2-2.5kPa」のようにガス種と管内圧力を合わせて表記する)、漏洩流量は、178.4l/minの漏洩量となり、流量区分で6となるマイコンメータが異常を検知して遮断する流量182l/minよりは僅かに少ない漏洩量となる。従って、仮に孔径が5mmφ以上であれば、漏洩流量はマイコンメータが異常検知する基準を超えるため、短時間で供給が遮断される。すなわち、孔径が5mmφの場合が最も長時間かつ多量のガスが漏洩する条件といえる。

13A-1.3kPa が漏洩する場合、その流量は 42.7ℓ/min となるが、熱量は H2-2.5kPa と等価となる。従って、これらの場合におけるガスの爆発の程度はほぼ等しいものと考えられる。

その他の条件も併せて計算実施条件を表 2.4 に示す。

表 2.3 配管からの漏洩流量

ガス種	2.5kPa	1.3kPa
水素 $\rho=0.0893\text{kg/m}^3$	178.4 (151.4)	129.0 (109.5)
都市ガス $\rho=0.815\text{kg/m}^3$	59.1 (50.1)	42.7 (36.2)

単位：（上段）ℓ/min、（下段）m/sec

表 2.4 計算実施条件

条件名	ガス種	管内圧力	漏出流量	漏出位置	給湯器	解析条件	
		[Pa]	[ℓ/min]	[m]		メッシュ数	時間刻み[s]
H2-2.5kPa	水素	2500	178.4	0.4	有	約 100 万	0.02
H2-2.5kPa(LH2.6)				2.6			
H2-2.5kPa(No Boiler)				0.4	無		
H2-2.5kPa_1.5M		有	約 150 万				
H2-2.5kPa_2.0M			約 200 万				
H2-1.3kPa		1307	129.0	0.4	無	約 100 万	
H2-1.3kPa(No Boiler)					有	約 150 万	
H2-1.3kPa_1.5M						約 100 万	
H2-0.14kPa		143	42.7				
13A-2.5kPa	都市ガス	2500	59.1	0.4	有	約 100 万	0.05
13A-1.3kPa		1307	42.7	0.4			
13A-1.3kPa(LH1.0)				1.0			
13A-1.3kPa_1.5M				0.4			

※漏出位置は床面からの高さ

## 数値計算条件

計算条件は以下のとおりとした。

数値スキーム：

圧力補正解法：SIMPLEC 法

移流項精度：3次精度 WENO 法

マトリックスソルバー：ILUCGS 法

物理モデル：

計算コントロール：非定常計算

流れ解析：圧縮性流体

乱流モデル：標準  $k-\epsilon$ モデル

境界条件：入口境界：流速固定

出口境界：圧力固定

壁面：ノースリップ 断熱

圧縮性流体として解析を行ったのは、モル質量の違いによる拡散物質への浮力項を考慮するためである。質量の違う拡散物質が混合した場合に、軽い方の拡散物質が浮力により上昇することを確認している。

## 5) 検討結果

### i) パイプシャフト内での濃度分布

本節では、パイプシャフト内での水素並びに都市ガスの拡散性状に関して検討するため、時系列に沿ったパイプシャフト内でのガス濃度に関する比較・考察を行う。

比較・考察にあたり、図 2.4 に示すように水素の爆発下限界である 4vol% (図中 0.04 mol/mol) を目安として濃度分布を表示し、パイプシャフト内の爆発可能状態にある範囲やセンサー取り付けが予想される天井直下の濃度に着目する。

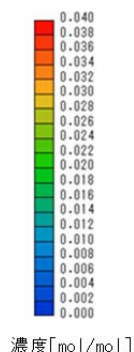


図 2.4 ガス濃度コンターのスケール



### 管内圧力による比較

図 2.5 にガス種が水素の場合の管内圧力によるパイプシャフト内濃度分布の差を示す。比較した計算条件名は H2-2.5kPa と H2-1.3kPa である。なお、コンター図の白色四角は、給湯器の位置にあたる。

H2-2.5kPa では、細孔から噴出された水素がパイプシャフト扉に衝突し、上方だけでなく下方にも床面付近まで拡散している。H2-1.3kPa では、水素は扉には衝突するが、床面まで下降せずに上昇に転じていることが見て取れる。

天井付近をみてみると、漏洩開始 60 秒後には管内圧力によらず、僅かに濃度が上昇し始めているが、時間の経過とともに、H2-2.5kPa の方が水素濃度は高まってゆく。仮に天井直下の水素濃度が 2vol% で反応するセンサーであれば、H2-2.5kPa は約 240 秒、H2-1.3kPa は約 300 秒で感知することになる。

### ガス種による比較

図 2.6 に管内圧力が 2500Pa の場合の水素及び都市ガスの拡散性状を示す。比較した計算条件名は H2-2.5kPa と 13A-2.5kPa である。

管内圧力が等しくても、水素は都市ガスの約 3 倍の流量であるとともに、ガスに働く浮力が大きく異なるため、拡散性状も異なっている。水素は前述の通り、パイプシャフト扉に衝突後、上方に拡散するのに対して、都市ガスは扉に衝突後はほぼ同心円状に拡散する。これらの図より、水素は爆発濃度内の範囲は都市ガスと比べて急速に拡大するが、それに伴いセンサー等での感知も早期に行えることが分かる。

図 2.7 は管内圧力 1307Pa での水素と都市ガスの漏洩性状である。漏洩流量が小さいため、拡散速度は 2500Pa の場合と比べて小さいが、拡散性状はほぼ同じ傾向を示す。

### 等価熱量での比較

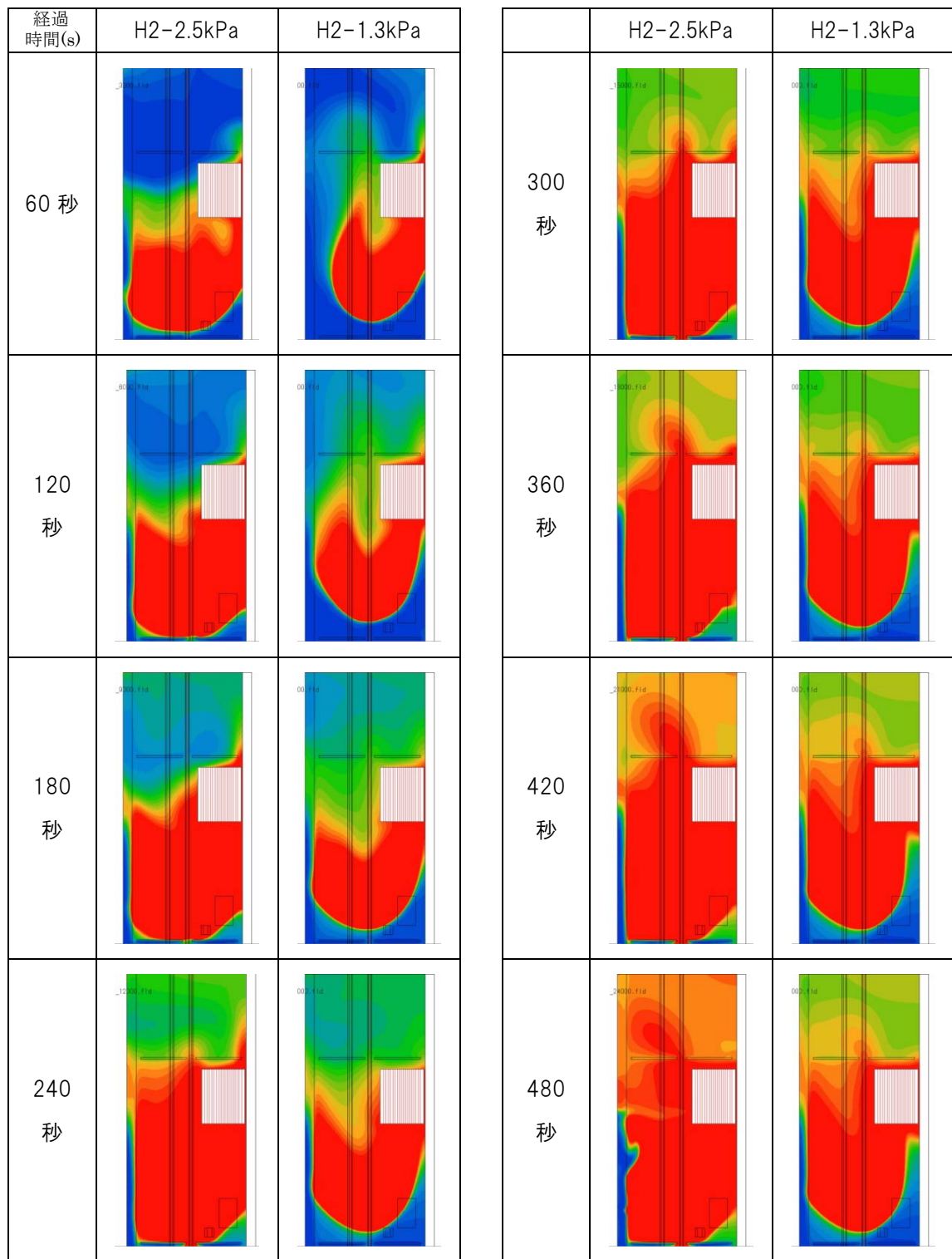
図 2.8 に熱量が等価の場合の水素及び都市ガスの拡散性状を示す。比較した計算条件名は H2-2.5kPa と 13A-1.3kPa である。

漏洩開始後から爆発濃度となる範囲が大きく異なり、480 秒後では水素はパイプシャフトの大部分となっているのに対して、都市ガスでは漏洩箇所の近傍にとどまっている。

### 給湯器の有無による比較

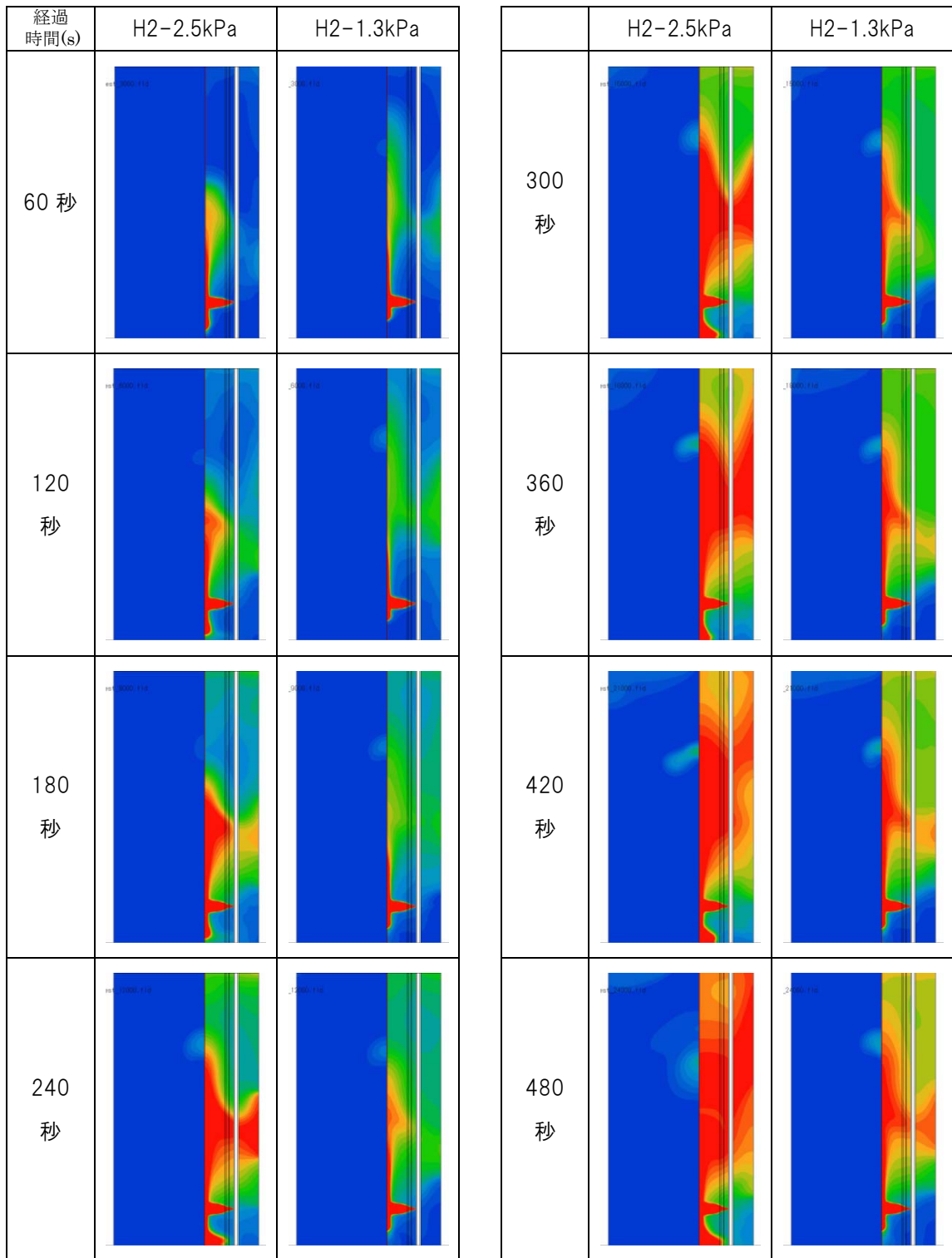
水素配管の場合、燃料電池による発電及び給湯が予想されるため、パイプシャフト内には本来給湯器は存在しない。これまでは比較を簡単にするため給湯器が置かれた場合を想定してきたが、給湯器の有無による拡散性状も検討が必要である。H2-2.5kPa での給湯器の有無による拡散性状を図 2.9 に示す。

漏洩開始 120 秒後までの計算結果であるが、両者とも大差ないことが分かる。給湯器のある側にガスが片寄るように見えるが、これは、廊下側での環境風の設定が、給湯器側から流れ込むように設定したことで、シャフト内部にも流れが生じたことによると思われる。従って、給湯器はパイプシャフト内での水素拡散性状にほとんど影響しないといえる。



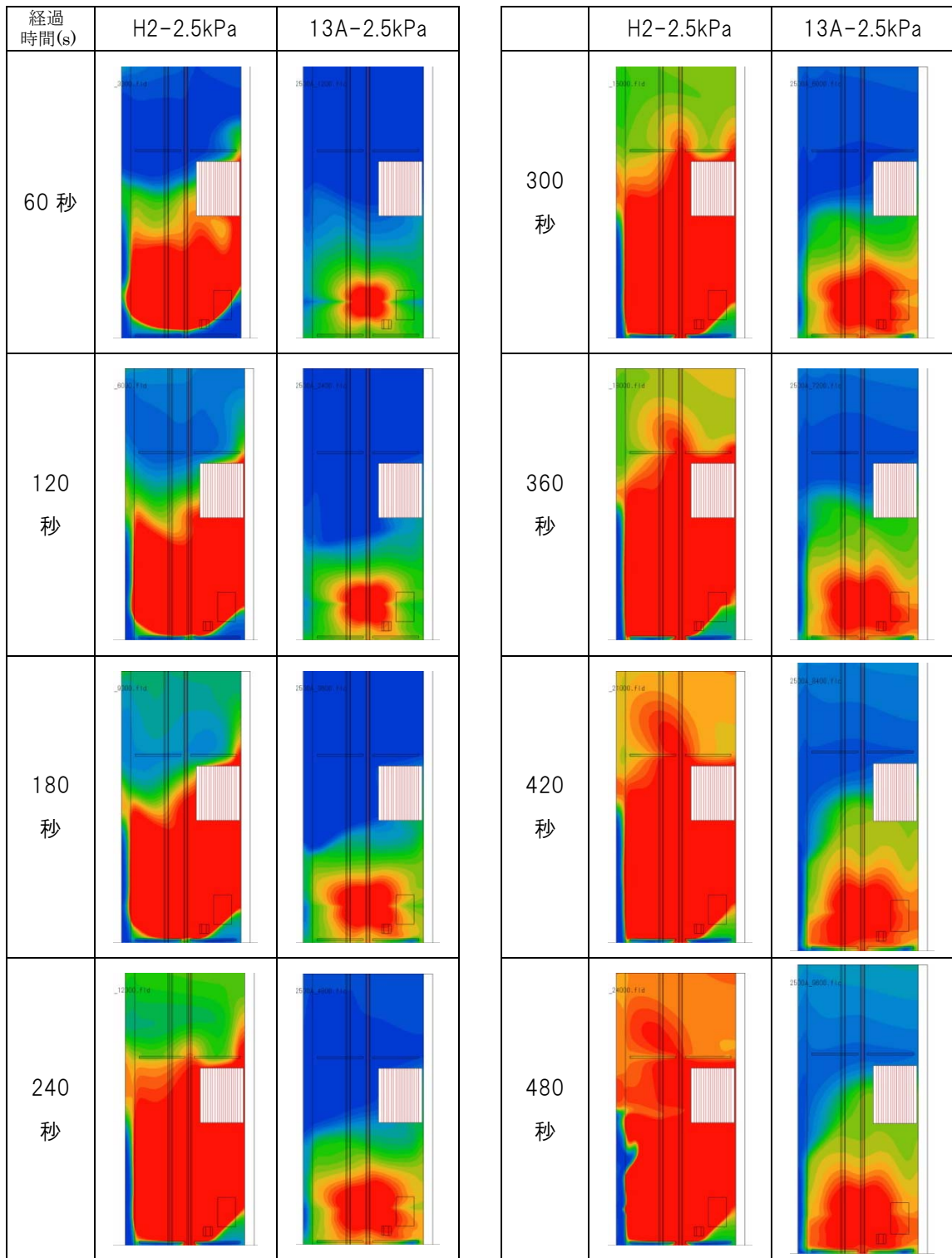
(X-Z 平面) (ガス濃度の凡例は図 2.4 を参照)

図 2.5(1) 管内圧力による水素拡散性状の違い(1/2)



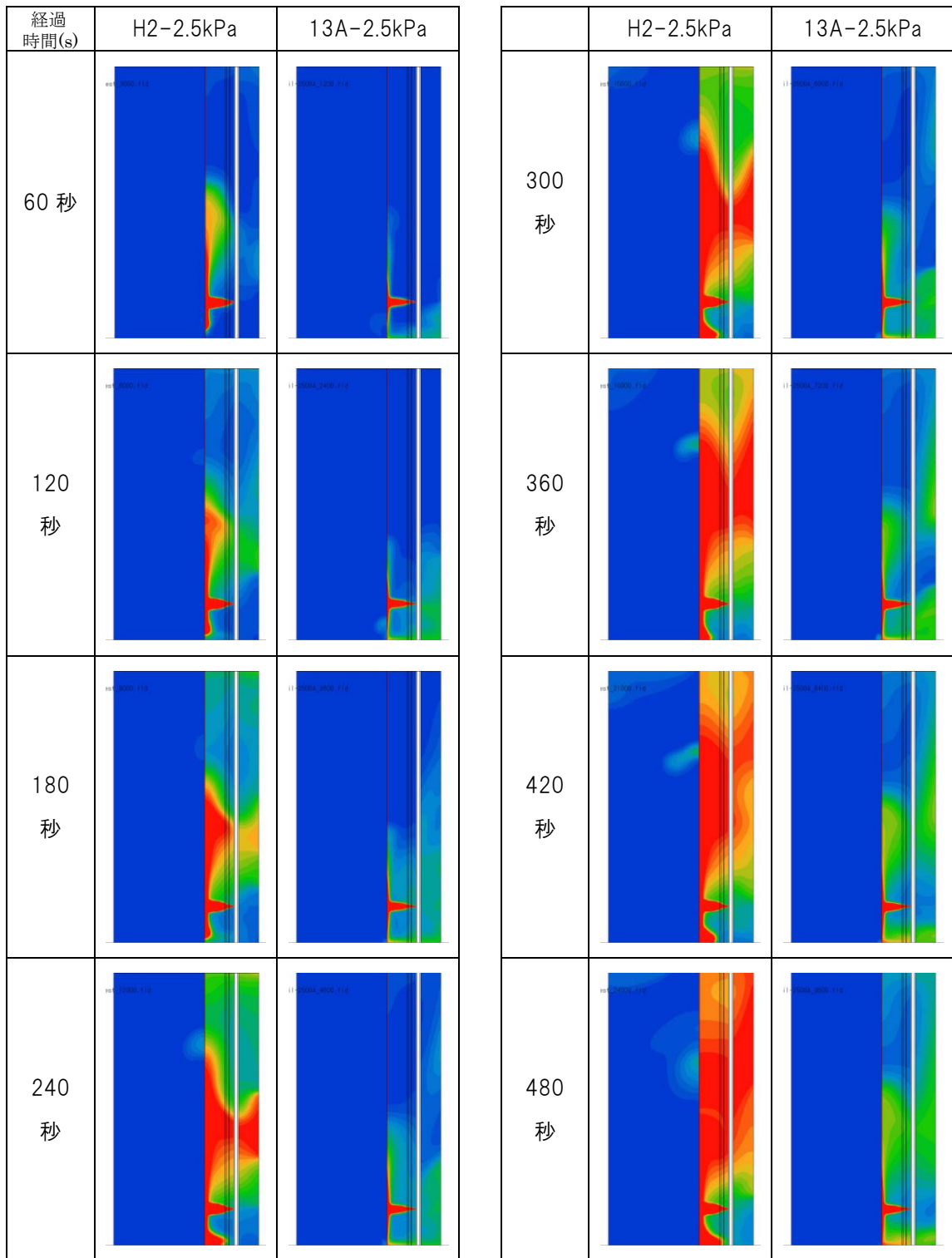
(Y-Z 平面) (ガス濃度の凡例は図 2.4 を参照)

図 2.5(2) 管内圧力による水素拡散性状の違い(2/2)



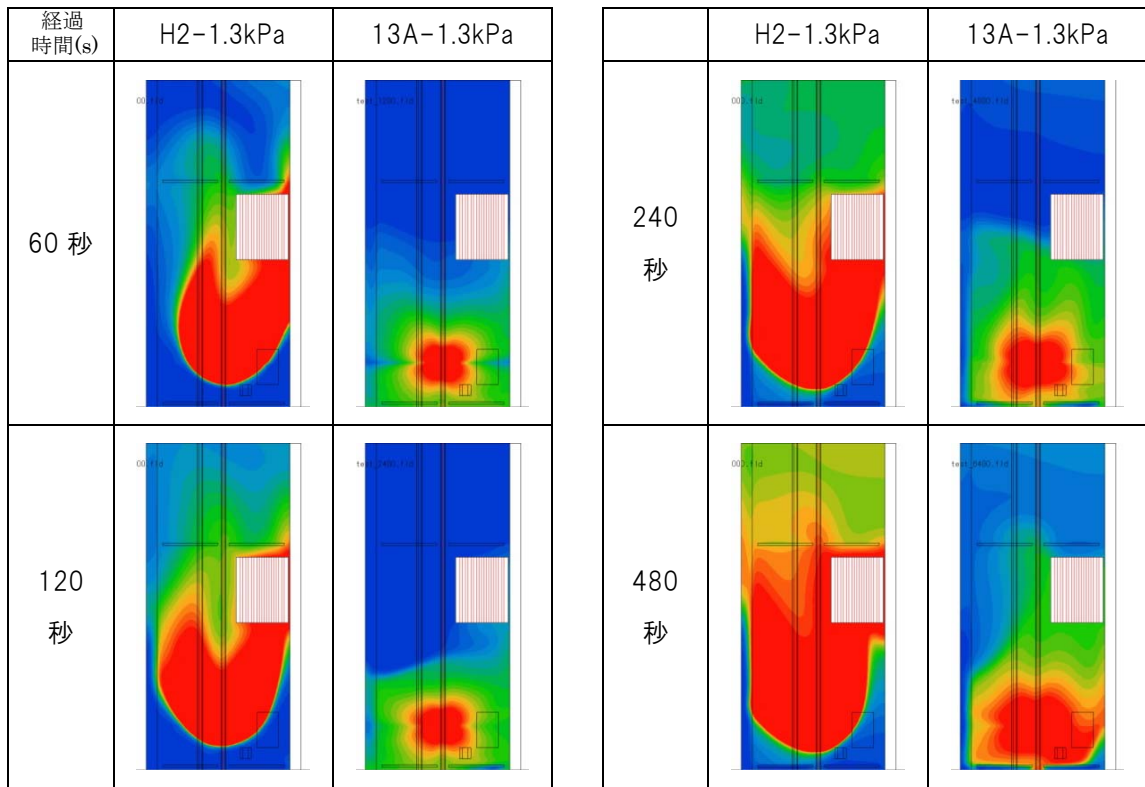
(X-Z 平面) (ガス濃度の凡例は図 2.4 を参照)

図 2.6(1) ガス種による拡散性状の違い (管内圧力 2500Pa) (1/2)



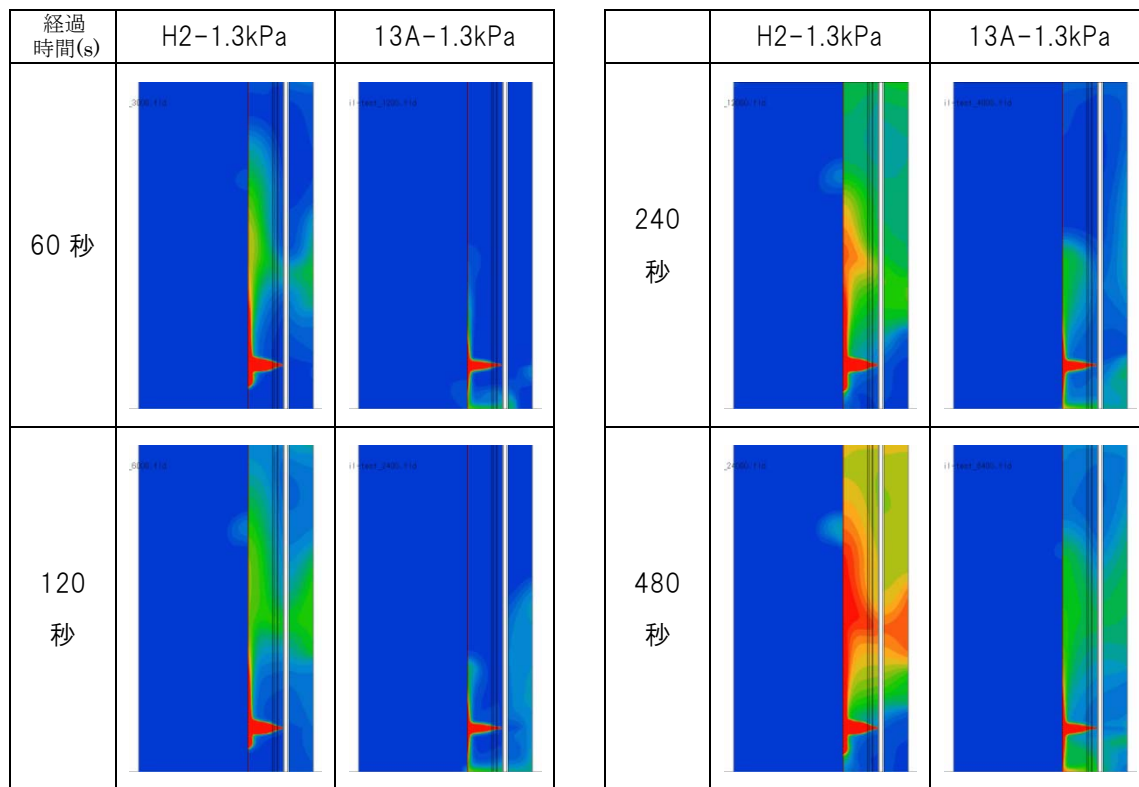
(Y-Z 平面) (ガス濃度の凡例は図 2.4 を参照)

図 2.6(2) ガス種による拡散性状の違い (管内圧力 2500Pa) (2/2)



(X-Z 平面) (ガス濃度の凡例は図 2.4 を参照)

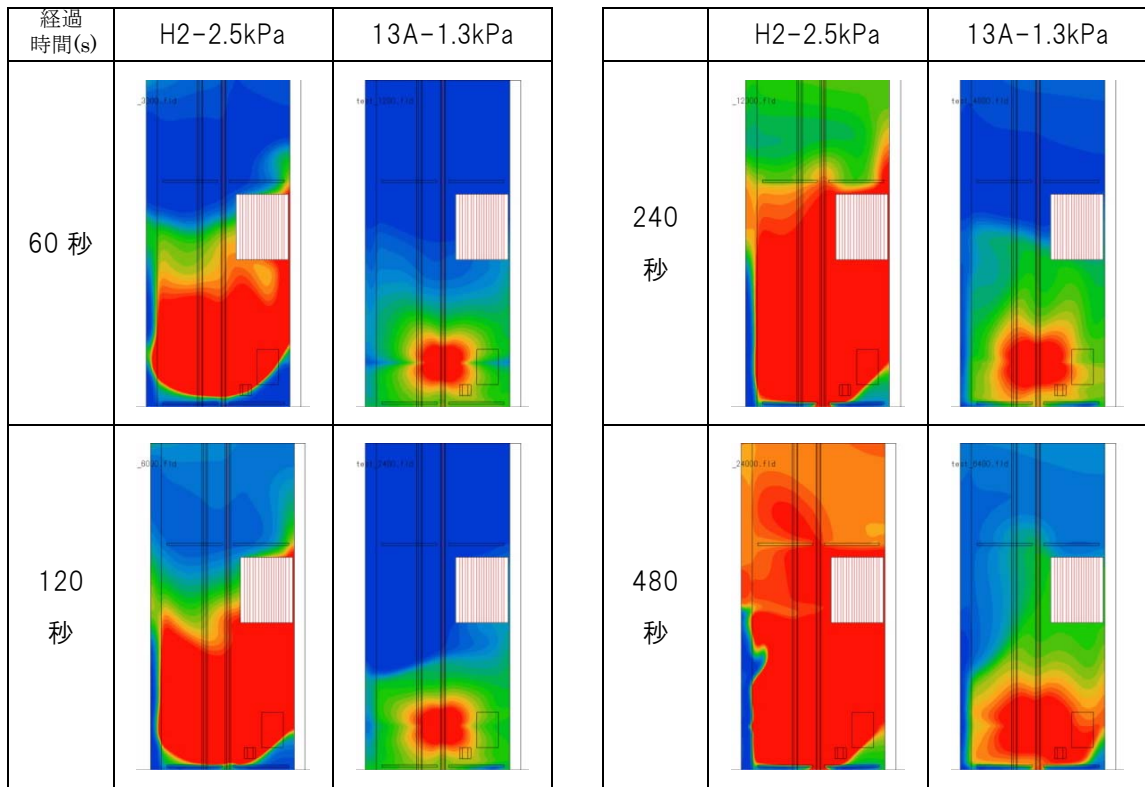
図 2.7(1) ガス種による拡散性状の違い (管内圧力 1307Pa) (1/2)



(Y-Z 平面) (ガス濃度の凡例は図 2.4 を参照)

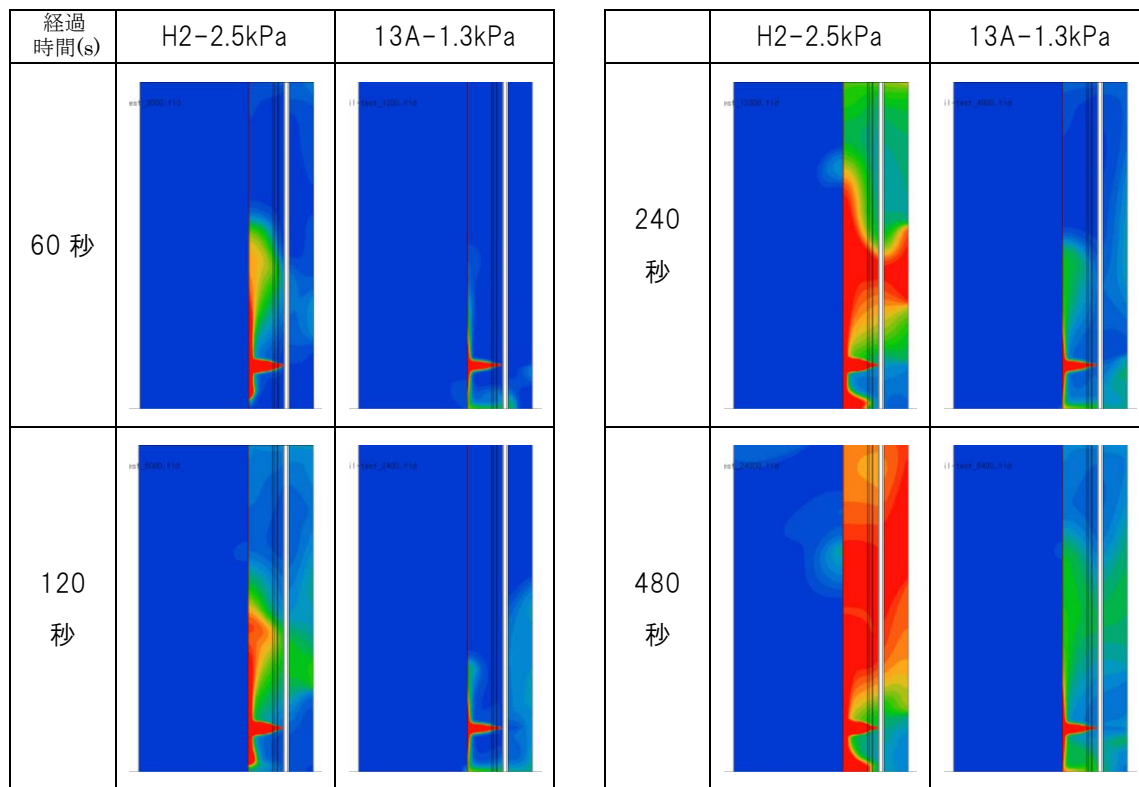
図 2.7(2) ガス種による拡散性状の違い (管内圧力 1307Pa) (2/2)





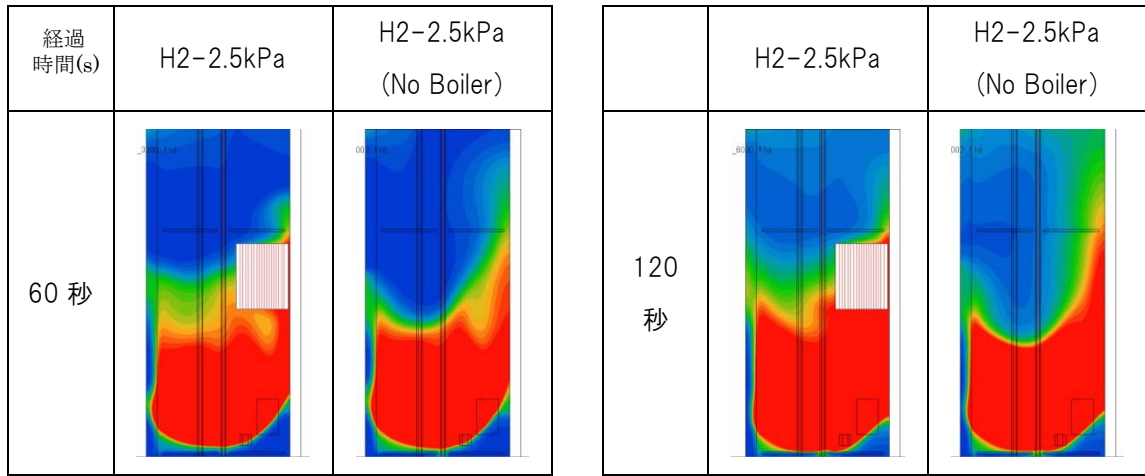
(X-Z 平面) (ガス濃度の凡例は図 2.4 を参照)

図 2.8(1) 等価熱量での拡散性状の違い(1/2)



(Y-Z 平面) (ガス濃度の凡例は図 2.4 を参照)

図 2.8(2) 等価熱量での拡散性状の違い(2/2)



(X-Z 平面)

(ガス濃度の凡例は図 2.4 を参照)

図 2.9 給湯器の有無による水素拡散性状の違い (管内圧力 2500Pa)

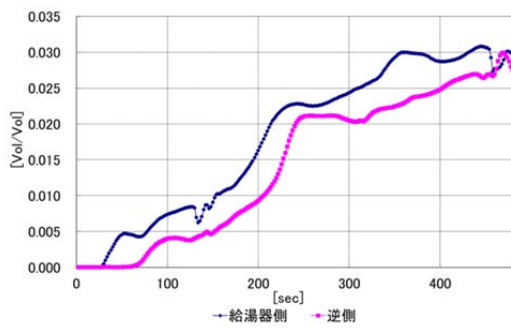
ii) 廊下での濃度分布

廊下への漏出水素

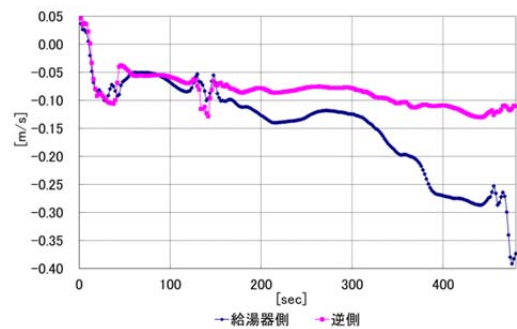
廊下での水素濃度分布を計算する際の入力条件として、パイプシャフト扉上部のスリットからの漏出流量を用い、廊下での流体解析を実施した。パイプシャフトから廊下へ漏出するガス濃度とスリット部での流速を図 2.10～図 2.13 に示す。なお、都市ガスのパイプシャフト内での漏洩箇所は、廊下への漏出が最も遅くなるように床上 1.0m とした。

各図に示すとおり、都市ガスと比較して、水素の方が多量に漏出する。これは、パイプシャフト内での漏洩流量が異なることで、パイプシャフト内全体の密度低下が水素の場合に大きくなり、換気が促された結果である。

各図において、漏出流速が正（廊下からパイプシャフトへの流れ）となる時間が散見されるが、これはパイプシャフト内と廊下の圧力バランス及びスリット周辺に発生する渦によるものと思われる。この場合、廊下へのガスの漏出流速を 0 m/s に変換して計算を行った。

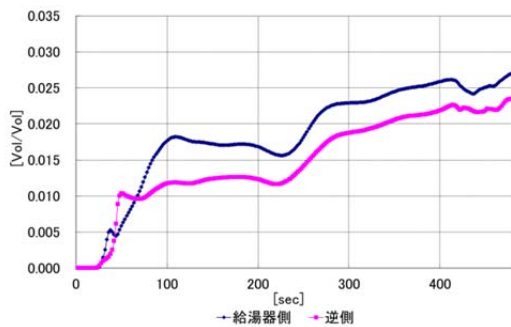


(a) 漏出濃度

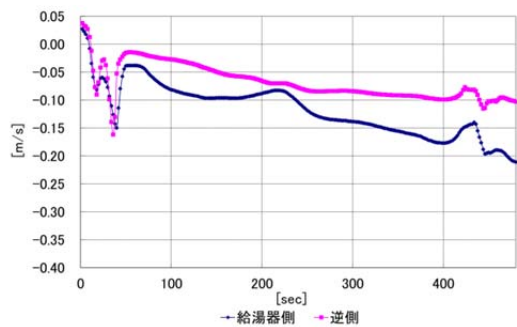


(b) 漏出流速

図 2.10 H2-2.5kPa での上部スリットからの漏出流量

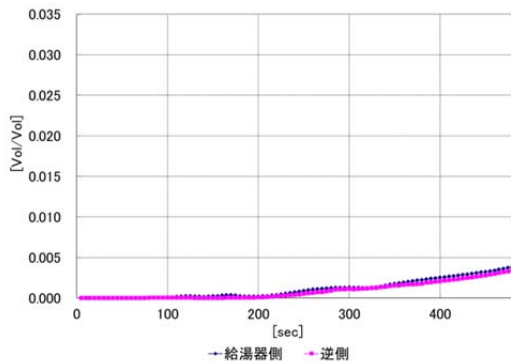


(a) 漏出濃度

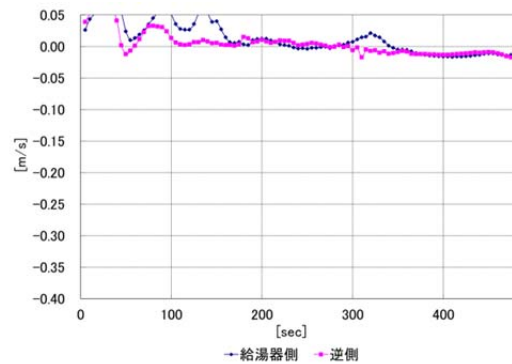


(b) 漏出流速

図 2.11 H2-1.3kPa での上部スリットからの漏出流量

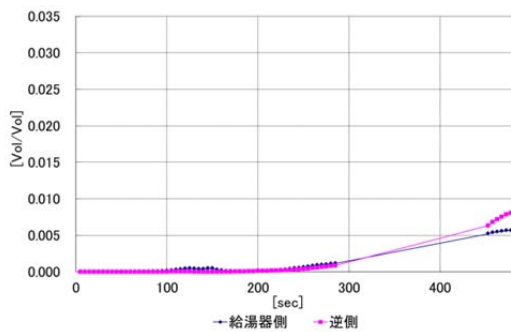


(a) 漏出濃度

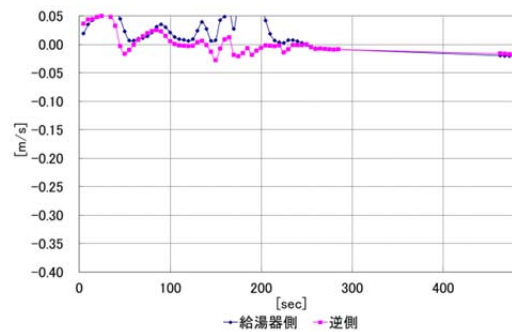


(b) 漏出流速

図 2.12 13A-2.5kPa (LH1.0) での上部スリットからの漏出流量



(a) 漏出濃度



(b) 漏出流速

図 2.13 13A-1.3kPa (LH1.0) での上部スリットからの漏出流量

### 廊下での流動性状

図 2.14 に管内圧力の差を比較するため、H2-2.5kPa と H2-1.3kPa の中央断面での濃度分布の時間変化を、図 2.15 にガス種による差を比較するための H2-2.5kPa と 13A-2.5kPa(LH1.0)の中央断面での濃度分布の時間変化を示す。

まず、図 2.14 では僅かに H2-2.5kPa のほうが廊下への漏出流量は大きいですが、一部では H2-1.3kPa の方が廊下での拡散が早いようにも見える。これは、図 2.16 に示す等濃度面からもわかるように、H2-2.5kPa ではパイプシャフトが設けられた壁面側に偏って廊下を流れているためである。

図 2.15 を見ると、水素と都市ガスでは流動性状は大きく異なる。水素は天井下に約 50～60cm 程度の厚みで 0.1vol%の水素の層が形成されているのに対して、都市ガスは天井面直下にごく薄い層が流れているのみである。このことより、仮に水素に添加された付臭剤が水素の挙動に追従するとすれば、都市ガスと比べて水素の方が臭いによる覚知は早くなる。

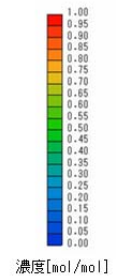
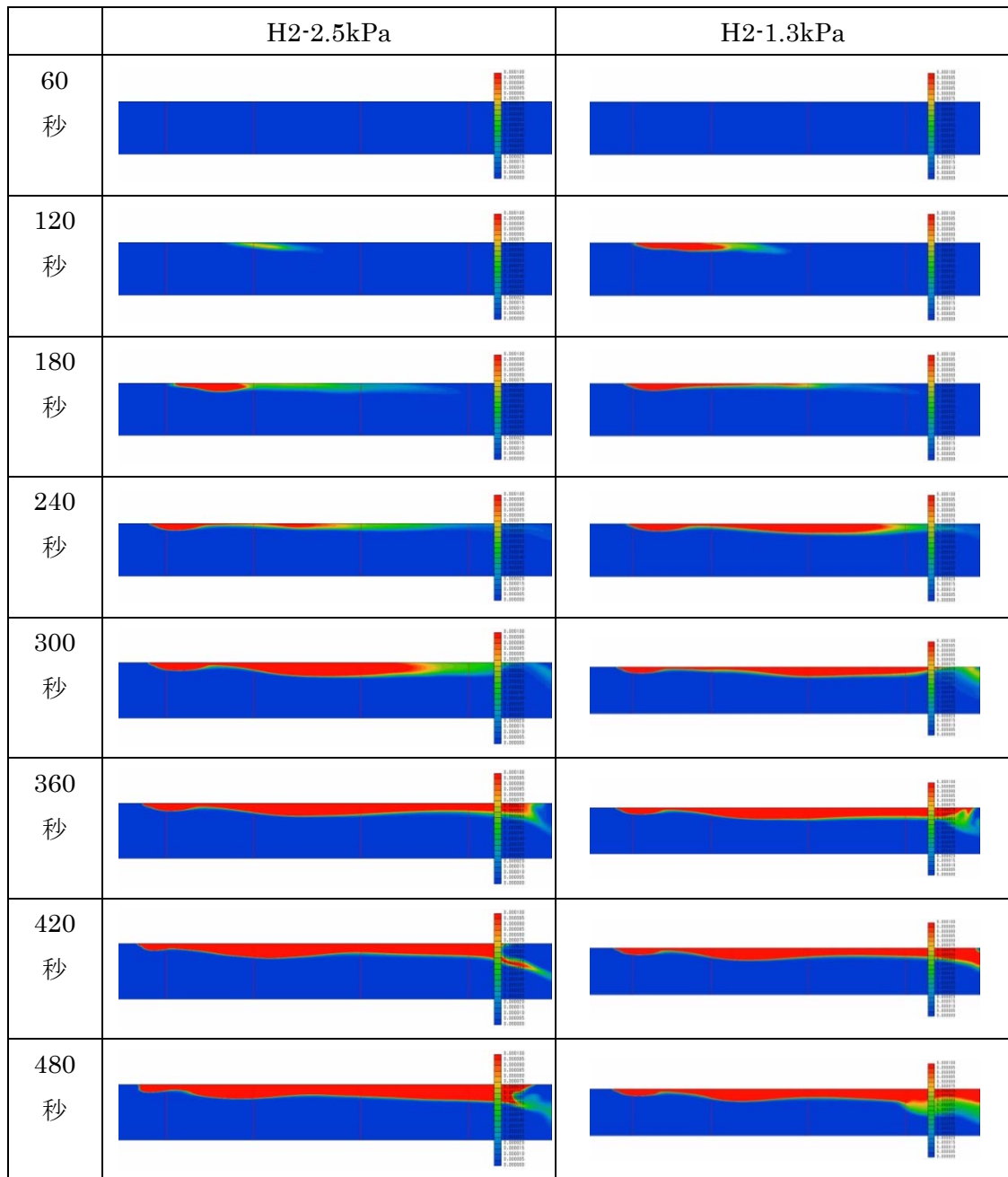


図 2.14 管内圧力による水素拡散性状の違い

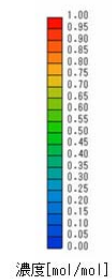
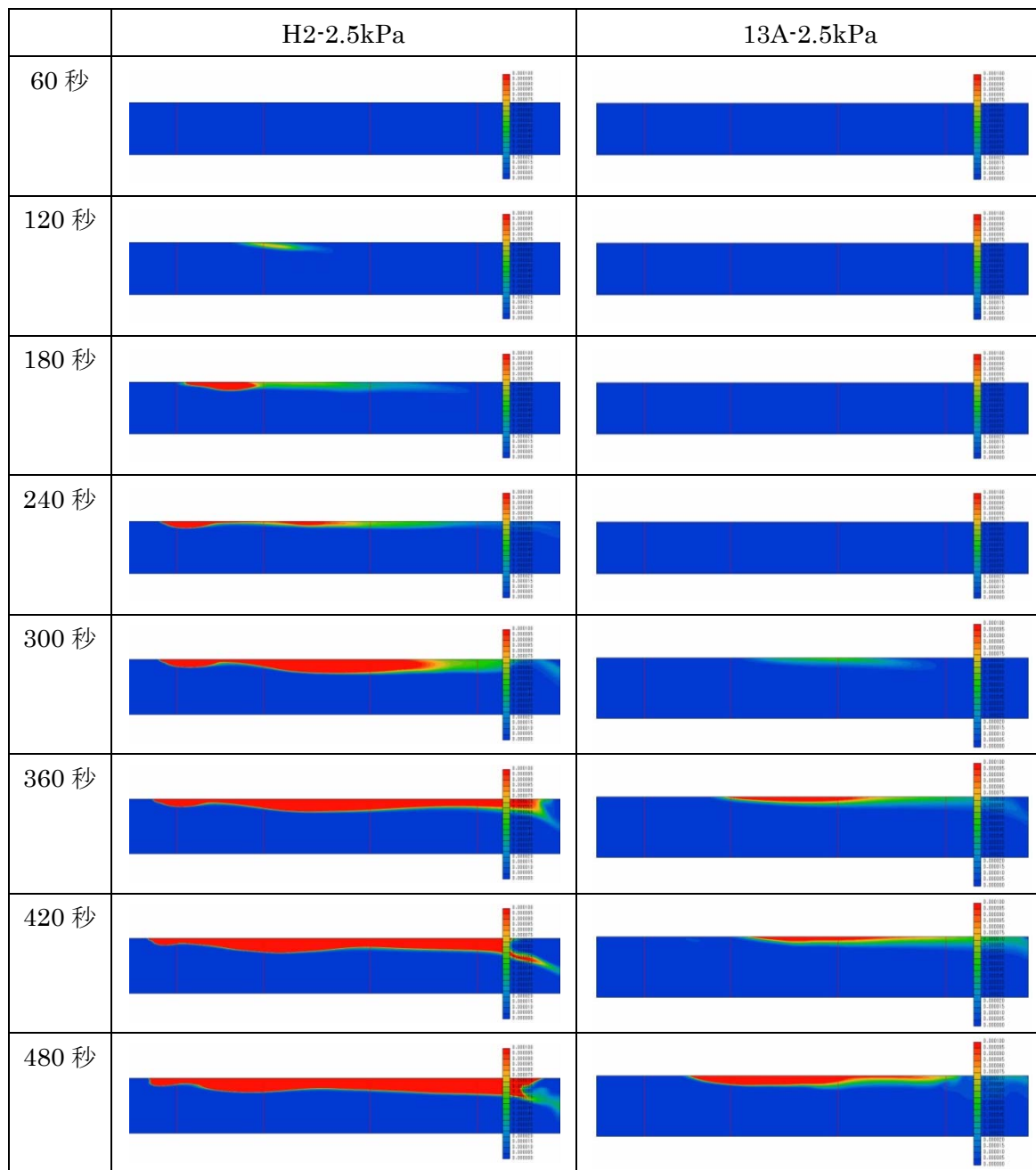


図 2.15 ガス種による拡散性状の違い

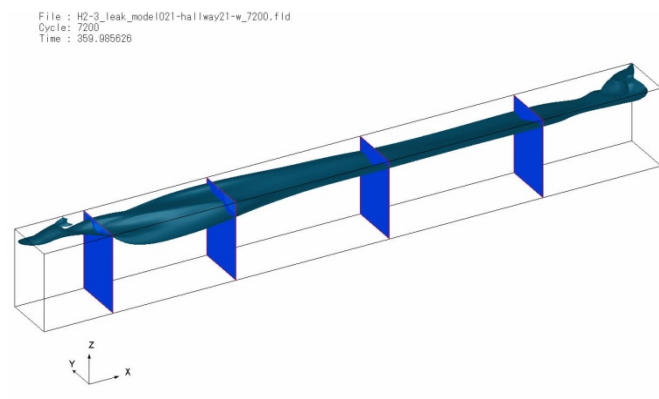


図 2.16 水素-2.5kPa での 420 秒後の等値面図



### iii) ガス漏洩検知に関する考察

マイコンメータにより検知される漏洩規模のものは、比較的早期に検知されること、検知後速やかにガス供給が停止されることから、爆発に至るリスクは小さい。一方、マイコンメータでは検知できない程度漏洩の場合、人の居住域あるいはセンサーの設置箇所までガスが拡散する間に漏洩する流量が問題となる。従って、ガス漏洩の検知を速やかにするための方策が必要であり、漏洩時のガス濃度分布を計算することにより、爆発の危険性を考察する。

床面付近で漏洩した場合、水素も都市ガスも漏洩箇所の近傍が濃度が高く、天井付近の濃度上昇は比較的遅い。しかし、ガス事業法の低圧ガス配管において許容される管内圧力の範囲（1～2.5kPa）では、ガス種が水素の場合の方が、漏洩量が多くなる。従って、パイプシャフト内および廊下での拡散も水素の方が短時間で広い範囲にわたる。爆発の観点から、水素と都市ガスの熱量が等しい条件では、拡散範囲の差が一層大きくなるため、都市ガスは局所的に激しい爆発をするのに対して、水素は広範囲に比較的緩やかな爆発をするといえる。

一方、漏洩検知の観点から見ると、都市ガスはマイコンメータで検知できない漏洩については臭いによる検知が現状では唯一の手段であり、水素より拡散の遅い都市ガスは検知にも時間がかかる。それに対して水素は、付臭剤が水素に追従するという仮定の下では、拡散範囲が都市ガスと同じになった時点で検知され、その時間は都市ガスと比べ短く、漏洩する熱量も小さくなるため、爆発による被害は小さくなる。しかし、付臭剤が水素に追従するという知見は現状では得られておらず、また、水素は一般の建物では馴染みが薄いガス種であることを考慮すると、都市ガスと比べて一層の安全対策を建築物に要求することが望ましいと思われる。

要求する安全対策の一例として、パイプシャフト内に水素検知センサーを設置する案が考えられる。パイプシャフト内のどこで漏洩するかは不明ではあるが、天井面あるいは天井直下に設けるのが妥当であろう。しかしながら、頻繁な換気がなされていれば、天井付近に水素が達する前に廊下へ漏出する可能性もあるので、換気量あるいは換気口の大きさに制限を加える等の規制が必要であるとともに、パイプシャフト内での他の機器にも防爆処理を施す等の着火源の抑制も必要である。

## 6) 今後の課題

今回の一連の解析では、廊下にある程度の換気がなされている条件下での結果を求めたため、人の居住域までガスが降下することはなかった。付臭による検知を詳細に検討するには、廊下でガスが蓄積する条件での解析を実施する必要がある。

また、水素検知センサーの設置場所を検討するのであれば、パイプシャフトと廊下との換気が大きい場合のパイプシャフト内での拡散性状についても検討する必要がある。

## 7) まとめ

建物内における水素配管を安全に設置するための技術基準を検討するための基礎資料とするため、建物内水素配管からの漏出性状について計算を行った。

既存の事務所建物及び共同住宅における一般燃料ガスの配管設置状況を調査し、事務所及び共同住宅におけるパイプシャフトの寸法、内容物については建物規模によらず用途ごとに概ね似通ったものになる傾向があった。

水素漏出時の建物内および周辺での水素蓄積性状及び対策の検討では、マイコンメータでは検知できない程度のガス漏洩の検知方策を検討するため、パイプシャフト内でガスが漏洩し、廊下に漏出した場合を想定して数値流体解析を実施した。

水素は都市ガスと比べて、拡散速度が速く、熱量が小さいことから、都市ガスは局所的に激しい爆発をするのに対して、水素は広範囲に比較的緩やかな爆発をするといえる。一方、漏洩検知の観点から見ると、水素漏洩時の臭いによる検知の時間は都市ガスと比べ短く、漏洩する熱量も小さくなるため、爆発による被害は小さくなる。しかし、付臭剤が水素に追従するという知見は現状では得られておらず、また、水素は一般の建物では馴染みが薄いガス種であることを考慮すると、都市ガスと比べて一層の安全対策を建築物に要求することが望ましいと思われる。

要求する安全対策の一例として、パイプシャフト内に水素検知センサーを設置する案が考えられる。パイプシャフト内のどこで漏洩するかは不明ではあるが、天井面あるいは天井直下に設けるのが妥当であろう。しかしながら、頻繁な換気がなされていれば、天井付近に水素が達する前に廊下へ漏出する可能性もあるので、換気量あるいは換気口の大きさが一定以上であれば、隣接空間での拡散性状を考慮して適切な位置にセンサーの設置が必要である。

## 2.2.4 建物内空間（居室等）で漏洩した水素の拡散性状

### (1) 目的

建築空間内における水素漏洩時の爆発危険性を低減するための換気条件の把握、及び早期漏洩覚知のための検知器設置条件の検討についての知見を得るため、建築空間内を想定し、漏洩した水素の流動性状についての数値流体解析を実施する。

燃料電池とガス栓の接続部に生じたピンホールからの水素の漏出を想定し、広さの異なる居室、地下空間の場合の漏出水素流動形状について数値流体解析を行う。対象とする空間の換気状況についても、開口の大きさや機械換気の有無、外部風の有無などの複数の解析条件を想定した解析を実施する。

### (2) 解析条件

燃料電池に接続されたガス管に生じたピンホールからの水素漏出を想定し、建築空間内における水素流動性状の解析を行った。計算対象空間は、間口、奥行きが異なる4ケースを想定すると共に、開口部条件や外気条件（外部風の有無など）および計算メッシュ数を変更して合計28ケースの解析を行った。

解析ケースは、計算対象空間と開口部条件、及び外気条件について複数の組み合わせを選択した。なお、以降のケースAはバルコニーを想定した空間であり、2.2.5で述べるべきものであるが、本節で述べる居室等の解析条件と比較するため、バルコニーの解析条件もここで示す。

#### ① 計算対象空間

計算対象空間として、図2.17に示すような間口及び奥行きが異なる4ケース（ケースA～D）を使用した。A～Cについては奥行きと梁の有無のみが異なっており、ケースDは、ケースCを水平方向に2スパン設けた場合に相当する。

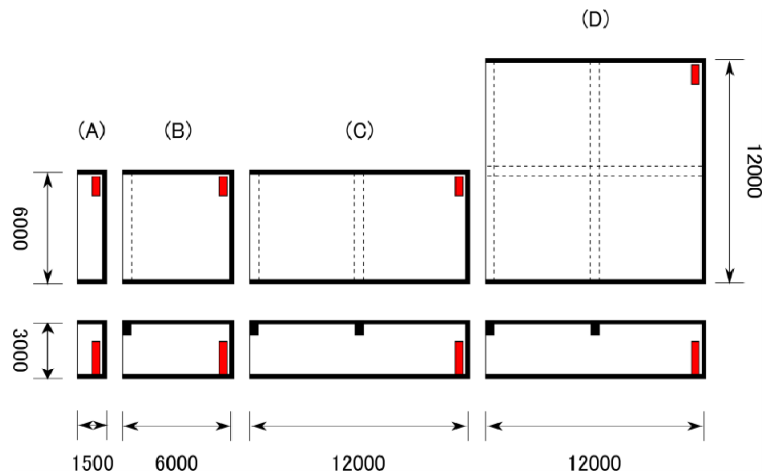


図 2.17 解析に用いた計算対象空間

図 2.17 は左から順にケース A、B、C、D を示した。上段に平面図を、下段に側面図を示している。図中の数値は全て外径であり、壁の厚さは 100[mm]とする。長さの単位は[mm]。赤で示した部分は燃料電池ユニットであり、角の壁面から 100[mm]ずつ離れた位置に設置されている。点線及び黒で示した部分には高さ 600[mm]、幅 500[mm]の梁が存在するものとした。各形状の左端は、図 2.18 に示した開口部条件のいずれかを適用した。

## ② 開口部条件

開口部条件はバルコニー、自然換気口、全面開口、機械換気の 4 つのパターンを計算対象とした。図 2.19 にこれらの形状を示す。バルコニー形状はケース A の場合、自然換気口・全面開口及び機械換気の形状はケース B・C について、自然換気口（2 スパン）、全面開口（2 スパン）、機械換気（2 スパン）の形状はケース D の場合についてそれぞれ使用した。ただし、計算ケースは表 2.5 に示す通りであり、全ての組み合わせを計算対象とするものではない。

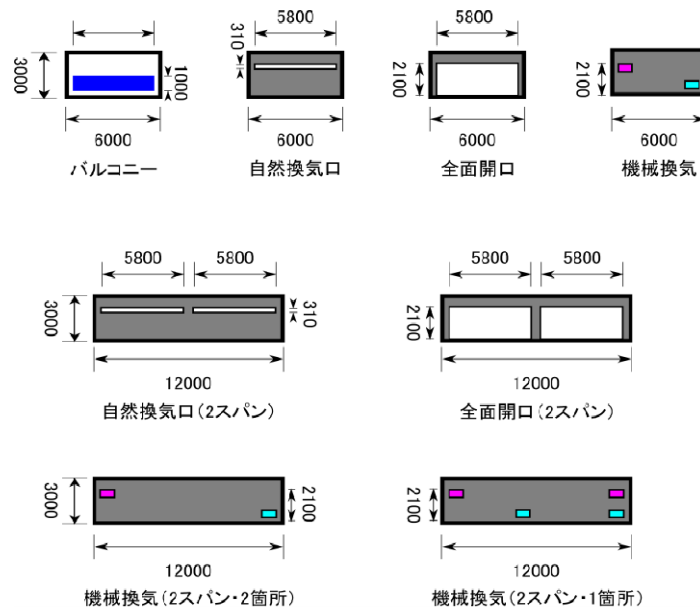


図 2.18 開口部条件

各計算対象領域の開口部に適用される開口部条件を列挙した。バルコニー形状は、厚さ無しの板としてモデル化し、周囲の壁面から 100[mm]の位置に存在する（本来は柵などで支えられているが、解析モデル上は柵などの微細な形状を再現せず、中空に存在するとした）。グレーで示した部分は壁面であり、全て壁面厚さを 100[mm]として設定した。機械換気の場合、マゼンタで示した部分が排気口、水色で示した部分が吸気口である。

### ③外気条件

外気条件については、以下の 2 つのパターンを想定した。

- 開放空間

外部開口形状の外側は完全に開放されているものとみなす。計算上は、境界条件を外部開口形状の位置に設定した場合に生ずる影響を回避するため、図 2.19 で模式的に示したように外部に広い空間を設定して解析を行った。外部風が存在する場合は、この領域に一様に外部風を流入・流出させた。

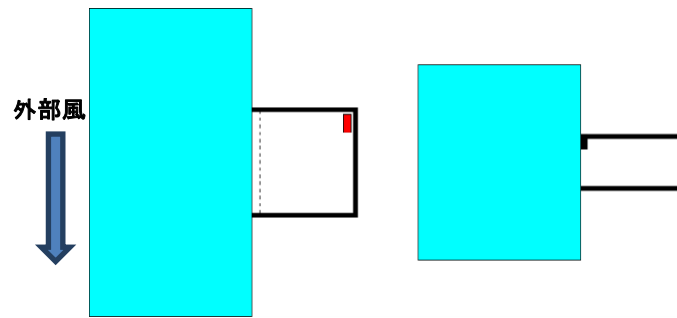


図 2.19 外部領域の設定

ここではケース B の場合を例に、左に平面図、右に側面図を示した。水色で示した領域が外部領域である。ただし、実際には十分広く設定している。外部風がある場合、矢印の向きに外部風を設定した。

- ・ ドライエリア

計算対象空間が地下空間であるとみなし、外部に図 2.20 で示すような幅 2[m]のドライエリアを設定した。この場合も、境界条件による影響を回避するため、ドライエリア上方に広い外部空間を設定して解析を行った。なお、計算対象空間上方には建築物が続いているものとみなし、壁面境界を設定している。外部風が存在する場合は、ドライエリア上方の外部空間に対して一様に外部風を流入・流出させている。

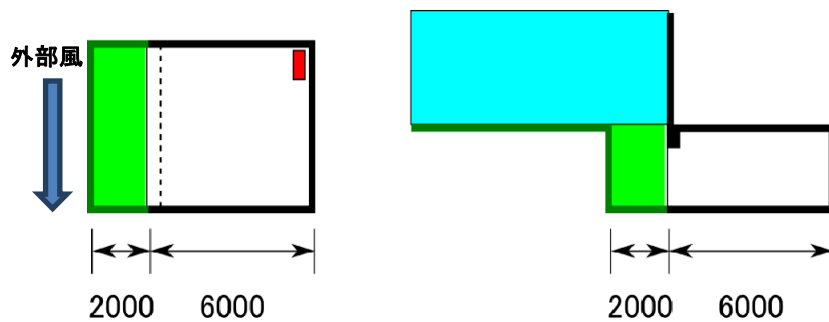


図 2.20 ドライエリアの設定

ここではケース B の場合を例に、左に平面図、右に側面図を示した。緑色で示した領域がドライエリアである。外部領域はドライエリア上方に設定する（平面図では図示していない）外部風がある場合、矢印の向きに外部風を設定する。

#### ④ 燃料電池と水素漏洩箇所

水素漏洩箇所としては、図 2.21 に示すような燃料電池とガス栓の接続部分に生じたピンホールを対象とした。燃料電池の大きさとしては、商品化されているユニットを想定して幅 1065[mm]×奥行き 430[mm]×高さ 1883[mm]と設定した。ガス管径は 50[mm]であり、ピンホールの直径を 5[mm]とした。

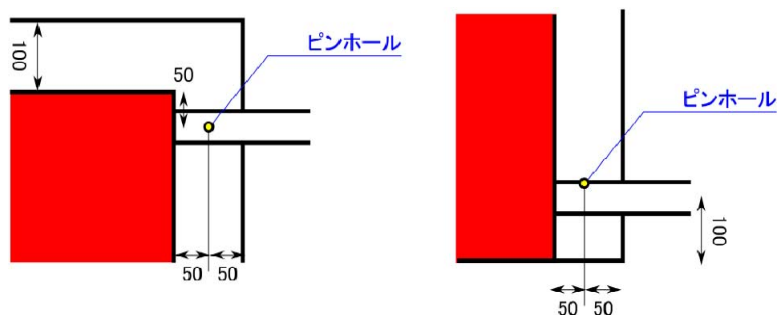


図 2.21 電池設置箇所とピンホール位置

左に平面図、右に側面図を示した。赤の領域が燃料電池であり、50[mm]径の水素ガス配管に接続されている。ピンホールは直径 5[mm]であり、燃料電池と壁面の中間に生じたものとした。

ガス配管内部の圧力としては 2.5[kPa]を想定し、オリフィス径と圧力に対する流量 $Q$ の関係式

$$Q = \frac{C\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2.9)$$

を用いて流入流量を算出し、計算条件として与えた。ここで、オリフィス流量係数  $C=0.64$  であり  $D$ :オリフィス直径 (5[mm])、 $\rho$ :流体密度、 $\Delta P$ :オリフィス前後の差圧 (2.5[kPa]) である。オリフィスの差圧は 1 気圧と比較して小さいため、流体密度 $\rho$ は水素 1 気圧の場合の値を用いた。このとき、漏洩流量は  $Q=178.4$  [L/min]であり、一様な流速に換算すると 151.4[m/s]となる。

#### ⑤解析手法

解析に用いた物理モデルは、2.2.3 と同様に気体の圧縮性を考慮した標準型  $k-\epsilon$ モデルを適用し、計算対象時間は水素漏出開始から 600 秒とした。



## ⑥解析ケースまとめ

解析対象としたケースを表 2.5 にまとめた。ここでは、計算メッシュ規模及び解析時の並列数も併せて示している。外気条件としては、特に記載が無い場合は開放空間であることを示す。

代表的な計算ケースについて、計算領域の概要（壁面として設定する面に関する計算領域の可視化）を図 2.22 に示した。

表 2.5 水素流動性状解析の解析ケース一覧

ケース番号	空間形状	開口部条件	外気条件	メッシュ規模	並列数
1	A	バルコニー	外部風無し	50万	16
2	A	バルコニー	外部風 3[m/s]	50万	16
3	B	自然換気口	外部風無し	100万	16
4	B	自然換気口	外部風 3[m/s]	100万	16
5	B	自然換気口	外部風 5[m/s]	100万	16
6	B	自然換気口	外部風無し	100万	16
7	B	自然換気口	ドライエリア 外部風 3[m/s]	100万	16
8	B	全面開口	ドライエリア 外部風無し	100万	16
9	B	全面開口	外部風 3[m/s]	100万	16
10	B	全面開口	外部風無し	100万	16
11	B	機械換気	ドライエリア 換気回数 10回	100万	16
12	B	機械換気	換気回数 20回	100万	16
13	B	自然換気口	外部風無し	200万	16
14	C	自然換気口	外部風無し	400万	16
15	C	自然換気口	外部風無し	200万	16
16	C	自然換気口	外部風 3[m/s]	200万	16
17	C	自然換気口	外部風無し	200万	16
18	C	全面開口	ドライエリア 外部風無し	200万	16
19	C	全面開口	外部風 3[m/s]	200万	16
20	C	機械換気	換気回数 10回	200万	16
21	C	機械換気	換気回数 20回	200万	16
22	C	全面開口	外部風無し	400万	32
23	C	全面開口	外部風 3[m/s]	400万	32
24	D	自然換気口 (2 スパン)	外部風無し	400万	32
25	D	全面開口 (2 スパン)	外部風無し	400万	32
26	D	機械換気 (2 スパン、1 箇所)	換気回数 10回	400万	32
27	D	機械換気 (2 スパン、1 箇所)	換気回数 20回	400万	32

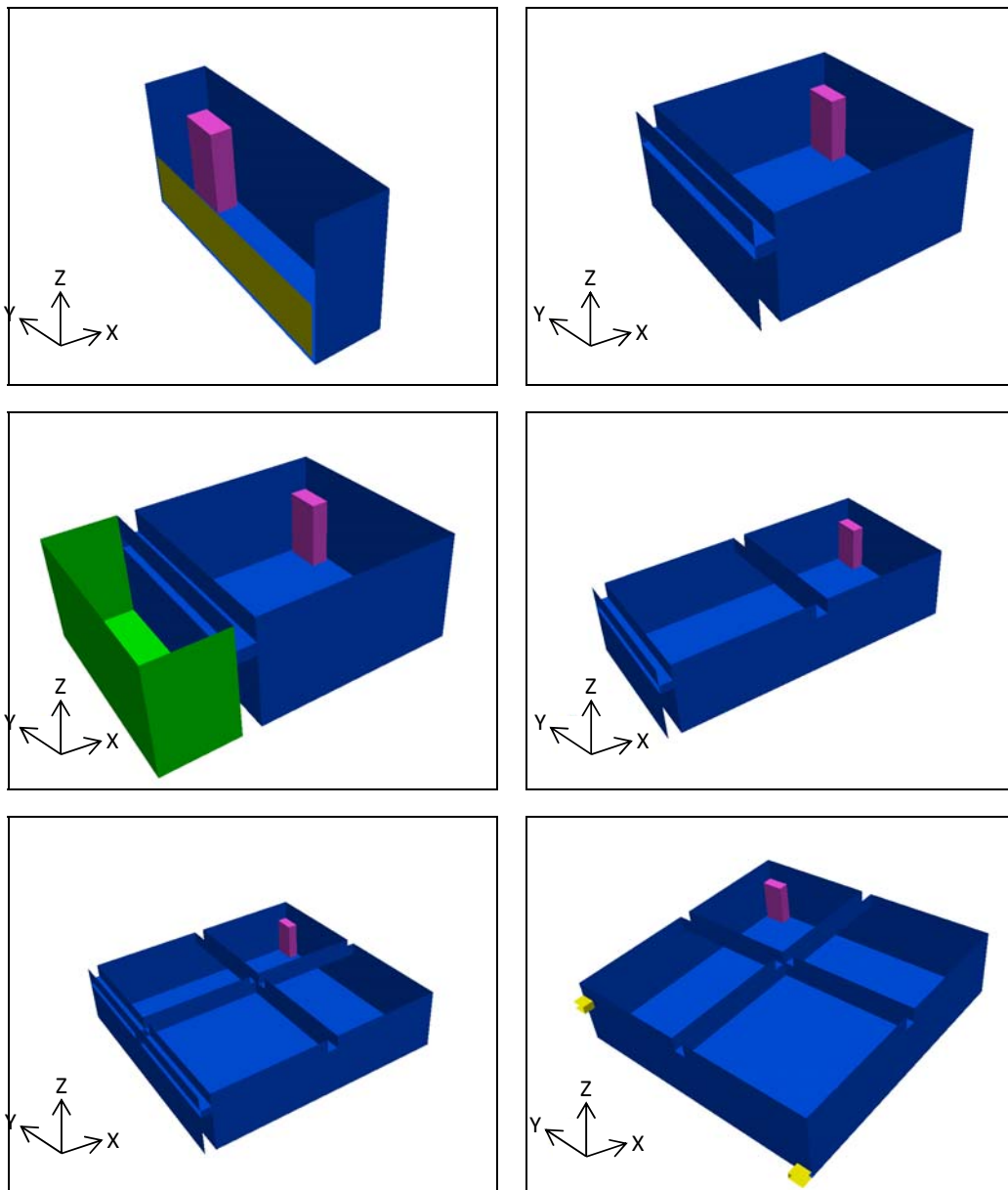


図 2.22 計算に使用した領域の概要

計算領域の壁面について可視化している。燃料電池はマゼンタで、ドライエリアは緑色で示した。

左上：ケース 1（形状ケース A+開口部バルコニー）、

右上：ケース 3（形状ケース B+開口部自然換気口）

左中：ケース 6（形状ケース B+開口部自然換気口+ドライエリア）

右中：ケース 15（形状ケース B+開口部自然換気口）

左下：ケース 17（形状ケース D+開口部自然換気口）

右下；ケース 26（形状ケース D+開口部機械換気）

### 【計算メッシュ】

計算メッシュは全て六面体の要素を用いて作成している。代表的なケースとして、解析ケース 3（形状ケース B+開口部自然換気口）の場合のメッシュの配置について、メッシュ分割の状況を図 2.23 に示す。燃料電池周辺など、水素ジェットからの拡散が重要な箇所ではメッシュを細かく分割している。要素サイズは、計算対象領域内で最小 5[mm]、最大 40[mm]とした。外部領域に関しては、精度の高い解析は必要としないため、遠方で最大 1[m]程度まで粗いメッシュを使用している。

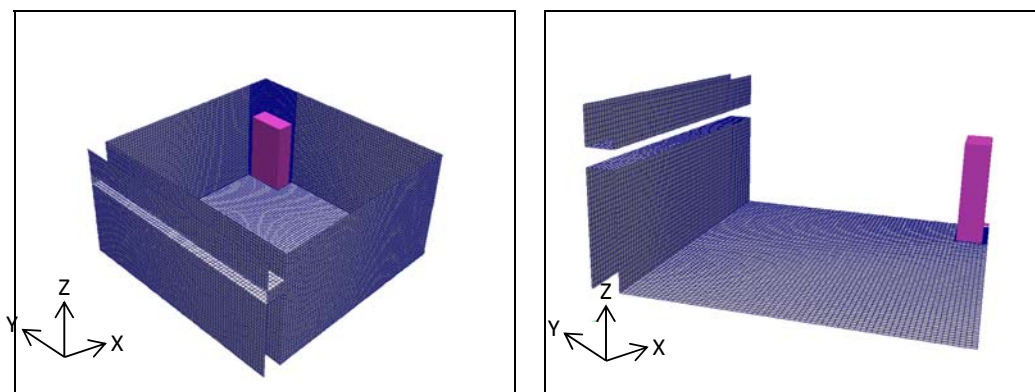


図 2.23 メッシュの分割状況

解析ケース 3 の場合を例に、メッシュ分割の様子を壁面について示している。

左：計算対象領域全体像、右：燃料電池周辺

燃料電池周辺に細かいメッシュを集中させている。

### 【境界条件】

解析にあたっての境界条件設定を表 2.6 に示す。なお、標準  $k-\epsilon$ モデルにおいて解析対象とする乱流エネルギー場  $k$  及び乱流散逸率場  $\epsilon$ については、壁面にて壁関数を適用している。

外部領域については、無風の場合は領域を広く取り、領域限界を全て壁面として設定した上で、出口における不均一を回避できるように遠方上方に流出口を設けている。

外部風有りの場合、計算対象空間をそのまま外部に広げた領域を作成し、図 2.22 に示したように燃料電池の設置側を上流として、上流に一様流速による外部風流入条件、下流側に圧力固定による外部風流出条件を設定した。

表 2.6 水素流動性状解析の境界条件

境界	境界条件
壁面	流速：ゼロ固定（滑り無し）
燃料電池境界	圧力：静水圧勾配のみ
ガス管	温度：断熱
外部領域境界	物質質量：勾配ゼロ（流速ゼロ）
出口	流速：自由流出（逆流時はゼロ固定）
外部風下流出口	圧力：静水圧考慮し値固定 温度：自由流出（逆流時は常温固定） 物質質量：自由流出（逆流時は空気を流入）
ピンホール	流速：流量固定（178.4[L/min]） 圧力：静水圧勾配のみ 温度：常温固定 物質質量：水素体積比 100%
外部風上流流入口	流速：流速（外部風流速） 圧力：静水圧勾配のみ 温度：常温固定 物質質量：空气体積比 100%
ジェット模擬	圧力：静水圧勾配のみ その他の物理量：準備計算から流量保存を考慮してマッピング

表 2.6 中のピンホールの流速固定条件は、ピンホールから漏出した水素ジェットをモデル化して境界条件として与えたことを示す。本解析の解析条件では、水素ジェットを正しく解像して解析を行うためには、ピンホール径である 5[mm]よりも細かいメッシュ分割間隔が必要となる。一方、ピンホール径とガス管内部圧力から見積もった流出速度は 100[m/s]のオーダーとなるため、安定に物質輸送を計算できる Courant 数条件を考慮すると、 $10^{-5}$ [sec]オーダーの極めて短い時間間隔で計算を行う必要があり、600 秒という解析対象時間は非現実的な長さとなってしまふ。

このような困難を回避するため、解析メッシュとしては【計算メッシュ】に示した比較的粗いメッシュを用い、ジェットは細かいメッシュで予め計算しておいた流れ場を境界条件としてマッピングする手法をとった。具体的な手順の模式図を図 2.24 に示す。まず、ジェット付近の流れを漏出開始から 1 秒時点まで 2.5[mm]程度のメッシュを用いて解析し、

安定した時間領域である 0.4 秒以降について平均場を計算した後、十分ジェットが拡散して流速が 5[m/s]程度まで減速した部分を含む直方体状の領域を抽出した。この領域界面における流速や熱及び各物質量フラックスを取得し、粗いメッシュにおける境界条件として与えることとした。ジェット付近の解析は、各解析ケースにおける全体の系のメッシュについて、ジェット付近のみを細かく分割して使用しており、外部風などの条件も粗いメッシュによる長時間の計算と同等に設定している。これは、計算領域形状や外部風によるジェット形状に対する影響を考慮するためである。

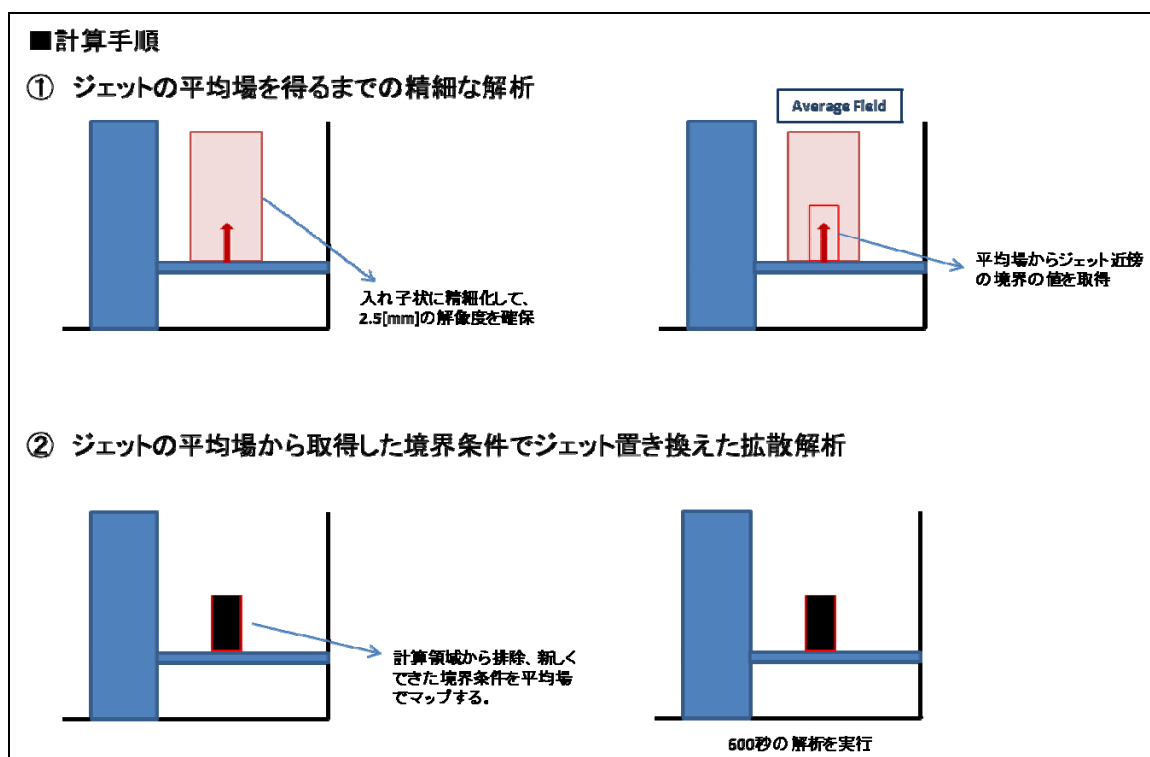


図 2.24 水素ジェットのモデル化

## 【計算結果】

主要な計算結果について、各ケースの差異に関する考察と関連させながら示す。

### (1) 時系列変化

図 2.25 及び図 2.26 に、解析ケース 3 の場合について、水素漏洩開始から 500 秒までの水素濃度及び流速ベクトルの時系列を示した。水素濃度については、漏洩から時間の経過に従って天井に水素が蓄積していき、出口換気口上部に存在する梁を超える高さまで水素が蓄積してから外部に流出を開始している。一方、流速ベクトルからは、100 秒の時点で漏洩水素の浮上に伴うと見られる居室内全域の緩やかな対流が確認できる。この流れ場は弱く、以降の時刻でも概ね安定しており、水素は浮力により居室上部に蓄積しながら拡散していくことがわかる。攪拌による濃度の広がり弱いものと考えられる。

蓄積した水素は比較的拡散しやすく、水素が流出を開始した時点での居室上部の水素濃度分布は爆発下限界である 4%を超えていないため、この計算の条件下では爆発の危険性は少ないものと見られる。一方、計算結果は梁などの上部構造に従って容易に水素が蓄積しうることを示しており、水素漏出量などによっては爆発の危険性が生じる可能性も考えられる。また、このような危険を回避するには、居室上方の換気状態に注意する必要があることも示唆される。

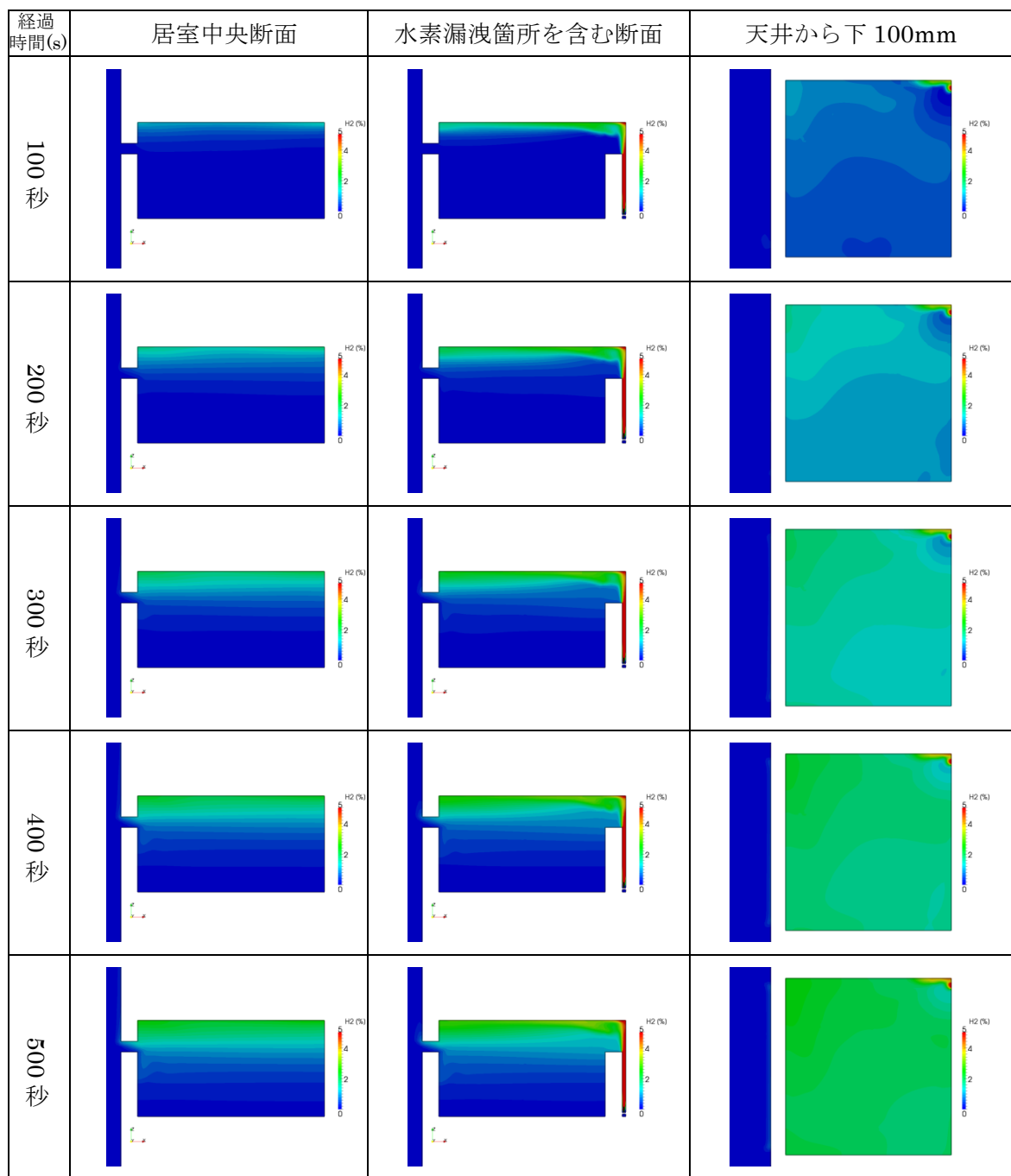


図 2.25 解析ケース 3 (居室 B +自然換気口、外部風無し) の水素濃度分布 (時系列)

居室中央及び水素漏洩箇所を含む鉛直断面と、天井から 100mm の水平断面について、漏洩開始から 500 秒まで 100 秒おきに示した。

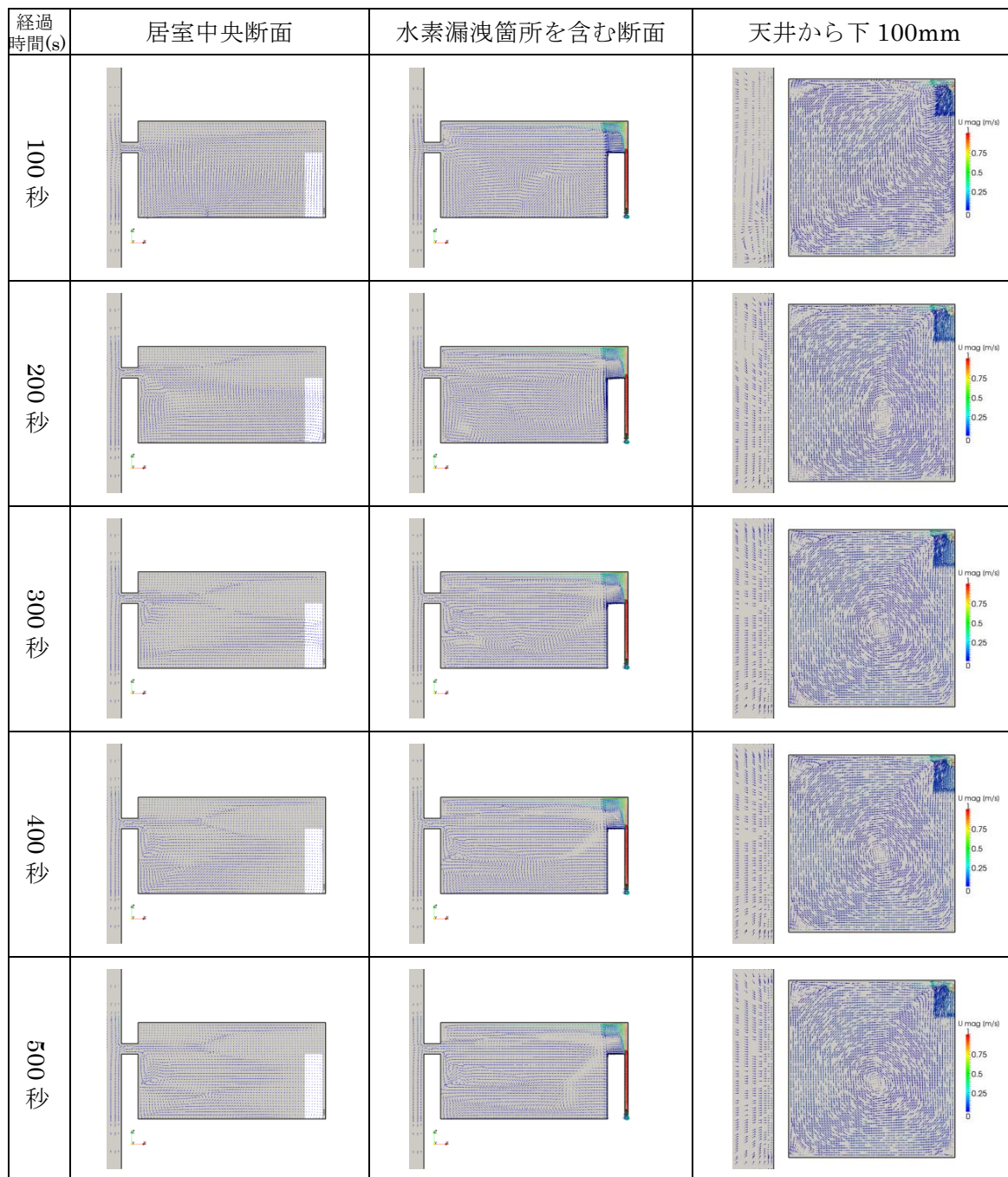


図 2.26 解析ケース 3 (居室 B + 自然換気口、外部風無し) の流速ベクトル分布 (時系列)

居室中央及び水素漏洩箇所を含む鉛直断面と、天井から 100mm の水平断面について、漏洩開始から 500 秒まで 100 秒おきに示した。



(2) 計算対象領域の差異

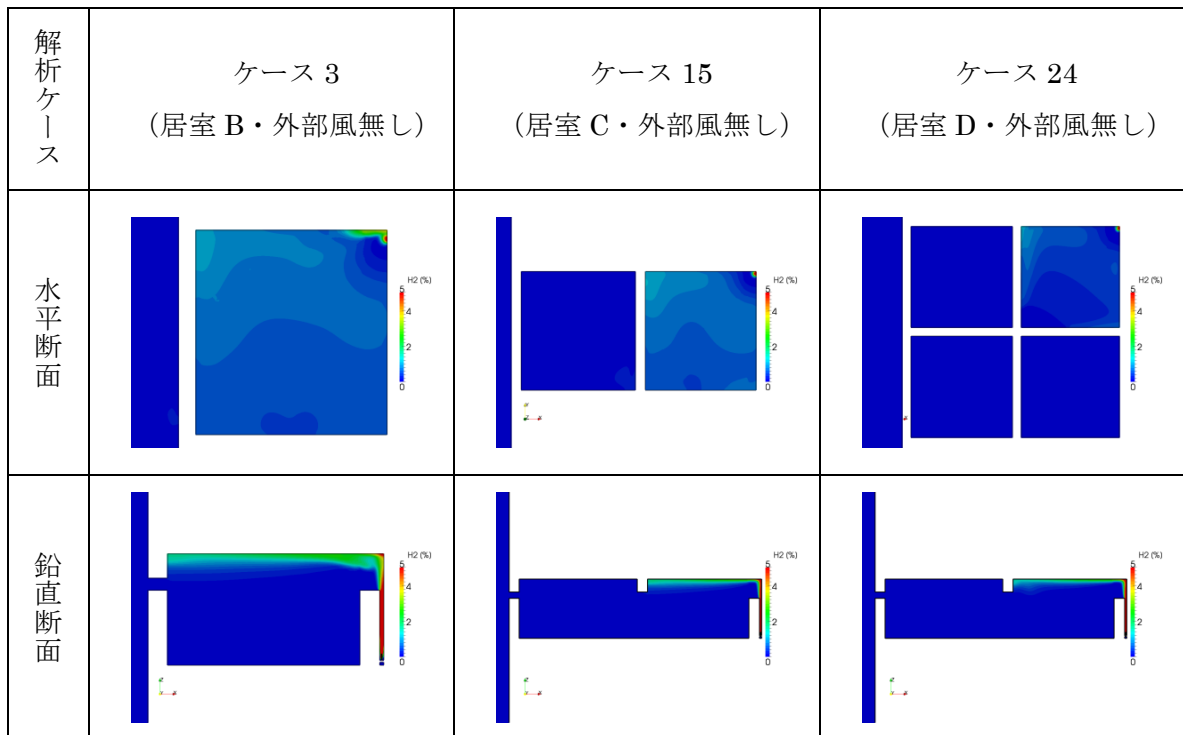


図 2.27 計算対象領域の差異

水平断面：天井下 100mm 鉛直断面：ピンホールを含む断面  
100 秒経過時点での濃度分布を示す。

計算対象領域による差異を確認するために、

- ・ ケース 3 (居室 B + 自然換気口、外部風無し)
- ・ ケース 15 (居室 C + 自然換気口、外部風無し)
- ・ ケース 24 (居室 D + 自然換気口、外部風無し)

を比較した (図 2.27)。この場合、無風であるために拡散状況そのものは同様であり、梁の存在によって水素の移動が阻害される影響が大きい。実際、形状ケース C の場合は水平断面で見て右側の空間に、形状ケース D の場合は右上の空間に水素が蓄積されている。従って、梁で区切られた区画のうち水素漏洩箇所に近い部分へまず水素が溜まり、梁を超える高さまで水素が蓄積してはじめて外部へ流出することが可能となるものと考えられる。外部風などが存在する場合は異なった影響が考えられるため、該当する項目で引き続き議論する。

(3) 開口部条件

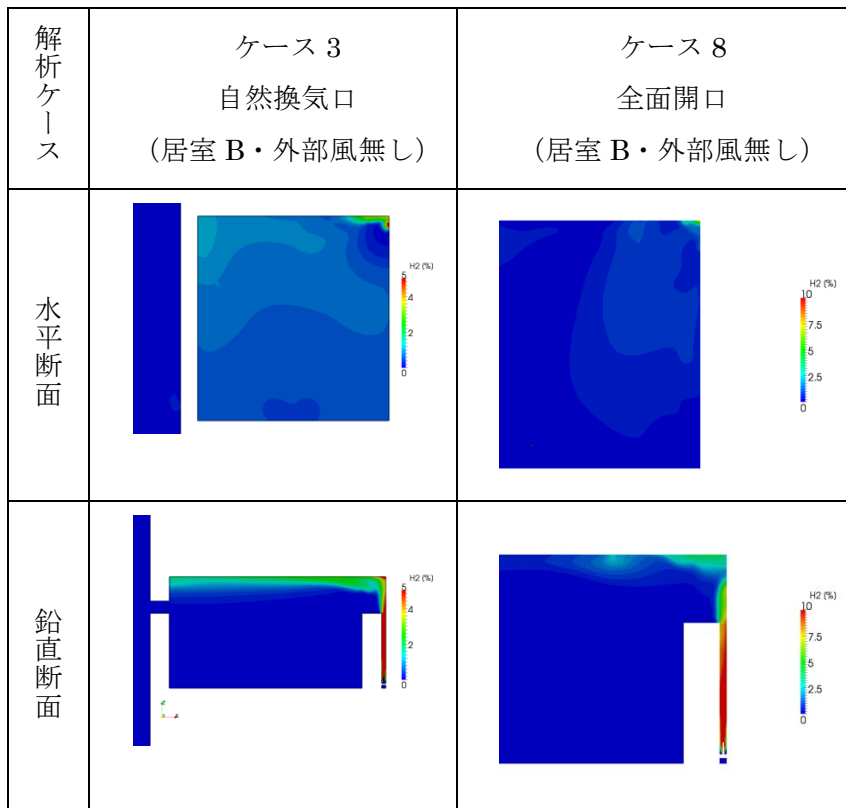


図 2.28 開口部条件の差異

水平断面：天井下 100mm 鉛直断面：ピンホールを含む断面  
100 秒経過時点での濃度分布を示す。

開口部条件による差異を確認するために、

- ・ ケース 3 (居室 B + 自然換気口、外部風無し)
- ・ ケース 8 (居室 B + 全面開口、外部風無し)

を比較した (図 2.28)。水素は浮力により居室内上方に蓄積しており、梁によって流出を妨げられている。外部風が存在せず、開口による居室内の流れ場に対する影響は限定的であり、開口条件による水素濃度分布への影響は小さいものと見られる。

(4) ドライエリア

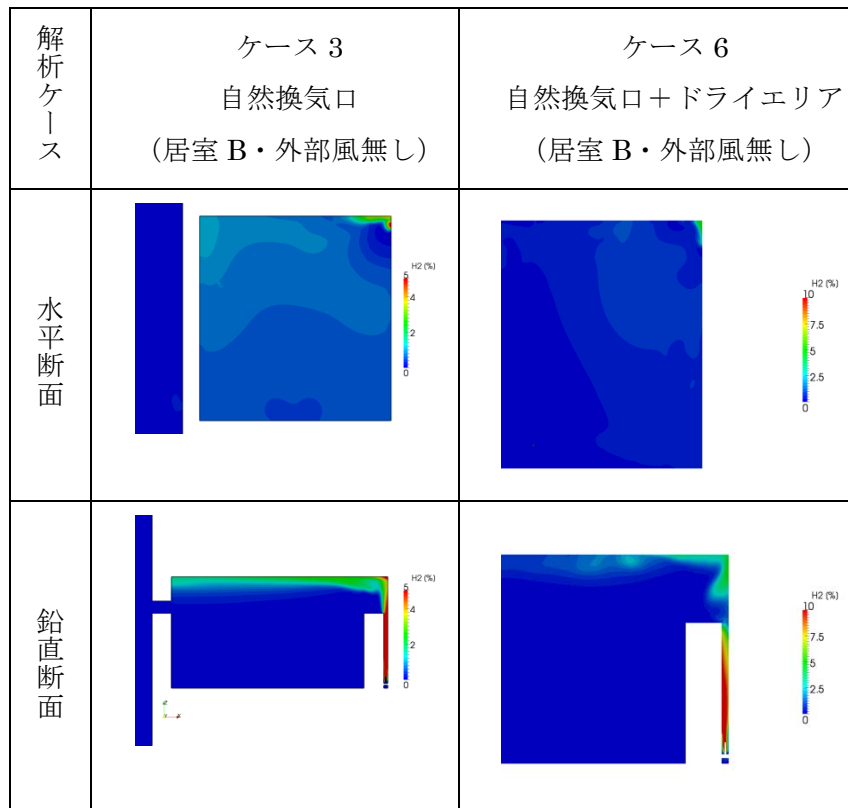


図 2.29 ドライエリアによる差異

水平断面：天井下 100mm 鉛直断面：ピンホールを含む断面  
100 秒経過時点での濃度分布を示す。

ドライエリアによる差異を確認するために、

- ・ ケース 3 (居室 B + 自然換気口、外部風無し)
- ・ ケース 6 (居室 B + 自然換気口 + ドライエリア、外部風無し)

を比較した (図 2.29)。ドライエリアの方が外部への流出による気流が弱く、一様であり、水素の輸送は主に拡散によって行われる。

(5) 外部風の有無

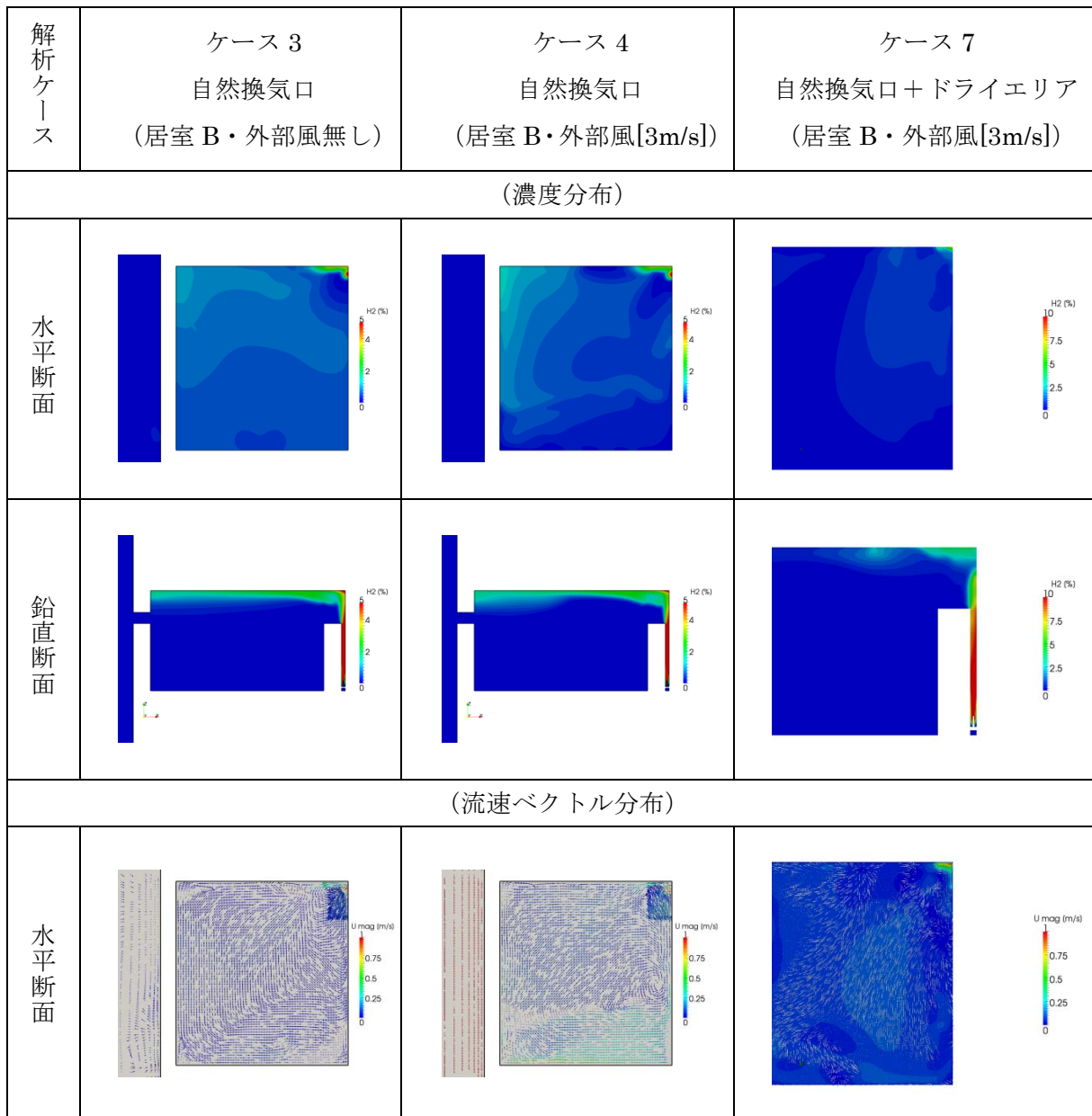


図 2.30 外部風による差異（自然換気口の場合）

水平断面：天井下 100mm 鉛直断面：ピンホールを含む断面

100 秒経過時点での濃度分布と流速ベクトル分布を示す。

外部風による差異を確認するために、

- ・ ケース 3（居室 B + 自然換気口、外部風無し）
- ・ ケース 4（居室 B + 自然換気口、外部風 3[m/s]）
- ・ ケース 7（居室 B + 自然換気口 + ドライエリア、外部風 3[m/s]）

を比較した（図 2.30）。外部風が存在する場合、計算領域内を循環するような流れが生じており、これに従って水素が壁に沿う形で輸送されている。無風の場合と比較した居室内の水素の分布としては、僅かに壁付近で濃くなる傾向が見られるものの、梁によって外部への流出が阻害され、居室上方に水素が蓄積する点では顕著な差は見られない。一方、ドライエリアが存在する場合、外部風による影響は限定的である。

図 2.31 に示すように、全面開口の場合は外部風の影響が特に顕著であり、ケース 9 では大きく空間内を循環する渦が生成されていることが確認できる。

この流れによって、水素は燃料電池と壁の間を流れる気流によって輸送されており、燃料電池の開口部側側面へ回り込むような流れも見られる。このため、天井へ到達することなく外部へ流出している。一部は内部へ再循環する部分も確認できる。

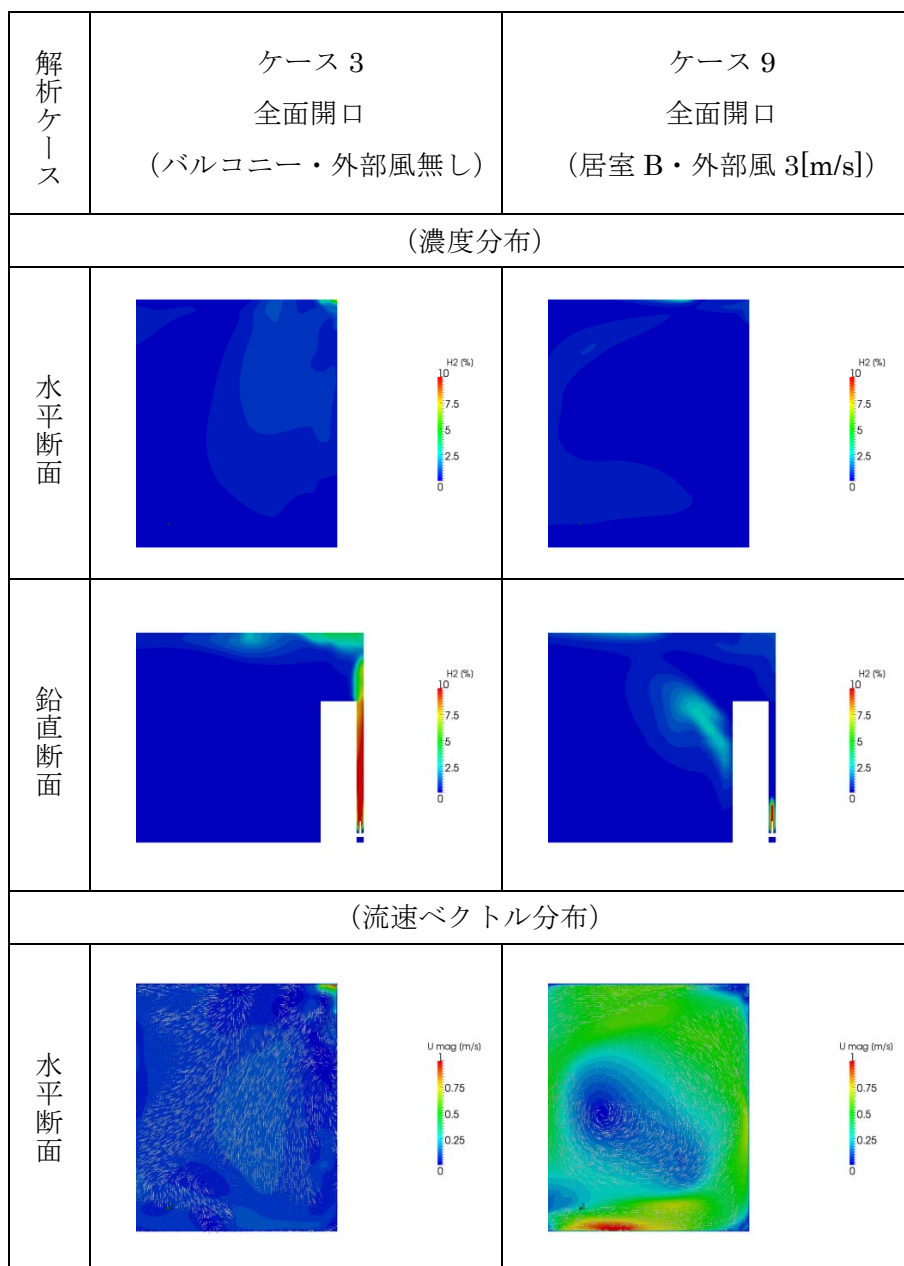


図 2.31 外部風による差異（全面開口の場合）

水平断面：天井下 100mm 鉛直断面：ピンホールを含む断面

100 秒経過時点での濃度分布と流速ベクトル分布を示す。

【既往の水素爆発実験からみた考察】

過去に行われた代表的な水素爆発実験に関する文献調査を実施し、9 つの実験（調査した文献全 17 件には同じ実験に関するものが含まれる）から水素爆発時の被害想定に関する知見を得た。

いずれも屋外での水素爆発を対象としており、水素空気の混合気体積、水素濃度等をパラメータとした実験を行っており、爆風圧や火炎寸法等を爆発の程度として表す指標としており、これらの指標が建材や建具、人体へ与える影響を把握するための比較資料となる。

ここで選定した9つの実験では、水素濃度は30%を代表値とするものが多いため、本解析で求められた結果とは直接比較することはできないが、水素が蓄積すれば起こりうる爆発であると推測される。

一例として、混合気の水素濃度を30%とし、混合気体積を9.4m<sup>3</sup>、75m<sup>3</sup>、200m<sup>3</sup>とした爆発実験（産総研）では、過圧力は最大で15kPa程度になっており、これ以上の圧力では構造上重大な被害となることが記されている。

低濃度での爆発実験に関する論文等の文献は見あたらなかったが、閉空間では距離によらず過圧力は減衰しにくいとのトンネルでの実験結果もあるため、居室内や廊下等で水素が爆発する場合にも同程度の過圧力がかかるものと推測される。一般に1kPa程度でガラスが破損するとされており、高濃度の水素が蓄積する前に漏洩検知、供給遮断がやはり有効な対策となると考えられる。

なお、爆風圧が建築物の構造体、建具、設備等に与える影響として平成6年石油コンビナートの防災アセスメント策定指針（消防庁特殊災害室）<sup>4)</sup>からの一部抜粋を次に示す。

影響	爆風圧[kPa]
一般的にガラスが破損	1.03
構造上の小被害が限定的に発生する	2.70
家屋の一部が破壊され、居住に不適當となる	6.90
鉄筋の入っていないコンクリートや軽量ブロックの壁が壊れる	13.8～20.7
これ以上の圧力では重大な構造上の被害を生ずる	15.9
家屋がほぼ完全に崩壊する	34.5～48.2

## 2.2.5 屋外空間（バルコニー等）で漏洩した水素の拡散性状

### (1) 目的

建物バルコニー等の屋外空間に敷設されたガス配管から水素ガスが漏洩した場合を想定し、水素ガスの拡散性状をもとにした漏洩検知対策を検討することを目的として、数値計算による検討を行う。

### (2) 解析手法

解析手法は2.2.4に示したものと同様であり、解析対象空間は2.2.4に示したとおりである。計算メッシュは図2.32に示すように燃料電池周辺を細かくしている。

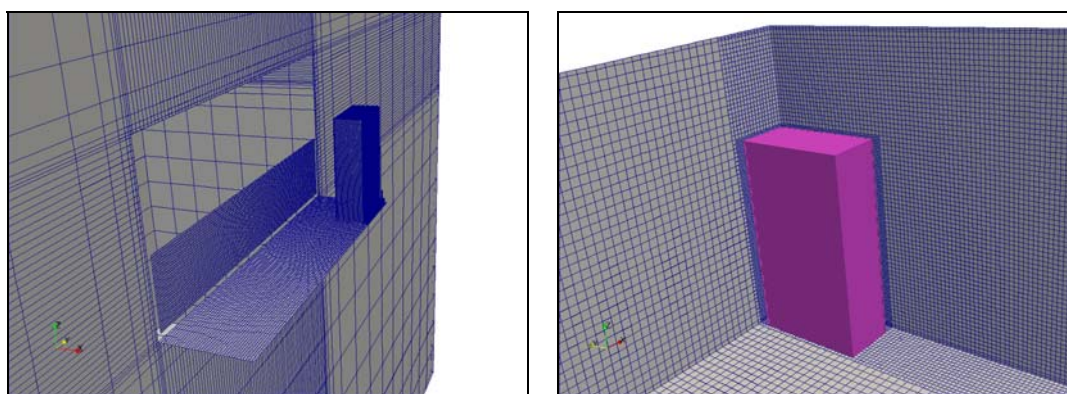


図 2.32 計算メッシュの分割

### (3) 解析結果

図2.33はバルコニーでの水素漏洩時における水素漏洩部を含む鉛直断面の水素濃度分布と爆発下限界である4%濃度となる等値面を外部風の有無で比較したものである。

外部風がない場合、ピンホールからの水素ジェットはその間欠性により水素拡散性状は非定常性をもちながらも、天井面に衝突後外部へと流出している。外部風がある場合はキャビティ流れにより上流側壁面に押しつけられつつも天井面下に薄い水素の層を形成している。いずれにせよ、天井面下にごく薄い水素の層を形成するのみで外部へ流出するためバルコニーでの水素漏洩時の危険性は小さいものと考えられる。



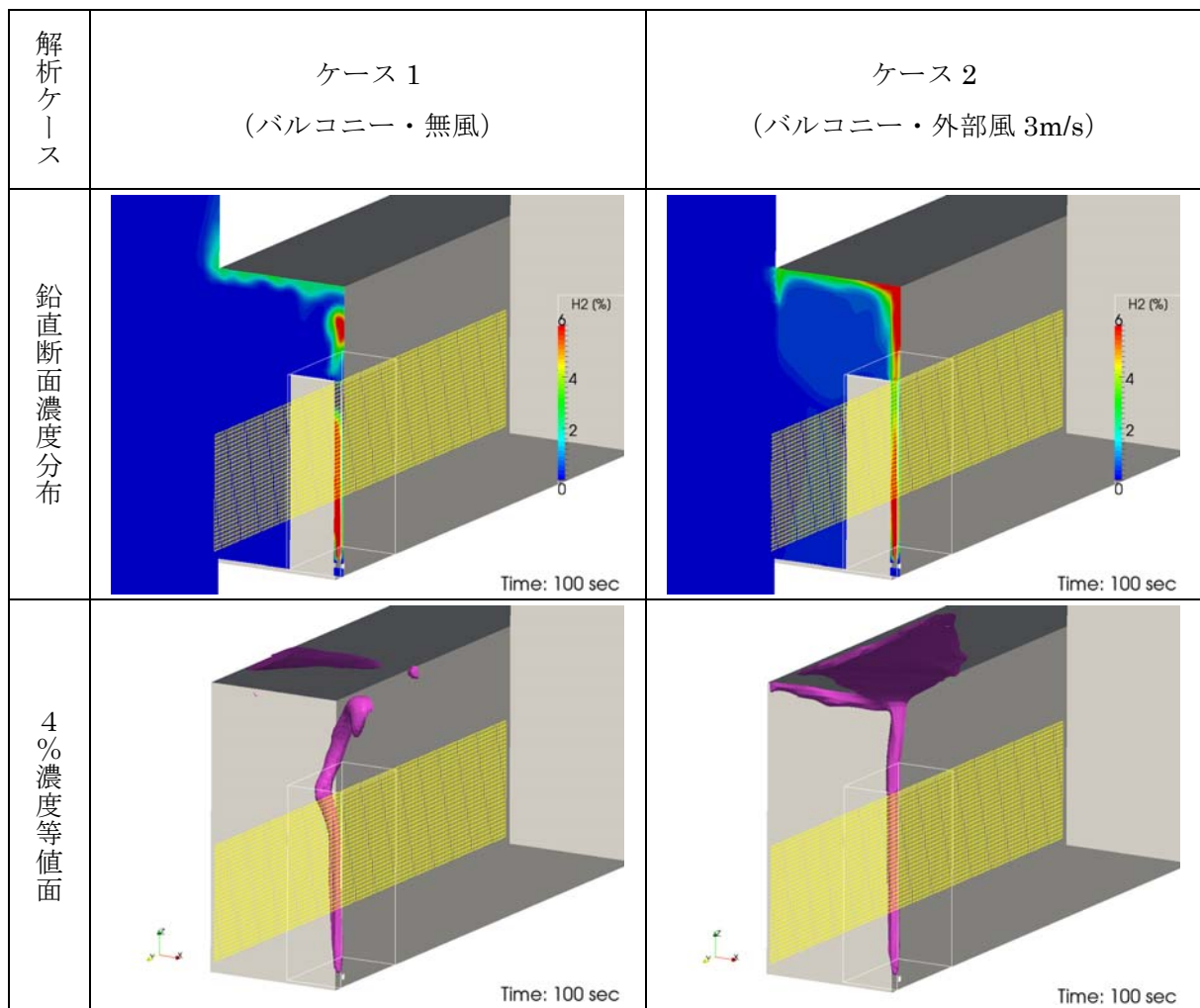


図 2.33 外部風による差異 (バルコニーの場合)

鉛直断面：ピンホールを含む断面

## 2.2.6 建築基礎を貫通するガス配管の耐震性能

### (1) 実験の目的

低層及び中層建物を想定した基礎及びガス配管を対象に、地盤と基礎の揺れによる挙動の差異が配管に及ぼす影響を把握し配管への要求事項を検討することを目的として、地中埋設ガス管が建物基礎部分を貫通する部分の加震実験を実施した。

特に、本実験では、実物大規模に近い試験体を構築し、振動実験によってガス配管の有意性について実験的に検証を行ったものである。本実験に関する主な検討項目は以下の通りであった。

※ガス（水素）配管の動的挙動

- ①配管口径の違いによる確認
- ②配管経路の違いによる確認
- ③配管深度の違いによる確認
- ④戸建用配管および集合住宅用配管の上記①～③における確認

### (2) 実験方法

#### 1) 実験装置

実験装置は、独立行政法人建築研究所 建築基礎・地盤実験棟屋内ピットに常設されている。本装置は、せん断土槽（17段）、油圧アクチュエータ、土砂自動搬送装置および計測システムからなり、せん断フレーム内に長さ10m、深さ5m、幅3.6mの地盤を作製し、地震時の地盤の振動を再現することができる。

#### 2) 試験体

##### I) 試験ケースおよび模型地盤の概要

試験ケース（仕様1、2）および模型地盤の概要を図2.34に示す。

##### II) 盛土材料

盛土材料は、栃木県産の日光珪砂6号を用いた。本材料は、比較的粒径のそろった材料である。

##### III) 試験体の作製

#### ① 地盤の作成

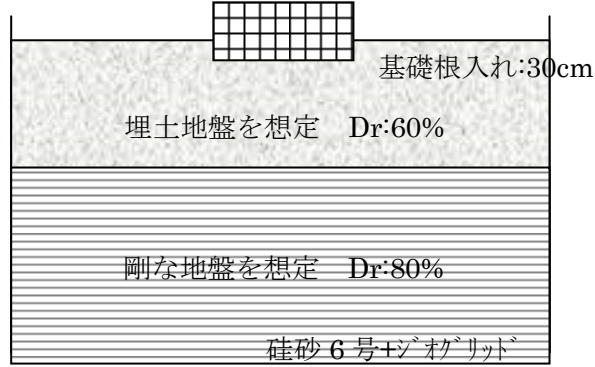
乾燥砂の撒き出し厚さを25cm程度として均一に敷き均し、プレートタンパーにより締固めた（図2.35）。盛土施工時の土の締固め程度は転圧回数8回、相対密度80%程度（0～3.3m:深度方向50cmピッチ各層全面にジオグリッドを敷設）および転圧回数6回、60%程度（3.3～4.8m）とし、コアカッター法等により各層毎に密度測定を実施した。また、併せて盛土地盤の均一性を確認した。さらに、盛土終了後に盛土地盤の地盤強度を確認す

るためにスウェーデン式サウンディングにより試験を行った。

盛土施工に係わる調査・試験の内容を表 2.7 に、試験方法の概要を図 2.36 に試験結果を図 2.37 に示す。

仕様 1：戸建用ガス配管

基礎模型 (建物荷重  $2t/m^2$ )



仕様 2：集合住宅用ガス配管

基礎模型 (建物荷重  $6t/m^2$ )

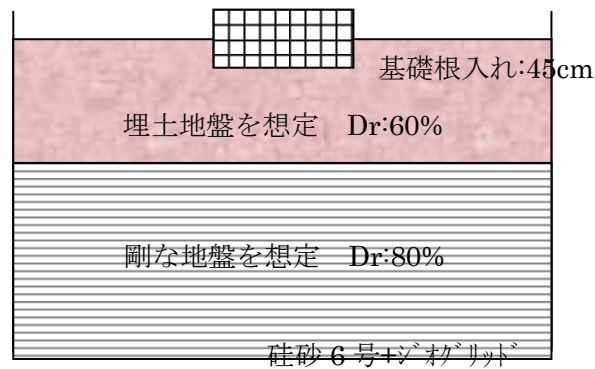


図 2.34 試験ケースおよび模型地盤の概要

表 2.7 盛土施工に係わる調査・試験の内容

項目	目的	数量	備考
密度測定	盛土地盤の密度を確認し、作製地盤の締固め度とばらつきを把握する。	3点×3層 (@0.5m)	コアカッター法
スウェーデン式サウンディング	作製した盛土地盤の地盤強度 ( $N_{sw}, N_c$ 値)に関する情報を収集する。	1点	—

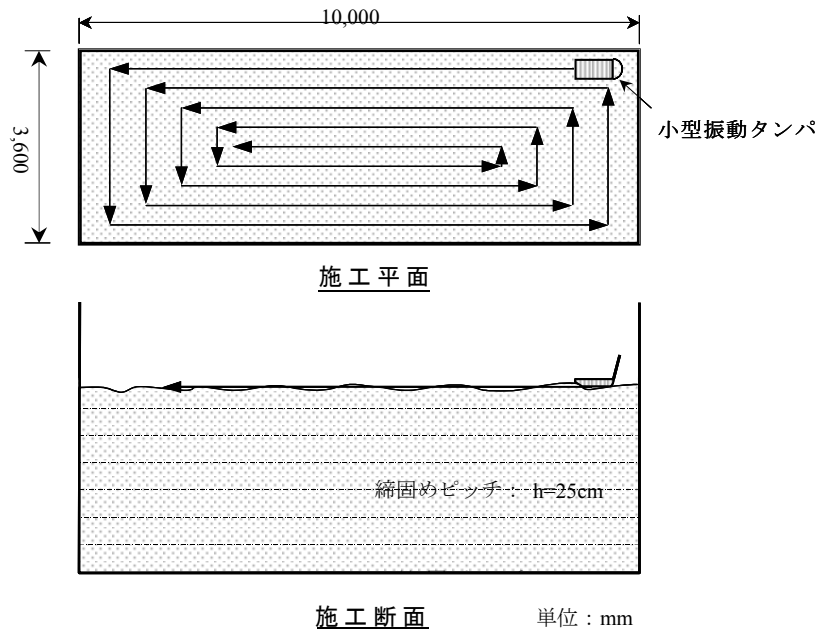


図 2.35 盛土の締固め方法

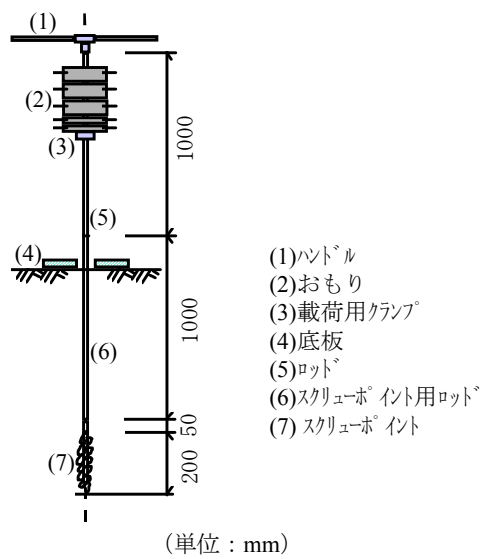
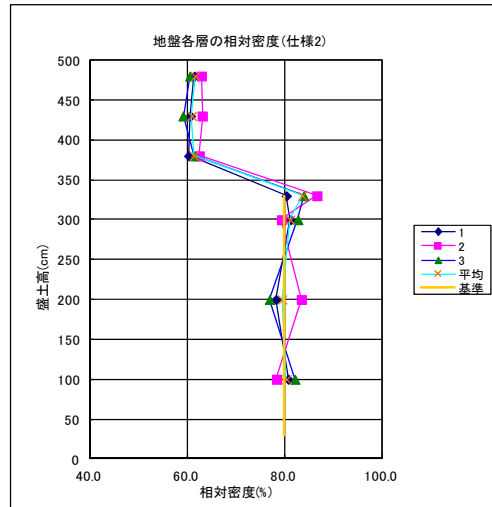
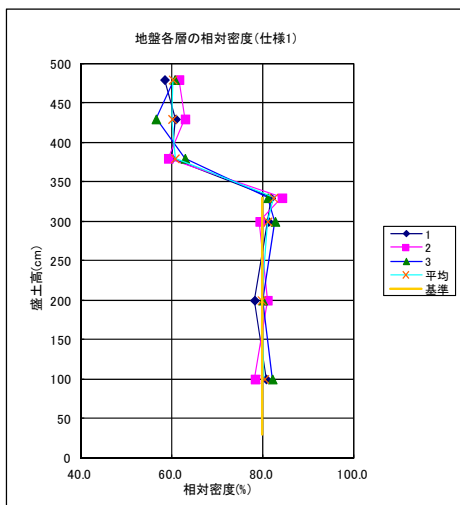
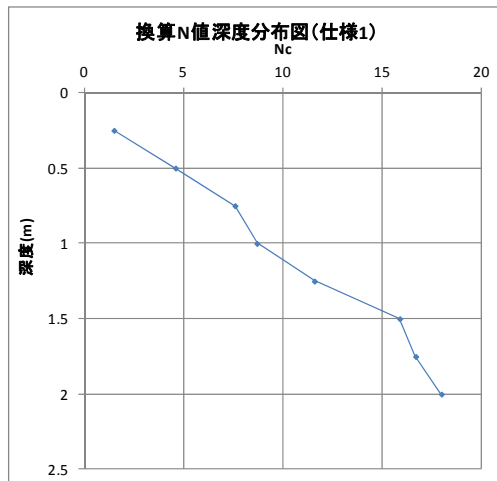
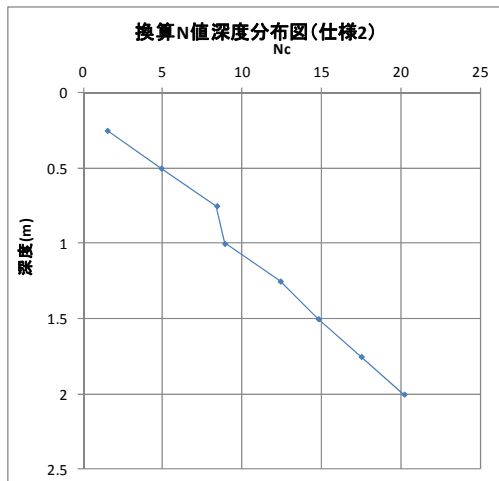


図 2.36 スウェーデン式サウンディングの概要



地盤各層の相対密度



スウェーデン式サウンディング試験結果

図 2.37 地盤試験結果

## ② 建築基礎模型の製作

建築基礎は仕様1、仕様2ともにべた基礎を模擬した図2.38に示す寸法および形状のものとした。また、基礎模型上部の中央部にH型鋼フレームを固定し、仕様1では2ton/m<sup>2</sup>、仕様2では6ton/m<sup>2</sup>の錘を積載させ、加振時に建築基礎との位相のずれがないようPC鋼棒で緊結した。図2.39に示すように配筋し、配管貫通部に設けたスリーブ位置には配筋しないものとした。また、仕様1においては、マイコンメータを固定するためのアングルフレーム及び鉄板をアンカーボルトにて建築基礎に固定した。なお、建築基礎模型は底面を仕様1では30cm、仕様2では45cmの深さまで地盤に根入れし、大型せん断土槽の中央に配置・設置した。

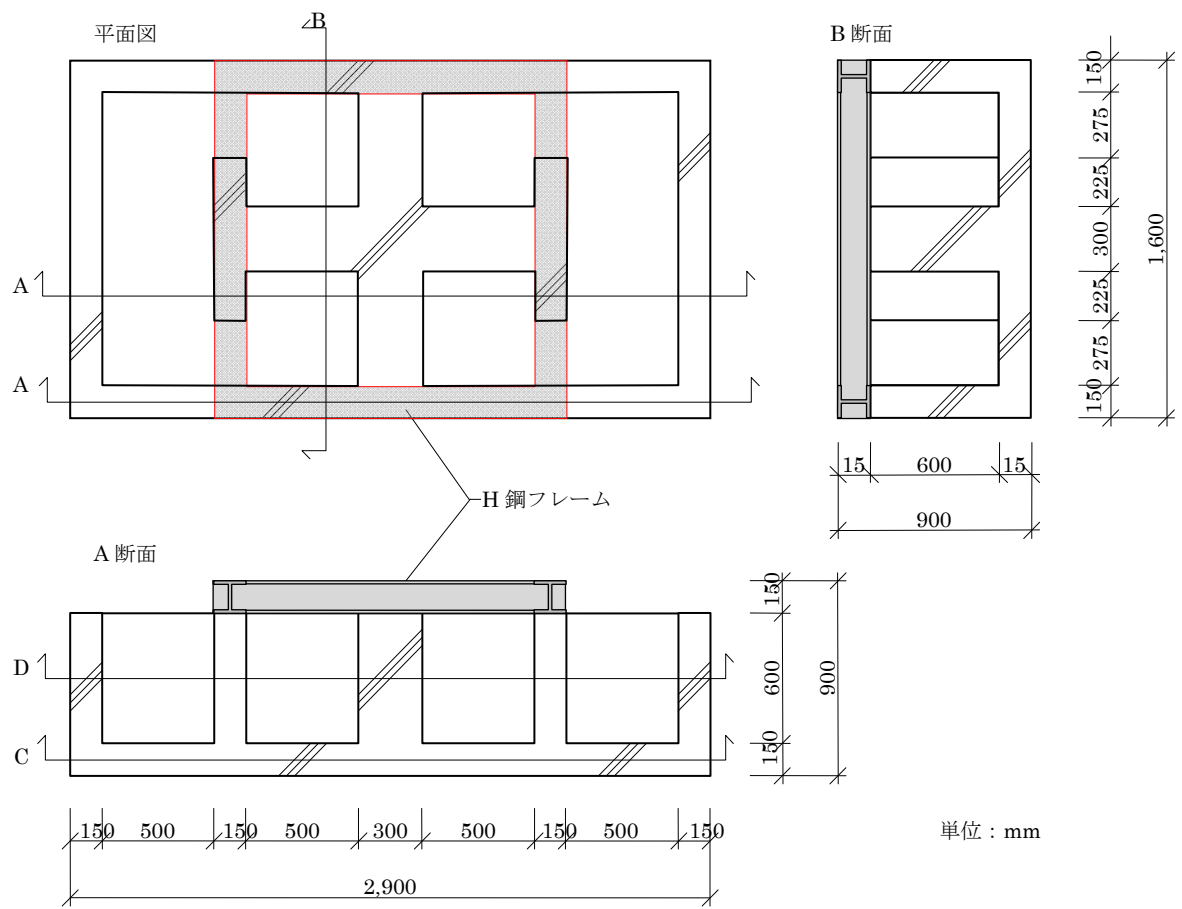


図 2.38 建築基礎

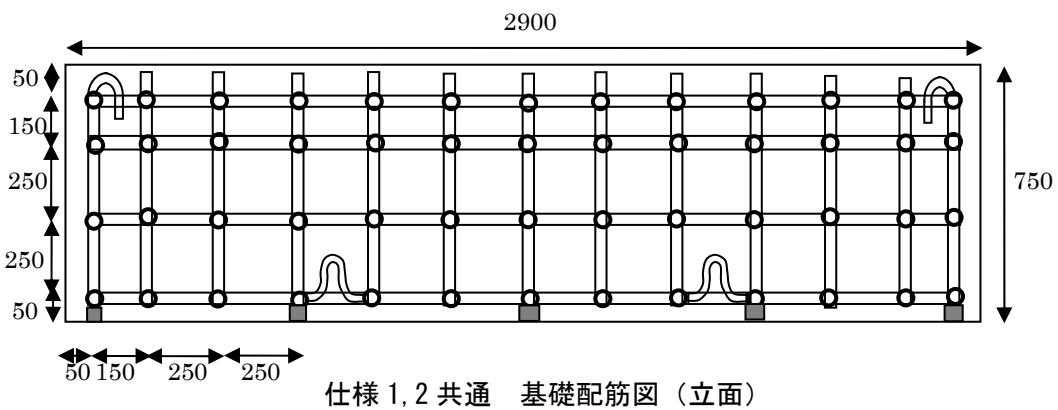
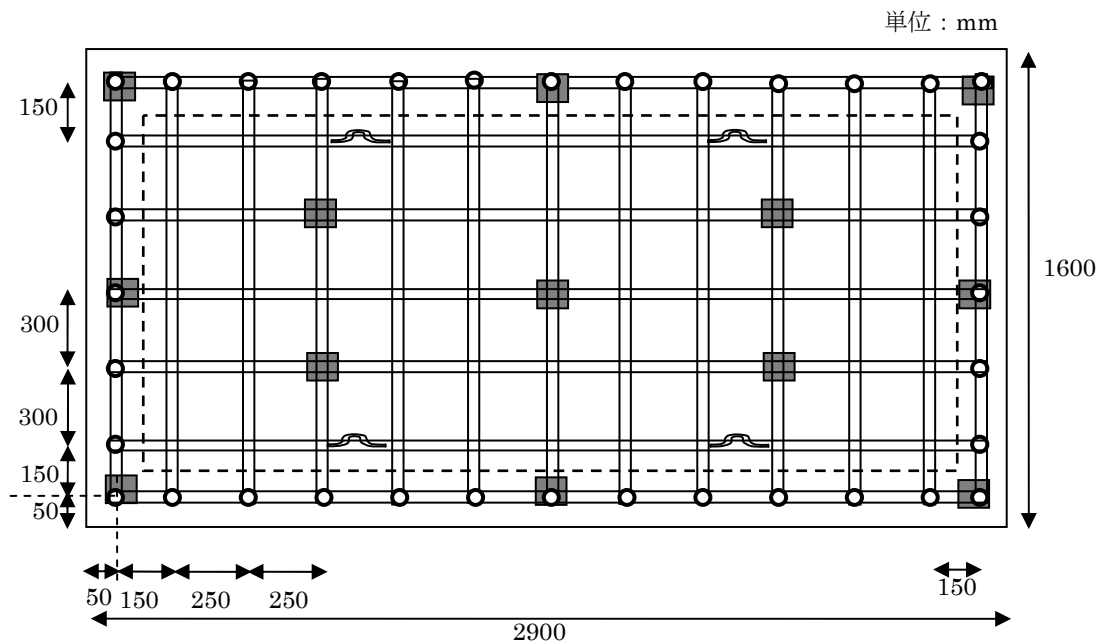


図 2.39 建築基礎配筋図

### ③ ガス配管

図2.40にガス配管図を示す。ガス配管は仕様1、仕様2ともに10系統とし、表2.8に示す通りの材質、径のものを使用した。ガス配管の地中側端部は閉塞し深さ1200mm（8系統）および1800mm（2系統）を地盤外周部に設けたアングルフレームに緊結し、地上部に吐出する配管は建築基礎に設けたスリーブに貫通させ、地上部の貫通部はモルタル、埋設部の貫通部には防水エポキシ樹脂にて埋め戻した。各配管基礎側終端部には圧力計（管内圧力測定のため）を取り付け、各配管系統にはエアを2kPaの圧力で充填し、バルブを閉じた状態

として加振した。

仕様1では、建築基礎を貫通する8系統に最大流量 $2.5\text{m}^3/\text{h}$ の膜式マイコンメータ（あるいは寸法及び重量が等しい工作物）を接続し、そのうち4系統は地中にて基礎貫通、4系統は配管をアングルフレームに留め付けた鉄板に固定した上で地上にて基礎貫通させるものとした。なお、ガス配管のエルボ、マイコンメータ、その他に関する詳細な仕様は「供給管・内管指針（設計編）」（一般社団法人 日本ガス協会編）<sup>5)</sup>によった。

表 2.8 配管仕様

仕様 1

	埋設深さ (mm)	埋設部	地上部	マイコンメータ 取り付け方法
配管(1)(2)	1200	25A PE 管	25A 亜鉛メッキ鋼管	自立式
配管(3)(4)	1200	15A 亜鉛メッキ鋼管	15A 亜鉛メッキ鋼管	自立式
配管(5)(6)	1200	25A PE 管	25A 亜鉛メッキ鋼管	壁に固定
配管(7)(8)	1200	15A 亜鉛メッキ鋼管	15A 亜鉛メッキ鋼管	壁に固定
配管(9)	1800	25A PE 管	-	-
配管(10)	1800	15A 亜鉛メッキ鋼管	-	-

仕様 2

	埋設深さ (mm)	埋設部	地上部
配管(1)(2)	1200	75A PE 管	80A 亜鉛メッキ鋼管
配管(3)(4)	1200	50A PE 管	50A 亜鉛メッキ鋼管
配管(5)(6)	1200	75A PE 管	80A 亜鉛メッキ鋼管
配管(7)(8)	1200	15A 亜鉛メッキ鋼管	15A 亜鉛メッキ鋼管
配管(9)	1800	25A 亜鉛メッキ鋼管	-
配管(10)	1800	50A 亜鉛メッキ鋼管	-



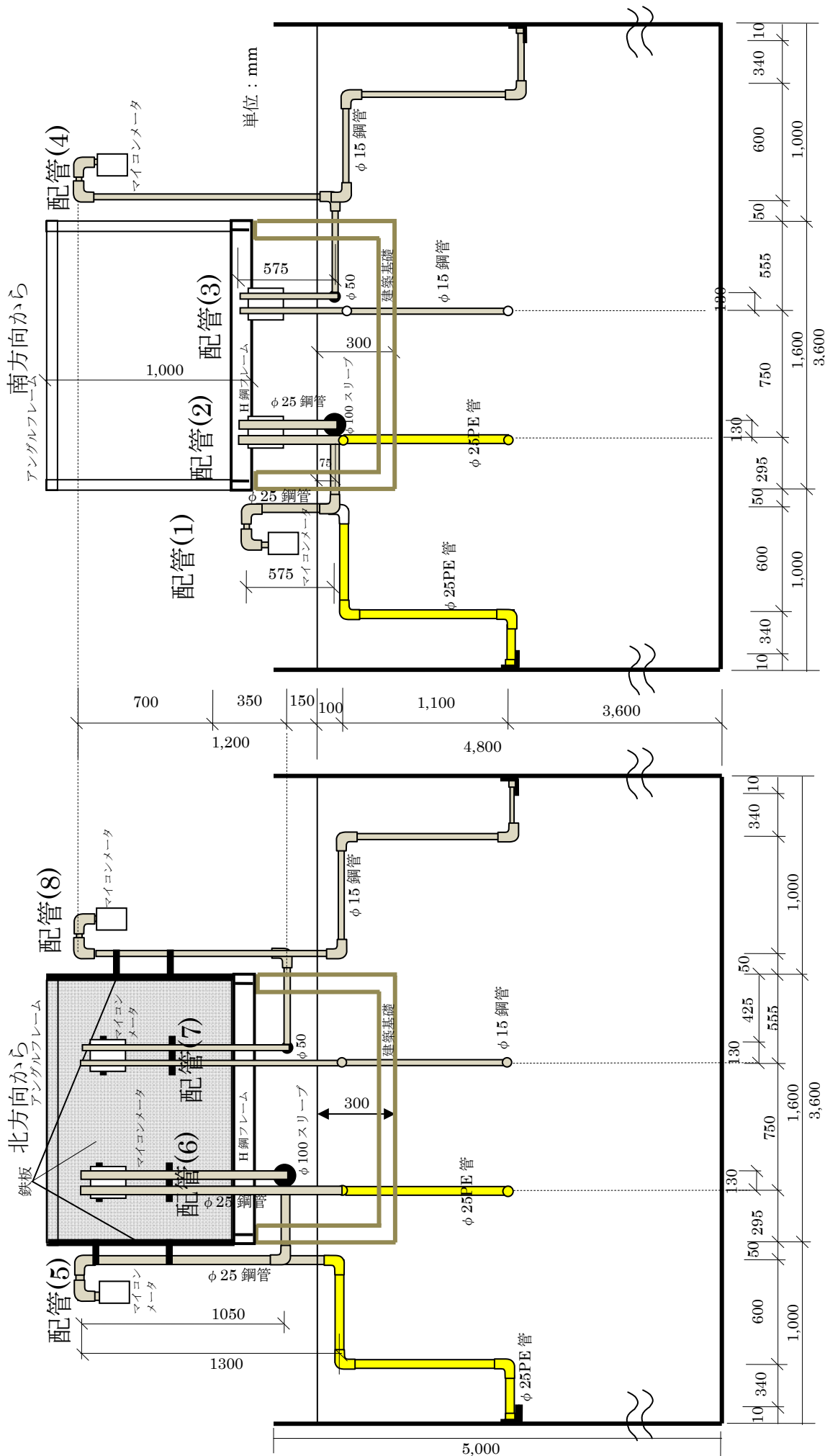


図 2.40(1) ガス配管図 仕様 1(1/6)

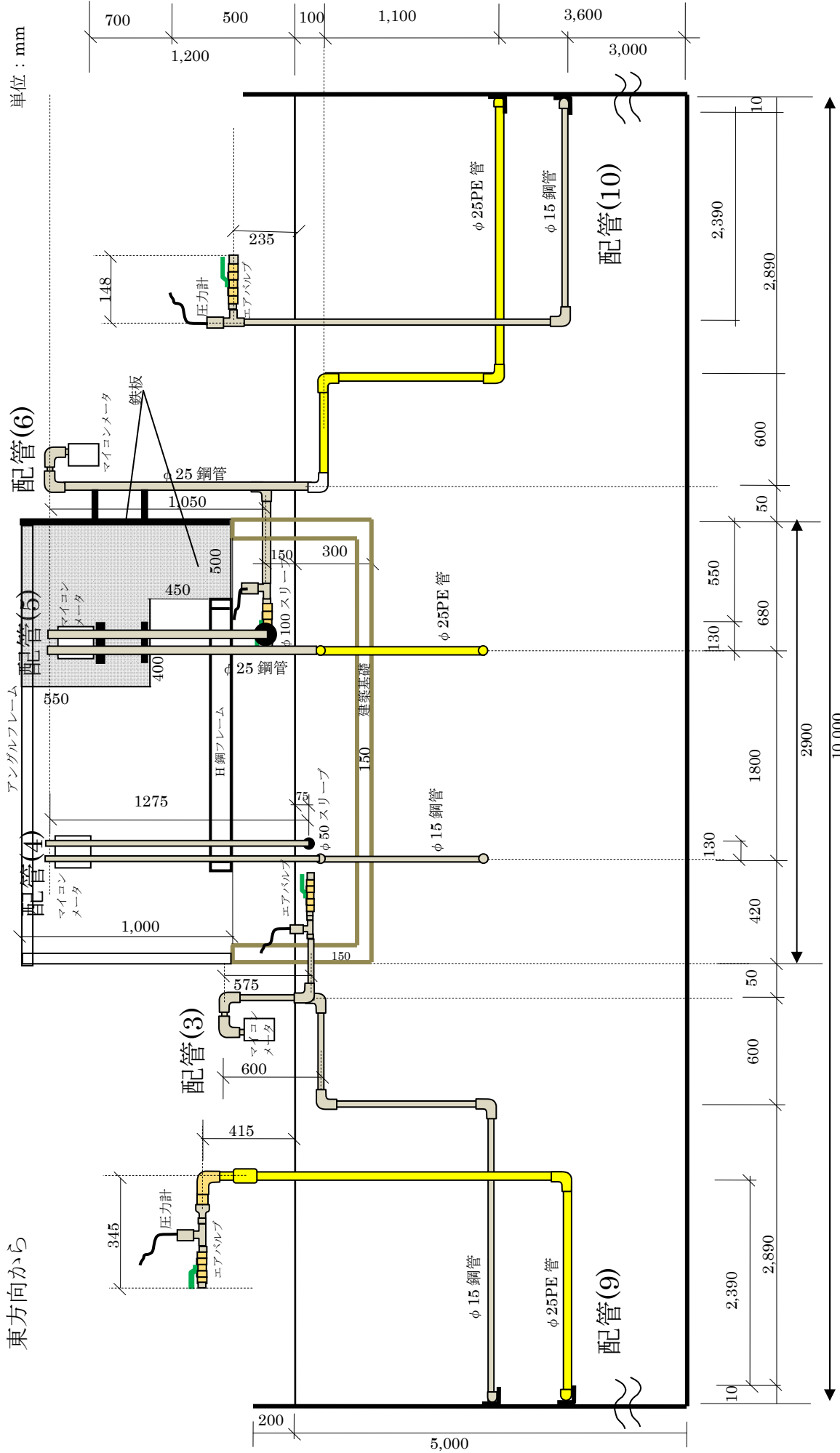


図 2.40 (2) ガス配管図 仕様 1 (2/6)

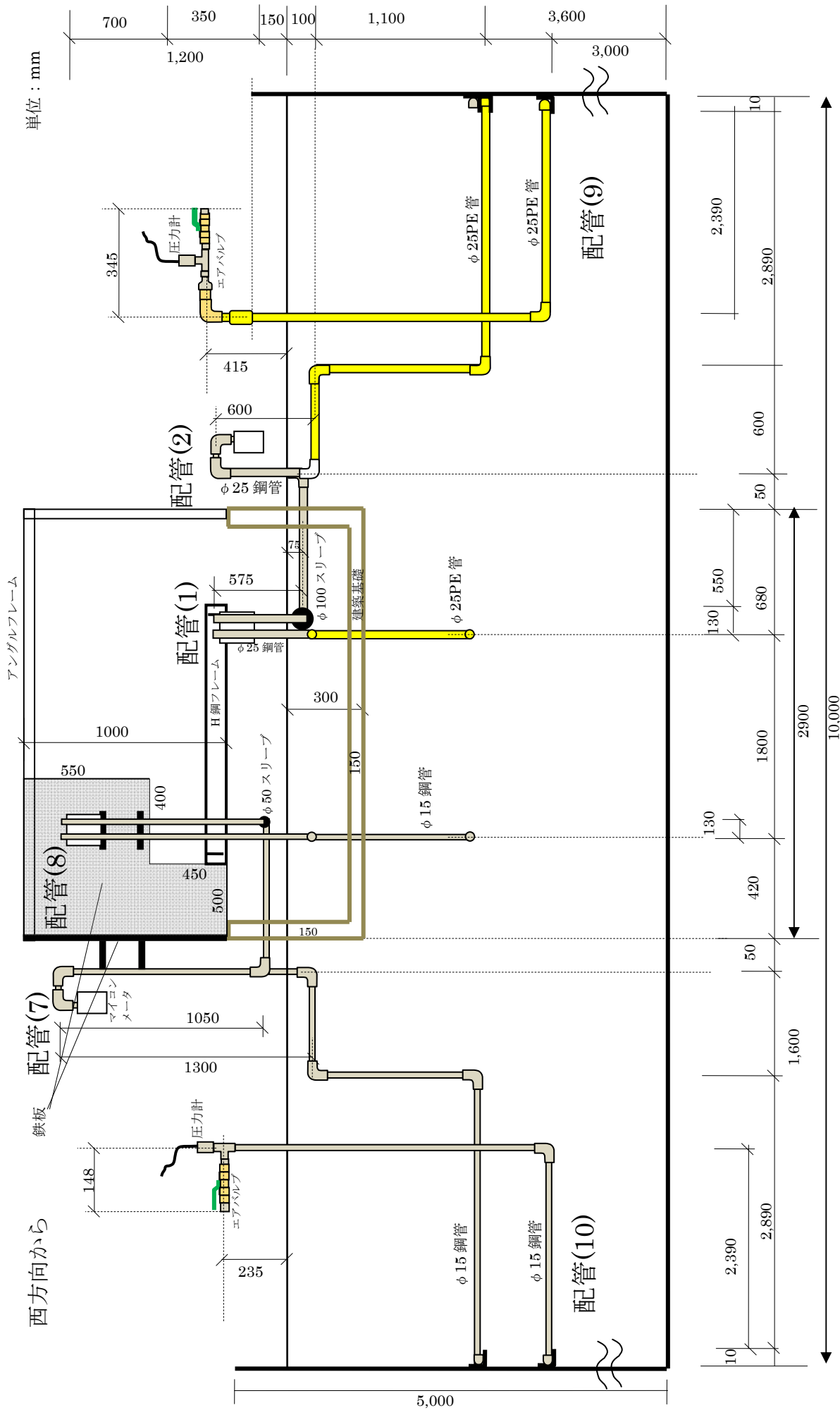


図 2.40 (3) ガス配管図 仕様 1 (3/6)

北方向から

南方向から

単位：mm

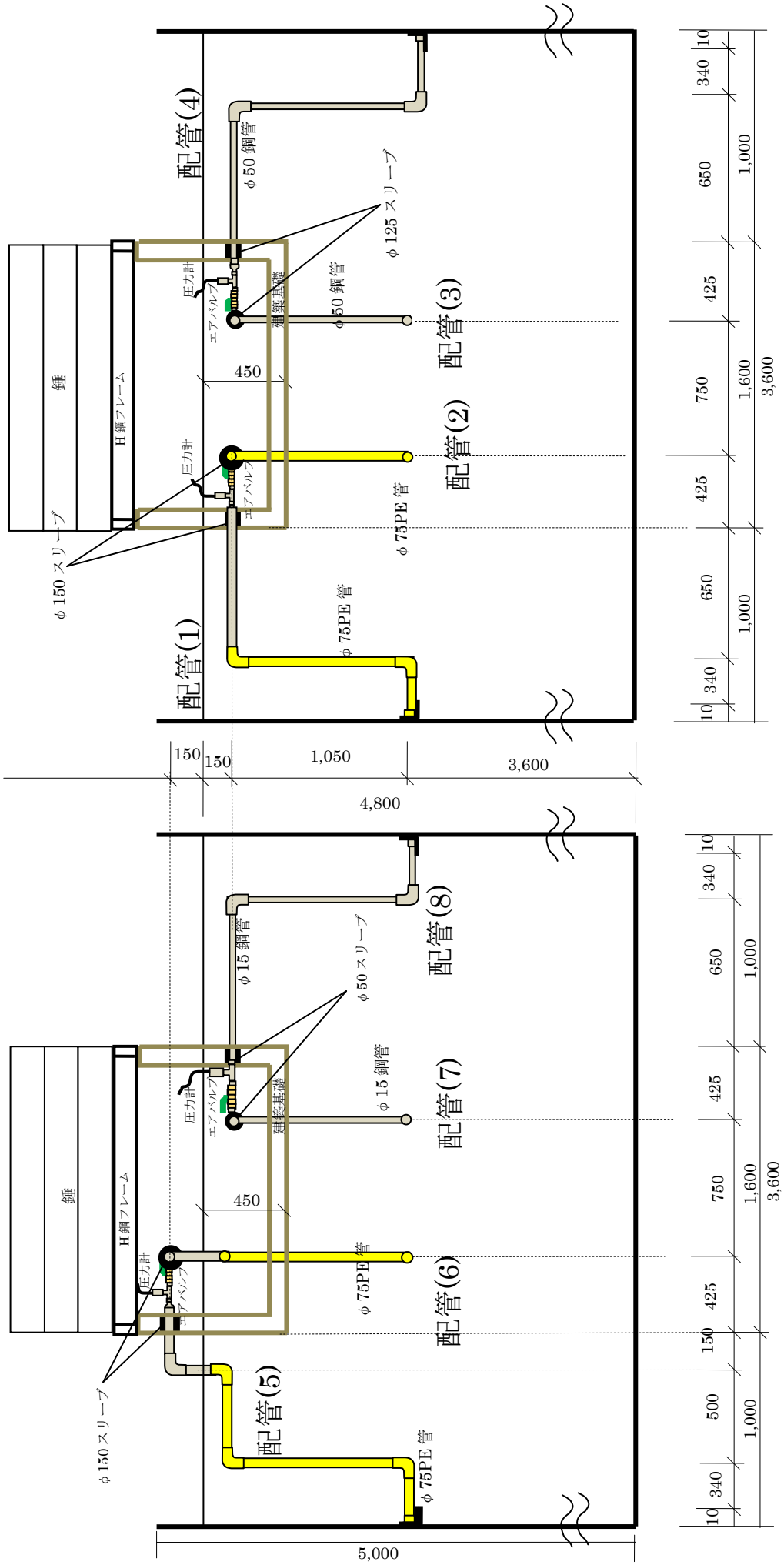


図 2.40(4) ガス配管図 仕様 2(4/6)

東方向から

単位 : mm

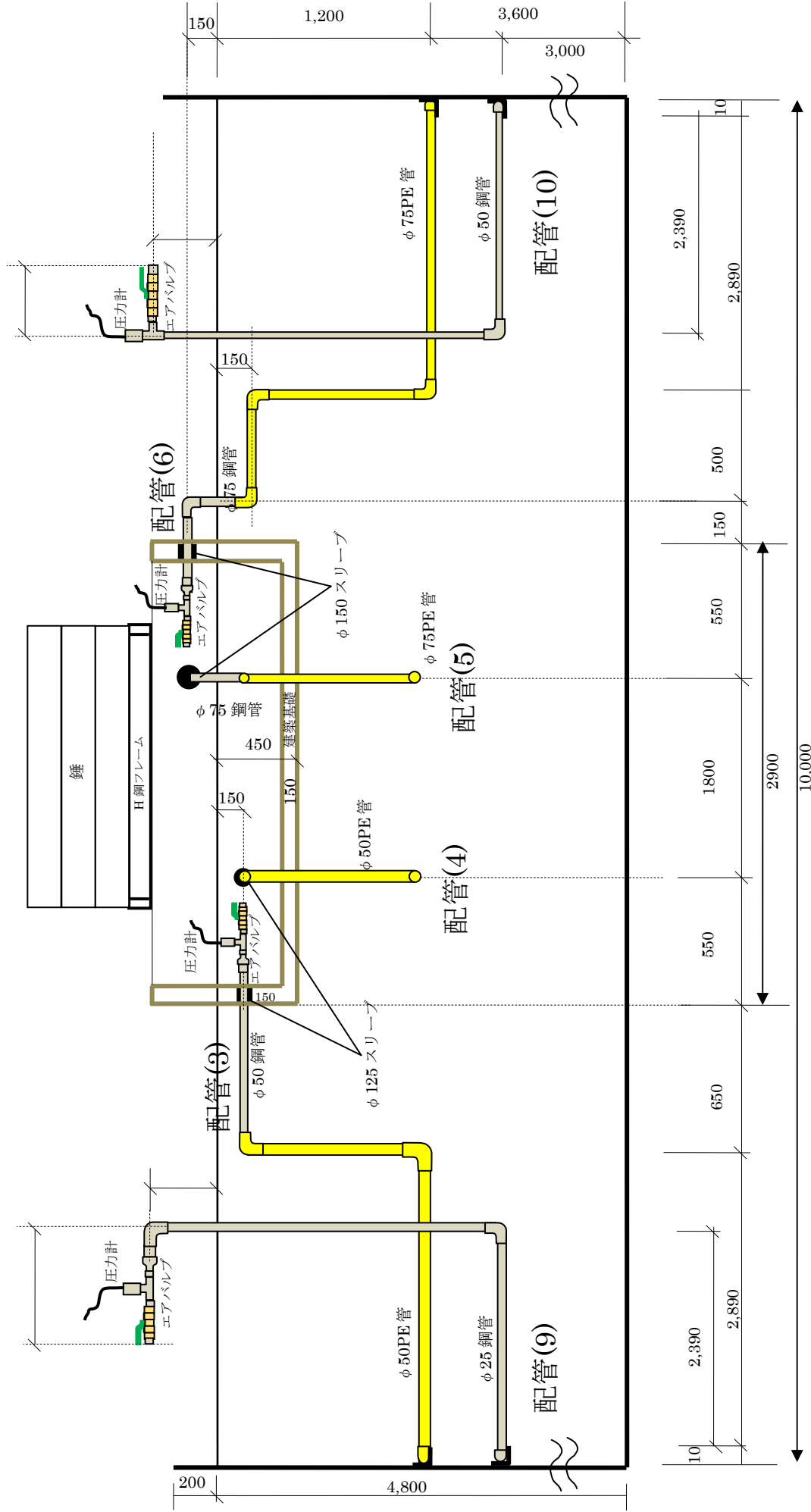


図 2.40 (5) ガス配管図 仕様 2 (5/6)

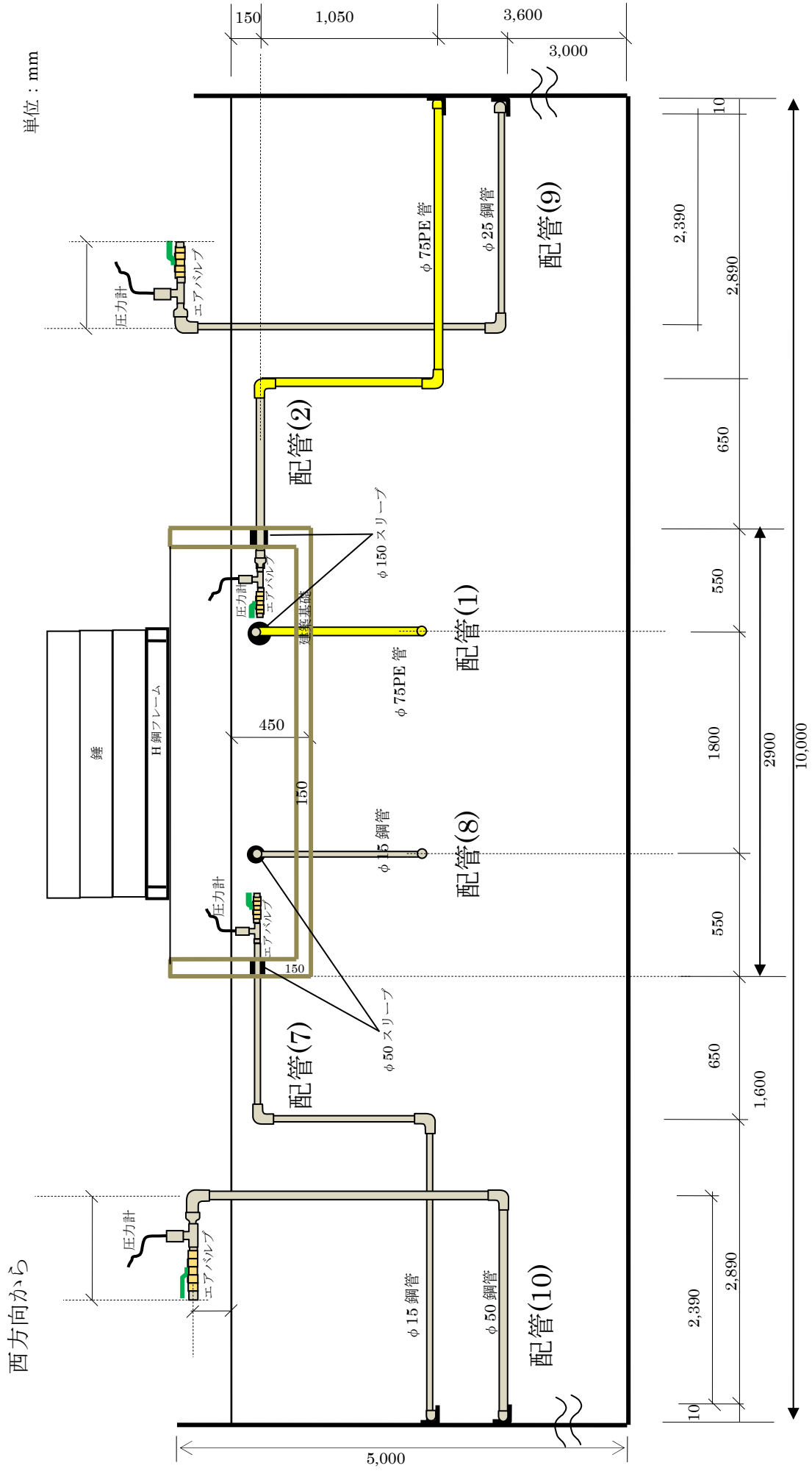


図 2.40 (6) ガス配管図 仕様 2 (6/6)

### (3) 計測方法

#### 1) 計測内容および計測項目

計測内容および計測項目を表 2.9 に示す。

表 2.9 計測内容および計測項目

計測内容	計測方法	数 量	目 的
各深度の応答加速度	加速度計	仕様 1 : 44 仕様 2 : 36	各深度（概ね 1 m 間隔）における応答加速度の大きさを確認する。 併せて、基礎・錘・ガス管・マイコンメーターに対する入力の大きさも確認する。 （土槽全体の挙動確認含む）
各深度の作用土圧	土圧計	7	各深度の作用土圧を確認する。 （鉛直土圧：5 水平土圧：2）
ガス管のひずみ量	ひずみゲージ	仕様 1 : 46 仕様 2 : 36	荷重によるガス管のひずみ量を直接測定する。
配管内圧力	圧力計	10	予め加圧した配管の密閉性の加振前後での変化を確認する。
加振テーブル・せん断土槽・ 地盤・基礎模型の変位量	糸巻変位計 レーザー変位計	6 8	加振時の作用力・地盤のせん断ひずみの大きさを確認する。

#### 2) 計測器の設置方法

##### I) 加速度計

地盤中：アクリル板と釘を用いて所定の深度・位置に固定した。

基礎・錘・ガス管・マイコンメーター：エポキシ接着剤で所定の位置に接着した。

##### II) 土圧計

所定の深度・位置に埋設した。E-6, E-7 については、エポキシ接着剤で基礎側面の所定の位置に接着した。

##### III) ひずみゲージ

亜鉛メッキ鋼管：所定の貼付位置をグラインダー・サンドペーパーで研磨しアセトンで埃・油等を除去した後に、CN 接着剤で接着し、VM テープ・ビニルテープで養生した。

PE 管：所定の貼付け位置を細目のサンドペーパーで研磨し、アセトンで埃・油等を除去した後に、CN-Y 接着剤で接着し、VM テープ・ビニルテープで養生した。

#### IV) 圧力計

ガス管に接続をした T 字に、防水テープで外径調節したセンサーを挿入し、接合部にエポキシ接着剤を塗布して密閉した。

#### 3) 計測器の設置位置

計測器の設置位置を図 2.41 に示す。



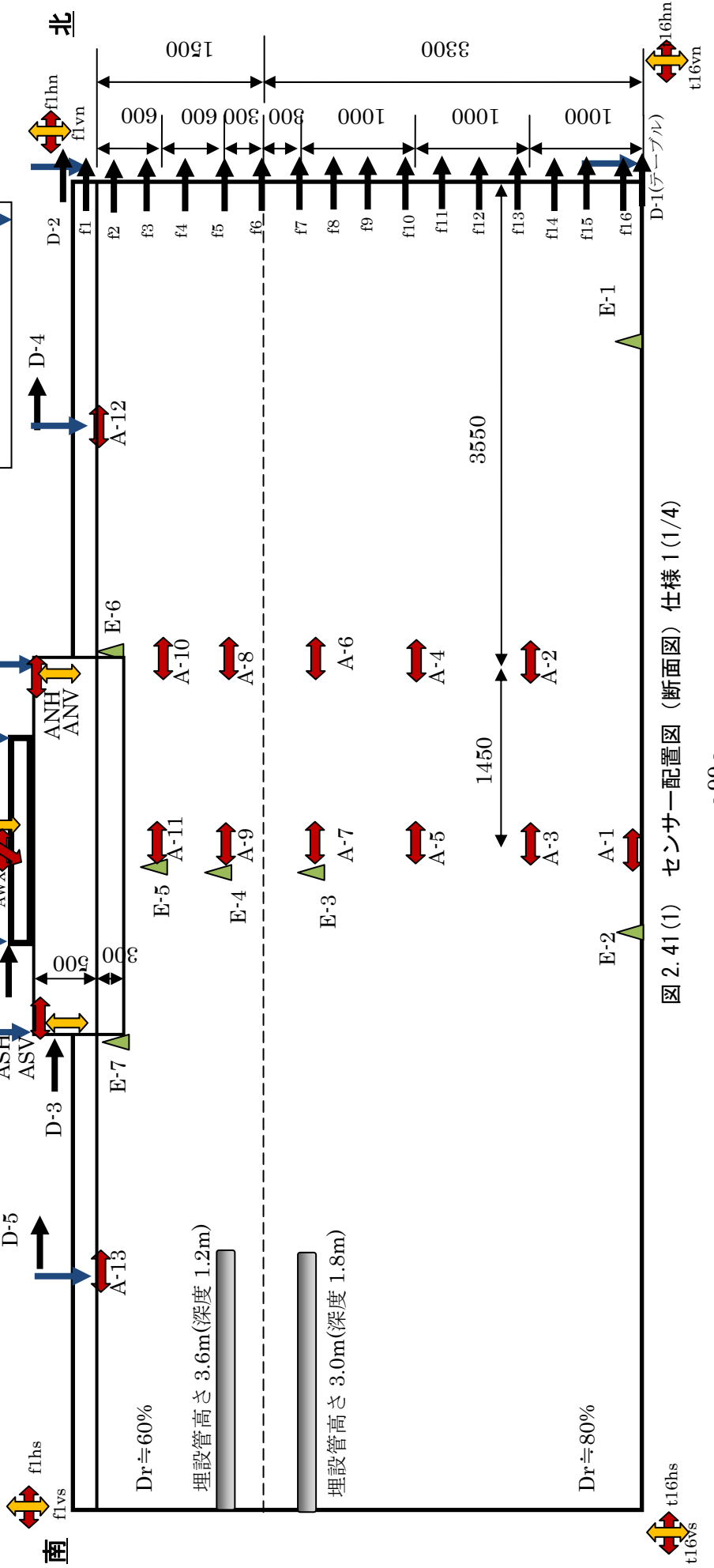
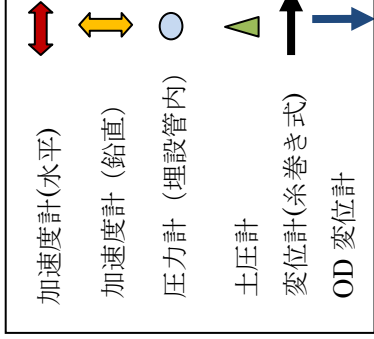
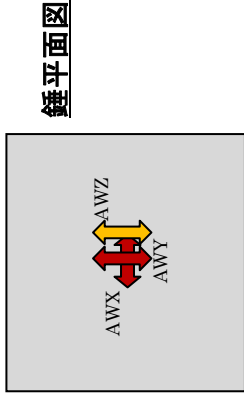


図 2.41 (1) センサー配置図 (断面図) 仕様 1 (1/4)

- ➡ 加速度計(水平)
- ↔ 加速度計(鉛直)
- 圧力計(埋設管内)
- ▲ 土圧計
- ➡ 変位計(糸巻き式)
- ➡ OD 変位計

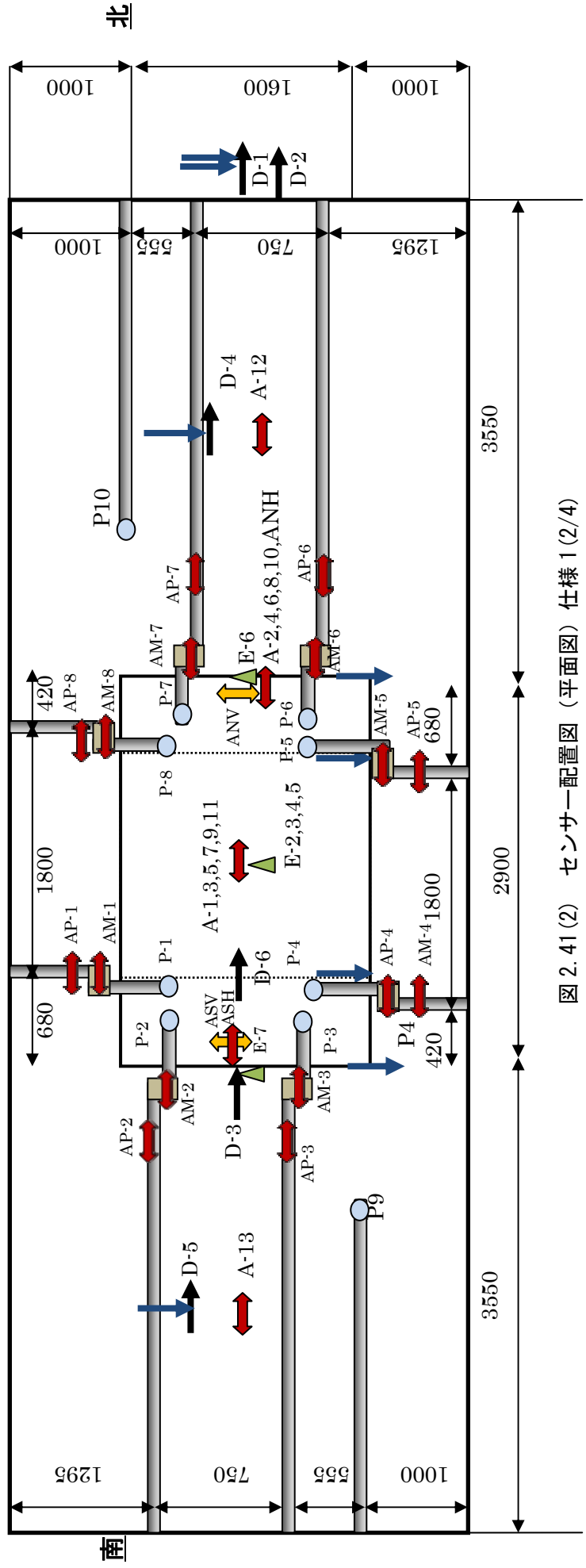
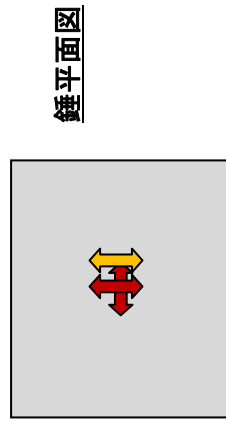


図 2.41(2) センサー配置図 (平面図) 仕様 1(2/4)



鍾平面図

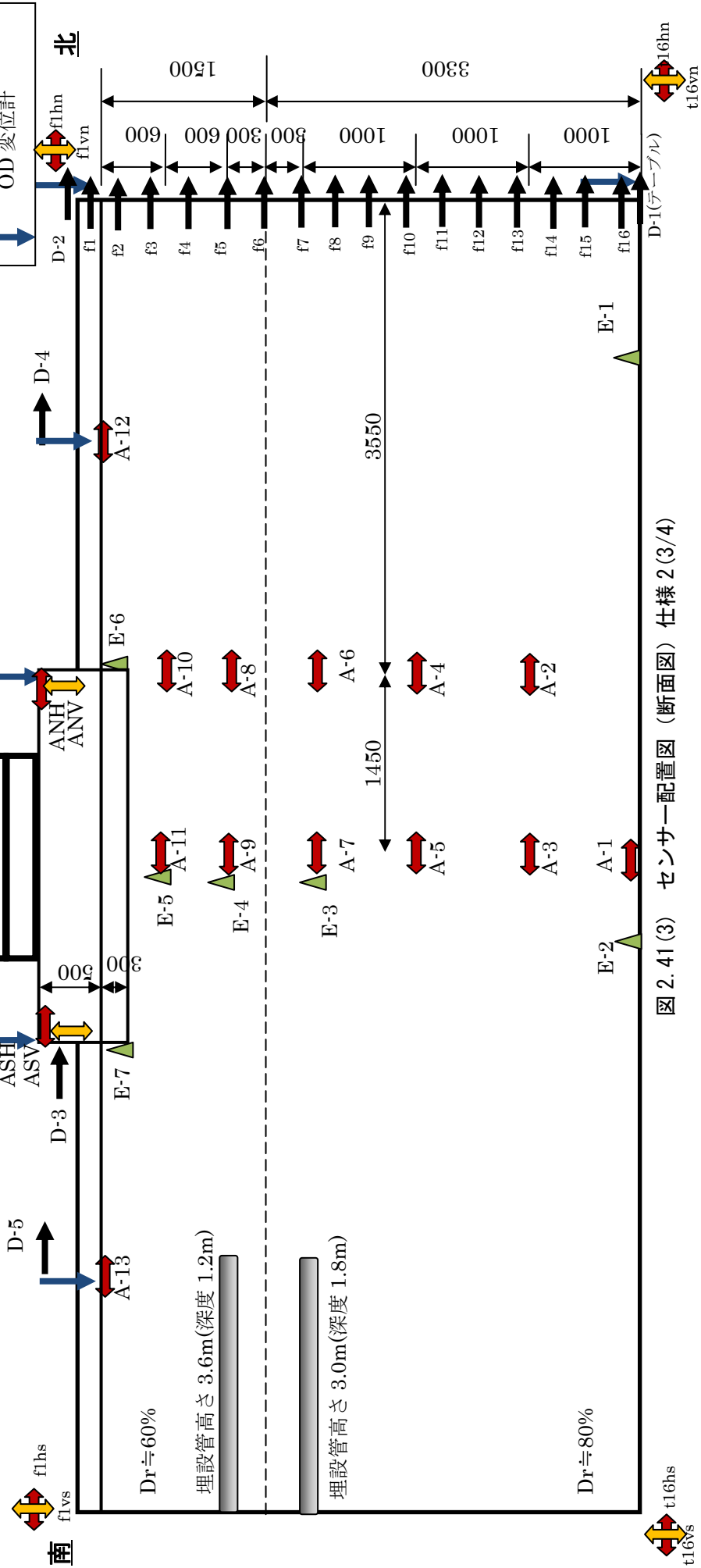
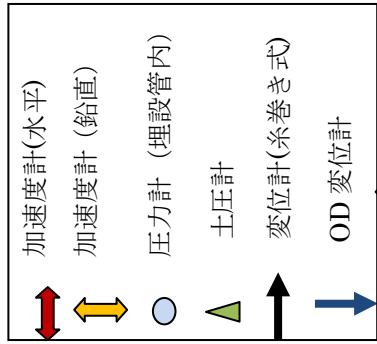


図 2.41 (3) センサー配置図 (断面図) 仕様 2 (3/4)

- 加速度計(水平)
- 圧力計(埋設管内)
- 土圧計
- 変位計(糸巻き式)
- OD 変位計

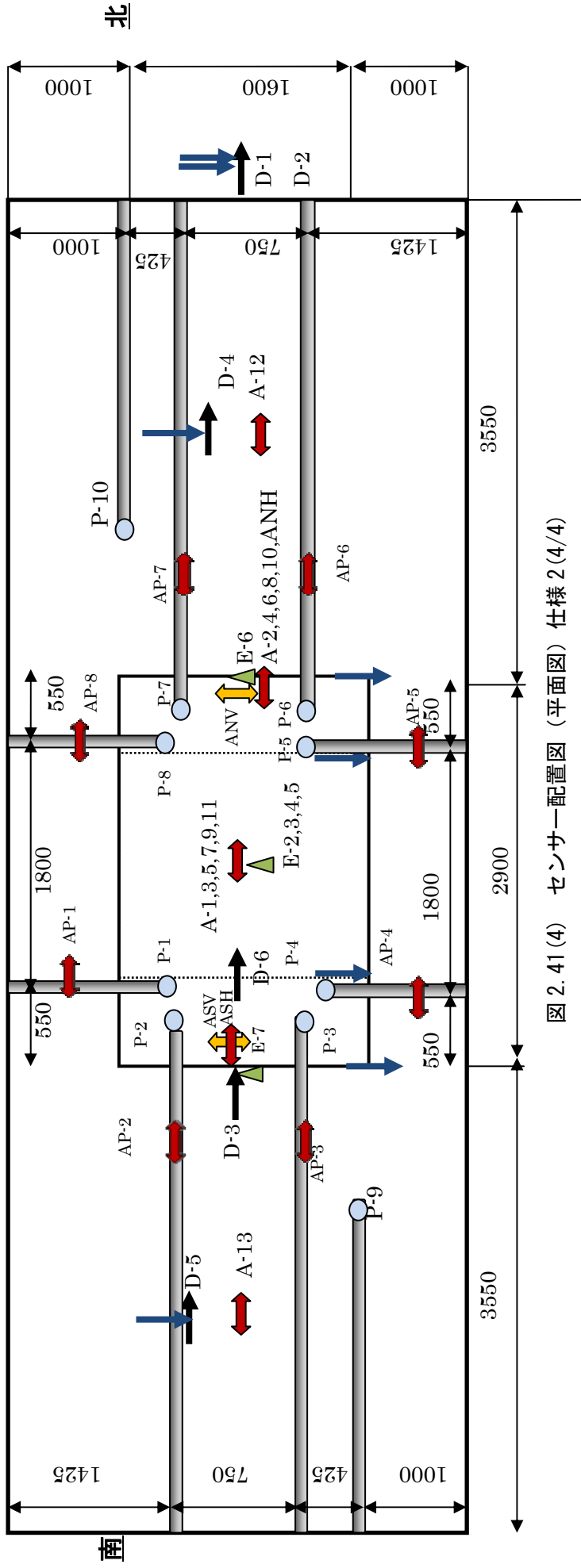


図 2.41 (4) センサー配置図 (平面図) 仕様 2 (4/4)

#### (4) 加振条件

加振条件を表 2.10～2.11 に示す。

加振は、スイープ加振・正弦波（ステップ加振）および地震波加振（エルセントロ NS 波および神戸 NS 波）を行った。スイープ加振は、試験体の共振振動数を求めるため、10gal 程度の振幅一定の正弦波を 0.1Hz～10Hz に変化させて基盤に入力し、応答加速度を確認した。また、ステップ加振は、入力加速度振幅の大きさを増加させる段階加振とし、入力波形は正弦波 2Hz とした。

表 2.10 加振条件（仕様 1）

回数		周波数	入力加速度
1	スイープ加振	0.1～10Hz	10gal
2	正弦波	2Hz	75gal
3	エルセントロ NS 波	-	360gal
4	Kobe NS 波	-	400gal
5	正弦波	2Hz	150gal
6	スイープ 40	0.1～10Hz	10gal
7	スイープ 40	0.1～10Hz	20gal
8	スイープ 40	0.1～10Hz	30gal
9	スイープ 40	0.1～10Hz	40gal
10	エルセントロ NS 波	-	360gal

表 2.11 加振条件（仕様 2）

回数	内容	周波数	入力加速度
1	スイープ加振	0.1～10Hz	10gal
2	正弦波	2Hz	75gal
3	エルセントロ NS 波	-	360gal
4	Kobe NS 波	-	400gal
5	正弦波 2Hz	2Hz	150gal
6	スイープ加振	0.1～10Hz	10gal
7	スイープ加振	0.1～10Hz	40gal

## (5) 実験結果と考察

実験結果を図 2.42～図 2.45 に示す。

→ピーク値拡大

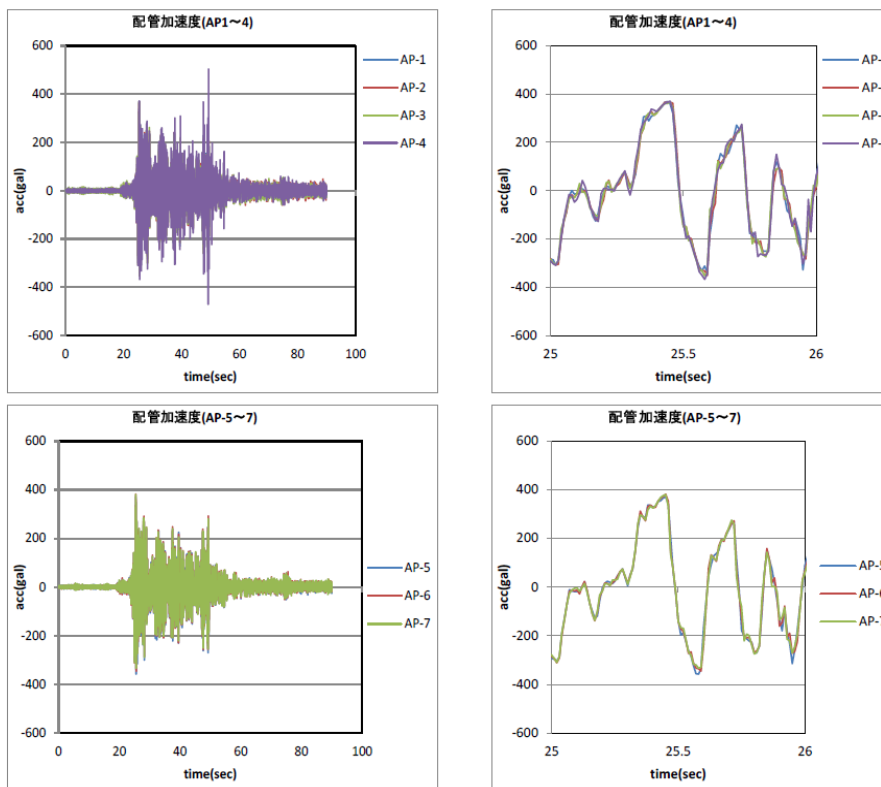


図 2.42 仕様 1 基礎近傍配管加速度 (エルセントロ NS 波)

※ノイズのため AP-8 は除外

→ピーク値拡大

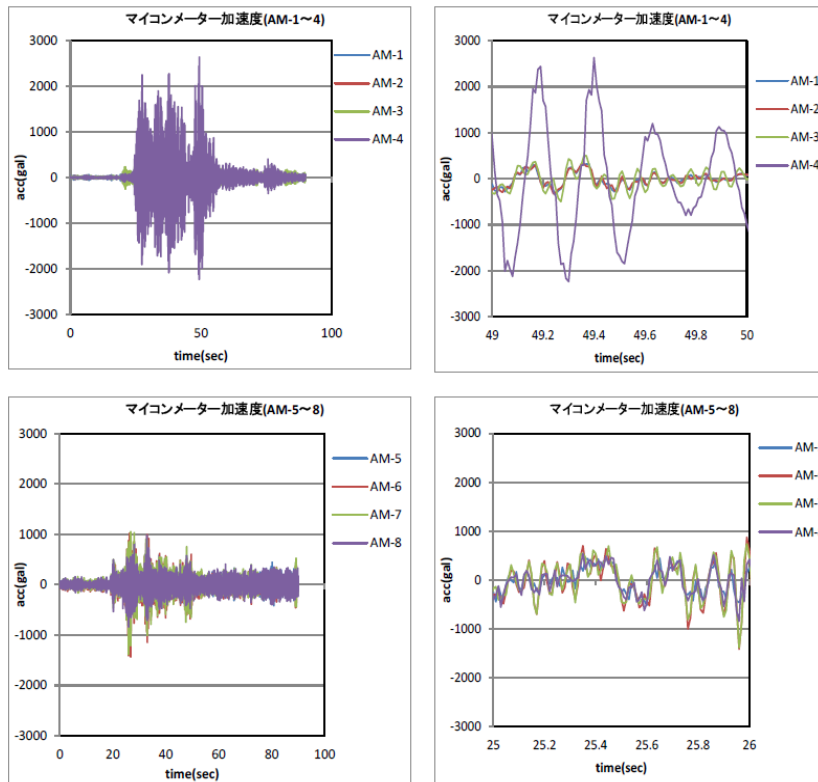


図 2.43 仕様 1 マイコンメータ加速度（エルセントロ NS 波）

→ピーク値拡大

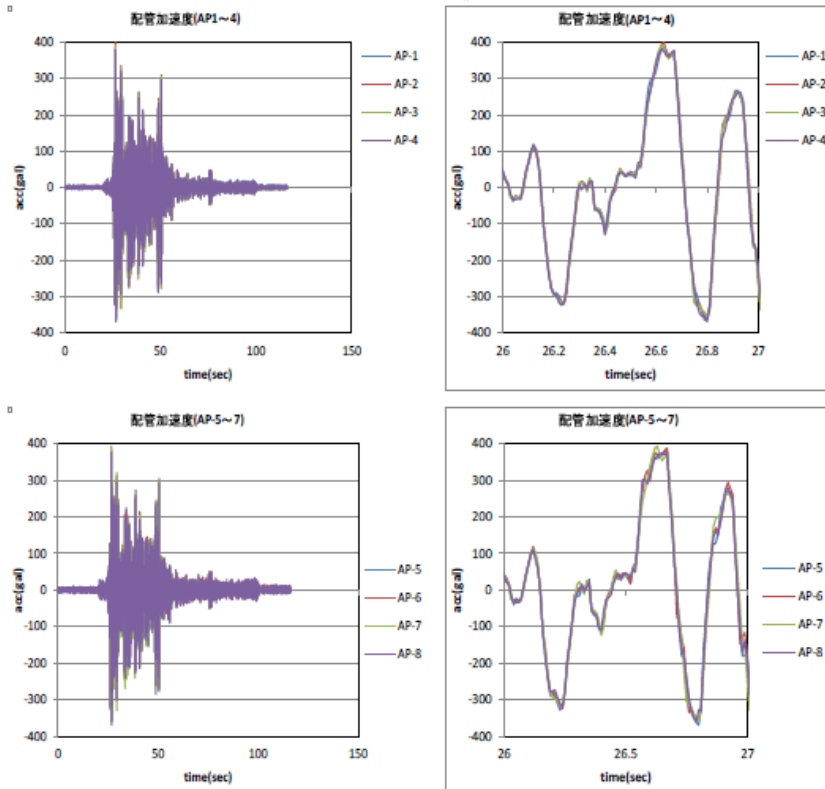


図 2.44 仕様 2 基礎近傍配管加速度（エルセントロ NS 波）

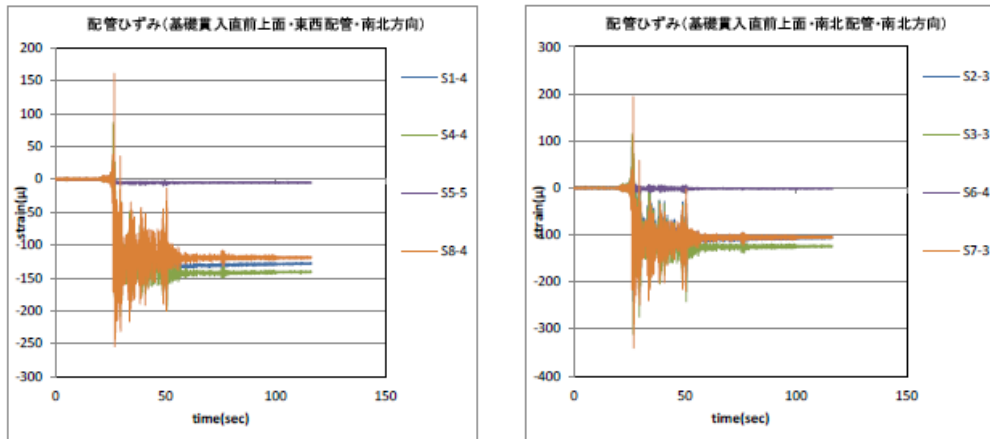


図 2.45 仕様 2 基礎近傍配管歪み (エルセントロ NS 波)



## (6) 考察

本実験における加振結果に対する考察は以下のとおりである。

### 1) 試験体の共振

- ①仕様1 地盤の共振振動数：概ね 6.7Hz 程度  
錘の共振振動数：概ね 6.6Hz 程度
- ②仕様2 地盤の共振振動数：概ね 6.7Hz 程度  
錘の共振振動数：概ね 6.5Hz 程度

### 2) 地盤・基礎・錘の加振方向応答加速度の特性

土槽底盤～地盤中央～基礎・錘の応答加速度の波形には位相がみられ、また、応答加速度の大きさは増加傾向にある。なお、基礎・錘との関係において位相はみられなかった。

(錘の加振直角方向：横、東西方向の応答加速度は大きな挙動がみられず、加振方向に対して横ずれ等の現象は少なかったと考えられる)

### 3) 基礎の鉛直方向応答加速度の特性

基礎の加振方向(南北側)両端に設置された鉛直方向応答加速度の波形から位相が  $180^\circ$  逆転した波形がみられ、これは、基礎が加振中にロッキングをおこしていたと推測される。

### 4) 配管の加振方向応答加速度の特性

各配管の応答加速度の波形には位相がみられず、配管の材質・径に関係なく配管の挙動に顕著な傾向はみられなかった。

### 5) マイコンメータの加振方向応答加速度の特性 (仕様1のみ)

自立式マイコンメータにおいて、地表からの設置位置が高いほど応答加速度が大きく顕著な傾向がみられた。壁固定式マイコンメータにおいて、加振方向に設置したマイコンメータの応答加速度が大きくみられ設置方法の違いにより顕著な傾向がみられた。

### 6) 地盤の鉛直土圧および基礎の水平土圧の応答特性

地盤の鉛直土圧は深度方向に対して増加傾向にあり、深度依存の影響がみられた。また、仕様1と仕様2では上載荷重が違い、上載荷重の大きい仕様2で特に顕著な傾向がみられた。

基礎の水平土圧は、基礎の加振方向(南北側)両端に設置された水平土圧に大きな差異はなく、加振により基礎に働く土圧として大きくなかった。また、仕様1と仕様2では上載荷重が違い、上載荷重の大きい仕様2のほうが大きな土圧となった。

#### 7) 配管に貼付したひずみ量の応答特性

配管の材質では、鋼管より PE 管、配管の径では、より小さい径の配管ほど発生するひずみは大きくなった。地盤の剛性の違いが配管に与える影響度合いについて、顕著な傾向はみられなかった。

#### 8) 配管内圧力の応答特性

10 系統全ての配管内圧力について、圧力の大きさはセンサーの許容誤差範囲内にあり加振中に配管内のエアが漏れていないことがわかる。よって、配管に亀裂等が生じなかったと推測される。

#### 9) レーザー変位計による試験体の応答特性

加振方向に対して位相・変化量ともに大きな差異はなく、一体に挙動していたと思われる。鉛直方向に対しては、入力波の最大値付近で概ね 1mm 程度の沈下がみられた。

## 2.2.7 室内敷設配管の火災加熱による延焼防止性能

### (1) 目的

室内ガス配管が火災時に加熱された場合を想定し、配管の損傷や継ぎ手部分のガス漏洩等により、火災区画以外で配管が損傷してガスが漏洩し、蓄積後に着火して爆発して、延焼しないよう配管への要求事項を検討することを目的として、室内敷設配管の火災加熱実験を実施した。

### (2) 実験概要

本実験では、独立行政法人建築研究所防耐火実験棟の水平炉内にガス配管を貫通させた区画を作成し、区画内を加熱することにより区画外での配管継ぎ手の損傷を調査することとした。

#### 1) 試験区画

試験区画として、100mm厚のALCパネルにより、図2.46～48に示す区画1体を製作した。試験区画内側のALCパネルには25mm厚のセラミックファイバーブランケットを貼り付け、ALCパネルの取り合い部は加熱時の炎、熱、その他のガスが流出しないよう耐火ボンド等で嚴重にシールした。この区画には、次に示すガス配管を貫通させるためのスリーブ及び配管支持材を通す孔（以下、「スリーブ等」という。）を設けている。

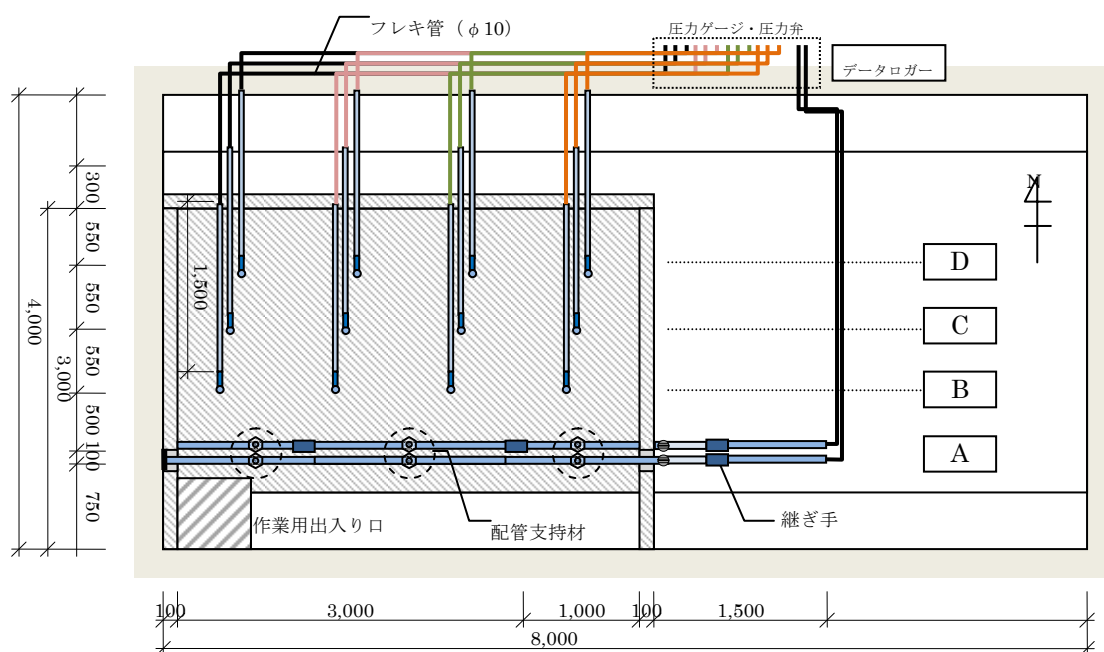


図 2.46 試験区画および配管平面図

単位：mm

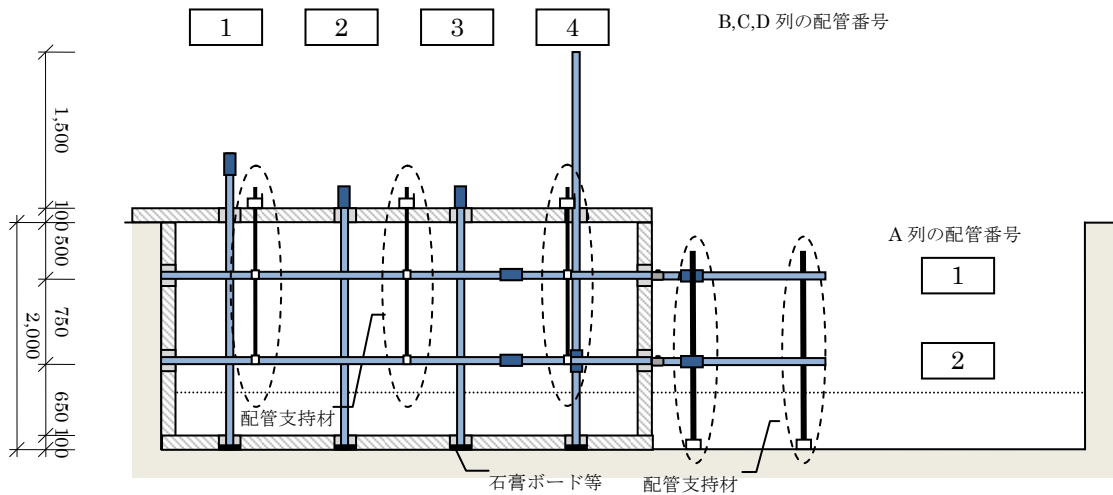


図 2.47 長手方向断面図

単位：mm

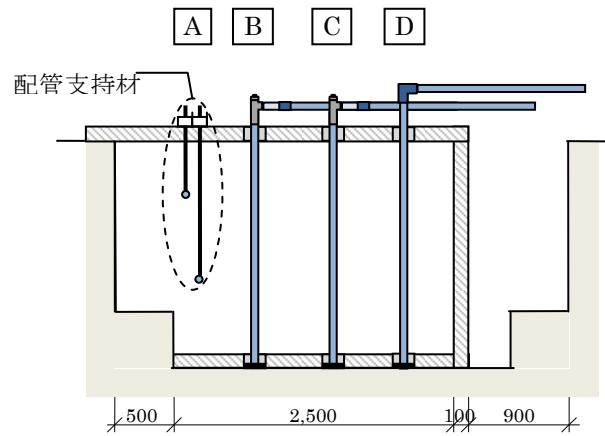


図 2.48 短手方向断面図

単位：mm

## 2) ガス配管の設置

ガス配管は表2.12に示す径、長さ及び材質のものを試験区画に取り付けた。ガス配管の試験区画貫通部は防火モルタルで埋め戻し、その他の仕様は一般社団法人日本ガス協会発行のガス配管設置基準に従うものとした。各配管はたわみ防止のために、金具等で支持した。

ガス配管表面には図2.49に示すようにガラス被覆されたK型熱電対（ $\phi 0.65$ ）を設置し、配管の表面温度と継ぎ手部の損傷状況を比較することとした。

炉外のガス配管端部からフレキ鋼管（ $\phi 10\text{mm}$ ）を接続し、フレキ鋼管端部に圧力ゲージを設置することで加熱時の気密性維持状態を確認するとともに、過度な管内圧力上昇を防止するため手動で管内圧力を低減可能な弁を設けた。

表2.12 配管仕様

配管 番号	仕様			熱電対（計35点）
	配管材料	管径	区画外配管仕様	
A-1	亜鉛メッキ鋼管	25A	ねじガス栓 +強化ゴムホース	3点（ガス栓前後、強化ゴムホース端部）
A-2	亜鉛メッキ鋼管	25A	可とう管ガス栓	3点（ガス栓前後、可とう管端部）
B-1	亜鉛メッキ鋼管	25A	メータ接続キット (L=250mm) +マイコンメータ	2点（区画貫通部炉外表面、メータ接続キット 炉側）
B-2	亜鉛メッキ鋼管	25A	ねじガス栓 +強化ゴムホース	3点（ガス栓前後、強化ゴムホース端部）
B-3	亜鉛メッキ鋼管	25A	可とう管ガス栓	3点（ガス栓前後、可とう管端部）
B-4	亜鉛メッキ鋼管	25A	継ぎ手無し	4点（下図B-4仕様参照）
C-1	亜鉛メッキ鋼管	25A	メータ接続キット (L=500mm) +マイコンメータ	2点（区画貫通部炉外表面、メータ接続キット 炉側）
C-2	亜鉛メッキ鋼管	50A	分岐ガス栓	2点（ガス栓前後）
C-3	亜鉛メッキ鋼管	15A	ねじガス栓 +強化ゴムホース	3点（ガス栓前後、強化ゴムホース端部）
C-4	プラスチック被 覆鋼管	25A	ねじガス栓	2点（ガス栓前後）
D-1	フレキ管	10A	ねじガス栓+貫通 部さや管	2点（ガス栓前後）
D-2	フレキ管	10A	ねじガス栓	2点（ガス栓前後）
D-3	フレキ管	10A	台座付きエルボ +強化ゴムホース	2点（ガス栓前後）
D-4	フレキ管	20A	ねじガス栓	2点（ガス栓前後）

図2.46及び図2.48に示すA～D列の配管の設置位置についての詳細は図2.49のとおりである。スリーブ径は50Aの管径に対しては100mm、その他の管径のものに対しては65mmとした。詳細は一般社団法人日本ガス協会発行のガス配管設置基準に従うものとした。

また、写真 2.1 に加熱前の試験体の様子を示す。

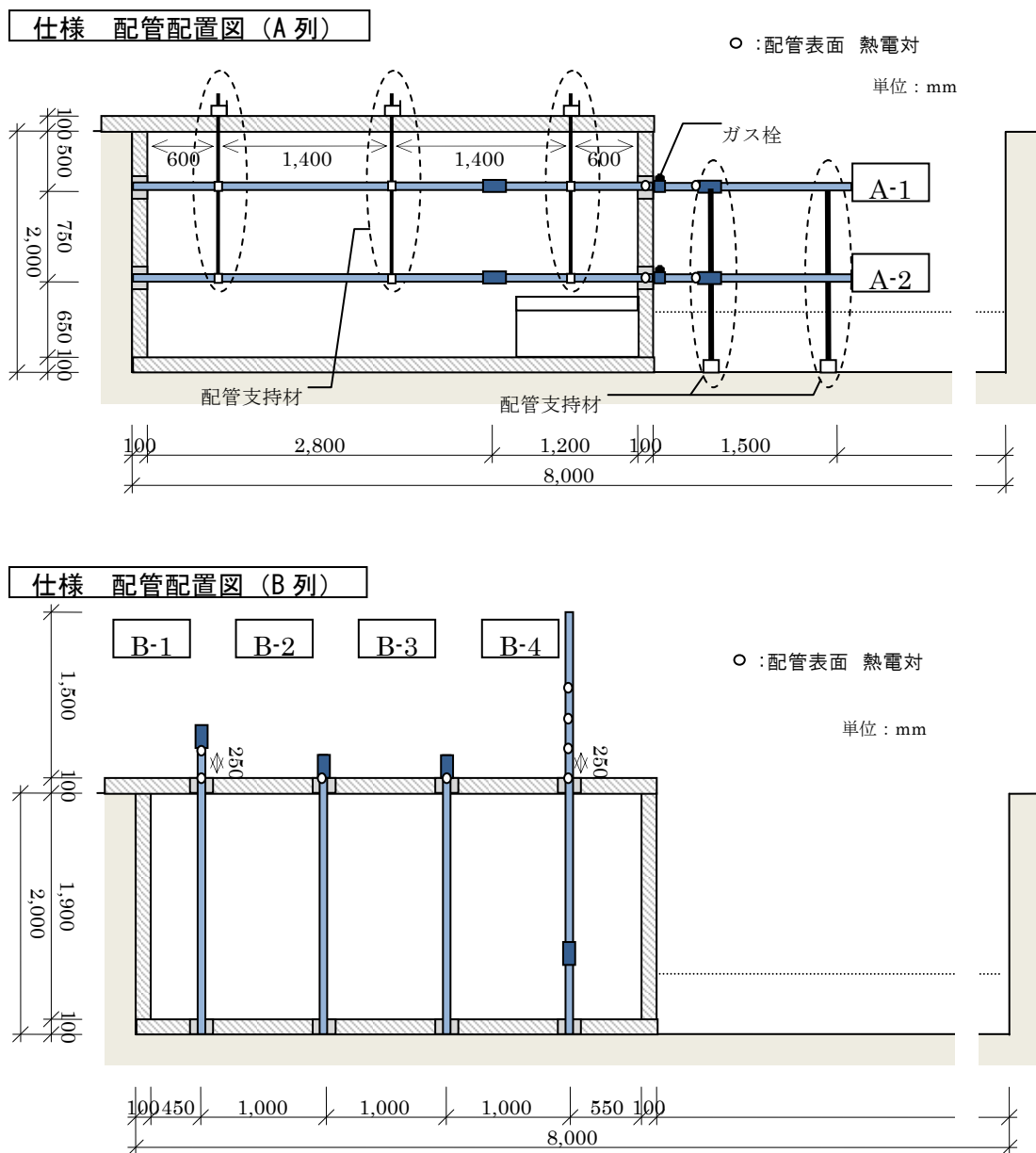
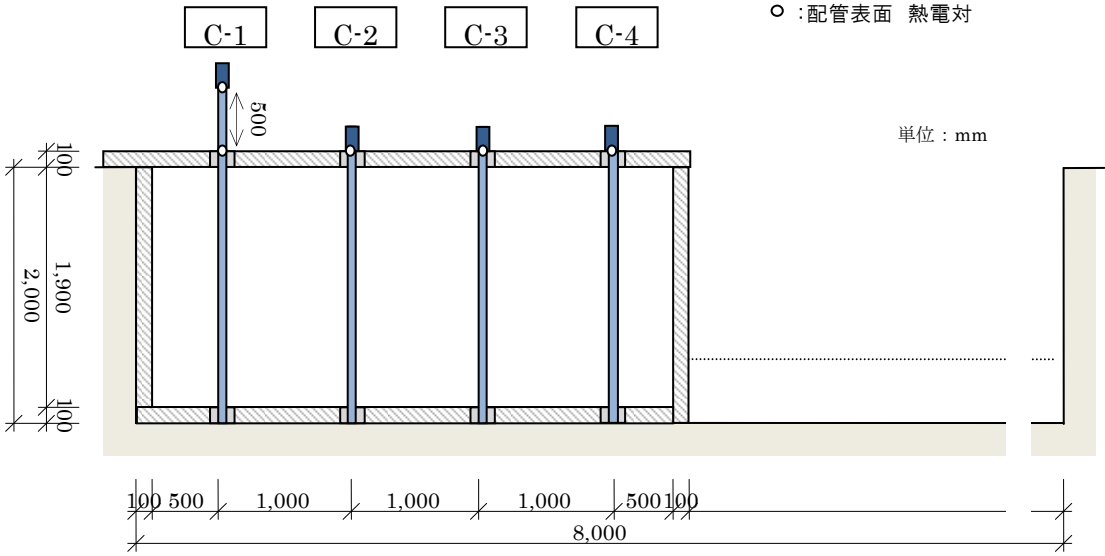


図2.49(1) 配管配置断面図(1/2)

仕様 配管配置図 (C列)



仕様 配管配置図 (D列)

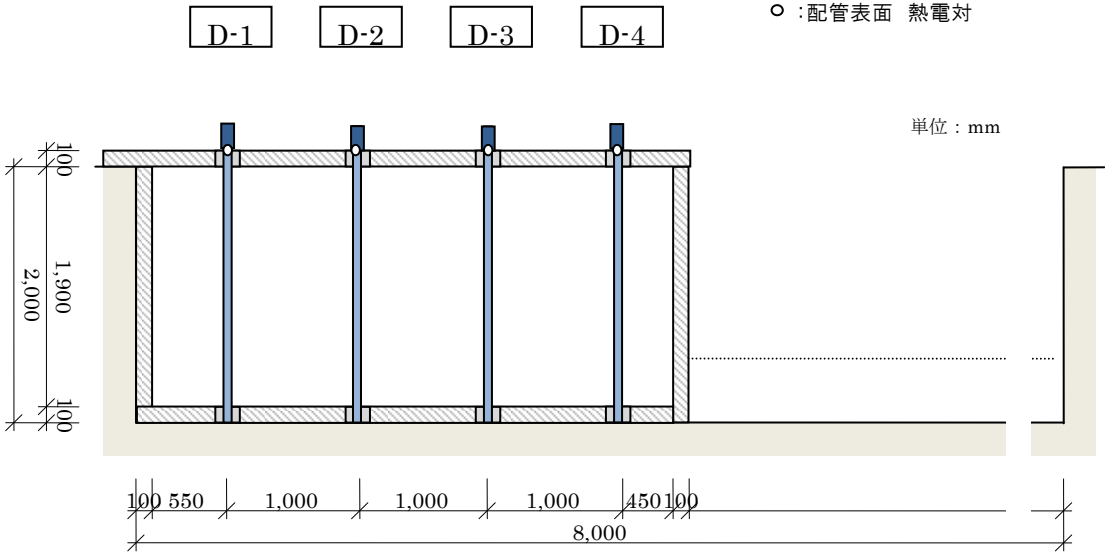


図2.49(2) 配管配置断面図(2/2)



試験体外観



区画外でのガス栓



試験体内部



管内圧カゲージ

写真2.1 試験体

### 3) 測定項目

本実験では、配管継ぎ手部が区画内からの熱伝導により加熱されることで、シール材が融解・燃焼し、配管内の気体が漏洩するほどの隙間・ピンホールが形成されるかを確認するため、

- ・ 配管表面温度
- ・ 配管内圧力
- ・ 継ぎ手部の目視観察



を測定項目とした。

配管表面温度のみでは、配管からの漏洩を調査することはできないが、配管内圧力が上昇しないあるいは低下する場合には何らかの理由で配管から空気が漏れていることを示しており、配管表面温度並びに実験終了後の継ぎ手部の状況とを比較することで、配管の熱による亀裂、隙間の発生を推定するものとした。また、継ぎ手部の損傷状況は実験中の状態変化を目視により観察することともに、実験終了後継ぎ手部を詳細に観察・分解することで配管の損傷の程度を把握することとした。

配管内圧力は5分ごとに圧力を記録するとともに、ゲージ圧が10kPaに達した時点で圧力弁を開放し、0kPaに圧力を下げた時刻を記録した。

#### 4) 実験条件

実験では、試験炉での加熱をISO834 (Fire-resistance tests -- Elements of building construction) に示される標準加熱 (以下、ISO834 標準加熱という) となるよう制御し、加熱時間は1時間とした。

### (3) 実験結果

#### 1) 温度

図 2.50 に配管表面温度の測定結果を示す。各図には炉内温度及び ISO834 標準加熱の温度も併せて示す。

全ての温度測定点において最高温度を示したのは C-2 配管の区画貫通部の約 200℃であった。継ぎ手部の温度は高いものでも 100℃に達しておらず、継ぎ手部のシール材が熔融する温度には至らなかった。

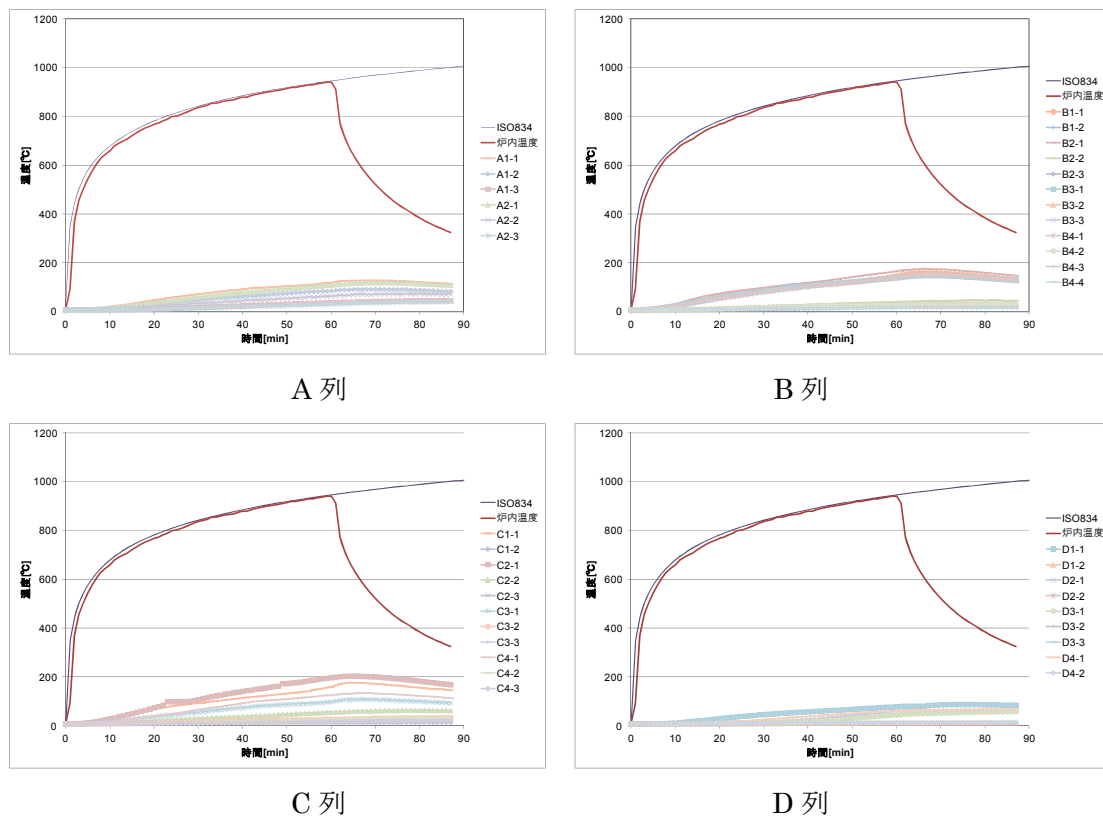


図 2.50 配管表面温度

## 2) 配管内圧力

図 2.51 に配管内圧力の測定結果を示す。

A,B,C 列は点火直後から約 30 分は圧力が頻繁に上下しており、これは加熱直後の配管内の空気が急激に膨張したためであり、30 分以降も圧力の上昇速度は小さくなるものの定期的に圧力弁を開放する 10kPa に到達している。

一方、D 列は加熱直後に 1, 2 度 10kPa に到達したものの、以降は 40 分まで緩慢な圧力上昇となっている。この後、40 分で D-4 配管が、55~60 分で D-1 配管及び D-2 配管が複数回圧力が急激に上昇する現象がみられた。このため、配管に何らかの亀裂や損傷が発生したと推測される。しかし、配管温度の上昇は小さく、実験後の観察でも区画外での損傷は見受けられなかったことから、区画内で配管が損傷したと推測される。この一因として、D 列はフレキシ管であるため、区画内側の端部を既製のキャップにより封していたことが考えられる。このキャップが ALC 厚よりも長いため、モルタルにより周囲を固定していたが、比較的熱の影響を受けやすく、シール材が損傷したものと推測される。なお、シール材が熱により変質していることは実験後の観察でも確かめられている。

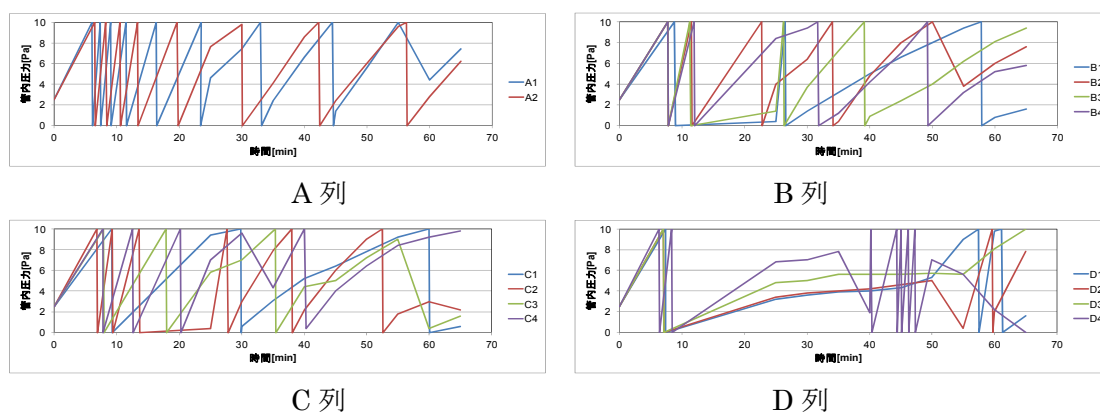


図 2.51 配管内圧力

### 3) 目視観察

実験中は配管の変化や異音は観察できず、写真 2.2 に示すように配管が膨張することにより試験区画貫通部において埋め戻しに使用したモルタルが区画外側へずれるという現象がみられた。これは試験炉の都合上、配管長さが限定されること、配管他端が壁又は床により固定されていることから発生するものであり、通常の建築空間であれば配管長はより長い場合火災区画内で座屈、変形することにより埋め戻し部の突出は起こりにくくなると考えられる。

実験後の配管については、鋼管は試験区画内でも大きな座屈等は見受けられず、目視で確認できる損傷もなかった。フレキ管は被覆材が燃え落ち、座屈しているものの配管そのものに損傷はなかった。前述のように、配管端部のキャップに多少の損傷は認められたものの、これは通常の建築空間では使用されないものであり、建築空間内にフレキ管を使用することに対して問題になるとは言えない。また、フレキ管の区画内外での状態は写真にも示すとおり区画貫通部を境に被覆材の残存の有無が明確に別れており、これからも区画貫通部での熱伝導の影響は小さいことがわかる。



区画貫通部のずれ



実験後の区画内



実験後の鋼管



実験後の継ぎ手



実験後のフレキ管

写真 2.2 実験後の配管

#### (4) 考察

区画貫通した配管を試験炉で加熱した結果、ISO834 標準加熱に従う限り区画外での配管には大きな損傷は発生しないことが確かめられた。また、シール材等も溶融・変質するほどの温度には至っておらず、これは配管材料内の熱伝導よりも区画貫通部での区画材や埋め戻し材への熱損失が大きかったことが要因だと考えられる。

## 2.2.8 都市内に水素を供給する際の安全性を確認するための実証実験

### (1) 実証実験の概要

#### 1) 実験対象範囲、実験設備の概要

既成市街地における水素の専用配管の建設コストが過大であると、水素ガス普及の支障となる可能性が考えられたため、既存の共同溝を活用して大幅にコスト低減を図る方針を追求することにした。

茨城県つくば市内の既存共同溝（延長約250m）を実験対象範囲とし、既存共同溝内に水素配管を敷設して、一方の地上部に水素ポンペを設置して水素を供給し、他方の地上部に燃料電池を設置してオンラインで水素供給を行うための技術を実証した（図2.52）。

なお、実証実験に当たっては、共同溝利用者協議会において、水素ガスの安全性等について説明を行い、共同溝利用者協議会の了解を得た。

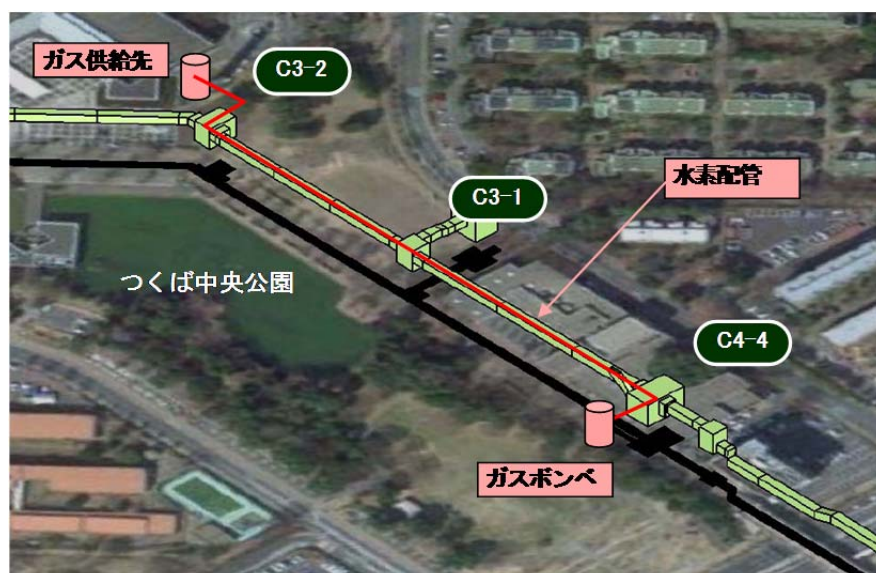


図 2.52 水素供給実験対象範囲

水素ポンペを設置する「水素送出部」、共同溝内に水素供給配管を設置する「水素供給部」、燃料電池を設置する「水素消費部」により実験設備を構成する。水素消費部にはユニットハウスを設置し、燃料電池で発電した電力を消費する家電製品等を配置した（図2.53）。

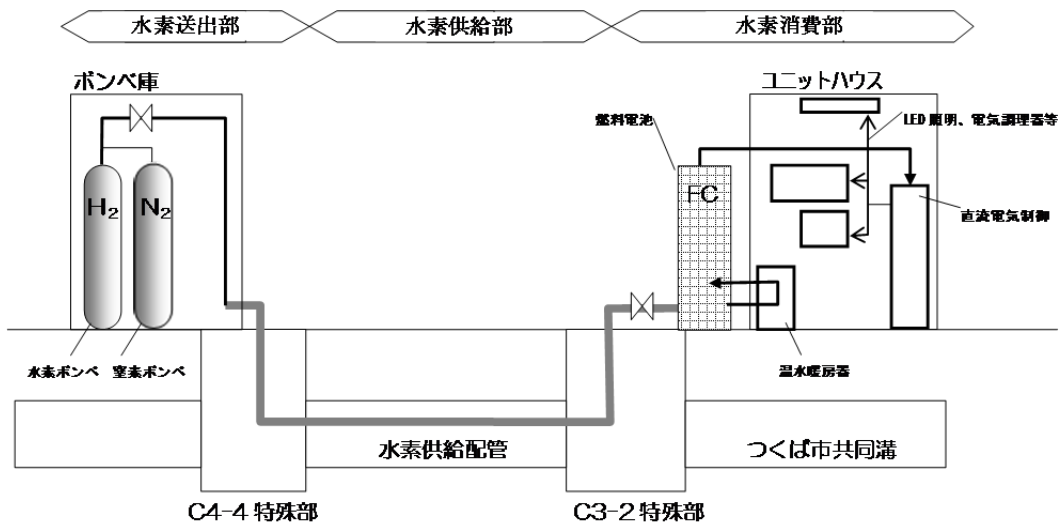


図 2.53 水素供給試験のシステム構成

## 2) 水素供給配管の敷設状況

平成17年から平成19年にかけて経産省で行われた「水素供給システム安全性技術調査事業」を参考にポリエチレン管（以下PE管）を採用した。配管の接続方法についても同調査報告の方法を採用した。外装管には軽量で施工性が高く耐久性に優れる硬質塩化ビニル管を採用し、ポリエチレン管（内管）と塩化ビニル管（外管）の二重管を整備した。外装管の両端部は地上部で外気に開放し、内管からの水素漏洩時に管内圧力の上昇を回避するとともに、外気解放部に送風機を設置し外装管内の空気を放出する手段を整備した。共同溝内では、既設の集塵管に1m間隔で帯鉄状バンドを取り付け、水素供給配管を吊り下げるとともに、振れ取りのために集塵管の架台（最大10m間隔）にもアングルで結束することにより水素供給配管を施工した（写真2.3-写真2.6）。

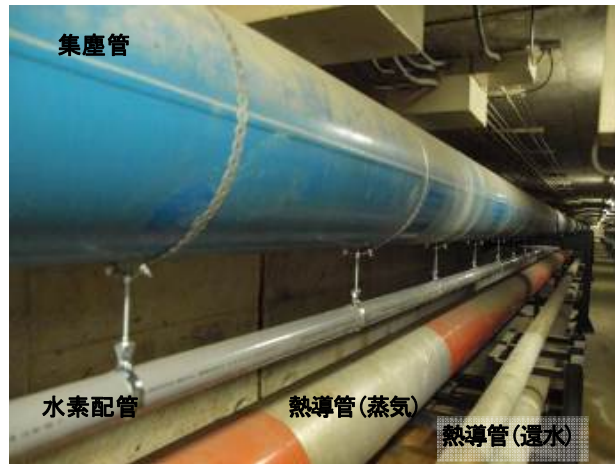


写真 2.3 共同溝標準部直線区間の水素配管

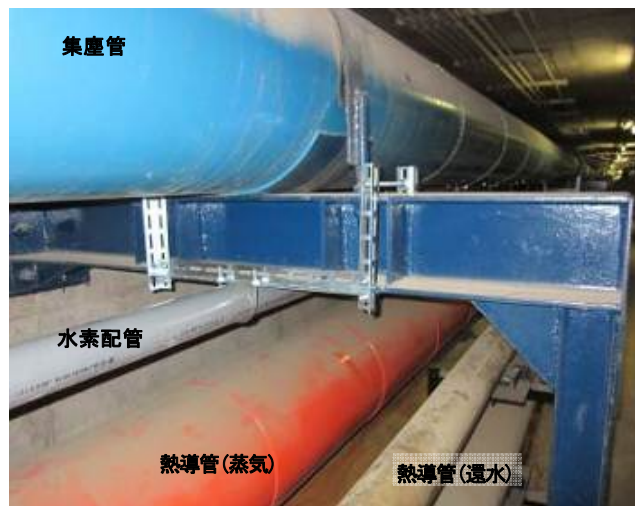


写真 2.4 集塵管架台部の振れ取り





写真 2.5 特殊部曲り部の水素配管



写真 2.6 架台部中間部の振れ取り

### 3) 水素漏洩検知警報システムの設置状況

ライフラインの基幹となっている共同溝の機能維持を図るために、水素圧力検知システム、水素濃度検知システム、音速変化検知システムの3つの水素漏洩検知システムを導入し、多重的な監視体制を構築することにより水素供給の安全性の確保を図る。

漏洩検知システムの計測データ及び異常データ計測時の警報は、水素送出部（ポンペ庫）及び水素受入部（燃料電池庫）の2箇所において同時に表示・発報できる通信基盤を形成し、水素漏洩時の供給停止、使用停止、水素パージ作業等の応急対策を同時にできる体制を構築した（図2.54）。

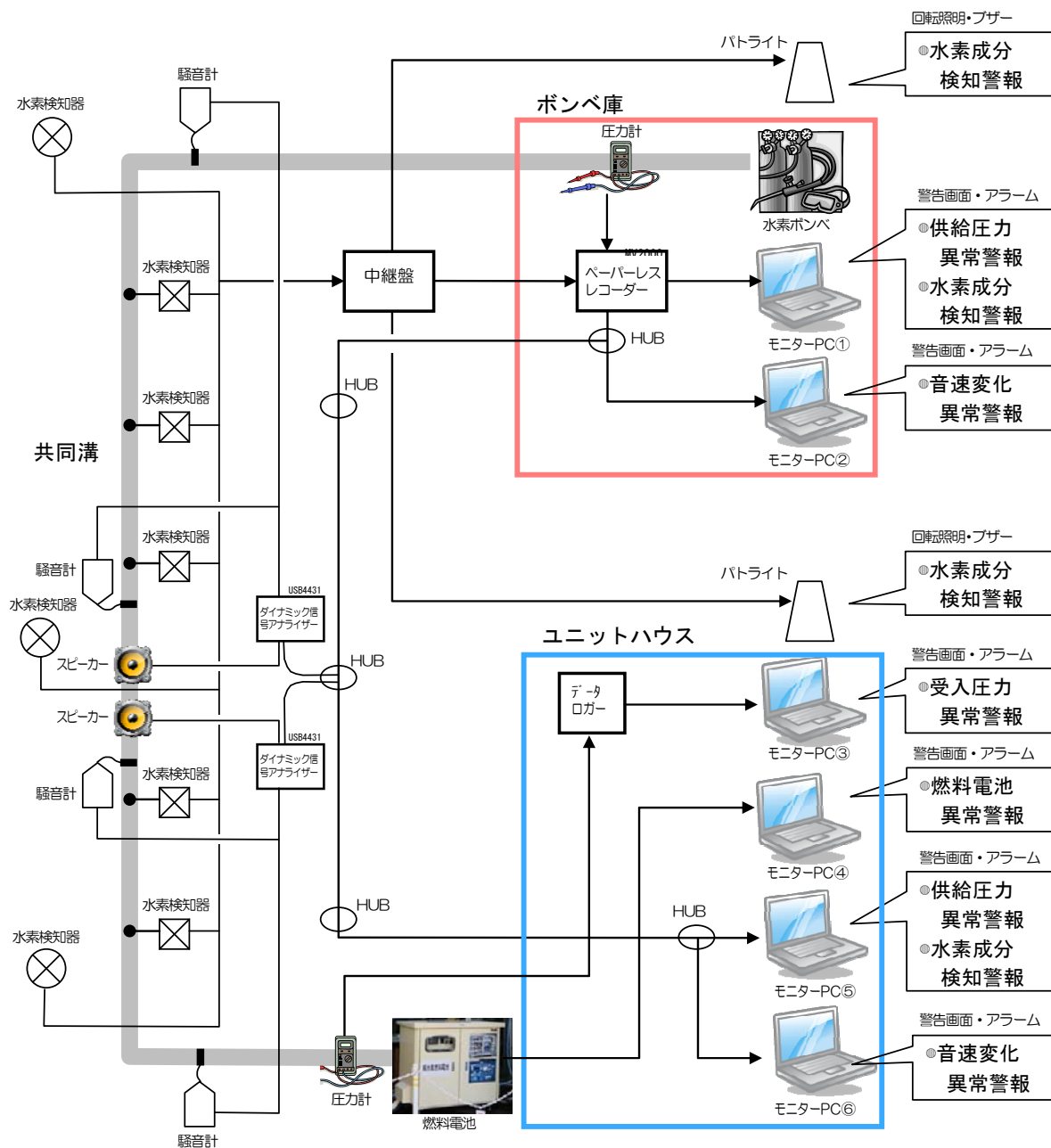


図2.54 水素漏洩検知システムと警報発信フロー

#### 4) 実証実験の実施経過

水素供給実験の安全確保に万全を期する観点から、ヘリウムを使用した点検、水素を使用した点検の二段階の事前設備点検を実施し、水素配管の気密性、水素検知システムの性能、燃料電池の制御方法等を検証し、水素供給実験の全工程を事前に実施した。

その後、事前実験で実験設備の安全性、作業方法が検証された水素供給実験を報道機関、視察希望者、市民サポーターに公開して実施した。公開実験の実施期間は2012年12月17～19日の3日間である（表2.13）。

表2.13 公開実験スケジュール

実施状況	試験・実験内容	機能検証	データ記録
12月7日（金）	水素濃度検知器、警報システムの性能試験	○	—
12月10日（月） ～11日（火） 設備点検・試験	ヘリウムを使用した内管の耐圧試験	○	—
	ヘリウムを使用した内管の気密性試験	○	—
	外装管内伝達音波の検知試験	○	—
	ヘリウム注入時の音速変化の検知試験	○	—
	水素濃度検知、音速検知モニターの運用試験	○	—
12月12日（水） ～14日（金） 設備点検・試験	水素を使用した内管の気密性試験	○	○
	定量水素送出時の圧力、流量の計測	○	○
	水素を使用した燃料電池の立ち上げ・運転試験	○	○
	強制排出時における外装管内通気量の計測	○	○
	通常時の外装管内通気量の計測	○	○
	電力負荷変動時の燃料電池出力変動の計測	○	○
	太陽光発電出力変動時の燃料電池出力変動の計測	○	○
	太陽光発電、燃料電池の電力供給量の計測	○	○
	燃料電池の中断使用時の管内圧力、流量の計測	○	○
	水素置換（窒素パージ）時の管内圧力、流量の計測	○	○
	開放弁の瞬時開閉時の管内圧力、流量の計測	○	○
12月17日（月） ～19日（水） 水素供給実験	電力負荷変動時の燃料電池出力変動の計測	—	○
	太陽光発電出力変動時の燃料電池出力変動の計測	—	○
	太陽光発電、燃料電池の電力供給量の計測	—	○
	燃料電池の中断使用時の管内圧力、流量の計測	—	○
	水素置換（窒素パージ）時の管内圧力、流量の計測	—	○
	開放弁の瞬時開閉時の管内圧力、流量の計測	—	○
	窒素置換（水素パージ）時の管内圧力、流量の計測	—	○

## (2) 水素配管の気密性の検証

### 1) 実験の目的

共同溝内に敷設した水素供給用配管が所定の機能を保持し、ガスの供給設備として支障がないことを確認するために、気密性試験を実施する。二重管の内管に使用したポリエチレン管は、単体では水素供給用配管としての機能が実証されていることから、本試験は配管ネットワーク全体の機能性の保持、特に接合部やセンサー取付継手における施工信頼性を確認することが主な目的となる。

水素供給実験の安全確保に万全を期する観点から、ヘリウムを使用した気密性試験、水素を使用した気密性試験を実施し、二段階の事前設備点検により水素配管の気密性を十分に検証した上で、燃料電池の運転を含めた連続的な水素供給実験を行うものとした。

### 2) 実験設備及び実験方法

#### ① 気密性試験における圧力、温度の計測ポイント

二重管の内管にヘリウムまたは水素を充填し、ボンベ庫内の水素供給配管に設置した圧力計、温度計で充填したガスの圧力、温度の推移を計測する。また二重管周囲の環境を把握するために、共同溝内の入口側、出口側の2カ所に温度計を設置し、共同溝内の温度の推移を計測する（図2.55）。

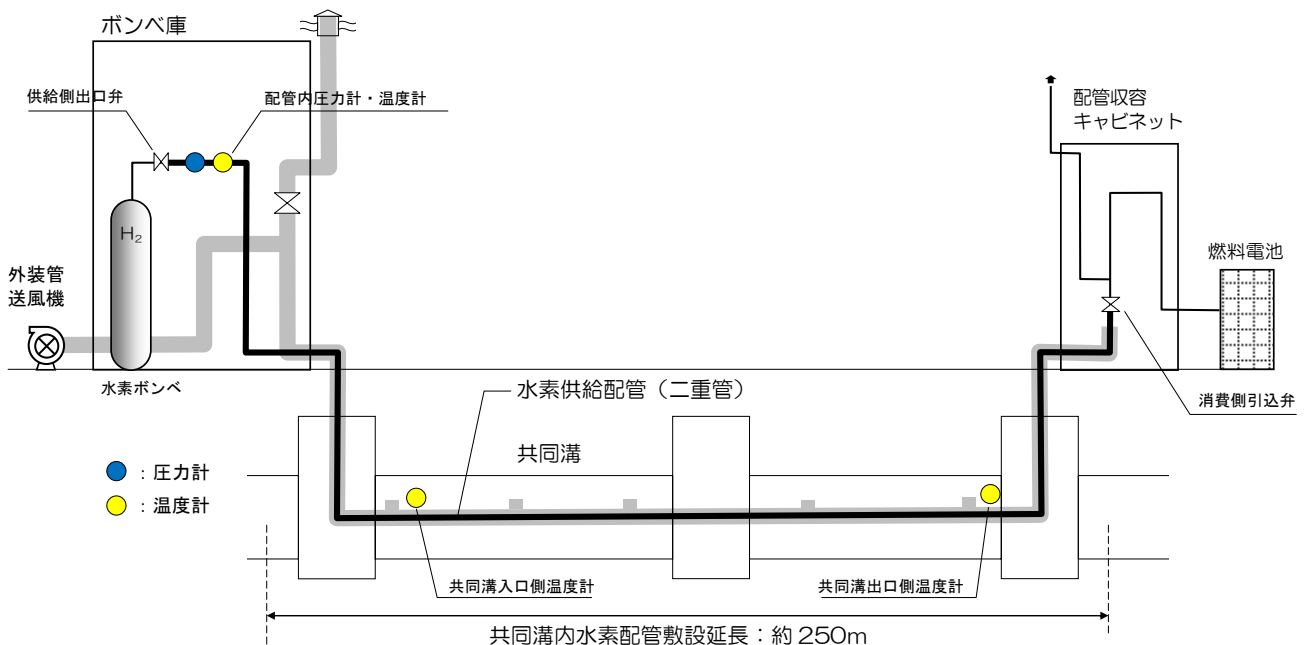
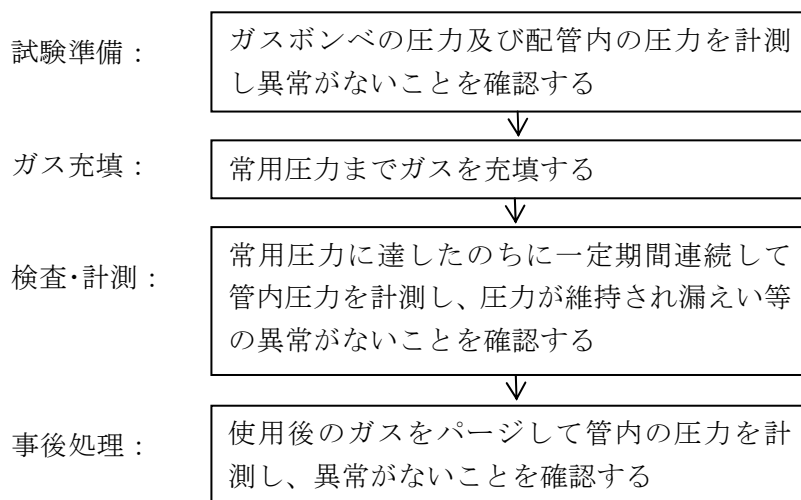


図 2.55 水素配管の気密性の検証に係る実験設備概要

## ② 実験方法

ヘリウムを使用した気密性試験は、平成23年度に実施した気密性試験と整合をとるために、供給圧力を20kPa程度とする想定を継承し、試験圧力は供給圧力の1.1倍である22 kPaとする。水素を使用した気密性試験は、平成24年度の水素供給実験における供給圧力を最大15 kPaと設定していることから、供給圧力の1.1倍である16.5 kPaとする。

ガスを充填した後は、配管の両端にある供給側出口弁、消費側受入弁を閉鎖し、供給側ではガスボンベとの間の開放弁を開いて、気密性試験対象区間を切り離すことに留意する。



ヘリウムを使用した気密性試験は、夕方にガスを充填した後に夜間を含めて連続20時間に渡って実施した。水素を使用した気密性試験は、作業員が配置されている昼間の時間帯に約30分に渡って実施した。

## 3) 実験結果

### ① 計測データの集計方法

管内圧力、温度、共同溝内温度の計測間隔を調整するために、以下のようにデータを集計し整理した。

- ・ 供給側配管内圧力計：1秒毎計測データを1分間平均値に集計
- ・ 供給側配管内温度計：1秒毎計測データを1分間平均値に集計
- ・ 共同溝入口側温度計：5分毎計測データを補完し1分間データに集計
- ・ 共同溝出口側温度計：5分毎計測データを補完し1分間データに集計

また、管内圧力は温度変化による膨張、収縮により、漏洩が無くても変動することから、計測された圧力と温度に基づき水素配管に充填されたガスの体積換算を行い、連続

的な体積の推移をみることにより水素配管の気密性を評価する。

試験開始時の圧力、温度条件における体積を $V_0$ とし、各時間におけるヘリウム、水素の体積 $V_t$ を $V_0$ に対する比率 $V_R$ で表す。体積比率 $V_R$ は、以下の式より算出する。

$$V_R = \frac{V_t}{V_0} = \frac{P_0}{P_t} \cdot \frac{T_t}{T_0} \quad (2.10)$$

$P_0$  : 試験開始時のヘリウム、水素の絶対圧[kPa]

( $P_0 = He_{p0} + 101.325$ 、 $He_{p0}$  : 試験開始時のガス圧力[kPa(G)])、

$T_0$  : 試験開始時のヘリウム、水素の絶対温度[K]

( $T_0 = He_{t0} + 273.15$ 、 $He_{t0}$  : 試験開始時のガス温度[°C])

$P_t$  : t 時のヘリウム、水素の絶対圧[kPa]

$T_t$  : t 時のヘリウム、水素の絶対温度[K]

## ②ヘリウムを使用した気密性試験結果

19:30から翌日の15:30まで20時間にわたって気密性試験を行い、管内圧力、温度、及び共同溝内の温度を連続的に計測した。

管内圧力は、試験の前半では25~26kPa、試験の終わりには26~27kPaを記録しており、わずかに増加する傾向が捉えられる。外気温の影響を受けやすい管内温度計（ボンベ庫内に設置）では、朝方の-2°Cから昼間の11°Cまで大きく変動する温度が計測されているのに対して、共同溝の入口側温度計では20°C程度、共同溝の出口側温度計では26°C程度で安定している温度が計測されている（図2.56）。

地上部及び共同溝内の水素配管の異なる環境を反映するために、配管延長250mのうち5%を管内温度、45%を共同溝入口側温度、50%を共同溝出口側温度に按分して体積比率を見積もると、試験開始時点からわずかに元の体積を下回るものの、20時間にわたって体積比率が安定していることが確認された（図2.57）。26kPaの圧力をかけた状態においても長期間にわたって体積変動が発生していないことから、ヘリウム漏洩が生じていないことが気密性試験により確認された。

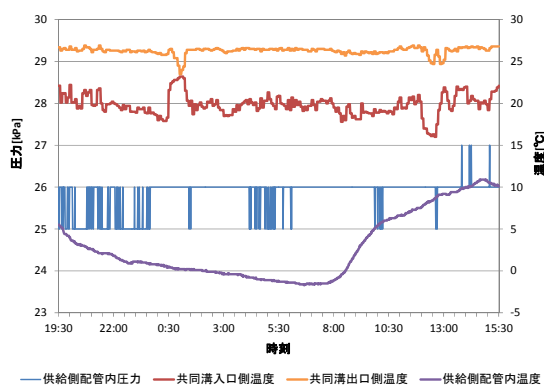


図 2.56 気密性試験における圧力、温度計測データ

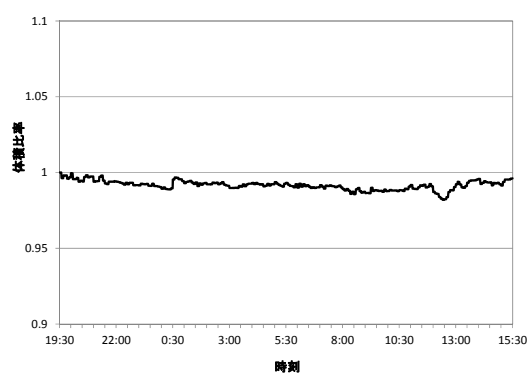


図 2.57 水素配管内のヘリウムの体積比率の推移 (11日 19:30~12日 15:30)

### ③ 水素を使用した気密性試験結果

ヘリウム試験と同様に水素による気密性試験を行い計測されたデータから体積比率を算定した(共同溝入口側温度は外部要因による例外値として除いた)(図2.58、図2.59)。30分間にわたって体積比率が安定しており、水素漏洩が生じていないことが確認された。

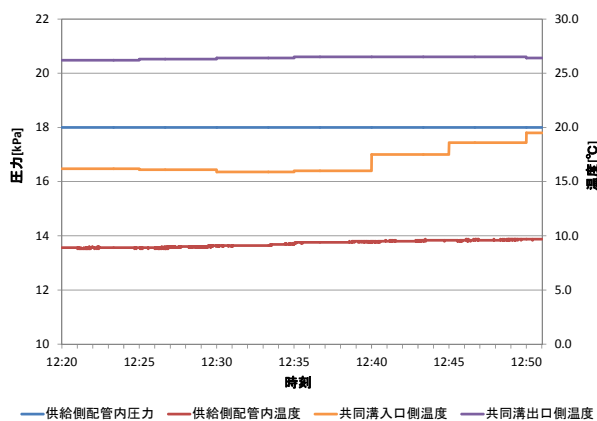


図 2.58 気密性試験における圧力、温度計測データ (13日 12:20~12:50)

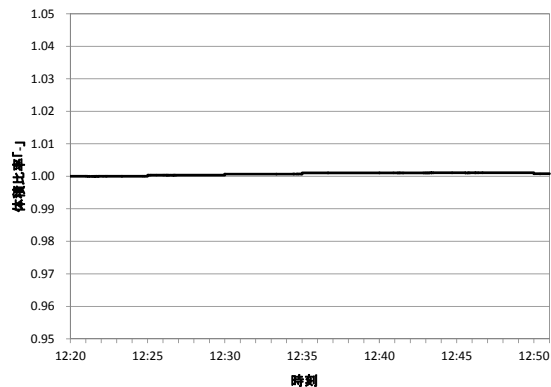


図 2.59 水素配管内の水素の体積比率の推移 (13日 12:20~12:50)

### (3) 外装管内の通気性状の検証

#### 1) 実験の目的

ポリエチレン管内の水素が共同溝内に漏洩することを回避するために、本実験では外装管により漏洩した水素をブロックする二重管を整備することとしている。

二重管の内管が破断し、水素の送出と消費を停止した後に配管内に滞留する水素が外装管内に漏洩すると、外装管内の漏洩箇所付近で水素割合が非常に高い状態となることが想定される。また仮にポリエチレン管が破損し外装管内に水素が全量漏洩する状態で、水素供給が継続された場合には、全区間が爆ごう下限の割合を上回ることが想定される。

共同溝内の着火源となる設備とは外装管でブロックされているため、内管から水素が漏洩しても直ちに水素の燃焼、爆ごうが生じるものではない。しかし、外装管内に爆ごう下限を上回る水素が滞留し、同時に外装管が破損することにより水素混合空気が共同溝内に漏洩した場合には、共同溝内の発火源が爆ごうを引き起こし共同溝内の他の占用物件に被害を及ぼす危険性がある。このようなリスクを回避するためには、外装管内に外気を引込み、管内に漏洩した水素を希釈する必要がある。

したがって、本実験では外装管内空気の流速を連続的に計測し、送風機を使用しない状況で両端で外気開放している外装管の通気性状を把握する。さらに、1分以内で外装管内の空気を排出する能力のある送風機を選定・装備し、この送風機を実際に運転して排出口、吸引口の風速を計測することにより、水素漏洩発生後も外装管内の水素割合を爆ごう下限を下回る水準に抑制することが可能であるかどうかを検証した。



## 2) 実験設備及び実験方法

### ① 装管通気性の計測ポイント

実験の対象となる二重管の外装管は、水素送出部のボンベ庫外で外気開放及び送風機に接続しており、ポリエチレン管と接合する共同溝内区間を介して、水素消費部の配管収容キャビネット内で外気開放している。ボンベ庫内に敷設した外装管立ち上げ管内部には、温湿度計、風速計を設置し、外装管通風吹き出し口にも風速計を設置した(図2.60)。

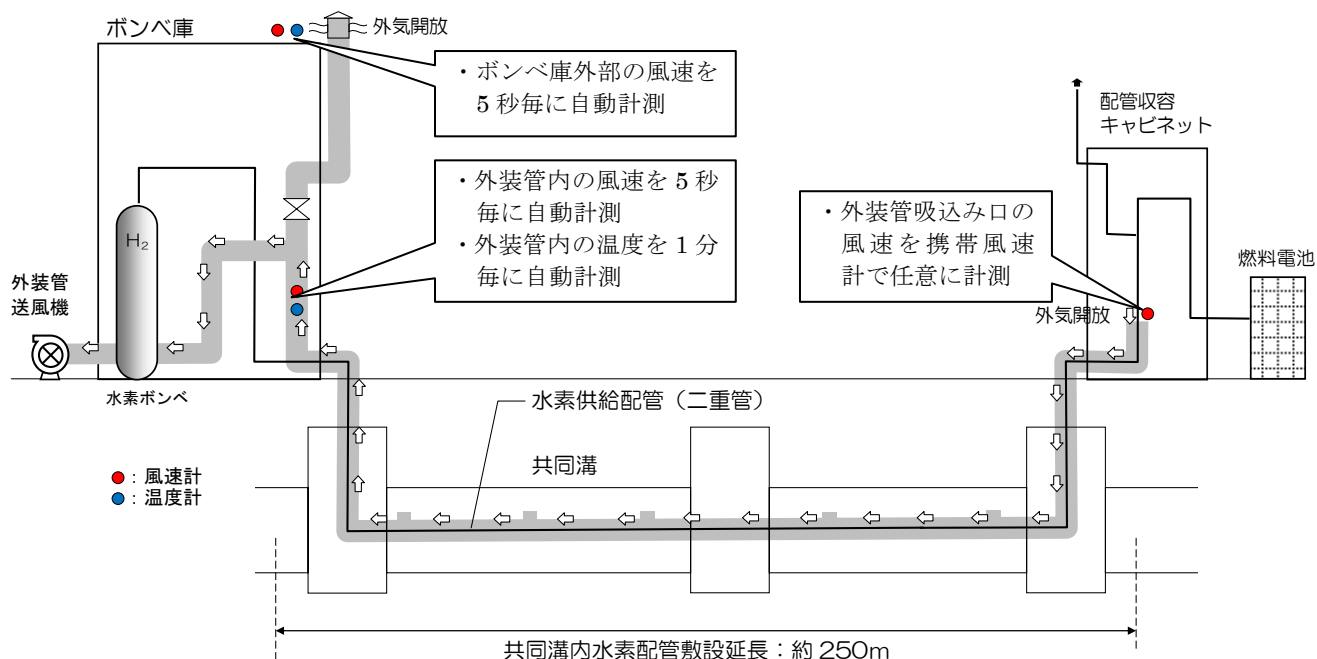


図 2.60 外装管における通気性状検証の実験設備概要

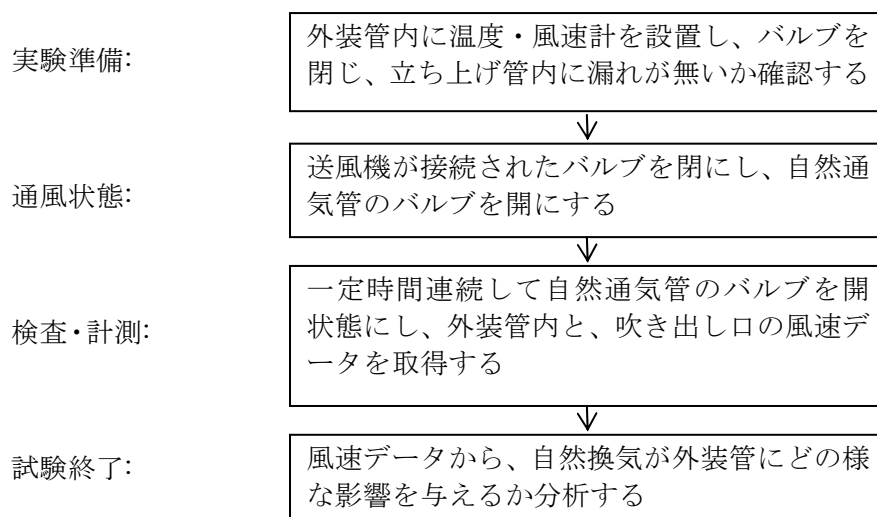
### ② 送風機の仕様選定

共同溝内に敷設した延長250mの二重管において、内管の専有空間を除く外装管内の容積は、直管部、曲りBOXを合わせて1.18m<sup>3</sup>と想定される。水素消費部(燃料電池側)の空気吸込口から水素送出部(ボンベ庫側)の空気排出口までの静圧を二重管のアイソメ図から算定した結果、単位抵抗を1.0Pa/mとした場合は0.92kPa、単位抵抗を1.5Pa/mとした場合は1.09kPaと想定される。

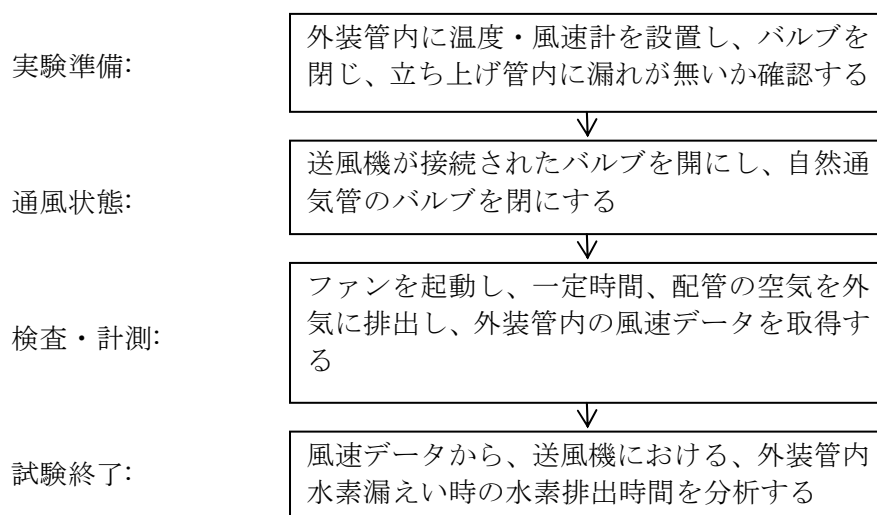
したがって、静圧1.09kPa以上かつ排気量1.18m<sup>3</sup>/分以上の送風機を選定した。

### ③実験方法

自然状態における通気性状の検査・計測過程では、外装管立ち上げ管の風速センサーで管内の風速、気温を記録し、ボンベ庫外の風速センサーで吹き出し口の風速を記録する。



適宜ボンベ庫外に設置された送風機を運転し、外装管内の空気をパージする試験を行う。また、実測で得た送風量データを基に、外装管内の空気の排出時間等を算出する。



### 3) 実験結果

#### ① ボンベ庫側排出口の計測データ

外装管内風速の時刻別変動を図2.61に示す。ボンベ庫外部では日中は2m/s程度の風速が観測されたのに対して、自然換気による外装管内の風速は最大0.162m/sであり、無風の時間帯も多い。外装管内には通常時に通風がないため、水素センサーまでの距離が長い場合は、検知に時間がかかると考えられる。

送風機を運転した時には、外装管内に5.0m/s程度の風速が計測された。

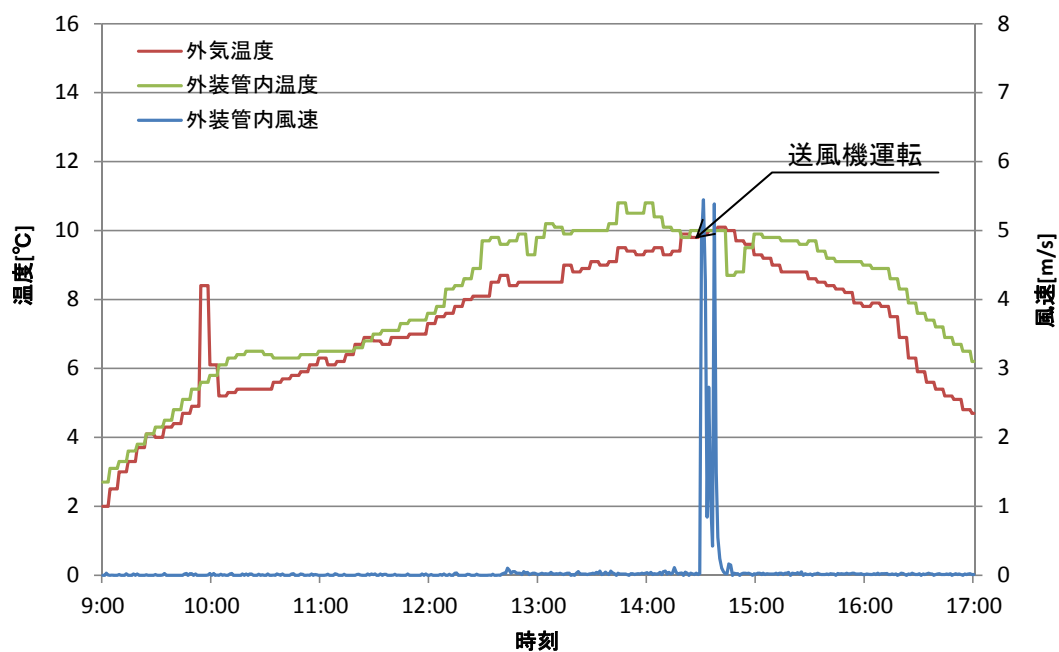


図 2.61 外装管内風速・温度と外気温度計測データ (12日 9:00~17:00)

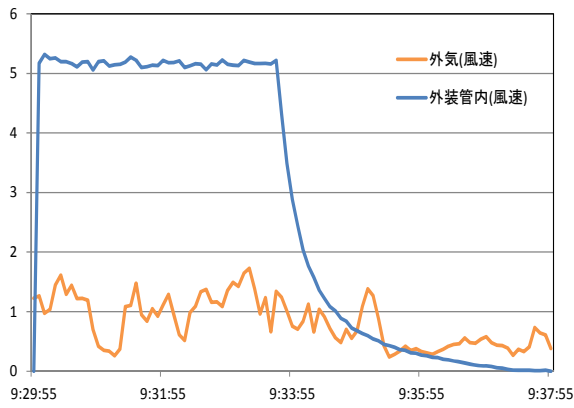


図2.62 送風機運転時間の外装管内風速、外気風速 (13日9:29~9:37)

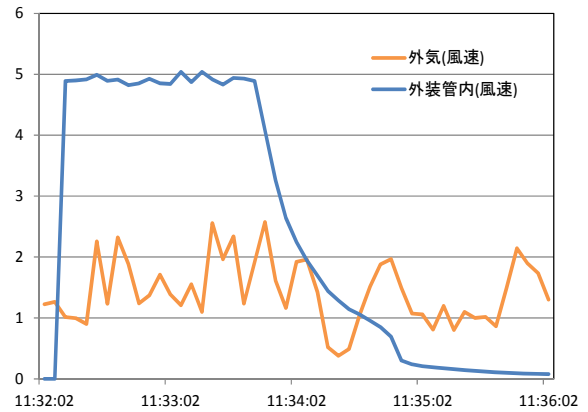


図2.63 送風機運転時間の外装管内風速、外気風速 (13日11:32~11:37)

12月17日~19日の公開実験期間中においても何回か送風機の起動実験を行い、外気温、外装管内温度と合わせて外装管内の風速の変動を記録した。公開実験中送風機を起動した時には、3~5m/s程度の風速が記録されている(図2.62-2.64)。

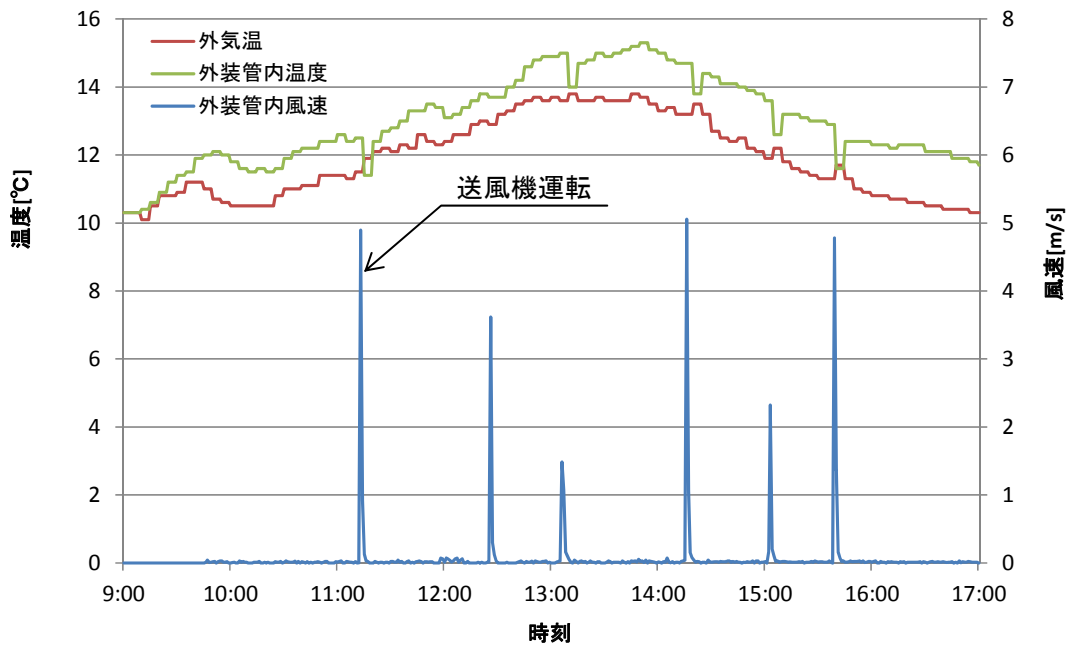


図 2.64 外装管内風速・温度と外気温度計測データ (18日9:00~17:00)

## ②吸込み口の計測データ

送風機の運転時にユニットハウスの吸込み口で携帯型の風速計で風速を計測した結果を見ると、開口部の計測ポイントでばらつきがあるものの、計測値は4.68～5.46m/sとなっており、排出口で計測した5.0m/sに近い風速が計測された（図2.65）。

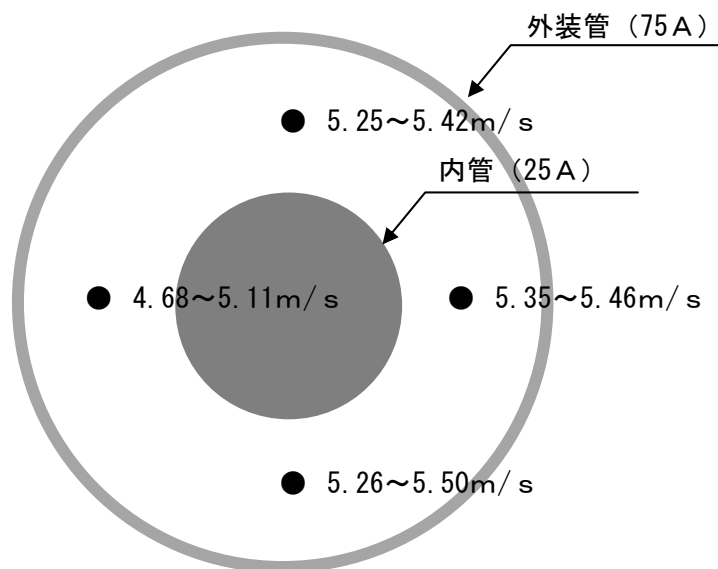


図 2.65 吸込み口の風速計測箇所と計測結果

(12月13日 11:35~11:39 外気温 16℃ 湿度 30%)

#### 4) 水素漏洩時における管内空気排出の有効性

##### ①外装管内の水素排出(完全混合時)と完全置換に掛かる時間

下記の式を用いて、送風機を運転して内管から外装管に漏洩した水素(完全混合時)を排出するまでに掛かる時間を算出した。内管の水素ガスが外装管に漏えいした際に、外管全体に完全混合すると想定し、送風機を運転した際に記録した風速により混合空気が外気に放出され、徐々にガス濃度が減衰すると考える。

$$p - p_0 = (p_1 - p_0)e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (2.11)$$

$p$  : 内管水素ガス濃度[kg/m<sup>3</sup>]、 $p_0$ :外気水素ガス濃度[kg/m<sup>3</sup>]、 $p_1$ :管内の初期水素濃度[kg/m<sup>3</sup>]、

$Q$ :風量[m<sup>3</sup>/s]、 $t$ : 時間[s]、 $V$ :配管の体積[m<sup>3</sup>]

外気の水素濃度は無いと考えるので、 $p_0 = 0$ である。従って、以下の計算式で、送風機の換気による外装管内水素ガス排出濃度を算出できる。

$$p = (p_1)e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (2.12)$$

漏えい時に外装管内で完全混合した水素の濃度は13%程度となり、送風機の運転による希釈により徐々に減衰する。水素濃度が燃焼限界濃度の4%を下回る時間は、送風機の運転開始後52秒となる(図2.66左)。

次に、外装管内の空気を総入れ替え(完全置換)する際に要する時間を算出する。外装管の気積は、約1,214m<sup>3</sup>であり、積算換気量がこの値を超える時間を確認すると44秒となり、積算換気量を上回る結果となる(図2.66右)。

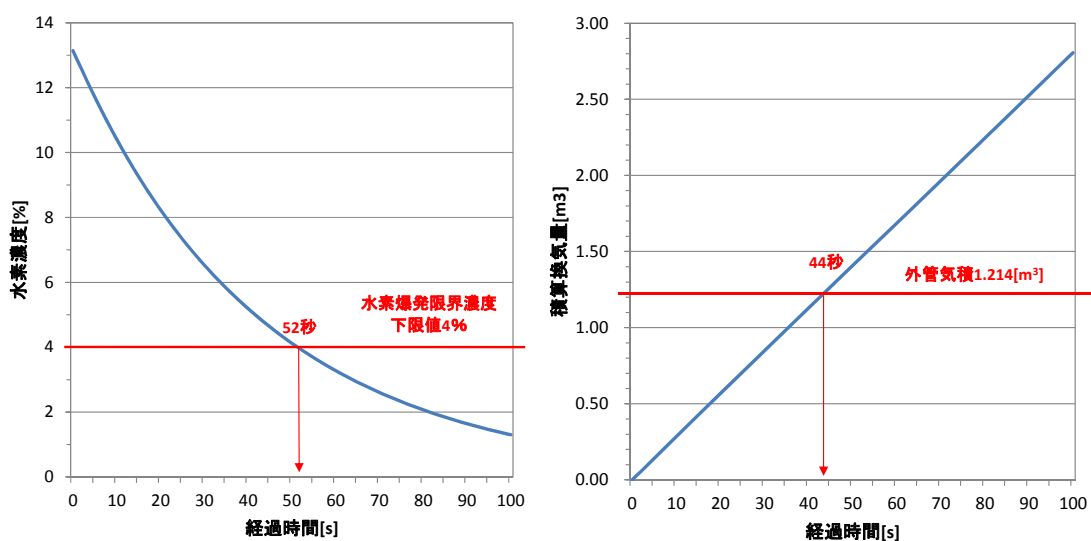


図 2.66 燃焼限界濃度下限値までの水素混合空気排出、完全置換に要する時間

## ② 送風機による外装管の水素排出に掛かる時間

内管の水素が外装管内に全量瞬時に漏えいした場合を想定し、送風機により水素の排出に要する時間を算出した。送風機から最も遠い水素消費部（ユニットハウス側）において水素漏洩が生じる場合を考える。

水素混合のプロセスを計算するために一定間隔で外装管（250m）を区切り、区間ごとに外装管内水素量の変化を求め、物質収支式より全区間の水素濃度を順次算出する。外装管を区切る間隔によって計算値の相違が予想されたため、ここでは外装管を区切る間隔を3ケース（10m, 5m, 1m）設定し、配管内全区間が水素燃焼限界濃度下限値（4%）までに要する時間を算出した。その結果、10m間隔で区切った場合は64秒、5m間隔で区切った場合は63秒、1m間隔で区切った場合は61秒となった（図2.67-2.69）。

本実験で選定した送風機によれば、1分程度で外装管内の漏洩水素を排出する能力があることが示された。

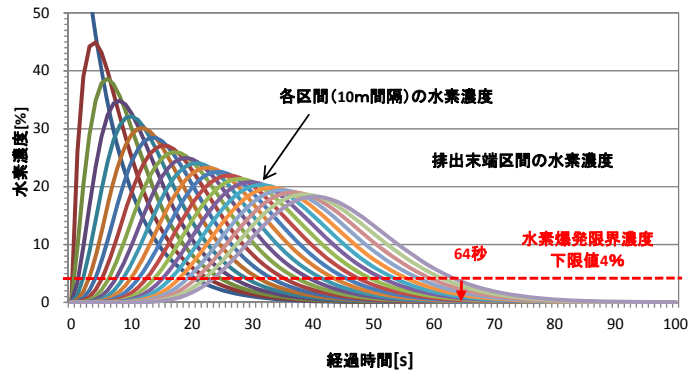


図 2.67 各区間の水素濃度変化 (10m 間隔)

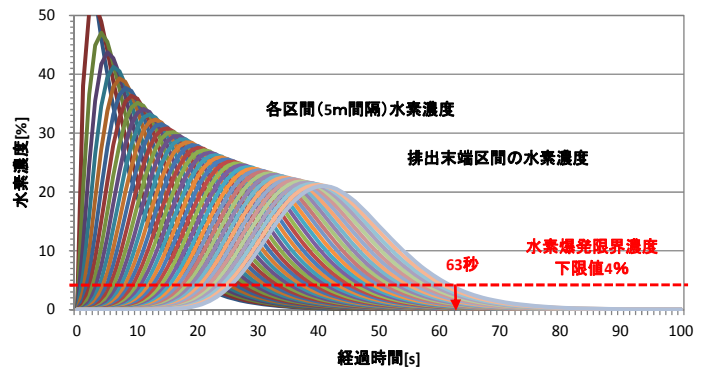


図 2.68 各区間の水素濃度変化 (5m 間隔)

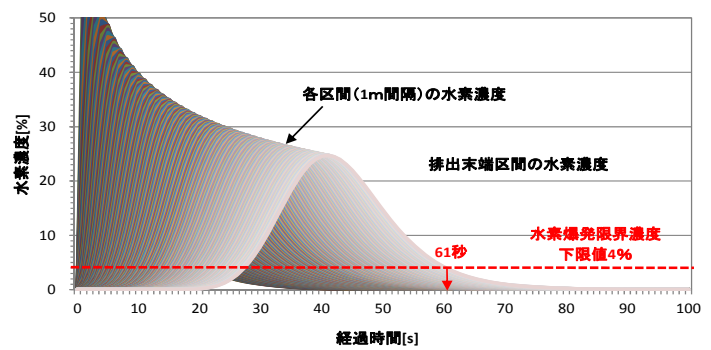


図 2.69 各区間の水素濃度変化 (1m 間隔)



#### (4) 燃料電池使用時等の水素導通性状の検証

##### 1) 実験の目的

都市内では主に燃料電池の動力源として水素を供給することが想定されるため、燃料電池の運用特性を考慮して水素供給インフラを構築することが求められる。

燃料電池は、天候により太陽電池の出力が変動する場合や、商用電力系統が停電した場合にバックアップ電源として活用することが期待されており、一定地域の燃料電池群が同時に運転・停止する事態が起り得る。このように広範囲かつ同時に需要が大きく変動するのは、都市ガスの供給には見られない水素供給の特性であり、水素供給の流量、圧力の変動が配管設備等のインフラにどのような影響を与えるかを把握し、必要となる安全対策を講じることが重要となる。

したがって、本実験では家庭用途に製作された発電出力1kWの純水素燃料電池と共同溝内に敷設した延長約250mの水素配管を接続して、燃料電池に水素を供給することにより、燃料電池の発電出力と水素の流量・圧力を連続的に計測する。これにより太陽電池等と連携して燃料電池が運転される場合の出力変動の状況や水素送出側に及ぼす影響について明らかにする。

さらに、水素圧力、流量を一定にして燃料電池を定格運転した後に急停止した際の水素圧力、流量の変動を計測や、水素を大容量で大気放出時に、開放弁を瞬時に閉鎖、及び開放した際の管内水素の流量、圧力の変動の計測を行い、太陽電池の出力変動を調整する燃料電池群が一斉に運転・停止する場合の水素配管への影響を検証する。

## 2) 実験設備及び実験方法

### ① 水素通気性状に係る供給流量、圧力の計測ポイント

水素供給実験では、水素配管の端部を純水素型燃料電池に接続し、燃料電池が消費する分の水素を水素ポンベから供給する。水素送出部ではボンベ庫内の水素配管に流量計、圧力計を設置し、水素消費部ではキャビネット内の水素配管に圧力計を設置する（図 2.70）。本実験では流量データ、圧力データを1秒毎に記録して使用する。

※キャビネット内の水素圧力データは、データロガーの不調により全データ欠損

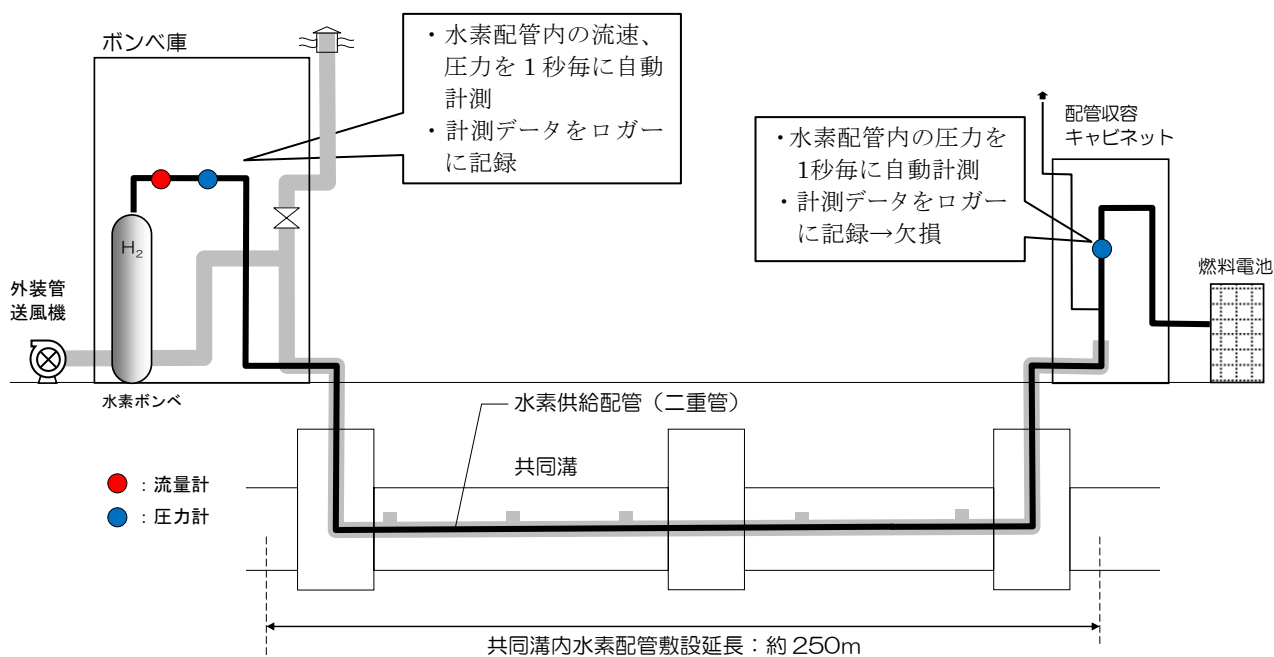


図 2.70 燃料電池使用時等の水素導通性状検証の実験設備概

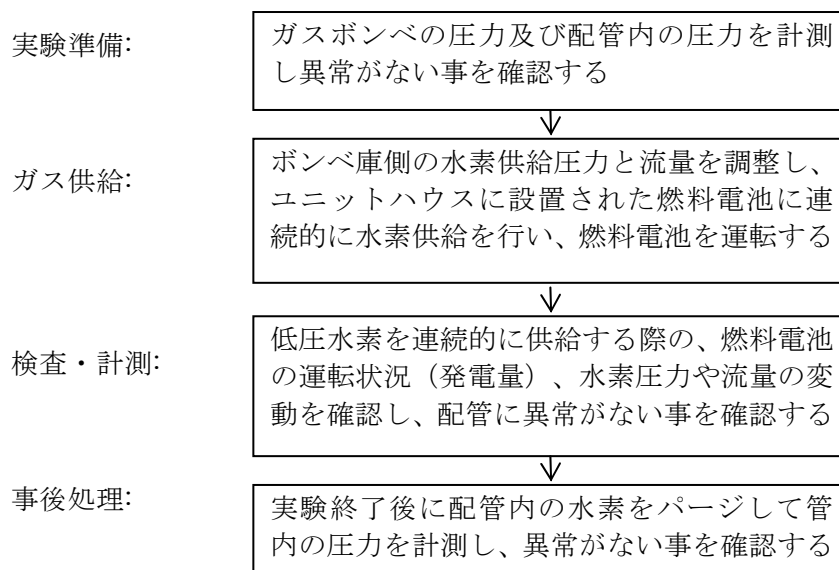
### ② 燃料電池の仕様と計測ポイント

つくば市が所有する家庭対象規模の純水素固体高分子型燃料電池を借用して、水素供給実験で水素を消費する燃料電池として運用する。燃料電池内で運転状況を示す各種データが計測されており、本実験ではその中で発電量データを1秒毎に記録して使用する。

### ③実験方法

共同溝内に敷設した水素配管を介してポンベ庫から燃料電池に水素を供給し、燃料電池を運転している期間の水素供給流量、圧力、及び燃料電池発電量を計測する。燃料電池の多様な運転状況を再現し、水素の供給流量・圧力のデータを収集するために、ユニットハウス内の電力負荷を瞬時に遮断、接続する実験や、燃料電池を定格運転した後に急停止する実験を行う。実証実験における最大水素供給圧力は、燃料電池仕様書に記載された水素使用条件である15kPaに設定する。

計測したデータに基づき燃料電池の運転状況に応じて水素流量・圧力の変動と配管に与える影響について検討する。



また、燃料電池運転実験を行う前に配管内の窒素パージ（水素置換）のために水素を大容量で大気放出する際に、開放弁を瞬時に閉鎖、及び開放することにより、燃料電池群の水素消費の瞬時変動を想定した管内水素の流量、圧力の変動を計測する。

### 3) 実験結果

#### ① 計測データの概要

12月14日の実験準備、17日の公開実験において、水素供給及び燃料電池の運転・停止実験を行った13時～16時の燃料電池発電量、水素流量、水素供給圧力の時刻別変動データが記録され、発電量と水素流量に相関性があることと、出力変動時に供給圧力が増減することが捉えられた（図2.71）。

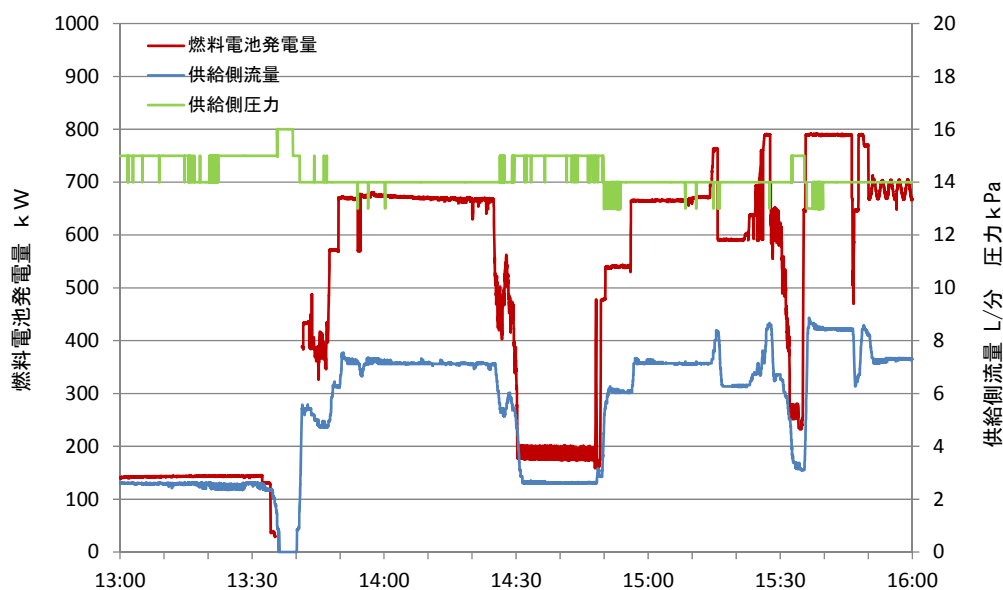


図 2.71 燃料電池間断使用時の水素流量、圧力計測データ（17日13:00～16:00）

12月18日の公開実験においては、一部欠損があるものの、水素の立ち上げ準備を行った10時～13時の燃料電池発電量、水素流量、水素供給圧力の時刻別変動データ、及び水素供給及び燃料電池の運転・停止実験を行った13時～16時の燃料電池発電量、水素流量、水素供給圧力の時刻別変動データが記録され、発電量と水素流量に相関性があることと、出力変動時に供給圧力が増減することが捉えられた（図2.72, 図2.73）。

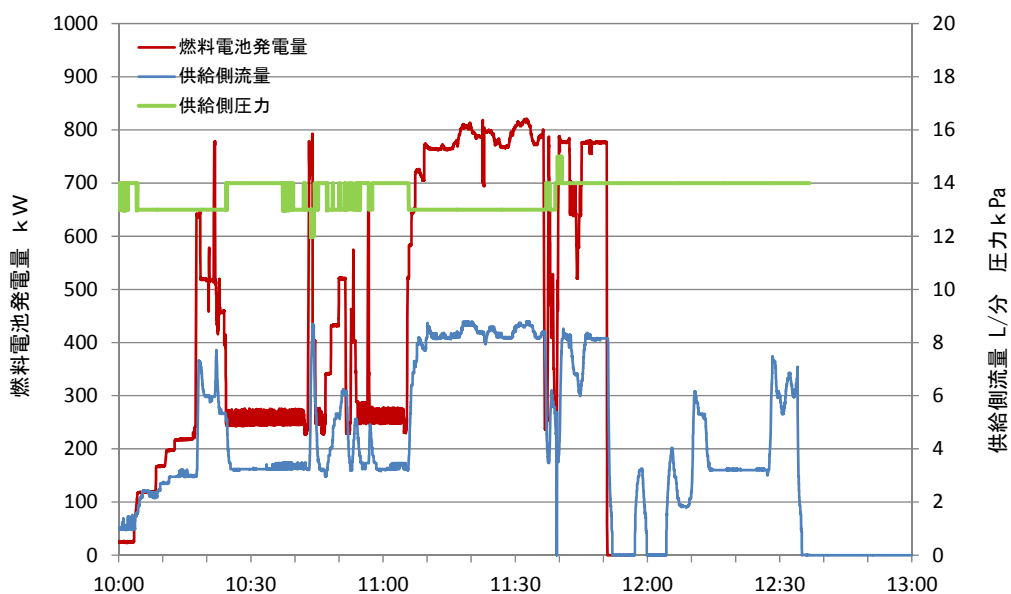


図 2.72 燃料電池発電量と水素送出流量、圧力計測データ（18日10:00～13:00）

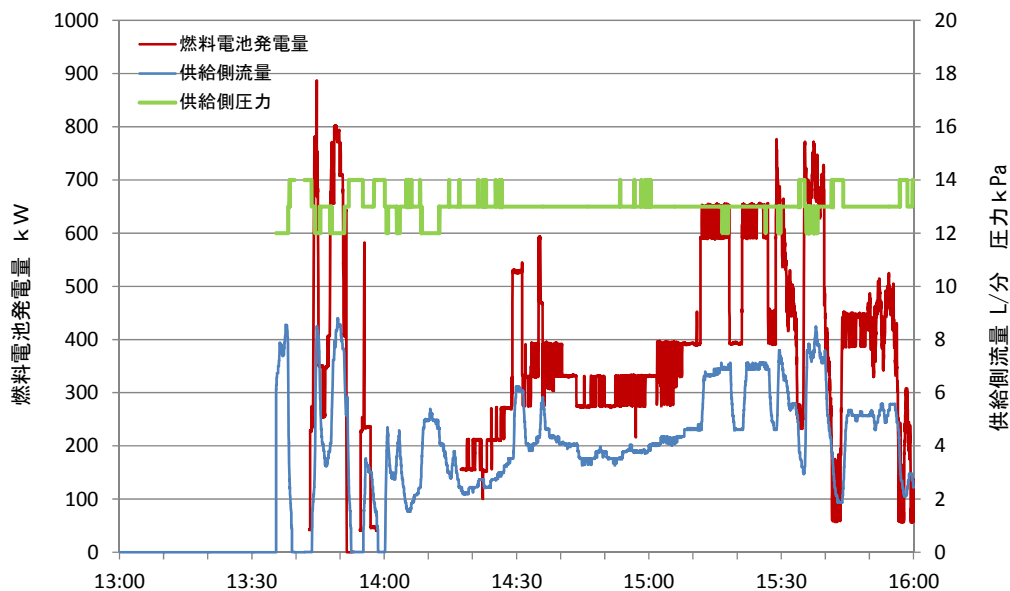


図 2.73 燃料電池間断使用時の水素流量、圧力計測データ（18日13:00～16:00）

12月19日の公開実験においては一部欠損があるものの、水素の立ち上げ準備を行った10時～13時の燃料電池発電量、水素流量、水素供給圧力の時刻別変動データが記録され（図2.74）、水素供給及び燃料電池の運転・停止実験を行った13時～16時については燃料電池発電量の欠損が生じたものの、水素流量、水素供給圧力の時刻別変動が記録され、データ発電量と水素流量に相関性があることと、出力変動時に供給圧力が増減することが部分的に捉えられた（図2.75）。

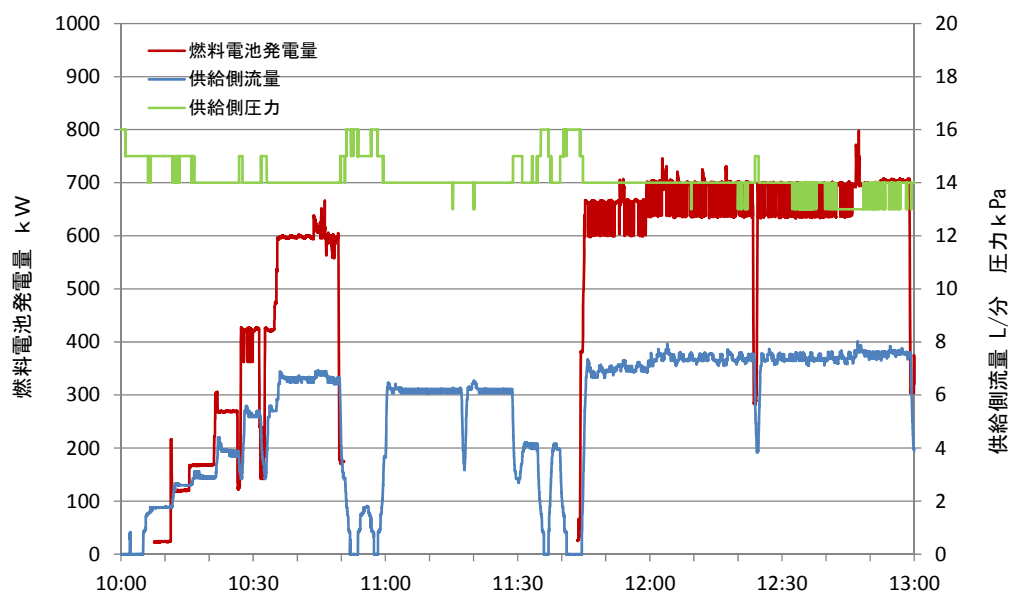


図 2.74 燃料電池発電量と水素送出流量、圧力計測データ（19日10:00～13:00）

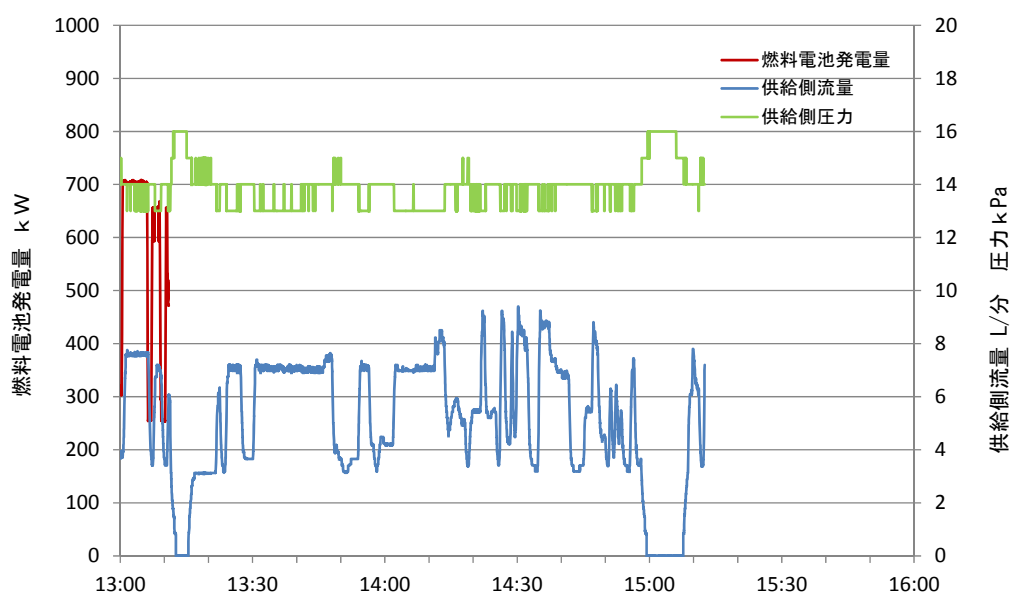


図 2.75 燃料電池間断使用時の水素流量、圧力計測データ（19日13:00～16:00）

## ②燃料電池間断使用時の水素配管への影響

12月17日において、燃料電池の発電出力が680Wから200Wに低下した場合には、水素の流量が7L/分から2.5L/分に減少するが、流量の減少による供給圧力の変動は1kPa程度の増加にとどまっており、配管への影響は軽微と想定される（図2.76上）。

12月17日において、燃料電池の発電出力が250Wから800Wに増加した場合には、水素の流量が瞬時に3L/分から8.5L/分に増加する。このとき供給圧力は15kPaから13 kPaに減少しているが、5分後には14 kPaに戻り安定しており、配管への影響は軽微と想定される（図2.76下）。

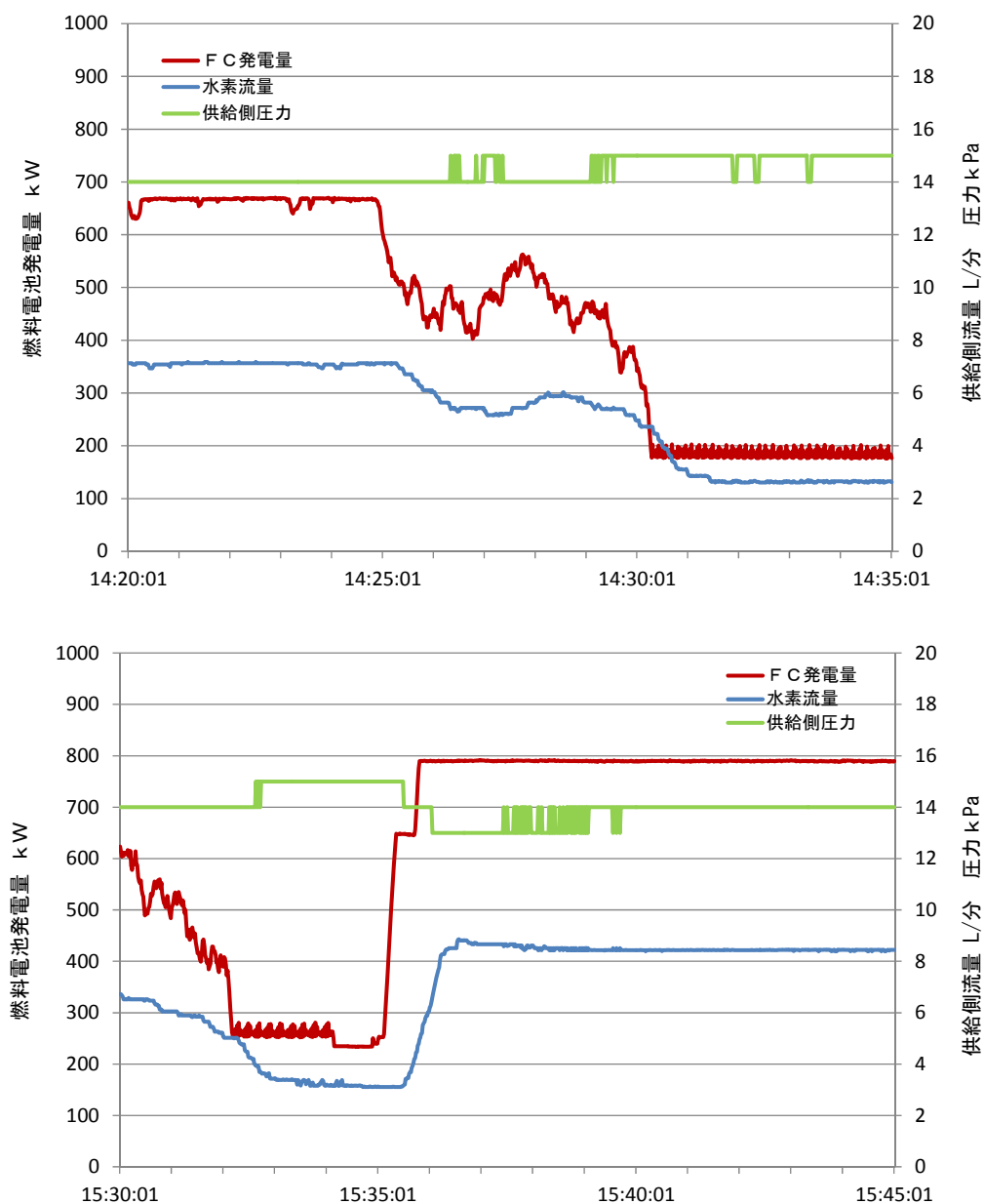


図 2.76 燃料電池出力変動時の水素流量、圧力（上：17日14：20、下：17日15：30）

12月18日において、燃料電池の発電出力が250Wから750Wに増加した場合には、水素の流量が瞬時に3L/分から8L/分に増加するが、流量の増加による供給圧力の変動は1kPa程度の低下にとどまっております、配管への影響は軽微と想定される（図2.77上）。

12月18日において、燃料電池の瞬時停止（発電出力760W→0W）した場合には、水素流量が8L/分から0L/分に減少するが、ポンペ庫側では流量が漸次減少する状況が捉えられている。このとき供給圧力は14 kPaで安定しており、配管への影響は軽微と想定される（図2.77下）。

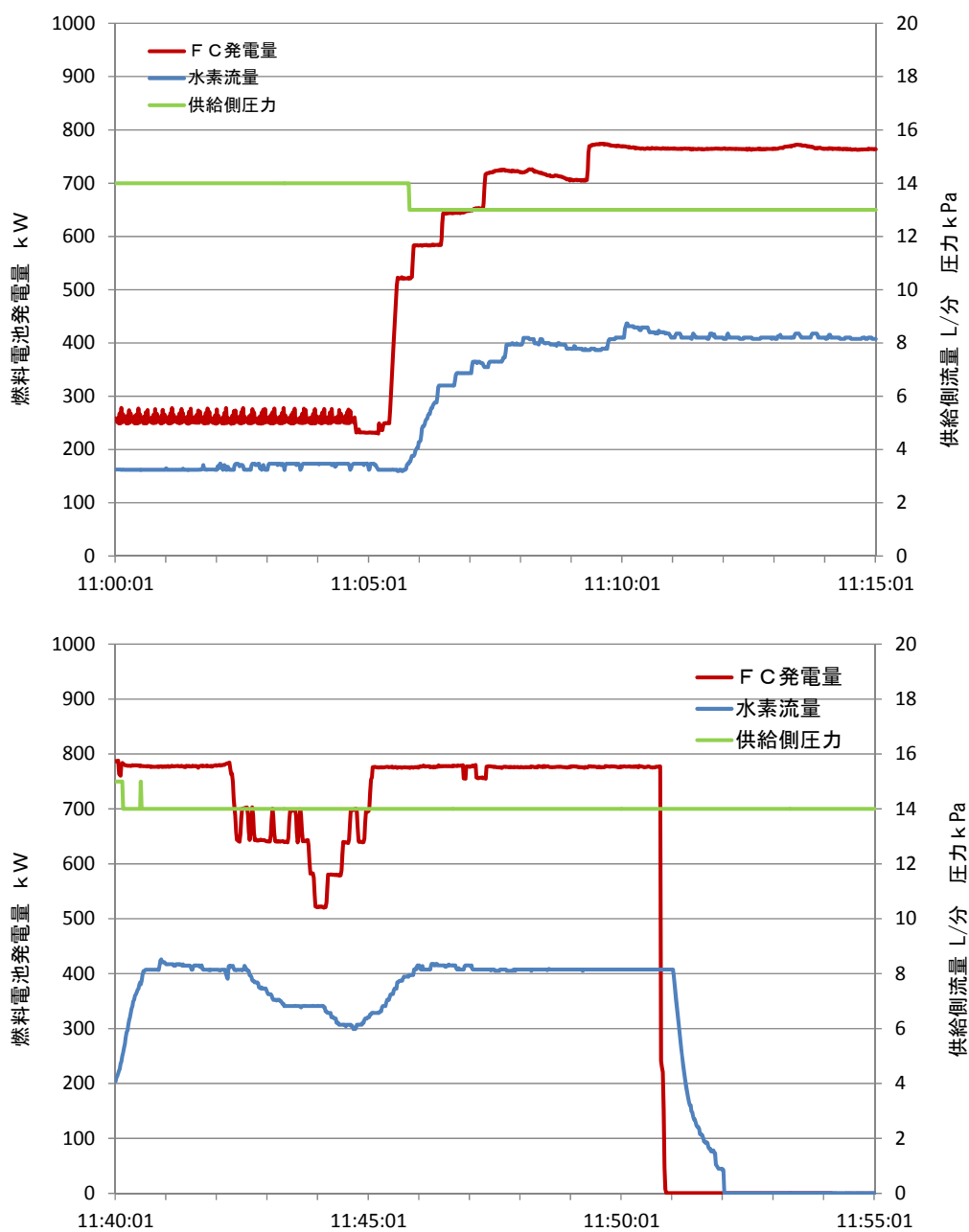


図 2.77 燃料電池出力変動時の水素流量、圧力（上：18日11：00、下18日：11：40）



燃料電池が0Wから800Wまでの間で短時間に大きく出力変動する場合には、水素供給流量も0L/分から8.5L/分までの間で大きく変動するが、流量は漸次変動する傾向が捉えられている。このとき供給圧力は12 kPa から14 kPaの間で変動しているが、漸次変動する供給流量がクッションとなって急激な圧力変動は計測されていない。したがって燃料電池が大幅に出力変動を繰り返す場合であっても、配管への影響は軽微と想定される（図 2.78）。

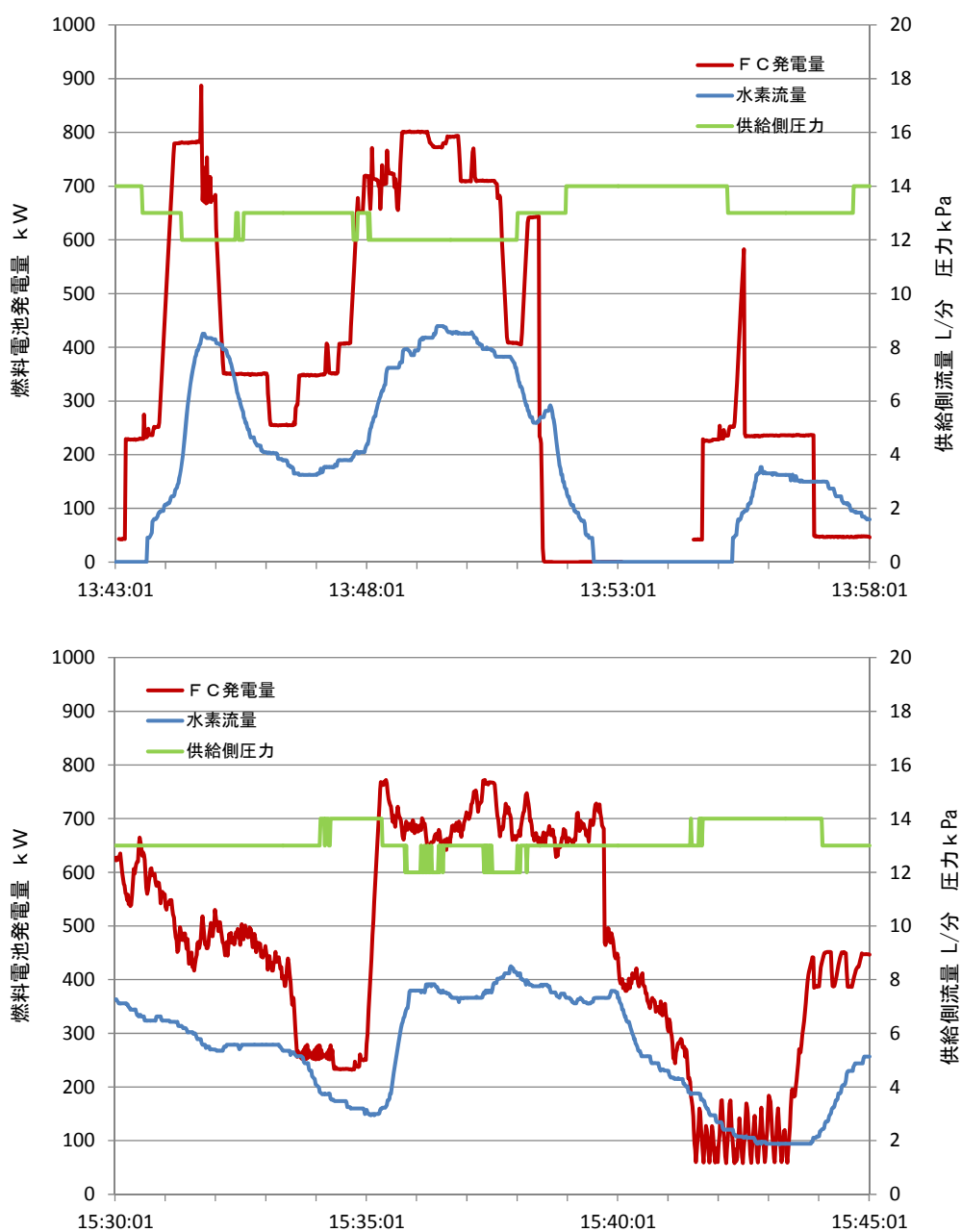


図 2.78 燃料電池出力変動時の水素流量、圧力（上：18日13:43、下：18日15:30）

#### 4) 燃料電池群の一斉遮断時の水素配管への影響

水素の大容量放出、瞬時閉時の水素流量、圧力の時間変化を図2.79に示す。

水素消費部の配管キャビネット内の解放弁を開き、ボンベ庫から圧力を13kPaに調整した水素を供給してキャビネットの放出管から外気中に自由放出した場合には、放出管の摩擦抵抗により水素流量は72L/分で安定する。

このとき、キャビネット内の開放弁を瞬時に閉じた際には、ボンベ庫の送出側で水素流量が漸次減少するとともに、水素圧力が13kPaから19 kPaまで6 kPa程度増加することが計測データより明らかとなった。

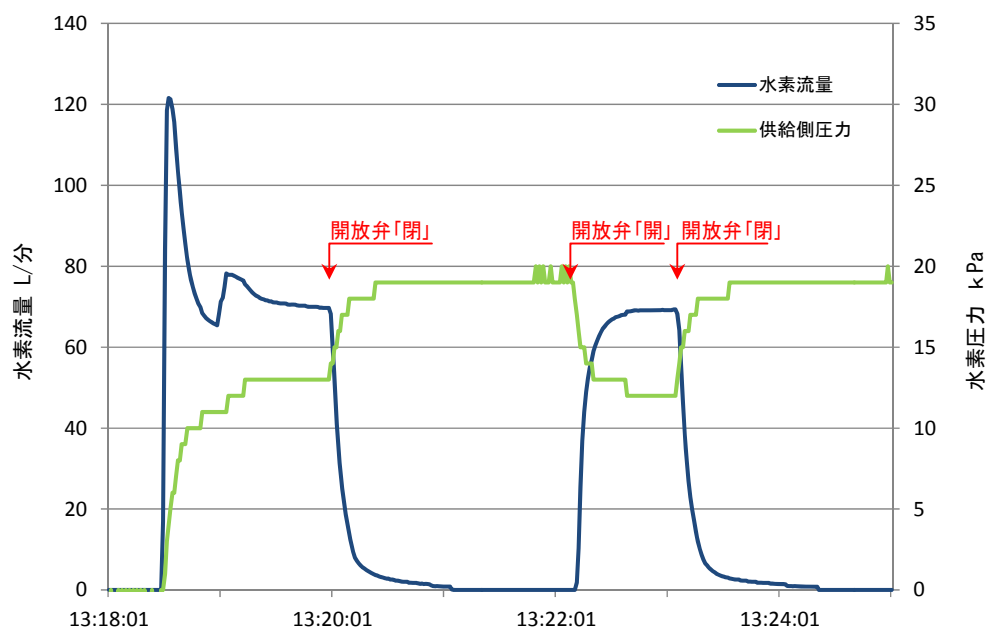


図 2.79 水素の大容量放出～瞬時閉時の水素流量、圧力（14日13:18～13:25）

72L/分の水素流量は、実験で使用した燃料電池が800W発電時の水素流量（8L/分）の9基分に相当する。すなわち、家庭用燃料電池1基が瞬時停止した場合の圧力増加が1～2kPaであったのに対して、家庭用燃料電池9基が同時に停止する場合は、6kPa程度圧力が増加することが想定される。

ポリエチレン管は中圧ガス（300kPa）の供給にも耐えうる性能が保証されており、本実験と同様に15kPa程度の低圧で水素を供給する場合は、燃料電池群の同時停止による圧力増加が配管に及ぼす影響は比較的軽いものと考えられる。

その一方で、圧力増加の水準が燃料電池の機能に支障が生じる30kPaを上回ることが想定されるため、水素流量変動による圧力増加を燃料電池側に及ぼさない仕組みを検討することが必要である。

## (5) 水素パーズ、窒素パーズの安全性の検証

### 1) 実験の目的

共同溝内で水素漏洩が発生した場合には、これを確実に検知し直ちに水素遮断等の対策を実施するために、本実験では水素を供給する際には必ず人が立ち会うことを原則としている。そのため夜間は水素ポンペをガス会社が持ち帰り、各日の実験終了後には配管内の水素をパーズすることとしている。

また、水素供給実験中に共同溝内の占用物件に障害が発生した場合は、作業員が共同溝内に入り、障害物件の点検、修理ができるように、可能な限り速やかに配管内の水素をパーズし、作業の安全性を確保することが必要である。

水素パーズを窒素置換により行う場合には、共同溝内に敷設した250mの水素配管に窒素送入を開始した後で、水素パーズが完了し、配管の全区間で安全が確保されるタイミングを見極めることが重要となる。

一方、窒素置換をした翌日に再度水素置換を行い、燃料電池に水素を供給する際には、窒素が混入して燃料電池を傷めることがないように、配管内から窒素を確実にパーズされ、水素置換が完了したタイミングを見極めることが必要である。

したがって本実験では、水素供給と燃料電池の運転を連続的に行う公開実験に先立って、水素パーズのタイミングを見極めることを目的とする事前実験を行い、パーズ実施中の窒素供給圧力、流量、送出時間と放出口における水素濃度を計測し、水素パーズの性状と目安時間を把握した。同様に窒素パーズの事前実験を行い、パーズ実施中の水素供給圧力、流量、送出時間を計測し、窒素パーズの性状と目安時間を把握した。

事前実験により設定したパーズの目安時間を適用して、公開実験中の水素パーズ、窒素パーズを行うことにより、水素供給及び燃料電池運転実験に係る安全性を検証するデータをさらに収集・整理した。

## 2) 実験設備及び実験方法

### ① 水素パーズ、窒素パーズに係る供給流量、圧力の計測ポイント

キャビネット内の開放弁を経由して、水素配管の端部を延長1.8mの外気放出管に接続し、置換用の窒素、水素をボンベ庫から供給する。水素送出部ではボンベ庫内の水素配管に流量計、圧力計を設置し、流量データ、圧力データを1秒毎に記録して使用する（図 2.80）。水素パーズ中の水素濃度を計測する際には、外気放出管をテフロンチューブに交換し、携帯濃度計のセンサーを排出口に近づけて排出空気中の水素濃度を計測した。

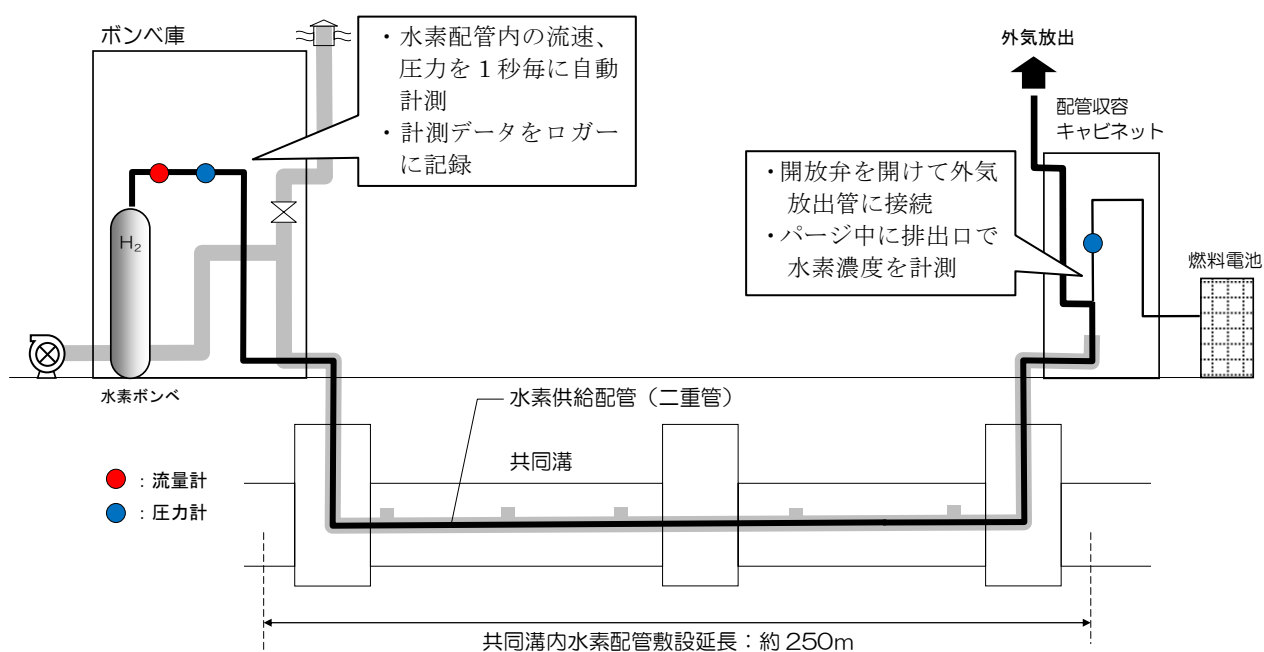
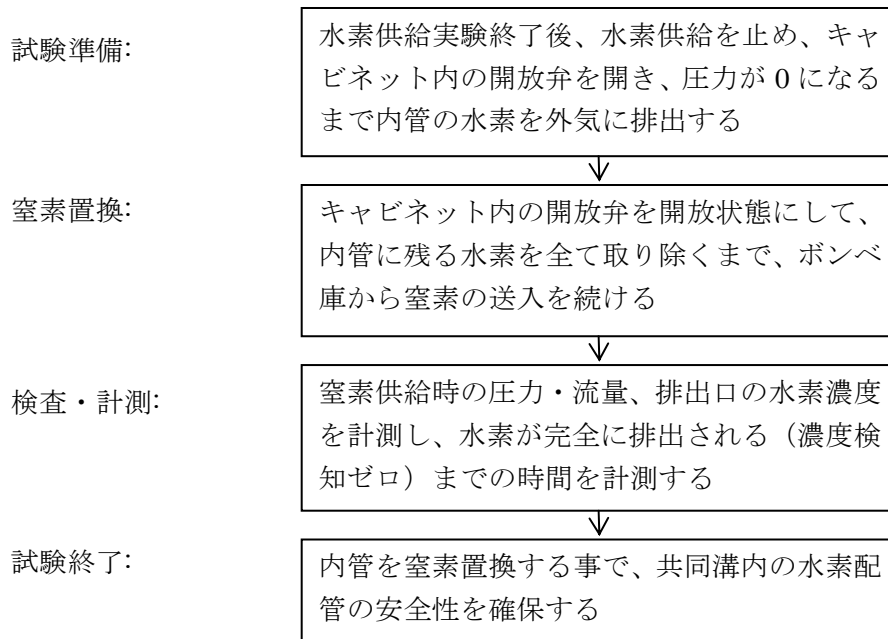


図 2.80 水素パーズ、窒素パーズの安全性検証に係る実験設備概要

## ② 実験方法

水素供給実験終了後に、水素供給を止め、開放弁を開いて内管に残る水素を外気に排出する。さらに管内に残った水素をパージするために窒素を送入し、排出口で水素濃度を計測して水素濃度を検知できなくなるまでにかかる時間と、パージ中の圧力、流量を計測する。外気放出管の状況を写真2.7、写真2.8に示す。



水素供給実験終了前に、管内に残った窒素をパージするために水素を送入し、窒素が排出されるまでにかかる時間と、パージ中の圧力、流量を計測する。実験の様子を写真2.9-2.11に示す。

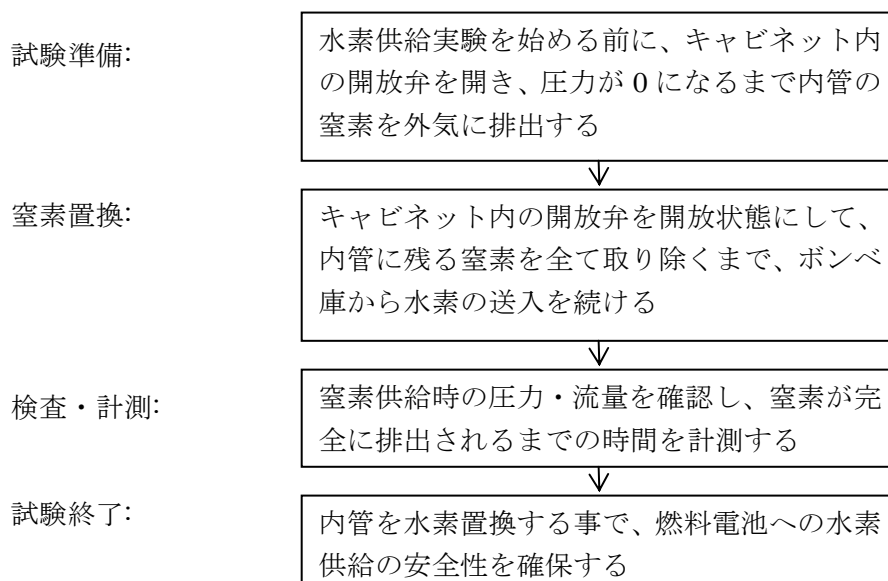




写真 2.7 外気放出管(ステンレス製)の取付け状況  
(外径 : 6.35mm/肉厚 1mm、延長 : 1,800mm)

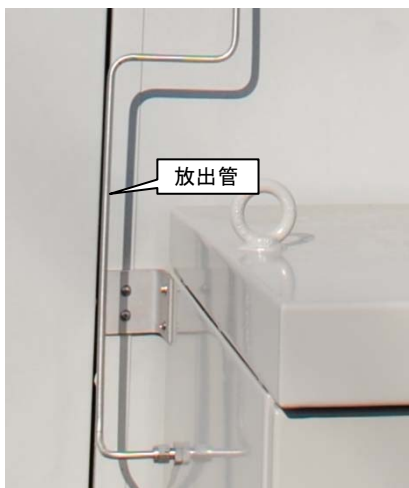


写真 2.8 外気放出管の分岐部  
(開放弁を開いて分岐)



写真 2.9 開放弁の操作状況  
(配管収容キャビネット)



写真 2.10 外気放出口(テフロン管に付け替え)における水素濃度の計測



写真 2.11 パージ作業の操作状況  
(ボンベ庫)

### 3) 実験結果

#### ①水素パージの目安時間

水素供給実験後に管内水素を窒素で置換する際の窒素供給圧力、流量を計測した（図2.81-図2.83）。窒素送出時に供給圧力が増加した後で、水素が外気放出管を通過する際の抵抗により送入する窒素流量及び圧力が安定する期間があり、窒素置換完了後には窒素が外気放出管を通過する際の抵抗が増加して、窒素流量が減少し圧力が増加する。

放出管出口で水素濃度を計測したが、濃度は瞬時に低下しパージのタイミングを計測することは困難であった。窒素流量減少及び圧力増加が安定化した後も200ppmの水素濃度が検知されたが、燃焼限界を大きく下回っているため、安定化後10秒の段階で水素パージが完了するものと設定し、公開実験の際に適用した。窒素置換後には水素放出時には聞かれなかった放出管抵抗による摩擦音が発生することを確認した。

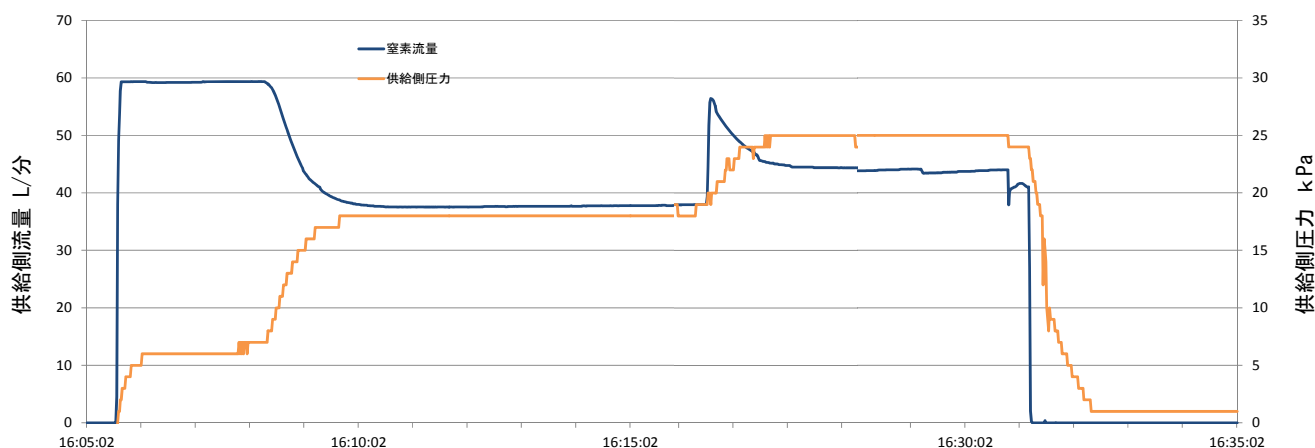


図 2.81 窒素置換（水素パージ）における流量、圧力計測データ（12日16:05～16:35）

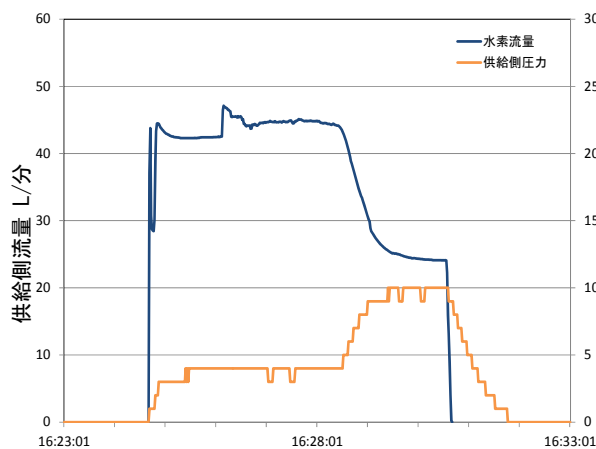


図2.82 窒素置換（水素パージ）における流量、圧力（14日16:23～16:33）

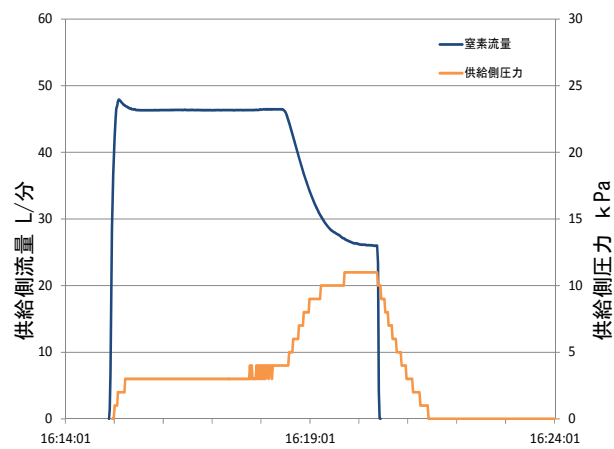


図2.83 窒素置換（水素パージ）における流量、圧力（17日16:14～16:24）

## ②窒素パージの目安時間

水素供給実験前に管内窒素を水素で置換する際の水素供給圧力、流量を計測した（図2.84、図2.85）。

送入圧力が安定まで水素流量が増加～減少した後、窒素が外気放出管を通過する際の抵抗により送入する水素の流量及び圧力が安定する期間があり、水素置換完了後には水素が外気放出管を通過する際の抵抗が減少することによる水素流量の増加及び圧力の低下が捉えられた。

水素パージにおける知見を応用し、水素流量増加及び圧力減少が安定化した後10秒の段階で窒素パージが完了するものと設定し、公開実験の際に適用した。

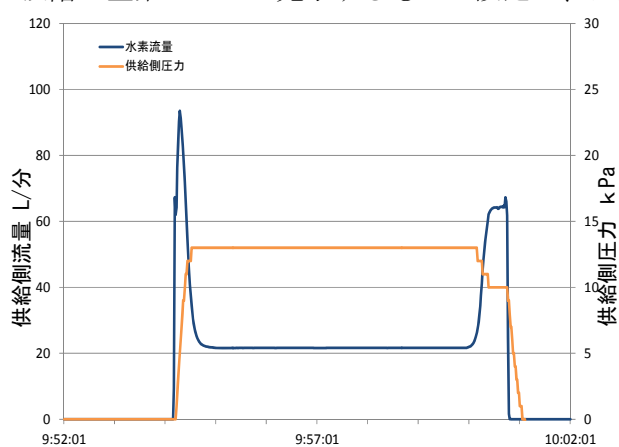


図2.84 水素置換（窒素パージ）における流量、圧力（17日9：52～10：02）

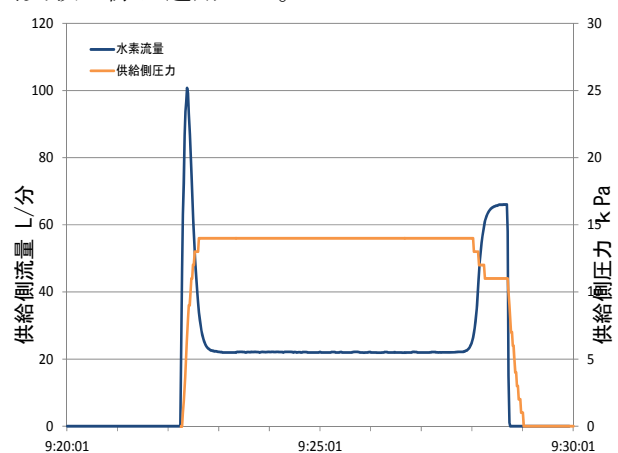


図2.85 水素置換（窒素パージ）における流量、圧力（19日9：20～9：30）



## 2.3 安全対策に係る検討（設計・施工、漏洩検知等）

2.2 で述べた水素の漏洩に関する数値計算、配管の耐震性能に関する実験、配管の炎症防止性能に関する実験の調査結果を踏まえ、建築空間における安全対策について以下の点について整理した。

### 2.3.1 建物空間における安全対策

#### (1) 水素配管の建物の屋外敷設の原則

水素が燃焼する際は無色であるため、配管から水素が漏洩して燃焼した場合、外観により水素の漏洩を判断することは容易でない。そのため、水素配管は建物の屋外に敷設することを原則とする。

戸建て住宅では、燃料電池は屋外に設置することから、既存の建物も含めて水素配管は屋外に敷設する。

他用途の場合でも、新築の建物では屋外配管を原則とするが、既存建物や建物の用途、例えば、低層部が物販店舗で上層部が共同住宅の場合等では、屋内配管とする必要がある場合もあるが、その場合も極力屋外に施設するよう計画する。

なお、配管した部分が屋外と見なせるための条件は、

- ・水素ガスが自由空間で拡散できだけの空気量があること
- ・漏洩した水素ガスで、燃焼範囲にある水素ガスが屋外で想定される以上に蓄積することがないこと

である。そのため、配管を敷設したシャフト内が十分換気されるよう計画する。

#### (2) 既存建物における安全対策

配管からガスが漏洩した場合、マイコンメータにより検知される漏洩規模のものは、比較的早期に検知されること、検知後速やかにガス供給が停止されることから、爆発に至るリスクは小さい。一方、マイコンメータでは検知できない程度の漏洩の場合、検知や供給遮断が遅れ広範囲に水素が拡散するため、爆発の被害も大きくなる。従って、空間特性に応じた安全対策が望まれる。

##### 1) パイプシャフト及び廊下での安全対策

標準的な規模のパイプシャフト床面付近で漏洩した場合、水素も都市ガスも漏洩箇所の近傍が濃度が高く、パイプシャフト天井付近の濃度上昇は比較的遅い。しかし、ガス事業法の低圧ガス配管において許容される管内圧力の範囲（1～2.5kPa）では、ガス種が水素の場合の方が漏洩量が多く、パイプシャフト内の濃度上昇は都市ガスに比べ早く、廊下での拡散も水素の方が短時間で広い範囲にわたる。熱量が等しい水素と都市ガスがそれぞれ漏洩した場合を比較すると、拡散範囲の差が一層大きくなるため、都市ガスは局所的に爆

発をするのに対して、水素は広範囲に爆発の被害が及ぶといえる。

一方、漏洩検知の観点から見ると、都市ガスはマイコンメータで検知できない漏洩については臭いによる検知が現状では唯一の手段であり、水素より拡散の遅い都市ガスは検知にも時間がかかる。それに対して水素は、付臭剤が水素に追従するという仮定の下では、臭いによる検知が可能となる範囲まで水素が拡散する時間は小さく、この傾向は気密性が高く換気量が小さい廊下で顕著になる。しかし、付臭剤が水素に追従するという知見は現状では得られておらず、また、水素は一般の建物では馴染みが薄いガス種であること、臭いによる検知から何らかの対策を実施するまでの時間に拡散範囲はさらに増大することを考慮すると、都市ガスと比べて一層の安全対策を建築物に要求することが望ましい。

要求する安全対策の一例として、パイプシャフト内に水素検知センサーを設置する案が考えられる。パイプシャフト内のどこで漏洩するかは不明ではあるが、天井面あるいは天井直下に設けるのが妥当であろう。センサーが水素を検知する以前に廊下へ水素が漏出する場合もあり得るが、ごく低濃度の水素の漏出であり、廊下の空気と混合するため爆発のリスクは小さい。一方、水素センサーが水素漏洩を検知時点ではパイプシャフト内あるいは廊下へ漏出する水素濃度は爆発範囲に達していることも予想されるため、速やかに供給遮断する方策を併せて施す必要がある。また、水素拡散を抑制する観点からパイプシャフトには常閉の扉が設けることは有効な対策であり、給湯器等の燃焼機器は設置されないことを前提にすれば扉の換気スリットは不要と考えられる。

## 2)居室及び屋外（バルコニー等）での安全対策

バルコニーのように奥行きが浅く、外気に広く面している空間では水素は天井面下に薄い層を形成し外気へと流出するので、屋外と同等と見なせる。同様に、居室でも天井に梁等の突起物がなく、壁面が全面開放されている場合は、水素の蓄積は少なく、水素が蓄積することによる爆発の危険性は小さいと考えられる。

一方、床面積の 1/20 程度の換気口が外壁の梁下に設けられる場合や居室内に梁等の突起物がある場合には、梁せいの分だけの水素溜まりが存在することになり、高濃度の水素がある程度の時間漏洩し続ければ、爆発範囲内の濃度となる空気と水素の混合気が溜まることになる。この部分で電気的な火花等の着火エネルギーを与えるものがあれば、水素は容易に爆発し、建物の構造体や建具、さらには人体への悪影響は免れない。

燃料電池が置かれる空間が通常は人がいない機械室等であれば、臭いによる覚知は想定しづらいため、水素検知センサーによる機械的な漏洩検知対策が必須である。

従って、居室に燃料電池を設置する場合、一つ以上の壁面が全面開放であり、天井に突起物がない空間以外は燃料電池及び水素配管が設置されるスパン全てに水素検知センサーの設置が望ましい。

### 2.3.2 共同溝における安全対策

2.2 で述べた共同溝を用いた実証実験の調査結果を踏まえ、共同溝における安全対策について以下の点について整理した。

#### (1) 配管材料

平成17年から平成19年にかけて経済産業省で行われた「水素供給システム安全性技術調査事業」を参考にポリエチレン管（以下「PE管」）を採用した。配管の接続方法についても同調査報告の方法を採用した。

#### (2) 防爆

共同溝全体を防爆処理することも検討したが、コストが大幅に跳ね上がるため本実験においては不採用とした。

本実験では、低圧（水素に関しては15kpa）での実験であるため、防爆に相当する仕様としてガス管にPE管（25φ）、それを包む外装管として塩ビ管（75φ）を用いた二重巻方式を採用した。なお、外装管については供給側需要側共に地上部までシームレスに施工し、大気開放することで管内圧力が上昇することを抑えつつ共同溝内に漏れるガスを極小とする方針で設計を行った。

#### (3) ガス漏れ検知

ガス漏れ検知対策に関しては、以下の3つの方法を用意した。なお、漏れ検知と同時にガス遮断を自動で行う装置を探したが実機がないため、水素実験期間中は常時担当者が待機し手動による遮断とした。

- ①濃度を直接測る方法
- ②ガス圧の急低下をモニターする方法
- ③音速の変化によって検知する方法

①は市販されている水素検知器を塩ビ管内に5箇所、共同溝内の高所に3箇所の計8箇所設置し、常時モニターする方法をとった。なお、通常の水素漏れ検知はLEL（Lower Explosion Limit）25%が法で定められているが、費用は変わらないとのことで、今回はLEL10%で検知し、常時モニターしている場所でパトライトを光らせてガス停止操作を行うこととした。

②は実験データ取得のために設置していた圧力計をリアルタイムでモニターすることによりPE管破断等、急速低下が予想される管内圧力変化によって検知する方法である。①と同じ画面上に表示し、水素を供給している期間中は常時担当者がモニターする方法とし

た。

③については、塩ビ管内に音源とマイクロフォン2箇所を設置し、各マイクロフォンに音が到達する時間差を計測することにより塩ビ管内に漏れた水素ガスを検知する方法である。音速は空気中に比べて水素雰囲気の中では3倍以上となる。ピンホール等によって漏れ出る水素については①よりも早期に音速に影響が出ることが期待されるため、全体区間を2セットの音速変化計測によって漏れ検知装置とした。

#### (4) 排気

水素が漏出した場合、排気が有効である。共同溝全体を排気する方法は現実的ではないため、塩ビ管内の気体をファンによって排気する方法をとした。

本実験では、供給ガス圧を15kpaとし漏出量を極小とする計画であったものの、配管延長が長い外装管が健全なままPE管が破断した場合には約20リッターの水素ガスが外装管内に漏出する。外装管内には「火種」は無いものの緊急に外装管内の空気を入れ替えることにより爆発等の可能性を最小限とするため、2.2kwの遠心ファンによって排気することとした。吸い込み口において風速を実測した結果、約5.5m/sであった。別途流速計でも計測したが、ほぼ同じ数字となっている。全長は約250mなので、1分以内に外装管内の空気を入れ替える能力である。

なお、断面形状がPE管の部分が欠損した形となるため、狭隘な部分の風速は小さくなり、自然拡散と通風による希釈が必要と想定し、運転時間は5分と設定した。

#### (5) その他

当初の計画では、ガス漏れ検知と同時にメールの一斉配信装置を用意していた。しかしLAN環境での機能は確認されていたがWi-Fi環境で機能しなかったため、安全対策からは外した。

共同溝内の配管に水素を残したまま放置することについて、確立された安全対策が無かったことから、毎日の実験終了後に窒素による水素パージ（水素の追い出し）を行い、「人が監視していない状態では水素を共同溝内には一切残さない」こととした。

今回は、塩ビ管を外装管とすること、及び実験で利用する総水素量が小さかったため、共同溝内の防爆対策までは行わなかったが、一般的な共同溝においてはガスが漏れた場合の対策（ガスの排出対策、着火源の排除等）が必要である。なお、国土交通省関東地方整備局東京第二営繕事務所から平成19年に発行された「施設整備・管理のための天然ガス対策ガイドブック」<sup>6)</sup>によれば、千葉県九十九里平野や東京都東南部低地あたりについては天然ガスが湧出する地域とされている。特に地下鉄等が多く通っている都心部においてはガス管を通していない共同溝であってもガス漏れ検知装置の導入を検討すべきと考えら

れる。

共同溝の安全対策とは直接的には関係ないものの、系統電力網からの離脱実験（停電を想定した実験）を行ったとき、運転をセーブしている燃料電池が数秒以内にフル稼働する状況が確認された。一つの配管系統に数百台の燃料電池が繋がっていて系統電力網との連携運転をしている場合、停電時において一斉に水素燃料消費量が上昇することを意味する。これは、従来 of ガス供給事業においてはありえない現象である。配管設計における配管径や供給ガス圧の設定において留意する必要があると考えられる。

## 2.4 まとめ

第2章では、水素配管を敷設した建物等空間の安全性について検討を行い、以下の知見を得た。

1)水素配管を敷設した建物等空間の安全性に関する検討を行うための前提条件を整理し、水素配管を敷設した建物等空間の安全性を数値計算、実験により検討するために、外力を想定した。また、水素配管を敷設した建物等空間の安全性を確保するために必要な事項(対策)を検討する上での前提条件を整理し、国内における水素等配管等の材料・施工コストに関する情報を整理するため、建物内の既存一般燃料ガス配管からの漏出事象事例及び検知並びに一般燃料ガスの設置基準についてのガス事業関連法令及び業界実務指針、自主基準等の資料収集並びに整理を行った。また、施工コストについては関連雑誌、カタログ及びガス事業者の公表値を整理した。

2)水素漏洩時の爆発危険性を検討するため、既存建物のパイプシャフトの現況調査を実施し、この結果をもとに数値流体解析によりパイプシャフト及び廊下での水素拡散性状を検討した。その結果、既存建物の調査では、事務所及び共同住宅におけるパイプシャフトの寸法、内容物については建物規模によらず用途毎に概ね似通ったものになる傾向が明らかとなった。また、数値流体解析による水素拡散性状の検討では、配管内圧力、廊下での換気量によるパイプシャフト内及び廊下での水素拡散性状の違いを明らかにするとともに、都市ガスの拡散性状との比較を行った。

3)建物居室等の空間内に敷設されたガス配管から水素ガスが漏洩した場合を想定し、水素ガスの拡散性状をもとにした漏洩検知対策を検討することを目的として、数値計算による検討を行った。その結果、水素は天井付近に蓄積しつつ徐々に下方へ拡散するが、梁等の障害物が存在することで局所的に水素濃度が高くなることが明らかになった。自然換気の場合、外部風があれば室内に対流が生じることにより水素は室外へ排出されやすくなるが、無風時であれば換気の影響は少なく天井付近に高濃度の領域が存在することになる。このため、水素爆発の危険性を低減するためには、天井付近に蓄積する水素濃度が爆発下限界を上回るまでに漏洩を止める必要があり、水素検知のためのセンサーが設置されることが望ましいことを指摘した。また、機械換気の場合、換気回数を5回程度にすれば天井付近への蓄積を防止することができることが分かった。

4)建物バルコニー等の屋外空間に敷設されたガス配管から水素ガスが漏洩した場合を想定し、水素ガスの拡散性状をもとにした漏洩検知対策を検討することを目的として、数値計

算を行った。その結果、バルコニー上部で水素の拡散を阻害する要因がなければ、外部風の有無によらずバルコニーで水素が蓄積することはないことが示された。したがって、バルコニーについては水素漏洩に関する特段の措置は必要ないものと思われる。

5)低層及び中層建物を想定した基礎及びガス配管を対象として、神戸 NS 波、エルセントロ NS 波、正弦波（+スweep加振）を想定地震波として加震実験を実施した。その結果、地盤の隆起・陥没、液状化等では損傷の恐れはあるものの、一般的な宅地地盤（相対密度60%）におけるガス配管は揺れだけでは損傷しないことが明らかとなった。

6)室内ガス配管が火災時に加熱された場合を想定し、配管の損傷や継ぎ手部分のガス漏洩等により、火災区画以外で配管が損傷してガスが漏洩し、蓄積後に着火して爆発して、延焼しないよう配管への要求事項を検討することを目的として、室内敷設配管の火災加熱実験を実施した。その結果、通常の1時間程度の火災であれば、火災区画外での水素配管（亜鉛メッキ鋼管またはフレキ管）および継ぎ手部に熱による損傷はなく、火災に起因する水素漏洩に関する特段の措置は必要ないものと考えられる。ただし、配管が長時間加熱を受ける場合や消火後等の事故防止のため、火災覚知と同時に水素供給が停止される仕組みは必須であるといえる。

7)水素供給実験の安全確保に万全を期する観点から、ヘリウムを使用した点検、水素を使用した点検の二段階の事前設備点検を実施した。現地において水素配管の耐圧気密性を確認するとともに、共同溝内の水素配管を經由して燃料電池に水素を供給する実験より、水素供給時における水素配管の圧力変動などの実証データを得た。

8)水素配管を敷設した建物等空間の安全性を確保するために必要な安全対策を整理した。また、既存共同溝において都市内に水素を供給する際のガス漏れ等の対策を確認するための実証実験を通じて得られた安全対策を整理した。