



エネルギー総合工学研究所における

水素拡散、燃焼基礎物性の研究について

2008年7月30日

(財)エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部

石本祐樹

ishimoto@iae.or.jp

Tel 03-3508-8894

Copyright; 2008 IAE. All rights reserved.

発表内容

1. 水素の物性
2. 水素安全研究の流れ（IAE）
3. 研究の背景と動機
4. 半閉鎖空間における水素の拡散・燃焼実験
5. ダクトで換気される閉鎖空間における水素の拡散・燃焼実験

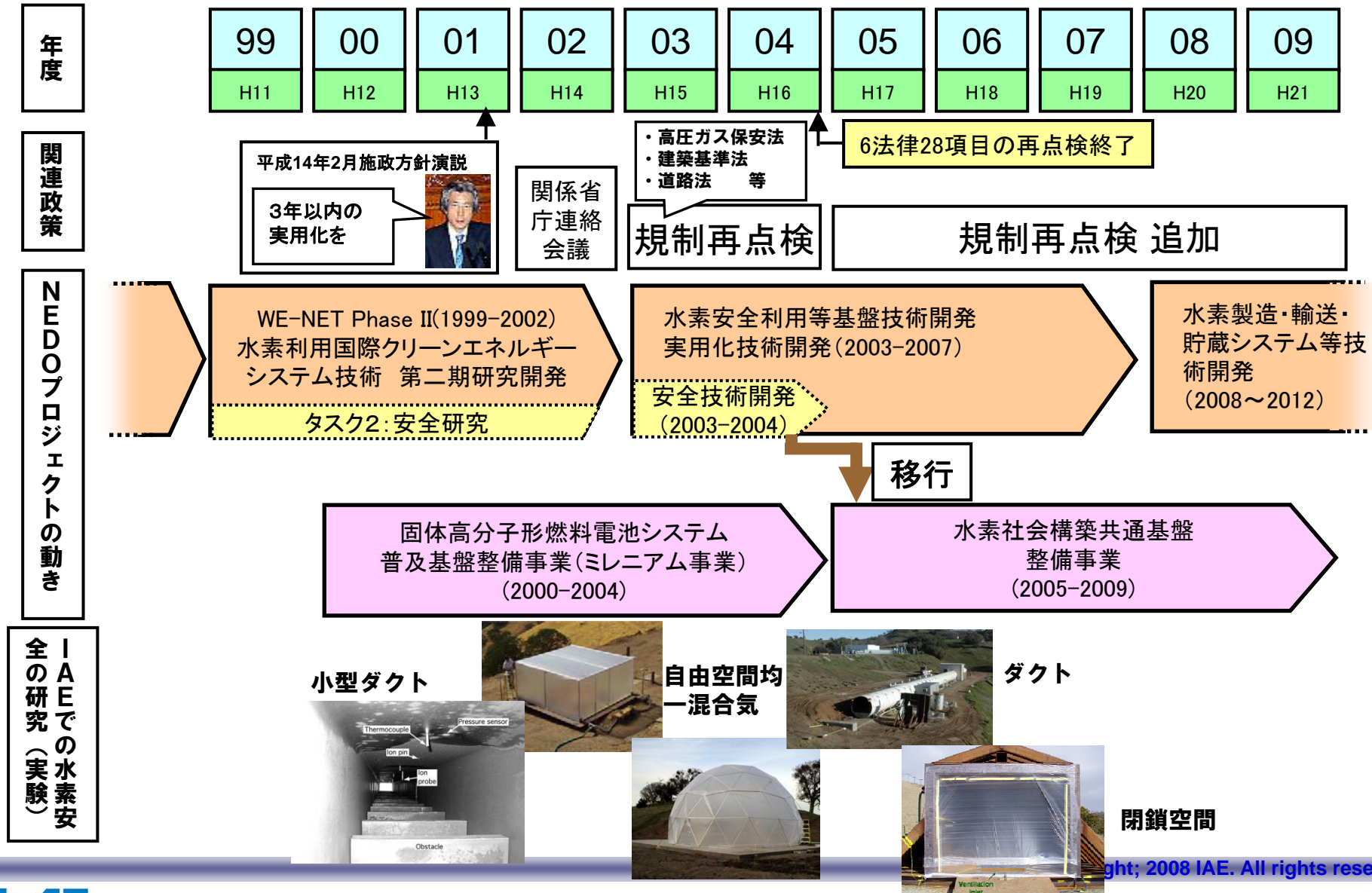
水素の特性

| | 水素 | メタン | プロパン | ガソリン | 水素の特性 |
|---|----------------|----------------|--------|---------------|---------------------------|
| 拡散係数 (空气中) [cm ² /s] (1atm, 20°C) | 0.61 | 0.16 | 0.12 | 0.05 (ガス状) | 拡散しやすい。 小孔から透過しやすい。 |
| 金属材料を脆化 | あり | なし | なし | なし | 金属をもろく、割れやす くする。 |
| 最小着火 エネルギー (mJ) | 0.02 | 0.29 | 0.26 | 0.24 | 着火しやすい |
| 燃焼範囲 (下限-上限) [vol%] | 4.1-75 | 5.3-15 | 2.1-10 | 1.0-7.8 | 燃焼可能濃度範囲が広い |
| 熱放射 (輻射率 ε) | 0.04 ~ 0.25 | 0.15 ~ 0.35 | ガソリン並 | 0.3~0.4 | 熱放射による被害や類焼 は少ない |
| 最大燃焼速度 [cm/s] | 346 | 43.0 | 47.2 | 42.0 | 爆風圧が大きい。ジェッ ト火炎が保炎しやすい |
| 燃焼熱 [MJ/Nm ³] 真発熱量 | 10.77 | 35.9 | 93.6 | — | 熱量を確保するのに 高圧を要す。 |

- ・ 水素火炎は見えにくい
→ 発見しにくい
- ・ (多くの場合) 高圧ガスである
→ 着火しなくても危険はある

Copyright; 2008 IAE. All rights reserved.

水素安全の研究の流れ



Copyright; 2008 IAE. All rights reserved.

背景と動機

- 定置用燃料電池、燃料電池自動車、水素インフラの導入普及のために様々な研究開発が精力的に行われている。
- 水素エネルギーの導入普及のためには安全確保が不可欠である。
- 開放空間での水素の爆発実験を行うことで、スケール効果等が確認できた。
- 同じ漏えい条件でも、着火した場合の爆風圧は、開放空間より閉鎖空間のほうが大きくなると考えられる。
- **ダクト状の半閉鎖空間、水素を使用する空間を模擬した閉鎖空間における水素の漏えい・拡散・着火実験を実施した。**



ダクト



閉鎖空間

半閉鎖空間における水素の拡散・燃焼実験

実験設備

トンネル内での水素漏洩後に着火する事故を想定。

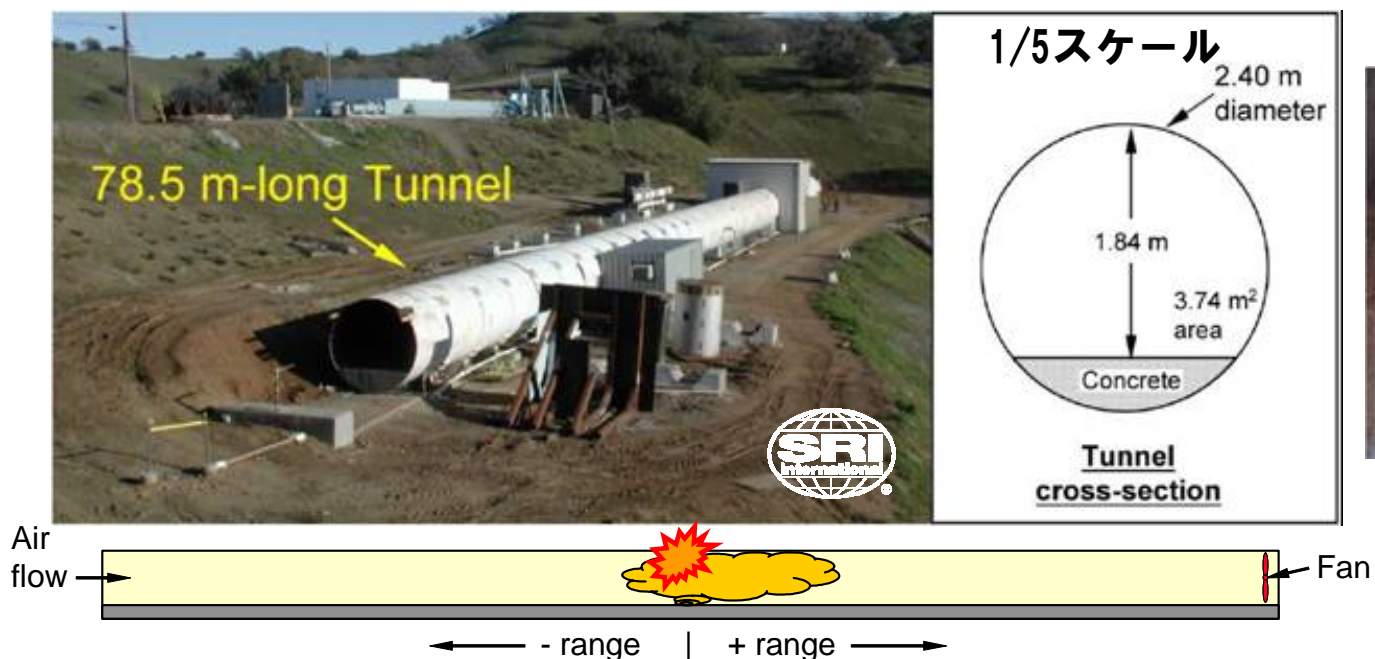


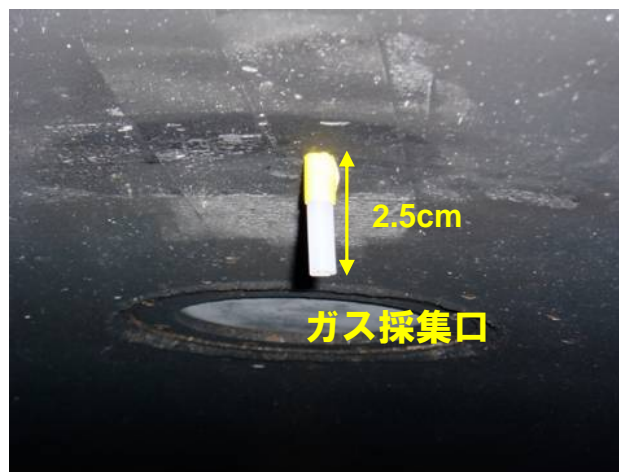
図 ダクト内部

図 ダクト実験設備概観（上）、断面図（下）

- ダクト中央部付近：着火用の電気スパーク
- スパークは水素ガスの放出停止と同時、500ms後に起動。
- 1000ms後から連続（15s, 15mJ, 60Hz）

円筒状半閉鎖空間における水素漏洩・拡散・燃焼実験

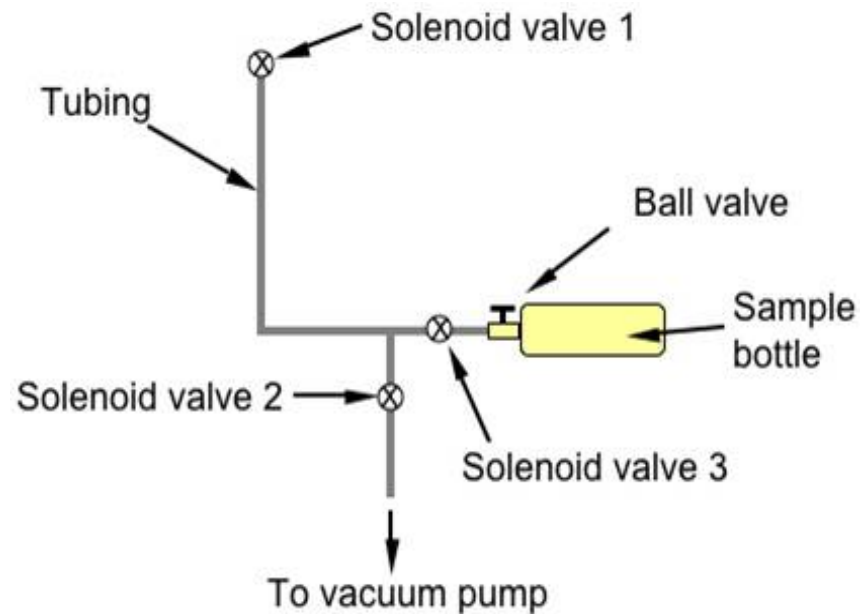
計測器



その他：可視・赤外カメラ

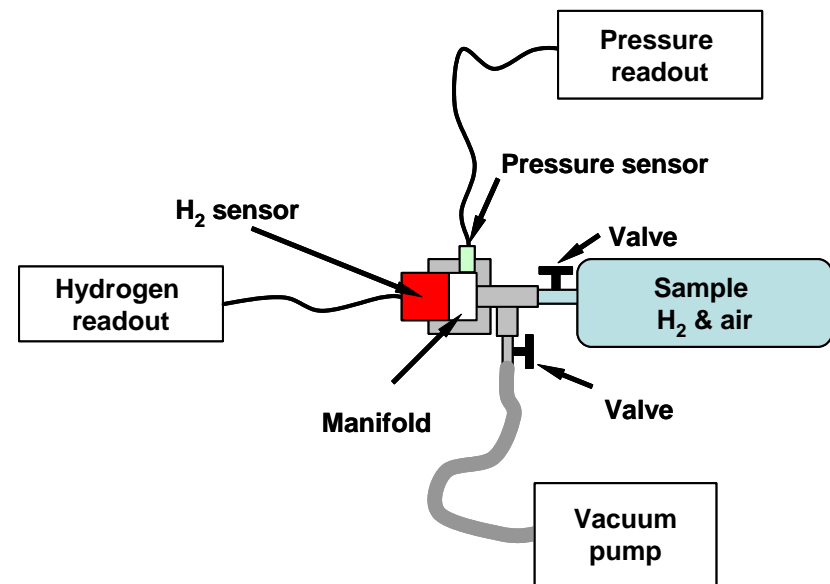
Copyright; 2008 IAE. All rights reserved.

水素濃度測定



サンプリング

- サンプルボトルは実験前に真空引き
- 3秒間ガスを採集する
- 1箇所につき3つのボトルを設置



濃度測定

- 実験後に水素濃度測定
- 全圧と分圧を測定

円筒状半閉鎖空間における水素漏洩・拡散・燃焼実験

実験条件・結果

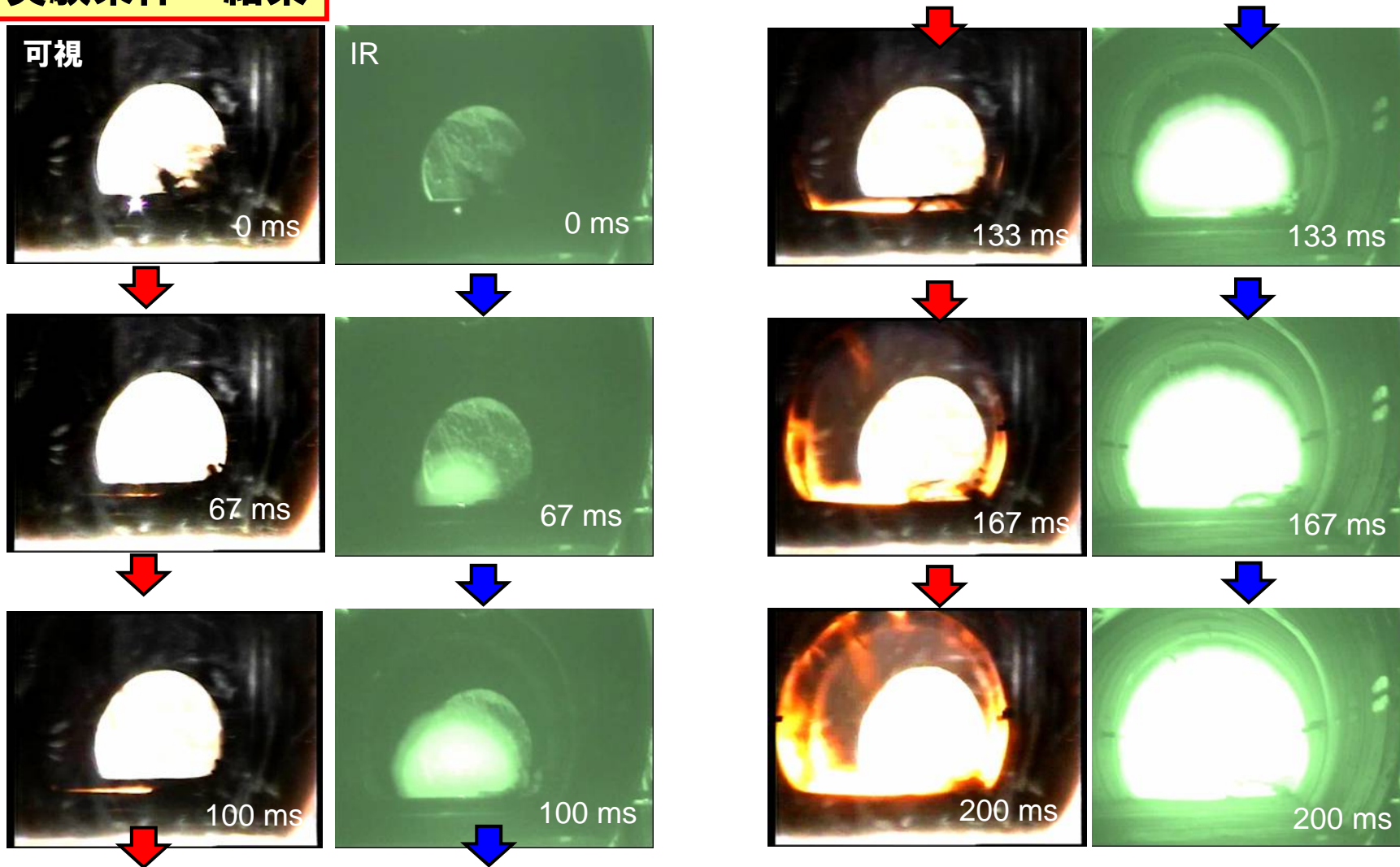


図 爆燃時の可視・IRカメラ像

Copyright; 2008 IAE. All rights reserved.

円筒状半閉鎖空間における水素漏洩・拡散・燃焼実験

(1) 水素／空気均一混合系

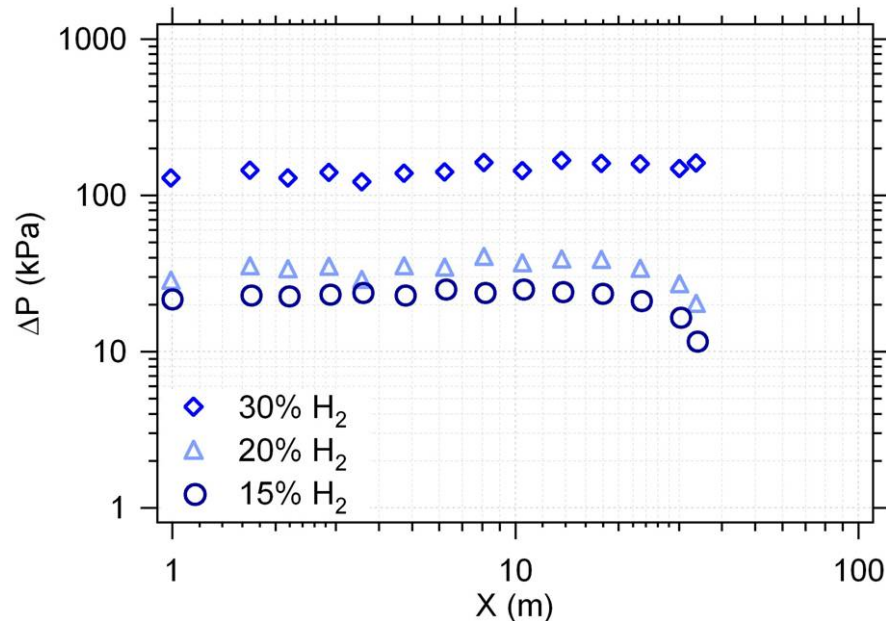





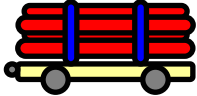
図 ダクト内の過圧分布の水素濃度依存性

- 水素／空気混合気を、ダクト中央に設置したテント（容積：37m³）内に保持し、電気スパークで点火、爆燃させた。
- 本条件は、断面内に水素ガスが充満している特殊な条件下であり、実際の事故時より大きな爆風圧となる恐れがあるが、数値シミュレーションの検証データとして取得した。
- 30%、20%条件と同様15%水素の場合も、ダクト内の爆燃では開放空間より大きな圧力が発生した。
- 爆風圧はダクト端まで減衰することなく伝播し、発生圧力は水素濃度に大きく依存した。また、混合気中での火炎伝播速度も開放空間の場合より、高かった。

円筒状半閉鎖空間における水素漏洩・拡散・燃焼実験

(2) 漏えい・拡散・燃焼実験

実験シナリオ 着火時刻までに搭載・積載した水素の70%が漏洩

| 種類 | タンク容量 (m ³ NPT) | 初期圧力 (MPa) | 漏洩部直径 (mm) | 漏洩時間 (s) | 漏洩水素量 (m ³ NPT) |
|---|-------------------------------|---------------|---------------|-------------|-------------------------------|
|  燃料電池自動車 | 60 | 35 | 5 | 15.2 | 42 |
|  燃料電池バス | 300 | 35 | 5 | 75.9 | 210 |
|  輸送カードル (1本) | 140 | 20 | 10 | 15.5 | 98 |
|  輸送カードル (20本) | 3000 | 20 | 5 | 1329 | 2100 |

円筒状半閉鎖空間における水素漏洩・拡散・燃焼実験

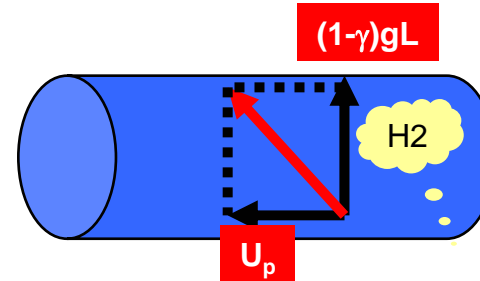
実機から実験設備への変換のためのスケール則

実機と実験設備で、水素濃度分布が相似になるようにパラメータを設定。

1. フルード数が等しい。

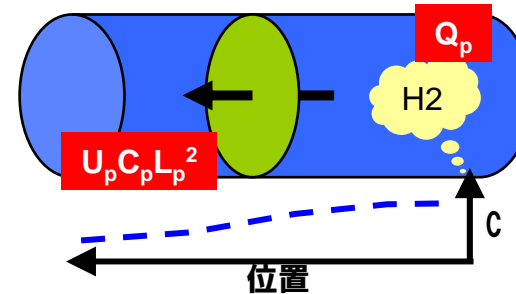
$$Fr \equiv \frac{U^2}{(1-\gamma)gL} \quad Fr \text{ は換気風の慣性力と浮力の比}$$

$$\Rightarrow \boxed{U_m/U_p = (L_m/L_p)^{0.5}} \quad (1)$$



2. 断面を通過する水素流量と放出水素の比が等しい。

$$\Rightarrow \boxed{\frac{U_p C_p L_p^2}{Q_p} = \frac{U_m C_m L_m^2}{Q_m}} \quad (2)$$



3. (1), (2) 式および濃度が等しいことから水素流量の比が求まる。

$$\Rightarrow \boxed{Q_m/Q_p = (L_m/L_p)^{2.5}}$$

4. 経過時間の比

$$\begin{aligned} t_m/t_p &= (L_m/U_m) / (L_p/U_p) \\ &= (L_m/L_p)^{0.5} \end{aligned}$$

U: 換気風速, γ : 密度比 (H2/air)
 C: 水素濃度,
 L: 特性長さ, Q: 水素放出速度
 p: 実機, m: 実験設備

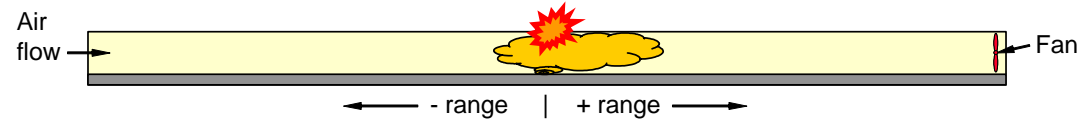
Copyright; 2008 IAE. All rights reserved.

円筒状半閉鎖空間における水素漏洩・拡散・燃焼実験

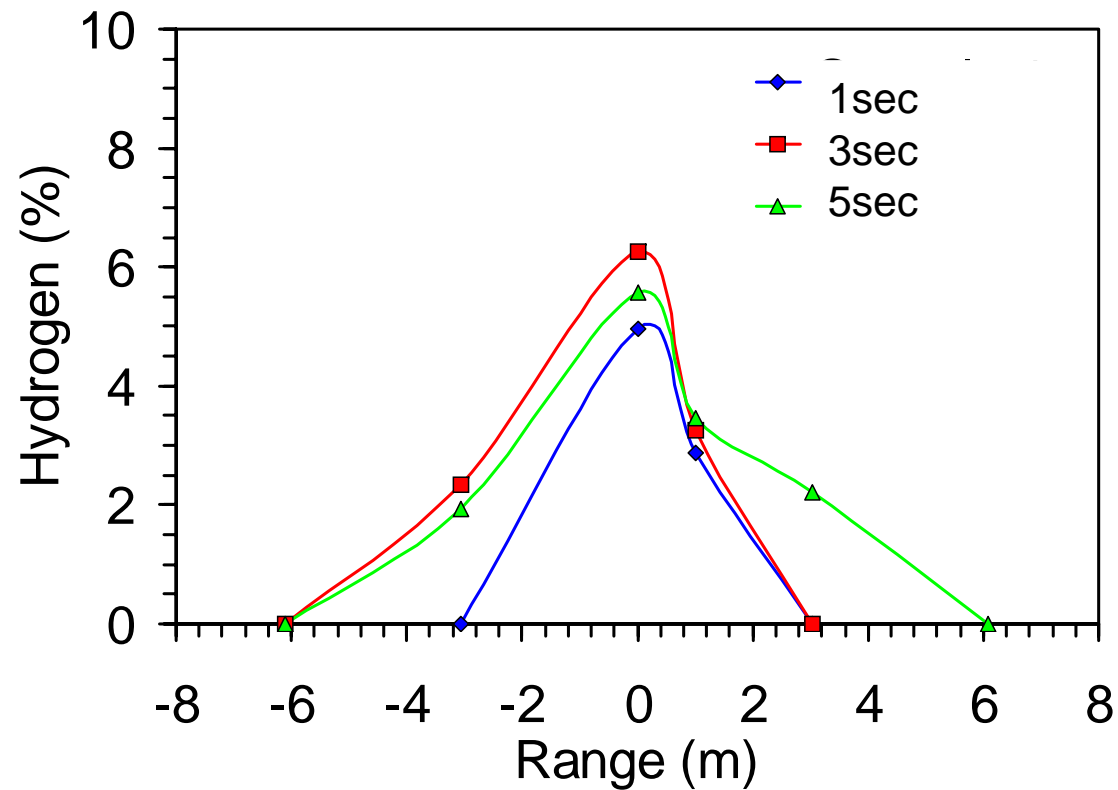
実験結果



0.34m³を
7.6秒で
放出



TEST FCV-1
換気なし、障害物なし→着火せず



Copyright; 2008 IAE. All rights reserved.

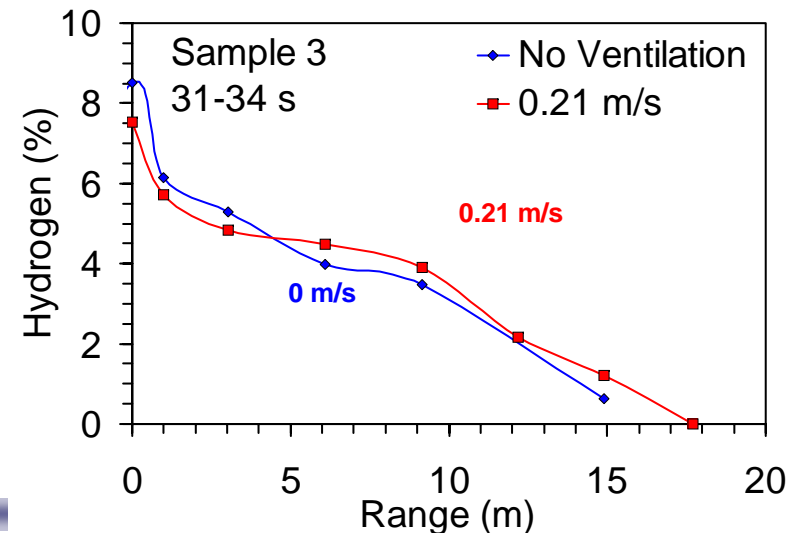
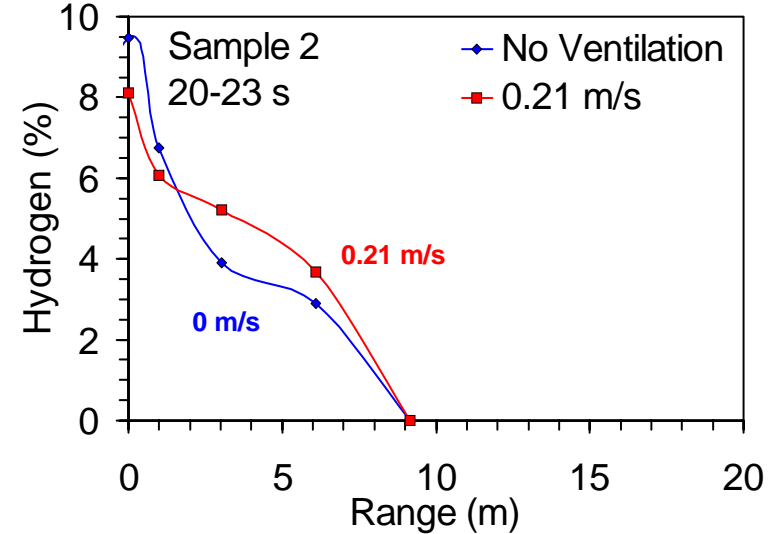
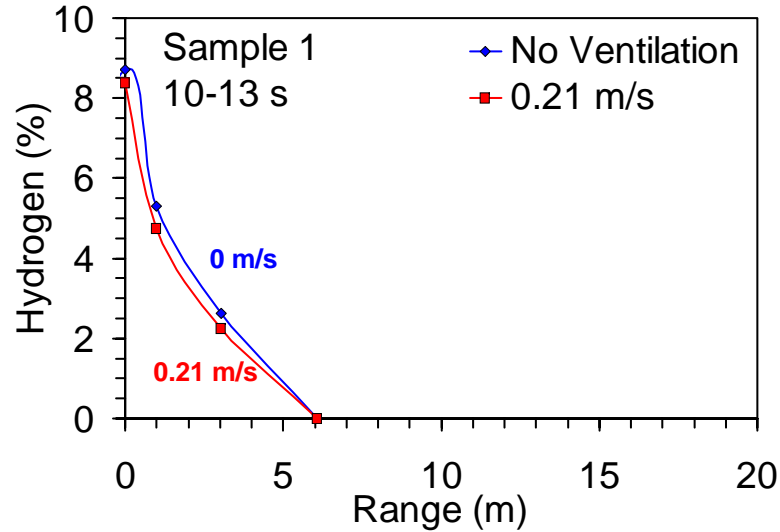
円筒状半閉鎖空間における水素漏洩・拡散・燃焼実験

TEST_FCB-3

換気0.21m/s、障害物なし→着火



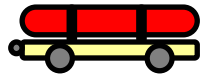
1.7m³を
35秒で
放出



- 漏洩後短時間では、この換気速度では水素濃度低減に効果は小さいことがわかった。
- 水素放出口近傍では、換気有りの場合、水素濃度がやや小さい。

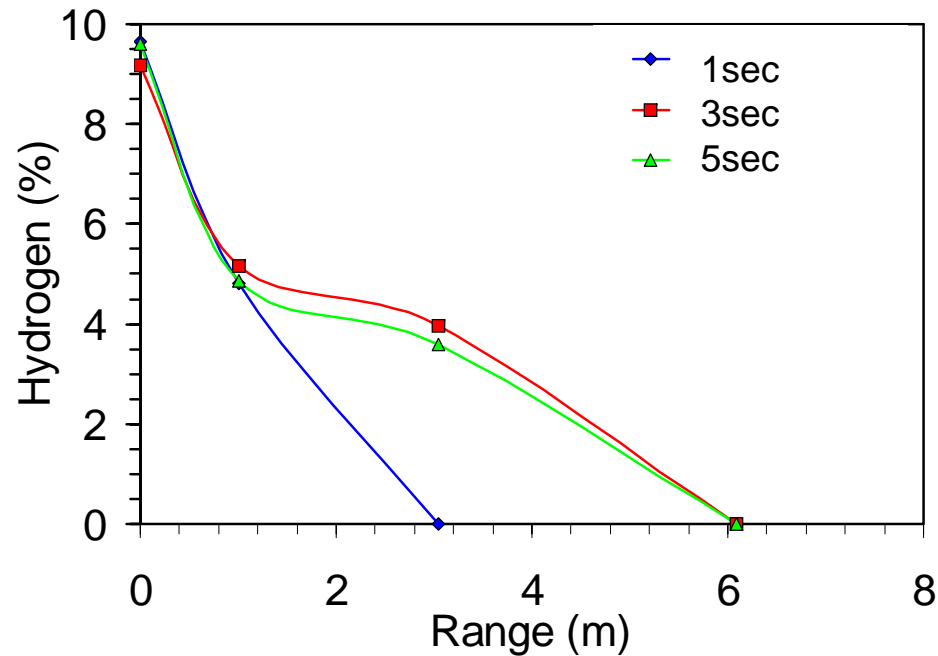
円筒状半閉鎖空間における水素漏洩・拡散・燃焼実験

実験結果



0.86m³
を7.9秒
で放出

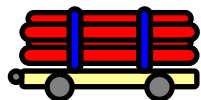
TEST HTB-1
換気0.21m/s、障害物なし→着火せず



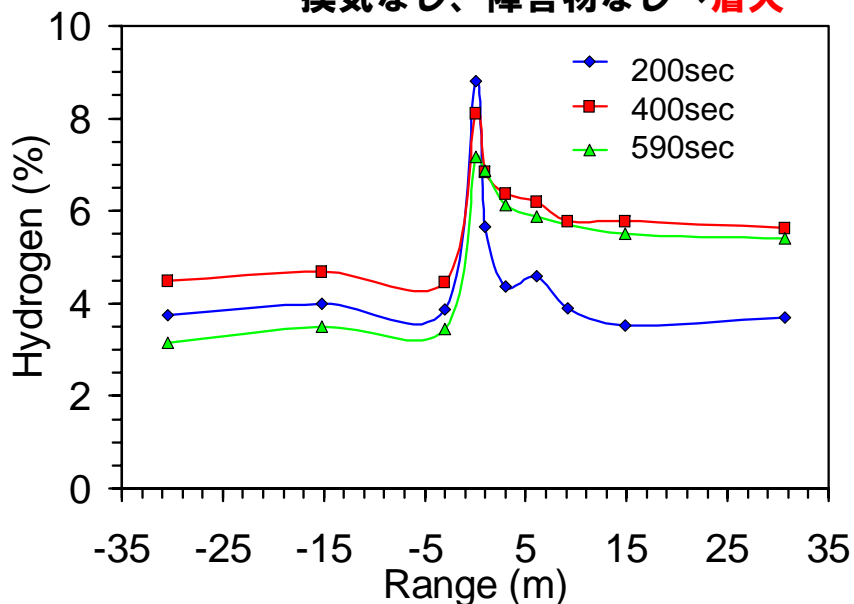
円筒状半閉鎖空間における水素漏洩・拡散・燃焼実験

TEST HT-1

換気なし、障害物なし→着火

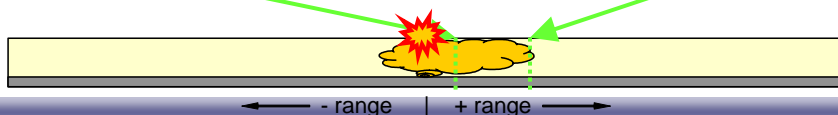
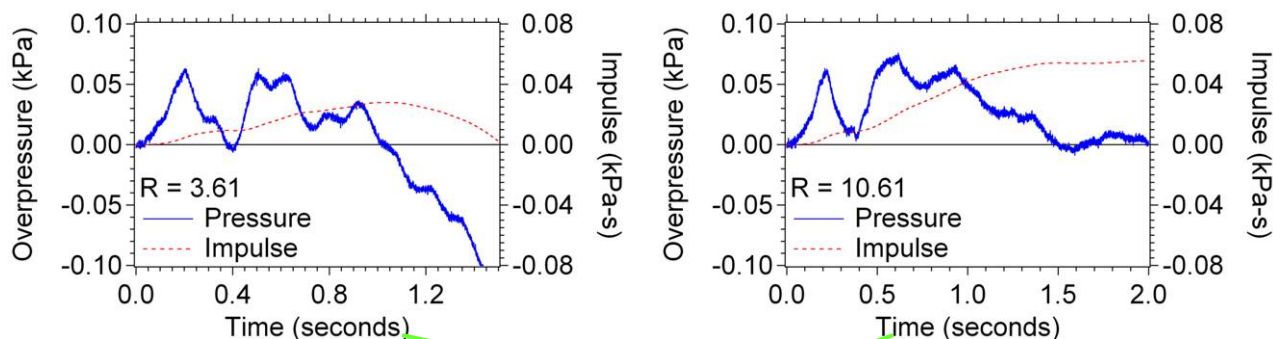


17m³を
594秒で
放出



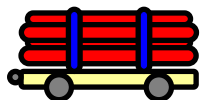
- 今回の条件下では、障害物の有無は拡散の状況に大きな差異を及ぼさなかった。
- 爆風による過圧は、約0.06kPaと小さい。
- 最大過圧はダクト内にわたってほぼ一定。

ダクト内圧力の時間変化



Copyright; 2008 IAE. All rights reserved.

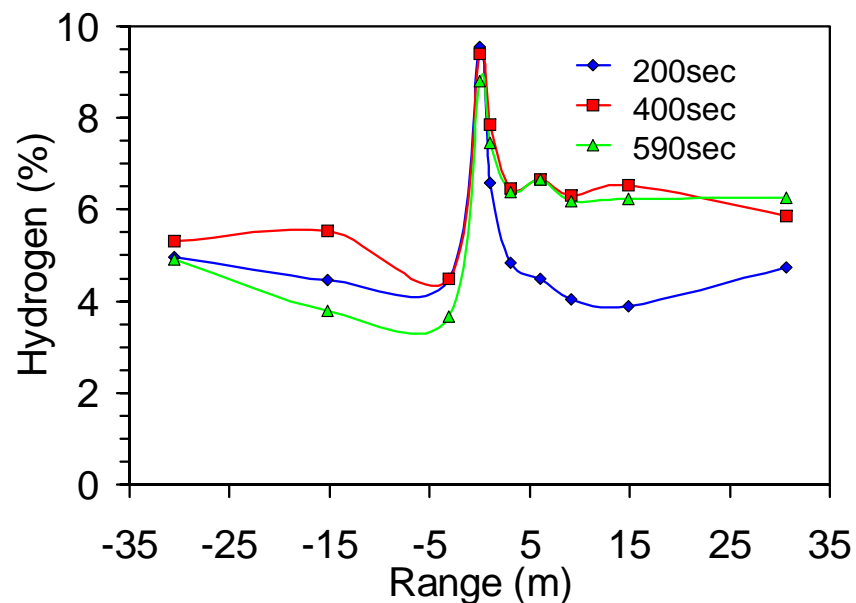
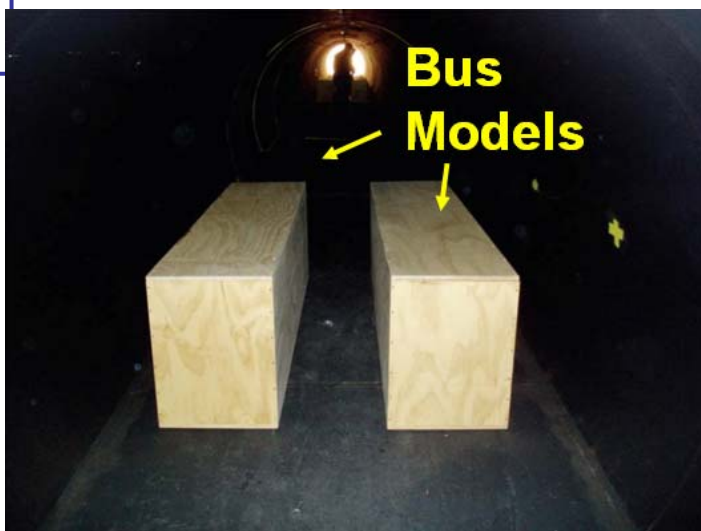
円筒状半閉鎖空間における水素漏洩・拡散・燃焼実験



TEST HT-2

換気なし、障害物あり→着火（過圧は検出下限0.02kPa以下）

17m³を
594秒で
放出



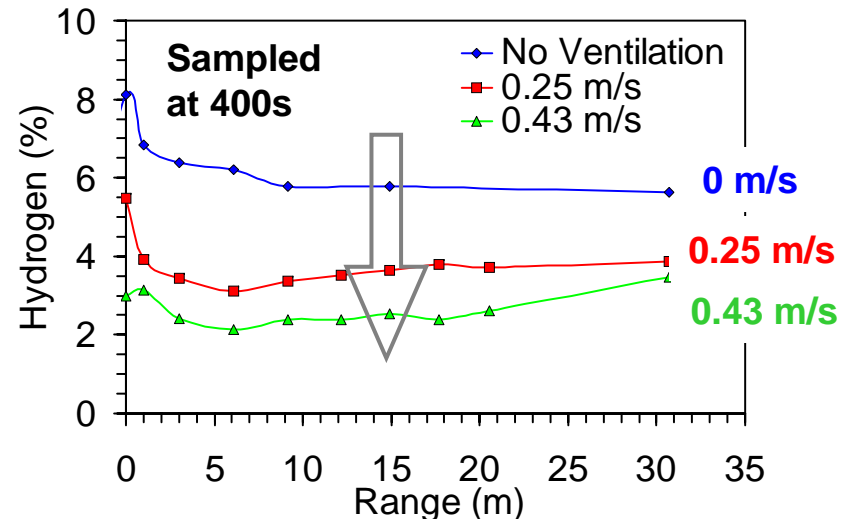
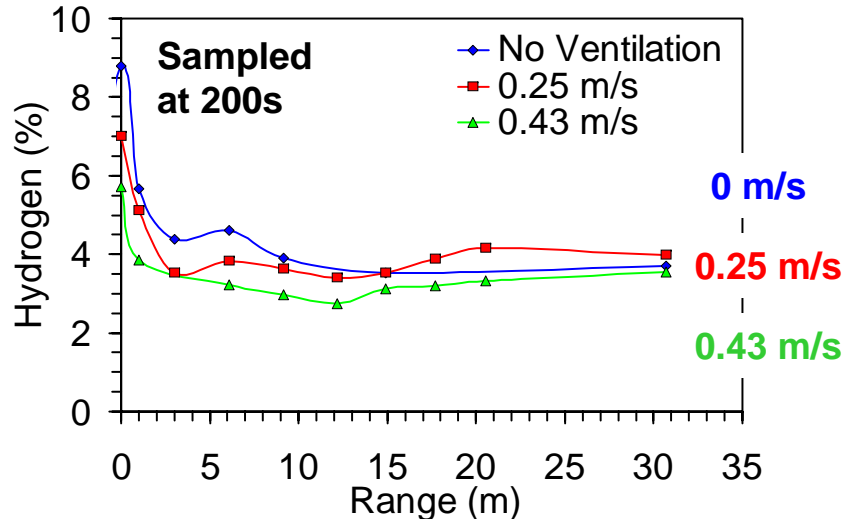
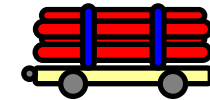
•大きなBlockage ratioではないが、障害物に起因する乱流が原因による燃焼の促進は観測されなかった。

Copyright; 2008 IAE. All rights reserved.

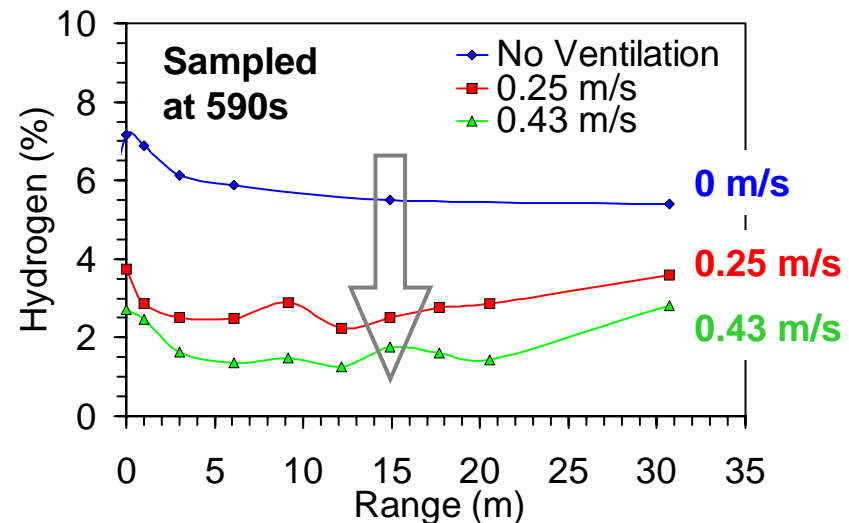
円筒状半閉鎖空間における水素漏洩・拡散・燃焼実験

実験結果

ダクト内水素濃度分布の換気風速依存性



- 放出開始から400秒以降では、換気風速 0.43m/s（実機換算で1m/s）の場合、全計測域で水素濃度がLFL以下
→換気が水素濃度低減できる。
- 着火抑制に有効である可能性を見出した。
- 放出開始から200秒では、放出口近傍を除いて水素濃度に大きな差はない。
→放出直後からダクト全域の水素濃度を低減するためには、より大きな風速が必要。



Copyright; 2008 IAE. All rights reserved.

ダクトで換気される閉鎖空間における水素の拡散・燃焼実験

- 同じ漏えい条件でも、着火した場合の爆風圧は、開放空間より閉鎖空間のほうが大きくなると考えられる。
- 閉鎖空間では、漏えいした場合においても水素濃度を着火下限界以下にするために、強制換気が要求されると考えられる。
- 閉鎖空間において、水素漏えい量と換気量が水素濃度に与える影響を調べる必要がある。
- 閉鎖空間で水素を使用・貯蔵する場合に必要な換気速度を見積もるための基礎データとして実験を実施。

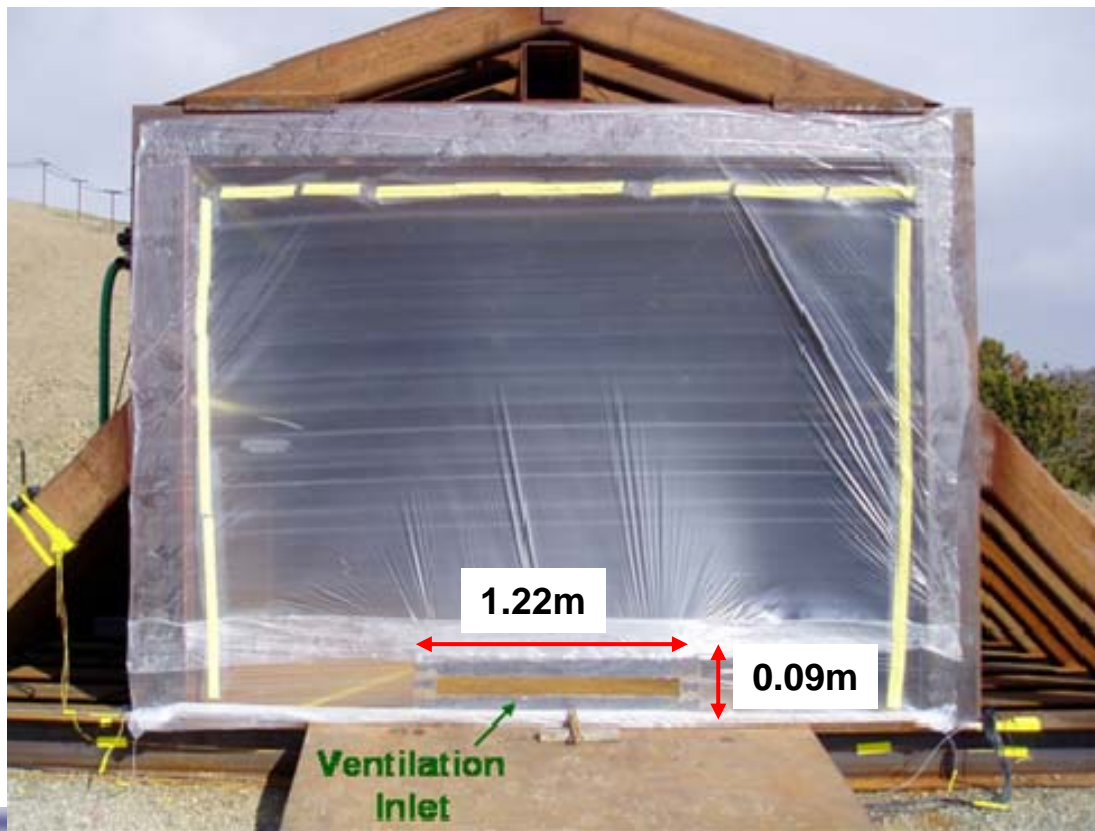


Copyright; 2008 IAE. All rights reserved.

ダクトで換気される閉鎖空間における水素の拡散・燃焼実験

実験設備

- 鋼鉄製
- 水素ガスが漏れないよう隙間には樹脂を充填
- 可視・赤外カメラでの計測のため、正面は7.6ミクロンのポリエチレンシートで覆っている。



サイズ

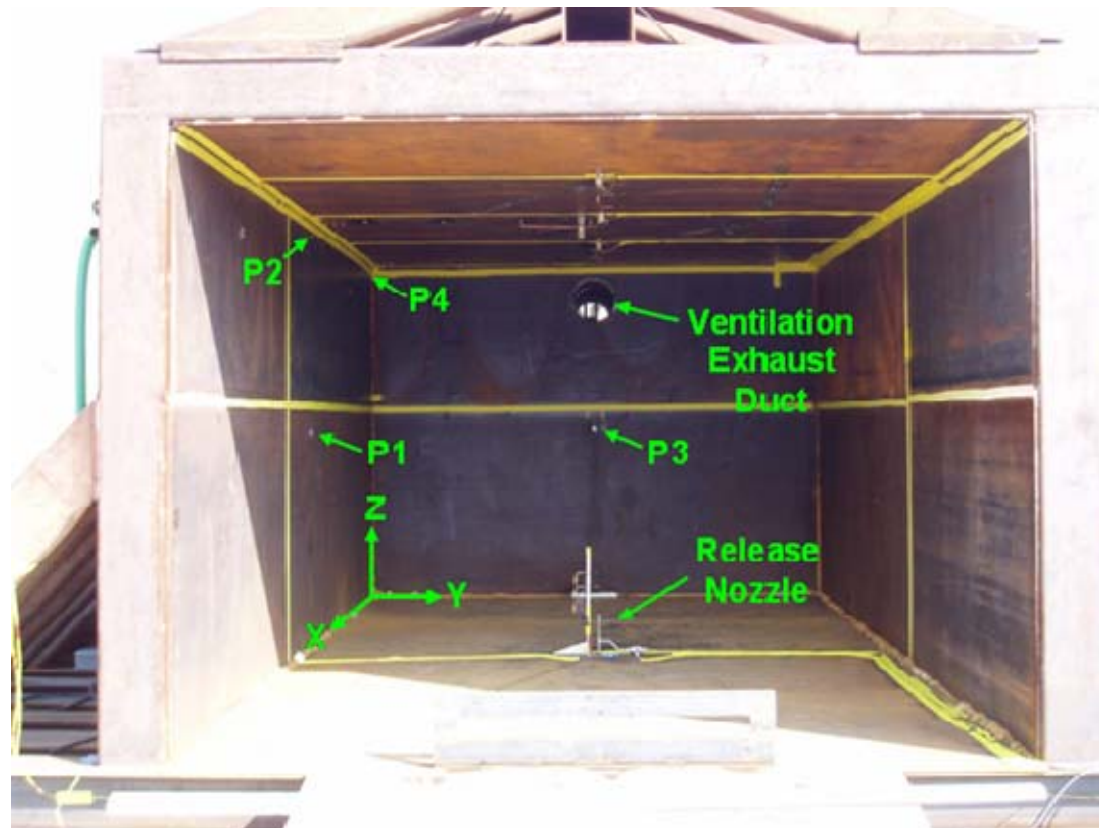
- 高さ：2.72 m
- 幅：3.64 m
- 奥行き：6.10 m
- 体積： $\sim 60 \text{ m}^3$

Copyright; 2008 IAE. All rights reserved.

ダクトで換気される閉鎖空間における水素の拡散・燃焼実験

実験設備内部

- 水素放出ノズルは床面中央に設置
- 水素ガスは天井に向って放出。
- 着火した際に発生する圧力は、ピエゾ式圧力計が壁面と同じ高さに埋め込まれている。

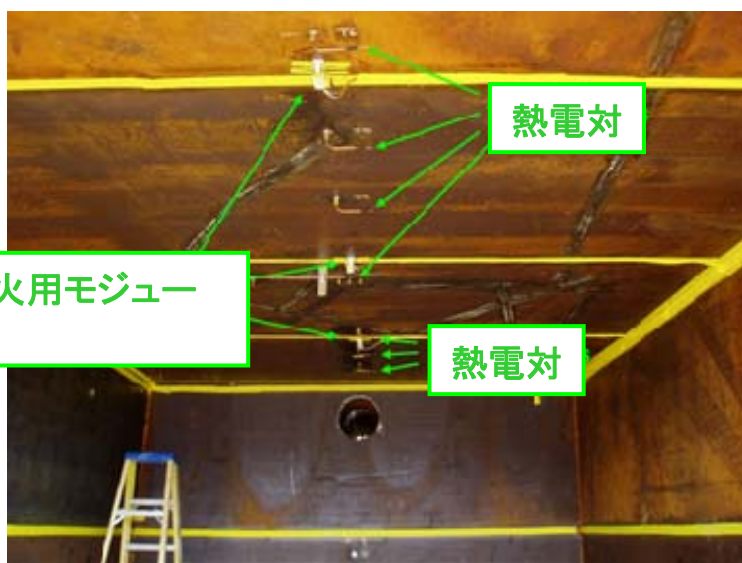
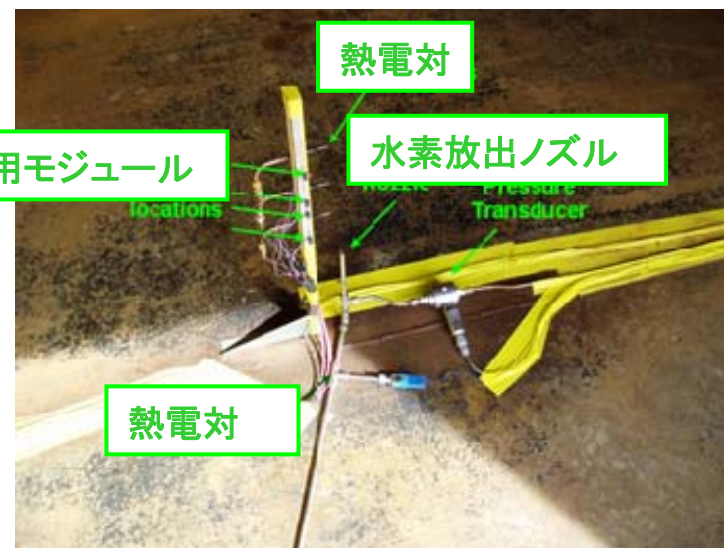
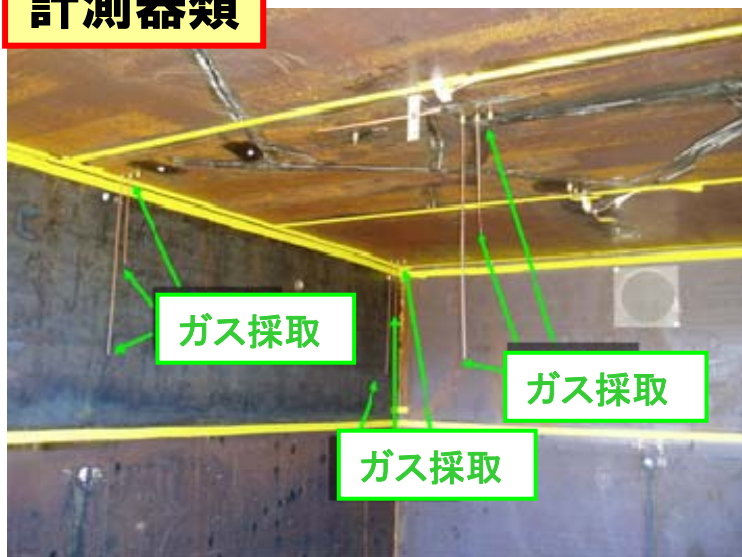


- 音速ノズルを用いて、水素は一定の漏えい流量で放出した。
- 水素の漏えい流量は、熱式のマスフローメータで測定

Copyright; 2008 IAE. All rights reserved.

ダクトで換気される閉鎖空間における水素の拡散・燃焼実験

計測器類

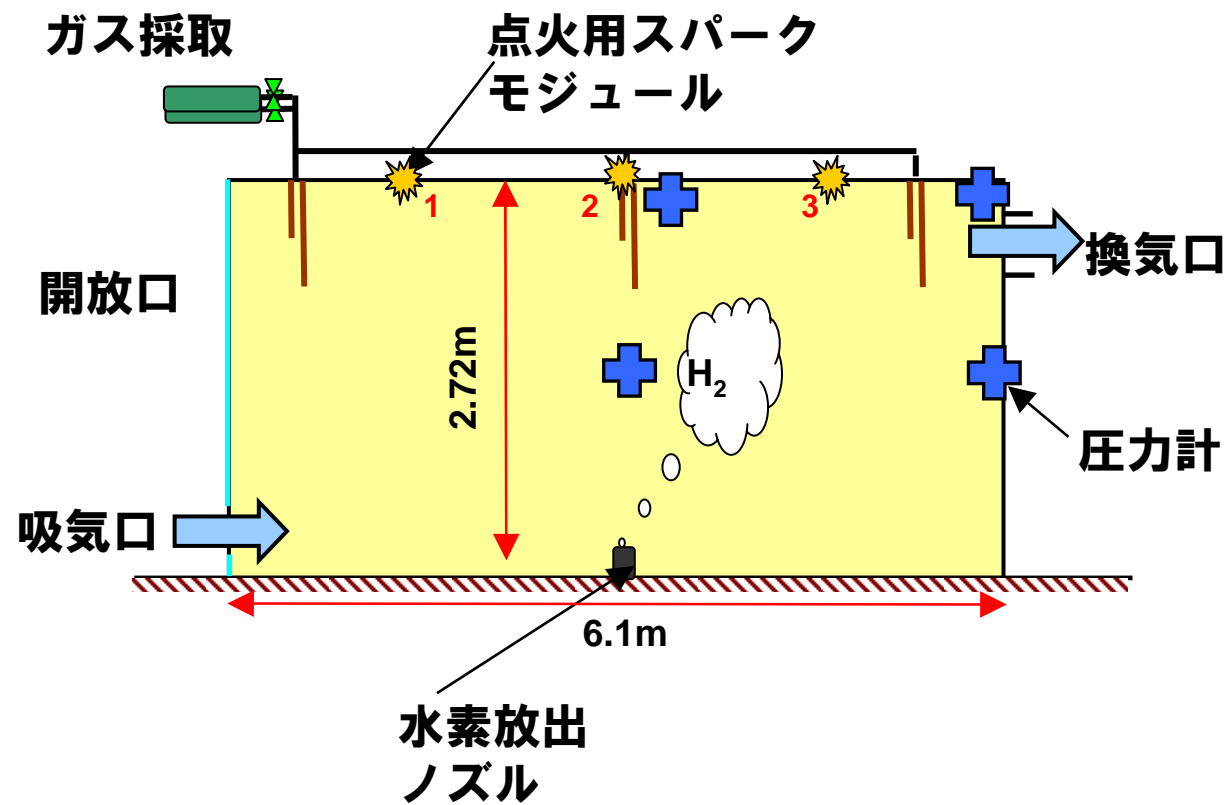


- 9箇所でガス採取を実施。
- 高速応答の熱電対は、火炎伝播速度の計測に使用。
- ノズルの近傍にも点火用モジュールを設置

Copyright; 2008 IAE. All rights reserved.

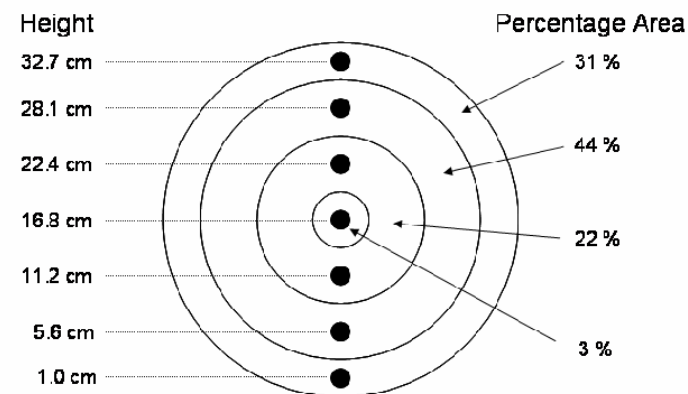
ダクトで換気される閉鎖空間における水素の拡散・燃焼実験

実験設備の断面図（概略）



ダクトで換気される閉鎖空間における水素の拡散・燃焼実験

換気

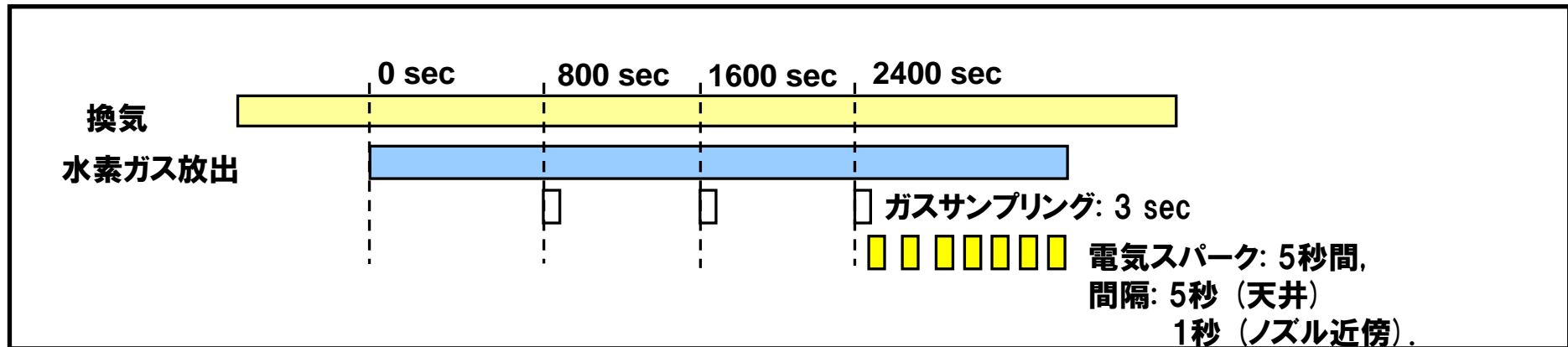


- 風速計のデータを用い、換気量を測定
- 実験前に各点で10秒間の平均風速を測定し、分布が軸対称であると仮定して、換気風速を算出した。
- 実験中は軸上に計測位置を固定し、ダクト内の風速分布は相似であるとして換気風量を評価した。

Copyright; 2008 IAE. All rights reserved.

ダクトで換気される閉鎖空間における水素の拡散・燃焼実験

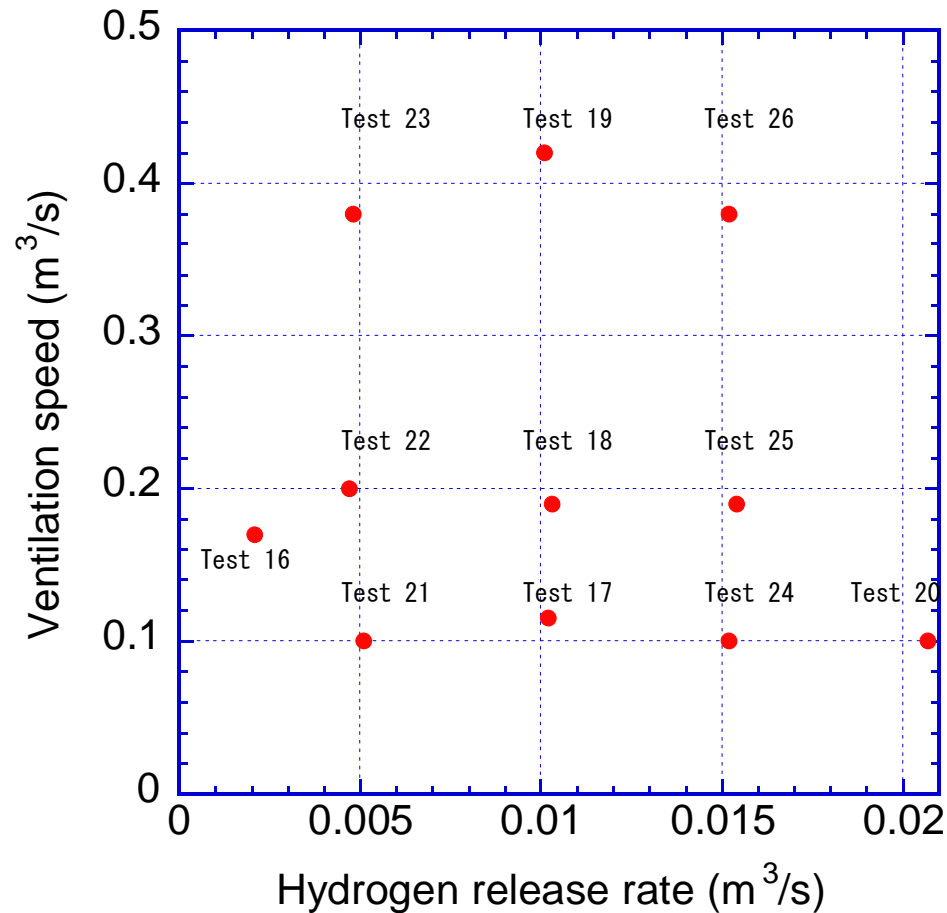
実験手順



- 水素の放出前に換気量を測定
- 水素の放出は一定流量
- 天井付近9箇所の水素濃度を3回測定
- 水素濃度測定用のガスサンプリング後
- 水素ガスは最後のスパークが起動した後に停止。

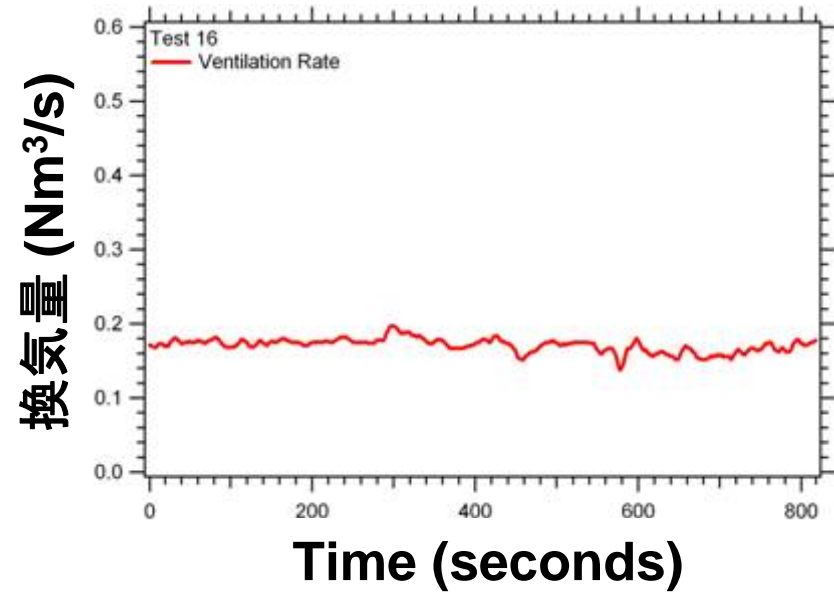
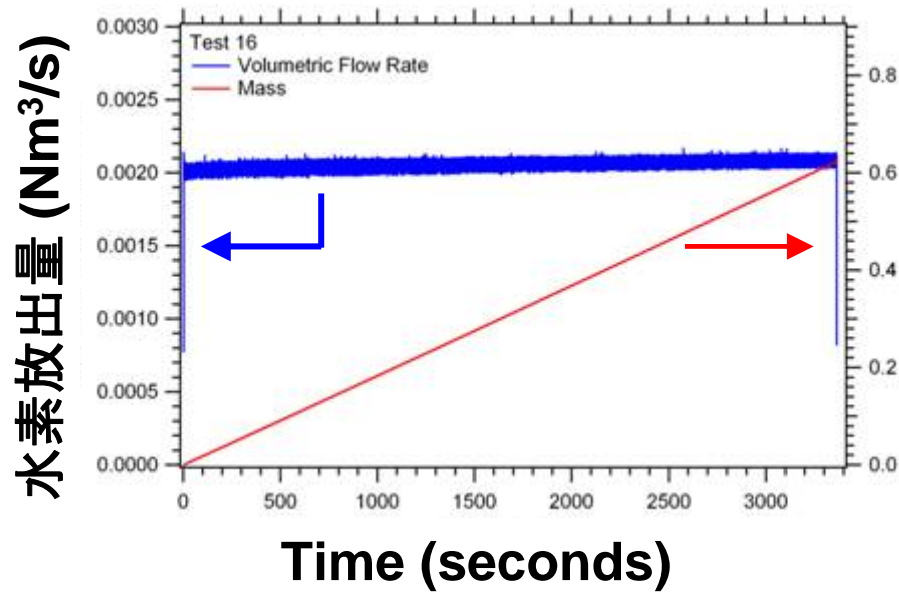
ダクトで換気される閉鎖空間における水素の拡散・燃焼実験

実験パラメータ領域



ダクトで換気される閉鎖空間における水素の拡散・燃焼実験

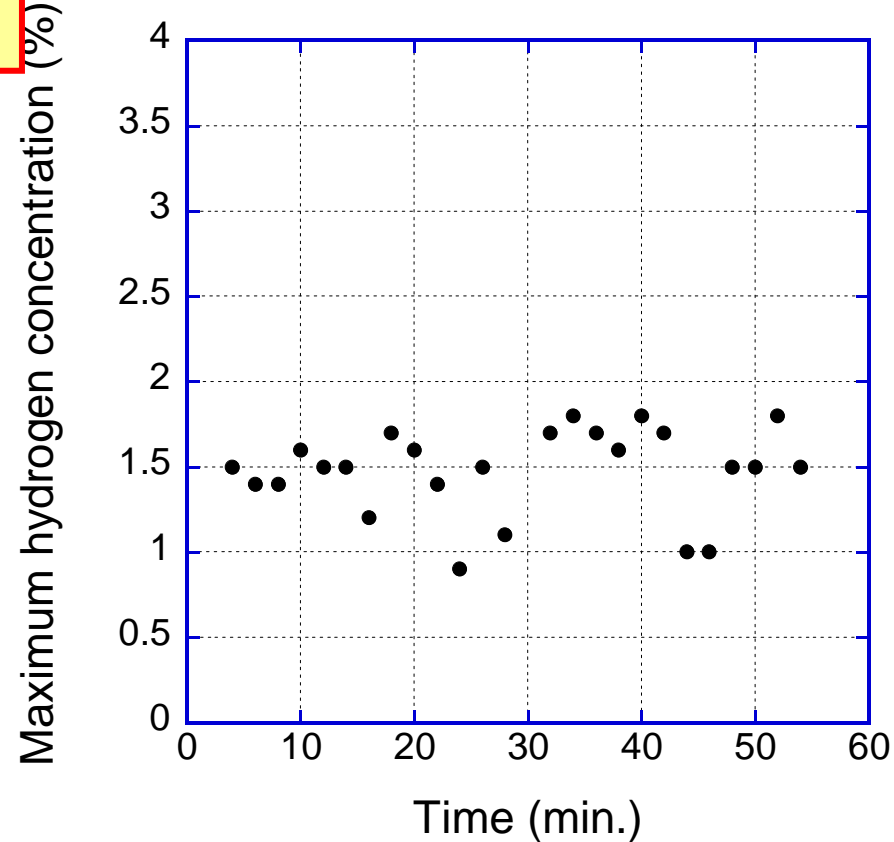
水素放出量と換気量



それぞれの実験で、水素放出量と換気量は時間的にほぼ一定。

ダクトで換気される閉鎖空間における水素の拡散・燃焼実験

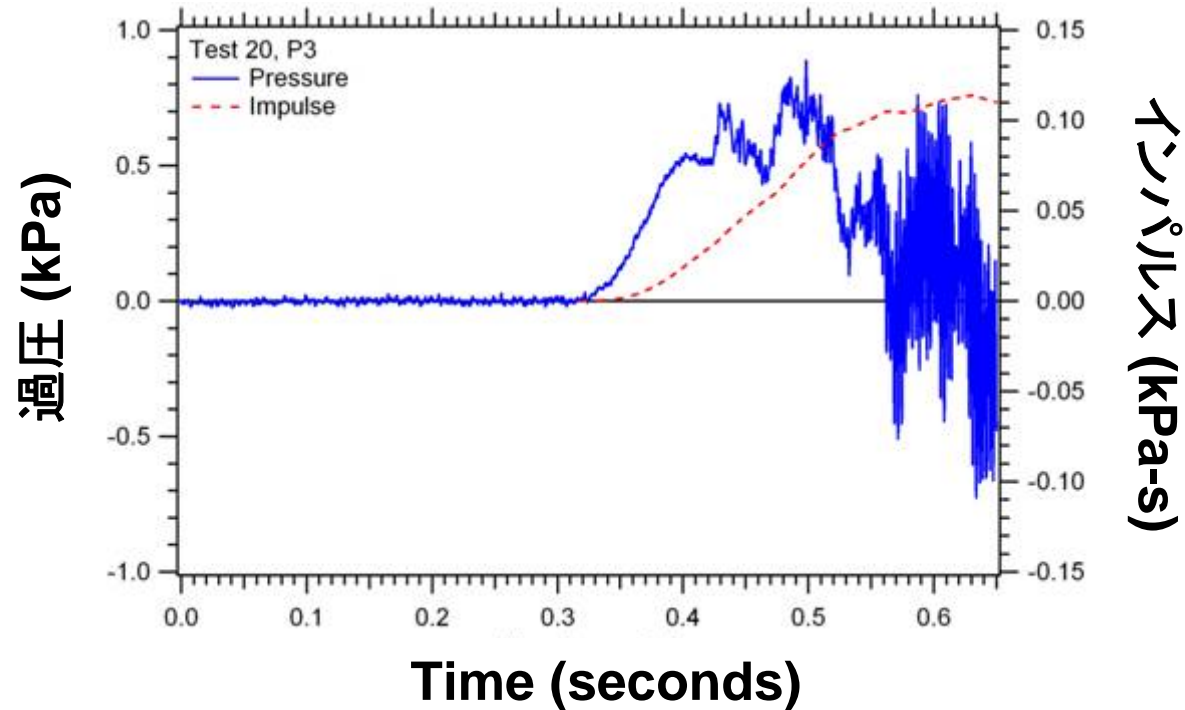
水素濃度の時間変化



- 水素濃度は実験開始後4分で約1.5%に達した
- 以後の実験は、40分間水素を放出した。

ダクトで換気される閉鎖空間における水素の拡散・燃焼実験

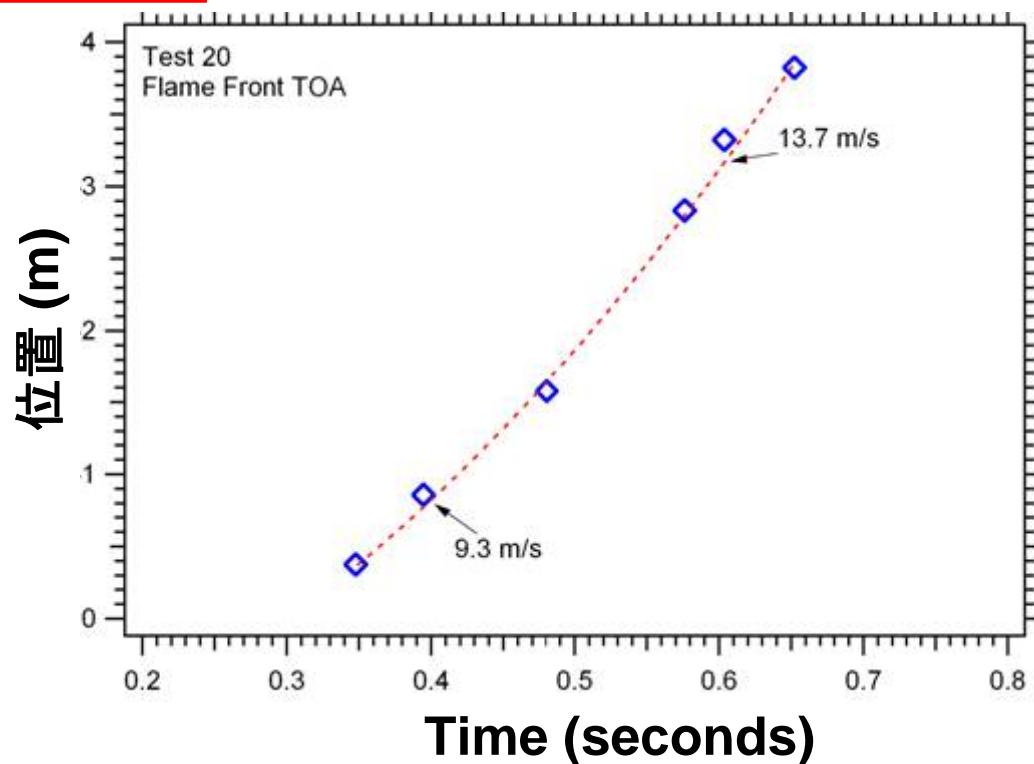
着火したケースの過圧およびインパルス



- 水素放出量: $0.02\text{m}^3/\text{s}$
- 換気量: $0.1\text{m}^3/\text{s}$.
- 着火前の天井付近の水素濃度: 15~17%.
- 水素空気混合気は、天井に設置された電気スパークで着火した。
- 過圧(最大値) 0.77 kPa、インパルス(最大値) 110 Pa-sec.

ダクトで換気される閉鎖空間における水素の拡散・燃焼実験

火炎伝播速度

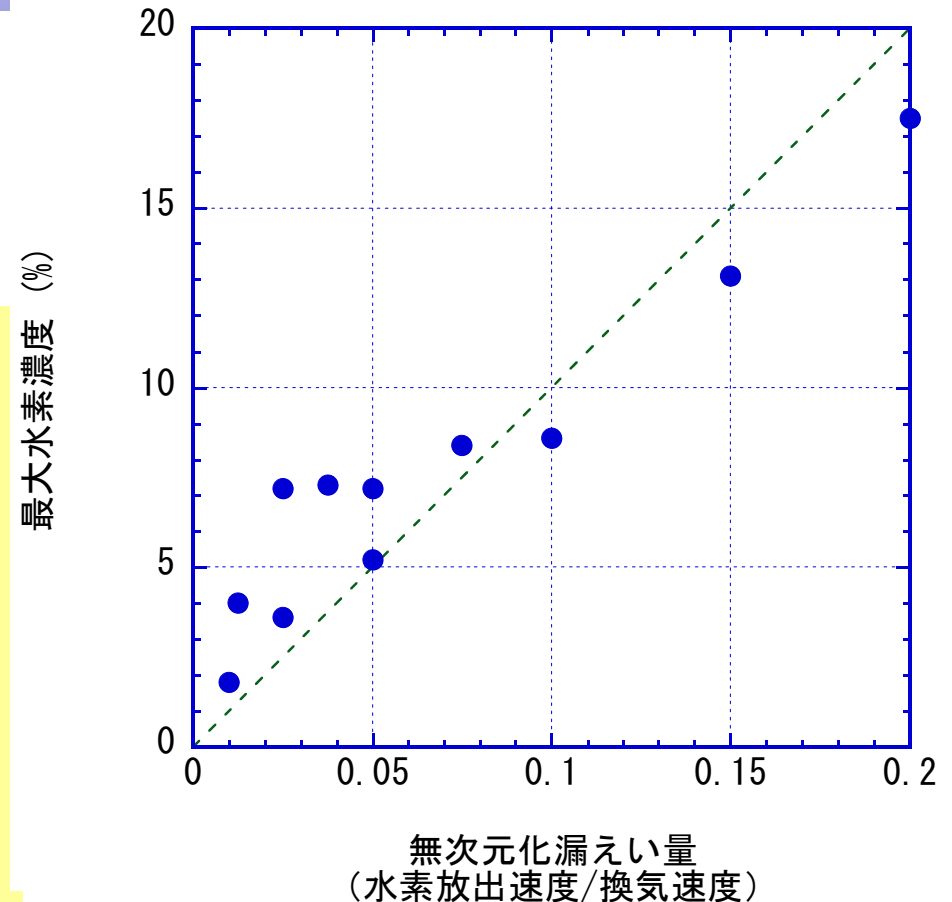


火炎伝播速度は、9.3 m/sから13.7 m/sと若干ではあるが加速された。

ダクトで換気される閉鎖空間における水素の拡散・燃焼実験

無次元漏えい量による整理

- 本実験の条件では、実験中の最大の水素濃度は、水素放出量と換気量の比である無次元化漏えい量に比例した。
- 本実験の条件内では、想定される水素漏えい量に対する換気量が求められる。
- 空間の体積やノズルの向きなどを変化させた実験も必要。



無次元化漏えい量（水素放出量/換気量）と最大の水素濃度との関係

まとめ (1/2)

●円筒状半閉鎖空間における水素漏洩・拡散・燃焼実験

(1) 水素／空気均一混合系

- ・水素／空気混合気を、ダクト中央に設置したテント（容積：37m³）内に保持し、電気スパークで点火、爆燃させた。
- ・爆風圧はダクト端まで減衰することなく伝播し、発生圧力は水素濃度に大きく依存し、混合気中での火炎伝播速度も開放空間の場合より高かった。

(2) 漏えい・拡散・燃焼実験

- ・FCV, FCBus, 輸送用カードルからの水素ガス漏洩を想定し、実験を実施した。
- ・いずれの条件でもダクト内水素濃度は10%以下であり、電気スパークで着火しないか、着火した場合でも最大過圧が約0.25kPaであった。
- ・換気風により水素濃度は低減できたが、漏洩直後にダクト全体の濃度を低減するには、大きな換気風速が必要であることが示唆された。

まとめ (2/2)

●閉鎖空間における水素の拡散・燃焼実験

- ・ダクトによって強制的に給排気される閉鎖空間において、水素流量、換気量をパラメータとした水素の拡散挙動、および燃焼挙動の把握を目的に実験を行なった。
- ・体積60m³の閉鎖空間において、水素放出量 (0.002 m³/s~0.02 m³/s) と換気量 (0.1 m³/s~0.4 m³/s) をパラメータとした。
- ・今回の実験条件の範囲では、実験中の最大の水素濃度は、水素放出量と換気量の比である無次元化漏えい量に比例した。
- ・本実験の条件内では、想定される水素漏えい量に対する必要な換気量が求められる。

ご清聴ありがとうございました。

この研究はNEDO殿の委託「水素安全利用等基盤技術開発」「水素社会構築共通基盤整備事業」により行ったものです。