

水素の性質

～水素の安全な利用のために～

- 昨今、カーボンニュートラル実現に向けた鍵となる新たなエネルギー源として、水素（ H_2 ）を活用する取組みが進められています。発電や自動車などの燃料として**一部が既に実用化されており、今後水素は新たなエネルギー源として、より身近なものになっていくと考えられます。**
- 一方水素には、既存のエネルギー源である天然ガス等と比べ、次頁以降の**特徴的な性質があり、**取り扱う際はこれらの性質を十分に理解して取り扱う必要があります。
- 水素を使用する設備では、次頁以降の性質を踏まえ、**①水素を漏らさない、②漏れたら早期に検知し、拡大を防ぐ、③水素が漏れてもたまらない、④漏れた水素に火がつかない、⑤万が一、火災等が起こっても周囲に影響を及ぼさない、**といった対策・管理がされています。

1. 重量・密度

水素の性質

- ✓ 水素はあらゆるガスの中で**最も軽い**という特徴を持つ。重量は、空気と比較して約1/14であるため、水素を風船につめると空気中で大きな浮力を得る。

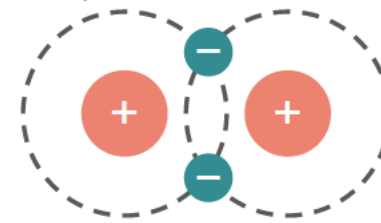


解説

- ✓ 水素は分子式 H_2 で表される、常温、常圧で気体（ガス状）の物質であり、比重は空気1に対して0.07である。^{※1,2}。なお、分子を構成する水素原子の原子番号は1である。
- ✓ 各気体の $1m^3$ あたりの重量は以下の通り（ $0^\circ C$ 、1気圧のとき）。^{※3}

| 気体の種類 | 水素 | 空気 | 酸素 | 二酸化炭素 |
|-----------------------------------|-------|---------|---------|---------|
| 重量（ $1m^3$ 、 $0^\circ C$ 、1気圧のとき） | 約90 g | 約1293 g | 約1429 g | 約1964 g |

水素分子の構造（イメージ）



1つの陽子、1つの電子からなる水素原子2つが結合

(※1) 参考：阿部，水素の物性，水素エネルギーシステム（2002）

(※2) 参考：厚生労働省，モデルSDS「水素」

(※3) 分子量より計算

2. 色・臭気

水素の性質

- ✓ 水素単体は**無色・無臭**のガスであり、そのままの状態では、人間の感覚で検知することが難しい。
- ✓ また、水素が燃焼したときの**火炎はほとんど目に見えない**。



解説

- ✓ 無色・無臭である水素の漏洩を検知するため、**水素を検知するセンサー**等を使用し、水素濃度を監視することが有効である。
- ✓ 水素火炎の目視が難しい理由は、水素火炎の光の強度が高い波長が**可視域にはほぼ存在せず、紫外域や赤外域に存在**するためである。ろうそくの火炎はオレンジ色に発光するが、この原因の一つである煤（すす）は、水素の燃焼時には発生しない。*1,2



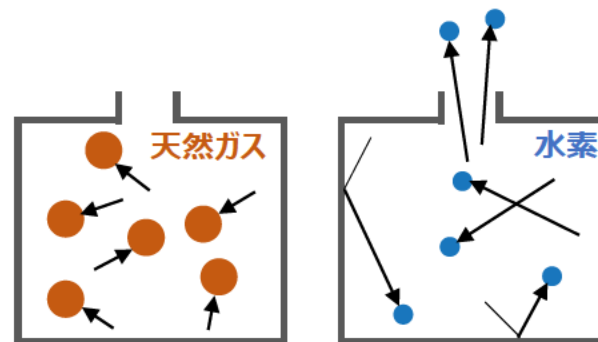
(※1) 参考：繁森敦, 水素の物性と安全な取り扱いについて, 低温工学 (2020)

(※2) 参考：福地ら, OH発光の差分画像計測による水素火炎の可視化, 電気学会 (2007)

3. 拡散性

水素の性質

- ✓ 水素は分子の大きさが小さいことから、他のガスと比べ分子が速く動いており、**拡散しやすい**。
- ✓ また上述の性質から、目視では確認できないほどの**ごくわずかなき裂からも漏洩するおそれがある**。



解説

- ✓ 水素は**拡散係数が0.61 cm²/s (常圧、空気中、20℃)** ※1であり、これは**あらゆる気体の中で最も大きい**。つまり、最も拡散しやすいガスである。これは水素の分子量が小さいことに起因し、一般的に物質毎の拡散速度は分子量の平方根の逆数に比例※2することが知られている。
- ✓ この拡散性等により、水素は**ごくわずかなき裂や隙間から透過しやすい**が、漏洩したガスは**漏洩停止後に速やかに希釈**されるため、水素が着火・爆発する濃度まで達することは、屋外等の開放された空間では困難である※3,4。一方室内等の閉鎖的な環境に近い空間では、条件によっては天井付近に滞留した水素の濃度が、安全な濃度に低下するまでに長時間かかる可能性がある※5,6,7。

| 物性 | 水素 | メタン (参考) |
|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| 拡散係数 (常圧、空気中、20℃) | 0.61 cm ² /s | 0.16 cm ² /s |

(※1) 出典：繁森，水素の物性と安全な取り扱いについて，低温工学（2020）

(※2) グレアムの法則より

(※3) 参考：繁森，水素ステーションの火災安全対策，火災（2016）

(※4) 参考：佐藤，安全に関わる水素の性質，安全工学（2005）

(※5) 参考：井上，水素の安全利用，電気設備学会（2016）

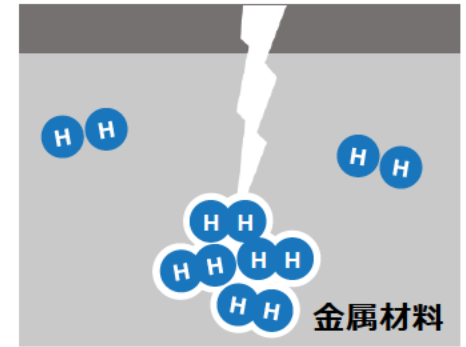
(※6) 参考：井上，室内における漏洩水素の拡散に関する実験的研究，水素エネルギーシステム（2008）

(※7) 参考：井上，ダクト内および天井下における漏洩水素の拡散に関する実験的研究，水素エネルギーシステム（2009）

4. 水素脆性

水素の性質

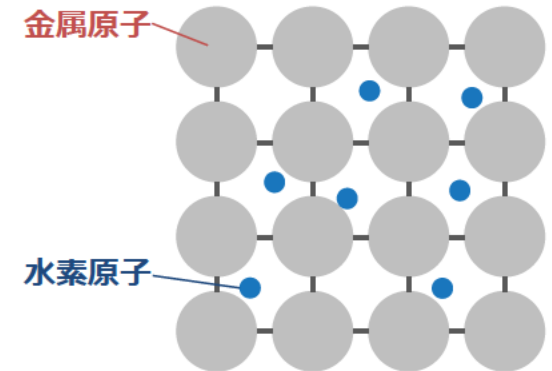
- ✓ 水素は、**金属材料**の種類によっては材料中に侵入して延性（力を加えられた金属が破壊する前に伸びる性質）やじん性（力を加えても破壊しにくい性質）といった**材料強度等を低下させる性質（水素脆性）**を持つ。



解説

- ✓ 水素脆化は**材料中の水素によって引き起こされる**※1。こうした現象は、水素原子が**全原子中もっとも小さな原子半径**であり、**金属材料中の金属粒子間の距離に比べて非常に小さく、容易に金属内部に侵入**することが一因と考えられている※2。
- ✓ 下記に掲げる現象を総じて、水素脆化と言われる。※3,4,5,6

| 現象 | 説明 |
|-----------------------------------|---|
| 水素侵食※7： Hydrogen attack | ✓ 高温 (> 200℃) 高圧 の水素が金属中に侵入し、金属中の炭化物との化学反応により生成した メタンガス が微細な空洞やき裂を形成することで引き起こる。 ($Fe_3C + 4H \rightarrow 3Fe + CH_4$) |
| 水素脆化※8： Hydrogen embrittlement | ✓ 比較的低温で高圧 の水素が金属中に侵入することで引き起こり、応力を負荷した後、 時間を経てから破壊が生じる という特徴がある。 遅れ破壊 とも呼ばれる。金属原子の結合力が水素によって低下すること等が理由として取り上げられているが、統一的なメカニズムの解明には至っていない。 |



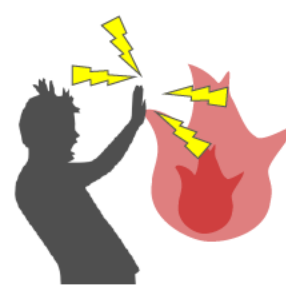
水素はその小ささから金属内部に侵入しやすい

(※1) 参考：秋山，金属材料の水素脆化と今日の課題，まてりあ（2017）
(※2) 参考：横川ら，水素脆性と金属材料の安全性，水素エネルギーシステム（1997）
(※3) 参考：佐藤，安全に関わる水素の性質，安全工学（2005）
(※4) 参考：秋山，金属材料の水素脆化と今日の課題，まてりあ（2017）
(※5) 参考：熊本ら，Dual-Phase 鋼における擬脆性的な水素助長損傷の発達，日本金属学会（2019）
(※6) 参考：南雲，破壊現象としての水素脆性-水素脆性機構-，圧力技術（2008）
(※7) JIS Z 0103「防せい防食用語」では、「高温・高圧の水素に接する金属材料に水素が侵入して機械的性質が劣化する現象。」と定義されている。
(※8) JIS Z 0103「防せい防食用語」では、「腐食、酸洗い、電解、溶接などによって生じた水素が金属中に吸蔵されて、材質がもろくなる現象。遅れ破壊ともいう。」と定義されている。

5. 着火性・燃焼性

水素の性質

- ✓ 水素は可燃性のガスで、**静電気程度のわずかなエネルギーで着火する可能性がある**。また水素は燃焼特性より、**燃焼を止めにくく、火炎が広まりやすい**。

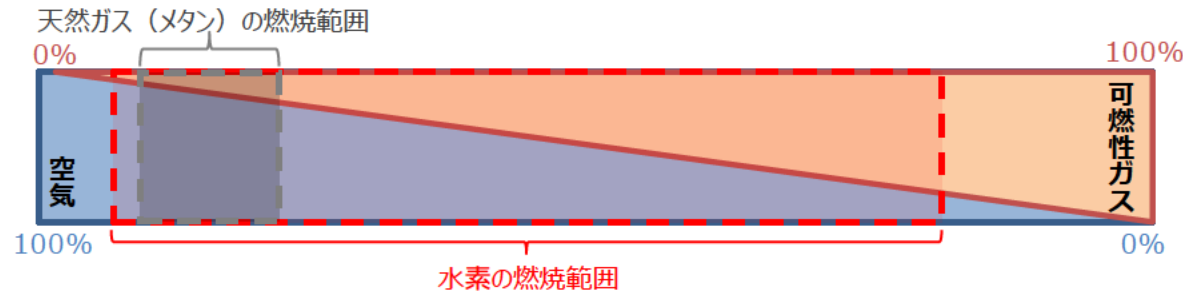


静電気注意

解説

- ✓ 水素の**最小着火エネルギーは0.02mJ**であり、天然ガスの主成分であるメタン0.28mJなどの1/10以下に相当する。このため、**静電気等のわずかなエネルギーでも着火する恐れ**がある。※1,2,3
- ✓ 水素等の可燃性ガスを燃焼するためには、着火源に加え、酸素等の支燃性ガスと共に特定の濃度範囲で存在する必要がある。この範囲を**燃焼範囲**といい、**水素は4.0～75.0 vol%である。これは他の可燃性ガスに比べて広く、着火しやすいといえる**。※1,2,3
- ✓ また、炎は隙間の大きさが小さいほど通過が難しくなるが、この炎が通ることができる隙間の最小の大きさを**消炎距離**という。この値は**水素で0.64 mm**であり、メタンの値2.2 mmなどより小さく、炎が伝播しやすいことを示している。※1

| 物性 | 水素 | メタン (参考) |
|------------|-----------|-------------|
| 最小着火エネルギー | 0.02 mJ | 0.28 mJ |
| 燃焼範囲 (空气中) | 4~75 Vol% | 5~15 Vol% |
| 消炎距離 | 0.64 mm | 2.2 mm |



(※1) 参考：井上，水素の安全利用，電気設備学会（2016）

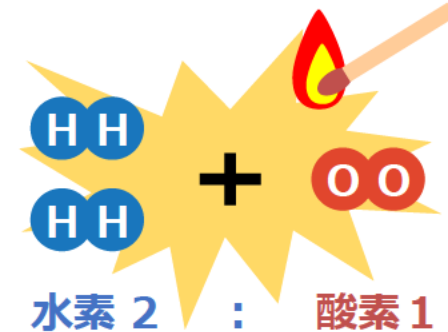
(※2) 参考：佐藤，安全に関わる水素の性質，安全工学（2005）

(※3) 参考：繁森，水素の物性と安全な取り扱いについて，低温工学（2020）

6. 爆発性

水素の性質

- ✓ 水素は爆発性を有し、着火後は、**爆発を起こすおそれがある**。特に、**水素2・酸素1の割合**で混合したガス（水素爆鳴気）に点火すると**激しい爆発**を起こす。また爆風圧が大きい。



解説

- ✓ 水素と酸素が2：1の割合（化学量論組成^{※1}）に近い混合ガスに点火すると、激しい爆発を起こす^{※2,3}。このガスを水素爆鳴気と言う。
- ✓ 水素は**燃焼速度が大きい**。燃焼速度は火炎が未燃焼ガスのほうへ移動する速度を指し、**燃焼速度が大きいほど、爆発時の圧力上昇が速くなりやすい**。水素の最大燃焼速度は2.91m/sであり、メタンの0.37m/sと比べ大きいことから、**水素は爆風圧が大きい**。^{※4,5}

| 物性 | 水素 | メタン (参考) |
|--------|----------|-------------|
| 最大燃焼速度 | 2.91 m/s | 0.37 m/s |

(※1) 化学量論組成：化学式に必要な各物質の整数比の組成。水素と酸素の反応は $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ で表されるため、水素・酸素混合ガスの化学量論組成は、水素2、酸素1の割合である。

(※2) 参考：繁森，水素ステーションの火災安全対策，火災（2016）

(※3) 参考：三宅，水素の爆発と安全性，水素エネルギーシステム（1997）

(※4) 参考：佐藤，安全に関わる水素の性質，安全工学（2005）

(※5) 参考：小林，カーボンフリーアンモニア燃焼，日本燃焼学会（2016）