

# 水素の安全性

平野 敏右

東京大学大学院工学系研究科

113 東京都文京区本郷 7-1-3

Hydrogen Safety

Toshisuke HIRANO

The University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

This paper presents basic understanding needed for safely utilizing hydrogen as energy resources. There have occurred a number of disasters caused by accidents in systems using hydrogen. Each of those disasters has contributed to the progress of science and/or technology. The hazards of hydrogen are attributable to its characteristics, and reliable methods for protection against such hazards are indispensable for appropriately making use of hydrogen. The importance for establishing reliable technology on hydrogen utilization is not to neglect but to understand the hazards of hydrogen.

Key words: hydrogen safety, hydrogen hazards, safety concepts

## 1. 水素エネルギー利用技術の基本

現在、WE-NET（水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術）の開発計画がNEDO（新エネルギー・産業技術開発機構）により、進められている[1]。この計画は、地球上のどこかに余剰エネルギーを発生させ得る地域があったと仮定し、そのエネルギーを水素に変換して、エネルギーが不足している地域に移送し、そこで水素をエネルギー源として利用しようとするものである。近未来の日本は、エネルギーが不足すると予測されることから、エネルギー源としての水素の輸入元として、想定されている。

水素は、燃料として、燃焼機器に用いても、燃料電池に用いても、空気中の酸素と反応して、水となるはずであり、クリーンな燃料という印象が深く、環境悪化を心配している人々に歓迎されるに違いない。

水素をわれわれが日常生活や産業の現場で必要とするエネルギー源として用いるとすると、これまで化学系の産業における原料やあるいはロケットの燃料として用いてきた量と比べて、遙かに多量の水素を取り扱

うことになる。また、用途が変わるので、これまでとは異なった状況で、水素を貯蔵し、輸送し、消費することになるはずである。このような状況に合わせて、水素を取り扱う、新しい技術を確立しなければならない。

新しい技術のほとんどは、厳しい条件の下で、必要とする役割を果たすためのもので、その基本は、安全の確保にある。航空、原子力、半導体、宇宙、いずれをとってみても、その技術の大半は、安全を確保するためのものである。WE-NET計画にもこのことは当てはまる。水素という燃焼しやすく、爆発しやすい物質を多量に扱うわけであるから、その利用技術の主体が安全対策であることは当然である。反応やエネルギー変換のどのような優れたアイデアも、安全の確保に疑問があれば、実現することはない。

ここでは、水素エネルギー利用技術の開発に携わっている人々の今後の活動に役立てていただくために、水素を取り扱うにあたって、知っておかなければならない、水素に関連する幾つかの事項について述べる。それらについて知っていることが、水素エネルギー利

用技術の基本である。

## 2. 水素関連事故による災害

水素をエネルギー源として利用しようとする人々が最も耳にしたくないことのなかに、水素に関連する事故による災害がある。それらの人々のなかには、水素に関連した災害の話になると、耳を貸さなくなったりする人々がいる。しかし、耳にしなくても、原因や拡大に水素が深く関わった災害が現実起こったわけであり、それらが、科学や技術の進歩に重大な影響を与えてきたことは事実である。それらの災害をもたらした事故のうち、比較的好く知られているものに、飛行船ツッペリンの事故、鹿島石油の水素製造装置の事故、スリーマイル島の原子力発電所の事故、スペースシャトル・チャレンジャーの事故、角田のロケット開発センターの事故がある。

飛行船ツッペリンの事故により、水素を用いることの危険性が一般に知られるようになり、飛行船や気球に、水素に代わる空気より軽い気体を用いるようになった。鹿島石油の水素製造装置の事故を調査した結果として、高温の状態の水素を扱う場合、金属によっては、脆化してしまうということが指摘された。高温において水素を扱う機器に用いている材料の脆化に関する特性曲線であるネルソンカーブという言葉聞いたことのある人も多いのではないかと思う。この事故以来、水素を扱う機器の設計に際して、材料の選定に、この事故の経験が生かされるようになったのはいうまでもない。

スリーマイル島の原子力発電所の事故と水素と結びつく人は、日本では、まだ少数派に属するのではないかと考える[2]。これは、日本の原子力行政と関連のあることで、技術的な問題とはいえませんが、安全確保の上では非常に重要なことである。スリーマイル島の原子力発電所での事故の概要は、いろいろなメディアを通じて繰り返し報道され、ドキュメンタリーとして書物にまとめられたりしているが、その多くで、米国の原子力委員会の事故調査報告書にも述べられている大切な部分が切り捨てられている。そのことをここで非難するつもりは無いが、水素を扱う人々にとっては、重要なことであるので、事実を簡単に紹介しておく。日本以外で原子力利用に関わる人々が、かなり深刻に受け止めた事故時の現象に、炉心熔融に至った一連の事故が始まってから9時間50分後に起こった水素の爆発がある。炉心の高温固体面で水蒸気が熱分解して

発生した水素と酸素が爆発したことにより、格納容器内の圧力が約2気圧上昇した。この場合、格納容器が旧式の設定基準であったのが幸いして破壊することはなかったが、新しい設計基準で建設されていたら大変な事故になったはずである。このことは、この事故以後の専門的な国際学会などで、繰り返し触れられている[3]。2気圧圧力が上昇すると、1平方メートルあたり20トンの力がかかるわけで、水素の漏洩するおそれのある場所を閉鎖空間としなければならない場合には、このことを考慮しなければならない。実際、大きな空間をもつ構造物の強度をこれほど高くするのは容易ではないはずである。原子力発電所の施設にこのような事故に対する対策がなされるようになったことはいうまでもない。

スペースシャトル・チャレンジャーの事故については、すでにいろいろな方面から検討されているところである。この事故の例を挙げた理由は、それ以前、毎月1回程の頻度で打ち上げられていたスペースシャトルが、事故発生後、2年8ヶ月間打ち上げを中断したという事実があるからである。この場合、スペースシャトルの任務の重要性の故に、2年8ヶ月後に打ち上げ再開にこぎ着けることができたが、場合によっては、計画中断という事態になりかねない。確かに、私達の生活を豊かにするための計画が、不幸にする結果をもたらすのであれば、計画を中断して当然である。スペースシャトル・チャレンジャーの事故は、事故のもつ意味を十分に認識しておく必要があることを示す、よい例と言える。

角田のロケット開発センターの事故は、実験中に起こった事故で、事故の発生の経過が映像として残っている例として、ここに挙げた。事故から災害に至る経過が迫力ある映像にとらえられている。また、事故後の調査もかなりの確に行われ、事故報告書は、多量の水素を扱う場合の参考になるはずである。この場合にも、事後の対策を行ったわけであるが、開発センター付近の住民とのやりとりも、WE-NET計画を推進する際の重要な情報である。

以上の水素関連事故による災害とその効果について、表1にまとめておいた。これらの他にも、水素の関連する多くの事故による災害があり[4]、それぞれの事故が、何らかの意味で、以後の技術の進展や安全の確保に役立っているといえる。事故を知ることが、その事故の原因となった現象に対処する第一歩である。

表1 水素関連事故による災害とその効果

災害に至った事故の例	もたらした効果
飛行船ツッペリンの事故、	水素を用いることの危険性が一般に知られるようになり、飛行船や気球に、水素に代わる空気より軽い気体を用いるようになった
鹿島石油の水素製造装置の事故、	高温の状態の水素を扱う場合、脆化を考慮して、温度設定や材料選択を行うことが、水素を扱う機器の設計において、常識となった
スリーマイル島の原子力発電所の事故、	冷却水を用いる原子力施設の設計を行う際、水素爆発対策を行うようになった
スペースシャトル・チャレンジャーの事故	毎月1回程度の頻度で、打ち上げられていたスペースシャトルが、事故発生後、2年8ヶ月打ち上げを中断した
角田のロケット開発センターの事故	大量に水素を用いる施設での爆発事故の詳細な検討資料を提供し、また、住民対策の例ができた

3. 水素の性質

水素は、常温大気圧下での密度が0.083 kg/m<sup>3</sup>である。この密度は、空気の約1/14.5であり、水素は、空気に比べて、非常に軽い。また、分子の大きさも小さく、その分子の拡散は、空気の主成分である窒素や酸素と比べて、遙かに速く、窒素や酸素などが通過できないところを通過したり、達することができない部分にまで、達することができる。

水素原子は、鉄などの金属結晶の大きさに比べて非常に小さいばかりでなく、金属と接触すると、原子状

あるいはイオン状になって、大きさはきわめて小さくなり、金属の物理的、化学的性質に影響を与える[5]。これが、水素脆化といわれる現象の原因であり、金属材料を水素取扱い機器に用いる場合に注意すべきことである。

水素関連事故が大きな災害となるのは、それに着火し、火災や爆発が起きた結果である。水素の燃焼に関する性質も、他の可燃性気体とは大幅に異なる。表2に、主な可燃性気体の燃焼範囲を示す[6-9]。この表の下限界というのは、空気中の可燃性気体の濃度がその値以下になると、火炎が伝ばしないことを示し、上限界というのは、その値以上になると、火炎が伝ばしないことを示す。アセチレンのように、

表2 可燃性気体-空気混合気の燃焼限界

(大気圧・室温；上方火炎伝ば) [7,8]

可燃性気体	下限界 (vol. %)	上限界 (vol. %)
水素	4.0	75.0
メタン	5.0	15.0
エタン	3.0	12.5
プロパン	2.1	9.5
ブタン	1.6	8.4
ペンタン	1.5	7.8
ヘキサン	1.1	7.5
ヘプタン	1.05	6.7
オクタン	1.0	6.5
エチレン	2.7	36.0
アセチレン	2.5	100.0
メタノール	6.0	36.0
エタノール	3.0	36.0
一酸化炭素	12.5	74
アンモニア	16.0	25.0

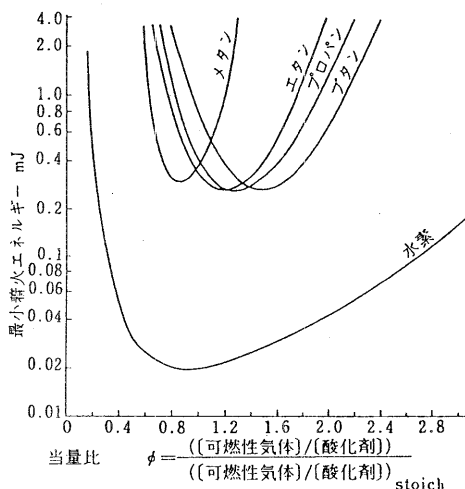


図1 可燃性気体-空気混合気の最小着火エネルギー

酸素が無くても大気圧より少し高い圧力のもとでは(表ではアセチレンの上限界が100%となっているが、実際に常温大気圧で100%アセチレンに火が着いたといわれている事例は非常に少ない)、発熱分解による熱発生面(火災)が伝ばするという特殊な物質を除けば、水素の燃焼範囲は、他の可燃性気体、特に燃料として用いられる可燃性気体の主成分であるメタンやプロパンより、遙かに広いことがわかる。

図1には、可燃性気体と空気混合気に電気火花で着火する場合に必要な、最小着火エネルギーの測定結果を示す[6-9]。図からわかるように、最小着火エネルギーは、可燃性気体の種類や、空気との混合割合で異なるが、水素と空気の最小着火エネルギーが異常に小さいことがわかる。

また、図2には、可燃性気体-空気混合気の消炎距離の測定値を示す[6-9]。消炎距離というのは、火災が消炎してしまい通過できない隙間の最大値をいうが、水素の消炎距離は、他の可燃性気体と比べて異常に小さいことがわかる。

これら2つの図からわかることは、水素が空气中に漏洩した場合、極僅かのエネルギーでも容易に火が着くということと、ふつうの火災では通り抜けることができないような小さな隙間でも、水素の火災は通り抜けてしまうということである。

このような水素の燃焼特性は、その燃焼反応による。燃焼反応は、比較的早い反応であるが、その反応の主体は、連鎖反応である。その連鎖反応の進行に重要な役割をしている化学種が、H、OH、Oなどであり、水素と空気の火災では、これらの化学種の生成が他の可燃性気体と空気の燃焼反応より容易である。こ

のことが、表2、図1、図2に示した、水素と空気の燃焼特性が、他の可燃性気体と空気の燃焼特性と大幅に異なっている理由である。

#### 4. 必要性和安全性

自動車の事故とその普及を例に引くまでもなく、危険なものでも、必要があれば、それを生活や生産の現場で利用してゆく。身の回りを見渡してみると、私達の利用しているものの多くは、使い方を誤ったり、周囲条件の大幅な変化があったりすると、災害をもたらす。危険なものをいかうまく利用するかが、生活をよくする鍵である。生活が豊かになるにつれて、危険な状態は増え、災害による損失が増えてゆく。

このような話は、心情的に受け入れ難いと思っっているに違いない。確かに、エネルギーの安定供給を目指す原子力の利用にあたって、便利で迅速な旅行のために航空機を開発する過程で、あるいは新しく使いやすい材料を生産するための化学プロセスにおいて、安全確保に努力してきた。しかし、それらが実現する以前と比べたら、それらの事故による災害が増えた分だけ、明らかに損失はふえている。文化とか文明が発達するにつれて災害による損失が増えてきたといえる。

何かを導入しようとするとき、それを導入することによって増大する危険性が、得られる利益と比べて小さいことを確かめる。このことは、一般には、無意識のうちに行われていることである。得られる利益の方が小さければ、導入は見送ることになる。利益を得たいという欲求すなわち必要性和、利益に見合う範囲に損失を抑え得るといふ裏付けすなわち安全性を、バランスにかけて、判断する。

危険が特定できれば、それを回避するのに、現在の最先端の技術を駆使すればよいことになる。ただ、問題となるのは、危険を回避するのに必要な負担とその危険を回避することによって得られる利益のバランスである。僅かな利益のために、多くの犠牲を払ってもよいというわけではない。負担が利益によって報われるという見通しができて初めて、計画を進めることになる。見通しといっても、対象とする期間の長さは一定ではない。場合によっては、100年単位で考えねばならないこともある。

安全確保にかかる努力は、その必要性の程度によ

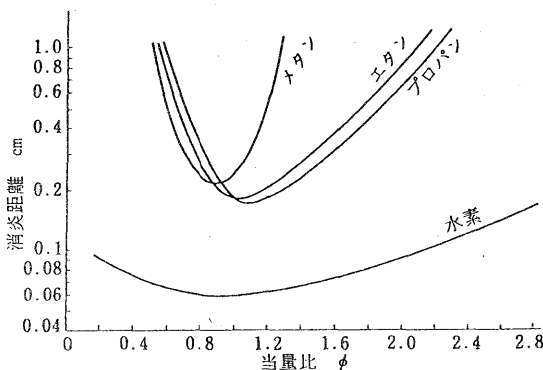


図2 可燃性気体-空気混合気の消炎距離

るといえる。必要性を感じなければ、それほど危険ではないものすら、計画の段階から一步も進むことはない。必要であると判断して初めて、水素エネルギーを利用するための技術の基礎である、安全技術が進み出すということになる。

### 5. 危険の回避と軽減

2および3で述べたように、水素は、多くの事故を起こしてきたし、また、他の可燃性気体と比べてみても、とても安全な物質であるとはいえない。安全といえない物質でも、それを使う必要性が高ければ、使うように努力するのが当然である。「水素が他の物質と比べて安全である」というような話は、水素をエネルギー源として利用しようとする人々の間だけのもので、一般には通用しない。この種の特定の分野だけにしか受け入れられないような話は、他の分野でも過去に繰り返し創作され、その都度まずい結果をもたらしてきた。エネルギー源で、何をしても安全なものなどあり得ない。確かな技術を確立したいなら、まずそれについての知識をしっかりと身につけておくべきである。

多くの事故による災害は、危険性を侮った結果として起こってきた。必要性の高いものには、その必要性の高さに応じた、対策を施すべきである。それが先進社会の常識である。

危険性の高いものでも、技術的にその危険性を、回避したり、許容できる限度以下に軽減することができる、実現することができる。最近の他の分野での新技術開発の経過から推定すると、水素をエネルギー源として利用しようとするときの努力の大半は、この危険の回避あるいは軽減に向けてなされるものとなりそうである。しかし、水素をエネルギー源として利用しようとしている人々の多くは、まだそのことを意識していないようである。

危険を回避するためにまず行うべきことは、どのような危険性が潜在しているかを洗い出すことである。このような目的のための手法には、燃焼特性などの物質の性質による危険性の検討、過去の事故事例に基づくプロセス全体に関する危険性の検討、FTA(Fault Tree Analysis)やFMEA(Failure Modes and Effect Analysis)などのシステム安全解析による危険性の検討、などそれぞれ特徴のあるいろいろな方法がある

[8,9]。これらの方法を用いて検討を始めればすぐにわかることであるが、個々単一分野の知識だけでは、危険の回避に限りがある。多分野の専門家の協力が欠かせない。

例えば、FTAにより、危険の洗い出しを行う場合を考えてみる。確かにFTAに表現したことが正しくかつ遺漏がなければ、FTAにより、どのような対策を行えば、危険を回避できるかを判定することはできる。しかし、各事象をFTAに正しくかつ遺漏無く表現するには、その分野の専門家の知識が必要であり、FTAの各事象全てが特定の分野の知識で理解できるわけではない。管の破断には、材料工学や材料力学の専門的な知識が必要であり、爆発に関しては、燃焼学や気体力学の専門家の知識が必要である。「多分野の専門家の協力が必須である」と述べた意味を理解していただけたものと思う。

### 6. 水素エネルギー利用にあたっての課題

水素は、一般的にみて、必ずしも安全な物質ではない。このことは、過去の災害事例から見てもすぐにわかることである。しかし、危険であるからといって、その利用を見合わせなければならないというわけではない。水素をエネルギー源として利用することにより得られる利益と発生する損失とを比べてみて、利益の方が大きければ、その利用を進めるべきである。水素をエネルギー源として積極的に利用してゆくためには、まず、水素を利用する際に発生する可能性のある危険性を洗い出し、洗い出された危険を軽減あるいは回避する技術を開発しなければならない。危険性を十分認識して取りかかれば、思いもかけない短期間の内にすばらしい技術が開発されるかも知れない。そのような成り行きを期待したい。

### 参考文献

1. エネルギー・産業技術総合開発機構; 委託先(財)エネルギー総合工学研究所; 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術(WE-NET)サブタスク1総合評価と開発計画のための調査・研究; 平成5年度成果報告書 NEDO-WE-NET-921 平成6年3月
2. 平野敏右; Newton, 17,74(1997)

3. M. Berman; "Fuel-Air Explosions," J.S.H.Lee and C.M.Guirao ed, Univ. Waterloo Press, 1982, pp. 861-892 "Hydrogen Combustion Research at Sandia"
4. 高圧ガス保安協会;高圧ガス保安法事故情報、1997
5. 横川清志;高圧ガス、34、1044(1997)
6. Zabetakis, M. G. : Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapours, Bulletin 627, Bureau of Mines (1965)
7. Lewis, B. and von Elbe, G.:Combustion, Flames and Explosions of Gases, 3rd ed., Academic Press, Orland (1987)
8. 平野敏右:ガス爆発予防技術、海文堂、東京 (1983)
9. 平野敏右・堤内 学編、難波桂芳監修:爆発防止実用便覧、サイエンスフォーラム、東京 (1983)