HOF 01-064

本田財団レポートNo.64

# クリーンエネルギーとしての水素利用

東海大学工学部　応用物理学科教授　　内田 裕久

**講師略歴**

内田裕久（うちだひろひさ）

1949年　東京生まれ。
1973年　東海大学工学部応用物理学科卒業。
1975年　東海大学大学院工学研究科金属材料工学専攻修了。
　　東海大学工学修士。
1977年　西独シュツットガルト大学理学部化学科金属学専攻修了。
　　シュツットガルト大学理学博士。
1975—1981年　西独マックス・プランク金属材料研究所研究員。
1981—現在　東海大学工学部応用物理学科教授。

現在の研究分野
①太陽エネルギーの金属水素化物による貯蔵システムの開発。
②水素貯蔵合金の研究開発。
③超高真空から高圧条件下の金属表面上での気体反応プロセスの研究。
④プラズマ反応によるセラミクスコーティング反応機構の研究。

このレポートは平成2年6月21日、パレス・ホテルにおいて行われた第55回本田財団懇談会の講演の要旨をまとめたものです。

# 目　　次

はじめに……5

エネルギーとしての水素について……6

化石エネルギーと水素エネルギー……7

クリーンなエネルギーとしての水素……9

水素エネルギーの原理と応用……10

(1)　水素貯蔵用合金の原理と利用……10

(2)　水素燃焼による機械エネルギーへの変換……17

(3)　水素ガスの移動による熱エネルギーの発生……19

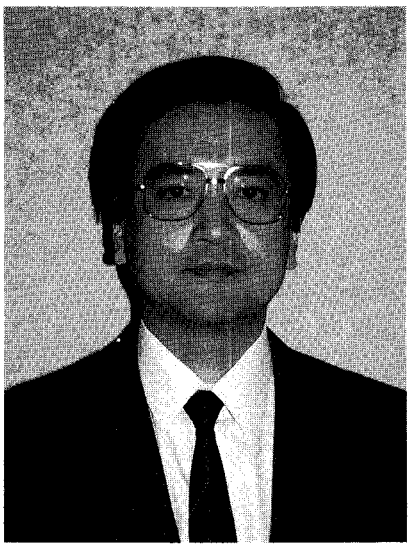
(4)　ガス圧力の変動の利用……19

(5)　電気化学エネルギーへの変換……20

サテライトからの情報……21

宇宙船地球号のフェイルセーフ……21

質疑応答……23



## はじめに

今日は水素エネルギーの利用ということで、比較的専門にからんだ方もいらっしゃるかもしれませんが、材料あるいは、エネルギーに関係していない方々もいらっしゃると思いますので、なるべく分かりやすく、いろいろと図面その他、マンガ等を用意してまいりました。折角聴いていただくんですから、是非、ご理解願いたいという気持ちからでございます。

それで、今日お話をする内容をご説明いたしますと、水素というものに対しての一般的なイメージは、実は、あまりよろしくございません。それでこのイメージを、今日は皆さんに変えていただくために、まず水素のイメージについてお話いたします。

次に、よく言われます、クリーンエネルギーのクリーンという意味について、お話をして、それから水素エネルギーについては、液体水素の利用ということよりも、むしろ、水素を非常にコンパクトに入れることができる特殊な合金がございます。その金属のお話をいたします。金属のお話については、原子の世界のイメージをもっていただこうということで、分かりやすくお話いたしたいと思います。

その次に、具体的に水素はどのように利用され得るのか。実験的にも応用面で、だいぶ使われておりますが、いくつかの例についてお話をいたします。

最後にこの水素エネルギーとからんでまいります環境問題についても触れたいと思います。私どもの大学にスペースセンターというのがございまして、今、地球の回りを廻っておりますサテライトから送られてくる、いろいろな情報を取込んで、地球表面上の変化を、コンピューターによって作った画像情報としてとらえております。その中のいくつかの例についてお話したいと思っております。

## エネルギーとしての水素

水素のイメージというものは、まず、爆発しやすく危いというものです。1936年のヒンデンブル号の爆発というのが、水素爆発というイメージにつながる典型的な例でございます。しかし、この場合、よく知っておいていただきたいのは、97人の乗員乗客中62名が生存できた事実です。確かに引算すると35名の方がお亡くなりになったのですが、62名の方が生存できたのは、実は、水素を使っていたからだということが言えるんですね。もし、これがプロパンガスのように炭素を含むようなガスで、こういう爆発が起きていたら、ほとんどの方が火傷で亡くなったであろうと言えると思います。水素というのは、燃えても比較的発熱量が少ないものですから、そういう意味で火傷よりも爆発による直接の傷害の方が大きいかもしれません。

それから、もう一点は、よく小学校や中学校で、水を電気分解しまして、酸素と水素が試験管に出てくる実験をいたします。先生が「ハイ、火をつけなさい。」というわけですね。まあうまくやれば、ピューという音で色が青かったとか、そんなようなことを言わせるんですが、問題は、それをもたもた子供がやりますと、適度に酸素が混じったりしまして、爆発を起こします。これは非常に危険な実験なので、本当は、そういうことはやってほしくないんですね。同じような実験を、もしプロパンガスを試験管の中に入れて火を付けたらどうなるか、これはもう大変なことになります。

そういうことも含めて、水素というものもきちんとコントロールしてやれば、非常に安全に使うことができます。むしろ、我々が日常使っているプロパンガスや、その他ブタンガス、こういったものは非常に危険なんだ、ということを逆に認識していただかなければいけないと考えているわけであります。

水素の性質として、まず、欠点の方を出しますと、確かにこれは燃焼速度が大きいものですから、水素がある源からスーと出てくるときに、この速度が余り遅いと燃えている炎が水素が出ている源に向って逆に入っていってしまう。それによって爆発を起こします。工場などで、水素のボンベが爆発を起こすというのは、ボンベの中に残っているガスを最後まで使おうとしますと、最後の方は圧力が非常に低くなってきて、そこへ火を一生懸命つけたりすると、却って中に吸込まれて爆発事故を起こす、ということがあり得るわけですね。ですから、こういうことは注意しなければいけません。それから、爆発限界が広い。これも水素の特徴でございまして、酸素との混合比が非常に広いところでどんどん爆発する、あるいは、燃えるということです。それから、点火エネルギーがメタンの15分の１程度で、静電気など特にスパークなどによっても引火しやすい。こういう、危険性はございます。但し、これは我々が日常何気無く使っているガソリンや、プロパンガスと比べてもそれほど著しく危険だということを意味しているとは思いません。

逆に長所は、非常に軽いので一ケ所にたまらないことです。プロパンが漏れた

りいたしますと、たとえばこの部屋ですと、床辺りにずーとたまってまいりまして、それに引火するとここで爆発が起きる。水素の場合は、漏れますと、まずこの部屋位ですと、５秒もすると天井まで広がります。ですから、換気さえしっかりしておけば水素ガスは、どんどん流れていくということが言えるわけです。

それから、重量エネルギー密度が大きい。これは何を意味するかと申しますと、ここに液体水素とガソリンと灯油ということで、密度が示してございます。（表１）同じ１リッター当り、水素はせいぜい70グラム、ガソリンが740グラム、灯油が860グラムと、非常に水素は軽いわけです。同じ体積で比べますと、実際にエネルギーに換算して、水素というのは非常に小さくせいぜいガソリンの４分の１、灯油の５分の１程度と少ないのですが、同じ重さ辺りで比較してみますと、実際に灯油やガソリンの３倍近いエネルギーを取り出すことができるというわけであります。それで、どのような使い道があるかと申しますと、具体的にはロケットの打上げで使われるときの、メインエンジンの燃料は液体水素が使われているということですね。スペースシャトルの例では、打上げ用大型タンクの約３分の１の体積が液体酸素、それから３分の２の後側の体積が液体水素で占められておりまして、特に重力に逆って外に飛び立たせる場合には、この重量というものが非常に重要になってくるということであります。

〔長所〕
○軽いので一箇所にたまらない。
○重量エネルギー密度が大きい。
　―ロケット燃料として使われる理由。

| 燃料密度 kg／l | エネルギー密度 kcal／kg | kcal／l |
|---|---|---|
| 液体水素 0.07 | 29,000 | 2,050 |
| ガソリン 0.74 | 11,500 | 8,500 |
| 灯　油 0.86 | 10,500 | 10,000 |

表１

## 化石エネルギーと水素エネルギー

エネルギーについて具体的に入りますが、大体人間が、石やおのや矢じりというものを使っていた時代から、エネルギー源としてきたのは、森から木を切り出して、この木を燃やすことによって煮たきをしました。（図１）時代が進んできますと、酸化鉄からうまく炭を使って還元して、純粋な鉄を取出しこれでいろいろなものを作っていった時代がございます。それからそのあとに今度は石炭の時代となります。18世紀以降のヨーロッパの産業革命の時期、この石炭を大量に使い始めます。電気も出てきますが基本的には石炭の時代がきましてそのあと、石油、化石燃料を使っている現在の我々の時代となってくるわけです。（図２）こ

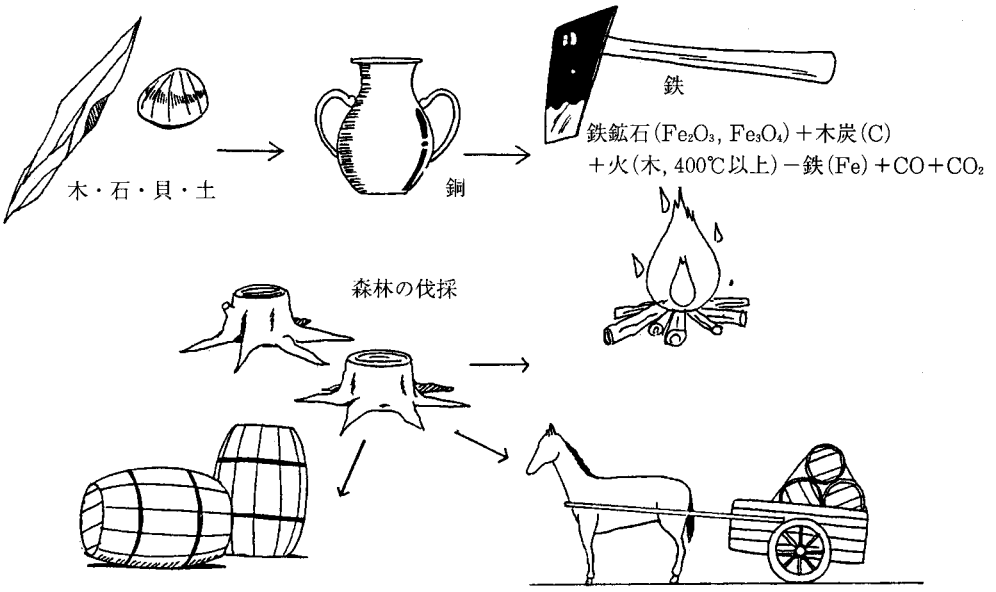



図１　16世紀以前のヨーロッパ

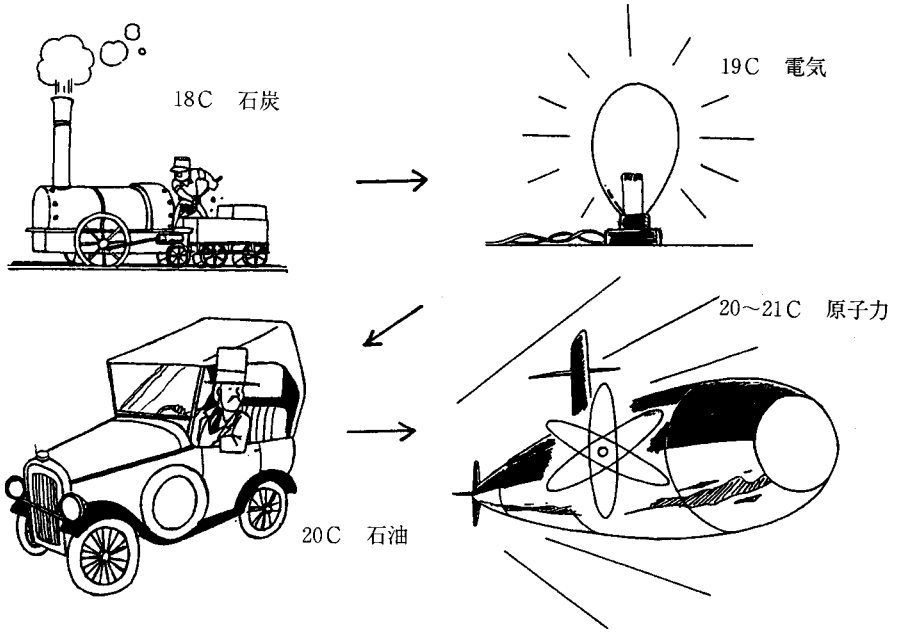



図２　産業革命以後のヨーロッパ

のあと、果たして21世紀にかけては原子がメインになるかどうか。この辺まだちょっと？マークがついているかもしれませんが――。大体こんな物質とエネルギーの利用の流れで我々は今まで生きてきているわけでございます。それで、時代の流れの中で、このエネルギー源というものをもう一度材料又は物質という立場から見直してみるとどのように変わってきているのか、ということなんですね。最初に木材を燃やしたという時代がございます。この木というのも、実は、炭素と水素が、非常に沢山集まって出来ている材料でございます。石炭もそういう材料ですし、ガソリン、プロパン、メタンというものもみんなそういう材料でございます。こういうものを燃やすことに我々は、エネルギーを得てきているわけであります。

一般に化学式で考えますと、一つの分子に、炭素(C)がm個、水素(H)がn個くっついて、これらが酸素($O_2$)と反応して完全燃焼しますと、水($H_2O$)と二酸化炭素($CO_2$)というものができてくるわけであります。(表2) ところが完全燃焼しますと水と二酸化炭素なんですが、不完全燃焼しますと、一酸化炭素(CO)なども加わって発生してくるわけですね。

〔化石燃料〕

$C_mH_n + O_2 \rightarrow H_2O + CO_2 (+CO)$

〔水素〕 m=0

$H_2 + O_2 \rightarrow H_2O$

| | 石 炭 | ガソリン | プロパン | メタン |
|---|---|---|---|---|
| m／n | 0.5 | 0.45 | 0.38 | 0.25 |

表2

ここで面白い傾向がございます。一分子当りの水素の数に対して、炭素の数というものをm/nでとってみますと、昔、石炭の時代にはこの比率が大体0.5。ガソリンになりますと、ちょっと減りますけれどそれほど変りません。それから最近の液化石油ガス、あるいはメタンというというものになりますと、この一分子当りの中の炭素の量が減ってまいりまして、m/nが0.3位になります。それで実は水素では、正にこのmを0としたような、ちょうど$H_2$というものだけが、酸素と反応して水になるという形になってまいります。こういう形できますと、この値はちょうど、水素のところで0になる。これが多分我々がこれから未来にかけて使っていくエネルギーの流れとしては間違いないであろうという傾向でございます。

石器時代、産業革命、現代、そして未来と見据えた場合、ちょうど我々現代から未来にかけて、石油天然ガス等使っておりますが、化石燃料に代わるものとしての原子力エネルギー、あるいは自然エネルギー、水素エネルギーといったものが、一体これからどう利用されていくのかということが、非常に大きな問題になっていくとみえるわけでございます。

## クリーンなエネルギーとしての水素

クリーンエネルギーというのは炭素を含んだ$CO_2$やCOというものが出てこないという意味で、水素を燃やすと非常にクリーンなんだという意味でございます。石油の原油価格についてみますと、第4次中東戦争で一回上り、イラン革命でもう一度、最高30ドル以上まで上りました。その後また落ちてきて、近年は、10ドルから15ドル前後でいろいろと動いているんだと思うんです。ちょうど、クリー

ンエネルギー、あるいは、石油に代るエネルギーというものを開発しようという動きが出てきたのが、正にこの第４次中東戦争のころからなんですね。

たとえば、通産省が出してまいりましたサンシャイン計画、その他省エネルギーを目的としておりますムーンライト計画等は、この辺から出てきておりまして、また、自然エネルギーをなんとか利用しようという計画や、原子力発電も、積極的に推進しようじゃないかという計画も出てきております。

## 水素エネルギーの原理と応用

水素を非常にコンパクトに、しかも、高密度で貯蔵できる合金というものが、1970年にオランダのフィリップスという電気関係の会社で、偶然に見つかっております。ちょうどこの辺から、水素をもっと積極的に使おうという考え方が急速に出てまいります。確かに、液体水素を使った利用方法は以前からございますが、水素を気体で使うとなると非常に低温で使わなければなりませんので、大掛かりな装置が必要になってまいります。従って、使う条件としては、ロケット発射とか、非常に極端な条件に限られていました。ところが、水素をある特殊な金属の中にコンパクトに入れることができ、しかも、それを自由に取り出したり、また、入れることができるということになってまいりまして、非常に身近なところで、水素が使いやすくなったということが言えるわけであります。

### (1) 水素貯蔵用合金の原理と利用

では、一体その堅い金属の中にどうして触っても感じないようなガスが入るかという、その辺のお話からしていきたいと思います。というのは原子が集まって、集合体となって結晶というものを作っているんですが、この自然界というのは不思議なものでございまして、あらゆる元素というのは、自然に放っておきますと集まってきて、ある固有の結晶形というものを作ってまいります。図３の右側も

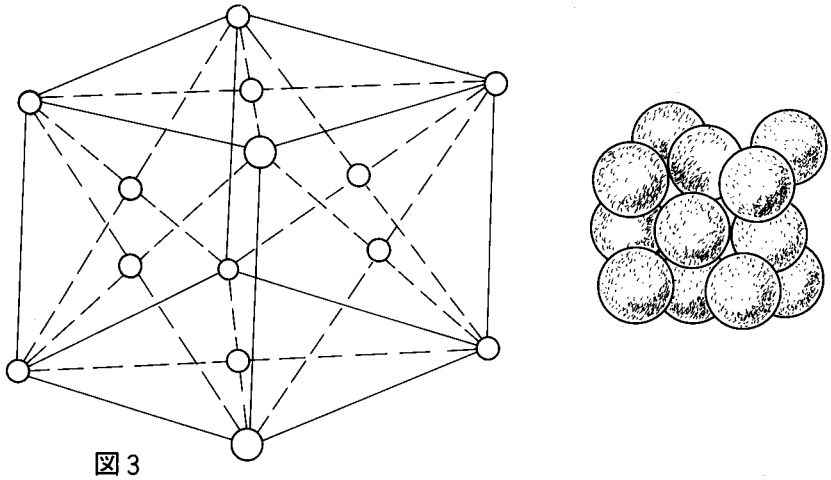


図３

その一例でございまして綺麗に原子が規則的に並んでおります。ただ、こういう見方ですと、非常に見にくいので、我々はこの一つ一つの丸を小さく書きまして、図３の左側のように表します。これは、原子同志がお互いに結合していると申しますが、つながっているぞということで線を入れまして、こういう形で結晶というものを表現いたします。「やあ、そんなこと言うけど、見てきたようなこと言うじゃないか。」と言われると非常につらいんですが、これを直接見た方はいらっしゃらないんです。しかし、多分こうだろうということです。最近は電子顕微鏡を使いまして、材料を原子レベルで見ることができるようになってまいりました。図４の写真は電子顕微鏡で撮ったある金属材料の表面でございます。光った点の一つと一つの間が、大体３から４オングストローム（１オングストローム＝0.00000001cm）程度という、非常に短い距離です。ただし、ここで見える像は光学顕微鏡で倍率を上げていって直接我々が目で見ているものとは、実は違います。これは電子というものを使って、それを表面に当てて、電子の反射や吸収の状態を見ていますので、直接見ている画ではなくて、ある意味ではイメージでございます。では、それが本当に原子かと言われるとなんとも言い難いのですが、多分原子であろう、この粒々の光っているところで、原子が綺麗に並んでいるのだろうと、こんなふうに捉えているわけでございます。

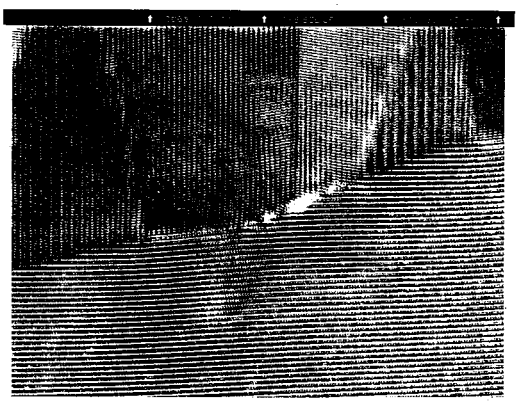


図４

もう一つ申しあげますと、こういう堅い金属、たとえば、自動車のボディにもいろいろ金属がございまして、非常に堅いというイメージがございます。ところが金属には確かに堅いものもあれば、柔らかいものもございます。金属というものは一般的に、金属を構成している原子が意外にお互いに動きやすい状況にございます。それを一つ今日はここでデモンストレーションということで、ある特殊な金属のバネを持ってまいりました。このバネをまず延ばします。延びるということは、この金属材料を作っている小さな原子が、この中のどこかで動いていて、このように延びるわけでございます。これをたとえば、お湯の中に入れると、また、元に戻ってしまう。こういうふうに変形いたします。これをまた、大体60度以上のお湯の中に入れますと、あっという間に戻ってしまうわけですね。これは、非常に特殊な金属で、「形状記憶合金」という合金でございまして、これも新し

い素材の一種でございます。これは、比較的幸せ者の新素材でございまして、ワコールが、ブラジャーなどに使っている材料でございます。なかなか新素材は日の目を見ないんですが、これは、そういう意味では、比較的幸せ者の新素材ということがいえるだろうと思います。

こんなふうに、原子というものが非常に動きやすいことが分かりました。そこで、次のステップにまいりますと、金属の原子がございまして、この金属の原子の中に小さな水素のようなものが入ると、丁度、この隙間のところに入っていく感じになります。（図５）こういうかたちで実は水素の貯蔵というものを、金属原子の中に入れていくわけでございます。水素原子が入ってきますと、金属原子も少しづつ位置をずらして全体のバランスをとります。次に具体的にある特殊な合金の中に、水素原子をとじ込めておくということを少しお見せしたいと思います。

ある特殊な金属の結晶の中に水素の原子が入っております。出口側の方をたとえば真空にする、あるいは温度を上げてやりますと、中に入っている水素が外に出てまいります。出てまいります時には原子状ではなくて、分子状のガスになって出てまいります。そして、これが空になりましたら、外側からガス圧力をかけてやります。または温度を下げてやりますとまた、バラバラに原子になりまして、内部に入っていきます。こういう状況が、丁度、バッテリーの充電や放電をするように、水素が出たり入ったりする状態をくり返して、我々は水素の利用を行うということであります。

では、非常に特殊な材料の中に水素を入れるということは、一体どんなメリットがあるのかということをお話いたします。よく工場などで見かける赤色のボンベがございますが、その体積は、約47リッターで、重さは54キロでございます。

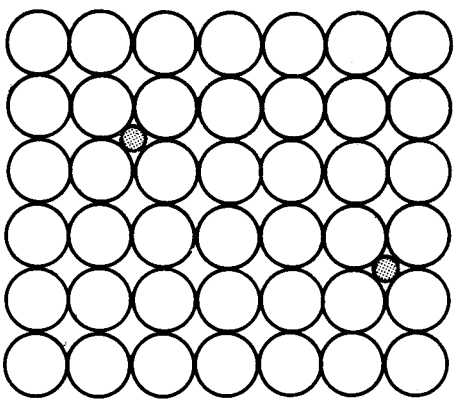


図５

（表３）ところが、中身の、肝心かなめの水素そのものは、実際には600グラム程度でございます。ほとんど、ボンベを運んでいると言っていいわけでございますね。液体水素状態にしますと、勿論その水素そのものの重さは600グラムで、体積は約80リッター程度になるんですが、これを、特殊な合金に入れますと、５リットルから７リットル位の体積になります。液体水素よりもっと小さな体積にすることができます。実際こういった合金の中には同じ体積の中に、液体水素以上の密度で水素原子が一杯詰まってくるという形になります。重さの方は、ボンベに近い状態にもなりますし、ましてある容器に入れますと、もっと重くなるという問題は出てまいります。しかし、非常に体積を小さくできるということが、大きなメリットだと考えております。

それでは、こういう水素の反応を利用して、あるいは、こういう特殊な貯蔵用合金を利用して、一体どんなことができるのか、具体的な利用原理を、表４を使って、ちょっとご説明したいと思います。Ｍと書いてございますのが、水素貯蔵合金、あるいは、吸蔵合金とも呼ばれております。具体的にはどんなものかと申し

**表３　ボンベ１本分の水素量（600g）の貯蔵**

| 貯蔵形態 | 体積／l | 重量／kg |
|---|---|---|
| ボ ン ベ | 47 | 54 |
| 液体水素 | 8.5 | 0.6 |
| 水素化物 | 5―7 | 20―45 |

○液体水素・水素化物の場合、容器の体積・重量が加わる。

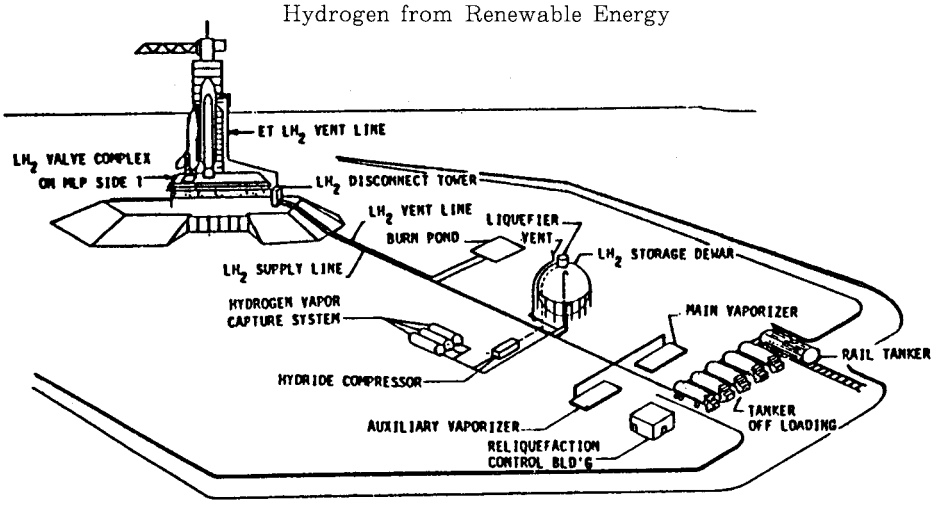
**表４　水素エネルギーの利用原理**

| | |
|---|---|
| M（水素貯蔵合金）＋ $H_2$（水素） | |
| 吸収 ↓ | ↑ 放出 |
| MH（水素化物）＋ Q（熱） | |

ますと、希土類という材料と、ニッケル・コバルト系、こういうものが一つございます。その他には、マグネシウム系統をメインとしたもの、それからチタン系統をメインにしたものと大きく現在三種類ほどベーシックな貯蔵用合金がございます。ただ、反応自体は全く原理は同じでございまして、この金属(M)と水素($H_2$)、これは$H_2$で、ガスになっておりますが、イオン(H)でもどちらでもかまいません。これが反応いたしますと、MとHが反応するとくっつきまして、MHという、水素化物というものをここで作ります。そして水素を吸う過程では熱を外に出します。次に、今度は、水素を貯蔵しているものがございまして、ここに熱を加えてやりますと、今度はこの中に入っていた水素がガスになって出てまいります。そして、入れ物の方は空っぽになります。ですから、水素を吸うと、化合物を作って熱を出す一方、むしろ水素をここから出してやりますと、まわりから熱を奪います。こういう形で反応が進んでいくわけであります。この具体例をお話いたしますと、この合金の中に吸われた水素というものは、非常に高密度で中に入ります。これをガスタンクのようなものに応用したら、どの位になるだろうかということを見てみますと、ある会社が実際に造ってテストしたケースでありますが、ガス状で113立方メートルという大きなタンク、敷地も36平方メートルを占有するというものでございます。今度は同じこの中に入っているガスを、小さなボンベに分けて入れてみると、22立方メートル位になり、敷地占有面積も15平方メートルになるというものであります。ところが、水素貯蔵用合金を使いますと、一気にこれが体積は3.5立方メートル、占有面積は５平方メートルで済むという、これ程コンパクトにできるということでございます。この位にいたしますと、保守点検等が非常に楽でございます。

また、合金の中に水素が入りますと、圧力を一気圧程度、あるいはそれよりも低くすることができます。このように、安全性という面でも、非常に大きなメリットが出てまいります。

それから、例のスペースシャトル・チャレンジャーの事故のあとに、ケネディスペースセンターでは、基礎研究がだいぶ滞っているようでございますが、このスペースシャトルの基地、ケネディスペースセンターでも、貯蔵用合金を使った試みというものが行われております。図６は、打上げ前のシャトルに液体水素を供給している状況でございます。発射台にくっつけたあと、液体水素を発射台まで流してきて、シャトルの大きなタンクの３分の２の体積を占めるところへ、発射直前まででちょうど満タンになるように入れてやります。この液体水素タンクと全く反対の方向に、実は液体酸素のタンクがございます。それから水素タンクと酸素タンクを結ぶ方向に対して直角方向にヒドラジンと過酸化窒素という軌道修正の燃料がございますが、こういった各種燃料タンクが十字形に配置されております。こういうところで実は問題なのは、打上げが成功して、シャトルが飛んでいってしまったあと、打上げ発射台から液体水素のタンクまで実は水素が残ってしまうんですね。残った水素をどうするかということが一つございます。この




Artists concept of hydrogen boiloff recovery system at LC-39. (G&H Engineering, 1983)

図6　液体水素貯蔵タンクおよびシャトル発射台

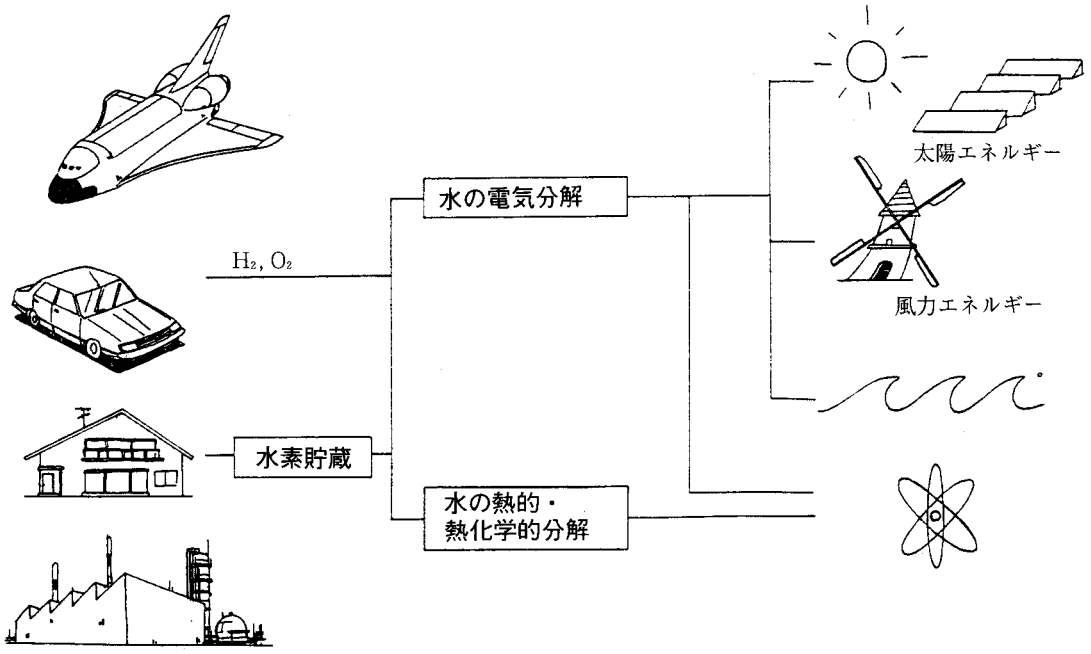



図7　自然エネルギーの利用

距離は、実は相当遠いのでございまして、通常はここで残った水素は全部燃やしてしまうという作業を行っていたわけでございます。ところが、こういう所で残ってしまう水素に限らず、液体水素を非常に冷えた温度で入れておくわけですが、液体水素がどんどん気体になっていってしまうという問題もあります。実際には入れた液体水素の７割がシャトル用に使われまして、３割は途中で気化してしまう、というデーターが出ております。その気化してしまうものを、先程の金属を使って回収してやろうという計画がございまして、そういう形でここを模式的にお見せいたしますと、こんな形になっております。荷物列車やタンクローリーで液体水素を持ってきて、タンクに貯蔵していたのを、発射直前のシャトルに供給するというシステムでございます。そこで残ったものは、水素化物を作らせるように、うまく水素を吸わせてやろうとするとき、問題になりますのは、反応速度が遅かったら話にならないということで、回収するのに一年も二年もかかったら全く意味がないわけです。では、どの位の速度か。定量的に申しあげるのは非常に難しいのですが、正に、人間が口で息を吸ったり吐いたりする位の速度で水素を吸放出いたします。このように反応速度が高いということも、応用面で非常に大きなメリットを持っているということでございます。

それから、自然エネルギーの貯蔵という目的で、使われているケースでございまして、実際に、私どもの大学のキャンパスで今、一部動かしております。（図７）太陽エネルギー、それから、風力エネルギー、あるいは波力エネルギー、といった自然エネルギーの一番大きな欠点は、その日の天気によって変動が非常に大きいということです。たとえば、晴れていて突然雲が掛かってきますと、すぐに太陽電池の出力が落ちてしまいます。ですから、太陽電池を使ってそのまま、それをなにかシステムでつなぐということは、まず、絶対にできないわけですね。これは風力についても同じですし、波力についても全く同じでございます。そういう変動の大きな自然エネルギーを使うには、基本的には、一度出てきたものをすべて貯めておかなければならないという発想が出てきます。どういうふうに貯めるかと言いますと、出てくる電力を使って、水を水素と酸素に分解いたしまして、出てきた水素を先程の金属の中に貯めてやるという方法で、自然エネルギーを貯蔵するということが実際にできます。現在我々の研究室の屋上には、１キロワットの太陽電池が付けてございまして、晴れた日には一分間に２リットルの水素が出てまいります。この水の電気分解で、２リットルの水素をこの中に貯めていくということで、太陽光エネルギーを水素の形で貯蔵しておくということでございます。

それから、原子力発電所が多くなってまいりますと、夜間の過剰電力も非常に増えてまいりますので、そういう余分な電力を使って、夜間に水を電気分解して水素と酸素にして、やはり貯める。あるいは、原子力発電の非常に高温の反応を使いまして、水を直接熱的に分解する。または、化学的な反応を使ってうまく分解して貯める。このようなことも考えられております。

それから、最後に、燃料電池ということがございますが、これは、水素と酸素を結合させますと、また元の水に戻ります。その時に電圧を発生するという原理を使って発電というものにも使えるということでございます。

### (2) 水素燃焼による機械エネルギーへの変換

次に、内燃機関への利用ということも考えられます。これは、$H_2$というガスを燃やして、機械的なエネルギーに変換して、それで動力を得ようというものでございまして、水素自動車というものが、例としてございます。水素自動車の利点というのは、燃えると出てくるものは排気ガスの出てくる所からポタポタと水が出てきて、$CO_x$が出てこないということです。それから$NO_x$は出てくるんですが、これは、空気を吸入して燃焼させますので、窒素の酸化物というのはどうしても出てまいります。それにしても、炭素系のもの、あるいは、硫黄系のものは出てこないということで、ガソリン車に比べれば相当クリーンであるということは言えるんですが、ただ、問題は、アルコール燃料を使った場合、ガソリンを１としますと重量比でアルコールは２倍、体積が２倍位になります。それから、金属水素化物を使って自動車になると重量比が25倍になってしまいます。これは非常に大きな欠点とも言えるかと思います。それから、体積比は７倍、ところが電気自動車のバッテリーを積むことを考えれば、まだ相当いいだろうという考え方でございます。

この内燃機関を使った例については、ちょうど私がおりましたシュツットガルトにはダイムラー・ベンツという会社がございまして、そこが、1974年位からでしょうか、水素自動車の開発を行ってまいりました。80年代後半に入ってから、ベルリン市内で30台程の自動車を使いまして、走行テストを行ってまいりました。その辺のレポートが、多分去年辺りから出てきてるはずです。図８は、バンタイプの例なんですが、水素を貯めるタンクが乗っております。これは比較的最新の型ですが、これより少し前の型になりますと、違った合金を二種類積んで、うまくそれを組合せて走ったという時代もございます。こちらのケースの場合には、ほとんど一種類の合金しか使っていないと思います。

今日はホンダのご専門の方々がいらっしゃいますでしょうから、あとは水素をここから出して燃焼させてやるというご専門の部分になります。燃焼の方は専門じゃないのでよく分らないのですが、ベルリンではだいぶ西独政府からの援助金も出まして、水素スタンドというものを造り、普通のガソリン車と同じようにホースを差し込んで、大体200気圧位の水素ガス圧をかけて満タンにするということを行ったわけでございます。ただ、重量比が相当に大きいために、およその目安として、たとえば、100キログラムの合金を積みますと、これを水素で満タンにしましてどの位走るかというと、せいぜい100キロメートルがいいところなんですね。それでは、自動車を運転している人が100キロ走るたびに空になって、ス

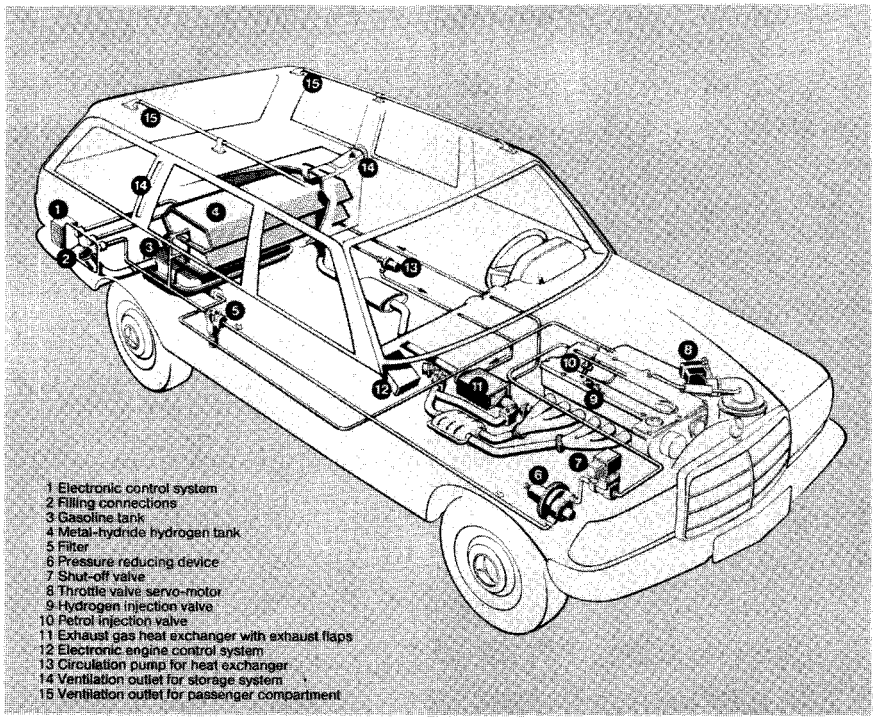



図8

タンドに行くということになると、これは却ってストレスがたまるんじゃないかなど、いろいろなご意見があるんですが。100キロずつでも構わない、たとえば、私は市内しか走らない、買物にしか使わないということで、若しシティーカーという感覚で使うならば、100キロずつでもいいじゃないかというのが、どうもダイムラーの考え方のようでございます。あるいは、特殊車両としてなにも一般道路を走る車両ばかりに使わなくてもいいだろうというような考えもございます。いずれにしても、この重量が非常に重くなるというところが、どうも一つ欠点と言えば欠点だと言うことができます。

水素貯蔵タンクの内部構造ですが、これは非常に難しい所でございます。何故かと申しますと、特殊な合金というのは、水素を吸いますと体積が20パーセント以上膨張いたします。金属が20パーセント以上膨張すると、ゴムではございませんからどういうことが起きるかというと、非常に細かい粉になってしまうんですね。そういう細かい粉になっても水素を吸う能力は落ちませんが、問題は粉が、水素のガスの流れと共に外に飛び出したり、あるいは、エンジンに巻き込まれてしまう、ということを防がなければなりません。その一つの例としては、フィルターが各エレメントの外側に付いておりまして、このフィルターで粉の流れを、全部止めているという形になっております。それからもう一点は、金属粉体の粒径が細かくなってまいりますと、熱が非常に伝わりにくくなるんですね。すると水素を吸ったり吐いたりという反応が、遅くなってまいります。そういう点を加味して熱の伝わり方をよくするために、回りに水をうまく流してやるとか、あるいは、フィルターを入れて、粉の飛散を防ぐとか、いろいろ工夫が入っているようでございまして、マンネスマンという金属関係の会社が、この辺を担当して開発を行っていたようでございます。

### (3) 水素ガスの移動による熱エネルギーの発生

図9はダイムラー・ベンツ社のモデルハウスの理念でございますが、都市ガスが今、各家庭の地下にきているわけで、それと同じように水素ガスを流してやりまして、地下に貯蔵用の特殊な合金のタンクを置いておきます。そうして、水素を貯めますとこの時に熱が出ますので、出て来た熱を、暖房、あるいは給湯配水に使う。それから、台所の方で煮炊きに水素ガスを燃やして使うという状況で貯蔵タンクが冷えてくるんですね。冷えてくるこの反応を使って冷蔵庫やクーラーに使おうと、こういう発想がございます。実際これはヒートポンプという形でいくつかのメーカーでも以前から、この研究が進められております。

また自動車については、家に帰ってきてガレージに駐車し、ガス栓につないでおけば、朝出る時には満タンになっている。と、このようなことが考えられるわけでございます。

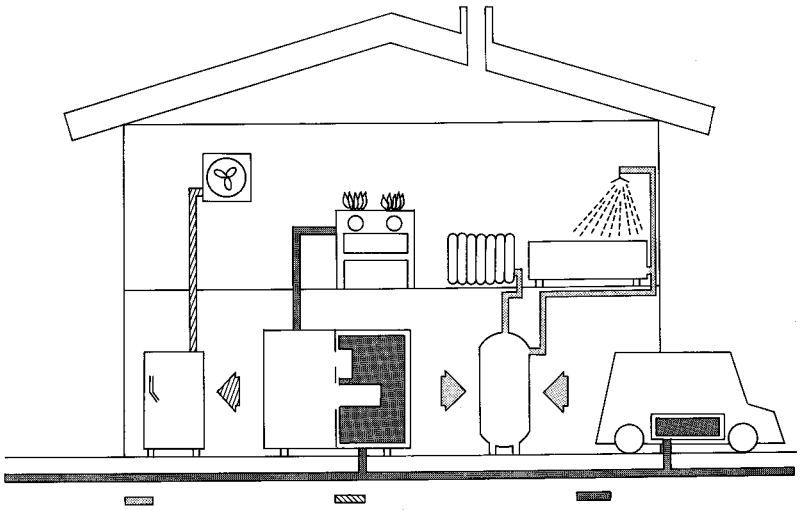


図9

### (4) ガス圧力の変動の利用

国立のリハビリテイション・センターでは気体のガスが出たり入ったりする時の圧力の変動を利用して、アクチュエータというものを動かし、ロボットの動力や、身体障害者用の補助動力研究が実際に行われております。

あるいは、温度センサーとして、ジャンボ機等の航空機のエンジンにテスト用に使われているというのが、レポートで出てきております。実際に、エンジン温度が上ってまいりますと、中から水素がどんどん出てまいりますので、ある容器の中のガス圧力が上ってまいります。上ってくるのをうまく、機械的なセンサーとして捉えてやろうということでございます。

以上まとめてみますと、ここに水素を含んだ合金があるといたします。こちら側から温度を上げたり下げたり、温度に変化を与えてやりますと、水素が出たり入ったりいたします。この水素が出たり入ったりするのをうまくピストンで捉え

て、機械的なエネルギーに替えていこうという考え方もございます。

また、逆に、水素を入れたり出したりするのを機械的にやれば、こちら側で熱を出したり取り入れたり、あるものを置いておけば温度を上げたり下げたりできるだろうと、実際こういう使い方もございます。

それから、２種類の違った特性をもった合金を、うまく組み合せますと、低い温度の変化、例えば20度から80度位の変化を、こちらの方で100度から150度位の変化をもたらすといった形で使うこともできるわけでございます。

### (5) 電気化学エネルギーへの変換

最後に、水素貯蔵合金の水素貯蔵密度が非常に高いということで、電気化学エネルギーとしての利用が考えられております。若しこの合金をニカド電池のカドミウムの代りに使ったとしますと、現在のニカド電池の２倍近い容量の電力を貯蔵できます。バッテリーの開発というのが意外に知られていないのですが、単位体積当りのエネルギー、それから重さ当りのエネルギーと見ますと、自動車用鉛電池、それから家庭でいろいろなものに使われていますニカド電池というのが典型的といえましょう。水素貯蔵用合金を使った電池がうまく働き出すと、今のニカド以上に沢山のエネルギーを同じ体積でも入れることができる。逆のことを言いますと、同じ程度の電気容量でよければ、今の電池の半分の体積でいいということで、今、この辺の開発が急激に進められております。

よく最近聞かれますリチウム電池と申しますのは、大電流を取り出すことができません。使える電流というのは非常に小さいものですから到底自動車用のバッテリーには使えません。マイクロエレクトロニクス製品程度にしか使えません。それに比べて水素電池の方は、比較的大電流でもなんとか使えるというところでだいぶ開発が進んでいるようでございます。

それから最後に、この電気化学エネルギーの利用ということで、水素(H)の代りに重水素(D)を考えてみるとどうなるか。反応式でMとHがくっついてその結果、水素化合物ができるというお話をいたしました。このMとHの代りにここに実は重水素という原子核に１つ中性子を余分に含んだような水素を持ってきますと、昨年来いろいろと世間を騒がせております、常温核融合、低温核融合という現象の方へ入ってくるわけであります。これが、本当になにかエネルギー源として使えるようになるかどうかということは、到底まだ分らないような感じでございます。

以上が、水素エネルギーを具体的に使っていく上での原理的なものでございます。

## サテライトからの情報

これからは水素エネルギーのようなクリーンなエネルギーをつかっていかなければならないという意味で、実際の地球環境についても少し触れたいと思います。

最近は地球の回りをいろいろな人工衛星が飛んでおり、こういった衛星から地球上で生じているいろいろなことが正確に捉えられるようになりました。例えば、最近よく知られるようになりましたが、ブラジルのアマゾン地域や、タイ―ラオス国境付近での森林破壊などがあります。こういった森林の伐採が地球上の二酸化炭素の増加を助長しているという説がありますが、海洋が吸収している二酸化炭素の正確な量も二酸化炭素の全体量をみる上で重要なのですが、これがまだ分からない現在、必ずしも二酸化炭素の増減とのかかわり合いは確定できないのが現状のようでございます。

また衛星観測で得られたオゾン層ホールの出現も大きな話題になっております。オゾン層の破壊により大気圏内に入ってくる紫外線量が増える問題とは反対に、太陽光が遮られ、気象変化をも引き起こすのが火山の爆発による火山灰の微粒子の大気中への飛散です。東海大学の情報技術センターでは、1986年11月21日に起きた伊豆大島の三原山の爆発後の画像情報を解析したところ、噴煙が相当の高度まで噴き上げているのを確認しています。また有名なチェルノブイリの原子力発電所の事故も、ソ連の公式発表にかかわらず、衛星から事故地周辺の水温の変化などがきわめて正確に得られています。

こういった地球環境の監視モニターの重要性は今後ますます増加してゆくと思います。

## 宇宙船地球号のフェイルセーフ

水素エネルギーのお話と、地球環境の監視モニターというものを含めてまとめてみたいと思います。

我々が住んでいるこの地球というものを、ふるさととか家という感覚で捉えるならば、やはり、これを一つの宇宙船と考えて、これが墜落しないようにするにはどうしたらいいかということで、フェイルセーフという言葉を使ってみました。これにはまず人間が中心にいて、エネルギー、情報、物質、これらのバランスがとれていなければならないだろうと思います。今日お話した内容で、どういうふうにバランスがとれていなければならないかということをご説明いたしますと、たとえば、人間はエネルギーというものを使って、生活をしているわけであります。ところが、我々は新しい物質を見つけ利用することで、たとえば、ウランが核分裂を起こすことによって、大きなエネルギーを得るということを知りました。こういう材料の研究から、非常に大きなエネルギーを取り出すことができると分かったのです。あるいは、最近では超電導材を使って若しこれがうまくいけば大

電力を貯蔵することができます。こんな形で人間と物質とエネルギーというものが、つながっております。

もう一つは、情報と物質のつながりです。現在では、人工衛星が我々に色々な情報を送ってきてくれるようになりました。その背景には、やはり超LSIなり、集積回路を作った回路、あるいは、機能というものを非常に高密度にすることができた、ということがまず第一の原因だと思います。そうしますと、こういう材料技術の発展があって今のような情報を我々は手に入れることができるようになったという流れがあるわけですね。ところで、エネルギーと物質と情報というのは、すべて、今のところ大体人間にフィードバックしてくるので分かるんですが、この情報とエネルギーというものの関係では人間が介在していない所でございまして、非常に目立たないところなんですね。これは、電通大の合田周平先生もよくおっしゃっていることなんですが、たとえば、光通信にしても、我々が通常行う通信、これも実は電気を使った信号でございます。その電気エネルギーの信号というものが、情報を運んでいくわけであります。しかしこの時には、一切人間は介在しないので、我々はどうしても認識しがたいのです。この情報とエネルギーというところのつながりを、もう少し明確に認識していかないと、次の時代ではどうも、バランスがとれていかないのではないだろうかということです。この辺、私自身もまだ不勉強で、もう少し考えなければならない面もあるのですが、人間性（HUMANITY）、エネルギー（ENERGY）、情報（INFORMATION）、材料（MATERIAL）、この４つのファクターがきちんとバランスをとって、我々が技術をうまく自分たちのところへ取り込んで使っていかない限り、どうしても技術に引っ張られてしまう、ということが出てくるだろうと思われます。エネルギーばかり使えばいいんだということであれば、自然破壊につながります。そういうことで、この４つのファクター（H. E. I. M）をうまく並べますと、ちょうどドイツ語でふるさとという意味のハイムという言葉になります。このハイムという言葉で、我々のふるさとである地球というものを、うまくコントロールしようじゃないか。と、こんなようなお話で最後を締めたいと思います。どうも、拙い話で失礼しました。

# 質疑応答

どうも、ありがとうございました。
皆様の方からご質問がございましたら一つ、二つ、お願いしたいと思いますが、いかがでございますか。

――よろしいですか。あの、水素の合金は、今、いくら位しているかということを伺いたいのですが。一番安いので１キログラムいくら位なんですか。

「はい。あの実は値段は決まっておりません。これは合金メーカーさんが、とりあえずは大体、そうですね、今、通常のカタログですと、１キロ当りで５万から10万程度でしょうか。但し、これは１キロ位を注文されるとそういう値段をおっしゃられますが、たとえば100キロ注文されますと、１キロ当り多分５千円位になると思います。ですから、やはり総べてのものがそうだと思うのですが、消費量が増えてまいりますと、当然生産コストも下ってまいりまして、そういう意味でもっともっと安くなると思います。」

――もう一つ、あの、これで水素を吸収させたり、あるいは放出したりする方法というのは、加熱するわけですか。

「たとえば、容器がございまして、容器の中に金属を入れておきます。で、一つ栓を付けまして、あとから水素ガスを入れてやれば、それを送り込んでやるだけでもう、吸ってしまいます。」

――放出させるときはどうですか。

「放出するときは、今度はその弁を開けてやれば、シューという音と共に普通のガスの栓をひねるのと同じように出てまいります。」

――あとで加熱しているんですか。

「いや、加熱しなくてもよいのですが温度を調整してやりますと、出てくる圧力を１気圧以下にもできますし、50気圧から100気圧にもいくらでも変えることができます。」

――割合に簡単にできるんですか。

「そうです。非常にシンプルです。」

――密閉されていて、それで何回分位使えますか。

「そうですね。現在私どものところでテストしている限りでは、大体３ケ月かけて3,300回連続で使いましたが、ほとんど劣化はないんです。ただ問題は、使われている途中で、若し不純物、不純ガス等が巻き込まれたりいたしますと、その辺もう少し劣化が進むかもしれません。基本的には、たとえば吸わなくなってしまうというようなことは、通常の条件だとまず起きないようでございます。」

――もう一つ、残存量といいますか、それはどの位水素が残っているかと。

「水素を出した場合ですか。」

――そうです。それは結局入れた分がなぜ分かるか。メーターというのはないんですね。

「いや、実際にメーターで流量計みたいなものを付けていただければ、どれだけ入ってどれだけ出たということは分かります。で、実際に測定しますと、ほとんど、まず、90パーセント以上は綺麗に出てまいります。」

――どうも、ありがとうございました。