



# MHA による低密度エネルギー変換技術

## — 新エネルギー変換技術の紹介 —

ユニヴ・テック環境流体工学研究所 所長  
工学博士 吉田 静 男

### 1. はじめに

人類は今や化石エネルギーの枯渇問題で大きな岐路に立っている。今のところ選択肢は2つある。1つは自然エネルギー利用の方向、いまひとつは核融合炉利用の方向である。他に石油形成の無機物からの生成説もあるが、上記いずれの技術よりも実現の見通しが立っておらず、化石燃料枯渇までその実証結果を待っている時間は無い。では核融合技術は化石燃料枯渇までに完成し得るのか、といえはきわめて危うく、到底請け負い得ない状況にある。また、自然エネルギーに関して地球上で現在利用されている程度のエネルギーをまかなうだけの資源はあるものの、太陽パネルや風車を必要なだけ準備できるかという問いに明確に答え得る段階にはない。要するに、化石燃料枯渇後のエネルギー調達の目途はまだしばらく立ちそうに無いといえる。

ここに紹介する水素吸蔵合金(あるいは水素化物)利用アクチュエータ(MHA: Metal Hydride Actuator)はこれまでの自然エネルギー変換技術とは大いに異なっている。風も太陽光も太陽エネルギーが起源であるが、MHAは太陽熱や地熱などの温度差エネルギーを機械エネルギーに変換する装置である。温度差は30°C以上必要となるが高温熱源の温度は100°C以下でよい。つまり、40°Cの温泉と10°C以下の冷水があれば機能し仕事を取り出せる。この種の変換装置として有名なものに海洋温度差発電があるが大きな問題点を抱えている。それは必要とするポンプに供給するエネルギーと出力エネルギーが同等なことである。これに対してMHAは他からの

補助エネルギーを必要とせず、自前で調達できる機能を有している。つまり、熱源が地熱などであるならばまさにランニングコストゼロで仕事を取り出すことが出来る。もちろん、現段階では、この装置は全人類が利用しているエネルギーを賄えるようなものではないが、風車や太陽電池などと並ぶエネルギー変換装置に育つ可能性はある。

### 2. 水素吸蔵合金の組成とその特性

水素吸蔵合金は単なる水素化物ではなく加熱時に容易に水素を放出し、冷却時に水素を原子状態で吸着する合金である。この性質は合金が金属水素化物を作りやすい2A~5A族金属とつくりにくい6A~8族元素(図-1参照)から成る2元または多元系金属間化合物であることに由来する。実際に製造されている合金の概略を表-1に示す。たとえば、ランタンとニッケルの組み合わせは常温に近い温度で水素の吸収・放出が可能な代表的な組み合わせとして広く知られている。その他温度特性を異にする多くの合金が製造可能であるが、われわれ利用者側

イオン結合型		金属水素化物										共有結合型							
												3B	4B	5B	6B	7B			
Li	Be														B	C	N	O	F
Na	Mg	3A	4A	5A	6A	7A	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Al	Si	P	S	Cl			
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br			
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I			
Cs	Ba	ラランタイド	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At			
		アクチノイド																	
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am											

図-1 周期律表

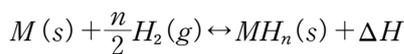
としては表-1から該当する合金を選択すればよい。たとえば、近くに40°Cの温泉と10°Cの河川水があるとしたならば表-1の0~100°Cに属する合金を選べば有用なMHAを製造することが出来る。

表-1 各合金の利用温度

使用温度幅(°C)	合金の分類	構造
-50~0	チタン系	Ti <sub>1.2</sub> Cr <sub>1.2</sub> Mn <sub>0.8</sub> 、Ti <sub>1.2</sub> CrMn
0~100	希土類 チタン系	LaNi <sub>5</sub> LaNi <sub>4.7</sub> Al <sub>0.3</sub> 、MmNi <sub>4.5</sub> Mn <sub>0.5</sub> MmNi <sub>4.5</sub> Al <sub>0.5</sub> 、MmNi <sub>4.7</sub> Al <sub>0.3</sub> Zr <sub>0.1</sub> TiFe、TiFe <sub>0.85</sub> Mn <sub>0.15</sub>
100~150	希土類 チタン系	LaNi <sub>4.5</sub> Al <sub>0.5</sub> 、LaNi <sub>4.3</sub> Al <sub>0.7</sub> TiCo <sub>0.5</sub> Fe <sub>0.5</sub> V <sub>0.05</sub> 、TiCo <sub>0.5</sub> Fe <sub>0.5</sub> Zr <sub>0.05</sub> TiFe <sub>0.8</sub> Ni <sub>0.15</sub> V <sub>0.05</sub> 、TiCo
300以上	マグネシウム系	Mg <sub>2</sub> Ni、Mg <sub>2</sub> LaNi、Mg <sub>2.2</sub> La <sub>0.8</sub> Ni Mg <sub>2.3</sub> La <sub>0.7</sub> Ni、CeMg <sub>12</sub>

水素吸蔵合金は、液体水素よりも高い水素密度でしかも非常に低い圧力で水素を安全に貯蔵することができる。今日、この特性を利用して同合金を未来の水素社会の水素貯蔵庫にするという計画もある。その方が350気圧に水素を圧縮してボンベに貯蔵するよりもよはるかに安全なためである。実は水素吸蔵合金利用の第一目的はこの水素貯蔵庫である。しかし、水素吸蔵合金にはもう一つの重要な物理特性がある。それは水素を放出する際の水素圧の存在である。この圧力は温度に依存するが常温でも数十気圧になり得る。この圧力を利用してピストンを駆動させ力学エネルギーに変換する装置が水素吸蔵合金アクチュエータ(MHA)である。

水素吸蔵合金は適当な温度および圧力条件で水素と反応し、金属水素化物を生成する。合金(M)の水素吸蔵反応の平衡状態は次式によって表され、反応熱ΔHを伴う。



反応式の数値nは、合金の水素吸蔵量を表しており、その数値の大小は合金の応用面において重要な意味を持つ。

一般に金属水素化物の生成・分解反応は、可逆性がよく、反応速度や反応熱が大きいという特徴を有している。この反応式の矢印が二つ反対の向きを指しているが、これは、この反応が可逆的であること

を示している(実際は合金特有のヒステリシスが存在する)。反応がどちらの方向に進むかは、水素圧力と温度によって決まる。もし、ある温度で水素ガスが平衡圧力以上(たとえば冷却時)であれば、反応は水素を吸収し金属水素化物を形成する右向きの方角に進み、反応熱ΔHを伴う。また、水素ガスの圧力が平衡圧力より低ければ(たとえば加熱時)、金属水素化物はΔHの吸熱を伴い分解し水素を放出する方向に進む。水素吸蔵合金を水素貯蔵材料として利用する場合、ΔHは小さいほうがエネルギー効率の面からみて有利となるが、熱利用材料(たとえば、ヒーターやクーラー)として利用する場合にはむしろ大きいほうが有利になる。これらの反応の平衡状態を表すため、図-2のように温度軸のT<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>における圧力と固相の組成との関係で示すことが多い。同図の縦軸は気体水素の各温度における平衡水素圧(P)を示し、横軸は固相中の水素原子Hと金

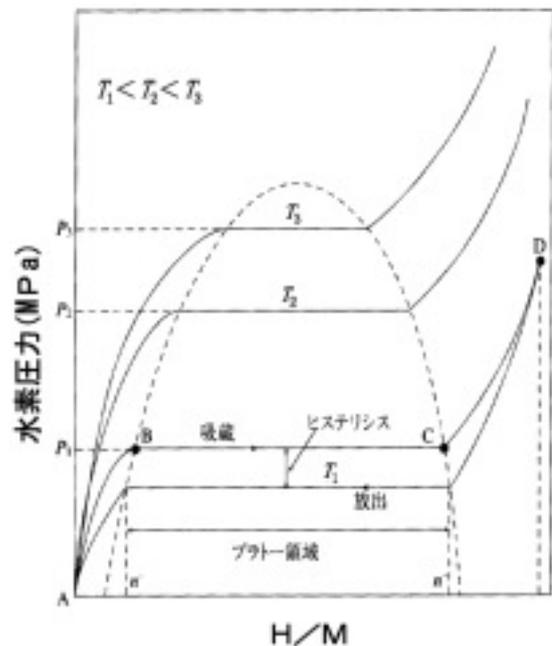


図-2 金属水素化物のPCT線図

属原子Mの比、H/M(水素原子数/金属原子数)を示す。同図から一定温度T<sub>1</sub>に保ったまま、水素圧を上げていくと、金属中に水素が溶解し、H/Mは曲線にそって増大する。やがて限界B点に達すると一気に水素が吸着されるプラトー域を経て限界C点に達する。これ以上水素を吸着させるには相当高圧を必



図-5に試作機的设计図、図-6に装置の全景、表-2に装置の諸元を示す。この装置の最も重要な機構は合金容器交換部である。合金容器は高温熱源の中に6基、低温熱源の中に6基挿入され12分経過すると両熱源に挿入されている各1基の容器がそれぞれ逆の熱源に挿入される。さらに12分経つと隣の容器が同様の過程をたどる。この過程はアクチュエータから取り出された動力の一部で駆動されるがそのエネルギーは4W程度と小さい。より消費エネルギーの小さい手法として容器を動かさず熱源を切り替える方法も考えられるが、熱源の存在形態により、どちらを使用すべきかが決まってくる。装置は始動後しばらくすると駆動状況が定常化する。一例として海水交換のスクリーを取り付けた際の動特性を図-7に示す。この例は20°Cの低温熱源と80°Cの高温熱源を使用した場合で、アクチュエータのピストンにかかる圧力は平均0.48 MPaと0.25 MPa

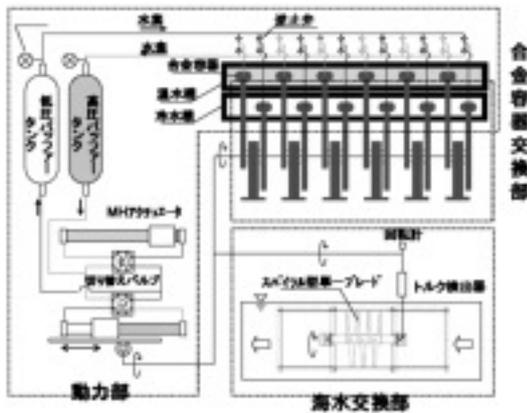


図-5 海水交換装置

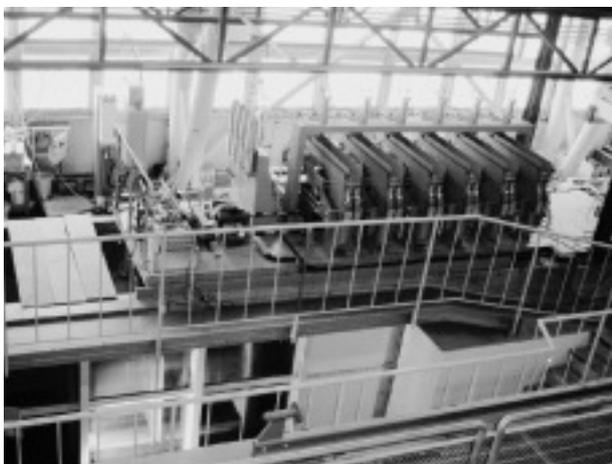


図-6 装置全景

で差圧は0.23 MPaである。圧力はガス経路の切り替え毎に若干変動するが、負荷の慣性が大きいいため駆動自体は滑らかである。この装置の海水交換能力は31 l/secと決して小さくない。なお、駆動力は負荷によって決まるが、出力自体は合金から放出される水素放出流量で決まる。従って、理論的には合金量と容器の形状、容器の熱伝導率によって出力は一義的に決定される。

表-2 装置の諸元

- アクチュエータ：内径40 mm。ストローク300 mm、耐圧0.7 MPa、ピストン速度最大300 mm/sec、最大出力879 N、最大仕事率263 W
- 合金(MmNi<sub>4.4</sub>Mn<sub>0.1</sub>Co<sub>0.5</sub>)：総質量6.72 kg、80°Cで1 MPa、20°Cで0.2 MPa
- 合金容器：ステンレス製、個数24、フィン付、2個を対として1基を構成、各容器に0.28 kg 収容
- 熱源：高温熱源(温水80°C流水)、低温熱源(冷水20°C流水)
- 負荷：単純加重、直径1 m スパイラルスクリー(2 N・m) またはトルク発生装置、および、容器駆動
- 運転時のアクチュエータ仕事率：10.2 W (効率1.7)。容器熱伝導の改善により少なくとも5倍の50 W にし得る。仕事率は合金量に比例する。

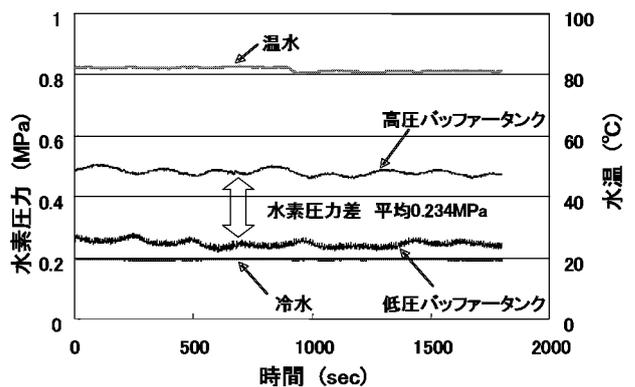


図-7 海水交換装置の動特性

今回試作された装置については自律駆動が可能であるかどうかを確認することと、必要な海水交換を実現できるかどうかを検討することに目標が置かれ、合金容器については製作が容易なステンレスを

使用した。そのため熱伝導が十分でなく出力が極めて小さいものとなっている。逆に言えば細心の注意を払わずに製作しても海水交換装置程度であれば容易に製作できることを示している。実機の製作に当たっては当然上記の容器製作上の問題点が改善されるから、さらに少ない合金量で同じ性能を持たせることが出来よう。実際、別途実施された実験結果によれば、容器をアルミ製とし形状を変えることで容易に出力を5倍にすることが出来る。また、工夫次第でさらに出力アップが望めると考えられている。なお、温度差エネルギーから機械エネルギーへの変換効率は温度差によって異なるがカルノー効率の半分といったところで決して悪くない。ただ、自然エネルギーは無尽蔵であることを考えるとあまり効率に拘泥する必要はない。

### 5. 環境への影響

MHA は初期に水素を吸着させるのみで駆動によってその水素が消費されることはない。また、MHA からはなんら放出される物質も無い。もちろん熱エネルギーの放出があるがその温度は地表の年平均温度に近く、熱的負荷は与えないといってよい。もちろん製作段階でエネルギーが必要であるが化石燃料枯渇時にも自前のエネルギーで製造が可能である。具体的にペイバックタイム（自分と同等の装置を自ら発するエネルギーで製作する場合の所要時間を調べると今回試作した容器に関しては1週間程度、その他の部品の溶解も入れると20日程度である、その消費エネルギーを他の装置と比較してみると、太陽電池で2年半を要する。つまり太陽電はMHA に比べきわめて大きな製造エネルギーを必要とする。しかし、問題はこれだけにとどまらない、太陽電池は15年ほどで劣化し製造しなおす必要があるのである。一方、MHA についてはほとんど壊れる部分がなくマイナーな修理のみでいつまでも使用し続けることが出来る。

### 6. MHA の熱源

高温及び低温熱源としては図-8に示される多くのものが候補として挙げられる。低温熱源に関して

は広く存在するが高温熱源はかなり限定される。ただ、最高温度が40°C以上あればよいことから地熱や温泉が利用できる。ところで、発電などに利用可能な自然エネルギーは表-3に示すとおりであり潤沢ではない（図中1ゼタジュールは現在世界中で利用されている全電力量に相当するエネルギーである）。ただ、地熱は相当あって今後その開発が期待されている。このような状況にあってMHAの開発は非常に期待されるエネルギー変換装置といえる。

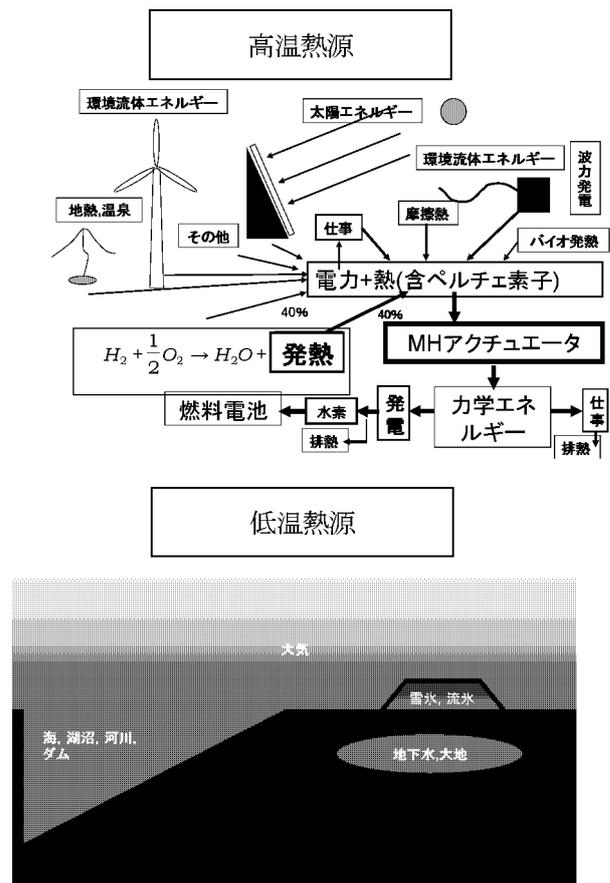


図-8 熱源の候補

表-3 利用可能なエネルギーの総量

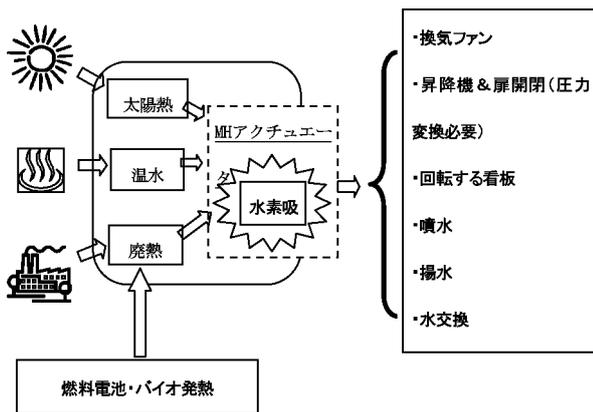
エネルギーの種類	利用可能なエネルギーの総量 (単位 10 <sup>21</sup> J/年)	採算の取れるエネルギーについての評価。実際のエネルギーはかなりの多い。この見逃されたエネルギーもMHAの熱源とし得る
波力	0.000085	
潮汐力	0.0008	
水力	0.049	
海洋温度差	0.1	
地熱(温水)	0.431	
風力	0.7	
太陽光	1	
*地熱(高温岩石)	310	

ZJ=10<sup>21</sup>J  
(ゼタジュール)  
原子力委員会資料

## 7. MHA の応用分野

図-9にMHAの応用分野の概略が示されている。要は力学エネルギーに変換された後の応用であり、発電も含めると極めて広い分野が対象になる。ただ、気体のアクチュエータであるため瞬発的に正確な位置まで物体を持ち上げるなどの作業には適していない。

応用を考える上で重要なことはMHAのダウンサイジングが比較的容易なことである。そのことを考慮すると新たな応用分野も見えてくる。たとえば、燃料電池が将来必ず使用されるようになると予想されているが、その運転には循環水を数気圧に加圧する必要がある。ところがそれを長寿命で遂行できるポンプが現在無いのである。このような作業はまさにMHAに適している。



## 8. あとがき

化石燃料枯渇後は自然エネルギーを利用せざるを得ないことは明白である。ただ、わが国は燃料の原産国ではないため他国より早く燃料枯渇の影響が現れると思われる。たとえば、北海道では30年もすると石油をヒーターの燃料として使用できなくなる可能性がある。後世をこのような状況に陥らせないためには今から自然エネルギー採取法の開発を進める必要がある。すでに述べたように太陽起源の自然エネルギーである風と太陽光エネルギーはそれほど潤沢ではなく、地熱の利用は欠かせない。ここに示したMHAはその地熱からエネルギーを取り出せる機能を有しているが、これによるエネルギー採取を加えたとしても今日人類が使用しているエネルギー

をまかなえるかどうか疑問である。このこと自体が大変なことで、環境問題どころではない様々な難問を生み出す可能性もある。今後は利用エネルギーの削減は必須で、加えて分野を問わずエネルギー問題解決のために英知を集めざるを得ない時代がやってくるであろう。

以下、参考のため筆者が関係したMHAに関する研究成果について紹介させて頂く。

- ・海岸工学論文集 (2002)
- ・土木学会北海道支部年次学術講演会 (2002)
- ・平成14年度日本水産工学会学術講演会 (2002)
- ・日本機械学会ロボテックス・メカトロニクス、8編 (2003)
- ・第46回(平成14年度)北海道開発局 技術研究発表会 (2003)
- ・北海道開発土木研究所月報 3月号 No.598 (2003)
- ・第47回北海道開発局技術研究発表会 (2004)
- ・29回海洋開発シンポジウム (2004)
- ・2nd International Conference on Asian and Pacific Coasts (2004)
- ・エコデザイン2004 ジャパンシンポジウム (2004)
- ・平成16年度 北海道立工業技術センター研究成果報告会 (2004)
- ・北海道開発土木研究所月報12月号 No.619 (2004)
- ・第17回ふゆトピア研究発表会 (2005)
- ・日本機械学会第15回環境工学総合シンポジウム (受理2005)
- ・ISOPE 2006 (in print)
- ・特許4件

## 参考文献

- 1) 田村英雄：水素吸蔵合金 ― 基礎から最先端技術まで ― (1998)
- 2) 太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会編、新太陽エネルギー利用ハンドブック (2001) 日本太陽エネルギー学会