

■ 展望・解説 ■

# 水素吸蔵合金

——利用技術開発の最新の動向——

Metal Hydrides—Recent Developments of Application Technology—

須田 精二郎\*  
Seijirou Suda



## はじめに

我が国で水素吸蔵合金に関連する研究が活発化し始めたのは、およそ15年程前のことで、通産省工業技術院によるサンシャイン計画の一環として、「水素の輸送と貯蔵」のテーマのもとにいくつかの研究、開発プロジェクトがスタートした時期にさかのぼる。

当時、既に米国ではブルックヘブン国立研究所の J. Reilly らによる鉄・チタン合金やマグネシウム系合金、あるいはオランダのフィリップス基礎研究所の van Malらによる強磁性体の研究途上に生まれた布土類・ニッケル系合金の発明が相次ぎ、国内では松下技研の研究スタッフによる多元系合金の開発も始められていた。

その後、内外における合金材料やその特性に係わる研究・開発は、年を追うごとに活発化したが、今の時点でその過程を振り返ってみると、当初発見された材料の挙動や特性の改善面で数多くの成果が得られたものの、水素吸蔵量の大きい新規な材料の開発では決して成功しているとは言い難い。

このことが、水素吸蔵合金特性の利用面で工業化や商品化を妨げている最大の原因であり、原油コストの低廉化のようなエネルギー経済上の周辺環境の変化による新規開発意欲の減退にその理由を帰するわけにはいかない。現時点では、水素吸蔵合金の水素貯蔵能力とコストとの間にしかるべき経済性が見い出せないこと、さらにはこれまでの技術開発成果では、既存技術を越えて優位性を発揮できる程のレベルに達していないなどの点が本分野の動向を沈静化させている大きな原因となっていると見なしてよい。ここでは、このようなこれまでの研究・開発状況をふまえ、新しい応用分野を拓いて行こうとしている技術開発動向を中心に紹介してみたい。

## 1. 水素吸蔵合金の有効水素貯蔵量について

図-1は、金属水素化物（水素吸蔵合金が水素との化学反応により生成した場合の正式名称）の等温条件下における圧力-水素濃度関係を表わす典型的な図で、ここには水素吸蔵時と放出時の両過程において有効に利用できる水素吸蔵量が必ずしも最大吸蔵量に一致せず大幅に減ってくることを模式的に示したものである。

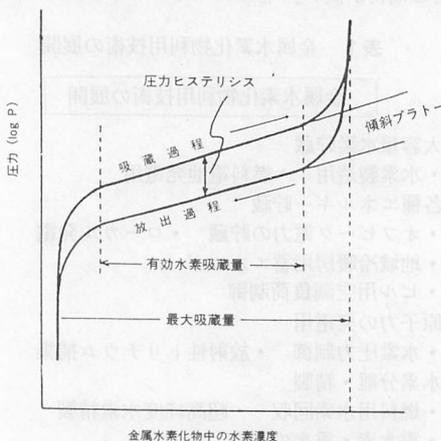


図-1 水素吸蔵合金の最大水素吸蔵量と有効水素吸蔵量の違いを示す模式図（等温条件下）

この有効水素吸蔵量と最大吸蔵量の大小は、金属水素化物利用技術の経済性や効率にきびしく影響を与えるため、その他の既存技術との競合性の有無を決定付ける最大の要因となっている。

この経済性や競合性を考慮した上で、金属水素化物関連技術をより適正な方向に展開させ、なおかつその実用化促進をはかるためには、水素製造技術や水素利用技術を相互に関連づけ、一つのエネルギーシステムを構築する上で欠くことのできない要素技術としてその中心に据えていくことが大切である。

## 2. エネルギー貯蔵/変換材料としての水素吸蔵合金

水素吸蔵合金特性の利用面で、最も期待されている

\* 工学院大学工学部化学工学科教授

方向は、新しいエネルギー体系におけるエネルギー貯蔵体及び変換媒体として次のような応用にあると考えられる；

(a)低品位熱エネルギーの高品位化(ヒートポンプ)、(b)間欠性の高い自然エネルギーなどの緩衝貯蔵用、(c)熱電併用型(コージェネレーション)エネルギー供給システム、(d)水素エネルギー関連技術の複合化のための要素技術(各種エネルギーの貯蔵と輸送及び変換)などへの応用である。

### 3. ヒートポンプの開発動向

表1には、水素吸蔵合金技術として将来にわたって実用に供される可能性の高いものを列挙したものである。なかでもヒートポンプとしての用途は、他の既存方式のものと競合しない高温度領域、特に100℃～300℃の範囲の温度を昇温目的とするヒートポンプとしての期待が高い。

表1 金属水素化物利用技術の展開

#### 金属水素化物利用技術の展開

- ①大容量水素貯蔵
  - ・水素製造用 ・燃料電池発電用
- ②各種エネルギー貯蔵
  - ・オフピーク電力の貯蔵 ・ローカル発電
  - ・地域冷暖房用蓄エネルギー
  - ・ビル用空調負荷制御
- ③原子力の発電用
  - ・水素圧力制御 ・放射性トリチウム捕集
- ④水素分離・精製
  - ・燃料用水素回収 ・超高純度水素精製
  - ・重水素・重水の製造
- ⑤熱回収型ヒートポンプ
  - ・化学プラントの高効率化
  - ・スチーム及び冷却水製造
- ⑥地熱発電
  - ・地熱水の回収・水蒸気発生
- ⑦その他
  - ・各種検出機能 ・磁性特性 ・超伝導特性
  - ・微粉化特性 ・触媒 ・電池電極

ヒートポンプ開発事例のほとんどは、国内におけるもので、海外で連続運転に成功した例は1～2例に過ぎない。金属水素化物ヒートポンプの特徴は、80℃～160℃程度の熱駆動型の昇温(第2種ヒートポンプ)、増熱(第1種ヒートポンプ)、冷却及び冷凍などのサイクルが構成できることで、熱源温度によって最高300℃迄の昇温を行った事例(住友金属工業)がある。また、3種類の金属水素化物から構成される6基の熱交

換器間に連続した水素の循環流れを生じさせ、投入熱量に対し1:2:2の関係で高温熱源と低温熱源を同時に4ヶ所で取得させる高効率型ヒートポンプの開発(日本重化学工業)、あるいは同じく3種類の金属水素化物の組合わせによって80℃レベルの廃熱から150℃前後のスチームを発生させる第2種型ヒートポンプの開発(中央電気工業、積水化学工業、日本化学技術)がある。また、同様な方式によるヒートポンプの開発事例が他にもう1件ある(松下電器産業)。金属水素化物ヒートポンプは、原則的に2種類の材料を組合せ、これに対(ついで)状にして2組用意して構成できる。しかしながら、現実に利用可能な熱源と放熱源の温度レベルとの関係、さらには金属水素化物の圧力-温度特性とによって、出力温度は第1種、第2種ともに一定の範囲内に制限されることとなり、他方式のヒートポンプに比較して格段の優位性を見出すことは難しい。加えて、水素吸蔵と放出の両反応の非連続性による回分操作(2組の熱交換器は常に逆方向に水素を流すために切り換え操作を要する)を行う間に昇温と冷却の両過程を交互に繰り返すため、抽出すべき反応熱の一部は顕熱として自己消費されることとなる。

このような点で、2種類の金属水素化物によって構成されるヒートポンプには、昇温と冷却温度に強い制限がある上、あまり高い効率率は期待できないため、既存方式との競合性も乏しく、実用に供されることは少ないと見なすべきであろう。

しかしながら、ヒートポンプとしての用途を離れて、その開発途上に得られた知見をもとに一定量の水素ガスを閉鎖系の回路中で高速で循環させるシステムとしての応用を考えると、循環経路中にタービンを挿入して、その軸仕事による発電を行うことも可能である。この水素タービン発電は、千代田化工建設によって提

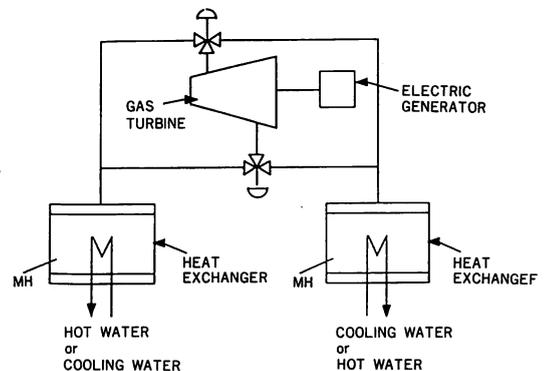


図-2 水素吸蔵合金を用いた廃熱回収発電の原理図

案されたもので、水素吸蔵合金利用技術のなかでも最も新しい方向を狙うものであり、産業廃熱のような低レベルの熱エネルギーの有効な回収方法として注目すべき技術である(図-3参照)。現時点で想定される発電設備コストは、600~700千円/kW程度であるが、駆動熱源温度は、150℃前後の低温廃熱と常温の大気とである点に注目すべきであろう。

4. 電力貯蔵への応用

間欠性の著しい風力や太陽光による発電、あるいはオフピーク電力の貯蔵を目的に開発の進められているものにSPE-水電解装置とマグネシウム系水素吸蔵合金の併用による電力貯蔵法がある。この方法は、マグネシウム系材料の水素貯蔵能力の大きさと貯蔵圧力が大気圧に近いという2つの特徴を生かした電力貯蔵方式として期待が寄せられている。

この方式を燃料電池用の水素供源と連結して用いると、例えばMg<sub>2</sub>Ni合金による場合は、その有効水素貯蔵量は重量基準で2.5重量%以上となり、合金の材料コストは、現段階では40,000~50,000円/kW程度を占めることとなる。サンシャイン計画のなかで開発が実施され成功をおさめたSPE-水電解方式は、大気圧よりも高い圧力下(約7気圧)での水素発生が可能であり、水素吸蔵合金による水素貯蔵法との併用に適合する方式である。これをマグネシウム系合金によって行う場合には、大気条件下で容易に行うことができるため、圧縮動力や高压容器が不要となり、電解効率を勘案しても決して経済的に不利なエネルギー貯蔵

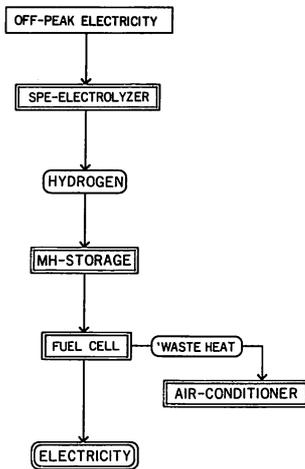


図-3 水素吸蔵合金を中心に据えた夜間電力貯蔵型のエネルギー利用システム

方式とはならない。特に、ハワイ州のように間欠性の高い自然エネルギーによる発電と夜間余剰電力の活用方法としてこの方式に着目しているところでは、ある程度経済性の評価は先に延ばしても実際にはパイロットスケールでの開発を進めようとする試みがある。

ここでは、200~500kW規模の能力をもつ幾つかのパイロットプラントの建設が予定されているが、図-3に示されるような併合エネルギー系による実証運転が行われる日も遠くない。

なお、このマグネシウム系合金を単純な水素もしくはエネルギーの輸送媒体と考えた場合には、約3.5重量%の有効水素貯蔵能力が期待でき、材料コストは、30,000円/kW前後となる。

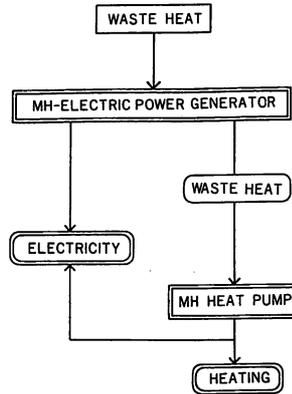


図-4 水素吸蔵合金による廃熱回収発電と増熱型ヒートポンプの開発

廃熱利用によって2つの金属水素化物系エネルギープラントを稼働させ、電気と暖房熱源を効率的に取り出そうとする計画が進行中である(図-4参照)。80℃~150℃の廃熱と大気を放熱源とする金属水素化物発電システムとその廃熱によって駆動する高効率増熱型ヒートポンプの複合システムである。

現段階では、金属水素化物の有効水素吸蔵量と合金コストのバランスが悪く、実際の合金コストは、2,700~3,650円/kgを下回ることはないものと予測されているが、有効水素吸蔵量の増大によってコストの低減が著しい応用例である。

5. 海外における開発動向

図-5は、電気供給が需要の少ない遠隔地での特殊なケースであり、マグネシウム系合金による大型カートリッジを用いた大量の水素貯蔵と輸送を想定した場合に初めて成り立つものである。貯蔵・輸送容器の耐圧

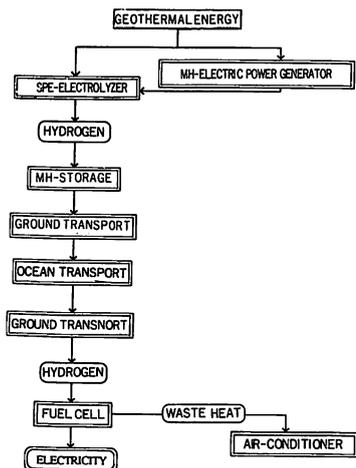


図-5 地熱発電と熱廃水利用による発電方式を併用した遠隔地における水素利用システムの概要

はせいぜい数気圧程度であり、大気圧に近い非耐圧性容器による輸送も計画されている。この場合の有効水素貯蔵量は3.5重量%程度となるが、需要地に所定の熱源が得られる場合には、特性の異なるマグネシウム系合金の採用によって、この量を5重量%近くまで上げることも可能と考えられている。

本例は、エネルギー供給面でのリスク管理上の要求によって生まれたものであって、経済性に関する厳密な評価が終了している訳ではないことをお断りしなければならない。

この複合システムは、潜在的に莫大な水力発電能力を持ちながら、需要が少なく、遠隔地への送電コストの大きいカナダでは、豊富な電力による水素製造と輸送手段として、液体水素、アンモニア、シキロヘキサン、メタノールなどによる貯蔵・輸送手段と共に詳し

い検討が進められている。また、ECとカナダとの間では、この水素輸送をはじめとする水素関連のプロジェクトが近年開始される見込みである。特に西ドイツへの水素輸送は、大陸間エネルギー輸送の具体的実施例として詳細な経済的評価が加えられており、IEA(国際エネルギー機関)の水素プロジェクトの中にもカナダ、イタリア、ベルギー、スイス、スウェーデン、日本の6カ国が共同参加しているTASK-VIIIの1課題として取り上げられている。なお、EC/カナダ間のプロジェクトは、日本の持つ技術への期待も高く、いくつかの関連技術はカナダを通じて採用されることとなろう。

スウェーデンでは、総発電量の47%に相当する現方式の原子力発電を2010年をめどに段階的に中止する政策を進めている。残る発電量の内、わずか6%強が石油・天然ガスによるもので、45%が水力発電である。この原子力発電総量の低下を補うには、エネルギー消費の40%を占める民生エネルギーと、このうち特に高い比率を占める暖房用エネルギー消費量の圧縮もしくはエネルギー源の転換が重要な課題となっている。スウェーデンにおける今後25~30年間の技術開発課題として、フロンを使用しない化学系ヒートポンプ、熱電併用型(コージェネレーション)のエネルギーシステムなどに対して、高い優先順位が与えられている所以がどこにあるかは想像に難くない(表2参照)。

水素吸蔵合金技術を複合化して用い、電力や熱の有効な利用をはかるプランが極めて現実味をもって検討されている理由もよく理解できよう。表2中で下線を入れた項目は、水素吸蔵合金技術を中核に据えた複合水素エネルギーシステムと強い関係にある技術要素と考えられるものである。

表2 スウェーデンにおける今後25~30年間のエネルギー技術開発テーマ(重要度による分類)  
Survey of Energy Technologies for Sweden over the Next 25~30 Years

Technologies of great importance concerning	Technologies of limited importance concerning	Technologies without any appreciable importance concerning
Heat pumps Combustion Combined heat and power and industrial back pressure Condensing power Hydropower Nuclear energy District heating Electric power transmission Natural gas transmission	Hydrogen gas Geothermal energy Solar heat  Wind power Wave power Fuel cells Heat storage Electricity storage	Energy supply from shales Synthetic propellant fuels MHD (Magneto-hydrodynamics)  Solar cells OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) Fusion

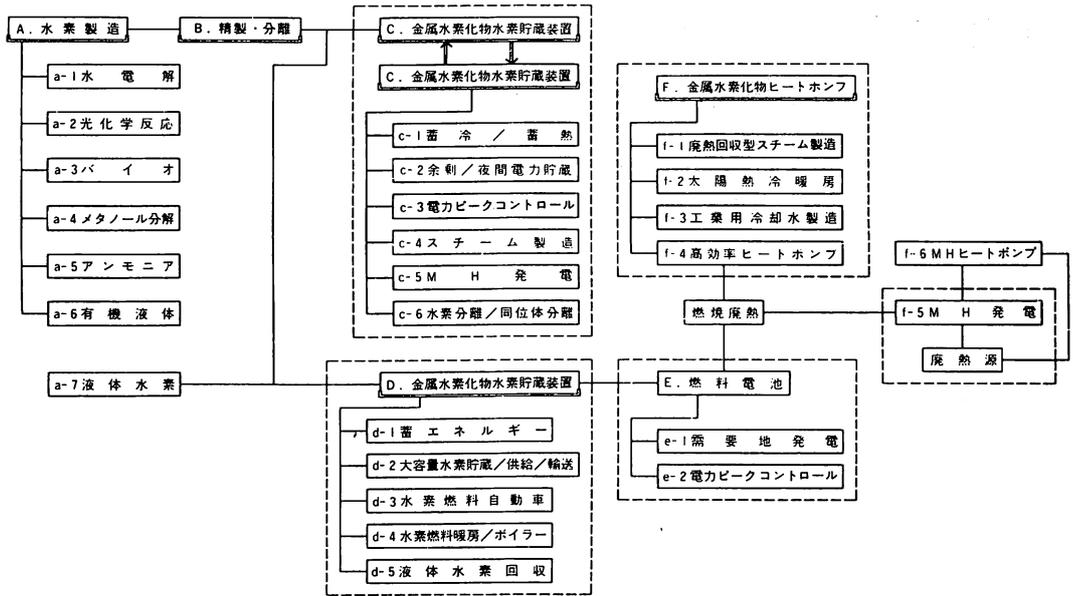


図-6 CHESプロジェクトの概要

6. おわりに

ここに述べてきたように、水素吸蔵合金に係わる技術開発は、研究、開発段階で得られた成果を単独自立型の技術や機器・プラントとして応用するのではなく自然エネルギーや廃熱の回収手段と電気エネルギーの有効な貯蔵手段などとして、いくつかの関連技術を包括し、これを複合化する方向で生かされるのではなかろうか。ここに紹介したいいくつかの事例は、ハワイ州、カナダ、スウェーデンなどで計画の進められているものであり、図-6に表わされるようなCHESプロジェクト

(Comprehensive Hydrogen Energy System) の各国の状況に照し合せた部分的な体现である。このプロジェクトには、現段階では研究、開発途上にあり、実用化に至るには相当年数を要するものも含まれる場合もあるが、この段階で効率や経済性に関する評価を優先させることをせず、ひと先ず各種の要素技術の持つ将来的な可能性を探索した上で、そこに得られた実験の結果を基礎工学的な課題として再び研究・開発現場に還元しようとする意図が含まれていることを付記したい。

