

水素化金属を用いた太陽熱発電システムの概念設計

Conceptual Design of Solar Thermal Electric Power Generating System
with Metallic Hydride.

池田 長康*
Nagayasu IKEDA

田中 忠良*
Tadayoshi TANAKA

谷 辰夫**
Tatsuo TANI

堀米 孝***
Takashi HORIGOME

Abstract

Possibility of solar thermal electric power system with metallic hydride is presented. Change of solar insolation, delay time of starting and short generation time of electricity are made clear from the operation of a solar thermal power pilot plant at Nio. It is important to solve the problems such as heat storage, the heat capacity of the system and the heat transportation for long distance when we intend to develop 100 MWe class solar thermal power plant.

From the point of view, an application of chemical heat pump system is considered. Especially, there seems to be a possibility in the system with metallic hydride. We investigate metallic hydride on the application of solar thermal power system.

We designed solar thermal electric power systems with metallic hydride conceptually. The system consists of distributed solar reactive collectors, hydrogen transport pipes with no thermal insulation and steam generator with hydrogen reaction like a structure of a nuclear reactor.

Key Words: Solar thermal system, Electric power plant, Conceptual design, Metallic hydride.

1. まえがき

太陽エネルギーを利用するシステムの技術開発が鋭意進められてきているが、実用化には今一歩というところである。しかしながら21世紀に向けて是非成功させなければならない技術開発である。

太陽エネルギーは無尽蔵であるが、稀薄でしかも間欠的であり、気象条件にも左右される。この太陽エネルギーを利用するには、まず、需要量に見合ったエネルギーを集熱する必要がある。また、需要時間に合わせるために、蓄熱する必要もある。現在までのソーラーシステムはこの二大要素の技術開発に力を注いで来た。しかし、少し大口の需要に応じるために、太陽エネルギーは稀薄であるため、それ相応の広さの面積で太陽エネルギーを集めねばならない。この集熱面積が広くなれば、それぞれの集熱装置で集められた熱をもう一度一個所に集める必要がある。この熱輸送には現在断熱配管を用いているが、過渡的な運転には断熱材の優劣だけでなく、配管系の熱容量も問題となって来る。我国の太陽熱発電システムの開発で建設・運転

したパイロットプラントのうち、分散集熱方式システムは配管途中の大きなバルブや支持体等からの熱損失のため、設計値に比べ、大きな熱損失を経験している。このように、熱の効率的な輸送は大形のソーラーシステムの実用化への一つの鍵を握っていると考えられる。この熱輸送技術は地味であり、しかも難しい技術であるが、太陽熱システムでは避けて通ることの出来ない技術であると考えられる。

最近、水素化金属(または金属水素化物と呼ばれる)が水素貯蔵や熱貯蔵の媒体として注目されているが、熱の輸送にも大きな適用可能性を持っている。水素を輸送することにより、実質的には熱を輸送するシステムの可能性で、長距離になれば熱の効率的な輸送方法になるものと期待される。このシステムを太陽熱発電

* 電子技術総合研究所エネルギー部 主任研究官
Electrotechnical Laboratory Senior researcher

** ノミネーション
ノミネーション
室長
Section chief

*** 東京農工大学工学部電気工学科 教授
Tokyo University of Agriculture and Engineering Professor

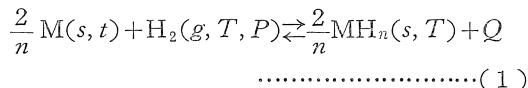
システムに適用するならば、次のようなシステムが考えられる。すなわち、集熱器に内蔵するあらかじめ水素を吸収している金属（水素化金属）に太陽熱を与えると吸熱反応によって水素ガスを放出する。この水素ガスを配管により中央に集め、金属に吸収させると逆反応により熱を放出する。この熱により蒸気を発生させ、発電するというシステムである。この太陽熱発電システムは集熱過程を水素ガスの輸送で行っており、従来のシステムと全く異なるシステム構成となっている。特に、途中の配管の断熱は全く不要である。また、水素化金属や水素は完全な閉ループであるため、原則としては消耗しないシステムである。

この論文では、このシステムについて概念設計を行い、個々の要素やサブシステムはどのようなものとなるか、水素化金属の必要量はどれ位であろうか、経済性はどうだろうか等のシステム概念をうることとこのシステムの問題点を洗いだすと共に、今後の課題を明確にすることを目的としている。

2. 水素化金属を用いた熱輸送系

2. 1 水素化金属の特性¹⁾²⁾

殆んどの金属は適当な温度、圧力のもとで、水素ガスと反応し、水素化金属を作る。この反応は



で表わされる。ここで、Mは金属、MH_nはその水素化物、s, gはそれぞれ固相、気相、Tは温度、Pは圧力である。Qは水素1モル当たりの水素化反応熱である。水素化金属は通常 i) アルカリ金属やアルカリ土類金属の塩形水素化物、ii) 遷移金属の金属形水素化物と、iii) III_bからV_b族の金属による共有性水素化物に分けられており、このうち、熱輸送の可逆反応として適当な金属は ii) の範疇に属する金属ということになる。

次の、金属の水素化反応の特徴を考えて見る。

i) 可逆性が優れている。図1に各種金属の金属水素化物の平衡分解圧曲線を示すが、温度と水素ガス圧の条件により、(1)式の反応が右に進んだり、左に進んだりする。条件を図1の平衡分解曲線の右上に選ぶと反応は水素化の方向に進み、発熱する。反対に左下に選ぶと、水素を放出し、吸熱する。このように、温度と圧力により反応の向きを制御することが出来る。

ii) 反応速度が速い。固一気反応でありながら、この反応は相当に速く、熱の拡散速度によって制限され

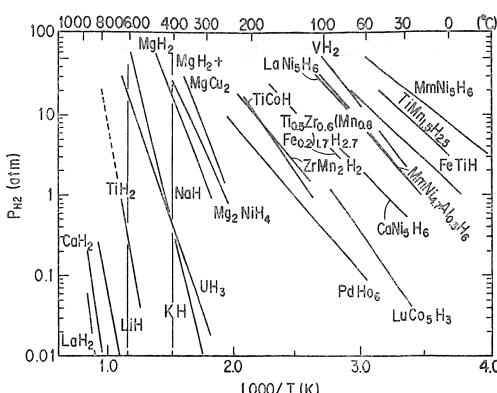


図1 各種金属の金属水素化物の平衡分解圧曲線

ている。

iii) 反応熱が一般に大きい。表1には各種金属水素化物の1気圧における分解反応のエンタルピー変化ΔH_f（これを一般に反応熱Qと呼んでいる）を示す。アルカリ金属やアルカリ土類金属、希土類金属のような塩形水素化物となる金属はΔH_fの値は大きい。鉄などの遷移金属の水素化物は金属結合のためΔH_fは小さい。

iv) エクセルギーの有効利用の可能性がある。水素化金属を回復させるためには、発熱時と等量の熱を与えるなければならないが、低温の排熱を利用することが出来る。

v) 安全な反応である。水素の放出反応は吸熱反応であり、熱が与えられない限り急激な水素ガスの放出はない。また、水素ガスを吸収し発熱しても、熱が除去されず、高温となれば、吸収反応は止まり発熱は停止する。従って、いずれにしても、反応は停止する方

表1 金属水素化物の分解反応熱(ΔH_f)

金属—金属水素化物	ΔH _f (kcal/mol·H ₂)
Li—LiH	37.6
Na—NaH	27.0
K—KH	27.6
Mg—MgH ₂	17.8
Ca—CaH ₂	41.7
Sr—SrH ₂	42.3
Ba—BaH ₂	40.9
La—LaH _{2.76}	40.1
U—UH ₂	20.4
Th—ThH ₂	~35
Zr—ZrH ₂	29.6
Ti—TiH ₂	38.9
Pd—PdH _{0.56}	8.9
FeTiH _{0.1} —FeTiH _{1.95}	~7.5
MgNiH _{0.3} —Mg ₂ NiH _{4.2}	15.4
LaNi ₅ —LaNi ₅ H ₆	~7
TiMn _{1.5} H _{0.5} —TiMn _{1.5} H _{2.47}	6.8
TiCo—TiCoH _{1.4}	13.8

向に進む。

vi) 輸送・貯蔵時におけるエネルギー損失はガスの漏れがなければ、原則的にない。

vii) ヒートポンプ機能をもっている。適当な2種類の金属を選ぶことにより、熱源温度より高い温度をうることが可能である。

2.2 水素化金属を用いた熱輸送系

熱輸送系として水素化金属を用いる場合、熱の輸送端では金属の水素化物 MH_n に熱 Q を与え、水素を分離発生させる。この水素を反応条件による圧力差またはポンプにより受熱端に送り、水素化されていない金属に水素を吸収させる。このとき、等量の反応熱 Q を放出する。このように、水素を送ることにより、実質的には熱を輸送することになる。

水素は既に述べたように、種々の温度、圧力の範囲で、水素の放出、吸収する金属や合金があり、熱輸送システムの目的に合せて、送熱端と受熱端の水素化金属を選ぶことが可能である。また、水素の輸送については、大規模なシステムでは広い温度範囲で運転出来る圧縮機やポンプを採用した制御のし易い圧力駆動型システムが望ましい。一方、小型のシステムについては、複数の金属を組合せ、その温度の平衡圧で水素を移動させる熱源駆動型システムの方が簡便で適していると思われる。図2(a)にこのシステムの模式図を示す。この熱輸送システムと熱交換器・断熱配管による従来のシステムとを比べて見る。詳細には各機器を設計してコスト等も算出し、比較する必要があるが、ここでは定性的に考える。この結果を表2に示す。これから判ることは、この熱輸送システムは高温熱媒の長距離輸送には適すると云うことが云える。特に、熱の非定常輸送には優れていると思われる。

ここで、具体的にシステムの概念を得るため、比較的温度の低い動作域をもつカルシウムニッケル合金 ($CaNi_5$) を両端にもつ系と受熱端は高温動作域をもつ金属チタン (Ti) からなる系それぞれの3システムについてケーススタディを行った。

第1のケースは温度 $50^{\circ}C$ の等温熱輸送を考える。流量として $100 l/min$ 輸送距離は $\sim km$ を想定する。この温度域では $CaNi_5$ 合金を両端に用いることにする。この合金の圧力と濃度と温度 (P-C-T) 特性³⁾ は図3に示すように、 $50^{\circ}C$ の温度域では1気圧から3気圧の範囲で水素の吸収・解離放出を行う。多少のヒステリシスが見られるが、合金の原子数に対する水素の原子数の比で0.2から0.7までほぼ同じ圧力で反応が進む。従って、 $CaNi_5$ 合金1モル333.63 gに対して、

0.2から0.7までの約0.5モルの水素が吸収されたり、放出されたりし、3.75 kcalの熱の出入りがある。受熱端では $25^{\circ}C$ の温水が入り、 $50^{\circ}C$ に加熱されて負荷に送り出されるとするならば、必要な熱量は $2,500$ kcal/minとなる。これは水素化金属の反応熱(1モル当たり7.51 kcal)に依存するものであるから、反応速度は 332.9 mol/min 必要である。しかし、C-P-T特性から判るように、動作域は0.5モルであるので、実際は2倍の量が必要で、 665.8 mol/min となる。これは $50^{\circ}C$ で2気圧の発熱反応槽では $147.0 l/sec$ となる。もしガス流速を $5 m/sec$ とするならば、半径 9.67 cm (断面積 $294 cm^2$) の配管となる。次に、水素化金属の量を調べる。カルシウムニッケル合金は水素1モル

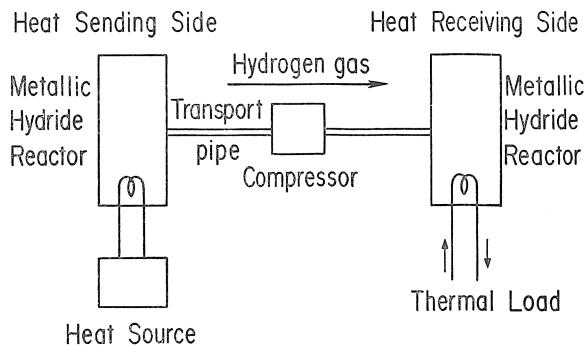


図2 (a) 水素化金属を用いた熱輸送システムの模式図

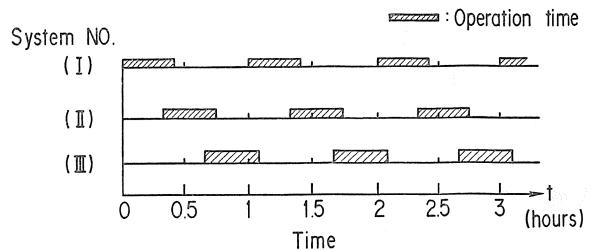


図2 (b) 水素化金属を用いた熱輸送システムにおけるバッチ運転モード (3系統)

表2 热輸送システムの比較

従来システム	水素化金属を用いたシステム
○定常的な熱輸送では距離に対して指指数的な温度降下となる。	○水素を用いた可逆反応利用システムである。
○非定常では配管と断熱材の熱容量が効き、温度降下は大きい。	○熱を等価的に水素に変換して取扱うため、配管等に漏れがなければ、定常、非定常に拘らず損失はない。
○定常的に比較的短距離の熱輸送に適する。	○比較的長距離の輸送において特徴を發揮する。
○構造も簡単で、伝熱のみで単純なシステムである。	○両端に送熱反応槽と受熱反応槽が必要であり、これらの槽では現在まだ高価な水素化金属をかなりな量が必要である。
○拡散方程式に支配されるため、源がなければいつかは零となる。	○新らしい技術であるため、合金から要素機器のまで新らしく開発する必要がある。
○非常に習熟した技術である。	

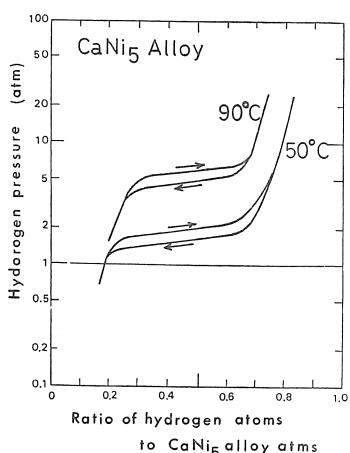


図3 カルシウム・ニッケル合金の圧力一濃度一温度特性

ルに対して実際は2モル必要であるから、1分間の反応量として222.1kg、体積にして28.9l(この合金の密度は7.68g/cm³である)必要である。実際の運転には、図2(b)に示すような30分運転容量の3対のシステムを用い、25分給熱運転、35分回復運転を行うのが水素化金属の量も少なく適当であると思われる。回復過程ではより低い温度の排熱を用いているため、時間がかかるため、回復運転にはより多くの時間をとっている。従って、この合金の重量は一系統につき13.3トン必要であり、3系統では40トン必要となる。一端における合金体積は1m³以下であり、装置としても小型の熱交換器程度である。

同様な考え方で、ヒートポンプ作用を加味した2ケースについて、ケーススタディを行った。一つは50°C入熱で90°Cの温水を負荷に送り出す場合、もう一つは1,000kW程度の発電に必要な熱を輸送する場合で受熱端の水素化金属としてチタンを想定した。以上3

表3 热輸送システムの計算例

ケース	I	II	III
輸送距離(km)	~1	~1	~1
送熱端温度(°C)	50	50	50
受熱端温度(°C)	50	90	600
想定負荷	50°C, 100l/min	50°C, 100l/min	6 × 10 ⁶ kcal/hr
輸送熱量(kcal/min)	2,500	6,000	1 × 10 ⁵
水素化合金			
送熱端	CaNi ₅	CaNi ₅	CaNi ₅
重 量(kg)	3 × 6,678	3 × 16,010	3 × 51,517
受熱端	CaNi ₅	CaNi ₅	Ti
重 量(kg)	3 × 6,678	3 × 16,010	3 × 7,388
水素流量(mol/min)	333.3	798.9	2,570.7
標準状態(l/min)	7.5 × 10 ³	17.9 × 10 ³	575.8 × 10 ³
系統数	3	3	3
システム圧力(atm)	2	7	2

ケースについて、システムの概要をまとめたものを表3に示す。

3. 太陽熱発電システム

太陽熱発電システムは現在、タワー集光方式と分散集光方式の各システムがある。タワー集光方式はヘリオスタットの数が多くなれば、タワーの高さも高くする必要があり、ヘリオスタットの追尾には、より高精度の制御技術が要求される。一方、分散集光方式は広大な面積で集熱された高温の熱を長い距離運んで始めて発電を行うことが出来るため、この熱の輸送が問題となる。この論文では熱の輸送における損失をなくすことから、水素化金属による水素ガス輸送で等価的に熱を輸送出来ることを検討して来たが、この章では水素化金属を用いた太陽熱発電システムのイメージをうるために、システムの概要、集光系、集熱系、発電系の各サブシステムについて水素化金属の適用を調べ、実用規模のシステムについて概念設計をする。

3.1 システム概要

水素化金属を用いた太陽熱発電システムは図4(a)および(b)のように、原理的には、日中の発電のための集熱システムと夜間の発電にそなえて、水素の貯蔵と水素化金属から水素を除く過程のシステムに分けられる。

まず、日中、太陽エネルギーが降りそそいでいる時間帯では集熱系C₁の水素化金属m₁Hが太陽エネルギーを吸収して水素を放出する。この水素が蒸気発生装置B₁に送られ、水素が空になっている水素化金属(金属)Mに吸収され、水素化物となり反応熱を放出する。この熱により、高温蒸気を発生し、タービンにより発電される。一方、夜間のために、他の集熱系C₂により、水素を放出させる。この水素は水素貯蔵タンクRに吸収させ貯蔵する。また、タービンからの排熱を利用して、別の蒸気発生装置B₂の回復を図り、この水素を回収し、これも水素貯蔵タンクRに収藏する。

夜間、太陽エネルギーの供給が止った時には、同図(b)のように、水素貯蔵タンクRがタービン排熱で加熱され、水素化金属m₃から水素が蒸気発生装置B₂に送られ、高温蒸気を発生し、発電を行う。また、夜間は各集熱系C₁、C₂および蒸気発生装置B₁の回復過程である。タービンからの排熱を利用して蒸気発生装置B₁の水素化金属MHから水素を放出させる。この水素によって、集熱系C₁の金属を水素化し、明日の集熱に備える。集熱系C₂は水素貯蔵タンクから放出さ

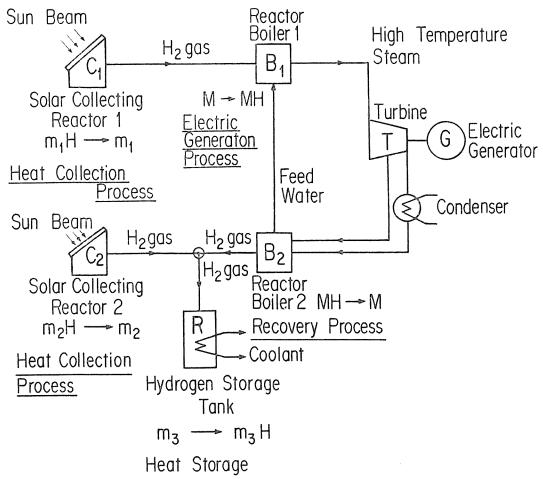


図4 (a) 水素化金属を用いた太陽熱発電システムの模式図（日中）

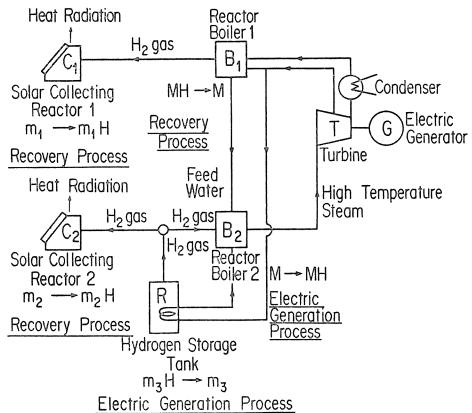


図4 (b) 同システム（夜間）

れた水素の一部を用いて回復を図る。

このような過程を昼と夜繰返すことにより、準定常に、24時間連続して発電することが可能となる。

3. 2 集光・集熱系

集光系は効率が高いことと同時に、莫大な面積で集熱するので低価格であることが重要である。更に、耐風性が良く、散乱光も集光可能なシステムが望ましい。低コストのためには、何よりも使用する材料の量を少なくすることが必要である。従って、全面に集熱配管を張りめぐらした平板型集熱器のタイプよりも多少集光機能をもたせ集熱面積を小さくした方が配管の長さを短かく、材料の量を少なくすることが出来る。しかし、大型の反射板をもち焦点または焦線に集光するタイプは太陽を追尾する必要があり、追尾機構のため、コスト高となる。さらに、これは散乱光が収集出来ないということと大型の反射板の正確な曲面の維持と強風対策等に問題がある。

ここでは、これらの問題を解決する一つの方法とし

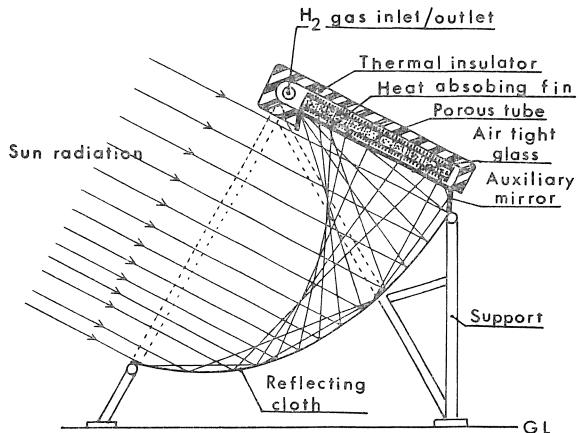


図5 水素化金属を用いた反応型集熱器

て、懸垂線を用いた布状の反射板と比較的小面積の集熱部をもつ反応槽を兼ねた集熱器⁴⁾について述べる。この集熱器の概念は図5に示す。集熱部は受光部面積の約半分となっているため、使用材料の量は約半分となる。また、集熱部が集熱器の上部に配置されているため、対流による熱損失ではなく、集熱部が小さい分だけ伝導による損失も小さいという特徴をもっている。反射板はゴム等の重い布状形態をし、暖簾のように切れ目を持つため、風は切れ目を通って容易に抜けること出来る。従って、反射板の形状維持や強風に対しても問題はない。

水素化金属を用いる場合には図5のように集熱部にこの合金を直接配置することにより、太陽エネルギーを直接水素に変換させる反応型の集熱器とすることが出来る。すなわち、反射板から集熱部に入る光は下部の気密用ガラスを通して、金属水素化物を内蔵する容器外側の吸熱フィンに至り、熱に変換される。この熱は容器内部の伝熱フィンによって金属水素化物に伝えられ脱水素反応が起る。この生成水素は多孔質管を通して水素化金属収納容器の外へ導かれ、上部の配管接続口より蒸気発生器等へ送られる。これは一度温水を加熱し、その後水素を発生生成するシステムより簡素であり、経済的なシステムとなる。この集光・集熱システムは、追尾を考える必要はないので、設置の精度や配管の断熱施工に特別な配慮をする必要はなく簡単である。また、反射板も形状を考えることもなく、両端を支持体に掛けるだけで極めて容易である。従って、大規模システムへの適用性にも優れていると考えられる。

3. 3 蒸気発生系

水素化金属を用いた反応型集熱器から水素が非断熱の配管によって集められる。半分は夜間運転用に貯蔵

されるが、半分は水素が空となっている水素化金属に吸収され、発熱反応により熱エネルギーにもどされる。この熱により、高温蒸気が生成され、タービンに送られ発電を行う。

ここで述べる蒸気発生装置⁵⁾は図6に概念を示すように、原子炉の形状に類似している。原子炉の燃料棒に相等する水素化金属を内蔵した棒状の発熱体モジュールが発熱体として内部に多数、整然と配置され、その周囲を冷却水が流れ、上部で蒸気を発生する。この発熱体モジュールは上下一対の整流板で支持され、上部および下部の水素配管マニホールドと接続されている。このモジュールは図7に概念的に示す構造をもち、水素の通過と伝熱を可能にしている。中央に位置する多孔質の配管により、周囲の水素化金属への水素供給を行っている。この多孔質管の周りにはヘリカルな（あるいは縦形の）フィンを配し、良好な伝熱を保持すると同時に、水素化金属の交換時にも便利な構造となっている。モジュール本体の外側には冷却水との熱伝達を良くするために多数のフィンをもっている。

3.4 発電系

この発電システムは現在の間欠運転を行っている太陽熱発電システムとは異なり、連続運転が可能なシステムである。従って、タービン・発電系は火力発電や原子力発電と同じシステムを取ることが出来、特に問題もなく、従来の技術そのまま適用可能であると考えられる。蒸気発生系に金属チタンを用いれば、600°C近い高温が得られるため、高温高圧の蒸気システムの他、ガスタービンの採用によるより高効率システムの可能性も考えられる。

3.5 水素貯蔵系

独立した発電所を考える場合、電力の間欠供給は許されることではない。従って、太陽熱発電所も夜間の発電に備え、日中に水素を貯蔵することが不可欠である。水素貯蔵用としての水素化金属は水素放出の際に排熱でまかなえることが重要で、小さな反応熱をもつものが望ましい。伝熱面から考え、構造は蒸気発生装置に類似した多数本の水素吸蔵モジュールをもつものが考えられる。

3.6 実用規模太陽熱発電システムの概念設計

実用規模としては最小である24時間稼動の1万kWの太陽熱発電システムを考える。

電力の所内率を0.1、タービン・発電機の効率を0.4と仮定するとタービン入口熱量は2.78万kW必要である。蒸気配管系での熱損失を2%とすれば、蒸気発

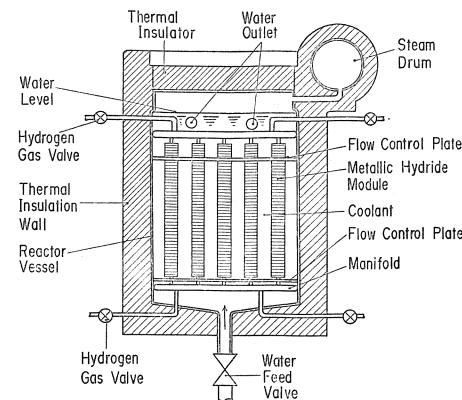


図6 蒸気発生装置の概念図

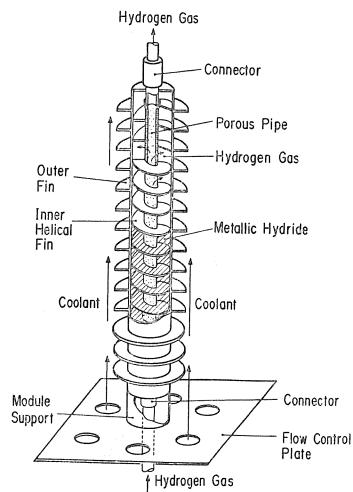


図7 発熱体モジュールの概念図

生装置出口熱量として、2.84万kW_t必要である。これは 6.77×10^3 kcal/secである。24時間運転を考えると必要な熱量は 5.85×10^8 kcal/dayとなる。水素輸送系両端における熱損失と集熱器の効率をそれぞれ0.1、0.05と0.81とすれば、集熱器が集めなければならない熱量は 1.63×10^8 kcal/dayとなる。我国の日射量として 0.5 kW/m^2 、 $3\text{ kWh/day} \cdot \text{m}^2$ を仮定するならば、一日の入熱量は $2,580\text{ kcal/day} \cdot \text{m}^2$ であり、従って、集熱面積として $6.3 \times 10^4\text{ m}^2$ 必要で、敷地として2倍を仮定すると約 $13 \times 10^4\text{ m}^2$ (360m × 360m)の広い敷地が必要である。集熱用水素配管の長さも約65kmとなる。

蒸気発生装置の水素化金属としてチタンを用いる。すなわちチタンは図1に示したように平衡曲線の温度が500°C～600°Cと高く、また、反応熱も38.9 kcal/molと大きい。しかし、チタンの特性はまだ不明な点が多く、今後の研究に待たねばならないが、大きな問題が起らなければ、熱力学的高効率と少ない水素輸送量のシステムが期待される。両端の水素変換効率を含めて、水素は193.5 mol/sec必要である。この水素は

標準状態で $4,330 \text{ l/sec}$ である。蒸気発生装置では 600°C , 0.7 気圧となり, $19.78 \times 10^3 \text{ l/sec}$ となる。流速を 10 m/sec とすると、直径 115 cm の管が 2 本必要である。水素化金属の量を最小にすることは建設費の低減からも重要であり、このシステムでは熱輸送系のケーススタディと同様図 8 のように 3 系統とする。チタンの利用率を 50% とすると、30 分運転では 33.4 ton 必要であり、この体積は 7.4 m^3 である。従って、3 系統では 100.2 ton のチタンが必要である。

蒸気発生装置における発熱体モジュールについて考える。このモジュールの基本構造は既に図 7 に示したが、具体的に設計を行って見る。チタンの容器外径を 100 mm とする。外側フィンを 10 mm とする。この容器は 500°C 以上の高温と外側からの圧力を耐えるため、 3 mm 厚のステンレス鋼とする。中心の多孔質水素ガス供給管の内径は 50 mm (厚さ 2 mm)、内部ヘリカルフィンの厚さとピッチをそれぞれ 1 mm と 20 mm とする。また、モジュールの長さを 3 m とすると、チタンの充填可能な体積は 13.2 l となる。微粒子状のチタンの充填率を 50% とすると 1 モジュール当たりのチタンの重量は 29.8 kg で、その発熱量は $12.1 \times 10^3 \text{ kcal}$ である。従って、30 分運転の 3 系統からなるシステムを考えると、1 系統当り $1,119$ 本の発熱体モジュールが必要である。このモジュールを収納するのに約直径 $5 \text{ m} \sim 5.5 \text{ m}$ の蒸気発生装置が必要である。高さも 6 m 程度となり、表面積が最小の円柱に近い寸法である。モジュール当りの水素ガス必要量は 17.5 l/sec で多孔質管の内断面が 19.6 cm^2 であるので、入口流速は約 9 m/sec である。

集熱系の水素化金属は日中にカルシウムニッケル合金を用いて必要な集熱をする必要があり、合金の総量は $1.11 \times 10^4 \text{ ton}$ 必要で、単位面積当り 177 kg/m^2 となる。これはこの合金の密度が 7.68 g/cm^3 であるので、 23 l/m^2 程度である。3.2 で述べた集熱器を考えると、開口部は $1 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 程度で、充填率を 50% と見ても 10 cm 程度の厚さの合金が集熱部に配置されることになる。従って、反応型の集熱器であるが、特別大きな容器とはならない。

以上、この 1万 kW_e の太陽熱発電システムの特性をまとめ、表 4 に示す。

次に、 1万 kW_e システムと同様の手法で、 10万 kW_e クラスの発電所についても考えて見る。表 4 にこのシステムの特性を示す。要素機器は 1万 kW_e システムと同じものと考える。所内率は 2% 減らし 8% とする。蒸気発生装置は発生蒸気量が 10 倍となるため、多少複雑となる。蒸気発生装置への水素ガス供給管は直

径 130 cm 程度のものが 16 本必要であり、モジュールは 1万 kW_e システムと同じものを使えば、 $3,243$ 本の 3 段積の配置となり、水素供給用配管は複雑なものとなる。図 9 に概念的な予想図を示す。外径、高さがそれぞれ 15 m 程度の蒸気発生装置 3 基と数倍の容積をもつ水素貯蔵タンクをもつプラントになると考えられる。これらの設計例では現状の効率を用いたため、ブ

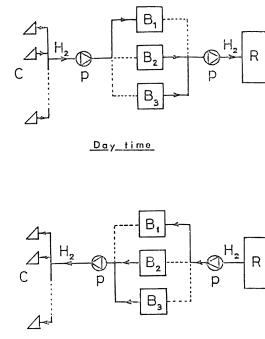


図 8 太陽熱発電システムにおける水素ガス系統図
(3 系統)

表 4 太陽熱発電システムの概念設計例

ケース	I	II
送電端発電量($\times 10^4 \text{ kW}_e$)	1	10
発電時間(hrs/day)	24	24
所内率(%)	10	8
総発電量($\times 10^4 \text{ kW}_e$)	1.1	10.87
T/G効率(%)	40	45
タービン入口熱量($\times 10^4 \text{ kWt}$)	2.78	24.16
蒸気配管損失率(%)	2	2
蒸気発生器出口熱量($\times 10^4 \text{ kWt}$)	2.84	24.65
$(\times 10^3 \text{ kcal/s})$	6.77	58.86
蒸気発生器熱損失率(%)	10	10
蒸気発生器発生熱量($\times 10^3 \text{ kcal/s}$)	7.52	65.40
水素流量($0^{\circ}\text{C}, 1$ 気圧)($\times 10^5 \text{ l/min}$)	2.60	22.60
金属チタンの量(30 分運転、3 系統)(ton)	100	870
カルシウムニッケル合金の量($\times 10^4 \text{ ton}$)	1.12	9.69
集熱器熱損失率(%)	5	5
集熱器吸収効率(%)	81.2	81.2
集熱器必要集熱量(10^3 kcal/day)	1.63	14.14
平均日射条件(kW/m^2)	0.5	0.5
(kWh/day)	3	3
集熱面積($\times 10^4 \text{ m}^2$)	~ 6.3	~ 54.8
集熱敷地($\times 10^4 \text{ m}^2$)	~ 13	~ 110
集熱用水素配管長(km)	~ 65	~ 555
集熱温度($^{\circ}\text{C}$)	~ 80	~ 80
発生温度($^{\circ}\text{C}$)	~ 500	~ 500

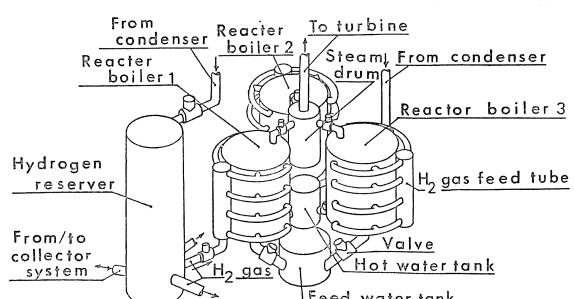


図 9 10万 kW_e クラス太陽熱発電システムの蒸気発生部の概念図

ラント COP は 1.2 程度であるがより高効率のサブシステムが開発されれば、1.5 以上の COP が期待されるであろう。

4. 今後の課題

以上、いくつかのケースについて検討して来たが、過渡的な入力をもつ太陽熱発電システムや太陽熱利用システムへの適用が有望であり、今後、21世紀へ向けて研究開発を行うべき課題であると思われる。

しかしながら、熱に関する新らしい技術とも云うべきものであるので、今後の課題としては水素化金属自身やそれに関連したものとシステム全体や要素機器についてそれ多く研究開発課題や要素機器開発がある。

まず、水素化金属については

i) 需要に適合した温度の新らしい合金を開発し、特性データを収集し、取扱いに習熟すると共に、設計データを整備する必要がある。

ii) この金属、合金の低コスト化を図る必要がある。現在、2~3 千円/kg であるが、大規模な需要のためには 1/10 以下にする必要がある。ちなみに、鉄やステンレス鋼は kg 当りそれぞれ、10~4 円、400 円程度である。

iii) 水素の放出速度は水素化金属の粉体への熱の供給速度によって制限される。従って、加熱方法、伝熱面積の確保、粉体の充填方法、水素の近接、除去等に関連し粉体特性の把握が必要である。より基本的な問題として、粉体媒質における伝熱の問題が解明されなければならない。これは粉体の粒度、粒形や充填圧等に依存し、複雑な現象であると思われる。更に、難しいのはこの粉体媒質における伝熱の熱源が反応によるため、粉体媒質中の水素ガスの拡散と局所的な温度、圧力が重要であり、これらの現象を解明されなければならない。

iv) 水素を放出した後の金属微粉末は化学的に活性で酸素があれば、爆発的な反応を引き起す可能性があり、取扱いに注意を要する。従って、取扱い方法の確立と反応槽の構造に工夫をこらす必要がある。

水素化金属の反応容器としての発熱体モジュールについて

i) 水素化金属の反応特性と伝熱特性からモジュールの最適設計法を確立する必要がある。

ii) 水素は発熱用の水素化金属だけでなく、これを納めている容器自身の中へも侵入してゆくため、容器の水素せい性に関する特性を把握しておかなければな

らない。これにより、発熱体モジュールの取換え期間が決まると考えられるので、高温出力の大規模システムにとって重要な問題である。

iii) 取換える必要性から、このモジュールの簡単な着脱機構の開発が必要である。

次に、システムについては

i) 新らしいシステムであるので、熱力学的な解析と同時に、シミュレーションコードの開発が必要である。この際、伝熱や反応に関するデータを理論と小型システムの実験の両方から取得し、システム解析の結果を信頼性のあるものにする必要がある。

ii) 集熱器に関してはいずれのシステムを採用するにしても、低コストコレクターを開発しなければ、大規模な太陽熱発電システムの経済性は望めない。本報告では低コストが期待される布状反射体を用いた集熱器を提案している。しかしながら、概念設計から分るように、集熱側の水素化金属の量は電気出力 kW 当り 600 kg 程度必要で、これは現在 180~120 万円/kW と建設コストを上げる要因となる。水素化金属自身の価格を下げる努力と共に、システムを改良し、効率を上げると共に 30 分程度の交互運転を行えるようにしなければならないであろう。

5. あとがき

以上、検討して来たように、やっと着目されはじめたシステムであり、不明な未知な部分が多い。しかし、大規模な熱の輸送を伴うシステムにとって優れた特性を示し、強味を發揮するものと期待される。特に、太陽熱発電システムのような稀薄な熱を広大な面積から集め利用しようとするシステムには適したシステムと考えられる。基礎的な研究から要素機器の開発、システム解析とソフト・ハード両面から研究開発がなされなければならない。

参考文献

- 日本太陽エネルギー学会編 "太陽エネルギー利用ハンドブック" p. 222 (1985)
- 小野修一郎、電気化学および工業物理化学 46, (7) p. 388 (1978)
- 大阪科学技術センター、水素吸蔵合金利用開発委員会編 "水素吸蔵合金利用開発委員会調査報告書" p. 225 (1985)
- 昭和60年特願第232618号 "太陽光集熱装置" (1985)
- 昭和60年特願第271088号 "蒸気発生装置" (1985)
(昭和61年 6月20日 原稿受理)