

温度差エネルギーを利用した水素吸蔵合金 アクチュエータ活用型海水交換装置の開発

APPLICATION OF THERMAL ENERGY AND METAL HYDRIDE ACTUATOR TO SEAWATER EXCHANGE SYSTEM

長谷一矢¹・渥美洋一²・井元忠博³・先川光弘⁴・松村一弘⁵・吉田静男⁶

Kazuya HASE, Youichi ATSUMI, Tadahiro IMOTO, Mitsuhiro SAKIKAWA,
Kazuhiro MATSUMURA, and Shizuo YOSHIDA

¹正会員 修(工) (独)北海道開発土木研究所 港湾研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 (独)北海道開発土木研究所 港湾研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

³(独)北海道開発土木研究所 港湾研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁴正会員 国土交通省 北海道開発局 港湾空港部 (〒060-8511 札幌市北区北8条西2丁目)

⁵博(水産) 北海道立工業技術センター (〒041-0801 函館市桔梗町379番地)

⁶正会員 工博 (独)北海道大学大学院助教授 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

Seawater exchange is being considered as a measure against deterioration of water quality and freezing, which are becoming problems in harbors and fishing ports. It is therefore desirable to develop a seawater exchange system with low running cost to put these systems into practical use.

At the same time, development and use of new energy sources such as renewable energy have become much more common in recent years due to concerns about the global environment. Hydrogen is a clean energy source that can replace fossil fuels. Metal hydride (MH) has been studied as a method for storage of hydrogen. The MH actuator is being developed as a method for directly obtaining a mechanical force using hydrogen pressure generated by a temperature difference applied to a MH.

In this study, seawater exchange system was produced experimentally using a MH. This system could be applied to practical use as a sea water exchange.

Key Words : an enclosed harbor area, seawater exchange, thermal energy, metal hydride, spiral type screw

1. はじめに

港湾や漁港内においては外郭施設や係留施設の整備が進められてきた。港内の静穏度が向上し、荷役作業等の安全性を高めた一方で、港奥部の閉鎖性海域では水質悪化や港内結氷等が問題となっている。こうした問題への対策としては、水質改善には清浄な外海水、また結氷防止には港内水より高い温度の外海水の導入が考えられる。

その方法として、これまで多くの海水交換型防波堤が開発されてきた。海水交換型防波堤には、堤体に導水孔を設けた有孔堤や、この有孔堤前面に潜堤を設置した二重堤など様々な構造形式があげられる。これらの海水交換型防波堤は、いずれも防波堤前面の波動に伴って発生する水平方向の水粒子の運動エ

ネルギーや水面変動そのものを利用しているものであり、海水交換のためのランニングコストは皆無であった。しかし、こうした波動が非常に小さな場合には海水交換能力が著しく低下することは避けられず、この問題に対応するためには別のエネルギーを利用した強制的な海水交換が必要となることが想定される。その最も単純な方法としては、商用電源と電動ポンプを使用した海水交換が考えられるが、この方法では永久に必要なランニングコストが問題となる。

本研究は、こうしたランニングコストをほとんど発生させることなく全く新しい強制的な海水交換装置の開発を目指すものである。利用するエネルギーは自然界に存在する、もしくは何らかの方法で自然界から得ることができる温度差である。当然温

度差が得られただけでは海水交換は行えない。そこで着目したのが水素吸蔵合金アクチュエータである。

水素吸蔵合金（metal hydride：以降MHと称す）は、常温下においても多量の水素を吸蔵し、しかもわずかな加熱によって吸蔵した水素を容易に放出する特徴を有している。MHを利用した動力機構のひとつがMHアクチュエータである。MHアクチュエータは、ふたつのMH容器に温度差を与えることにより発生する水素圧力差から機械動力を得るものである。このMHアクチュエータの動力を用いることにより、様々な手法で強制的な海水交換が可能であると考えている。

本研究で開発している水素吸蔵合金アクチュエータ活用型海水交換装置は、MHアクチュエータを動力部として海水中に設置したスパイラル型スクリーを回転させ、強制的な海水交換を行うものである。本論文は本装置の現地適用方法、メカニズム、運転特性を示すものである。

2. 本装置を用いた海水交換方法

図-1に示すような港形において、港奥部まで海水が十分に循環せず、水質悪化が進行している場合を想定する。港奥部の海水浄化を行う場合、港外との海水交換を行うことが必要となる。それには港奥部堤体を海水交換型防波堤に改良し、波浪力により海水交換を行う方法や、別な外力を用いて強制的に港外の海水を導入する方法が考えられる。後者の方法の一つとして、本研究で開発している海水交換装置を適用することが可能であると考えている。堤体への本装置の設置イメージを図-2(a)、(b)に示す。

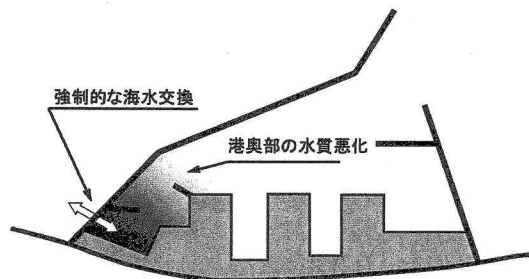


図-1 港奥部の水質悪化

図-2(a)は既設の防波堤に本装置を設置するイメージを示したものである。堤体を跨ぐように取水管を設置し、取水管の両端はそれぞれ港外海中と港内海中に没する状態にする。そして、堤体上部には本装置の動力部であるMHアクチュエータを設置し、港内側の取水管内にはスパイラル型スクリーを設置する。取水管内を海水で満たし、MHアクチュエータによりスパイラル型スクリーを回転させることで、サイフォンの原理により港外から港内へ海水を引き込むことが可能である。

港内において畜養水面等を計画する場合、港内の水質悪化を防止するため、建設当初から海水交換型

防波堤を適用することがある。しかしながら、建設後、目標とする海水交換量が得られず、更なる対策に苦慮する場合も少なくない。図-2(b)は既設の海水交換型防波堤の導水孔を利用した、本装置の設置イメージを示したものである。既設の導水孔にスパイラル型スクリーを設置し、堤体上部にMHアクチュエータを設置する。前述同様にMHアクチュエータによりスパイラル型スクリーを回転させることで港外から港内へ海水を導入することができる。

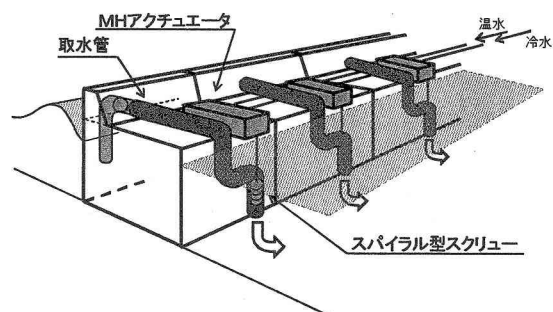


図-2(a) 既設堤体への設置方法

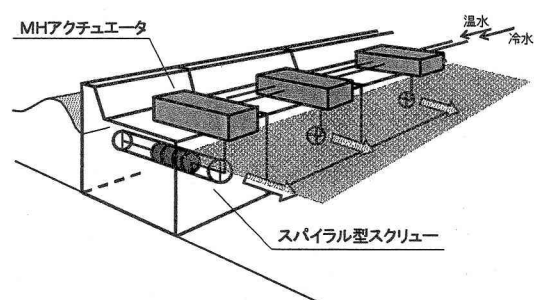


図-2(b) 既設導水孔を利用した設置方法

本装置を利用する場合、MHを加熱・冷却するための温水と冷水を本装置に供給しなければならない。MHの冷却は海水を利用することができるが、MHの加熱については、現地の状況に応じて温水の取得方法を検討しなければならない。温泉水等の高温熱源を現地付近で取得できる場合は、本装置に直接供給することができる。また、高温熱源が現地付近で得られない場合においては、太陽エネルギーや風エネルギーを利用して高温熱源を得ることが可能であると考えている。

MHアクチュエータの動力を利用した海水交換は前述の方法以外にも考えられるが、本研究では図-2(b)の方法を想定した装置を試作し、本装置の運転特性を調べることとした。

3. MHアクチュエータ

MHアクチュエータの基本構造を図-3に示す。図に示すような1組のMH（容器Aと容器B）とアクチュエータが連結された機構を考える。初期状態として容器AのMHにのみ水素が十分充填されているものと

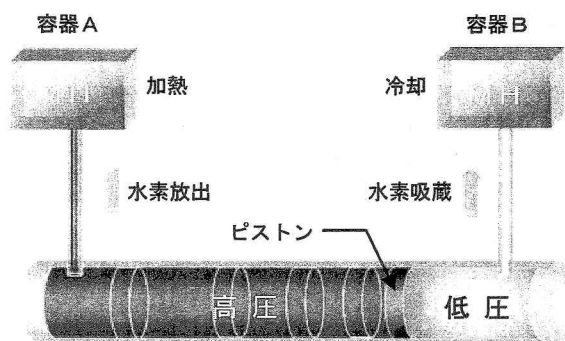


図-3 MHアクチュエータの基本構造

する。この状態で容器Aを加熱、容器Bを冷却すると、容器Aは水素を放出、容器Bは水素を吸蔵し始める。するとアクチュエータ内のピストンを境に水素の圧力差が生じ、ピストンは動き出す。このような機構により温度差から動力を得ることができる。

4. 水素吸蔵合金アクチュエータ活用型海水交換装置

本装置を写真-1(a), (b)に示す。本装置は動力部（MH容器、リザーブタンク、アクチュエータ）、駆動部（ギヤ、シャフト）、海水交換部（スパイラル型スクリュー）の3つに大別される。実際の堤体上部に設置する部分は動力部と駆動部であり、写真中の上半分の部分である。試作段階ではあるが、動力部・駆動部は縦1.6m横1.9m高1.7m（設置面積：約3.0m²）に収まる寸法であり、ほとんどの堤体に設置可能であると思われる。以降、各部の詳細を示す。

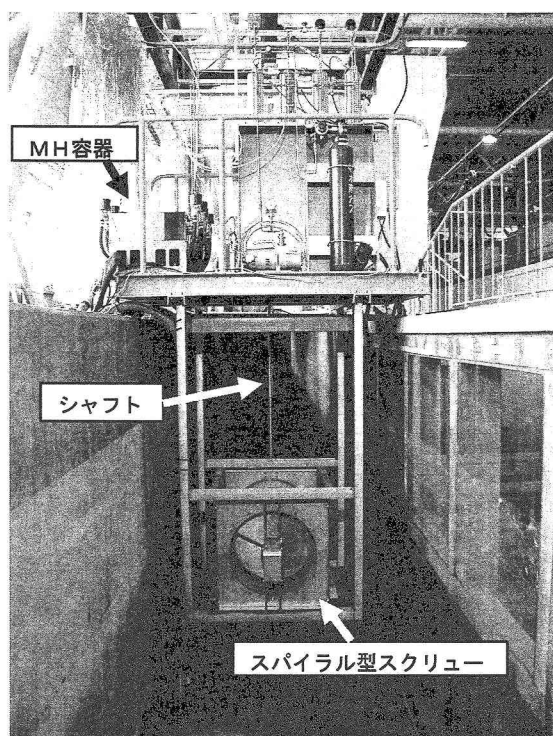


写真-1(a) 装置正面

(1) 動力部

a) 動力部の機構

本装置の動力部の機構を図-4に示す。この機構は3章で示したMHアクチュエータの基本構造を応用したものであり、本装置を連続的に駆動させることを目的に考案した。

図のMH容器には粉末状のMHを1台当り1.7kg（水素吸蔵量：約250L）充填している。容器内は温水・冷水が循環する経路とMHが水素を吸蔵・放出する経路に分けられており、温水・冷水がMHと接触することなく熱のみを効率的に伝える構造となっている。80℃の温水と15℃の冷水を1組のMH容器にそれぞれ循環させることにより、0.7MPa程度の水素圧力差を得ることができる。

アクチュエータを連続的に動作させるため、MH容器とアクチュエータの間に切り替えバルブを設置した。アクチュエータ内のピストンが端まで移動した所で切り換えバルブが作動し、MH容器からアクチュエータに繋がる水素の放出経路と吸蔵経路が切り替わる。するとアクチュエータ内の高圧水素と低圧水素がピストンを境に切り替わるため、ピストンは逆方向へ動き出す。この動きを繰り返すことで、ピストンは連続的にアクチュエータ内を往復する。ただし、切り換えバルブが作動する度にアクチュエータ内の高圧水素と吸蔵側MHが連結されるため、この高圧水素分が吸蔵される。つまり、放出側MHから吸蔵側MHへ徐々に水素が移動することになる。

本装置を駆動させるためには、ある一定以上の水素圧力差が必要となる。これは海水を移動させるために必要な力と装置の摩擦抵抗に相当するものである。前述の方法によりアクチュエータを動作させる

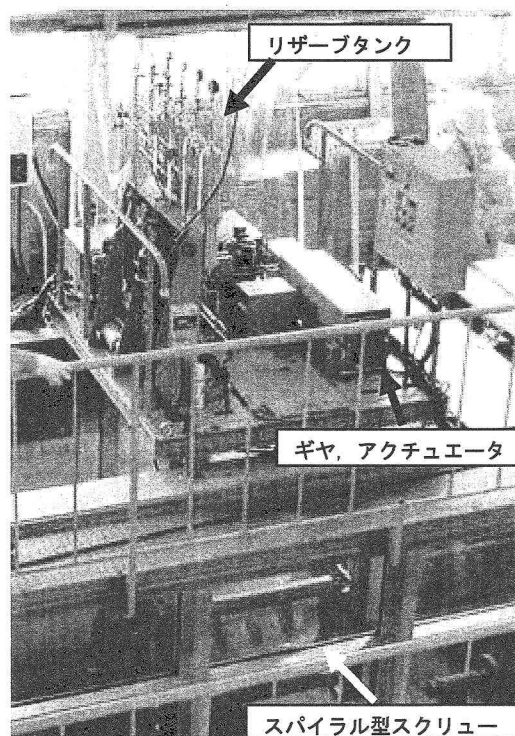


写真-1(b) 装置側面

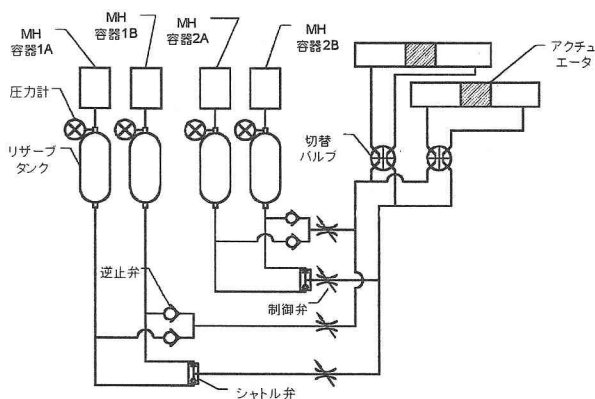


図-4 本装置の動力部

が、MHの水素吸蔵・放出速度の影響により、切り換えバルブが作動する度に必要な圧力差がピストンに作用するまで多少時間がかかってしまう。そこで、MH容器と切り換えバルブの間に水素圧力を溜めるリザーブタンクを設置し、切り換えバルブが作動しても瞬時に必要な圧力差がピストンに作用するようにした。これにより、アクチュエータをスムーズに動作させることができる。

しかしながら、アクチュエータを動作させ続けると水素の移動に伴い1組のリザーブタンクの圧力差は徐々に減少していくことから、やがてアクチュエータは断続的な動きに変化する。そこで、MH容器を2組設置し、適当な時間間隔で交互に使用することにより、アクチュエータをスムーズに動作させ続けられるようにした。

各リザーブタンクには圧力計を設置しており、装置運転時のリザーブタンク内の圧力変動を測定することが可能である。

本装置動力部のアクチュエータは内径35mm長さ450mmであり、装置の規模からすると非常に小型である。切り換えバルブの機構上、アクチュエータを2本使用しているが、これらは同時に動作するものではなく、常にどちらか一方の動力により本装置は駆動する。

b) 動力部の運転

前項に示すように、本装置の動力部は2組のMH容器を使用している。図-4の1A, 1Bの組を1側、2A, 2Bの組を2側と称することとする。本装置を運転する初期条件としてMH容器1A, 2Aにのみ十分水素を充填する必要がある。次に、全ての制御弁を閉じた状態で1A, 2Aを加熱、1B, 2Bを冷却する。すると、それぞれのMHは水素の吸蔵・放出を始めるため、1A, 2Aのリザーブタンクが高圧となり、1B, 2Bのリザーブタンクが低圧となる。この状態で1側から運転を開始するものとする。

1側の制御弁を開放すると、シャトル弁、逆止弁により、水素が1Aから1Bへアクチュエータを介して移動する経路ができる。また、アクチュエータの動きにあわせて切り換えバルブが作動し、2本のアクチュエータは交互に連続的な往復運動を繰り返す。

やがて1側リザーブタンクの圧力差が減少しアクチュエータの動きが連続的な動きから断続的な動きに変化する。その時に1側の制御弁を閉じ、2側の制御弁を開放すると、アクチュエータは2側の水素圧力差により連続的な往復運動を始める。

この時の1側MHの状態をみると、運転時に1Aから1Bへ水素が移動したため、1Aよりも1Bの方が水素量は多くなっている。そこで、2側での運転を行っている間に1側MHの加熱と冷却を切り替え、1Bのリザーブタンクを高圧、1Aのリザーブタンクを低圧にする。1側のリザーブタンクに十分な圧力差ができたところで、2側の制御弁を閉じ、1側の制御弁を開放する。この時、1側リザーブタンクの高圧側と低圧側が入れ替わっているが、シャトル弁と逆止弁により水素が1Bから1Aへアクチュエータを介して移動する経路ができる。そしてアクチュエータは再び連続的に動作する。

この様に、任意の時間間隔で1側と2側を切り替えることで、装置の連続運転が可能となる。

(2) 駆動部

駆動部はギヤとシャフトから構成されている。写真-2はギヤ（ラック、ピニオン、駆動ギヤ、シャフトギヤ）とアクチュエータを示している。本装置で使用しているアクチュエータは水素の漏れを防止するため、マグネット式ロッドレスタイプを採用している。マグネットがアクチュエータ内のピストンの動きに追従することにより動力を取り出すことができる。このマグネットはラックと一体化しており、ラック&ピニオン方式によりアクチュエータの直線的な動力を回転力に変換している。

シャフト（写真-1(b)）は回転力を海水交換部へ伝達する部分である。シャフトを回転させるギヤ比を1:1, 1:2, 1:3（駆動部ギヤ1回転に対しシャフト3回転）の3段階に変更することが可能である。

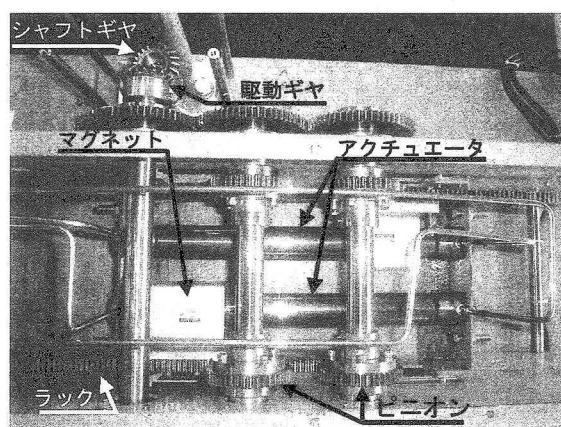


写真-2 ギヤとアクチュエータ

(3) 海水交換部

図-5は本装置の海水交換部であるスパイラル型スクリューの構造を示している。直径500mmのスパイラル型スクリューを内径540mmのアクリル管で覆っ

た構造となっている。ギヤボックスにより、シャフトの回転力をスクリーに伝えることができる。スクリーの取水側管内には流速計を設置しており、管内流速分布を計測することで海水交換流量を求めることができる。

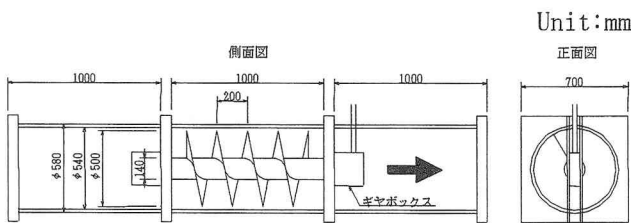


図-5 海水交換部（スパイラル型スクリー）

本装置の海水交換部をスパイラル型スクリーにする大きな利点としては、揚程を生じさせることなく水平方向の海水移動が可能であるため、海水交換に大きなエネルギーを必要としないことがあげられる¹⁾。また、筆者らはスパイラル型スクリーの小型模型を用いた水理実験²⁾を行っており、スパイラル型スクリーを用いた海水交換特性を明らかにしている。得られた結果の一部を図-6に示す。

図-6は、2次元造波水路において小型のスパイラル型スクリーを設置した模型堤体に重複波を作用させ、波高伝達率を求めた結果である。ここではスパイラルの巻数による効果を調べるため、1巻、2巻、5巻の3種類を使用した。また、比較のためにスクリーを設置しない場合、いわゆる有孔堤の場合とスクリー形状が異なるプロペラ型スクリーを用いた場合についても実験を行った。作用させた重複波は波高を0.2mに固定し、周期を1.5、2.0、3.0secと変化させた。図に示す波高伝達率は、重複波の波高と堤体背後に伝達した波高の比で定義している。

図より、周期が長くなるにつれて波高伝達率が増加する傾向にある。有孔堤の波高伝達率の増加傾向に比べると、スパイラル型スクリーの増加傾向は非常に小さい。スパイラル型スクリーの波高伝達率は有孔堤の値の半分以下となる。また、スパイラルの巻数が増加するほど、波高伝達率は低下していく。形状の異なるプロペラ型スクリーと比較して

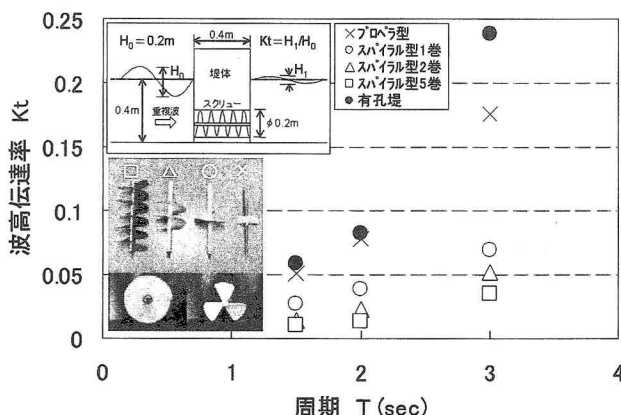


図-6 周期と波高伝達率

も波高伝達率は非常に小さいことがわかる。

スパイラル型スクリーは伝達波高を抑制する効果が高く、実海域における海水交換に適していると考えられる。

5. 本装置の運転特性

図-8は本装置運転時におけるリザーブタンク内の水素圧力変化の一例を示している。これは図-4に示す1側（1Aと1B）を使用してギヤ比を1:3、運転時間を480秒間とした時の圧力変化である。縦軸の圧力の値は1気圧（大気圧）を0MPaとして示している。

図-8では、高压側と低压側のリザーブタンクの初期圧力差が0.7MPa程度となった時に運転を開始している。運転を開始するとリザーブタンク内の圧力差が徐々に減少している。これは、アクチュエータの動作に伴い、水素が高压側から低压側へアクチュエータを介して移動する現象を現している。しかし、この間にも1Aと1BのMHはそれぞれ水素を放出、吸蔵し続けており、圧力差が減少し続けるのは、単位時間当りのMHの水素放出・吸蔵量よりもアクチュエータの動作による水素移動量の方が多いためである。圧力差の減少速度を遅くするためには初期圧力差を小さくしてアクチュエータの動きを遅くする方法が考えられるが、以降に示す本装置の摩擦抵抗を考慮する必要がある。

運転開始後170sec付近で一度装置は停止している。これは、アクチュエータに作用する本装置の動摩擦と水素圧力差が等しくなったためである。両MHはそれぞれ水素の吸蔵・放出を続けているため、装置が停止している間に圧力差が大きくなっていく。そして、200sec付近で装置は再び駆動し始める。これは、アクチュエータに作用する本装置の静止摩擦と水素圧力差が等しくなったためである。アクチュエータには本装置の機械摩擦（周動抵抗）と海水移動に伴う負荷の両方が作用しており、ギヤ比を小さくすることでその大きさも小さくなる。しかし、ギヤ比を小さくするとスクリーの回転速度も低下するため、海水交換流量が低下してしまう。図より、ギヤ比1:3で装置を運転する場合、0.35MPa以上の圧力差が必要であることがわかる。

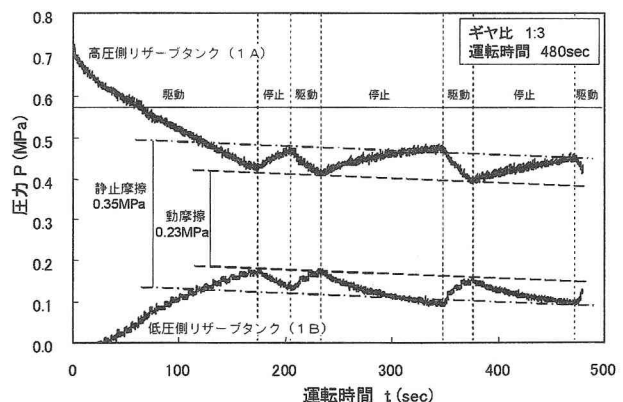


図-8 リザーブタンク内の水素圧力変化

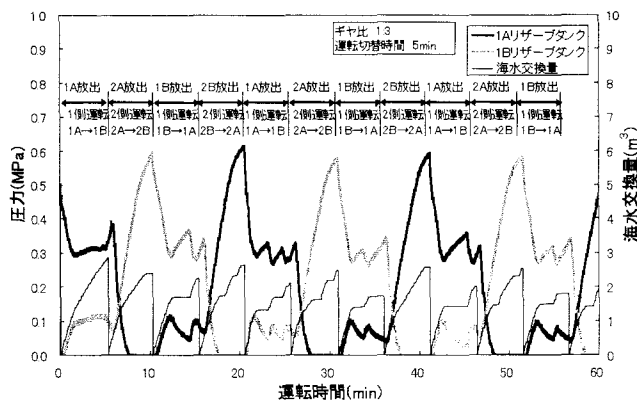


図-9 連続運転状況

その後も装置は駆動・停止を繰り返すが、停止時間の方が長くなっている。本装置は2組のMHを切り替えて使用するが、同じMHの組を長く使用することは効率的ではないといえる。装置が停止する前に、できるだけ早い段階でMHを切り替えて装置を運転することが理想的である。しかし、切り替え時間間隔をあまり短くしすぎると、一度使用したMHの組が初期の圧力差に戻らずMHを切り替える度に初期圧力差が低下し、やがて装置は駆動しなくなることが予想される。

以上の結果から、本装置の連続運転においては水素初期圧力差、MH切り替え間隔、ギヤ比を適切に設定する必要があることがわかった。そこで、これらのパラメータを変化させた繰り返し実験を行い、適切な条件を模索した。その結果、水素初期圧力差0.5MPa、MH切り替え間隔5分、ギヤ比1:3の最適条件を得た。

この条件により実施した運転状況を図-9に示す。連続運転は約3.5時間行ったが、図には運転開始後1時間の1側リザーブタンクの圧力変動のみ示している。また、1側、2側による海水交換流量を切り替え間隔毎に累積して示した。海水交換流量が増加していない区間は装置が停止していることを示している。

初期圧力を0.5MPaとして運転を開始すると、1A（高压側）、1B（低压側）の圧力差は減少していく。運転開始後5分に1回目のMH切り替えを行い、1A、1BのMHの加熱と冷却を逆にすると圧力差は徐々に大きくなり、2回目の切り替え時（10分）には初期の圧力差程度に達している。その後の圧力変化を見ても同様の圧力変動を繰り返していることがわかる。

各切り換え時の海水交換量を見ると、駆動・停止を繰り返しつつも、概ね同様の海水交換量が得られている。

図-10は図-9の連続運転における運転時間と累積した海水交換量の関係を示している。海水交換量は運転時間にほぼ比例して増加していることがわかる。このことから、本装置による安定的な海水交換が可能であるといえる。図中の近似直線の傾きから日当りの海水交換量を求めると665.3m³/dayとなる。

ここで示した海水交換能力は、試験的に設定した

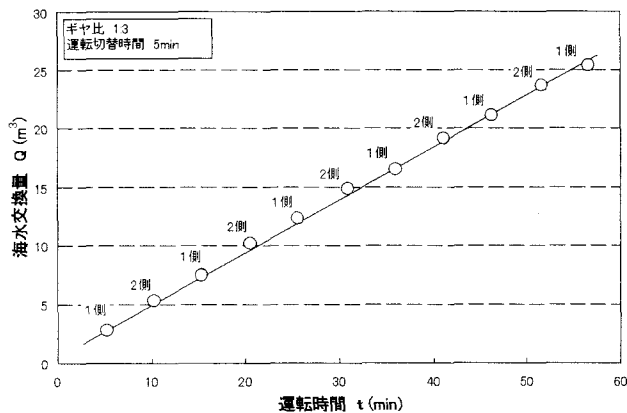


図-10 連続運転時の海水交換流量

MH1.7kg×4台を使用した場合の値であり、本装置自体の海水交換能力の限界ではない。図-7に示す様に、このMH量では装置の停止状態を免れない。しかし、これはMH量を増加させることで容易に解決できる。例えば、1A、2A、1B、2BをそれぞれMH容器2台並列（計8台）で使用すると水素の放出・吸蔵量が2倍になり、海水交換能力も2倍となる。この様に、MH量を増加させることで、容易に海水交換能力を高めることが可能である。

6. 結論

本研究では、温度差エネルギーを利用した海水交換装置の実現を目指して、水素吸蔵合金アクチュエータ活用型海水交換装置を試作した。本論文の結論は以下の通りである。

- (1) 本装置を既設堤体及び既設導水孔を利用して設置する方法を具体的に示し、後者の方法を想定した装置を試作した。実験により安定的な海水交換が可能であることを示した。MH 1.7kgを4台使用して装置を運転した場合、665.3m³/dayの海水交換能力が得られることがわかった。
- (2) 本装置はMH量を増加させることで、容易に海水交換能力を高めることができることを示した。

謝辞：本研究を進めるにあたり、日本データサービス(株)遠藤氏、井戸向氏、長尾氏のご協力を頂いた。ここに記して厚く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 先川光弘・森昌也・梅沢信敏・松村一弘・岡田昌樹・遠藤強・吉田静男：温度差エネルギーと水素吸蔵合金を利用した海水交換装置の開発，海岸工学論文集，第49巻，pp1406-1410，2002。
- 2) 長谷一矢・井元忠博・先川光弘：スパイラル型スクリュウを用いた海水交換特性について，第46回北海道開発局技術研究発表会発表論文集，2004。