

海流及び波力を利用した浮体式海水ウラン 採取システムの開発 (その1)

正員 信川 寿* 正員 為 廣 正 起*
正員 小 林 正 典** 正員 中 川 寛 之**
榊 原 実 雄*** 高 木 憲 夫***

Development of Floating Type-Extraction System of Uranium from Sea Water Using Sea Water Current and Wave Power

by Hisashi Nobukawa, *Member* Masayuki Tamehiro, *Member*
Masanori Kobayashi, *Member* Hiroyuki Nakagawa, *Member*
Jitsuo Sakakibara Norio Takagi

Summary

The concept of the extraction system of uranium from sea water using sea water current and wave power by the application of spherical fiber adsorbents is presented in this paper. The adsorbent bed system consists of thin disk cartridges enclosed in nets and arranged below the sea surface in horizontal layers by suspending ropes hung from a cylindrical buoy with a hole in the centre. These cartridges filled with the adsorbents are transferred from the ships hold to the buoy by the ship board crane and are fixed to the suspended ropes. The ropes are unwound through the center hole so as to place the adsorbent beds in the sea water current which enables the current to pass through the adsorbent beds. The exchange of sea water around the adsorbents is improved by the heaving motion of the buoy due to waves. After about 40 days, the adsorbent beds are recovered using the same process, the cartridges are transferred into a tank for the elution process. Throughout the above processes, the adsorbents are not taken out of the cartridges.

The model tests of a cylindrical buoy with adsorbent beds are carried out in uniform flow as well as in regular waves. The displacements of the adsorbent beds in the flow and the heave motion of the buoy with adsorbent beds suspended from it are analysed.

Furthermore, numerical simulation of this system was carried out for practical operation in the ocean and the production cost of uranium extraction was calculated to be 41,800 yen/kg, where adsorptive ratio is assumed to be 3.2mg/g. 40days.

1. 結 言

海水中に溶存するウランは炭酸ウラニルイオンを形成しているといわれ、ウラン濃度は1,000トンの海水中に3gfのウランを含む3ppbである。これを採取する吸着材の研究、開発が進むに伴って採取システムの研究も行われ、種々の方式のシステムが提案されている^{2)~8)}。

海水中に溶存するウランを吸着材に吸着させるためには、海水と吸着材を接触させる必要があるが、これにはポンプを利用して海水を吸着材に供給する方法^{2),3)}と海流及

び波力等の自然エネルギーを利用する方法^{4)~8)}に大別される。文献^{4),5)}は波力を利用する方法であり、文献^{7),8)}は海流を利用する方法である。

著者らは、文献⁶⁾で海流と波力を利用する採取システムを提案したが、本論文ではこれをさらに発展させた。すなわち、文献⁶⁾では吸着材(アミドキシム型繊維球状吸着材で、繊維径10ミクロン、繊維比重1.3、球の外径5~7mm、球状吸着材のかさ重量(球状吸着材の重量/球の体積)を 0.18 gf/cm^3)¹⁾を海水と一緒に混ぜてスラリー化してポンプで吸着床に充填し、また吸着材の回収も同様に行う方式を用いたが、この方法は吸着材の損耗が激しく、また回収時に問題点があるので、これを改良して吸着材の入った吸着床をカセット式にして吸着・回収・脱着の作業をカセットから吸着材を取り出さないで行う方式を提案し、この

* 広島大学工学部

** 株式会社三井造船昭島研究所

*** 工業技術院四国工業技術試験所

システムの概念設計を行った。次に、このシステムの約1/10の模型に吸着材を入れ、一様流中の海水中で吸着床を上下揺させて吸着実験を行い、また、このシステムの構造体の海流と波力に対する応答を模型実験により調べて計算値と比較した。さらに概念設計を行ったシステムの海流及び波浪の応答を調べるとともに、各種の設定条件の基にウラン採取コストの概算を行った。

2. システムの概念設計

吸着材を入れる吸着床は、海水が吸着材の中へ透過できるように周囲をネットで覆った薄い円板状のかごの中に繊維製の球状吸着材を入れた吸着床を基本ユニットとする。このユニットを海中の深さ方向に多段に配列して、これらをロープ（又はチェーン）で連結して長い帯状の吸着床を構成する。この1条の吸着床を中空円筒浮体の中央の穴からロープ（又はチェーン）で吊るして海中に設置する（Fig. 1）。数十日間海中で吸着された後、浮体の甲板上のウインチ⑥でロープを巻き上げて、浮体甲板上に上ったユニットをロープから外して作業船のクレーン①からベルトコンベア⑤により作業船内へ回収する。Fig.2に示す作業船に回収された各ユニットは、静水タンク⑩に運ばれ、ユニットを清水で洗浄して遠心分離器⑫で水分を除去し、次にユニットを脱着槽⑨に入れ、塩酸槽③（No. 5及びNo. 6タンクを除くNo. 1～No.8タンクに15%濃度の塩酸水を満載）の塩酸水をこのユニットにかけて吸着材に塩酸水を透過させた後、遠心分離器⑫によりユニット内の吸着材に含まれる塩酸水を除去する。そして、このユニットをベルトコンベア⑪で作業船の上甲板に積み上げておき、すべてのユニットが浮体から回収された後に、これらをベルトコンベア⑪から⑤を経て浮体に移して海中に再設置する。一方、ユニット内の吸着材を透過した塩酸水には吸着材に吸着していたウランが溶出し、このウランを含有した塩酸水はNo. 5及びNo. 6の空槽になっている塩酸槽に集められる。No. 5及びNo. 6を除くすべての塩酸槽に満載されていた塩酸水は順次脱着槽⑨からユニットに振りかけられて脱着に使用され、ウランを含む使用後の塩酸水は順次使用前の塩酸水と入れかえられていく。すべての塩酸槽内の塩酸水が吸着材を透過した塩酸水に入れかわれば、これを陸上施設で濃縮してウランを抽出する。

2.1 吸着床及び浮体

繊維球状吸着材を自然な状態で吸着床ユニットに充填した場合、充填率 α （吸着材の乾燥重量/吸着床の容積）は 0.065 gf/cm^3 （吸着材の繊維容積とした場合は吸着床容積の5%）となる。さらに、 α を小さくして吸着床ユニット内に空間を設ければ、波浪によるユニットの動揺及び波の粒子運動により球状の吸着材はユニット内で運動を生じて、海水が吸着材の内部を通過して海水と吸着材の接触が促進され、ウラン回収率の向上が期待できる反面、ユニットの

容積が大きくなり、システム全体が巨大になる。

ユニットの寸法及びその配列間隔等は、海流及び波浪によって海水が容易に吸着材の内部に流入できるように選ばれる必要がある。また、ユニットの直径及びユニットの配

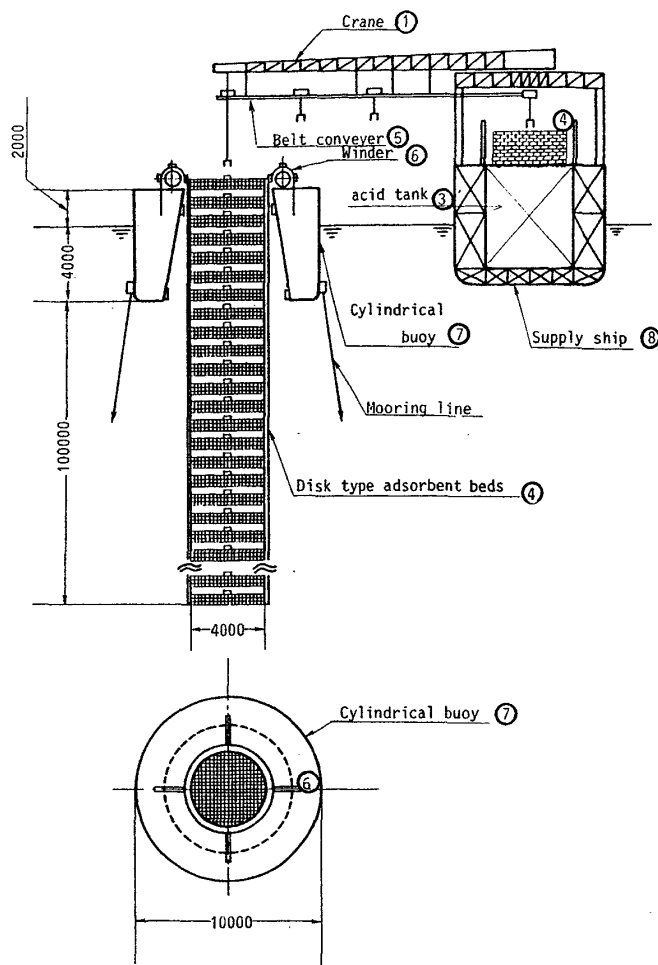


Fig. 1 Cylindrical buoy with adsorbent beds

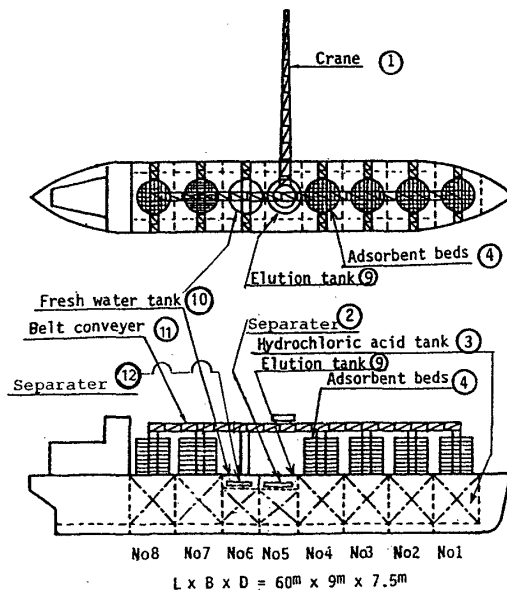


Fig. 2 Supply ship

列数等はユニットの強度及び吸着床を吊るロープの強度、ロープを巻き上げるウインチの容量、浮体の大きさ等に関連してくる。

各ユニットを連結して1条の吸着床を構成するが、ユニットとロープの結合は容易に取り付け及び取り外しができる連結構造とする。

吸着床を吊るす浮体の甲板上には数台のウインチを設置し、中空円筒浮体の中央の穴から吸着床をウインチに連結したロープで吊るす。このロープは、海流によって傾斜を生じるので、ウインチの台はロープの傾斜に合わせて傾斜できるように設備する必要がある。このロープの傾斜を減少させるため、吸着床の下端に錘 \bar{W} を設ける方法も考えられる。

吸着床を吊るした浮体は、隣接の浮体に吊した吸着床による流れの減少、或いは吸着床相互の接触等を生じないような適正な間隔で係留する。これらの吸着床を専用の作業船によって数十日の間隔で回収し、脱着処理後、再び海中に設置して、この作業を繰り返す。

2.2 作業船

作業船甲板上には、Fig. 2 に示すように吸着床ユニットを浮体から作業船に移すクレーン①及びそれに付随したベルトコンベア⑤の設備をもち、また、作業船内の各処理過程へ移すためのベルトコンベア⑩を船の長さ方向に設ける。作業船内には、遠心分離器⑫を設置した清水槽⑩、吸着床ユニットに塩酸水を噴射する装置及び吸着材を含む塩酸水を脱水する遠心分離器②を有する脱着槽⑨を設備する。清水槽及び脱着槽は数個のユニットが格納できる容積で十分である。脱着処理された吸着床ユニットは作業船の甲板上に保管し、その空間は1条分のユニットが収納できる大きさを必要とする。脱着処理液である塩酸水は、吸着材の重量の約25%の重量を必要とするが、これは塩酸槽③に貯蔵する。

塩酸槽の容量を大きくすれば、作業船が巨大化し、作業船の建造費の上昇、また、回収・設置等の作業性を悪くするので、作業船は、1条の吸着床ユニットを回収し脱着処理できる機能を有し、作業員の交替期間まで塩酸水及び清水、燃料等の補給を要しない設備を具備しておれば、極力小さくした方が望ましい。

作業船は、吸着床ユニットの回収、脱着、再設置の一連の過程を連続して繰り返す。そのため、作業船の処理能力に応じた数の浮体を海上に配列、係留しておく。

3. システムの海流及び波浪による応答

3.1 システムの模型実験

3.1.1 一様流中における吸着床に作用する力

Fig. 3 に示すように、直径30 cm、厚さ10 cmの円板状の吸着床ユニットをメッシュ7 mmのネットで覆い、中にダミーの吸着材(繊維径10 ミクロン、繊維比重1.3、球の

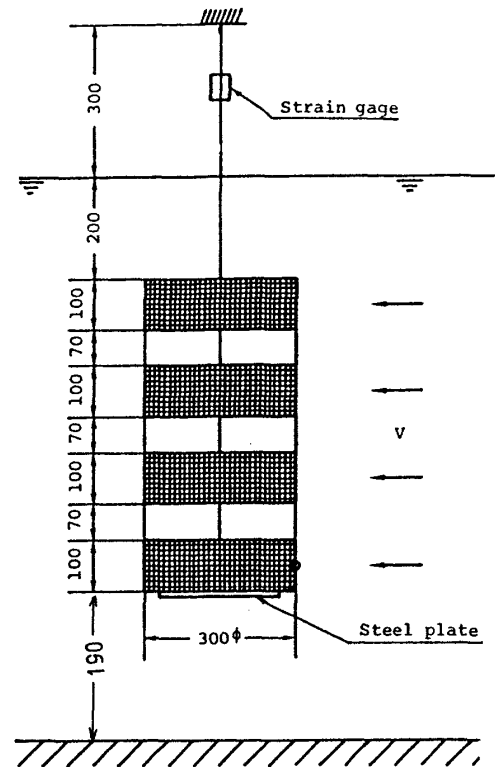


Fig. 3 Model of adsorbent beds

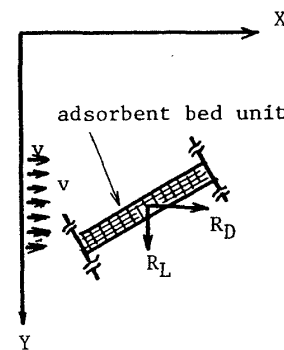


Fig. 4 Drag force and lift force applied to adsorbent bed unit

外径2 cm、球状化した場合のかさ重量 0.18 gf/cm^3 を充填率 $\alpha=0.065 \text{ gf/cm}^3$ で入れた。吸着材は実物大を用いるので、実機に対する模型の厚さは直径に比べて大きくし、吸着材がユニットの中に積層されている状態とした。各ユニットは7 cm 間隔でユニットの外周の4個所をばねで結合し、最下端に錘(鋼板: 2.88 kgf)を付けて1条の吸着床模型とし、上端をロードセルを介して一様流速 v の回流水槽内に吊した。 v を3段階に変化させ、模型を吊るしたロープの張力をロードセルで計測し、また、吸着床の全体の変位をビデオカメラで計測した。この場合、1条の吸着床模型全体の平均伸び剛性は模型の下端に荷重をかけて全体の伸びを測って求め、20 kgfを得た。計測した張力とユニットの変位から、各ユニットに働く平均の抗力 R_D 及びそれと垂直下方の揚力 R_L (Fig. 4) をランブド・マス法⁶⁾で求め

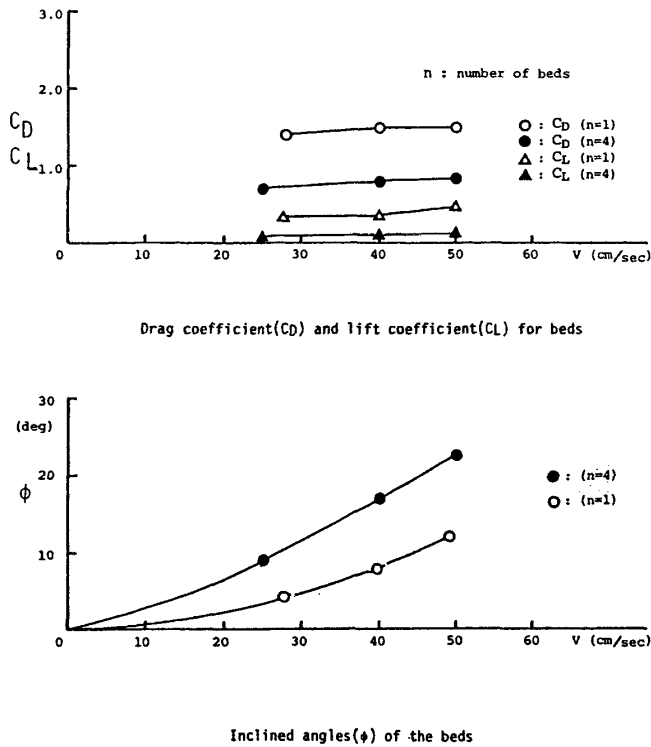


Fig. 5 Drag coefficient (C_D) and lift coefficient (C_L) for adsorbent beds and inclined angle of the beds

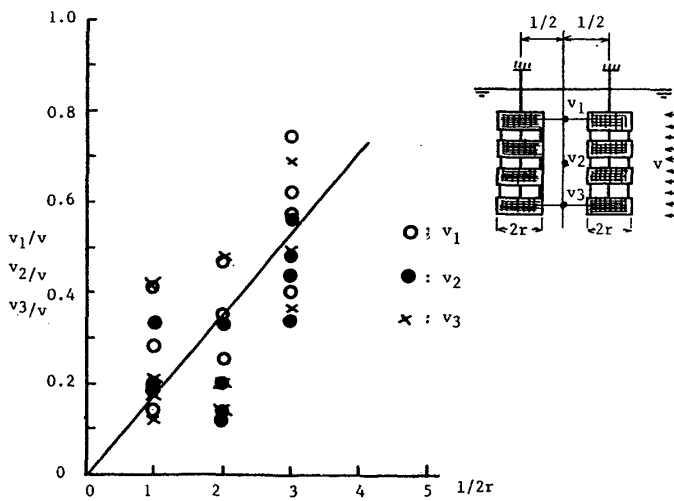


Fig. 6 Variation of uniform flow for the spacing of adsorbent bed systems

て、次式で表わす抗力係数 C_D 及び揚力係数 C_L を求めた。

$$R_D/C_D = \rho A v^2 / 2, \quad R_L/C_L = \rho A v^2 / 2 \quad (1)$$

ここに、 A : 流速 v 方向と直角の面への吸着床ユニットの投影面積、 ρ : 流体の密度

吸着床ユニットが1個の場合も下端に同じ錘を付けて同様な実験を行い、Fig. 5 にユニット数 n が1個及び4個の場合の C_D と C_L を v に対して示し、また、ユニットの傾斜角 ϕ と v の関係を表わした。これより、 $v=25\sim 50$ cm/sec (レイノルズ数 $7.5 \times 10^4 \sim 15 \times 10^4$) では C_D 及び C_L はあま

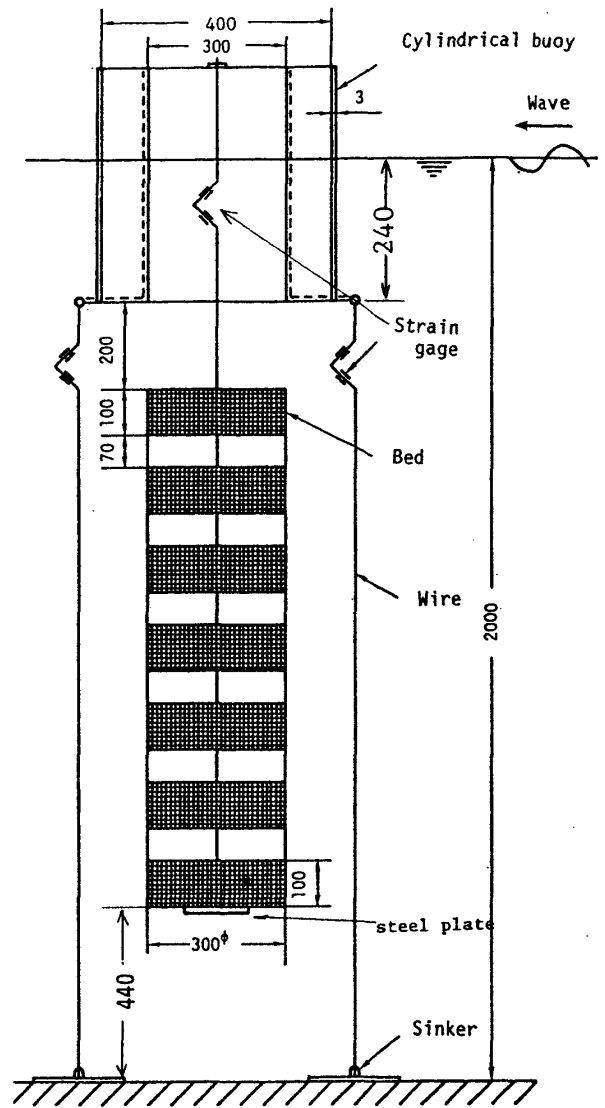


Fig. 7 Model of cylindrical buoy with adsorbent beds

り変化せず、ほぼ一定になり、 $n=1$ で $C_D=1.4$, $C_L=0.4$ となり、 $n=4$ では $C_D=0.8$, $C_L=0.1$ となる。このように $n=1$ の場合に比べ $n=4$ では、 C_D 及び C_L はいずれも減少する。これは、 $n=4$ の場合は $n=1$ の場合に比べ隣接するユニットによって、ユニットのまわりの流速が減少するため、 R_D 及び R_L が小さくなることを示している。 $n=1$ の場合は上下に隣接するユニットの間隔が大きく、それらの相互干渉がない場合に相当し、 $n=4$ の場合は、ユニットの配列間隔が密な場合に相当する。

3.1.2 一様流中の吸着床模型の配列と流速の変化

2条の前節の吸着床模型を l の間隔で一様流 v の中に吊るし、相互の模型の中間点での深さの方向の流速 (v_1 : 上部、 v_2 : 中部、 v_3 : 下部) をプロベラ式流速計で計測した。Fig. 6 は縦軸に v_1/v , v_2/v , v_3/v の値をとり横軸に間隔 l をユニットの直径 $2r$ で無次元化した値をとって流速の変化と間隔との関係を示している。これよりユニットの直径の3倍の間隔でユニット間の流速は約 $1/2$ に低下することが

わかる。したがって、吸着床相互が流速の低下をおよぼさない範囲に浮体を配列するには直径の6倍の間隔をとる必要があることがわかる。

3.1.3 規則波中における吸着床を吊したロープの張力及び係留張力

Fig. 7に示すように、外径40 cm、内径30 cm、吃水24 cmの亚克力樹脂製の中空円筒浮体模型(模型重量8.25 kgf)を作製し、また、7個の上記吸着床ユニットを7 cm間隙でユニットの外周の4個所をばねで結合し、最下端に前述の錘を付けて浮体からロードセルを介して吊るした。この場合、1条の吸着床模型全体の平均伸び剛性は模型の下端に荷重を作用させて全体の伸びを測って求め、34kgfを得た。

浮体は2本のワイヤー(直径1 mm)により、1.01 (kgf/ワイヤー)の張力で緊張係留を行った。この吸着床を吊した浮体模型に2次元規則波を作用させ、吸着床を吊すロープの変動張力 T_v 及び1本当たりの係留ワイヤーの変動張力 T_n を計測した。規則波は波周期 T_w を0.6秒から2.6秒まで0.2秒間隔で変え、波高は1.1 cmから7 cmの間にあるよう設定した。

T_v 及び T_n の解析は次のように行った。緊張係留された浮体は近似的に動かないものとし、各吸着床ユニットが静止位置にあると仮定したときの波力が各ユニットに働き、ばねで連結された各ユニットが2次元振動をするときの T_v をランブド・マス法⁶⁾で求めた。この場合のユニットに働く波力は次のように求めた。Fig. 8に示すような η , X 座標において、波高 H_w 、円周波数 ω 、波数 $k=\omega^2/g$ 、重力の加速度 g 、時間 t の深海波が $\eta=1/2 \cdot H_w \cdot \cos(kX-\omega t)$ で表わされるとき、 Y_n の水深のユニットに働く X 軸方向のフルード・クリロフの力 R_{x0} は次式で与えられる。

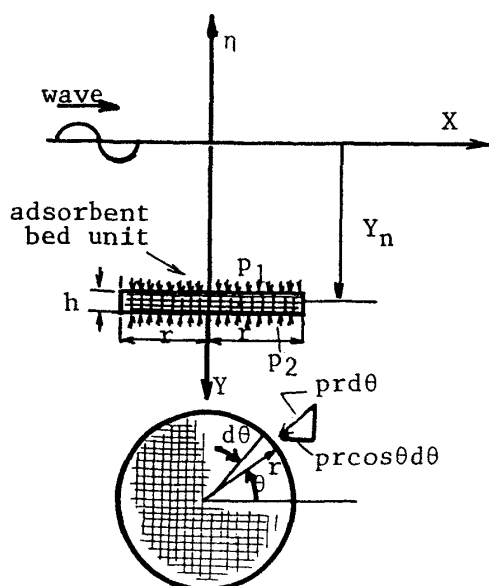


Fig. 8 Coordinate system of adsorbent bed unit

$$R_{x0} = -2\bar{h} \int_0^\pi pr \cos \theta d\theta$$

ここに、 $p = \rho g / 2 \cdot H_w e^{-kY_n} \cos(kX - \omega t)$

\bar{h} : ユニットの有効厚さ

($\bar{h} = \bar{k}h$, h : ユニットの厚さ)

r : ユニットの半径, Y_n : ユニットの水深

\bar{k} はユニット内の吸着材の充填状態によって変化すると考えられるが、Fig. 7の模型における実験結果によれば $\bar{k} = 0.2$ となった。また、ユニットに働く Y 軸方向(鉛直下方)のフルード・クリロフの力 R_{y0} は次式となる。

$$R_{y0} = A_v(p_1 - p_2)$$

ここに、 $p_1 = \rho g / 2 \cdot H_w e^{-k(Y_n - \bar{h}/2)} \cos \omega t$

$p_2 = \rho g / 2 \cdot H_w e^{-k(Y_n + \bar{h}/2)} \cos \omega t$

$A_v = \pi r^2$

ユニットに働く X 軸方向の粘性力 R_{x1} 及び Y 軸方向の粘性力 R_{y1} は次式で与えられる。

$$R_{x1} = 1/2 \cdot \rho C_H A_H |u|$$

$$R_{y1} = 1/2 \cdot \rho C_V A_H |w|$$

ここに、 C_H, C_V : ユニットの粘性抵抗係数

$A_H = 2r\bar{h}$

$u = \pi H_w / T_w \cdot e^{-kY_n} \cos \omega t$

$w = \pi H_w / T_w \cdot e^{-kY_n} \sin \omega t$

ユニットに働く流体粒子の加速度に比例する波力は、 X 軸方向成分 R_{x2} 、 Y 軸方向成分 R_{y2} とすれば、

$$R_{x2} = -2\pi^2 H_w / T_w^2 \cdot M_H e^{-kY_n} \sin \omega t$$

ここに、 $M_H = \rho \bar{V} m_H$, $\bar{V} = A_v \bar{h}$

m_H : ユニットの付加質量係数

また、 $R_{y2} = 2\pi^2 H_w / T_w^2 \cdot M_V e^{-kY_n} \cos \omega t$

$M_V = \rho \bar{V} m_V$

m_V : ユニットの付加質量係数

ユニットに働く X 軸方向及び Y 軸方向の波力をそれぞれ R_x 及び R_y とすれば、

$$\left. \begin{aligned} R_x &= R_{x0} + R_{x1} + R_{x2} \\ R_y &= R_{y0} + R_{y1} + R_{y2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

となる。

m_H, C_H 、及び m_V, C_V は、Fig. 7に示す7個のユニットを7 cm間隙で剛棒で連結し、これをばねを介して水中に水平及び垂直に吊るして自由振動を与えて計測された振動張力の波形が、ばねと質点の1自由度の振動系にモデル化したときの計算結果と一致するように定めた。それによると $m_H = 0.6$, $C_H = 0.7$, $m_V = 1.0$, $C_V = 1.0$ となった。

浮体に作用する波力は特異点分布法で計算した。この波力と T_v の差が T_n として求めた。以上のような計算を行い、模型実験結果と計算結果を比較し、Fig. 9に T_v と T_n の波形を示す。これより、各波周期において、 T_v 及び T_n の計算値はかなり良く実験値の傾向を表わしている。また、Fig. 10は各波周期での実験値と計算値の比較を示したもので、横軸に波数 k を浮体の外径 d で無次元化した値をと

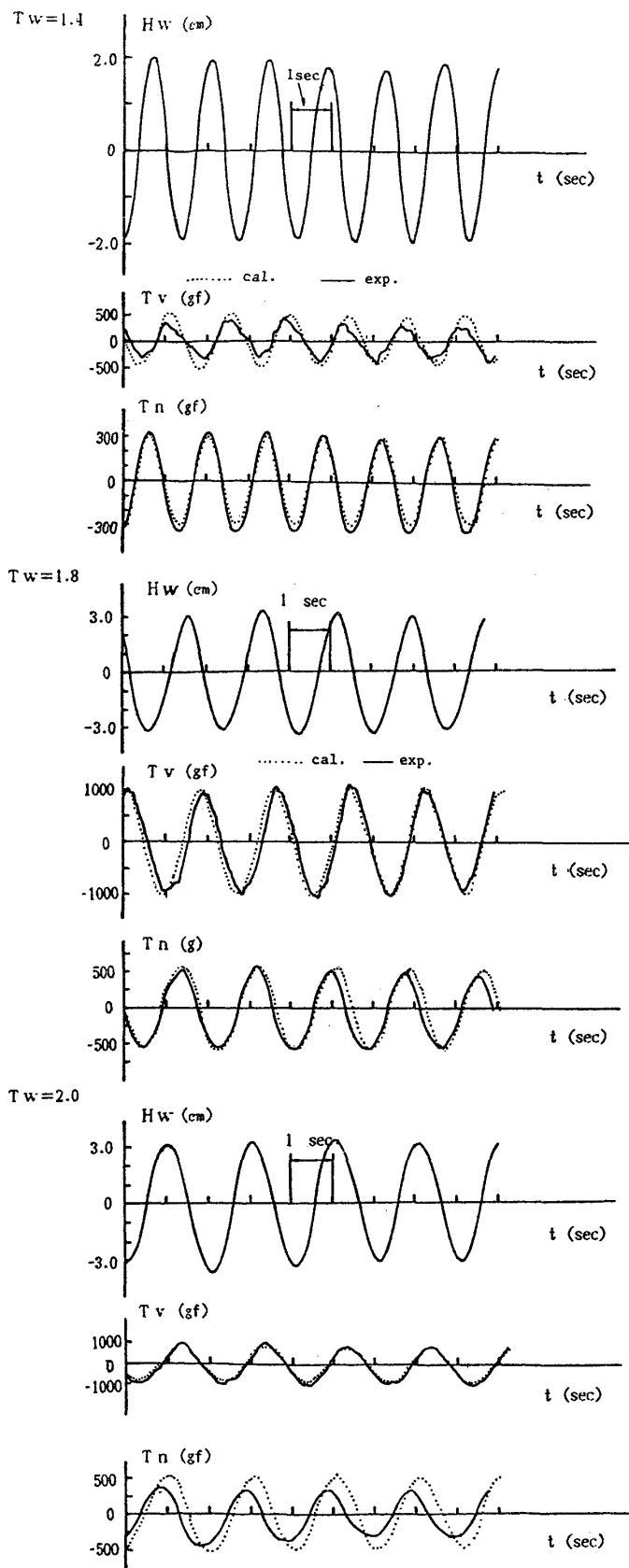


Fig. 9 Time history of tension of ropes hung with adsorbent beds and mooring tension due to regular waves for model experiment and calculation

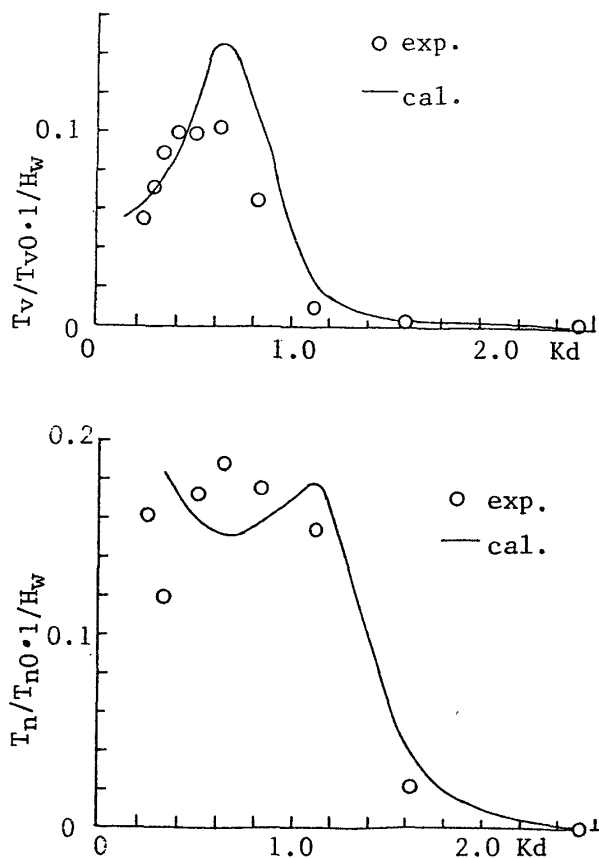


Fig. 10 Tension of the ropes hung with adsorbent beds and mooring tension due to regular waves for model experiment and calculation

り、縦軸に $T_v/T_{v0} \cdot 1/H_w$ 及び $T_n/T_{n0} \cdot 1/H_w$ を示している。ここに、 T_{v0} 及び T_{n0} はそれぞれ T_v 及び T_n の静的平衡時の値である。

3.2 システムの海流及び波浪による応答

前節のシステムの模型実験で得られた知見を基に、システムの構造体の海流及び波浪による応答を調べ、システムが実海域で稼動する場合の設計上の資料を得る。

3.2.1 システムの海流による応答

吸着床ユニットの寸法の適正值は現段階では明確でないが、吸着材の中を通過する流速は、吸着材を自然な状態で充填した場合、20 cm~40 cm の充填厚さにおいて 70 cm/sec の流入速度で 3 cm/sec の通過流速が得られている⁶⁾ことを考慮し、ユニットの厚さを 0.3 m と設定してみた。吸着材はユニット内に自然な状態で充填 ($\alpha=0.065 \text{ gf/cm}^3$) し、ユニットの外径は 4 m、ユニットの間隔は 0.7 m、1 条の吸着床は 100 段のユニットの連結で構成し、最下端には吸着床の傾斜を小さくするための錘 (水中重量 $\bar{W}=0, 10, 20, 30$ トン) を設けた場合を考え、前節の模型実験結果を解析したランプド・マス法がこの場合にも適用できるものとして以下のように数値計算を行った。

ユニットの C_D 及び C_L については、実機の場合レイノルズ数は 4×10^6 となり、模型実験値とは異なるが、ここで

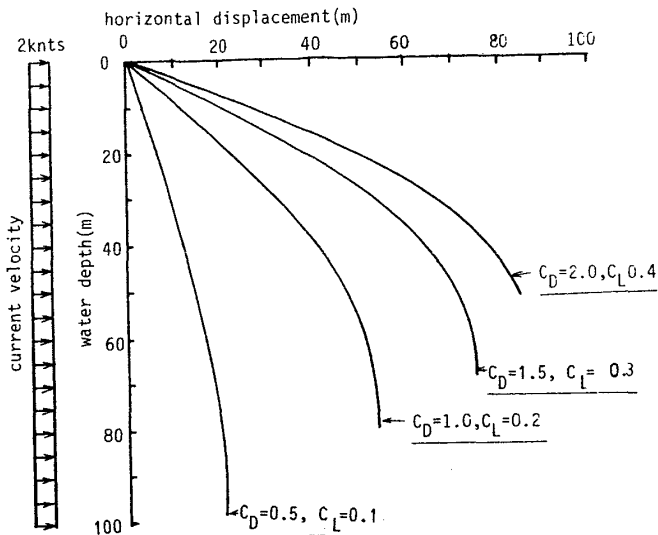


Fig. 11 The influence of C_D and C_L on horizontal displacement of ropes hung with adsorbent beds due to uniform current

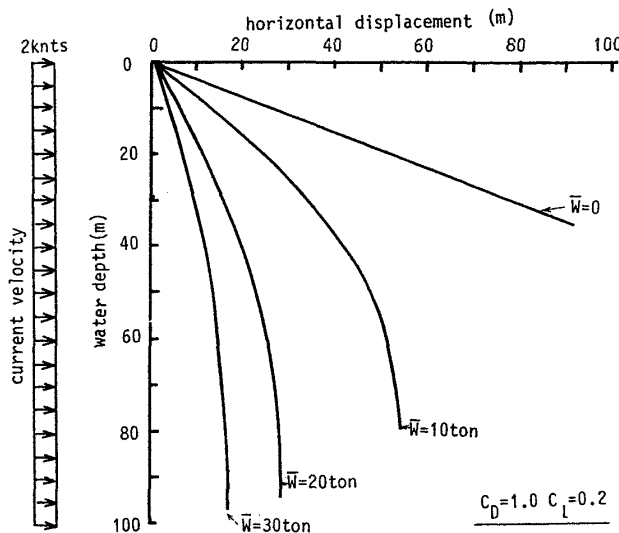


Fig. 12 Horizontal displacement of the rope hung with adsorbent beds due to uniform current

は $C_D=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, C_L=0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ の場合についての応答を調べた。各ユニットの骨組みは F. R. P 製とし、ユニット当たりの重量は 0.2 トン (水中重量 0.08 トン)、ユニット当たりの吸着材の重量は 0.254 トン (水中重量 0.05 トン) とした。吸着床は 2 ノットの流速で、水深 100 m にわたり一様な海流の中におかれた場合を考えた。Fig. 11 は吸着床下端の錘の水中重量 $\bar{W}=10$ トンの場合の 1 条の吸着床ラインの海流による変形状態を示したもので、 C_D 及び C_L によって変位量は大きく相違することがわかる。Fig. 12 は $C_D=1.0$ 及び $C_L=0.2$ の場合において、吸着床ラインの変位におよぼす \bar{W} の影響を示したもので、Fig. 13 はこの場合のラインに生じる張力の分布を示す。Fig. 12 よりわかるように、 $\bar{W}=0$ の場合に比べ、 $\bar{W}=10$ トンの場合は、ラインの傾斜は著しく減少する。また、Fig. 13 に示す

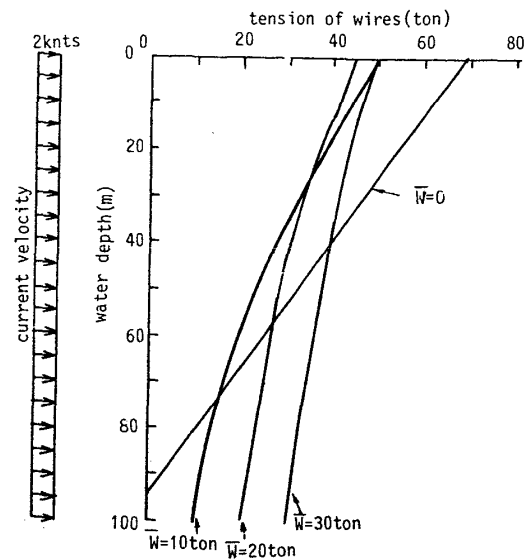


Fig. 13 Tension of ropes hung with adsorbent beds due to uniform current

ように、 $\bar{W}=0$ の場合はラインの傾斜が大きいため、ユニットに働く抗力が大きくなり、吸着床上部の張力が増大する。

3.2.2 システムの波浪による応答

前節の波浪中の模型実験の解析に用いた波浪外力が吸着床の各ユニットに作用するとして、以下の吸着床及びそれを吊るす浮体の上下揺、係留ラインの張力等を調べた。

吸着床は、前述の $\bar{W}=10$ トンの場合を対象として考えることにした。それを吊るす浮体は、外径が 10 m、甲板部の内径 5 m、底部の内径 8 m、浮体単独のときの吃水 3 m、水線面積 45 m^2 、排水量 114 トンとした (Fig. 1)。

浮体の甲板にあるウインチの稼動及び作業船からの吸着床ユニットの回収及び設置の作業を容易にするため、係留力を大きくして極力浮体の移動が小さくなるようにする必要があるが、ここでは係留系のばね定数 K を 10 トン/m とした。

吸着床を吊るした浮体の上下揺の運動方程式は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} & (W/g + M_B)\ddot{\xi} + N_B\dot{\xi} + \rho/2 \cdot A_w \bar{C}_D(\dot{\xi} - w) \\ & \cdot |\dot{\xi} - w| + C_B\xi \\ & = F \cos(\omega t + \epsilon_H) + \mu_x T_V - \mu_{x0} T_{V0} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、

ξ : 浮体の上下揺 (下方を正), W : 浮体の重量, M_B : 浮体の付加質量, N_B : 浮体の減衰係数, $C_B = \rho g A_w + K$, A_w : 浮体の水線面積, K : 係留ラインのばね定数, μ_{x0}, μ_x : T_{V0} 及び T_V の鉛直軸に対する方向余弦, F 及び ϵ_H : 波力の片振幅 (下向を正) 及び波に対する位相差, \bar{C}_D : 浮体の粘性抵抗係数 (1.5), T_{V0}, T_V : 吸着床を吊るすロープの上端の静的張力及び動的張力 (静的張力を含む). M_B, N_B, F は特異点分布法により求めた。

(3)式は数値的に次のように求めた。ロープの静的平衡

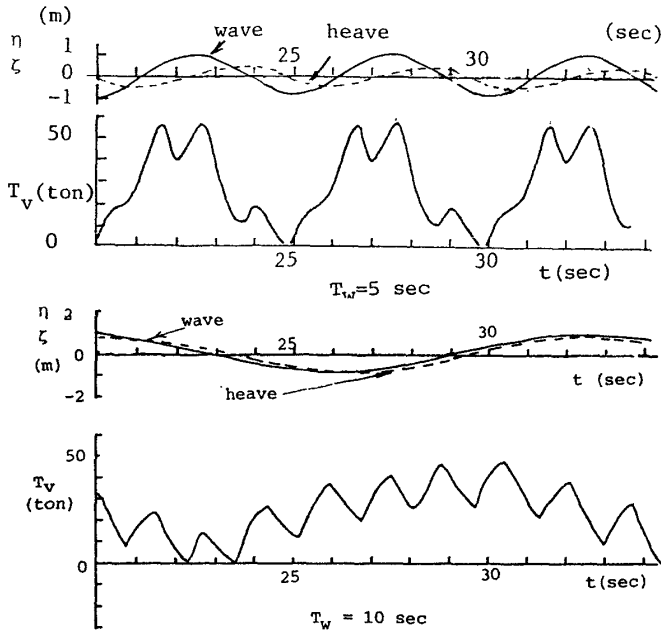


Fig. 14 Time history of tension of ropes hung with adsorbent beds and heave of the cylindrical buoy in regular waves for the designed system

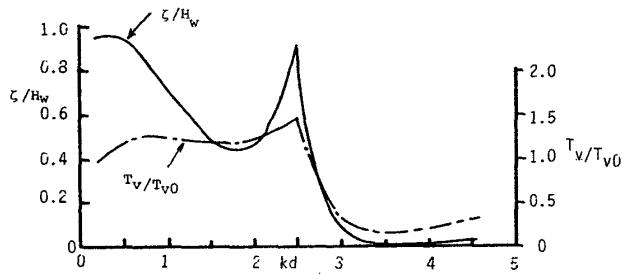


Fig. 15 Tension of ropes hung with adsorbent beds and heave of the cylindrical buoy in regular waves for the designed system

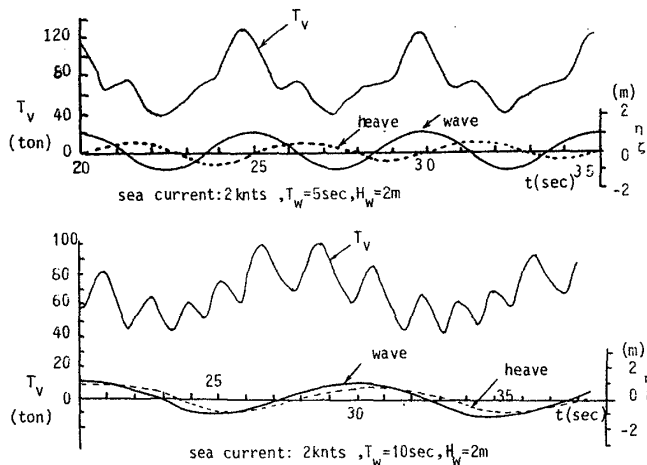


Fig. 16 Time history of tension of ropes hung with adsorbent beds and heave of the cylindrical buoy in sea current and regular waves for the designed system

Table 1 Maximum expectation of tensions in mooring lines and in ropes hung with adsorbent bed units in ocean waves

maximum expectation	mooring tension(ton)	tension of ropes hung with beds(ton)
1/3	69	237
1/10	89	289
1/100	112	352
1/1000	134	413

状態を初期値とし、ランブド・マス法⁹⁾と時間積分法(Newmark β 法⁹⁾)を組合わせ、或る時刻の $\mu_x T_v$ 及び吸着床を吊るすロープの上端の垂直変位を求める。この $\mu_x T_v$ を(3)式に代入し、Newmark β 法でその時刻の ζ を求める。求めた ζ をロープ上端の垂直変位として再び $\mu_x T_v$ を求める。この繰り返し計算により ζ の収束値を求め、この ζ を初期値として次の時間ステップの ζ を同様な計算で求める。この計算においてロープの伸び剛性を12,560トンとした。

Fig. 14 は波高 2m, $T_w=5$ 秒及び 10 秒の場合の動的張力 T_v と、上下揺 ζ の時間変化を示したものである。このときの T_v の初期値である T_{v0} は 23 トンである。Fig. 15 は T_w の変化による ζ/H_w 及び単位波高当たりの T_v/T_{v0} を示したもので、横軸の kd は波数に浮体の外径をかけた無次元値である。このように、 $K=10$ トン/m では $kd < 2.5$ において $0.4 < \zeta/H_w < 1$ の範囲にありユニットの上下揺はかなり生じている。また、この範囲の kd の動的張力は静的張力の約 1.0~1.5 倍となる。Table 1 は係留ラインの変動張力を $T_n = K\zeta$ として表わし、有義波高 15m, 波周期 13 秒としたときの T_n 及び T_v の最大期待値を示している。

Fig. 16 は、海流 2 ノットの中で規則波 ($H_w=2m, T_w=5$ 秒, 10 秒) が作用したときの T_v 及び ζ の時間変化を示したもので、この計算の初期値は Fig. 12 及び Fig. 13 の $\bar{W} = 10$ トンの値を用いている。

4. システムの評価

4.1 吸着模型実験

アミドキシム型繊維吸着材のウラン吸着性能は、Fig. 17 に示すように縦軸に吸着率 β (吸着材 1gf 当たりのウラン吸着重量 (mgf)) をとり、横軸に吸着日数をとって表わしている。●印は繊維吸着材を直径 3cm のシリンダ内に入れ、 $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ の海水 (濃度 3 ppb) を 0.85 cm/sec の割合でポンプで送給した場合の吸着率を示し、実線はそれらの平均値を表わす。この性能は吸着材の内部まで海水が透過した場合の値である。しかし、吸着材を吸着床ユニットに入れた場合は、海水が吸着材の中を透過する量が減少し、吸着材の性能は $\bar{\eta}$ (%) (ウラン回収率とよぶことにする) に低下

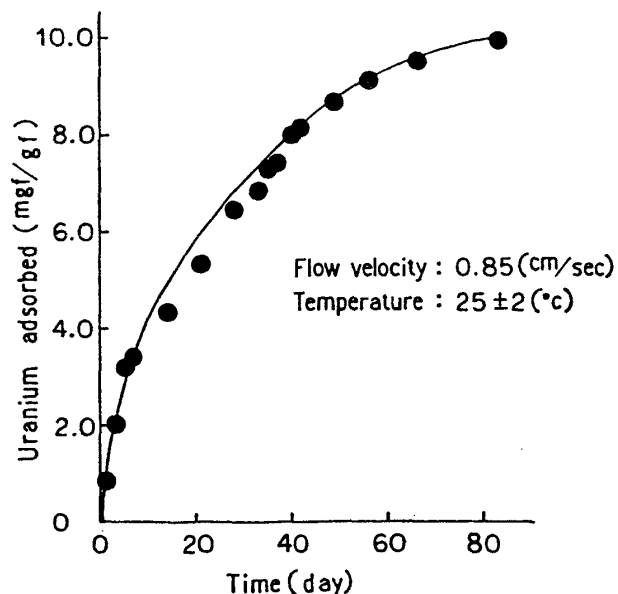


Fig. 17 Adsorption rate of uranium from sea water

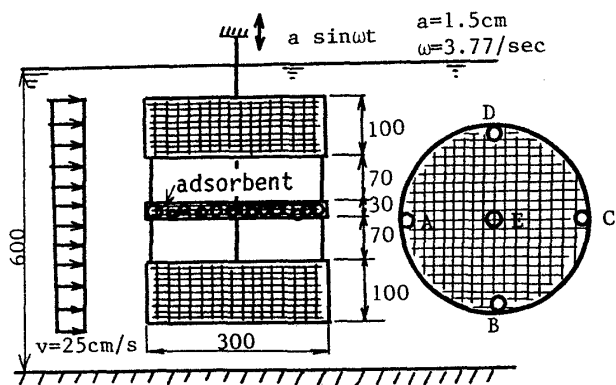


Fig. 18 Adsorption experiment using spherical type of amidoxime fiber adsorbent by adsorbent bed model under uniform flow and heave motion in seawater

Table 2 Adsorption experiment by adsorbent bed model using spherical type of amidoxime fiber adsorbent

measured point	adsorption of uranium ($\mu\text{gf/gf}$)
A	448
B	496
C	351
D	361
E	425

する。この $\bar{\eta}$ を求めるため、次のような模型実験を行った。

Fig. 18 に示すように、3個の吸着床ユニットの模型を7 cm 間隙でロープで結び、上部及び下部のユニットは前節で用いた模型 (直径 30 cm, 厚さ 10 cm) をそのまま使い、中央のユニットは直径 30 cm, 厚さ 3 cm とし、ユニットに

は 2 mm のメッシュのネットで覆い、中に球径 5~7 mm のアミドキシム型繊維球状吸着材を充填率 $\alpha=0.065$ gf/cm^3 で入れた。この吸着床模型を幅 60 cm, 深さ 60 cm の水路にロープで吊りし、 $21^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ の海水を 25 cm/sec で流し、波浪による吸着床の上下揺を模擬して、ロープの上端を周期 1.67 秒, 両振幅 3 cm で上下揺させ、7 日間連続して吸着実験を行った。吸着実験後、中央の吸着床ユニット内の吸着材の中央層において、Fig.18 に示すようなユニットの外周部 A, B, C, D 及び中央部 E 点の吸着材を取り出し、吸着したウランを計量した。Table 2 は、吸着材 1 gf 当たりのウラン吸着量 (μgf) を示す。これによれば、各点の吸着材はほぼ均一な吸着をしていることがわかる。これらの吸着量は吸着材のもつ性能の約 20% 程度である。

4.2 ウラン採取コストの概算

前述のように吸着模型実験によるとウラン回収率 $\bar{\eta}$ (%) は 20% であるが、これは実機の約 1/10 の模型で、しかも流速は 25 cm/sec と非常に小さい。実機では海流 2 ノット、波高 2 m の海域を想定しているが、実機の $\bar{\eta}$ は海流の強さ及び波力の効果等によって異なるので、本節では $\bar{\eta}=10\% \sim 60\%$ の場合を想定して採取コストの概算を行った。

吸着床ユニットの回収は 4 台のウインチ (巻上速度 12 m/sec, 最大巻上力 20 トン) で行なう。作業船は Fig. 2 に示すように、100 個の吸着床ユニットを収容できる甲板をもち、1000 トンの塩酸槽を有するようになる。前節の寸法の吸着床ユニットにおいては、1 条の吸着床に充填される吸着材が 24.5 トンとなり、その脱着液は吸着材重量の約 25% (6.1 トン) 必要である。作業船が 1000 トンの塩酸水を有すれば、 $1000 \text{ トン} / 6.1 \text{ トン} = 164$ 条分の吸着床の脱着処理ができ、1 条の処理時間 H (回収, 脱着, 再設置) が 10 時間と設定すれば約 68 日間の周期で塩酸水の補給を要する。作業船の主寸法は、長さ 60 m, 幅 9 m, 深 7.5 m, 載貨重量 2,000 トンと設定して、その建造費を算定した。

ウラン採取コストの概算においては、システムは 1 隻の作業船と、それがうけもつ浮体 (1 個の浮体に 1 条の吸着床を吊るす) N_s 個で構成する場合を対象に考えた。

4.2.1 年間のウラン採取量

吸着床ユニットの容積を V (m^3), 1 条当たりのユニットの個数を n , ユニットに充填される吸着材の充填率を α とすれば、1 条の吸着床に充填される吸着材の重量 W_a (トン) は $\alpha n V$ となる。吸着床ユニット内のウラン回収率を $\bar{\eta}$ (%) とし、 a 日での吸着率を β (mgf/gf) とすれば、 a 日間に 1 条の吸着床に吸着されるウランの重量 (トン) は $\bar{\eta}/100 \cdot \beta \cdot W_a/1000$ となる。

吸着床は a 日間海中に吊りした後、回収・脱着・再設置を行う吸着サイクルを考える。作業船が N_s 条の吸着床を連続して処理し、 a 日後に再び同じ吸着床の処理ができるためには N_s 条件の処理時間 $N_s \cdot H$ (H : 1 条当たりの処理時間) が $24 a$ 時間になるようにすればよい。したがって N_s

$=24a/H$ となる。作業船の年間作業日数を S とすれば、年間ウラン採取量 U は

$$U = \bar{\eta}/100 \cdot \beta \cdot W_a/1000 \cdot N_s \cdot S/a \text{ (トン)}$$

となる。ここで $S=300$ 日と仮定した。

4.2.2 システムの年間運転費

システムの年間運転費 C は、吸着材の補給費 C_1 、ユニットの補修費 C_2 、浮体の補修費 C_3 、脱着液費 C_4 、人件費 C_5 、作業船の動力費 C_6 、作業船維持費 C_7 の和とする。

C_1 は、吸着材の補給量を1回の脱着につき稼働吸着材の $\delta_A(\%)$ とし、吸着材の単価を p (円/トン) とすれば次式で与えられる。

$$C_1 = \delta_A/100 \cdot W_a \cdot N_s \cdot p \cdot S/a \text{ (円)}$$

ここに、 $p=770,000$ 円/トン

C_2 は、吸着床ユニットの総額の $\delta_u(\%)$ とすれば、

$$C_2 = a_A \cdot n \cdot N_s \cdot \delta_u/100 \text{ (円)}$$

ここに、 a_A : ユニットの単価 (500,000 円)

$$\delta_u(\%) = 5\%$$

C_3 は、浮体の総価格の $\delta_b(\%)$ とすれば、

$$C_3 = a_B \cdot N_s \cdot \delta_b/100 \text{ (円)}$$

ここに、 a_B : 浮体の単価 (100,000,000 円)

$$\delta_b(\%) = 5\%$$

C_4 は、吸着材の重量の25%の塩酸水が脱着液として使用され、塩酸水の単価を a_c (円/トン) とすれば、

$$C_4 = 0.25 W_a \cdot N_s \cdot S/a \cdot a_c \text{ (円)}$$

ここに、 $a_c=5,000$ 円/トン

C_5 は、人員数 n_M 、単価 a_H とすれば、

$$C_5 = n_M \cdot a_H \text{ (円)}$$

ここに、 $n_M=20$ 人、 $a_H=10,000,000$ 円/年/人

C_6 は、燃料単価 a_F (円/トン)、燃料消費量を v_F (gf/時/馬力)、動力(HP)を P_H とすれば、

$$C_6 = 24S \cdot v_F \cdot P_H \cdot a_F \times 10^{-6} \text{ (円)}$$

ここに、 $P_H=2,000$ HP、 $v_F=120$ gf/時/馬力、 $a_F=5000$ 円/トン

C_7 は、作業船の建造費 F_1 の $\delta_s(\%)$ とすれば、

$$C_7 = \delta_s/100 \cdot F_1 \text{ (円)}$$

ここに、 $\delta_s(\%) = 5\%$

4.2.3 システムの設備費及びウラン採取コスト

システムの設備費 F は、作業船の建造費 F_1 、吸着床の価格 $F_2 = a_A \cdot n \cdot N_s$ 、吸着材費 $F_3 = W_a \cdot N_s \cdot p$ 、浮体の価格 $F_4 = a_B \cdot N_s$ の和で与えられる。ここで $F_1 = 3 \times 10^9$ 円とする。

1 kgf のウランを採取するコスト C_U (円/kgf) は、次式となる。

$$C_U = (qF + C)/(1,000U) \text{ (円/kgf)}$$

ここに、 U : 年間ウラン採取量 (トン)、 q : システムの年減価償却率 (年金利4%、20年返済として0.0628)

以上の条件のもとに、 $\delta_A=10\%$ として C_U 、 U を求めたものが Fig. 19 である。ここに、 C_A 、 C_E 、 C_R はそれぞれ年間における吸着材費、装置費、運転費がしめる割合を示し

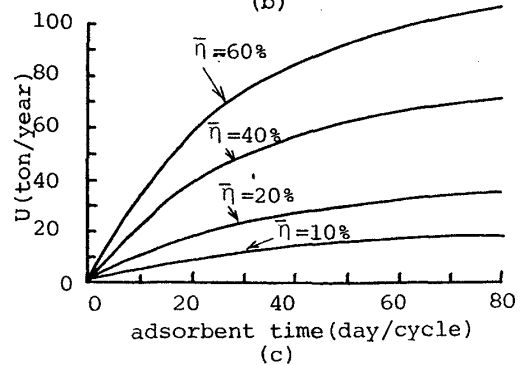
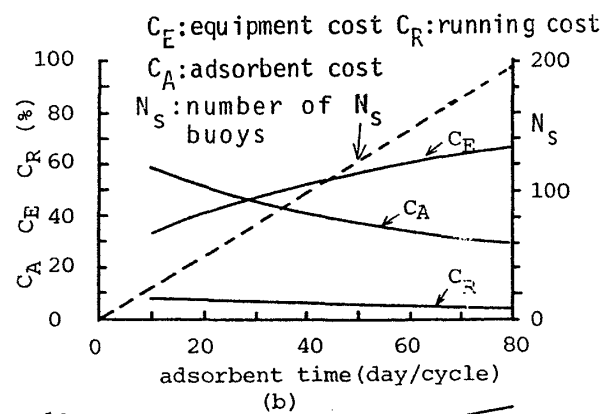
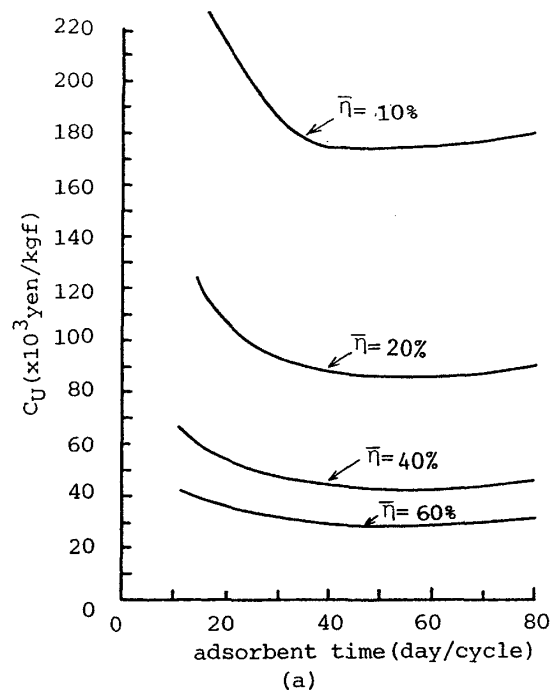


Fig. 19 Cost estimation of uranium extraction ($\delta_A=10\%/cycle$)

たものである。Fig.20 は $\delta_A=5\%$ とした場合の C_U 及び C_A 、 C_E 、 C_R 等を示している。 $\delta_A=5\%$ の場合の U 及び N_s は $\delta_A=10\%$ の場合と同様である。Fig.19 及び Fig.20 において、横軸の吸着日数 a が小さくなれば、脱着回数が増加するため吸着材の補給費が増大して採取コスト C_U が高くなり、一方 a が大きくなれば、浮体の数 N_s が増加し、また、吸着率 β が飽和状態になるので C_U がやや増加する。 a が

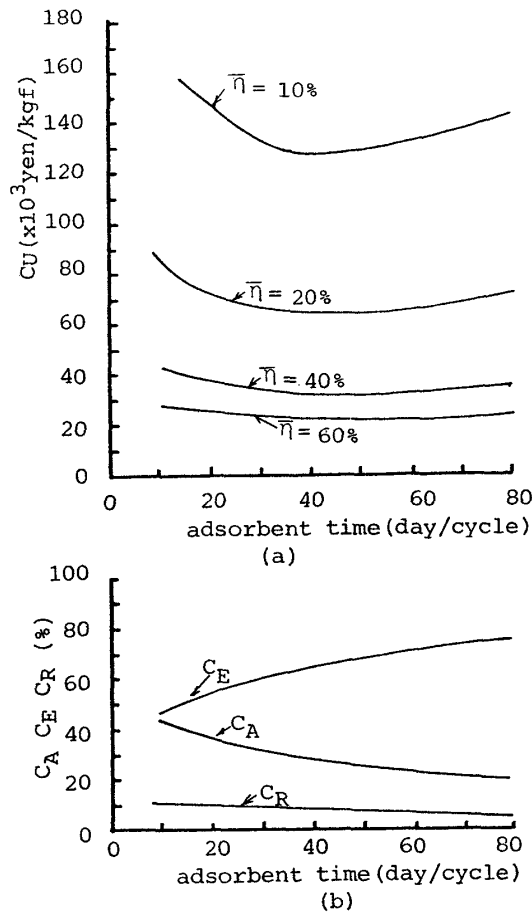


Fig. 20 Cost estimation of uranium extraction ($\delta_A=5\%/cycle$)

増加すれば β が増加するため、ウラン採取量 U は増加する。 C_A, C_E, C_R の比率は Fig.19 及び Fig.20 の (b) に示すように、横軸の a が減少すれば N_S の減少により C_E は減少し、 C_A は吸着材の補給が増大するため増加する。運転費 C_R は一定で、約 10% を占める。Fig.19 及び Fig.20 において、 C_U の最小値はほぼ $a=40$ 日付近になっているが、海水中の吸着床への生物付着による回収率の低下を考えれば、 a は 40 日以下が適当とも考えられる。 a が 20 日以下になれば、吸着材の補給費が増大すると共に、ウラン採取量 U の低下のため、ウラン採取コスト C_U の増加は著しくなる。

Table3 は $\bar{\eta}=10\%, \delta_A=10\%$ の場合の C 及び F の内訳、並びに C_U 及び U の値等を各 a の値に対して示している。

過去ウランの市場価格は最高 66 ドル/kgf・ウラン程度になったが、海水ウラン採取の採算性を考えるとき、本システムの採取コストは $\bar{\eta} \geq 40\%$ において市価の数倍となる。

5. 結 言

海流及び波力の自然エネルギーを利用した浮体式海水ウラン採取システムの概念設計について述べ、そのシステムの構造体及び吸着床の海流及び波浪に対する応答を模型実験により調べ、実験値と計算値を比較した。これらの両者が良好な対応をしていることを確認し、実海域でのシステムの海流及び波浪に対する応答特性を調べた。

次に、システムの吸着床模型による吸着実験を行い、ウ

Table 3 Cost estimation of uranium extraction ($\bar{\eta}=10\%, \delta_A=10\%/cycle$)

adsorption day		a	20	40	60	80
adsorption of uranium(mgf/gf)		$\beta \cdot \bar{\eta}$	0.55	0.8	0.9	1.0
number of buoys		N_S	48	96	144	192
total adsorbent weight(ton)		$N_S W_a$	1176	2352	3529	4705
running cost of system per annum (10^9 yen/year)	compensation of adsorbent	C_1	1.357	1.357	1.357	1.357
	maintenance of adsorbent beds	C_2	0.12	0.24	0.36	0.48
	maintenance of buoys	C_3	0.24	0.48	0.72	0.96
	elution	C_4	0.022	0.022	0.022	0.022
	personnel	C_5	0.2	0.2	0.2	0.2
	fuel oil	C_6	0.0086	0.0086	0.0086	0.0086
	maintenance of supply ship	C_7	0.15	0.15	0.15	0.15
	total	c	2.0979	2.4579	2.8179	3.1779
equipment cost(10^9 yen)	supply ship	F_1	3.0	3.0	3.0	3.0
	adsorbent beds	F_2	2.4	4.8	7.2	9.6
	adsorbent	F_3	0.9048	1.8	2.71	3.62
	buoys	F_4	4.8	9.6	14.4	19.2
	total	F	11.1048	19.2096	27.3143	35.4191
extraction weight of uranium per annum(ton/year)		U	9.7	14.1	15.9	17.6
extraction cost of uranium(10^3 yen/kgf-uranium)		C_U	216	174	177	180

$W_a=24.5$ ton/buoy

ラン採取コストの概算を各種のパラメータを設定して行い、本システムの実用化に関する検討資料を作成した。

今後に残された問題は次のような項目が挙げられる。

(1) 大型吸着床による吸着実験を行い、吸着床ユニットの形状、ユニットの間隔、吸着材の充填率、流速、ユニットの上下動等とウラン回収率 η との関係を調べる。

(2) 吸着材の入った吸着床ユニットを数日間海中に吊した場合、ユニット及びその中の吸着材にどの程度海洋生物が付着するかを調査するとともに、それらがウラン回収率の低下におよぼす影響を調べる。これについては、大型吸着床モデルによる吸着実験と平行して行う必要がある。

以上の項目を研究するため、大型水槽の水路に生海水を流し、その中に吸着材を充填した吸着床を吊して吸着実験を行う計画をしている。

本研究は、文部省科学研究費補助金により実施されたものである。

文 献

- 1) 加藤俊作：アミドキシム基を含有する繊維の調整とウラン吸着性，日本化学会誌，(1982,2)，1449
- 2) M. J. Driscoll, F. R. Best : System studies on the extraction of uranium from seawater, MIT-EL81

- 038, MITNE-248 (1981)
- 3) 尾方 昇：海水ウラン採取における吸着工程の概念設計，コスト及び感度解析，日本海水学会誌，39-5 (1986)
- 4) Bo Bjork, Per Vallander : Recovery of uranium from seawater using wave power and floating offshore units, International Meeting on Recovery of Uranium from Seawater, Tokyo, Japan, (1983)
- 5) 堀田 平, 中川績一郎, 宮崎武晃外：波力利用海水ウラン回収システムについて，第2回波浪エネルギー利用シンポジウム，海洋科学技術センタ (1987)，233
- 6) 為広正起, 信川寿, 菅坡和彦, 加藤俊作外：海流と波力を利用した海水ウラン採取システム，第2回波浪エネルギー利用シンポジウム，海洋科学技術センタ (1987)，225
- 7) 平井達雄, 坂田則彦外：海流利用型海水ウラン吸着採取システムの開発，日本海水学会誌，42-1(1988)，7
- 8) 岡崎守男, 田門 肇, 山本卓司：海流利用型海水ウラン吸着採取システムの概念設計，日本海水学会誌，45-1 (1988)，257
- 9) John M. Biggs : Structural Dynamics, McGraw-Hill Ins., 1980, 30