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2)

正員 信 川 寿* 正員 道 本 順 一*
 正員 小 林 正 典** 正員 中 川 寛 之**
 榊 原 実 雄*** 高 木 憲 夫***
 正員 為 廣 正 起****

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

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

Summary

The adsorbent bed system proposed in the 1st report consists of large number of units which are the thin disk cartridges enclosed in nets, and the each unit is arranged below the sea surface in horizontal layers by suspending ropes hung from a buoy.

In this paper, the possibility of the following operating system is discussed. The units filled with fiber ball type-adsorbent are controlled in inclined position against sea current by the winches installed on a buoy so that sea current may permeate the units. When the units are collected on the buoy and also rearranged underwater, the units are controlled in horizontal position so as to maintain the smooth operations of system by reducing the horizontal displacement of the units through decreasing the drag forces of units due to sea current.

The uranium adsorption test using the model unit reduced to a scale of 1/10 was carried out in the test channel of uniform flow of sea water through 21 days. On the other hand, the flow distribution in the unit was calculated and the uranium adsorption of the adsorbent enclosed in the unit was simulated numerically. A good agreement can be seen between the measured and simulated uranium adsorptions.

1. 緒 言

前報において、海水が吸着材の中を容易に透過できるように周囲を網で覆った薄い円盤状の吸着床を用い、この中に吸着材 (球状繊維型)²⁾を密封した状態で吸着・回収・脱着の一連の作業を行うカセット方式の吸着床ユニットを提案した。そして、このユニットを適正な間隔で海中の深さ方向にロープで多段に連結した1条の吸着床を浮体から吊るして海中に設置する海水ウラン採取システムの概念設計

を行った。さらに、システムの海流および波浪による応答および採取コストの概算を行い、本システムの有効性を示した¹⁾。

吸着床ユニットは水平な層状に配列するよりも、海流の方向に対して傾斜させたときの方が、ユニットの上下面の圧力差が大きくなり、ユニット内への海水の透過が増大するので、吸着効率は向上すると考えられる。しかしながら、ユニットが傾斜した場合、海流からうける抗力が増加して吸着床の水平変位が増大するためユニットの回収および再設置の作業が困難になるとともに異常海象時に浮体の係留ラインおよび吸着床を吊るすロープの張力が過大になる恐れがある。

このような問題点に対する対策として、吸着稼働時以外の場合は、1条の吸着床 (ユニット全体) を吊るすロープ

* 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

**** 東海大学

のうち、海流に対する風上側および風下側の長さを浮体の甲板上のウインチで制御してユニットを水平に保持することにより、ロープに生じる張力およびユニットの水平変位を軽減する方法が考えられる。

本報告では、ウインチでこれらの両側のロープの長さを制御することにより、ユニットの傾斜と海流によって生じるロープの張力および吸着床の変位を制御できることを示し、また異常海象時のロープの張力および係留ラインの張力を軽減できることを数値計算例で示した。さらに、一様流中にユニットが傾斜して設置されている場合のユニット周辺の圧力分布を求めて、ユニット内の吸着材を透過する海水の流速分布を数値シミュレートした。そして透過する海水流量と吸着率から吸着ウラン量を推定し、別途行った吸着模型実験によって吸着されたウラン量との対応を調べた。

2. 吸着床ユニットの傾斜の制御

前述のように、吸着稼働時はユニットを海流の方向（水平方向）に対して傾斜させて、ユニット内への海水の透過効率をあげ、その他の場合はユニットに作用する海流による抗力を減少させるためにユニットの姿勢を水平に保つように吸着床全体を吊るすロープの風上側および風下側の長さをウインチで制御するシステムを考える。以下にそれらのロープの長さやユニットの傾斜角との関係を求める。これは、静的平衡状態での関係式であるが、ウインチの操作を非常にゆるやかに行なえば、ユニットの傾斜及びロープの張力はほぼ静的解析が適用でき、ウインチの制御による過渡現象は支配的にはならないと考えられる。この過渡現象については別途検討することにする。

2.1 吸着床全体を吊るすロープの長さや吸着床ユニットの傾斜角およびロープの張力

Fig. 1 のように、各吸着床ユニットは4本のロープで連結されており、海流 v の方向に対して風上側および風下側のロープを同図中のように定義する。

Fig. 1 Control ropes hung with adsorbent beds

海流に対する吸着床ユニットの変位を求めるに当たり、Fig. 2 に示すように座標軸を取る。すなわち、ウインチでロープを支持している水平面 AD の方向に X 軸、また水深の方向に Y 軸をとり、2 次元の静的問題として取り扱う。また、同図中に示すように、BC を最上部のユニットの中央面にとり、ユニットには上方から下方に番号 1, 2, ..., N を付す。そして、 $AD=2a$, $AB=l'_0$, $DC=l''_0$, $BC=d$, $\angle DAB=\theta_0$, $\angle ABC=\theta_1$, $\angle BCD=\theta_2$, $\angle CDA=\theta_3$, また、ユニット番号 n と $n-1$ 間における長さおよび張力をそれぞれ l_{n-1} および T_{n-1} (T_0 においては風上側および風下側をそれぞれ T'_0 および T''_0 とする) とする。

いま、ユニット n には、次式に示すような抗力 R_{Dn} と揚力 R_{Ln} が、その中心に作用しているとする。

$$R_{Dn} = \rho A C_D v^2 / 2, \quad R_{Ln} = \rho A C_L v^2 / 2 \quad (1)$$

ここに、 ρ : 海水の密度、 v : 海流の流速、

C_D, C_L : 抗力および揚力係数、

$$A = A_X \sin \theta_n + A_Y \cos \theta_n,$$

$$A_X = \pi d_0^2 / 4, \quad A_Y = d_0 h,$$

d_0, h : 吸着床ユニットの直径および厚さ、

θ_n : 流れの方向とユニットのなす角度。

そして、(1) の力の X 軸および Y 軸方向の成分をそれぞれ R_{Xn}, R_{Yn} とする。また、ユニット n の水中重量を W_n とする。

Fig. 2 において、四角形 ABCD の各辺の長さが一定とすれば四角形の変形の幾何学的関係より次式が成り立たなければならない。

$$X \text{ 軸方向成分: } l'_0 \cos \theta_0 - d \cos(\theta_0 + \theta_1) + l''_0 \cos \theta_3 - 2a = 0$$

$$Y \text{ 軸方向成分: } l'_0 \sin \theta_0 - d \sin(\theta_0 + \theta_1) - l''_0 \sin \theta_3 = 0$$

上式を整理すれば、それぞれ次式となる。

Fig. 2 Coordinate system of adsorbent beds

$$l_0' \cos \theta_0 - d \cos \theta_0 \cos \theta_1 \\ + d \sqrt{(1 - \cos^2 \theta_0)(1 - \cos^2 \theta_1)} + l_0'' \cos \theta_3 - 2a = 0 \quad (2)$$

$$l_0' \sqrt{1 - \cos^2 \theta_0} - d \cos \theta_1 \sqrt{1 - \cos^2 \theta_0} \\ - d \cos \theta_0 \sqrt{1 - \cos^2 \theta_1} - l_0'' \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3} = 0 \quad (3)$$

また, Fig. 2 において, ユニット 1 から下方の部分の X 軸方向および Y 軸方向の力の釣合およびモーメントの釣合より次式を得る。

$$X \text{ 軸方向: } \sum_{j=1}^N R_{Xj} + T_0'' \cos \theta_3 - T_0' \cos \theta_0 = 0 \quad (4)$$

$$Y \text{ 軸方向: } \sum_{j=1}^N (R_{Yj} + W_j) - T_0'' \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3} \\ - T_0' \sqrt{1 - \cos^2 \theta_0} = 0 \quad (5)$$

$$\text{モーメント: } T_0'' (\sqrt{(1 - \cos^2 \theta_0)(1 - \cos^2 \theta_1)(1 - \cos^2 \theta_3)} \\ - \cos \theta_1 \cos \theta_3 \sqrt{1 - \cos^2 \theta_0} - \cos \theta_0 \cos \theta_3 \sqrt{1 - \cos^2 \theta_1} \\ - \cos \theta_0 \cos \theta_1 \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3}) - T_0' \sqrt{1 - \cos^2 \theta_1} = 0 \quad (6)$$

(2)~(6) より, T_0' , T_0'' , $\cos \theta_0$, $\cos \theta_1$, $\cos \theta_3$ が求められる。

これらを解くにあたり, $x_0 = \cos \theta_0$, $x_1 = \cos \theta_1$, $x_3 = \cos \theta_3$ の記号で表し, (4), (5) より T_0' , T_0'' を求めれば,

$$T_0' = \{ \sqrt{1 - x_3^2} \sum_{j=1}^N R_{Xj} + x_3 \sum_{j=1}^N (R_{Yj} + W_j) \} / (x_0 \sqrt{1 - x_3^2} \\ + x_3 \sqrt{1 - x_0^2}) \quad (7)$$

$$T_0'' = \{ x_0 \sum_{j=1}^N (R_{Yj} + W_j) - \sqrt{1 - x_0^2} \sum_{j=1}^N R_{Xj} \} / (x_0 \sqrt{1 - x_3^2} \\ + x_3 \sqrt{1 - x_0^2}) \quad (8)$$

(7), (8) を (6) に代入して整理すれば,

$$(\sqrt{(1 - x_0^2)(1 - x_1^2)(1 - x_3^2)} - x_0 x_1 \sqrt{1 - x_3^2} \\ - x_1 x_3 \sqrt{1 - x_0^2} - x_0 x_3 \sqrt{1 - x_1^2}) \\ \times \{ x_0 \sum_{j=1}^N (R_{Yj} + W_j) - \sqrt{1 - x_0^2} \sum_{j=1}^N R_{Xj} \} \\ - \sqrt{1 - x_1^2} \{ \sqrt{1 - x_3^2} \sum_{j=1}^N R_{Xj} + x_3 \sum_{j=1}^N (R_{Yj} + W_j) \} = 0 \quad (9)$$

(2) を x_0, x_1, x_3 で表し, x_3 を求めると,

$$x_3 = 2a/l_0'' + x_0 x_1 d/l_0'' - l_0' x_0 / l_0'' \\ - d/l_0'' \cdot \sqrt{(1 - x_0^2)(1 - x_1^2)} \quad (10)$$

となり, また (3) を x_0, x_1, x_3 で表せば,

$$l_0' \sqrt{1 - x_0^2} - l_0'' \sqrt{1 - x_3^2} - d(x_1 \sqrt{1 - x_0^2} + x_0 \sqrt{1 - x_1^2}) \\ = 0 \quad (11)$$

のようになる。(10) の x_3 を (9) と (11) に代入して得られる 2 式より, x_0 および x_1 を求めるに当たり, 陽な数式の形で解を得ることは困難であったので, ニュートン・ラプソン法により数値計算で求めることにした。

以上のような方法で, x_0, x_1, x_3 が求められ, それを用いてユニット 1 の風上側および風下側のロープの位置の座標 (X_1' , Y_1') および (X_1'' , Y_1'') が次式から得られる。

$$X_1' = l_0' x_0, \quad Y_1' = l_0' \sqrt{1 - x_0^2}, \\ X_1'' = l_0' x_0 - d \{ x_0 x_1 - \sqrt{(1 - x_0^2)(1 - x_1^2)} \}, \quad (12)$$

$$Y_1'' = l_0' \sqrt{1 - x_0^2} - d(x_1 \sqrt{1 - x_0^2} + x_0 \sqrt{1 - x_1^2})$$

また, ユニット 1 の X 軸および Y 軸に対する方向余弦をそれぞれ λ_1 および μ_1 とすれば,

$$\lambda_1 = (X_1'' - X_1')/d, \quad \mu_1 = (Y_1'' - Y_1')/d \quad (13)$$

となる。

海流 v の X 軸および Y 軸に対する方向余弦を λ_v, μ_v とし, ユニット n の方向余弦を λ_n, μ_n とすれば, 両者のなす角 θ_n は,

$$\theta_n = \cos^{-1}(\lambda_n \lambda_v + \mu_n \mu_v) \quad (14)$$

で与えられる。この θ_n を用いて (1) の R_{Dn} , R_{Ln} は求められる。

一方, 吸着床ユニット n より下方の部分の X 軸方向および Y 軸方向の力の釣合より, 次式を得る (Fig. 2)。

$$X \text{ 軸方向: } \sum_{j=n}^N R_{Xj} - 2T_{n-1} \sqrt{1 - \mu_{n-1}^2} = 0 \quad (15)$$

$$Y \text{ 軸方向: } \sum_{j=n}^N (R_{Yj} + W_j) - 2T_{n-1} \mu_{n-1} = 0 \quad (16)$$

ここに, μ_{n-1} はユニット $n-1$ と n を結ぶロープの Y 軸に対する方向余弦である。また, ユニット $n-1$ と n 間のロープの長さを l_{n-1} , 風上側および風下側のロープの張力を T_{n-1} とする。(15), (16) より μ_{n-1} および T_{n-1} を求めれば次のようになる。

$$T_{n-1} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sum_{j=n}^N R_{Xj})^2 + (\sum_{j=n}^N (R_{Yj} + W_j))^2}, \\ \mu_{n-1} = \sum_{j=n}^N (R_{Yj} + W_j) / (2T_{n-1}) \quad (17)$$

また, 吸着床ユニット n の風上側および風下側のロープの位置の座標 (X_n' , Y_n') および (X_n'' , Y_n'') は次式のように表される。

$$X_n' = X_{n-1}' + \bar{\lambda}_{n-1} l_{n-1}, \quad Y_n' = Y_{n-1}' + \bar{\mu}_{n-1} l_{n-1}, \\ X_n'' = X_{n-1}'' + \bar{\lambda}_{n-1} l_{n-1}, \quad Y_n'' = Y_{n-1}'' + \bar{\mu}_{n-1} l_{n-1} \quad (18)$$

ここに, $\bar{\lambda}_{n-1}$ はユニット $n-1$ と n を結ぶロープの X 軸に対する方向余弦であり, $\bar{\lambda}_{n-1} = \sqrt{1 - \bar{\mu}_{n-1}^2}$ と表される。

以上により, すべてのユニットの風上側および風下側の座標は求められる。ただし, (1) で与えられる R_{Dn} および R_{Ln} の計算において, 計算の最初の段階では θ_n は未知であるので仮定した値を用いる。そして, (14) で新たに θ_n が求められると, これを用いて再び一連の計算を繰り返して上記座標を求め, これらの座標値が収束するまで繰り返して計算する。

2.2 数値計算例

Fig. 3~Fig. 5 は, 次を示す値に対して吸着床の変位および張力を計算したものである。

$$N = 100, \quad l_1, l_2, \dots, l_{N-1} = 1 \text{ m}, \\ W_i (i = 1, 2, \dots, n-1) = 0.13 \text{ ton}, \\ W_N = 10 \text{ ton}, \quad a = 2.5 \text{ m}, \quad d_0 = 4 \text{ m}, \\ h = 0.3 \text{ m}, \quad C_D = 1 \text{ (ユニットが傾斜状態)}, \\ C_L = 0.2 \text{ (ユニットが傾斜状態)},$$

$C_D=0.5$ (ユニットが水平状態),
 $C_L=0.1$ (ユニットが水平状態),
 $v=1\text{ m/sec}$ (一様流).

Fig. 3 は, $l'_0=10\text{ m}$, $l''_0=10\text{ m}$ にして, ほぼ吸着床ユニットを水平に保持した場合で, ロープの張力は $T'_0=108\text{ kN}$, $T''_0=105\text{ kN}$ となっている。Fig. 4 は $l'_0=10\text{ m}$, $l''_0=8\text{ m}$ として吸着床ユニットを傾斜させた場合で, 傾斜角

Fig. 3 Displacement and tension of ropes hung with adsorbent beds controlled in horizontal position ($l'_0=10\text{m}$, $l''_0=10\text{m}$)

Fig. 4 Displacement and tension of ropes hung with adsorbent beds controlled in inclined position ($l'_0=10\text{m}$, $l''_0=8\text{m}$)

は最上部のユニットで 30 度, 最下部で 20 度となり, $T'_0=201\text{ kN}$, $T''_0=204\text{ kN}$ となっている。Fig. 5 は $l'_0=10\text{ m}$, $l''_0=7\text{ m}$ としてさらに吸着床ユニットの傾斜角を増加させた場合で, 最上部および最下部のユニットの傾斜角はそれぞれ 40 度, $T'_0=265\text{ kN}$, $T''_0=274\text{ kN}$ となっている。これらはともに一樣な 1 m/s の海流中における計算結果であり, 傾斜角の増加とともにロープの張力が増加することがわかる。また逆に, 吸着床の傾斜をなくするように風上側および風下側のロープを制御することにより, 海流によるユニットの変位およびロープの張力は減少させることができる。

次に, 吸着床の傾斜をなくした状態での波浪による応答を調べてみる。浮体は水深 150 m のところで 4 点係留し, 係留ラインの長さは 500 m とする。そして, 風上側の係留

Fig. 5 Displacement and tension of ropes hung with adsorbent beds controlled in inclined position ($l'_0=10\text{m}$, $l''_0=7\text{m}$)

Fig. 6 Dynamic spring constant of mooring lines of a buoy with an adsorbent bed system controlled in horizontal position

Table 1 Expectation of maximum tension of mooring lines and ropes hung with an adsorbent bed system in ocean waves

maximum expectation	tension of a mooring line (kN)	total tension of ropes hung with beds (kN)
1/3	612.0	774.0
1/10	705.0	924.0
1/100	818.0	1106.0
1/1000	928.0	1283.0

significant wave height = 15 m

wave period = 13 sec

ラインに 274 kN の静的張力が作用し、その他の係留ラインには 160 kN の静的張力が作用している場合を考える。これは、1 m/s の海流の中で吸着床および浮体に作用する水平力、浮体に作用する風速 60 m/s の水平風荷重、波高 15 m、波周期 13 秒の波浪中で浮体に作用する漂流力を考慮したときの係留ラインの静的張力である。このように係留したときの係留ラインの動的ばね定数の値を Fig. 6 に示す。これを用いて、前報と同様の方法で、有義波高 15 m、波周期 13 秒の異常海象のときのロープに作用する全張力および係留ライン（風上側）の張力の最大値の期待値を計算した。その結果を Table 1 に示す。なお、吸着床を吊るす浮体は前報と同様（外径 10 m、深さ 6 m、排水量 114 トン）としている。Table 1 に示すように、吸着床ロープに作用する全張力および係留ライン（1 本当たり）に生じる張力の 1/1000 期待値はそれぞれ 1283 kN および 928 kN となる。これらの張力の 1/1000 期待値は、前報に示したユニットが傾斜した場合に比べ減少している。このことはユニットの傾斜をなくさせるようにロープを制御することによって波浪中においても有利となることがわかる。なお今回の張力の計算結果は、システムの設計において許容できる範囲内にある。

3. 吸着床ユニット内の吸着材を透過する 海水の流速とウラン吸着量

3.1 吸着模型実験

吸着床ユニット内でのウラン吸着特性を調べるため、実験機の約 1/10 の吸着床ユニット模型（直径 30 cm、厚さ 5 cm）に球状繊維吸着材（球の直径 0.5～0.7 cm、繊維径 5 デニール²⁾）を充填率（吸着材の質量／ユニットの容積）0.137 g/cm³ で入れたものを用いて、一様流中で吸着実験を行った。ただし、吸着材はアミドキシム化（吸着材繊維にアミドキシム基を付し、ウランを選択的に吸着する機能を付加する）した吸着材が不足したため、充填した吸着材のうち 54.7% がアミドキシム化したもので残りはアミド

キシム化していない模擬吸着材を用いた。

一様流の方向およびそれと直交する方向におけるユニットの横断面内の吸着量を計測するため、Fig. 7 に示す計測

Fig. 7 Model of adsorbent bed unit and measured points of adsorption

Fig. 8 Uranium adsorption rate in an adsorbent bed unit at measured point 1

点1, 2, 3, 4, 5の位置で、それぞれユニットの厚さ方向に上, 中, 下の3点の合計 $5 \times 3 = 15$ 個所の計測点を設定した。吸着実験は、幅50 cm, 水深50 cmの水路に一樣流速($v = 27$ cm/s)の生海水(海水温度 $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$)を連続21日間流し、この中にユニットを流れに対して30度の傾斜(風

Fig. 9 Uranium adsorption rate in an adsorbent bed unit at measured point 2

Fig. 10 Uranium adsorption rate in an adsorbent bed unit at measured point 3

Fig. 11 Uranium adsorption rate in an adsorbent bed unit at measured point 4

上側が下方)を与えて設置し、7日おきに上記に設定した15点の個所から吸着材ボールを抽出してウラン吸着量を計測した。この抽出した吸着材ボールは再びユニット内へは返さないで7日おきに計測箇所近傍のボールを順次抽出して吸着量を計測する方法とした。Fig. 8~Fig. 12に各計測点における吸着量の計測結果を示す。7日おきに計測した単位質量当たりの吸着材のウラン吸着量($\mu\text{g/g}$) (●:上部, ▲:中部, ■:下部)は位置によりかなりばらつきがあるが、ユニット周辺部の風上側(計測点1)で大きくなる傾向を示し、ユニットの厚さ方向の吸着量の分布の傾向は顕著に表されていない。なお、海から採取した海水のウラン濃度は3 ppbであるが、本模型実験では、タンクに入れた海水をユニットを設置した水路を通して循環させながら、新しい海水をタンクに補給しているため、海水のウラン濃度は2.8 ppb ($2.8 \times 10^{-9} \text{g/cm}^3$)に低下している。

3.2 ユニット内の吸着材中を透過する流れの流出量とウラン吸着量

吸着実験における吸着量と、ユニット内の吸着材の中を

Fig. 12 Uranium adsorption rate in an adsorbent bed unit at measured point 5

Fig. 13 Distribution of pressure around an adsorbent bed unit at an angle of 30 degree against uniform flow

透過する流速分布との対応を, Fig. 7 に斜線部①②③④で示す中央面に着目して2次元計算により調べる。

(1) ユニットまわりの圧力分布

まず, 吸着床ユニットまわりの圧力分布を推定するために, Fig. 7 の①②③④での部分を取り出し, Fig. 13 に示すようにユニットの上面を x 軸, 風上側のユニット側面上に y 軸をとり, 一様流 ($v=27$ cm/s) 中で, 30 度の傾斜をしているときのユニット周辺の圧力分布を有限要素法により解析した。要素は三角形要素とし, x 軸および y 軸上ではそれぞれ 20 分割および 4 分割となっており, ユニット周辺の流場の分割要素の総数は 670 個である。また, ユニットは固体とみなした。Fig. 13 は計算されたユニット周辺の圧力分布を示したものである。

(2) ユニット内を透過する海水の流出量

次に, この圧力分布をもとにして, ユニット内の吸着材を有孔体とみなして, ユニット内の吸着材中を透過する流速を解析する。

一般に有孔体内の流体の運動の基礎式は Darcy の法則³⁾と連続の方程式で表される。非圧縮性流体の連続の方程式は, x, y 座標で表される2次元流場において, 次式で表される。

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (19)$$

ここに, $v_x = -\partial\phi/\partial x$, $v_y = -\partial\phi/\partial y$ で, v_x および v_y はそれぞれ x 軸および y 軸方向の速度成分を表し, ϕ は速度ポテンシャルである。(19)を速度ポテンシャル ϕ で表せば,

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (20)$$

となる。また, Darcy の法則は次式で表される。

$$v_x = -\frac{\kappa}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad v_y = -\frac{\kappa}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (21)$$

ここに, κ : 有孔体の透過率, μ : 海水の粘性係数,
 p : 有孔体内の流体の圧力。

したがって, (21)より, $\phi = px/\mu$ となるから, (20)は次式となる。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 0 \quad (22)$$

模型実験におけるユニット内の吸着材中を海水が透過するときの κ/μ は, (21)より次のようにして求めた。Fig. 14 に示すように, アミドキシム化した球状繊維吸着材を直径 6 cm, 高さ 50 cm のシリンダー内に充填率 0.137 g/cm³の割合で入れ, 海水を透過させる。この場合の海水流量, 海水が吸着材層を透過する入口と出口の圧力差を計測すれば, κ/μ は次式で求められる。

$$\kappa/\mu = \frac{QL}{S(P_1 - P_2)} \quad (23)$$

ここに, Q : 海水の流量, $P_1 - P_2$: 圧力差,

L : 吸着材の積層厚さ, S : シリンダーの断面積。

(23)より κ を求めれば, 1.07×10^{-5} (cm²) となる。

(22)を解くことにより, 有孔体内の圧力分布を求めることができる。なお, 計算を行うときの周辺条件としては Fig. 13 の圧力分布を用いた。(22)を差分式で解き, p の分布を求め, (21)により v_x および v_y を求め, これらを合成した速度分布は Fig. 15 のように描かれる。また, Fig. 16 はユニット周辺から流入および流出する流速分布を示したものである。これより, ユニット上面および両側面から海水が流入し, 底辺から透過海水が流出し, その流出量は 1.8 cm³/s となる。

(3) ユニット内のウラン吸着量

ユニット内を透過する海水流速分布, すなわち海水の透

Fig. 14 Measurement of permeability coefficient of adsorbent fiber ball

Fig. 15 Distribution of flow velocity in an adsorbent bed unit set at an angle of 30 degree against uniform flow

Fig. 16 Distribution of flow velocity around the surface of an adsorbent bed unit

過流量が前節において既知となり、その透過流量の中に含まれるウランの何%が吸着されたかが推定できれば、ユニット内で吸着されたウランの量が計算できる。そこで、以下において、ユニット内の吸着材を透過する海水中のウランの濃度の変化を解析する。

ユニットを透過する海水は、Fig. 16で述べたように、ユニットの上面から下面へ流れると考えることができる。そしてユニット内の海水中のウラン濃度分布は、次に示す拡散方程式⁴⁾を満たすと仮定する。すなわち、

$$\frac{\partial C}{\partial t} = B \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v \frac{\partial C}{\partial y} - kC \quad (24)$$

ここに、 C ：ユニット内の吸着材内を流れる海水中のウラン濃度、

v ：ユニット内の海水の流速、

B ：拡散係数、

k ：海水中のウランが吸着材によって吸着されて、海水中のウランが消失する係数、

t ：時間、

y ：ユニットの上面から下面方向にとる座標。

(24)を簡単に解くため、次の仮定を設ける。Fig. 8に示すように、ウランの吸着には長時間を要し、吸着量は準定常的に増加する。吸着実験において吸着量の計測は7日目、14日目及び21日目に行っている。そこで、各計測日の近傍においては、時間に影響する(24)の左辺は無視できるものとし、また右辺の拡散の項は透過流速及び吸着材によって吸着される影響の項に比べて省略できるとすれば、(24)は次式となる。

$$v \frac{dC}{dy} + kC = 0 \quad (25)$$

(25)の解は次式となる。

$$C/C_0 = \exp(-ky/v) \quad (26)$$

ここに、 C_0 ：ユニット上面から流入する海水中のウラン濃度。

いま、ユニット下面($y=h$)から流出する海水中のウラン濃度を C_1 とすれば、

$$C_1/C_0 = \exp(-kh/v) \quad (27)$$

となる。

ユニット内を透過した海水中のウランが吸着材によって

吸着される割合は $(1-C_1/C_0)$ となる。また、これは、Fig. 7に斜線で示す単位幅のユニットを考えれば、ユニット底面の単位長さ当たりの割合となる。

ユニット内における $(1-C_1/C_0)$ を求めるには、吸着材の吸着性能を表わす係数 k を求める必要がある。その k は吸着材固有の係数で、吸着材を透過する流速には影響されないと考えられる。そこで、次のようにしてこの吸着材の k を求めた。Fig. 14に示すシリンダ内にすべてアミドキシム化した吸着材(充填率 0.137 g/cm^3)を入れ、 0.92 cm/sec の流速でウラン濃度 3 ppb ($3 \times 10^{-9} \text{ g/cm}^3$)の海水を透過して27日間の吸着実験を行い、Fig. 17の結果を得た。これよりわかるように、吸着日数の増加とともに●印で示す吸着量は増加するが、その増加率はしだいに減少する。したがって、透過する海水の中に含まれるウランが回収される割合は、▲印で示すように吸着日数とともに減少する。すなわち、吸着日数7日間においては、透過する海水中に含まれるウランの98%が吸着されていて、その吸着量は $440 \mu\text{g/g}$ であるが、吸着日数が21日になると、海水中に含まれるウランが吸着される割合は72%に低下し、その場合の吸着量は $720 \mu\text{g/g}$ となる。▲印を結ぶ曲線は $(1-C_1/C_0) \times 100(\%)$ の実験値を示す。この曲線から各吸着日数における C_1/C_0 を求め、これらを(27)に代入して各吸着日数における k を計算すれば、Fig. 17において点線で示すような曲線となる。これよりわかるように、 k は吸着量 ($\mu\text{g/g}$) の増加に伴って減少する。

Fig. 18はユニットの底面から流出する海水中に含まれるウランが吸着材に回収される割合 $(1-C_1/C_0)$ を(27)を用いて計算したものである。ここで k は、Fig. 8～Fig. 10における各計測点の上中下の吸着量の平均値に対する k をFig. 17から求めた。すなわち、吸着日数7日では平均吸着量が $191 (\mu\text{g/g})$ となり、これに対する k は 0.09 となる。吸着日数21日では平均吸着量 $602 (\mu\text{g/g})$ に対する k は 0.04 となる。また v はFig. 16に示すユニットの底面に分布する値を用いている。

単位幅の2次元ユニットの底辺の単位長さ当たりの吸着材の分布量は 5 cm (ユニットの厚さ) $\times 1 \text{ cm}$ (ユニット底辺の単位長さ) $\times 1 \text{ cm}$ (ユニットの単位幅) $\times 0.137 \text{ g/cm}^3$ (充填率) $\times 0.547$ (アミドキシム化した吸着材の比率) $= 0.375 \text{ g}$ となる。

前述したようにユニットの吸着実験では、ユニットに流入する海水のウラン濃度は 2.8 ppb である。この海水がユニットを透過したときは、Fig. 18に示す $(1-C_1/C_0)$ の割合で海水中のウランが吸着材により回収される。すなわち、7日目において、ユニットの底面の単位面積当たりのウラン吸着量(単位質量の吸着材当たりのウラン吸着量)は、ユニットの底面の単位面積から流出する透過海水の流速 $v(\text{cm/s}) \times 7 \text{ 日} \times 3600 \text{ 秒} \times 24 \text{ 時間} \times 1(\text{cm}^2) \times 2.8 \times 10^{-9}(\text{g/cm}^3) \times (1-C_1/C_0)/0.375(\text{g})$ で算出される。このよ

Fig. 17 Uranium extraction rate from sea water for the experiment of adsorption in a cylinder

Fig. 18 Calculation of uranium extraction rate from sea water in the unit

Fig. 19 Distribution of uranium adsorption rate along bottom of an adsorbent bed unit

うな計算により、吸着日数7日及び21日の場合の2次元ユニットの底辺にそってのウラン吸着量($\mu\text{g/g}$)をFig. 19に実線で示す。また、Fig. 19に示す●印、▲印、■印は2次元ユニットに相当する一様流れの方向のユニットの横断面における風上側(計測点1)、中央(計測点2)、風下側(計測点3)での、それぞれのユニットの厚さ方向の上部、中部、下部での吸着量の計測値をFig. 8～Fig. 12から抜粋して示したものである。これによれば、実線で示す吸着量の推定値と計測値の対応は、かなり良好である。

4. 結 言

前報において、システムの概念設計および採取コストの概算を行い、引き続き本報では、吸着・回収・脱着等の作業性の改善方法を示し、また実機の約1/10モデルの吸着床ユニットに球状繊維吸着材を充填して吸着実験を行うとともに、これに対する数値シミュレーションを実施した。得られた結果を要約すると以下のようになる。

(1) 一様流の海流の中に、薄い円盤状をした周囲を網で覆った吸着床ユニットを層状に配列し、システムが吸着稼働時には、このユニットを傾斜させて、海流のユニット内の透過効率を良くし、ユニットの回収、再設置などの吸着以外の作業時にはユニットを水平に保持して海流による吸着床の水平変位を小さくして、それらの作業を容易にす

るとともに、異常海象時には吸着床を水平に保持して、吸着床を吊るすロープの最大張力を小さくしてシステムの稼働性を向上させる方法を示した。

(2) 二次元一様流れの中に吸着床ユニットを30度の傾斜角で設置した場合、ユニットの上面および側面から海水が流入し、底面より流出する。

(3) 二次元ユニット内の吸着材の中の透過流速を多孔質体内を流れる場合に適用されるDarcyの法則を用いて求め、さらに拡散方程式よりユニット内の透過海水のウラン濃度を求めてウラン吸着量を推定した結果と吸着模型実験により得られた吸着量とはかなり良く対応していた。

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。

参 考 文 献

- 1) 信川 寿, 為広正起, 小林正典, 中川寛之, 橋原実雄, 高木憲夫: 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), 日本造船学会論文集, 165号(1989), 281.
- 2) 加藤俊作外: 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.
- 3) 日本機械学会編: 機械工学便覧, A 5, (1987), 41.
- 4) 伊藤清三: 拡散方程式, 紀伊国屋書店, (1979), 4.