

# モール状捕集材を用いた 海水ウラン捕集システムの提案

## RECOVERY SYSTEM FOR URANIUM FROM SEAWATER USING BRAID TYPE ABSORBENT

清水隆夫<sup>1</sup>・玉田正男<sup>2</sup>・瀬古典明<sup>3</sup>・坂口勇<sup>4</sup>

Takao SHIMIZU, Masao TAMADA, Noriaki SEKO, Isamu SAKAGUCHI

<sup>1</sup>正会員 工修 電力中央研究所我孫子研究所環境科学部 (〒277-0094 千葉県我孫子市我孫子 1646)

<sup>2</sup>工博 日本原子力研究所高崎研究所材料開発部 (〒370-1292 高崎市綿貫町 1233)

<sup>3</sup>工修 日本原子力研究所高崎研究所材料開発部 (〒370-1292 高崎市綿貫町 1233)

<sup>4</sup>農博 電力中央研究所我孫子研究所応用生物部 (〒277-0094 千葉県我孫子市我孫子 1646)

The density of uranium in the seawater is only  $3.3 \text{ mg/m}^3$ , but its total amount 4.5 billion tons is 45,000 times of annual demand of nuclear fuel in the world. The target of this study is the cost-down of the collection of the uranium from the sea to three times of the market price and cheaper than the recycle fuel by nuclear reprocessing. In this study, the high performance adsorbent deformed to the race is proposed with its mooring system, and the feasibility of the cost down is shown in the Kuroshio influenced basin offshore the west coast of the Okinawa Island, based on the field test on the adsorption ratio of uranium and the quantity and kind of the adhered creature and the water channel test on the drag force on the adsorbent due to waves and currents.

*Key Words* : Uranium, adsorbent, sea water, mooring, drag force

### 1. はじめに

海水中には  $3 \text{ mg/m}^3$  という極低濃度ではあるがウランが溶存しており<sup>1)</sup>, その総量は 45 億トンにも達する. この海水ウランは全世界で 1 年間に消費される発電用ウラン 10 万トンの 45,000 倍に相当する. 海水ウランを鉱山ウランの価格の 3 倍以下のコストで捕集するシステムを開発すれば, 今後数十年で枯渇すると予想されている鉱山ウランの代替として, 使用済み燃料を再処理するよりも安いエネルギー源を確保することができる<sup>2)</sup>.

海水ウランを吸着して集める捕集材の研究は古くから行われているが, 捕集効率が悪い, 捕集材の強度が低いなどの理由で実用化には至らなかった. しかし, 日本原子力研究所は放射線グラフト重合法といういわゆる接木法によって高性能で実用的な捕集材を開発した<sup>3)</sup>. これは丈夫なポリエチレンの基材に放射線を当てて生じたラジカル活性種を出発点として重合反応を開始し, アミドキシム基というウランやバナジウムを選択的に吸着する枝を取り付けたものである.

吸着されたウランを分離するときには塩酸をかけて溶かし出し, 捕集材は中和処理して再使用できる.

次に問題となるのが, 捕集材をいかに大量の海水と接触させるかである. 海水を汲み上げて懸け流す方法<sup>4)</sup> も検討されたが, 海水ポンプを動かす電気が大量に必要となり, 実用化しなかった. そこで, 直接海域に捕集材を係留する次のような方法が提案された<sup>5)</sup>. まず, 不織布状に成型した捕集材を網状のスペーサーで挟むように積層したカセットをつくる. これを, 厚さ 40cm, 直径 4m の円盤型ステンレス製の籠に収納して吸着床とする. これは海水が通りやすくしかも捕集材の充填密度を上げる方法として考えられたものである. この吸着床を直径 10m の円筒形ブイから 1m 間隔で 100 床吊り下げるというものである. この方式の海域実証試験が青森県関根浜沖で行われ, 海水ウラン 1kg の捕集に成功した.

しかし, 須郷ら<sup>6)</sup> のコスト評価によれば, 捕集材 125kg を収納する籠 1 個が 685kg, 円筒形ブイが 50 トン, チェーンが 24 トン, シンカーが 320 トンとなり, 捕集材 1kg あたりで 37kg もの係留資材が必要となる.

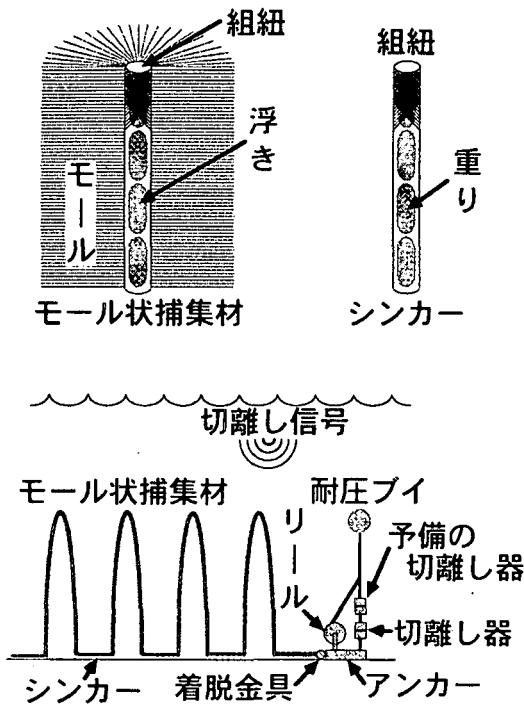


図-1 モール状捕集材と係留方法の概念図

そのため、係留コストが総コストの8割を占め、海水ウランのコストは鉱山ウランの価格の5倍～10倍となっている。

本研究の目的はウラン捕集材の係留コストを大幅に軽減する新しいシステムを提案することにある。

## 2. モール状捕集材と係留方法

捕集材の係留システムに必要な物量を大幅に削減するために、籠を使わず捕集材自体が自らを海水中に保持する新しい捕集システムとして図-1に示すようなモール状捕集材とその係留方法を考案した。

モール状捕集材は捕集材の繊維をモール状の組紐にしたもので、組紐の中に浮きを内蔵させる。組紐の一部は一定間隔でモールのないシンカー部分とし、その部分は浮きのかわりに重りを組紐に内蔵させる。モール状捕集材とシンカーが交互につながった長大な組紐を大陸棚の海底に設置すると、シンカー部分は海底に着底し、モール状捕集材は立ち上げ係留される。組紐の端は耐圧パイ、リール、切離し器をつけたアンカーにつなぐ。モール状捕集材を回収するときは切離し信号を出して耐圧パイを浮上させこれを手繰って引き上げる。

モール状捕集材を用いた海水ウラン捕集システムは以下のような特長を有する。

- モール状なので、捕集材を格納する籠などが不要で非常に軽く、係留システムが経済的になる。
- 浮きと重りを組紐に内蔵させるので、途中に出っ張りなどがなく巻き取り回収が容易である。

- 海底から立ち上げる係留方式なので、台風などの高波浪や吹送流などの影響を受けにくく、太陽光が届かず藻類が着生しにくい。
- 海面付近にブイなどを設置しないので、船舶の航行に支障を生じない。

技術的に検討を要する課題としては以下の項目が上げられる。

- 1) サイトの選定
- 2) 捕集効率の確認
- 3) 付着生物の検討
- 4) 係留システム的设计

そこで、サイトを選定して現地海域試験を行い、捕集効率と付着生物を調査し、実験水路で捕集材に架る抗力を調べ係留システムに必要なフロートとシンカーの重量を見積もった。

## 3. 現地海域試験

### (1) 試験の概要

モール状捕集材の捕集効率は水温が高いと向上することが明らかになっている<sup>7)</sup>ので、試験海域として黒潮が流れる沖縄西岸海域とした。恩納村漁協の協力を得て、恩納村沖約3km、水深100mの地点に試験片を係留した。試験係留システムは図-2に示したように、海底にアンカーと砂袋を設置し、これに繋いだ長さ90mのメインロープの上端に耐圧パイを付けて立上げ係留し、深度10m、50m、90mに試験片を取り付けた。耐圧パイには長さ約20mの案内ロープとその先端に標識パイを付けた。

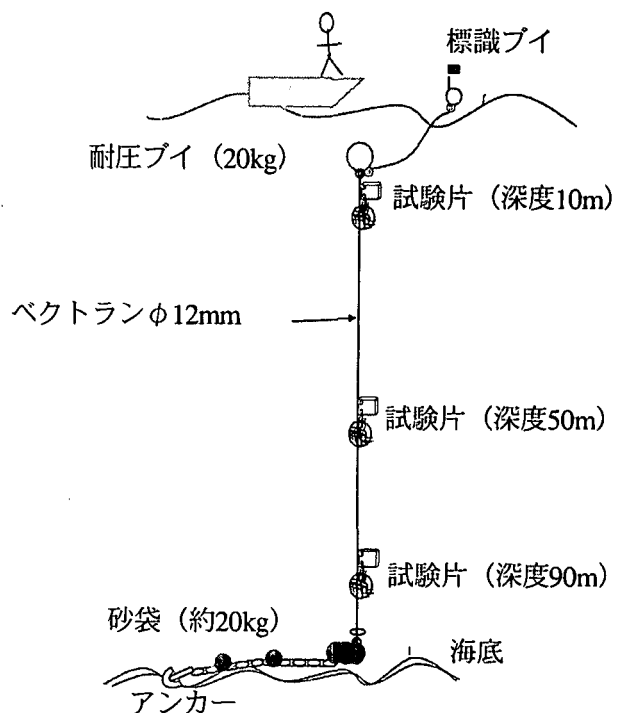


図-2 試験係留システム

試験片としてはウラン捕集量を調べる不織布状捕集材の小切片 (3cm 角), 不織布状捕集材と網状スパーサーを積層したカセット (16cm 角), モール状捕集材の小切片 (長さ 5cm の繊維), 生物付着を調べるためのモール状捕集材の模擬試験体 (長さ 30cm で捕集機能はない) と標準試験片として塩ビ板 (25cm 角) を用いた. なお, この時点でグラフト重合法の最適条件が明らかになっていなかったため, 捕集機能を持たせたモール状捕集材の試験体は参考程度に保留した.

試験は 7 月 24 日から 11 月 5 日まで行い, 途中, 8 月 27 日と 10 月 2 日に試験片の交換を行った. また, Tidbit 水温計による連続観測と ICTD (深度, 水温, 塩分濃度, クロロフィル濃度測定器) を用いた鉛直分布計測を行った. 試験期間中に台風 16 号が沖縄本島に上陸し, 台風 21 号が沖縄近海を通過した.

水温は台風の影響を除くと, 表層で約 27℃~30℃, 底層で約 23℃~25℃であった. 塩分濃度は 33.5psu~34.5psu と高く, 試験地点が外洋性であることがわかる. クロロフィルは 8 月 27 日に深度 60m~80m にピークが現れ, 10 月 2 日には深度 40m~60m にピークが現れた.

## (2) ウラン捕集効率

関根浜沖海域での試験結果と比べるために, 不織布状捕集材の小切片を保留した結果, 深度に係わらず, 図-3 のように約 1 ヶ月で最大約 3 [g-U/kg 捕集材] のウランが捕集された. むつ海域試験では, 7 月, 8 月は約 2 [g-U/kg 捕集材], 6 月が約 1 [g-U/kg 捕集材] であった. これは沖縄海域の水温が深度 100m でも 23~25℃と高かったためと考えられる.

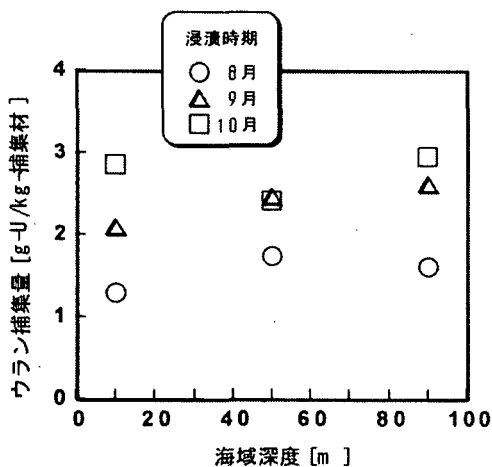


図-3 不織布状捕集材切片のウラン捕集量

不織布状捕集材のセットを保留した結果では, 図-4 のようにウラン捕集量が不織布の端に比べて中心が約半分になった. これは海水がカセットの中心部まで良く通っていないためと考えられる. 捕集効率は平均的

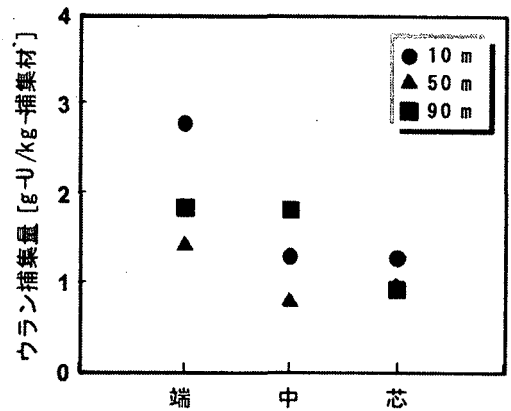


図-4 捕集材ミニカセットのウラン捕集量

表-1 モール状捕集材切片のウラン捕集量

深度 [m]	吸着量 [g/kg]
10	2.33
50	2.20
90	2.65

10/1~11/5 (36日間)

には 1.3 [g-U/kg 捕集材] 程度である.

モール状捕集材の小切片を保留した結果, ウラン捕集量は表-1 のように深度に係わらず約 2.4 [g-U/kg 捕集材] となった. これは不織布状捕集材の切片と同程度, カセットの約 2 倍に相当する.

モール状捕集材の試験片は不織布状捕集材に比べてグラフト率 (アミドキシム基の重量/基材重量) が 1/2, 繊維太さが 3 倍であるため, 不織布状捕集材と同等のグラフト率と繊維太さが実現できれば, 捕集量はさらに多くなると考えられる.

## (3) 生物付着

生物付着の標準的な調査方法である塩ビ板を保留した結果, 深度 10m でヒドロ虫が付着し, 深度 50m, 90m ではほとんど付かなかった. 付着量は表-2 のように平均すると深度 50m 以下では約 1 g/625cm<sup>2</sup> であった.

モール状捕集材の 30cm 長模擬試験片を保留した結果, 写真-1 のように肉眼で観察できる生物の付着は少なかった. 付着生物の湿潤重量は表-3 のように, 1/8 モールあたり最大 5 g 程度であった. 付着生物の大部分は珪藻であった.

塩ビ板の生物付着量を他の海域のデータ<sup>8)</sup> と比較すると, 表-4 のように他の海域の平均値に対して沖縄海域は約 1/10 である. また, フジツボやムラサキイガイのように硬い殻を持つものは着かず, 廃棄物がほとんど出ないことが分かった.

表 - 2 試験板に付着した生物の重量 (湿重量)

調査回次	浸漬期間	水深			平均
		10m	50m	90m	
1	7月24日～8月27日	0.42	1.62	0.21	0.75
2	8月27日～10月2日	4.19	0.65	1.45	2.10
3	10月2日～11月5日	3.80	0.52	欠測	2.16
平均		2.80	0.93	0.83	1.52

g / 625cm<sup>2</sup>

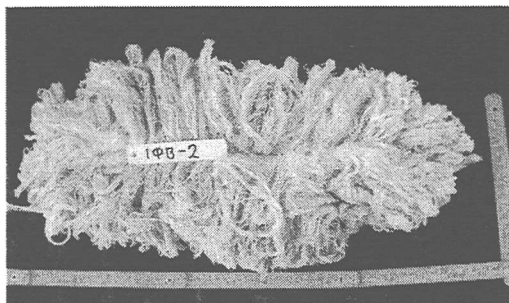


写真 - 1 モール状捕集材への付着状況  
浸漬期間：10月2日～11月5日  
深度 50m

表 - 3 モール状捕集材に付着した生物の湿重量

繊維の断面形状	1/8モールあたり			
	丸型			Y型
浸せき水深	10m	50m	90m	50m
湿重量 (g)	3.73	1.08	1.34	5.10

丸型：繊維の断面が円形

Y型：繊維の断面がY形

表 - 4 試験板に付着した生物の重量 (湿重量) の海域比較

浸漬時期	本調査 沖縄県	越喜来湾 岩手県	東京湾	油壺湾 神奈川県	清水港 静岡県	浜名湖	的矢湾 三重県	浦ノ内湾 高知県	野母湾 長崎県	他の海域
										平均
8月	7	216	1280	160	480	120	616	1920	320	639
9月	67	120	2080	32	656	520	576	432	120	567
10月	61	256	8	200	264	96	336	848	160	271
平均	45	197	1123	131	467	245	509	1067	200	492

(単位はg/m<sup>2</sup>)

#### 4. 水路試験

モール状捕集材の係留システムを設計するためには、捕集材に働く波力と潮流力を評価する必要がある。そのためにも、1/100 縮尺の模型実験を行い、波浪・潮流中での捕集材の挙動と波力・潮流力の特性を把握し、実物のモール状捕集材の抗力試験を行い、両者を合わせて係留力を評価した。

##### (1) 1/100 縮尺模型実験

###### a) 実験方法

1/100 縮尺の水理模型実験は水深 100m に立ち上げ長さ 60m のモール状捕集材を係留すると想定して行った。実験は波と流れを起こすことのできる長さ 50m、幅 90cm、深さ 120cm のガラス張り水路において水深 1m で行った。現時点でモール状捕集材の仕様が決まっていなないので、水中での浮力、流れから受ける力、材料のしなやかさなどを考慮して表-5 に示す 7 種類の模型を製作した。

係留力は水路の底を嵩上げし、その下に埋め込んだ荷重計にモール状捕集材模型の下端をとりつけて測定

した。

実験ケースは流れと波を組み合わせた 7 ケースで実験条件は表-6 のとおりである。実験はフルードの相似則に従って行ったので、流速の縮尺は 1/10、波高の縮尺は 1/100、周期の縮尺は 1/10 である。

###### b) 実験結果

水平係留力の平均値と水平流速の平均値の関係、ならびに水平係留力の振幅と水平流速の振幅の関係を図-5 にケース別、図-6 に模型別に示す。ただし、水平係留力、水平流速ともそれぞれケース 1 の水平係留力と水平流速で正規化されている。

これらの図から、以下のことが分かる。

- 1) 波による係留力の振幅は流速の全振幅と同じ流速の流れによる係留力よりも図-5 中の実線と点線のように 1/5 程度と小さい。
- 2) 波に順流が加わっても係留力の振幅はほとんど変わらず、逆流が加わると係留力の振幅が大きくなる。
- 3) 波による係留力や波と流れによる係留力は模型が異なっても流れによる係留力で正規化できる。

表 - 5 1/100 縮尺模型実験に用いた模型

SR1-2	シリコンゴムチューブ 内径1mm 外径2mm (チューブの両端は密閉した。以下同様)
SR2-3	シリコンゴムチューブ 内径2mm 外径3mm
SR2-4	シリコンゴムチューブ 内径2mm 外径4mm
SR3-5	シリコンゴムチューブ 内径3mm 外径5mm
CR	天然ゴムチューブ 内径3mm 外径5mm
WB	直径1.5mmのリリアン糸に7mm間隔で直径5.6mm の木のビーズを通し、孔に接着剤を充填したもの
SRM	SR2-3に長さ34mmのナイロン糸を 0.8mm 間隔で接着したもの

表 - 6 実験ケースと実験条件

ケース	流れ	波
1	7 cm/s	なし
2	なし	波高10 cm 周期1 sの規則波
3	なし	波高10 cm 周期1.5 sの規則波
4	なし	波高10 cm 周期2 sの規則波
5	なし	波高15 cm 周期2 sの規則波
6	順流 5 cm/s	ケース3の波
7	逆流 7.5 cm/s	ケース3の波

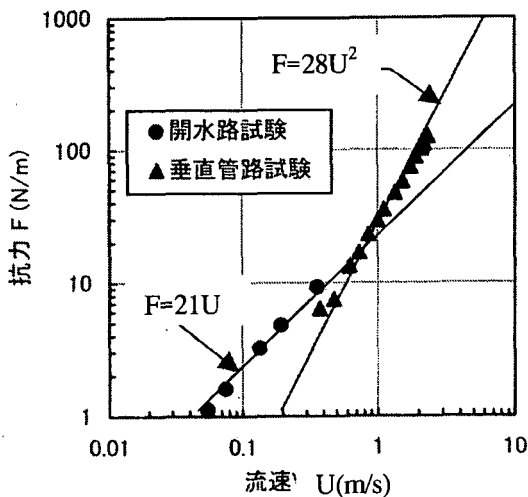


図 - 7 流速Uと抗力Fの関係

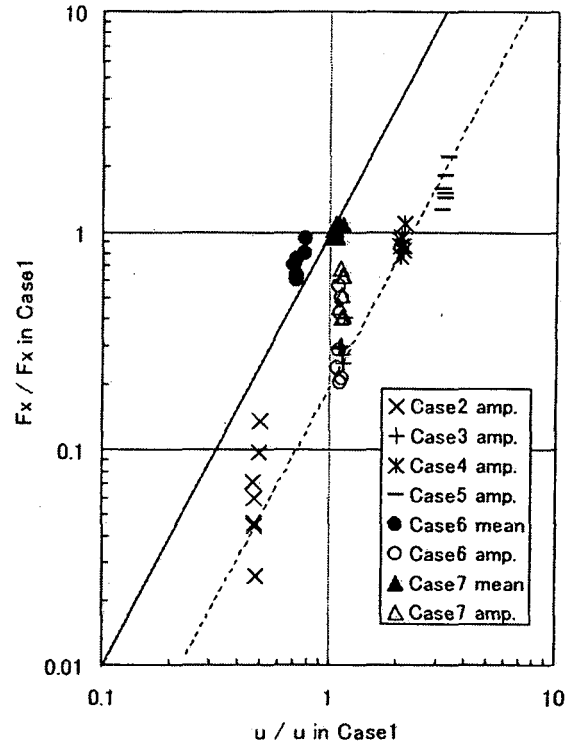


図 - 5 水平流速uと水平係留力Fxの関係  
(ケース別のプロット)

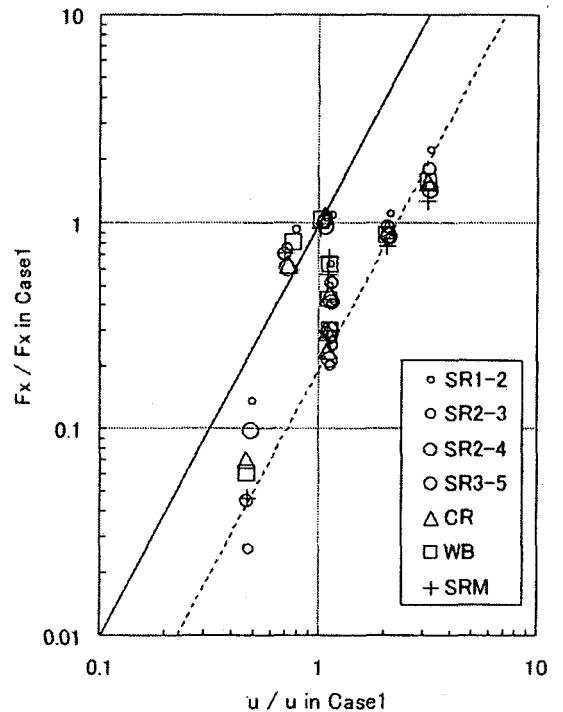


図 - 6 水平流速uと水平係留力Fxの関係  
(模型別プロット)

## (2) モール状捕集材の抗力試験

### a) 実験方法

写真-1 と同じ長さ 30cm モール状捕集材の抗力試験を行った。

低流速については、1/100 縮尺実験と同じ水路の水深を 33cm に下げ、導流壁を設けて水路幅を 33cm にして行った。ここに長さ 30cm のモール状捕集材の試験片をテグスで吊り下げて流れを当てた。抗力は試験片を上流側からテグスで引っ張り、その張力として計測した。

高流速については、垂直管水路内に取付金具でモール状捕集材を固定して実験した。取付金具は片持ち梁になっていて、歪ゲージを張って荷重を測定できるようにしてある。

### b) 試験結果

長さ 30cm の試験片にかかる抗力と流速の関係は図-7 のようになった。抗力は一般に流速の 2 乗に比例するが、モール状捕集材は流速が早くなるに従って流れの後方にすぼんだ形になるため、低流速域では流速のほぼ 1 乗に比例している。

## 5. フロートとシンカーに関する試算

抗力試験の結果に基づいてモール状捕集材係留システムのフロートの浮力とシンカーの重量を以下のように試算した。

まず、フローとの浮力を求める。モール状捕集材の空中重量は  $1.3\text{kg}/\text{m}$  (グラフト率 100% の場合) 程度であるが、海水中では浮きも沈みもせず、ほぼ中立である。この捕集材  $1\text{kg}$  に  $6\text{g}$  のウランが付くとしても、捕集材の水中重量はわずかに  $7.8\text{g}/\text{m}$  である。これに打ち勝って立上げ係留をするためなら、 $30\text{g}/\text{m}$  程度の浮力でよいわけだが、海域には静穏時でも  $10\text{cm}/\text{s}$  程度の流速があるので、静穏時に係留システムが立ち上がっているためには  $100\text{g}/\text{m}$  程度の浮力が必要となる。その場合でも傾斜した係留システムに作用する抗力と浮力のバランスを計算すると鉛直から  $52^\circ$  傾斜する。

次に、荒天時にかかる係留力からシンカーの重量を求める。水深  $100\text{m}$  で海底から  $60\text{m}$  立上げ係留し、これに台風時の吹送流の流速として  $70\text{cm}/\text{s}$  が作用すると仮定すると、上述と同様に係留システムは鉛直から  $75^\circ$  傾斜し、係留力は  $226\text{N}$ 、即ち  $23\text{kg}$  となる。また、周期  $20\text{s}$ 、波高  $10\text{m}$  の波が作用すると仮定すると、図-6 のケース 4 のように係留力はやはり  $23\text{kg}$  となる。これらが同時に作用するとして、係留力を  $46\text{kg}$ 、摩擦係数を  $0.5$ 、安全率を  $6$  とすると、必要なシンカーの重量は  $552\text{kg}$  となる。 $60\text{m}$  の捕集材の重量が  $78\text{kg}$  であるから、捕集材  $1\text{kg}$  あたりのアンカー重量は  $7.1\text{kg}$

になる。これにフロートなどの資材を加えても捕集材  $1\text{kg}$  あたりに必要な物量は  $8\text{kg}$  程度と考えられる。

## 6. まとめ

- (1) モール状捕集材単位重量あたりのウラン捕集量は不織布状捕集材とほぼ同等、単位容積あたりでは不織布状捕集材の 2 倍の捕集量を達成した。
- (2) 平常時の  $10\text{cm}/\text{s}$  程度の流速で立ち上がり、台風などの荒天時には傾斜するような浮力を選ぶことによって、捕集材  $1\text{kg}$  あたりのシンカー等の所要重量を約  $8\text{kg}$  にすることができる。
- (3) 沖縄海域では本州周辺海域と比較して生物付着量が非常に少ない。しかも、ヒドロ虫(腔腸動物)など殻を持たないものがほとんどであるため、フジツボやムラサキガイなどと違って廃棄物としての処理が容易である。
- (4) 以上によって、モール状捕集材を用いた海水ウラン捕集システムの実現可能性が示された。

謝辞：本研究にあたり、日本原子力研究所の須郷高信氏、沖縄電力株式会社の宮城朝順氏、恩納村漁業協同組合の金城重治氏、TBR 株式会社の福井宏海氏、ニチモウ株式会社の阿部清悦氏、橋本産業株式会社の佐野勝章氏、荏原総合研究所の藤原邦夫氏のご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 田伏岩夫、小夫家芳明：海水ウラン採取のための選択的キレート吸着、日本海水学会誌、Vol. 36, pp. 205-217, 1982.
- 2) 平岡徹：海水ウランによる原子力発電、日本原子力学会誌、Vol. 36, pp. 644-645, 1994.
- 3) 片貝秋雄、瀬古典明、川上尚志、斎藤恭一、須郷高信：放射線共グラフト重合法により作成したアミドキシム吸着材の海域での吸着、日本原子力学会誌、Vol. 40, pp. 878-880, 1998.
- 4) 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、Vol. 39, p. 5, 1986.
- 5) 信川寿、為廣正起、小林正典、中川寛之、榊原実雄、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、No. 165, pp. 281-292, 1989.
- 6) 須郷高信・玉田正男・瀬口忠男・清水隆夫・魚谷正樹・鹿島遼一：海水ウラン捕集のコスト評価と実用化に向けての技術課題、日本原子力学会誌、Vol. 43, pp. 1010-1016, 2001.
- 7) Sekiguchi, K., K. Saito, S. Konishi, S. Furusaki, T. Sugo, H. Nobukawa: Effect of Seawater Temperature on Uranium Recovery from Seawater Using Amidoxime Absorbents, Ind. Eng. Chem. Res. Vol. 33, pp. 662-666, 1994.
- 8) 梶原武：海産付着動物の生態と防除に関する研究—研究成果報告書—, 昭和 51, 52 年度 文部省科学研究費補助金総合研究(A), 1978.