

波力利用海水ウラン採取システムの開発

堀田 平 *1 中川賢一郎 *1 村山良孝 *2
芦田英雄 *3 朝田 宏 *4 丸中俊則 *5
小嶋良一 *6 児玉 猛 *7 杉岡 寛 *8
高橋義明 *9

海水ウランを採取する際、その濃度が3ppb と非常に低いため多量の海水を処理する必要があり、その移動を動力によって行くと莫大なエネルギーを消費し、採算が取れない。

そこで波と海流により海水を浮体内の吸着剤と接触させる方式に着目して全体システムの概念設計および実現性評価を行ったところ吸着剤の開発が進み、その吸着性能が今後10倍程度向上すれば有望な事が判った。

本年度より各機関における吸着剤の開発の進展に合わせて採取システムについてもその中心となる吸着浮体に関して、模型実験による海水流入量の推定、浮体の運動計測および計算、係留方式の選定および索張力計測、システムの波浪中における稼働率の推定法の検討、吸着室囲壁への生物付着対策の検討、ウラン回収コストの予測等を行って来たが、これまでに得た結果および今後の本開発の見通しについてここに報告する。

-
- *1 海洋開発研究部
 - *2 三菱重工業株式会社
 - *3 三井造船株式会社
 - *4 石川島播磨重工業株式会社
 - *5 川崎重工業株式会社
 - *6 日立造船堺重工業株式会社
 - *7 住友重機械工業株式会社
 - *8 日本鋼管株式会社
 - *9 動力炉・核燃料開発事業団

Development of a Seawater Uranium Recovery System Utilizing Wave Power

Hitoshi HOTTA*¹, Kenichiro NAKAGAWA*¹
Yoshitaka MURAYAMA*², Hideo ASHIDA*³, Hiroshi ASADA*⁴
Toshinori MURANAKA*⁵, Ryoichi KOJIMA*⁶, Takeshi KODAMA*⁷
Hiroshi SUGIOKA*⁸, Yoshiaki TAKAHASHI*⁹

Because uranium density in seawater is very low, recovery systems using mechanical devices to handle enormous quantities of seawater are uneconomical.

In this paper, a unique seawater uranium recovery system is proposed in which adsorbent is contained in floating offshore structures (adsorbing barges), and seawater/adsorbent contact is enhanced by current and wave motion, requiring no energy supply. A feasibility study based on an initial design of the entire system showed encouraging results and development was begun.

As a first step, studies and experiments, mainly on adsorbing barges, were carried out. The following results were obtained.

- 1) Measurements and calculations in regular waves showed that hull motion in normal sea state is very small.
- 2) As a result of estimation of seawater flow rate through an adsorbing chamber based on measured flow resistance of a model, a flow rate of 1,500 m³/sec was obtained.
- 3) SALM (Single Anchor Leg Mooring) was selected as the best mooring concept for this system and an intermediate buoy with buoyancy of 150 – 300 tons was found to be optimal through model experiments.
- 4) Economic feasibility of the recovery system was reevaluated and it was determined that the proposed system would be competitive and technically feasible, assuming the successful development of the new adsorbent with improved adsorbing capability.

*1 Marine Research and Development Dept.

*2 Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

*3 Mitsui Engineering and Shipbuilding Co., Ltd.

*4 Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

*5 Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

*6 Hitachi Zosen Sakai Heavy Industries, Ltd.

*7 Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

*8 Nippon Kokan K.K.

*9 Power Reactor and Fuel Development Corporation

1. まえがき

海水中には約40億トンと言われる大量のウランが^{1),2)}溶存しており、注目されるようになって久しいが、その商業的規模の回収は未だ実現していない。その理由は、海水中のウラン濃度が3ppb ときわめて薄いため、回収されるウラン量と比べ大量の海水を回収媒体と接触させる必要があり、そのため大量のエネルギー、大規模な装置が必要となって回収ウランのコストを押し上げるからである。例えば、代表的な回収法である吸着法においては、年間1,000トンのウランを回収するためには、回収効率100%としても毎秒10,000トンの海水を吸着剤と接触させる必要があり、その移動を機械的に行えば莫大なエネルギーが必要となる。

そこで著者らは波力を利用して海水と吸着剤とを接触させる方式に着目し、種々の仮定のもとに回収システムの概念設計を行ってウランの回収コストを推算した²⁾。

その結果、現状の10倍程度の10g-U/l-R・10日(10日間に吸着剤1リットル当たり10gのウランを吸着)の吸着速度を有する吸着剤が開発されれば海水ウラン回収が経済的に成立する可能性が高いことがわかった。

一方、吸着剤及びそれよりウランを脱離・製錬するプラントを保持し、吸着剤と海水を接触させる海洋構造物(吸着浮体)を開発する上で問題となる技術的課題もいくつか摘出した。

これまで、著者らは年間1,000トンのウランを回収するシステムを開発する目的で、主として吸着浮体におけるこれらの課題の各々につきフィージビリティスタディおよび試験研究を行って来たがここにその概要を報告する。

2. 吸着浮体

海水中のウランを回収するには、吸着法、共沈法、浮選法、溶媒抽出法など幾つかの方式があるが、ここでは大規模システムとして有望であろうとされている吸着法に着目する。

この吸着法は、有機系もしくは無機系のウラン吸着剤に海水を適当な期間接触させ、その後それに溶離剤をかけてウランを溶離させ、濃縮工程を経たうえイエローケーキを精製するという方法である。

この際に、海水を吸着剤と接触させるのに、海洋に存在するエネルギー、とりわけ波浪および海流のエネルギーを利用できれば回収コストをかなり低減できると考えられる。この方式を用いて、ウランを多量に効率よく回収するための要点は、
(1) 吸着剤の吸着性能(吸着速度、吸着容量、繰り返し使用強度)および価格
(2) 海水の流入量および海水との接触量
(3) 設置方法、稼働率、メンテナンスおよび安全性
(4) プラントの建造費およびランニングコストなどである。

2.1 海洋ウラン吸着方法

波力エネルギーを利用して、吸着室への海水の流入量と、吸着剤と海水との接触量をできるだけ多くするためには、半潜水式海洋構造物の様な波浪動揺応答、特にヒービング、及びローリングが一般的な船舶・バージ等に較べて小さい構造物に吸着室を設けるのが得策である。この構造物のローワーハル間に図1に示すように、上下に網を張った吸着室を固定し、その中にウラン吸着剤を充填し、波浪中に設置すると、ローワーハル部における波粒子の相対運動が大きいため、海水が吸着室に流入し、ウラン吸着剤と接触し、ウラン吸着が行われる事になる。但し、この場合吸着室及び吸着剤の存在により、ローワーハルおよびカラムのみを考慮した場合の流体力特性と異なり、運動特性も異なってくることを考慮しなければならない。

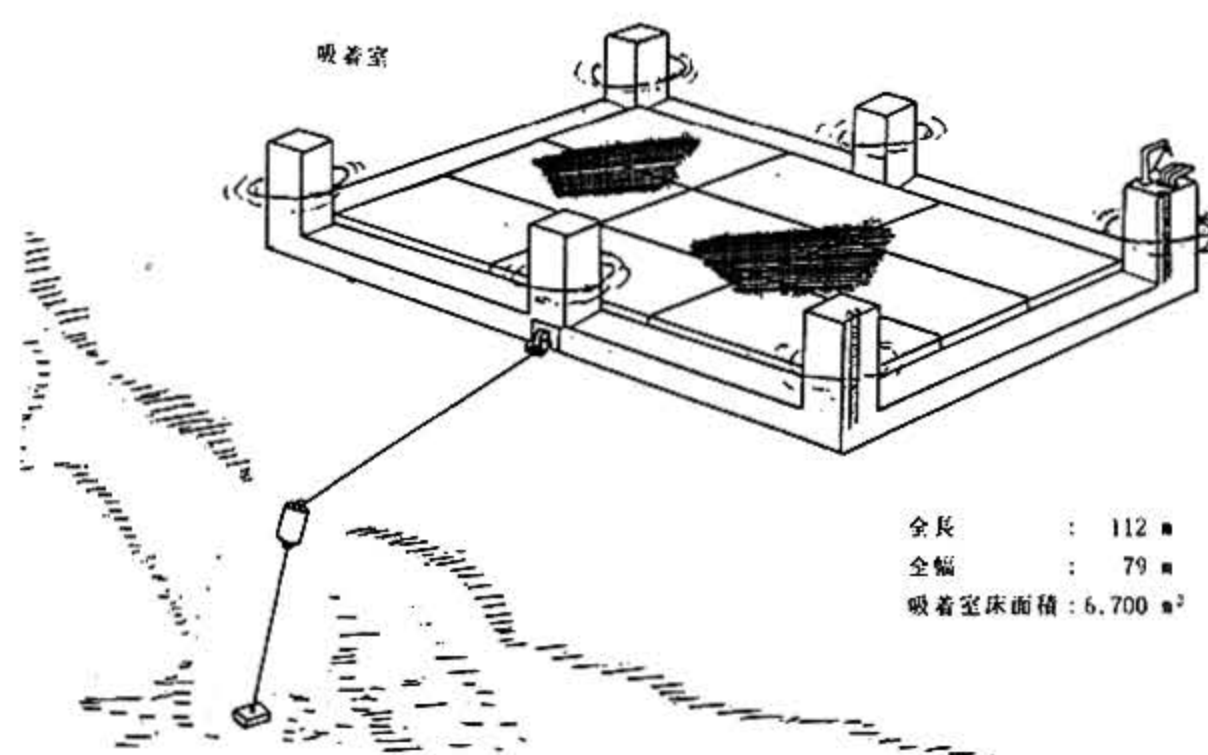


図1 吸着浮体概念図

Fig.1 Bird's eye view of adsorbing barge

なお、ウラン吸着剤は実機ではまず球状の吸着剤を想定することにしたがこの吸着剤の真の比重が海水より僅かであるが大きいいため、水中では沈降し、そのため、吸着室へ流入する海水の流れが下向流のときには固定層に、また上向流のときには流動層になる。従って、往復行程で水頭の損失値が異なるため上向流が卓越し、一度吸着室に流入した海水が再び流入しにくい。

2.2 吸着室および吸着浮体形状

2.1 に示した吸着方法にもとづいた吸着室およびそれを海洋中に保持するための浮遊式海洋構造物である吸着浮体は、図2に示すような浮体となる。海水と浮体の相対運動により、海水は主として吸着室下面から流入するのであるから、吸着室はできる限り浅深度に、かつ上面が露出しないように設置することが必要である。

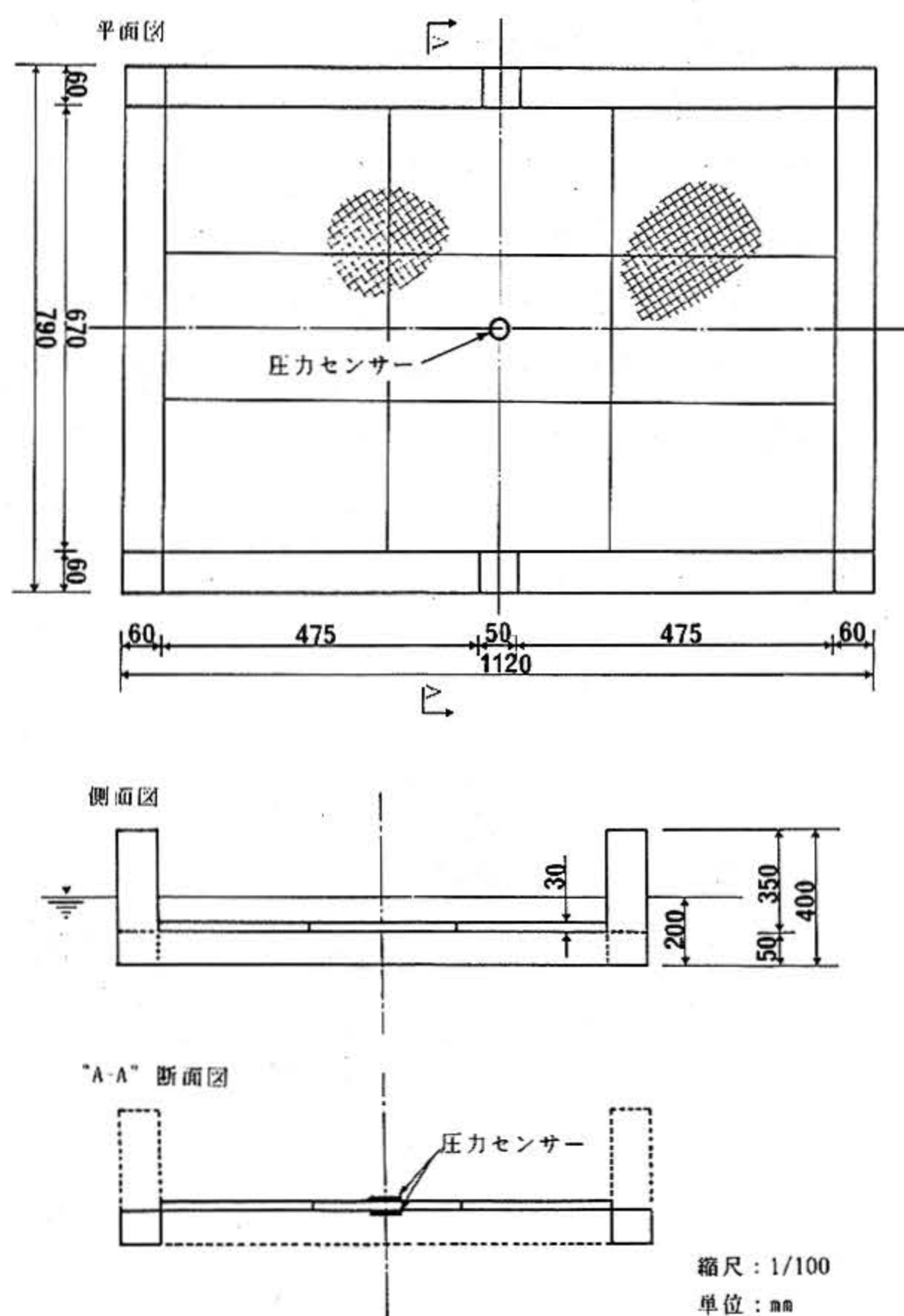


図2 吸着浮体模型

Fig.2 Model of adsorbing barge

2.3 吸着浮体の運動

図2に示した吸着浮体の運動を1/100縮尺モデルを用いた模型実験および計算により調べた。

実験は、長さ40m、幅4m、水深2.0mの造波水槽において、波周期0.7~4秒、波高2~15cmの規則波中で行った。図2に示す寸法の吸着室模型を60メッシュのサランネットで製作し、これに粒状の吸着剤を充填率1/3⁴⁾として層高10mmまで入れた。一方、計算は吸着室の無いローハルのみの状態について行ったものであり、ローハルの付加質量および減衰係数は2次元特異点分布法により、また、浮体運動はHoof t法を用いて求めた値である⁵⁾。

得られた結果としてheavingおよびpitching特性をそれぞれ図3および図4に示す。図中の各プロ

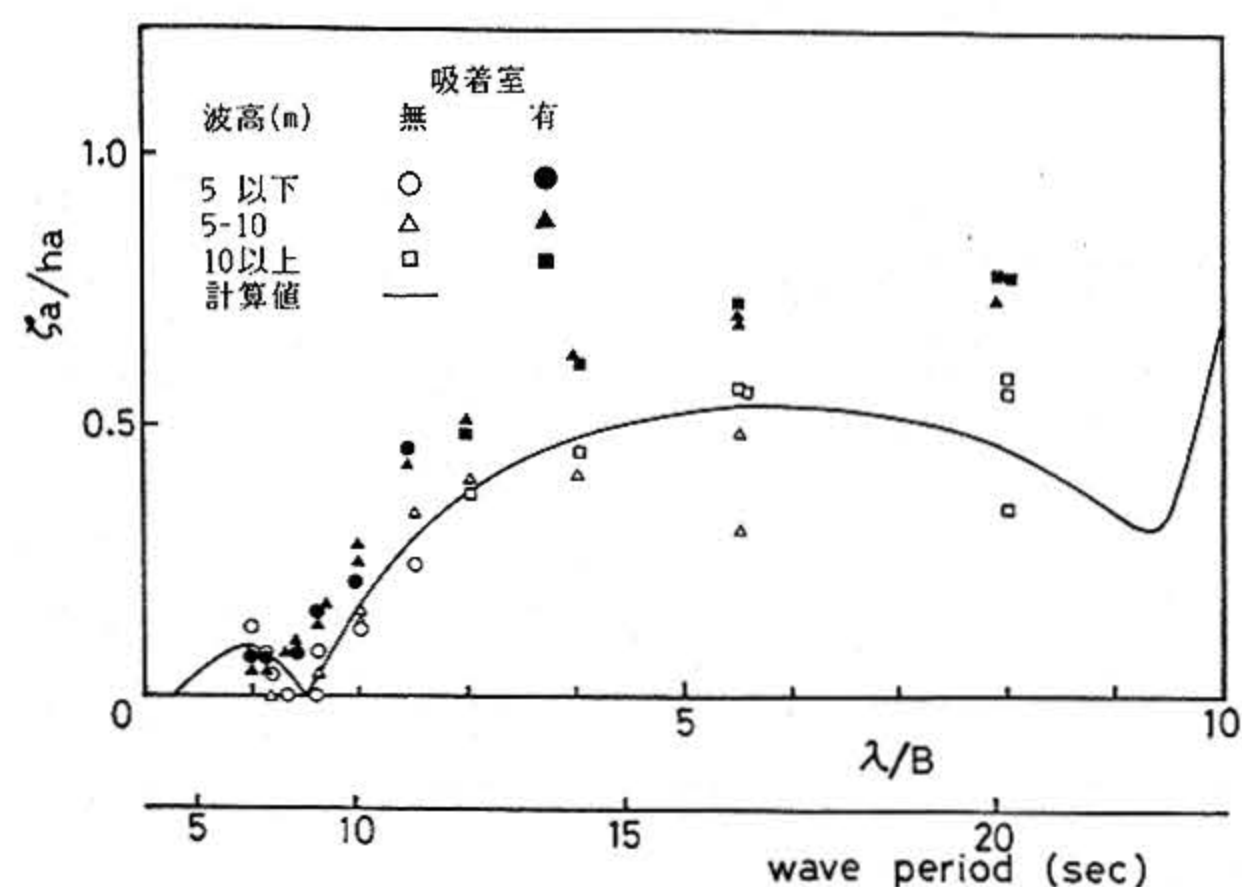


図3 規則波中上下揺れ

Fig.3 Heaving in regular waves

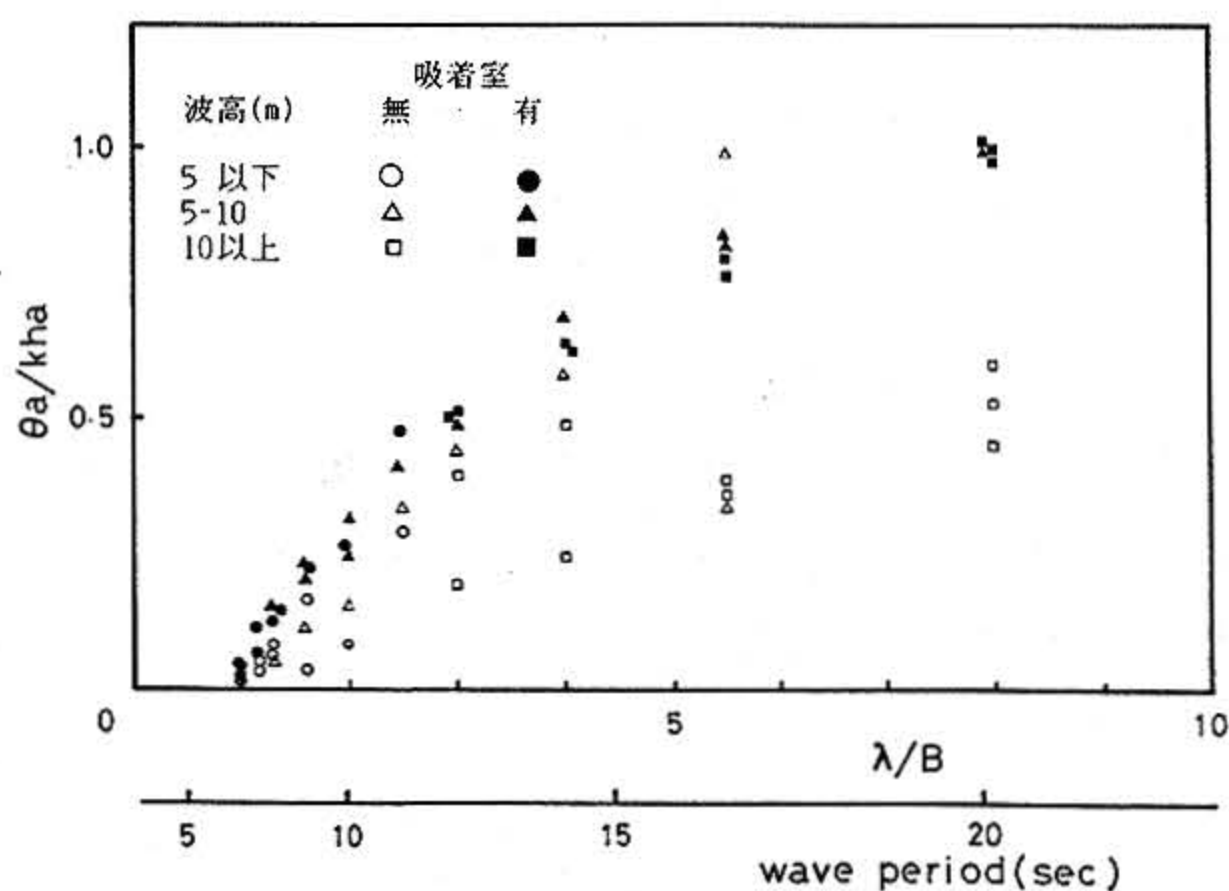


図4 規則波中縦揺れ

Fig.4 Pitching in regular waves

ットは波高別の実験値であり、実線は計算値である。横軸は、波長 λ を浮体幅 B で除した値であり、縦軸の h_a は波振幅、 ζ_a はheaving 振幅、 θ_a はpitching 振幅、 k は波数である。これより、 $\lambda/B < 2$ の範囲では吸着室無し、吸着室付きともにheaving および pitching とともに波浪中応答値は小さい。実機では $B = 80\text{m}$ を想定すると、これは $\lambda < 160\text{m}$ すなわち波周期 $T_w < 10\text{sec}$ の範囲である。このような通常の家象下では、本構造の浮体の動揺量は小さく、したがって吸着室への海水の流入量が多いことが予想される。

2.4 海水流入量

規則波中動揺試験を行う際に、図2中に○印で示す吸着室上下面の中央に圧力センサーを取り付け、吸着室上下面に生じる差圧変動 Δp を計測した。一方、定常流中における差圧 Δh と吸着室を通過する流量 Q の関係について、定常流水路にて、この吸着室の部分模型を用いて計測を行った。これによって得られた特性を図5に示す。

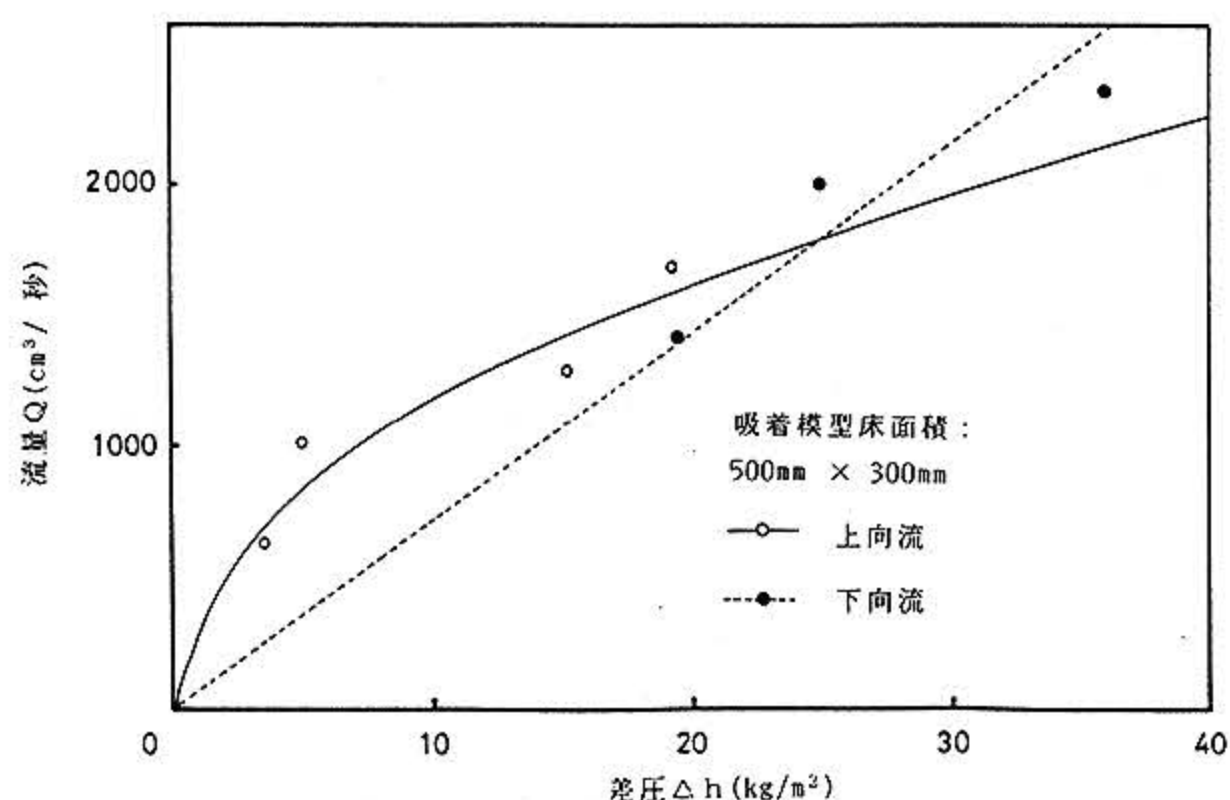


図5 吸着室部分模型の流入特性
Fig.5 Rate of waterflow through adsorbing chamber

吸着室への海水流入特性が準定常的に取り扱えらるとすると、時々刻々に変動する Δp を Δh と等価とし、 Δh に対応する流量 q を逐時求め、1秒間あたりの平均流量 Q を求めた。模型の縮尺を $1/100$ としているから、尺度影響を考慮しないとすれば、波高を 5m としたときの実機の吸着浮体一基あたりの波周期に対する海水流入量は、図6に示すような値となる。

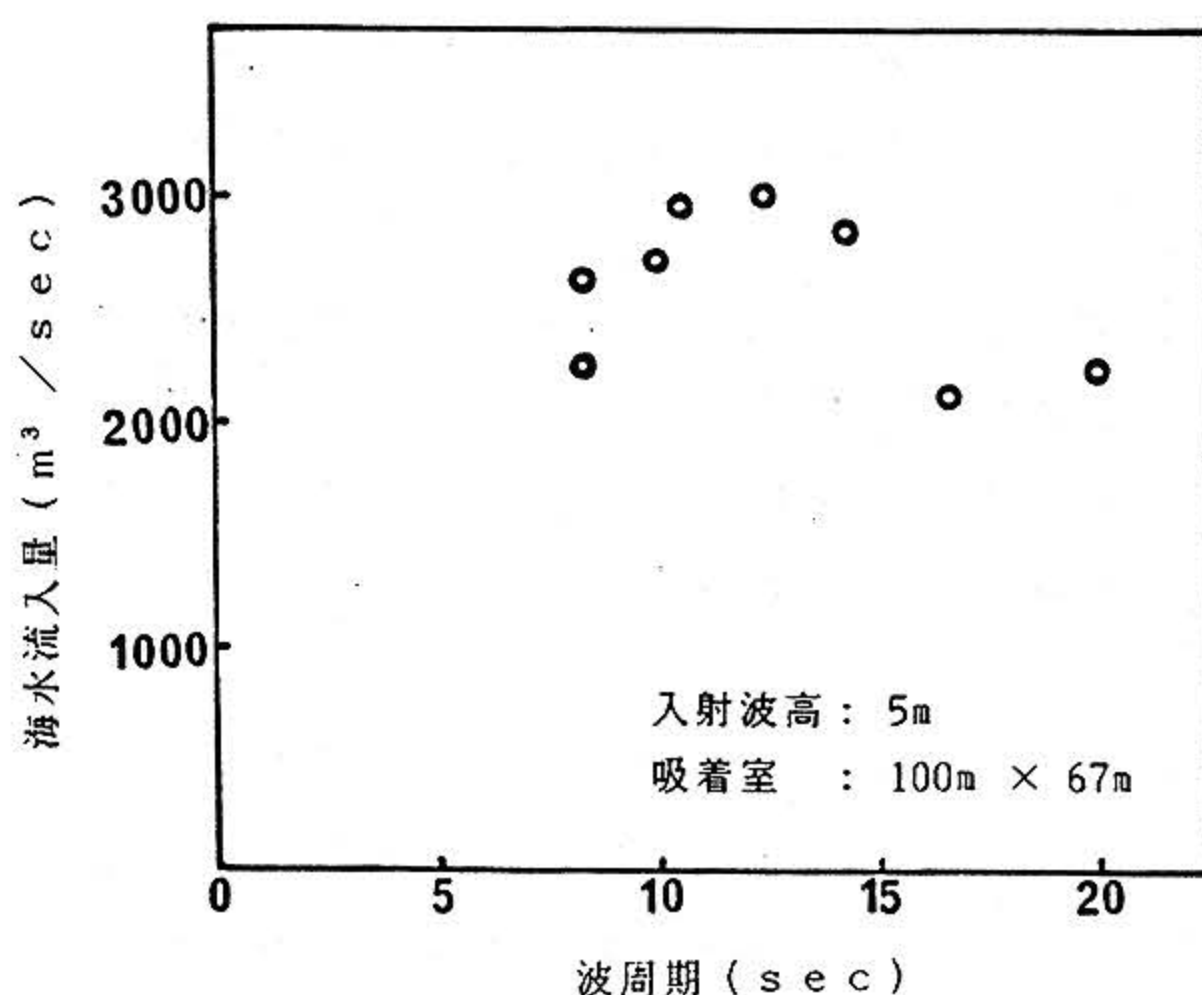


図6 波浪中の海水流入量
Fig.6 Estimated seawater flow rate in waves

実海域において、最も出現率の高い波周期は約8秒程度であり、従って一基あたり平均的に $2500\text{m}^3/\text{sec}$ の海水が流入することになる。ただし、平均的な波高を 3m とすると、海水流入量が波高にだいたい比例するとすれば、一基あたり $1,500\text{m}^3/\text{sec}$ となる。ところで海水の再流入により流入海水が必ずしもすべて新鮮な海水とは限らない事、さらにその中のウランも必ずしも100%吸着されない事も考えられる。これらを総合した吸着率を50%とすると、年間1,000トンのウランを回収するには、 $20,000\text{m}^3/\text{sec}$ の海水流量が必要である。従って今回実験を行った吸着浮体を用いるとすれば、14基程度の吸着浮体が必要とすることが判った。

ただし今後、吸着剤、吸着室および網、さらに浮体の形状等の最適化、改良により、浮体の基数を減らすことは十分可能である。

3. 係留装置

3.1 全体システムの比較検討

本装置の検討にあたり、先ず設計条件として下記を設定した。

風速 (平均)	: 40 m/sec
有義波高	: 14 m
平均波周期 (T_z)	: 15 sec
海流 (風送流を除く)	: 1 m/sec

水深 : 200 m

実際の設置場所としては、黒潮が流れる太平洋上を想定しているが、海域が決定した時点でその付近に合わせた設計条件の見直しが必要となる。

候補となる諸方式を比較検討したのが表1である。この中で⑤のカテナリー方式はシンプルで安価である点は大変良いのだが、外力方向の変化に追従可能なシステムを作りづらいのが致命的である。

結論として表の①, ②に示すSALM方式が選定されたが、この方式の特長として海底および海面の占用面積が小さく製錬船の稼働率が向上することも挙げられよう。

例えば、⑦や⑧の方式ではシンカーが複数個打たれる事により、何百m四方の海底に影響を与えようし、また⑤のような方式で仮に諸問題を解決して回転可能にできたとしても、回転半径が仮に数百mとして各浮体の周囲の直径1km以上の範囲に陸地を含めた固定物があってはならないことになる。

SALMの場合、海面上の移動範囲はこれよりずっと小さく、また海底においても一点にすぎないため、設置場所の選定もずっと容易になる。

また、SALMを用いた場合、一点係留であるため万一のライン破断に備えたバックアップ対策を



図7 係留索の破断対策

Fig.7 Backup against mooring line failure

考える必要が出てくるかもしれないが、図7のように主係留索と同強度をもつ少したるませた予備索を設ける方法が一案として考えられる。この時、ジャックル、アイプレート等も2重に設けるようにし、主係留索が切断した時は、ALARM信号を発信するようにしておくといよい。突然破断した場合に対してはロランC等による位置検出や、自己沈下等の方法が考えられるが、今後の検討を必要とすると思われる。

3.2 係留索の模型実験

(1) 模型実験の概要

係留系の模型実験は前述の海洋科学技術センターの波動水槽にて実施した。実験装置を図8に示す。

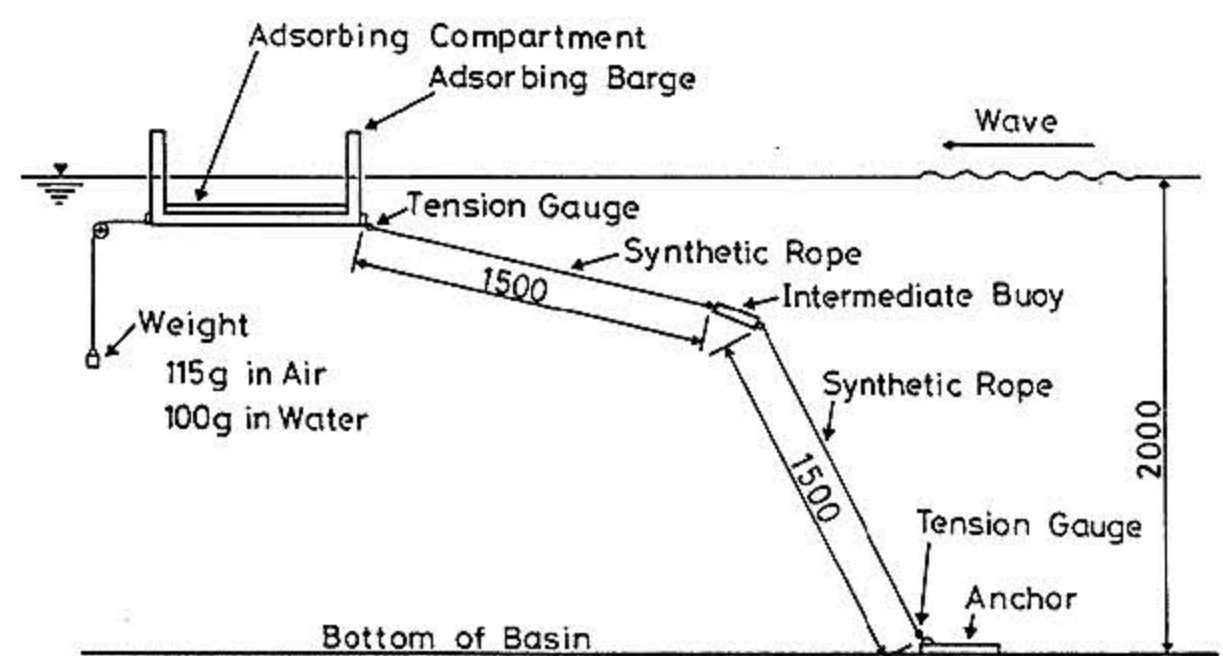


図8 係留模型試験装置

Fig.8 Arrangement for mooring test

係留系については、図8に示すように上下の索共に索長を1.5mとした。また、中間没水ブイについては図9に示すように浮力を変化させた8種類のブイを使用した。なお、索には合繊の糸を用いており、実機との索の相似則については特に考慮していない。

索の振動張力は、図8に示すように静的水平力100g(実機で100tonに相当)を与えた状態で規則波を作用させ、索の上下端に取付けたリングゲージによって計測した。

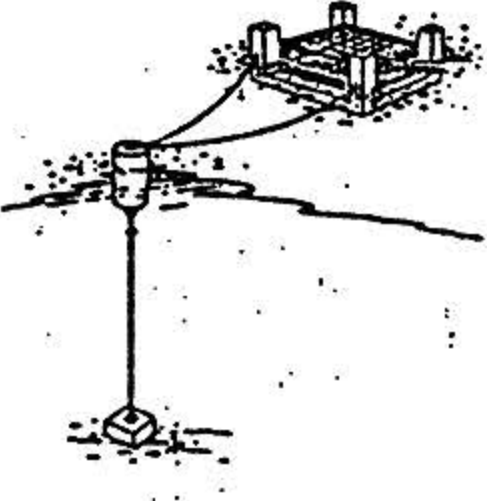
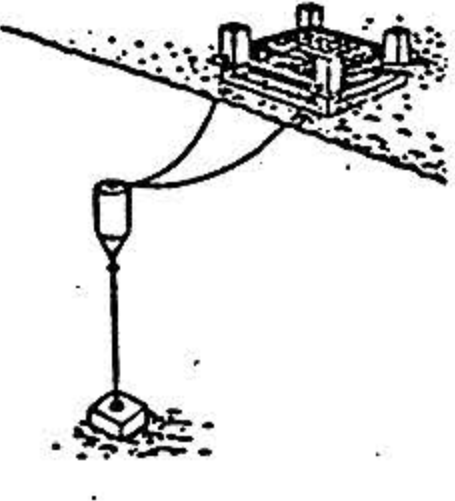
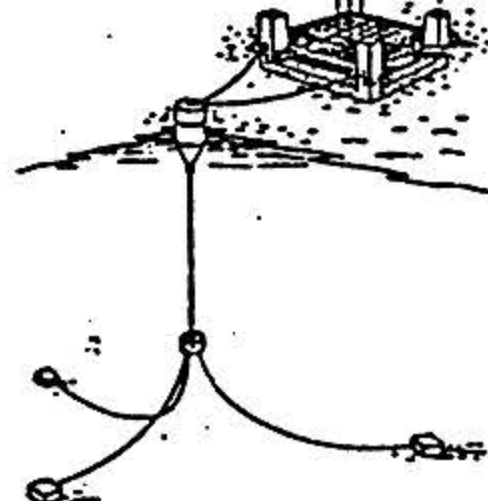
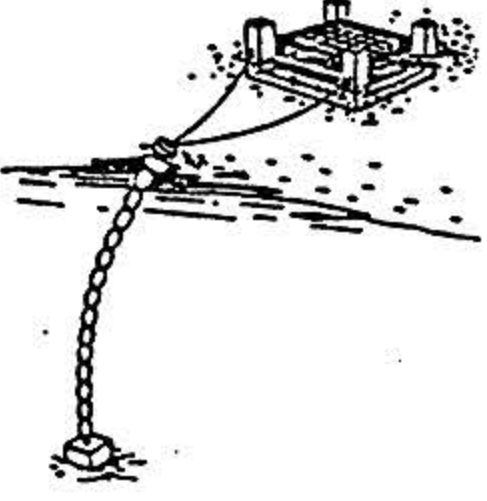
(2) 実験結果

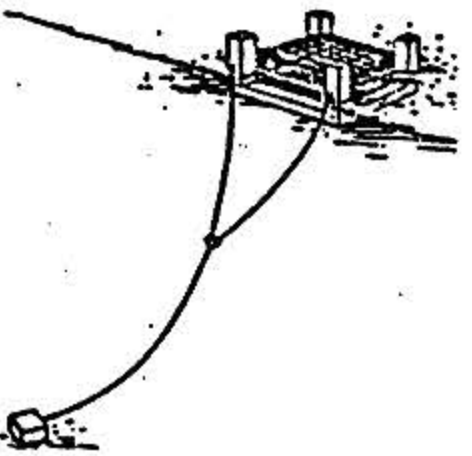
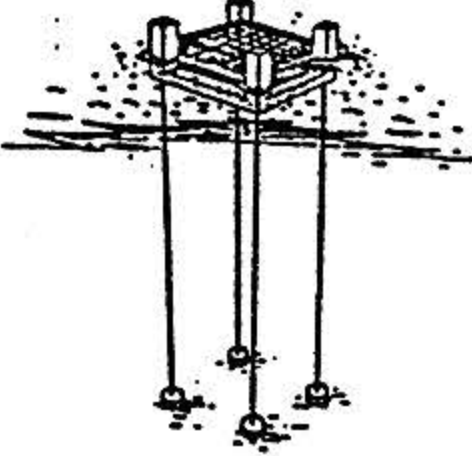
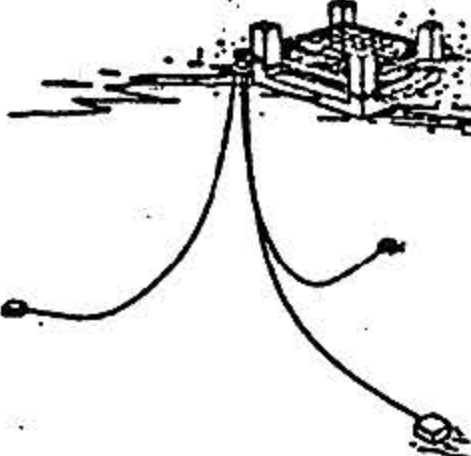
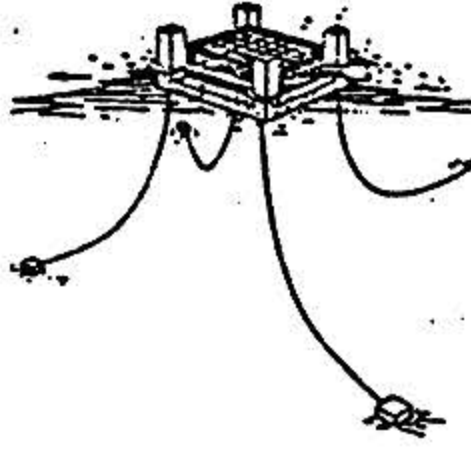
図9には上下索の振動張力の最大値とブイのNet浮力の関係を示す。

① 下部索について

Net浮力が150~300tonの範囲で極小となる

表1 諸係留方式の比較検討
Table 1 Comparison of various mooring systems

番号/名称	① 水面上SALM	② 水中SALM	③ SALM+カテナリー	④ 連続ブイ
略 図				
長 所	・ライン/ブイのメンテナンス容易 ・外力方向変化に追従	・ブイが水中のため波浪影響減少 ・外力方向変化に追従	・SALMとカテナリーの相乗効果 ・外力方向変化に追従	・チェーン等の重力によるカテナリーとは反対の、浮力による逆カテナリーのため海底部のライン角度が垂直に近い ・外力方向変化に追従
短 所	・ブイへの波浪影響あり	・ライン/ブイの据付及びメンテナンスが大作業	・部材数多	・部材数多
実 績	多 (石油関連)	有 (OTEC-1, 他)	有 (係船ブイ, 他)	無
評 価	○	○	△	△

番号/名称	カテナリー	⑥ TLP	⑦ タレット	⑧ 多点係留
略 図				
長 所	・シンプルな構成	・方向性なし	・外力方向変化に追従	・全方向外力考慮済
短 所	・外力方向変化追従に不適 ・重いラインで、カテナリー効果を充分持たせるか、或いは強く伸縮性の充分なものを使う要有	・コスト大 ・船体にテンション分の予備浮力が必要	・ライン数多 ・浮体が四角ではウェーザーベーンによる外力減少効果あまり無し	・ライン数多
実 績	有 (船の錨泊と似た方式)	有 (HUTTON油田, 他)	有 (JABIRU油田, 他)	多 (一般セミサブリグ, 他)
評 価	×	×	×	×

傾向を示す。これは図10に示す振動張力の最大値を初期張力で除したいわゆる応答倍率から分るように、ブイ浮力が0の付近では波強制力を受けて係留浮体を含む係留系が緊張・弛緩状態を繰り返していることによるものと考えられる。一方、ブイ浮力が300ton以上の範囲では、ブイのNet浮力の増加に伴って静的な索張力が増加し下部索の固有周期が短くなり、波強制力に対する応答が小さくなったことによるものと推測される。

② 上部索について

図9に示すように、上部索の振動張力はブイの浮力が0に近づくにつれて増加する傾向を示すが、ブイの浮力が150tonを越えると著しい変化は現れていない。これは、下部索と同様に、ブイ浮力が0の付近では索の張力が係留系の動的挙動に大きく影響されるためと考えられる。一方、ブイ浮力が150tonより大きい範囲では、上部索が下部索ほど強いTaut状態にないため、下部索に比べてブイの動きに影響されて振動振幅が大となり、図10のごとく、応答倍率が下部索よりも大となったと考えられる。

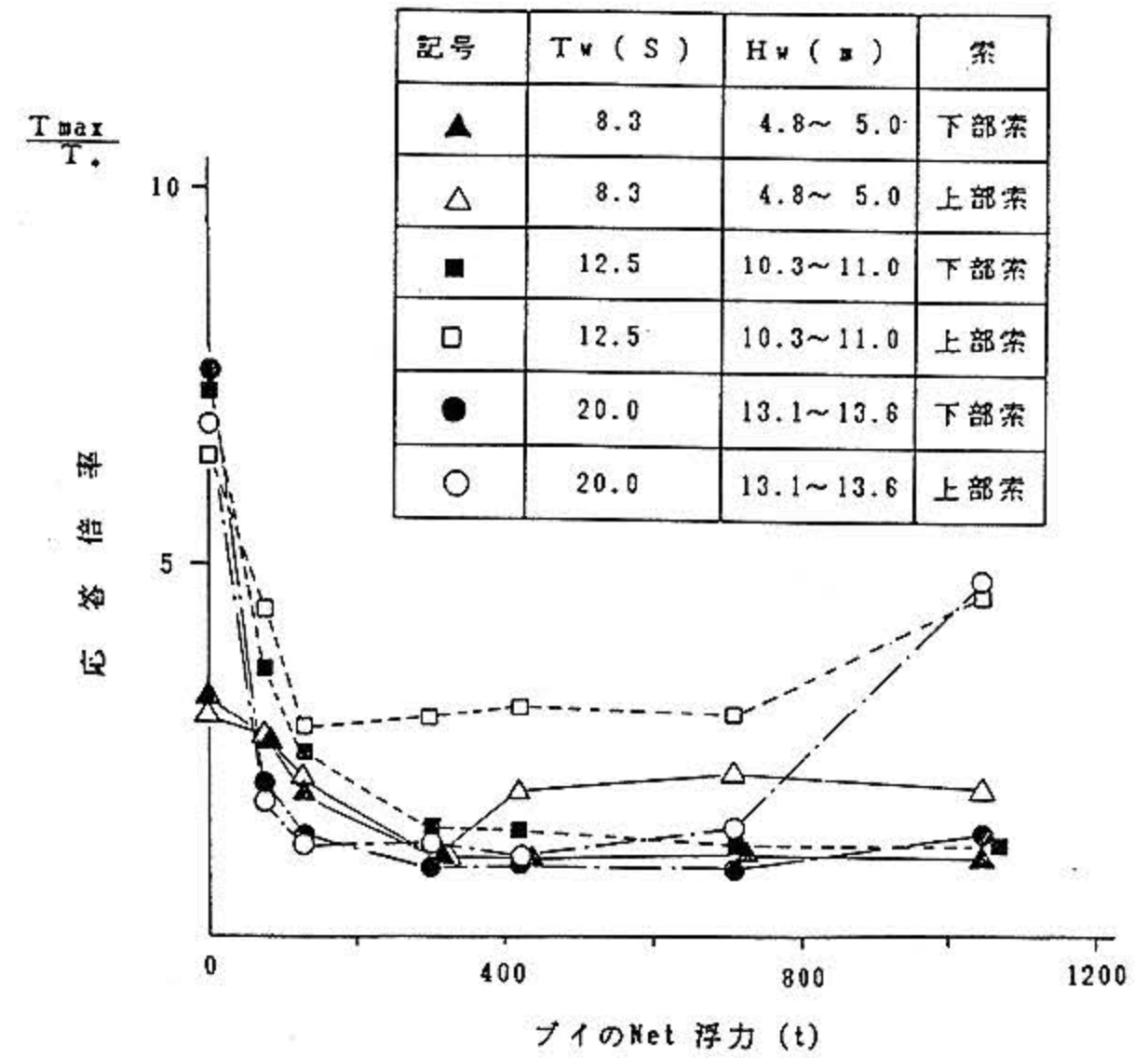


図10 係留索の動的張力
Fig.10 Dynamic tension on mooring lines

索張力の絶対値を小さくし、かつ変動張力成分を小さくするには、今回実施した実験の条件下では、ブイのNet浮力としては、150ton~300ton程度とするのが望ましいと思われる。

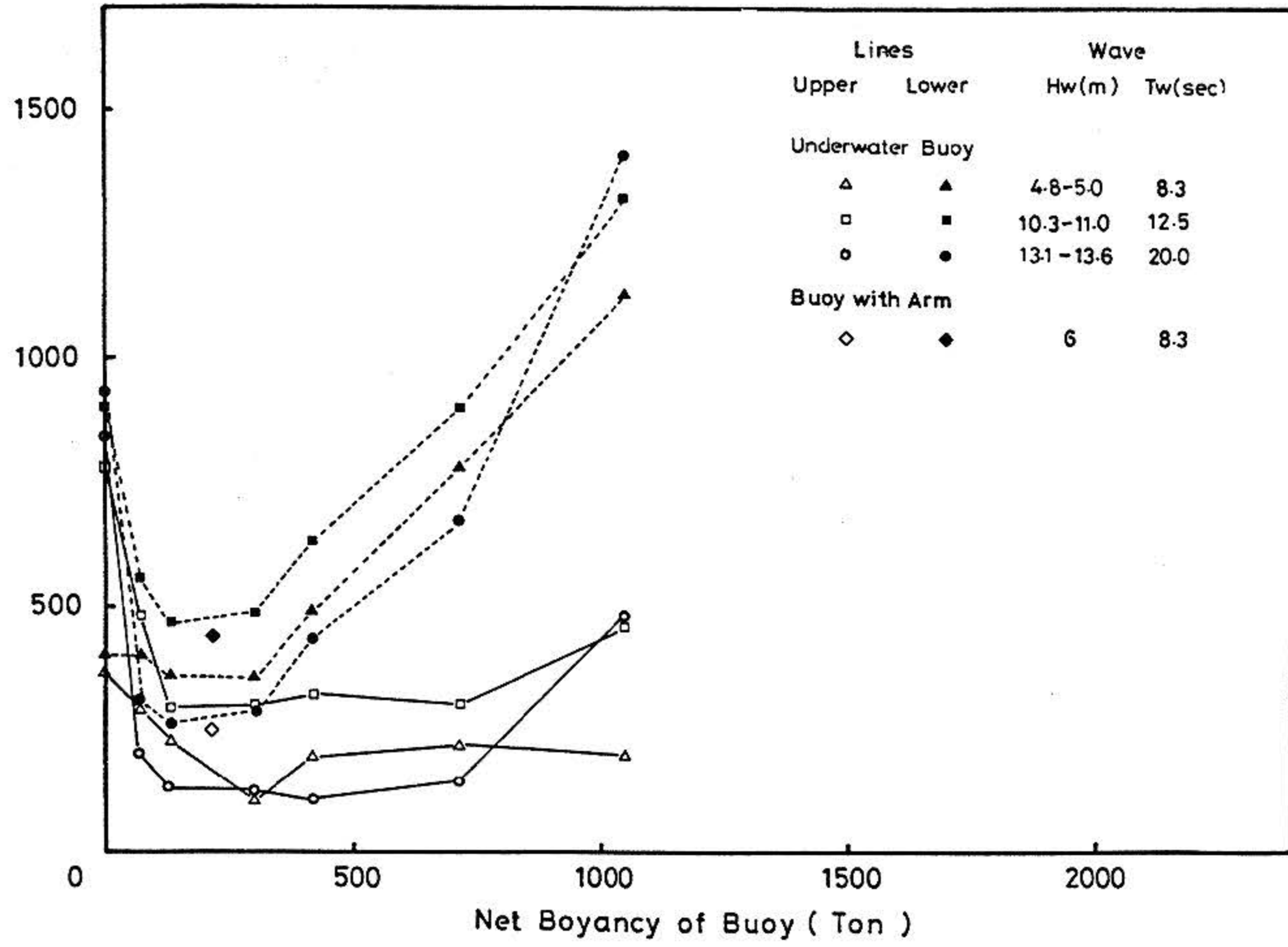


図9 係留索の最大索張力
Fig.9 Max. tension on mooring lines

今後、このような係留方式について、浮体を含めた関係について時刻歴応答解析等⁶⁾を行って、振動張力の詳細な検討を行う必要がある。また、索に使用する高張力ロープの選定、高張力ロープとシンカー、ブイ浮体との連絡部の疲労強度やすれの問題等についても検討が必要と思われる。

4. 海生生物の付着対策

4.1 付着生物対策の重要性

波力を利用した浮体式海水ウラン回収装置にとって、海生生物による汚損は、一般の海洋構造物に与える浮体のスタビリティへの影響・海水吸入孔の閉塞といった諸問題の他に、ウラン吸着室への海水の流入・流出の阻害によるウラン吸着効率の低下という問題が発生し、更には係留系への負荷の増大という問題も引き起こす。

長期間、設置海域から移動ができない海洋構造物にとって、海生生物による汚損対策技術は、耐久性の向上・性能の維持という目的から、克服しなければならない重要な問題のひとつと言える。

しかしながら、現在までに種々調査研究⁷⁾が重ねられているにもかかわらず、防汚技術は未だ確立された技術とは言えず、更に今回の研究から導かれたシステムの構成が新たな問題を提起している。

ウラン吸着剤の形状等、未だ確定しない要素もあるが、この研究では、近い将来の具体化設計に供するため、次のような諸問題について、調査研究・技術開発が、必要と考え、研究の緒についた。

- (1) 事例調査 既応資料調査による海洋構造物への海生生物の付着実態（出現種・優先種の把握、付着層の垂直分布・帯域区分など）の調査研究。
- (2) 網形状 吸着室を構成する網形状の生物付着・除去の視点からの調査研究。
- (3) 防汚塗料 吸着室の網構造に対する最適な防汚塗料の調査研究。
- (4) 浸漬試験 (2)(3)項に対する評価、及び(1)項に対する確認のための、沿岸域における試料浸漬試験。
- (5) 評価 (1)～(4)項の総合評価のための実

海域における浸漬試験。

4.2 海生生物の付着防止

ウラン吸着室の通水網の形式は吸着剤の最適形状、及び吸着室の通水性の検討から決定される。これらの検討の結果から求められる通水網の必要条件の範囲内で、海生生物が付着しにくく、また付着した生物を除去し易い網形状の検討を行うとともに、防汚塗料等の付加的手段をもって、付着を抑制する検討を始めた。

現在までの調査・実験の結果からは、通水網の形状から、生物の付着しにくい構造を開発することは困難が多く、防汚塗料で生物付着を抑制する方法が最も実現性が高いと判断される。

従来の銅化合物または有機錫化合物を防汚成分とした防汚塗料は、その溶出した金属イオンがウラン吸着剤に吸着されてしまう欠点がある。折しも、イセス漁網の防汚対策として、銅、有機錫化合物をベースとしない無公害型防汚塗料の開発が進められており、これらを通水網に適用し、防汚効果の確認のため、浸漬試験を継続中であるがその結果の一例を図11に示す。

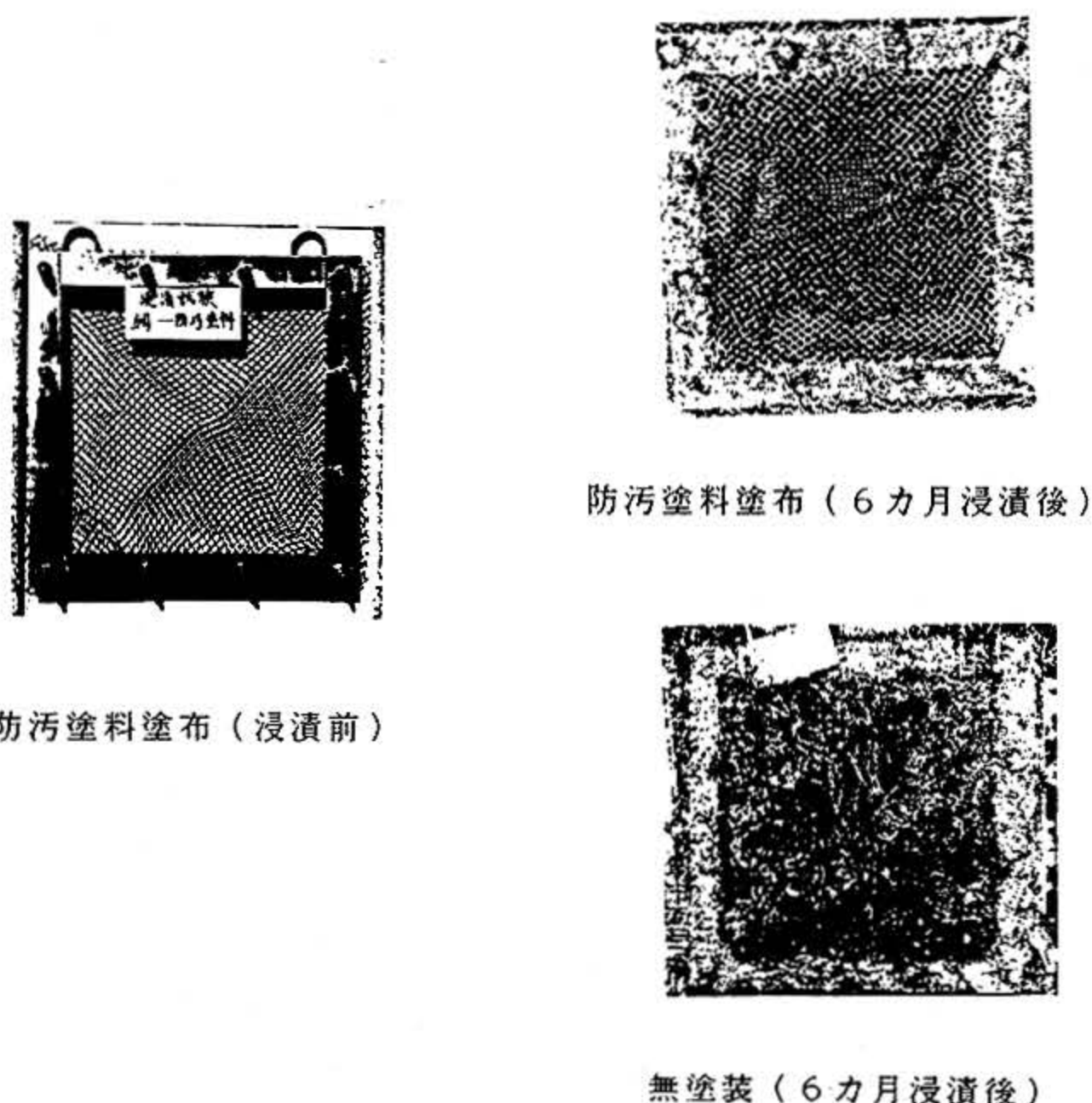


図11 網による海水中生物附着実験
Fig.11 Field test on non-polluting type antifouling paint

4.3 付着生物の除去

長期にわたり入渠が不可能な海洋構造物にとっては、施された防汚対策も恒久的のものとはなり得ず、付着生物の除去対策が必要となる。浮体構造本体はロングライフの防汚塗料により克服できるかも知れぬが、通水網のごとく、生物付着がシステムの効率に敏感に影響するものは、発想を転換し、生物付着そのものを是認し、短いインターバルで付着生物を除去するのが現実的と思われる。

本システムにおける付着生物の除去の研究は、未だ具体的検討の段階には至っておらず、今後、防汚技術と関連した基礎技術を確立して行かなければならないと考える。

5. 稼働率、効率および設置海域の検討

5.1 暴風時の作業中断による稼働率の低下

荒天により作業を中断しなければならない場合として次の3ケースが考えられる。

- (1) 吸着浮体の暴風時退避による稼働率低下
- (2) 荒天により吸着浮体と製錬／運搬船間の物資輸送、補給作業ができないことによる稼働率低下
- (3) 吸着浮体もしくは製錬／運搬船に搭載されたプラントの動揺制限による稼働率低下

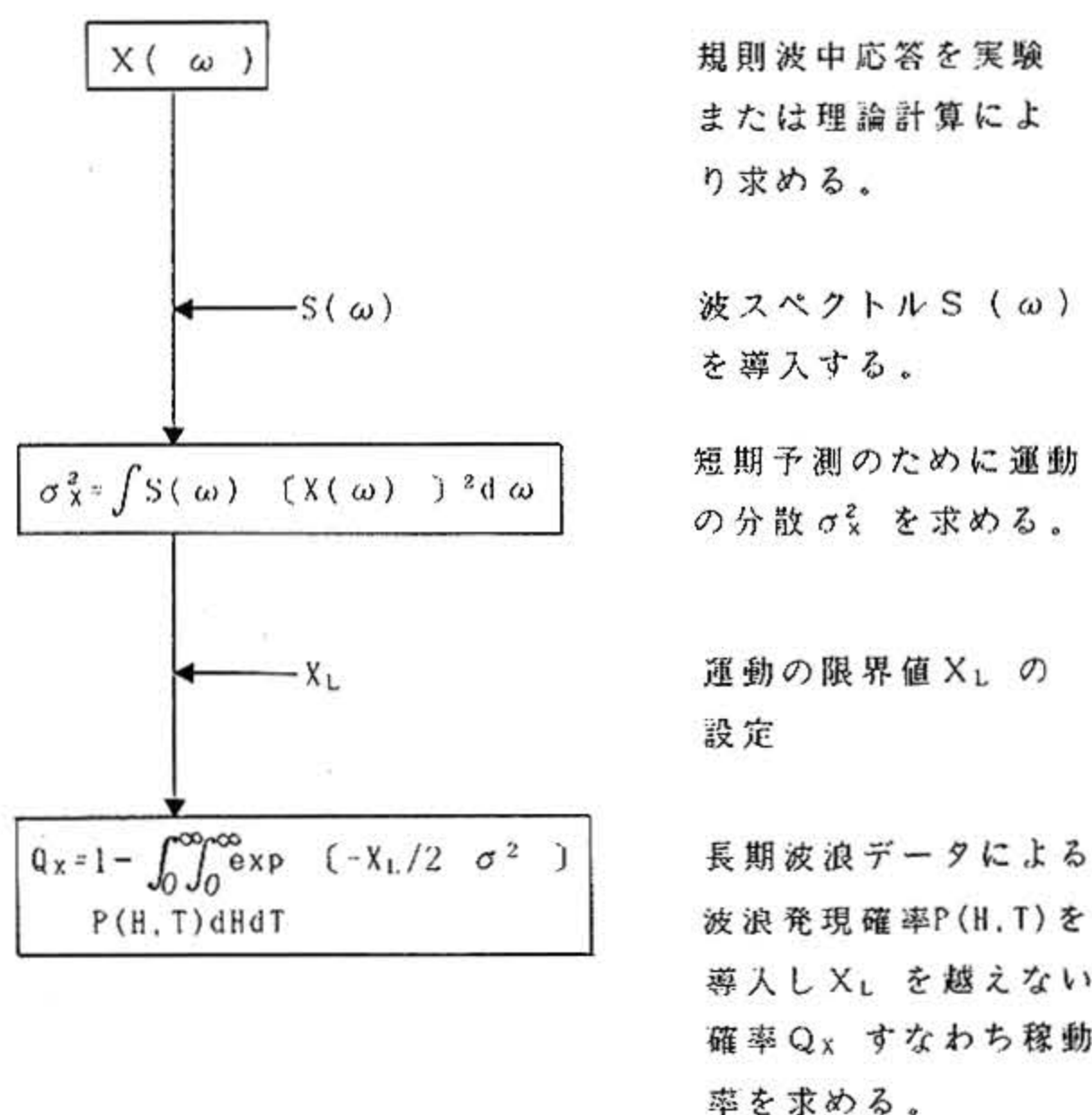


図12 稼働率の推定

Fig.12 Procedure for downtime estimation

いずれも図12に示すように吸着浮体、製錬／運搬船の運動特性が求められれば、通常の長期予測手法⁸⁾により稼働率が算定できる。

なお、ここでは上記(1)、(3)については運動応答特性 $x(\omega)$ として吸着浮体、製錬／運搬船の規則波中応答を、また(2)については吸着浮体と製錬／運搬船の相対運動の規則波中応答を考えるものとし、それぞれに対し運動の限界 X_L を与える。

5.2 吸着浮体のウラン吸着効率

ウラン吸着効率を考える場合には平穏な海における海水流入量の低下をも考慮した次のような長期予測が必要である。

- (1) 吸着室に対する、規則波中の波粒子垂直方向相対速度の応答関数 $\zeta(x, y, \omega)$ を計算または実験により求める。ただし x, y は吸着室上の座標である。

- (2) 単位波振幅あたりの吸着室へ流入する海水量 V_0 は単位時間あたり

$$V_0(\omega) = \frac{1}{T_0} \int_0^B \int_0^L \int_0^{T_0} |\dot{\zeta}(x, y, \omega)| dt dx dy$$

ただし L, B はそれぞれ吸着室の長さおよび幅を示す。

- (3) 長波頂不規則波を仮定すれば、波スペクトル $S(\omega)$ を導入することにより V_0 の分散 σ_v は

$$\sigma_v^2 = \int_0^\infty S(\omega) [V_0(\omega)]^2 d\omega$$

となる。なお短波頂不規則波の場合も成分波の入射角を考慮して容易に計算できる。

- (4) V_0 の極大値(極小値)の確率密度がレイリー分布すると仮定すれば $S(\omega)$ による V_0 の平均値 $\bar{V}_0$ は

$$\bar{V}_0 = 1.25 \sigma$$

となる。

- (5) 設置海域の長期波浪発現確率 $P(H, T)$ が与えられれば、長期平均海水流入量 V は

$$V = \int_H \int_T 1.25 \sigma P(H, T) dT dH$$

- (6) V が求められれば、例えば年間の総海水流入量の推定が可能となり、これにより吸着ウラン量が算定できる。

設置海域の決定には水深、潮流、海流、陸地との距離などさまざまな要因が考えられるが、上記5.1および5.2の検討が最も基本的な要因となろう。

6. ウラン回収コストの予測

回収コストに最も影響を与えるのは回収効率である。そこで、今後の開発の進展によりそれを改善してこのシステムのウラン回収コストをどこまで低減できるか推定してみた。

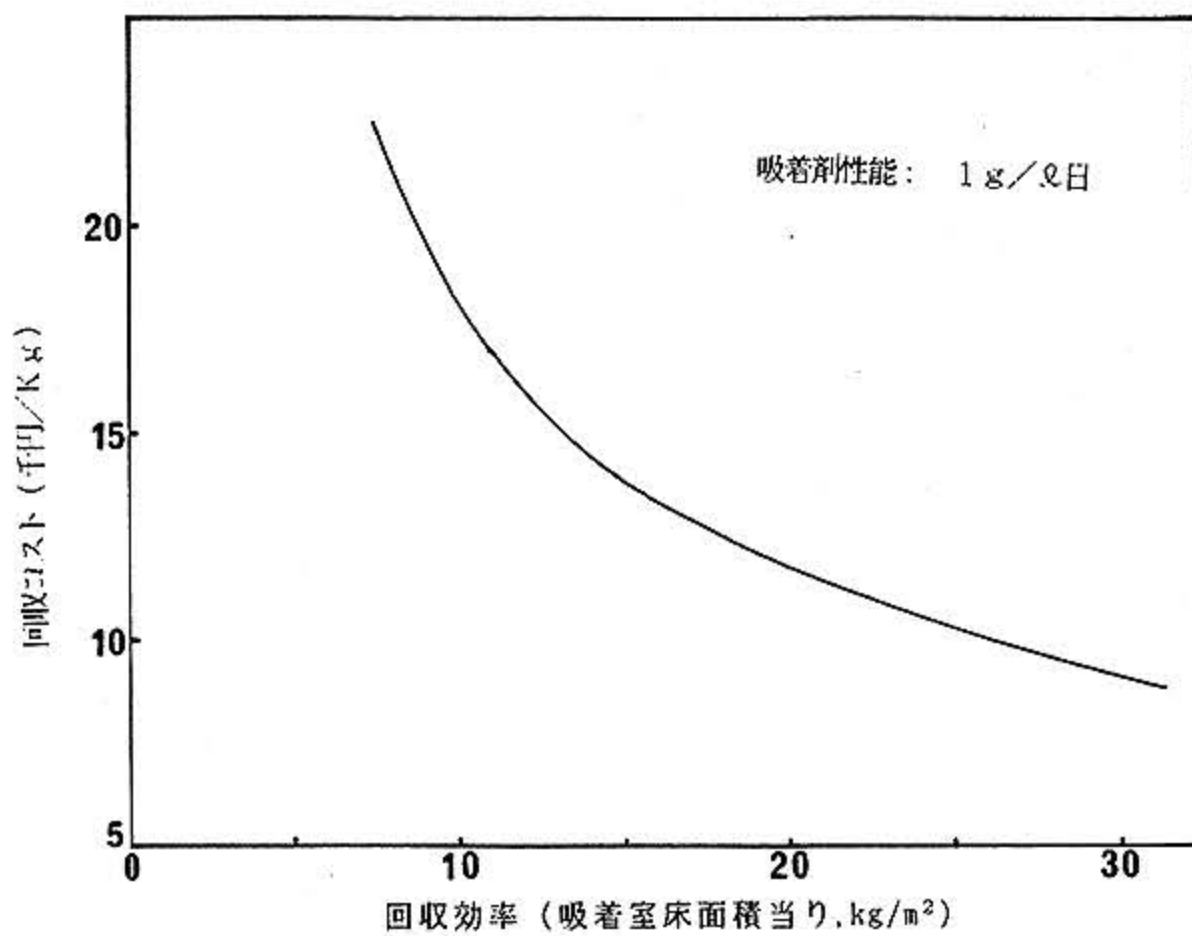


図13 ウラン回収コスト

Fig.13 Uranium recovering cost

第13図はこれまでの検討³⁾で得た吸着浮体、製錬兼運搬船、製錬プラントの建造費及び運転維持費をもとに種々の回収効率を有する年産1,000トンのウラン回収システムによるウラン単価を概算したものである。但しこれには10 g-U/ℓ-R・10日の吸着性能を有する吸着剤のコストもℓ当り800円として算入してある。

ウラン回収速度は吸着室への単位時間当りの海水流入量 Q 、流入海水中の新鮮海水含有率 η_F およびその中に含まれるウランの吸着率 η_A の積に比例すると考えられる。回収コストを低減するには高い回収速度をなるべく小規模の構造物で実現する必要がある。これらを総合的に表す指標として1年間に回収できるウラン量を吸着室床面積で除した値を回収効率として図の横軸に取った。

2.4の場合においては既述の通り、実験結果より $Q = 1,500 \text{ m}^3/\text{秒}$ と推定され、また $\eta_F \times \eta_A$ を50%と仮定した。このケースでは吸着浮体は14

基必要で、回収効率は $10.6 \text{ kg/m}^2/\text{年}$ 、コストは $17,000 \text{ 円/kg}$ 程度となる。このコストをどの程度まで下げられるかの一つの目安として以下のような概算をやってみた。

いま、設計点が波無し周期になっていて吸着浮体が規則波中で静止しているとする。座標軸の原点を浮体の中央静水面に、 x 軸を波の進行方向に取ると波粒子速度の上下方向の成分 v は

$$v = \omega h_a e^{-kd} \sin(kx - \omega t) \quad (1)$$

ここで、 k ; 波数 ($= \omega^2/g$)

g ; 重力加速度

ω ; 波の円周波数 ($= 2\pi/T$)

h_a ; 波振幅 ($= H/2$)

d ; 没水深度

吸着室の網および吸着剤の上向流、下向流に対する流入抵抗による圧力損失の割合をそれぞれ ξ_1 、 ξ_2 とすると流速はそれぞれ $\sqrt{1-\xi_1}$ および $\sqrt{1-\xi_2}$ となる。このように単純化すると、単位時間当りの吸着室への平均海水流入量 Q は

$$Q = A \omega h_a e^{-kd} \left(\sqrt{1-\xi_1} \int_0^{T/2} \sin \omega t dt + \sqrt{1-\xi_2} \int_{T/2}^T \sin \omega t dt \right) / T \quad (2)$$

ただし A は吸着室の総床面積である。

太平洋の黒潮流域を設置海域と想定して波浪条件を $H = 3 \text{ m}$ 、 $T = 8 \text{ 秒}$ とし、また $A = 6,700 \text{ m}^2$ 、 $d = 5 \text{ m}$ 、圧力損失を上向流、下向流それぞれ20%および80%、すなわち $\xi_1 = 0.2$ 、 $\xi_2 = 0.8$ として(2)式を用いて平均海水流入量を求めると約 $2,500 \text{ m}^3/\text{秒}$ となる。 $\eta_F \times \eta_A$ を $2/3$ とすると、年間1,000トンのウランを回収するには吸着浮体は6基あれば良く、その場合の回収効率およびコストはそれぞれ $25 \text{ kg/m}^2/\text{年}$ および $10,000 \text{ 円/kg}$ 程度である。この辺りが理論上の一つの限界と考えられ、この開発における最終目標となろう。

今後の開発により上記2ケースの中間の回収効率すなわち $18 \text{ kg/m}^2/\text{年}$ 程度しか達成されない場合でも期待通りの吸着剤が開発されれば $13,000 \text{ 円/kg}$ 程度のコストが実現できよう。これは現在の山ウラン価格の約2倍であるが、陸上の資源が有限である事から近い将来採算に乗る可能性が高

いと思われる。

7. 結 言

これまで、第1図の吸着浮体を出発点としてまずその特性を調べるために試験研究を行い、種々の仮定および単純化のもとではあるが、以下の結論を得た。

- (1) 浮体の上下揺れ及び縦揺れは周期が10秒以下の通常の海象では小さい。
- (2) 吸着室上下面の圧力計測から波浪中での海水流入量は波高3 mでは $1,500\text{m}^3/\text{秒}$ 程度と推定される。
- (3) 係留方式はSALMが最適である。水中SALMの規則波中での係留力計測の結果から見た限りでは、ブイの浮力は150~300 t程度が最適である。
- (4) 吸着室への生物付着は防汚塗料による予防とともに除去法も併用する必要がある。
- (5) システム全体の稼働率は作業限界を設定できれば通常の長期予測手法で算定できる。
- (6) ウランの回収コストは1~2万円/kg程度と予測され、経済的実現性が高い。

今後は、より現実に近い条件でのこれらの特性を把握する必要がある。

さらに、吸着剤の性能は回収効率を直接左右するので、その向上が待たれる一方、浮体に関しては今後、吸着室まわりの流れの可視化による水の再流入の観察および海水加振循環水槽での海水ウラン吸着試験による総合的な回収効率の計測等により最適な吸着室の寸法形状および吸着剤の性状を求める。これと同時に信頼性の高い係留装置・制御監視システムおよび付着生物対策などの要素技術の開発を進めて行く必要がある。

上記のデータをもとに最終的には吸着浮体の寸法・形状の改良、全体システムの構成の最適化および実海域における稼働率を検討する予定である。

おわりに、本報をまとめるにあたり多くの資料を提供して頂き、また貴重なご意見を賜りました関係各位ならびに実験等に協力頂いた東海大学海洋資源学科4年秋山典生氏および論文作成に協力頂いた浅見典子氏に感謝致します。

文 献

- 1) 菅野昌義, 1983 概論—海水ウラン採取. 海洋科学, 15, (11),
- 2) 正田幸雄, 1987. 金属鉱業事業団の海水ウラン採取プロジェクトについて. 海のエネルギー・資源に関する研究会.
- 3) 堀田 平他, 1987. 波力利用海水ウラン回収システムについて. 第2回波浪エネルギーシンポジウム.
- 4) 高木憲夫他, 1987. 波エネルギーを利用した海水中の溶存希少資源採取技術について. 第2回波浪エネルギーシンポジウム.
- 5) 山下誠也, 1987. 派浪中の没水柱体に働く上下方向定常力についての一検討. 西部造船会々報, 74号.
- 6) 中嶋俊夫他, 1983. 質点系モデルによる係留ラインの3次元動的解析法, 日本造船学会論文集, 194号.
- 7) 伊藤信夫, 1984. 海洋構造物の付着生物, 海洋科学, 165号.
- 8) 福田淳一, 1969. 船体運動の統計的予測, 第1回耐航性に関するシンポジウム.

(原稿受理 1987年12月1日)