

JNC TJ6557 91-044

~~JNC PJ6557 91-044~~

本資料は /⁹ 年 9 月 18 日付で登録区分
変更する。

配付限定期

人形峰環境技術センター
環境保全技術開発部 管理課

低濃度ウラン溶液からのウラン

採取システムの技術開発

－高性能ウラン吸着剤利用システムに関する調査研究－

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1990年8月

海洋科学技術センター



JNC TJ6557 91-044

~~JNC TJ6557 91-044~~

1990年 8月

低濃度ウラン溶液からのウラン採取システムの技術開発

堀田 平、石井進一

宮崎武亮、鷲尾幸久

要旨

本研究においては、海水中に溶存するウランを経済的に、かつ大量に回収する技術の可能性を明確にすることを目的として、新たに開発・改良されたウラン吸着剤の吸着性能の把握ならびにこの吸着剤を用いた海水ウラン回収システムの必要とされる基本的な諸元についての検討を行った。

まず、ウラン吸着剤としては、動力炉・核燃料開発事業団より支給されたアミドキシム樹脂DCB（ジクロエタン未処理 3% NaCl型）、同（アルカリ72時間振とう 3% NaCl型）マイティピートおよびRNH-5（クロロホルム）について海洋科学技術センターの岸壁において、海水温度の高い夏期間に、最長10日間に亘って海水通水試験を行い、ウラン吸着量の分析を行った。その結果、アミドキシム樹脂DCB（ジクロエタン未処理 3% NaCl型）およびRNH-5の吸着剤がこれまでにない高い吸着性能を有することが判った。しかし、他の吸着剤はさほど高性能ではなかった。

一方、海水ウラン回収システムとしては、上下に通水網の張られた吸着室方式を考慮し、これに粒状の海水ウラン吸着剤が充填され波浪中の海面下に固定された時の、吸着剤の最適充填量および最適吸着室幅について模型実験によって明らかにされた。実験においては、主に吸着室内の挙動を観察することによって、各種の特性の把握が行われた。

その結果、最適充填量としては、吸着室高さの1/8程度であり、また、最適吸着幅は波長の1/5程度であることが明らかになった。

本報告書は、海洋科学技術センターが動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

事業団担当者：

※海洋開発研究部

LIMITED DISTRIBUTION
AUGUST, 1990

Research and Development of the System for
Extracting Uranium from Low Content Solution

Hitoshi Hotta *
Shinichi Ishii *
Takeaki Miyazaki *
Yukihisa Washio *

Abstract

In this report, in order to make clear on the possibility of the economical technics for recovery of a large quantity of Uranium which melts in the seawater, the behavior of adsorption of Uranium adsorber which was developed and modified was tested and discussed, and some fundamental principal particulars of the recovery system of Uranium from seawater were studied and discussed.

The adsorber of Uranium from seawater, two types of Amidoxim resins of DCE, RNH-5 and "Mighty-peat", which were supplied by PNC, were tested on the quantity of adsorbed Uranium by "the seawater penetration test" during 10 days at maximum, in the summer time, at the wharf of JAMSTEC. As some results of this test, one kind of Amidoxim resin and RNH-5 have very superior characteristics to adsorb the Uranium from seawater. However, results by other types of adsorbers were not so good.

As a recovery system of Uranium from seawater, the adsorption chamber whose both side (top and bottom) are fulled by nets are studied by the scale model test. The optimum volume of adsorber and the optimum breadth of the adsorption chamber when it is fixed in the waves under the water surface, were tested in the wave tank. In the experiment, such behaviors were analyzed by the observation of action of adsorber in the chamber. Consequently, it was made clear that the optimum volume of adsorber in the chamber is about 1/3 and the optimum breadth of chamber is about 1/5 of the wave length.

Work performed by Japan Marine Science and Technology Center under Contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liason

* Marine Research and Development Department

目 次

まえがき	1
1. 吸着剤性能試験	2
1.1 試験供試吸着剤	2
1.2 試験装置及び試験方法	3
1.2.1 試験装置	3
1.2.2 試験方法	3
1.3 試験結果	8
1.4 評 價	10
2. 吸着装置の最適化の検討	11
2.1 検討条件	11
2.2 予備試験	11
2.2.1 カラム試験	11
2.2.2 吸着剤最適充填量	14
2.3 吸着室内における吸着剤の挙動測定実験	20
2.3.1 実験の目的	20
2.3.2 実験方法	21
2.3.3 挙動定量化の方法	24
2.3.4 実験結果	28
2.3.5 考 察	28
2.4 最適吸着室幅	41
2.4.1 目 的	41
2.4.2 波浪中のウラン吸着実験	41
2.4.3 実験結果	44
2.5 結 論	47
3. 結 言	48
謝 辞	48

表・図・写真目次

表 題	P a g e
表 - 1 試験供試吸着剤.....	2
表 - 2 定流量試験機の主要目.....	7
表 - 3 各ウラン吸着剤のウラン吸着量.....	8
表 - 4 吸着剤の物理的諸元	12
表 - 5 カラム通水試験状況の概要.....	12
表 - 6 実験状況の概要	17
表 - 7 吸着浮体建造費及び吸着剤コスト概算の概要.....	19
表 - 8 吸着室模型の諸元.....	28
表 - 9 吸着室模型の諸元	28
表 - 10 実験状況の概要	44
表 - 11 実験状況の概要	44
表 - 12 吸着剤分析結果と温度補正結果	44
 図 - 1 吸着試験全体系統図	 4
図 - 2 吸着試験カラム部	5
図 - 3 吸着剤カラム断面図	6
図 - 4 ウラン吸着速度特性	9
図 - 5 海水温度による吸着剤の性能の変化	13
図 - 6 波浪中ウラン吸着実験 実験装置概略図	14
図 - 7 吸着室模型の設置状態	15
図 - 8 取り出した吸着室 1 室	16
図 - 9 吸着室部分模型の概略図	16
図 - 10 吸着剤層高とウラン吸着率の関係	17
図 - 11 吸着剤層高とウラン量の関係	18
図 - 12 吸着剤層高と吸着浮体建造費+吸着剤コストの関係	19
図 - 13 吸着剤の挙動測定 実験装置概略図	22
図 - 14 挙動測定用吸着室模型概略図	23
図 - 15 吸着剤の挙動によるグループ分け	24
図 - 16 設計波高における吸着剤偏在率特性	30
図 - 17 波高 4.0 cm における吸着剤偏在特性	31
図 - 18 波高 1.0 cm における吸着剤偏在特性	32
図 - 19 設計波高における吸着剤流動率特性	33
図 - 20 波高 4.0 cm における吸着剤流動率特性	34
図 - 21 波高 1.0 cm における吸着剤流動率特性	35

図-22	設計波高における透過波高特性	36
図-23	波高4.0 cmにおける透過波高特性	37
図-24	波高1.0 cmにおける透過波高特性	38
図-25	透過波高計測記録例	39
図-26	吸着剤の挙動説明図	40
図-27	ウラン吸着実験用吸着室模型概略図	42
図-28	波長・吸着室幅比とウラン吸着率の関係	46
図-29	実験中の吸着剤の挙動	46

写-1	試験装置全景	7
写-2	試験装置カラム部	7
写-3	規則波中の吸着剤の挙動	20
写-4	静止水中の吸着剤	26
写-5	波面上昇時の吸着剤の挙動	26
写-6	波面上昇時の吸着剤の挙動	26
写-7	波面下降時の吸着剤の挙動	27
写-8	波面下降時の吸着剤の挙動	27
写-9	波面上昇時の吸着剤の挙動	27
写-10	ウラン吸着実験中の吸着剤の挙動	43
写-11	ウラン吸着実験中の吸着剤の挙動	43

まえがき

海水には低濃度であるが膨大なウランが含有されており、それを経済的に回収することにより人類のエネルギー問題は、ほぼ永久的に解決すると言われている。

近年特にウラン吸着樹脂の開発に著しい進歩が見られ、今後の改良、洋上吸着システム、吸着ウランの二次処理等の技術開発の進展により、回収技術が実用化される可能性が充分ある。動力炉・核燃料開発事業団殿の人形崎事業所では、ウランの採鉱、製錬、転換等の技術開発を実施しているが、その技術成果の他方面への応用とそのための技術の開発を検討しており、本研究においては、特に海水ウラン回収技術への適用を検討する。

そこで、低濃度ウラン溶液からのウラン採取システムに適したウラン吸着剤の吸着性能に関する試験ならびにそれを用いた最適システムに関する試験を昭和63年度に引き続き実施し、その結果を用いて解析・検討・評価を行う。

本研究においては、主に以下の項目について研究を実施した。

(1) 吸着剤性能試験

低濃度ウラン溶液からのウラン採取システムに適すると考えられるウラン吸着剤について、吸着性能（吸着速度、吸着容量、耐久性など）に関する試験および分析を実施する。

(2) 吸着剤適用試験

(1)において試験を実施した吸着剤の低濃度ウラン溶液との効率良い接触法および取扱い法などについて試験を実施する。

(3) 試験結果の解析評価

1. 吸着剤性能試験

海水には、濃度としては微量ながら、総量としては膨大なりょうのウランが溶存しており、これを効率良く低コストで回収することができれば、その恩恵は多大である。

しかし、海水中溶存ウラン濃度は3ppb(1,000トンの海水に約3g)でしかなく、これを陸上で産出されるウランと同程度のコストで回収するためには、幾つかの課題について解決しなければならない。

そして、そのうちで最も重要な課題が、まず、ウラン吸着剤のウラン吸着性能の格段の向上である。これまでの概略的な推定によれば、海水ウランの回収コストを陸上産出ウラン並みのコストまで引き上げるには、吸着剤1gについて吸着日数10日間当たり約10mgのウラン吸着する性能を有することが必要であるとされている。これに対し、今までのとこを同条件下で約0.2mgを吸着するにとどまっている。従って、まず、この吸着性能を向上させるための方策を見い出し、それを検証することが必要である。

本研究においては、この方針に基づいて、動力炉・核燃料開発事業団殿より支給された4種類のウラン吸着剤を用い、実海水を使用したウラン吸着性能試験及び吸着量の分析を実施し、各吸着剤の性能について明らかにした。

吸着試験を行ったが、装置に関してトラブルは全くなかった。

1.1 試験供試吸着剤

動力炉・核燃料開発事業団殿より支給された4種のウラン吸着剤を表-1に示す。なお、いずれの吸着剤についてもその詳細な構成及び特徴は不明である。また、表中の試験供試量は、吸着試験1回当たりに使用した吸着剂量である。

表-1 試験供試吸着剤

呼称	吸着剤名	形 状	試験供試量
A	アミドキシム樹脂DCE (ジクロエタン未処理 3%NaCl型)	粒 状	6 ml
B	アミドキシム樹脂DCE (アルカリ72時間振とう 3%NaCl型)	粒 状	6 ml
C	マイティピート	纖維状	0.5g(乾)
D	R N H - 5 (クロロホルム)	粒 状	6 ml

1.2 試験装置及び試験方法

1.2.1 試験装置

性能試験に使用した試験装置は、昭和62年度に製作し、昭和63年度に種々の改良を加えた「定流量試験機」であり、その全体系統図を図-1に、吸着剤カラム部分を図-2に、主要目を表-2に、また、その全景を写-1、カラム部を写真-2に示す。

一方、吸着剤を充填した吸着剤カラムを図-3に示す。

本試験装置は、昭和63年度の改良工事により、フィルター、吸着剤カラム内のメッシュ及び吸着剤自体に目詰りを起こしても、10日間程度の連続運転下においても常に定流量の海水が流れる構造になっており、吸着剤性能試験には適した装置である。実際に4種類の吸着剤を各々最大10日間にわたって吸着試験を行ったが、装置に関してトラブルは全くなかった。

1.2.2 試験方法

①吸着剤の充填

まず、A, B 及びD の吸着剤については、メスシリンダーにより 6mlを、C の吸着剤については、天秤ばかりにより 0.5gを計量する。一方、吸着カラム内に、まず12meshそして次に80meshのサンネットを入れ、計量した各吸着剤をその上に充填する。そして、その上には、上向流中で吸着剤が流出しないようまず80meshそして次に12meshのサンネットを入れ、吸着剤カラムを密閉する。

②吸着剤カラムの取付け及び通水

吸着剤が充填された吸着カラムを試験装置の図-2中に示すカラム取付け部に取付け、ポンプを作動させることにより、上向に海水を通水させる。海水の流速はいずれも 1l/min (SV:10,000) となるよう、吸着剤カラムの上（下流側）に取付けられた流速計を見ながらポンプ流量を調節する。

③フィルター

吸着剤カラムに海水を通水させる前に、フィルターを通して海水中の浮遊物等を除去した。使用したフィルターの孔径は 1~150 ミクロンのものを使用した。なお、このフィルターは試験の開始前に必ず全て交換し、試験中は交換しなかった。

④試験期間

各々の吸着剤について、2, 5 及び10日間にわたり連続で通水し、吸着を行わせた。

⑤試験中の点検・調整及び計測

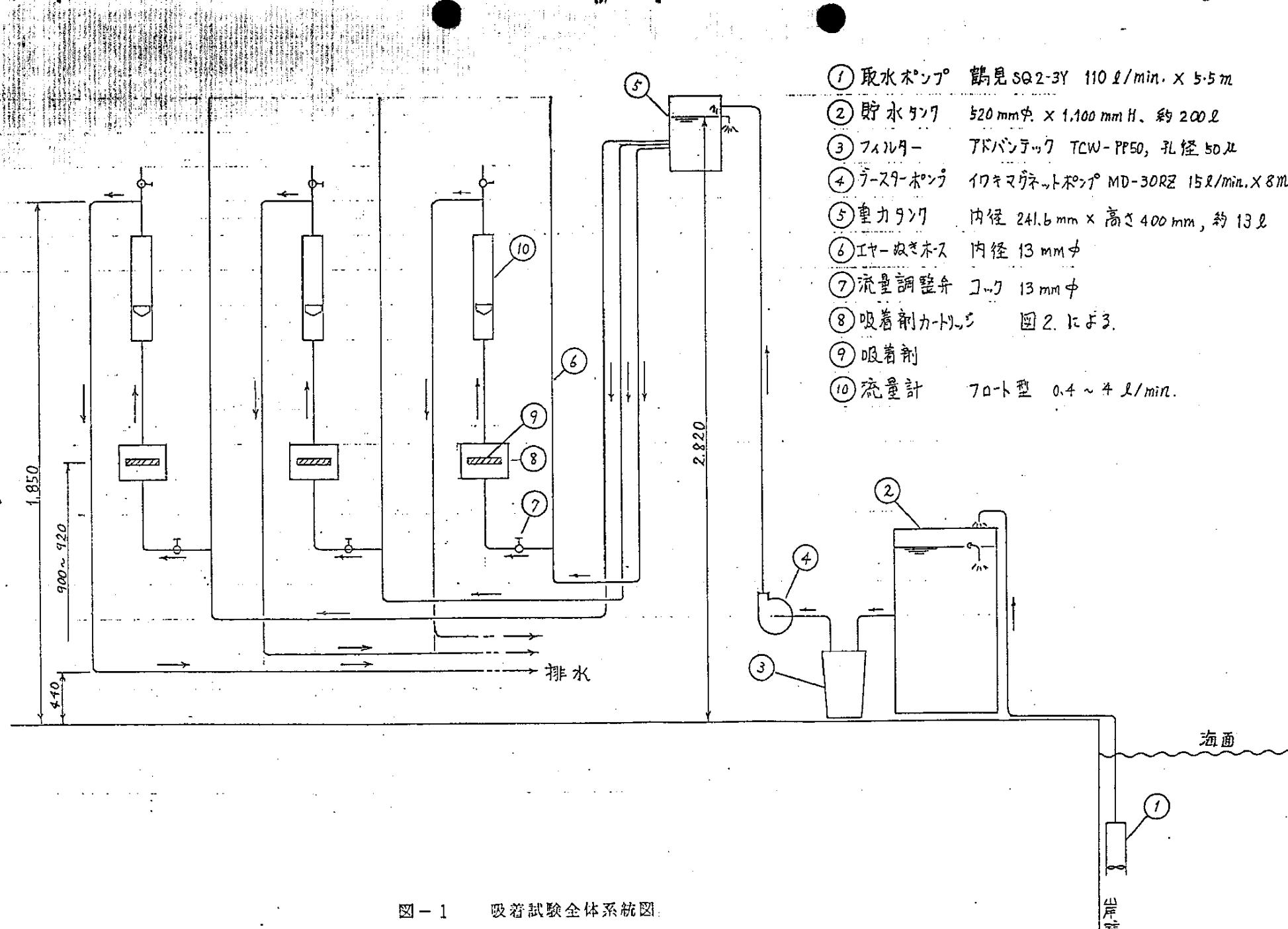


図-1 吸着試験全体系統図

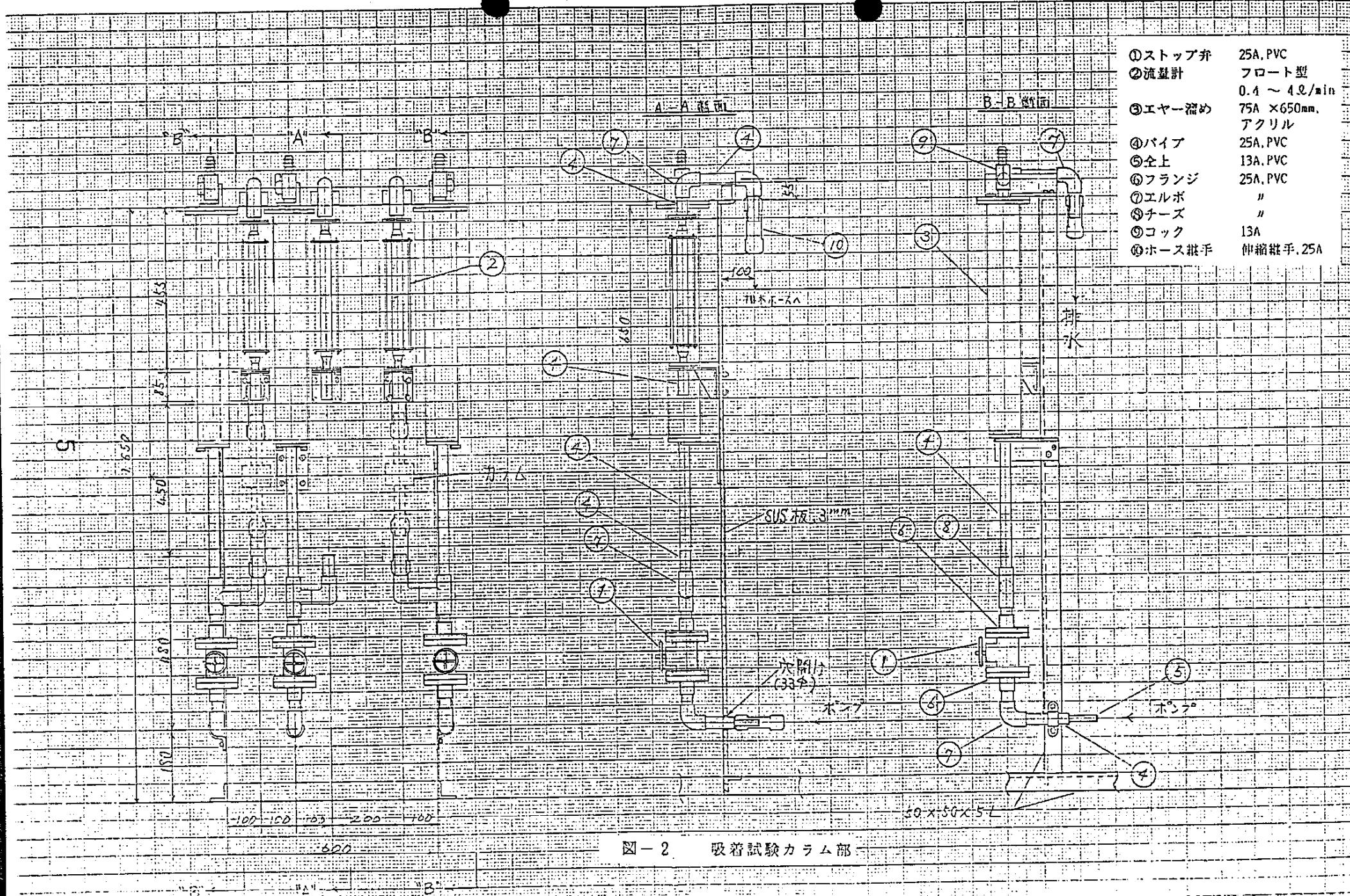


図-2 吸着試験カラム部

単位 mm

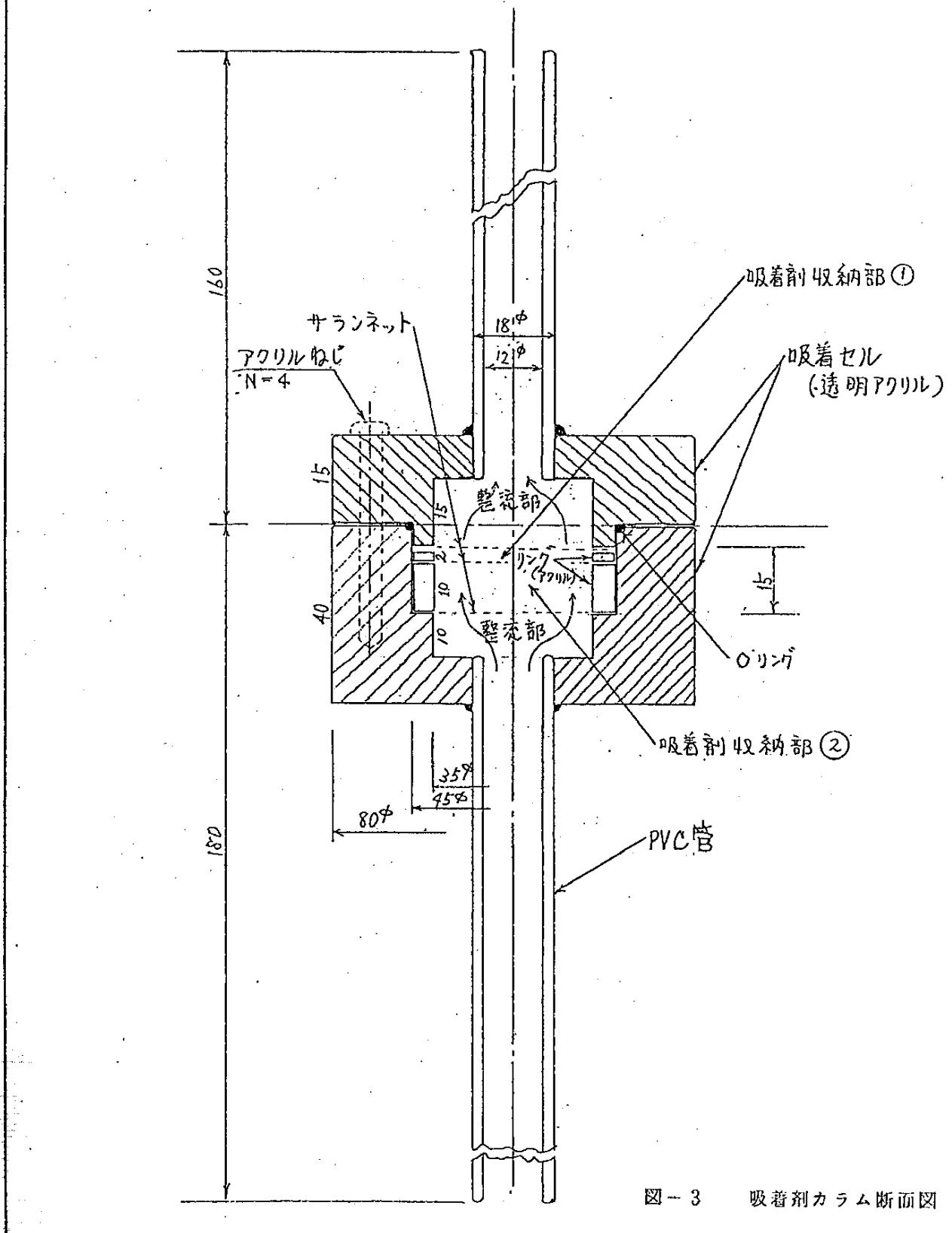
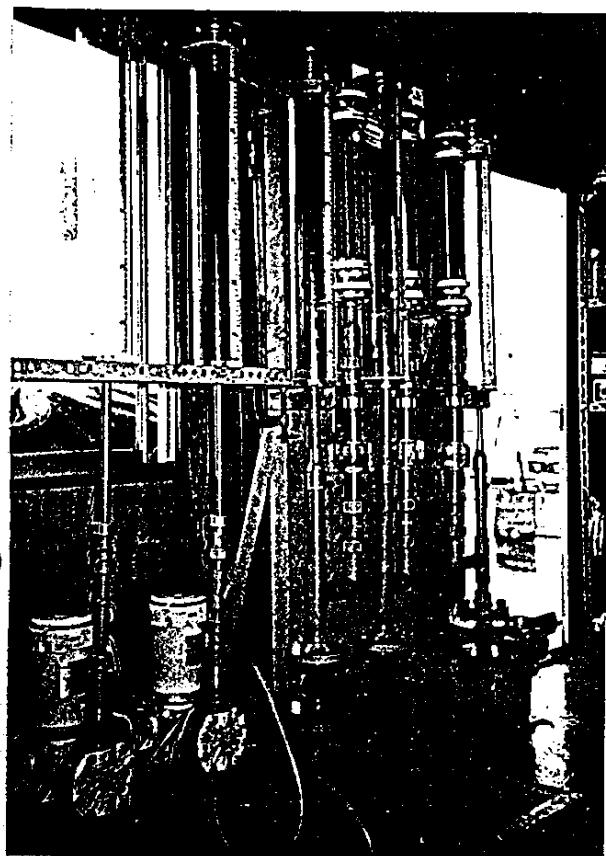
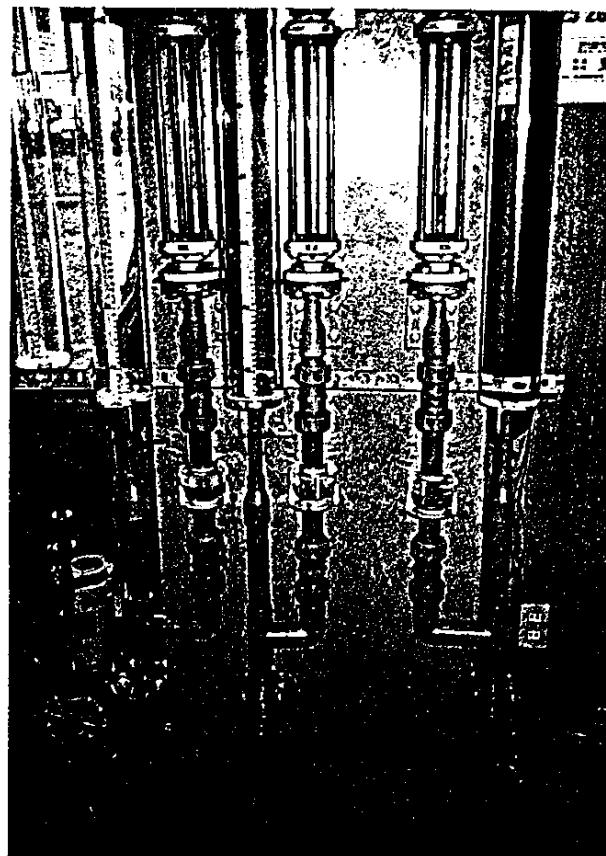


図-3 吸着剤カラム断面図



写-1 試験装置全景



写-2 試験装置カラム部

表-2 定流量試験機の主要目

カラム数	：	3本
吸着セル	：	
内 径	：	35mm
高 さ	：	40mm (全高) 2/10mm (吸着剤充填部)
ボンブ	：	3台—ダイヤフラム式、各 $1.7\ell/min. \times 8kg/cm^2$
流 速	：	各 $2.9cm/sec$ (吸着剤充填部にて)
配 管	：	3系統—管内径 $25mm\phi$ (一部 $13mm\phi$)

試験期間中、毎日の朝夕に機器の作動状況及び流量並びにフィルター、吸着カラム内の目詰まりなどをチェックした。流量が変動している場合には、所定の流量となるようポンプ流量を調整した但し、結果的には、これは僅かであり、この変動による影響は無視できる程度であった。また、期間中の点検時に、海水温度を計測し、記録した。

1.3 試験結果

試験は平成2年の7月から8月にかけて、海洋科学技術センターの岸壁にて行われた。

試験結果を表-3に、吸着速度特性を図-4に示す。

表-3 各ウラン吸着剤のウラン吸着量(SV:10,000)

吸 着 剤		吸 着 日 数		平均海水 温度(℃)	ウラン吸着量(μg/g)	
呼称	名 称	呼 称	時 間		HCl 溶離法	灰化法
A	アミドキシム樹脂DCE (ジクロエタン未処理 3% NaCl型)	2日間	47.5	26.6	20	25
	" "	5	120	24.8	50	58
	" "	10	240	24.2	63	77
B	アミドキシム樹脂DCE (アルカリ 72時間振とう 3% NaCl型)	2	47.5	26.6	163	179
	" "	5	120	24.8	210	243
	" "	10	240	24.2	334	364
C	マイティーピート	2	37	25.5	< 5*	< 5*
	" "	5	120	26.8	< 5*	< 5*
	" "	10	240	24.2	20**	16**
D	R NH-5 (クロロホルム)	2	37	25.5	151	178
	" "	5	120	26.8	359	384
	" "	10	236	26.8	411	475

* ; 分析可能範囲以下

** ; 灰化法による分析値が溶離法による値より低いのは、分析測定誤差のためと考える。

内の
ボン
でき

れた。

(g/g)

化法

25

58

77

179

243

364

5*

16**

178

384

475

ウラン吸着量 ($\mu g - U / g - R$)

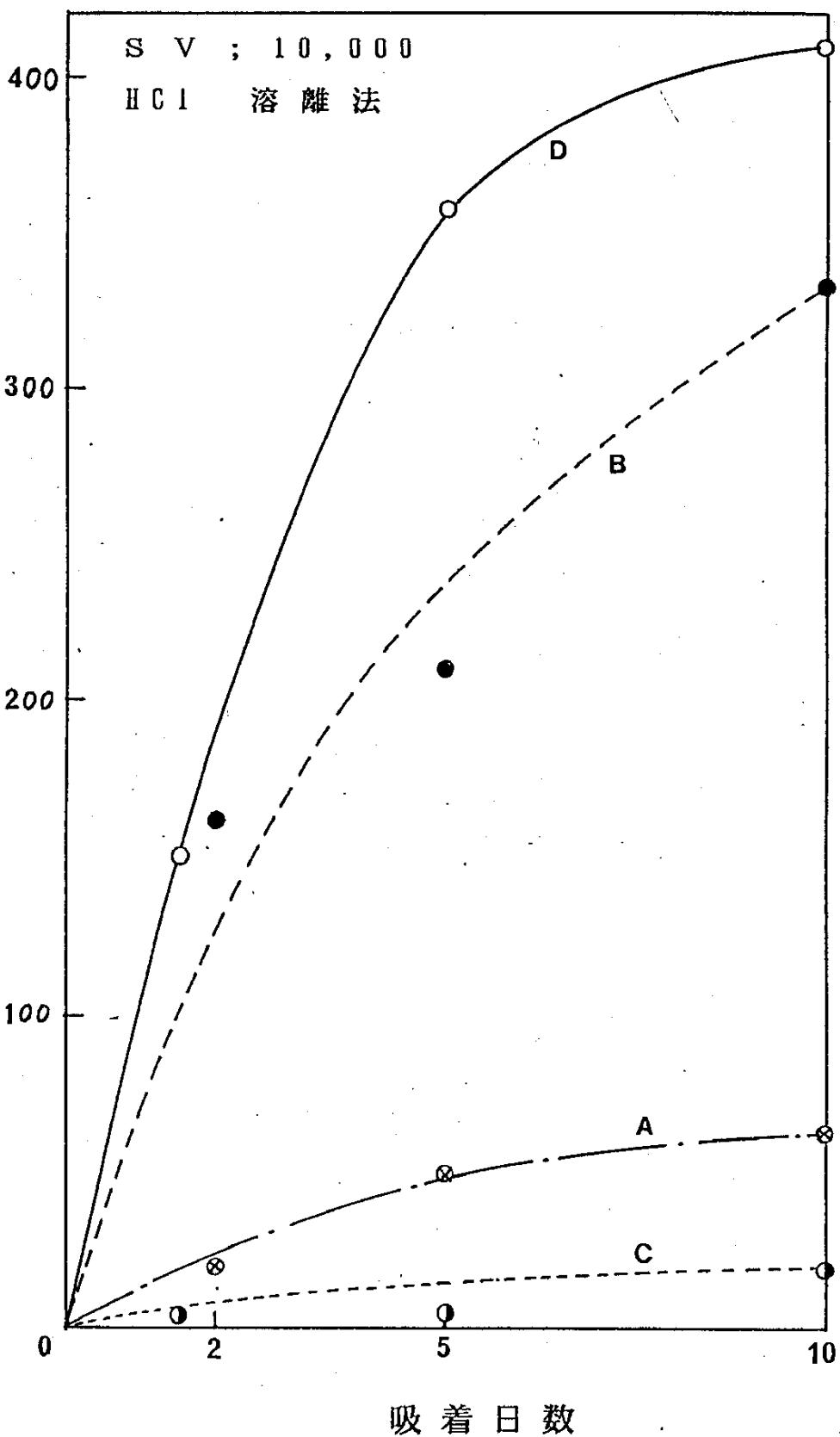


図-4 ウラン吸着速度特性

1.4 評 價

表-3より判るように、今回、吸着試験を行った吸着剤のうちBおよびDの吸着剤の吸着性能が、前年度までに同様の試験を行った。他の吸着剤と比較して見ても、格段に向上していることが明らかになった。現在、市販されている三変化成錫のウラン吸着剤CR-55Xの吸着性能が約 $200\mu\text{g}/10\text{days}$ であることからも、それを十分上回る性能の吸着剤が開発されたと言える。しかも、10日間に亘る試験によっても吸着剤の物理的な“こわれ”や劣化は見られず、従って物理的特性からも問題はないと考えられる。

なお、A、BおよびDの吸着剤のウラン吸着量は、必ずしも日数に比例して増加していないが、これは、試験の為に汲み上げた海水がフィルターを通したにも拘らず、かなり汚れており、これが吸着剤に“目詰り”を起こしていることも十分考えられる。もちろん、吸着剤の本来の特性と言うことも考えられるため、これを明らかにするためには清浄な海水を用いた同様の吸着試験が必要である。

因みに、もし、吸着剤のウラン吸着速度の劣化が“目詰り”によるものであるとすれば、清浄な海水域でづ吸着を10日間行った場合には、BおよびDの吸着剤は約 $800\sim 1,000\mu\text{g}/\text{g}$ のウランを吸着できることになり、第一段階の目標である $1\text{mg-U/g-R}/10\text{days}$ にほぼ到達出来たということになる。

の吸
に向
剤CR
着剤
こわ
して
かな
もち
には
すれ
,000
sに

2. 吸着装置の最適化の検討

2.1 検討条件

波力により浮体の吸着室へ海水が流入し、ウランを吸着させるシステムにおいては、回収効率は

- ①吸着剤の吸着速度
- ②吸着室への新鮮な海水の流入速度
- ③海水と吸着剤の接触効率

を総合した性能から決まる。

これらの性能向上を目的として模型実験を行った。

これらの性能は浮体自身の性能（浮体の動搖・吸着室の寸法、形状）及び吸着剤の性状（形状、比重等）に支配されていると思われるが、今のところ海水流入量と吸着室内における海水の動きを直接計測することは困難である。さらに浮体の動搖のため現象はいっそう複雑となる。

そこで、本報においては、浮体は静止しており、かつ吸着剤は粒状であるという条件のもとで、吸着室の最適な寸法について模型実験による検討を行った。また、その際、性能比較は吸着剤の波浪による挙動の定量化及びウラン吸着実験による確認という指標により行った。

2.2 予備実験

2.2.1 カラム試験

カラム通水試験は吸着剤を充填したカラムに一定流速で強制的に海水を通水することにより、海水と吸着剤の理想的な接触状態において吸着剤のウラン吸着率を調べる試験である。

（ウラン吸着率とはある期間海水と接触させた吸着剤の単位重量当りのウラン吸着重量である）

本研究においてカラム通水試験を行う目的は、以後に行うウラン吸着実験の目標とするウラン吸着率を求めることと、ウラン吸着実験から求めるウラン吸着率の温度の影響を取り除くため、予め海水温度とウラン吸着率の関係を調べることである。

(1) 試験条件

本研究で使用した吸着剤はM社製のアミドキシムキレート樹脂である。この吸着剤の物理的諸元を表-4に示す。

カラム通水試験は表-5に示すように直接海から汲み上げた海水温度28.0~14.5℃の生海

水を使用し、約5でおきに3回行った。試験を終えた吸着剤は群馬環境技研（株）に分析を依頼し、ウラン吸着率を求めた。（以下本研究でのウラン吸着率は同様に分析を依頼して求めた）

表-4 吸着剤の物理的諸元

密 度	見掛け密度 水 分	672 g/l 52.7 %
粒 径	平均径 有効径 均一係数	0.58 mm 0.44 mm 1.44
粒度分布	0 - 0.35 - 0.42 - 0.59 - 0.84 0.84 -	0.4 % 7.1 % 43.7 % 39.3 % 9.5 %

表-5 カラム通水試験状況の概要

サンプル No	1	2	3
試験吸着剤量 (ml)	6.0	6.0	6.0
海水通水流量 (l/h)	1.0	1.0	1.0
海水通水時間 (h)	240	120	120
平均海水温度 (°C)	26.2	20.8	15.2

(2) 試験結果

試験結果を図-5に示す。この結果を用いて以下に行うウラン吸着実験におけるウラン吸着率の温度補正を行った。

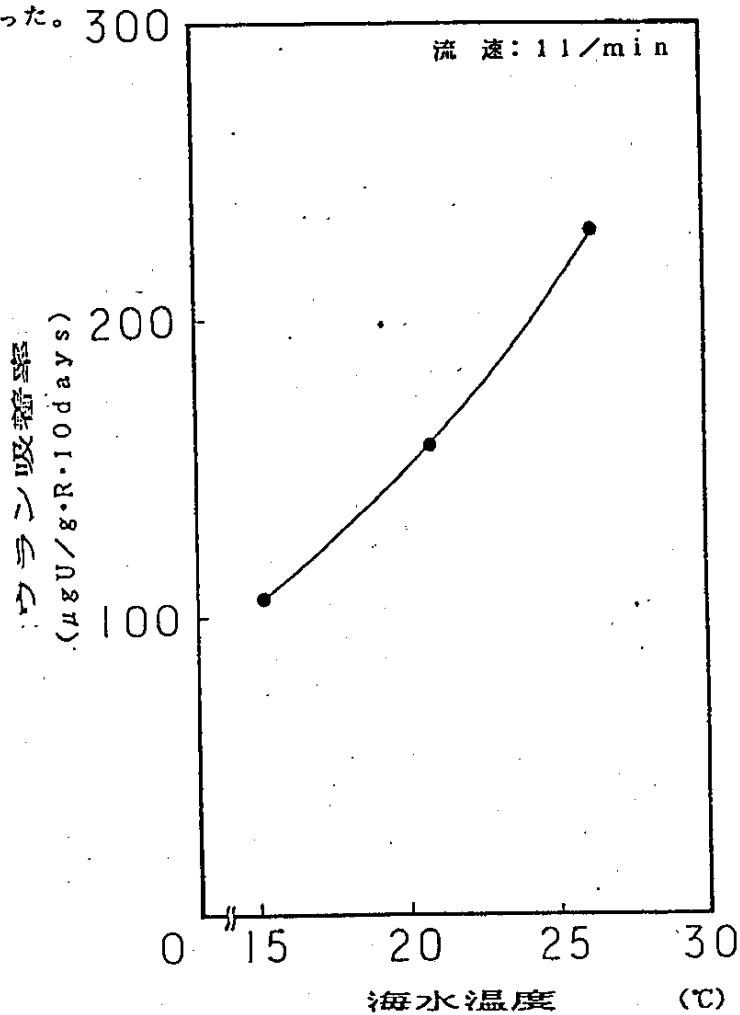


図-5 海水温度による吸着剤の性能の変化

(3) 考察

カラム試験結果(図-5)からわかるように、海水温度が10°C上るとウラン吸着率はおよそ倍近くになる。このことから吸着浮体は年間通じて海水温度が高く、温度変化の少ない海域に設置する必要があることがわかる。

2.2.2 吸着剤最適充填量

(1) 吸着室に充填する吸着剤層高

吸着室に充填する吸着剤の層高によりウラン吸着率が変化することが考えられたため、吸着室部分模型を用いて充填する吸着剤層高を変化させ、それぞれの吸着剤層高に対し波浪中ウラン吸着実験を行うことにより、吸着剤層高とウラン吸着率の関係を調べた。そして、吸着剤層高とその吸着剤層高におけるウラン吸着率からウラン回収システムの経済性を考え、吸着室に充填する最適な吸着剤層高を求めた。

(2) 実験方法

ここで行ったウラン吸着実験は、波力を用いて海水と吸着剤を接触させてウラン吸着率を測定する実験である。

実験は次のように行った。海水循環加振水槽にポンプで海水を汲み上げ、加振機により波高 4.0cm、周期 1.0sec の規則波を起こした。そして、この規則波中に吸着剤を充填した吸着室部分模型を模型没水水深 10cm に水平に固定し、吸着室部分模型に充填する吸着剤層高を変化させ、それぞれの吸着剤層高に対して 5 日間連続して実験を行った。図-6 に実験装置の概略図を示し、模型の設置状態を図-7 に示す。また、実験条件及び装置の説明を以下 a) ~ d) に示す。

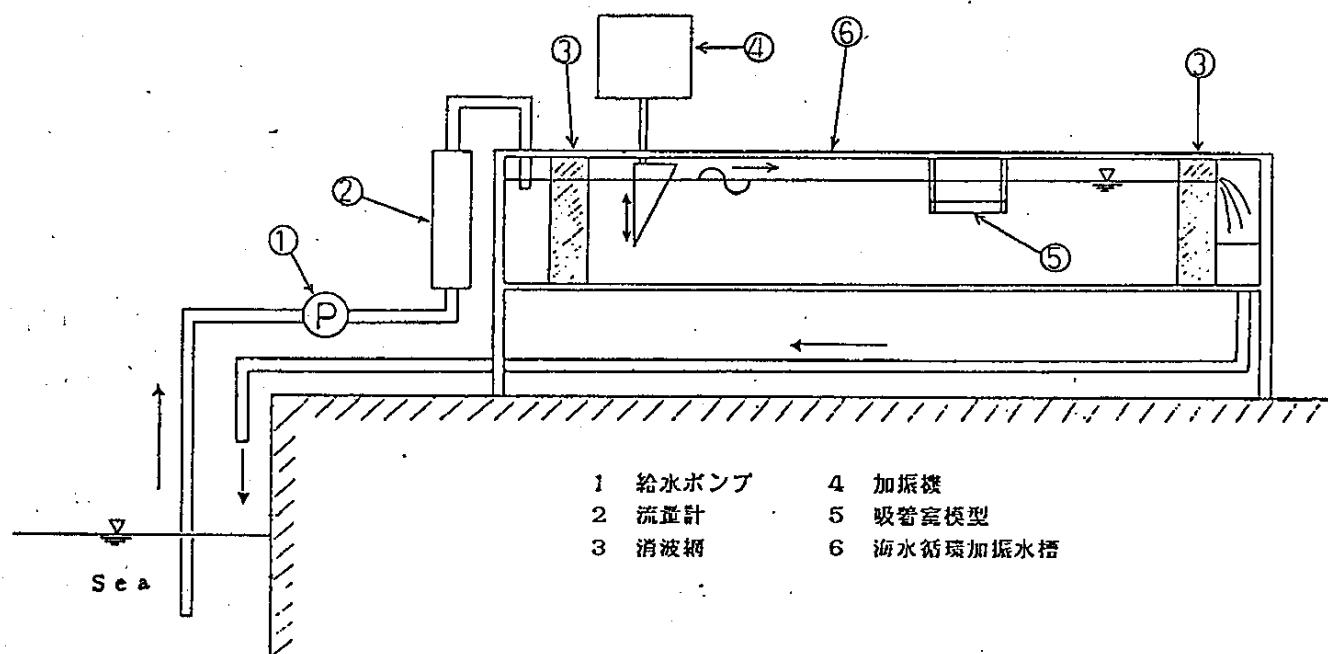


図-6 波浪中ウラン吸着実験 実験装置概略図

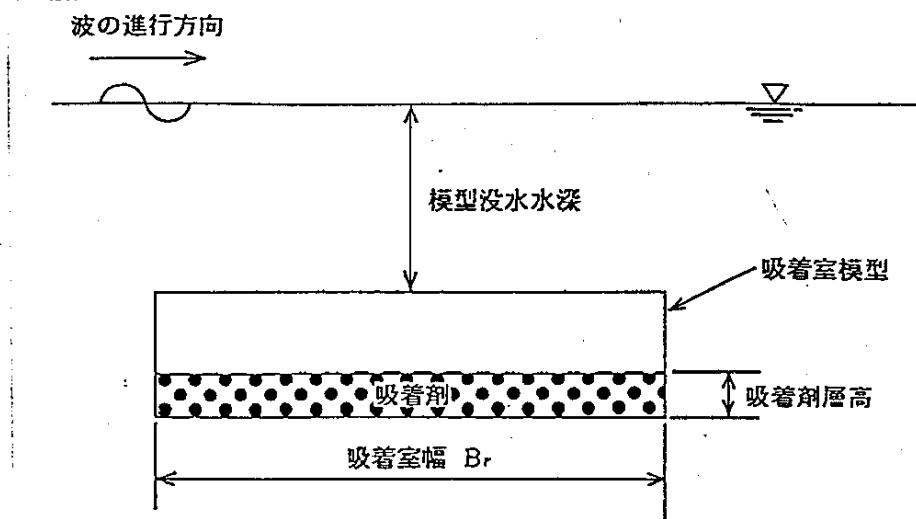


図-7 吸着室模型の設置状態

a) 実験条件:	波高	4.0 cm
	波周期	1.0 sec
	海水流量	10 m³/h
	模型没水水深	10cm
	水槽内水深	40cm
	吸着剤	M社製アミドキシムキレート樹脂
	吸着剤比重	約1.15
	吸着剤層高	2.6 mm, 7.8 mm, 13mm
	実験時間	120 時間

b) 海水循環加振水槽: 海水循環加振水槽（長さ 5m、幅 0.5m、深さ 0.5m）は水槽内の水深を一定に保てるように、一定水深を越えた海水はオーバーフローして再び海に排出される構造になっており、常に新鮮な海水が水槽に流入し、一方向に流れる。

c) 加振機: 加振機はモーターによる回転運動をシャフトの上下運動に変化させるものであり、シャフトの先端に造波体がついている。この造波体が上下することにより規則波を起こすことができる。

d) 吸着室部分模型: 吸着室部分模型は図-8 に示すように吸着浮体に9室ある吸着室の1室を取り出し、波の進行方向に対し垂直方向長さを水槽の幅に合わせて実機の1/117に縮小し製作したものであり、2次元での実験となる。実験に使用した吸着室部分模型を図-9 に示す。この模型の上下面には吸着剤保持ために60メッシュのサランネットが張ってある。

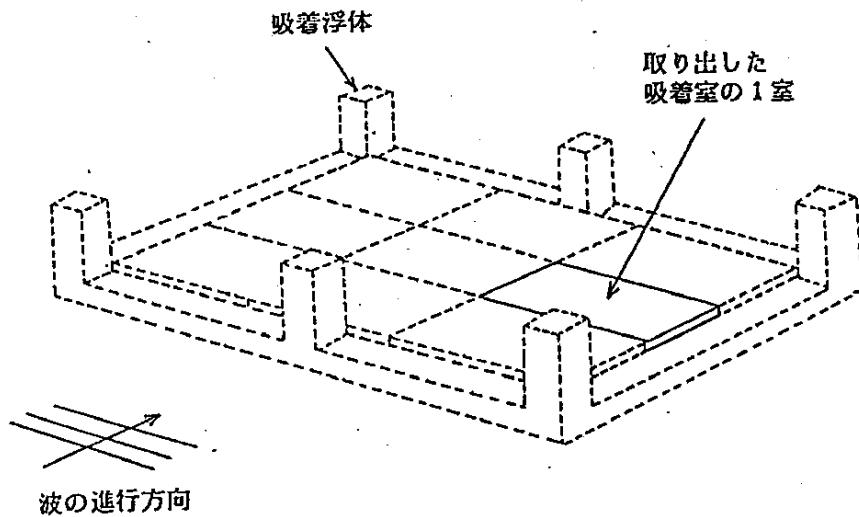


図-8 取り出した吸着室1室

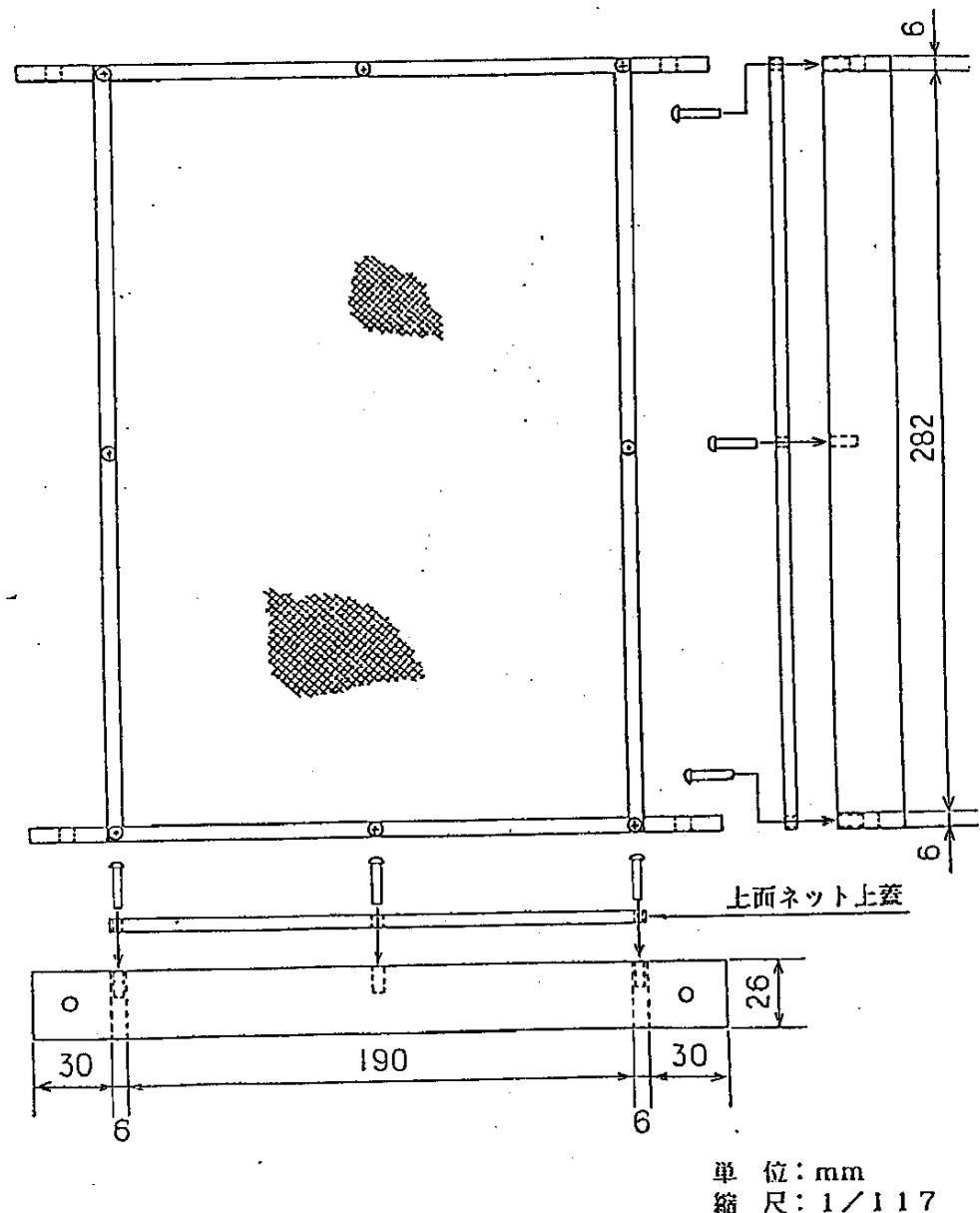


図-9 吸着室部分模型の概略図

(3) 実験結果

実験状況を表-6に示す。また、実験結果を図-10に示す。

表-6 実験状況の概要

サンプル No	4	5	6
実験開始時刻	09月07日17時20分	09月12日19時00分	09月18日10時15分
終了時刻	09月12日18時05分	09月17日19時10分	09月23日10時15分
吸着剤層高 (mm)	2.6	7.8	13.0
吸着剤量 (cm ³)	139.3	417.9	696.5
波 高 (cm)	4.5~5.0	4.5~5.0	4.0~5.0
波 周 期 (sec)	1.0~1.1	1.0~1.1	1.0~1.1
海水流量 (m ³)	9.3~10.5	8.5~11.1	7.8~10.0
平均海水温度 (°C)	25.6	25.3	24.6

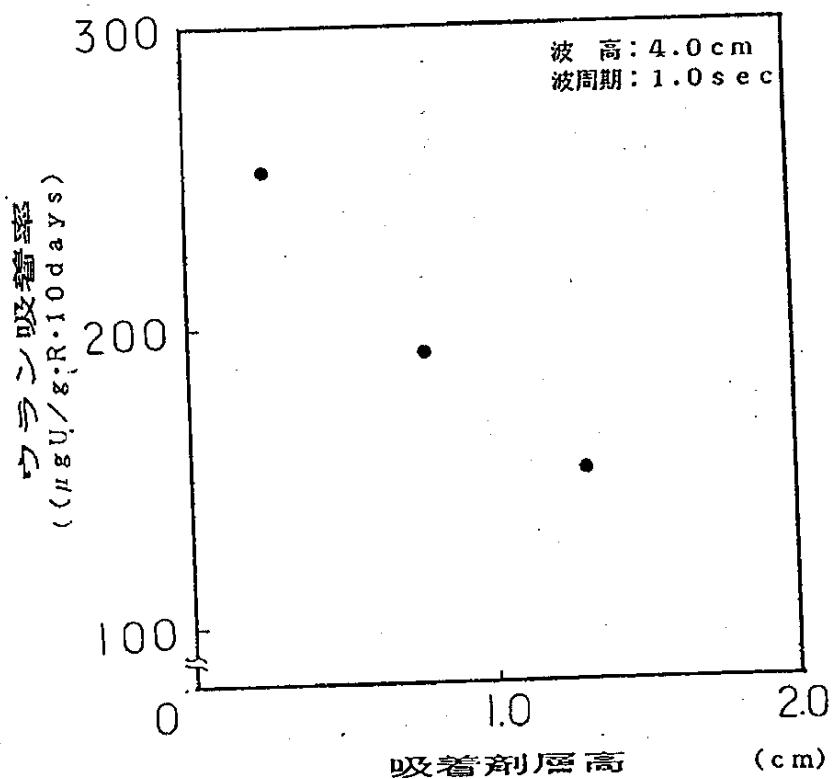


図-10 吸着剤層高とウラン吸着率の関係

(4) 考 察

図-10から吸着剤の層高が増すに従いウラン吸着率が低下していくことがわかる。これは吸着剤の層高が増すに従い海水の流入抵抗が増し、海水の流入量が減少するためであると考えられる。また、吸着剤の層高が増せば吸着室の単位容積当たりの吸着剤量が増し、海水と吸着剤の接触量が減少するためであると考えられる。このように吸着室に充填する吸着剤層高はウラン吸着率に大きく影響すると言える。

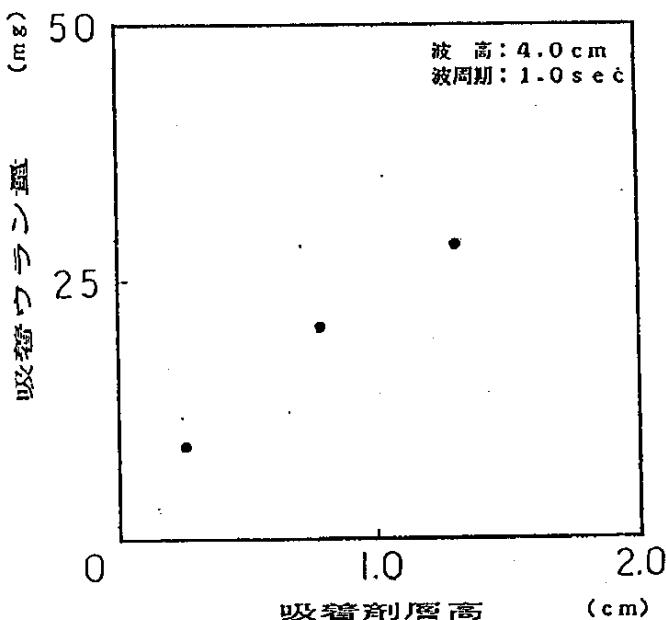


図-11 吸着剤層高とウラン量の関係

図-11はウラン吸着率と吸着剤充填量から求めた吸着ウラン量と吸着剤層高の関係を示した図である。ここで吸着ウラン量とは吸着室部分模型に充填した吸着剤が吸着したウランの量である。この図から吸着剤層高が増せば吸着ウラン量は増す傾向にあることが言える。この実験により、ウラン吸着率は吸着室に充填する吸着剤層高により変化することがわかつたため、吸着剤層高とその層高におけるウラン吸着率から吸着剤層高に対する本システムの経済性について考えてみた。

ウラン回収コストは吸着浮体基数、及び吸着剤量に依存することから、吸着剤層高とその層高におけるウラン吸着率から年間1000トンのウランを回収するために必要な吸着浮体建造費と吸着剤コストを概算してみた。吸着浮体建造費、及び吸着剤コストは昭和62年度に概念設計された吸着浮体をもとに見積られた値段であり、吸着浮体建造費は1基当り27億円、吸着剤コストは1リッター当り800円とした。表-4はコスト概算の概要を示しており、図-12はこの概算結果をグラフにしたものである。

表-7 吸着浮体建造費及び吸着剤コスト概算の概要

サンプル N <small>o</small>	4	5	6
吸着剤層高 (mm)	2.6	7.8	13.0
吸着剤量 (cm ³)	139.3	417.9	696.5
吸着剤乾燥重量 (g)	36.2	108.7	181.1
ウラン吸着率 ($\mu\text{g/g} \cdot \text{R} \cdot 10\text{d}$)	262	192	152
吸着ウラン總量 (mg)	9.1	20.9	27.5
浮体一基の 吸着剤充填量 (m ³)	2010	6030	10050
吸着剤乾燥重量 (t)	523	1568	2613
浮体一基の 年間回収ウラン量 (t)	4.1	9.5	12.5
ウラン年産 1000トン			
必要浮体基数 (基)	241	106	80
浮体建造コスト (億円)	6507	2862	2160
吸着剤コスト (億円)	3875	5113	6432
コスト総計 (億円)	10382	7975	8592

吸着浮体: 27億円/基 吸着剤コスト: 800円/1

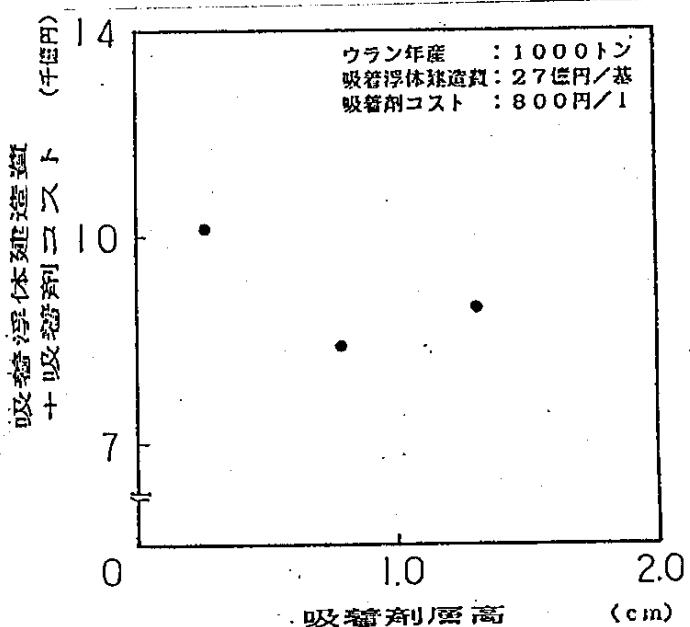


図-12 吸着剤層高と吸着浮体建造費+吸着剤コストの関係

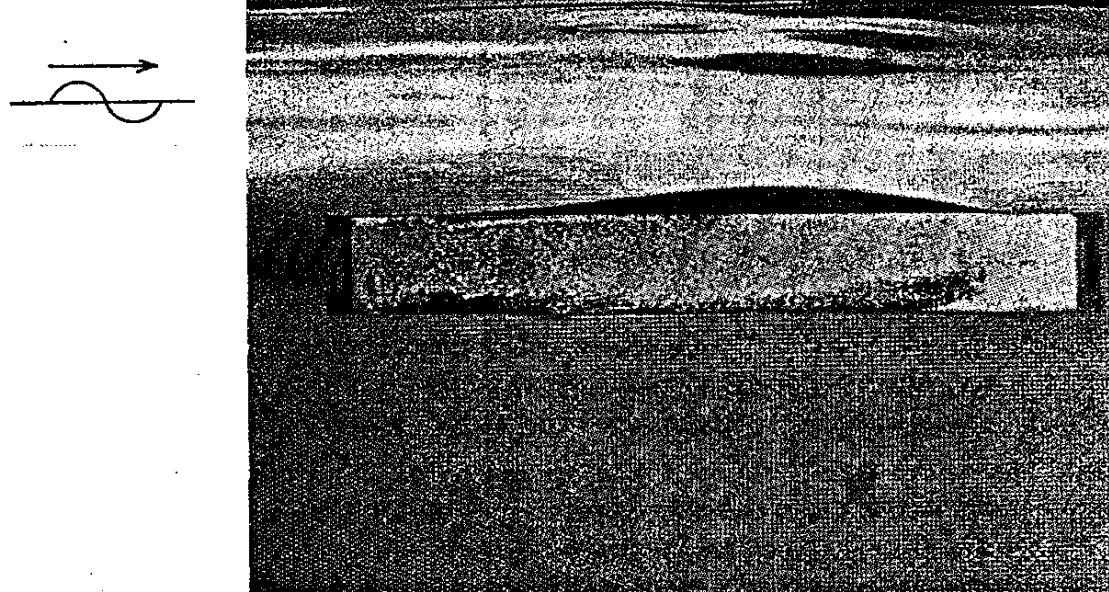
この結果、吸着剤層高が 8 mm 付近で最もウラン回収コストが低くなることが予想され、吸着室に充填する吸着剤層高に最適値が存在することがわかった。この実験においては、表-6 サンプル No. 5 の吸着剤層高 7.8 mm が最適な吸着剤充填量であるとした。以下本研究において吸着室に充填する吸着剤層高はすべて 7.8 mm とした。

2.3 吸着室内における吸着剤の挙動測定実験

2.3.1 実験の目的

波浪中における吸着室内の吸着剤の挙動は、偏らずに吸着室全域において流動状態にあることが海水と吸着剤の接触量も多く、理想的であると考えられる。しかし、昭和62年度に行われた吸着浮体の模型実験から、波浪中の吸着剤の挙動は偏りを示し、吸着室全域において流動化しておらず、海水と吸着剤の接触状態がよくないことが予想された。その一例として写真-5に規則波中の吸着剤の挙動を示す。このことから吸着剤の偏在域と流動域がウラン吸着率に最も影響すると考えられたため、波浪中における吸着室内の吸着剤の挙動によって実験的に偏在域と流動域とにわけ、それについて定量化を試みた。そして、波浪中の吸着剤の挙動を把握することにより、理想的と考えられる吸着剤の挙動が得られる吸着室の幅を求めてみた。

また、入射した波が吸着室により減衰し、その後方の吸着室では海水流入量が減少することが考えられたため、吸着室の透過波高を測定することにより、海水流入量がどの程度減少するのかについても調べてみた。



写-3 規則波中の吸着剤の挙動

2.3.2 実験方法

実験は次のように行った。循環水槽に吸着剤を充填した吸着室模型を水深 4.3cmに水平にくさびで固定し、波高 1~4 cm、波周期 0.6~2.0sec の規則波を吸着室模型に入射させた。そして、そのときの吸着剤の挙動を吸着室側面からビデオカメラで撮影し、テレビモニター再生画面より吸着剤の挙動を測定し、解析することにより吸着剤偏在率、吸着剤流動率を求めた。また、同時に吸着室の 5 cm 後方で透過波高を計測し、透過波高比を求めた。透過波高比とは、透過波高を入射波高で除した無次元値である。

実験には幅の異なる 4 種類の吸着室模型を用いてそれぞれの模型について吸着剤の挙動を測定し、解析を行った。充填した吸着剤量は各模型層高 7.8mm である。また、吸着室模型の縮尺は 1/117 としている。実験装置の概略図を図-13 に示す。

a) 実験条件：波高 1.0cm, 2.6cm, 4.0cm

波周期 0.6~2.0sec

水槽内水深 50 cm

模型没水水深 4.3cm

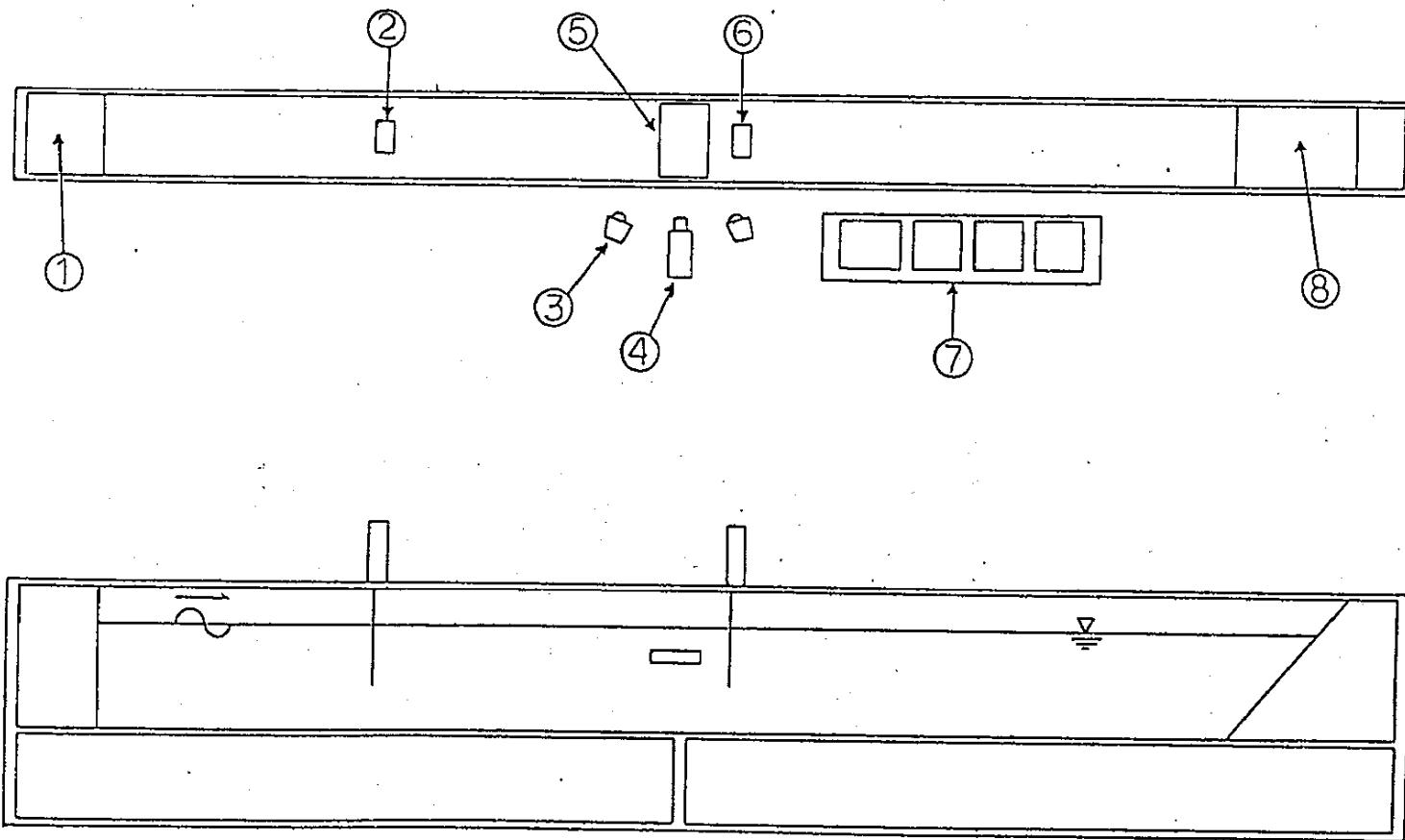
吸着剤 M社製アミドキシムキレート樹脂

吸着剤比重 約 1.15

吸着剤層高 7.8 mm

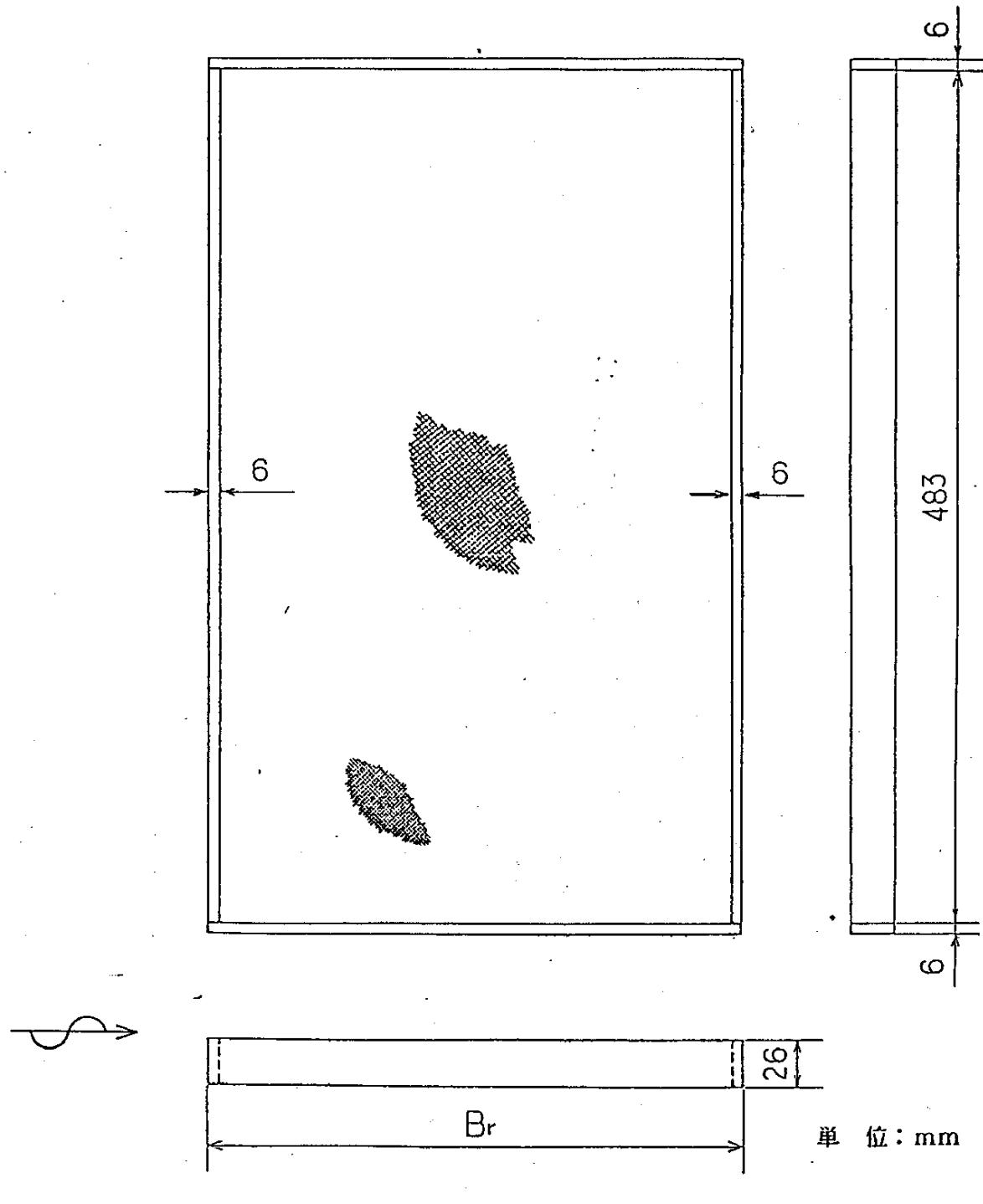
b) 循環水槽：循環水槽（長さ 20m、幅 0.5m、水深 0.5m）は造波機を備えた回流水槽である。

c) 吸着室模型：実験に使用した幅の異なる 4 種類の吸着室模型を図-14 に示す。この型の上下面には吸着剤保持ために 60 メッシュのサランネットを張った。模型ごとの諸元を表-8 及び表-9 に示す。



1 波板機	4 ビデオカメラ	7 計測機器
2 入射波高計	5 吸着室模型	8 滅波ブロック
3 照明ライト	6 透過波高計	

図-13 吸着剤の挙動測定 実験装置概略図



吸着室模型	吸着室幅 B_r (mm)
A	100
B	200
C	300
D	400

図-14 振動測定用吸着室模型概略図

2.3.3 挙動定量化の方法

この実験において吸着室内は吸着剤の動き方の相違により図-15に示すように3つの領域に分かれることが観測された。（写真-5参照）

領域 A s (偏在域) : 吸着剤が密集して滞留しており、波浪中でも概ね動かない。

海水はほとんど流入していないと思われる。

領域 B s (流動域) : 吸着剤が浮動している。

海水が最も多く流通していると思われる。

領域 C s : 吸着剤は浮いているがほとんど動いていない領域。

海水流通は非常に少ないと思われる。

また吸着剤の動きは二次元的、すなわち波の進行方向に対して直角方向には変化が少なく一定と見なせたので、側面から各領域の面積を測り、偏在域及び流動域を求めた。さらに、これらにより吸着剤充填量に対する偏在域の占める割合（吸着剤偏在率）および吸着室容積に対する流動域の占める割合（吸着剤流動率）を求めた。

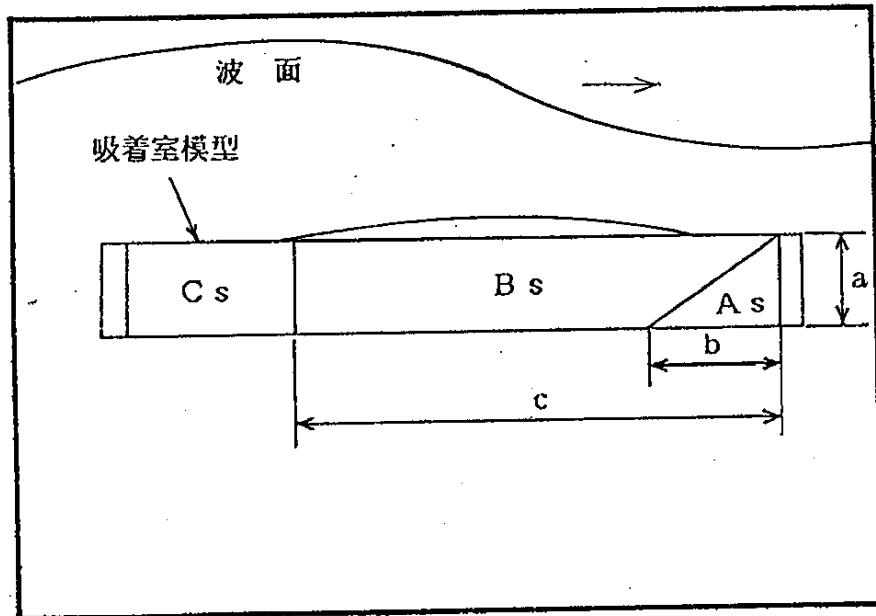


図-15 吸着剤の挙動によるグループ分け

なお、規則波中において偏在域はほとんど変動しなかったが、領域 B s と領域 C s の境界線は変動したので平均位置を採用した。

測定はまず図-15の a, b, c の寸法を測定する。（b の値は変動することから平均値を

領域

測定する) そして、この写真は実物より縮小しているので、a の値から倍率を求めて b, c を実寸法に直す。

$$\text{倍率} = \frac{\text{模型の高さ } 2.6\text{cm}}{\text{測定値 } a \text{ (cm)}}$$

次に領域 A s, B s の面積を求め、吸着室模型の波の進行方向に対し垂直長さをかけ、吸着剤の偏在域と流動域を求める。そして、この値から吸着剤偏在率、吸着剤流動率を求める。

$$\text{吸着剤偏在率} = \frac{\text{吸着剤偏在域 } (\text{cm}^3)}{\text{吸着剤充填量 } (\text{cm}^3)}$$

$$\text{吸着剤流動率} = \frac{\text{吸着剤流動域 } (\text{cm}^3)}{\text{吸着室容積 } (\text{cm}^3)}$$

一例として写真-5 から吸着剤偏在率と吸着剤流動率を求めてみる。

この写真の吸着室模型は吸着室模型 B であり、垂直方向長さ 48.3cm, 吸着剤充填量 708.2cm³, 吸着室容積 2360.9cm³である。

a = 1.25cm, b = 1.75cm, c = 6.5cm と測定でき、

倍率 2.08 より

吸着剤の偏在域 : 228.6cm³

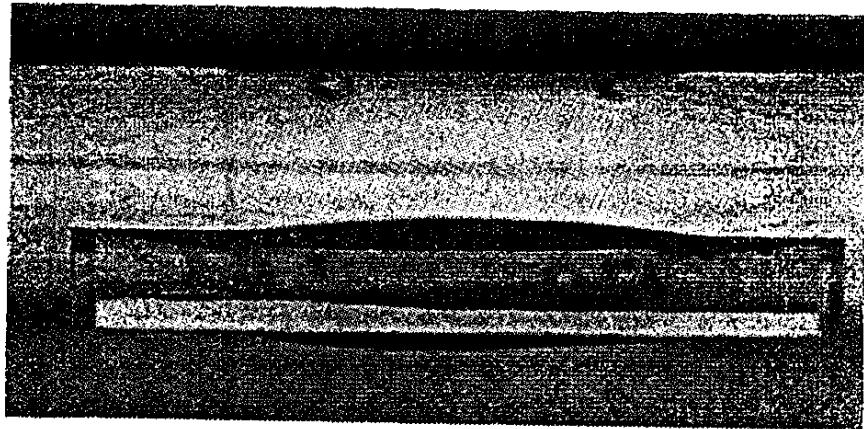
吸着剤の流動域 : 1469.2cm³ と求まり

吸着剤偏在率 : 0.32

吸着剤流動率 : 0.62 と求められる。

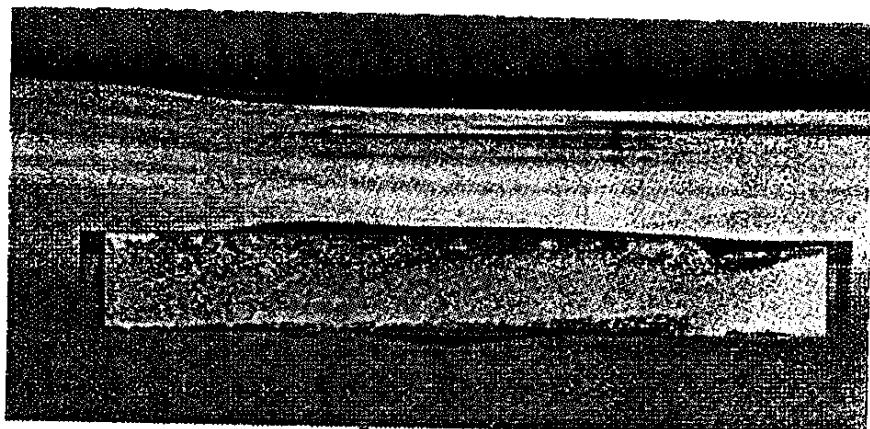
の境界

均値を

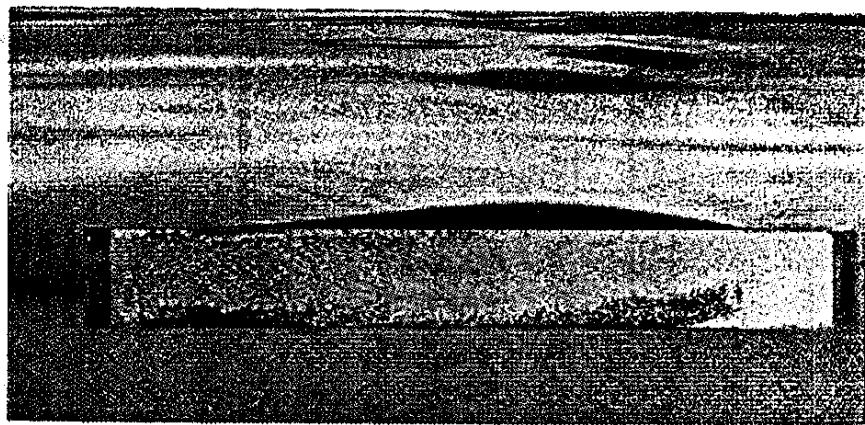


写-4 静止水中の吸着剤

吸着室模型 B, 波高: 2.6 cm, 波周期: 1.2 sec



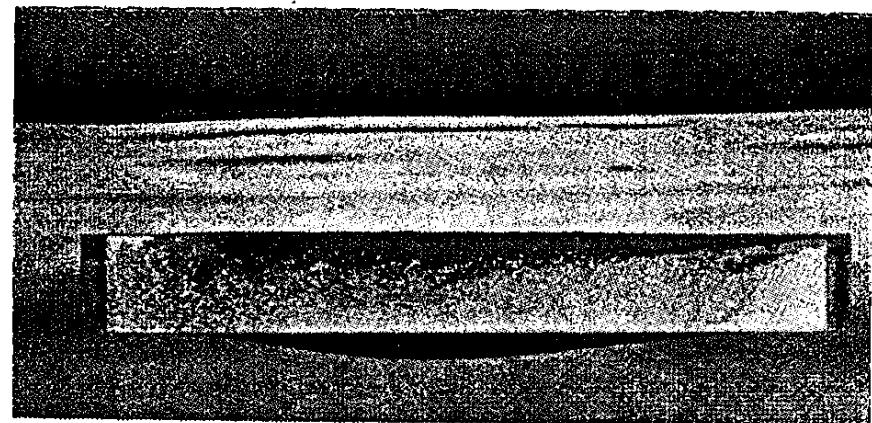
写-5 波面上昇時の吸着剤の挙動



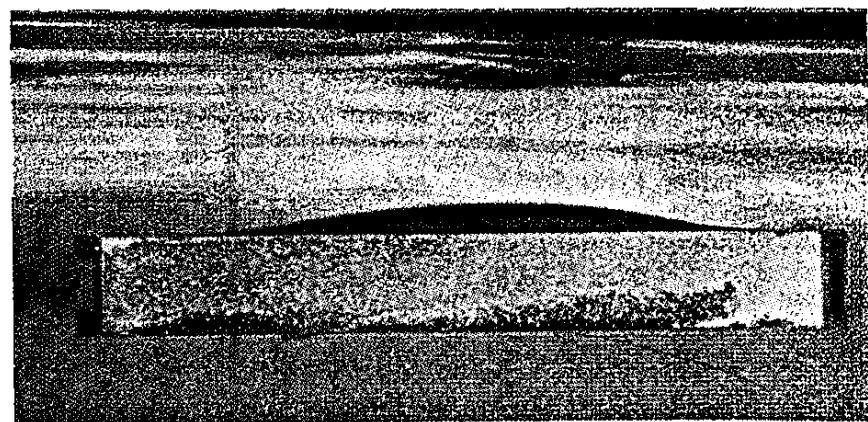
写-6 波面上昇時の吸着剤の挙動



写-7 波面下降時の吸着剤の挙動



写-8 波面下降時の吸着剤の挙動



写-9 波面上昇時の吸着剤の挙動

表-8 吸着室模型の諸元

吸着室模型	A	B
吸着室幅 (cm)	10	20
吸着剤層高 (mm)	7.8	7.8
吸着剤充填量 (cm ³)	331.5	708.2
吸着室容積 (cm ³)	1105.1	2360.9

表-9 吸着室模型の諸元

吸着室模型	C	D
吸着室幅 (cm)	30	40
吸着剤層高 (mm)	7.8	7.8
吸着剤充填量 (cm ³)	1084.9	1461.6
吸着室容積 (cm ³)	3616.7	4872.5

2.3.4 実験結果

実験結果を図-16から図-24に示す。

図-16～図-18は吸着剤の偏在特性について、図-19～図-21は吸着剤の流動特性について示し、図-22～図-24には透過波高特性が示されている。そして、図-25に透過波高の記録例を示す。

以上、それぞれのグラフの横軸には波長 λ を吸着室幅 B_r で除した無次元値が示されている。

2.3.5 考 察

測定結果は、それぞれ測定項目において4種類の模型それぞれに差異は見られたが、波周期に対してほぼ同じ傾向を示した。

a) 吸着剤偏在特性

図-16は設計波高（実海域において3m）における吸着剤の偏在率特性を示しているが、模型Aが最も高く模型B, C, Dはほぼ同じ程度である。ここで、模型Aが高い吸着剤偏在率を示すのは、吸着室幅に対して吸着室の高さが高く、吸着剤充填量に対して偏る吸着剤量が多くなるためであると考えられる。この図からは吸着室幅 B_r は極端に小さくしない

限り、吸着剤偏在率は吸着室幅Brに依存しないと言える。さらに、波長・吸着室幅比Lw/Brの値の中間で、吸着剤偏在率は高い値を示しているので、ウラン吸着率が吸着剤偏在率に依存するならば、Lw/Brの値を極端に小さくするか、あるいは極端に大きくして吸着室を設計しなければならないことが言える。Lw/Brの値を大きくすると吸着室は細分化されて構造上コスト高となるので、偏在率から見た限りはLw/Brの値は小さいほど良い。

波高が設計波高より高い場合(図-17)においても、吸着剤偏在率は設計波高の場合とほぼ同じ傾向の変化を示す。波高が低くなると(図-18)模型A, Bは設計波高と同じ様な周期に対する吸着剤偏在率の変化を示すのに対し、模型C, Dにおいては偏在率が非常に高くなる。模型C, Dの吸着剤偏在率は吸着剤充填量の割に吸着室の天井が低いため、台形状の広い偏在域が発生して波エネルギーをふさぐ形となり、さらに波エネルギーそのものも低レベルであることと相まってますます偏在域が発達したと思われる。このような現象が発生する限界波高についてはさらに詳細な実験が必要である。

b) 吸着剤流動率特性

図-19は設計波高における吸着剤の流動率特性を示している。この図から吸着剤流動率は吸着室幅Brに依存せず、またLw/Brの値が10付近より小さくなると急激に低下する。このことからウラン吸着率が吸着剤流動率に依存するならば、吸着室を設計するにはLw/Brの値を10付近より小さくすることは避けるべきであると言える。波高が設計波高より高い場合(図-20)は上記の領域においてもやや高い吸着剤流動率を示す。波高が設計波高より低い場合(図-21)は吸着室幅により差異がみられ、吸着剤流動率は模型Bが高く、模型Aは低い値を示している。吸着室幅により吸着剤流動率に違いがみられるのは、吸着剤の偏りと吸着室前部空間容積(図-26参照)と関係があると思われる。

吸着剤の偏りは吸着室後方ほど吸着剤層高が高くなり、吸着剤が偏りを示すことによって生じる吸着室前部空間容積は、吸着室幅が大きくなるに従い広くなる。吸着室前部空間容積の大きい吸着室模型B, C, Dは流動化した吸着剤が広がりやすくなり、吸着剤流動率が高くなると考えられる。これに対して吸着室模型Aは吸着室前部空間容積が小いため、吸着剤流動率が低い値を示すと考えらる。

つい
の記
いる。

波周

るが
剤偏
吸着
ない

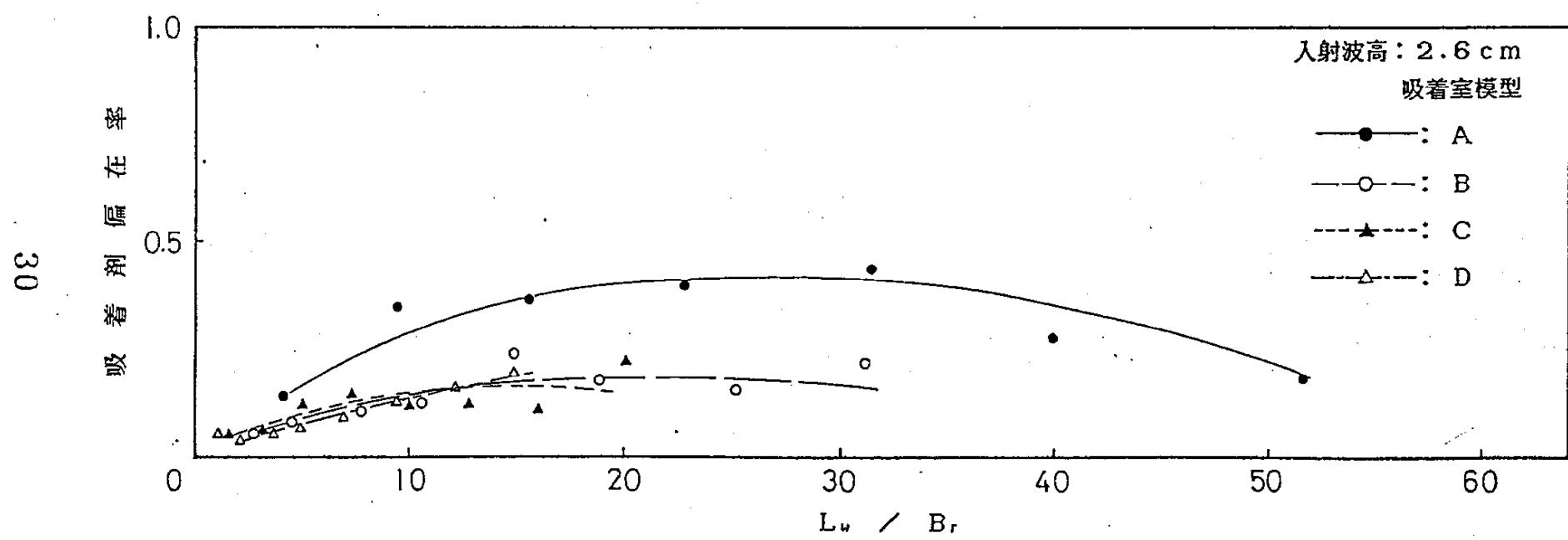


図-16 設計波高における吸着剤偏在率特性

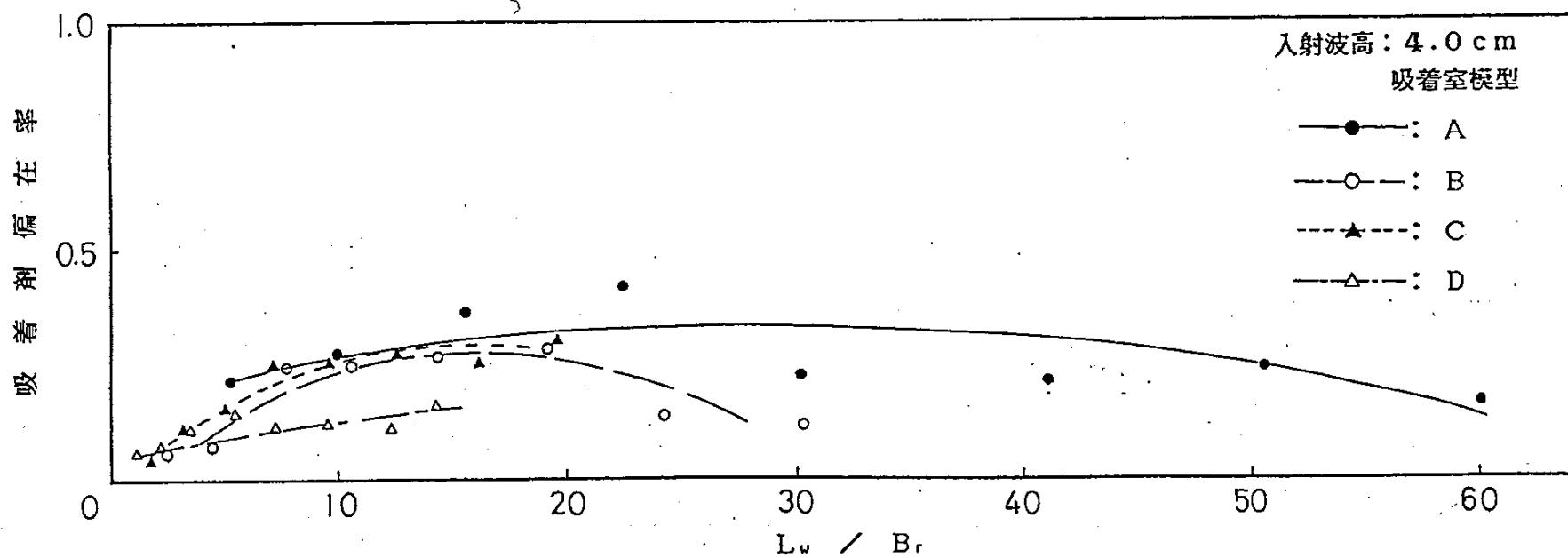


図-17 波高4.0 cmにおける吸着剤偏在特性

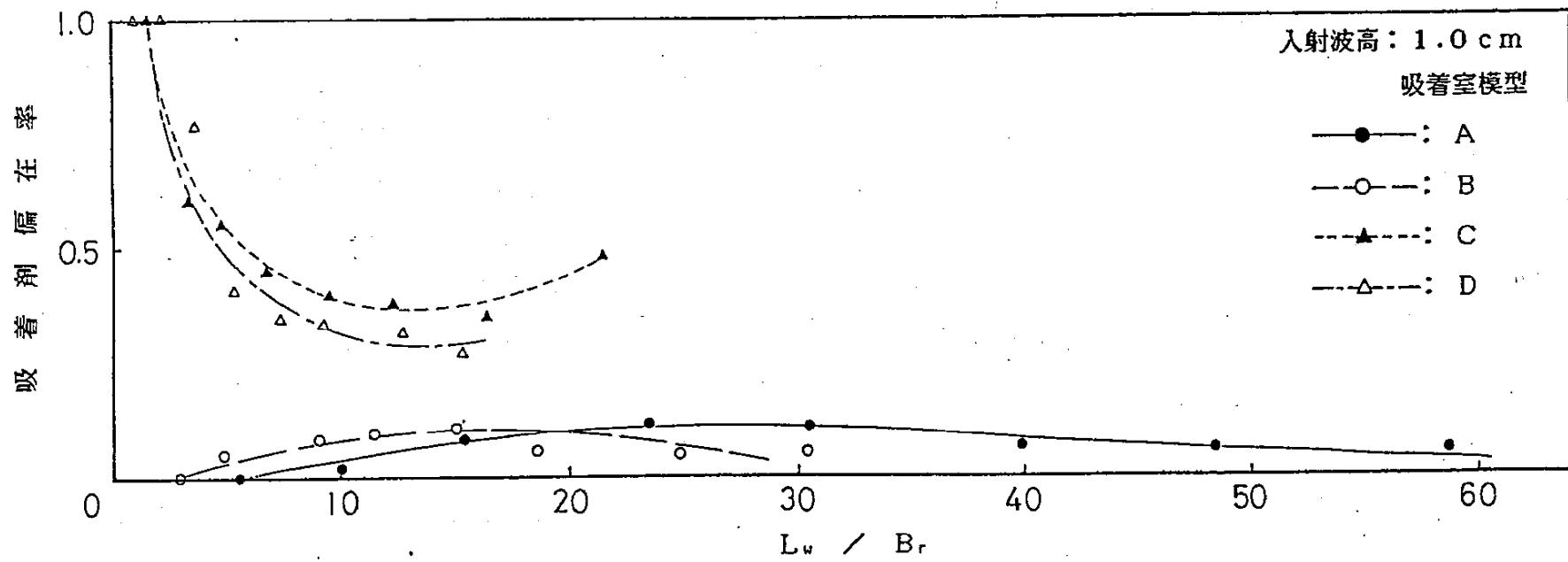


図-18 波高1.0 cmにおける吸着剤偏在特性

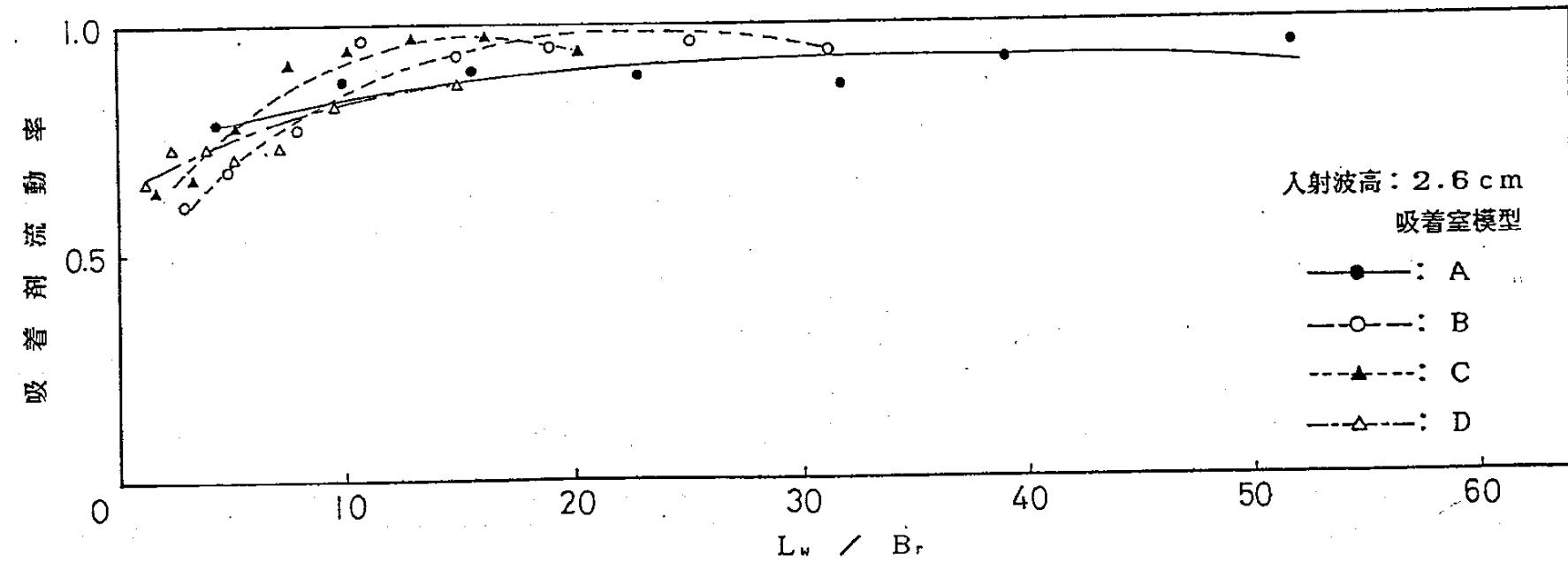


図-19 設計波高における吸着剤流動率特性

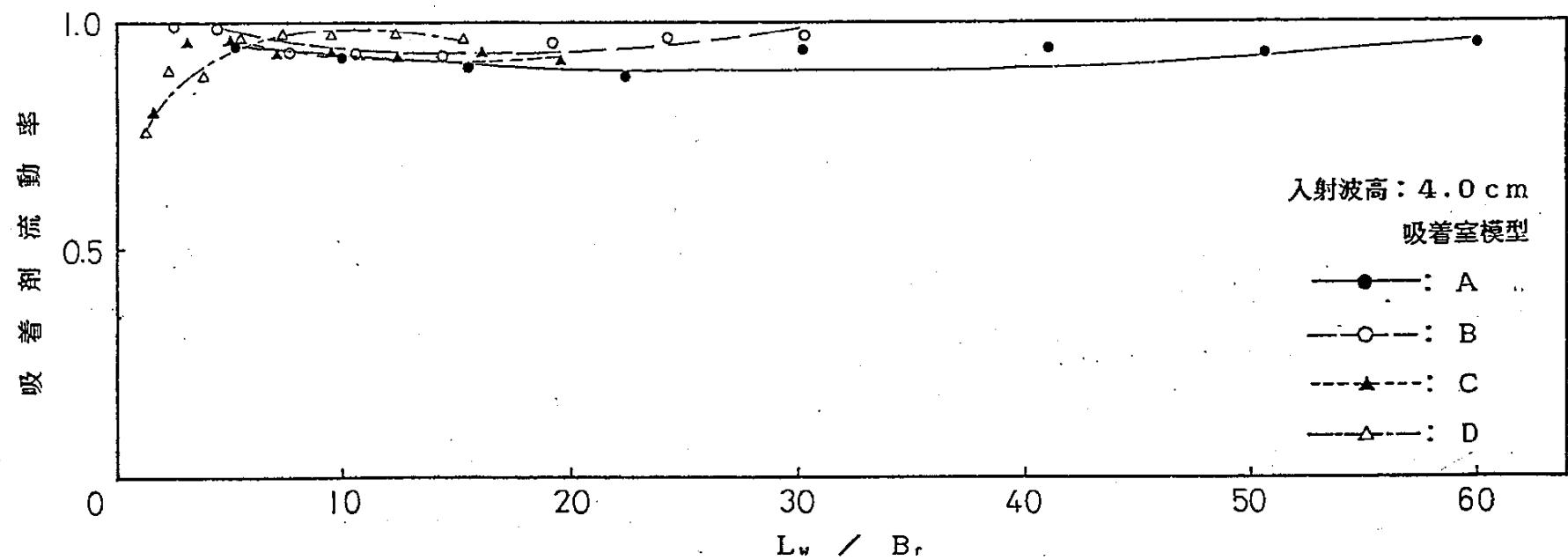


図-20 波高4.0 cmにおける吸着剤流動率特性

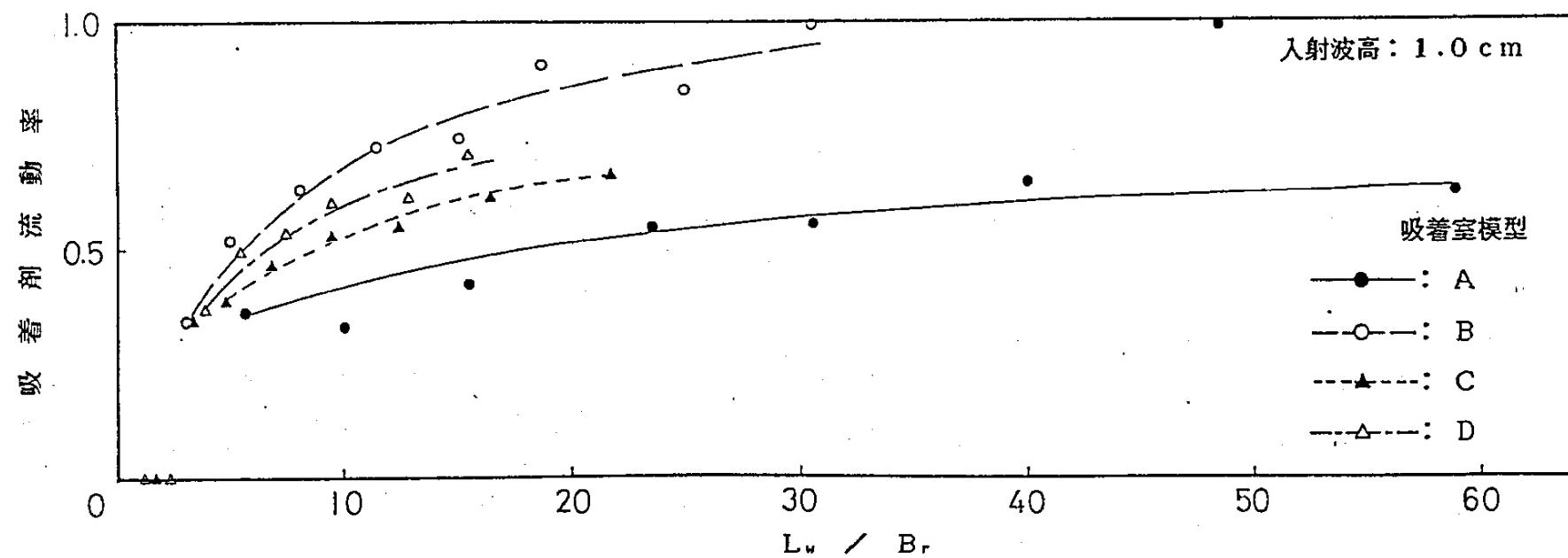


図-21 波高1.0 cmにおける吸着剤流動率特性

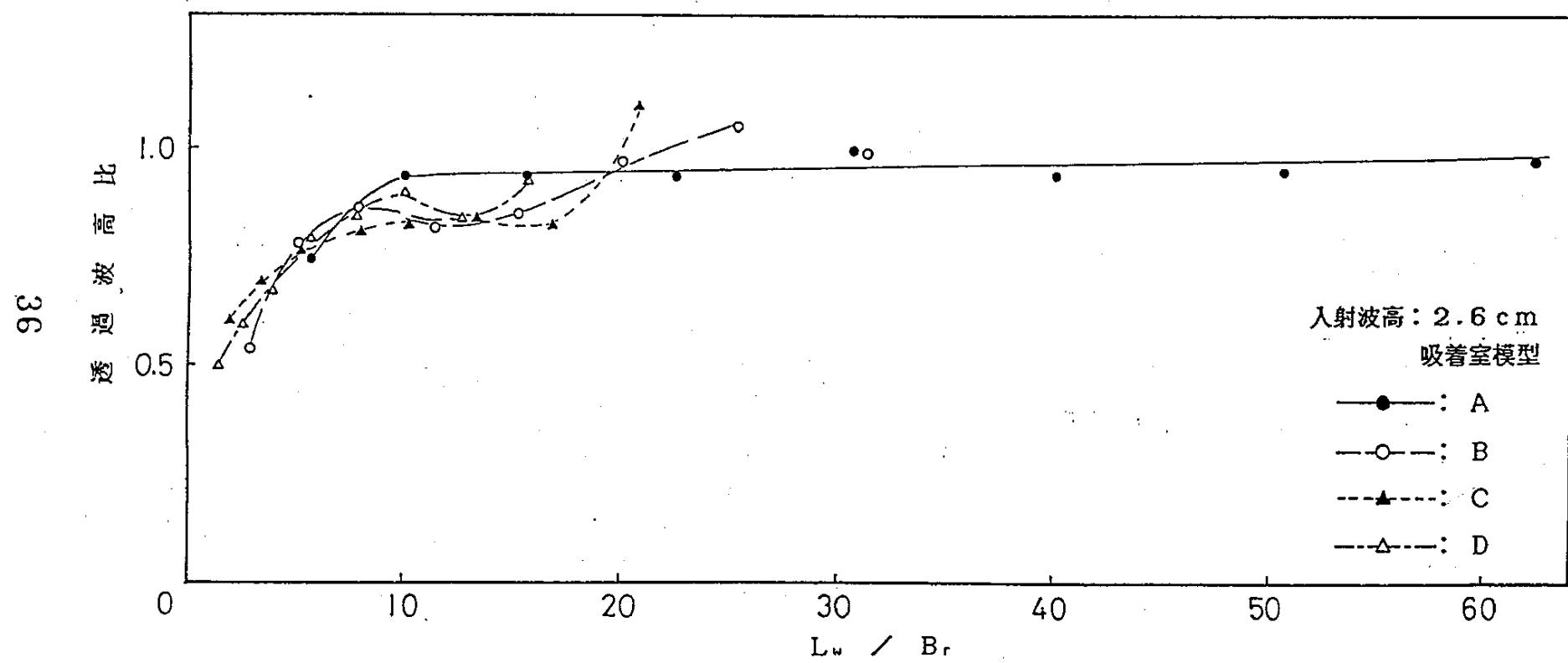


図-22 設計波高における透過波高特性

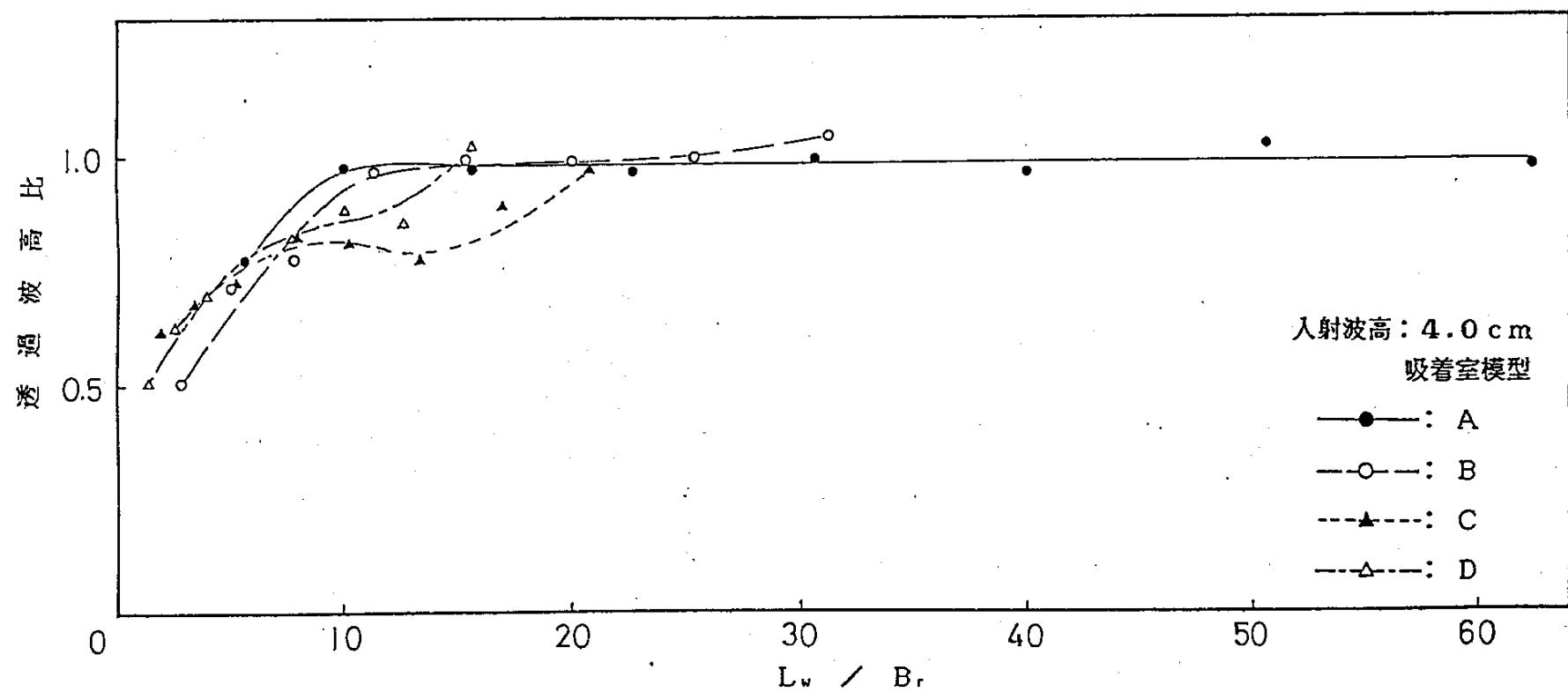


図-23 波高4.0 cmにおける透過波高特性

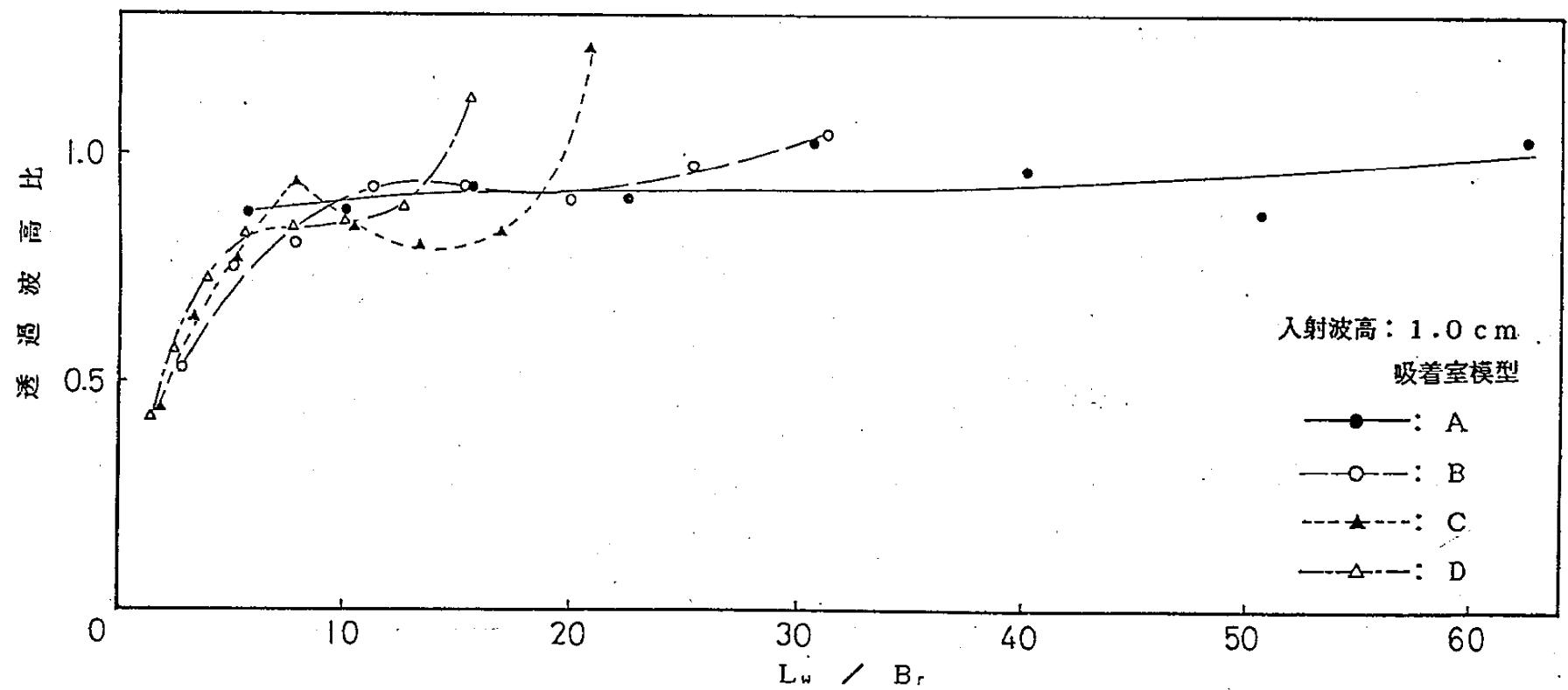


図-24 波高1.0 cmにおける透過波高特性

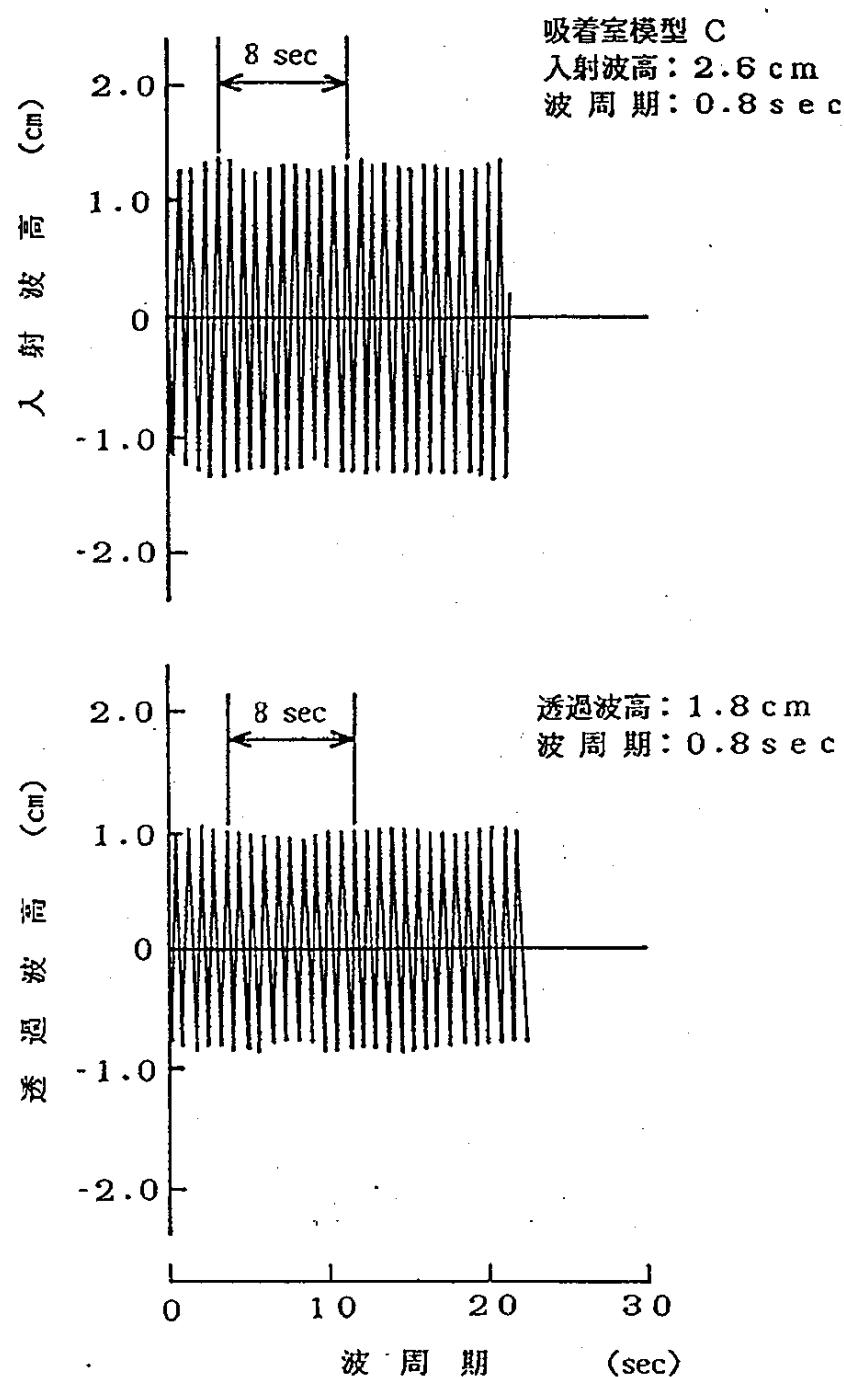


図-25 透過波高計測記録例

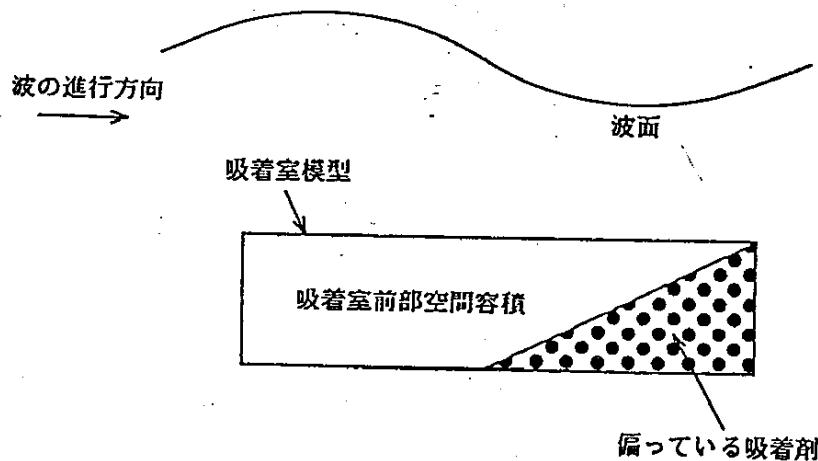


図-26 吸着剤の挙動説明図

c) 透過波高特性

図-22は設計波高における透過波高特性を示している。この図からわかるように L_w/B_r の値が10付近より小さくなると透過波高比が低くなる。また、波高が設計波高より高くなつても(図-23)、低い場合(図-24)でもほぼ同じ傾向にあると言える。

この原因は2つあると考えられる。一つは、波の短周期側では吸着室に流入する水の流入速度が早いために、水粒子の運動に吸着剤粒子の運動が追従できず、吸着剤粒子が水粒子の運動の抵抗となり、波エネルギーが損失されるためと考えられる。もう一つの原因是、吸着室上面ネットに吸着剤が押し付けられ、この吸着剤による目詰まりが海水の流入抵抗となり、波エネルギーを損失しているためと考えられる。

また、 L_w/B_r の値が10付近より大きくなると透過波高比の値が1.0近くを示すのは、波周期が長くなるに従い吸着室に流入する水の流入速度が遅くなり、吸着剤粒子が水粒子の運動に追従するようになることから、波エネルギーの損失が少ないためと考えられる。

実機においては吸着室は波の進行方向に3列に並んでいるので、吸着室1室の透過波高比が小さいほど後方の吸着室の海水流入量が減少し、ウラン吸着率も低下することが考えられる。吸着室1室の幅は22mであり、このとき実海域において出現頻度の高い波周期は約8秒(波長にして100m)であるがこの時 L_w/B_r は4.5となる。図-22から L_w/B_r が4.5の時の透過波高比はおよそ0.7であることから、波の進行方向に対して最後列にある吸着室の海水流入量は、最前列の吸着室の半分程度となることが推測される。故に、最前列吸着室より後方の吸着室では、吸着室ごとにウラン吸着率が減少していくことが予測される。

以上が実験結果より得られた結論であるが、この実験は吸着剤保持のためのネット、及び吸着剤の縮尺影響を無視しているため、上記の結論がそのまま実機に当てはまるかどうかについては、今後の詳細な研究が必要である。

2.4 最適吸着室幅

2.4.1 目的

2.3の実験結果より、設計波高において吸着剤偏在率は L_w/Br の値を10程度よりも小さくすれば低くなり、吸着剤流動率は10程度よりも大きくすれば高くなるということが言えた。このため、 L_w/Br の値が10程度以下をさらに詳しく調べるために、より精度の高いウラン吸着実験を行った。この実験により、ウラン吸着率が最も高くなる吸着室の幅を波長・吸着室幅比で求め、また、ウラン吸着率が偏在率と流動率のどちらに依存するのかを調べた。

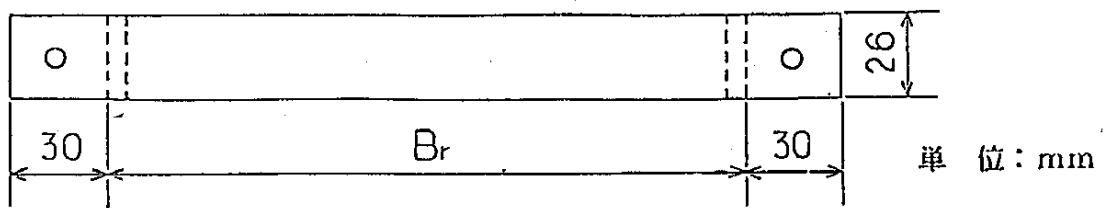
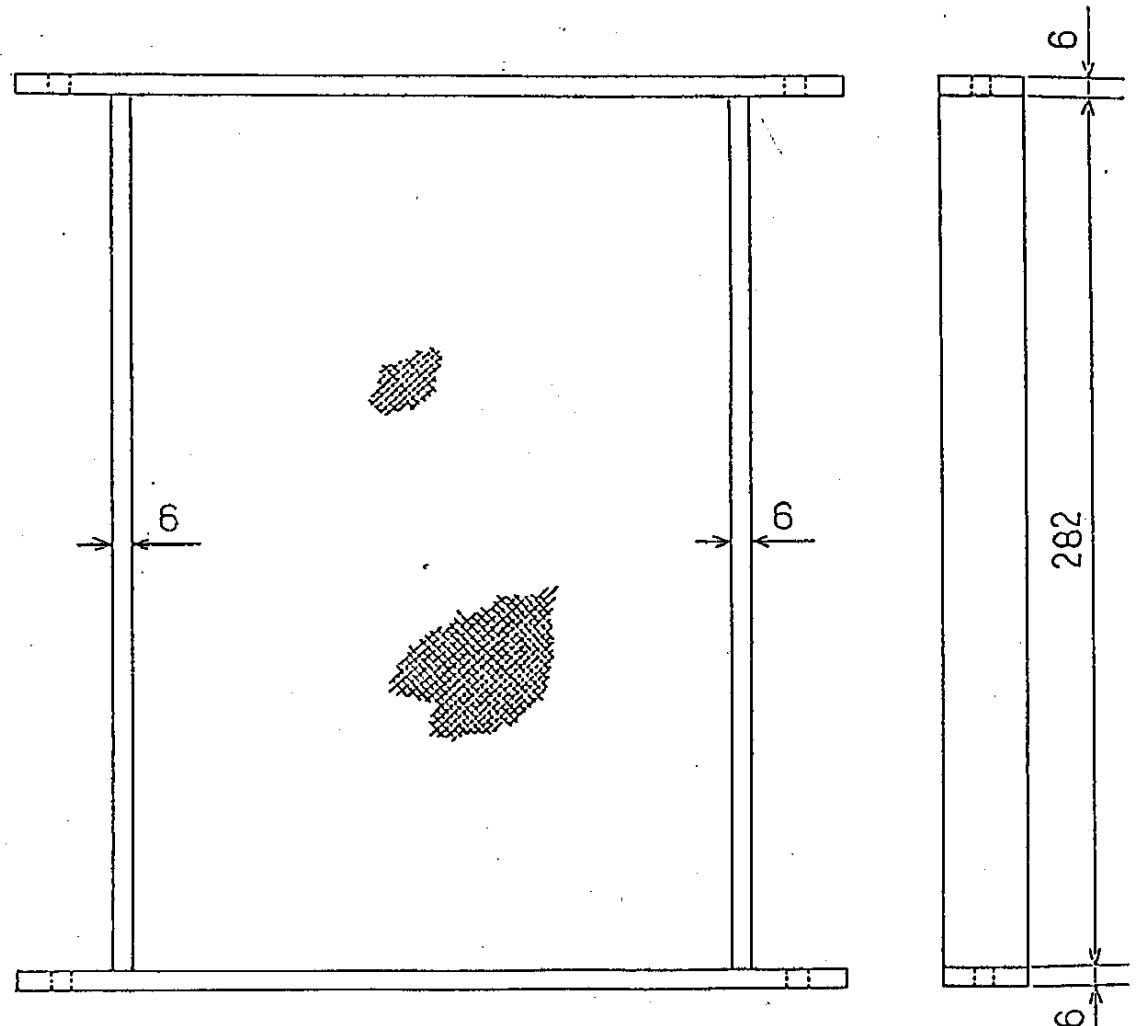
2.4.2 波浪中のウラン吸着実験

ここで行ったウラン吸着実験は、2.2.2(2)と同じく波力を用いて海水と吸着剤を接触させてウラン吸着率を測定する実験である。

実験は次のように行った。図-6に示される海水循環加振水槽にポンプで海水を汲み上げ、加振機により波高 2.6cm、波周期 0.8sec の規則波を起こし、この規則波中に吸着剤を充填した吸着室模型を模型没水水深 4.3cm に水平に固定した。吸着室模型は幅の異なる 4 種類を用い、各模型に吸着剤を層高 7.8mm に充填し、それぞれの吸着室模型に対して 4 日間連続して実験を行った。

a) 実験条件:	波高	2.6cm
	波周期	0.8sec
	海水流量	10cm/h
	模型没水水深	4.3cm
	水槽内水深	40cm
	吸着剤	M社製アミドキシムキレート樹脂
	吸着剤比重	約1.15
	実験時間	96時間

b) 吸着室模型 : 実験に使用した幅の異なる 4 種類の吸着室模型を図-27に示す。この模型の上下面には吸着剤保持ために 60 メッシュのサランネットを張った。



吸着室模型	吸着室幅 B_r (mm)
A	100
B	200
C	300
D	400

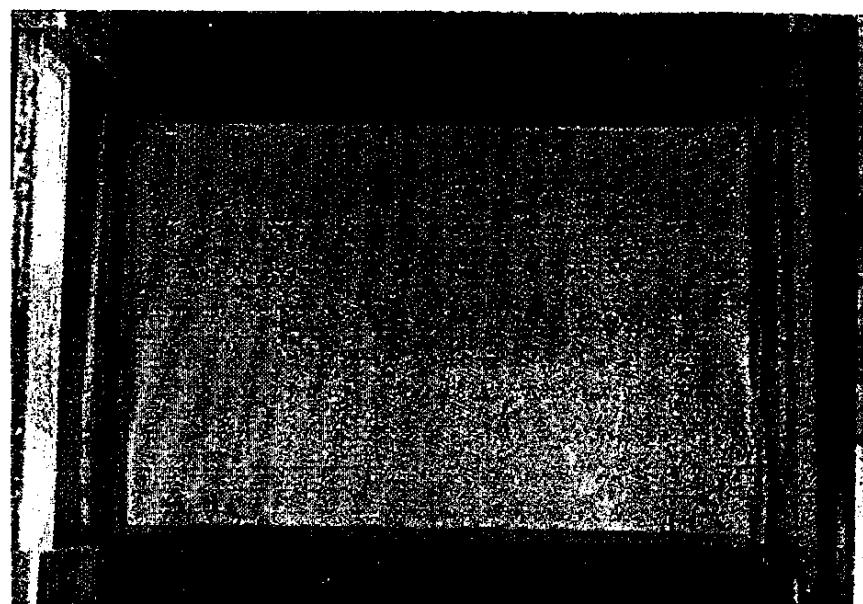
図-27 ウラン吸着実験用吸着室模型概略図

6

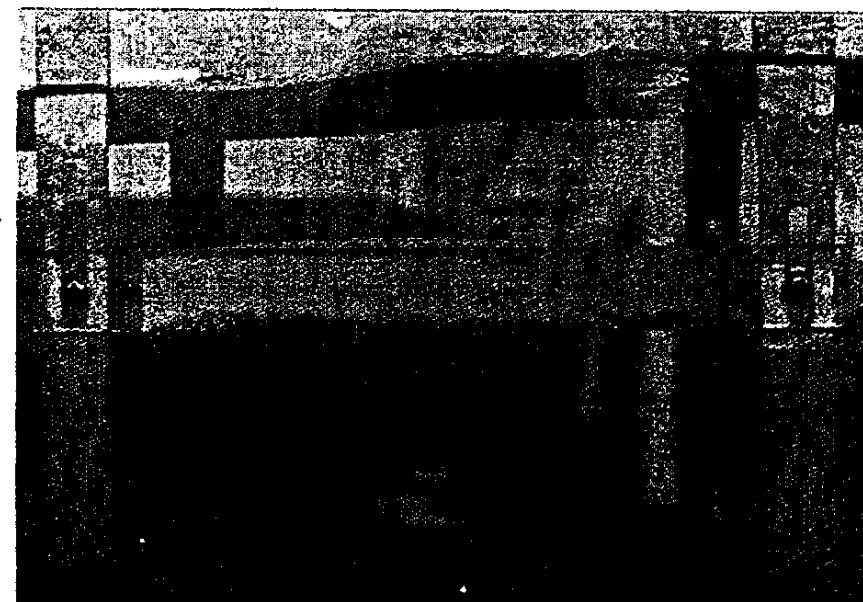
282

6

mm



写-10 ウラン吸着実験中の吸着剤の挙動(上面: 吸着室模型B)



写-11 ウラン吸着実験中の吸着剤の挙動(側面: 吸着室模型B)

2.4.3 実験結果

実験状況を表-10、表-11に示す。また、実験を終えた吸着剤の分析結果及び補正結果は表-12に示す。図-28は分析結果をグラフにしたものであり、実験中の吸着剤の挙動を図-29に示す分析結果は2.2.1の試験結果を用いて、海水温度25℃におけるウラン吸着率に補正した。

表-10 実験状況の概要

サンプル No	7 (吸着室模型A)	8 (吸着室模型B)
実験開始時刻	11月22日14時45分	11月14日18時25分
終了時刻	11月26日14時45分	11月17日18時25分
吸着剤層高 (mm)	7.8	7.8
吸着剤量 (cm ³)	193.6	413.6
波 高 (cm)	2.5~3.0	2.7~3.5
波 周 期 (sec)	0.8	0.8
海水流速 (m ³ /h)	9.0~9.8	10.0~10.5
平均海水温度 (℃)	17.8	16.8

表-11 実験状況の概要

サンプル No	9 (吸着室模型C)	10 (吸着室模型D)
実験開始時刻	11月10日20時10分	11月27日16時45分
終了時刻	11月21日20時10分	12月01日16時45分
吸着剤層高 (mm)	7.8	7.8
吸着剤量 (cm ³)	633.6	653.6
波 高 (cm)	2.5~3.5	3.0~4.0
波 周 期 (sec)	0.8	0.8
海水流速 (m ³ /h)	9.0~10.1	0.8~0.9
平均海水温度 (℃)	16.4	15.8

表-12 吸着剤分析結果と温度補正結果

サンプル No	分析結果 ($\mu\text{g}\cdot\text{U}/\text{g}\cdot\text{R}\cdot4\text{ days}$)	補正結果 ($\mu\text{g}\cdot\text{U}/\text{g}\cdot\text{R}\cdot10\text{ days}$)
7	36	198
8	37	210
9	36	210
10	27	206

図-28より L_w/Br の値が5より小さい範囲でウラン吸着率が高くなることがわかる。

ここで、図-29より実験中の吸着剤の挙動を見ると、 L_w/Br の値が増すに従い吸着剤偏在率、及び吸着剤流動率は増す傾向を示しているのに対し、図-28からウラン吸着率は増す傾向を示さないことがわかる。

のことから、ウラン吸着率は吸着剤流動率に依存せず、吸着剤偏在率が大きく影響していると考えられる。

ここで、後方の吸着室の海水流入量を考慮すると、吸着室の透過波高特性から L_w/Br の値は大きくすべきであるということから、吸着室の幅は L_w/Br の値で5が最適であると言える。故に、本システムの吸着浮体の吸着室1室の L_w/Br の値は、出現頻度の高い波周期において4.5であることから、結果的にはほぼ最適な寸法にあると言える。

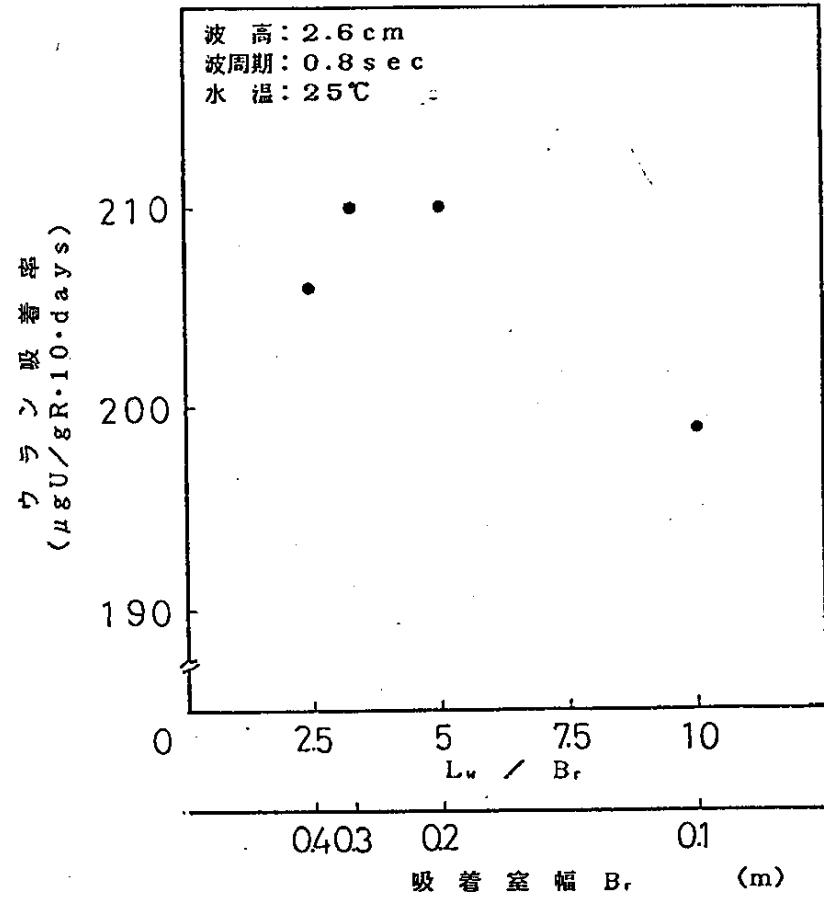


図-28 波長・吸着室幅比とウラン吸着率の関係

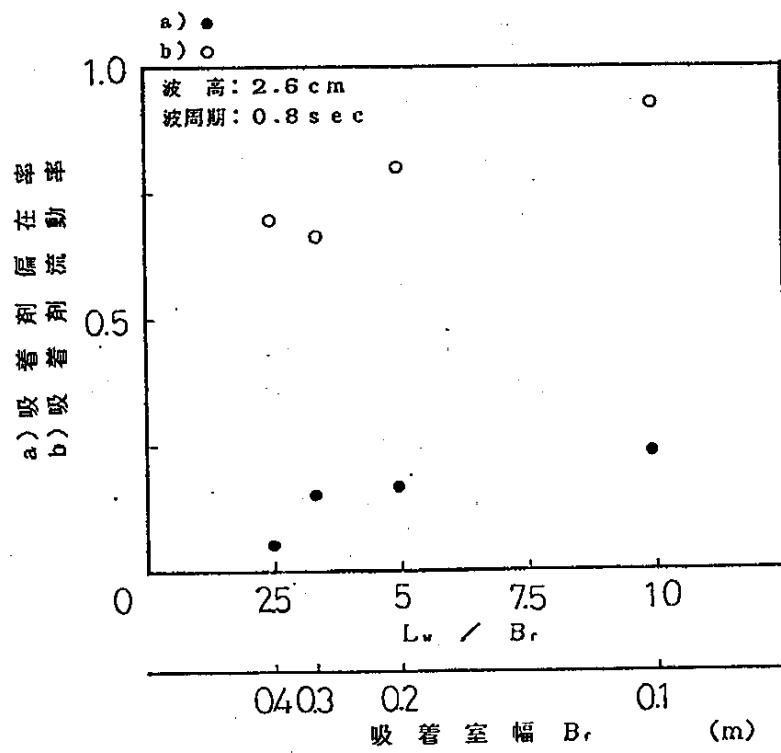


図-29 実験中の吸着剤の挙動

2.5. 結論

本研究は吸着剤と海水の接触効率を向上させるために吸着室の幅を最適化することを目的に規則波中で実験を行い、多くの仮定条件のもとではあるが以下の結論を得た。

- (1)ウラン吸着率は海水温度にはほぼ比例することから、吸着浮体は海水温度の高い海域に設置する必要がある。
- (2)吸着室に充填する吸着剤層高は、ウラン吸着率とウラン回収システムの経済性から、最適値が存在する。
- (3)吸着剤のウラン吸着率は吸着剤流動率に依存せず、吸着剤偏在率の影響が大きいと考えられ、吸着剤層高に依存する。
- (4)吸着室の透過波高特性は吸着剤層高7.8 mmにおいて吸着室幅Br、及び波高に依存しない。
- (5)吸着室を透過した波の周期は、吸着室幅Br、及び波高に依存せず、変化しない。
- (6)吸着室幅Brは吸着浮体設置海域における出現頻度の高い波長Lwに対し、 Lw/Br の値で5が最適であると言える
- (7)本システムにおける吸着浮体の吸着室1室の幅は、実海域において出現頻度の高い波周期（約8秒）において、結果的に最適な寸法にあると言える。

本研究の結論は模型実験から得られたものであり、吸着剤保持のためのネット、及び吸着剤の海水流入抵抗等の実機との相似則については考えていないので、今後の詳細な研究が必要である。本実験において理想的な挙動に近くウラン回収効率が最も高いと考えられる吸着室の幅が見いだせた。しかし、最適な吸着室幅において、吸着剤偏在率を0とすることはできなかった。故に、吸着剤偏在率を0としウラン回収効率をさらに向上させるために、最適な吸着室幅において、吸着室の高さが吸着剤の挙動にどの様に影響するのかを調べ、吸着室高さを最適化するとともに、吸着剤が偏らない吸着室の形状を求めることが今後の課題であると考えられる。また、今回のウラン吸着実験では海水流入量の推定が行われておらず、ウラン回収効率についてわかっていない。故に、海水流入量を測定することよりウラン回収効率を把握し、より正確なウラン回収コストの試算が望まれる。

3. 結 言

3.1 試験結果

本研究により、以下のことが明らかになった。

(1) 吸着剤の吸着性能

本年度、動燃事業団より支給されたウラン吸着剤のうち、2種類の吸着剤（アミドキシム樹脂 DCEアルカリ72時間振とう 3%NaCl型およびRNH₂-（クロロホルム）の吸着速度は、初めの2日間ではやく80～100μg-U/R/dayであった。これは、従来の吸着剤の約10倍の速度であり、飛躍的に性能が向上したと言える。

実用レベルの吸着速度としては、最終目標として1mg-U/R/dayであり、更に10倍の向上が必要であるが、今年度の成果を考慮すれば、それは必ずしも不可能ではないことが推測される。

(2) 吸着装置

粒状の吸着剤を充填して海洋中に設置され、波のエネルギーを利用して海水と吸着剤を接触させる、いわゆる半潜水式の“吸着室”を用いたシステムの最適充填率と最適幅を調べた結果、最適充填率は約1/3、最適幅は、卓越波長の約1/5である。

謝 辞

本調査を行うにあたり、貴重な御指導、御助言を頂きました熊本大学工学部 江川博明教授、動力炉・核燃料開発事業団国際部資源開発室 浅見博史室長、永崎靖志研究員、同人形崎事業所資源開発部 花田克己部長代理、土屋英典主査、河本薰明課長代理に厚く御礼を申し上げます。