

# 海水ウラン回収技術の現状と展望

日本原子力研究開発機構  
量子ビーム応用研究部門  
環境・産業応用研究開発ユニット  
金属捕集・生分解性高分子研究グループ

瀬 古 典 明

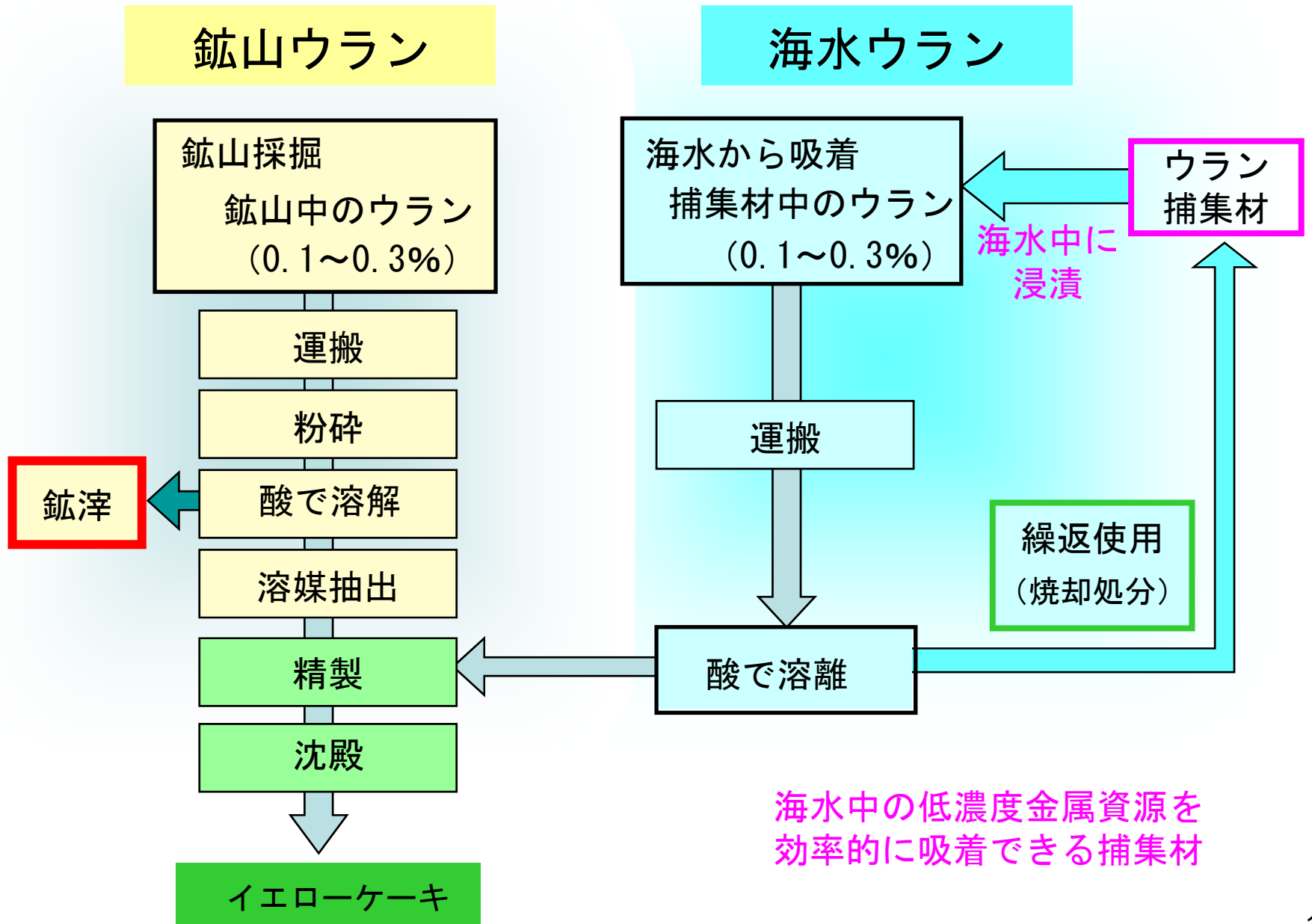


表1 海水中の全元素

元素	化学形	濃度mg/l	元素	化学形	濃度mg/l
H	H <sub>2</sub> O	108,000	Nb		0.00001
He	He	0.0000069	Mo	MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.01
Li	Li <sup>+</sup>	0.17	Ag	AgCl <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.00004
Be		0.0000006	Cd	Cd <sup>2+</sup>	0.00011
B	B(OH) <sub>3</sub>	4.6	In		<< 0.02
C	CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup> , 有機C	2.8	Sn		0.0008
N	有機N, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.5	Sb		0.0005
O	H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	857,000	I	I <sup>-</sup> , IO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.06
F	F <sup>-</sup>	1.3	Xe	Xe	0.000052
Ne	Ne	0.00014	Cs	Cs <sup>+</sup>	0.0005
Na	Na <sup>+</sup>	10,500	Ba	Ba <sup>2+</sup>	0.03
Mg	Mg <sup>2+</sup>	1,200	La		1.2 × 10 <sup>-5</sup>
Al	Al <sup>3+</sup>	0.07	Ce		5.2 × 10 <sup>-6</sup>
Si	Si(OH) <sub>4</sub>	3.0	Pr		2.6 × 10 <sup>-6</sup>
P	PO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.07	Nd		9.2 × 10 <sup>-6</sup>
S	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	88,000	Sm		1.7 × 10 <sup>-6</sup>
Cl	Cl <sup>-</sup>	19,000	Eu		4.6 × 10 <sup>-7</sup>
Ar	Ar	0.6	Gd		2.4 × 10 <sup>-6</sup>
K	K <sup>+</sup>	380	Dy		9.2 × 10 <sup>-6</sup>
Ga	Ga <sup>3+</sup>	0.0001	Ho		5.2 × 10 <sup>-7</sup>
Sc	Sc <sup>3+</sup>	0.0000	Er		3.0 × 10 <sup>-6</sup>
Ti	Ti <sup>4+</sup>	0.001	Tm		5.2 × 10 <sup>-7</sup>
V	VO <sub>2</sub> H <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0.002	Yb		2.0 × 10 <sup>-6</sup>
Cr	Cr <sup>3+</sup> , Cr <sup>6+</sup>	0.00005	Lu		4.8 × 10 <sup>-7</sup>
Mn	Mn <sup>2+</sup>	0.002	Hf		< 0.000008
Fe	Fe(OH) <sub>3</sub>	0.01	Ta		< 0.0000025
Co	Co <sup>2+</sup>	0.0001	W	WO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.0001
Ni	Ni <sup>2+</sup>	0.002	Au	AuCl <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0.000004
Cu	Cu <sup>2+</sup>	0.003	Hg	HgCl <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.00003
Zn	Zn <sup>2+</sup>	0.01	Tl	Tl <sup>+</sup>	< 0.00001
Ga		0.00003	Pb	Pb <sup>2+</sup>	0.00003
Ge	Ge(OH) <sub>4</sub>	0.00006	Bi		0.000015
As	AsO <sub>4</sub> H <sup>2-</sup>	0.003	Rn	Rn	0.6 × 10 <sup>-15</sup>
Se		0.0004	Ra		1 × 10 <sup>-10</sup>
Br	Br <sup>-</sup>	65	Th		0.00005
Kr	Kr	0.0025	Pa		2 × 10 <sup>-9</sup>
Rb	Rb <sup>+</sup>	0.12	U	UO <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> <sup>4-</sup>	0.003
Sr	Sr <sup>2+</sup>	8.0			
Y		0.0003			
Zr		0.000022			

海水の中には  
77の元素が  
溶け込んでいる

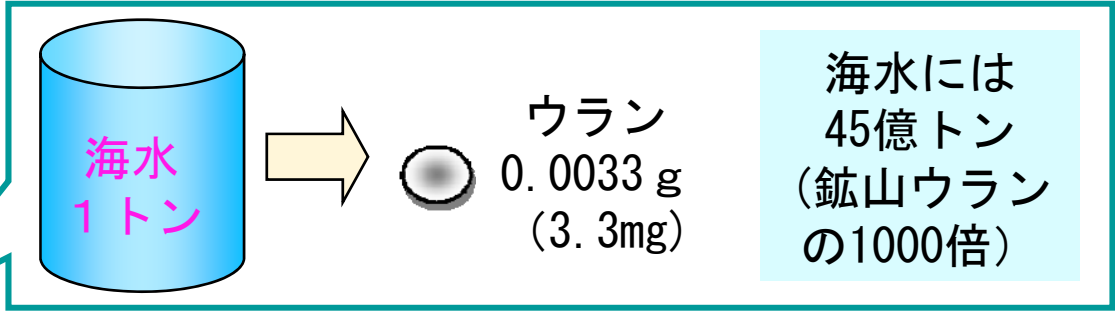
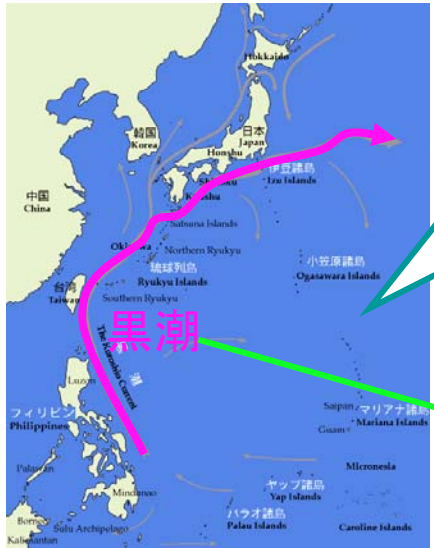
表2 海水中のカチオン種

カチオン種	濃度(g/kg)	モル濃度比
Na <sup>+</sup>	10.77	( 3.7 × 10 <sup>7</sup> )
Mg <sup>2+</sup>	1.29	( 3.8 × 10 <sup>6</sup> )
Ca <sup>2+</sup>	0.412	( 7.4 × 10 <sup>5</sup> )
K <sup>+</sup>	0.391	( 7.2 × 10 <sup>5</sup> )
Sr <sup>2+</sup>	8.1 × 10 <sup>-3</sup>	( 6.7 × 10 <sup>3</sup> )
Li <sup>+</sup>	7 × 10 <sup>-4</sup>	( 1.8 × 10 <sup>3</sup> )
Rb <sup>+</sup>	1.2 × 10 <sup>-4</sup>	( 1.0 × 10 <sup>2</sup> )
Ba <sup>2+</sup>	2.1 × 10 <sup>-5</sup>	( 7.1 )
Mo <sup>6+</sup>	1 × 10 <sup>-5</sup>	( 7.5 )
Ni <sup>2+</sup>	6.6 × 10 <sup>-6</sup>	( 8.1 )
Zn <sup>2+</sup>	5 × 10 <sup>-6</sup>	( 5.5 )
Fe <sup>3+</sup>	3.4 × 10 <sup>-6</sup>	( 4.4 )
U <sup>6+</sup>	3.3 × 10 <sup>-6</sup>	1

ウランは  
13番目に  
多い資源

[出典] K.K. Turekian, Handbook of Geochemistry, K.H. Wedepohl, Springer-Verlag, Berlin (1969) p.309

# 海水中のウラン溶存量



海水には  
45億トン  
(鉱山ウラン  
の1000倍)

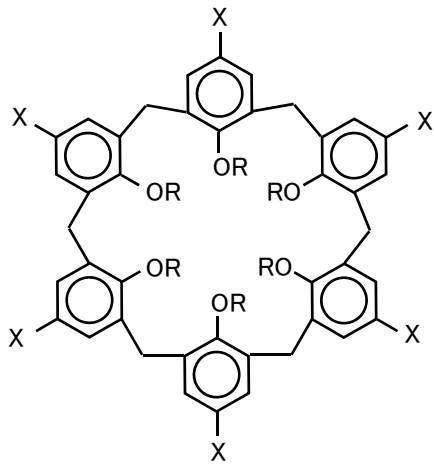


金属元素

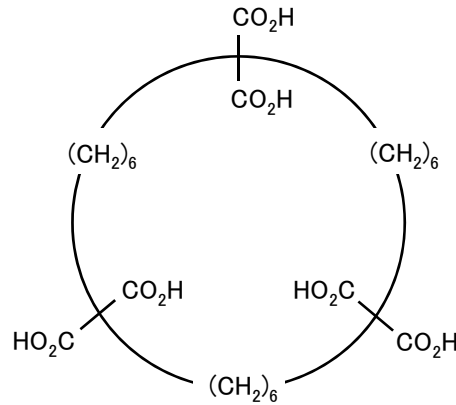
金属元素	地殻中資源 可採埋蔵量 (10 <sup>6</sup> t)	日本の 年間需要量 (10 <sup>3</sup> t/y)	海水中資源 濃度 (μg/L)	黒潮の運ぶ 年間資源量 (10 <sup>6</sup> t/y)	年間 通過量 (tym <sup>2</sup> )
------	---------------------------------------	---------------------------------------	-----------------------	---	----------------------------------

リチウム (Li)	2.2	4.7	170	268	8.5
モリブデン (Mo)	12.9	18.2*1	10	15.8	0.5
ニッケル (Ni)	54	67.5	6.6	10.4	0.3
<b>ウラン (U)</b>	<b>5</b>	<b>7.7*2</b>	<b>3.3</b>	<b>5.2</b>	<b>0.16</b>
バナジウム (V)	4.3	4.6*1	1.9	3	0.09
チタン (Ti)	170	24.8*1	1	1.6	0.05
マンガン (Mn)	900	272	0.4	0.6	0.02
コバルト (Co)	3.3	4.9*1	0.39	0.6	0.02
銀 (Ag)	-	3.4	0.28	0.4	0.01
金 (Au)	0.04	0.4	0.01	0.015	0.0005

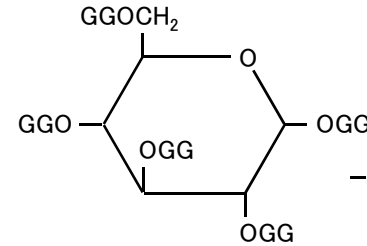
注1) 可採埋蔵量及び年間需要量は希少金属データブック (1993/2) から作成  
 注2) \*1は工業レアメタルNo. 112 (1996) から作成  
 注3) \*2は発電設備容量4,271万KW (1996末) に要する年間ウラン使用量  
 注4) 黒潮の流量は5千万m<sup>3</sup>/s・m<sup>2</sup>



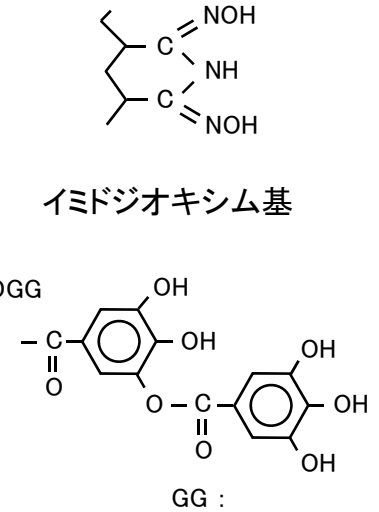
カリックスアレーン



大環状ヘキサカルボン酸



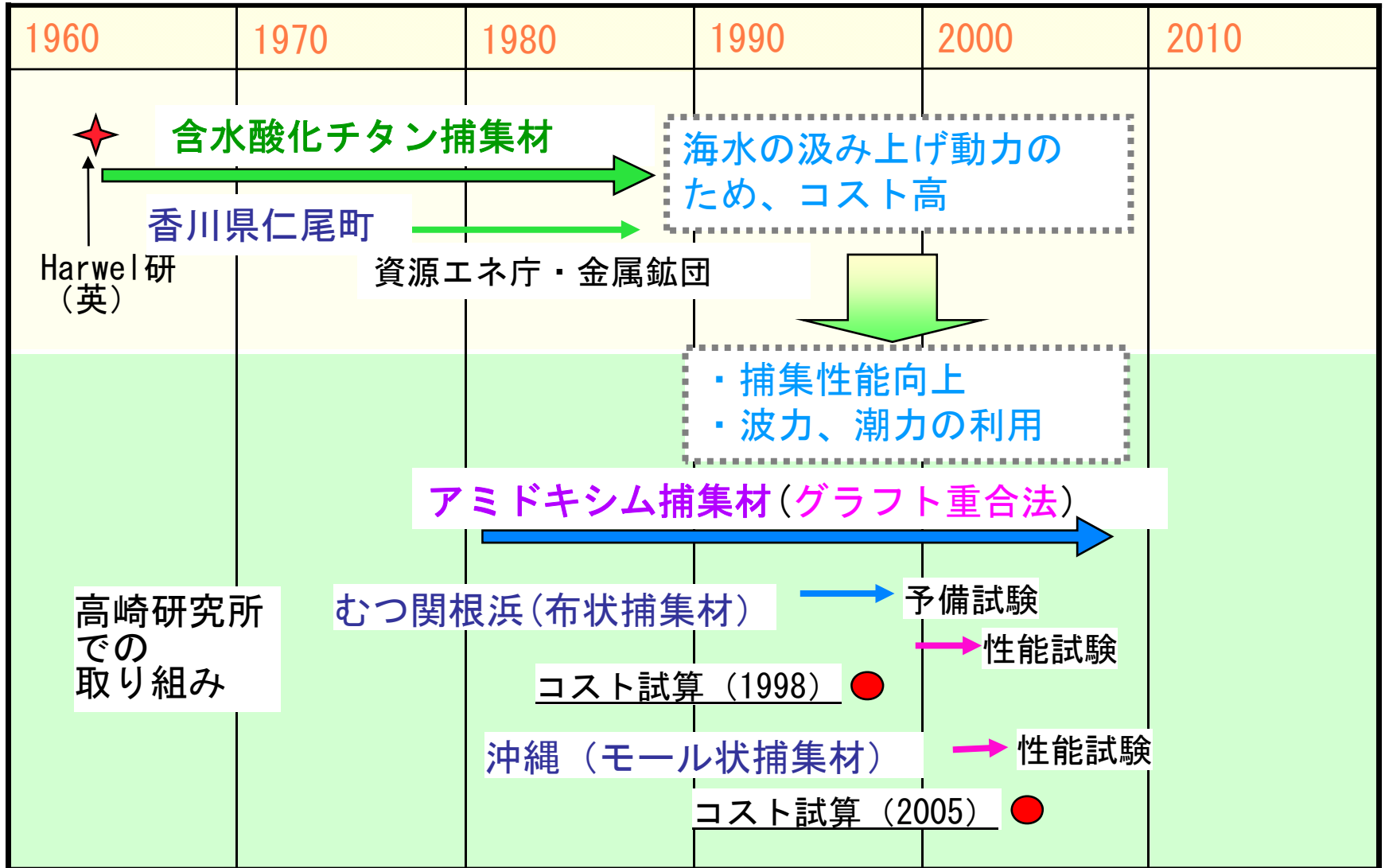
タンニン



イミドジオキシム基

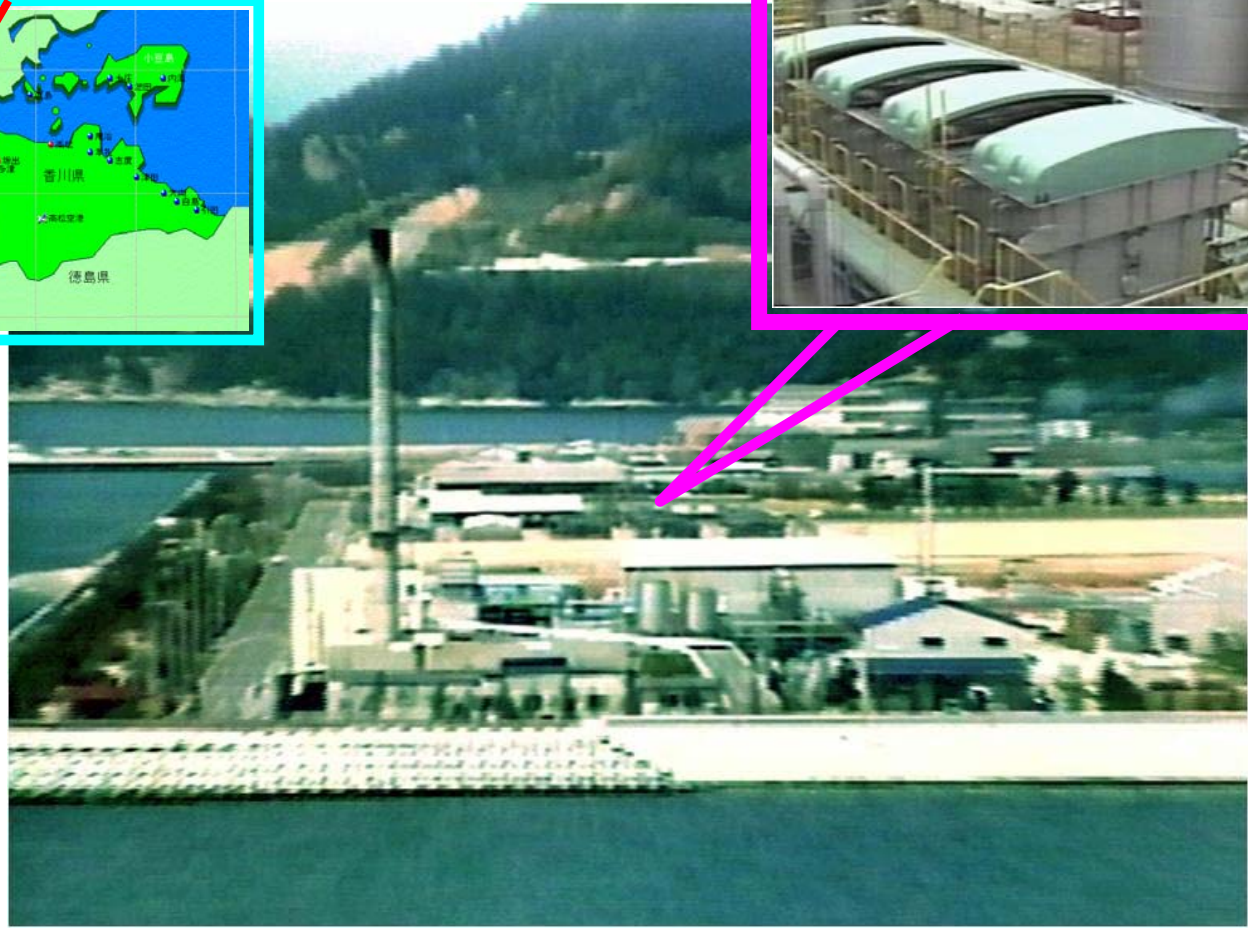
## アミドキシム基の濃縮係数

元素	海水中の濃度 [mg/L]	加藤 [g/kg]	小夫家 [g/kg]	佐々木 [mg/L]	江川 [mg/L]
ウラン	$3.30 \times 10^{-3}$	1.9	0.43	71	85
バナジウム	$2.00 \times 10^{-3}$	-	0.11	3.1	13
コバルト	$0.05 \times 10^{-3}$	0.3	-	-	-
ニッケル	$1.70 \times 10^{-3}$	0.3	0.071	11	63
銅	$0.50 \times 10^{-3}$	0.4	-	7.3	4.3
マグネシウム	$1.35 \times 10^{-3}$	6.6	9.5	310	229

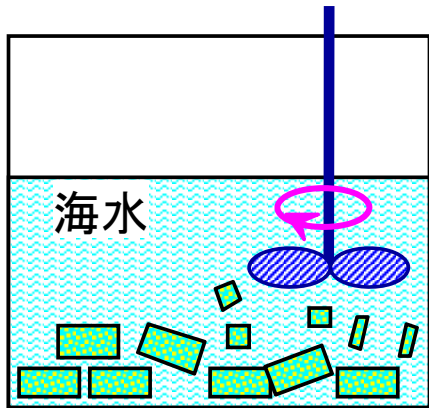


# チタン酸を利用した海水ウラン捕集 プラント（昭和48年仁尾町）

香川県三豊郡仁尾町



## 含水酸化チタン捕集材



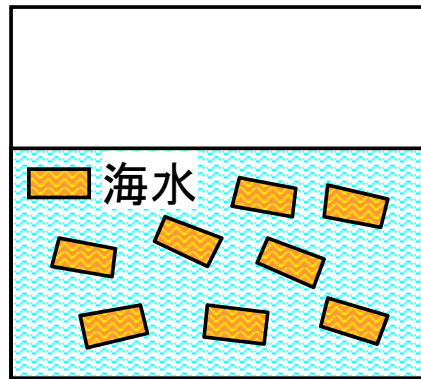
沈むので攪拌が必要

捕集材が損傷

汲上げや攪拌が必要

海水の汲み上げ動力のため、コスト高

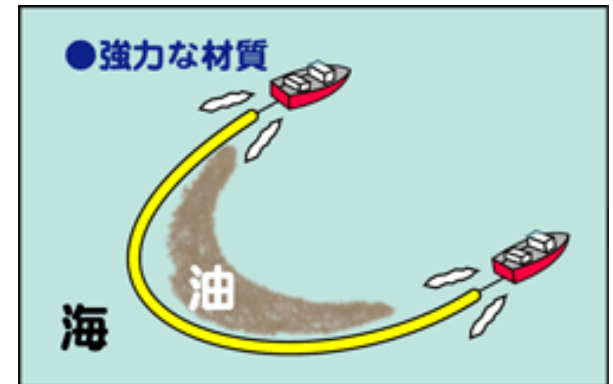
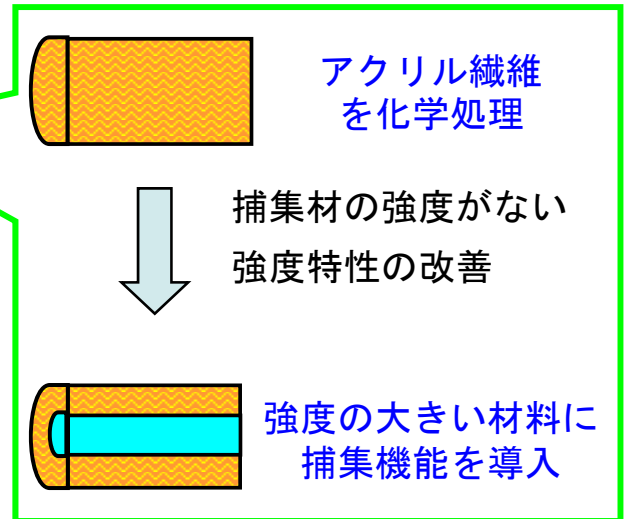
## アミドキシム型捕集材



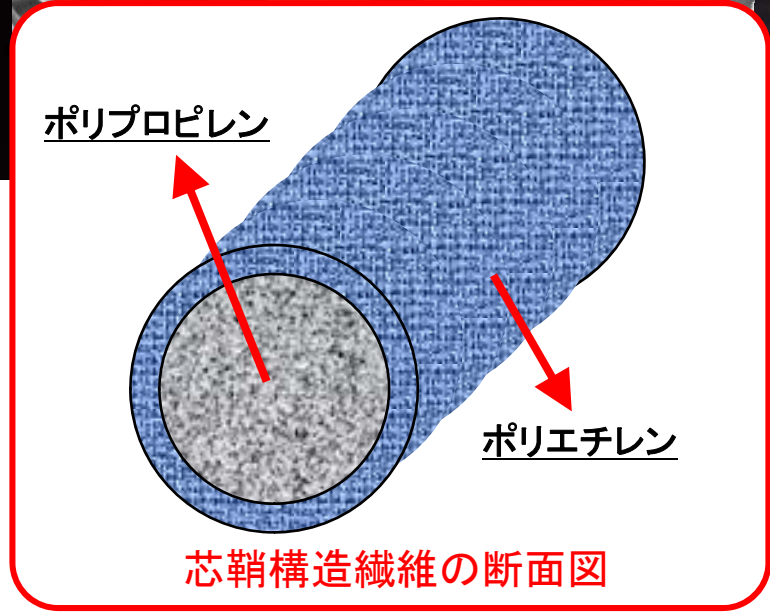
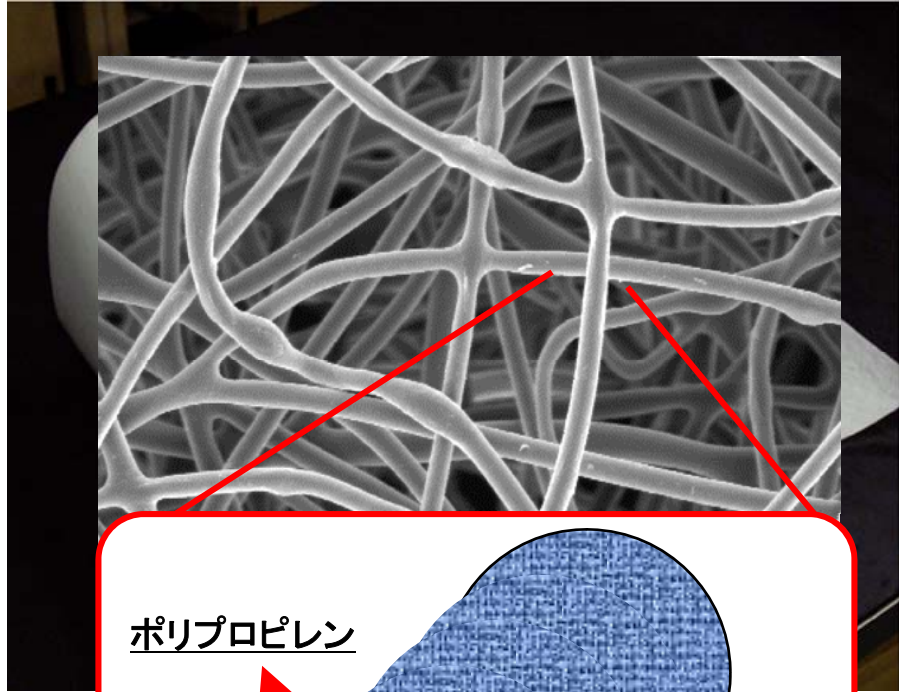
波動や潮力が利用できる

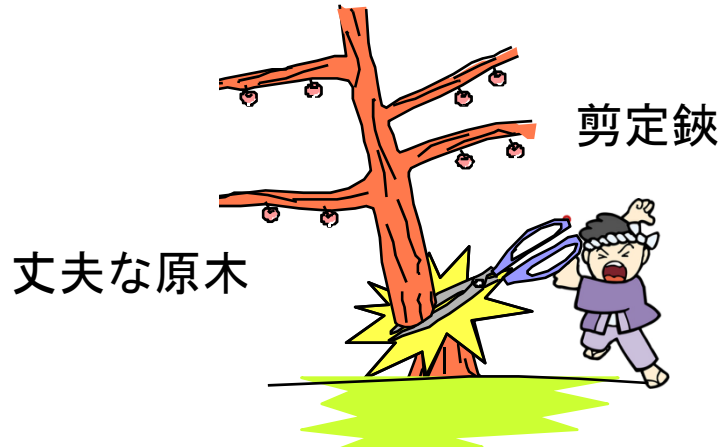
海水中に係留するだけで捕集可能

・ 捕集性能向上  
・ 波力、潮力の利用

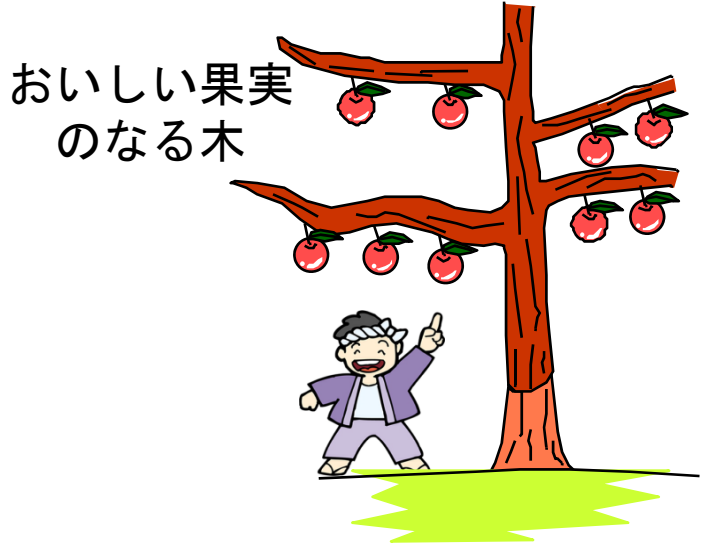




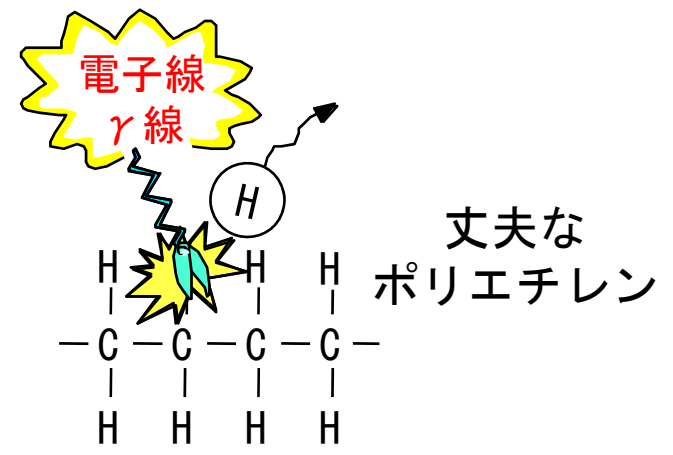




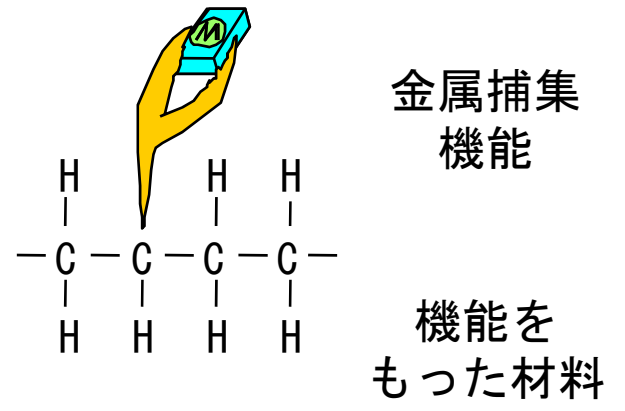
↓ 接木



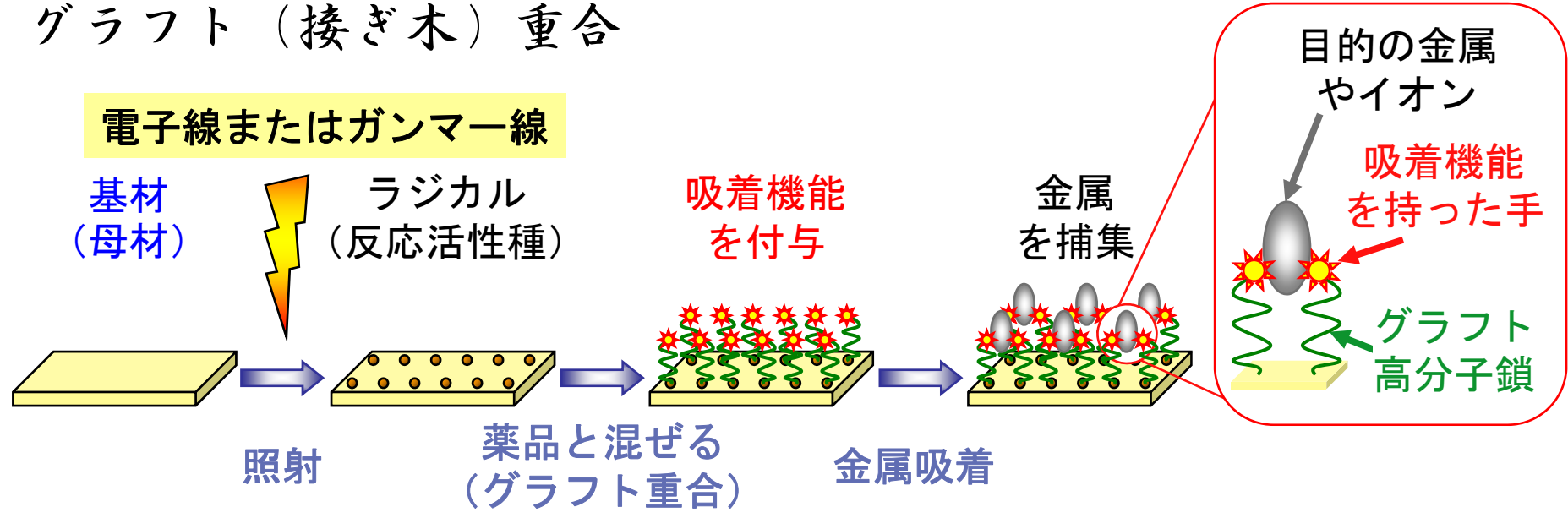
果樹園の接木  
放射線の接木



↓ グラフト重合



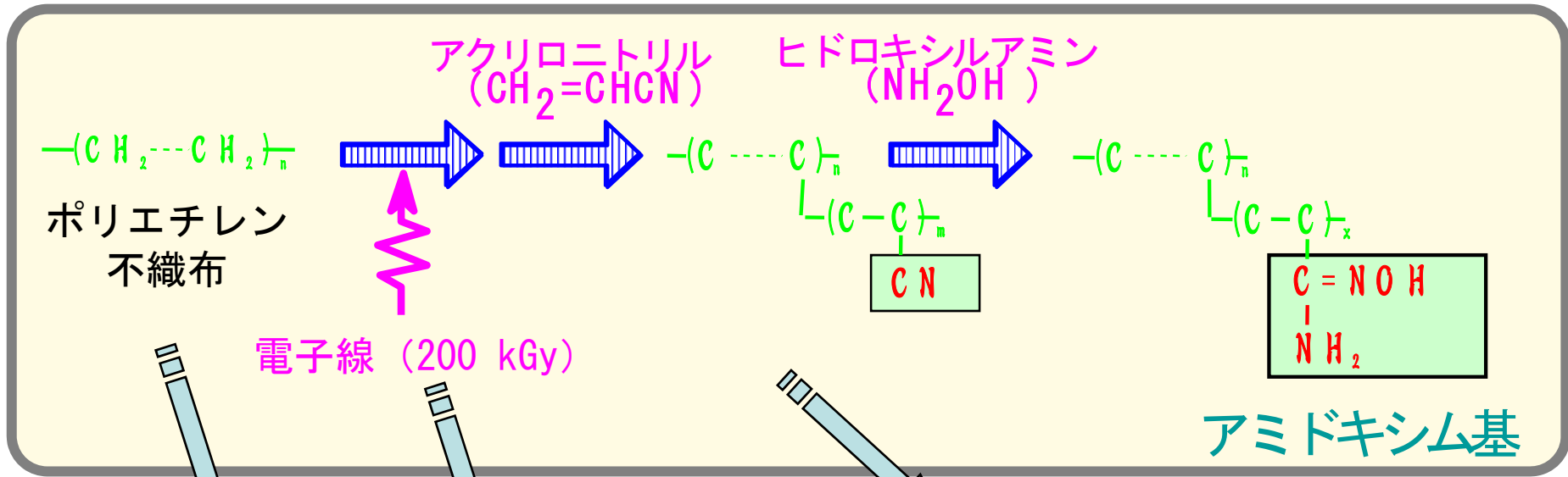
## グラフト（接ぎ木）重合



触媒不要  
(有害残存物質無)  
高透過力  
(大量処理が可能)  
幅広い使用条件  
(常温常圧低温処理)

既存の高分子成形体の特性・形状を保持した状態で**目的の機能化**が可能

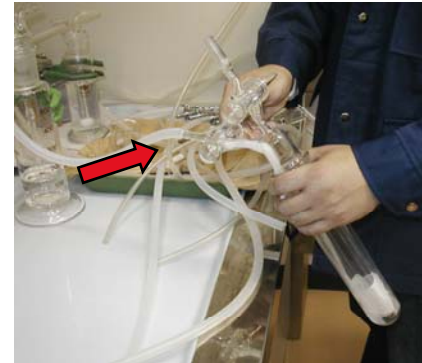




窒素雰囲気  
中の試料



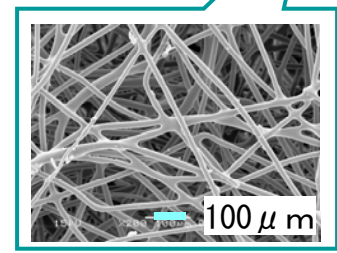
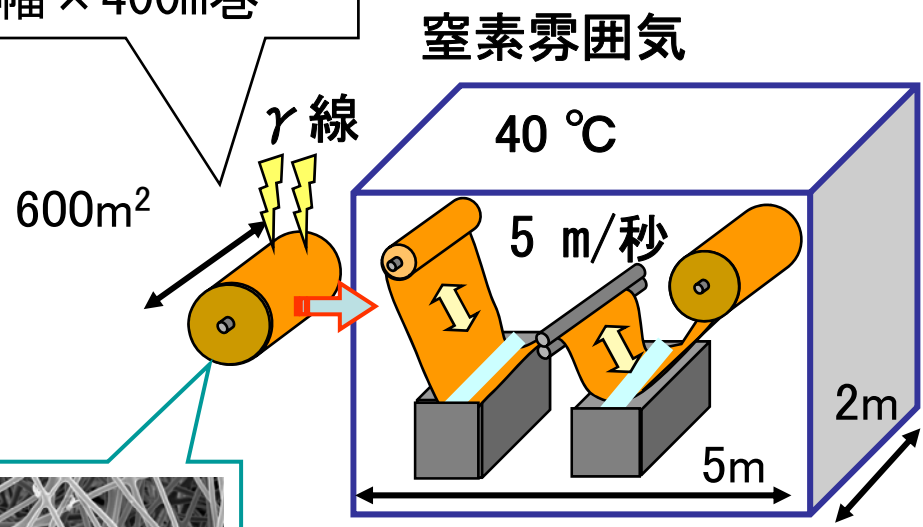
電子線加速器による照射



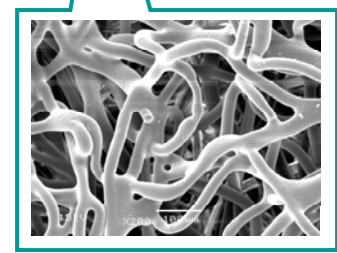
窒素置換したモノマー  
溶液の移送

# 布状ウラン捕集材の大量合成

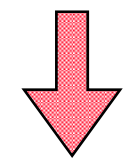
ポリエチレン製不織布  
1.5m幅 × 400m巻



グラフト重合前



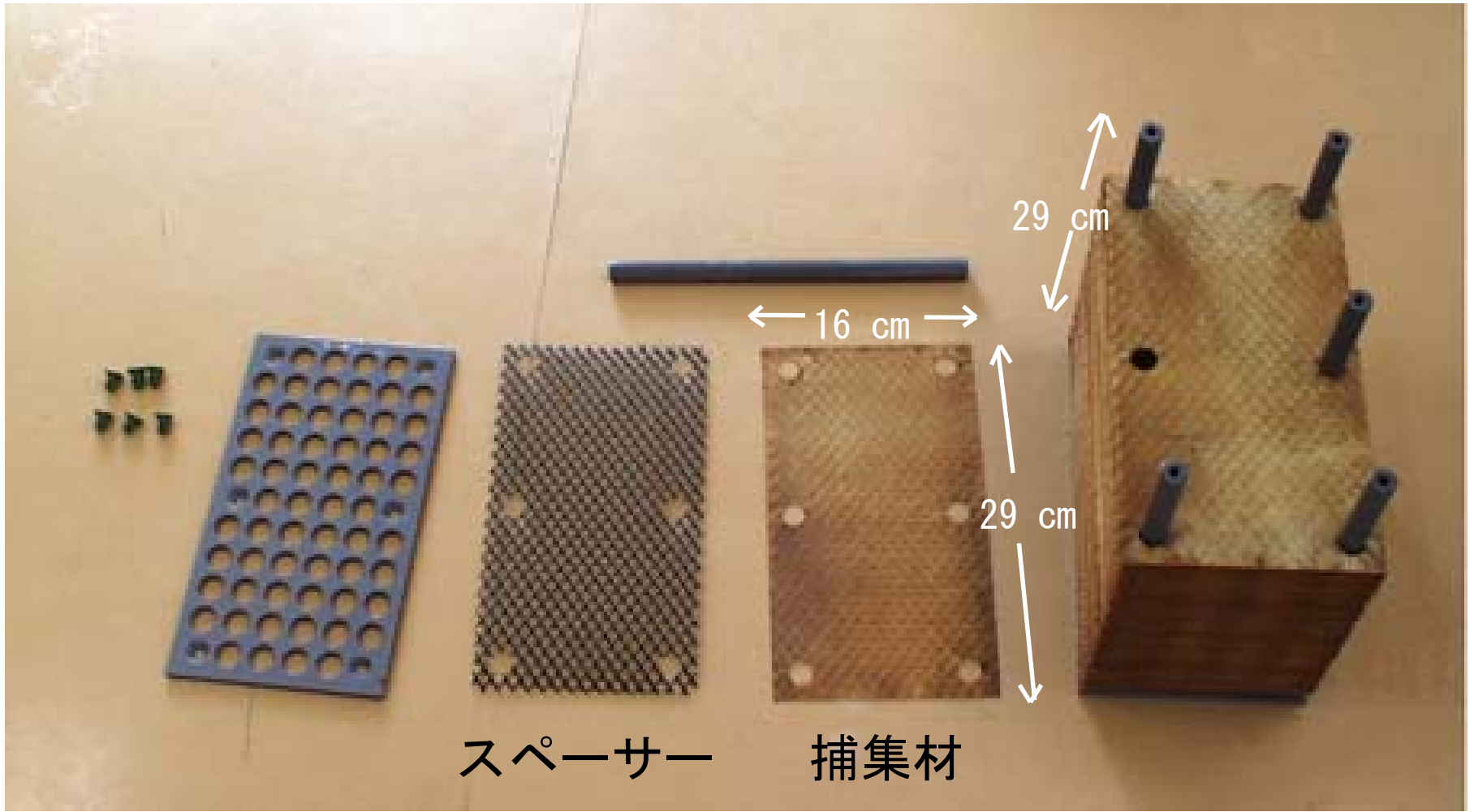
5 h グラフト重合後  
(グラフト率 120%)



アミドキシム基  
導入

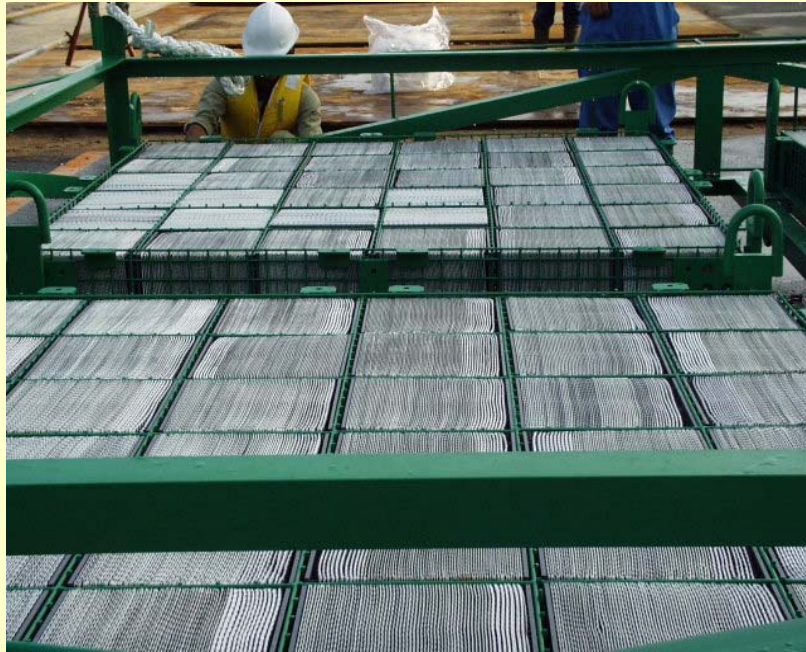
布状ウラン捕集材

6,000 m<sup>2</sup>



スペーサー

捕集材



144カセット/吸着床  
(115 k g 捕集材)

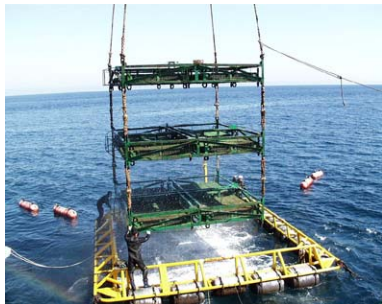
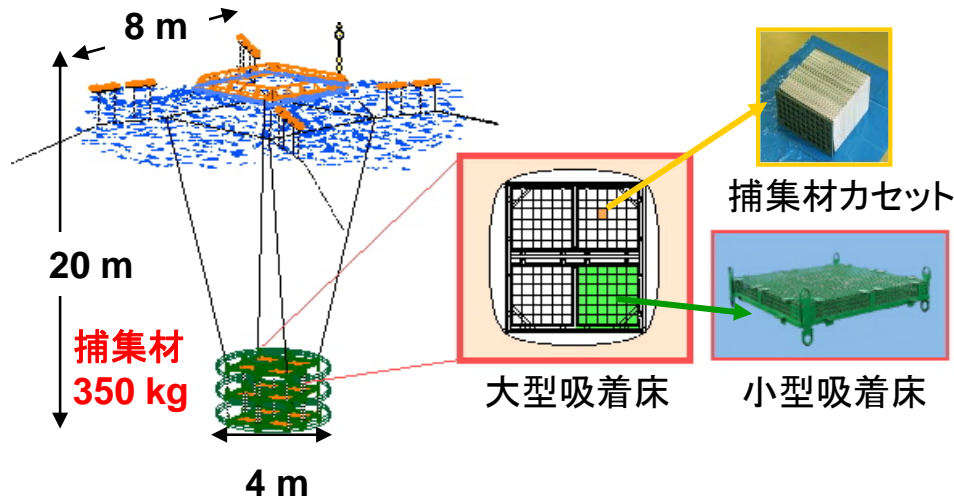


3段連結した吸着床









海上設備

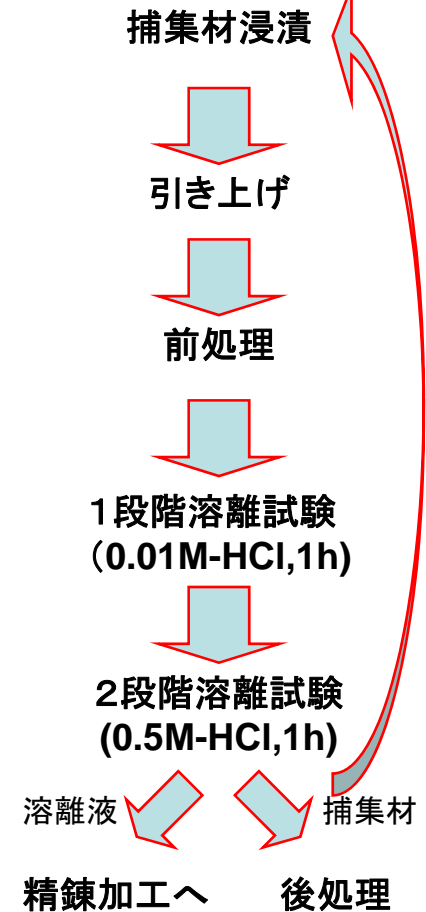


前処理設備

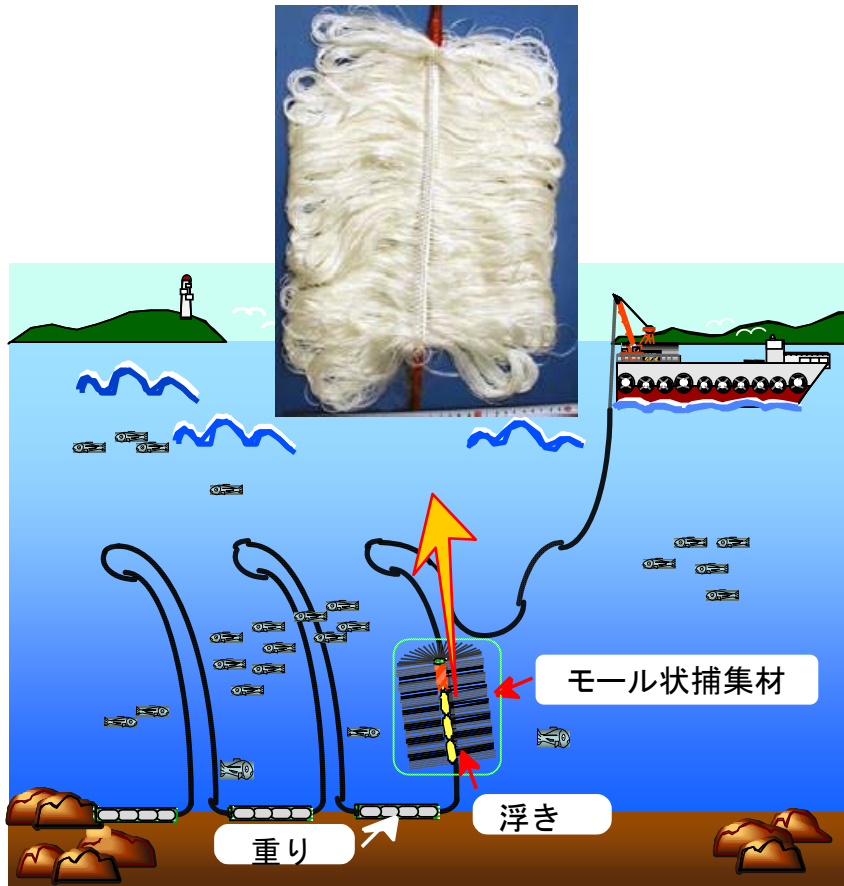


分別溶離装置

## 海洋試験の主な流れ



## —モール状捕集材の利点—



項目	布状捕集材 係留システム	モール状捕集材 係留システム
捕集材収納容器	吸着床が必要	不要
係留物の重量 (捕集材350kg使用と仮定)	カセット432ヶ, 吸着床12ヶ 総重量3.8トン	モール100m ×4本 総重量400kg
捕集材の回収	大動力	小動力
波浪の影響 (台風等)	波風の影響を 強く受ける	海底立ち上げの ため影響を受け にくい
船舶の航行	支障あり	支障なし

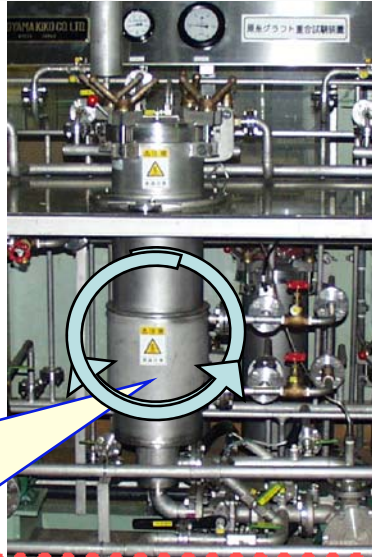
モール状捕集材を用いた海洋試験概念図

ポビン巻  
(ポリエチレン繊維)



γ線照射  
160kGy  
(-78°C)

原系グラフト重合装置



グラフト後



モール状捕集材の加工機

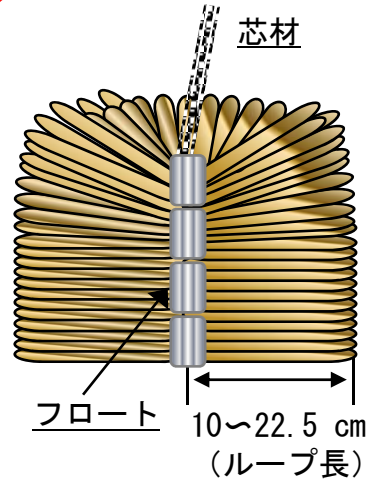
アクリロニトリル : メタクリル酸  
= 70 : 30  
50% ジメチルスルホキシド  
40°C 5時間

装置内部  
ポビン巻

モール自体が係留策になり得る

1. 浮力
2. 捕集機能

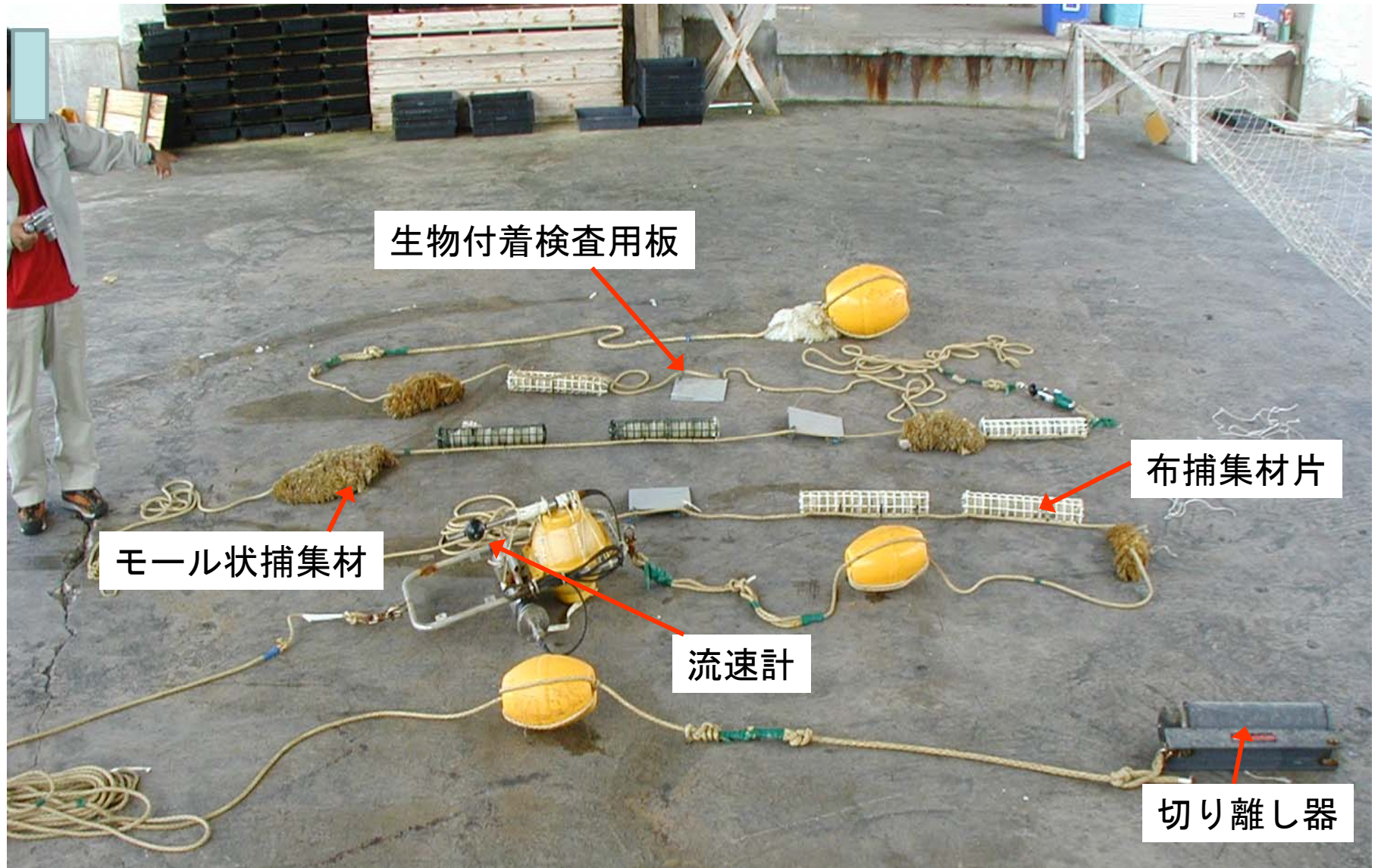
の両機能を備え持つ



海域試験地点



沖縄県恩納村  
沖合い 3km  
水深 100m





60mの長さのモール形状ポリエチレン(恩納村漁港での計測取り付け作業)



グラフト重合モール状捕集材



浸漬作業

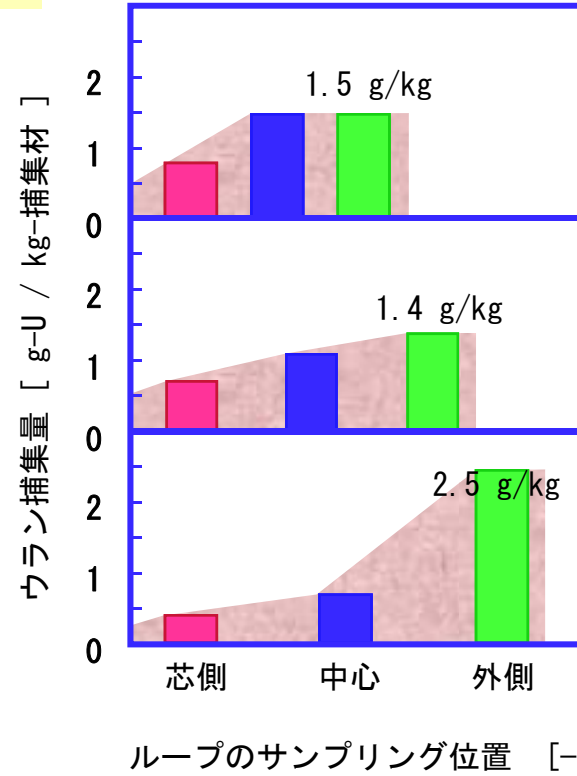
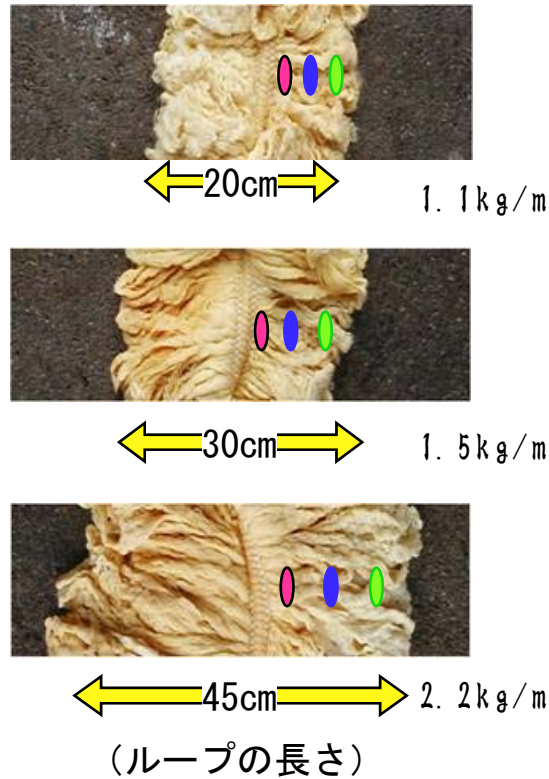


回収作業

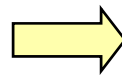




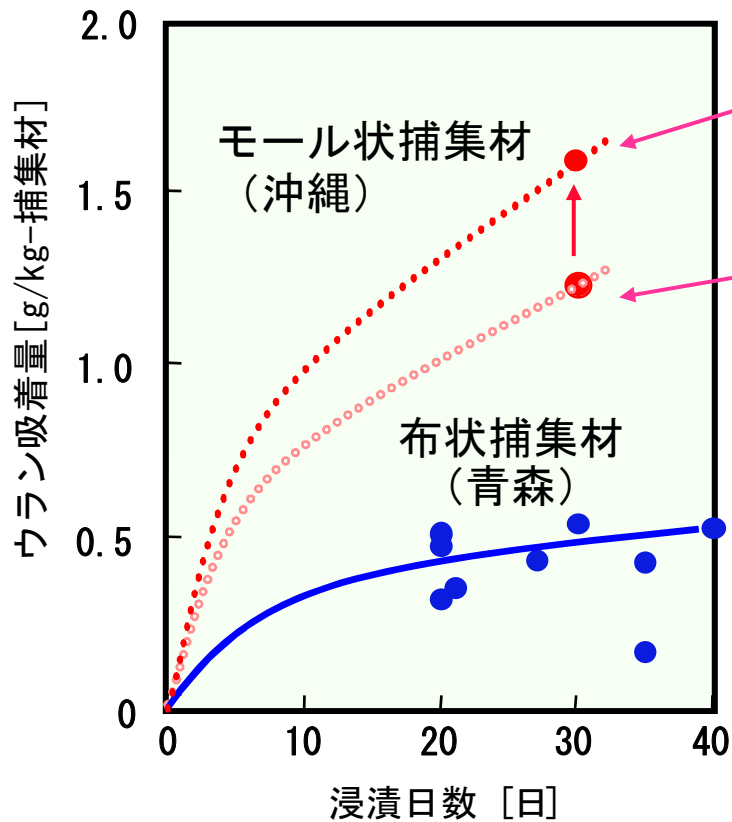
## 捕集部の長さの影響



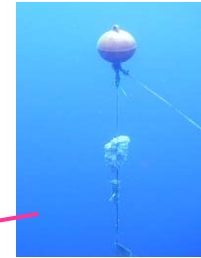
中心部の捕集量が少ない  
取り扱いの容易さ



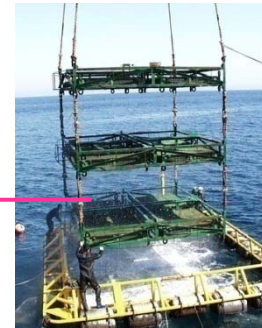
モール長さ 20cm



モール状捕集材と布状捕集材との吸着量の比較



沖縄県  
恩納村沖合



青森県  
むつ市沖合

モール状捕集材は布状捕集材と比較して  
3倍の吸着性能を有する  
(温度効果:1.5倍、形状改良:2.0倍)

- ウラン捕集規模：1200 t /y [金属ウラン換算]  
(100万キロワット級原子炉6基分、日本の需要の1/6)
- 捕集：60日の浸漬、6回/年

## 現状のコスト試算

- 捕集材の性能：2 g-U/kg-捕集材
  - 捕集材の耐久性：6回
- } 延べ： $6 \times 10^5$  t捕集材

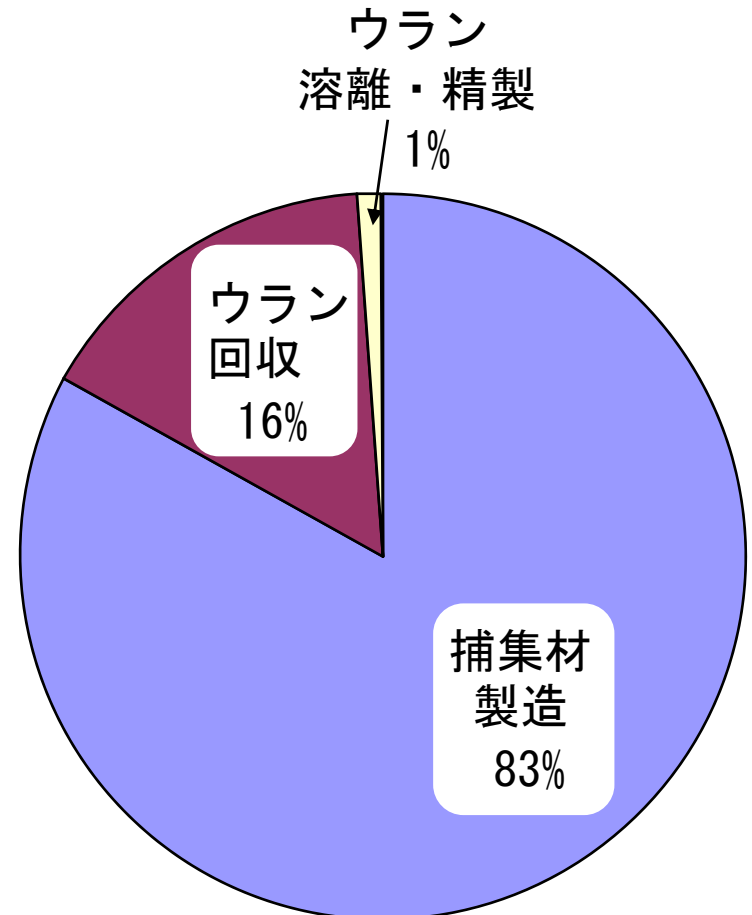
## 変動条件

- 捕集材の捕集性能 2, 4, 6 g-U/kg-捕集材
- 捕集材の繰り返し使用耐性 6, 12, 18, 30, 60 回

# 現状のコスト試算

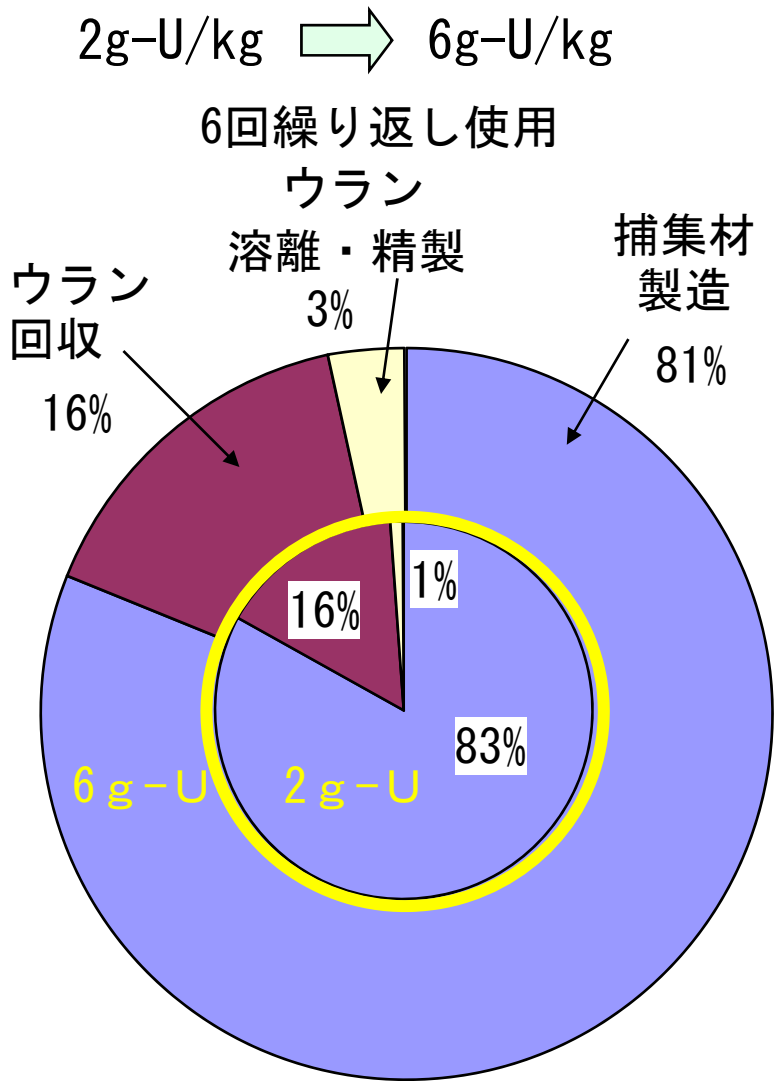
捕集材性能：2g-U/kg-捕集材  
捕集材耐性：6回

工 程	億円/年	円/kg-U
捕集材製造	1,452	121,080
ウラン回収	277	23,123
溶離・精製	20	1,649
計	1,751	145,882

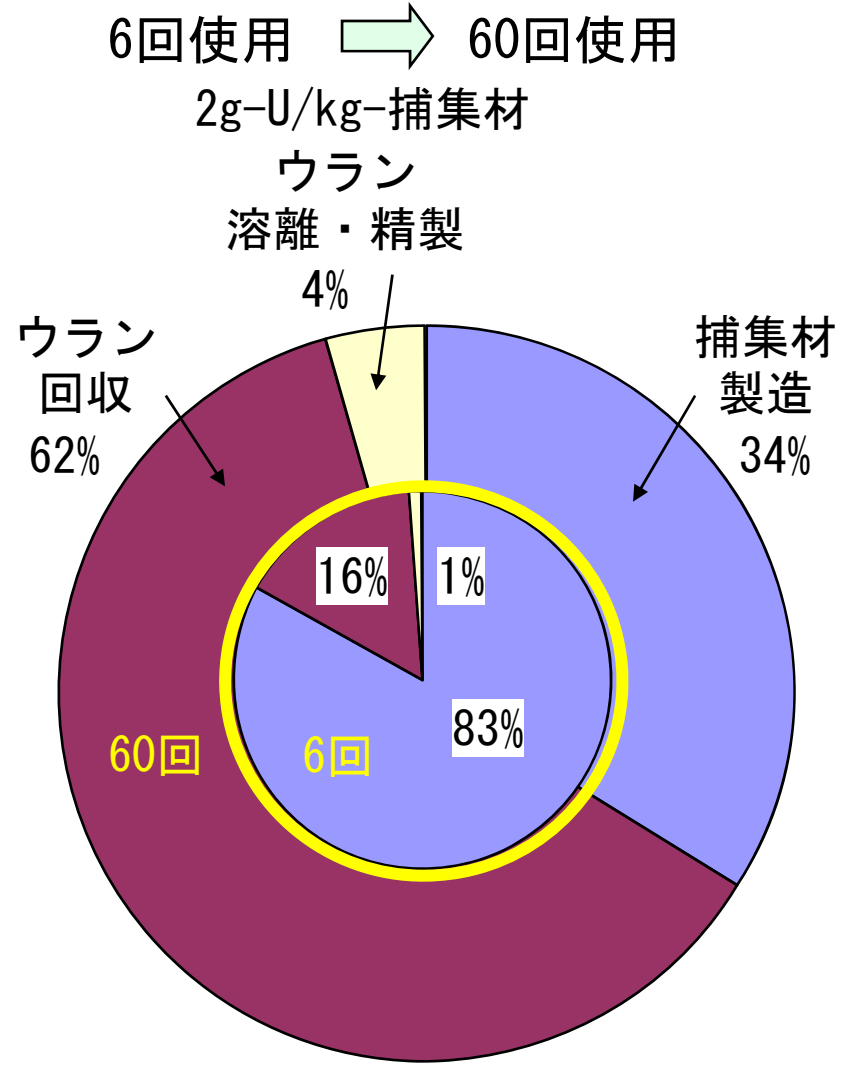


建屋建設費 719 億円  
設備建設費 3,345 億円

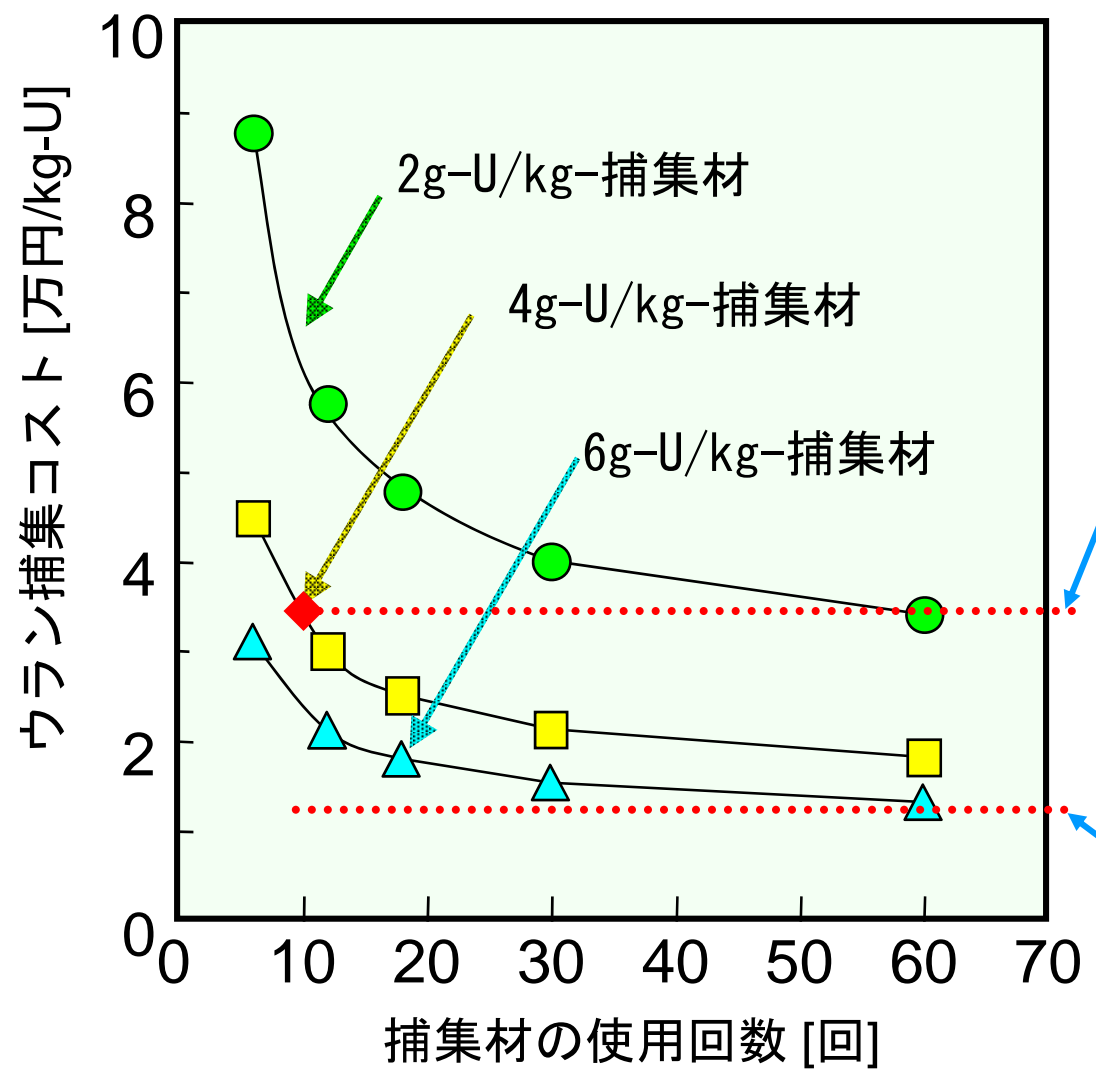
計：4,064億円



製造装置、係留装置の双方減少



係留装置より製造装置の減少の寄与大



4g-U/kg-捕集材  
8回繰り返し使用

3万2千円/kg-U  
 { 捕集材製造: 60%  
 { ウラン回収: 36%  
 { 溶離・精製: 4%

実験室のデータに基づいた達成可能なコスト

繰り返し使用の耐久性

捕集性能の向上

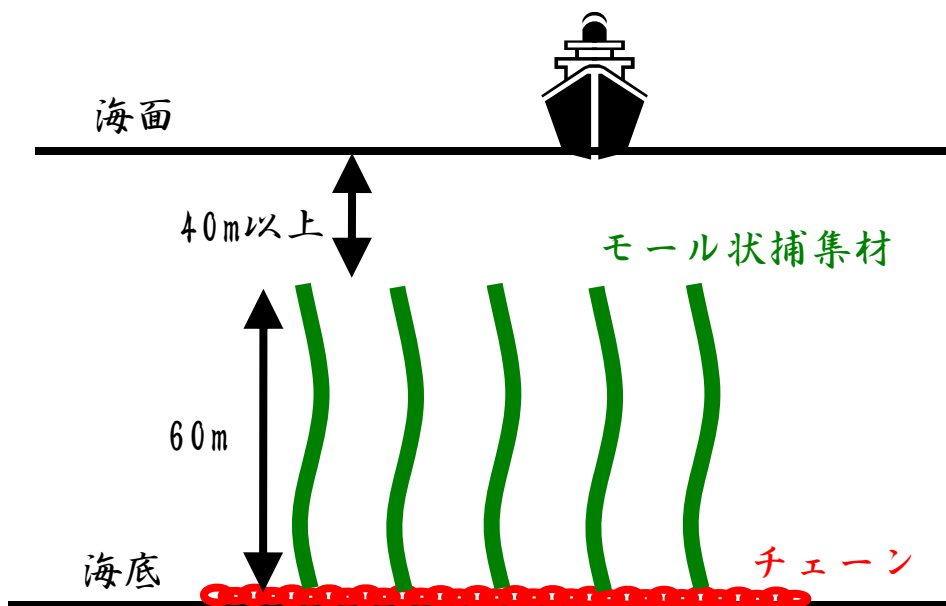
2009.5 週間スポット価格  
\$51/ポンド-U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>

1万3千円/kg-U  
目標とするコスト

年間1200tのウラン捕集規模でのコスト試算結果

玉田正男、瀬古典明、笠井昇、清水隆夫、モール状捕集システムによる海水ウラン捕集コスト試算、日本原子力学会和文論文誌 5 (2006) 358-363





細かい独立気泡の  
フロートを内蔵した  
モール状捕集材



## 特長

モール状にしたことで

- 1) 軽くて経済的
- 2) 付着生物が付きにくい

海底から立上げ係留にしたことで

- 3) 船舶航行の障害にならない
- 4) 台風の影響を受けない
- 5) 藻類が着生しにくい

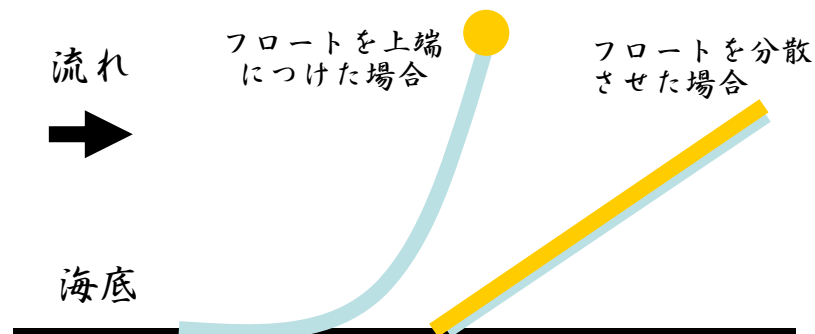
フロートを内蔵したことで

- 6) 捕集材が海底を引きずらない (下図参照)

チェーンに取り付けたことで

- 7) 芋づる式に回収できる

立上げ係留でも、フロートを分散させると捕集材が海底を引きずらない

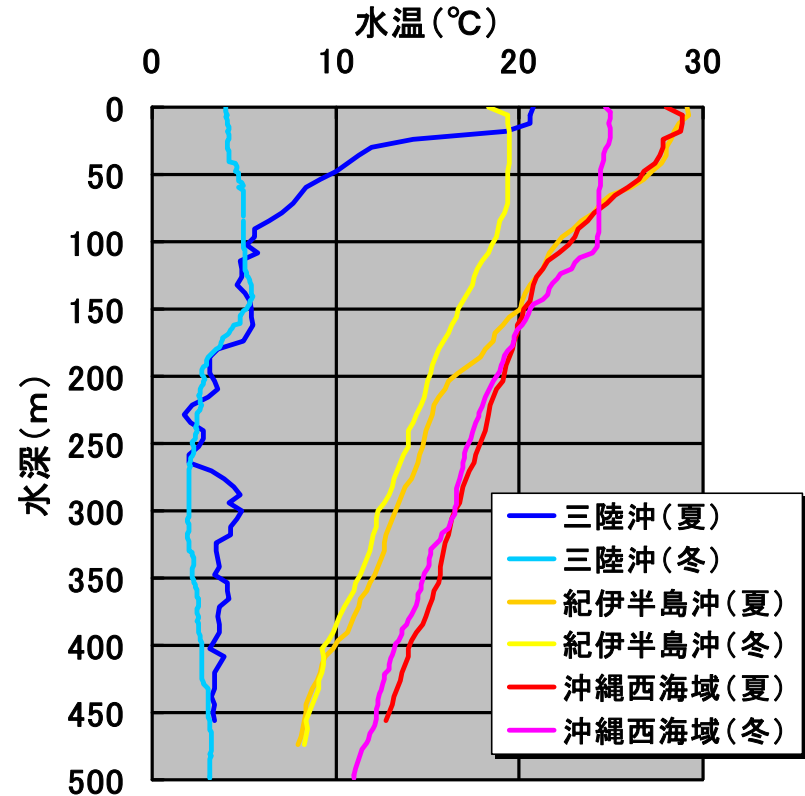


## 条件

- ① 水温が高いほど捕集効率が良いので、黒潮が海水を運んで来る**暖かい海域**
- ② 海底から60m立上げ、その上に海面まで40mの余裕をとれるように、**水深は100m以上**
- ③ 深度が大きくなると水温が下がるので、水深は**200m程度まで**
- ④ 潜水艦の潜水航行が禁じられている**領海の中**
- ⑤ **漁具が定置されていない海域**
- ⑥ **底引き網漁が行われていない海域**

水深100mあれば海中公園は避けられる。

溶離工場は全体で20,000平方mあればよいので立地の制約にはならない。



## 適した海域

南西諸島から土佐湾にかけて6000平方km

**港から18km以内に絞っても、1500平方kmはあり、海水ウラン捕集は成立する。**  
港と係留海域を回収船が10ノット2時間で往復できる。