

フレーム着底式海底資源掘削機 についての考察

九州大学大学院工学研究院 木村 元
(株)川崎重工業 宮崎良平

◎全体の流れについて◎

①背景と目的

②海底資源とその可能性について

③採掘システムについて

(全体の採掘システム、採鉱機、問題点等)

④新たな採掘システムの提案

⑤従来と新システムの比較

⑥まとめと今後の課題

背景（1）

- 現時点、日本は必要な金属資源のほぼ**全量**を海外に依存。

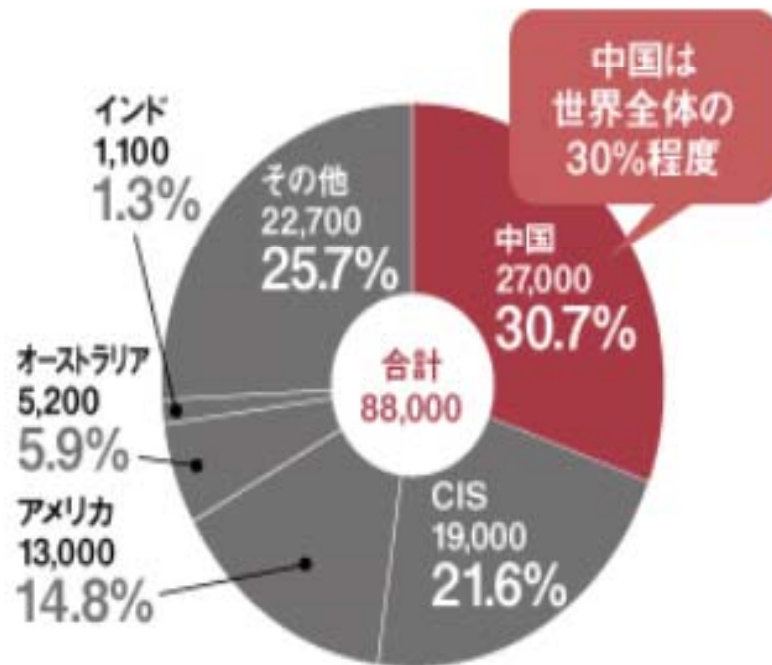


* JOGMECの資料より抜粋

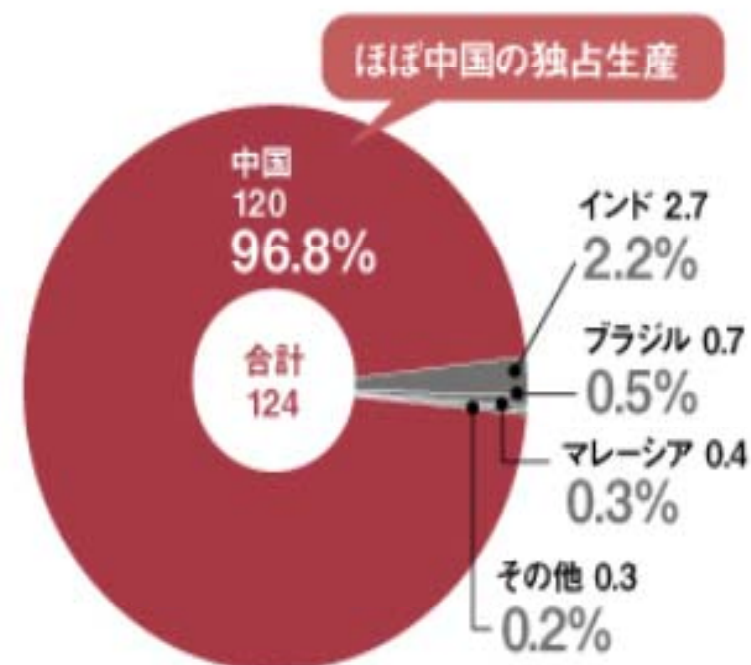
- 日本の金属資源主要輸入先（2011年）

背景（2）

- 特にレアアースは中国等の少数の資源国に集中しているため、**資源の安定供給に問題があり、価格変動が大きい。**



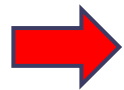
レアアースの埋蔵量
(酸化物量) 単位：千トン



レアアースの生産量
(酸化物量) 単位：千トン

背景（3）

- 陸上鉍物資源開発は需要増加のために低品位化、奥地化、高地化、困難化して、**開発コストが増加**、鉍山周辺的环境負荷の増加などの多くの問題がある。
- 海洋鉍物資源の日本の潜在資源量は**海底熱水鉍床は世界第1位**、**コバルトリッチクラストは世界第2位**
また、**日本の南鳥島にはレアアースを多く含んだ泥が発見**。



コスト面、環境面等を考慮し、
輸入だけに頼らず、自国供給路線を考え、陸上鉍物採掘
から海洋鉍物採掘にシフトしていくべき

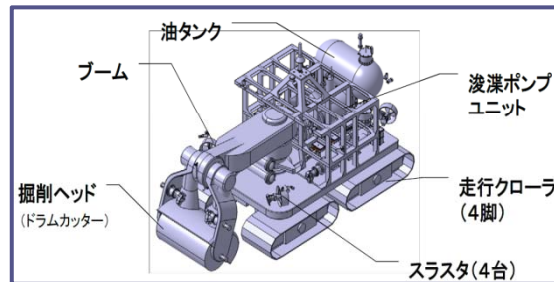
目的

①環境に優しい

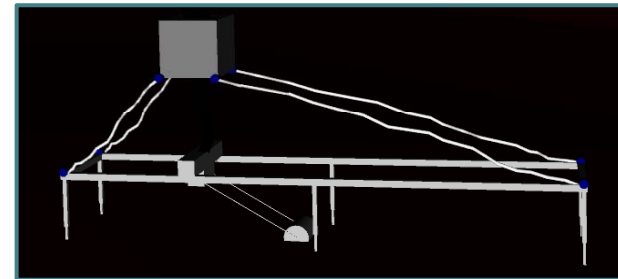
②掘削・輸送の効率が良い

を考慮した新たな海洋資源（ベース・レアメタル）採掘法
を検討する。

従来のシステム



本研究のシステム



そして、日本が商業的な面においても、
自国で資源を採掘できるように検討する。

◎全体の流れについて◎

①背景と目的

②海底資源とその可能性について

③採掘システムについて

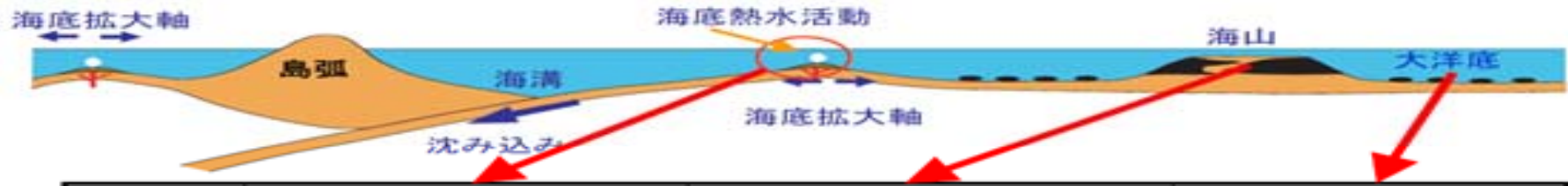
(全体の採掘システム、採鉱機、問題点等)

④新たな採掘システムの提案

⑤従来と新システムの比較

⑥まとめと今後の課題

海底資源について



	海底熱水鉱床	コバルトリッチクラスト	マンガン団塊	レアアース堆積物
水深が深いほど、ケーブルのコスト、浚渫コストが高くなり、総コストが高くなる	まれなもの	海底の岩石を皮殻状に覆う、厚さ数mm～10数cmの酸化物	直径が4～8cmの球状、扁平楕円形の形をしたマンガン酸化物	海底にある泥
百有九の金属	ガリウムなど、レアメタル	マンガン、銅、ニッケル、コバルト、白金など。メインは、コバルト、ニッケル、白金	マンガン、ニッケル、銅、コバルト約30種類の金属。メインは、銅、ニッケル、亜鉛鉛	レアアースを多く含む。特に重レアアースを多く含む。
分布する水深	500～3000m	1000～2400 m	1000～6000m	5000m～6000m
資源がある中心水域	排他的経済水域	排他的経済水域と公海	公海中心	排他的経済水域と公海
写真				

レアアース堆積物（1）

レアアース堆積物（南鳥島 PC5）の収入

採掘船1隻のみ、約300万トン/年 揚泥を想定

レアアース資源量 (約300万トン/年 揚泥を想定)

 $1.5 \text{ km} \times 1.5 \text{ km} \times 2 \text{ m} \times 0.66 \text{ g/cm}^3 \times 3,245 \text{ ppm}$

- ・ネオジウム量 \div 2,200 t (酸化物換算): 175億円
- ・ユウロピウム量 \div 130 t (酸化物換算): 215億円
- ・テルビウム量 \div 75 t (金属Tb): 145億円
- ・ジスプロシウム量 \div 440 t (金属Dy): 370億円
- ・イットリウム量 \div 3,700 t (酸化物換算): 130億円

※2012年12月の価格

1000億/年以上の収入

（*市場規模が小さいため、価格変動は大きい）

レアアース堆積物について（2）

●レアアース堆積物の特徴●

①資源量が多い

⇒南東太平洋と中央太平洋だけで、880億トン。
現在確認されている世界の陸上レアアース鉱床の総埋蔵量の
800倍ものレアアース資源がこの2つの海域だけで存在。

②非常に高い重レアアース含有量

⇒陸上の鉱床に比べ、重レアアース含有量が相対的に非常に高い。
つまり、現在、工業材料として重要性の大きい重レアアース含有量
が豊富。

レアアース堆積物について (3)

③トリウム、ウランなどの放射性元素を含まない

⇒放射元素のトリウム、ウランの含有量が少ないことは、陸上鉱床の精錬コスト高の問題を解決可能。

④探査がきわめて容易

⇒簡単な基礎調査だけで充分。レアアース堆積物は、遠洋の非常に堆積環境が安定した海域で、広く堆積。そのため、4隅の4点だけ掘削すればよい。

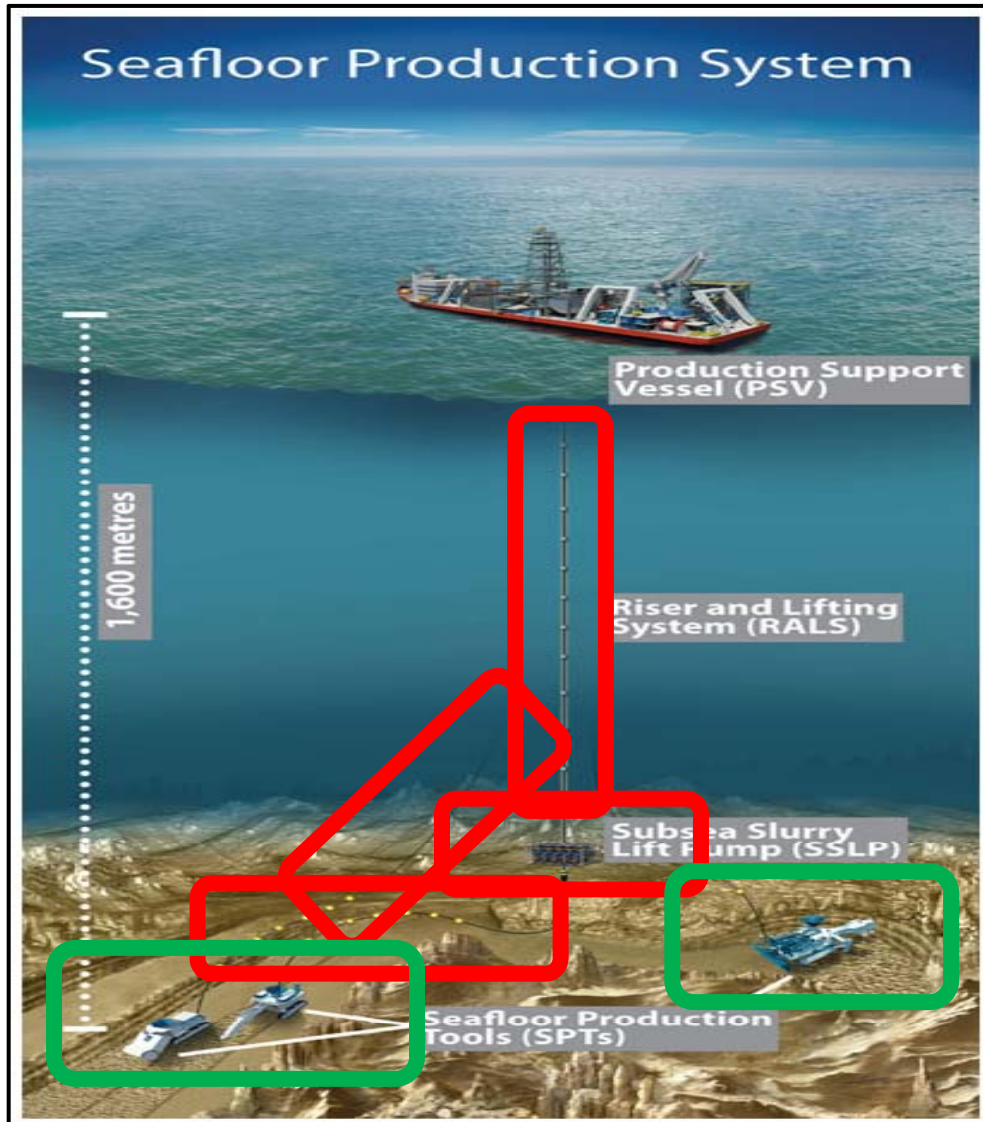
⑤レアアースの抽出が容易

⇒室温状態 (25℃) において希硫酸 (0.2 mol/l) と反応させることにより、短時間 (1時間程度) にCeを除く含有レアアースのほとんど (80%以上) が抽出可能。

◎全体の流れについて◎

- ①背景と目的
- ②海底資源とその可能性について
- ③採掘システムについて
(全体の採掘システム、採鉱機、
問題点等)
- ④新たな採掘システムの提案
- ⑤従来と新システムの比較
- ⑥まとめと今後の課題

全体の採鉱システム



左図は、カナダのNautilus Minerals社が現在開発を行っているイメージ図

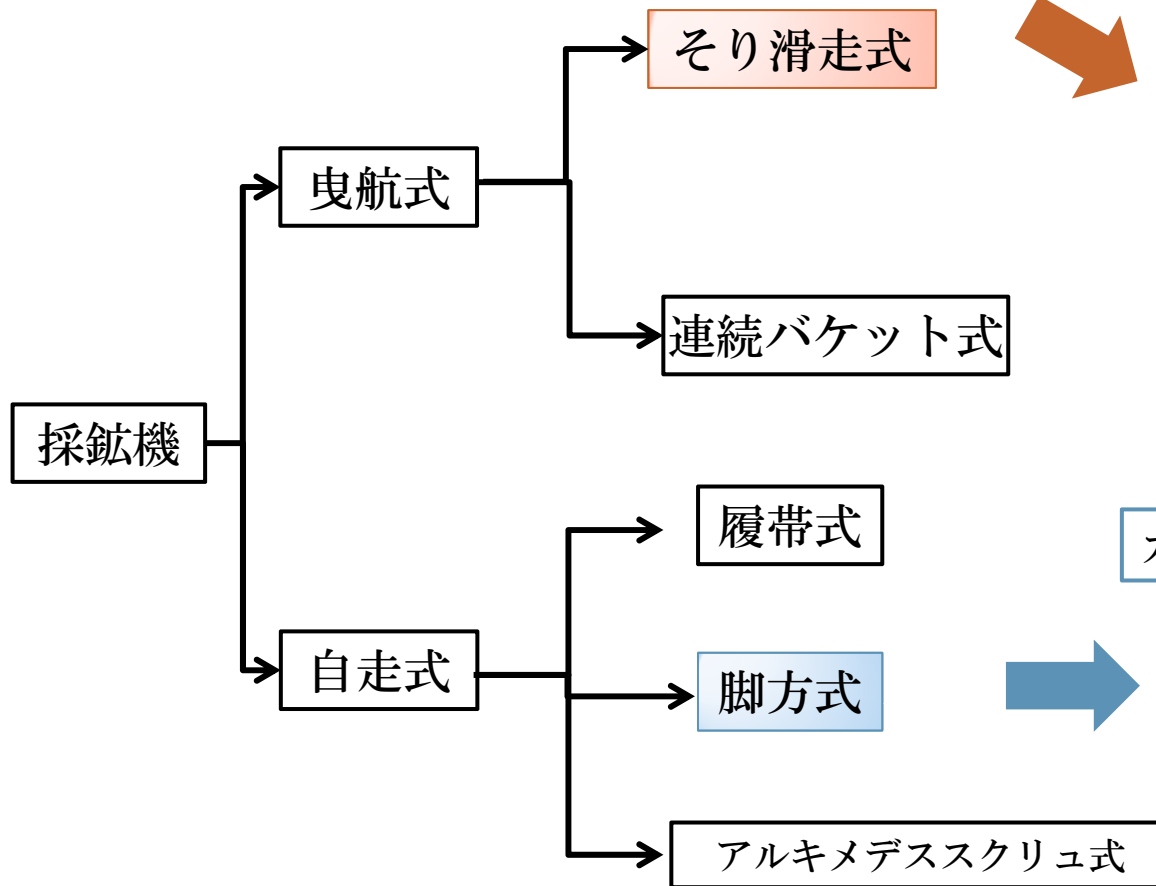
構成の中身は

- ①ケーブル
- ②フレキシブルパイプ
- ③水中ポンプ
- ④ライザー管
- ⑤採鉱機

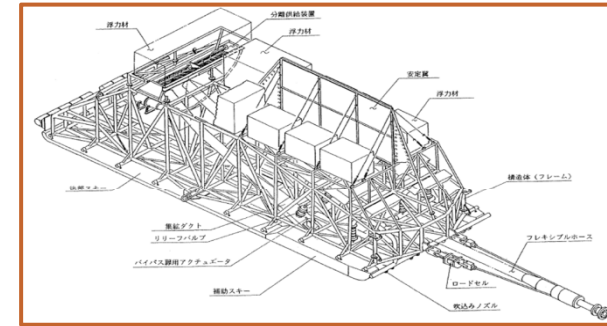
などがある。

現時点の採掘方法（1）

・採鉱機の種類について

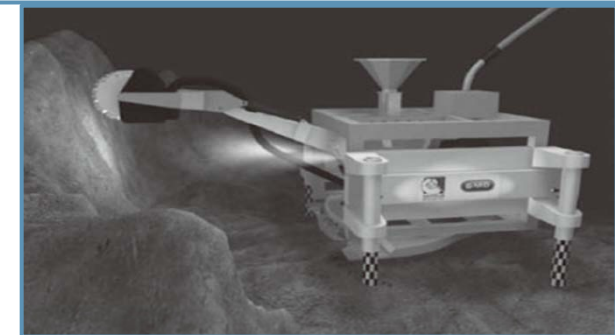


日本製、マンガン団塊を想定した採鉱機



* マンガン団塊採鉱システムの概要より抜粋

カナダ製、熱水鉱床を想定した採鉱機



* Nautilus Minerals社より抜粋

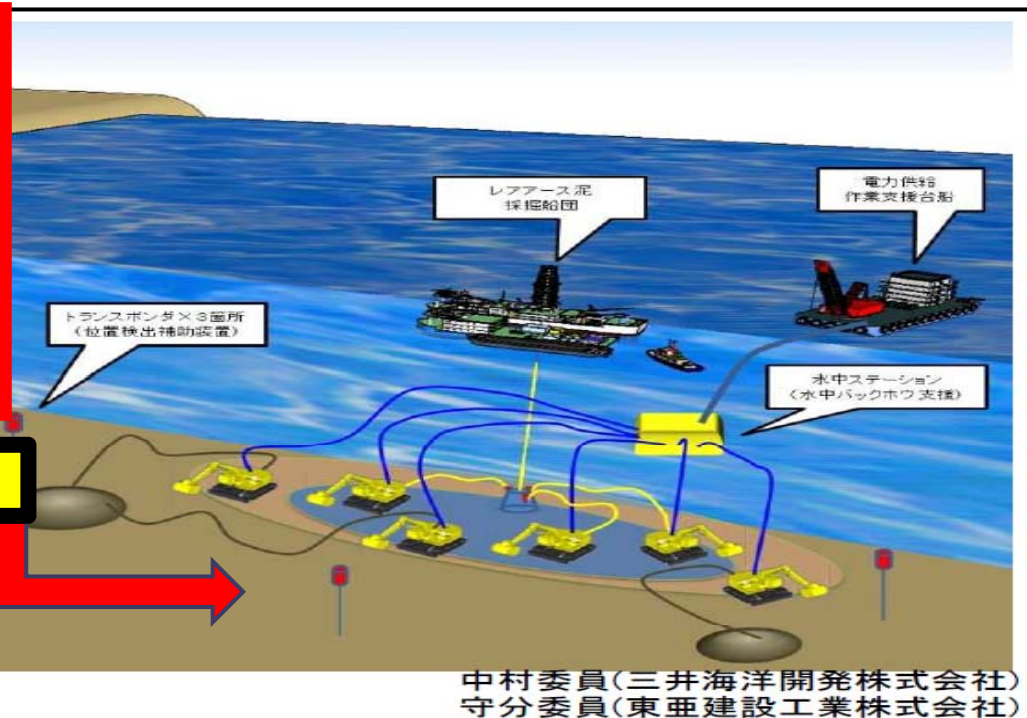
現時点の採掘方法（2）

●レアアース堆積物の採鉱システム●

現在、試作機のモデルを検討中



既存の水中バックホウを耐圧化する



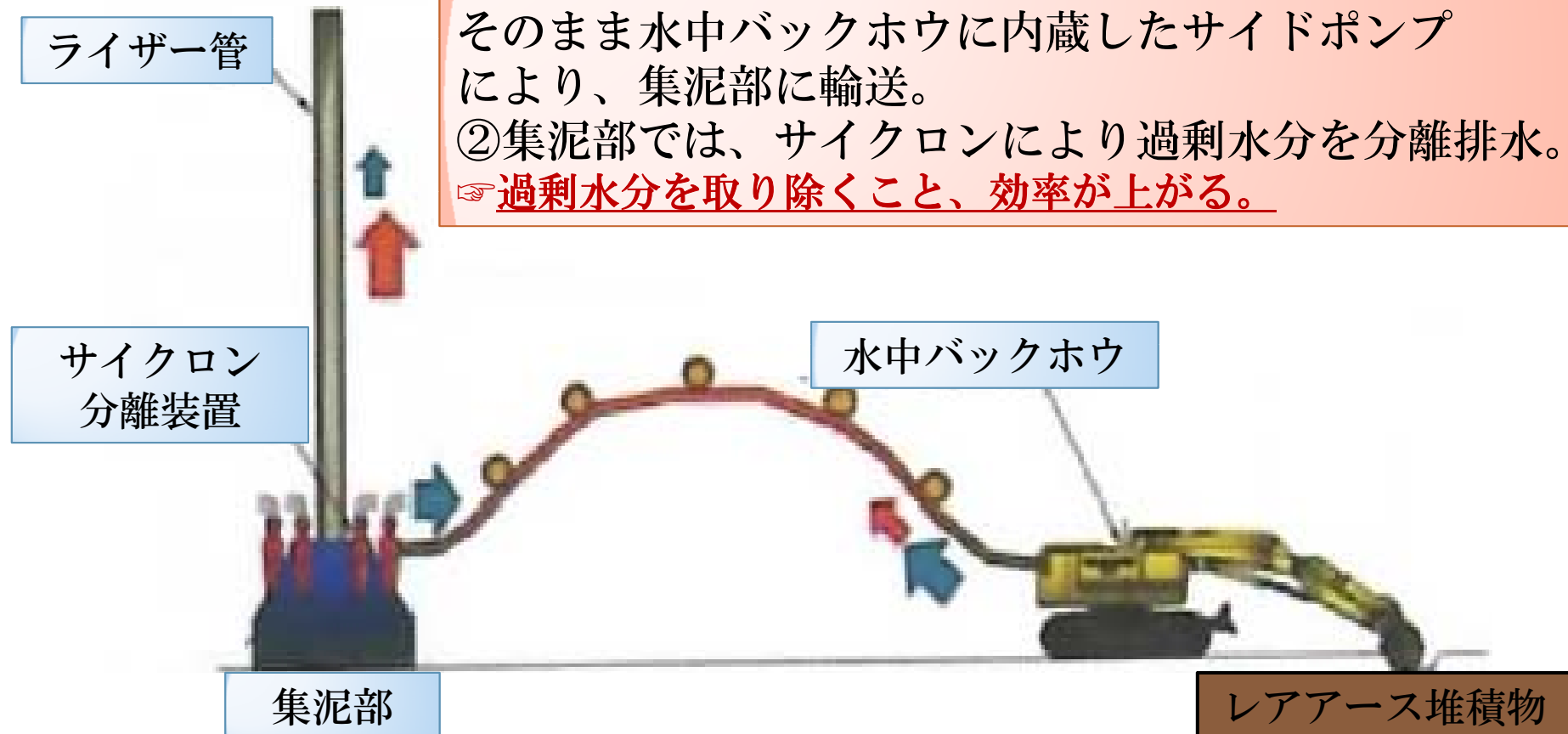
* 南鳥島海域のレアアース泥に関する勉強会報告書より抜粋

⇒ 1隻の専用船で泥を1万～1万5000トン/日揚泥。
年間の揚泥量は、300万トンと仮定している。

現時点の採掘方法（3）

●レアアース堆積物の採鉱システム●

- ①カッターにより揚泥したレアアース堆積物は、そのまま水中バックホウに内蔵したサイドポンプにより、集泥部に輸送。
- ②集泥部では、サイクロンにより過剰水分を分離排水。
☞過剰水分を取り除くこと、効率が上がる。



現時点の採掘方法（4）

●海底熱水鉱床の採鉱システム●

現在、小型の試作機を作成、実証実験中



* JOGMECより抜粋



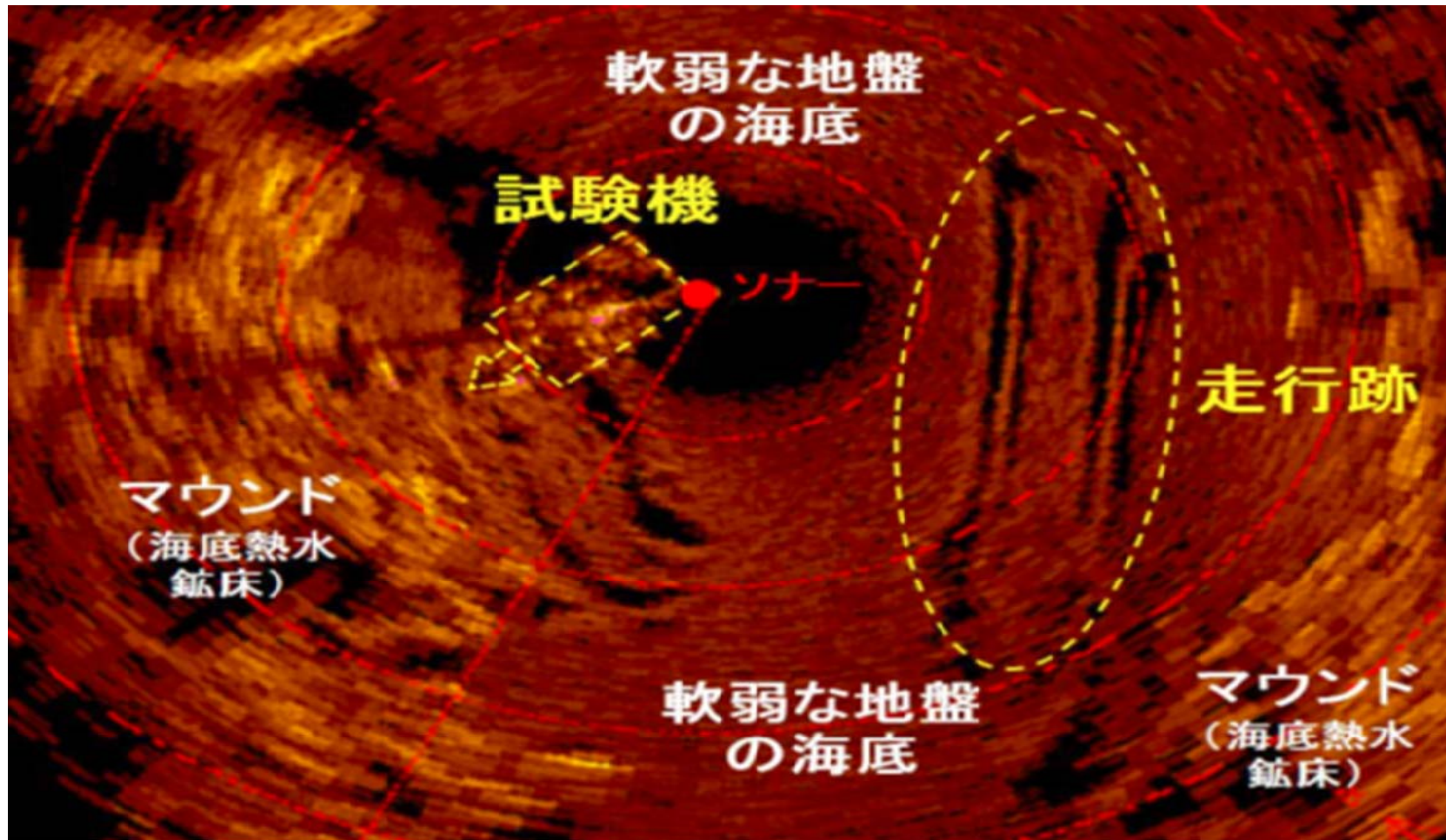
* JOGMECより抜粋

①三菱重工業の採鉱機
⇒ALL IN ONE型
(採鉱と集鉱が一つの採鉱機)

②三井三池製作所の採鉱機
⇒採鉱と集鉱が別々の採鉱機

履帯式の採鉱機の問題点（1）

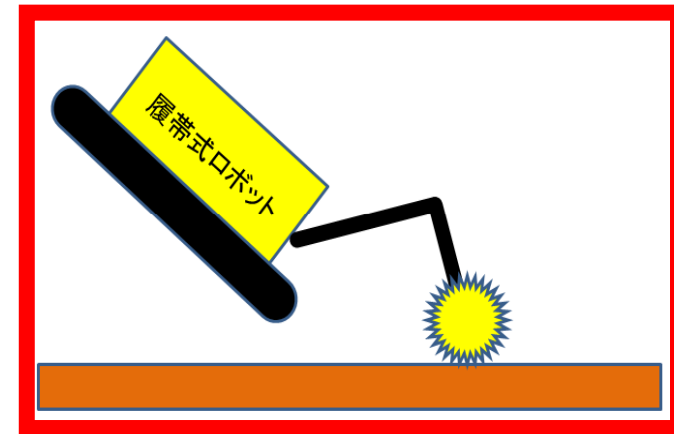
2012年、9月と12月に実際に熱水鉱床（沖縄）にて、2台の採鉱機を稼働させるという実験を行った。



履帯式の採鉱機の問題点（2）

●海底熱水鉱床を想定した場合●

①反力の問題

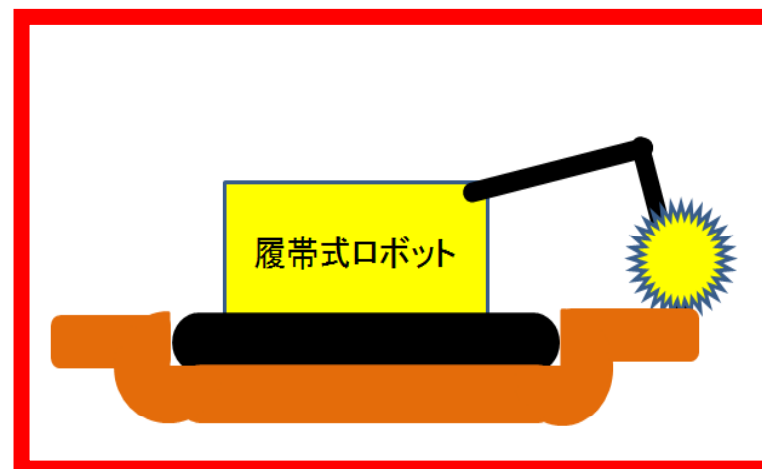


⇒掘削カッターの反力に対応するために採鉱機自身を大型化する必要がある。将来的は、ダイヤモンド掘削機（約**200**トン）のスケールが必要。

履帯式の採鉱機の問題点（3）

●レアアース堆積物を想定した場合●

②採鉱機の安定性の問題



⇒軟弱で攪乱を受けると大きな強度低下が起きる粘土質の泥では、動けないのではないか？

履帯式の採鉱機の問題点（4）

●海底熱水鉱床とレアアース堆積物の
両方を想定した場合●

③移動コストの問題

⇒履帯式では、轍等を作り、
余分な移動コスト等がかかる。



④環境面の問題

⇒掘削や移動の際に泥や砂等の舞い上がりにより、
周辺環境が悪化する。



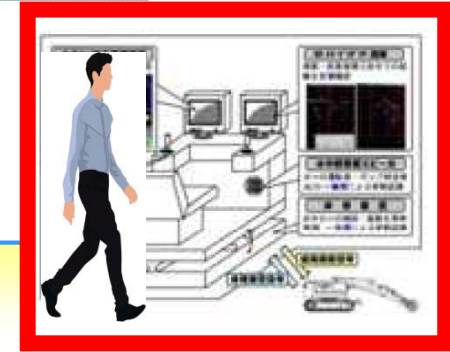
⑤カメラ等によるセンシングの問題

⇒掘削する際の土砂の舞い上がりにより、
カメラでのセンシングは困難。

履帯式の採鉱機の問題点（5）

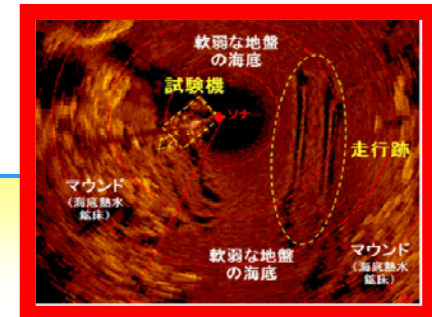
⑥自動化の問題

⇒オペレータによるリモコン操縦で採鉱機を稼働させているが、将来は自動化したい。



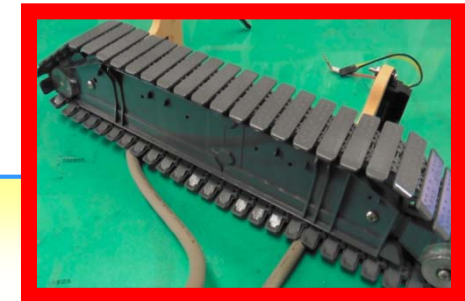
⑦ソナーの問題

⇒現在使われているソナーだけを使って採鉱機を思いのままに操作することは難しいレベルである。



⑧ケーブルの損傷の問題

⇒履帯部の巻き込み等によってケーブルの損傷が発生し、メンテナンス数も増加。

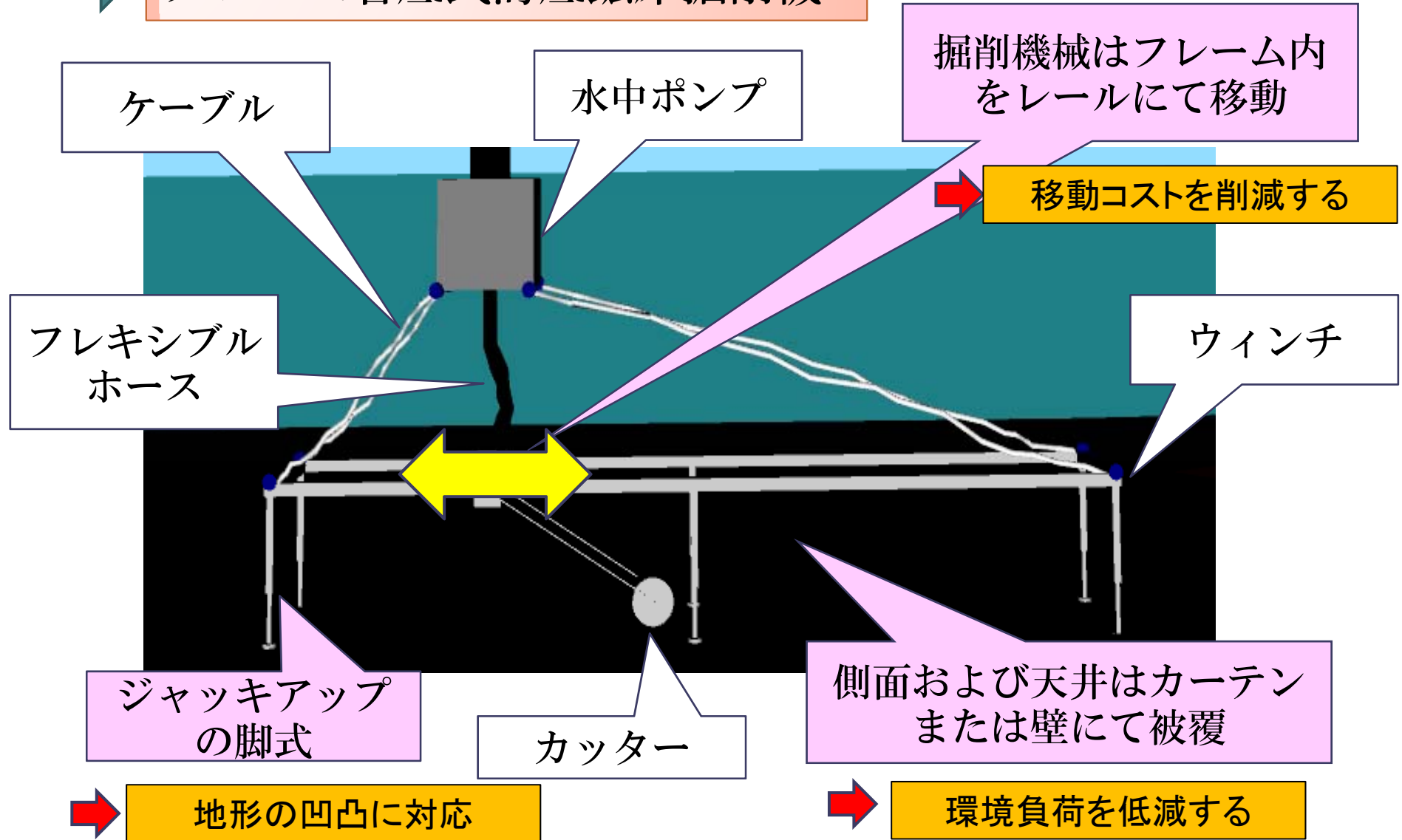


◎全体の流れについて◎

- ①背景と目的
- ②海底資源とその可能性について
- ③採掘システムについて
(全体の採掘システム、採鉱機、問題点等)
- ④新たな採掘システムの提案**
- ⑤従来と新システムの比較
- ⑥まとめと今後の課題

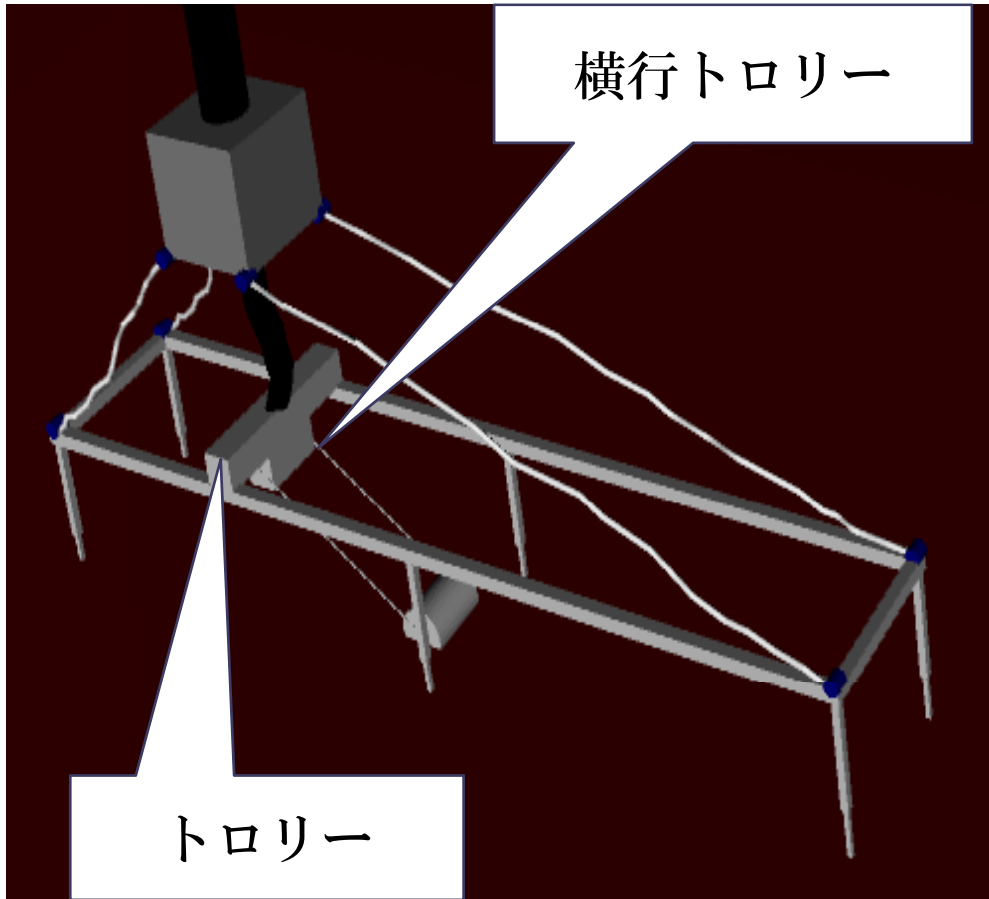
新たな採掘方法（１）

→ フレーム着底式海底鉱床掘削機



新たな採掘方法（２）

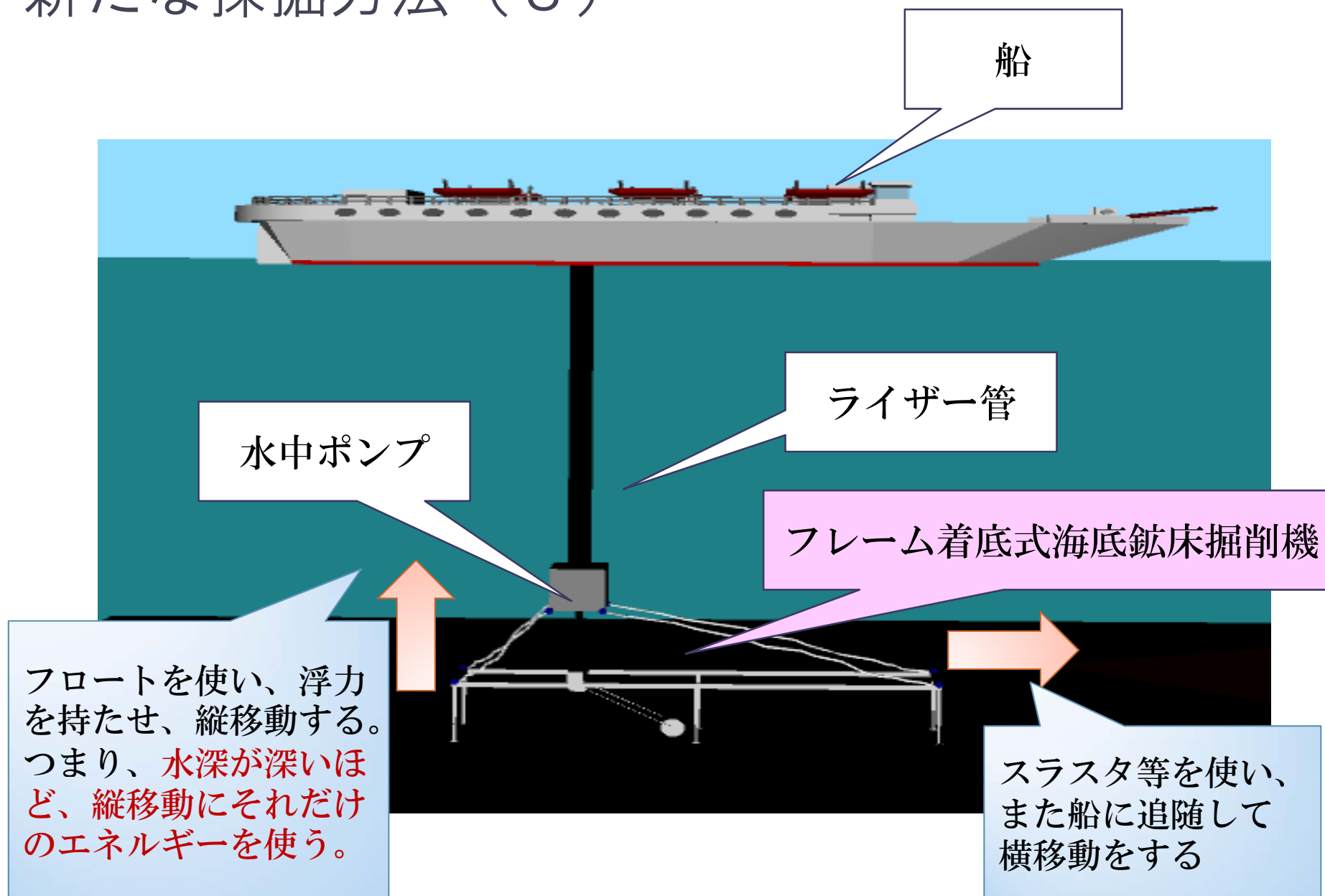
カッターの形状の一例



2つのトロリーを組み合わせることで、

- ➡
- ①掘削する前にソナー等を使い、地形データを得る。
 - ②掘削範囲に柔軟性を持たせる。

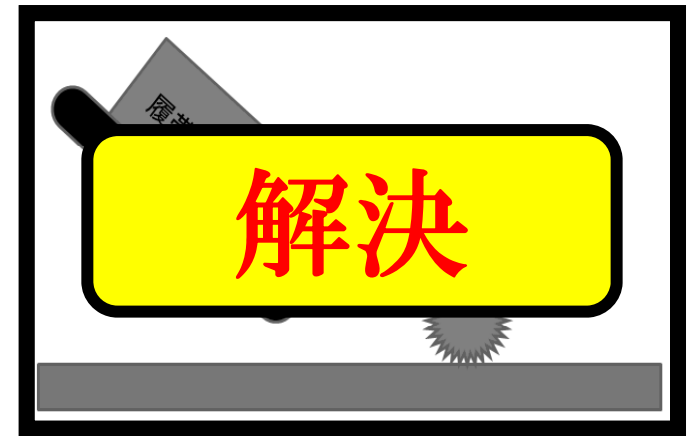
新たな採掘方法（3）



新たな採掘方法（４）

◎新システムの特徴・長所◎

●海底熱水鉱床を想定した場合●

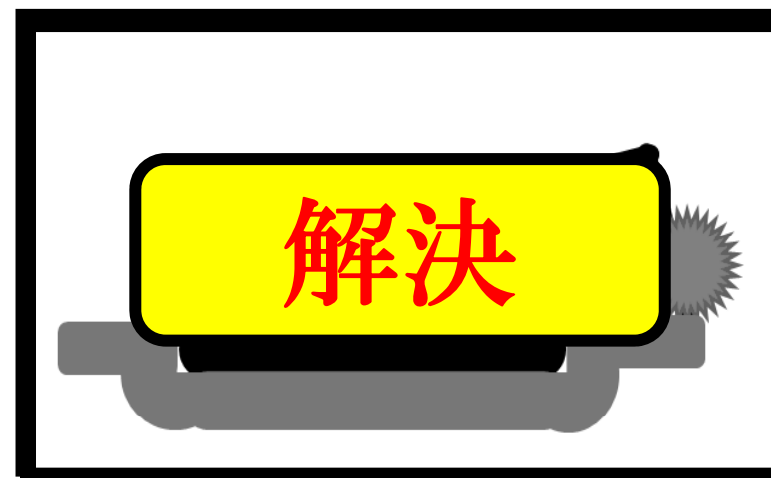


①反力の問題への対応

⇒フレームが大きな重量を有する、カッタードラムを大きくする、水中ポンプをこのフレーム構造内に入れることなどによって、ある程度の重さを調整が出来、反力の問題を解決

新たな採掘方法（5）

●レアアース堆積物を想定した場合●



②採鉱機の安定性の解決

⇒履帯式のように移動するわけではないため、
移動が出来ないことがない。また、軟弱地盤でも対応可能。

新たな採掘方法（6）

- 海底熱水鉱床とレアアース堆積物の両方を想定した場合●

③移動コストの削減

⇒トロリーはレール上を移動するため、
轆等を作らず、その分のエネルギーロスがない



④環境負荷の低減

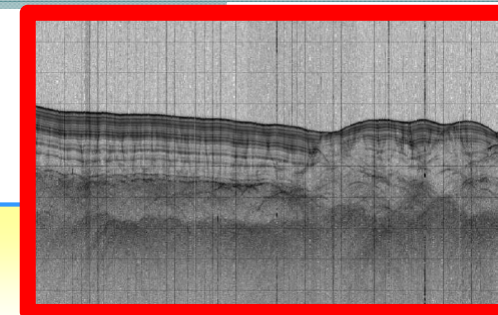
⇒側面および天井はカーテンまたは壁にて被覆するため、掘削時に砂等が舞い上がることによる拡散を防ぐ効果が高い



新たな採掘方法（7）

⑤ センシングの容易さ

⇒ トロリーを使いスキャナーのようにセンシングすることで、掘削対象の正確な形状を簡単に計測可能。そのため、視界悪化に影響されず、掘削可能。



⑥ 自動化への容易さ

⇒ 掘削前に地形データを把握でき、オペレータの手を借りず、採掘作業の完全自動化が可能。



⑦ ケーブルの損傷の回避

⇒ 掘削カッター一部はレールを走行するため、ケーブルの損傷の回避が可能。



◎全体の流れについて◎

- ①背景と目的
- ②海底資源とその可能性について
- ③採掘システムについて
(全体の採掘システム、採鉱機、問題点等)
- ④新たな採掘システムの提案
- ⑤従来と新システムの比較**
- ⑥まとめと今後の課題

従来システムと新システムの比較（1）

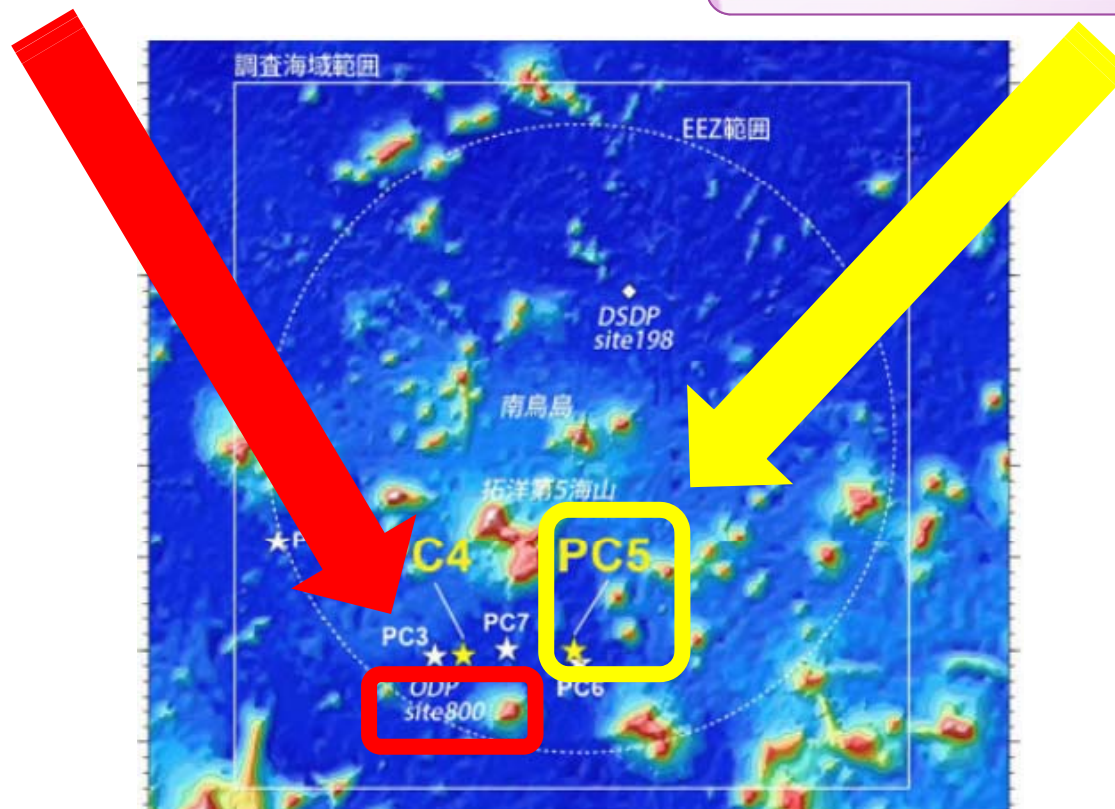
○採鉱場所について○

②Site 800

狭く、深い場所、低濃度

①PC 5

広く、浅い場所、高濃度



従来システムと新システムの比較（2）

①PC 5

○範囲

1 5 0 0 m × 1 5 0 0 m × 2 m

○濃度

3 2 4 5 p p m (Site 8 0 0 に比べ3倍)

○資源量

総レアアース量（酸化物計算）

☞ 9 6 0 0 t

ネオジウム（酸化物換算）

☞ 2 2 0 0 t

ユウロピウム（酸化物計算）

☞ 1 3 0 t

テルビウム（金属）

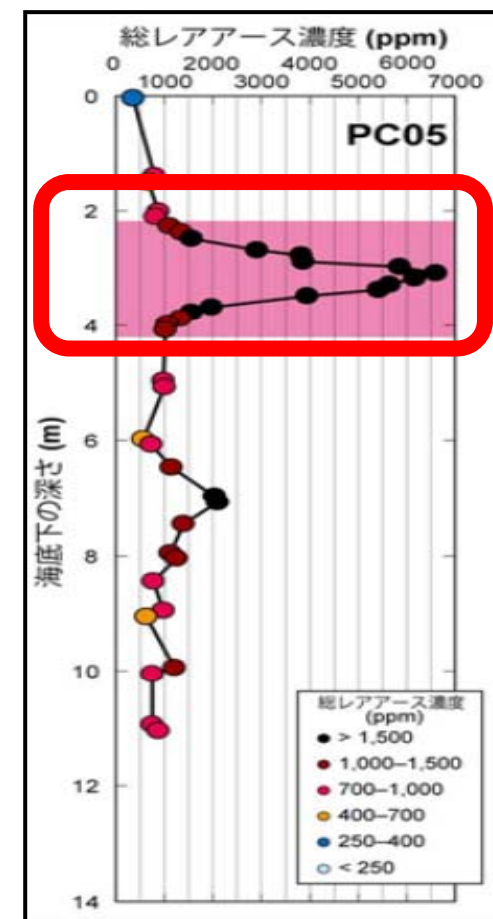
☞ 7 5 t

ジスプロシウム（金属）

☞ 4 4 0 t

イットリウム（酸化物計算）

☞ 3 7 0 0 t



PC 5
総レアアース濃度 (ppm)

従来システムと新システムの比較（3）

②Site 800

○範囲

700 m × 700 m × 10 m

○濃度

1070 ppm

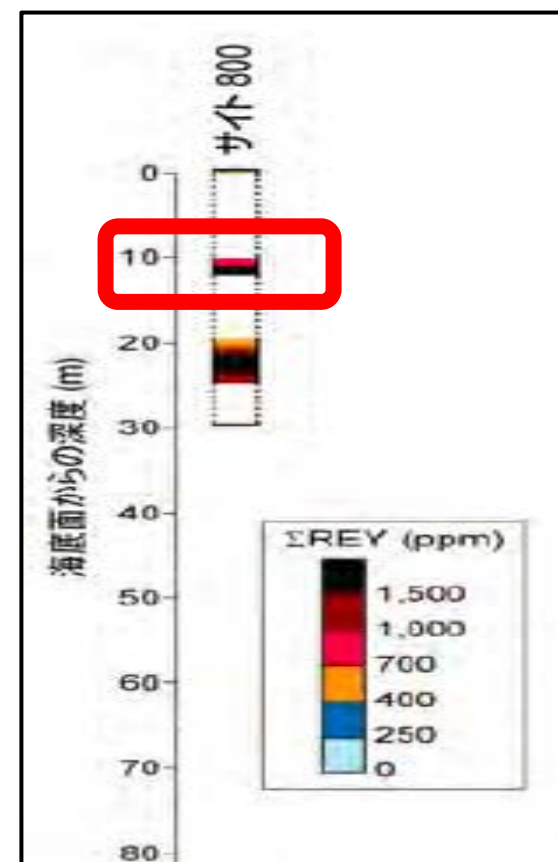
○資源量

総レアアース量（酸化物換算）

☞ 3500 t

ジスプロシウム（金属）

☞ 130 t



Site 800
総レアアース濃度 (ppm)

従来システムと新システムの比較（４）

○稼働日数について○

① 300日

加藤先生の資料で、「300日だとすると・・・」と仮定しているため。

② 268日

海底熱水鉱床の試算は、この268日。また、操業日サイクルは25日連続操業後、5日間点検休止と仮定。

③ 180日

レアアース堆積物は、海底熱水鉱床より3倍の深さがあるため、5日×3倍=15日間の点検休止があると仮定する。

操業日サイクルは15日連続操業後、15日間点検休止と仮定。

従来システムと新システムの比較（5）

○揚泥方法○

①東洋電機の水中掘削機を取り付ける

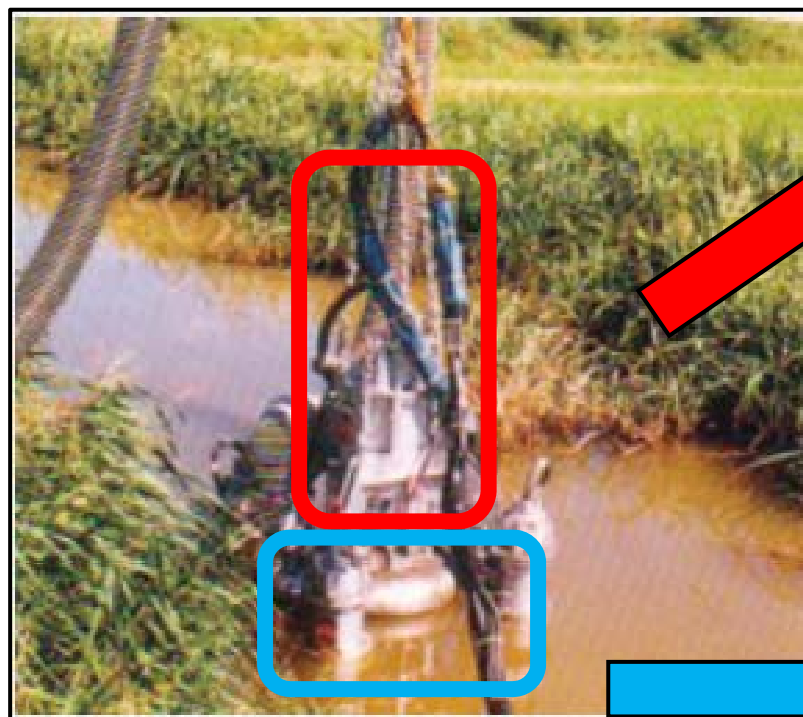


図 東洋電機の揚泥写真



図 水中攪乱サイドポンプ

サイドポンプ自身でも、浚渫可能だが、泥の条件では、下の掘削機に繋げることもある。



図 水中掘削機

油圧 or 電動で稼働する。
また、自身で浚渫能力は持っていないため、ポンプに繋ぐ必要がある。

従来システムと新システムの比較（6）

○揚泥方法○

①東洋電機の水中掘削機を取り付ける

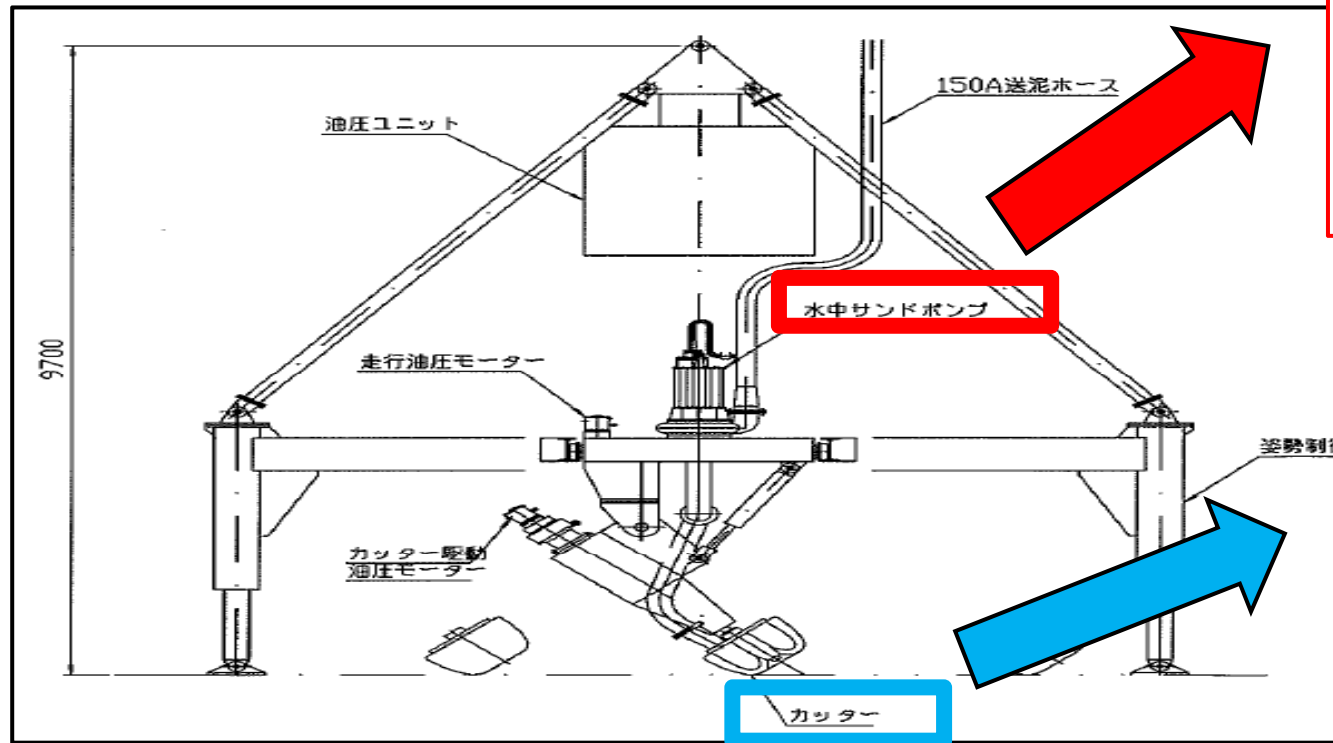


図 フレーム着底式海底鉤床掘削機

* 西松建設より抜粋

従来システムと新システムの比較（7）

○揚泥方法○

①東洋電機の水中掘削機を取り付ける

○水中攪乱サイドポンプ○
(DPFS-50)

- 揚水量：2.5 (m³/min)
- 揚程：35m
- 電力：37 (kW)
- 質量：730 (kg)

○水中掘削機○
(EPK-50)

- 電力：37 (kW)
- 質量：5800 (kg)

従来システムと新システムの比較（8）

○揚泥方法○

②五洋建設のSWAN工法を取り付ける



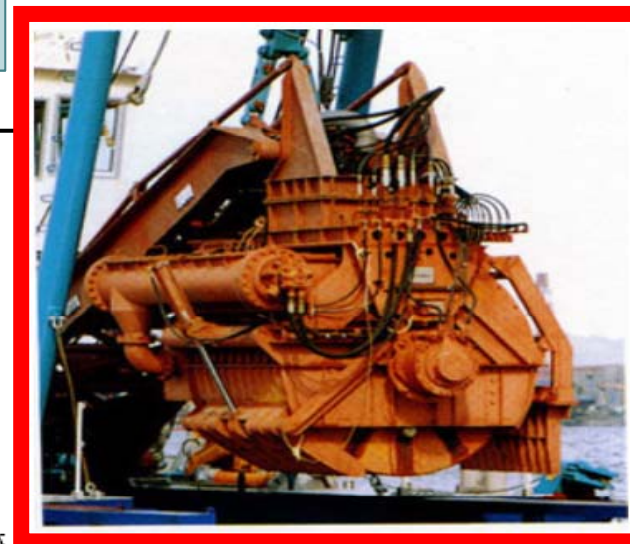
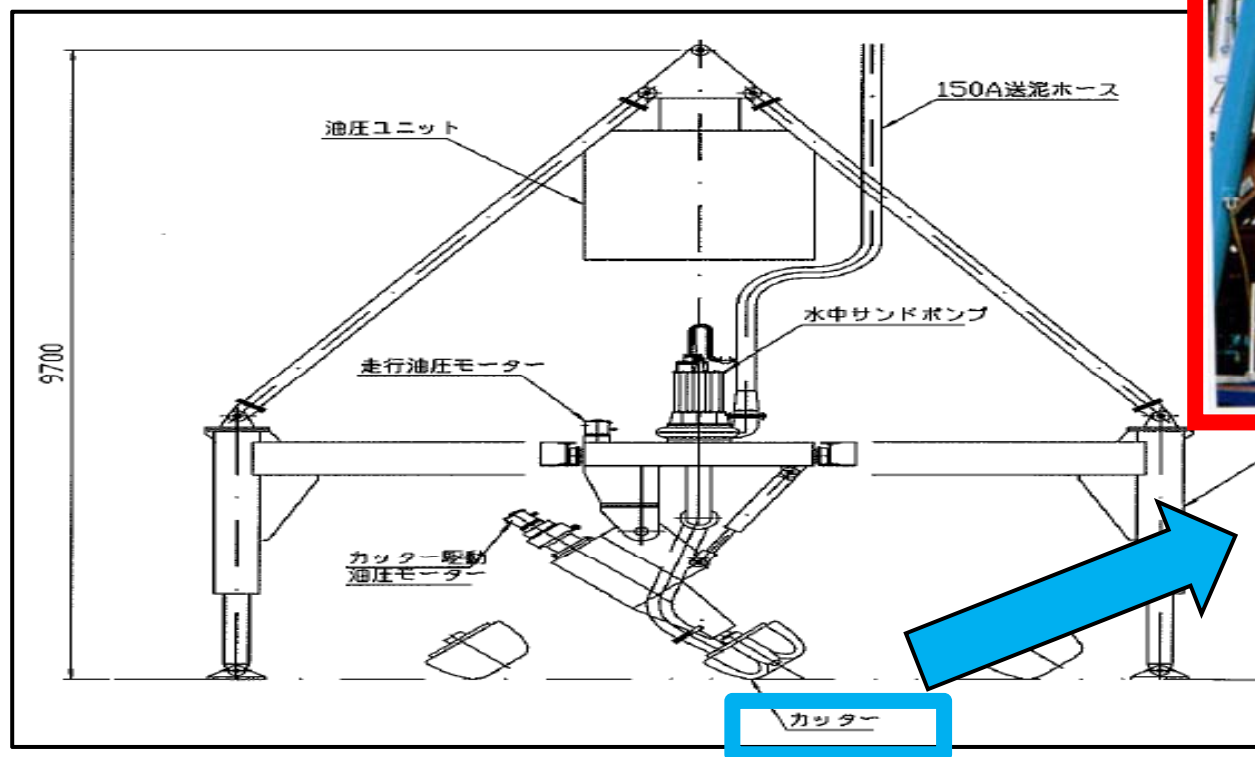
* 五洋建設より抜粋

浚渫船方式（SWAN工法）

従来システムと新システムの比較（9）

○揚泥方法○

②五洋建設のSWAN工法を取り付ける



SWAN工法
の集泥部

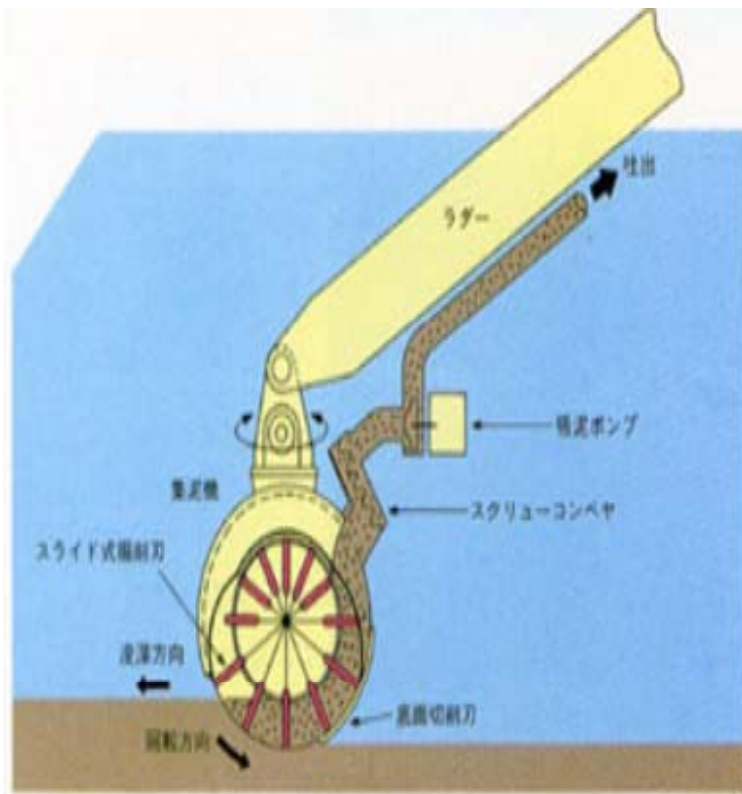
* 西松建設より抜粋

図 フレーム着底式海底鉤床掘削機

従来システムと新システムの比較（10）

○揚泥方法○

②五洋建設のSWAN工法を取り付ける



* 五洋建設より抜粋

○特徴○

- 余分な水の吸引を防ぐ。
- 汚濁発生量を抑える。

従来システムと新システムの比較（1/1）

○揚泥方法○

③日立建機の履带式（既存の方法）

海底での作業は、
陸上の採鉱機を耐圧化等することを想定

表 日立建機の採鉱機の一例



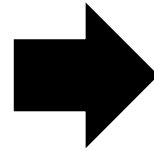
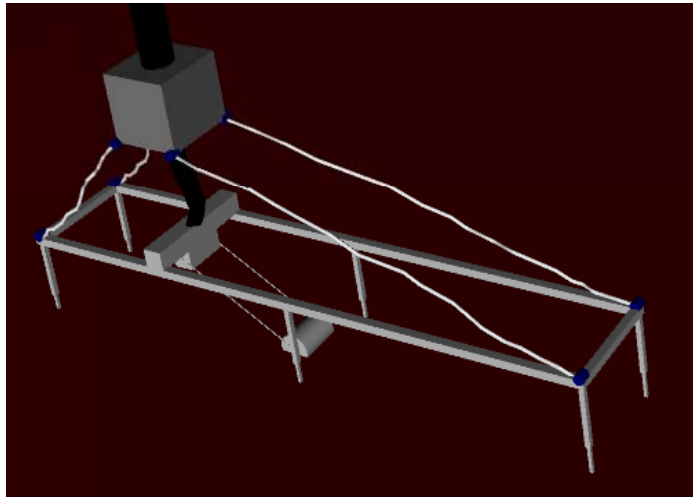
種類	水中重量(t)	採鉱機の出力 (KW)
①	19.5	122
②	46	270
③	111	567
④	192	810
⑤	252	1119

* 日立建機より抜粋

注意点：出力はショベル等を稼働させるための出力も入っており、
駆動用モーターの定格出力ではない

従来システムと新システムの比較（12）

○各々に方式にかかる電力○



- ①縦移動消費電力
- ②トローリーの移動消費電力
- ③横移動消費電力
- ④カッターの消費出力

この二つの消費電力は、
前スライドの出力から
計算可能と仮定

比較の際は、
同じ性能のカッター
(出力、揚泥量)
を使うと仮定

③カッターの消費電力

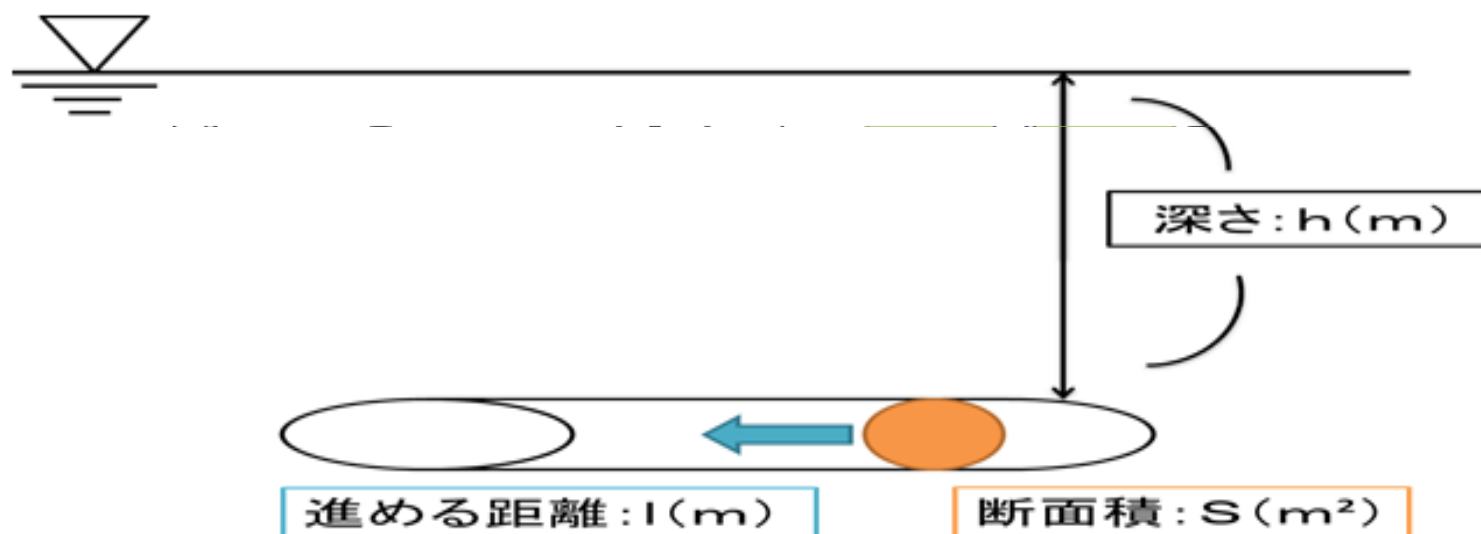
従来システムと新システムの比較（13）

○新システムの消費電力の計算について○

①縦移動消費電力

フレームに浮力を持たせるための消費電力

◎浮力の仕事の計算について



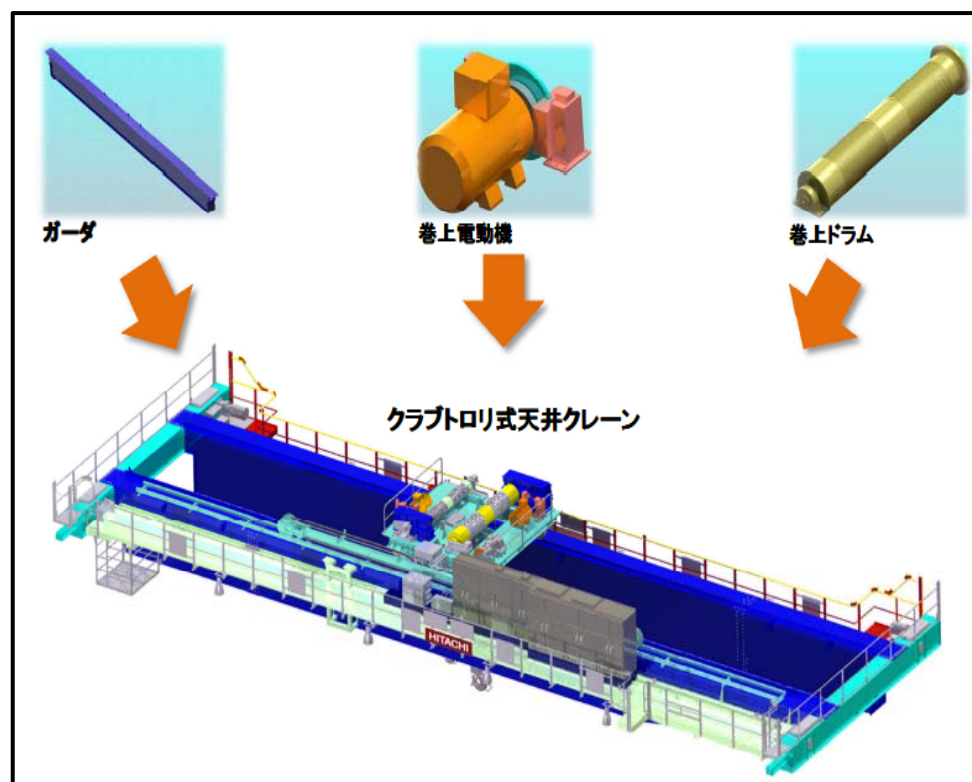
深さ 10 m ごとに水圧は 1 気圧 (1 kg f / m²) 上昇する。

気圧 (kg f / m²) × 断面積 (m²) × 進める距離 (m) × 9.8 = 仕事 (N · m)

従来システムと新システムの比較（14）

○新システムの消費電力の計算について○

② トローリーの移動消費電力



日立のクラブトロリ式天井クレーン

① 東洋電機のカッターを支える

東洋電機のカッター：5.8 (t)
 定格荷重：10 (t)
 横行モーター：3 (KW)
 走行モーター：4.4 (KW)

② 五洋建設のカッターを支える

五洋建設のカッター：55 (t)
 定格荷重：63 (t)
 横行モーター：11 (KW)
 走行モーター：15 (KW)

従来システムと新システムの比較（15）

○新システムの消費電力の計算について○

③横移動消費電力



かもめプロペラのサイドスラスト

* かもめプロペラより抜粋

新システムでは
スラスト等を使い、
また船に追従して、横移動をする
ことを想定しているが、
今回はスラストを複数個装備する
と仮定。

スラストの出力は、
新システムの重量に応じて
変化させる。

参考例

300トンの漁船

☞ スラストの出力：331（KW）

従来システムと新システムの比較（14）

○具体的試算について○

採鉱機 1 台あたりの揚泥量を仮定。
(東洋電機等の既存のポンプを使う) \rightarrow **12 m³/分**

稼働日数&年間採鉱量 (300 万t)
の条件より・・・

必要になる採鉱機の数が決定。

採鉱場所：PC 5
or Site 800

採鉱機のサイズを3つ
仮定すると・・・

新システムの採鉱機の総縦移動回数が決定。

- ・掘削時間はトロリーとカッターが稼働
- ・横移動時間はスラスターが稼働
- ・縦移動消費電力と総縦移動回数 より

総消費電力が分かる

従来システムと新システムの比較 (16)

○比較について○

新システムのフレーム式と**ほぼ同じ重量を持つ**
陸上の採鉱機を比較対象とする

一回当たりの縦移動時間を
①④は15分、②⑤は30分、③⑥は105分と仮定。

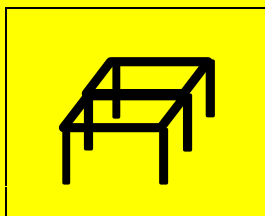


表2 従来システム (日立建機)




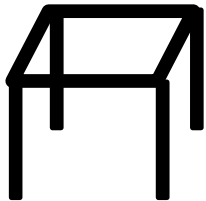
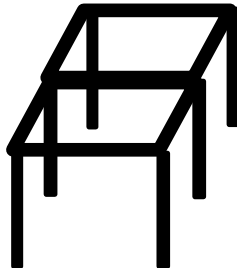
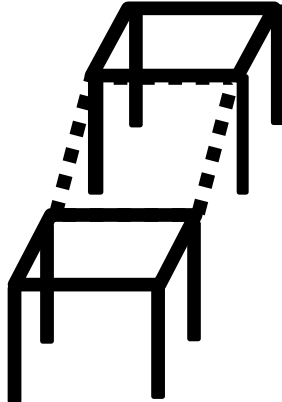
この出力（履帯部と、腕を稼働させる出力と仮定）が
24時間稼働と仮定。

大きさ(L×W)							0.8m
水中重量							
採鉱機の出カ	122KW	採鉱機の出カ	270KW	採鉱機の出カ	270KW		

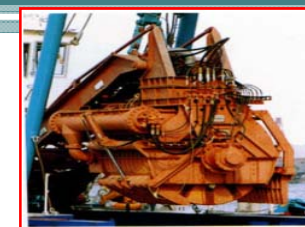
従来システムと新システムの比較（17）




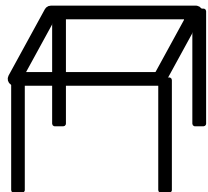
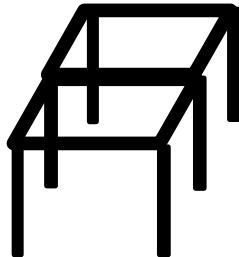
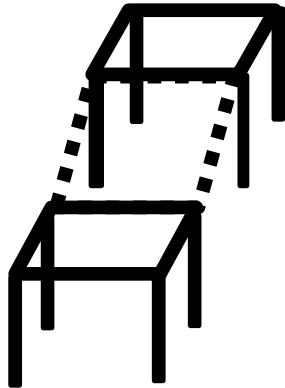
○新システムについて（カッター部分が東洋電機）○

	履帯式の採鉱機	新システム①	新システム②	新システム③
イメージ図				
主寸法 (L×W×H)	変化する	10m × 10m × 10m	10m × 20m × 10m	10m × 70m × 10m
水中重量	変化する	19.5t	35.7t	44.2t
縦移動一回の 消費電力	なし	319KWh	679KWh	722KWh
履帯部の 消費電力	変化する	なし	なし	なし

従来システムと新システムの比較（18）



○新システムについて（カッター部分が五洋建設）○

	履帯式の採鉱機	新システム(D)	新システム(E)	新システム(F)
イメージ図				
主寸法 (L×W×H)	変化する	10m ×10m ×10m	10m ×20m ×10m	10m ×70m ×10m
水中重量	変化する	123.5t	169t	236.6t
縦移動一回の 消費電力	なし	2017KWh	2760KWh	3864KWh
履帯部の 消費電力	変化する	なし	なし	なし

従来システムと新システムの比較（19）

縦移動回数が多くなるPC5の方が、
新システムで不利になる。
また、新システムのサイズが大きくなると、
より優れた結果が出る事が分かる。

しかし、サイズを大きくし過ぎ、重量も増えた場合、
レアアース堆積物のような超軟弱地盤に埋没する
可能性を考慮する必要がある

新システム(A)での比較					新システム(B)での比較					新システム(C)での比較				
① 300日	PC5	新システム 総消費電力 ÷ 従来システム 総消費電力 × 100	169	%	① 300日	PC5	新システム 総消費電力 ÷ 従来システム 総消費電力 × 100	82	%	① 300日	PC5	新システム 総消費電力 ÷ 従来システム 総消費電力 × 100	27	%
	site800		42	%		site800		20	%		site800		8	%
② 268日	PC5		189	%	③ 268日	PC5		92	%	③ 268日	PC5		30	%
	site800		46	%		site800		22	%		site800		9	%
③ 180日	PC5		176	%	④ 180日	PC5		86	%	④ 180日	PC5		28	%
	site800		43	%		site800		21	%		site800		8	%

従来システムと新システムの比較（20）

○結果について○

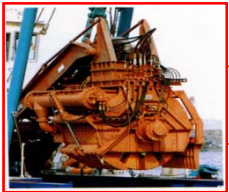


表2 新システム（五洋建設）と従来システム（日立建機）の差



新システム④での比較					新システム⑤での比較					新システム⑥での比較				
① 300日	PC5	新システム 総消費電力 ÷ 従来システム 総消費電力 × 100	234	%	① 300日	PC5	新システム 総消費電力 ÷ 従来システム 総消費電力 × 100	113	%	① 300日	PC5	新システム 総消費電力 ÷ 従来システム 総消費電力 × 100	35	%
	site800		54	%		site800		27	%		site800		9	%
③ 268日	PC5		254	%	③ 268日	PC5		123	%	③ 268日	PC5		38	%
	site800		59	%		site800		29	%		site800		10	%
④ 180日	PC5		237	%	④ 180日	PC5		115	%	④ 180日	PC5		35	%
	site800		55	%		site800		28	%		site800		10	%

○この計算の問題点○

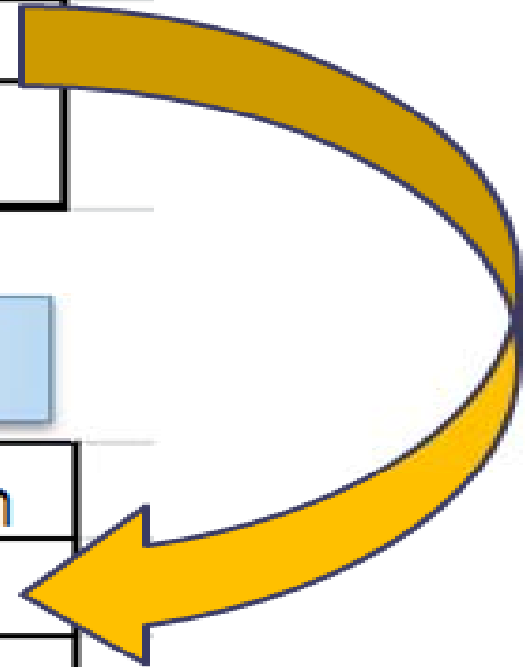
①日立の採鉱機の大きさ等は、フレーム式と同じ重量の陸上採鉱機から計算している。

フレーム式

大きさ(L×W×H)	10m×10m×10m
水中重量	19.5t
縦移動一回あたりの消費電力	319KWh

履带式

大きさ(L×W×H)	4.1m×2.8m×3.0m
水中重量	19.8t
採鉱機の出カ	122KW



◎全体の流れについて◎

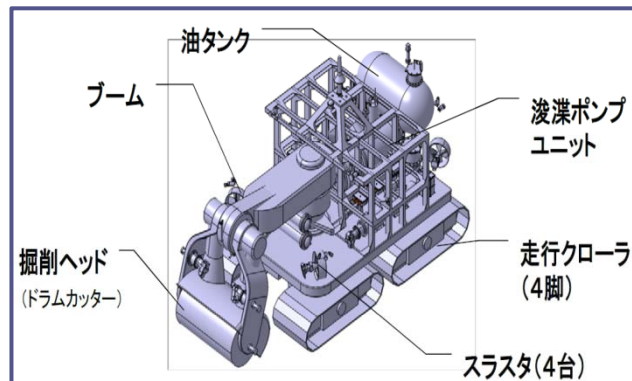
- ①背景と目的
- ②海底資源とその可能性について
- ③採掘システムについて
(全体の採掘システム、採鉱機、問題点等)
- ④新たな採掘システムの提案
- ⑤従来と新システムの比較
- ⑥まとめと今後の課題

まとめと今後の課題

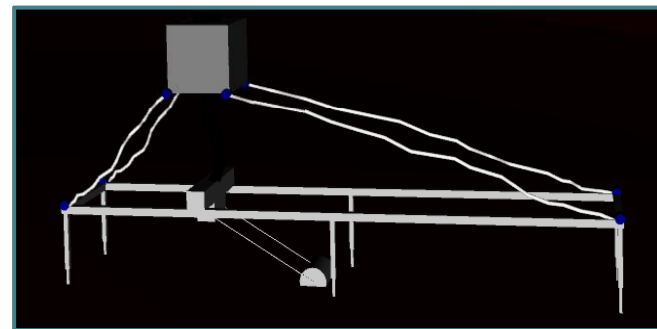
★新システムならではの長所

- 轍を作らず、また軟弱地盤でも対応可能
- センシングの容易さ
- 環境負荷の低減
- 自動化への容易さ
- ケーブルの損傷の回避

従来のシステム



本研究のシステム



まとめと今後の課題

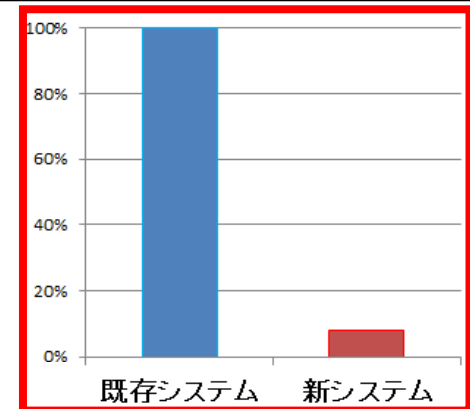
★新システムでは、履帯式の採鉱機より、エネルギーコストだけで**最大で92%の削減**することが可能。

年間電力費 1億4600万円→1168万円に

その他にも、**自動化を行うこと**で、**人件費も削減**することが可能。

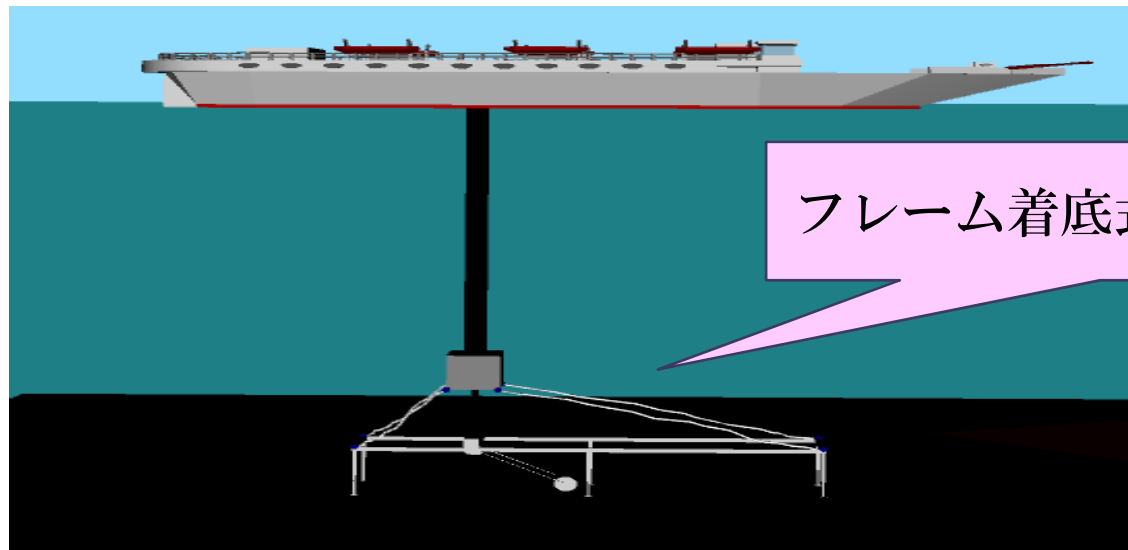
つまり、**新システムは、総稼働コストの面においても、既存システムより優位である。**

⇒新システムは、海底資源採掘の方法の一つとして、**有望であることが分かった。**



★今後の課題としては

- ①レアアース堆積物の泥を再現し、実証実験を行う。
埋没を考え、フレームの脚部の形状の検討。
- ②フレームの材質の検討、縦移動コストの削減を行い、
より実用的で具体的なシステムの構築と正確な試算。



フレーム着底式海底鉱床掘削機