

フレーム着底式海底資源掘削機についての考察

—レアアース泥採掘コストの試算—

正会員 木村 元* 正会員 宮崎 良平*

A Study of Frame-Grounding Type Seafloor Mining Excavator

by Hajime Kimura, Member Ryohei Miyazaki, Member

Key Words: Marine Resources Development, Offshore drilling, Rare Earth, Sea-floor hydrothermal deposit

1. 緒言

我が国の排他的経済水域の深海底には、海底熱水鉱床やコバルトリッチクラスト、レアアース堆積物など鉄や銅等のベースメタルやハイテク産業に欠かせないレアメタルやレアアース鉱物資源の存在が確認されており、これらの安定供給のためにも地上での採鉱と競争可能な採掘技術の確立が急務である。これまで履帯式の車体にカッタードラムやジェットノズルを取り付け、海水と一緒にパイプで海上まで引き上げる方式が開発されてきたが、移動や採鉱に大きなエネルギーを消費する問題がある。本研究では、採鉱の際のエネルギー消費が少なく、周囲に汚染物質をまき散らすことのないフレーム着底式採鉱装置について、レアアース泥鉱床での運用コストの概算を従来方法と比較し、実現可能性を検討する。

2. 海底資源の可能性

日本の排他的経済水域内における潜在資源量は、海底熱水鉱床は世界第1位、コバルトリッチクラストは世界第2位となっており、その回収推定額は180兆円以上だと言われている¹⁾。また、これらの海底鉱物資源を5000t/日採掘したとすると収入は、2~6億円/日である。また、南鳥島のSite800では、300万t/年採掘したとすると収入は、700億/年である²⁾。

3. 採鉱システムについて

3.1 一般的な採鉱システム全体の構成

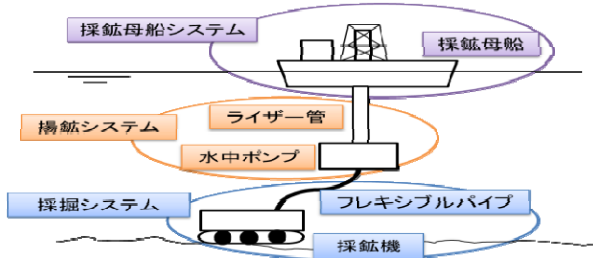


Fig.1 A concept of the standard sea-floor mining system

採鉱システムは、Fig.1に示すように大きく3つのサブシステムから構成され、①海底で鉱石を採掘する採掘システム、②採掘された鉱石を海面まで揚げる揚鉱システム、

③海面に揚がった鉱石を処理し陸上に運ぶための採鉱母船システムに区分される³⁾。

3.2 従来の採鉱機

従来の採鉱機は、履帯による自走式が一般的となっている⁴⁾⁵⁾。このタイプの採鉱機が平成24年8月に日本の海底熱水鉱床にて実証実験を行った³⁾。以下にその実証実験の問題点・改良すべき点を述べる。

- 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。将来的には、ダイヤモンド掘削機（約200トン）のスケールが必要。
- ②採鉱機の移動の問題：海底は軟弱な地盤であり、車輪や履帯の沈下のため移動が困難である。移動することが出来たとしても大きな轍（わだち）を作って移動するため、大きなエネルギーコストを要する。
- ③環境面の問題：掘削や移動の際に泥や砂等を巻き上げることなどにより、周辺環境が悪化する。
- ④カメラ等にセンシングの問題：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。
- ⑤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ることが前提であり、自動化は困難。
- ⑥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。掘削前に掘削範囲をスキャン等することで、掘削前に地形データを把握して、掘削を行いたい。
- ⑦ケーブルの損傷の問題：履帯部の巻込み等によってケーブルの損傷が発生し、メンテナンス回数も増加する。

4. 新たな海底資源掘削方法の検討

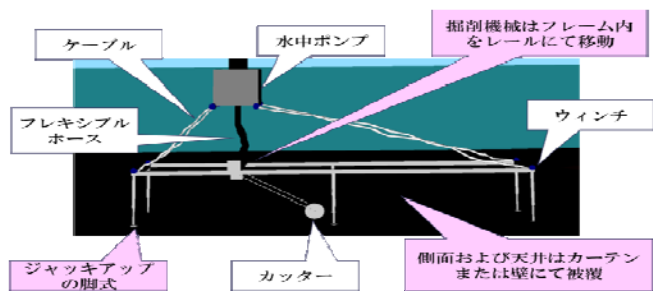


Fig.2 A concept of the frame-grounding type mining excavator

本研究では、新たな海底資源採掘方法である「フレーム着底式海底資源採掘機」を検討する⁶⁾⁷⁾。フレームにトロリ走行用の軌道を設置し、トロリに掘削用カッタードラムを取り付ける。カッタードラム後方には、掘削と同時に掘り出した鉱物を吸い込むための吸い込み口が設置され、フレキシブルパイプを通じて支援母船へ送られる。フレームは海底に対し支柱と脚によって掘削が海底地形

* 九州大学 大学院工学研究院

**川崎重工業株式会社

原稿受付（学会にて記入します）

秋季講演会において講演（学会にて記入します）

©日本船舶海洋工学会

に影響されない高さに支持される。掘削時、本機を海底面に着底させ、掘削カッターをトロリで移動させながら掘削する。掘削が終了したら、クレーン・フロートまたはスラストを利用して本機を海底面より持ち上げ、別の場所へ移動する。本システムは以下の特徴を有する：

- 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、水中ポンプをこの構造内に入れることによって、重さの調整が出来、反力の問題を解決できる。
- ②**採鉱機の移動の問題への対応**：トロリはレール上で移動するため、轍（わだち）等を作って移動せず、その分のエネルギーロスがない。また、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。特に、レアース堆積物等の超軟弱地盤で有効である。
- ③**環境負荷の低減**：側面および天井はシートやカーテン等にて被覆するため、掘削時における砂等の舞い上がりの拡散を防ぐ効果が高い。
- ④**センシングの容易さ**：トロリに超音波距離計を取り付け、スキャナのようにセンシングすることにより、掘削する前に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、掘削が可能である。
- ⑤**自動化への容易さ**：④で述べたように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容易に可能である。
- ⑥**ケーブルの損傷の回避**：掘削カッター部はレールを走行するため、履帯でケーブルを踏むような損傷が無い。

5. 既存の履帯式方法と新システムの比較

採鉱条件は、レアース揚泥量 300 万 t/年以上（揚泥量は 12[m³/分]）、稼働日数は 3 パターン（300 日、268 日、180 日）、採鉱場所は 2 パターン（PC5【縦 1500[m]×横 1500[m]×鉱床厚さ 2[m]】、Site800【縦 700[m]×横 700[m]×鉱床厚さ 10[m]】）とする。新システムの電力は、

(1) 縦移動消費電力（カッターの重量を構造的に支持可能な鋼材で構成される梁とラーメン構造として求めた。縦移動はフロートに空気注入して浮上するとして計算）

(2) トロリの移動消費電力（クラブトロリ式天井クレーンを採用し、カッター重量に応じてモータの規格を変更）

(3) 縦移動消費電力（スラストを複数個装備すると仮定。スラスト出力は、フレームの重量に応じて変化させ、例えば 300[t]の漁船のサイドスラストの出力は 331[KW]であることを参考に計算する。）の 3 つの合計を考える。

また、カッター部分は、Fig.3 に示す東洋電機工業所の水中掘削機-EPK50 型（電動型）を使用したタイプと Fig.4 に示す五洋建設の SWAN-3 号の集泥部(Fig.5)を使用したタイプの 2 種類について試算を行う。

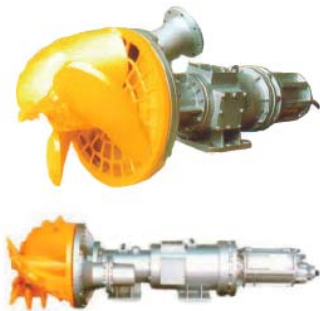


Fig.3 The EPK50-type excavator



Fig.4 SWAN III dredge ship

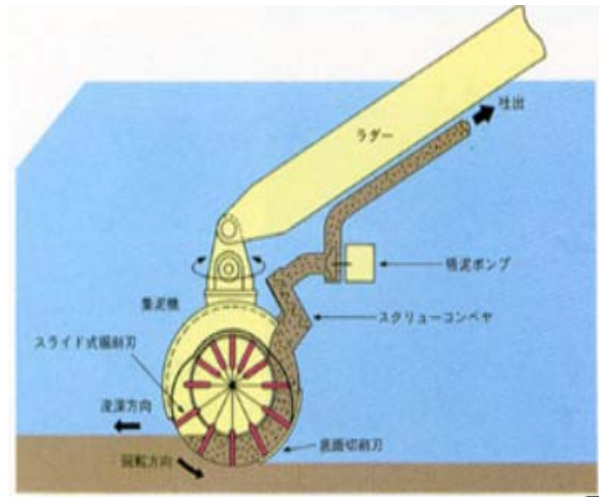


Fig.5 Outline of the excavator of the SWAN III

EPK50 型掘削機は、空中重量 5.8[t]で消費電力 37[KW]であり、掘削した鉱物は水と一緒に水中攪乱サンドポンプ（DPSF-50 型空中重量 0.73[t]出力 37[KW]揚泥量 12[m³/min]）によって揚鉱システムまで送るものとする。SWAN-3 号の回転式バケット集泥部は、浚渫速度と集泥機回転速度を同期させることにより、水底地盤を乱すことなく軟泥を取り込めるため、汚濁発生量が少ない特徴がある。この集泥機の空中重量は 30[t]、集泥機を駆動する油圧ポンプは 22[KW]、スクリーコンベア駆動用油圧ポンプは 37[KW]、さらに 220[KW]のロータリーポンプ 2 台で揚鉱システムまで水と一緒に鉱物を送るものとする。

既存の履帯式の方法の場合では、陸上の採鉱機を耐圧化して海底に沈めると想定しているため、本研究では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稼働した際の消費電力の計算を行った。

フレーム着底式海底鉱床掘削機のタイプとして、掘削部に EPK50 型を用いて、フレームの大きさを変えた 3 種類（A,B,C）と、SWAN-3 号の回転式バケット集泥部を用いてフレームの大きさを変えた 3 種類（D,E,F）の計 6 種類について試算する。フレームの大きさに関しては、集泥部のトロリ横行距離だけが異なるように設定する。A 型のフレームは 10[m]×10[m]×10[m]で水中重量は 19.5[t]、集泥部空中重量 5.8[t]、集泥機駆動電力 37[KW]、採鉱機から揚鉱システムまで送るポンプ駆動電力 37[KW]、集泥機をフレーム内で移動するトロリ駆動電力 7.4[KW]、スラスト出力 22KW、縦移動 1 回あたりの消費エネルギーは 319[KWh]である。B 型のフレームは 10[m]×20[m]×10[m]で水中重量は 35.7[t]、集泥部空中重量 5.8[t]、集泥機駆動電力 37[KW]、採鉱機から揚鉱システムまで送るポンプ駆動電力 37[KW]、集泥機をフレーム内で移動するト

ロリ駆動電力 7.4[KW], スラスト出力 40KW, 縦移動 1 回あたりの消費エネルギーは 679[KWh]である。

C型のフレームは 10[m]×70[m]×10[m]とかなり大きい在水中重量は 44.2[t], 集泥部空中重量 5.8[t], 集泥機駆動電力 37[KW], 採鉱機から揚鉱システムまで送るポンプ駆動電力 37[KW], 集泥機をフレーム内で移動するトロリ駆動電力 7.4[KW], スラスト出力 49KW, 縦移動 1 回あたりの消費エネルギーは 722[KWh]である。SWAN-3 号の集泥部を用いたフレーム D,E,F のうち D 型のフレームは 10[m]×10[m]×10[m]で A 型と一緒に集泥部が重い水中重量は 123.5[t], 集泥部空中重量 55[t], 集泥機駆動電力 22[KW], 採鉱機から揚鉱システムまで送るポンプ駆動電力 477[KW], 集泥機をフレーム内で移動するトロリ駆動電力 26[KW], スラスト出力 136KW, 縦移動 1 回あたりの消費エネルギーは 2017[KWh]である。E 型のフレームは 10[m]×20[m]×10[m]で水中重量は 169[t], 集泥部空中重量 55[t], 集泥機駆動電力 22[KW], 採鉱機から揚鉱システムまで送るポンプ駆動電力 477[KW], 集泥機をフレーム内で移動するトロリ駆動電力 26[KW], スラスト出力 186KW, 縦移動 1 回あたりの消費エネルギーは 2760[KWh]である。F 型のフレームは 10[m]×70[m]×10[m]で水中重量は 236.6[t], 集泥部空中重量 55[t], 集泥機駆動電力 22[KW], 採鉱機から揚鉱システムまで送るポンプ駆動電力 477[KW], 集泥機をフレーム内で移動するトロリ駆動電力 26[KW], スラスト出力 261KW, 縦移動 1 回あたりの消費エネルギーは 3864[KWh]である。

また、フレームを縦移動させて別の採鉱場所へ移動する間、採鉱できないため、この縦移動に要する時間の見積もりは重要ではあるが、参考になりそうなデータが全く存在しないため、縦移動時間はフレームの大きさのみに依存すると仮定し、フレーム A と D は 15 分、B と E は 30 分、C と F は 105 分として試算を行った。

採鉱システムの年間稼働日数は、メンテナンスに要する日数や台風などの影響も考慮し、年間 300 日・268 日・180 日の 3 パターンを検討する。上記のフレーム着底式海底鉱床掘削機 ABCDEF および従来の履带式採鉱機の全てにおいて、年間揚泥量を 300 万トンと想定し、上記 3 パターンの稼働日数と、各タイプの稼働時間や掘削能力、揚鉱システムまで鉱物を運ぶポンプ能力から上記揚泥量の確保に必要な同時稼働採鉱機数を算出した結果、年間 300 日稼働および 268 日稼働で 5 基、180 日稼働で 8 基が必要である。フレーム着底式海底鉱床掘削機 ABCDEF および従来の履带式採鉱機の消費電力コストを比較する際は、各フレーム着底式のフレーム重量と履带式採鉱機の掘削機部分を除いた部分の重量が最も近い陸上型の日立建機パワーショベルの電力から計算し、また履带式は常に採鉱場所を移動するため、稼働できない縦移動が不要なので 24 時間稼働できるものとして台数を計算した。各フレーム着底式との比較対象となる履带式採鉱機の掘削カッター部分はフレーム着底式で用いているものと同一とした。その結果、フレーム A との比較対象の履带式採鉱機の空中重量 19.8[t], 掘削カッターと水中サンドポンプを除いた部分(アームや履帯駆動)の定格出力 122[KW], フレーム B と C の比較対象の履帯式の空中重量 46[t], 掘削カッターと水中サンドポンプを除いた部分の定格出力 270[KW], フレーム D の比較対象の履带式採鉱機の空中重量 111[t], 集泥部と水中サンドポンプを除いた部分の定格出力 567[KW], フレーム E の比較対象の履带式採鉱機

の空中重量 192[t], 集泥部と水中サンドポンプを除いた部分の定格出力 810[KW], フレーム F の比較対象の履带式採鉱機の空中重量 252[t], 集泥部と水中サンドポンプを除いた部分の定格出力 1119[KW]である。Table 1~4 に各採鉱機の年間消費電力の試算結果を示す。単位が[KWh]なので今一つコストの実感が湧かないが、標準的な電力料金である 1[KWh]あたり 15 円で計算すると、履帯式のフレーム C 相当の電力コストが約 1 億 4600 万円になる。

Table 1 Annual power consumption of the type A, B and C.

Annual operating days	Mining location	Annual power consumption[KWh]		
		Frame A	Frame B	Frame C
300 days	PC5	7,442,616	8,011,441	2,636,928
	Site800	1,829,220	1,953,098	782,648
268 days	PC5	7,414,200	7,983,025	2,608,512
	Site800	1,800,804	1,924,682	754,232
180 days	PC5	7,431,960	8,000,784	2,626,272
	Site800	1,818,564	1,942,442	771,992

Table 2 Annual power consumption of the conventional crawler-type excavators counter to type A, B and C.

Annual operating days	Mining location	Annual power consumption[KWh]		
		counter to Frame A	counter to Frame B	counter to Frame C
300 days	PC5	4,392,000	9,720,000	9,720,000
	Site800	4,392,000	9,720,000	9,720,000
268 days	PC5	3,923,520	8,683,200	8,683,200
	Site800	3,923,520	8,683,200	8,683,200
180 days	PC5	4,216,320	9,331,200	9,331,200
	Site800	4,216,320	9,331,200	9,331,200

Table 3 Annual power consumption of the type D, E and F.

Annual operating days	Mining location	Annual power consumption[KWh]		
		Frame D	Frame E	Frame F
300 days	PC5	46,427,741	32,189,369	13,699,216
	Site800	10,843,090	7,742,289	3,715,545
268 days	PC5	46,327,901	32,089,529	13,599,376
	Site800	10,743,250	7,642,449	3,615,705
180 days	PC5	46,390,301	32,151,929	13,661,776
	Site800	10,805,650	7,704,849	3,678,105

Table 4 Annual power consumption of the conventional crawler-type excavators counter to type D, E and F.

Annual operating days	Mining location	Annual power consumption[KWh]		
		Counter to Frame D	Counter to Frame E	Counter to Frame F
300 days	PC5	20,412,000	29,160,000	40,284,000
	Site800	20,412,000	29,160,000	40,284,000
268 days	PC5	18,234,720	26,049,600	35,987,040
	Site800	18,234,720	26,049,600	35,987,040
180 days	PC5	19,595,520	27,993,600	38,672,640
	Site800	19,525,520	27,993,600	38,672,640

次に、（フレーム着底式の消費電力／履帯式の消費電力）×100 の計算を行う（Table 5, 6）．これは、フレーム着底式が従来の履帯式システムの消費電力の何％で稼働できるかを表す．つまり、この値が 100％以上の場合は、従来の履帯式採鉱機が優位であることを示す（黄色の部分）．また、100％以下の場合は、提案手法の着底式採鉱システムが優位であることを示す（緑の部分）．

Table 5 Comparison of the annual power consumptions between the frame-grounding types and the crawler types.

Annual operating days	Mining location	Annual power consumption[KWh]		
		Frame A /crawler	Frame B /crawler	Frame C /crawler
300 days	PC5	169 %	82 %	27 %
	Site800	42 %	20 %	8 %
268 days	PC5	189 %	92 %	30 %
	Site800	46 %	22 %	9 %
180 days	PC5	176 %	86 %	28 %
	Site800	43 %	21 %	8 %

Table 6 Comparison of the annual power consumptions between the frame-grounding types and the crawler types.

Annual operating days	Mining location	Annual power consumption[KWh]		
		Frame D /crawler	Frame E /crawler	Frame F /crawler
300 days	PC5	234 %	113 %	35 %
	Site800	54 %	27 %	9 %
268 days	PC5	254 %	123 %	38 %
	Site800	59 %	29 %	10 %
180 days	PC5	237 %	115 %	35 %
	Site800	55 %	28 %	10 %

Table 5, 6 の比較結果より、レアアース泥鉱床の層の厚みが少ない PC5 では、縦移動を伴うフレームの移動が Site800 より多く発生するため、小型のフレーム着定式採鉱機は履帯式採鉱機に比べて消費電力で劣る場合が多いことが分かる．逆に、単にフレームを大型化するだけで履帯式に比べてフレーム着底式が圧倒的に優位となる．鉱床の層が厚い場合は履帯式の約 1/10 ほどの消費電力に抑えられている．しかし、サイズを大きくし過ぎてフレーム重量が増えた場合、レアアース堆積物のような超軟弱地盤に脚部が埋没する危険性を留意しなければならない．また、建造方法や鉱床までの運搬、メンテナンス等を考慮してもフレームの大型化には限界がある．

また、Table 1～6 のコスト試算は、Fig.1 で示した全体システム中の「採鉱機システム」部分の、商用運転時の年間消費電力だけを比較したものであり、揚鉱システムや採鉱母船の消費電力やレアアース泥の精錬コストは考えていない．実現可能性について検討するためには、それらの調査に加え、採鉱機の建造・運搬・メンテナンス方法の検討およびコストについても検討が必要である．

6. 結 言

本研究では新しい海底資源採鉱システムである「フレーム着底式海底資源掘削機」をレアアース泥の採鉱に適用した場合について取り上げ、年間揚泥量 300 万トンとして稼働した場合の年間消費電力を試算し、従来の履帯

式採鉱機を用いた場合との比較を行った．その結果、フレームを大型化するほど、また鉱床の厚み大きいほどフレーム着底式が優位となり、Site800 での採鉱において履帯式の約 1/10 程度の電力で済むことを示した．また、履帯式においてはレアアース泥鉱床のような超軟弱地盤では履帯の沈み込みによって移動できない懸念やオペレータによる 24 時間連続操作にかかる人件費など上記試算に含まれないリスクやコストが存在するのに対し、フレーム着底式では地形の形状の把握が容易でカッターヘッドがフレーム内部にあり安全で位置計測も容易であるため完全自動化による無人運転が容易で、クローラによる移動を行わないので採鉱機が「動けない」という懸念やクローラでケーブルを踏んでケーブルを損傷する懸念もないなど多くの利点を有していることを示した．

参 考 文 献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁（2011 年）海底熱水鉱床開発計画にかかる第 1 期中間評価報告書．
- 2) 加藤泰浩（2012）,「太平洋のレアアース泥が日本を救う」,PHP 研究所..
- 3) 経済産業省資源エネルギー庁、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構、海底熱水鉱床開発委員会（2013 年）海底熱水鉱床開発第 1 期最終評価報告書．
- 4) 山本耕次（2010 年）,独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構セミナー・講演会資料「海底熱水鉱床の採鉱システムの検討について」．
- 5) . 石黒慎二,山内由章,小高宏幸,秋山清悟（2013）,海底熱水鉱床採掘技術試作機の開発,三菱重工技報,Vol.50.No.2,37～42.
- 6) 近藤操可, 中山努, 浚渫装置, 特開 2005-30138.
- 7) 宮崎 良平, 木村 元: 海底資源掘削法についての考察, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 Vol.19, pp.89--91（2014 年 11 月）．