

海底熱水鉱床は何故10年程度で商業化が実現しなかったのか

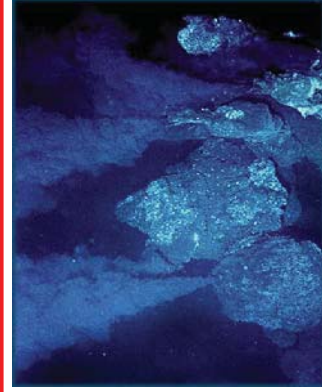
山崎哲生

大阪府立大学 大学院工学研究科
海洋システム工学分野 客員研究員

1. 海洋基本計画(第1期)の大目標
2. 挫折の原因分析
3. 「宝探し」(探査)に潜む危険性
4. 海底熱水鉱床開発総合評価
5. 経済性を成立させる技術開発
鉱石の海底選別、機械式揚鉱、パルプリフト

海底鉱物資源:

金属、レアメタル、レアアース類の安定的供給源として期待



海底熱水鉱床
水深700-1,700mの背弧
海盆、海洋性島弧
EEZに有望鉱床
金、銀、銅、亜鉛、鉛



コバルトリッチクラスト
水深800-2,500mの海山
EEZ、公海上に大量分布
公海上に鉱区確保



マンガン団塊
水深5,000mの深海底
EEZ、公海上に大量分布
公海上に鉱区確保

コバルト、ニッケル、銅、マンガン
レアメタル、レアアース類



レアアース泥
水深5,000-6,000mの深海底
EEZ、公海上に大量分布
レアアース類(トリウムFree)

海洋基本法概要(2007年7月20日施行)

背景

- ◎ 食料、資源・エネルギーの確保や物資の輸送、地球環境の維持等、海が果たす役割の増大
- ◎ 海洋環境の汚染、水産資源の減少、海岸侵食の進行、重大海難事故の発生、海賊事件の頻発、海洋権益の確保に影響を及ぼしかねない事業の発生等、様々な海の問題の顕在化

海洋政策の新たな制度的枠組みの構築が必要

海洋基本法の成立(平成19年4月20日)、施行(同7月20日)

基本理念

- ① 海洋の開発及び利用と海洋環境の保全との調和
- ② 海洋の安全の確保
- ③ 科学的知見の充実
- ④ 海洋産業の健全な発展
- ⑤ 海洋の総合的管理
- ⑥ 国際的協調

基本的施策

- ① 海洋資源の開発及び利用の推進
- ② 海洋環境の保全等
- ③ 排他的経済水域等の開発等の推進
- ④ 海上輸送の確保
- ⑤ 海洋の安全の確保
- ⑥ 海洋調査の推進
- ⑦ 海洋科学技術に関する研究開発の推進等
- ⑧ 海洋産業の振興及び国際競争力の強化
- ⑨ 沿岸域の総合的管理
- ⑩ 離島の保全等
- ⑪ 国際的な連携の確保及び国際協力の推進
- ⑫ 海洋に関する国民の理解の増進等

海洋政策の推進体制

国 ○ 総合海洋政策本部の設置

(本部長：内閣総理大臣)

副本部長：内閣官房長官、海洋政策担当大臣)

○ 海洋基本計画の策定(平成20年3月)

(海洋に関する施策についての基本的な方針、海洋に関し、政府が総合的かつ計画的に講ずべき施策等を規定。おおむね5年ごとに見直し。)

地方公共団体

各区域の自然的社会的条件に応じた施策の策定、実施

事業者

基本理念に則った事業活動、国・地方公共団体への協力

国民

海洋の恵沢の認識、国・地方公共団体への協力



第1期海洋基本計画(2008年3月18日閣議決定)

計画

メタンハイドレートと海底熱水鉱床は10年程度で商業化実現

1. エネルギー・鉱物資源の計画的開発

「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画(仮称)」を策定し、同計画の下で排他的経済水域等に賦存する石油・天然ガス、メタンハイドレート、海底熱水鉱床の探査・開発を着実に推進。メタンハイドレート及び海底熱水鉱床について、今後10年程度を目途に商業化を目指す。(経済産業省 等)

国際的背景

- 資源価格の高騰に伴い、資源産出国において資源ナショナリズムが高揚。



我が国の対策

- 資源外交による資源産出国との関係強化に加えて、自らの安定的な資源供給源として排他的経済水域等においてエネルギー・鉱物資源の開発を推進することが重要。

課題

- 石油・天然ガス、大水深海域等における探査の広域展開。特に三次元物理探査船の十分な活用。
- メタンハイドレート：海洋産出試験段階への移行。
- 海底熱水鉱床：資源量・環境影響の調査。採鉱・金属回収技術の開発。
- 以上は民間企業のみでは実施困難であり、国の主導による本格的な探査・開発が必要。

明確な目標と綿密な計画の下で、着実に推進。

【目標】メタンハイドレート及び海底熱水鉱床について、今後10年程度を目途に商業化を実現。

- 目標達成に至るまでの探査・開発の道筋(ロードマップ)
- そのために必要な技術開発
- 国、研究機関及び民間企業が果たすべき役割分担 等

「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画(仮称)」の策定(平成20年度中)

10年程度で商業化が実現しなかった原因

分析

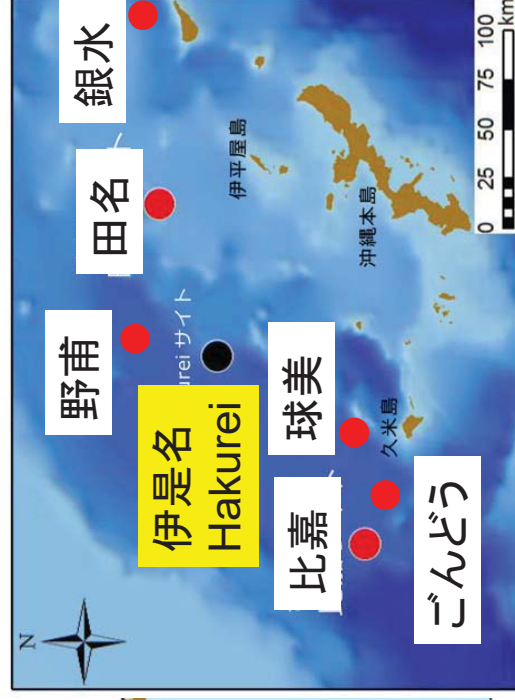
1. 主体となるコア(核)を作れなかった
2. 経済性成立の見通しを示せなかった
3. 「宝探し」という探査の無限ループに入り込んだ
ピラミッド型の資源であることを隠した
データが増えるほど金属含有率が低下
鉱量把握ボーリング結果は並みの金属含有率
4. 採鉱技術開発の要点を間違えた
「世界初の・・・」に縛られた
「経済性を成立させる技術開発」をしなかった
5. 硫化物からの重金属イオン溶出が起きた
6. 否定的な経済性評価結果を自ら示した

沖縄・奄美大島周辺の海底熱水鉱床発見

探査

- | | | |
|------------|-----------------------|---------------------|
| 2013年3月28日 | 沖縄海域 | Hakureiサイト |
| 2014年12月4日 | 沖縄本島北西沖 | 野甫(のほ)サイト |
| 2015年1月28日 | 沖縄県久米島沖 | ごんどうサイト |
| 2016年2月17日 | 沖縄海域 | 田名(だな)サイト・比嘉(ひが)サイト |
| 2016年5月26日 | 沖縄伊是名海穴の資源量を740万トンと確認 | |
| 2017年7月21日 | 久米島沖・沖永良部島沖 | 球美(くみ)サイト・銀水サイト |
| 2020年3月24日 | 奄美大島沖 | 天美(あまみ)サイト |

いずれも石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)ニュースリリース



宝探し(経済価値の高い鉱体の発見)は成功？
2020年3月24日ニュースリリース

探査

サイト名／試料	銅	鉛	亜鉛	金	銀		
	%	%	%	g／トン	g／トン		
天 美 サ イ ト	試料 1	3.36	12.40	15.60	17.70	2,820	
	試料 2	0.65	12.75	23.90	51.50	1,135	
	試料 3	1.59	9.17	16.30	59.60	27,514	
	試料 4	0.87	7.02	11.80	68.50	1,910	
	試料 5	2.69	21.76	29.30	22.80	888	
	試料 6	0.40	4.52	4.32	3.37	258	
	試料 7	1.07	9.90	13.35	3.78	23,729	
他 サ イ ト (沖 縄 海 域)	平均	1.52	11.07	16.37	32.5	8,322	
	球美サイト	4.70	7.60	6.00	2.90	842	
	銀水サイト	0.80	13.90	17.50	13.60	1,061	
	田名サイト	3.70	8.14	24.01	3.90	525	
	比嘉サイト	0.27	29.00	33.41	0.05	212	
	ごんどうサイト	13.00	5.20	12.30	1.70	326	
	野甫サイト	0.53	7.81	12.03	3.26	911	
	Hakurei サイト	0.33	2.52	7.25	2.63	216	
	銅換算品位(%)						120.8
							19.9
						30.5	
						21.8	
						21.9	
						23.0	
						18.6	
						7.35	

銅換算品位:異なる金属の含有率を価格補正計算して銅含有率で表示

分析対象試料の選択で金属含有率は高くなるというトリック

探査

2014年12月4日ニュースリリース
ごんどうサイト 選び出された6試料の品位分析結果

試料	銅(%)	鉛(%)	亜鉛(%)	金(g/t)	銀(g/t)
鉱石①	4.8	15.0	36.8	3.6	820.0
鉱石②	21.1	0.4	0.8	1.1	88.0
鉱石③	26.4	0.5	1.0	0.3	80.0
鉱石④	13.4	2.3	6.7	0.5	141.0
鉱石⑤	1.1	9.9	18.5	1.6	384.0
鉱石⑥	11.0	3.1	10.2	3.3	443.0
平均	13.0	5.2	12.3	1.7	326.0
銅換算品位: 23.0% (分析所: ALS Canada Ltd.)					
物質	比重量 (g/cm³)				
銅	8.96				
鉛	11.35				
亜鉛	7.13				
金	19.32				
銀	10.50				
鉄	7.87				
SiO₂	2.65				

2016年5月26日ニュースリリース
ごんどうサイト 9孔(延べ 380 m)のボーリング試料の品位分析結果

銅(%)	鉛(%)	亜鉛(%)	金(g/t)	銀(g/t)
3.38	2.39	6.39	0.97	62.6

銅換算品位: 7.39%

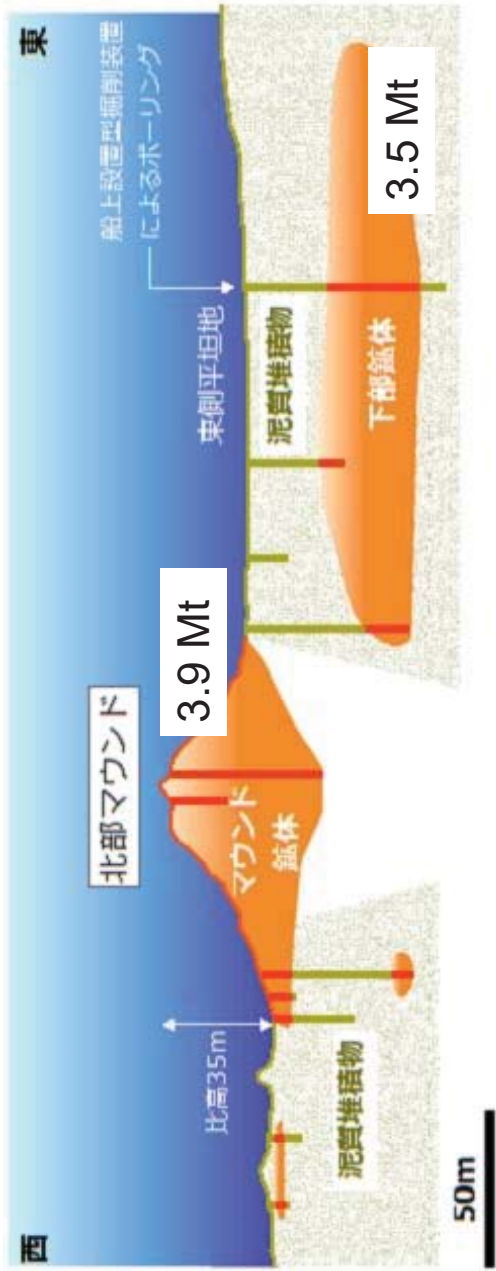
沖縄伊是名海穴の資源量を740万トンと確認

評価

2016年5月26日ニュースリリース

55孔(延べ2,712 m)のボーリング調査で、表層部マウンド鉍体の3.9 Mtと埋没下部鉍体 3.5 Mtを確認

銅換算品位:7.35%



沖縄伊是名海穴鉍体は開発対象にはならないと発表

2018年10月31日ニュースリリース



評価

世界で初めて海底熱水鉍床の連続揚鉍に成功しました～沖縄近海で海底熱水鉍床の探鉍・揚鉍パイロット試験を実施～

本件の概要

経済産業省及び(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)は、探鉍・集鉍試験し、水中ポンプで海水とともに連続的に洋上に揚げる世界初の探鉍・揚鉍パイロット試験の成功は、海洋鉍物資源開発に必要となる技術の確立に向け大きな一歩となります。調査結果を踏まえて、平成30年度に経済性評価を行います。



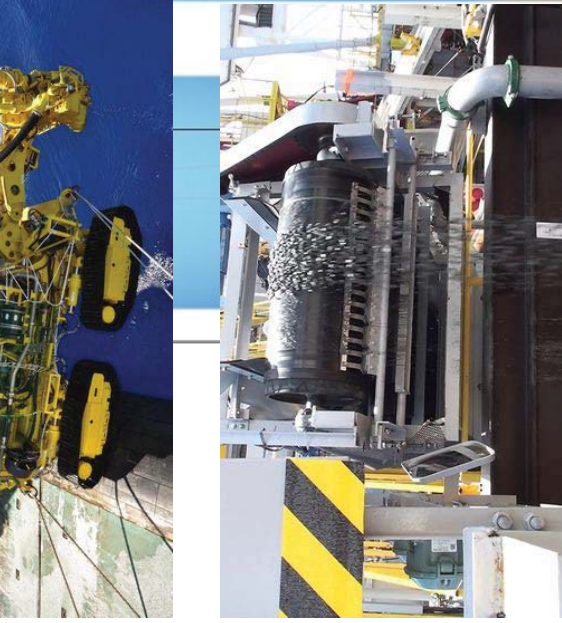
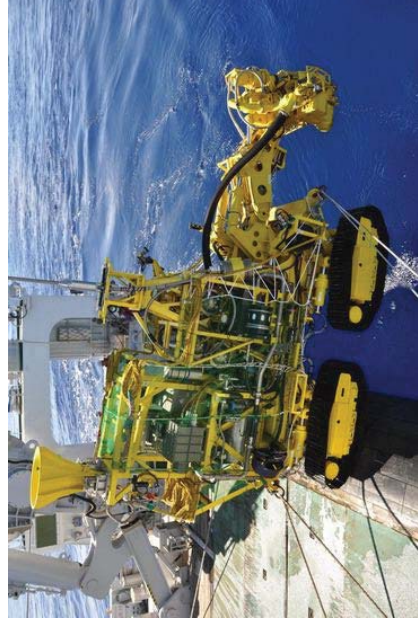
水深1600m「宝の山」採取に成功

「熱水鉍床」商業化へ一歩 経産省
貴金属などの資源を多く含む「熱水鉍床」は、単独で採掘するのではなく、海水と混ぜて揚げることで初めて成功した。日本近海では複数の熱水鉍床が確認されており、今後の成功は、資源の質を高め、世界の資源供給に貢献する一歩である。経産省は、今後、小笠原諸島など、日本近海で探鉍試験を行う。熱水鉍床は、単独で採掘するのではなく、海水と混ぜて揚げることで初めて成功した。日本近海では複数の熱水鉍床が確認されており、今後の成功は、資源の質を高め、世界の資源供給に貢献する一歩である。経産省は、今後、小笠原諸島など、日本近海で探鉍試験を行う。

2017年9月26日プレスリリース 世界初の海底熱水鉍床の 探鉍・揚鉍パイロット試験 に成功(水深1,600m)

海底熱水鉱床採鉱・揚鉱試験状況

評価



<http://www.meti.go.jp/press/2017/09/20170926001/20170926001.html>

「世界初の……試験」の意味？

評価

- ・5,000mからのマンガン団塊揚鉱は35～40年前
- ・先行するノーチラス社がPNGの内海条件の場所において稼働させようとした採鉱システムと同様のシステムなので、外洋域では長期間使えない
- ・採鉱能力がPNGの1/50以下、揚鉱総量がPNGの1日当たりの1/300でミニチュア過ぎる
- ・経済性を度外視(16.4トン揚鉱、うち銅換算品位7～8%の実鉱石は4トンのみ、百数十億円を投入)
- ・**鉱石揚鉱に伴って船上に上がってきた海水に重金属イオンが溶出したため排出できず、タンカーで持ち帰って処理。生産システム化の見通し立たず**

経済価値のより高い銅や金・銀を多く含む鉱床を開発対象とし、コスト改善や金属価格の上昇が達成されるケースでは、**(海底熱水鉱床開発は)**十分なIRR(内部収益率: Internal Rate of Return)が確保され、経済性を見出しうる

海底熱水鉱床開発総合評価結果

<http://www.meti.go.jp/press/2018/10/20181031002/20181031002.html>

次の3つの仮定をすべて満足する必要がある。

1. 30%経済価値の高い鉱石 銅換算品位: $7.35\% \times 1.3 = 9.6\%$
2. コスト(費用)を10%削減
3. 金属価格が20%上昇

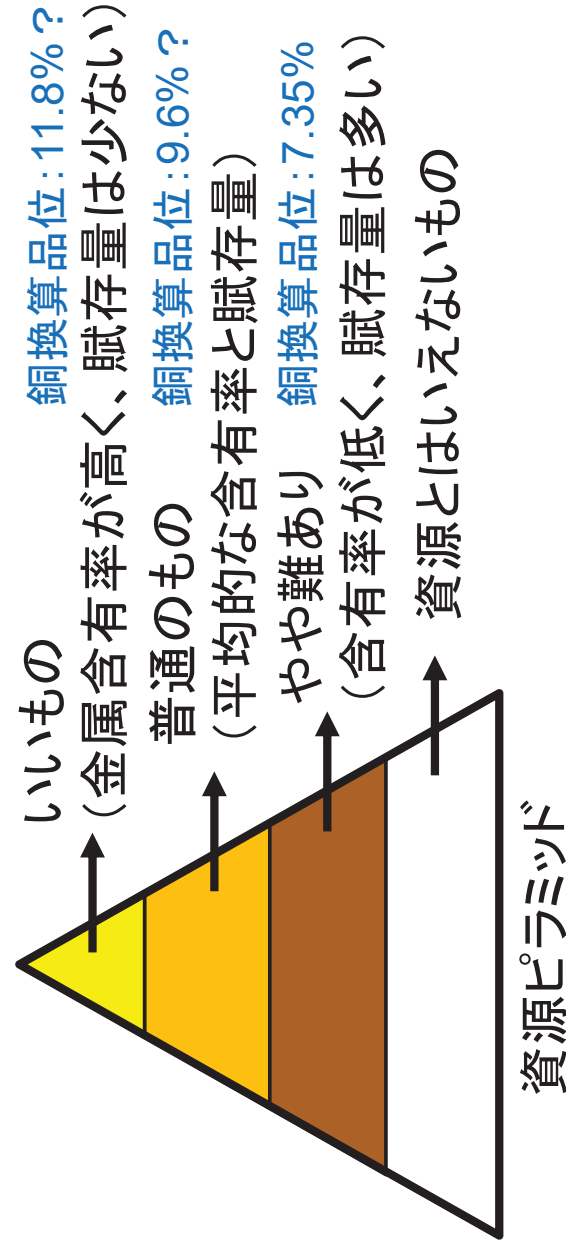
↑ 伊是名海穴のHakurei サイトで発見した740万トンの海底熱水鉱床鉱体は開発対象にはならない

銅換算品位: $7.35\% \times (1 + 0.3 + 0.1 + 0.2) = 11.8\%$

海底熱水鉱床の探査は「宝探し」

探査

海底熱水鉱床は「資源ピラミッド」分布の資源なので、「いいもの」を見つける探査の無限ループに陥る可能性



「宝探し」に成功しても、賦存量が少ないため、資源量確保を目指して、更なる探査に熱中することになる

「……場合には経済性を見出している」

- ①30%経済価値の高い鉱石
- ②コスト(費用)を10%削減
- ③金属価格が20%上昇

揚鉱水処理費用
が増加すること
は全く考慮せず

満足しなければならぬ3つの条件に、品位や価格という、他力本願のものを2つも含むということは、技術開発の可能性を否定するだけでなく、開発の可能性そのものを否定しているといえる

「経済性を成立させる技術開発」をクローズアップし、方向性を示さなければ、未来に繋がらない。

「経済性を成立させる技術開発」とは？

経済性を成立させる技術(方法)

技術

- ・銅換算品位60%増(11.8%)の海底熱水鉱床鉱体を発見する
- ・コスト(費用)を60%削減する



- ・一千万トン超の賦存量の発見はほぼ無理
- ・船がコストの約半分のため海洋では無理

2つの技術革新を組み合わせて成立させる

- ・鉱石の海底選別(30%分)＋機械式揚鉱(30%分)

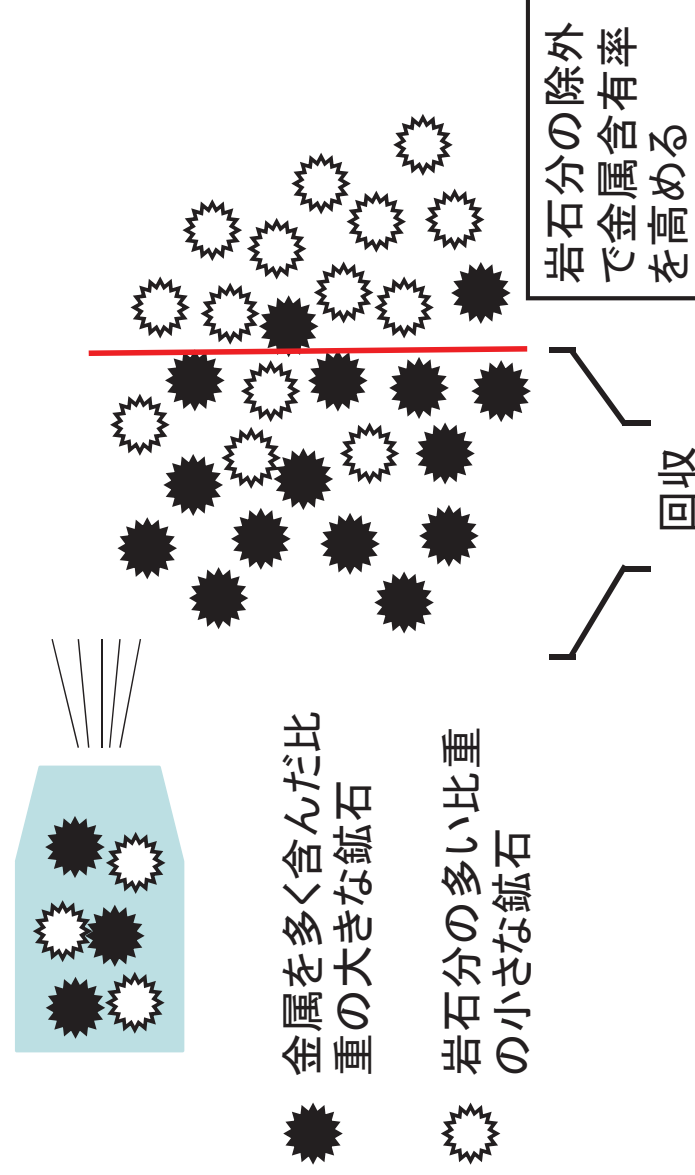
2つ一緒の開発と技術革新で成立させる

- ・マンガン団塊とレアアース泥の南鳥島EEZにおける複合開発＋パルプリフト
- ・コバルトリッチクラストと基盤岩リン鉱石の複合開発＋機械式揚鉱

海底熱水鉱床開発の経済性確保のため には輸入精鉱と同レベルの金属含有率が必要

- ・日本の稼働中の非鉄金属製錬所は、海外から**精鉱**(concentrate)を輸入し、銅、亜鉛、鉛を生産
- ・金属含有率0.5~5%の採掘原鉱石に、物理・化学的**選鉱**を行い、製錬原料として直接使用できる程度に品位を高め、**精鉱**とする。**選鉱**後の残留物である土、岩石等は原鉱石生産国に置いてくる
- ・日本で使われる**精鉱**の金属含有率は、**銅精鉱** **15~25%**、**鉛精鉱**50~60%、**亜鉛精鉱**35~50%等
- ・**選鉱**後の残留物には化学薬品等が含まれ、日本では処理費用が高額となり、選鉱は非現実的

鉱石スラリーの水平噴出による海底熱水 鉱床鉱石の海底一次選別



機械式揚鉦の採用

技術

流体ドレッシング方式

採掘した鉦石を揚鉦管でスラリー流送する

- ・ 揚鉦管に水中ポンプを吊り下げるため、集中荷重がかかる
- ・ 金属疲労、摩耗、電蝕等のため耐用年数が短い
- ・ 不要物となる海水にもエネルギーを消費

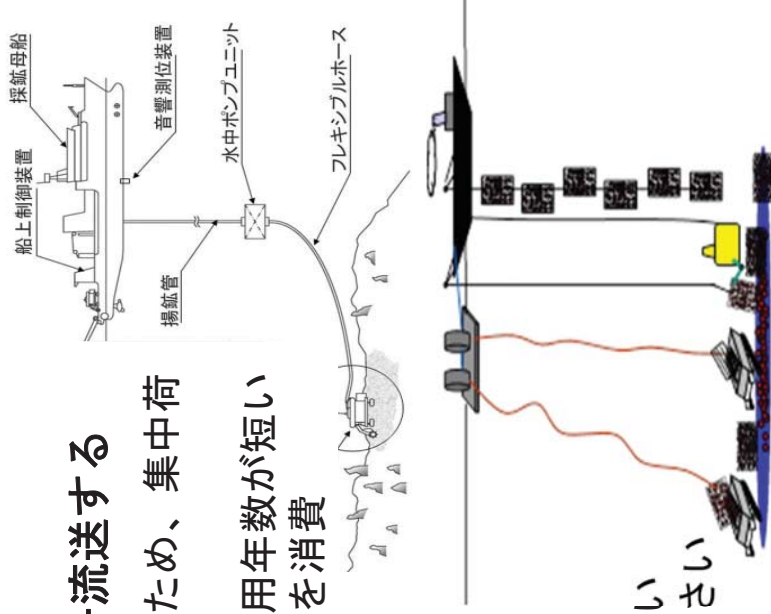


機械式揚鉦

鉦石をメッシュバグに入れて、ダイニーマ®ロープで引き上げる

- ・ 揚鉦排水がないため環境影響小さい
- ・ 耐用年数が長く、運用コストが小さい

関西設計（株）、東京製綱繊維ロープ（株）、ダイハツディーゼル（株）等の協力を得て概念設計



奥原孝平、中谷直樹、新井昴、山崎哲生 (2018) 海底熱水鉦床開発における機械式揚鉦システム適用の検討, 第27回海洋工学シンポジウム論文集, OES27-037.

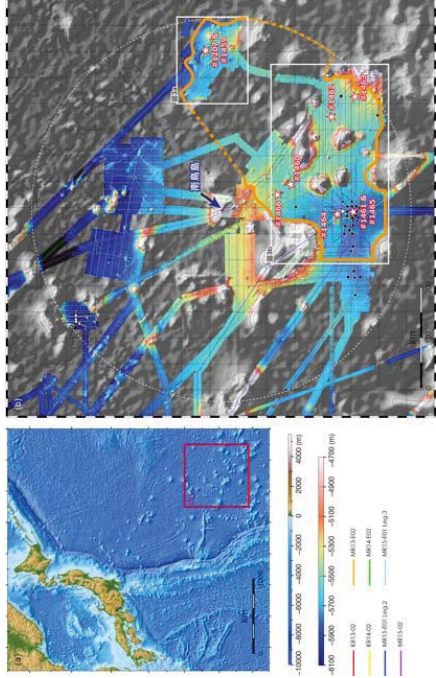
揚鉦水の処理は経済性のマイナス要因

- ・ 石油の場合は0~20%程度混入するガス、水、砂を分離し、再圧入等を実施。技術確立、量が少ない、コスト小
- ・ 酸化環境下では、硫化物鉦石からは重金属イオンが揚鉦水に溶出。粉碎され、接触表面積が増えるほど、溶出量は増加。酸化物鉦石は溶出なし
- ・ 重金属イオンを含んだ揚鉦水の直接放出は不可。海上で無害化処理・放出は高コスト
- ・ 揚鉦水のリユース、機械式揚鉦が解決方法の候補だが、リユースにはループライザーが必要

技術

技術

海洋研究開発機構(JAMSTEC)プレスリリース
2016年8月26日「南鳥島沖の排他的経済水域内の
深海底に広大なマンガンノジュール密集域を発見」
・レアース泥と分布域が**広範囲で重複**



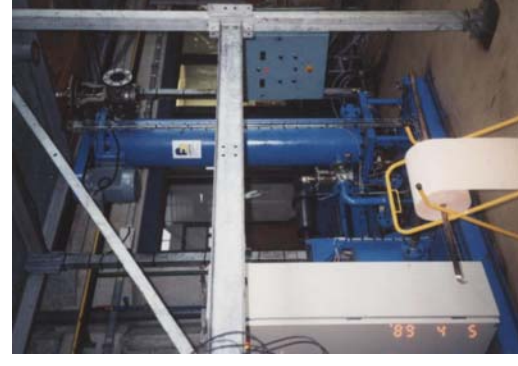
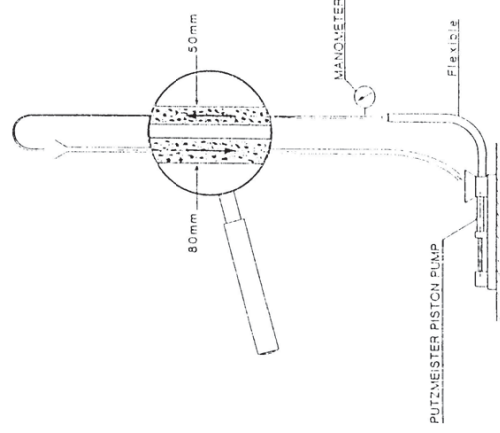
http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20160826/

マンガン団塊とレアース泥が共存する場合
では**複合開発**による採取コスト減の可能性

粉碎マンガン団塊と堆積物の高濃度
パルプリフトによる流体抵抗の劇的削減

フランスが1980年代に実施したPulp-lift Experiment

- ・破碎団塊と堆積物の混合によって、**体積濃度55-60%**での揚鉱可能
- ・ピストンポンプ使用
- ・揚鉱管径半減

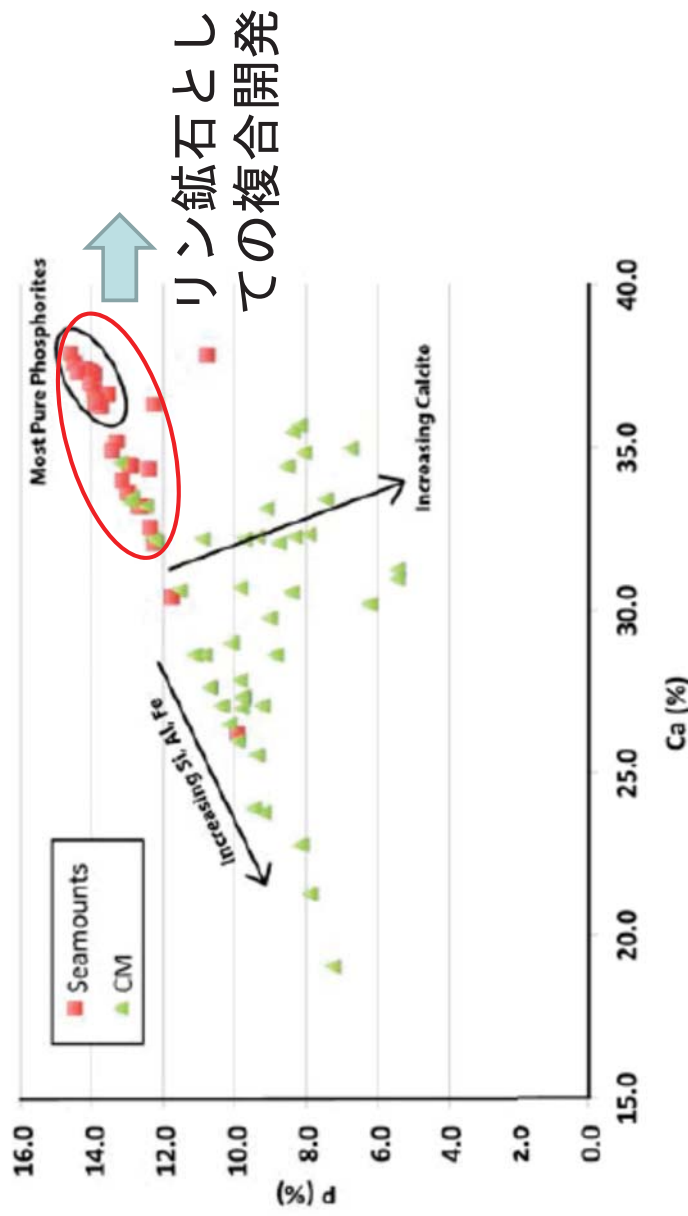


Bernard, J., Bath, A. R., Greger, B. (1987). Analysis and comparison of nodule hydraulic transport systems, Proc. 9th Offshore Tech. Conf., Paper No. 5476.

マンガン団塊とレアース泥の複合揚鉱アイデア

コバルトリッチクラストの基盤岩の石灰質岩石
は陸上リン鉱石と同等のリン含有率(12~15%)

技術



Hein, J. R., Koschinsky, A., Mikesell, M., Mizell, K., Glenn, C. R., and Wood, R. (2016). Marine Phosphorites as Potential Resources for Heavy Rare Earth Elements and Yttrium, Minerals, 6, 88.

要点(私見)

- ・海底鉱物資源の経済的開発可能性評価を、早期から、適宜実施し、経済性改善のキープポイントを見極めることが必要
- ・「宝探し」(探査)の限界を周知し、過度な期待を抱かないことが必要
- ・「経済性を成立させる技術(方法)」を見極め、開発に取り組むことが必要
- ・マンガン団塊とコバルトリッチクラストからのマンガン回収の可能性を考慮した、海底鉱物資源の経済的開発可能性評価を早急に実施し、探査、技術開発の優先順位を見極めることが必要

ご清聴ありがとうございました



日本が1997年に水深2,200mの海山で使用したマンガン団塊集鉱実験機