

# 日本の海洋鉱物資源開発の可能性と期待

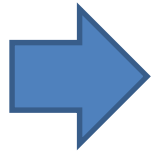
全部個人  
の見解です

大阪公立大学 大学院工学研究科  
山崎哲生

1. **流体ドレッジ**方式は環境面、経済面で**NG**  
環境影響低減のために揚鉱水は深層放出  
ゼロエミッションのためのループ式ライザー
2. インフラ既存の**海底熱水鉱床**開発への**期待**  
海底鉱石選別と機械式揚鉱の導入
3. インフラ未整備のGX対応**複合開発**の**可能性**  
南鳥島EEZのレアアース泥とマンガン団塊の共存  
パルプリフトによるレアアースとコバルトの獲得
4. **モラトリアム** (Stop Deep Seabed Mining) 対応

## 2019年Nautilus社破綻と2017年日本の採鉱・揚鉱実験結果は海底熱水鉱床開発に負のインパクト

- ・Nautilus社のSolwara 1鉱区（水深1,600m、銅含有率7%）は、経済価値は伊是名海穴より35%も高い鉱床であったが、**確定鉱量が少なく、「良いものは少ない」という資源ピラミッド**を実感させた。
- ・日本の海底熱水鉱床採鉱・揚鉱実験において、**揚鉱水の重金属イオン濃度が排出基準超え**という大きなコストアップ要因があることを認識させた。
- ・2018年の日本の海底熱水鉱床開発経済性評価結果は、「経済性を見出しうる」可能性があることより、可能性はあまりないことを認識させた。

 海底熱水鉱床開発の可能性は小さい、あるいは、困難  
ということを知らせ、当面の開発を指向する国や企業  
は無くなった。

# 世界はマンガン団塊の集鉱・揚鉱実験へ

海底熱水鉱床とコバルトリッチクラストは、探査活動しか実施されていないが、マンガン団塊については、2021年にベルギー、ドイツ、インドが水深4500～5000mの鉱区内で集鉱実験に成功。中国は南シナ海の水深1300mでの集鉱・揚鉱実験に成功。2022年にナウルが、2024年にベルギー、インドが鉱区内での集鉱・揚鉱実験を計画



2021年  
ベルギーの  
実海域実験  
用集鉱機



<https://gsr.a.fanaticdev.co.uk/#what>

## 2021年中国の浅海実験用集鉱機

Kang, Y. Liu, S. *Minerals* **2021**, *11*, 1132.  
<https://doi.org/10.3390/min11101132>

## 2022年ナウルの浅海実験用集鉱機

<https://investors.metals.co/news-releases/news-release-details/metals-company-and-allseas-announce-successful-deep-water-test>





モラトリアムの動き

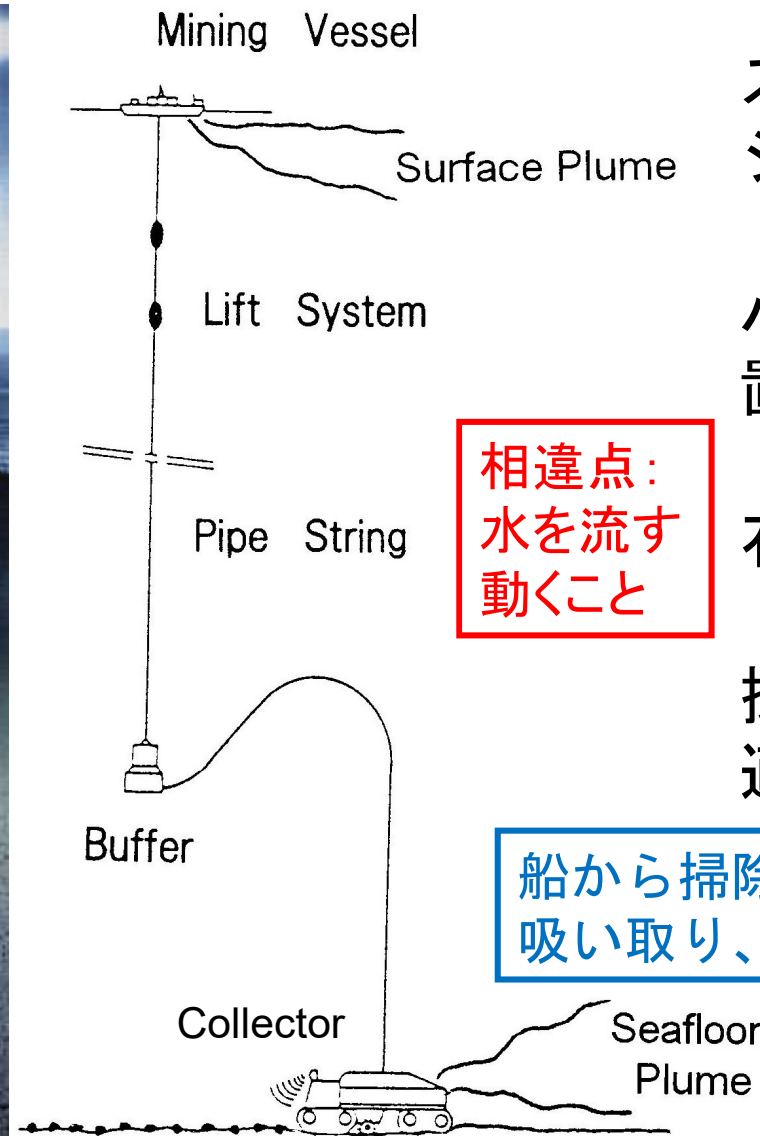
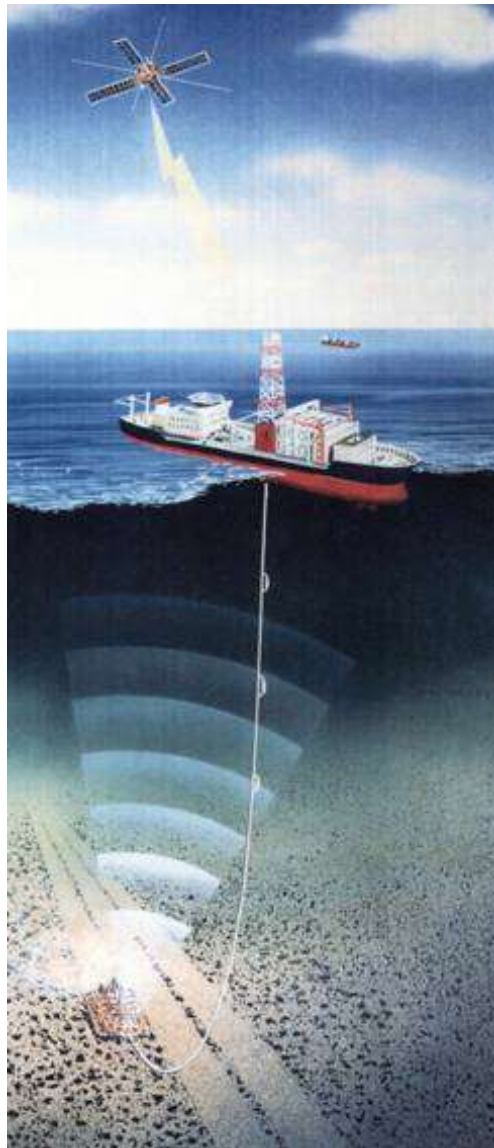
# STOP DEEP SEABED MINING

BEFORE THE INDUSTRY  
WIPES OUT PARTS OF  
THE PLANET WE KNOW  
VERY LITTLE ABOUT.



# 海洋鉱物資源の採取方法

流体ドレージNG



相違点:  
水を流す  
動くこと

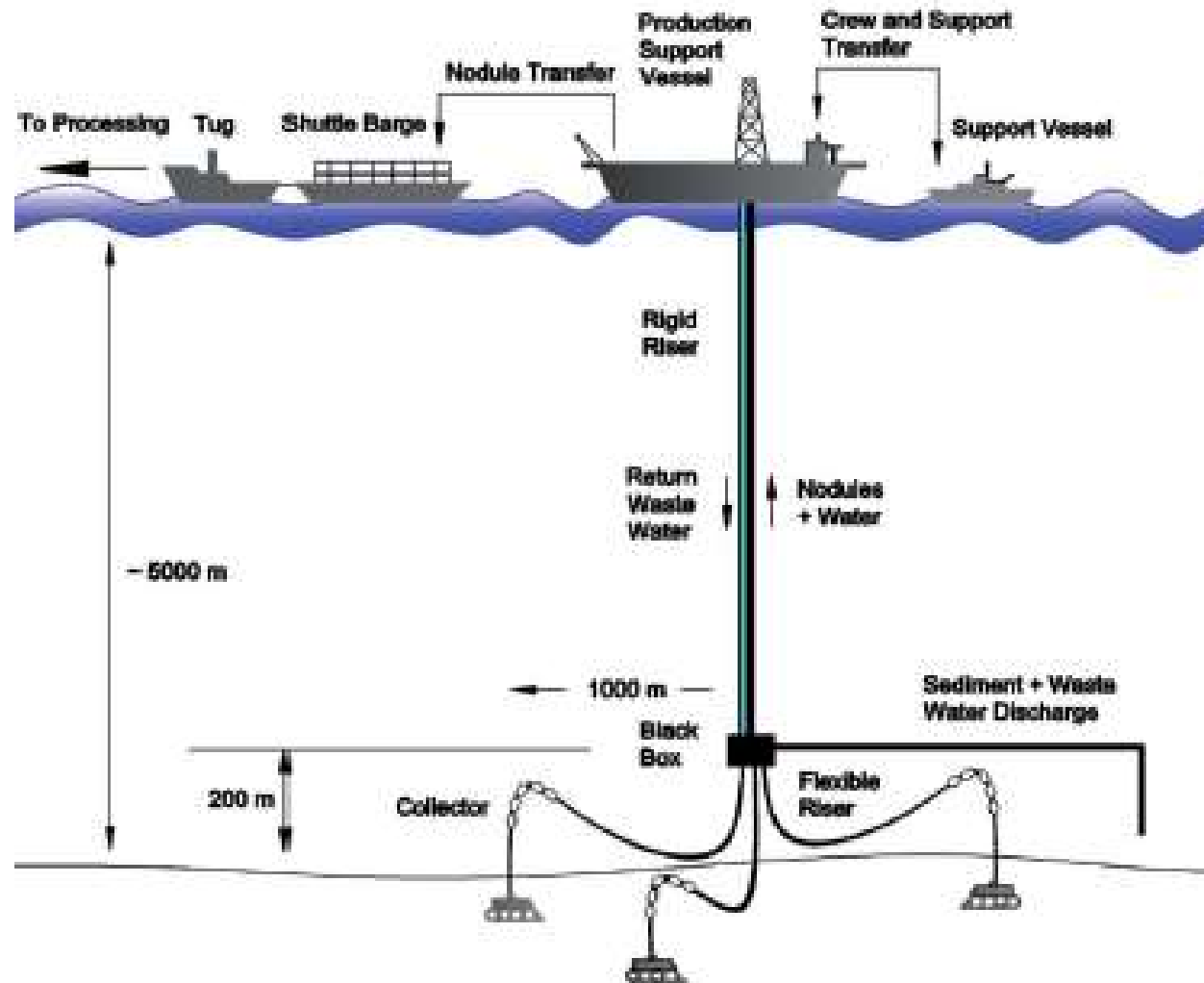
船から掃除機を降ろして、鉱石を  
吸い取り、パイプ内水流で揚げる

- ・ 海洋石油・天然ガスの採取方法類似のシステムを想定
- ・ 採鉱船、ライザーパイプ、水流発生装置、採取装置で構成
- ・ パイプ内水流で鉱石を船まで輸送
- ・ 海底ダイヤモンド採掘（水深200m）で適用中

Mero, J. L.: *The mineral resources of the sea*, Elsevier: Oceanography Series, 1, Amsterdam, Netherland, 1965, 312p.で原案提示

流体ドレージ曳航式 流体ドレージ自走式

# 最近のマンガン団塊採鉱システムは 複数集鉱機と**深層排水**イメージ図が主流



- ・揚鉱水の戻し管と戻しポンプが必要
- ・パイプ系の重量と移動時の流体抵抗増大
- ・デリックの動揺補償機能の強化必要
- ・戻し水の温度と溶存酸素の生態系影響は未知
- ・経済性？

Agarwal, B. et al., (2012). Feasibility Study on Manganese Nodules Recovery in the Clarion-Clipperton Zone, LRET Collegium 2012 Series Vo. 2, Univ. of Southampton, UK.

# Technipの提唱したゼロエミッション

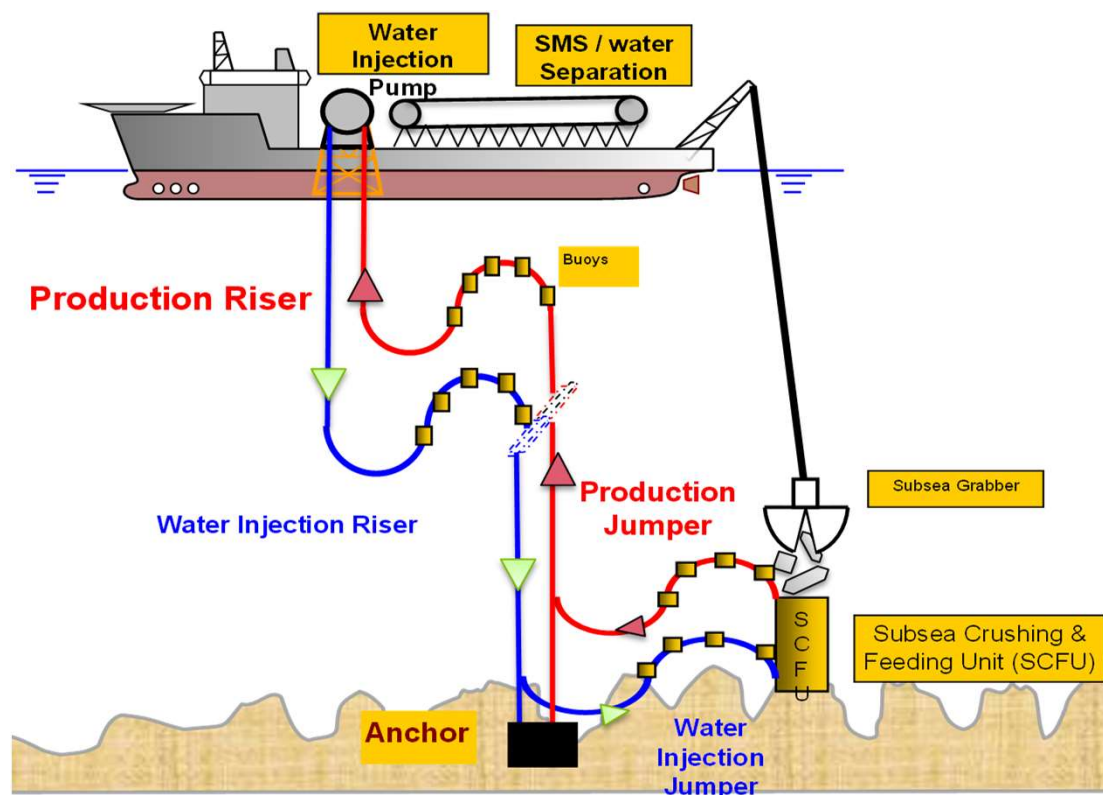
流体ドレージNG

## 外洋域海底熱水鉱床採鉱システム

フレキシブルライザーの**定点設置** (Self-standing Flexible Riser)

揚鉱用容積式ポンプを海底に設置

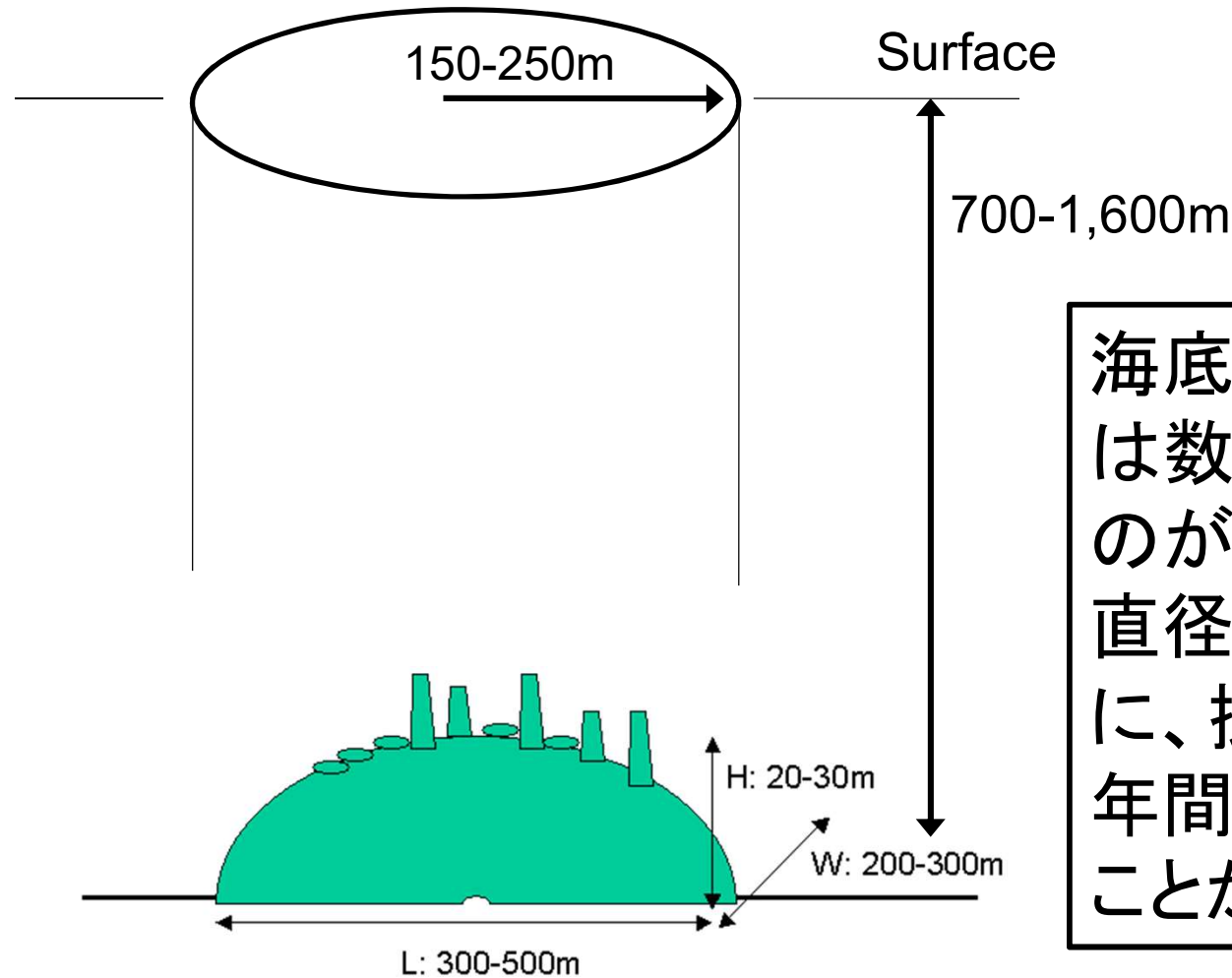
揚鉱水をフィルタリング後、加圧してデュアルライザーで海底へ  
これを揚鉱用ポンプに動力兼揚鉱水として供給



・ゼロエミッション、定点設置、容積式ポンプなど、技術的工夫は秀逸

・セルフスタンディングデュアルライザーや容積式ポンプは高額であり、定点保持期間が長く、品位の高い鉱体でないと経済性は見込めない 7

# 数年間には動かなくて良い海底熱水鉱床：流体ドレージNG 鉱体分布の空間スケール



海底熱水鉱床の鉱体は数百万トン規模のものが発見されており、直径数100mの範囲内に、採鉱システムが数年間留まって稼働することが予想される。



# 揚鉱(回収)物の価格比較

## 原油採掘

原油 = 100%

原油価格 = \$80/bbl

1bbl = 約0.16m<sup>3</sup>

回収物1トンあたり価格 =  $80/0.16/0.83 = \$600/t$

管内流速を考慮すると: 1~2m/s (原油は低速)

**\$600~1,200/t**

**銅換算品位が2倍になると\$1,200/t**

## 鉱石揚鉱

海底熱水鉱床鉱石体積濃度 = 10%, 海水 = 90%

揚鉱物中の鉱石重量濃度 = 25%, 海水 = 75%

揚鉱鉱石の銅換算品位 = 7% **➡ 14%**

銅価格 = \$7,000/t

揚鉱物1トンあたり価格 =  $7000 \times 0.07 \times 0.25 = \$120/t$

管内流速を考慮すると: 5m/s (揚鉱は高速)

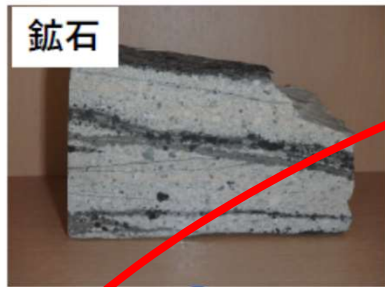
単位時間あたり価格は5倍になる (\$600/t)

**\$600/t**

# 海底熱水鉱床鉱石処理インフラ完備： 日本における銅資源の利用の流れ

海底熱水鉱床期待

チリ、ペルー、アメリカ、オーストラリア等が生産国  
現地で、硫化鉱の金属含有率を1%以下から30%程度に高  
め精鉱として輸入する。岩石分は現地で廃棄する



鉱石

・銅含有量：1%前後



精鉱

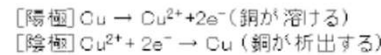
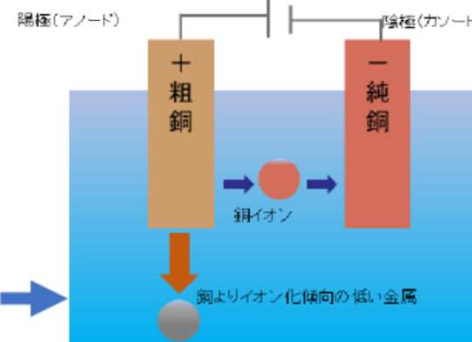
・銅含有量：30%前後

国内にインフラ完備  
炉を用いて精鉱を融解し、液状化した銅を金属含有率99%にして取り出す。  
鉄シリカ分のスラグは骨材等として売却

溶錬



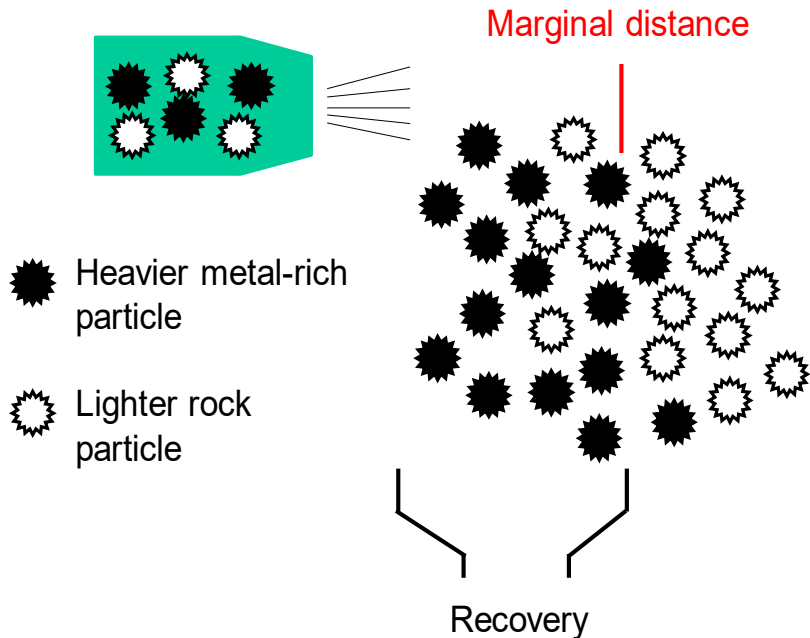
電解精製の原理



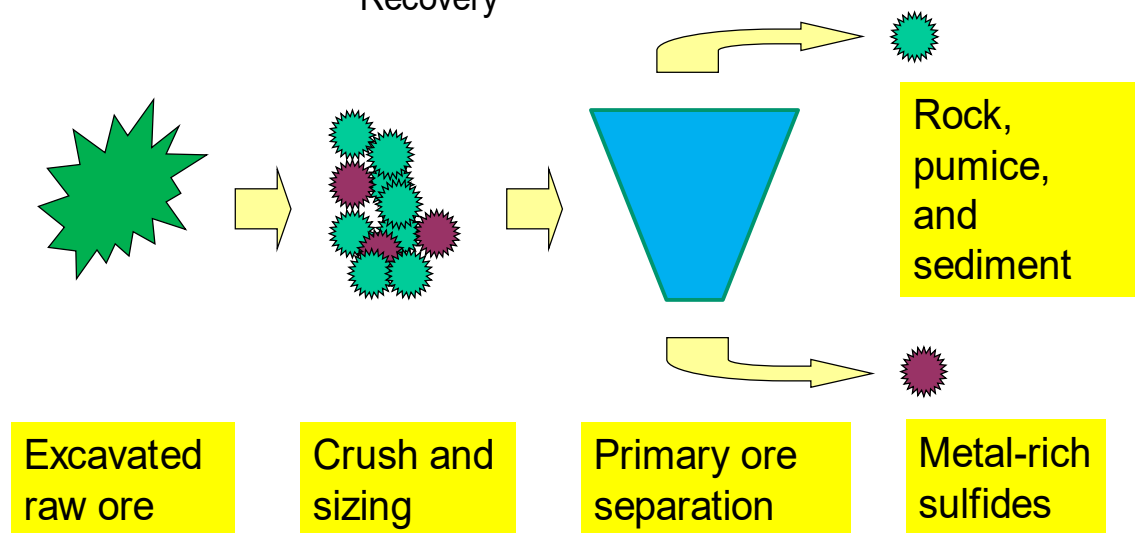
電気銅  
(銅地金、カソード)  
・銅含有量：99.99%

# インフラ活用に必要なこと(その1):

## 海底選別工程導入による鉱石の人為的高品位化

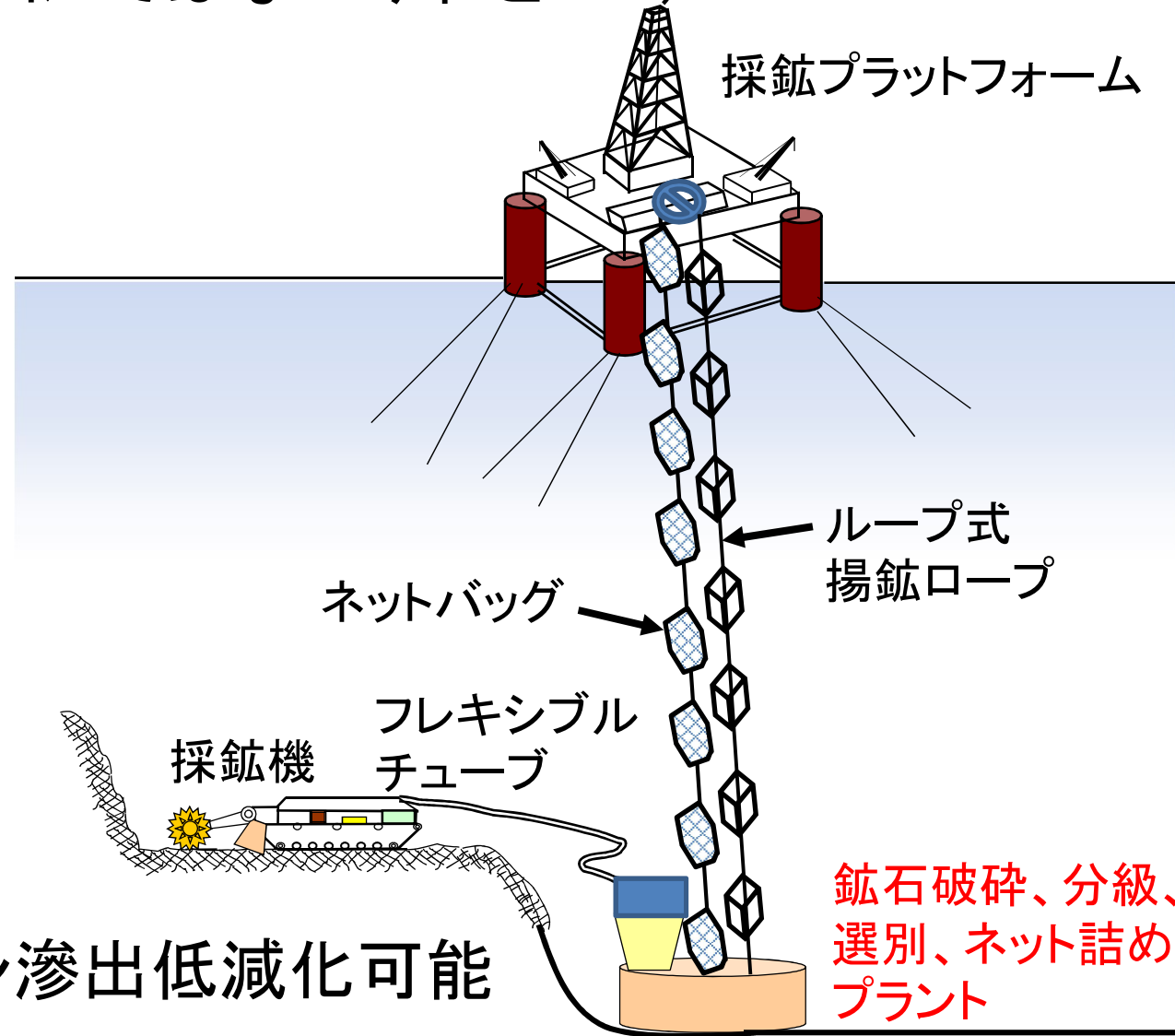


海底選別工程は、海底で採鉱した鉱石を海底プラントで粉砕、分級した後、比重差を用いた物理的選別によって、金属含有率が高く比重の大きな鉱石と、金属含有率が低く比重の小さな脈石を分離し、鉱石のみを回収する工程である。



物質	比重量 (g/cm <sup>3</sup> )
銅	8.96
鉛	11.35
亜鉛	7.13
金	19.32
銀	10.50
鉄	7.87
SiO <sub>2</sub>	2.65

# インフラ活用に必要なこと(その2): 機械式揚鉱による海底熱水鉱床採鉱モデル (ゼロエミッションではないけれど...)



重金属イオン滲出低減化可能

# 海底熱水鉱床開発の経済性評価： 流体ドレージと機械式揚鉱の比較（海底選別は実施）

海底熱水鉱床期待

サブシステム		年間鉱石フロー (千トン)	設備建造費用 (百万ドル)		年間操業費用 (百万ドル)	
			流体ドレージ	機械式	流体ドレージ	機械式
採鉱	採掘	1,260 (湿潤量)	666	682	144	88
	揚鉱	946 (湿潤量)				
輸送		804 (乾燥量)	197		59	
選鉱		804 (乾燥量)	36		73	
合計			899	915	276	220

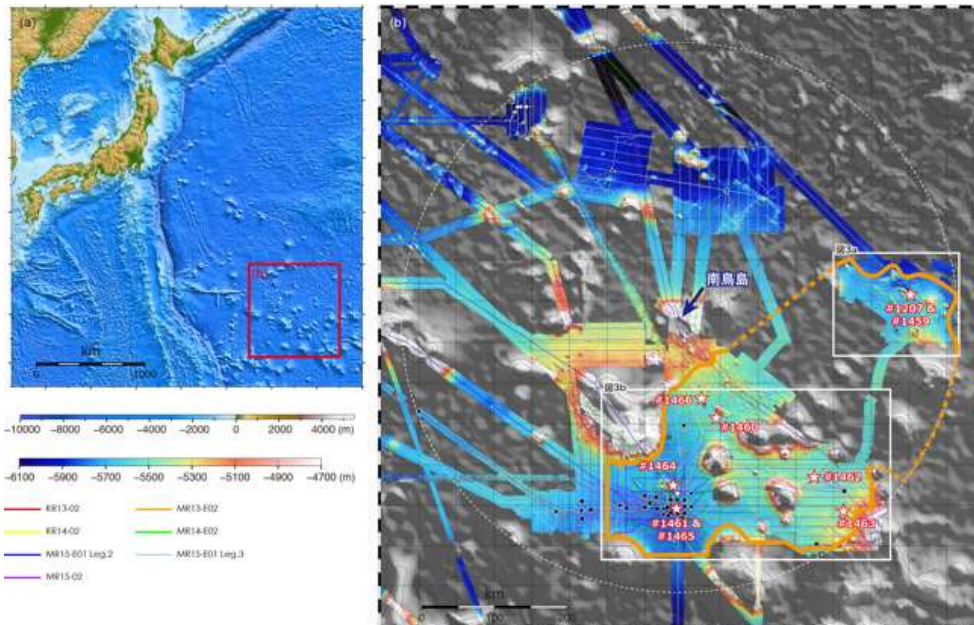
## 評価結果 流体ドレージはNG、機械式には経済性あり

流体ドレージ			機械式		
NPV (百万ドル)	IRR (%)	PP (年)	NPV (百万ドル)	IRR (%)	PP (年)
-348	-13	NA	41	6.3	14.6

NPV: Net Present Value (正味現在価値)  
 IRR: Internal Rate of Return (内部収益率)  
 PP: Payback Period (投資回収期間)

# 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



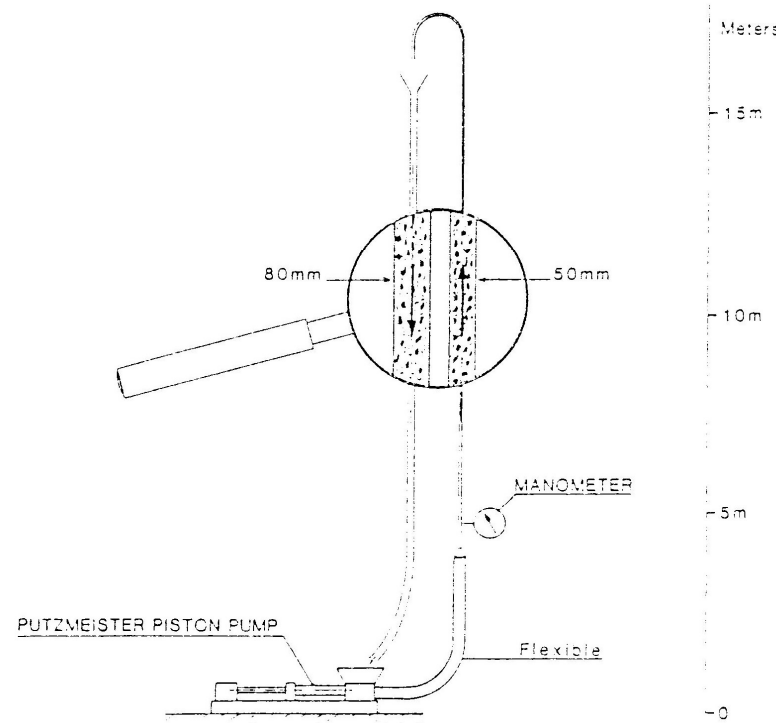
[http://www.jamstec.go.jp/j/about/press\\_release/20160826/](http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20160826/)

マンガン団塊とレアアース泥が共存する場所では  
パルプリフトによる複合開発の可能性

# 粉碎マンガン団塊と深海底堆積物の パルプリフトによる高濃度大量輸送

フランスが1980年代に先駆的に実施した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. et al. (1987). Analysis and comparison of nodule hydraulic transport systems, Proc. 9th Offshore Tech. Conf., Paper No. 5476.

深海底堆積物が無価値であったこと、廃棄物処理・利用が可能な場所を見出せなかったため、パルプリフト方式は断念したと推察される

**五洋建設(株)と大阪公立大学の共同研究において、フランスと同様のパルプリフト室内実験を実施中**

# 経済性評価で用いた複合開発モデル

複合開発可能性

1日あたり揚鉱量	レアアース泥: 6,000t (乾燥量) マンガング塊: 3,000t (乾燥量)
年間操業日数	300日
年間揚鉱量	レアアース泥: 180万t (乾燥量) マンガング塊: 90万t (乾燥量)
輸送距離	2,000 km
浸出・抽出・製錬	レアアース泥: 酸浸出および溶媒抽出 マンガング塊: 熔錬硫化塩素浸出法
廃棄物処理	レアアース泥残渣はブロック化無償譲渡 マンガング塊残渣は骨材売却
開発期間	20年

注1) 国内需要規模と元素含有率からレアアース泥 6,000 t/d を生産規模に設定

注2) 開発期間には3年間の建造期間と1年間の試運転期間(生産量50%)を含む



# レアアース元素および金属含有率と収益

Element	Concentration (ppm)
Ce	177.9
La	154.0
Pr	46.2
Nd	192.6
Sm	44.9
Eu	11.1
Gd	49.0
Tb	7.3
Dy	45.4
Y	277.2

レアアース泥からの収益 21%

0~4m: 0 ppm  
4~5m: 5,350 ppm

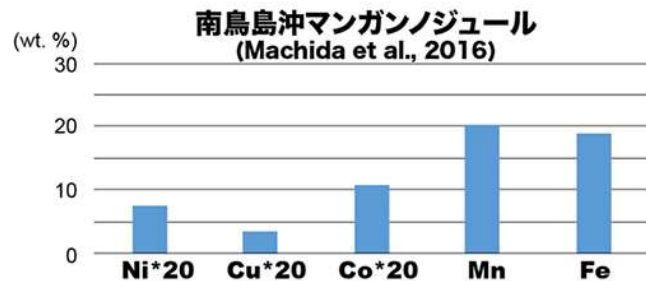
阿部和彦他：レアアース泥の開発技術と経済性評価, 第23回海洋工学シンポジウム論文集, OES-089, 2012.

Metal	Concentration (%)
Ni	0.4
Cu	0.2
Co	0.5
Mn	20.0

マンガン団塊からの収益 79%

Element and metal	Price(\$/t)	Yearly revenue(M\$)
Ce	15,000	1.2
La	15,000	3.8
Pr	125,833	9.6
Nd	83,333	26.6
Sm	35,000	2.6
Eu	1,500,000	27.6
Gd	100,000	8.1
Tb	1,033,333	12.5
Dy	508,333	38.2
Y	56,666	26.0
Ni	16,121	51.8
Cu	6,678	11.3
Co	34,698	155.6
Mn	2,463	354.7
Total		729.6

上記に加えて製錬スラグ収益が 50M\$/year



複合開発でレアアース泥単独より収益5倍に

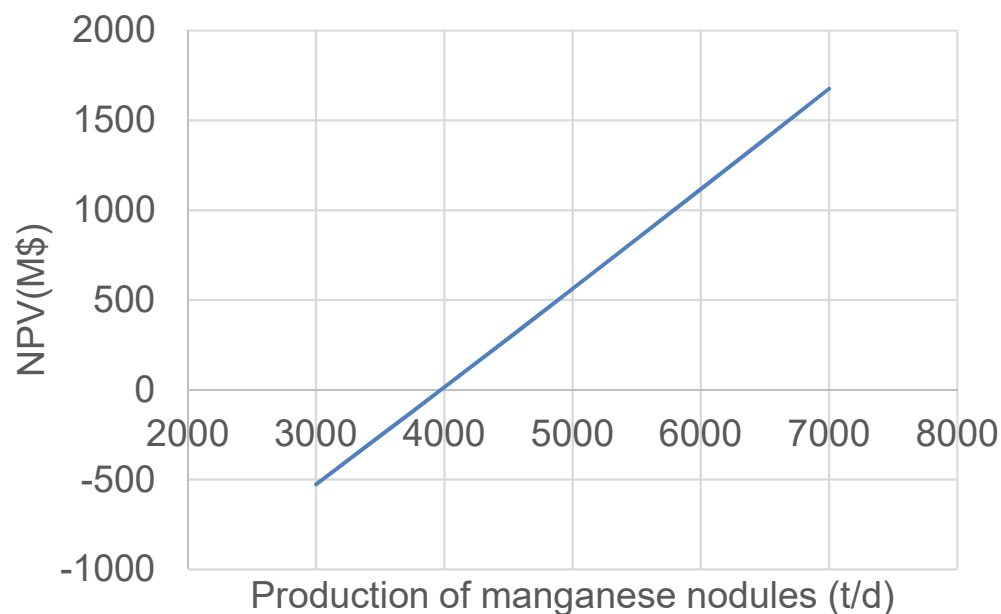
# パルプリフトの経済性評価結果

複合開発可能性

NPV(M\$)	IRR(%)	Payback period(year)
-526.7	3.66	15

ぎりぎり  
経済性はない  
という状態

マンガン団塊回収量を増加させる(レアアース泥は 6,000t/dで固定)



NPV>0となる  
マンガン団塊回収量は  
約3,950t/d

NPV (Net Present Value)  
正味現在価値が0(ゼロ)とは  
収支均衡を意味する

レアアース泥:マンガン団塊=1:1 の場合

NPV(M\$)	IRR(%)	Payback period(year)
1,117	17.2	9

# レアアース泥とマンガン団塊の 複合開発の経済性の鍵は廃棄物処理

経済性の検討においては、下記のような廃棄物処理を仮定した。

- ①レアアース抽出後の不要泥は中和処理後にセメントを加え、固めてブロックを作り、沿岸域の基礎生産性向上を図るための人工海底山脈構築に用いることを想定し、中和処理とブロック製造コストを計上した上で、引き取り手に対して無償譲渡する。
- ②製錬工程から出る鉄と二酸化ケイ素（ $\text{SiO}_2$ ）を主成分とするスラグは、コンクリート用骨材として、\$100/tで売却する。

ブロックが売れば、収益増で経済性改善

# 「Stop Deep Seabed Mining」の動き

モラトリアム

海洋環境の保全に必要な基礎情報や、開発行為によるダメージからの回復のモニタリングデータが不十分な状況で、国際海底機構（ISA: International Seabed Authority）がマンガン団塊の操業規則を制定し、開発を先導するのは時期尚早であるとする環境保護グループは、最低10年間のモラトリアム期間（開発に向けた活動の休止期間）を設けることを提案している。

国際自然保護連合（IUCN: International Union for Conservation of Nature）や世界自然保護基金（WWF: World Wide Fund for nature）が先頭に立って提案しているため、賛同する国際的企業が増えている。



PROTECTING THE SEABED  
BEFORE IT'S TOO LATE

[https://wwfint.awsassets.panda.org/downloads/factsheet\\_wwf\\_ocean\\_no\\_deep\\_seabed\\_mining\\_full\\_page.pdf](https://wwfint.awsassets.panda.org/downloads/factsheet_wwf_ocean_no_deep_seabed_mining_full_page.pdf)

BMW, Google, Samsung, Volkswagen, Volvo, Microsoft等



# STOP DEEP SEABED MINING

BEFORE THE INDUSTRY WIPES OUT PARTS OF THE PLANET WE KNOW VERY LITTLE ABOUT.



# 日本の持つ海洋鉱物資源の有利さ

- ・排他的経済水域 (EEZ) 及び大陸棚に大量に賦存
- ・金属含有率が陸上資源の5~10倍
- ・複数の有用金属の同時回収が可能
- ・銅、ニッケル、コバルト、レアアース、金、銀、マンガン等が対象
- ・国内完結型かつ廃棄物利用を含む環境負荷低減型開発システムの構築が可能

## 鍵となるのは

- ・海底鉱石選別、機械式揚鉱、パルプリフトの実現
- ・鉄マンガン酸化物の製錬システム構築と廃棄物利用技術確立
- ・人為的攪乱実験スケールアップと生態系反応モデル確立

Stop Deep Seabed Miningは公海でのこと(EEZは対象外) 22

## 日本の環境負荷低減型開発をめざした取り組み

1. デトリタス(沈降有機物)等を根源とする食物連鎖系を数式モデルで表現し、底層域生態系のベースライン状態を再現
2. 小規模な環境負荷(人為的攪乱)を底層域生態系に加え、生物種類別生息数の時間的、空間的变化を継続的に調査
3. 数式モデルの係数等を、生物種類別生息数の時間的、空間的变化の調査結果を再現できるものに調整
4. 異なる場所で環境負荷(人為的攪乱)を異種の底層域生態系に加え、数式モデル活用を普遍化

▲ 達成済み

▼ 未達成

5. 環境負荷(人為的攪乱)の時間的、空間的規模の拡大を図り、商業開発時の底層生態系反応の予想・評価数式モデルを構築
6. 商業開発時の底層生態系のダメージを低減できるような開発システム、開発方法、保護区画設置等検討ツールとして活用する

モラトリアム回避、あるいは解消に繋がる定量的評価ツール

# ご静聴、ありがとうございました



1997年に海山における集鉱実験で使用されたマンガン団塊集鉱機