

令和3年(第21回)海上技術安全研究所研究発表会

海底鉱物資源開発のための基盤的技術 並びに解析・評価ツールの開発

海洋開発系

中島康晴、山本譲司、高野慧、荒木元輝、藤原智、山本マルシオ、小野正夫、金田成雄、
高橋一比古、正信聡太郎



研究の背景

- * 低炭素・脱炭素を中心とする持続可能な社会への変革は、我が国における喫緊の課題
- * 海洋再生エネルギー開発、海運ゼロエミッション化等は、海洋・海事産業における重要な研究課題
- * 発電機、モーター、バッテリー等に不可欠な素材である銅やコバルト、レアアースなどの**希少金属（クリティカルメタル）**の確保が重要
- * 将来の金属鉱物資源として、**海底熱水鉱床、コバルトリッチクラスト、マンガン団塊、レアアースを含む海底泥**といった**海底鉱物資源**の重要性が認識されている



図 海底熱水鉱床（左）及びマンガン団塊（右）

出典：MIDAS Newsletter, Spring 2014



図 コバルトリッチクラスト

出典：J. R. Hein & S. Petersen, The Geology of Cobalt-rich Ferromanganese Crusts, in Deep Sea Minerals 1C Cobalt-rich Ferromanganese Crusts, 2013

海底鉱物資源を巡る最近の動き

- * 日本：海底熱水鉱床の採鉱・揚鉱パイロット試験（2017）や、国際鉱区におけるコバルトリッチクラストの資源探査を実施¹⁾。
- * 韓国、中国、インド：2000年頃から、マンガン団塊の開発を目指す国家プロジェクトを実施中²⁻⁴⁾。
- * 欧州連合（EU）：マンガン団塊の開発を目指すプロジェクト（Blue Mining）を実施（2014～18）⁵⁾。
- * ノルウェー：石油・ガス分野の技術的蓄積を活用し、海底鉱物資源の開発を目指すプロジェクト（MarMine）を実施中⁶⁾。

- 出典
- 1) 山路ほか, J. MMIJ, vol. 135, pp. 42-51, 2019
 - 2) S. Kim, et al., Ocean Eng., vol. 171, pp. 131-138, 2019
 - 3) Z. Qiu, et al., Acta Oceanologica Sinica, vol. 39, pp. 34-42, 2020
 - 4) R. Mukhopadhyay, et al., Mar. Geores. & Geotechnol., vol. 37, pp. 845-851, 2019
 - 5) BLUE MINING, 2018
 - 6) B. Snook, et al., Minerals, vol. 8, article 576, 2018

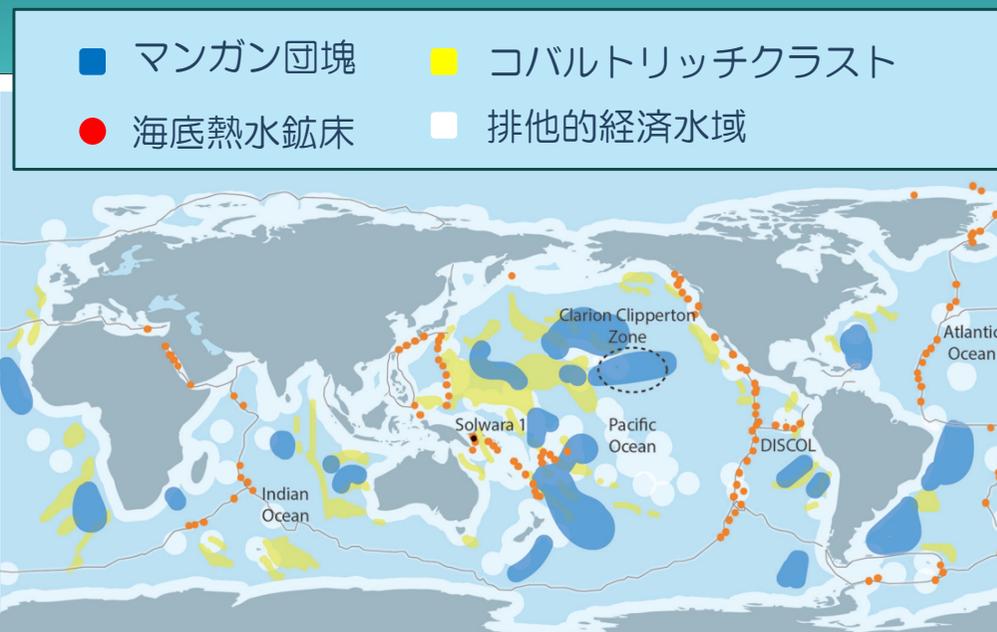


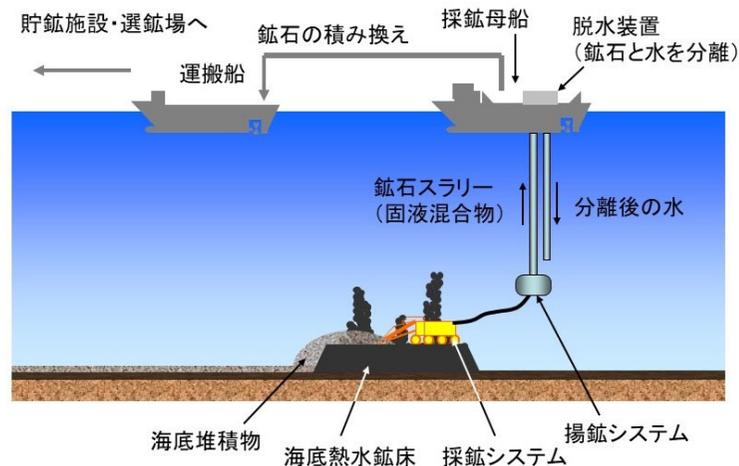
図 主な海底鉱物資源の分布

出典：K. A. Miller, et al., Frontiers in Marine Science, vol. 4, article 418, 2018

海技研における海底鉱物資源開発関連の研究開発

- 民間企業やほかの研究機関と共同で、研究開発を実施
- 本日は、基盤的技術、並びに、解析・評価ツールの開発について報告

基盤的技術の開発



解析・評価ツールの開発



基盤的技術の開発



採鉱・揚鉱システムに係わる研究

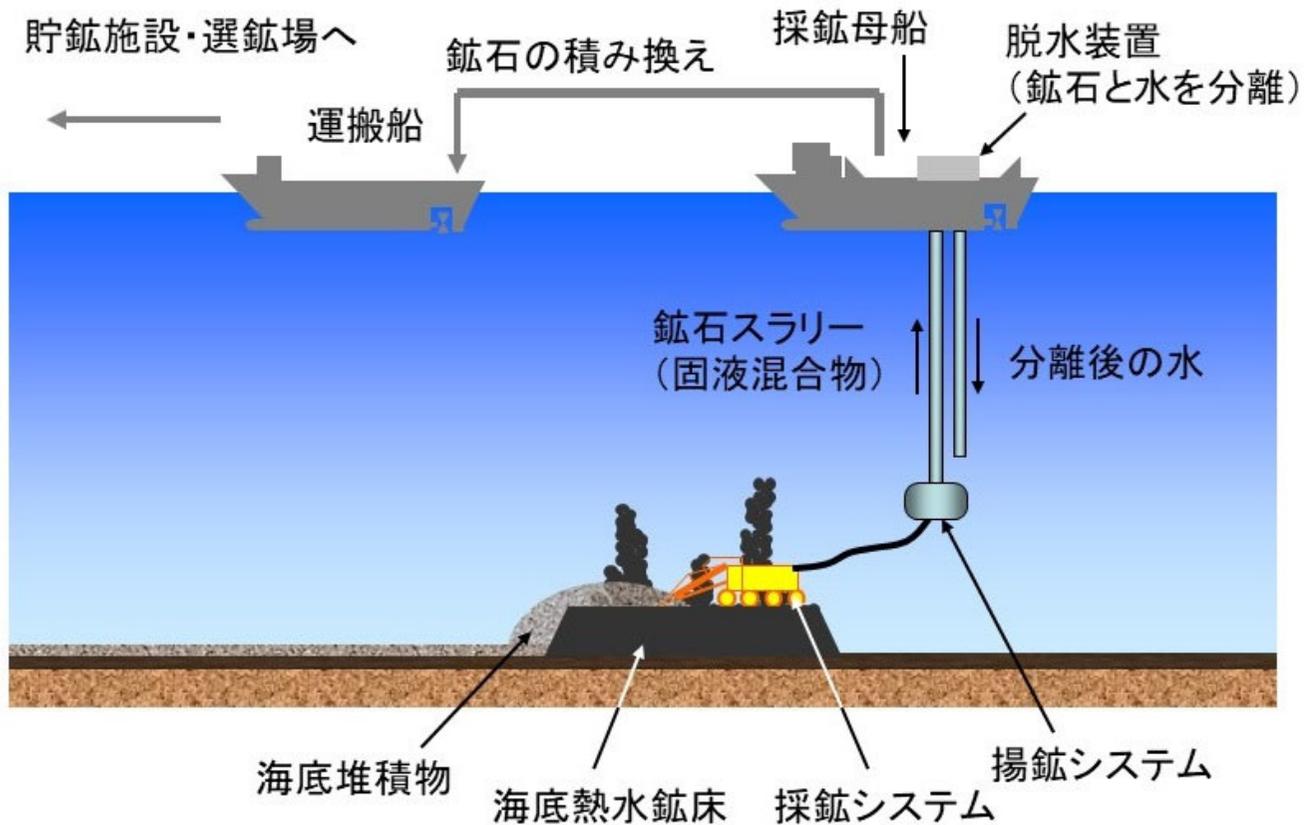


図 海底熱水鉱床の採鉱・揚鉱システムの概念図

採鉱・揚鉱システムに係わる研究（続き）

• 採鉱システム関係

- * 高圧タンクを用いて、採掘機等に搭載される各種機器の耐圧性能の評価を実施

• 揚鉱システム関係

- * 鉱石をスラリー（固液混合物）として揚鉱する場合の揚鉱管内の摩擦損失や摩耗の評価を実施
- * 摩擦損失の評価では、深海水槽内に揚鉱管模型を設置し、模擬鉱石（アルミナボール等）を用いたスラリー移送試験を実施
- * フレキシブルライザーについても、揚鉱システムへの適用を考慮した強度評価及び疲労評価を実施



スラリー移送試験

スラリー濃度や揚鉢管の傾斜角を変えて実験を行い、摩擦損失を与える数学的モデルを検証

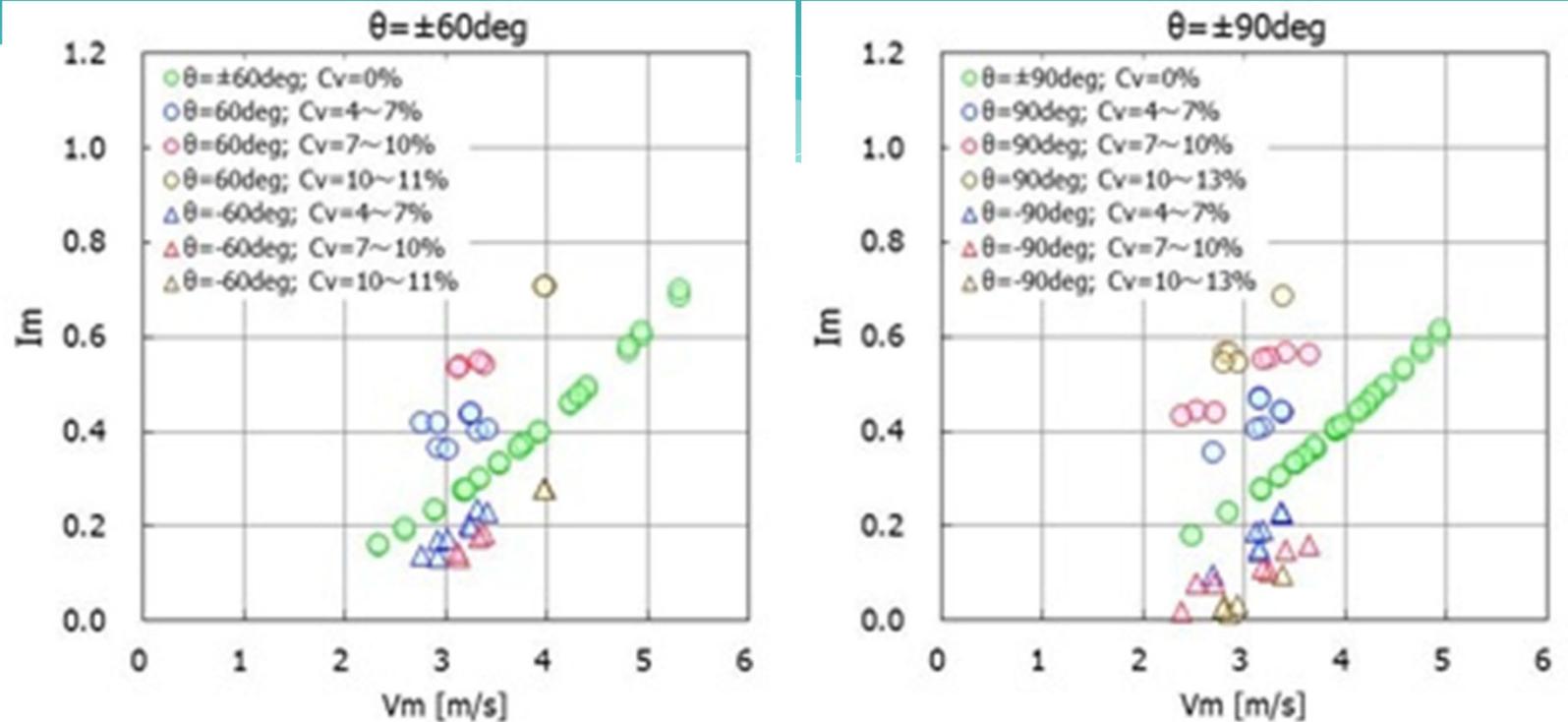


図 スラリー流速 (V_m) と圧力勾配 (I_m) の関係

C_v : スラリー濃度 (体積比) | 管の傾斜角 (θ) = $\pm 60^\circ$ (左) 及び $\pm 90^\circ$ (右)

出典: S. Masanobu, et al., J. OMAE, vol. 139, article 051401, 2017

鉱物処理に係わる研究

海底選鉱

海底で採掘した鉱石をその場で粉碎、選別し、有用な鉱物を多く含む粒子を揚鉱

- 粉碎技術
- ボールミルによる水中での鉱石粉碎を検討
- 高圧水中条件でも、陸上と同程度の粉碎が可能であることを確認

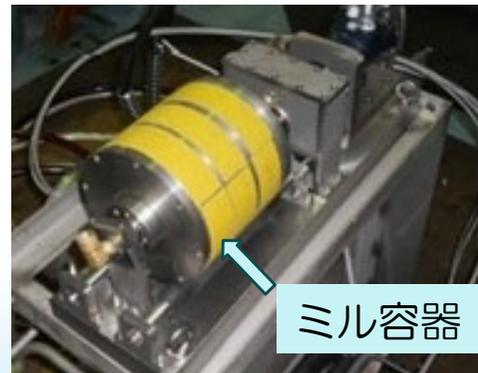
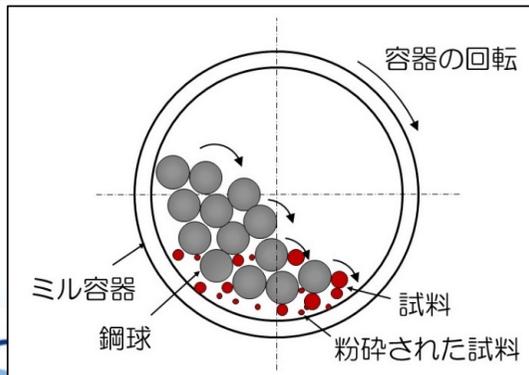


図 ボールミル粉碎の概要（左）と試験模型（右）

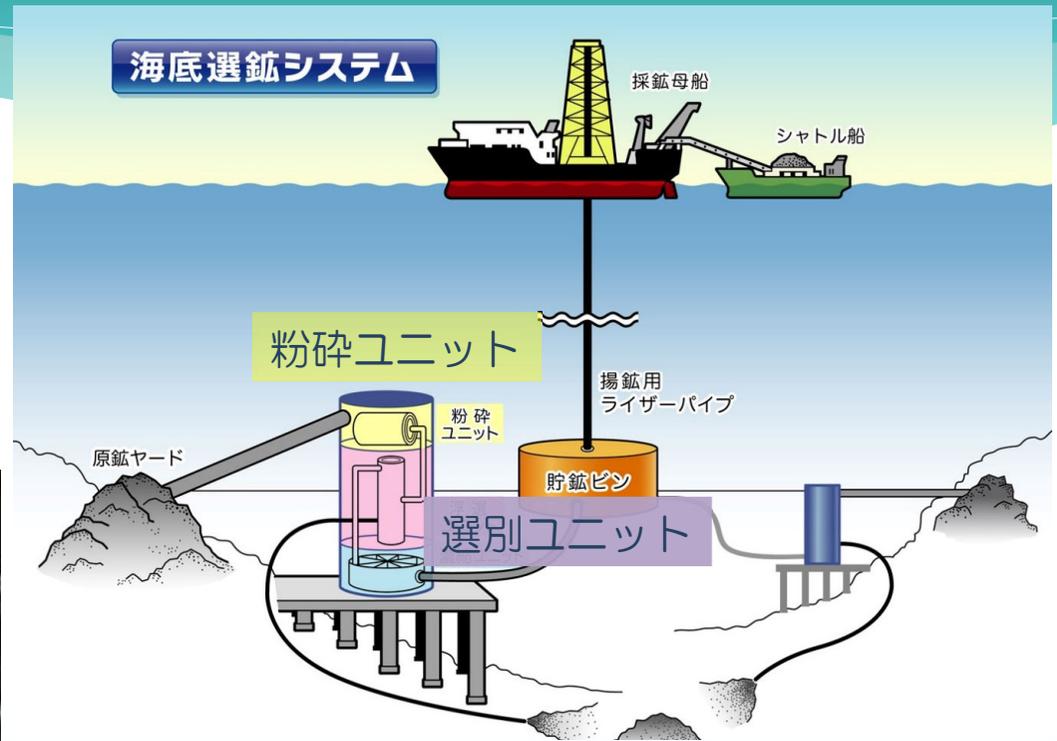


図 海底選鉱システムの概念図

出典：Y. Nakajima, et al., Proc. OMAE, OMAE2013-10756, 2013

鉍物処理に係わる研究（続き）

• 選別技術

- * 陸上鉍山で広く用いられる浮遊選鉍（浮選）の適用を検討
- * 高圧水中条件で微細な気泡を発生させ、鉍石粒子を分離し、より多くの有用金属元素を精鉍として回収できることを確認
- * レーザー分光計を用いた鉍石粒子品位の現場計測など、関連する研究を実施

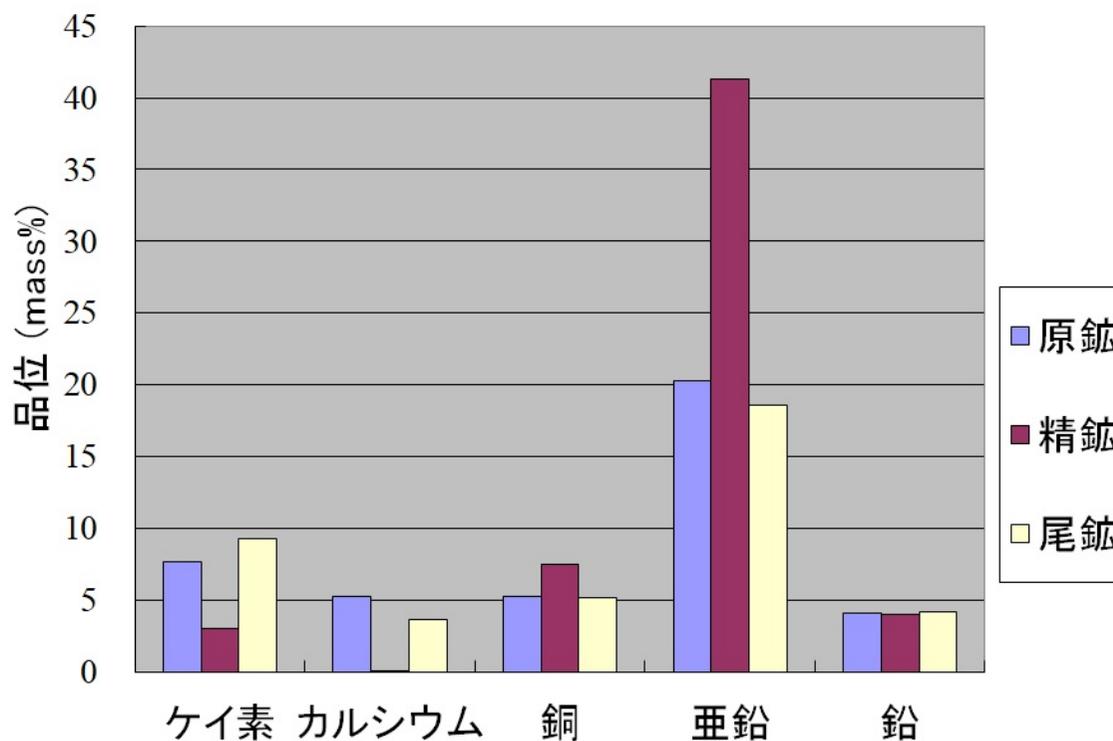


図 高圧条件での浮選試験結果の例 (@1MPa)

出典：Y. Nakajima, et al., Proc. OMAE, OMAE2012-83354, 2012

解析・評価ツールの開発



海底鉱物資源開発の計画支援プログラム

・ プログラム開発のコンセプト

- 海底鉱物資源開発事業の経済性を簡易的に評価。
- * 計算上の負荷を軽減し、海底鉱物資源開発に特化。
- * ユーザーサイドから見た使い勝手の向上を目指す
(多くの設定値をユーザーが調節可能)。
- * 水深データ、気象・海象データ等も収録。

以下、本プログラムの説明では、採鉱母船をプラットフォームと呼称

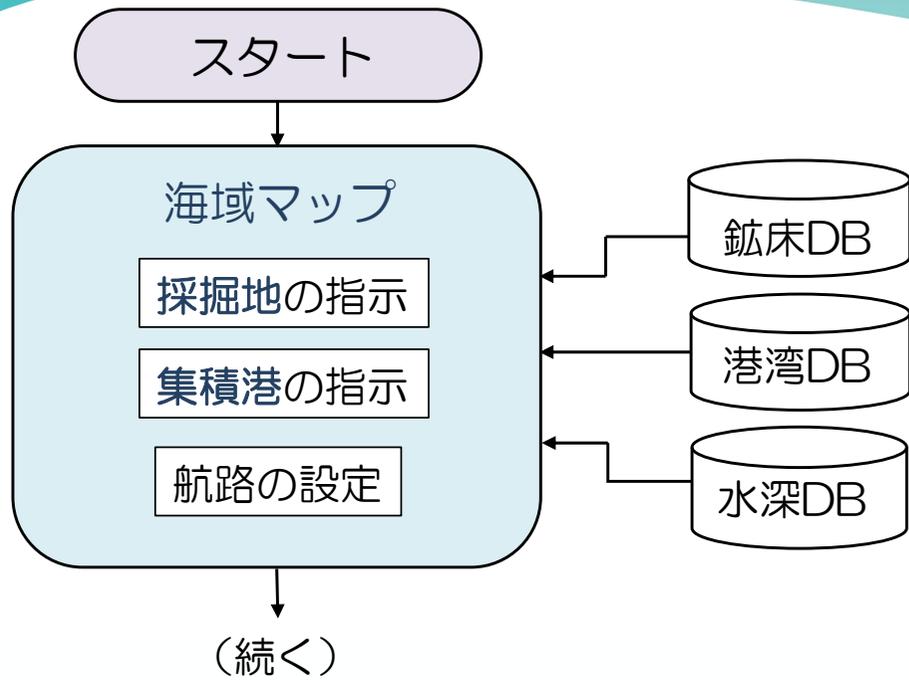


図 計画支援プログラムのトップ画面

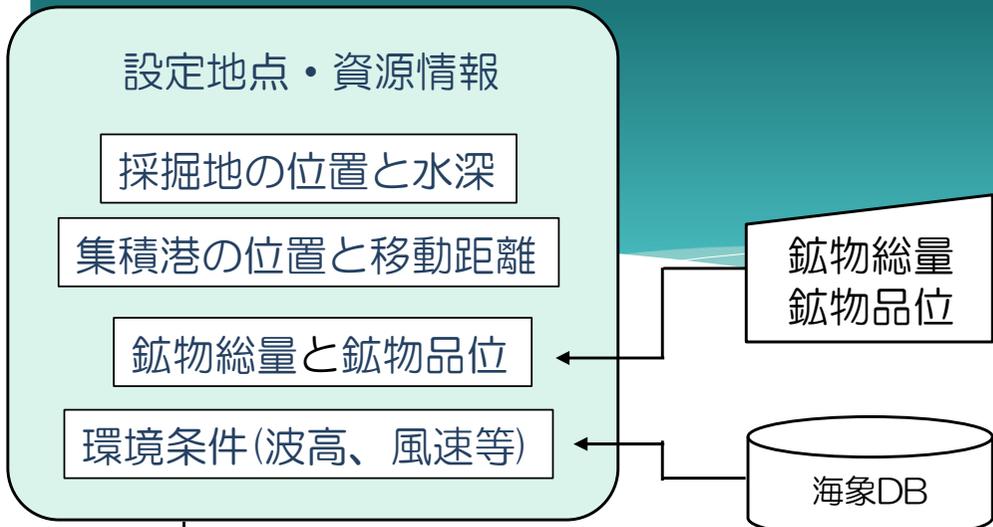
計画支援プログラムで計算する経済性評価指標

- * 総収入
- * 総コスト
- * 総利益
- * 正味現在価値（NPV）：投資によってどれだけの利益が得られるのかを示す指標
- * 内部収益率（IRR）：投資によって得られると見込まれる利回り

フローチャートと画面



計画設定のタブ



計画支援プログラム [計画A]

採掘地	名称	緯度	経度	水深(m)	移動距離	採掘地等設定
明神海丘 (サンライズ鉱床)		N32°06'12"	E139°52'06"	1,400	403km (217.6M)	
集積港	東京	N35°36'45"	E139°47'59"			

計画設定 | プラットフォーム仕様 | CAPEX | 経済性評価 | 環境条件

鉱物品位		生産計画	
鉱物総量	9,120,000 ton	稼働期間	15 年
資源品位		生産量	1,200 ton/日
Au	20.0 ppm 182.4 ton	移動距離	403 km
Ag	1,213.0 ppm 11,062.6 ton	最小荷役間隔	2 日
Cu	5.5 % 501,600.0 ton	荷役間隔	15 日
Zn	21.9 % 1,997,280.0 ton	シャトル船隻数	1 隻
Pb	2.3 % 207,024.0 ton	1サイクル生産日数	日
		年間最大生産日数	360 日
		年間生産日数	360 日
		年間設置回数	1 回
		年間シャトル往復回数	24 回
		貯鉱量	20,400 ton

プラットフォーム基本形式
プラットフォーム形式
 船型
 セミサブ
 係留方式
 DPS
 係留
 輸送方式
 自航式
 シャトル船使用

(続く)

計画設定 | プラットフォーム仕様 | CAPEX | 経済性評価 | 環境条件

再現期間

波高	2.3 m	平均
波周期	18.27 s	20年
風速	32.3 m/s	50年
表層流速	2.55 m/s	100年

採掘地の気象・海象条件を表示



計画の策定

生産計画

稼働期間(年)

生産量(ton/日)

移動距離(km)

荷役間隔(日)

シャトル船隻数(隻)

1サイクル生産日数(日)

年間最大生産日数(日)

プラットフォーム 基本形式

プラットフォーム形式
船型/セミサブ

係留方式
DPS/係留

輸送方式
自航式/シャトル船使用

貯鉱量

(続く)

計画設定のタブ

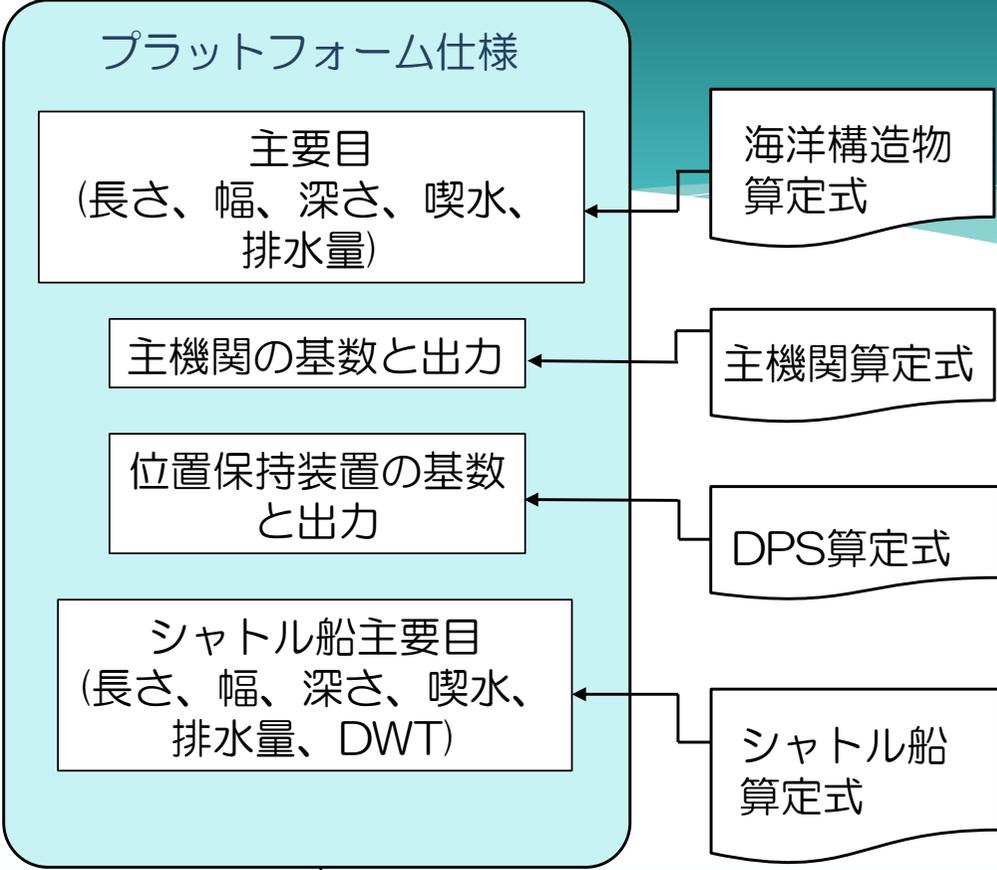
計画支援プログラム [計画A]

名称	緯度	経度	水深(m)	移動距離	採掘地等設定
採掘地	明神海丘 (サンライズ鉱床)	N32°06'12"	E139°52'06"	1,400	
集積港	東京	N35°36'45"	E139°47'59"	403km (217.6M)	

計画設定 | プラットフォーム仕様 | CAPEX | 経済性評価 | 環境条件

鉱物品位		資源品位		生産計画		プラットフォーム基本形式	
鉱物総量	9,120,000 ton	Au	20.0 ppm	稼働期間	15 年	プラットフォーム形式	<input checked="" type="radio"/> 船型
生産量	1,200 ton/日	Ag	1,213.0 ppm	移動距離	403 km	係留方式	<input type="radio"/> セミサブ
182.4 ton		Cu	5.5 %	最小荷役間隔	2 日	輸送方式	<input checked="" type="radio"/> DPS
11,062.6 ton		Zn	21.9 %	荷役間隔	15 日		<input type="radio"/> 係留
501,600.0 ton		Pb	2.3 %	シャトル船隻数	1 隻	輸送方式	<input type="radio"/> 自航式
1,997,280.0 ton				1サイクル生産日数			<input checked="" type="radio"/> シャトル船使用
207,024.0 ton				年間最大生産日数	360 日		
				年間生産日数	360 日		
				年間設置回数	1 回		
				年間シャトル往復回数	24 回		
				貯鉱量	20,400 ton		

プラットフォーム仕様のタブ



計画設定 | **プラットフォーム仕様** | CAPEX | 経済性評価 | 環境条件

プラットフォーム基本形式

形式 係留方式 輸送方式

主要目		主機関		シャトル船主要目	
長さ	<input type="text" value="151.0"/> m	基数	<input type="text" value="6"/> 基	長さ	<input type="text" value="145.2"/> m
幅	<input type="text" value="27.0"/> m	出力	<input type="text" value="3,700"/> kW	幅	<input type="text" value="24.2"/> m
深さ	<input type="text" value="17.0"/> m	位置保持装置		深さ	<input type="text" value="12.1"/> m
喫水	<input type="text" value="12.0"/> m			船首側基数	<input type="text" value="3"/> 基
排水量	<input type="text" value="34,000"/> ton	出力	<input type="text" value="2,500"/> kW	排水量	<input type="text" value="25,147"/> ton
		船尾側基数	<input type="text" value="3"/> 基	DWT	<input type="text" value="20,400"/> ton
		出力	<input type="text" value="2,500"/> kW		

(続く)



CAPEXのタブ

CAPEX

船体価格
掘削設備価格
位置保持設備価格
その他設備価格
その他価格
シャトル船価格

CAPEX算定式

(続く)

計画設定 プラットフォーム仕様 CAPEX 経済性評価 環境条件

CAPEX概要 (MMS)

船体価格	102.9
掘削設備	101.3
位置保持設備	24.2
その他設備	17.8
その他	24.6
総計	270.8
シャトル船	27.5

CAPEX詳細 (MMS)

主船総計	270.8
船体価格	102.9
Hull	48.5
Accommodation	5.0
Steel Works	4.9
Generator	26.6
Electric System	10.7
Ballast	2.4
Piping	4.9
掘削設備	101.3
Drilling Package	67.5
Riser System	33.8
位置保持設備	24.2
DPS 価格	20.1
DPS Control	4.0
Mooring System	0.0
その他設備価格	17.8
Hull/Deck Equipment	9.7
Fire Fighting	2.4
Others	5.7
その他	24.6
Engineering	12.3
Yard Contingency	12.3
Yard Profit	0.0
シャトル船	27.5

経済性評価

年間稼働日数
年間生産量
収益
プラットフォーム
OPEX
揚鉬システムOPEX
採鉬システムOPEX
シャトル船OPEX
コスト合計
利益

総収入
総コスト
総利益

正味現在価値
(NPV)
内部利益率
(IRR)

計画内容をファイルに保存

為替
インフレ率
鉬石価格

経済性算定式

積算

割引率

NPV
算定式

IRR
算定式

経済性評価のタブ

計画設定 プラットフォーム仕様 CAPEX 経済性評価 環境条件

経済性パラメータ

為替 円/\$ インフレ率 % 鉬石価格 \$/ton

	単位	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目	6年目	7年目	8年目
▶ 年間稼働日数	日	360	360	345	360	330	360	360	345
年間生産量	ton	432,000	432,000	414,000	432,000	396,000	432,000	432,000	414,000
収益	MM\$	129.6	130.2	125.4	131.6	121.2	132.9	133.5	128.6
プラットフォーム CAPEX	MM\$	270.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
プラットフォーム OPEX	MM\$	41.6	41.8	44.2	42.2	48.2	42.7	42.9	45.3
揚鉬システム CAPEX	MM\$	44.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
揚鉬システム OPEX	MM\$	4.4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.6	4.6	4.6
採鉬システム CAPEX	MM\$	45.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
採鉬システム OPEX	MM\$	4.6	4.6	4.6	4.6	4.7	4.7	4.7	4.7
シャトル船 CAPEX	MM\$	27.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
シャトル船 OPEX	MM\$	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4
コスト合計	MM\$	65.1	65.3	67.7	65.8	71.9	66.3	66.6	69.1
利益	MM\$	64.5	64.9	57.7	65.7	49.3	66.5	66.9	59.5

事業性

総収入 億円 総計 億円 NPV 億円 割引率 %

総コスト 億円 IRR %

- 収益やOPEXは年単位で表示
- 為替レート、インフレ率、割引率等はユーザーが変更可能

プログラムの利用例：生産計画の経済性指標への影響

下記の事例を基準として、生産計画のパラメータを調整し、正味現在価値（NPV）及び内部収益率（IRR）に及ぼす影響を比較

固定

変更

名称	緯度	経度	水深(m)	移動距離	採掘地等設定
採掘地 明神海丘（サンライズ鉱床）	N32°06'12"	E139°52'06"	1,400	391km (211.1M)	
集積港 東京	N35°36'45"	E139°47'59"			

計画設定 プラットフォーム仕様 CAPEX 経済性評価 環境条件

鉱物品位	9,120,000 ton
資源品位	
Au 20.0 ppm	182.4 ton
Ag 1,213.0 ppm	11,062.6 ton
Cu 5.5 %	501,600.0 ton
Zn 21.9 %	1,997,280.0 ton
Pb 2.3 %	207,024.0 ton

生産計画	
稼働期間	10 年
生産量	4,800 ton/日
移動距離	391 km
最小荷役間隔	2 日
荷役間隔	10 日
シャトル船隻数	1 隻
1サイクル生産日数	日
年間最大生産日数	180 日
年間生産日数	180 日
年間設置回数	1 回
年間シャトル往復回数	18 回
貯鉱量	57,600 ton

プラットフォーム基本形式	
プラットフォーム形式	<input checked="" type="radio"/> 船型 <input type="radio"/> セミサブ
係留方式	<input checked="" type="radio"/> DPS <input type="radio"/> 係留
輸送方式	<input type="radio"/> 自航式 <input checked="" type="radio"/> シャトル船使用

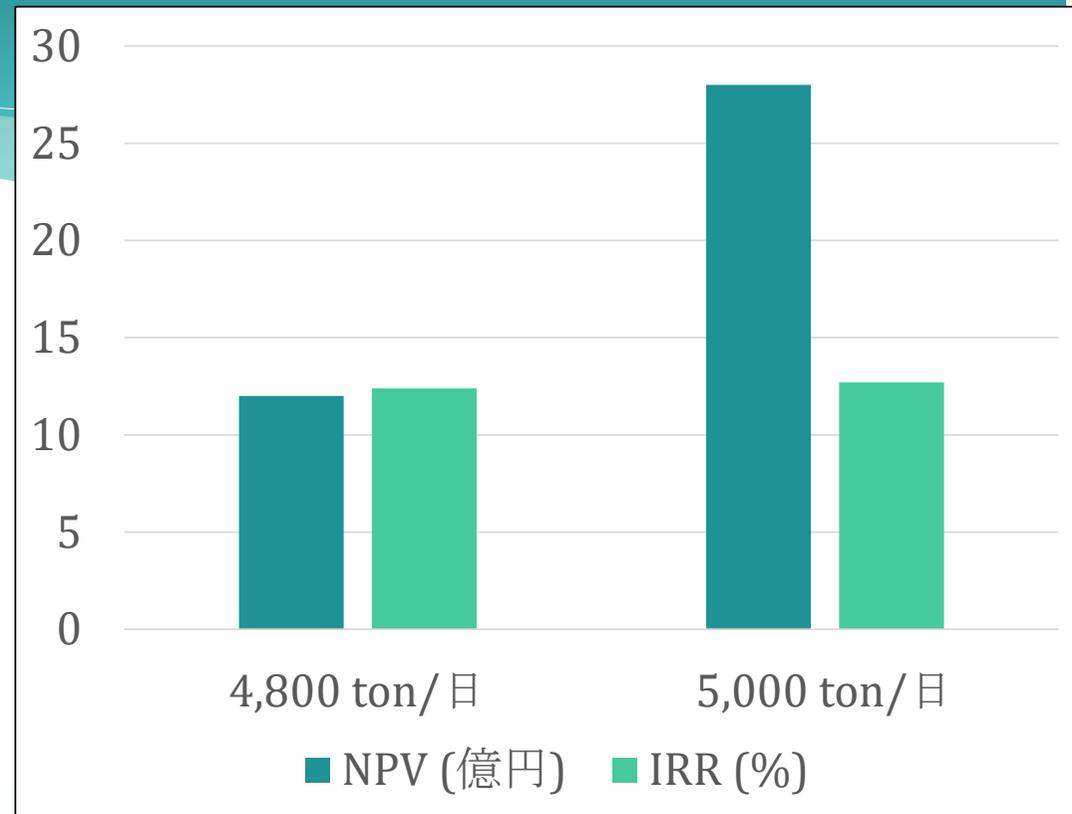
	case_1	case_2	case_3	case_4
生産量 (ton/day)	4,800	5,000	4,800	4,800
荷役間隔 (day)	10	10	5	10
シャトル船隻数	1	1	2	1
年間最大生産日数 (day)	180	180	180	190
	基準	生産量をアップ	隻数・荷役間隔	年間最大生産日数をアップ



生産量の影響

計画設定 プラットフォーム仕様 CAPEX 経済性評価 環境条件

鉱物品位		生産計画		プラットフォーム基本形式	
鉱物総量	9,120,000 ton	稼働期間	10 年	プラットフォーム形式	
資源品位		生産量	5,000 ton/日	<input checked="" type="radio"/> 船型	
Au	20.0 ppm 182.4 ton	移動距離	391 km	<input type="radio"/> セミサブ	
Ag	1,213.0 ppm 11,062.6 ton	最小荷役間隔	2 日	係留方式	
Cu	5.5 % 501,600.0 ton	荷役間隔	10 日	<input checked="" type="radio"/> DPS	
Zn	21.9 % 1,997,280.0 ton	シャトル船隻数	1 隻	<input type="radio"/> 係留	
Pb	2.3 % 207,024.0 ton	1サイクル生産日数		輸送方式	
		年間最大生産日数	180 日	<input type="radio"/> 自航式	
		年間生産日数	180 日	<input checked="" type="radio"/> シャトル船使用	
		年間設置回数	1 回		
		年間シャトル往復回数	18 回		
		貯鉱量	60,000 ton		



- 生産量の増大により、経済性指標向上

シャトル船の隻数・荷役間隔の影響

計画設定 | プラットフォーム仕様 | CAPEX | 経済性評価 | 環境条件

鉱物品位

鉱物総量: 9,120,000 ton

資源品位

Au: 20.0 ppm, 182.4 ton
 Ag: 1,213.0 ppm, 11,062.6 ton
 Cu: 5.5 %, 501,600.0 ton
 Zn: 21.9 %, 1,997,280.0 ton
 Pb: 2.3 %, 207,024.0 ton

生産計画

稼働期間: 10 年
 生産量: 4,800 ton/日
 移動距離: 391 km
 最小荷役間隔: 1 日
 荷役間隔: 5 日
 シャトル船隻数: 2 隻

プラットフォーム基本形式

プラットフォーム形式

船型
 セミサブ

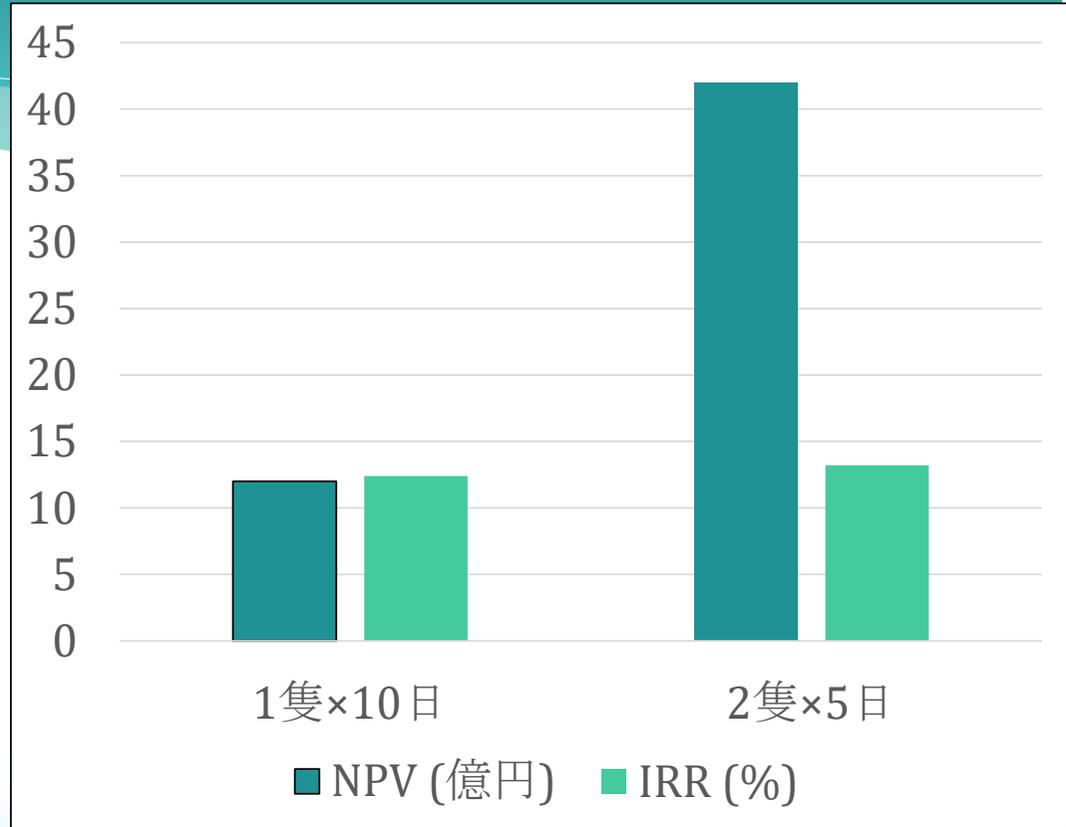
係留方式

DPS
 係留

輸送方式

自航式
 シャトル船使用

1サイクル生産日数: [] 日
 年間最大生産日数: 180 日
 年間生産日数: 180 日
 年間設置回数: 1 回
 年間シャトル往復回数: 36 回
 貯鉱量: 33,600 ton



- シャトル船隻数の増加によりPFの貯鉱量減少→PFのコスト減少→経済性指標向上



年間最大生産日数の影響

計画設定 | プラットフォーム仕様 | CAPEX | 経済性評価 | 環境条件

鉱物品位		資源品位	
鉱物総量	9,120,000 ton		
Au	20.0 ppm	182.4 ton	
Ag	1,213.0 ppm	11,062.6 ton	
Cu	5.5 %	501,600.0 ton	
Zn	21.9 %	1,997,280.0 ton	
Pb	2.3 %	207,024.0 ton	

生産計画	
稼働期間	10 年
生産量	4,800 ton/日
移動距離	391 km
最小荷役間隔	2 日
荷役間隔	10 日
シャトル船隻数	1 隻
1サイクル生産日数	10 日
年間最大生産日数	190 日
年間生産日数	190 日
年間設置回数	1 回
年間シャトル往復回数	19 回
貯鉱量	57,600 ton

プラットフォーム基本形式

プラットフォーム形式

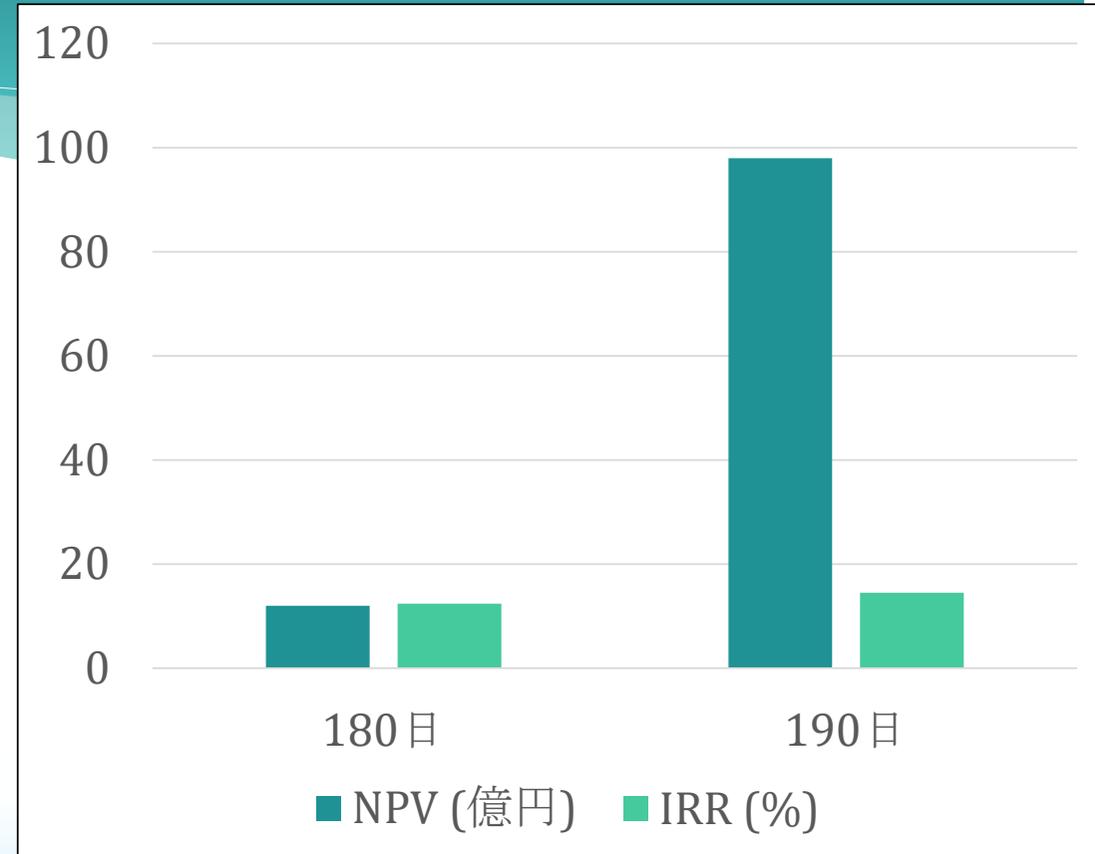
船型
 セミサブ

係留方式

DPS
 係留

輸送方式

自航式
 シャトル船使用



- 10日間の日数増大でも、経済性の向上に大きく寄与

計画支援プログラムの機能拡張に向けて

- * 計画支援プログラムを用いて、海底鉱物資源開発事業における経済性評価指標に対する各種パラメータの感度解析が可能。
- * 現在のバージョンでは海底熱水鉱床の資源データのみを収録しているが、今年度中にコバルトリッチクラストの資源データを追加予定。
- * 次年度以降に、海気象データに対応した採鉱・揚鉱オペレーション等の稼働率を計算する機能を組み込み、稼働率を考慮した経済性評価が可能となるような高度化を実施することを計画中。



まとめ

- * 将来の金属鉱物資源として期待されている海底鉱物資源の開発に資することを目的として、採鉱・揚鉱システム等の基盤的技術の開発、並びに、海底鉱物資源開発の計画支援プログラムの開発を実施。
- * 海底鉱物資源開発は国際的にも注目を集めており、海底熱水鉱床を皮切りとして、コバルトリッチクラストやマンガン団塊の開発に向けた動きも進むものと期待。
- * 当所では、これまでの研究開発で蓄積した知見を活用し、これらの開発に対しても引き続き貢献していく所存です。



謝辞

- * 本研究の一部は、JSPS科研費（JP22360373, JP25289323, JP16H04609及びJP18H01648）の助成を受けて実施されました。関係各位に深く感謝申し上げます。

