

# 熱水鉱床開発の社会受容性と 事業性評価に関する研究

東京大学新領域創成科学研究科

海洋技術環境学専攻

笠島優希

# 背景

## 熱水鉱床開発を海洋産業にするための課題

社会受容性の問題

事業性の問題

経済面と環境面の持続可能性  
(包括的指標による評価)

不確実性を考慮した事業性評価  
(金融工学的手法による評価)

環境リスクの定量化

社会受容性と事業性という2つの問題には、共通して、環境リスクという本質的な問題を抱えており、海洋産業として育成する為には早急な解決が不可欠。

# 研究目的

## 目的①

開発によって被る生態系への影響と、金属資源獲得のトレードオフの関係を定量的に明らかにする事で、持続可能性の検討を行い、社会受容性評価に貢献する。

環境リスクと経済性の関係を定量的に明らかにする

持続可能性の検討を行い、社会受容性評価に貢献

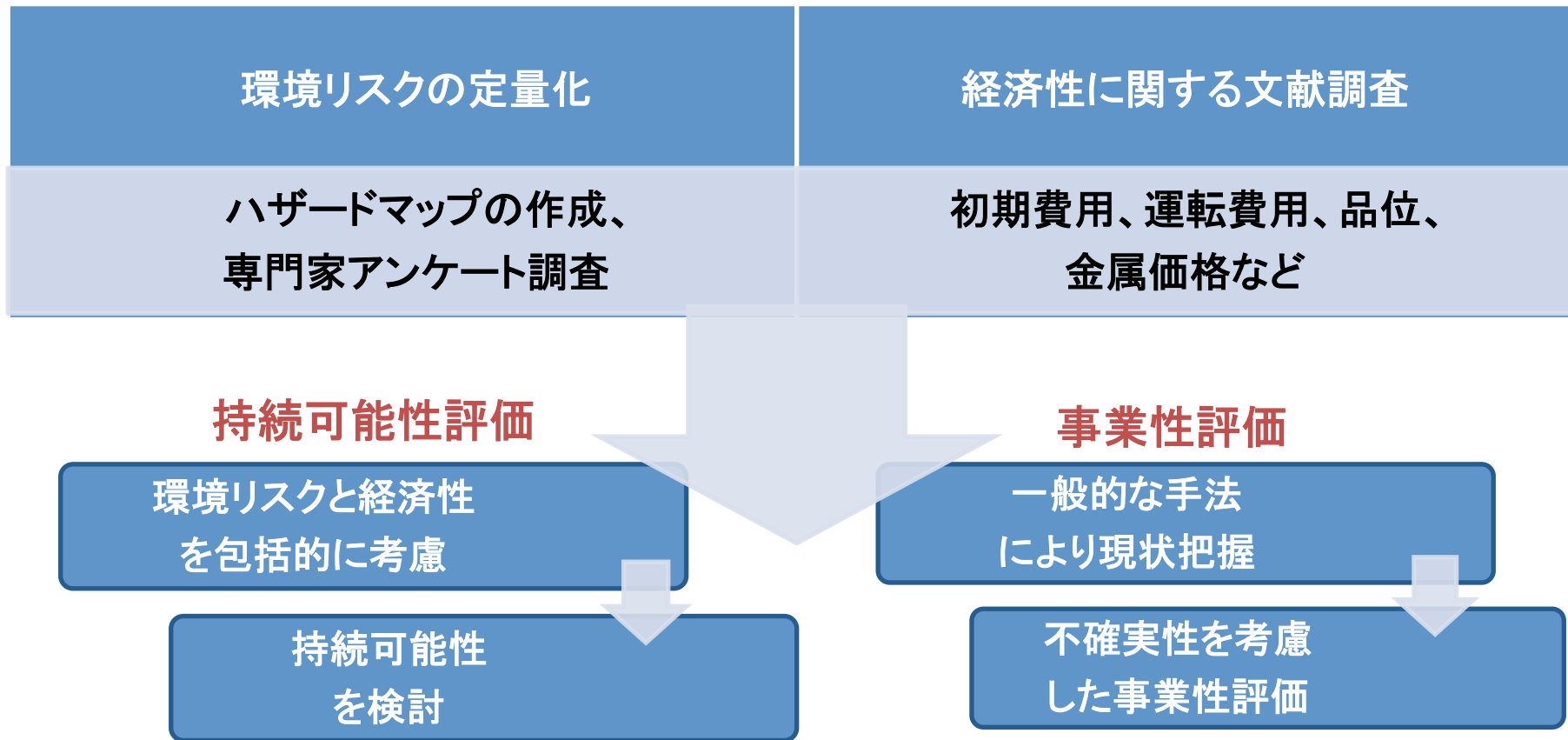
## 目的②

事業者が背負う可能性のある不確実な環境リスクを定量的に明らかにする事で、事業性評価に役立てる。

環境リスクの不確実性を定量的に明らかにする

事業性の評価

# 研究手法の概要



## 本研究の対象範囲

小濱ら(2010)にならい、右のような操業フローモデルを対象とする。

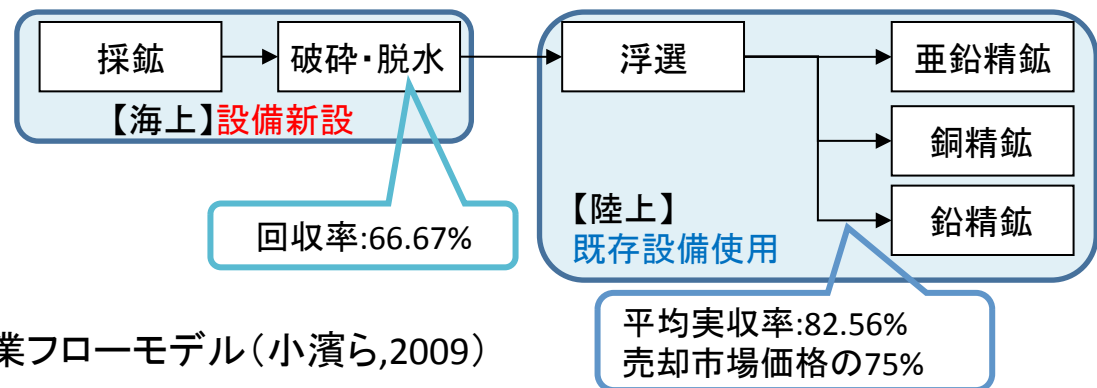


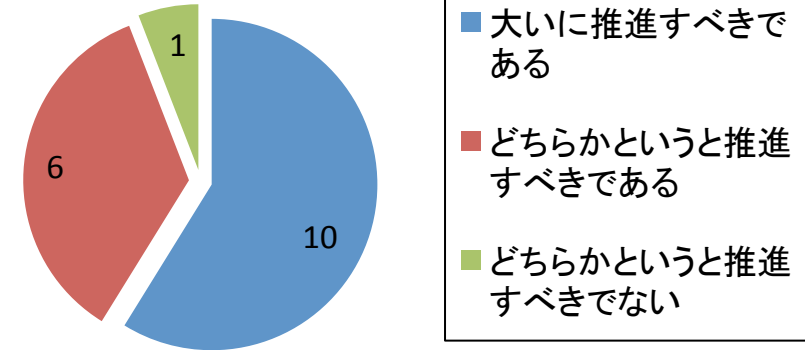
Fig.事業フローモデル(小濱ら,2009)

# 専門家アンケート概要

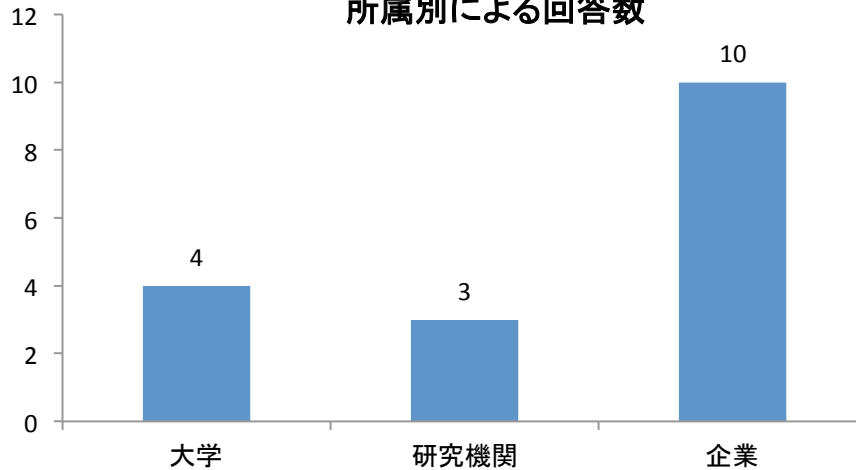
- 熱水鉱床を業務や研究の対象としている回答者を専門家として位置づけた。
- 大宮ら(2009)を参考に、ハザードマップを作成した。先行研究では、ハザードマップが複雑であった点と、種数減少率を一定としていた点が課題であった。そこで、本研究では、よりシンプルなハザードマップを作成し、且つ、種数減少率もアンケートの設問に加えた。

算出するパラメータ	有効回答数
生起確率 $P$	17
種数減少率 $s_n$	7
生態系の経済価値	17

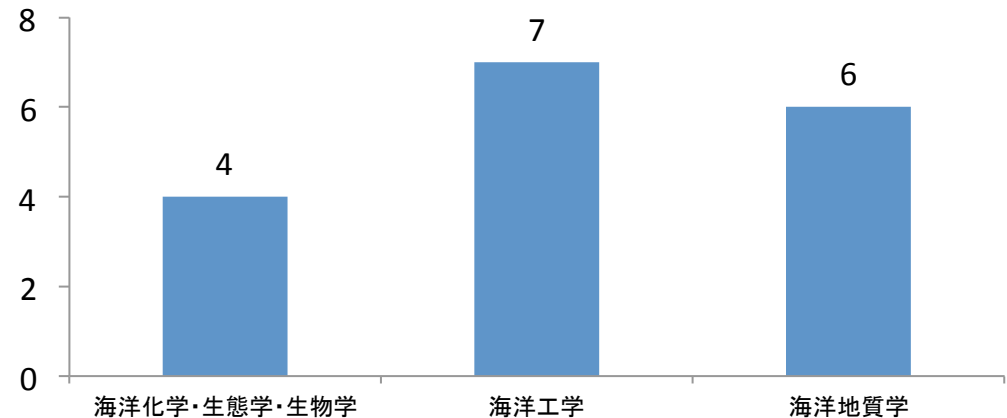
熱水鉱床開発に関する意見



所属別による回答数

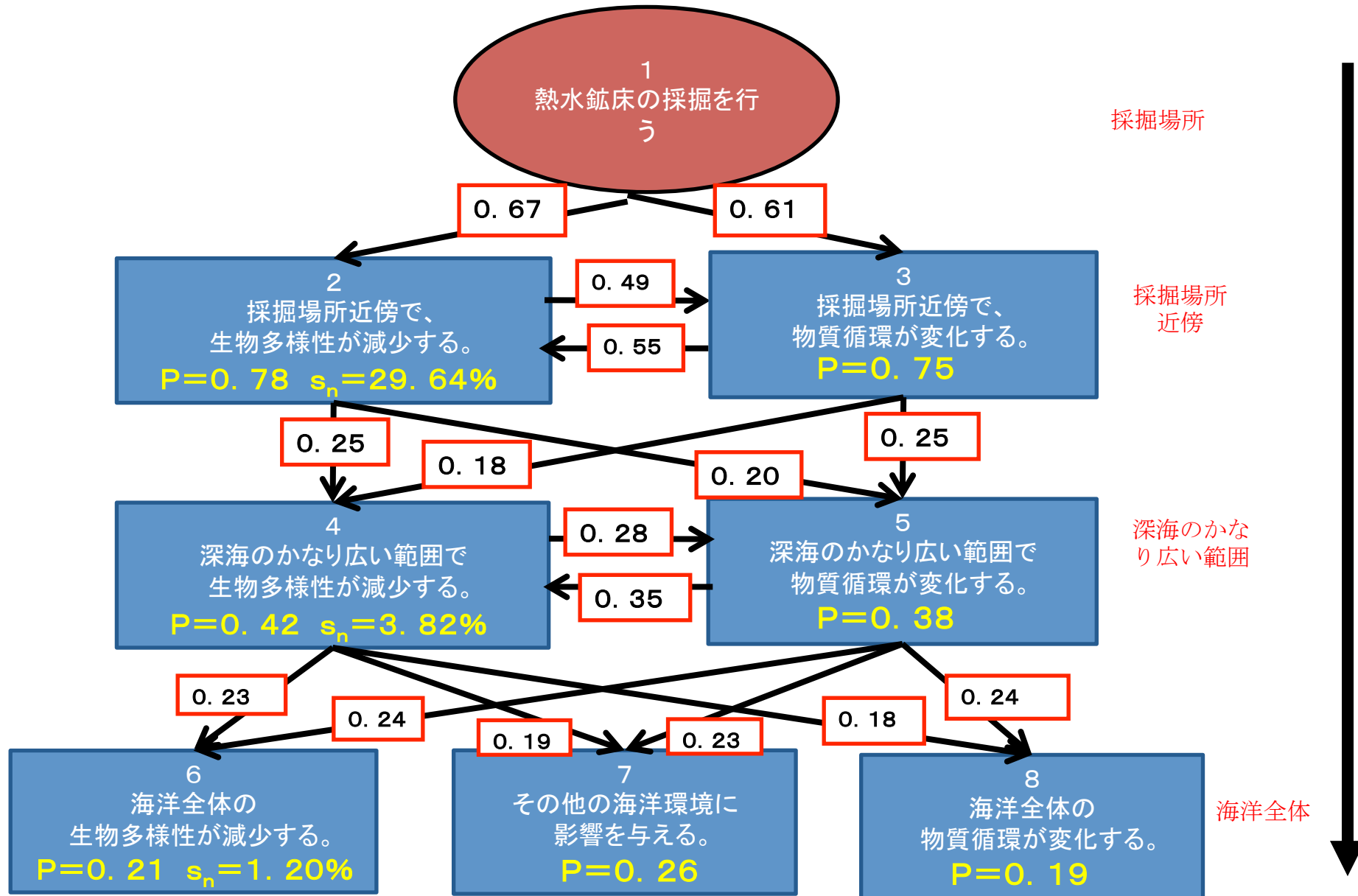


専門領域別による回答数



# ハザードマップの作成とアンケート集計結果

## 生起確率 $P$ と種数減少率 $s_n$



# 専門家アンケート分析(クロス・インパクト分析)

回答データ

事象*i*の生起確率*P*(*i*) (設問1-1)

事象*j*が生起するとしたときに事象*i*が生起する確率*P*(*i,j*) (設問1-3)

$$\min. \sum_i^n \{P^*(i) - P(i)\}^2 + \sum_{i < j}^n \{P^*(i, j) - P(i, j)\}^2$$

$$\theta_k^i = \begin{cases} 1 & : \text{事象}i\text{がある状態}k\text{で生起の場合} \\ 0 & : \text{事象}j\text{がある状態}k\text{で非生起の場合} \end{cases}$$

$$P^*(i) = \sum_{k=1}^N \theta_k^i \theta_k^j \pi_k \quad P^*(i, j) = \sum_{k=1}^N \theta_k^i \theta_k^j \pi_k$$

$$\sum_{k=1}^N \pi_k = 1 \quad \pi_k \geq 0$$

*P*<sup>\*</sup>(*i*) : 生物多様性の減少の起こる  
確率(*i*:2, 4, 6)

確率論との整合性を修正

修正後の生起確率 *P*<sup>\*</sup>(*i*)

採掘場所近傍	深海のかなり広い範囲	海洋全体
0.64	0.43	0.29

## 生態系の経済価値の算出

Costanza et. al. (*Nature*:1997)が算出している生態系サービスの経済価値を回答者に提示して、熱水鉱床近傍に生息する生態系の経済価値をアンケートで算出した。

Table 生態系の経済価値  
[\$/(ha・year)]

平均値	5511
-----	------

# 経済性に関するパラメーターの値

## 初期費用・運転費用

Nautilus社HPを参考

## 金属価格

1990年～2009年までの金属価格を参考

## 品位

3団体(JOGMEC,AIST,深海技術協会)が公表しているサンライズ鉱床の品位データを参考

対象鉱床 賦存海域			明神海丘サンライズ鉱床 伊豆小笠原海域 (社)日本深海技術協会	
品位	JOGMEC	AIST	LOW	HIGH
Cu	6.50%	5.50%	5.56%	6.67%
Pb	0.1%	2%	1%	1%
Zn	2.4%	21.9%	12.5%	15.0%
Au	0.0001%	0.002%	0.0005%	0.0006%
Ag	0.004%	0.12%	0.03%	0.04%

## その他

- 初期費用は借入金で賄う
- 法人税50%



# 包括的環境影響評価指標

*Inclusive Impact Indicator (III, triple I)*について

$$III = EF + \alpha ER + \gamma(\beta HR + CB)$$

環境影響

経済性

特徴:

- 環境影響と経済性の概念を統合した環境影響指標。
- $III < 0$ であれば、社会的に有用な開発であると判断できる。
  - $EF$ : エコロジカル・フットプリント
  - $ER$ : 生態リスク→専門家アンケートで算出した環境リスクを適用
  - $\alpha$ : 生態リスクからフットプリントへの変換係数→大宮, 佐藤にならい、 $\alpha=1$
  - $HR$ : 人間リスク
  - $\beta$ :  $HR$ を経済価値に変換する係数
  - $CB$ : コストーベネフィット
  - $\gamma$ : 通貨の単位で表現される $HR$ と $(C-B)$ を面積単位に変換するための係数  
→専門家アンケートから算出した生態系の経済価値から、  
 $\gamma=2.7 \times 10^{-6}$  (gha・year/yen)とする。

# 環境リスク(ER)の算出方法

- ✓ある経済活動が、将来的に、生態系に及ぼす影響の度合いを示す指標。本研究では、絶滅する生物種と同価の面積の大きさとして表現する。
- ✓熱水鉱床開発が及ぼすERは科学的調査がされておらず算出が困難。

## Specie Area Relationship(SAR)の経験式に基づく生態リスクの算出

$$ER_{region(k)} = A_{original,region(k)} (1 - (1 - s_{n,region(k)})^{1/z}) \times P_{region(k)}$$

$region(k)$ : 海域k

(k=採掘場所近傍、深海のかなり広い範囲、海洋全体)

$A_{original,region(k)}$ : 海域kの生息面積

$s_{n,region(k)}$ : 海域kで生じる生物種数減少率

⇒ 専門家アンケートで算出

$z$ : 経験的に0.25

$P_{region(k)}$ : 海域kで生物多様性が減少する確率

⇒ 専門家アンケートで算出

# ERの算出

$$ER = \sum ER_{region(k)} = \sum \{ A_{original,region(k)} \times (1 - (1 - s_{n,region(k)})^{1/z}) \times P_{region(k)} \}$$

Table パラメータ値

海域	生起確率 $P$	生息面積 $A_{original}$ [ha]	種数減少率 $s_n$	$ER$ [gha]
採掘場所近傍	0.64	$3.0 \times 10^2$	30%	$1.6 \times 10^2$
深海のかなり 広い範囲	0.43	$3.0 \times 10^2 \sim 3.9 \times 10^{10}$	4%	$1.7 \times 10 \sim 2.3 \times 10^9$
海洋全体	0.29	$3.9 \times 10^{10}$	0% ~ 1.2%	$0 \sim 5.4 \times 10^8$

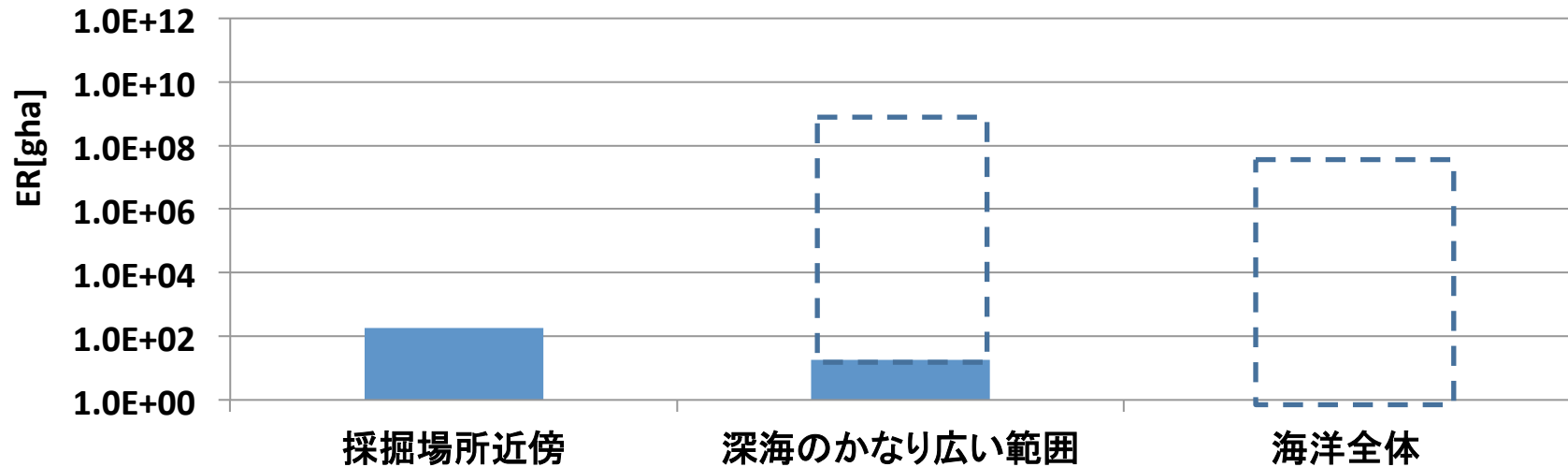


Fig.ER算出

# EF・HR・(Cost-Benefit)の算出

## ① EFの算出

### 前提条件:

- 輸送プロセスのEFを算出。
- 年間採掘量600万トン
- サンライズ鉱床を対象(東京から南東に400km)
- 採掘した鉱石は東京近郊の港に輸送される。
- 輸送には、140バラ積船を用いる。

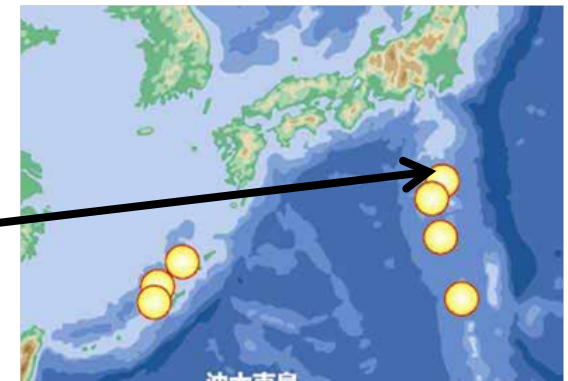


Fig. 国内EEZの熱水鉱床(資源エネ庁, 2008)

↓ CO<sub>2</sub>に換算

CO <sub>2</sub>	t-CO <sub>2</sub> /year	1.0×10 <sup>4</sup>
CH <sub>4</sub> (CO <sub>2</sub> 換算量)		1.8×10
N <sub>2</sub> O(CO <sub>2</sub> 換算量)		7.9×10
<b>合計</b>		<b>1.0×10<sup>4</sup></b>

EFに換算



合計	t-CO <sub>2</sub> /year	1.0×10 <sup>4</sup>
<b>EF</b>	gha	<b>2.6×10<sup>3</sup></b>

## ② HRの算出

HRは、EFやERと比較して、相対的に小さいと考えられる為、本研究ではHRを考慮しない事にする。

## ③ (Cost - Benefit)の算出

Table Cost - Benefit

Cost	初期投資額	億円	916
	年間運転費用(p.a.)		2,764
	1年あたりの費用(p.a.)		2,810
Benefit	売鉱による売上(p.a.)		4,391
<b>Cost - Benefit (p.a.)</b>			<b>-1,580</b>

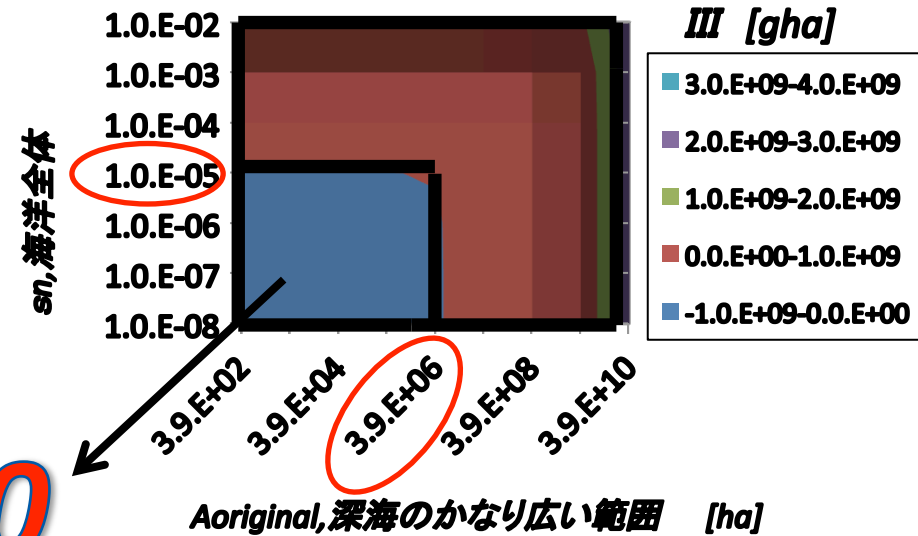
### III 算出と考察

$$III = EF + \alpha ER + \gamma(HR + CB)$$

Table III算出

$\alpha \cdot EF$	gha	$2.6 \times 10^3$
$ER_{\text{採掘場所近傍}}$		$1.6 \times 10^2$
$ER_{\text{深海のかなり広い範囲}}$		$1.7 \times 10 \sim 2.3 \times 10^9$
$ER_{\text{海洋全体}}$		$0 \sim 5.4 \times 10^8$
$HR$		0
$\gamma \times (C - B)$		$-4.3 \times 10^5$
$III$		$-4.2 \times 10^5 \sim 2.8 \times 10^9$

III > 0: 持続可能性が低い  
 III < 0: 持続可能性が高い



**III < 0**

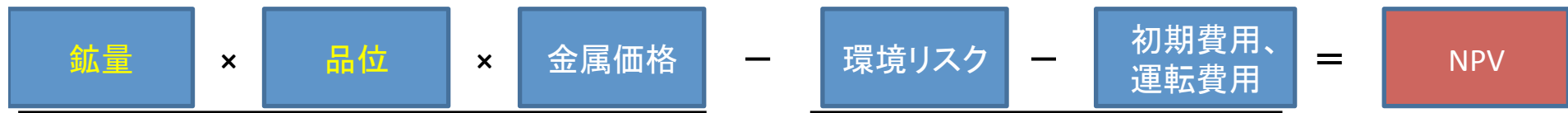
持続可能である

✓ IIIを用いた評価を行う事で、生態系リスクと金属資源獲得の経済性の関係が定量的に明らかになった。

✓ 持続可能性を見出すには、開発によって被る深海の生態系の生息面積  $A_{\text{original, 深海のかなり広い範囲}}$  が約  $3.9 \times 10^6$  (ha) 以下で、且つ、海洋全体の種数減少率  $s_{n, \text{海洋全体}}$  が約  $1.0 \times 10^{-5}$  以下でなければならない事が示唆される。これを満たすように、熱水鉱床開発を進めていく必要があると考えられる。



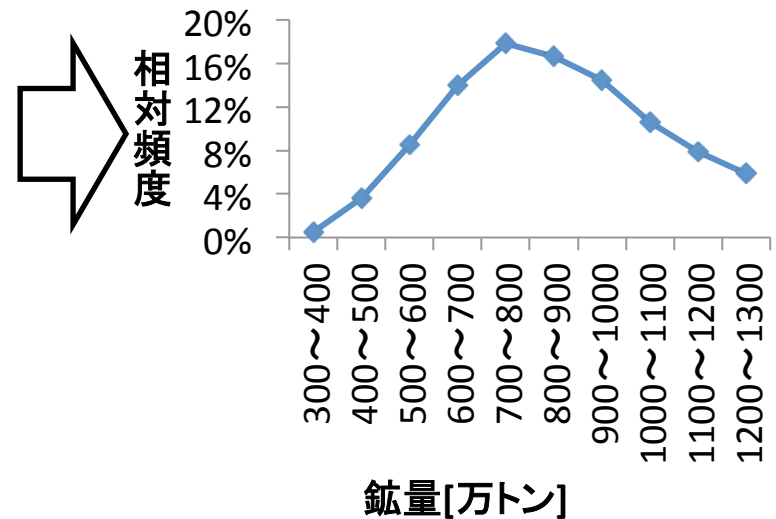
# 鉱量、品位



## 鉱量

対象鉱床	明神海丘サンライズ鉱床	
腑存海域	伊豆・小笠原海域	
規模	推定鉱量	9,000 K tonne (wet)
	ボラティリティ (標準偏差)	31.5%
	確率分布	対数正規分布

小濱ら(2010)によると、サンライズ鉱床と類似した成因を持つ世界の148鉱床を対象に、鉱量データを集計。対数をとると、正規分布に近い分布が得られ、平均900万トン、ボラティリティ31.5%となり、サンライズ鉱床もこの分布に従うと仮定している。



## 品位

文献調査で得られたデータを基に、金属種毎に品位の最大値と最小値をとって、一様分布としてモンテカルロDCFに組み込んだ。  
(出所によって、品位データのバラつきが大きい&詳細な情報が公表されていない)

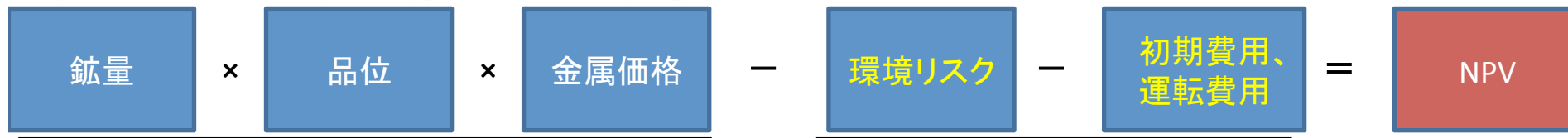
Table 品位分布

Cu	6.7%~5.5%
Pb	2.0%~0.1%
Zn	15.0%~2.4%
Au	0.002%~0.0001%
Ag	0.12%~0.004%





# 環境リスク、初期費用・運転費用



## ①環境リスク

海域	環境リスク 経済価値 [億円/年]	標準偏差
採掘場所近傍	0.1	120%
深海のかなり 広い範囲	199	52%
海洋全体	436	70%

専門家アンケートから算出した生態リスクER[gha]から変換係数γ[yen/gha/year]を乗じて算出。

アンケート回答者のERの標準偏差

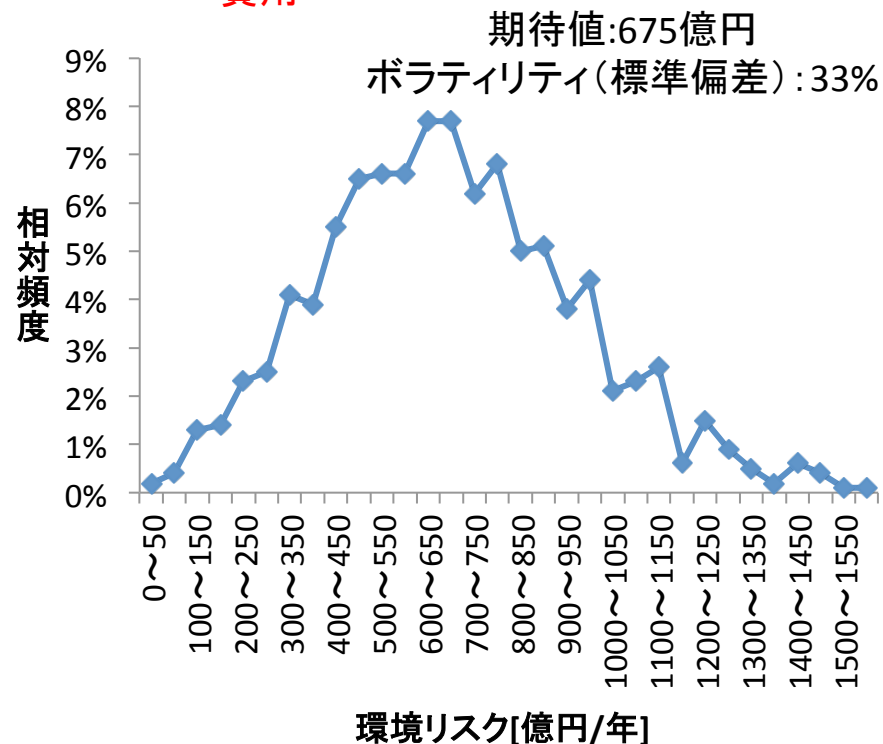
## ②初期費用、運転費用

基本的なパラメータ

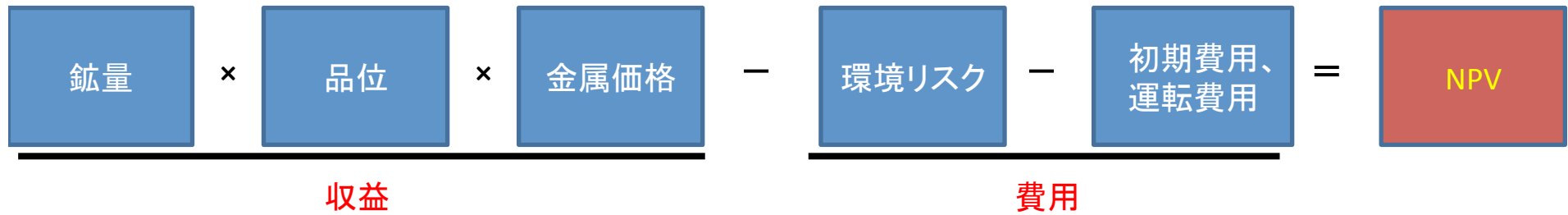
初期費用	探査費用 ※1	60億円
	開発費用 ※1	262億円
	環境調査費用 ※2	60億円
運転費用 ※1		116億円/年
割引率		3%

※1Nautilus社HPを参考に年間採掘量で調節  
 ※2経済産業省HP参考: [http://www.meti.go.jp/information\\_2/downloadfiles/review\\_sheet/0111.pdf](http://www.meti.go.jp/information_2/downloadfiles/review_sheet/0111.pdf)

## 費用

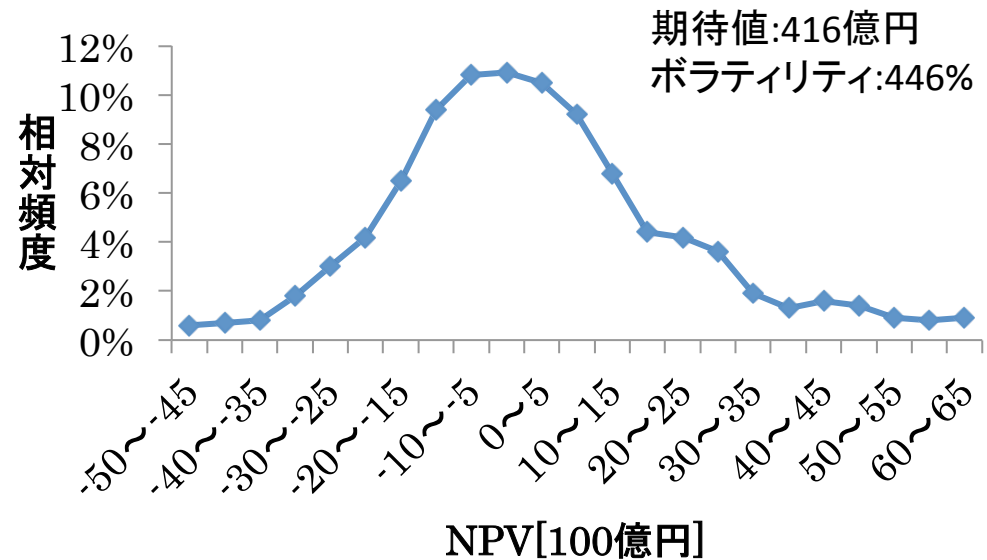


# NPV



## 事業性条件

期待収益 (現在価値)	億円	4,361
運転費用(per year)		116
環境リスク(per year)		675
探査コスト		60
環境調査費用		60
開発準備費用		262
NPV(期待値)		416



NPVが0以下になる頻度は約50%で、事業のリスクが大きい事が分かる。ボラティリティは446%と非常に大きい。不確実性が事業性に与える影響は大きく、事業者にとって参入障壁が大きい事を裏付けている。

不確実性を考慮した事業性評価手法であるリアル・オプション(ROV)法を適用する事が有用であると考えられる。

# リアル・オプション(ROV)法によるNPV算出

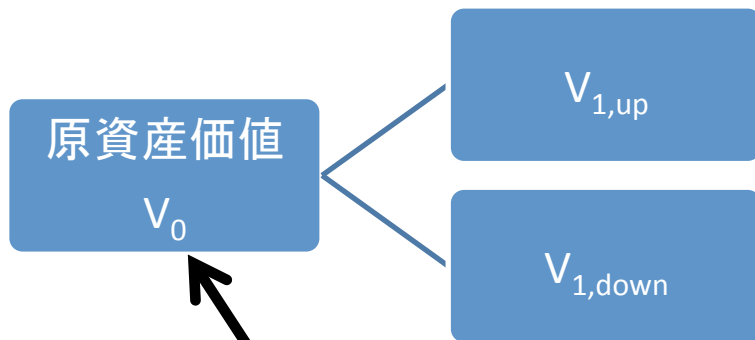
金融工学から派生した手法で、事業に内在する不確実性によって持ちうる経営上の意思決定(オプション)の価値を含めた事業価値を算出する事が出来る。

例:ある事業に投資をしようとしており、現時点( $t=0$ )で投資を実行すれば $V_0$ が得られるが、1年後( $t=1$ )に $V_{1,up}$ か $V_{1,down}$ に変化する。投資額  $I$  とすると、このとき、静的なNPV評価においては現時点で投資を実行するので $V_0 - I$ が事業価値となる。一方、ROV評価では、現時点で投資実行する場合( $V_0 - I$ )と、投資を延期する場合の事業価値を比較して、事業価値が高い方を選択する。

## •NPV評価

現時点

1年後

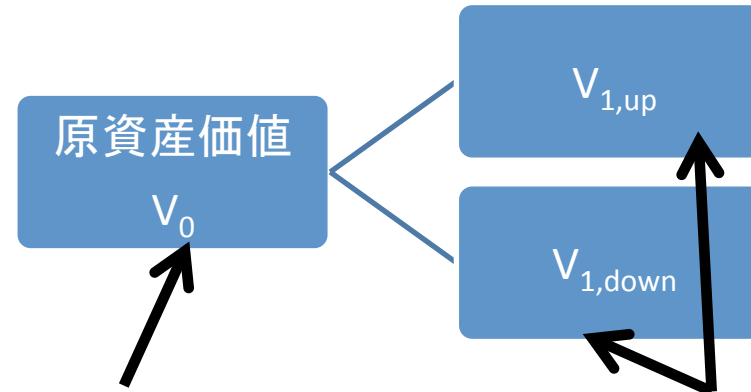


この時点で必ず投資実行する。

## •ROV評価

現時点

1年後



この時点では、必ずしも投資を実行しない。

投資を実行するか中止するかを選択する。

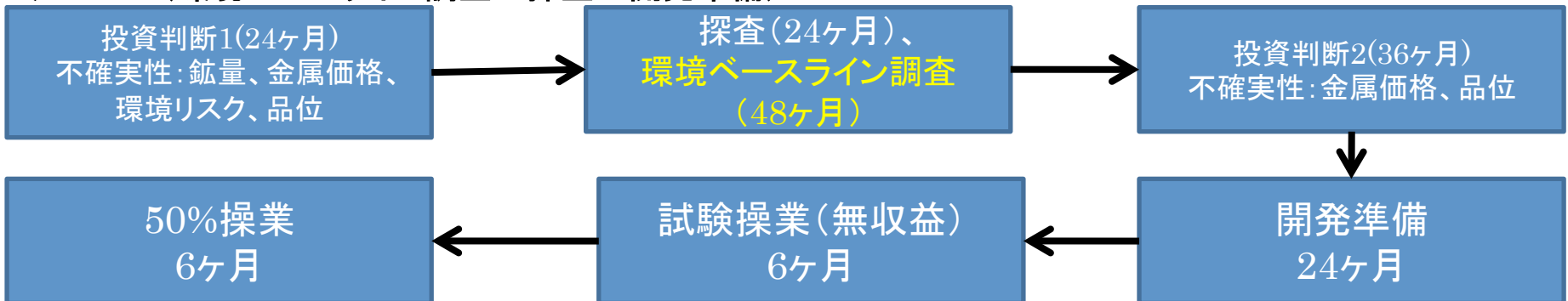
# 熱水鉍床開発の事業フロー

小濱(2009)が提唱している事業フローに、環境調査を追加

ケース1: (探査→環境ベースライン調査+開発準備)



ケース2: (環境ベースライン調査+探査→開発準備)



**投資機会**: 探査、開発準備、  
環境ベースライン調査

## パラメーターの値

Table 基本的なパラメータ

収益(期待値)	4,361億円
原資産価値(期待値) ※1	769億円
原資産のボラティリティ	242%
上昇率(原資産価値)	11.2
下降率(原資産価値)	0.09
割引率	3%

※1原資産価値: 収益 - 運転費用 - 環境リスク



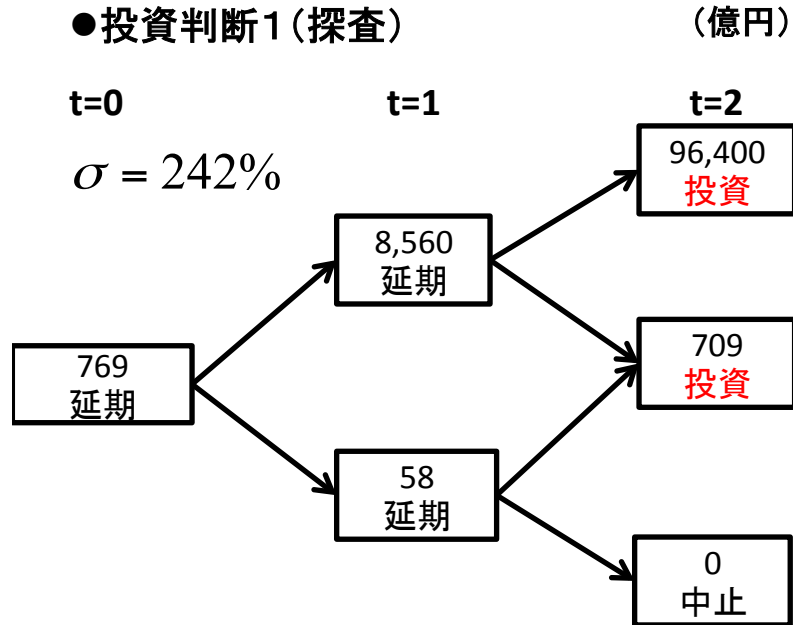
Fig. 採掘された鉍石 (Nautilus社HP)

# ROV結果 ケース1:(探査→環境調査+開発準備)

## ●投資判断1(探査)

t=0

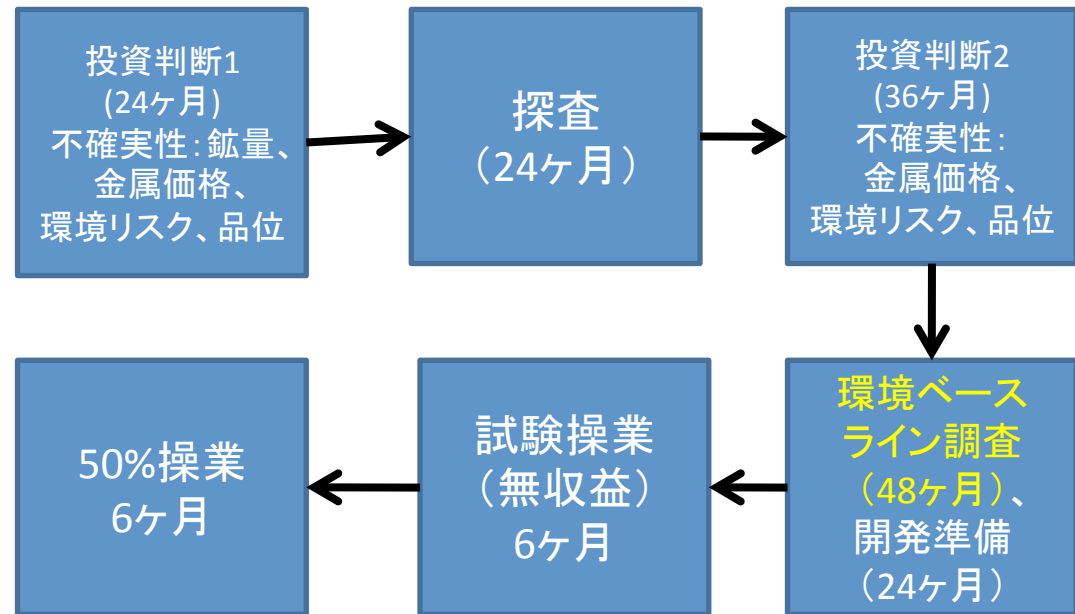
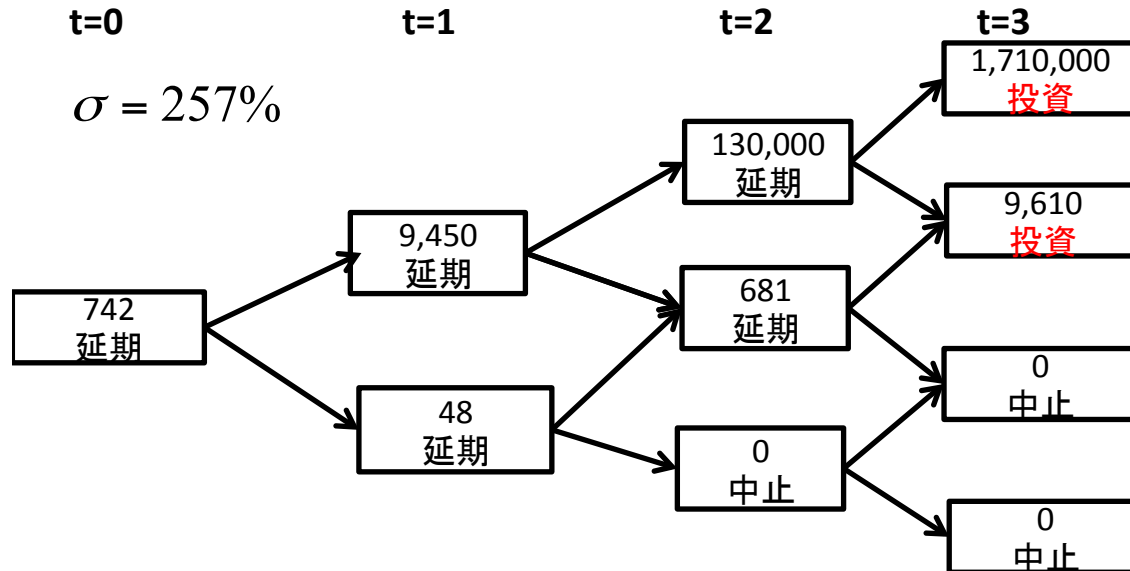
$\sigma = 242\%$



## ●投資判断2(環境調査+開発準備)

t=0

$\sigma = 257\%$



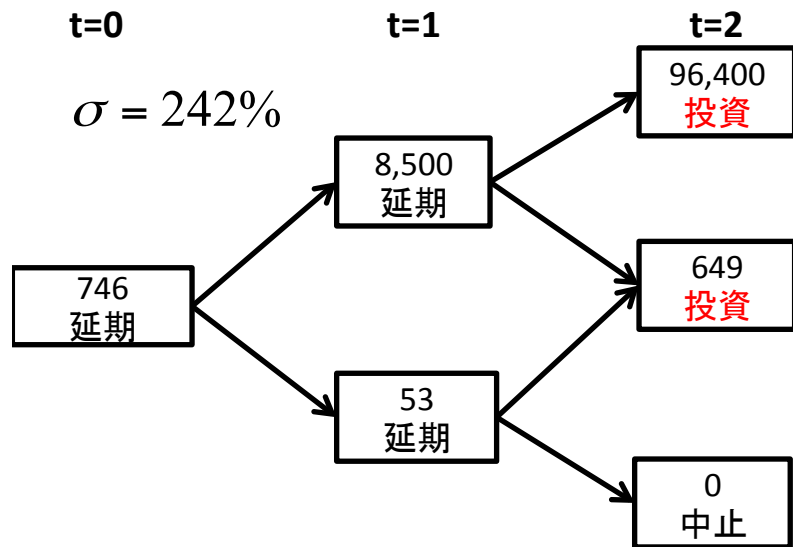
### ケース1結果

期待収益(現在価値)	億円	4,361
運転費用(p.a.)		116
環境リスク(p.a.)		675
探査コスト		60
環境調査費用		60
開発準備費用		262
NPV		405
事業価値		698
オプション価値		293

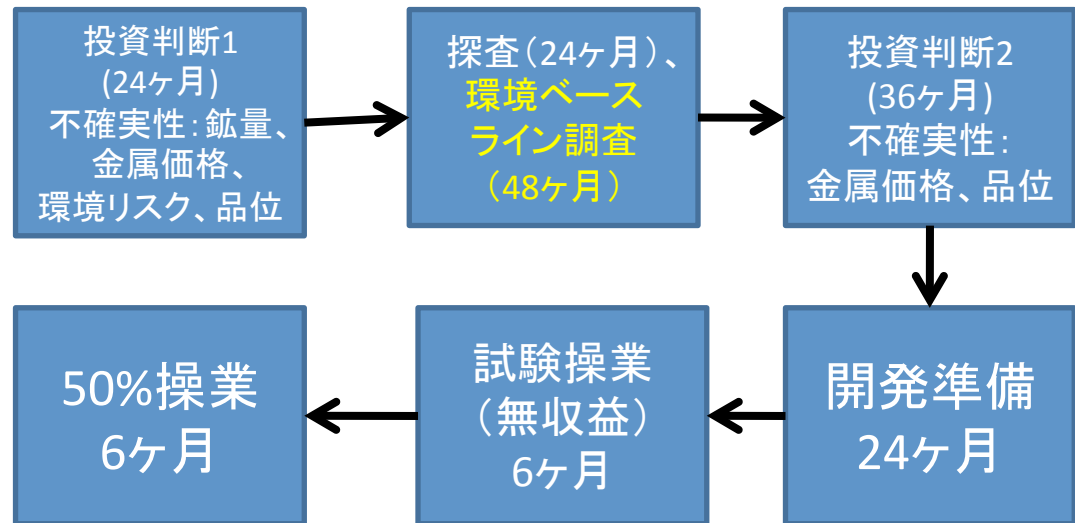
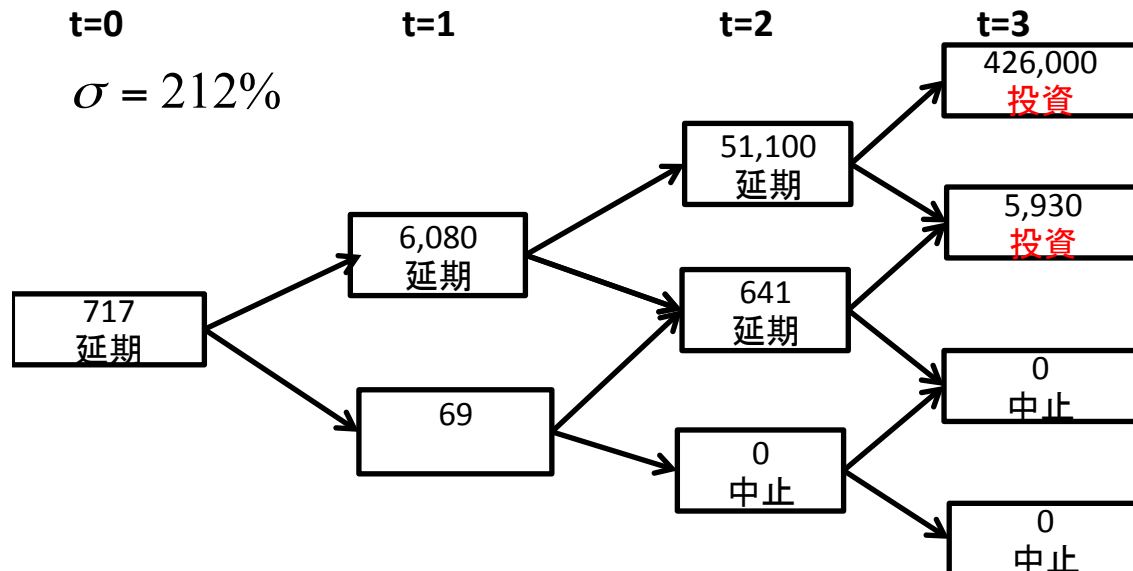
✓オプション価値はNPVに対して約72%程度存在する。

# ROV結果 ケース2: (環境調査+探査→開発準備)

## ●投資判断1 (環境調査+探査) (億円)



## ●投資判断2 (開発準備)



期待収益(現在価値)	億円	4,361
運転費用(p.a.)		116
環境リスク(p.a.)		675
探査コスト		60
環境調査費用		60
開発準備費用		262
NPV		416
事業価値		487
オプション価値		71

✓オプション価値はNPVに対して約53%程度で、オプションを設定する価値はある事が示唆される。

# 環境リスクの感度分析

金属資源獲得という意義を考慮すると、途中で中止しない方が望ましい。

必ず投資になるような環境リスクの条件を見つける為に、感度分析を行った。

ケース2のほうが、ケース1より投資になるパターンが多い。

ケース2の方が、より確実に事業を開始できる

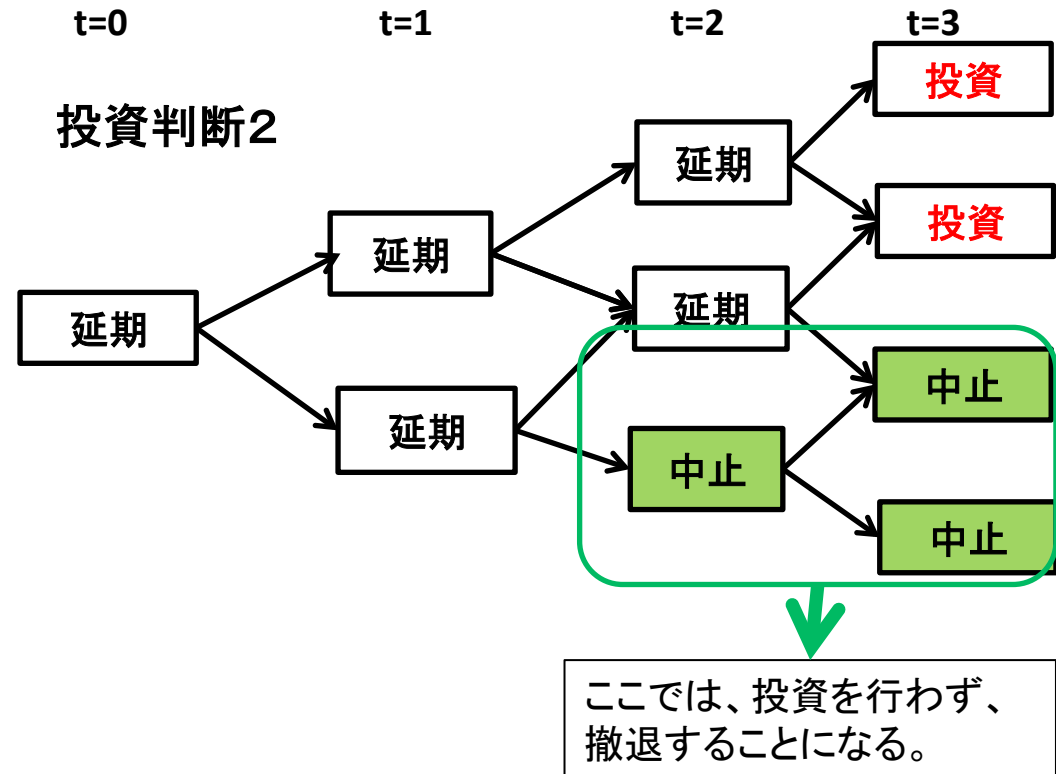


Table 必ず投資になるケース

環境リスク 感度分析	ボラティリティ(標準偏差)				
	25%	50%	100%	150%	200%
100	1 & 2	1 & 2	1 & 2	1 & 2	1 & 2
200	1 & 2	1 & 2	1 & 2	1 & 2	1 & 2
300	1 & 2	1 & 2	2	2	2
400	-	-	-	-	-
500	-	-	-	-	-
600	-	-	-	-	-
700	-	-	-	-	-

## 事業性評価考察

- ✓ モンテカルロDCFによるNPVを算出する事により、熱水鉱床開発の事業リスクが定量的に明らかになった。その値は期待値が416億円でボラティリティが446%である。
- ✓ 熱水鉱床開発の事業性評価には、NPVによる手法のみならず、不確実性も考慮できる評価手法であるリアル・オプション法も用いる意義が有る事が分かった。
- ✓ 環境リスクの感度分析を行ったところ、ケース2のほうがケース1より投資が実行される可能性が高く、熱水鉱床を確実に行うためには、ケース2のほうが優れていると考えられる。



# 結論

## 専門家アンケートによる環境リスク定量化

専門家アンケートとクロス・インパクト分析により、開発によって生じるハザードの大きさを定量化する事ができた。

## 持続可能性評価

包括的環境影響評価を行うことで、持続可能性の検討を定量的に行い、経済性と環境リスクの関係性を明らかにした。IIIによる評価が持続可能になるためには、開発によって被る深海の生態系の生息面積 $A_{original, 深海のかなり広い範囲}$ が約 $3.9 \times 10^6$  (ha)以下で、且つ、海洋全体の種数減少率 $s_{n, 海洋全体}$ が約 $1.0 \times 10^{-5}$ 以下でなければならない事が示唆された。

## 事業性評価

鉱量・金属価格・品位・環境リスクを不確実性として捉え、2段階の投資延期オプションを考慮したリアル・オプション評価を行ったところ、リアル・オプションを設定する価値が認められた。また、環境ベースライン調査を早期に行う(ケース2)ほうが、より確実に熱水鉱床開発を実行できることが示唆される。