

資源地質と探査の課題と展望

陸上探査と深海底探査



浦辺 徹郎

日本学術会議連携会員

東京大学大学院理学系研究科

「鉱物資源の持続可能性と資源問題への展望」
(平成20年1月25日 東大 小柴ホール)

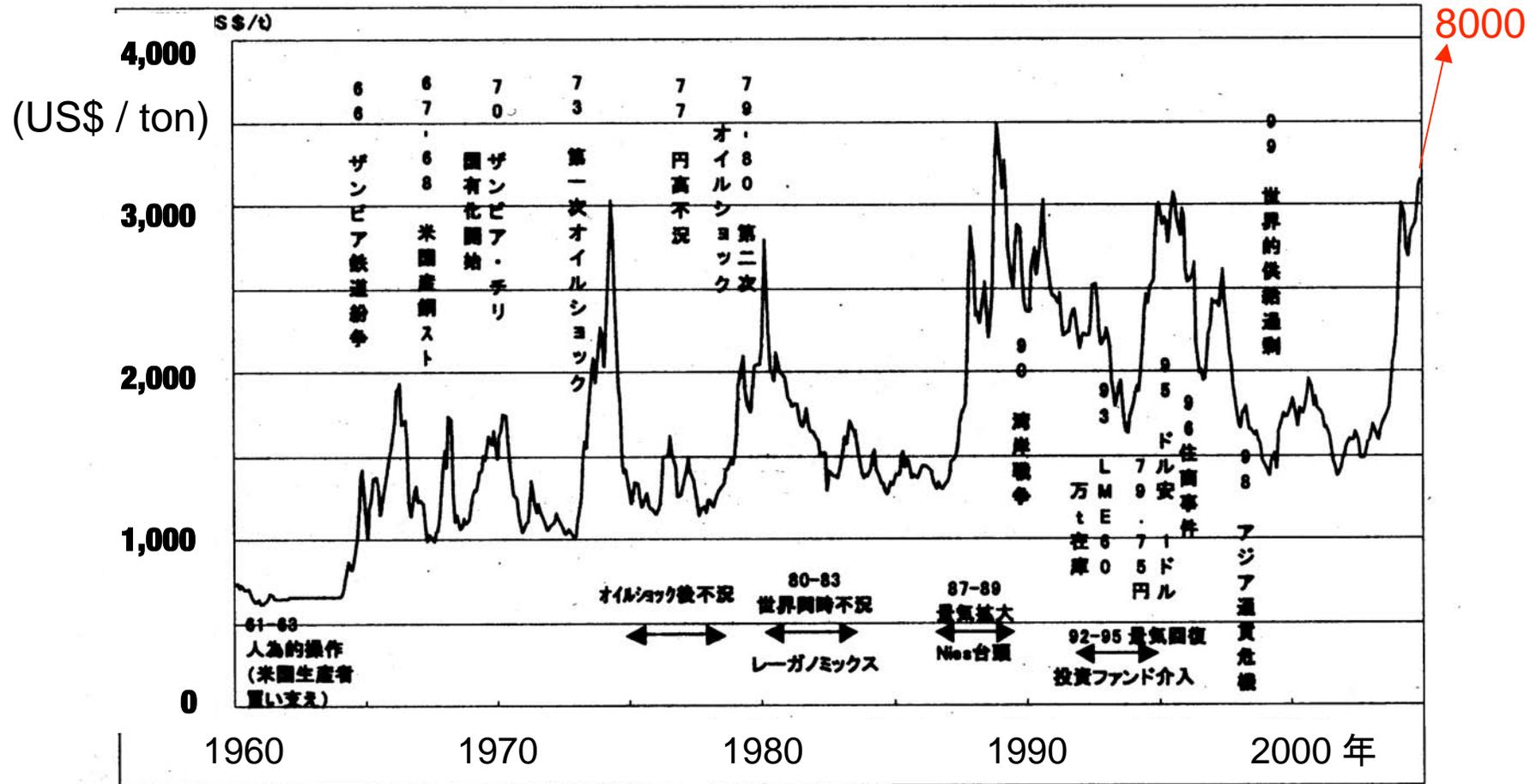
本日の要旨

1. 「上流」から発生する、資源の供給障害：
 - 現在、資源問題はこれまでと異なった、新しい局面に入ったのか？
2. 資源の安定供給を妨げる新たな要因：
 - 何が問題となっているか、どこに問題があるのか？
 - ベースメタルとレアメタルの違い
3. 陸上探査と深海底資源の開発：
 - 深海底資源の開発は問題の解決につながるのか？
 - その現状と我が国の方針のあり方について
4. まとめ

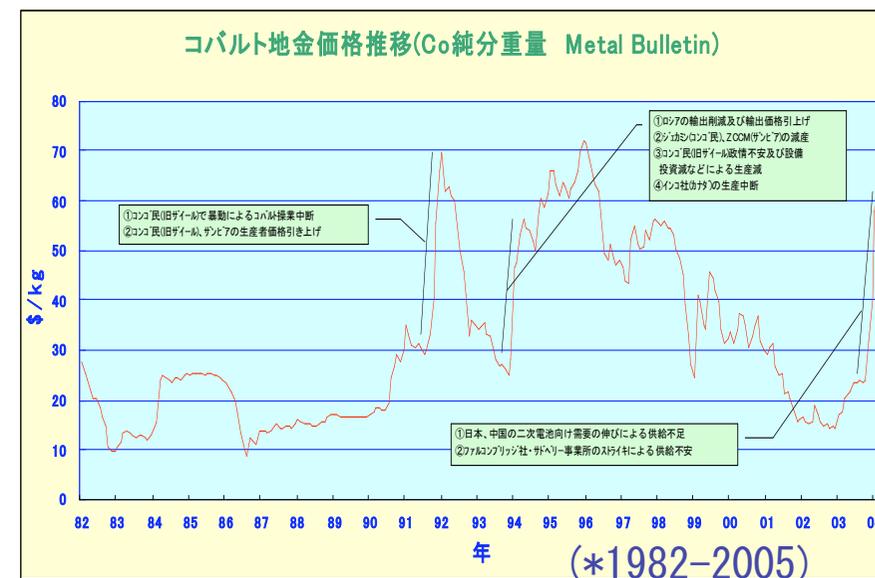
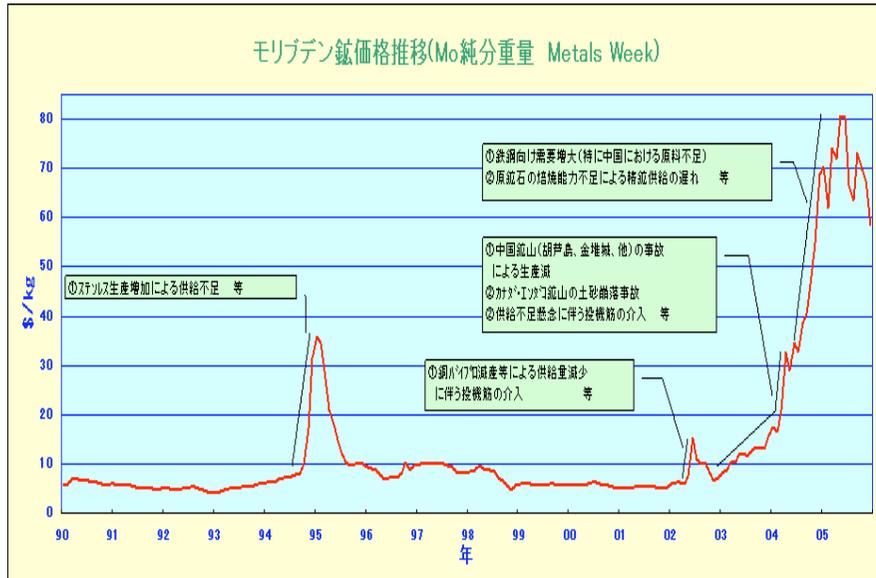
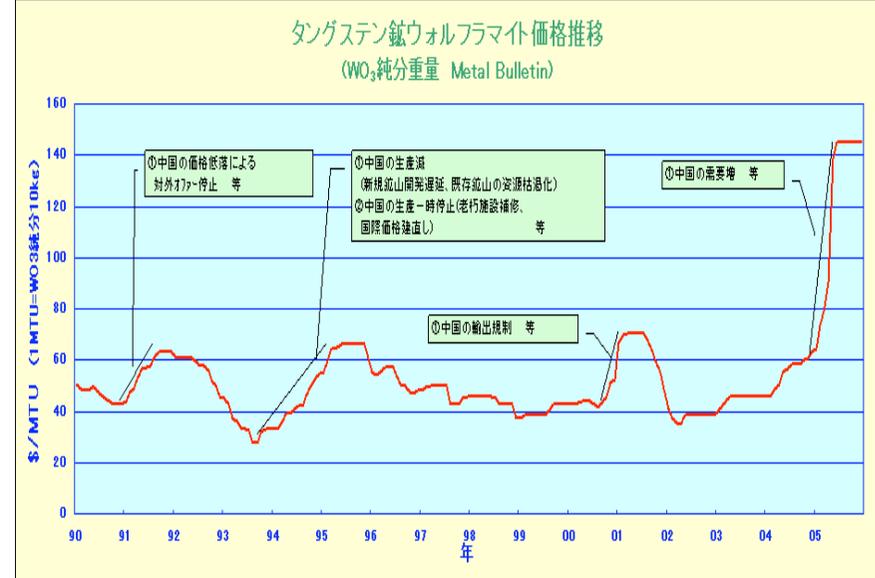
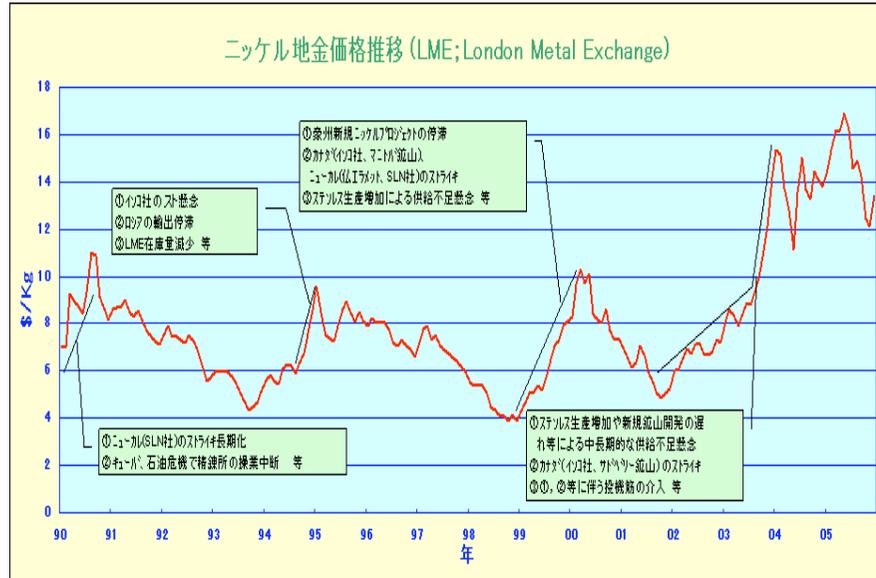
1960年以降の銅価格とその原因

これまでは、内乱、鉱山スト、鉱山の国有化などが価格上昇の原因であった

① 銅のLME価格推移 (月平均)



レアメタル (Ni, Mo, W, Co*) 金属価格 (1990-2006)



児嶋秀平(2002)「鉍物資源安定供給論」

産学官各界の自発的な参加者230名がインターネットを介して議論

- ◆ 我が国鉍業政策の長年のキーワード「**鉍物資源の安定供給**」
 - 定義：通常の経済活動で許容される価格変動の範囲で、必要な量の鉍物資源が国内産業に持続的に供給されている状態。

- ◆ 非鉄金属資源の供給障害の発生要因
 - 偏在性(政治・経済システムが不安定な国に偏在。価格が変動しやすい。)
 - 寡占性(非鉄メジャーの合従連衡による寡占化が加速されている。)
 - 代替困難性(各鉍種に特有の性質に基づき利用されている。)
 - 希少性(ベースメタル、レアメタルともに地殻存在度が低い。)
 - 開発投資のフィージビリティ、アクセシビリティが低い。
 - 「国家所有の原則」下にある(農産品、工業製品と異なる。)

- ◆ **結論**: マーケットが機能している限り、短期的以外の供給障害は発生しない
 - 供給障害の状態には価格高騰と量的途絶の2側面があるが、市場取引がなされているので、両者は供給障害の不可分な側面

生産国・わが国の輸入先は極端に偏在

鉱種	主要生産国 (2005年)	主要輸入先 (2005年)	中国の動向	備考	日本のシェア
①ニッケル (備蓄)	露22% 加15% 豪14%等	インドネシア(44%)、フィリピン (14%)、ニューカレドニア(13%)等 から調達	ステンレス生産の拡大を受け、輸 入が急増。海外調達を積極化。	・LME上場金属 ・我が国企業による探鉱開発あり。	1.中国、2.日本 3.米国
②クロム (備蓄)	南ア43% インド19% カザフ19%等	南ア(49%)、カザフ(26%)、インド (9%)から調達。	輸入量は年々拡大。	フェロクロム生産では日本企業が 南ア進出例あり。	
③タングステン (備蓄)	中国90%	<u>中国からの輸入が79%。</u>	増値税還付率を削減し、国内需 要を優先。	中国の付加価値政策(鉱石→中 間製品へ)で、鉱石としての輸入 は激減。	1.中国、2.米国 4.日本
④コバルト (備蓄)	コンゴ31% ザンビア17% 豪13%等	加工後の製品を、フィンランド、豪 州、カナダ等から調達	中国国内の二次電池需要が拡大 し、コンゴ等からの輸入が増加。	・銅及びニッケルの副産物。 我が国企業により探鉱開発あり (ニッケル)。	1.日本、2.西欧
⑤モリブデン(備 蓄)	米34% チリ27% 中国17%等	チリ(45%)、中国(15%)等から調 達	中国は輸出国の一つ。	・多くは銅の副産物。 ・我が国企業による探鉱開発あり (銅)。	1.西欧、2.米国 3.日本
⑥マンガン (備蓄)	南ア22% 豪14% ガボン13%等	南ア(47%)、豪州(23%)、中国 (19%)から調達。なお、中間製品 のシリコマンガンは中国に依存。	輸入が急拡大中。	・マンガン鉱石確保で、南ア・サマ ンコール社との提携あり。 ・シリコマンガン生産で中国進出例 あり。	1.中国、 5.日本
⑦バナジウム(備 蓄)	南ア42% 中国34% 露21%等	南ア(49%)、中国(25%)から調達	国内は大手2社で9割の生産。 (詳細は不明)	フェロバナジウム生産で南ア進出 例あり。	1.西欧、2.米国 4.日本
⑧インジウム	中国55% 日本15% 加11%等	輸入の7割が中国。また、亜鉛の 海外鉱から国内製錬所で抽出。	詳細は不明	・亜鉛の副産物	1.日本(60%) 2.米国
⑨レアアース	中国93%	<u>輸入の9割が中国</u>	内蒙古、華南で生産		1.中国、2.日本

(出典) 主要生産国:WBMS2006、MCS2006 主要輸入先:日本貿易統計

(鉱業分科会資料4)

中国をはじめとするBRICsの台頭

ベースメタルに関しては、わが国の相対的消費量は低下しつつある。しかし、ハイテク技術にかかわるレアメタルについては、わが国の消費量が世界の過半を占めるものもある。

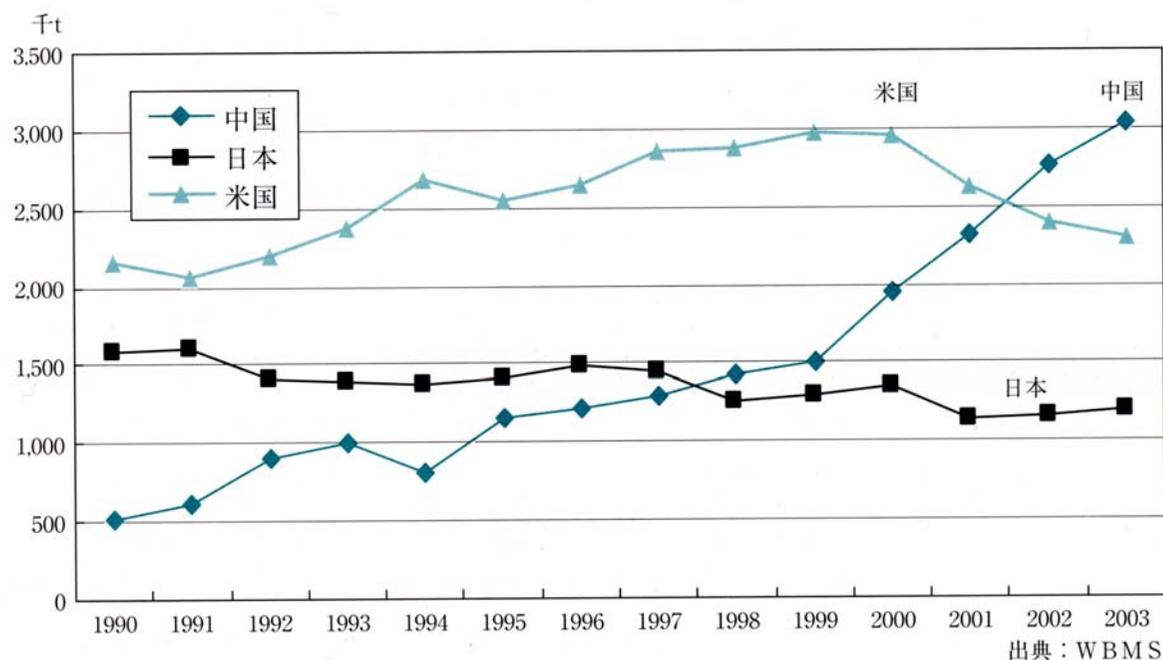


図3 銅消費上位3か国の進展

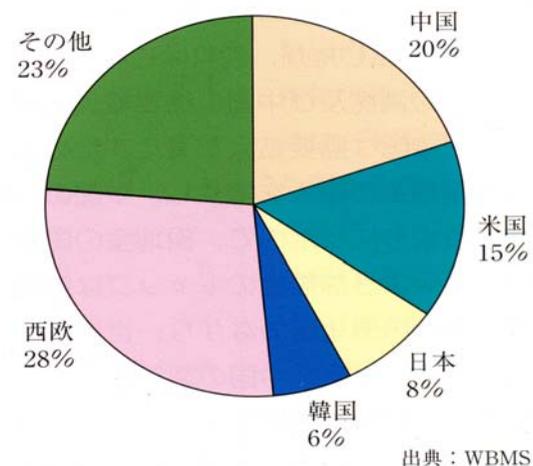


図2 2003年世界の銅消費割合

国としての問題意識 (鉱業分科会資料より抜粋)

- 中国をはじめBRICsにおける原料資源消費量の拡大を受け、原料資源の国際価格が高騰。一時的なものではなく、構造的な変化がその背景に。
- レアメタルは、自動車・IT製品をはじめとする高付加価値・高機能製品の製造に必須の素材であり、その安定供給は、我が国産業競争力の維持・強化の観点から極めて重要。
- 特定国へ極度に偏在するレアメタル等、国際的な需給逼迫や供給困難化の可能性がある。使用実態を踏まえつつ、鉱種の特性に応じた安定供給確保のための取組が必要。

個人としての問題意識 ベースメタルも高騰しているが...

- レアメタルとベースメタルの資源問題は本質的に差がないか？
- わが国が独自にやらなくてはならないことは何か？
- 海底資源は、この問題の長期的対策たりうるか？

鉱物資源の供給におけるリスク：まとめ

◆資源の偏在。

中国はアンチモン、ビスマス、カドミウム、鉛、マグネシウム、モリブデン、希土類、錫、タングステン、バナジウム、イットリウム、亜鉛、イルメナイトの埋蔵については世界第1位、銀、インジウムが第2位、銅、金、リチウムが第3位。

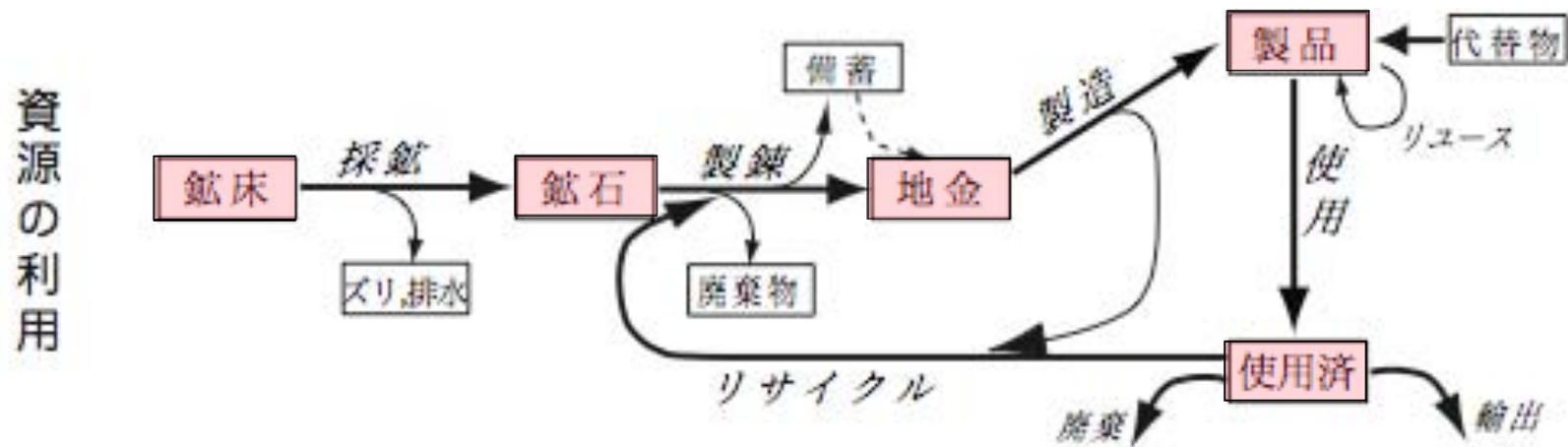
◆資源大国中国の自国資源保護政策と輸出規制。(資源ナショナリズムの台頭)

◆資源生産メジャー企業による寡占。

M&Aによる主要7社の銅鉱石生産シェアは33% (1990)から、47%(2004)に増大。



鉍物資源の供給・リサイクルにおけるリスク



リスク

- ・供給障害の発生
- ・地域の偏在性
- ・資源の希少性
- ・生産者の寡占
- ・資源ナショナリズム
- ・パイプロダクトとしての産出
- ・資源の枯渇
- ・探鉱投資リスクの増大による探査からの撤退

- ・環境汚染
- ・鉍害
- ・坑内水処理
- ・環境負荷
- ・住民の反対

- ・製錬所への鉍石供給阻害
- ・環境負荷物質の発生
- ・金属価格の変動
- ・製錬業の不振によるリサイクル中断

- ・消費量の変化
- ・市場価格の変動
- ・投機資金の流入

- ・リサイクルのコスト増加
- ・産業廃棄物規制の強化(往々にしてリサイクルを制限)

- ・代替物の登場(探鉱投資のリスクを増す)

自然要因によるリスク |||社会要因によるリスク

(浦辺,2007)

今回の価格高騰は特別な事態か？

— 供給障害は発生しないとする立場 —

- これまで「狼少年」は何回も叫び続けた。
- Meadowsほか(1972)「成長の限界」(ローマクラブ刊)
 - 近い将来人口の急増に見合うだけの「資源」が不足するため、永遠に成長を遂げることはできない。
 - 金は1981年、銀と水銀は1985年、亜鉛は1990年に枯渇する
- しかし、資源は枯渇しなかったばかりか、上昇が予想された金属の価格(Cr, Cu, Ni, Sn, W)は10年後全て下落。
 - 消費量の指数級数的増加がなく、線形的増加に留まった。
 - 上流：消費を上回る速度での、新たな資源の発見。
 - 中流：効率の良い原料の使用、代用品
 - 下流：リサイクル、リユース

増大する鉱床発見と開発の困難性 — 資源の枯渇は「当然」とする立場 —

■ 地表に露頭のある鉱床は無くなりつつある。今後はすべて潜頭鉱床を発見しなければならない。(1930年まで銅鉱床はすべて50m以浅、1990年には最深1700m)

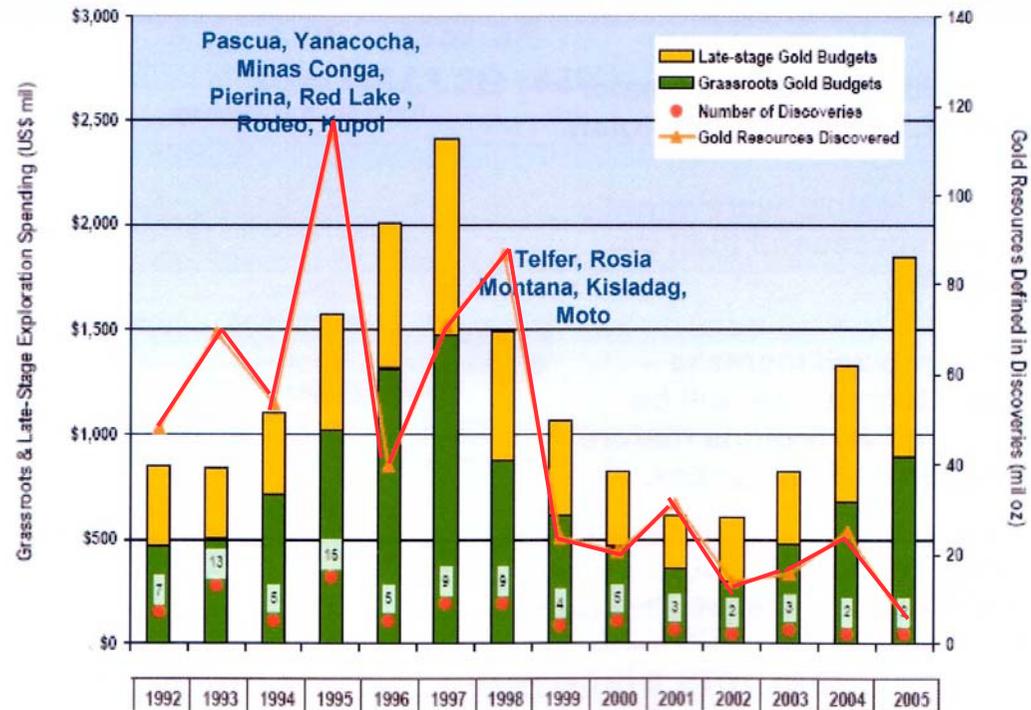
■ 鉱山の開発は、長期にわたる閉山後の環境保全経費を勘案しなければならない。

■ 鉱山の開発はリスクが大きく、リターンが長期的にかかるので、資金調達が難しくなっている。

■ 資源は必要になっても開発にリードオフタイムが必要で、急には供給できない。

最近、金鉱床の発見率が3/1,000から3/10,000に下がっている S. McIntosh (Rio Tinto) R. Krmarov (Barrick Gold), 2007 at AMIRA 7th Exploration Managers Conf.(2007)

Fewer Discoveries and Increased Costs



Source Data: MEG Corporate Exploration Strategies 2006

中期的にはどちらが正しいのか？

— ベースメタルとレアメタルで違いがあるのか？ —

- ・ 現在、主要ベースメタルや一部貴金属にはマーケットが存在し、生産量・ストック量などの情報が共有されているため、供給障害は未然に防止されている。
- ・ しかし、レアメタルは経済規模が小さいためマーケットが存在せず、生産・消費の情報がきわめて限られている。
 - インジウムの可採年数(=埋蔵鉱量÷生産量)は8年(USGS Mineral Com. Data 2006)
 - 狼少年や投資ファンドや資源ナショナリストの跳梁跋扈を許している。
 - 我が国が、ベースメタルのLMEのような、レアメタルのマーケットを作るべきでないか。備蓄倉庫機能も持たせてはどうか？

レアメタル資源の長期的対策

- レアメタル資源探査の特殊性

- レアメタルは他の非鉄金属の副産物として産する(例:InはZn鉱石の、Dyは軽希土鉱石の約1000分の1の含有量)。主要金属の品位が下がると、生産中止となることがある。
 - ・ (世界最大のIn生産者であった豊羽鉱山は2006年閉山)
- レアメタルは経済規模が小さいため、非鉄メジャーや国内鉱山会社が開発対象としないことがある。
- 微量元素の回収にはコストがかかるうえ、他の有害元素の処理をどこで、どのようにするのか検討が必要。
- 技術開発により消費が急激に増減すること、代替物質の技術開発努力は、探査へのインセンティブを下げる。

中間的結論

- レアメタルにはLMEなどのきちんとしたマーケットが無く、価格決定のメカニズムが分かっていない。また、生産統計・工業統計がない。
- レアメタルには、それぞれ地質学的な問題があり、それぞれ金属種毎にきめこまかな対応が必要である。まず、上流の地質・資源情報の整備が求められる。
- 大消費国であるわが国が対策を立てなければ、どこからも情報が来ない。レアメタル資源は、わが国にあった、まな板の上に載るサイズの問題である（逆に、資源メジャーには小さすぎる問題）。
- レアメタル資源は、多くの企業にとって、経験や勘が働かない鉱種。情報量の多さが、投機的資金の流入を防ぐ。流通その他の情報の主体性を握ることを図らなければならない。
- すべての局面、場所場所で、智恵を出し合うことが安定供給につながる。
- 人材の育成が大事（しかし、大学の資源部門はほとんど絶滅している。）
- **結論の結論：国家としての資源戦略を持つ！**

深海底資源は中長期対策たりうるか

- 海底熱水活動と海底熱水鉱床
- 海底熱水鉱床の資源としての重要性
- 開発に当たっての注意点
- コバルトリッチ・マンガンクラストとの比較
- その他

海底熱水鉱床

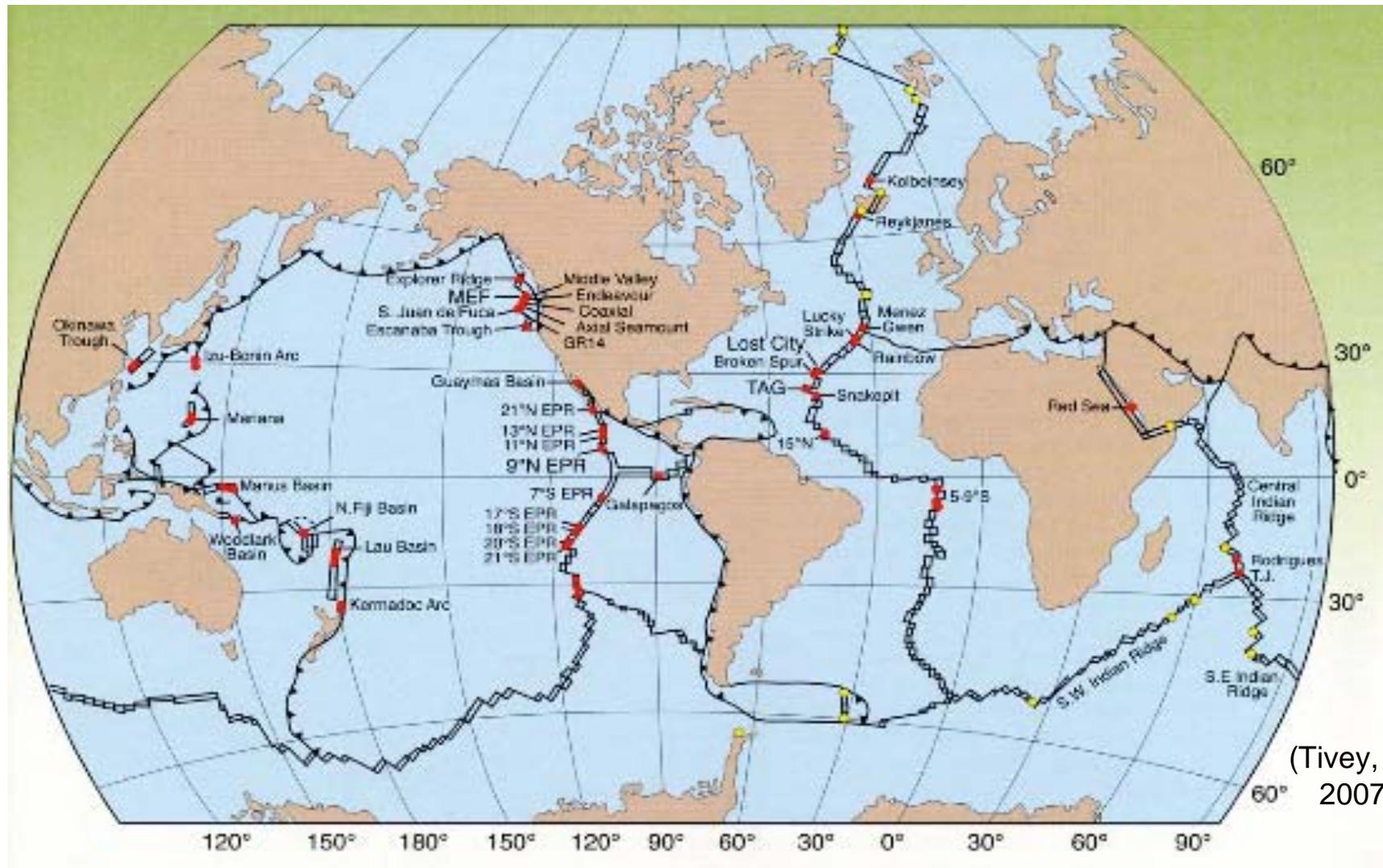
- ・ 1978年に最初の発見。現在世界中の海底に340カ所知られている。
- ・ 水深100m～4000m。多くは1100～2600mの深海底。
- ・ 地球の熱放出の5%をになっている主要な現象。
- ・ 主として、海底火山に伴う。またマントルに達する断層に沿うものも。

- ・ 高温： 温度は数℃～最高407℃。通常270℃～350℃。
- ・ 還元的：熱水中には硫化水素が含まれる→金属が硫化物として沈殿
- ・ 重金属に富む：同様の成因でできた鉱床に火山性塊状硫化物鉱床

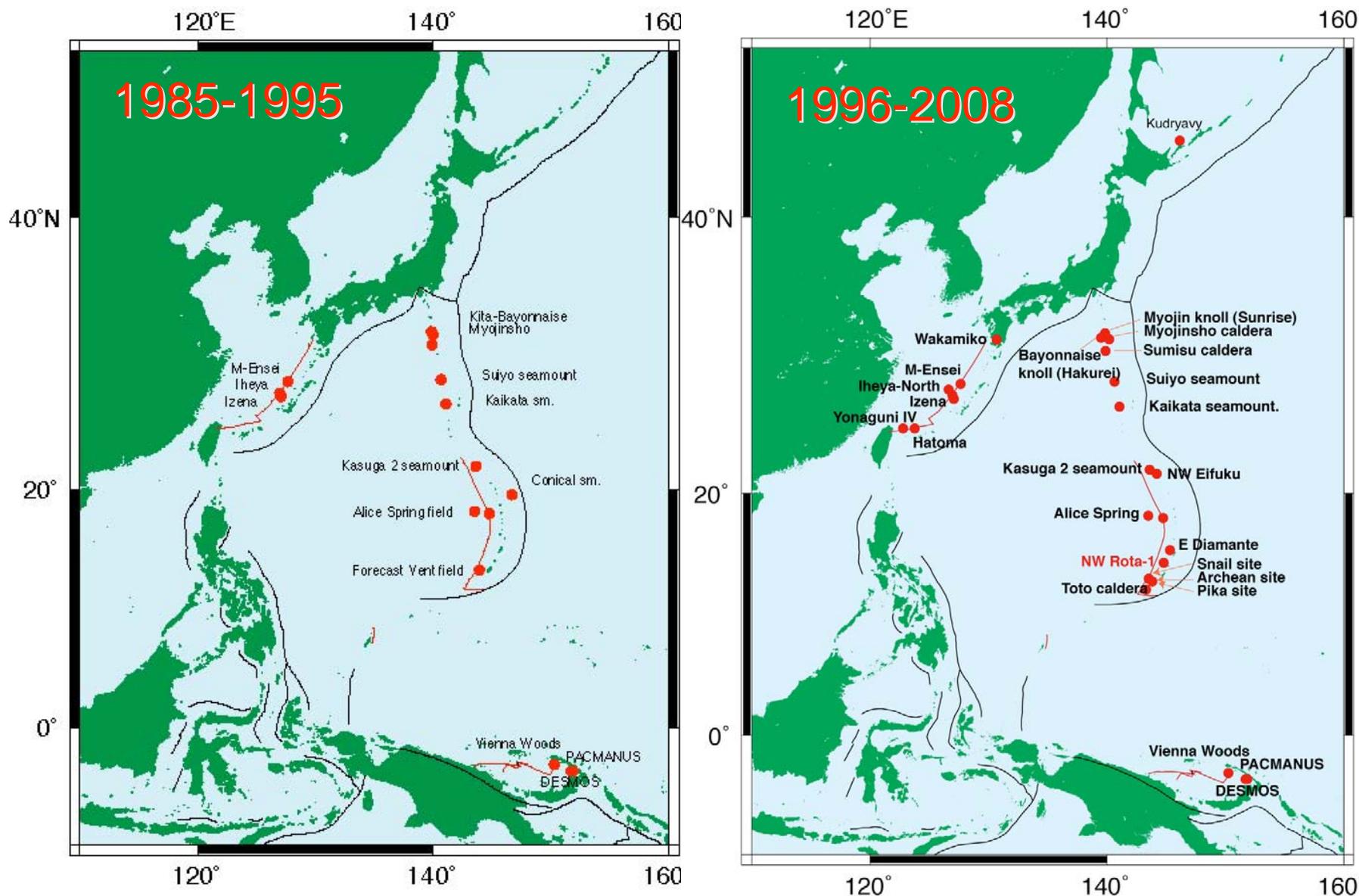
- ・ 化学合成⇨熱水中の高い濃度の水素，硫化水素，メタンなどのガスにより微生物による化学合成が行われている(地下生物圏)

世界の海底熱水サイト

1978年ガラパゴスにおける最初の発見以来、主として海嶺で研究が行われてきた。

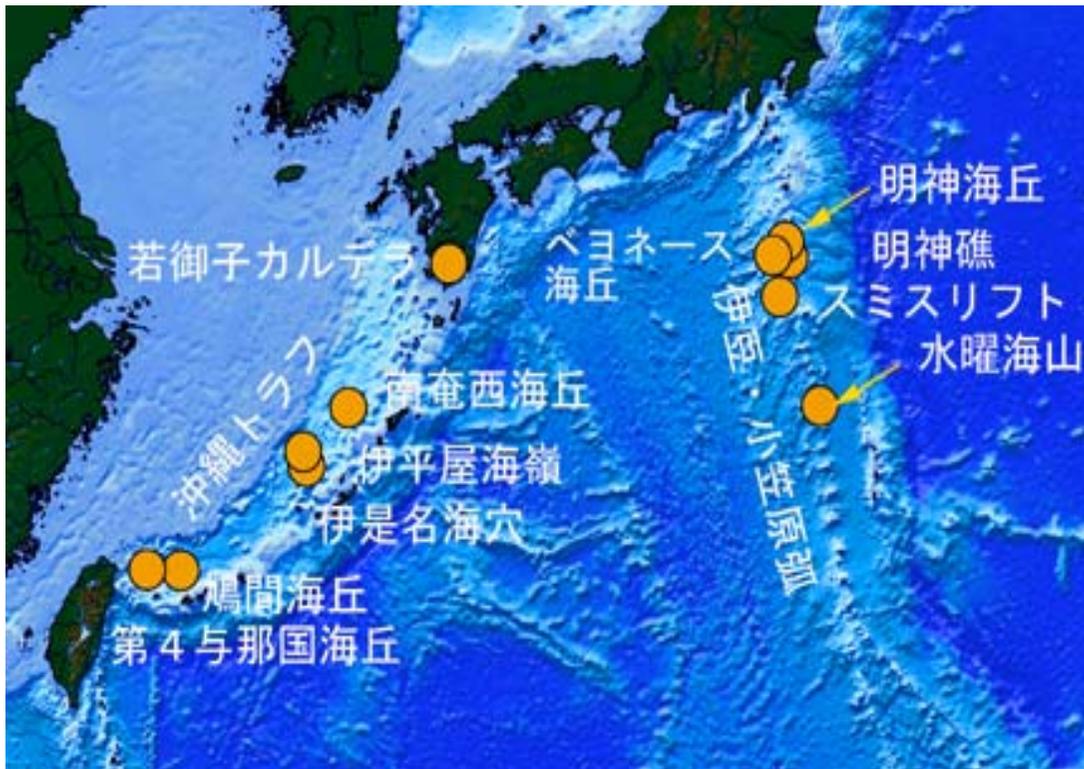


西太平洋の海底熱水域



(Ishibashi and Urabe, 1995)

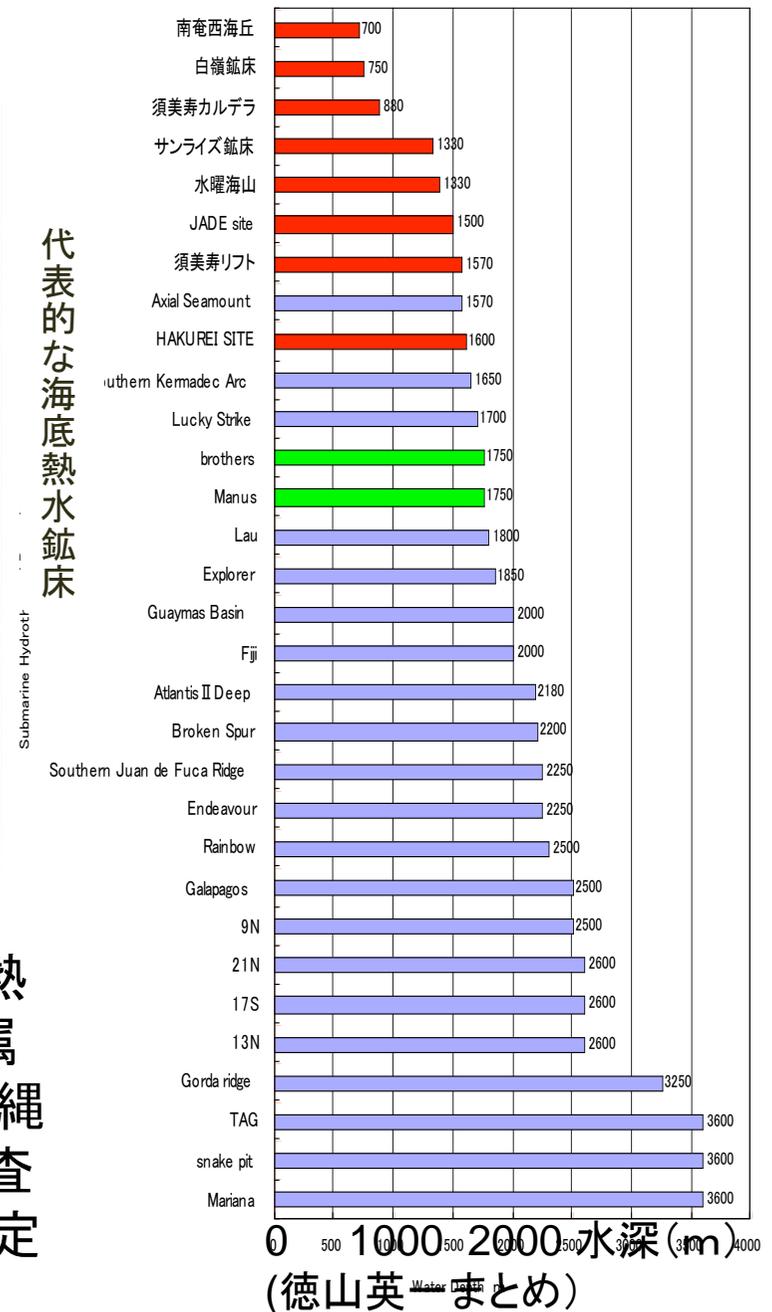
日本近海の海底熱水鉱床



(飯笹, 2006)

日本の経済水域内には、世界最大級の海底熱水鉱床活動が数カ所確認されている。旧・金属鉱業事業団が資源調査として1995年から沖縄トラフで、2000年から伊豆・小笠原海域で調査を開始したが、現在は休止中。20年度再開予定

代表的な海底熱水鉱床の賦存水深



日本周辺の大規模熱水鉱床

- 水曜海山は地球科学、化学、微生物学的に見ても、最も情報がある熱水域であるが、活動を開始してから数十年しか経って居らず、鉱石量はきわめて限られている。
- 皮肉なことに、地球科学的データの多い鉱床には小規模なものが多い。潜水艇による調査が無い、または限られており、ボーリングもなされていないものに、より大規模と思われる熱水鉱床がある。
- それらの大鉱床にはJOGMEC/DORDの調査で発見されたものが多い。
 - サンライズ鉱床（明神海丘カルデラ）
 - 白嶺鉱床（ベヨネーズ海丘カルデラ）
 - HAKUREIフィールド（伊是名海穴）
- 西太平洋の海底熱水鉱床は、中央海嶺のそれに比してAu, Ag, Pb, Ba, As, Sb, In, Geなどの貴金属・レアメタルに富んでおり、トン当たりの価値が飛躍的に高い。

埋蔵鉱量Reserveと資源量Resource

総鉱物資源量	既知鉱物資源量	<p>1. 埋蔵鉱量 (reserve)*</p> <p>a. すでに見つけてあり、かつ現在の諸条件の下で経済的に利用可能な鉱床量—埋蔵鉱量</p> <p>b. 上に準ずるが、特に経済性の点で限界すれすれのもの—准埋蔵鉱量</p>
	潜在鉱物資源量	<p>2. 鉱物資源量 (resources)</p> <p>a. すでに見つけてあるが、低品位その他の理由で、現在では利用し得ない鉱床量—既知経済限界下鉱物資源量</p> <hr/> <p>b. 未知の地域にその存在が地質学的に期待される鉱床に関する量—潜在鉱物資源量</p>

*実際にはカットオフ品位以下のものを除外することが多い。

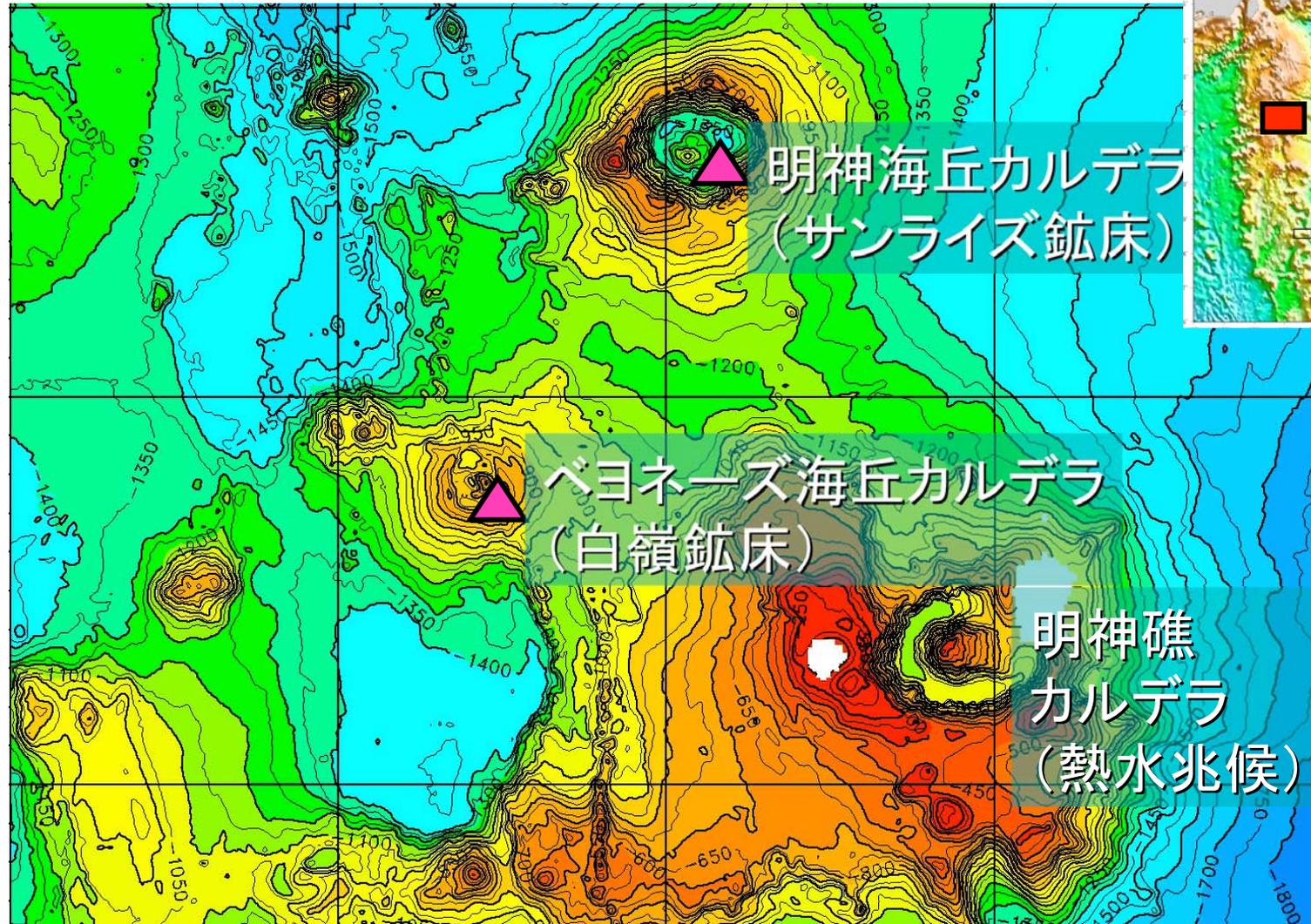
実質資源量 = 埋蔵鉱量 × 採鉱実収率 (採掘した粗鉱量 / 計画上の粗鉱量)
 × 選鉱・製錬過程の実収率 (黒鉱では60-90%)

伊豆島弧北部の熱水鉱床群

32°10'N

32°00'N

31°50'N



明神海丘カルデラ
(サンライズ鉱床)

ベヨネーズ海丘カルデラ
(白嶺鉱床)

明神礁
カルデラ
(熱水兆候)

139°30'E

139°40'E

139°50'E

140°00'E

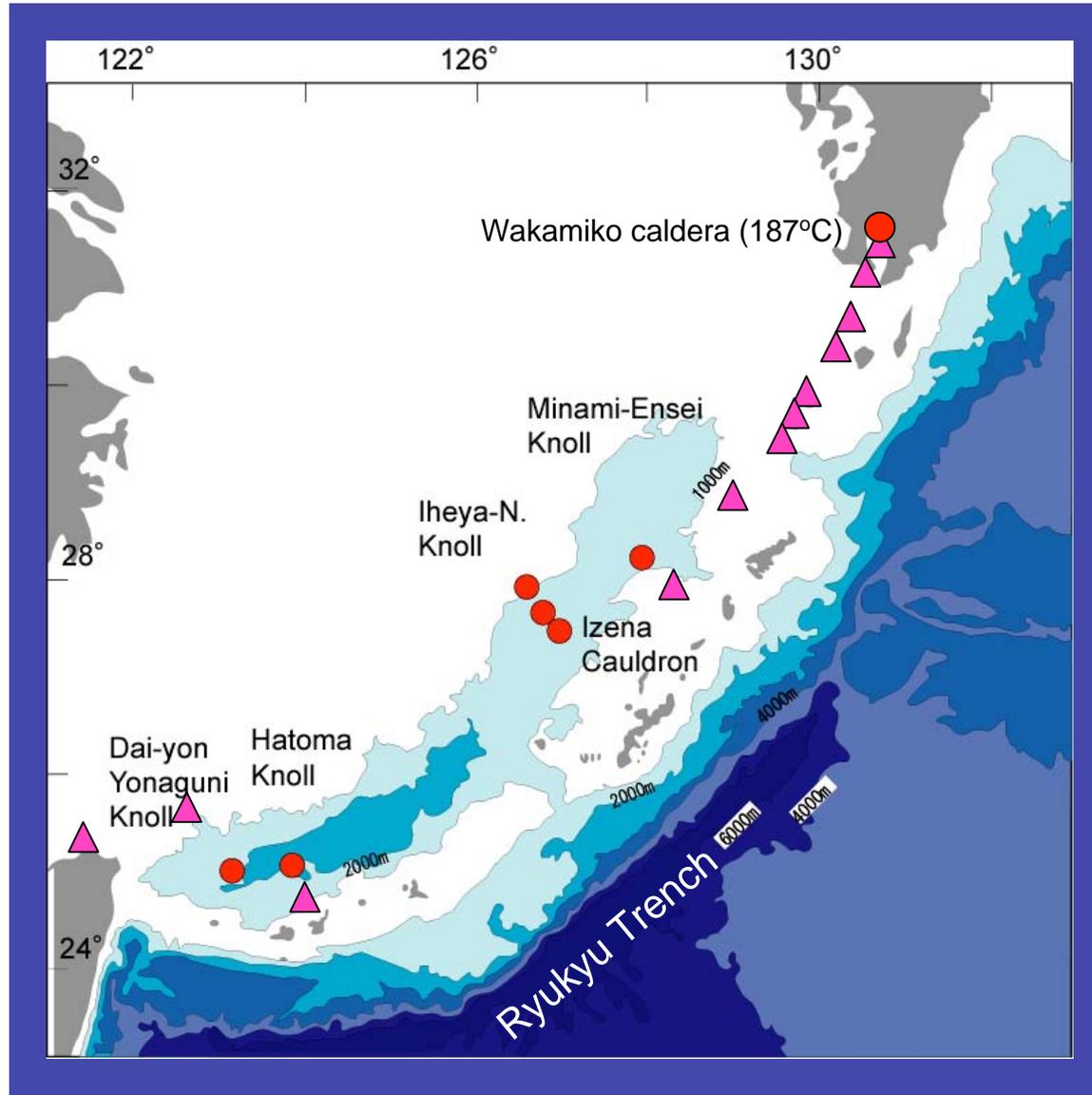
140°10'E

沖縄トラフ

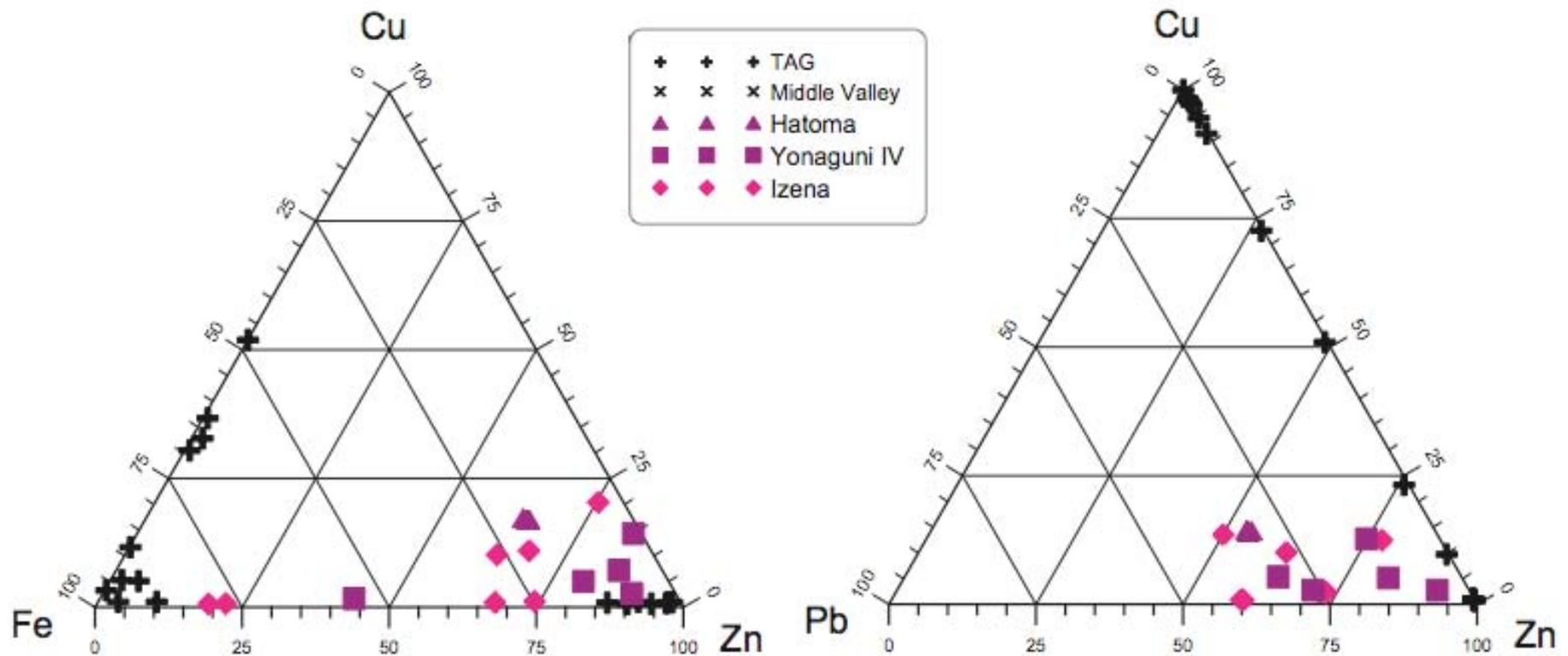
沖縄トラフには6つの熱水活動が存在する:

- 第4与那国海丘
- 鳩間海丘
- 伊平屋北 および 伊平屋
- 伊是名海穴 (カルデラ)
(JADE & Hakurei サイト)
- 南奄西海丘

琉球の島弧火山 (▲) は琉球海溝と平行に伸びている。その裏側(大陸側)に背弧海盆である沖縄トラフがある。



中央海嶺と島弧の熱水鉱床の金属比



海底熱水鉱床の主要金属含有量

海 域	銅 [%]	亜鉛 [%]	鉛 [%]	鉄 [%]	銀 [ppm]	金 [ppm]
ガラパゴス海嶺	4.5	4.0	0.04	32.6	46	0.34
東太平洋海膨 (北緯 21 度)	0.8	32.3	0.32	19.2	159	0.08
東太平洋海膨 (北緯 13 度)	7.9	10.8	0.07	23.9	62	0.31
ファンデフカ海嶺 / 南部	1.5	38.6	0.14	16.9	182	<0.1
ファンデフカ海嶺 / Megaplume	0.2	11.3	0.75	19.6	436	0.30
ファンデフカ海嶺 / 中軸部	0.9	24.3	0.18	9.9	207	2.50
エクスプローラ海嶺	3.6	5.0	0.06	30.0	99	0.63
ゴルダ海嶺	1.0	23.3	7.40	24.6	401	<0.2
グアイマス海盆	0.2	1.4	0.52	7.8	74	0.14
大西洋 TAG 海域	0.1~2.7	1.1~4.5	0.10	17~36	21~150	1.6~4
沖縄トラフ (伊是名海穴)	4.7	26.4	15.30	5.5	1645	4.90
七島・硫黄島海嶺 (明神礁)	2.1	36.6	6.08	2.5	260	1.62
七島・硫黄島海嶺 (水曜海山)	12.6	20.8	0.84	15.7	203	28.90

Koski, R.A.: Polymetallic Sulfides in the Pacific Ocean (1990)

海底熱水鉱床の資源開発について

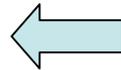
- 日本のEEZは、海底熱水鉱床に関して、世界で最も資源量(resource)が大きいことが推定される。また日本の熱水鉱床は貴金属およびレアメタル資源としてポテンシャルを持っている。
- 陸化したこのタイプの鉱床は、世界のZn, Pbの1 / 4程度を産する、主要資源である。
- しかし現在の所、いずれも資源量しか分かっておらず、埋蔵量(reserve)とするために、継続的な調査が必要。キーは稠密ボーリングによる、深さ方向のデータ。埋蔵量の調査は、国の支援が不可欠である。
- 採鉱法、揚鉱法、環境汚染対策、製錬法など、経済性を判断する前に確立すべき技術開発が多い。しかし、鉱石の価値が高く、水深が浅いことは、大きな利点。

資源の探査

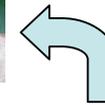
地質情報の
獲得



この繰り返し
いつまで
可能？



終掘・
環境修復

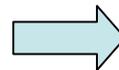


地表調査
物理探査
有望地発見

鉱山開発
採鉱/選鉱



ボーリング
調査

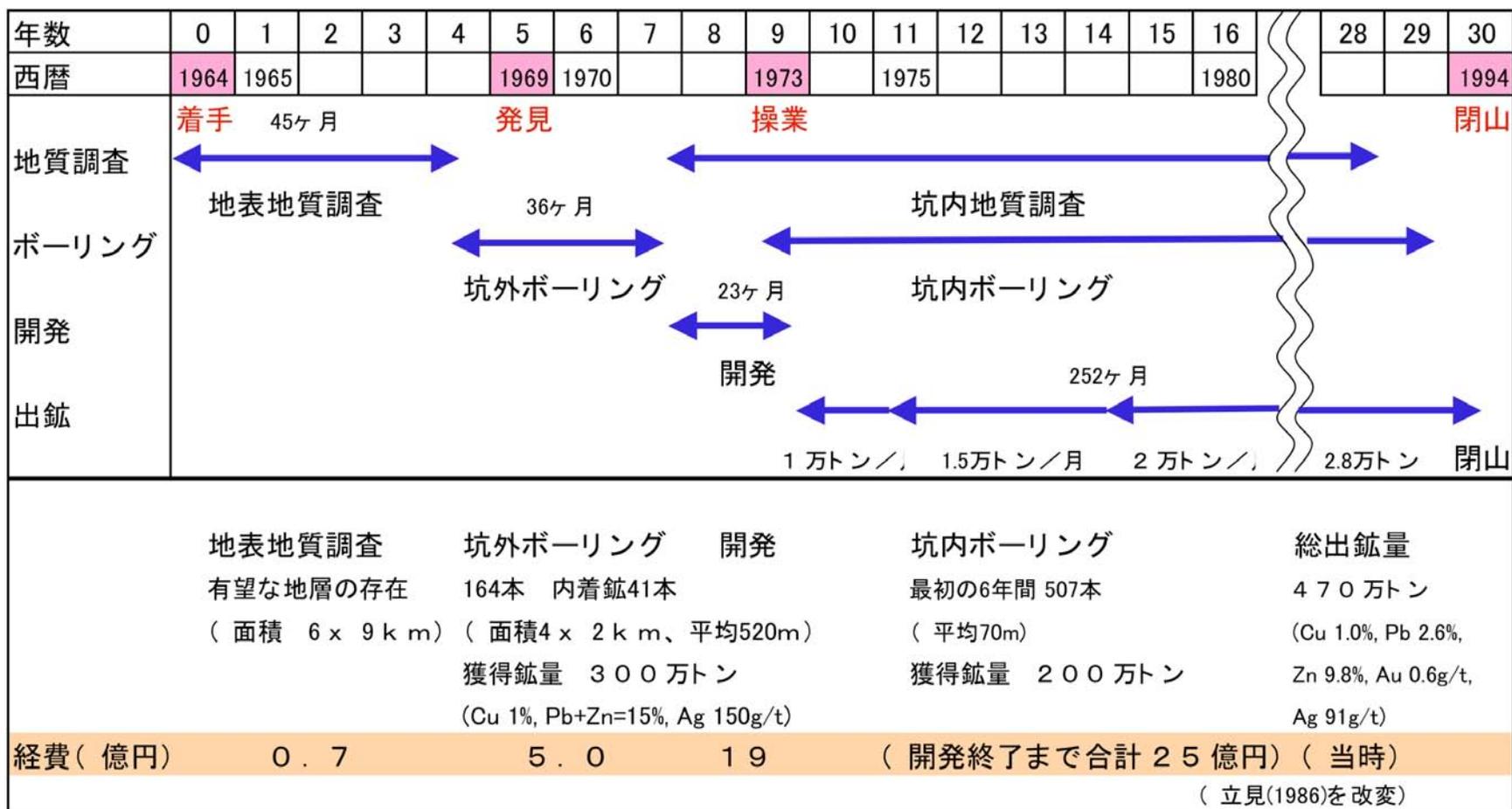


鉱床発見！
鉱量獲得

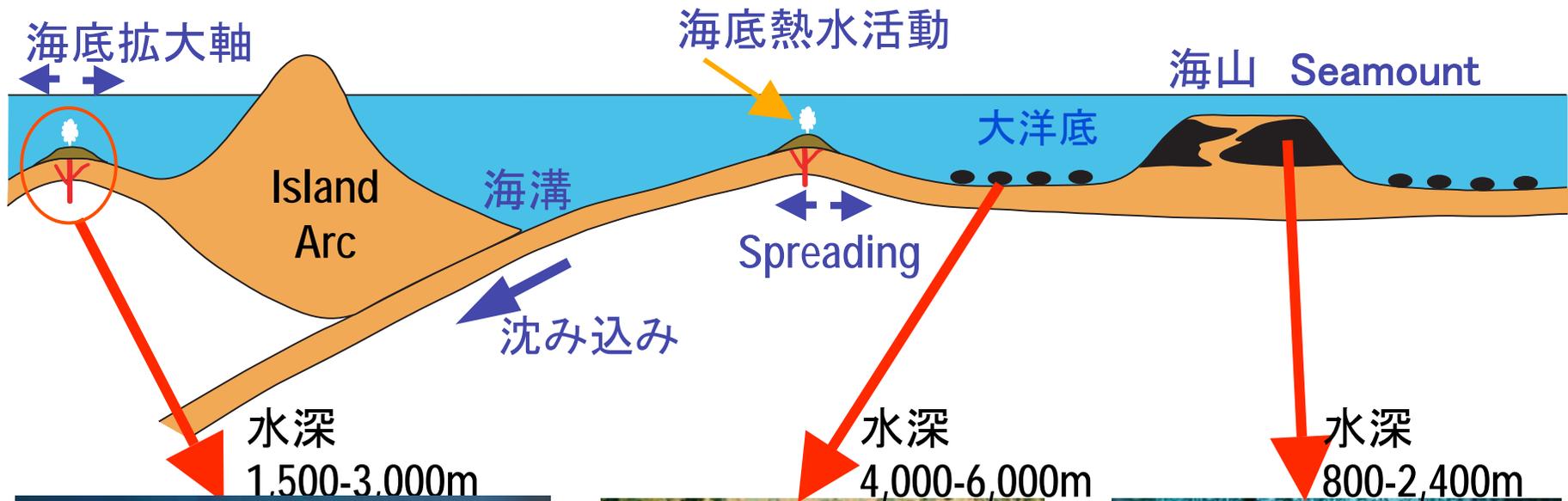


同和鉱業 深沢鉱山の開発史

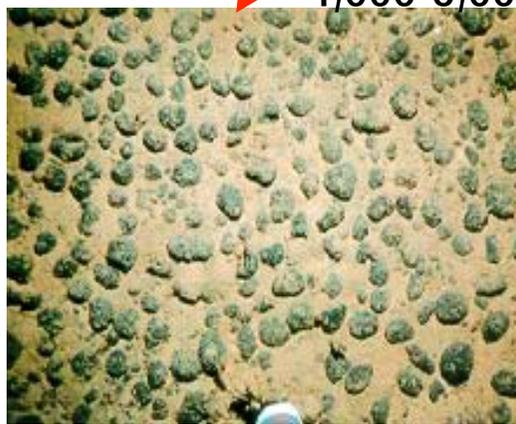
秋田県大館市深沢鉱山は、小坂鉱山と花岡鉱山の間に見出された中規模の黒鉱(くろこう)鉱床。当時最新の坑内掘りの技術を導入して突貫工事で開発され、最短記録を塗り替えた。



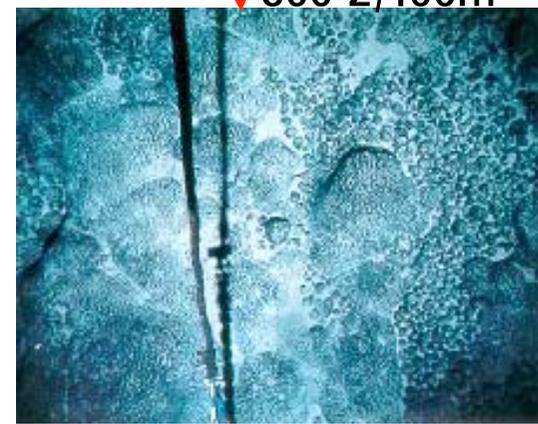
深海底鉍物資源



海底熱水鉍床



マンガン団塊



コバルト・リッチ・クラスト鉍床

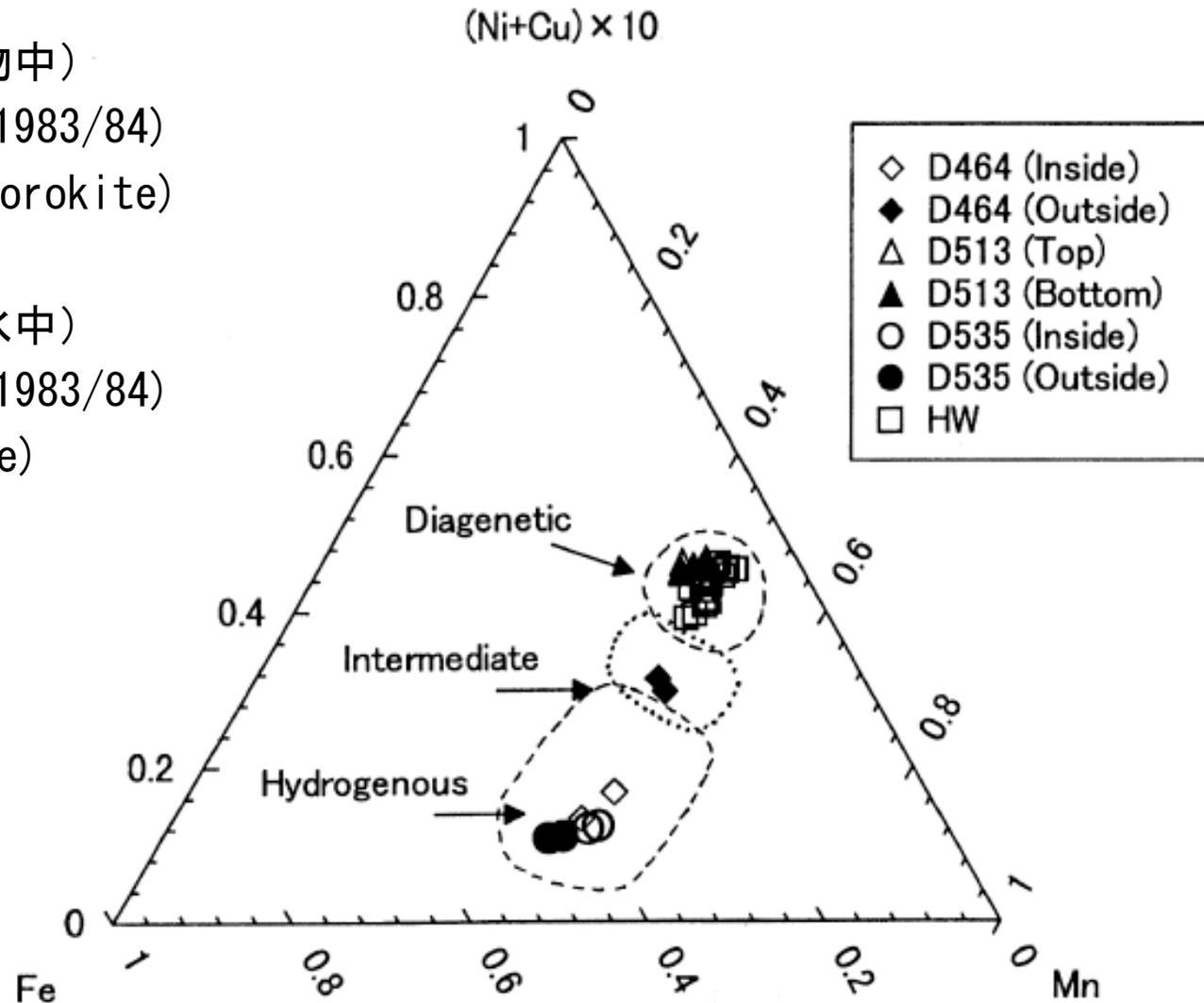
(JOGMEC資料を改変)

深海底の3種の鉱物資源

	マンガン団塊(1960s)	マンガン・クラスト(1980)	海底熱水鉱床(1979)
形態	径1-10cmの球状	厚さ1-10cmの被覆物	チムニー、マウンド
主成分	鉄+マンガン酸化物	鉄+マンガン酸化物	鉄、銅、亜鉛硫化物
対象金属	銅, ニッケル	コバルト, 白金、希土類?	金, 銀(銅、亜鉛, 鉛)
水深範囲	3500-6000 m	1000-3000 m	1200-3000 m
鉱床規模	~100km	~10km	~1km
原始資源量	5000億トン(?)	500億トン(?)	百万トン(1箇所あたり)
大洋別	太平洋, インド洋	西太平洋	中央海嶺284、島弧58
地質環境	堆積速度の遅い深海底	海山, 海台の露岩域	中央海嶺および島弧火山
形成時期	<80 百万年	<120 百万年	<百万年
成因	海水からの化学堆積	海水からの化学堆積	高温熱水から沈殿
EEZとの関係	外側の公海上	日本のEEZ+公海	日本のEEZ+公海
採鉱法の開発	現場採鉱テスト済み	未開発	ベンチャーが検討中

マンガンノジュールの成因と化学組成

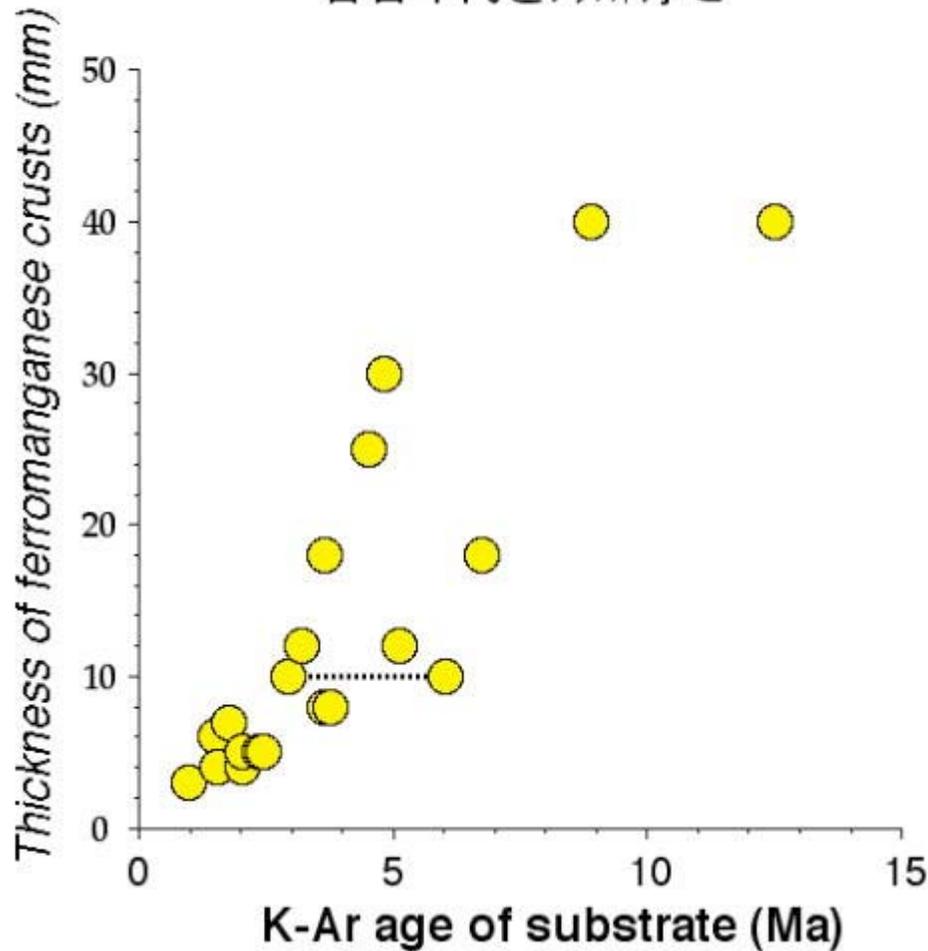
- (1) Diagenetic (堆積物中)
=rough type (Usui, 1983/84)
10 Å manganate (todorokite)
High Mn/Fe
- (2) Hydrogenous (海水中)
=smooth type (Usui, 1983/84)
 δ -MnO₂ (vernadite)



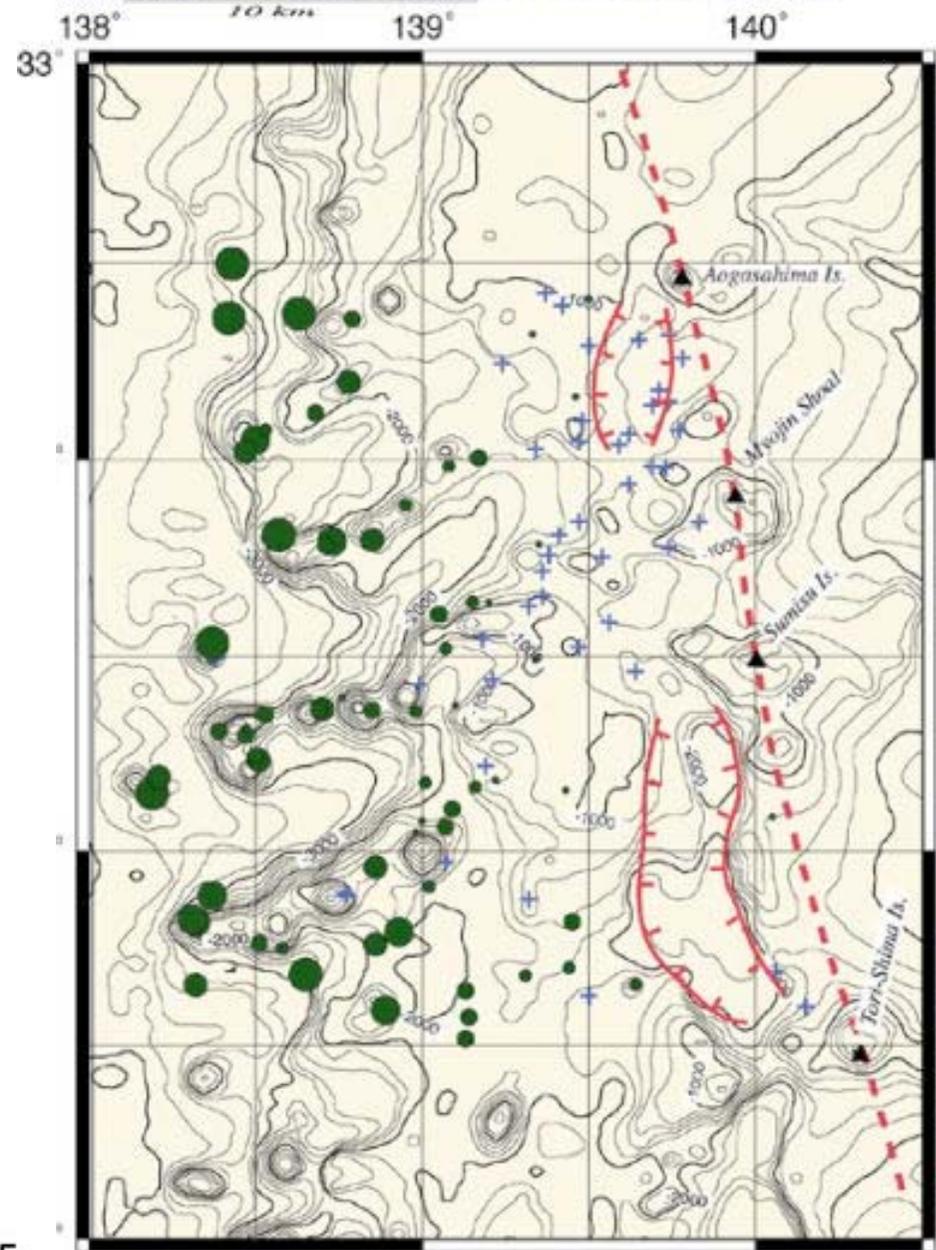
Ohta et al. (1999)

クラストの成長速度 （臼井による）

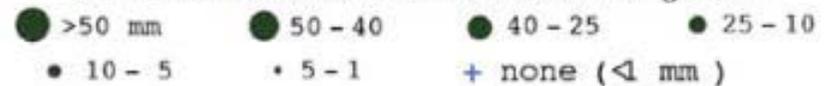
岩石年代とクラスト厚さ



THICKNESS OF HYDROGENETIC CRUSTS & NODULES



Maximum oxide thickness within each dredge haul



マンガンクラストの主要金属含有量

海 域	マンガン [%]	鉄 [%]	コバルト [%]	ニッケル [%]	チタン [%]
ハワイ-ミッドウェイ海域	24	16	0.91	0.45	1.1
ライン諸島	27	16	1.10	0.51	1.1
ギルバート諸島	29	18	0.99	0.63	1.2
マーシャル諸島	21	13	0.74	0.45	0.9
マリアナ諸島	12	16	0.09	0.13	-
仏領ポリネシア	33	12	1.20	0.60	1.0
九州・パラオ海嶺域	13	13	0.13	0.34	-
小笠原海台周辺海域	21	13	0.41	0.55	0.7

[出典] Manheim, F.: Science, 232 (1986) ; Hein, J. et al.: Cobalt-rich Ferromanganese crusts From the EEZ of the United State and Nodules from the Oceanic Pacific (1987)

結 論

1. 深海底資源の中で最も早くから気づかれ、調査が進んでいるのは**マンガン団塊** (ferro-manganese nodule)。しかし、公海域に分布すること、海洋法条約による制約を受けること、環境アセスメントなどの問題があり、当面開発される見通しが立っていない。
2. 最も開発に近いと考えられているのは**海底熱水鉱床**。我が国周辺のそれは、鉱量・品位とも第1級のポテンシャルを持つ。しかし、鉱量を推定する上で不可欠の厚さ方向の情報が未取得であること、熱水系生物群集の保護などの問題、採鉱、製錬法の技術開発が課題である。
3. 次いで開発に近いのは、**マンガンクラスト（コバルトリッチ・クラスト）**。これは、堆積物が少なく環境問題が少ないと考えられること、白金、レアアースなどのレアメタルを含むものの、薄く広く広がっているので、賦存状況、採鉱、製錬法の技術開発が海底熱水鉱床よりさらに必要。
4. いずれにせよ、これらの資源の開発に関して、我が国が他国に先がけて、調査及び技術開発に着手すべきである。