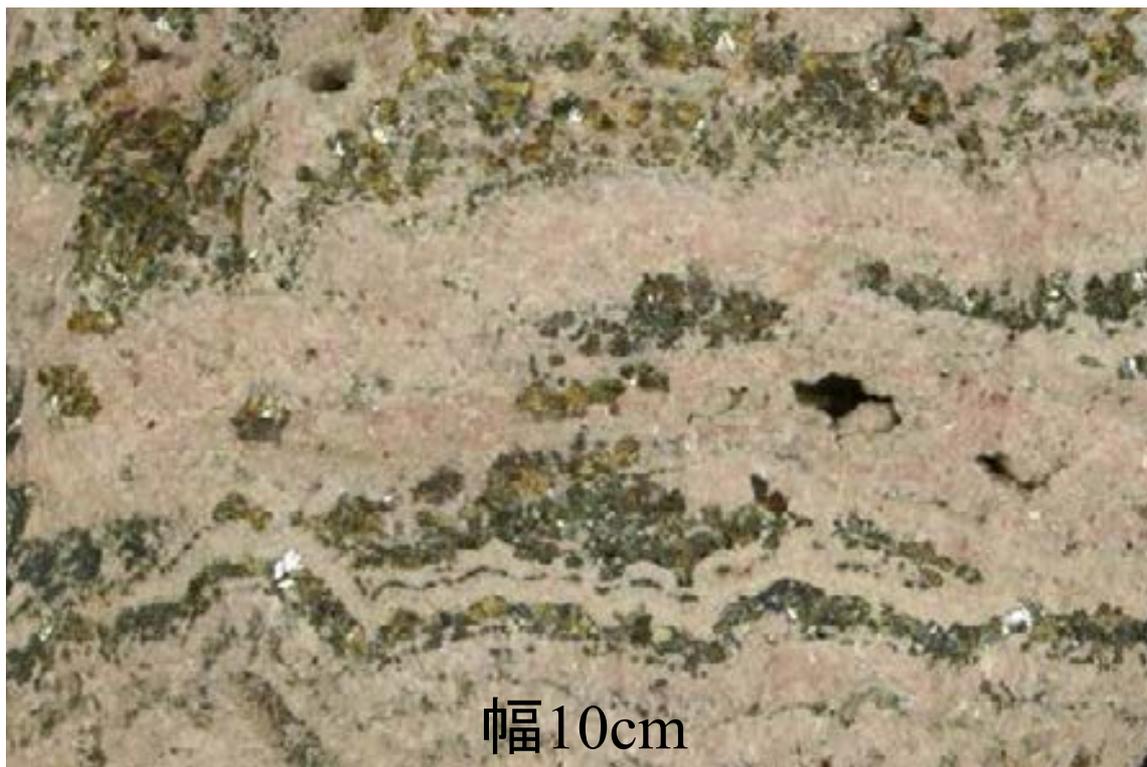


金、プラチナの輝き： レアメタルは地球のどこにある？

静岡大学 理学部
森下 祐一

北海道
上国鉱山



菱マンガン鉱



← マンガン

方鉛鉱、閃亜鉛鉱



← 鉛・亜鉛

幅10cm

主な職歴と研究・業務内容

- 1979年 東京大学理学部地学科卒業
- 1979年 科学技術庁原子力安全局行政官：原子力安全に関する予算措置
- 1980年 通商産業省地質調査所研究員：金属鉱物資源の同位体的成因研究
- 1987年 通産省工業技術院国際研究協力課：国際活動の予算措置と運営
- 1987年 東京大学理学博士
- 1988年 通商産業省地質調査所主任研究官：金鉱床の成因研究
- 1989年 米国ブラウン大学地質科学科客員研究員：鉱物中の元素拡散の研究
- 1991年 人事院任用局試験専門官併任：国家公務員採用Ⅰ種試験（地質）の運営
- 1996年 人事院国家公務員採用Ⅰ種（現在の総合職）試験（地質）試験専門委員併任：
地質試験問題の作成と採点
- 2000年 通商産業省地質調査所鉱床成因研究室長：鉱物資源の研究
- 2001年 産業技術総合研究所研究グループ長 資源地質学、地球化学の研究
- 2013年 静岡大学教授 資源地質学、地球化学の研究・教育

純金1kgバー

500g

300g

200g



5 cm

100g



5g

10g

20g

50g



http://gold.tanaka.co.jp/commodity/shohin/g_coin.html

ウィーン金貨
ハーモニー1オンス



メイプルリーフ
金貨1オンス





「純金千両箱」は総重量 約36Kg、
参考価格3億円相当(非売品)で、
2003年に田中貴金属工業(株)
で製作された

幅32.1cm、横19cm、高さ11cm

田中貴金属工業株式会社

5 cm

プラチナ(白金)バー



金もプラチナも宝飾品として使われますが、
いずれも産業で重要な役割があることを後で
紹介します。

金： 密度 19.32 g/cm^3

有史以来の生産量
15 万トン(諸説あり)

20 m

年間生産量
2,700トン
USGS (2012)

5.2 m

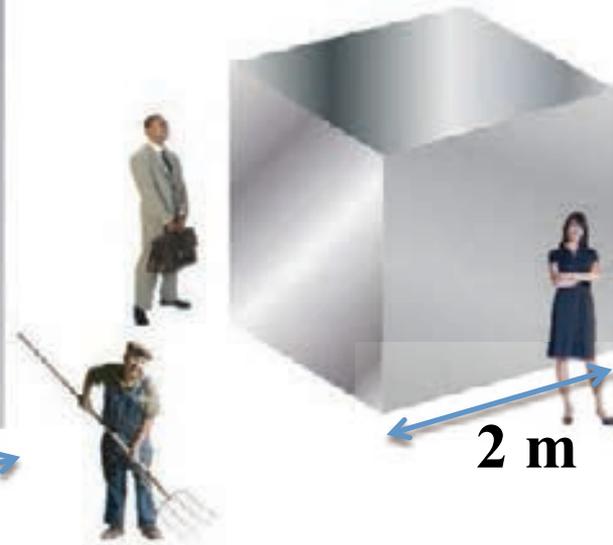
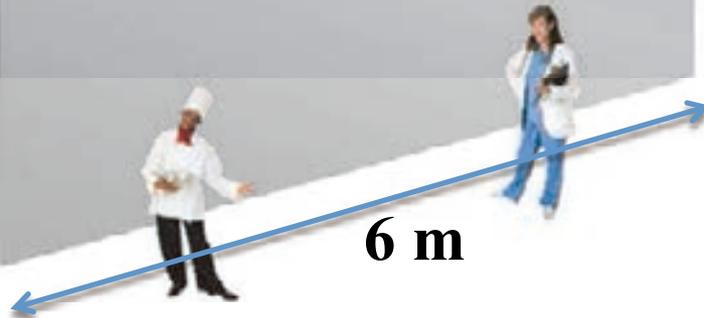
プラチナ(白金):
密度 21.45 g/cm³

有史以来の生産量
4,700トン

年間生産量
180トン

Johnson Matthey PLC (2013)

金やプラチナはもともと地球
のどこにあったのだろうか？



秋田県小真木鉱山
(黒鉱鉱床)

黄銅鉱

fool's gold
= 愚か者の金



黄鉄鉱

横幅7cm

石英脈中に金

非常に細粒で、
含有量が40ppm
では顕微鏡でも
見えない

鉍物資源研究は
知られていない



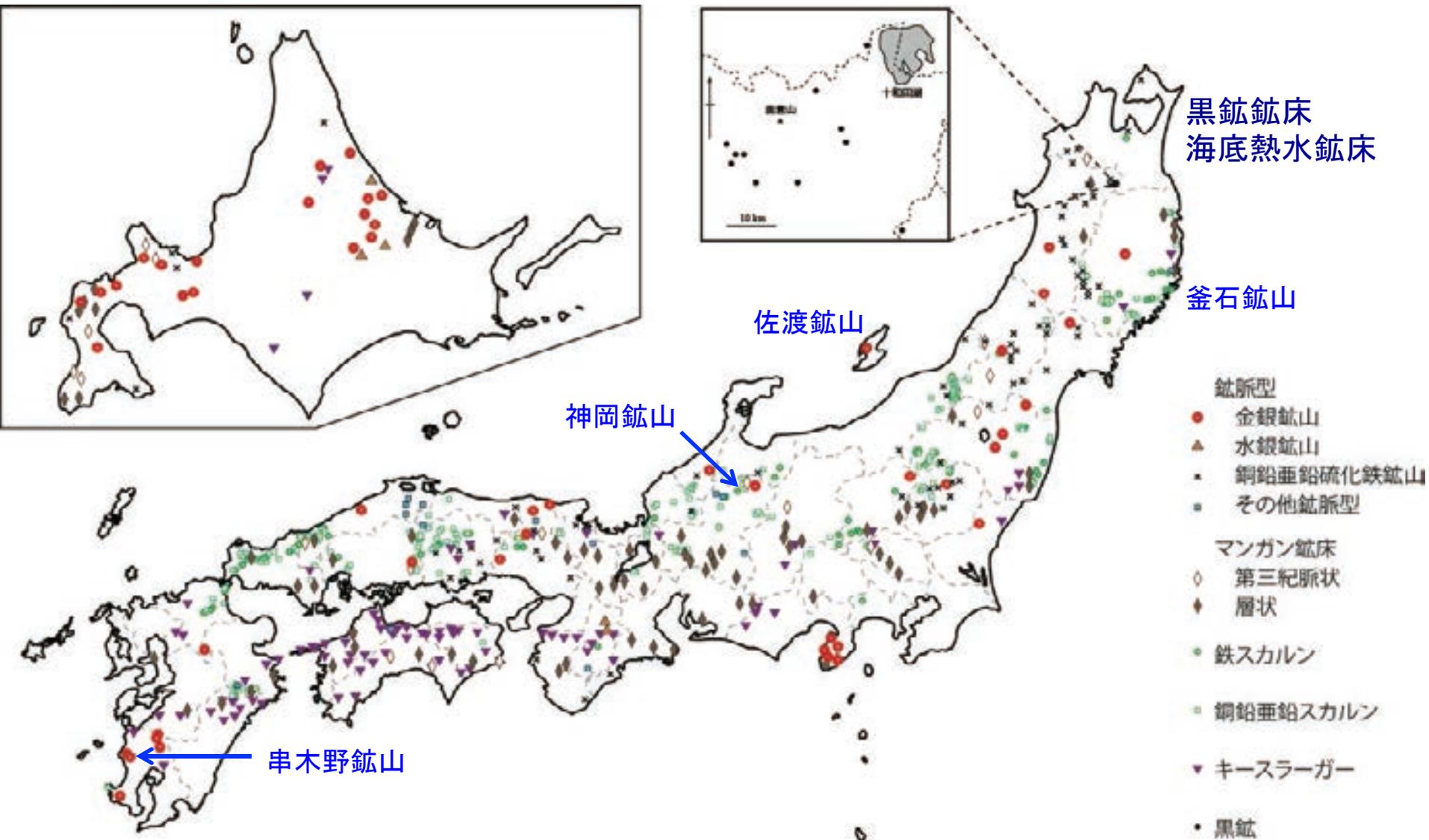
鉍物資源探査で
地質学が発展



本日のメニュー

- 1 日本の鉱山の歴史
 - 2 レアメタルの重要性と産業
 - 3 レアメタルとレアアース
 - 4 メタルフロー
- 休憩
- 5 マグマ熱水系
 - 6 研究手法1: 同位体比測定と日本の鉱床への適用研究
 - 7 研究手法2: 微小領域分析: 二次イオン質量分析法 (SIMS)
 - 8 SIMS分析の鉱床への適用研究

55年前は日本では数百の金属鉱山が操業していた 資源のない日本？



日本の鉱床総覧(1965)

現在操業中の金属鉱山

1960年以降、日本の鉱山は次第に閉山し始めるが、特に1980年以降、主に中国から輸入する安価な金属により日本の鉱山は次々と閉山し、現在では鹿児島県の菱刈鉱山の他に3つの小さな金鉱山が操業しているだけとなっている。



👉 経済至上主義による産業の育成が行われて来たが、日本の鉱山が4つになった2010年に問題が生じる。



レアメタル資源研究の重要性

「資源のない国」だから「外国から買えば良い」ではなく、「資源を大量に必要とする国」と捉えれば、当然鉱物資源の研究も必要

日本は鉱物資源を大量に使うので、マスコミが良く言う「資源のない国」ではなく、「資源を大量に必要とする国」と捉え、供給を確保することが必要



レアアースとレアメタル

	1族	2族	3族	4族	5族	6族	7族	8族	9族	10族	11族	12族	13族	14族	15族	16族	17族	18族
1 周期	1 H 0.15%																	2 He
2 周期	3 Li 13,000	4 Be 1,600											5 B 10,000	6 C 180,000	7 N 26,000	8 O 47.4%	9 F 1,600,000	10 Ne
3 周期	11 Na 2.3%	12 Mg 3.2%											13 Al 8.1%	14 Si 26.8%	15 P 0.10%	16 S 260,000	17 Cl 160,000	18 Ar
4 周期	19 K 0.91%	20 Ca 5.3%	21 Sc 30,000	22 Ti 0.54%	23 <u>V</u> 230,000	24 Cr 185,000	25 Mn 0.14%	26 Fe 7.1%	27 <u>Co</u> 29,000	28 Ni 105,000	29 Cu 75,000	30 Zn 80,000	31 <u>Ga</u> 18,000	32 <u>Ge</u> 1,600	33 As 1,000	34 <u>Se</u> 50	35 Br 400	36 Kr
5 周期	37 Rb 32,000	38 Sr 280,000	39 Y 20,000	40 <u>Zr</u> 100,000	41 Nb 11,000	42 <u>Mo</u> 1,000	43 Tc	44 Ru 1	45 Rh 0.2	46 Pd 1	47 <u>Ag</u> 80	48 <u>Cd</u> 98	49 <u>In</u> 50	50 Sn 2,500	51 Sb 200	52 <u>Te</u> 5	53 I 140	54 Xe
6 周期	55 Cs 1,000	56 Ba 250,000	57-71 ランタノイド	72 <u>Hf</u> 3,000	73 <u>Ta</u> 1,000	74 W 1,000	75 <u>Re</u> 1	76 Os 1	77 Ir 0.1	78 Pt 1	79 Au 3	80 Hg 50	81 Tl 360	82 Pb 8,000	83 <u>Bi</u> 60	84 Po	85 At	86 Rn
7 周期	87 Fr	88 Ra	89-103 アクチノイド															

レアアースを
除くレアメタ
ル 30 元素

レアメタルに
含まれるレア
アース 17 元素

ランタノイド	57 La 16,000	58 Ce 33,000	59 Pr 3,900	60 Nd 16,000	61 Pm	62 Sm 3,500	63 Eu 1,100	64 Gd 3,300	65 <u>Tb</u> 600	66 <u>Dy</u> 3,700	67 Ho 780	68 Er 2,200	69 Tm 320	70 Yb 2,200	71 Lu 300
アクチノイド	89 Ac	90 Th 3,500	91 Pa	92 U 910											

濃度 : ppb
 : バイブロ, : バイブロを含む

レアメタルとは

- 1 その名の通り、レア(希少)なメタル(金属)である。
- 2 産業における利用価値が高いことが前提。
- 3 レアではないが、資源として取り出すことが難しい金属も含む。
- 4 特定の地域に偏在して埋蔵されている金属も含む。
- 5 製錬に高度な技術や多量のエネルギーが必要などの理由で、
鉱石から金属にすることが困難である金属も含む。

注1 金、銀はレアメタルではあるが慣習的に貴金属と呼ばれる。

注2 レアメタルの分類は産業、社会状況に応じて変更され得る。

レアメタル

30元素

+レアアース

計31鉱種(47元素)

レアアース

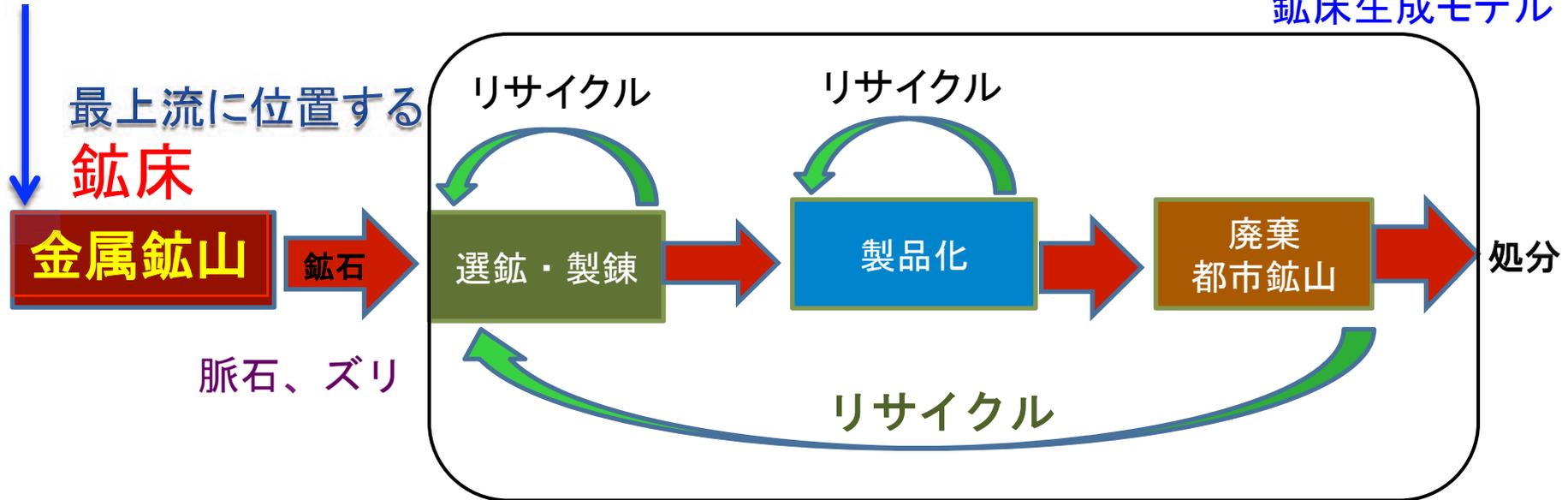
希土類元素

17元素

メタルフローの中での鉱物資源探査

鉱物資源探査

民間企業やJOGMEC(委員会) + 研究者(鉱床成因研究)
鉱床生成モデル



大学の講義
身近に鉱山がない
昔の国内鉱山は？

省資源, 代替材料,
リサイクル

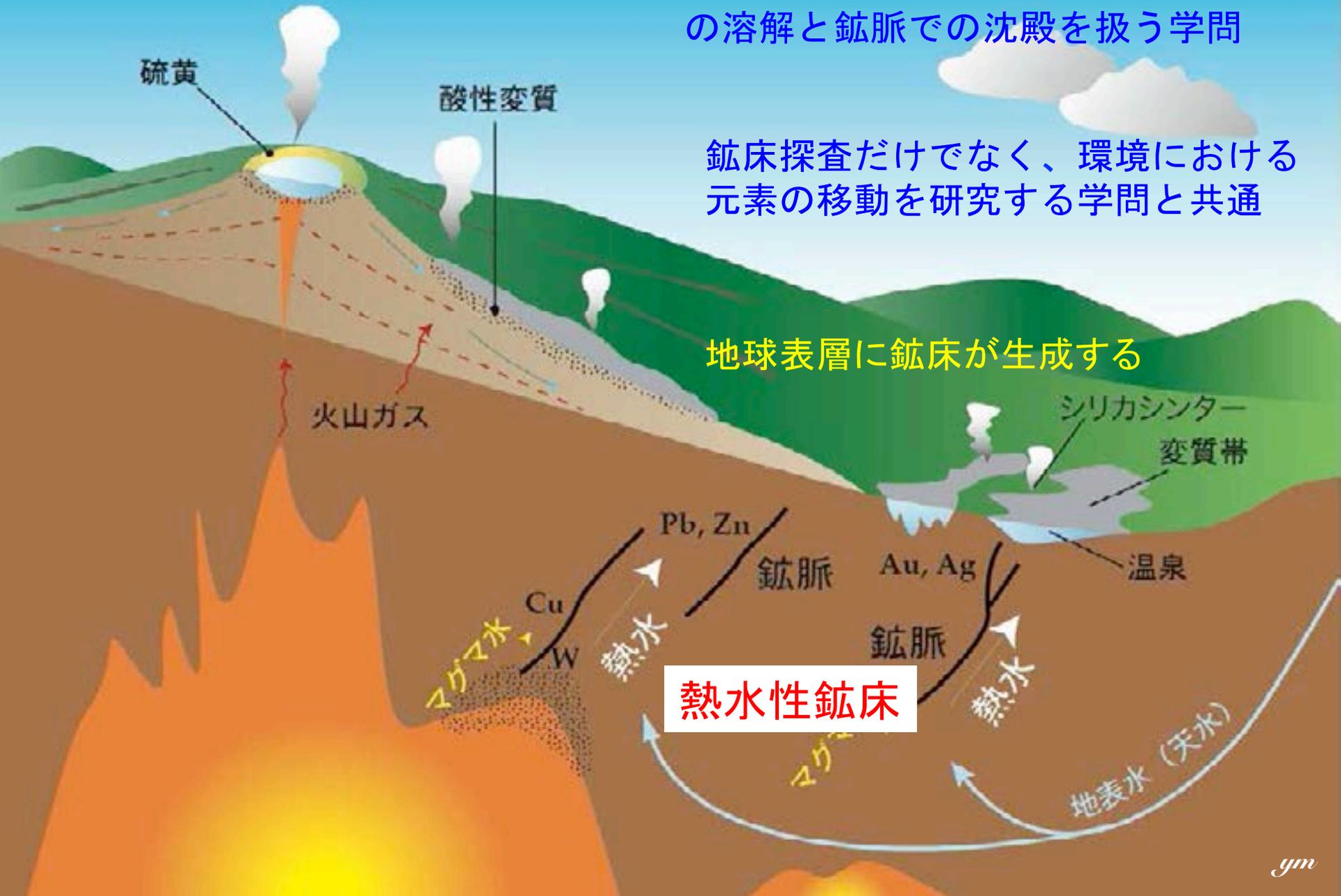
産業の高度化でますます多くのレアメタルが
世界中で必要になる

マグマ熱水系モデル

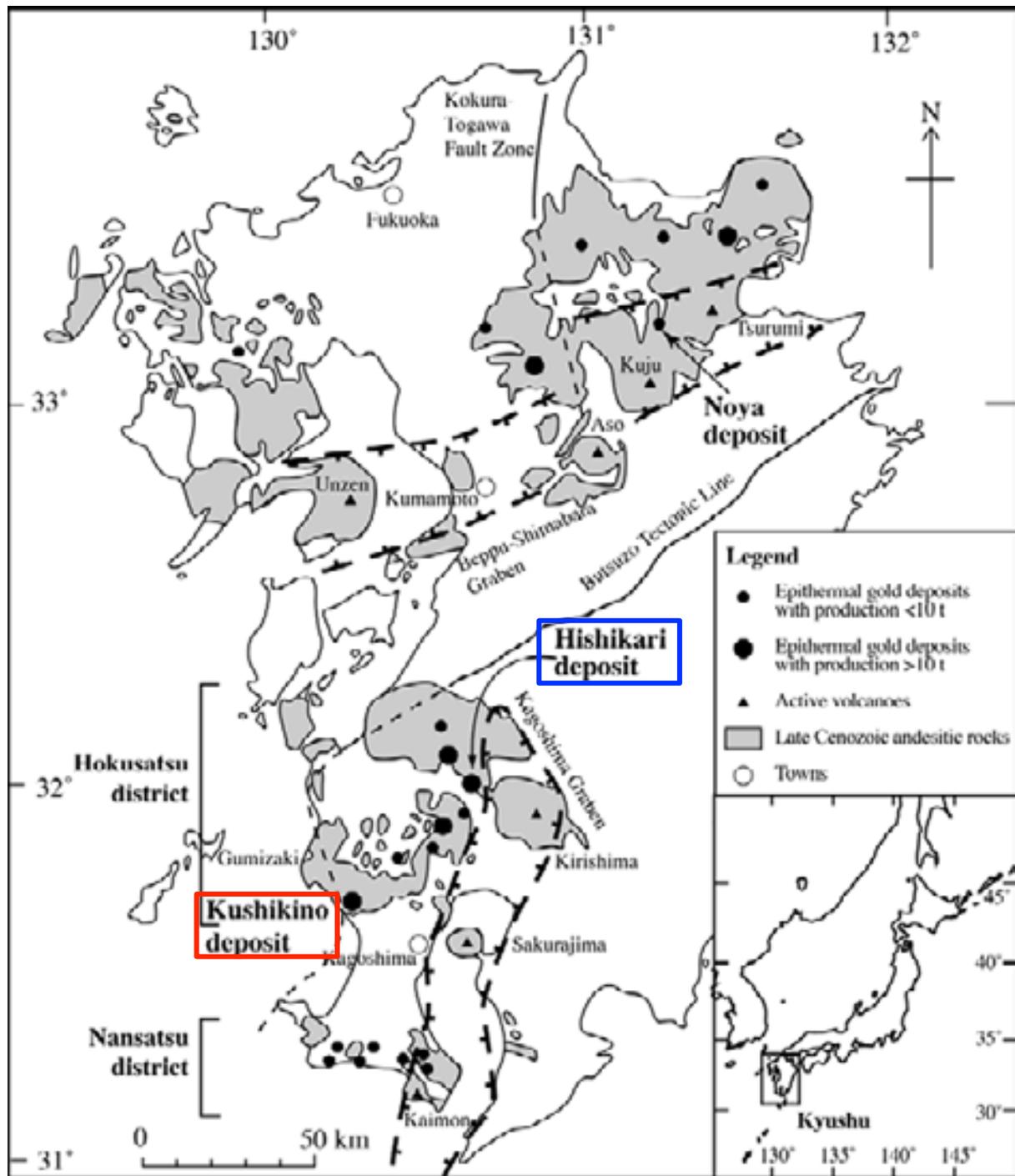
熱水性鉱床の成因解明は熱水への金属の溶解と鉱脈での沈殿を扱う学問

鉱床探査だけでなく、環境における元素の移動を研究する学問と共通

地球表層に鉱床が生成する



熱水性鉱床



鹿児島県
 菱刈鉱床と
 串木野鉱床
 (含金銀石英脈)

浅熱水性鉱床
 Epithermal deposit

黒丸：金鉱床
 鹿児島県には安山岩類中に
 金鉱床が多数あるが、その
 基盤岩は四万十帯の堆積岩

The Hishikari mine

鉍化作用: 1.25 Ma - 0.66 Ma
生成温度: 195° - 230°C

Izawa et al. (1993)

345 億円
9200億円

金の平均品位 = 40 g/t (2012)
金の年間生産量 = 7.5 t/y (2012)
金の総生産量 = 200 t (2012)
住友金属鉍山株式会社 (2012)



菱刈鉱山 山田鉱床 成泉7脈



鉍物資源の調査・探査手法

リモートセンシング

地質調査

物理探査

地化学探査

試錐(ボーリング)調査 →



私の研究手法

1 同位体比測定

質量分析計

(炭素、酸素同位体を測定)

2 微小領域分析

二次イオン質量分析法 (SIMS)

(元素分析、同位体分析)

1. 同位体比測定

同位体：同じ元素(原子番号が同じ)で質量数(重さ)が異なる原子

同位体比

炭素 ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C
98.93% 1.07%

$$\delta^{13}\text{C} = \left[\frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB}}} - 1 \right] \times 1000 \text{ (‰)}$$

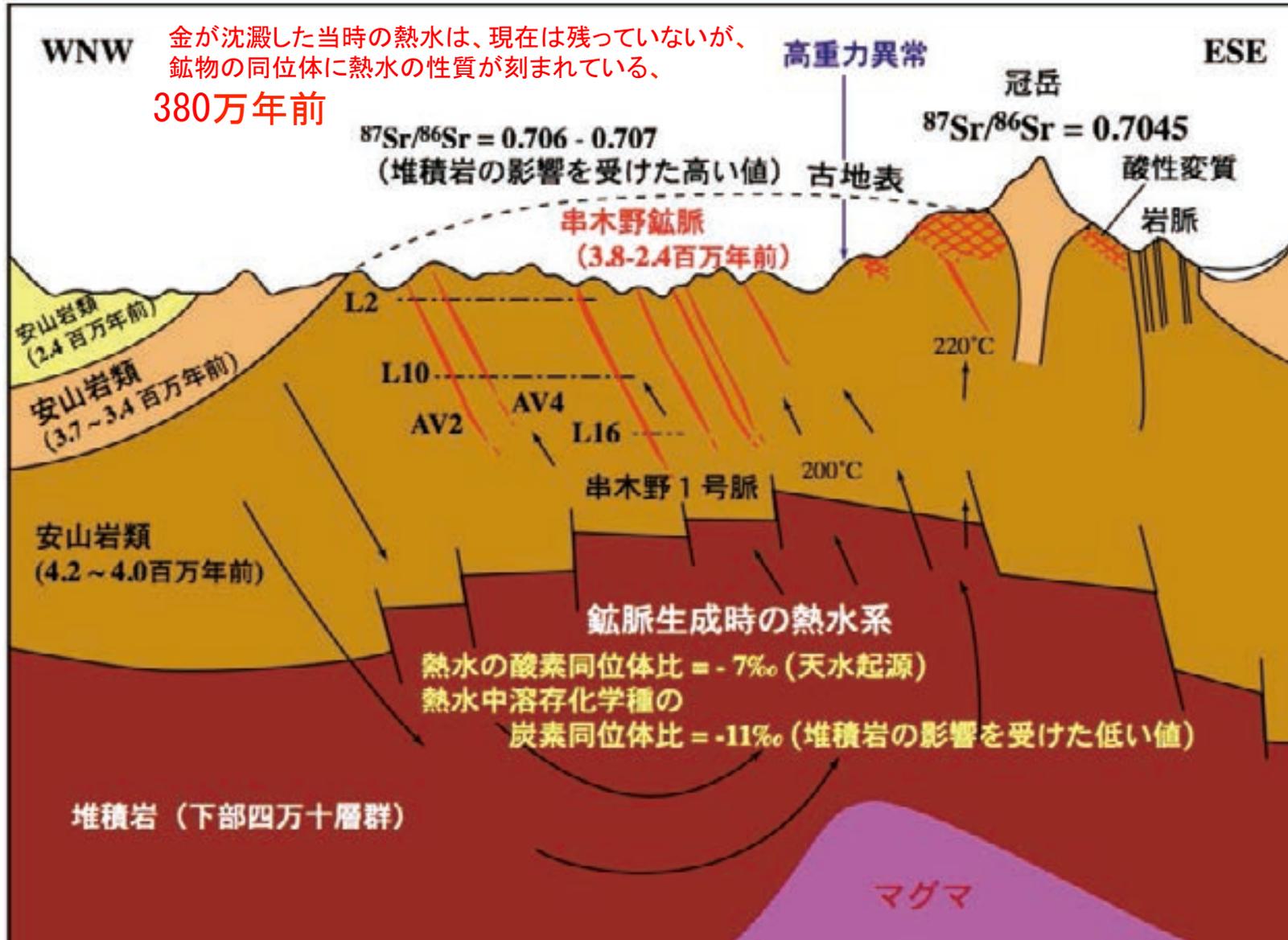
デルタ パーミル

酸素 ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O
99.757% 0.038% 0.205%

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sample}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} - 1 \right] \times 1000 \text{ (‰)}$$

鉱物を CO_2 に変換して、その同位体比を
気体質量分析計で測定

串木野金鉱床生成モデル断面図



横幅13km

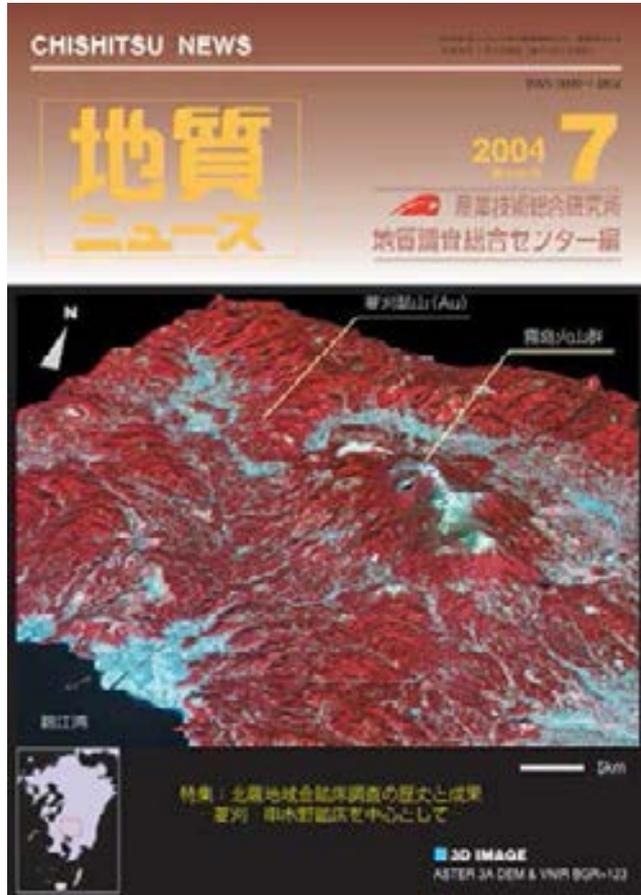
Morishita and Nakano (2008)



未知地域での鉱床探査

鹿児島県北薩地域の金鉱床特集

1985年から2007年まで、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)のアドバイザーを務め、記録を残すために2004年に編集した。



産業技術総合研究所ホームページからpdfで閲覧可能。

飛騨佐古西地区地質概要図



神岡鉱山 (スカルン型)

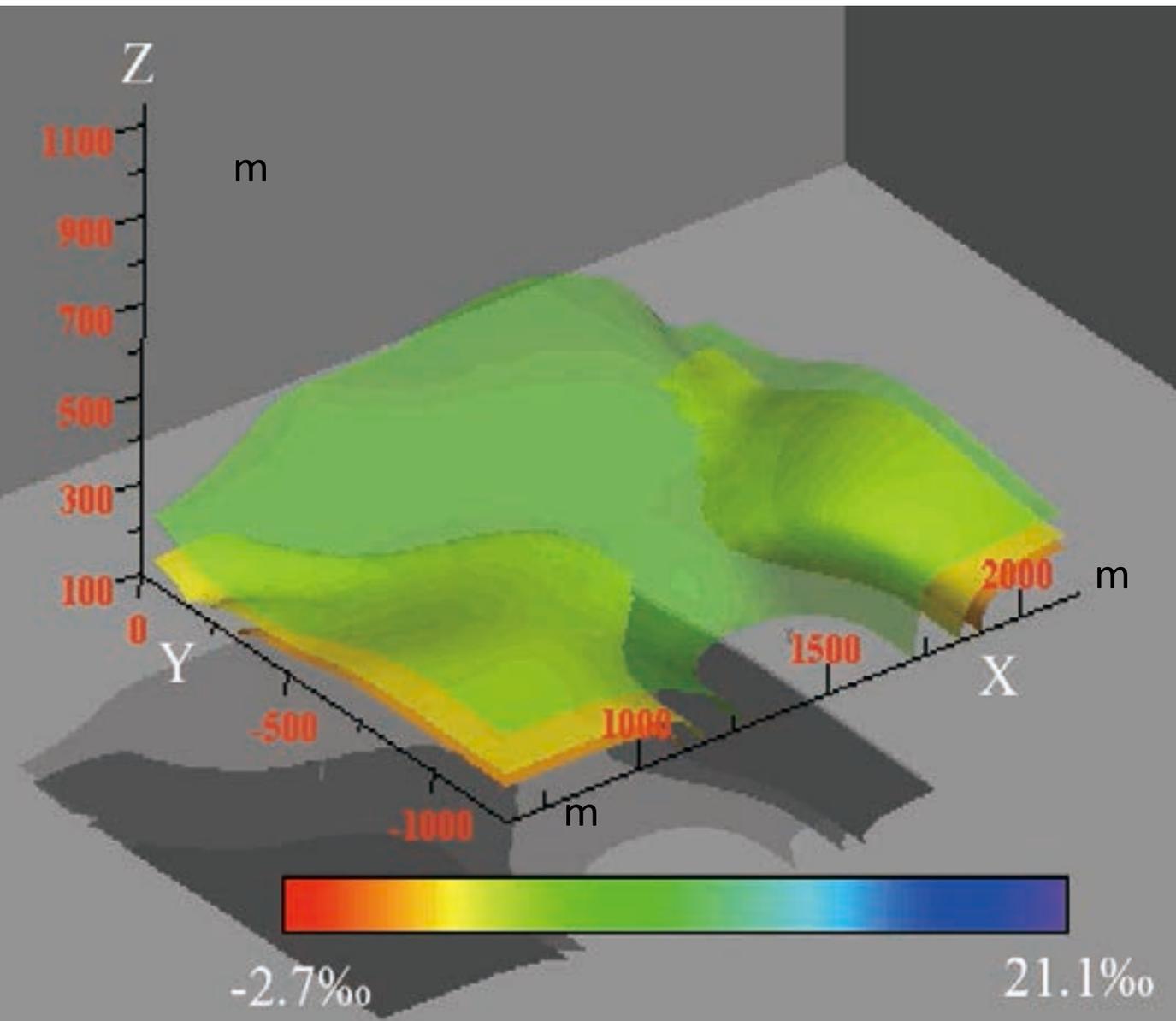
小柴昌俊先生がニュートリノ研究でノーベル物理学賞を受賞したカミオカンデが設置された(現在はスーパーカミオカンデ)。

かつて三井財閥グループの屋台骨を支えた大鉱山



神岡鉱山 茂住鉱北20号
Sphalerite (ZnS) 鉱石

神岡鉱山佐古西地区晶質石灰岩の 3D 酸素同位体比



高温で水/岩石比が高い
程熱水活動が活発で、酸素同位体比が低下する

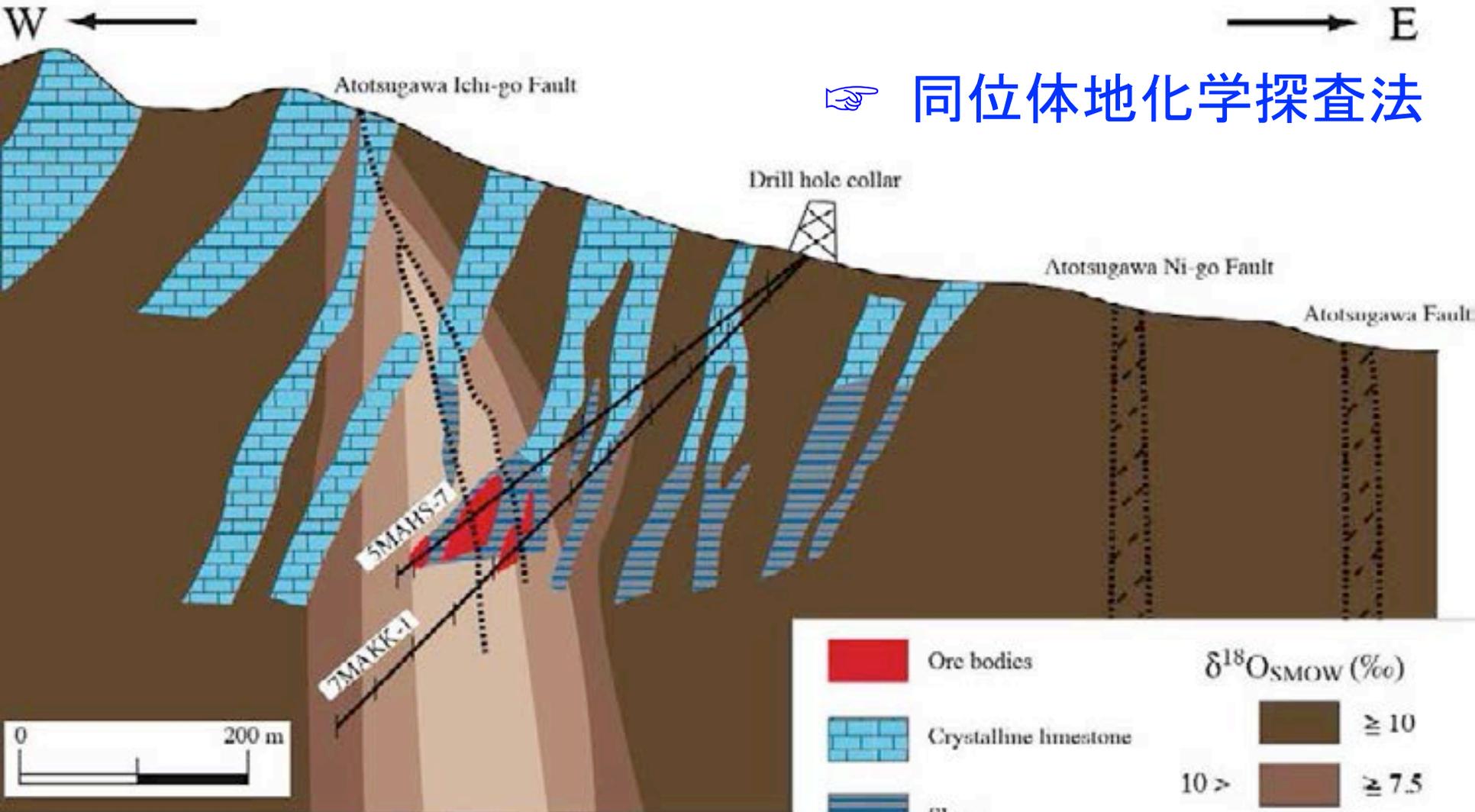
現在、熱水は失われているが、6500万年前のマグマ-熱水活動の3次元分布を示している

酸素同位体比が低い部分は、岩石と熱水の反応が大きかった熱水の通路

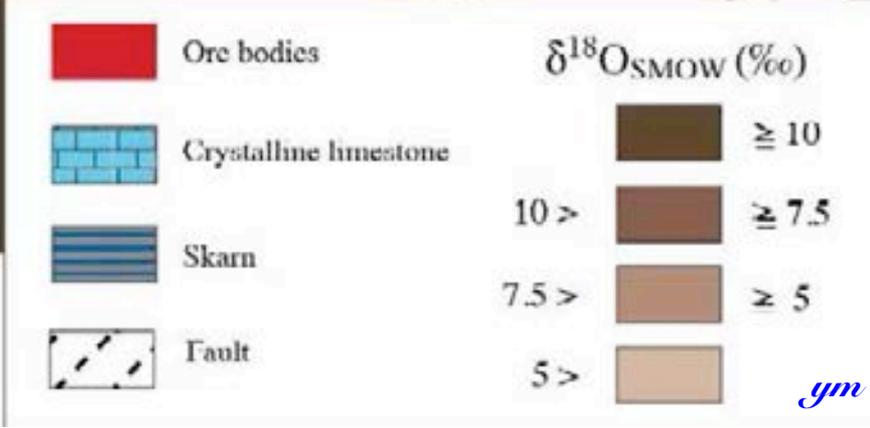
石灰岩の酸素同位体比
1.0‰, 2.5‰, 6.0‰等値
面の 3D 鳥瞰図

Morishita (1999)

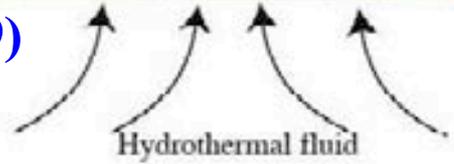
神岡鉾山佐古西地区東部着鉾部断面図



☞ 同位体地化学探查法



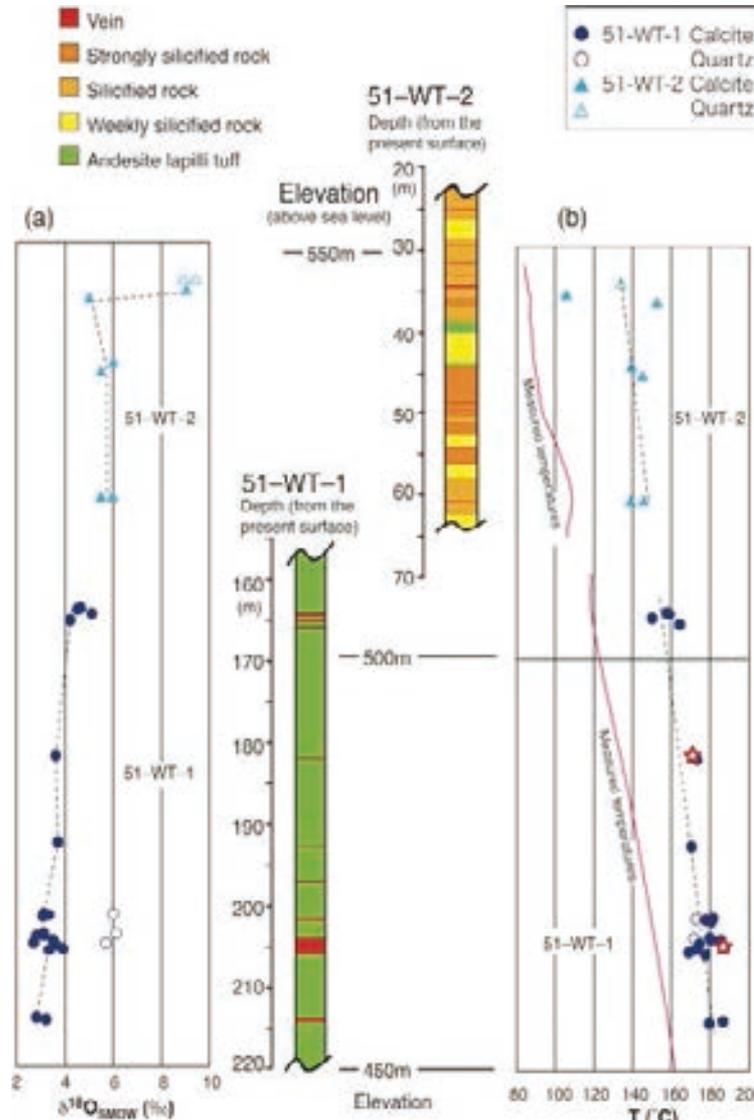
Morishita (1999)



野矢金鉱床：森下・竹野（1989）が大分県野矢で発見（潜頭性）



37万年前に生成した含金方解石-石英-アデュラリア脈（森下・竹野, 1993）



方解石と石英の酸素同位体分析



37万年前の熱水温度を推定



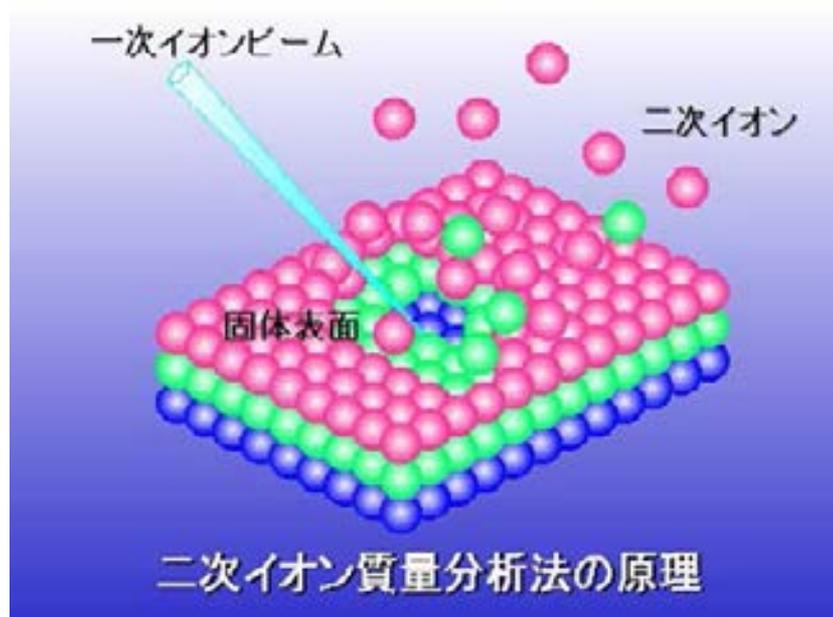
深部で温度が上昇するが、どの地点でも現在の検層温度(赤線)よりも高く、**金鉱脈は180°Cで生成した。**

方解石-石英脈の鉱物ごとの酸素同位体比を分析し(左図)、方解石-石英の生成温度を推定した(右図)。

Morishita and Takeno (2010)

2. 微小領域分析

SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry) 二次イオン質量分析法



固体表面の
微小領域分析装置

深さ方向分析

(半導体ドーパ元素) 半導体研究所

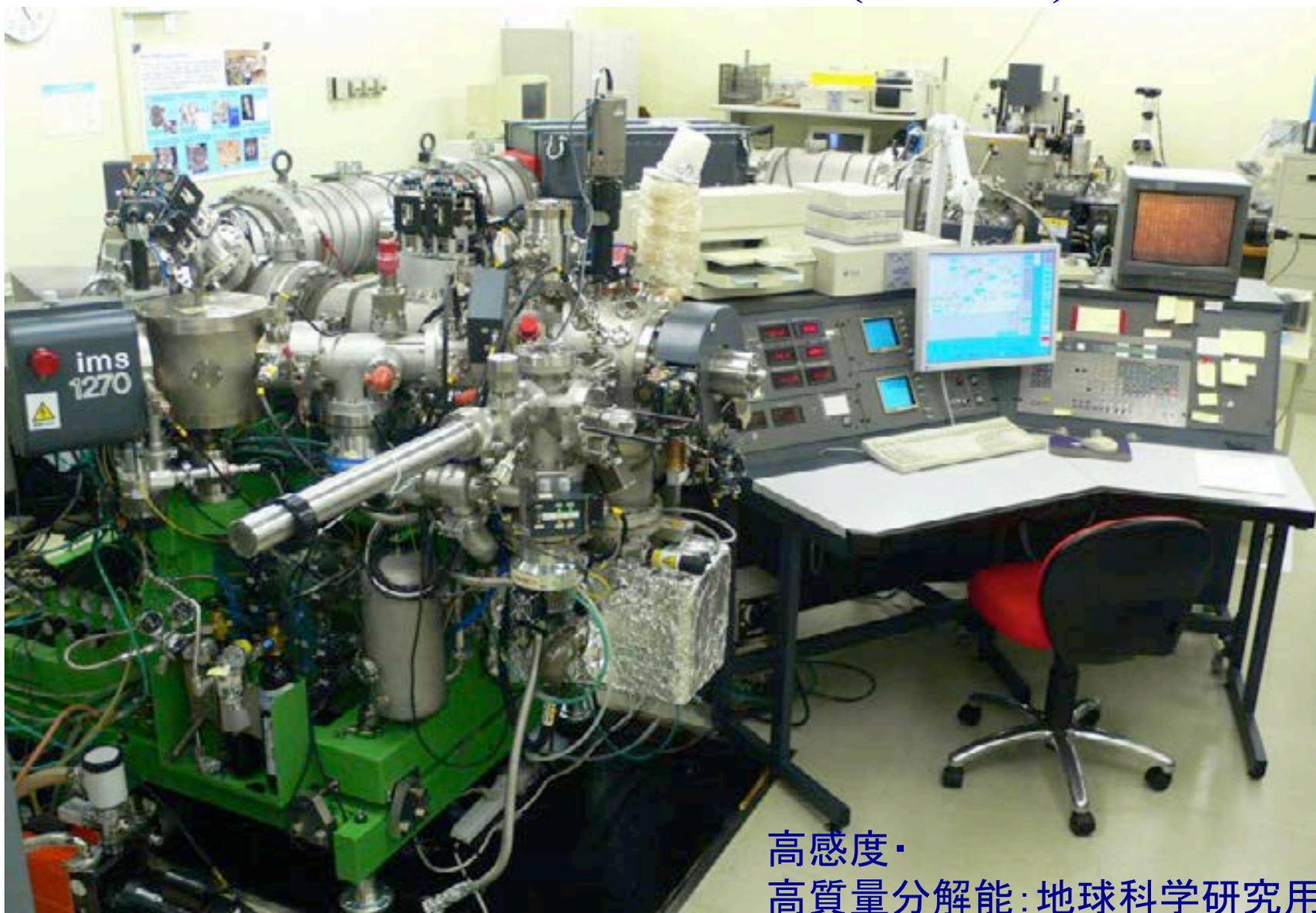
高感度分析

(低濃度元素の分析)

同位体分析

(地球科学等)

産業技術総合研究所の SIMS (ims-1270)

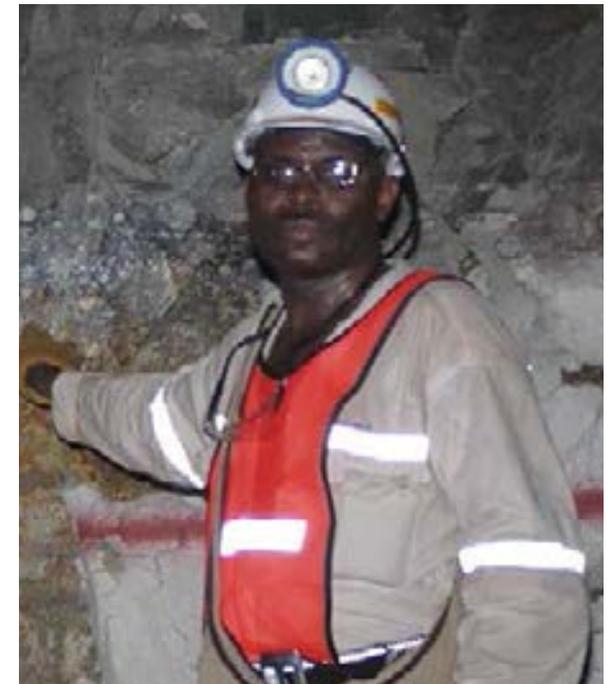


高感度・
高質量分解能：地球科学研究用

南アフリカ共和国の34億年前の縞状鉄鉱層 (BIF) に 胚胎するカラハリゴールドドリッジ金鉱床

Yuichi Morishita and Napoleon Q. Hammond

Geological Survey of Japan, AIST



南アフリカ共和国のカラハリ金鉱床



金の平均品位: 2.4g/t (ppm)
金の実収率: 80%



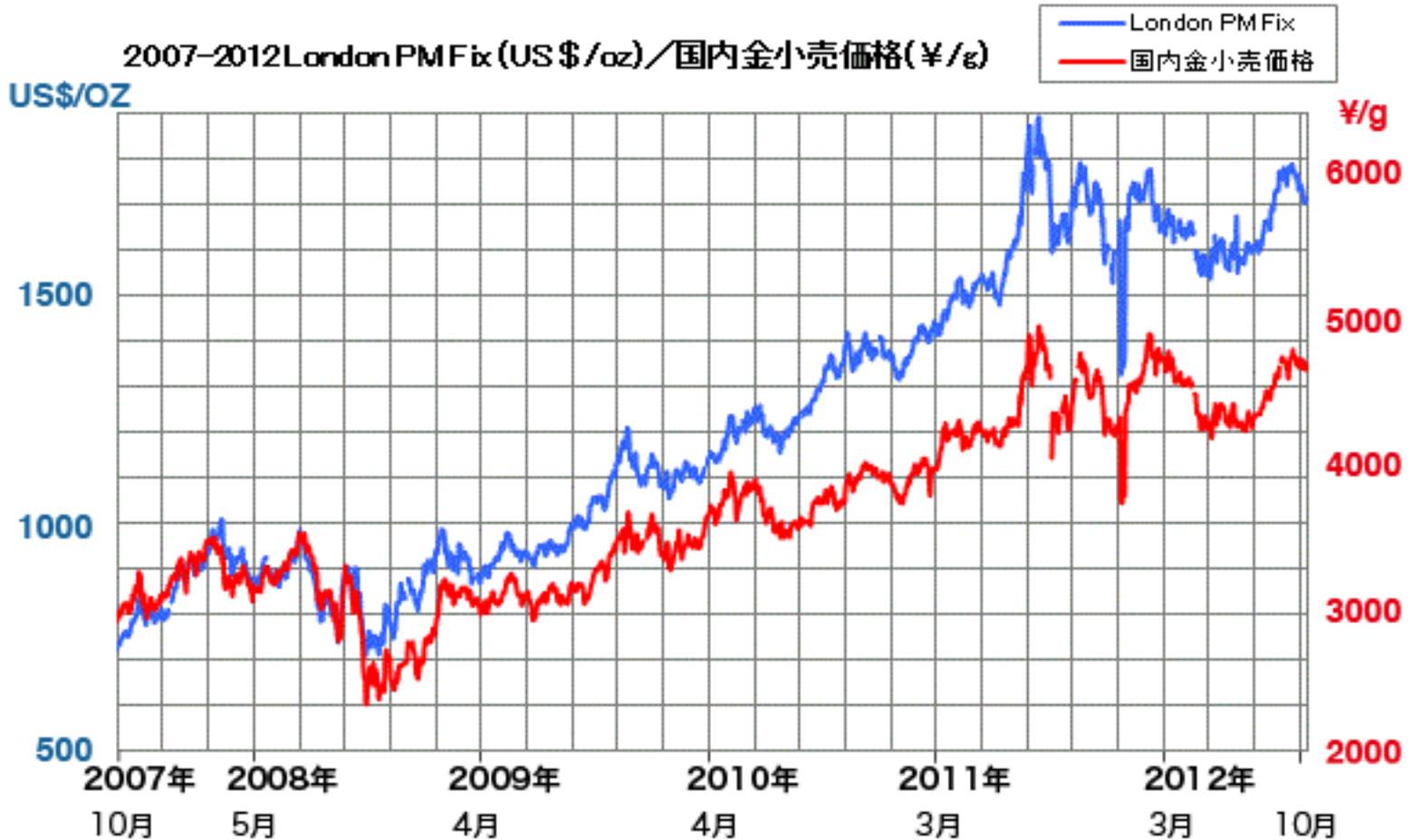
実収率の向上が必要



SIMS微小領域分析で
金の存在形態を解明する

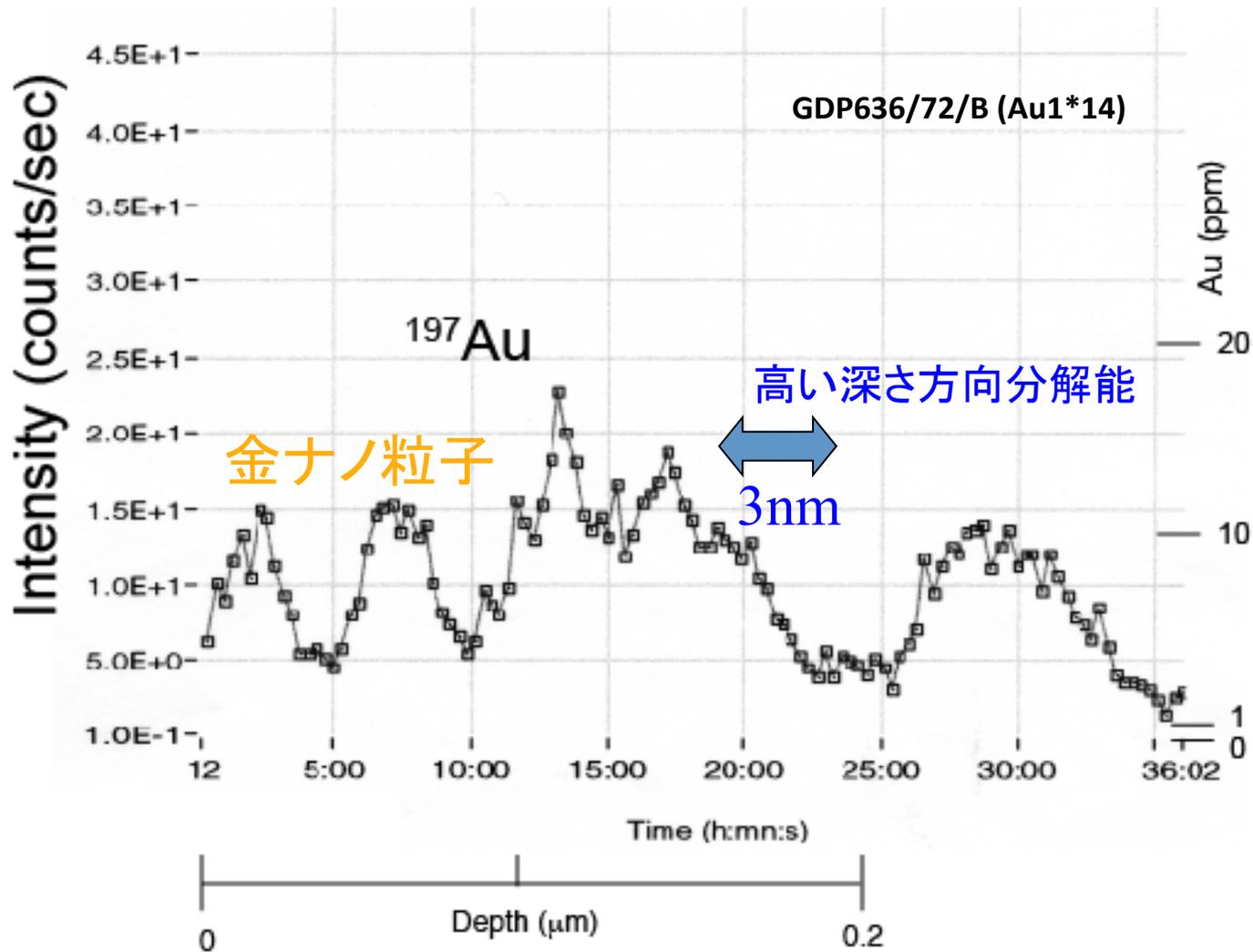
2.4g/t: 鉱石1トンの中に金
が平均 2.4 グラム含まれる

金価格の推移



⇒ 貴重な金を効率的に回収するために、
低品位鉱の処理やこれまで処理出来なかった鉱石
からの金の回収が急務

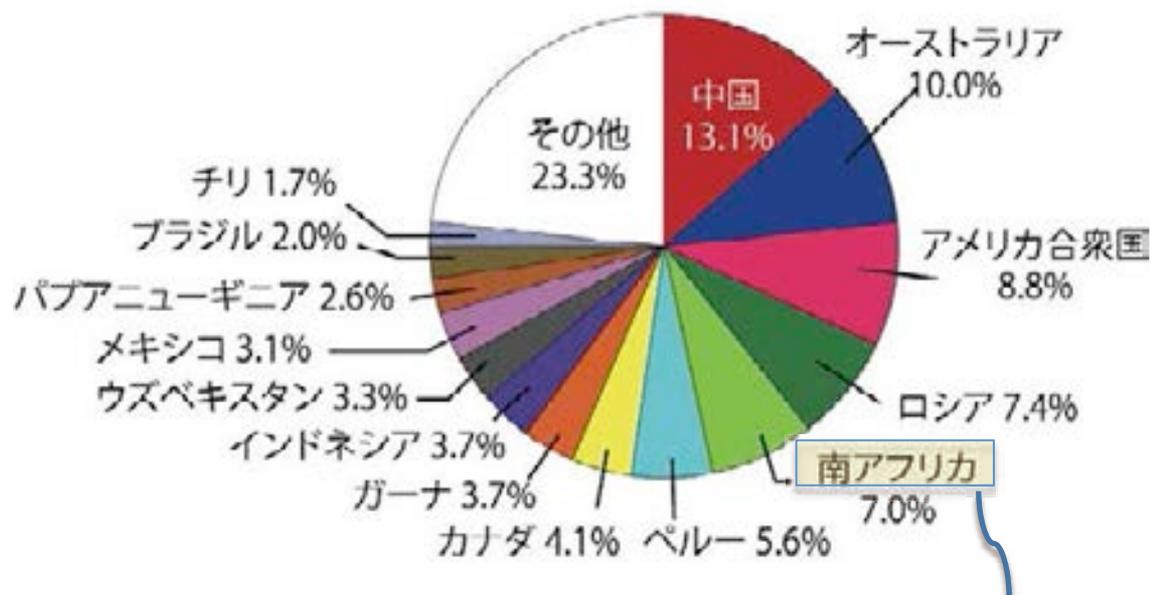
Pyrrhotite (Fe_7S_8) 中の金の深さ方向分析



Morishita and Hammond (2007)

国別金の生産量 (2011)

	生産量 (t)	比率 (%)
中国	355	13.1
オーストラリア	270	10.0
アメリカ	237	8.8
ロシア	200	7.4
南アフリカ	190	7.0
ペルー	150	5.6
カナダ	110	4.1
ガーナ	100	3.7
インドネシア	100	3.7
ウズベキスタン	90	3.3
メキシコ	85	3.1
パプアニューギニア	70	2.6
ブラジル	55	2.0
チリ	45	1.7
その他	630	23.3
世界合計	2700	100.0



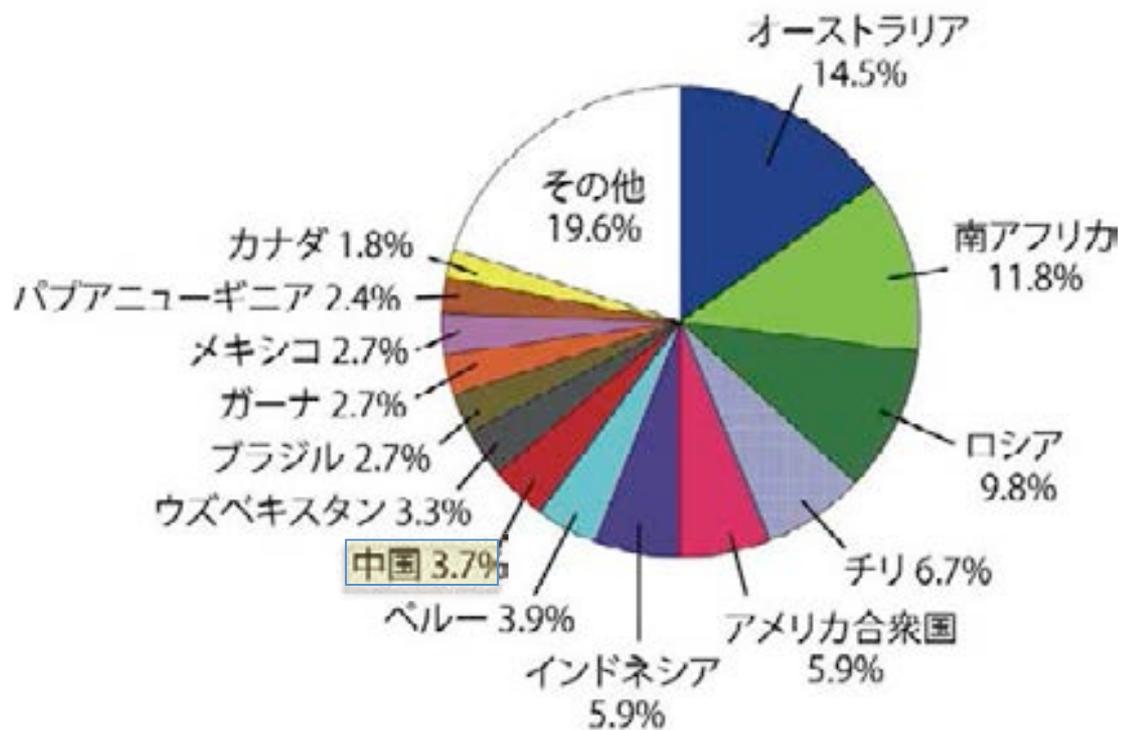
菱刈 7.5 (t)

採掘の深部化
20年前から減少
2007に首位陥落

(USGS Mineral Commodity Summaries, 2012)

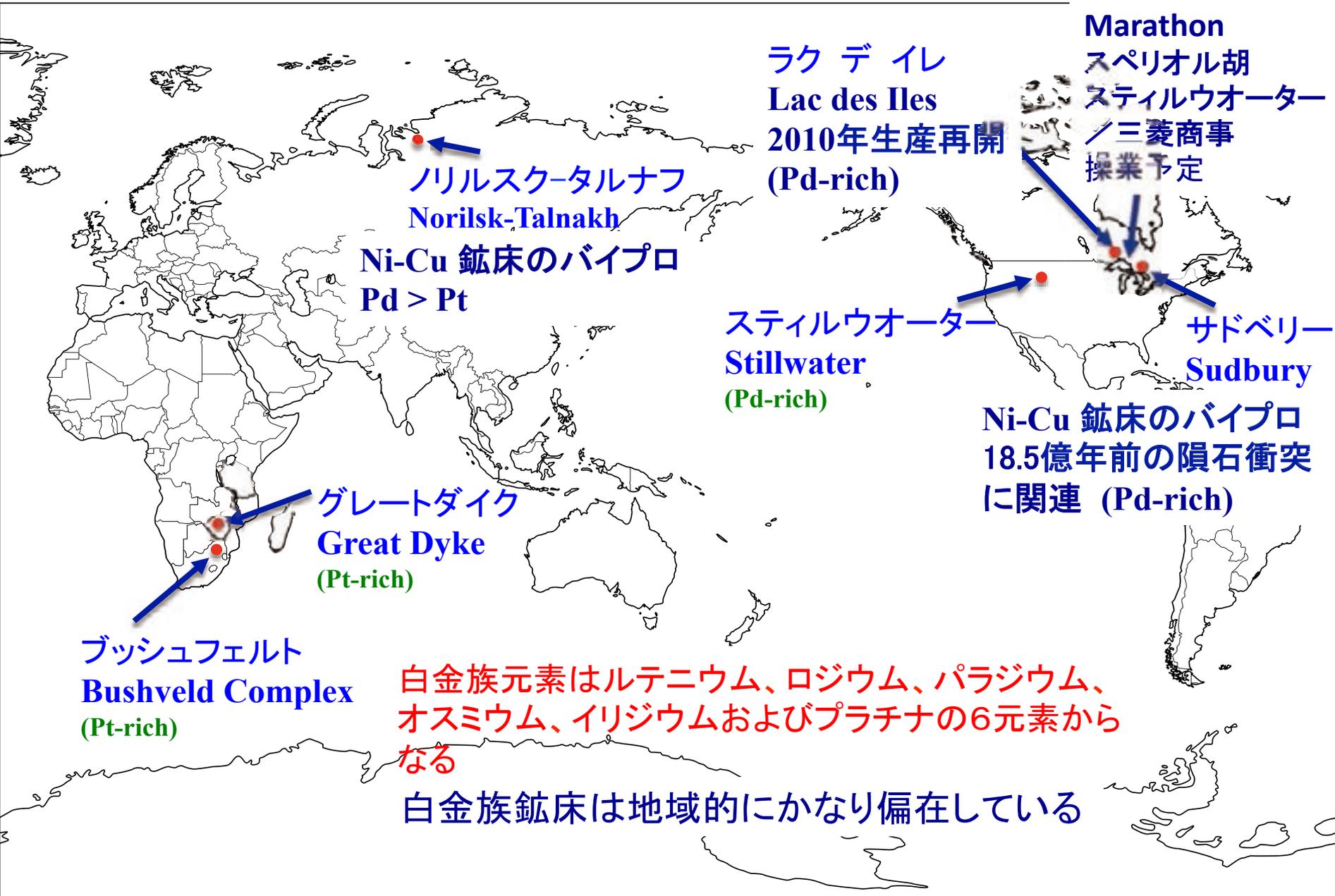
国別金の埋蔵量

	埋蔵量 (t)	比率 (%)
オーストラリア	7400	14.5
南アフリカ	6000	11.8
ロシア	5000	9.8
チリ	3400	6.7
アメリカ	3000	5.9
インドネシア	3000	5.9
ペルー	2000	3.9
中国	1900	3.7
ウズベキスタン	1700	3.3
ブラジル	1400	2.7
ガーナ	1400	2.7
メキシコ	1400	2.7
パプアニューギニア	1200	2.4
カナダ	920	1.8
その他	10000	19.6
世界合計	51000	100.0



(USGS Mineral Commodity Summaries, 2012)

世界の主要な白金族鉱床地域



ノリルスク-タルナフ
Norilsk-Talnakh

Ni-Cu 鉱床のバイプロ
Pd > Pt

グレートダイク
Great Dyke
(Pt-rich)

ブッシュフェルト
Bushveld Complex
(Pt-rich)

ラク デ イレ
Lac des Iles
2010年生産再開
(Pd-rich)

スティルウォーター
Stillwater
(Pd-rich)

Ni-Cu 鉱床のバイプロ
18.5億年前の隕石衝突
に関連 (Pd-rich)

マラソン鉱山
Marathon
スペリオル湖
スティルウォーター
三菱商事
操業予定

サドベリー
Sudbury

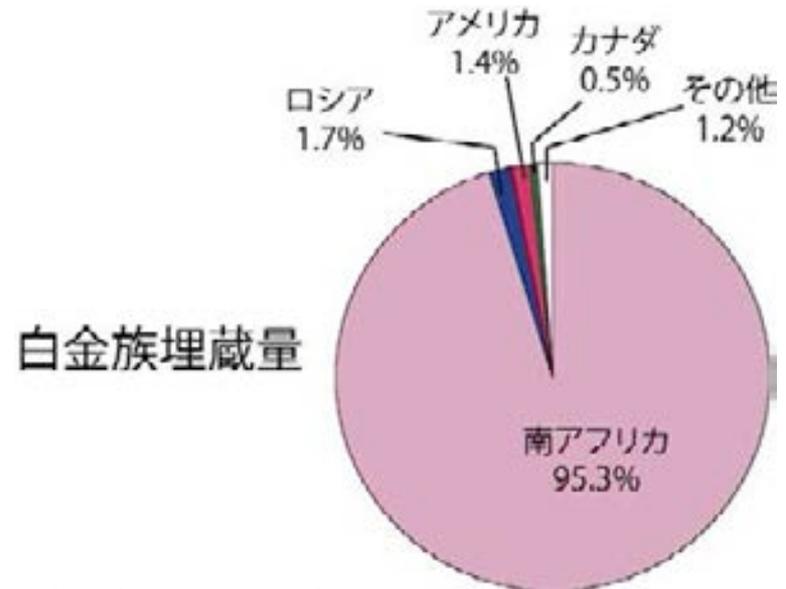
白金族元素はルテニウム、ロジウム、パラジウム、
オスミウム、イリジウムおよびプラチナの6元素から
なる

白金族鉱床は地域的にかなり偏在している

国別白金族埋蔵量 (t)

白金族埋蔵量

	埋蔵量 (t)	比率 (%)
南アフリカ	63,000	95.3
ロシア	1,100	1.7
アメリカ	900	1.4
カナダ	310	0.5
その他	800	1.2
世界合計	66,110	100.0

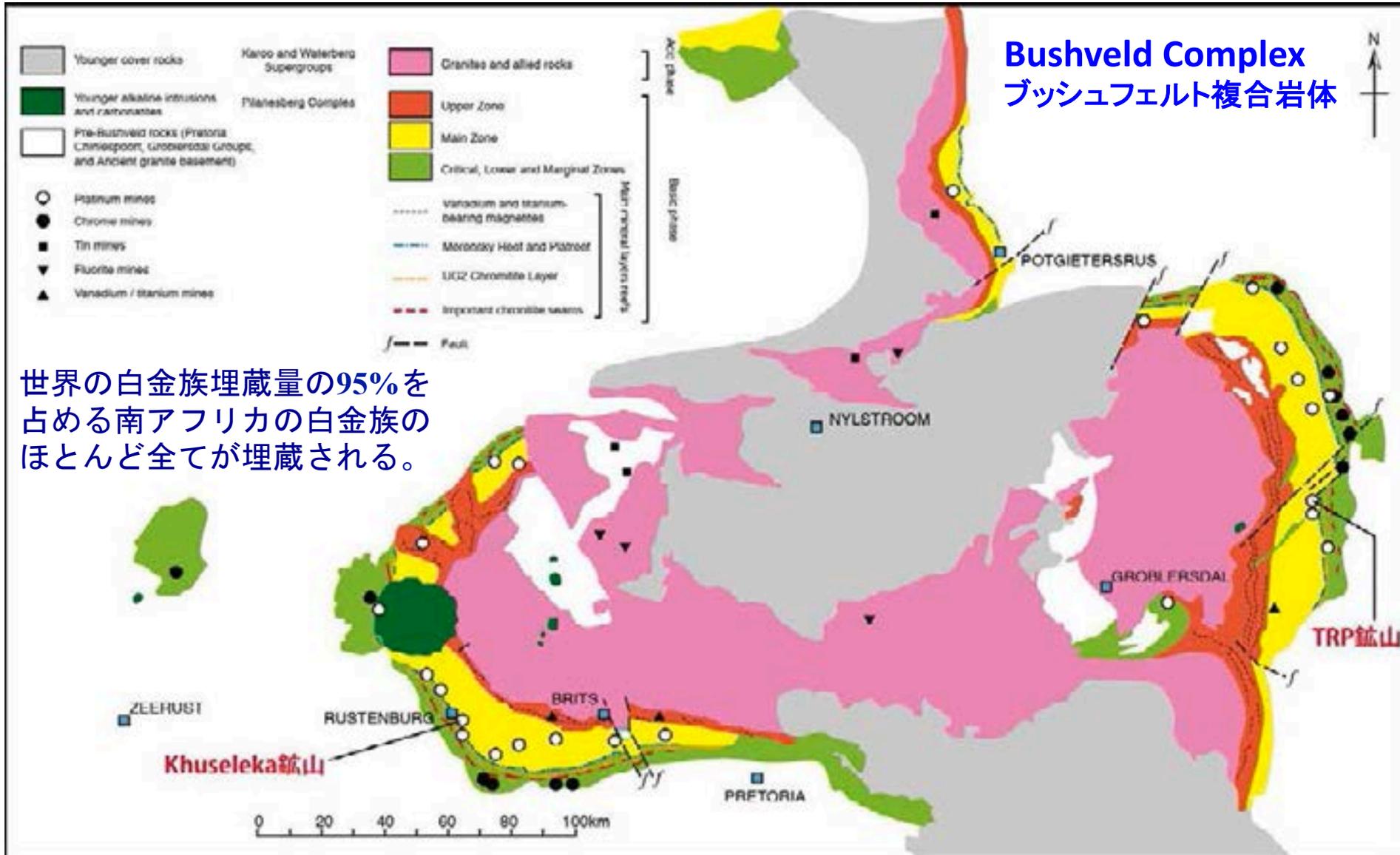


プラチナなどの白金族は世界的に偏在している

南アフリカ共和国と研究協力を進める

(USGS Mineral Commodity Summaries, 2012)

南アフリカ共和国の白金族鉱山



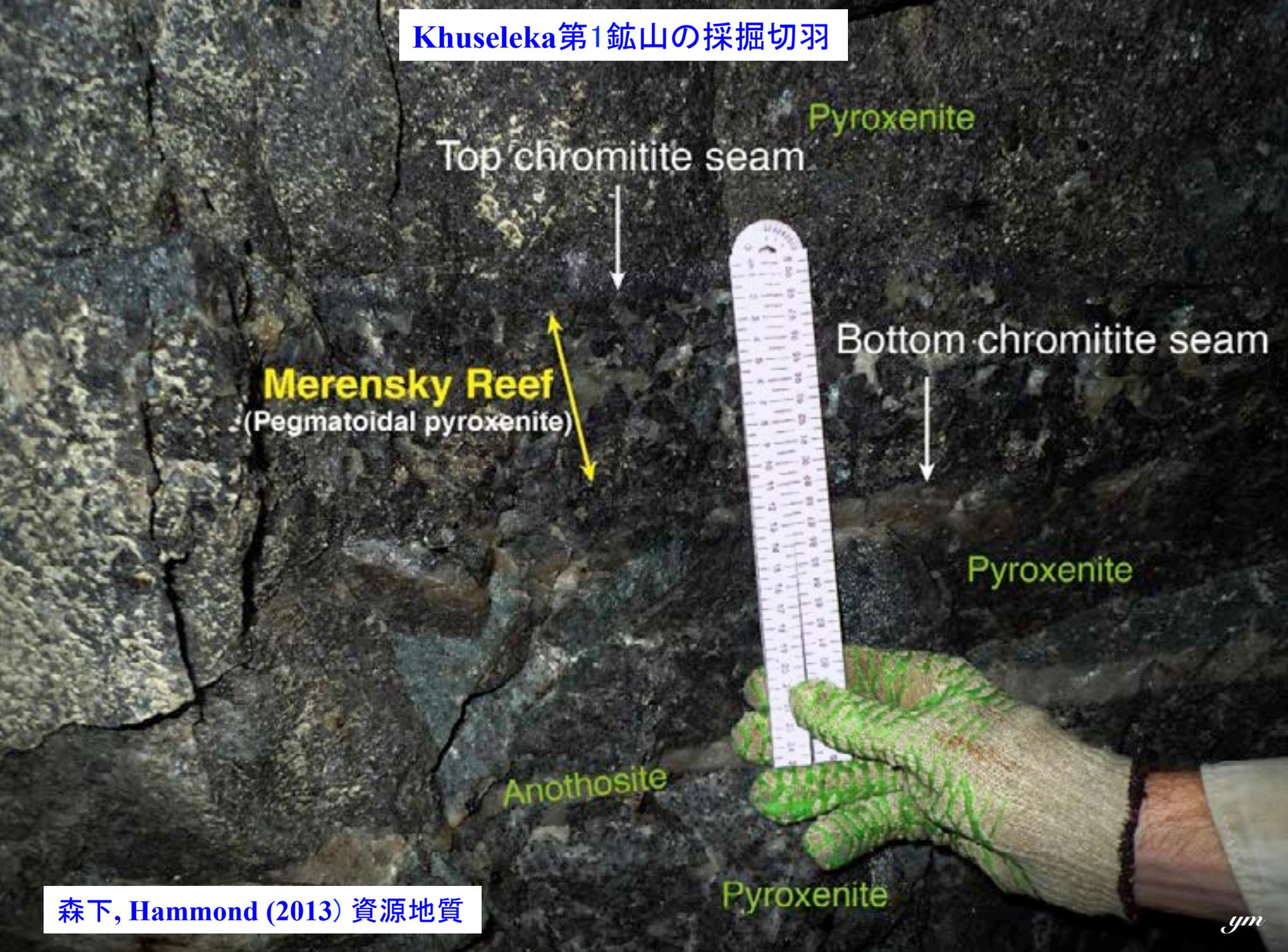
世界の白金族埋蔵量の95%を占める南アフリカの白金族のほとんど全てが埋蔵される。

(Viljoen and Schurmann, 1998; Johnson Matthey, 2008)

Khuseleka第1鉱山立坑
巻き上げ機とケージ(通洞レベルまで)



Khuseleka第1鉱山の採掘切羽



Top chromitite seam

Pyroxenite

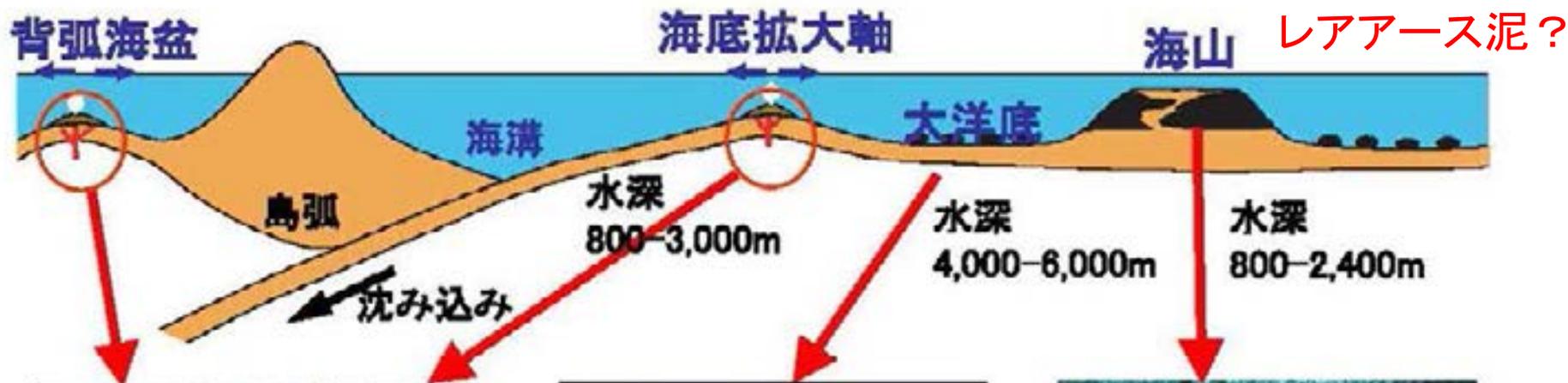
Merensky Reef
(Pegmatoidal pyroxenite)

Bottom chromitite seam

Pyroxenite

Anothosite

Pyroxenite



海底熱水鉱床
-Hydrothermal Deposits

銅、鉛、亜鉛、金、銀、レアメタル



マンガン団塊
-Manganese Nodules

マンガン、銅、ニッケル、コバルト



コバルト-リッチ・クラスト
-Cobalt-rich Manganese Crusts

マンガン、ニッケル、コバルト、白金

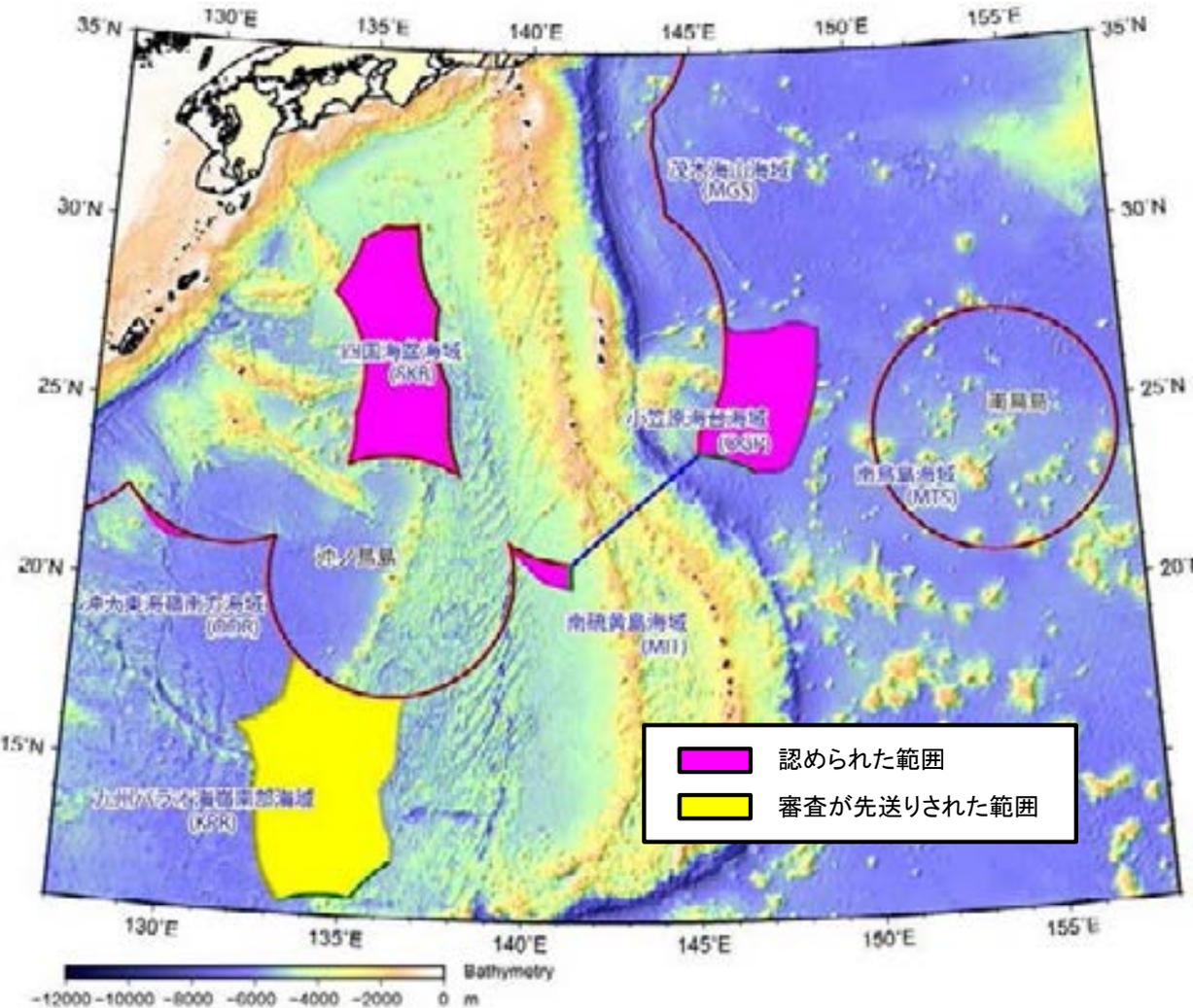
注: いずれもまだ開発されていない

我が国の延長大陸棚

2008年
EEZを越える大陸棚の
延伸を国連の大陸棚
限界委員会に申請

2012年
部分的な回答
約31万平方キロメー
トルの大陸棚延長が認
められた

EEZ = Exclusive Economic
Zone (排他的経済水域)
領海から200海里(約370km)



内閣官房総合海洋政策本部事務局 (2012.5.25)

本日のまとめ

地質学が発展して来た原動力の一つは鉱物資源探査だが、貿易活動の活発化に伴い鉱物資源も商品の一つとなり、「1円でも安い金属を輸入すれば良い」という経済至上主義が主流となった。

しかし、レアアース危機などの供給障害が起こり、これに対する反省により、国として鉱物資源安全保障を重要視するようになった。

そのためには資源国への投資や外交だけでなく、資源国と研究協力することも重要であり、国内外で鉱物資源の研究を行っている。

鉱物資源の研究は、鉱床の成因(資源生成メカニズム)を解明することであり、それは鉱床探査にも役立つ。

研究手法として「同位体比測定」と「SIMSによる微小領域分析」を基盤とした研究を紹介した。