

鉍床の成因研究と探査への応用

Study of ore genesis and its implications for exploration

実松 健造

Kenzo Sanematsu

鉍物資源研究グループ

2017年12月7日

地圏資源環境研究部門研究成果報告会@秋葉原

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

内容

- 鉍物資源とは
- 希土類鉍床の成因研究
(これまでの研究)
- ニッケル-コバルト鉍床の成因研究
(これから取り組む研究)



鉱物資源とは

金属鉱物資源

金属元素の物理化学的特性を目的とする。
有用元素の含有率（品位）が特に重要。

非金属鉱物資源

有用鉱物の物性を目的とすることが多い。
比較的簡単な処理をして利用することが多い。

有用元素・鉱物が地球表層に濃縮し、経済的に採掘できそう、または採掘されているものが鉱床。

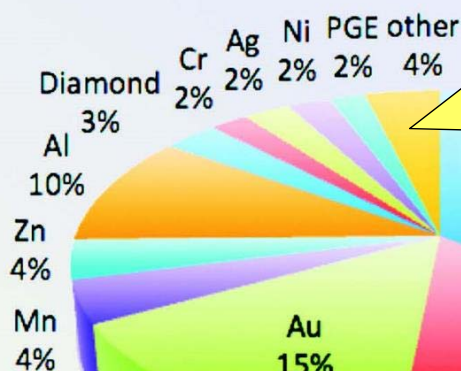
鉱床の成因研究の出口

→ 新たな鉱床発見につなげること
（どの地質帯、地質構造、母岩、変質鉱物…）

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

鉱物資源の相対価値

a) Value of production by commodity



産総研では、その他の鉱種（主にレアメタル）を調査・研究してきました。

製精錬後の金属生産量の相対価値 (Ericsson, 2008; USGS, 2016; Arndt et al., 2017).

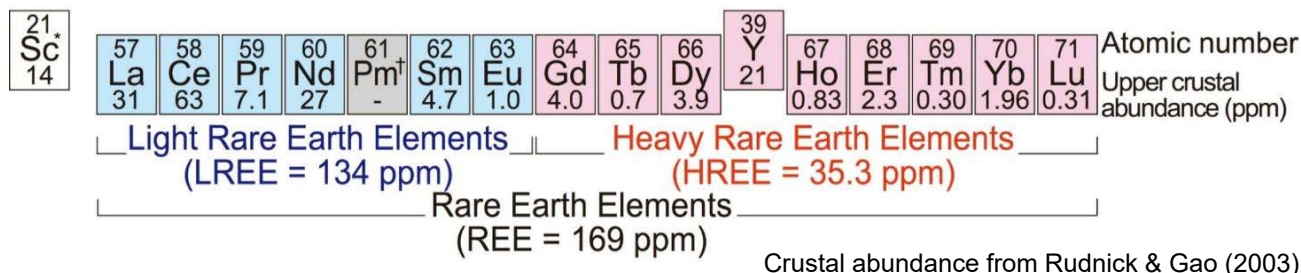
NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

レアメタルとは

族 1																	18					
1																	2					
1	H 水素																	He ヘリウム				
	金属																		半金属		非金属	
2	3	4															13	14	15	16	17	18
2	Li リチウム	Be ベリリウム															B ホウ素	C 炭素	N 窒素	O 酸素	F フッ素	Ne ネオン
	ベースメタル																		貴金属		レアメタル	
3	11	12															13	14	15	16	17	18
3	Na ナトリウム	Mg マグネシウム															Al アルミニウム	Si ケイ素	P リン	S 硫黄	Cl 塩素	Ar アルゴン
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36				
4	K カリウム	Ca カルシウム	Sc スカンジウム	Ti チタン	V バナジウム	Cr クロム	Mn マンガン	Fe 鉄	Co コバルト	Ni ニッケル	Cu 銅	Zn 亜鉛	Ga ガリウム	Ge ゲルマニウム	As ヒ素	Se セレン	Br 臭素	Kr クリプトン				
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54				
5	Rb ルビジウム	Sr ストロンチウム	Y イットリウム	Zr ジルコニウム	Nb ニオブ	Mo モリブデン	Tc テクネチウム	Ru ルルチニウム	Rh ロジウム	Pd パラジウム	Ag 銀	Cd カドミウム	In インジウム	Sn 錫	Sb アンチモン	Te テルル	I ヨウ素	Xe キセノン				
6	55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86				
6	Cs セシウム	Ba バリウム	ランタノイド	Hf ハフニウム	Ta タンタル	W タングステン	Re レニウム	Os オスミウム	Ir イリジウム	Pt 白金	Au 金	Hg 水銀	Tl タリウム	Pb 鉛	Bi ビスマス	Po ポロニウム	At アスタチン	Rn ラドン				
7	87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118				
7	Fr フランシウム	Ra ラジウム	アクチノイド	Rf ラザホーニウム	Db ドブニウム	Sg シーボーギウム	Bh ボーリウム	Hs ハッachニウム	Mt マイトネリウム	Ds ダームスタチウム	Rg レントゲニウム	Cn コペルニシウム	Nh ニホニウム	Fl フロロビウム	Mc モスコビウム	Lv リバモニウム	Ts テネシン	Og オガネソン				
	↓																					
	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71							
	La ランタン	Ce セリウム	Pr プラセオジウム	Nd ネオジウム	Pm プロメチウム	Sm サマリウム	Eu ユーロビウム	Gd ガドリウム	Tb テルビウム	Dy ジスプロジウム	Ho ホルミウム	Er エルビウム	Tm ツリウム	Yb イットリウム	Lu ルテチウム							
	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103							
	Ac アクチニウム	Th トリウム	Pa プロアクチニウム	U ウラン	Np ネプツニウム	Pu プルトニウム	Am アメリシウム	Cm キュリウム	Bk バークリウム	Cf ガハホルニウム	Es アインスタイニウム	Fm フェルミウム	Md メンデレビウム	No ノーベリウム	Lr ローレンシウム							

希土類鋁床の成因研究 (これまでの研究)

希土類(レアアース)とは



- 天然では共に産出するため、分離抽出が高コスト。
- 重希土類の需要が増加(ハイブリッド車の磁石等)。
- 軽希土類に比べて、重希土類は天然の存在量が少なく高価。



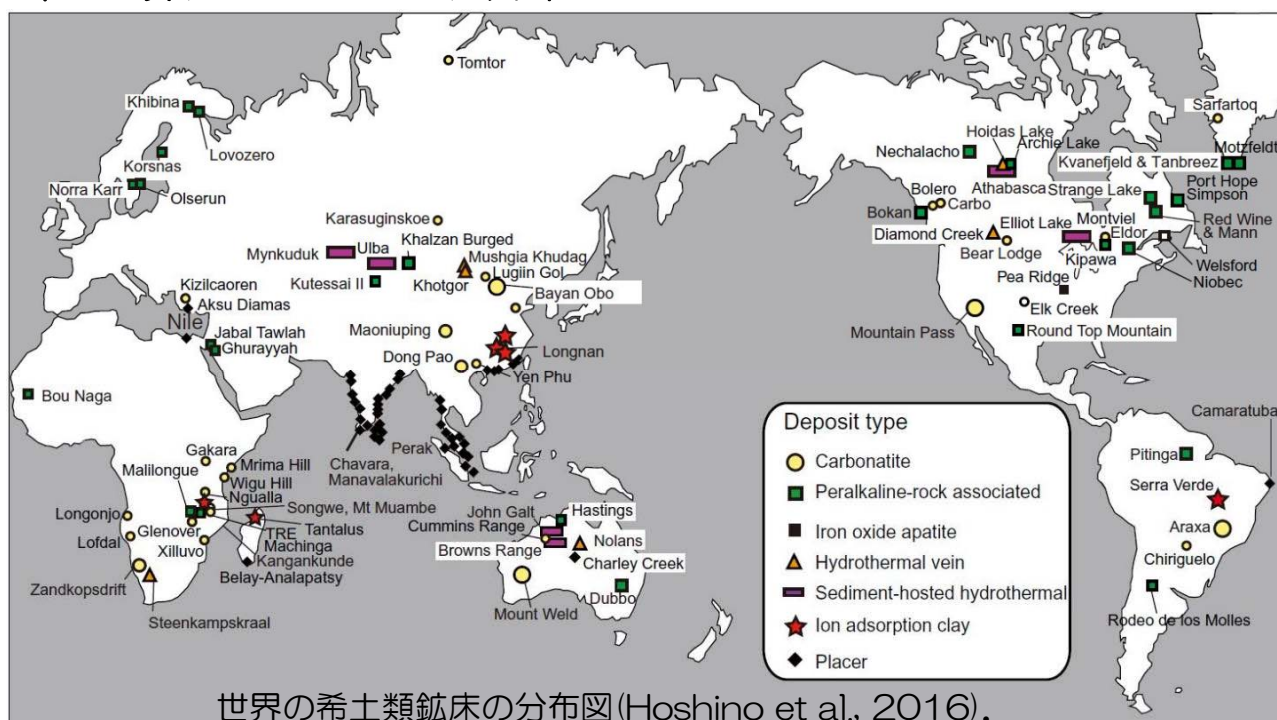
各希土類の酸化物



ハイブリッド車

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

希土類(レアアース)鉱床とは



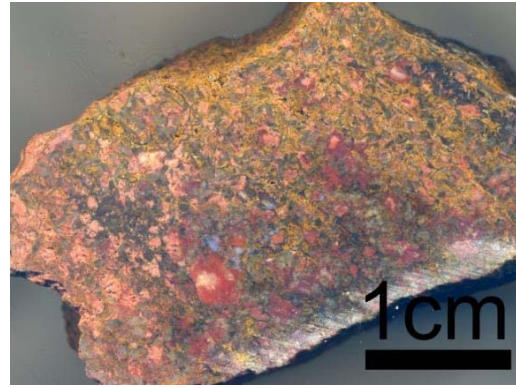
世界に希土類鉱床は多数確認されているが、経済的に開発可能なのはごく一部。

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

希土類資源の問題点



Bayan Obo鉱山(中国)の鉱石



Mountain Pass鉱山(米国)の鉱石

- カーボナタイトは高品位だが、重希土類に乏しくトリウムに富む。
- 重希土類資源のほとんどは中国南部のイオン吸着型鉱床(低トリウム)から生産されている。

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

イオン吸着型希土類鉱床



江西省竜南地区の鉱床採掘跡(石原ほか, 2005)

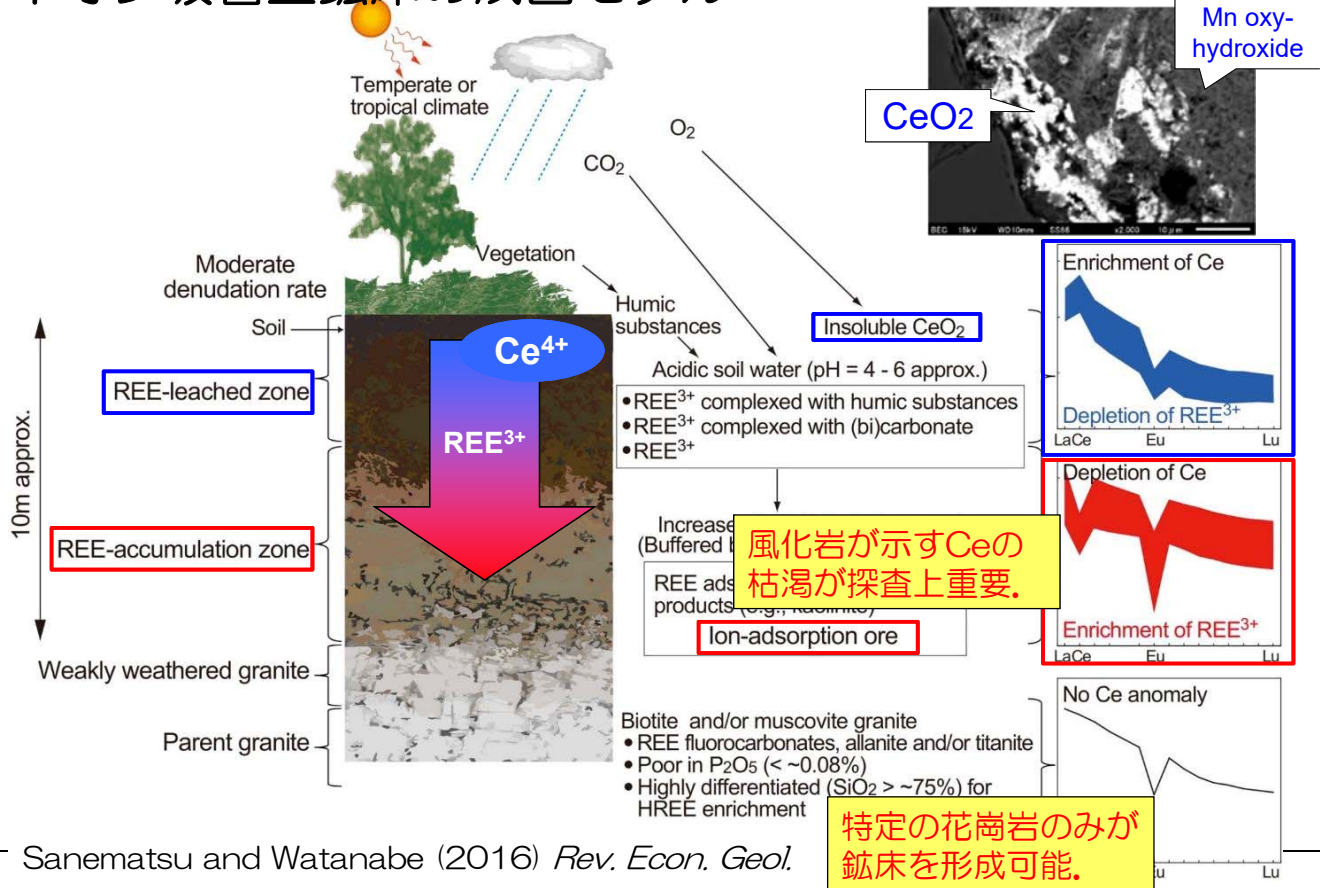


江西省定南地区の鉱床。

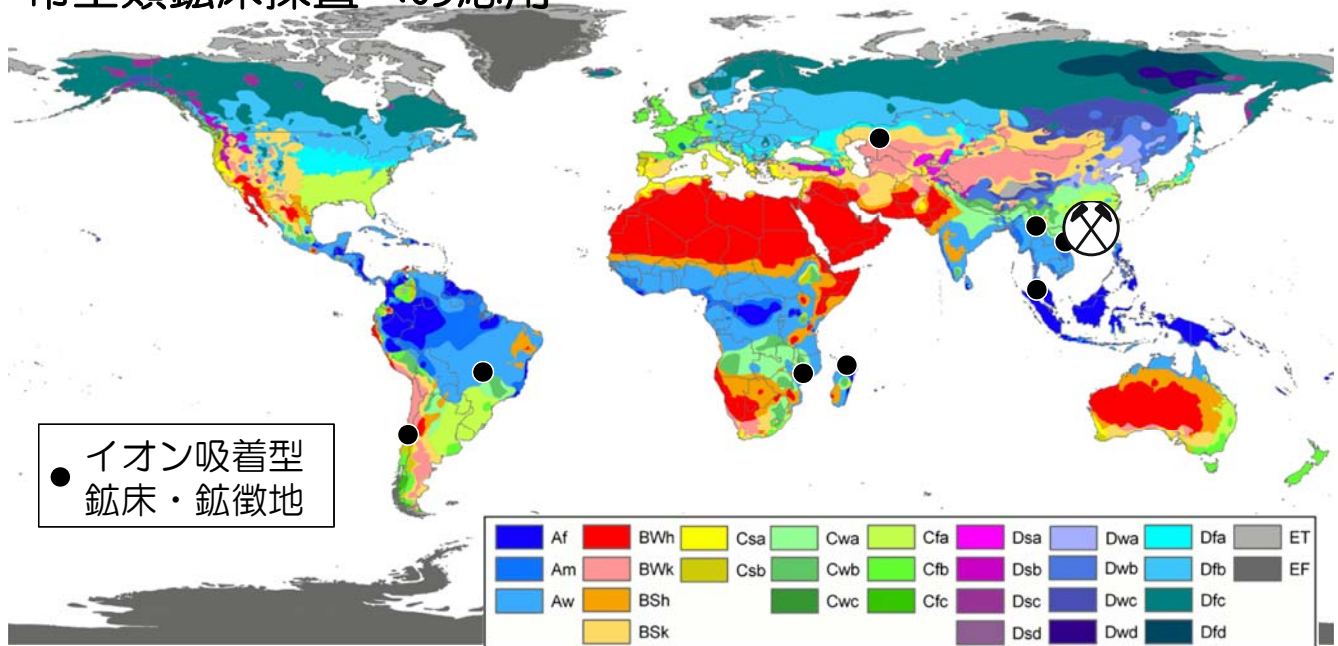
- 鉱石の多くは風化花崗岩
- REE品位は140 - 6500ppm (平均800ppm程度)
- 希土類の大部分は粘土表面に静電的に吸着
- 発破, 破碎・粉碎, 選鉱が不要なことが多い
- 希土類は電解質溶液を用いて回収
- 放射性元素(Th, U)が低濃度

(e.g., Wu et al., 1990; Huo, 1992; Bao & Zhao, 2008; Sanematsu and Watanabe, 2016)

イオン吸着型鉱床の成因モデル



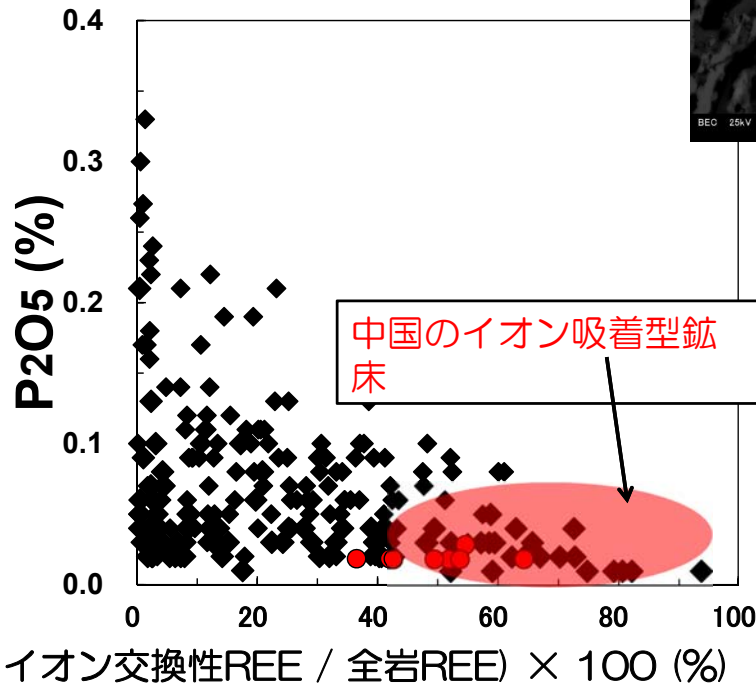
希土類鉱床探査への応用



A: 熱帯 B: 乾燥帯 C: 温帯 D: 亜寒帯 E: 寒帯
世界地図とケッペンの気候区分 (Peel et al., 2007)

イオン吸着型希土類鉱床は温帯に発達する傾向 (Sanematsu & Watanabe, 2016).

希土類鉱床探査への応用



Monazite
[(REE,Th)PO₄]



希土類はリン酸塩鉱物に固定される。

- ◆ Sanematsu et al. (2015) *Jour. Asian Earth Sci.*
- Sanematsu and Kon (2013) *Bull. Geol. Surv. Japan*

リン酸(P₂O₅)に乏しい風化岩が鉱石となる傾向がある。
P₂O₅は蛍光X線分析(XRF)により、簡単に定量可能。

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

希土類鉱床探査への応用



ブラジル Serra Verde鉱床(イオン吸着型)
資源量(measured) 22百万t@0.21% 酸化希土類
鉱体厚さは6m程度。
イオン交換性希土類は10~90%(本当か?)。

実松(2017) 資源地質とその引用文献

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

ニッケル-コバルト鉱床の成因研究 (これから取り組む研究)

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

コバルトの需要の急増

電気自動車の写真

世界のコバルト平均価格(USD/lb)
の推移を示したグラフ

電気自動車のリチウムイオン二次電池。
主要国での2040年までにガソリン車販売禁
止。

Roskill (2017)

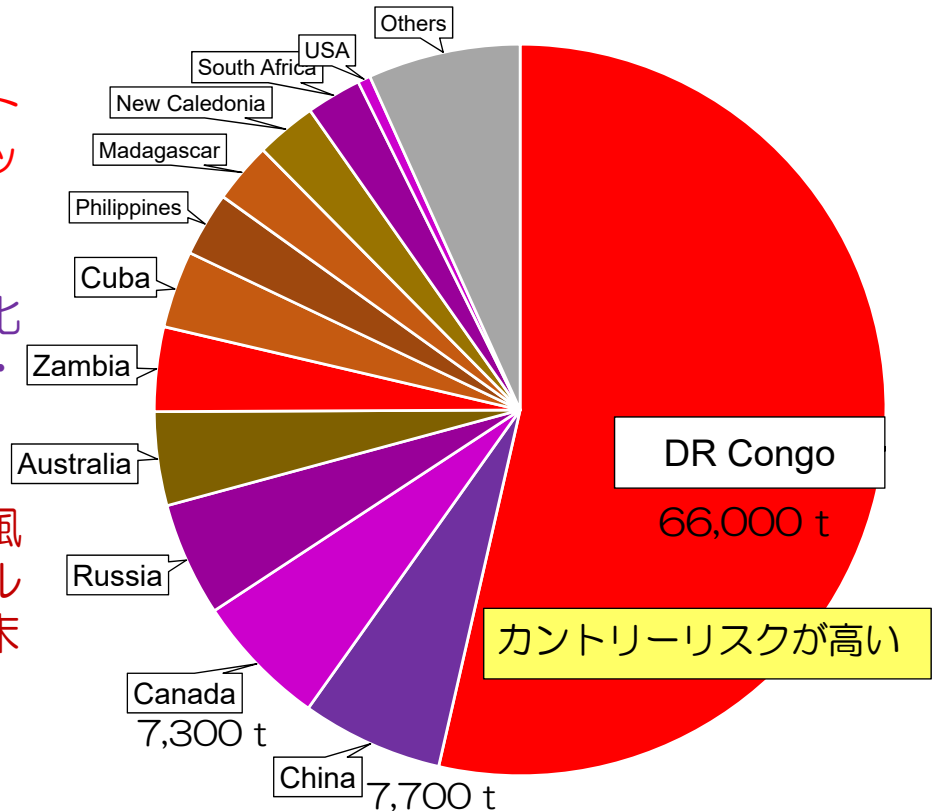
世界のコバルト消費量(kt)の将来予想の表
2026年にはバッテリー用として230.8kt
のコバルトの消費量が見込まれる。

Roskill (2017)

コバルトの生産量 と鉱床タイプ

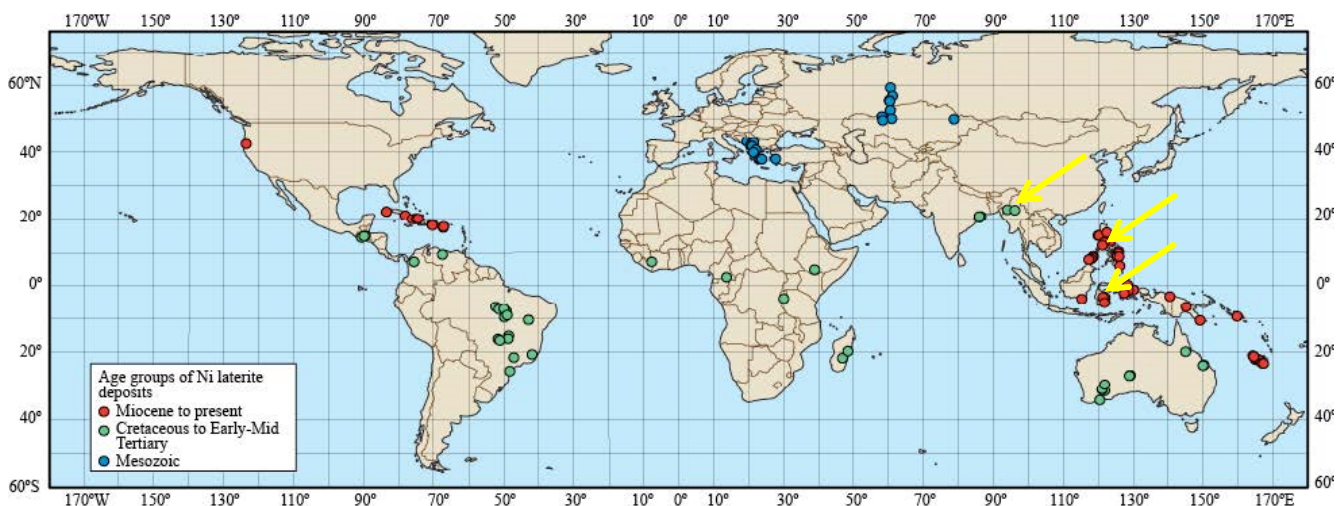
Estimated mine production of cobalt (USGS, 2017)

- 堆積性含コバルト
銅 鉱 床 （カッ
パー・ベルト）
- マグマ性（硫化
物）含コバルト・
ニッケル鉱床
- ラテライト型（風
化型）含コバル
ト・ニッケル鉱床



NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

ラテライト型ニッケル鉱床



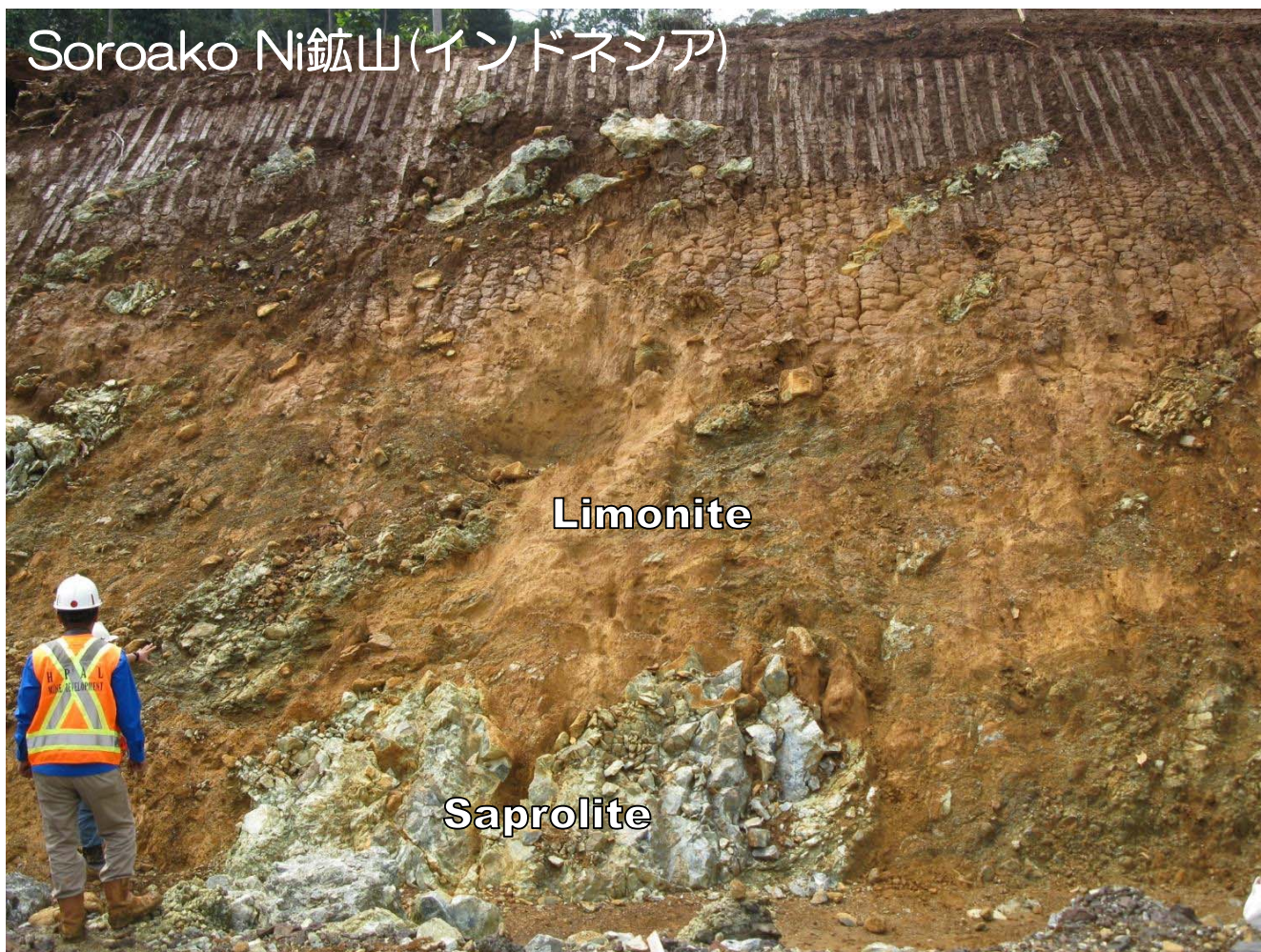
Distribution of representative lateritic Ni deposits (Berger et al., 2011).

ラテライト型ニッケル鉱床は超苦鉄質岩がある温暖・湿潤な
気候で発達。

少量のコバルトを含むが（Ni/Co=7-52），必ずしも製精錬
過程でコバルトが回収されている訳ではない。

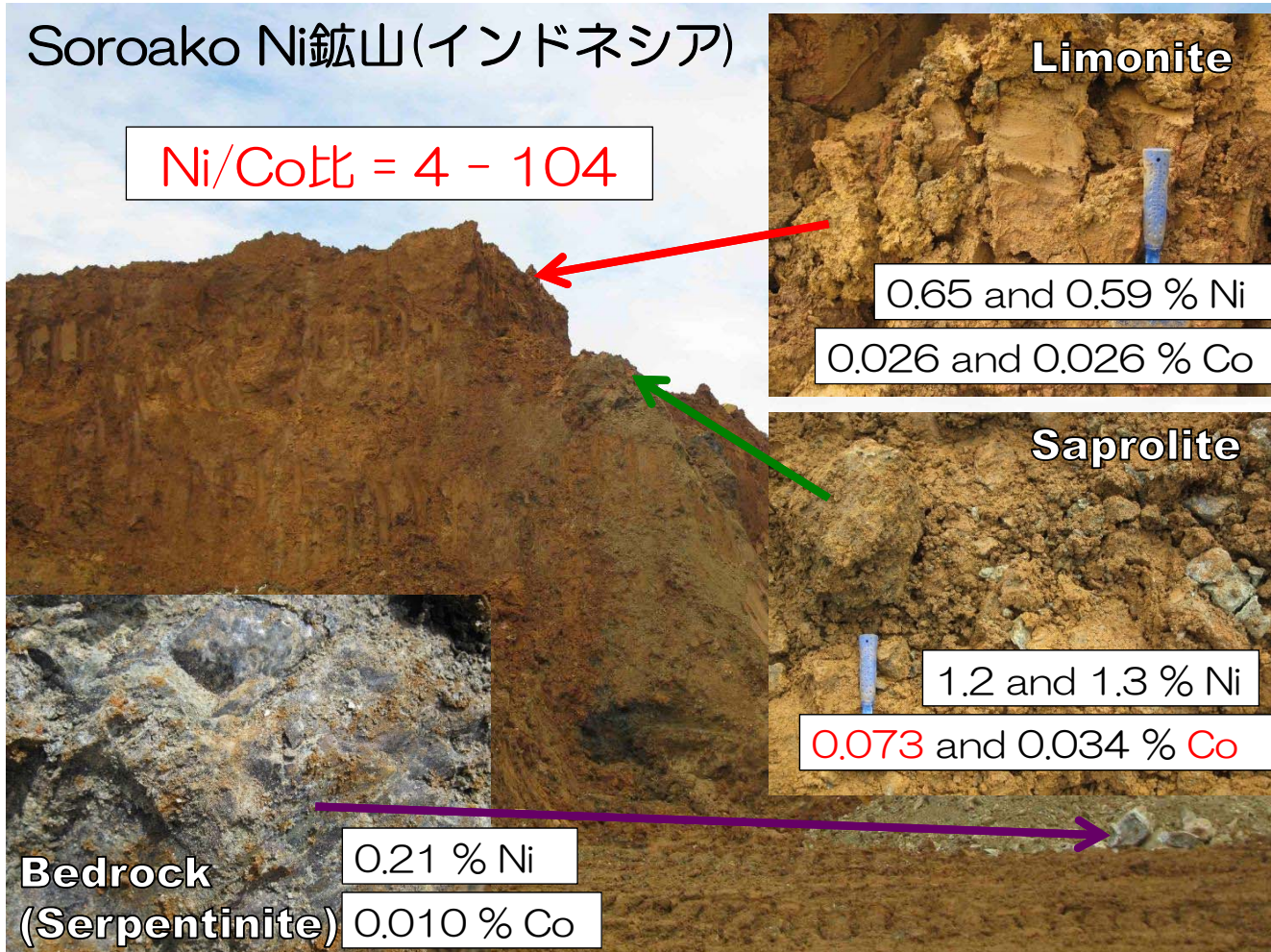
NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

Soroako Ni 鉱山 (インドネシア)

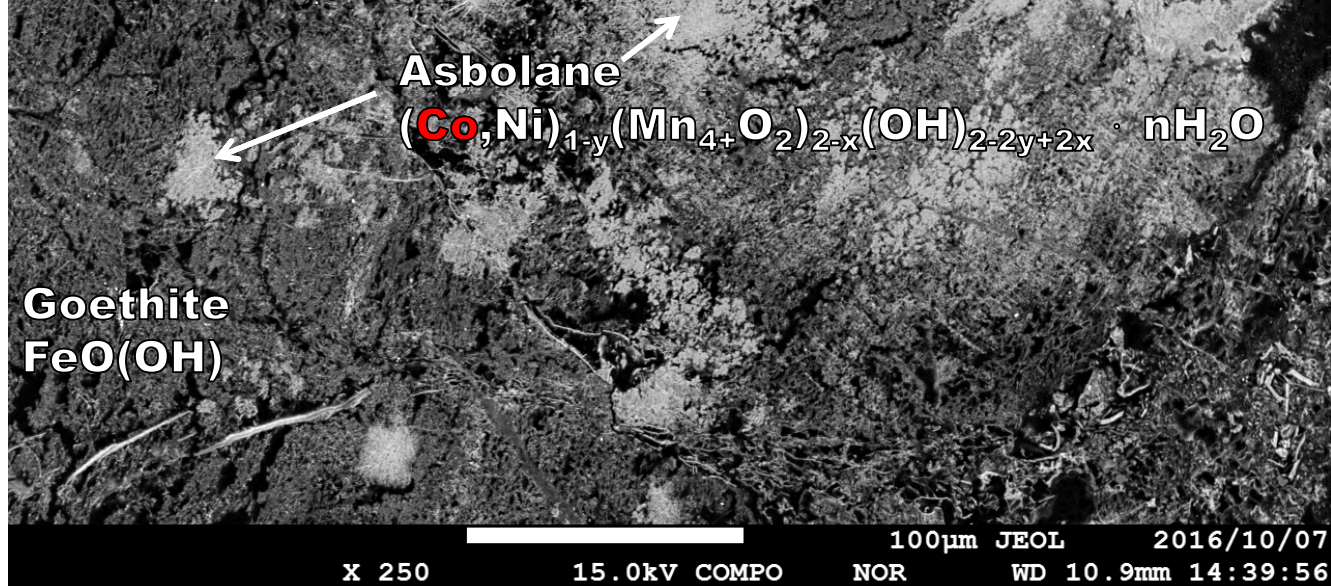


Soroako Ni 鉱山 (インドネシア)

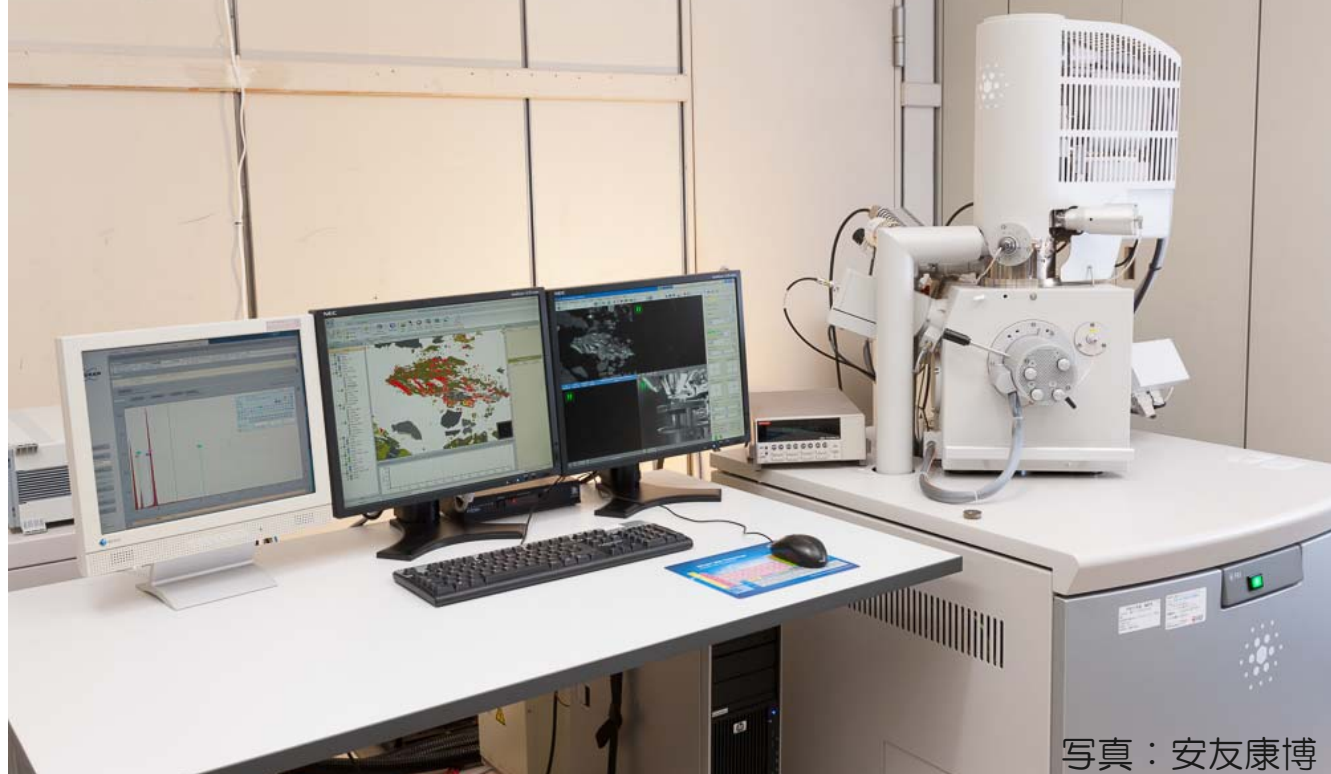
Ni/Co 比 = 4 - 104



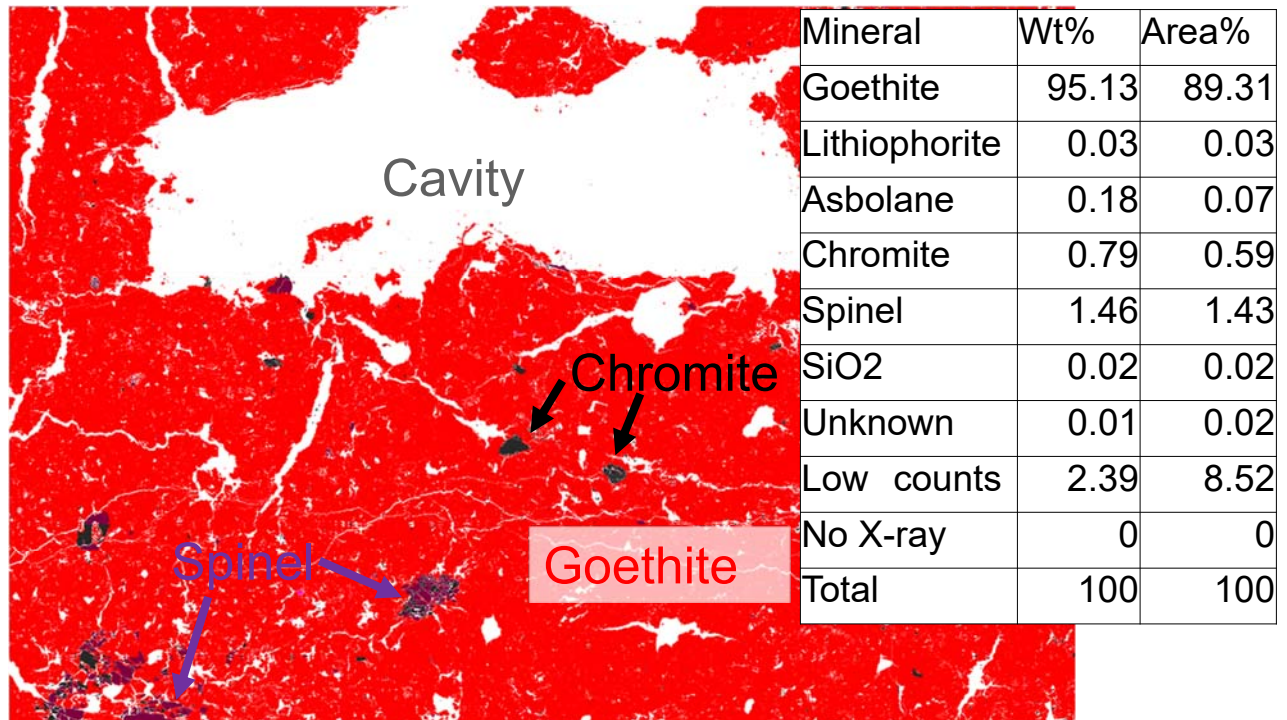
Soroako 鉱山のリモナイト鉱の反射顕微鏡写真



MLA (Mineral Liberation Analyzer) を用いた鉱物の定量



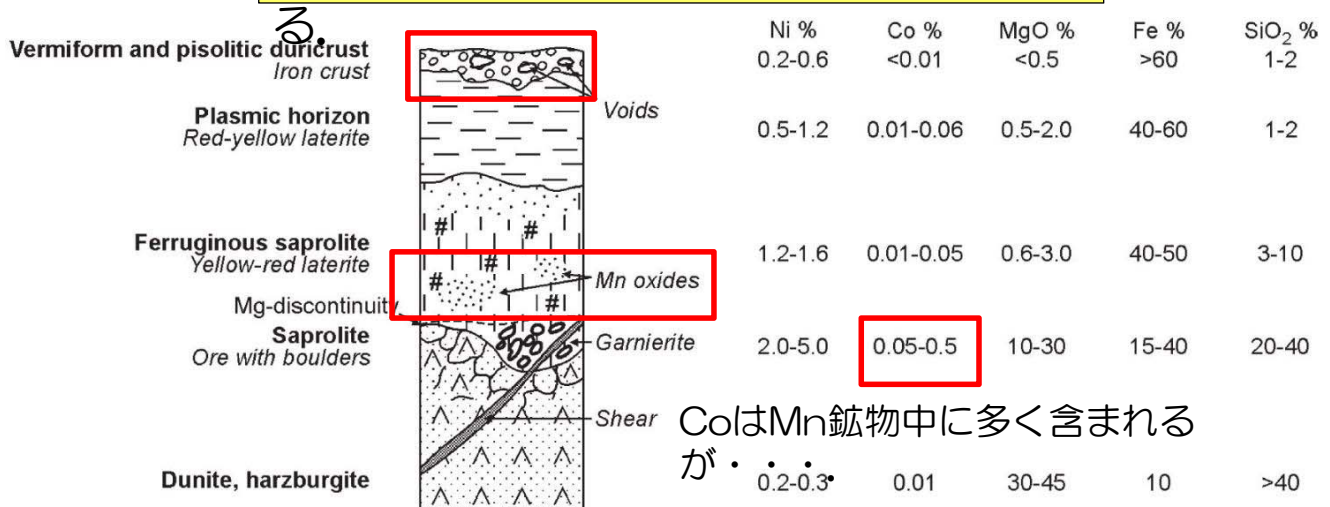
MLA (Mineral Liberation Analyzer) を用いた鉱物の定量(例)



ニッケルはserpentineやgoethiteに、
CoはMn酸化物に大部分が含まれている。

これから取り組む研究

今後の課題① Ni-Co鉱床の規模を地表の
情報（地化学異常など）から読み取る。



今後の課題② 広域的にCoに富む鉱床の特定。

Lateritic profile of the Goro deposit in New Caledonia (Freyssinet et al., 2005)

Eramen Ni鉍山 (フィリピン)



Berong Ni鉍山 (フィリピン)

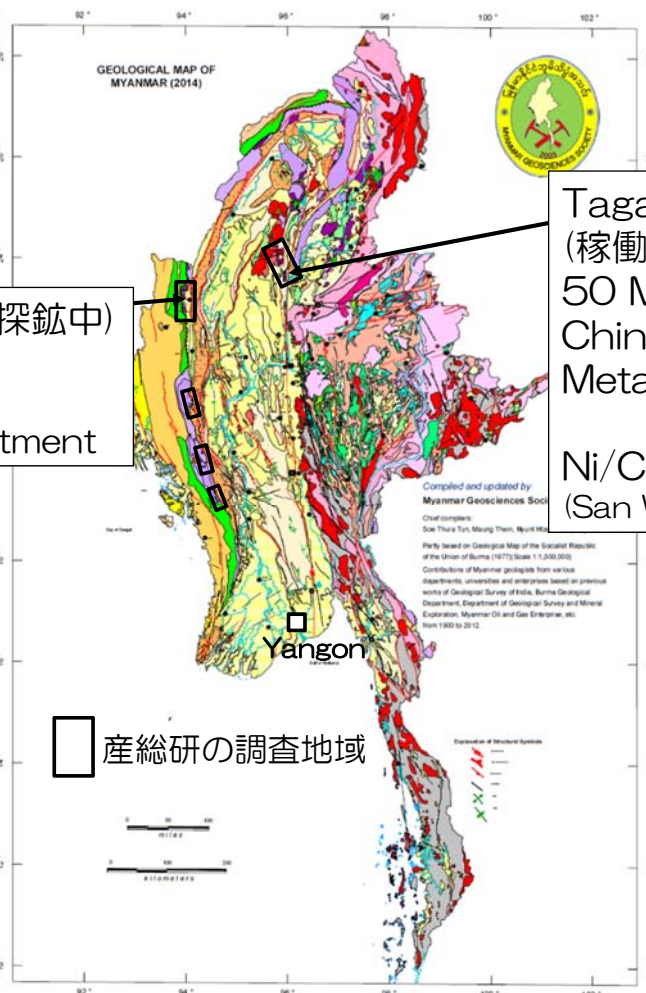


ミャンマー のニッケル 鉱床

Mwe Taung 鉱床 (探鉱中)
42 Mt @ 1.4 % Ni
(Lynn Myint, 2016)
North Mining Investment

Tagaung Taung 鉱山
(稼働中)
50 Mt @ 1.4% Ni(?)
China Nonferrous
Metal Mining

Ni/Co ratio = ~70
(San Win et al., 2014)



Mwe Taung Ni 鉱床 (ミャンマー)



Mwe Taung Ni鉱床(ミャンマー)



ラテライト質鉱体の厚さは0~43.9m(Lynn Myint, 2016)と報告されているが・・・



まとめ

- 重希土類資源として重要なイオン吸着型鉱床は、特定の花崗岩(SiO_2 >~74%など)を原岩とし、温暖湿潤な地域に確認される。風化岩の示すCeの枯渇や低 P_2O_5 濃度が地化学探査の指標となる。
- コバルトは銅ベルトを除くと、ニッケル鉱床（マグマ性及びラテライト型）の副産物が重要。コバルトに富むラテライト型鉱床の成因を研究中。

参考文献

- Arndt, N.T., Fontboté, L., Hedenquist, J.W., Kesler, S.E., Thompson, J.F.H. and Wood, D.G. (2017) Future Global Mineral Resources, *Geochemical Perspectives*, 6(1), p. 1-171.
- Berger, V.I., Singer, D.A., Bliss, J.D., and Moring, B.C. (2011) Ni-Co laterite deposits of the world; database and grade and tonnage models: U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1058, 26p.
- Ericsson, M. (2008) Trends in Mining, Present & Future. UNCTAD Secretary-General's High-Level Multi-Stakeholder Dialogue on Commodities in the context of UNCTAD XII 28-29 January 2008.
- Freyssinet, P., Butt, C.R.M., Morris, R.C. and Piantone, P. (2005) Ore-forming processes related to lateritic weathering. *Economic Geology* 100th Anniversary, p.681-722.
- Hoshino, M., Sanematsu, K., and Watanabe, Y. (2016) REE Mineralogy and Resources. *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, v. 49, p. 129-291.
- Lynn Myint (2016) Feasibility Study on Development of Mwetaung Lateritic Nickel Deposit Teddim Township, Chin State, the Republic of the Union of Myanmar. Presentation of Myanmar Mining Summit 2016.
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A. (2007) Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, European Geosciences Union, 2007, 11 (5), p.1633-1644.

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

参考文献

- Roskill (2017) Cobalt: Global Industry, Markets and Outlook to 2026. 13th Edition, Roskill Information Services Ltd., London, 222p.
- 実松健造 (2017) ブラジル連邦共和国ゴイアス州のSerra Verge希土類鉱床. *資源地質*, 67巻(2), p.117-123.
- Sanematsu, K. and Kon, Y. (2013) Geochemical characteristics determined by multiple extraction from ion-adsorption type REE ores in Dingnan County of Jiangxi Province, South China. *Bulletin of Geological Survey of Japan*. 64(11/12), 313-330. https://www.gsj.jp/data/bulletin/64_11_01.pdf
- Sanematsu, K. and Watanabe, Y. (2016) Characteristics and Genesis of Ion-Adsorption Type REE Deposits. In *Rare and Critical Elements in Ore Deposits, Reviews in Economic Geology*, v. 18, p. 55-79.
- Sanematsu, K., Kon, Y. and Imai, A. (2015) Influence of phosphate on mobility and adsorption of REEs during weathering of granites in Thailand. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 111, p. 14-30.
- Soe Win, Than Thay, Tin Lin and Win Myint Law (2014) A case study of Tagaung Taung nickel laterite deposit: From prospect to a mine. Unpublished report, 32p.
- USGS (2016) Mineral commodity summaries 2016. U.S. Geological Survey, 202p.
- USGS (2017) Mineral commodity summaries 2016. U.S. Geological Survey, 202p.

NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)