2013 年の地質鉱物関連英文ニュース誌の話題 「資源開発, 岩石・鉱物, 及び発表スライド」

Some topics in English newsmagazines in 2013, with special reference to mining, the rocks and minerals, and better presentation slides.

高橋 裕平 (Yuhei TAKAHASHI)*

Information collected from geological newsmagazines in 2013 is reviewed. First topic is overview of resources such as mineral commodity summary in USA, research on rare earth elements in Alaska, new oil and gas assessment of United States Geological Survey and geothermal energy of Australia. Second topic is on the rocks and minerals. It includes heritage stone resources (activity of task group and nomination of some examples), chalcopyrite mineralogy and classification programs of igneous rocks. Third topic is some remarks for better power point slides.

Keywords: Mineral resources, Rare earth elements, Geothermal energy, Heritage stone, Serpentine, Chalcopyrite, Igneous rocks, Presentation

I. ま え が き

地質鉱物学分野で今どんなことが話題となっているのか、あるいは社会が何を地質鉱物学分野に求めているかの情報源の一助となるよう、2013年に入手した英文ニュース誌で野外系の鉱物科学分野に関する話題を紹介する。鉱物科学会会員は“Elements”から鉱物科学に関してテーマを絞った動向を得られる。これに対し、小論ではウェブで主に入手できる雑多な情報を提供する。実務をめざす地質鉱物学分野の学生諸氏を読者に意識しているが、開発最前線の技術者が周辺動向を展望する一助になることも願っている。

II. 資 源 開 発

1. 米国の 2012 年鉱物資源動向

米国地質調査所 (United States Geological Survey, 以下 USGS) は、毎年、年が明けるとすぐに前年の鉱物資源概況を報告している。2012 年分の報告 (USGS, 2013) から Magyar and Demas (2013) がトピックをまとめた。それによると、(1) 成長率が 2009 年当初の -20% の急激な減少の後、金属資源は 2009 年後半にほぼ 20% の成長率となっ

た。その後は徐々に減少し 2012 年末には成長率は -2% であった。その一方、非金属鉱物資源産業は、回復はゆっくりであるが、建設業界の活発化により 2012 年の総額が前年より上がった。(2) 米国では、2012 年には 41 鉱種を国内消費の半分以上を国外から輸入に頼り、内 18 鉱種を 100% 国外に依存している。このような中、希土類元素に関して休止していたカリフォルニアのマウンテンパス鉱山が再開し、100% 輸入から脱した。

USGS (2013) に記されている多くの鉱物資源から、マスコミで話題となりやすい金と希土類元素、鉄鋼やアルミ産業で大量の用途がある蛍石、日本が主要産出国であるゼオライトとヨードを紹介する。記述の順は鉱物名のアルファベット順とする。

(1) 蛍石

国内生産と用途：米国の蛍石は石灰岩採石の副産物として生産されている。蛍石からフッ酸 (HF) の生産を行っている。HF はフッ素を使う化学産業に必須であり、またアルミニウムやウランの精錬に必須である。そのほか、鉄鋼でのフラックス、アルミニウム生産の初期段階、ガラス産業、エナメル、ロッドコーティング、セメント生産などに用途がある。

doi: 10.2465/gkk.140120a

(平成 26 年 1 月 20 日受付, 平成 26 年 5 月 22 日受理, 平成 26 年 6 月 23 日早期公開. 担当編集委員: 赤坂正秀)

* 名古屋大学 PhD 登龍門推進室, 〒464-8601 名古屋市千種区不老町

* PhD Professional Office, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan E-mail: takahashi.yuhei@nagoya-u.jp

リサイクル：年間数千トンの合成蛍石が、ウラン濃集過程、石油アルキル化過程、ステンレス鋼洗浄過程で回収されている。アルミニウム製造の精錬過程でHFやフッ素を回収している。

輸入先：米国の輸入先は、2008年-2011年で、メキシコ69%、中国20%、南アフリカ8%、そのほかが3%である。

市場動向：蛍石の価格は上昇傾向にある。ことに中国産の蛍石は、生産コストの上昇、中国ウォンがUSドルに対して高くなっていること、それに需要の増大で、価格の上昇が著しい。

世界の生産と埋蔵量：生産高には米国の統計が載っていない。米国を除くと、2012年には、中国が世界の産出高(685万トン)の半分以上の420万トンを生産して、メキシコ(120万トン)、モンゴル(42万トン)が続く。埋蔵量については米国のほかいくつかの産出国の統計が伏せられている。公表されている中では、南アフリカ、メキシコ、中国、モンゴルの埋蔵量が多い。世界の蛍石確定埋蔵量は5億トンである。このほか、リン酸塩岩から得られるフッ素を蛍石に換算すると47億トンとなる。米国ではすでにリン酸塩から2012年に蛍石12万8000トン相当分を生産している。

鉱山開発：米国内と国外で蛍石の探鉱と開発が活発化している。ケンタッキー州、リビングストンのKlondike II鉱山では2012年末に脈状鉱体が見つかった。別のプロジェクトでは、やはりケンタッキー州のクリッテンデン(Crittenden)で探鉱が始まった。ベトナムのNui Phao蛍石鉱業プロジェクトでは2013年第1四半期に開発が始まる見通しで、フル稼働すれば年間20万トンの輸出が見込まれる。英国では蛍石生産が2010年末に休止したが、2013年はじめに再開する。ロシアではアルミ工業の会社が300万ドルの投資をしてウラジオストック北の鉱山を近代化して蛍石を採掘する予定である。

代替品：鉄鋼のフラックスとして利用する蛍石の代替物として、アルミニウム精錬過程での生成物、ホウ砂、塩化カルシウム、鉄酸化物、マンガン鉱、ケイ砂、二酸化チタンが使われている。

(2) 金

国内生産と用途：約50のロード鉱山、いくつかの大規模な漂砂鉱山(全てアラスカ)、多くの小規模漂砂鉱山(主にアラスカと西部の州)が生産している。加えて、国内ではベースメタル、とりわけ銅の精錬過程の副産物として回収される。2011年の鉱山からの生産額は約126億ドルであった。用途は装飾に66%、歯科に12%、電子関連に5%、そのほか17%である。

2012年に鉱山からの産出は230トン、リサイクルで240トン回収されている。鉱山や粉碎に従事する者はここ数年確実に増え、2012年は12000人である。

輸入先：2008年から2011年で、メキシコ57%、カナダ20%、コロンビア9%、ペルー3%、そのほか11%である。

市場動向：米国内の鉱山からの金産出量は2011年の234トンから2012年には230トンとわずかに減少した。減少はネバダとユタの鉱山が休止したことによるが、一方、ネバダの稼行鉱山が増産し、モンタナの鉱山が再開したことで、国内総生産量減少分を相殺している。

世界市場：金の生産は、カナダ、中国、ガーナ、マリ、メキシコ、ロシア、タンザニアで増えているが、アルゼンチン、オーストラリア、パプアニューギニア、南アフリカで減って、世界全体では生産量は横ばいである。産出量で中国が最も多く、そして増え続けている。オーストラリア、米国、ロシア、南アフリカが続く。

埋蔵量：USGSが2000年あたりに推定した金埋蔵量は3万3000トンで、そのうち、確定分は1万5000トン、今後発見が予想される分として1万8000トンであった。2012年の報告では世界の埋蔵総量は5万2000トンで10年前の推定より多くなっている。未発見の金の約4分の1が斑岩銅鉱床に含まれると推定されている。

代替品：電子製品ではベースメタルを金が覆うことで広く使われている。このような金をパラジウム、白金、銀が代替する。

(3) ヨード

国内開発と用途：ヨードは、オクラホマの2社とモンタナの1社が稼行している。2011年より2012年の生産はわずかに増えている。ただし、生産高は公表されていない。このうちオクラホマのWoodward社は地下のかん水からヨードを抽出している。ヨードの用途は拡大している。日本で2011年3月の地震と津波で生産量が落ち込み、さらに抗爆剤の需要のため、ヨードの価格は2009年と2010年の25ドル/kg前後から2011年に38ドル/kg、2012年41ドル/kgとなった。2011年には17の工場が無機および有機化合物の加工に向けられ、このうちヨード化エチルとヨード化メチルが50%を占める。

市場動向：最近、ヨードは液晶ディスプレイやX線硬調媒体に向けられ、2011年に日本からの供給が一時中断したことが加わり、ヨードの需要が急激に高まった。2012年末から2013年にかけて高いまま推移し、さらに世界経済の回復でヨードの需要が増し、今後10年間は毎年3.5-4%の割合で価格が上昇すると予想されている。

輸入先：2008年から2011年の米国の輸入量は毎年5000から6000トン程度で、その相手先はチリが84%、日本が15%である。

世界の生産と埋蔵量：主要な生産国は、多い順にチリ、日本、米国である。このうち、チリは世界の生産の59%を占めている。埋蔵量が今回の報告(USGS, 2013)と前年の報告(USGS, 2012; 高橋, 2013)で大きく異なる。USGS(2012)では埋蔵総量が1500万トンであったが、本報告(USGS, 2013)では760万トンと半減している。USGSの利用情報源が代わり、チリの埋蔵量が900万トンから180万トンに減少していることによる。その結果、日本の埋蔵

量が世界の6.5割を占めることとなった。このほか、海水には0.05 ppmのヨードが含まれ、3400万トンとなる。海藻の乾燥したものには0.45%のヨードが含まれている。1959年以前には海藻がヨード生産の主原料となっていた。

代替物：飼料、触媒、栄養摂取、製薬、写真の用途で、ヨードに対抗できるものはない。バイオサイド(殺生物剤, biocide), 着色剤, インクの用途には、ヨードの代りに臭素や塩素が使えるが、通常はあまり好まれない。抗生物質がヨードバイオサイドの代りに使われることがある。

(4) 希土類元素

国内開発と用途：2012年にカルフォルニアのマウンテンパスが稼行し、バストネサイトを採掘している。米国は2012年希土類元素の消費国であり、輸出国であり、そして輸入国でもある。製錬した希土類元素の輸入は2012年6億1500万ドルで2011年の8億200万ドルから減少した。2012年8月までのデータで希土類元素の用途は、触媒62%, 合金13%, ガラス研磨とセラミックス9%, 永久磁石7%, リン関連3%, そのほか6%である。

リサイクル：リサイクルは少量で、主に永久磁石スクラップから回収する。

輸入先：2008年から2011年の輸入先は中国86%, フランス4%, 日本3%, そのほか7%であった。

国内外の市場動向：8ヶ月間のデータに基づくと希土類元素の国内消費は2011年の7790トンから2012年に5700トンと減少している。2011年に価格が上昇したことの反動で2012年には下降した。例えば、ネオディウム酸化物の価格は2012年当初はキロ195ドルであったものが年末には80ドルへと落ち込んだ。希土類元素の利用を減らす技術開発でユウロビウムやイットリウムの消費が減少している。

世界の動向として、中国では国内事情と環境への関心のため、希土類元素供給に制限がかかってきている。インドでは年末に年間1万トンの希土類元素を選鉱する施設の操業にこぎつけている。マレーシアでは希土類元素酸化物選鉱施設の操業が環境団体の活動のために遅れている。

埋蔵量：世界の資源としてみると、希土類元素は地殻で比較的豊富にあるが、鉱山として開発するにはほかの鉱物資源に比べ濃度(品位)が低い。中国や米国のバストネサイト鉱床は経済価値のある希土類元素資源として量が最も多い。モナザイトは2番目の量である。アパタイト、チェラ石(cheralite), ユージアル石(eudialyte), ロパライト(loparite), リン酸塩, 希土類元素含有(イオン吸着)粘土, 二次的なモナザイト, 使用済みウラン溶液, ゼノタイムは未着手の資源となる。未発見の資源は需要量に比べ大量にあると考えられる。

(5) 天然ゼオライト

国内開発と用途：米国では天然ゼオライトを6社で採掘して、別に1社が貯鉱と他社の鉱石で営業している。菱沸石がアリゾナで、クリノプチロライトがカリフォルニア、

アイダホ、ネバダ、ニューメキシコ、テキサスで採掘されている。ニューメキシコの生産量が最も多く、アイダホ、テキサス、アリゾナ、カリフォルニアと続く。なお、前年の報告(USGS, 2012; 高橋, 2013)では採掘が10社で行われていた。

米国で採掘されている天然ゼオライトは、アルカリ性湖成堆積物の凝灰岩が変質したものである。米国における天然ゼオライトの採掘量は、2012年は68000トン、消費は66500トン、そして価格はトン当たり45-800ドルである。

用途は多い順から、飼料、ペットリッター(猫砂)、セメント、脱臭、水のろ過、排水浄化、殺菌・殺虫剤のキャリアー、ガス吸着、化学肥料、油の吸着、乾燥剤、触媒、水耕である。飼料、ペットリッター(猫砂)、セメント、脱臭、水のろ過、排水浄化で用途の70%以上を占める。

リサイクル：リサイクルは基本的にないが、乾燥剤、ガス吸着、水の清浄やろ過に使うゼオライトでは、消費されたゼオライトを再調製して使う。

市場動向：米国では天然ゼオライトの消費が増えている、飼料、セメント、ガス吸着、脱臭、排水浄化の市場が拡大している。2011年に日本で地震津波に伴う核施設被害が起きたが、核施設冷却水からの放射性物質除去に天然ゼオライトの需要が増加している。米国には天然ゼオライトの貿易量に適当なデータがないが、米国は2012年に天然ゼオライトの輸出国であったと考えられる。

世界の生産と埋蔵量：世界各国の生産統計は不十分である。国によっては相当量がゼオライトを少量含む凝灰岩が統計を占めている。そのような場合、石材、軽量骨材、火山灰セメント、土壌改良材に利用している。

2012年の生産高では米国は6万8000トンである。これより上位は、中国が200万トンで圧倒的に多く、以下、大韓民国(23万トン)、日本(15万トン)、トルコ(10万トン)、スロバキア(8万5000トン)、米国より下位にヨルダン(1万2000トン)があり、その他の国の総量が11万トンである。

天然ゼオライトの世界の資源量は不明だが、米国のペーブンレンジ地域では地表近くにクリノプチロライト、菱沸石、エリオン沸石、モルデン沸石、フィリップス沸石が総量1億2000万トン見積もられている。米国全体では10兆トンが見積もられる。

代替物：ペットリッターの利用ではアタパルジャイト、ベントナイト、珪藻土、フーラー土、セピオライトと競合している。軽量骨材用途では、珪藻土、パーライト、軽石、バーミキュライト、凝灰岩が競合する。土壌改良材では、ベントナイト、石膏、モンモリロナイト、ピート、パーライト、珪砂、バーミキュライトがあげられる。水浄化用途では、カーボン、珪藻土、珪砂がゼオライトの代替物となる。油吸着ではベントナイト、珪藻土、フーラー土、セピオライト、さまざまなポリマーや天然有機物質が代用となる。

2. アラスカの希土類元素資源と関連する花崗岩

Karl and Laustsen (2013) は重希土類元素 (HREE) 鉱床で注目されているアラスカ州ボーカン・マウンテン (Bokan Mountain) 鉱床の研究例を紹介した。HREE はスマートフォンやタブレットに使う強磁石の製造や高温下でのエンジンや駆動部の能力をますために極めて重要である。希土類元素 (REE) 鉱床の中で、軽希土類鉱床が大部分であるが、ここで取り上げたボーカン・マウンテン鉱床は HREE が濃集した数少ない鉱床の一つで注目される。Karl and Laustsen (2013) で紹介されている Dostal らによる研究論文 (Dostal *et al.*, 2013) の筆頭著者の Jaroslav Dostal は、本鉱床に関連する花崗岩を、その地球化学と同位体組成に基づき、地殻が裂けてマグマが下部から湧き上がり冷却して形成された花崗岩 (リフト起源花崗岩) と位置づけた。USGS の Susan Karl はボーカン・マウンテン花崗岩とその被貫入岩類の構造を調べ、REE 鉱床の有力な探査指針を与えた。

Dostal *et al.* (2013) は商業誌の論文だが、Karl and Laustsen (2013) からリンクが貼られ、パーソナルユースで全文を読むことができる。その研究成果を以下に紹介する。

北米コルディアは、中生代にローレンシア (北米) 大陸西縁に付加した異地性体地質体の集合である。カナダ-アラスカコルディアの地質体の一つであるインスラー (Insular) 複合テレーン、アラスカ南東部のほとんどとブリティッシュコロンビア及びユーコンの一部に分布している。インスラー複合テレーンは主にウランゲリス (Wrangellia) とアレグザンダー (Alexander) テレーンからなる。

アラスカ最南部のプリンス・オブ・ウェールズ島 (Prince of Wales Island, 以下 PWI) 南部に位置するボーカン・マウンテン複合岩体 (Bokan Mountain complex) の年代、地球化学、地質構造からアレグザンダーテレーンの発達について時代やテクトニクスを絞りこみ、鉱床形成の位置づけを行った。

地球化学や記載岩石学のデータから、ボーカン・マウンテン複合岩体は分化が進んだパーアルカリ花崗岩で、アルカリ輝石やアルカリ角閃石を含む。 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ と $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 、Zr と $^{104}\text{Ga}/\text{Al}$ などを使った花崗岩識別図から、同岩体は、A-type の性質をもち、Nb と Y の図からプレート内花崗岩の性格を有することがわかる。同岩体の年代はこれまで角閃石やアルバイトのカリウム-アルゴン年代などが得られていた。著者らは新たに同岩体と被貫入岩類について、レーザー照射型誘導結合プラズマ質量分析 (LA-ICP-MS) 法を用いジルコンのウラン-鉛年代値を、また、同岩体の角閃石のアルゴン-アルゴン ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) 年代を得た。それらと地質学的な産状などを加味して、ボーカン・マウンテン複合岩体は 177 Ma に貫入し、176 Ma におおよそ 550 °C を経て急速な冷却があった。この 176 Ma は鉱化作用や左横ずれのせん断変形と同時期であると解釈した。この前期ジュラ紀の火成

活動 (177 Ma アルカリ火成活動) は、初期のリフトステージ形成に関わるもので、グラヴィナ (Gravina) 盆地の発達を促した。また PWI 南部で繰り返されてきたアルカリ/パーアルカリ質火成活動は、レアメタル鉱化作用を伴うことから、アレグザンダーテレーンの下にインコンパティブル元素に富む親石マントルが存在すると推定できる。

3. 米国中北部の新たな石油とガス

Androff and Wade (2013) はノースダコタ、サウスダコタ、モンタナに分布するバッケン層とスリーフォークス層の石油天然ガスを紹介した。それによると 2008 年から USGS がウィリストン盆地 (Williston Basin) で 4000 井を超える試錐を行い、2008 年時点ではバッケン層の 36 億 5000 万バレルに過ぎなかった資源量に、スリーフォーク層の 37 億 3000 万バレルの新たな資源量が加わった。結果としてこの地域で従来考えられた量の 2 倍のエネルギー資源が見込まれるようになった。さらに両層には、石油に加えて天然ガスと液化天然ガスが見込まれる。

両層の石油根源は、バッケン層のバッケン頁岩部層上部と下部である。石油は元の根源層の中から周辺にとどまり、地理的な広がりをもって不均質に分散している。

Stephanie *et al.* (2013) による地質の説明では、バッケン広域石油システム (Total Petroleum System, 以下 TPS) は、モンタナ州東部、サウスダコタ州北西部、ノースダコタ西部にまたがり、さらに北のカナダへと続く。主要な地質構造は、南北方向の背斜 (Nesson 背斜, Antelope 背斜, Little Knife 背斜, Billings Nose 背斜) と北東-南東方向の断層 (Brocton-Froid 断層) である。

デボン紀のスリーフォークス層、バッケン層、ミシシッピアン・ロジポール (Lodgepole) 層下部からなる。TPS はスリーフォーク層とバッケン層内の多量の石油流体で定義できる。スリーフォーク層は灰緑色のドロマイト質泥岩、桃色から黄褐色のシルト質ドロストーン、硬石膏からなる。同層を不整合にバッケン層のブロングホルン (Pronghorn) 部層が重なる。スリーフォーク層は最大 270 フィートの層厚となる。バッケン層は下位よりブロングホルン部層、下部頁岩部層、中部部層、上部頁岩部層からなる。ブロングホルン部層の層厚は最大 58 フィートである。上部と下部頁岩部層がバッケン TPS の初生資源根源岩で、同層の全有機炭素量は 1 未満から 35 wt% である。

Stephanie *et al.* (2013) はバッケン層と下位のスリーフォーク層の調査から地質モデルを構築した。それによると、上部と下部頁岩部層で生成した石油は、低浸透性で孔隙率が多様な貯留岩である中部部層とブロングホルン部層、スリーフォーク層のドロマイト質のユニットに移動した。局所的には上部と下部の頁岩部層の中でも低い浸透性の基質や割れ目に留まった。

4. オーストラリアの地熱開発

2005-2010 年にオーストラリアでは地熱エネルギー利用の調査や開発が盛んで多くの土地で深部試錐が行われた。

非火山地域での地熱開発として先導的な技術開発が進んだが、2010年以降、予算、土地、関係者の数が減少している。これを危惧してAnthony(2013)は、地熱利用の優位性やオーストラリアでの特異性を以下のように解説した。

地熱エネルギーは地球(geo)からの熱(thermal)である。それは火山や中央海嶺、間欠泉、温泉、噴気孔などから熱が放出されることで実感できる。人類は1000年にわたり温泉からの温水を、調理、浴用、暖房、洗濯に利用してきた。地熱蒸気を利用した発電は、1904年、イタリアのラルデレロ(Lardarello)で初めて実用化した。現在ここでの発電が世界の地熱発電の10%を占めている。

一般に地熱エネルギー利用は活火山地域で行われている。これに対してオーストラリアは活火山がない大陸であるが、地殻上部の高温の岩石(主に花崗岩)やさらに下部のマントル由来の熱を利用する。

火山に伴うものに比べ限定的であるが、この浅部で十分な熱が確保されている系を“高温堆積性帯水層系(Hot Sedimentary Aquifer (HSA) System)”と呼ぶ。大さんせい盆地にあるバズビル発電所がその例である。オーストラリアでは深部に熱源があるので水の流れの有無が課題である。そこで強制的に水の流れを作る“高温岩体地熱発電[Enhanced (or Engineered) Geothermal System (EGS)]”が有効で、それは冷たい水を地表から深部に押し込み、高温岩体に接して温まった水を地表で回収する閉鎖系の手法である。

エネルギーはオーストラリアの鉱業や製造業にとって重要でいかにそれを安く確保するかは課題である。Anthony(2013)によれば地熱は環境や経済性で優位性がある。すなわち、汚染がないクリーンエネルギーである。地熱発電所は1 MW未満のものからGWクラスまで理論上は可能で、オーストラリア国内のガスタービン、石炭火力、水力の発電所と遜色はない。

いくつかのプロジェクトで多くの新しい技術の経験を積んでいる。2003年の10月、ジオダイナミックス社は掘削井(Habanero-1)が4421 mの深度で高温高压流体に出会った。過剰圧力に対処するため、掘削では水よりも重い泥を必要とした。二つの破砕部を利用可能として、世界の他のEGSプロジェクトにくらべ規模の大きな貯留部を確保できた。2004年7月に別の掘削井(Habanero-2)がこの破砕貯留部に達し、二つの井戸の間に水が流れるようになった。しかし井戸がつまり2006年6月に利用をとりやめた。最終的なコストは当初予算をはるかに超えるものとなっていた。掘削井の技術的な問題を克服するため、ジオダイナミックス社は装置改良を行い、さらに数千mクラスの井戸を数本掘った。

2009年半ばにジオダイナミックス社で2つの井戸(Habanero-1とHabanero-3)で循環する流れに成功した。1 MWの発電機をつなげる前に井戸(Habanero-3)のスティールに亀裂が生じた。熱水が循環するにつれ膨張で負

荷がかかり割れたらしい。900万ドルを使い代わりの井戸(Habanero-4)をつなげた。ジオダイナミックス社はあらたな注入井(Habanero-1)と生産井(Habanero-4)の組み合わせで1 MWの発電に成功した。ここに至るまで5億ドルを費やしたが、EGS技術の蓄積となった。

海外での地熱開発と誘発地震への懸念の動きがオーストラリアでの開発に影響が出ている。2006年、スイスのバーゼルでマグニチュード3.4の地震が起こった。市内に設けられた井戸でEGSが進められていたため、世論によってプロジェクトの中止に至った。EGS掘削を手掛けているカリフォルニアのGeysers社の地熱フィールドでは地震を懸念する世論の反対で部分的にとりやめることとなった。ジーロング近くでオーストラリアの企業(Greeneearth Energy)は地熱掘削プロジェクト(Geothermal Drilling Program; GDP)を2009年後半に行っていたが、上記の二つの海外での事例から地域住民が誘発地震を懸念しているため作業が遅れ気味となっている。

オーストラリアでは二酸化炭素削減法案が議会を通らず、結果として地熱関連会社を含む再生可能エネルギー分野への投資が減っている。加えて2009年と2010年の南オーストラリアの中部で起きた洪水で掘削が遅れている。

オーストラリア政府は再生可能エネルギープログラムを続けているが、地熱プロジェクトには十分ではない。炭素買い取り価格の不確かさが地熱関連企業への投資を躊躇させている。

そのような中、オーストラリアでの再生可能エネルギーの商業化と展開や技術力向上をめざして、オーストラリア再生可能エネルギーセンター(Australian Centre for Renewable Energy; ACRE)が2009年10月に設立された。同センターは2012年7月1日にオーストラリア再生可能エネルギー機構(Australian Renewable Energy Agency; ARENA)に吸収された。同機構は官民連携で1997年に設立された独立行政法人的なもので、再生可能エネルギーの技術力の競争を促し、オーストラリアにおける再生可能エネルギー供給増加を目的としている。

Anthony(2013)は最後に、地熱には多くの長所があり、しかもオーストラリアの地熱への取組は野心的で、技術開発は鉱物資源や石油資源で発展してきたよりも短期間の進展を見せ、今後の開発に期待が持てるとしている。

III. 岩石・鉱物

1. ヘリテージストーン

(1) 委員会の動き

2012年、ブリスベンで行われた第34回国際地質会議(IGC)中にヘリテージストーン作業グループ(Heritage Stone Task Group, 以下HSTG)を国際地質科学連合(IUGS)内に設立することとなった。HSTGはオスロでの第33回国際地質会議で発案され、その会議でプロジェクトとして認められた(Copper *et al.*, 2013)。HSTG評議会

管理メンバーは13名で、会長がスウェーデンの Bjorn Schouenborg、事務局長がオーストラリアの Barry J. Cooper、残りは各地域の代表である。

Copper *et al.* (2013)によると、HSTG は自然の岩石をグローバルヘリテージストーン資源(Global Heritage Stone Resource, GHSR)として人類の文化の中で意識することを目指している。IUGS が初めて建物や装飾などに使われる石材に関わることとなり意義深い。

Copper *et al.* (2013)によると、ヘリテージストーンプロジェクトの初期の頃は、世界岩石資源遺産(World Heritage Stone Resource)という名称を提案したが、ユネスコの世界遺産(World Heritage)と混乱の恐れがあるということで、その名称を破棄した。グローバルヘリテージストーンプロジェクトは英国ストーンフォーラム(English Stone Forum)など地域の石材組合の協力を得てきた。このフォーラムは、公共の利益として必要な岩石を供給して建物の維持に努めている。

GHSR 指定を達成するため、HSTG の勧告では対象の岩石がいくつかの条件を満たす必要がある。広域的な利用と50年以上にわたる稼行実績が特に重要である。対象となる石材が、公共的なあるいは産業界で重要なプロジェクトで利用されたことも重要である。さらに岩石が現在も採掘できるということも有利である。

GHSR に推すために、上記の特長を網羅するため、名称、産出地域、地質年代、記載岩石学的名称などの地質事項も含め、約20の事項を満たさなくてはならない。

ヘリテージストーン指定を受けると、専門家集団の中で認知度がたかまる。その結果、地質分野のみならず、工学、建築、建物保全の分野の専門家もその岩石の存在を意識するようになる。ヘリテージストーン指定により天然の岩石資源を管理する意識が高まり、石材資源採掘を将来にわたって続けていくことにつながる。

(2) ヘリテージストーンの例：蛇紋岩

上記のヘリテージストーン活動では文化的遺産を後世に伝えるとともに持続的採石活動にも益することが挙げられている。歴史的建造物で利用されている蛇紋岩の例を Pereira(2012)が紹介している。

蛇紋岩は何世紀にもわたり、文化的宗教的な建造物に使われてきた。蛇紋岩は石材として魅力的でよく使われているのである。良く利用されている蛇紋岩は、パキスタン、インド(Rajasthan Green)、イタリア(Verde Antique, Verde Polcevera, Verde Prato)、米国(Vermont Verde Antique)、グアテマラ(Verde Guatemala)、ポルトガル(Verde Donai)、スペイン(Verde Macael, Verde Pirineos)から産出するものである。

岩石固有の性質を知ることによって代替の岩石を求めることができる。蛇紋岩の性質を知るためには、光学顕微鏡、X線回折計、化学分析、物理的機械的試験などさまざまな手法が使われる。また、いくつかの蛇紋岩は、歴史的建造物

を維持するため代替石材資源として新たに利用されることもある。

スペインを例にとると、ガリシア(Galician)採石場は何年も前に操業を中止している。現在、建築あるいは装飾の部分で蛇紋岩を使う建物は、インド、パキスタン、あるいはグアテマラから輸入した岩石を利用している。

Pereira(2012)は建造物の修復に岩石の性質の解析が必要なことを強調している。石材の供給側は販売情報とともに記載岩石学的な調査も必要となり、そこで科学者、建築家、供給者の連携が促進することとなる。

2. 黄銅鉱

黄銅鉱(chalcopyrite, CuFeS_2)は、銅鉱物の中で最も代表的なものである。Kimball(2013)は、銅の利用の歴史から始まり黄銅鉱の鉱物学的特性を記し、さらに銅鉱床や次世代ソーラーパネルについて解説した。

人類はチグリスユーフラティス文明の紀元前9000年頃に銅を使い始めた。銅の時代(紀元前9000–3000年)には純銅が装飾や道具に使われた。精錬法の発見で品位の低い鉱石から銅を抽出でき、さらに錫や亜鉛等ほかの金属と混ぜることができるようになり(青銅、真鍮)、青銅器文明が始まった(紀元前3300–1200年)。黄銅鉱(chalcopyrite)の名前は、ギリシャ語の“chalkos”が「銅」を、“pyros”が「炎」を意味することに由来する。エジプトでは紀元前1850–1580年の間に10000トン産出した。ちなみに2007年に世界の銅の総生産量は、1780万トンであった。人類の銅の需要は、19世紀まで長く一定であったが、その後は、指数関数的に需要が増えた。それは電気の利用によるところが大きい。銅は電気・電子製品のあらゆる部材で使われている。

そのほか銅は運輸や工業機材の支持材、貨幣、宝飾で利用されている。また、銅はある種のバクテリアの増殖を抑える機能があり、船底や病院の壁の一部などに利用されている。加えて硫酸銅は藻や菌類の成長を抑える機能があるので、池に投入したり土壌に加えたりする。

続いて Kimball(2013)は鉱物学的な解説を行っている。黄銅鉱は正方晶系の硫化物で、銅、鉄、硫黄がほぼ同じ重量となる。手標本では、はちみつ色でしばしば錆びるか虹色を呈する。硬度は3.5–4.0で黄鉄鉱より柔らかい。条痕色は緑黒色である。大抵は塊状だが、葡萄状あるいは半自形から自形の四角形の結晶である。

黄銅鉱はさまざまな鉱床タイプから普通に産出する。最も広汎には斑岩鉱床に産する。その鉱床は珪長質から中性の斑状貫入岩体に伴う熱水系で形成したものである。細かな黄銅鉱が黄鉄鉱とともに貫入岩体周辺の網目状割れ目や脈に生成(鉱染)している。

形成過程は次の通りである。マグマ体が冷却するにつれ、水やそのほかの揮発物質はメルトから離れ浮力で上昇する。これらの熱水溶液は、マグマから珪酸塩鉱物が晶出するにつれ、残った銅などの金属を運ぶ。その溶液から、

黄銅鉱など初生金属硫化物が、300–500 °Cで1–10 kmの深さで生成し、深成鉱物(hypogene mineral)に分類される。

斑岩鉱床から銅採掘が経済的に見合うのは大きな鉱体の場合である。鉱床の品位が概して低いため、ほとんどの場合、それは1 wt%未満である。斑岩鉱床は銅の供給源として重要で、世界の生産の60–70%を占めていて、さらにモリブデン、金、その他の金属を伴う。チリのチュキカマタ(Chuquibambilla)では2900万トン、米国のビンガム(Bingham)では1900万トンの銅を産出する。ビンガムでは当初は1–1.5 wt%の品位が対象であったが、現在は銅の抽出の効率化で0.6 wt%まで低くなっている。そこでの銅鉱物は、黄銅鉱80%、輝銅鉱(chalcocite, Cu_2S)9%、少量の斑銅鉱(bornite, Cu_5FeS_4)と孔雀石[malachite, $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$]である。

銅鉱床で2番目に経済的に重要なものは、堆積性層状鉱床(sediment-hosted stratiform deposit)で、世界の生産額の23%を占めている。この鉱床は銀、コバルト、鉛、亜鉛、ウランの源でもある。層状銅鉱床は、通常、層厚3 m以下の鉱染状あるいは脈状の銅硫化物を含む層からなる。その層はホストの堆積岩の層理と調和的である。

金属や硫黄を伴う塩水が大陸内部に流れ込み、無酸素性の有機物に富む堆積物あるいは溶液と接して銅の硫化物が析出する。重要な鉱床は、後期古生代と後期原生代の岩石中に産し、その岩石は、超大陸のリフト形成時、当時の赤道から緯度20–30°のあたりに堆積したものである。鉱床は50–400 °Cの広い範囲の温度で中程度から過飽和の塩分濃度のもとで形成された。

代表的な鉱床はドイツとポーランドに分布する二疊紀の含銅頁岩(クファシーファ, Kupferschiefer)である。鉱床は80万 km^2 の面積を占め、そして金属の累帯分布が認められる。経済的移行対象域は堆積盆地南縁である。2億3000万トンの銅が含まれ、輝銅鉱、斑銅鉱、黄銅鉱が産する。もう一つの代表的な鉱床はザンビアの後期原生代銅ベルト(Zambian Copperbelt)で、中央アフリカ銅ベルト(Central African Copperbelt)の一部にあたる。銅ベルトは大規模でかつ品位が高い堆積性の銅鉱床地帯である。ザンビアの銅ベルトの鉱化作用は鉱染した斑銅鉱、黄銅鉱、輝銅鉱からなり、銅品位は2 wt%以上である。

黄銅鉱が化学的な風化を受けると銅と鉄などの金属を放ち酸が発生する。それは酸性排水で課題となっている。黄銅鉱を含む岩石の風化露頭あるいはズリからの銅排水がそれまで適切な濃度にあった生態系に混入し、高い銅濃度になると、水生植物や動物に有害である。このような懸念は、魚類の生息地に位置する鉱山の開発を考える際に重要な問題である。

銅の用途は太陽エネルギー利用に拡大している。黄銅鉱は、太陽光にさらすと電流が流れる光電池の性質がある。第1世代のソーラーセルはシリコン結晶を半導体物質とし

て使っているが、黄銅型複合体の薄いフィルムのソーラーセルは、第2世代とされ、超薄層(数ミクロン)の半導体物質が使われ、安価に生産できる。すなわち、銅-インジウム-ガリウムジセレンド(copper indium gallium diselenide, 以下CIGS)合金は第2世代ソーラーセルの薄いフィルムとなりつつある。CIGS合金は黄銅鉱と同じ結晶構造をもち、インジウムとガリウムが鉄と置き換わり、セレンが硫黄原子を置換し、 $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})(\text{Se}, \text{S})_2$ となる。

シリコン結晶ソーラーセルは最大29%と高い効率であるが、生産コストが高い。CIGSソーラーセルは効率20%であるが、生産コストはそれほど高くない。モジュールとして利用することで商業ベースに乗る。

Kimball(2013)はさらに銅製錬について解説している。銅製錬の従来型技術はハイドロメタルジー(湿式製錬, hydrometallurgy)で重クロム酸塩などを使い、100 °C以上の高い温度をかけ、銅の抽出を行う。この手法は高い温度にするためにエネルギーが必要で、生産コストが高い。もっと低コストのハイドロメタルジーは、バイオリーチングである。この手法は銅、コバルト、ニッケル、亜鉛、ウランの回収で一般的になりつつある。バクテリアの金属酸化機能を利用すると、バクテリアが存在しない状態より、硫化物の分解が早くそして効率的に行われる。また、低品位あるいは複雑な鉱のために、従来型製錬では対象とならない鉱石もバイオリーチングで金属の回収を行える。低品位の鉱山の廃棄物(ズリ)に小規模な銅バイオリーチング手法が使われている。

バイオリーチング技術は商業的に成長を続けているが、従来型製錬技術も依然有効である。鉱石の品位は下がり続けるだろうからバイオリーチングは金属抽出に今後一層有力な手法となる。

銅は質の低下なくリサイクルできる。2000年には140万トンの銅が戻っている。米国の銅の消費は2004年から2008年で年平均200万トンである。現在や将来の世界の銅の使用状況を保つためには使用済みの銅をリサイクルしていくことが必要である。

3. 火成岩分類プログラム

火成岩分類命名のコンピュータプログラムがさまざまあるが、その長短をVerma and Rivera-Gomez(2013)が比較検討した。

Verma and Rivera-Gomez(2013)は、まずIUGSにおけるこの数十年の火成岩の分類法の動きを述べている。それによると、深成岩類についてはStreckeisen(1976)による記念碑的論文が最終版で、その後火山岩分類に移り、Le Bas *et al.* (1986)の全アルカリシリカ(Total Alkalies versus Silica; TAS)分類がもっとも重要な成果である。その後高Mgやピクライト質火山岩をTAS分類の前に行うようLe Bas(2000)が改善した。同様に火山砕屑岩類、チャノクカイト類、カーボナタイト類、アルカリ岩類、その他の岩石についても考慮され、成書としてLe Maitre *et al.*

(1989)が出版され、その第2版(Le Maitre *et al.*, 2002)ともどもよく利用される。

Verma and Rivera-Gomez(2013)によると、火成岩分類プログラムの中には、IUGS の分類提案に従い引用しているにもかかわらず厳密さを欠いているものがある。例えば、全アルカリシリカを使う火山岩分類では SiO_2 と $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ を単にプロットするだけで、鉄の酸化度や無水100%換算を考慮していないことがある。Verma and Rivera-Gomez(2013)はこれまでの火成岩分類ソフトウェアの長短を以下のように紹介している。

WINROCK : 1997年に公開され2012年にアップデートされた。個人用 AU\$ 399 (<http://www.geologynet.com/order.htm>)で入手できる。IUGS の分類を扱っているが、Le Maitre *et al.* (2002)が加えた岩石は扱っていない。Feの2価3価比は、利用者が指定する。

IUGSTAS software package : Le Maitre *et al.* (2002)に基づき、プログラムはケンブリッジ大学出版から入手できる。全アルカリシリカ分類の誤りが残っている。

SINCLAS : 名称は“Standard Igneous Norm and Volcanic Rock CLAssification System”に基づく。高Mgやピクライト質の岩石も含む、IUGSの火山岩の分類を網羅している。Feの2価と3価比を自動調整して水を除き100%換算する。 Fe_2O_3 とFeOが定量されているときはそれを利用できる。Verma(紹介論文の筆頭者)に問い合わせれば無料で入手できる。

IgPet : 1995年に公開され2006-2007年にアップデートされた。US\$ 199 (<http://www.rockware.com>)で入手できる。鉱物に基づく分類がIUGSの分類ではなく、Feの2価3価の扱いに選択肢がないなどの難点がある。

GCDKit : 名称は“GeoChemical Data ToolKit”に基づく(<http://www.gcdkit.org>)。2011年にアップデートされた。石英(Q) : アルカリ長石(A) : 斜長石(P) : 準長石(F) 鉱物比(QAPF)の分類、全アルカリシリカ図、CIPW ノルム計算が可能である。主要岩石以外のIUGS分類は含まれていない。

PetroGraph : 全アルカリシリカ分類が可能な無料のソフトである。QAPF分類の二つの三角図はなく、水を除く再計算やFeの2価3価比の扱いに不明なところがある。

Verma and Rivera-Gomez(2013)は、上記の諸プログラムの不備を改良した新しいプログラム IgRoCS (Igneous Rocks Classification System)を作成した。これはIUGSの分類(Le Maitre *et al.*, 2002)を網羅する。結果はエクセルファイルの出力である。主要な深成岩や火山岩の分類に入る前に、火山砕屑岩、カーボナタイト、メリライト含有岩、カルシライト含有岩、キンバーライト、ランプロアイト、リュウサイト含有岩、ランプロファイアー、チャーノックタイトの同定を行う。名称はIUGSの分類法に従うが、IUGS分類法で不明瞭なキンバーライトの2グループ分けは行わない。深成岩について、モード解析がある場合には

その結果を利用できるようモード分類図を備えてある。火山岩分類でははじめに高Mgやピクライト質火山岩を同定する。これらは上述のSINCLASをアップデートしたものを使っている。そのプログラムでのノルム計算では、ディオプサイドや黄鉄鉱の分子量で改良を加えたところ。IgRoCSソフトではノルム鉱物合計がほぼ100%となる。

IgRoCSはあらゆる火成岩を自動的に一回の作業でIUGS分類を行い、多量のデータを扱う場合、SINCLASを超える長所である。このソフトはVermaに要求すれば入手できる。

IV. 発表スライド作成

米国地質学会ニュース誌(GSA Today)でCheney(2013)が発表用スライド(パワーポイント)作成の初歩的な原則をまとめている。米国ではプレゼンテーションの訓練が進んでいると思われるが、このようなコメントがあるということは、米国でも基本的なことが徹底していないのかもしれない。口頭発表用スライドのみならずポスター作製の上でも参考となるので紹介する。

Cheney(2013)はスライド作成の2原則をあげた。1つは、「12:1」の原則である。コンピューター利用以前の1960年代に主張されたもので、原図の長辺の12倍の距離から読めるかどうかという留意点である。ただ、昨今は投影技術が当時より進んでいるので10:1比であろうとCheney(2013)は補足している。2つめは「KISSing」である。それは“Keep It Simple, Stupid.”で、スライドは単純なものにする。

図は単純なX-Y図が聴衆には理解しやすい。特定分野の研究者集団だけの集まりは別にして、一般には複雑な図は混乱を招き発表者の意図が伝わらない。

全てのスライドにその説明文(キャプション)をつけ、必要に応じラベル、スケール、方向(方位)などをつける。囲み線、ロゴマーク、小さな飾りなどは可能な限り削除したほうが良い。

白あるいは薄い色の背景に黒または濃紺の文字が最も読みやすい。また単純なフォントが望ましい。小さい文字は太字にすると良い。ただしタイトルでも40ポイント以上のフォントサイズは必要ない。スライドに12行以上盛り込むと読みにくくなる。

人々の色覚に差があるので、重要なデータやテキストを赤や緑にするのを避ける。また、一つのスライドに数色以上を盛るのは好ましくない。一つのスライドに2つ以上の図表を盛り込むと読みづらい。元の図表の文字類はスライドでは大き目のフォントの文字に置き換える(重ね書きにする)ほうが良い。

このような留意点をもって作ったスライドをプレゼンテーションの前に大きな講義室の後ろからながめて確認する。初めに示した「12:1」(あるいは10:1)の原則の実行である。

謝 辞 本稿は、赤坂正秀編集委員長のご助言で大幅に改善されました。ここに感謝申し上げます。

引用文献

- Anthony, B. (2013): What's happened to geothermal? Simple in concept—complex in application. *AusGeo News*, Jun 2013, Issue no. 110, http://www.ga.gov.au/webtemp/image_cache/GA21579.pdf
- Androff, B. and Wade, A.B. (2013): USGS Releases New Oil and Gas Assessment for Bakken and Three Forks Formations. Finds Formations Have Greater Resource Potential than Previously Thought. USGS Newsroom, released 04/30/2013, <http://www.doi.gov/news/pressreleases/usgs-releases-new-oil-and-gas-assessment-for-bakken-and-three-forks-formations.cfm>
- Cheney, E.S. (2013): No more lousy PowerPoint slides. *GSA Today*, **23**, 68–69, <http://www.geosociety.org/gsatoday/archive/23/9/pdf/i1052-5173-23-9-68.pdf>
- Cooper, B.J., Marker, B.R., Pereira, D. and Schouenborg, B. (2013): Establishment of the “Heritage Stone Task Group” (HSTG). *Episodes*, **36**, 8–10, <http://www.episodes.co.in/contents/2013/march/v36n1.pdf>
- Dostal, J., Karl, S. M., Keppie, D., Kontak, D.J. and Shellnutt, J.G. (2013): Bokan Mountain peralkaline granitic complex, Alexander terrane (southeastern Alaska): evidence for Early Jurassic rifting prior to accretion with North America. *Can. J. Earth Sci.*, **50**, 678–691, <http://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.1139/cjes-2012-0139>
- Karl, S. and Laustsen, P. (2013): Research on Rare Earth Elements in Alaska Could Help Make Them Less Rare. USGS Newsroom, released 6/4/2013, <http://www.usgs.gov/newsroom/article.asp?ID=3610#.UbQd16yCiic>
- Kimball, B.E. (2013): Minerals explained 53; Chalcopyrite—bearer of a precious, non-precious metal. *Geology Today*, **29**, 30–35, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2451.2013.00862.x/pdf>
- Le Bas, M.J. (2000): IUGS reclassification of the high-Mg and picritic volcanic rocks. *J. Petrology*, **41**, 1467–1470.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B. (1986): A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali–silica diagram. *J. Petrology*, **27**, 745–750.
- Le Maitre R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, G., Dudek, A., Schmid, R., Sorensen, H. and Woolley, A.R. (1989): Igneous rocks. A classification and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee of the Systematics of Igneous Rocks. pp. 193, Oxford, Blackwell Scientific Publications.
- Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, G., Dudek, A., Schmid, R., Sorensen, H. and Woolley, A.R. (2002): Igneous rocks. A classification and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee of the Systematics of Igneous Rocks. Second Ed. pp. 236, Cambridge, Cambridge University Press.
- Magyar and Demas (2013): U.S. Nonfuel Mineral Production Increases for Third Straight Year. USGS Newsroom, released 2/7/2013, <http://www.usgs.gov/newsroom/article.asp?ID=3506#.U3rpGyikFOI>
- Pereira, D. (2012): A report on serpentinites in the context of heritage stone resources. *Episodes*, **35**, 478–480, <http://www.episodes.co.in/contents/2012/december/p478-480.pdf>
- Stephanie, B.G., Kristen, R.M., Troy, A.C., Ronald, R.C., Donald, L.G., Debra K.H., Timothy R.K., Michael D.L., Paul G.L., Christopher J.S., Marilyn E.T. and Katherine J.W. (2013): Assessment of Undiscovered Oil Resources in the Bakken and Three Forks Formations, Williston Basin Province, Montana, North Dakota, and South Dakota, 2013. USGS Fact Sheet 2013-3013, <http://pubs.usgs.gov/fs/2013/3013/>
- Streckeisen, A. (1976) To each plutonic rock its proper name. *Earth Science Reviews*, **12**, 1–33.
- 高橋裕平 (2013) : 2012年の地質鉱物関連英文ニュース誌の話題「鉱物資源開発, 地域地質, 及び新刊地質図」. 岩石鉱物科学, **42**, 232–241.
- USGS (2012): Mineral commodity summaries 2012. pp. 198, USGS, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2012/mcs2012.pdf>
- USGS (2013): Mineral commodity summaries 2013. pp. 198, USGS, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2013/mcs2013.pdf>
- Verma, S.P. and Rivera-Gomez, M.A. (2013): Computer programs for the classification and nomenclature of igneous rocks. *Episodes*, **36**, 115–124, <http://www.episodes.co.in/contents/2013/june/pp115-124.pdf>