

資源をつくる水のちから

—その1 鉱物資源—

佐脇 貴幸¹⁾

1. はじめに

産業技術総合研究所(産総研)の地質標本館には、様々な岩石・鉱物・化石標本が展示されていますが、それらの中には、日本及び世界各地の鉱山から採取された鉱物・鉱石が多数含まれています。こういったものは、しばしば鉱物資源という呼ばれ方をすることがありますが、ではそういった鉱物資源はどのようにしてできたのでしょうか？

その解説は、地質標本館の2階第2展示室にあります。ここでは、各種鉱石標本(第1図下)とともに、鉱物資源および燃料資源(石油、石炭、天然ガス)が、多様な地質環境下で形成されたことを示す模式図(第1図上方)が展示されています。特に鉱物資源の多くは、地下にあるマグマの活動に関連して形成されたことが示されています。

しかしながら、この模式図ではあまりはっきり示されていないものがあります。それは、「水」の関与です。実は、地球上の多くの鉱物資源の形成には、「水」(より正確に言えば流体)が大きな働きをしています。また、燃料資源の

形成にも「水」は関わっていますし、地熱資源は「水」の熱エネルギー、水資源(地下水、河川水など)はまさに「水」そのものが資源となっています。

さて、鉱物資源、燃料資源、地熱資源、水資源という資源の呼び方は、いわば利用する物質(例えば鉄鉱石、石油など)及びエネルギー(例えば熱)の視点から分類したものといたえますが、一方、これを「水」という物質が持つ「ちから」(機能、作用)から見たときにはどう捉えられるのでしょうか？ 2016年4月28日に地質標本館で実施した「イブニング・ジオ・ツアー」のプログラム「資源を作る水のちから」(https://www.gsj.jp/Muse/event/archives/20160428_event.html 閲覧日:2021年5月18日)では、地質標本館の展示物を使って、その「水のちから」という観点から様々な資源のでき方を解説しました。ここでは、その時の説明内容に肉付けして、私たちの生活・社会を支えている基盤の一つである上記の鉱物資源などのでき方のことを紹介します。



第1図 地質標本館2階第2展示室の鉱床のでき方の解説と鉱石標本

1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報基盤センター

キーワード：水、鉱物資源、燃料資源、地熱資源、地質標本館

2. 「資源」とは何か？

2.1 「資源」の定義

ここで、改めて「資源」とは何かについて考えてみましょう。地質学の分野で主に研究対象とされているのは、前述の鉱物資源、燃料資源、地熱資源、水資源などですが、広く社会に目を向けると、水産資源、森林資源、観光資源、人的資源、情報資源など、様々な使われ方のものがあります。

深海(1972)は、科学技術庁資源調査会(1961, 1971)の文言を引用して「資源」を最広義に定義しており、「資源とは、人間が社会生活を維持向上させる源泉として働きかけうる対象となりうる事物である」、「資源は物質あるいは有形なものに限らない。まして、天然資源のみが資源なのではない。それは、潜在的な可能性を持ち、働きかけの方法によって増大するし、減少もする流動的な内容を持っている。欲望や目的によっても、変化するものである」と述べています。また、山口(1981)は、「鉱石」の定義を「有用成分を含有し、経済的に採取・利用しうる土砂・岩石」とし、この中の経済性が最も重要であると指摘しています。

これらを筆者なりに解釈すると、「資源とは、様々な物質・事象に対応する人間の関わり方によって規定されるもので、その位置づけ・価値は、産業分野、技術革新などの総合的な経済性の状況によって常に変わりうる」ということだと思います。例えば、石英と鉄鉱物(赤鉄鉱や磁鉄鉱など)からなる岩石があったとしましょう。製鉄業を行う上では石英は邪魔なもので、鉄鉱物の方が価値ある「資源」とみなされます。一方、ガラス製造業を行う上では石英の方が価値ある「資源」であり、鉄鉱物は邪魔なものともみなされることとなります(例えば、柴田, 1956, p.99を参照)。最近よく聞く「都市鉱山」の場合ですと、廃棄物として処分になっていた電化製品、携帯電話などが、ある時から有用金属(例えば金)が回収できる宝の山に変わった、即ち「ゴミが資源に変わった」ことになるわけです。また、品位が低い、生産コストが高い、使い道があまりない、経済的に見合わないなどの理由のためにあまり重要視されていなかった物質が、回収技術の進歩・開発、生産コストの低下、利用技術及び産業の発展、市場価格の上昇などの理由で、改めて価値ある重要な「資源」とみなされるようになります(例えば、希土類元素)。逆に、市場価格の低下、生産コストの上昇、代替物の登場などによって、価値ある「資源」とはみなされなくなる場合もあります(例えば、火山の噴気孔周囲で採取されていた自然硫黄：後述)。回収技術に関しては、例えば海水1 km³あたり亜鉛が0.3

t、銅及び錫がそれぞれ3.1 t、銀が220 kg、金が4.3 kg含まれています(スキナー [松尾訳], 1971)が、これらを経済的に回収する技術が確立されていないので、現時点で海水はこれらの元素に関しての「資源」とはみなされていません(高多, 1992)。しかし、金をはじめ、ウラン(志賀, 2019)やリチウム(<https://www.jaea.go.jp/02/press2013/p14020701/> 閲覧日: 2021年6月9日)などの元素に関する海水からの回収技術の開発はこれまでも進められてきており、回収技術に経済性、さらには国の安全保障が伴えば、「資源」とみなされることとなります(高多, 1992)。このように、「資源」の定義には、産業分野、技術革新などの経済性、さらには安全保障といった社会情勢が大きく関係します。

2.2 地質学での「資源」研究

前述のように、「資源」は様々な物質・事象に対して使われますが、地質学において研究対象としているのは、そのうちの鉱物資源、燃料資源、地熱資源、水資源といった非生物的な天然資源です。ただし、「資源」をつくる「水のちから」という観点からは、水資源はその点を論ずるまでもないので、それ以外の「資源」について話を進めたいと思います。

さて、第1表には、「資源」に関わる主な用語をリスト化しました。このうち、鉱物資源・燃料資源についてみると、「鉱区」は日本では鉱業法で規定される区域、「鉱山」は実際に人間が採掘する活動(鉱業)の場所という、共に人為的な事象に関わる用語といえます。ただし地熱資源は、日本では鉱業法の適用外(金子, 2012, 2016)なので、「鉱区」、「鉱山」という言い方はありません。一方、第1表の中でそれより下位の行にある「鉱床」、「貯留岩」、「熱水系」などは、天然に存在する事象・物質に対する用語です。地質学で研究対象とするのは、実はこの天然に存在する事象・物質です。

つまり、地質学における「資源の研究」を厳密に表現すれば、「資源」として利用することを念頭において、鉱物資源、燃料資源に関しては鉱床の成因や分布、地熱資源に関しては地熱系・地熱貯留層の発達過程・性状などを研究し、「資源となりうるもの」(鉱床、地熱系など)がどのようにしてできたのか、どこにどのように分布しているのかなどを明らかにすることを目的としています。産総研地質調査総合センターでは、旧地質調査所時代以来、長年にわたってこのような地質学的観点から「資源の研究」を重ねてきており、その研究成果の一部が地質標本館に展示されています。

第1表 「資源」に関する主な用語

1: 竹内ほか (1970), 2: 地学団体研究会 (1983), 3: 地熱エネルギー基準用語集委員会 (1982), 4: 森田・谷田部 (2021).

鉱物資源関係		意味	文献
鉱区	mining claim	鉱業法の下で鉱業権の設定された一定の土地の区画.	1
鉱山	mine	鉱業の行われる場所.	1
鉱床賦存地域	ore-bearing area	鉱床分布の偏在性によって限定される鉱床賦存地域のための総括的用語で、規模のいかんは問わない.	2
鉱床	ore deposit, mineral deposit	特定の鉱物又は化学成分がその周囲の岩石の鉱物組成又は化学組成の通常の変化度合いを超えて、特に濃密に集まっているもの.	2
鉱体	ore body	有用鉱床において採掘の対象とされる鉱石の集合部. 鉱床と混同して使用されることが多い.	2
鉱脈	mineralization vein, lode, reef	岩石の割れ目を有用鉱物が充填した、全体としては板状の鉱床.	2
鉱層	ore bed	地層中に介在して層状・レンズ状をなす鉱床.	2
鉱石	ore	有用元素又は有用鉱物が特に豊富に濃集し、鉱業として採掘の対象となり又は利用のために採掘された鉱物の集合体又は鉱床の一部分.	2
脈石	gangue	鉱床、鉱石に伴う経済的に役に立たない鉱物の総称.	2
尾鉱	tailing	鉱石を選鉱して有用鉱物粒を採取した残りの鉱石.	2
鉱物	mineral	物理的、化学的にほぼ均一かつ一定の性質を有する固体物質.	2
鉱化流体(鉱液)	ore-forming fluid	鉱床構成物質を運搬し、鉱床形成の元になる流体.	2

燃料資源関係		意味	文献
鉱区	mining claim	鉱業法の下で鉱業権の設定された一定の土地の区画.	1
鉱山	mine	鉱業の行われる場所.	1
油田	oil field	狭義には主に石油を産出する区域、広義には複数の産油区域を包含した一地方.	2
ガス田	gas field	狭義には主にガスを生産している区域、広義には過去に生産したか今後生産する可能性がある区域.	2
炭田	coal field	経済価値のある炭層が豊富に産出する地域.	2
石油鉱床	petroleum deposit	地下の岩石中に移行しうる量の石油を集積しているもの.	2
ガス鉱床	gas deposit	地下の岩石中に移行しうる量の天然ガスを集積しているもの.	2
石炭鉱床	coal deposit	地下の岩石中に移行しうる量の石炭を集積しているもの.	2
貯留岩	reservoir rock	多孔質・浸透性の岩石で、その孔隙が石油、水などで満たされているもの.	2
油層岩	reservoir rock	貯留岩のうち、特にその一部に連続層として石油を包蔵するもの.	2
油層	petroleum reservoir	貯留岩の中で石油が連続層をなす部分.	2
ガス層	gas reservoir	貯留岩の中で天然ガス、あるいは天然ガスを溶かした水が連続層をなす部分.	2
炭層	coal seam, coal bed	地層中に層状をなして存在する石炭の層.	2
帽岩	cap rock	石油・天然ガス鉱床において、貯留層を直接覆って流体を上方に通さない、不浸透性岩.	3
油頁岩(油母頁岩)	oil shale	頁岩のうち、油母を含有していて、乾留して多量の石油を生成するもの.	2
油砂	oil sand	石油を含んでいる砂・砂岩及び炭酸塩岩などの堆積岩類.	2
ケロジェン(油母)	kerogen, petrogen	泥岩中に含まれる有機堆積物のうち、アセトンやベンゼンなどの有機溶媒と呼ばれる薬品に溶けない成分.	2, 4
油田水	oil field water	油田鹹水(かんすい)ともいい、油層の周り・油層内に存在する塩水.	2

地熱資源関係		意味	文献
地熱地域(地帯)	geothermal area, geothermal field	地熱現象を有する地域.	3
熱水系	hydrothermal system	地熱流体とその熱の流れ、およびそれを支配する物理条件(温度、圧力)の場を含めた全体のシステム.	3
地熱貯留層	geothermal reservoir	透水性の地層の孔隙が地熱流体で満たされ、地下深部の熱源からの加熱によって生ずる浮力及び周囲の強制的圧力などにより、地熱流体がその中を流動しうる地層.	3
開口性フラクチャ	no-closed fracture	岩盤中に存在する割れ目. 天然の熱水が入っている場所.	3
帽岩	cap rock	地熱貯留層を直接覆って流体を上方に通さない、不浸透性岩.	3
地熱流体	geothermal fluid, hydrothermal fluid	地熱地域の地下にある高温の流体(蒸気、熱水).	3
深層熱水	deep geothermal water	主に平野部の地下深くに存在する地下水で、地球内部からの熱伝導によって温められた熱水.	3

3. 水の「ちから」

身の回りにある水。当たり前のように毎日飲んで、手を洗って、お風呂に入って……でも、水は自然界ではとても「異常な物性」を持つ物質です。例えば、固体(氷)の方が液体(水)よりも密度が小さい、分子量(水=18)に近い他の物質(例えばメタン=16)に比べて融点・沸点が異常に高い(1気圧下での水の沸点が100℃に対し、メタンは-161.5℃；国立天文台編, 2004), いろいろなものを溶かし込んでしまうなど、実は当たり前ではない性質を持つ物質なのです。その特異性については、様々な本、ウェブページに解説がありますので詳しいことはそちらを見ていただきたいと思います。小論の主題である資源との関係でいえば、「水のちから」のうち、「溶かし込む」、「沈殿させる」、「化合する」などの化学的な「ちから」、及び「削る」、「運ぶ」、「溜める」などの物理的な「ちから」(第2図)が「資源」をつくる上で重要となります。

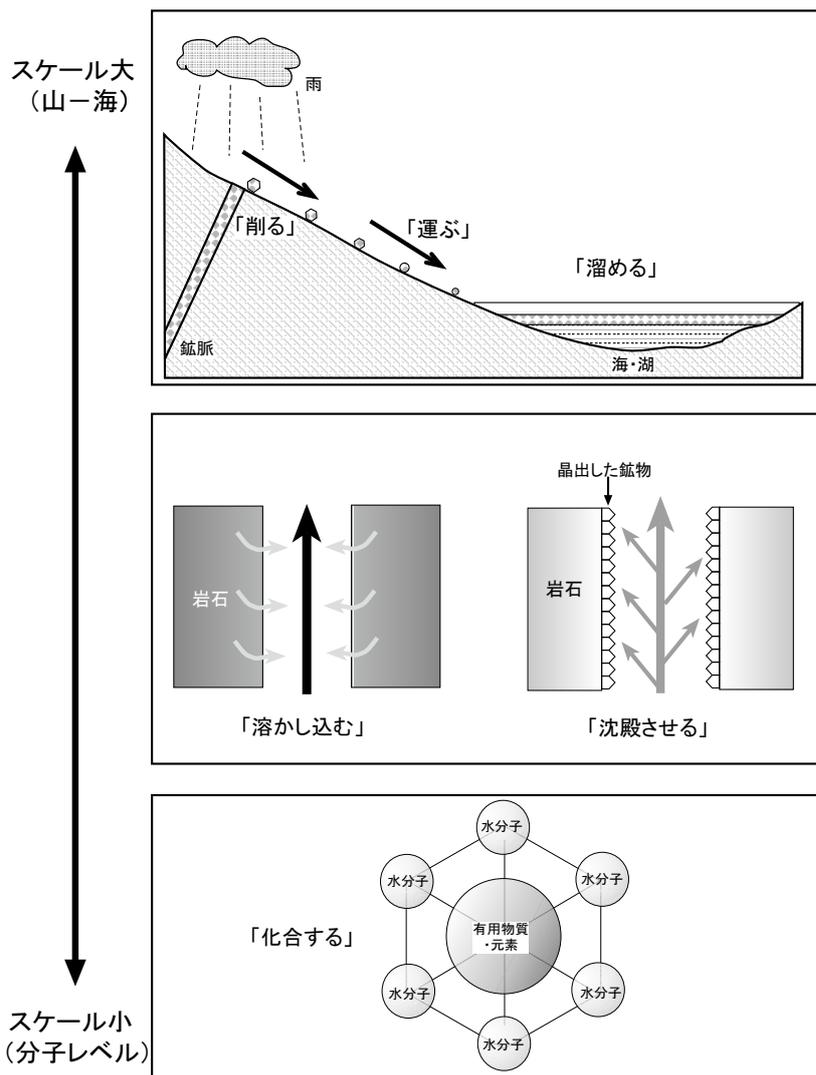
4. 鉱物資源をつくる「水のちから」

小論では、まず鉱物資源に関わることを述べ、燃料資源・地熱資源に関しては稿を改めて述べたいと思います。

4.1 鉱床の分類

鉱物資源の鉱床は、対象とする元素や物質によって、金属鉱物資源、非金属鉱物資源の鉱床に分けることができます。金属鉱物資源の鉱床としては、例えば金、銀、銅、鉄、鉛、亜鉛、希土類元素(レアアース)などがあります。非金属鉱物資源の鉱床としては、長石、珪石、粘土、石灰岩などがあります。

一方、鉱床の成因に基づく分類もあります(第2表)。この表を見てお分かりの通り、実は鉱床の分類名は必ずしも統一されているわけではありませんが、大まかには火成作用、堆積作用、変成作用それぞれに応じて形成される鉱床という観点から分類がなされていることがお分かりと思



第2図 様々な「水のちから」

第2表 鉱床の成因に基づく分類
 なお、産業技術総合研究所地質標本館編(2006)については、風化残留鉱床と漂砂鉱床は分類表(p.123, 表 4-5-2)には示されていないが、
 その他の箇所の文中の内容に合わせて付加。

梶子(2008)	産業技術総合研究所地質標本館編(2006)	武内(1986)	スミルノフ(渡辺・岸本訳)(1976)	岡野(1975)	渡辺・岩生(1969)	柴田(1956)
マグマ鉱床 結晶分化鉱床 液相分離鉱床 その他のマグマ鉱床 熱水鉱床 斑岩型鉱床 スカルン鉱床(接触交代鉱床) 貫入岩に伴うその他の熱水鉱床 広域変成作用に伴う熱水鉱床 陸上火山活動に伴う熱水鉱床 海底熱水鉱床 低温熱水鉱床	正マグマ性鉱床 ベグマタイト鉱床 スカルン鉱床 熱水鉱床I 中～高温熱水鉱床 熱水鉱床II ゼノサーマル鉱床 熱水鉱床III 浅熱水鉱床 熱水鉱床IV 鉱染型金鉱床 温泉堆積性鉱床 海底熱水鉱床I 黒鉱鉱床 海底熱水鉱床II キーラーガー 海底熱水鉱床III 層状マンガン鉱床 昇華鉱床	マグマ成鉱床 正マグマ鉱床 ベグマタイト鉱床 カーボナタイト鉱床 スカルン鉱床 熱水鉱床 岩銅硫化鉄鉱床	マグマ系鉱床 マグマ分化鉱床 ベグマタイト鉱床 カーボナタイト鉱床 接触交代鉱床 気成鉱床 熱水鉱床 噴気堆積鉱床	岩漿系鉱床 深成岩漿系鉱床 正岩漿性鉱床 ベグマタイト鉱床 気成鉱床～気成-深熱水性鉱床 接触交代鉱床 熱水性鉱床 高温型 中温型 低温型 浅岩漿系鉱床 高温-中温-低温移過型熱水性鉱床 中温-低温移過型熱水性鉱床 低温型熱水性鉱床 火山噴気型鉱床 陸上火山噴気-温泉型鉱床 海底火山噴気-堆積鉱床	火成鉱床 正岩漿鉱床 ベグマタイト鉱床 気成交代鉱床 接触交代鉱床 熱水鉱床 熱水交代鉱床 昇華鉱床	
堆積鉱床 化学的堆積鉱床 風化残留鉱床 漂砂鉱床	風化残留鉱床 漂砂鉱床	堆積成鉱床 機械的堆積鉱床 化学的沈殿鉱床 蒸發岩鉱床 有機的堆積鉱床 風化残留鉱床 地下水浸透鉱床	堆積系鉱床 機械的堆積鉱床 化学的堆積鉱床 蒸發岩鉱床 有機的堆積鉱床 風化残留鉱床	堆積系鉱床 風化残留鉱床 天水-地下水性鉱床 化学的沈殿鉱床 機械的堆積鉱床 有機的堆積型と機械的堆積型の中間型鉱床 風化残留型により生じた鉱床 有機的沈殿鉱床	水成鉱床 露天化鉱床 沈殿鉱床 砂鉱床	
	変成鉱床	変成源鉱床 被変成鉱床 変成鉱床	変成鉱床 続成作用による鉱床 熱変成鉱床 広域変成鉱床 自変成鉱床	変成鉱床 接触変成鉱床 広域変成鉱床 自己変成鉱床 多重変成鉱床	動力変成鉱床	
						有機鉱床 石炭鉱床 石油鉱床

ます。

例えば、産業技術総合研究所地質標本館編(2006)では、有用鉱物が濃集する機構に基づき、鉱床の成因を

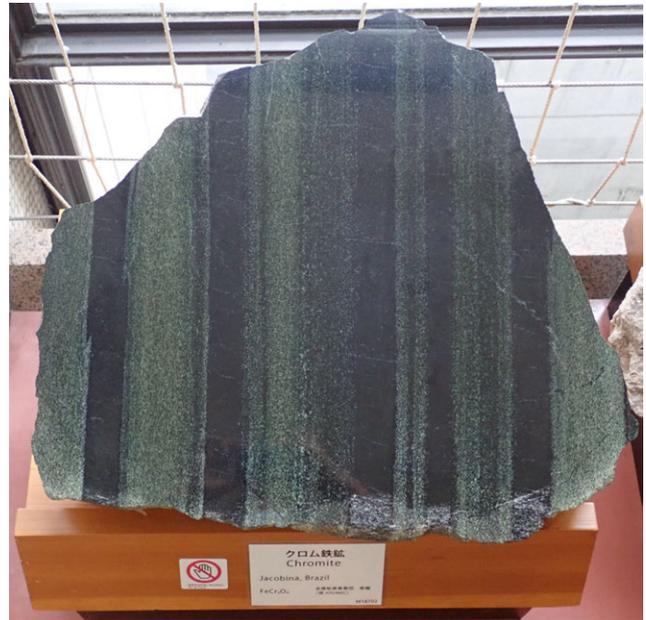
- (1) マグマという高温の溶融体中で物理的に分別(正マグマ性鉱床)
- (2) 液体状態や超臨界状態の水から鉱物が化学的に沈殿(ペグマタイト鉱床, スカルン鉱床, 熱水鉱床, 温泉堆積性鉱床, 海底熱水鉱床)
- (3) 高温の蒸気からの昇華濃集(昇華硫黄鉱床)
- (4) 岩石が雨水や熱水の作用で溶かされた後に最も安定な鉱物だけが残留(珪石鉱床, 粘土鉱床)
- (5) 風化作用によって岩石から分離した鉱物粒子が, 水流によって物理的に濃集(砂金, 砂鉄鉱床, 堆積性粘土鉱床)

の五種類に分けています。このうち、今回のテーマである「水のちから」がほぼ関係しないのは、(1)の正マグマ性鉱床だけです。これは、マグマの固結に伴って鉱物が晶出し、それがマグマだまり内で集積してできた鉱床で、例えばクロム鉄鉱鉱床(第3図)が代表的なものです。一方、他の四種類は、全て何らかの形で「水のちから」が関係しています。それを踏まえ、第4図には、産業技術総合研究所地質標本館編(2006)の図5-4-1及び記述内容に基づいて、

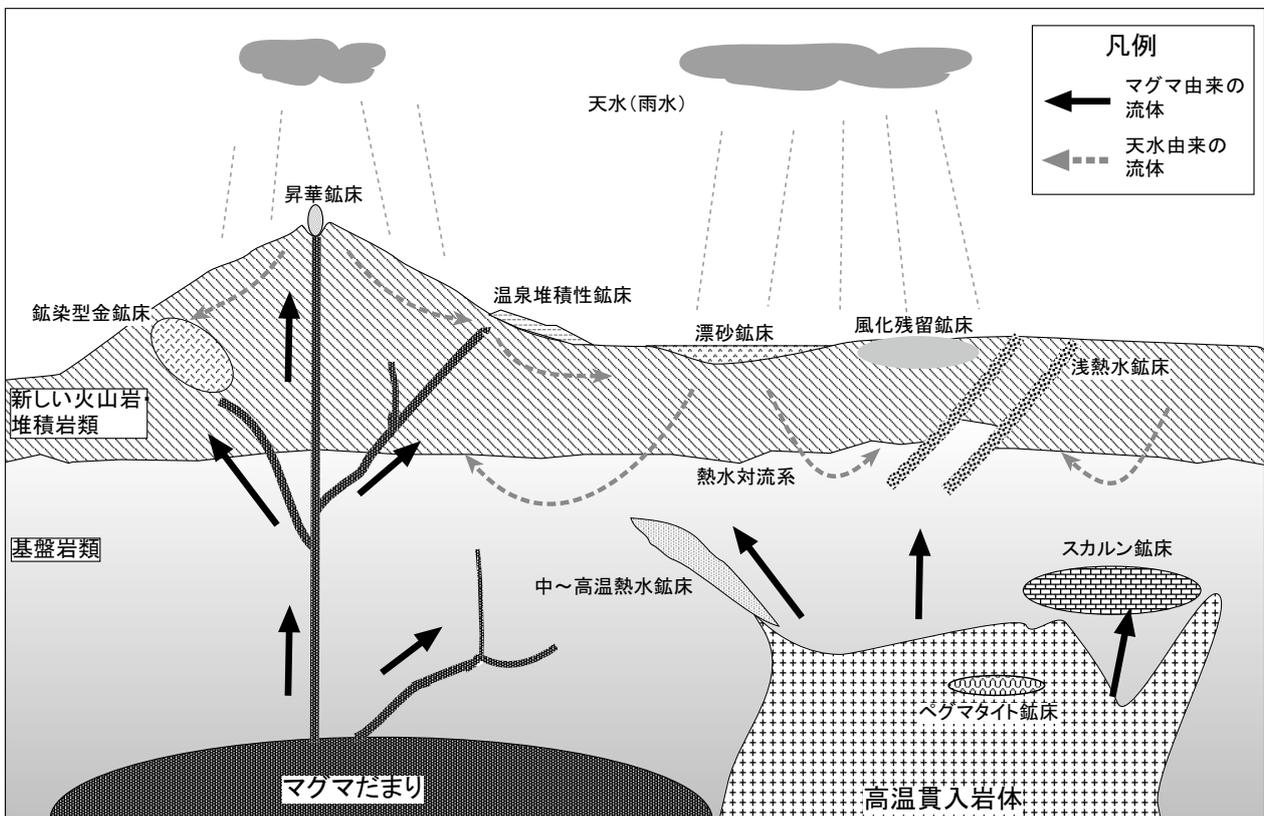
鉱床の生成環境を模式的に示しました。

4.2 鉱床をつくる「水」

上記の(2)のような鉱床をつくる「水」は、より正確に言えば鉱化流体、鉱液、熱水などと呼ばれるもの(第1表)で、



第3図 クロム鉄鉱の標本(2階第2展示室入口)



第4図 第2表の産業技術総合研究所地質標本館編(2006)の分類に基づく鉱床の生成環境の模式図

高温高压の条件下で、様々な元素を高濃度に溶かし込んでいるものです。この「水」が一体どこから来たのか、そこに溶け込んでいる元素がどこから来たのか、それらの元素がどのように集積したのか、という点はまさに鉱床の形成過程を明らかにする「鉱床学」という学問分野での核心となる問題です(例えば飯山, 1989)。

ごく簡単に言いますと、鉱化流体などと呼ばれる「水」の由来にはいくつか種類があり、マグマが冷却する段階で分離・放出され、様々な成分を溶かし込んだマグマ由来のもの(マグマ水)、雨水が地面に浸み込んだ地下水に由来するもの(天水)のほか、海水、地層中に長年取り込まれていた遺留水、変成作用に伴う変成水などがあると考えられています(鞠子, 2008)。第4図では、このうちのマグマ水と天水に関して示していますが、これらの「水」が周囲の岩石と反応しながらそこに含まれる元素を溶かし込み、また冷却、沸騰、化学反応などの過程を経て、それらの元素を鉱物として沈殿(晶出)させ、鉱床が形成されると考えられています。すなわち、第2図の「水のちから」のうち、化学的な「溶かし込む」、「沈殿させる」、及び物理的な「運ぶ」(第2図の状況とはちょっと異なりますが)という「ちから」が重要になります。

ただし、実際に鉱床を探索しても、そこには「水」そのものは目に見える形ではほとんど残っていません。そのため、鉱物の詳細な産状観察・化学分析や、鉱物中に残っている流体包有物(例えば佐脇, 2003)と呼ばれる微小・微量の水の分析を通して、元の「水」(鉱化流体など)の性状、鉱床の成因を探っています。

以下には、産業技術総合研究所地質標本館編(2006)の分類を踏まえ、実際に地質標本館内に展示されている標本を例にとって、「水」と資源の関係をお話したいと思います。鉱床の種類は、形成過程・場所を考慮すれば実に多種多様に分類されますが、ここではそのうちの①ペグマタイト鉱床、②スカルン鉱床、③熱水鉱床、④温泉堆積性鉱床、⑤昇華鉱床、⑥海底熱水鉱床、⑦海底沈殿鉱床、⑧風化(残留)鉱床、⑨漂砂鉱床、⑩蒸発岩鉱床に絞って紹介したいと思います。

4.3 ペグマタイト鉱床

ペグマタイト(pegmatite)とはギリシア語の“pegma”(くっつけ合わされたもの)に石を意味する接尾語“-ite”が付けられた言葉で、和訳は巨晶花崗岩です(歌代ほか, 1978)。その名の通り、大きな鉱物結晶からなることが特徴です。

第5図に示したのはペグマタイトの例ですが、Aは岐阜

県の苗木花崗岩中のペグマタイト、Bは山梨県の甲府花崗岩中のペグマタイトの石英(水晶)、Cは島根県の馬谷城山^{うまのたにしろやま}の石英、Dは福岡県福岡市長垂^{ながたれ}のリチウムペグマタイト(下川, 2017)です。日本では上記の苗木地方のほかに、福島県石川地方、滋賀県田上山^{たなかみやま}周辺が三大ペグマタイト産地として知られています。また、山梨県の甲府花崗岩体は、ここに示したような巨大な水晶が産出することが有名で、これが山梨県での宝飾品製造(水晶細工)の原料となりました(草下, 1990; 梅田・吉澤編, 2012)。馬谷城山^{うまのたにしろやま}の石英は、珪石として陶磁器原料、建材、濾過材などに利用されています(酒井, 1994)。

このようなペグマタイトは、マグマが冷却して鉱物が晶出する過程で分離された「水」が、固結しつつあるマグマ～火成岩体内の一部に集まることで形成されます。この「水」には、シリカ分(SiO₂)などのほかに、それまでに晶出した鉱物には含まれにくい元素、例えばリチウム(Li)、フッ素(F)、希土類元素、ウラン(U)などが比較的高い濃度で溶け込んでいます。冷却するにつれ、この「水」からこれらの元素を含む鉱物が晶出し、石英(SiO₂)、リチア輝石(LiAlSi₂O₆)、リチア雲母(K₂Li₃Al₅Si₆O₂₀(OH, F)₄)、螢石(CaF₂)、モナズ石((Ce, La, Y, Th)PO₄)、各種ウラン鉱物などからなるペグマタイトが形成されることとなります。それらの鉱物が多量に存在する場合には鉱床として扱われ、珪石、リチウム、フッ素、希土類元素、ウランなどを得るための資源として利用されることとなります(飯山, 1998)。

4.4 スカルン鉱床

スカルン(skarn)というのは、もともとはスウェーデン語で汚物、不潔物、ごみなどの意があります。それが鉱山用語として使われるようになると、資源として価値が低い脈石(第1表)の意味で使われるようになったようです(鈴木, 2005)。

第6図には、スカルンの例を示します。Aは茨城県^{いなだ}の稲田花崗岩中にみられるスカルン、Bは岩手県^{かまいし}の釜石鉱山の鉄鉱物を含むスカルン鉱石、Cは岐阜県^{かみおか}の神岡鉱山の垂鉛・鉛鉱物を含むスカルン鉱石です。

スカルンは、花崗岩などのマグマが固結して形成された火成(貫入)岩体に伴って形成されることが多く、特に、石灰岩や苦灰岩などの炭酸塩からなる、あるいは炭酸塩を多く含む岩石が、様々な元素を溶かし込んだ高温の「水」と反応して形成されることが一般的です。ただし、火成岩体から離れたところにもスカルンは存在することがあり、このことから、火成岩体は必ずしも「水」の供給源ではなく、むしろ「水」を熱し、対流系をつくるための熱源としての働き



第5図 ベグマタイトの例 A: 岐阜県苗木花崗岩中のペグマタイト (2階第2展示室), B: 山梨県甲府花崗岩中の水晶 (1階第4展示室), C: 島根県馬城山鉱山の石英 (1階アンモナイト階段下), D: 福岡市長垂のリチア雲母を含むリチウムペグマタイト (2階第2展示室入り口)

が重要であると考えられています(飯山, 1998)。

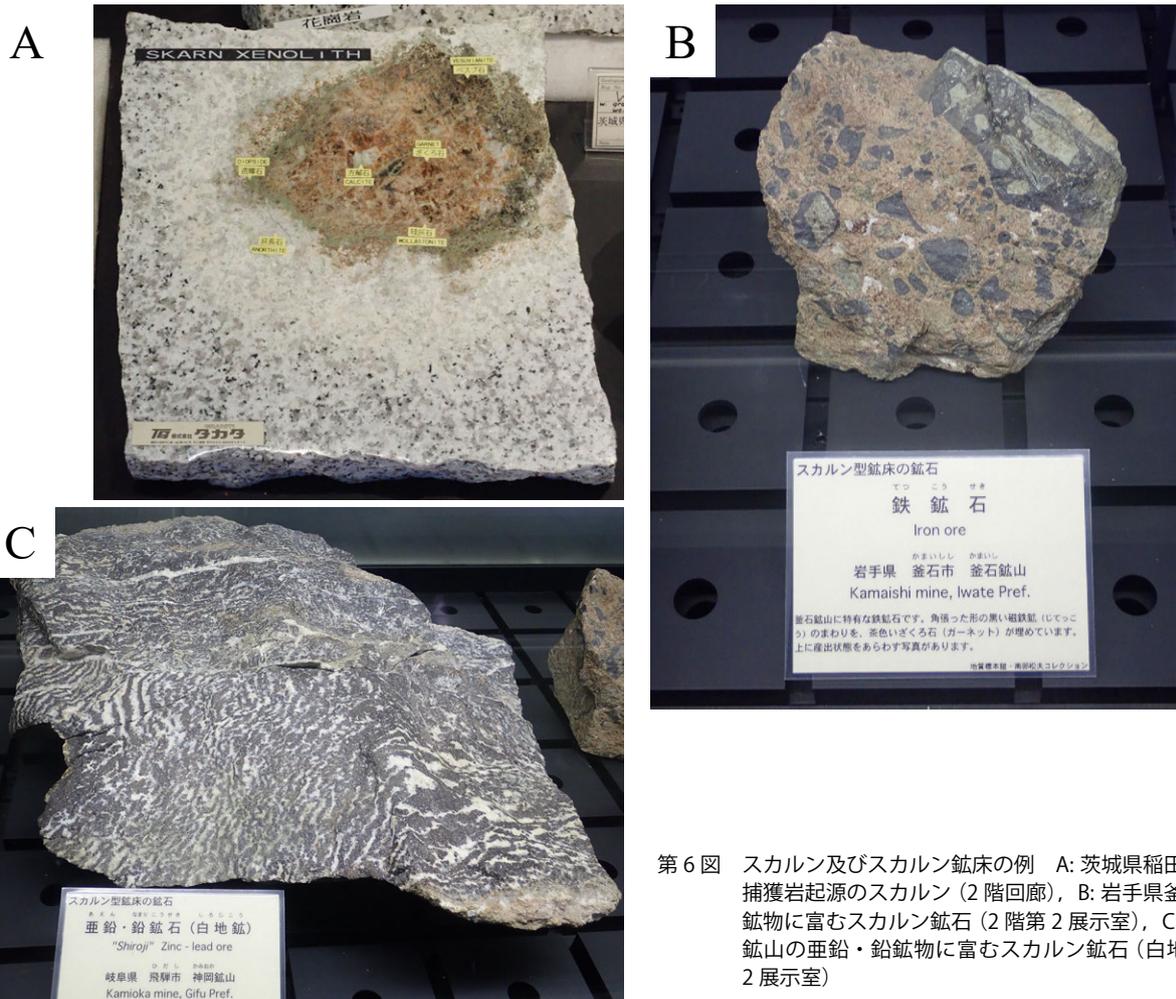
一般的に、この「水」にはシリカ分が多く含まれており、これが炭酸塩と反応することで、珪灰石(CaSiO_3)、Ca-単斜輝石($\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})\text{Si}_2\text{O}_6$)、Ca-石榴石(グランドイト: $\text{Ca}_3(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$)、^{りよくれんせき}緑簾石($\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$)などが形成されることとなります。また、鉍化流体の温度が下がっていくと、角閃石、電気石(これらの化学式は省略)、^{すず}蛍石などの出現とともに、タングステン、モリブデン、錫などの金属元素の酸化物や各種硫化物(CuFeS_2 , FeS_2 , FeS , ZnS , PbS など)が出現するようになります(飯山, 1998)。これらの金属鉍物が十分な量存在するところが、スカルン鉍床として開発対象になるわけです。

4.5 熱水鉍床

熱水鉍床は、その名の通り、高温の「水」(熱水)が様々な岩石と反応しつつ地下を移動し、温度、圧力、pHなどの物理化学条件が変化すると、熱水から鉍物が晶出して形成

される鉍床です。日本では、このタイプの鉍床は非常に数多く存在します。これは、日本では火山に代表される火成活動とそれに伴う熱水系の形成が、過去から現在に至る長い期間に、国土の広い範囲にわたって起きてきたためと考えられます。

この熱水鉍床に属する鉍石は地質標本館に数多く展示されていますが、その中の代表的なものを第7図に示します。第7図Aは北海道の光竜鉍山の金・銀鉍石、Bは秋田県^{あらかわ}の荒川鉍山(銅鉍床)の石英脈、Cは世界トップレベルの金鉍山である鹿児島県の菱刈鉍山の金・銀鉍石です。鉍脈は、^{ひしかり}岩石がパカッと割れて開いた面(割れ目)に沿ってできますので、鉍脈全体の形状は、いわば、厚さに対してずっと幅広い面を持った板状の形態となります(実際には割れ目の形状によって、面がうねったり分岐・合流したりして、複雑な形状になります)。A、C、及びBの写真手前にある小さな標本は、その鉍脈の「厚み」の方向から、一方Bの写真奥側の大きな標本は、鉍脈の「面」の方向から見ているもの



第6図 スカラン及びスカラン鉱床の例 A: 茨城県稲田花崗岩中の捕獲岩起源のスカラン (2階回廊), B: 岩手県釜石鉱山の鉄鉱物に富むスカラン鉱石 (2階第2展示室), C: 岐阜県神岡鉱山の亜鉛・鉛鉱物に富むスカラン鉱石 (白地鉱; 2階第2展示室)

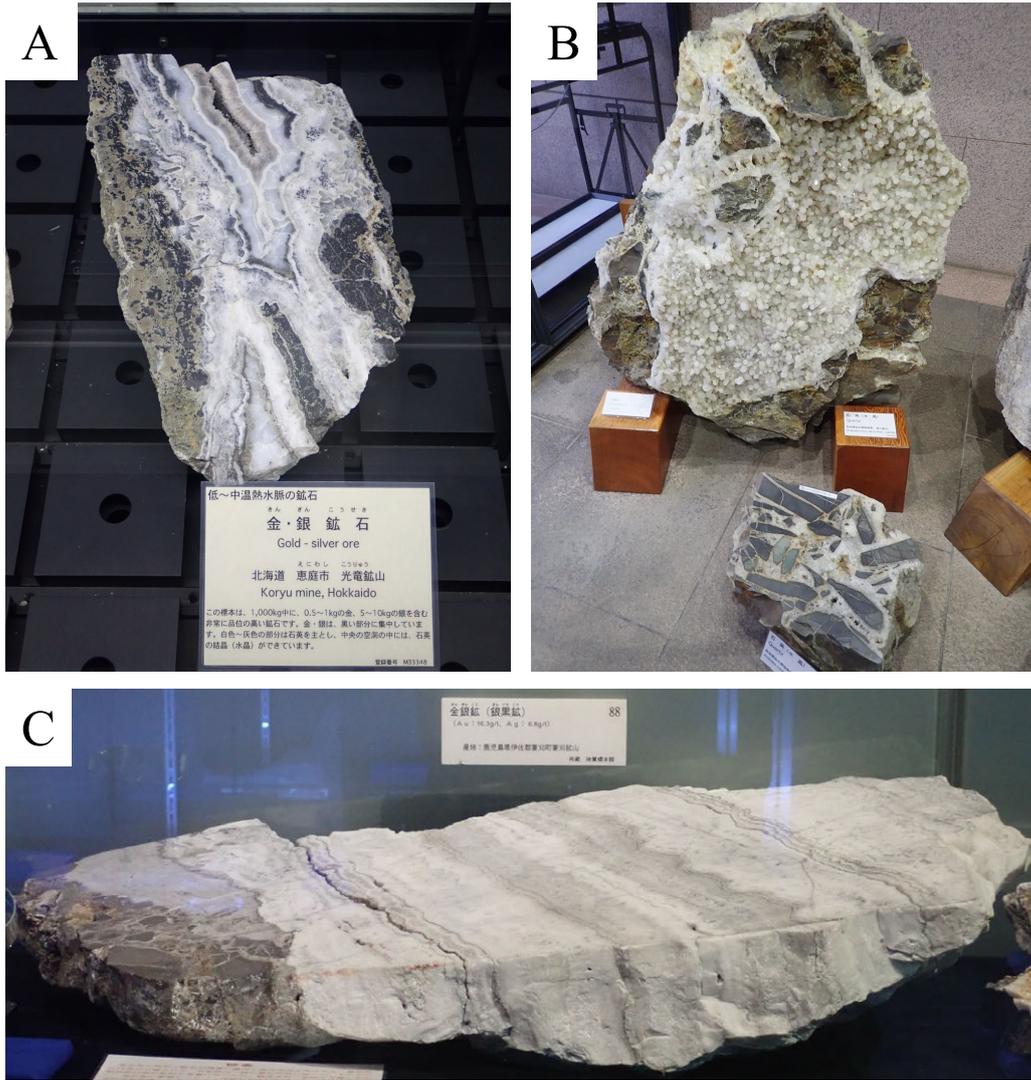
に相当します。これらの標本を見てお分りの通り、鉱脈を「厚み」の方向から見ると、どれも地層のように、鉱物の帯状組織が幾重にも重なってできているように見えます。このような鉱脈の組織は、まさに「水のちから」のうちの、「溶かし込む」、「運ぶ」、「沈殿させる」などのちからが働いて形成されました。

第8図にその模式図を示します。まず、岩石中に割れ目ができ、そこを様々な成分を溶かし込んだ熱水が通過する時(第8図(1))に、温度低下、沸騰などにより溶解度が下がると、溶存成分が鉱物となって沈殿します。これが割れ目を充填することで、割れ目は一旦閉塞します(第8図(2))。第7図Bの荒川鉱山の手前の小さな標本でいうと、母岩中に多数の割れ目ができ、そこを通った熱水から石英が晶出して割れ目が充填され閉塞しています。このようにして閉塞した割れ目は、地震や深部に閉じ込められた熱水の圧力上昇などによって、古傷のように再び開くことがあります(第8図(3))。そこを、再び熱水が通過して鉱物が沈殿し、割れ目が閉塞するという過程を何度も繰り返して

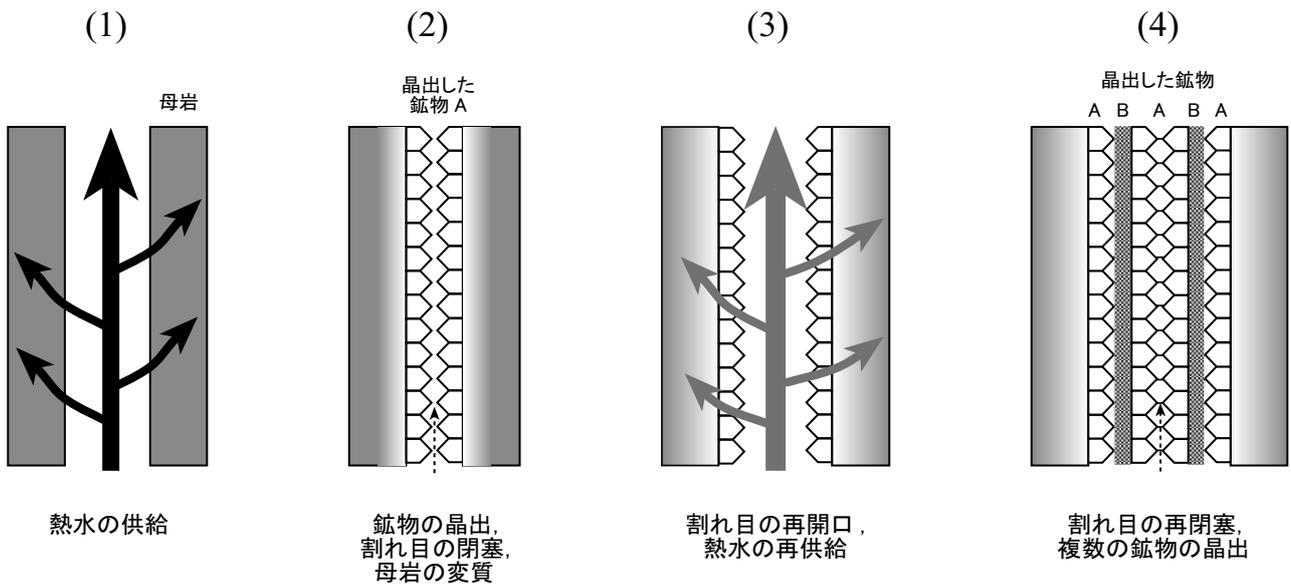
いくことで、徐々に鉱脈全体の幅が広がります。また、温度、化学組成などの物理・化学条件が異なった熱水が通過すれば、最初とは異なる鉱物が沈殿することがあります(第8図(4))。例えば、光竜、菱刈の標本(第7図A, C)では、石英を主とする鉱物帯の間に、銀黒と呼ばれる黒っぽい帯状部分があり、ここに金・銀が集まっています。このように、熱水が供給され鉱物が沈殿するという過程が何度も繰り返されることで、金・銀などの元素が多量に沈殿する鉱床になったと考えられます。

なお、熱水の一部はもともと存在していた岩石(母岩といいますが)内にも浸透して化学反応を起こし、母岩中の成分が溶け出したり、逆に熱水中の溶存成分が母岩に付加されたりして、もとの母岩中に含まれていたものとは違った組織・鉱物が形成されること(熱水変質)が一般的です(第8図(2))。熱水鉱床(に限りませんが)を探すためには、まずこのような熱水変質した岩石を探すことが重要な手掛かりとなります。

さらには、この熱水変質が進むことで形成される鉱床も



第7図 熱水鉱床の例 A: 北海道光竜鉱山の金・銀鉱石 (2階第2展示室), B: 秋田県荒川鉱山の石英脈 (地質標本館入口), C: 鹿児島県菱刈鉱山の金・銀鉱石 (2階第2展示室)

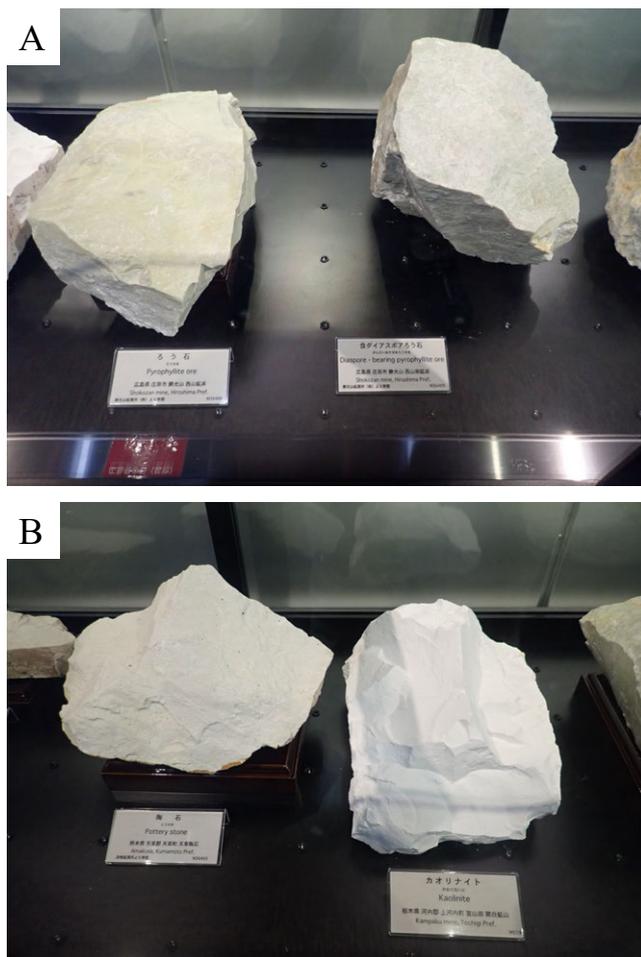


第8図 熱水鉱床の形成過程の模式図 (鉱物の沈殿, 熱水変質等)

あります。熱水の供給により岩石中のアルカリ金属(ナトリウム、カリウムなど)やシリカ分が溶けて排出される(溶脱^{ようだつ}といいます)ことで、4.1節で述べたような様々な非金属鉱物鉱床が形成されることがあります。鉱床の形態は、熱水系の規模・形、熱水の上昇の仕方によって変化しますし、形成される鉱物は、熱水の温度やpHによって多様なものがありますが、例えば珪石、ロウ石、陶石、カオリナイト、セリサイト、タルク、長石、ドロマイトなどがあります(須藤, 1992)。第9図には、そのロウ石、陶石、カオリナイトの例を示します。これらの鉱石は耐火物、一般陶磁器、タイル、衛生陶器、碍子^{がいし}などの原料として重要で、わたしたちの身近な生活用品に幅広く使われています。

4.6 温泉堆積性鉱床

4.5節で述べた熱水が、徐々に温度を下げながら地表まで到達すれば、温泉として湧出することになります。この湧出する温泉が地表を流れ下る間に溶存成分を沈殿させて



第9図 非金属鉱物鉱床の例 A: 広島県勝光山^{しょうこうざん}のロウ石, B: 熊本県天草の天草陶石(左), 栃木県関白鉱山^{かんぱく}のカオリナイト(右) (A, Bともに2階第2展示室)

鉱床をつくる場合があります、それが温泉堆積性鉱床(鉱層)と呼ばれるものになります。特に、強酸性の温泉は鉄イオンを多量に溶かしており、これが酸化鉄として沈殿します(産業技術総合研究所地質標本館編, 2006)。

第10図にはその例を示しますが、A, Bが群馬県の群馬鉱山, Cが長野県の諏訪鉱山の標本です。ともに、針鉄鉱^{しんてつこう}(褐鉄鉱^{かってつこう})を主成分とし、群馬鉱山の標本では塊鉄層^{かいてつそう}と粉鉄層^{こなてつそう}、あるいは鉄明礬石^{てつめいばんせき}(第10図B)が層状に堆積している組織がみられます(高島, 1954)。また、資源として採掘されたわけではありませんが、北投石を含む標本(青木, 2017)も、温泉からの沈殿物として形成されました。

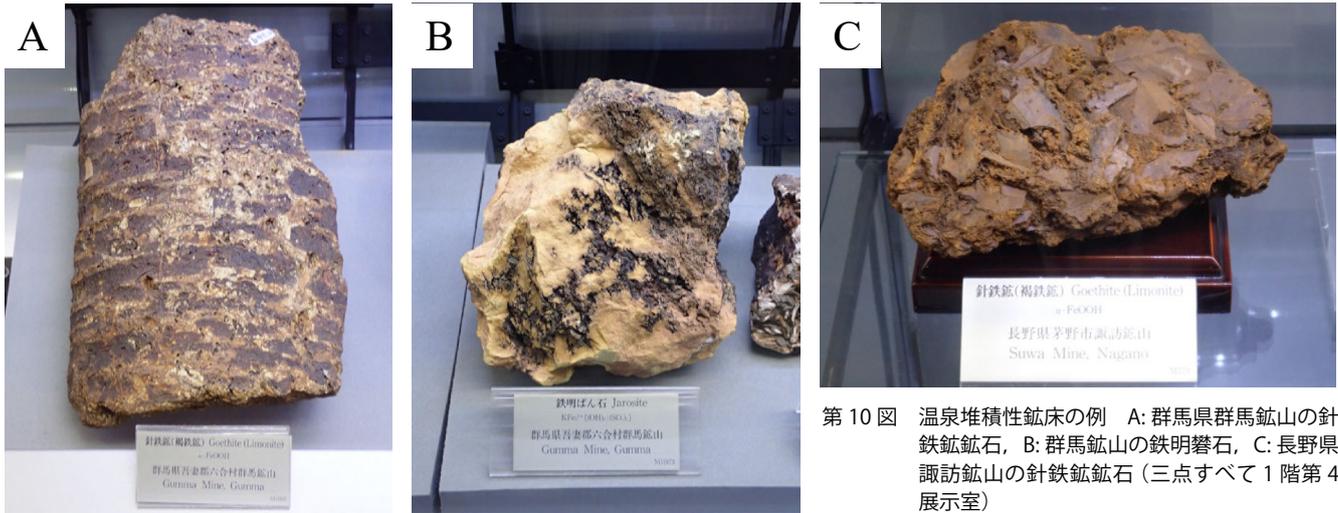
4.7 昇華鉱床

火山や地熱地帯の噴気孔では、黄色い硫黄の塊(結晶)がよく見られます。これは、火山ガス・蒸気中に含まれていた硫黄分が温度低下によって昇華したものの(産業技術総合研究所地質標本館編, 2006)で、これまで記してきた鉱床とは異なり、気体状態の「水」から分離して形成されたこととなります。この例として、第11図には大分県九重火山^{くじゅう}の自然硫黄を示します。

かつては、このような噴気孔で採取される硫黄は工業原料として重要な資源であり、多数の火山・地熱地帯が存在する日本では、全国各地に硫黄鉱山がありました。しかし、石油の脱硫装置による安価な硫黄が生産されるようになると、天然の硫黄採取はその役目を終えました。上記の標本の採取地である九重火山の硫黄鉱山は、1972年(昭和47年)に閉山しています(http://www.city.oita.oita.jp/o204/bunkasports/shitebunkazai/event/documents/09_panel.pdf 閲覧日: 2021年7月2日)。

4.8 海底熱水鉱床

様々な成分を溶かし込んだ熱水が、海底面下から直接海水中に噴き出すと、急速に冷却されて鉱物を沈殿させます。この時、噴出している熱水中に硫化物やシリカ分が晶出すると、その色によって、海底から灰黒色あるいは白色の煙が噴き上がっているように見えます(飯山, 1998)。その硫化物やシリカ分が沈殿し、煙突状の構造をつくったものが第12図Aのチムニー(chimney)です。真ん中の大きな標本(高さ約150cm)は北部東太平洋海膨で採取されたものの、左下の小さな標本は南部東太平洋海膨で採取されたものを縦に切断したもので、標本の中央に熱水の通路となった穴が上下につながっているのがわかります。これらには金、銀、銅、鉛、亜鉛などが含まれています。これは現在形成されつつある海底熱水鉱床(塊状硫化物鉱床)といえま



第 10 図 温泉堆積性鉱床の例 A: 群馬県群馬鉱山の針鉄鉱鉱石, B: 群馬鉱山の鉄明礬石, C: 長野県諏訪鉱山の針鉄鉱鉱石 (三点すべて 1 階第 4 展示室)



第 11 図 昇華鉱床の例 九重火山の自然硫黄 (1 階第 4 展示室)

すが、地球史の中では何度も繰り返して同じような海底熱水鉱床が形成され続けており、例えば西グリーンランドのイヌア (Isua) 鉱床は、37.6 億年前のものと考えられています (佐藤, 1983)。

日本海が拡大した中新世 (約 1,500 万年前頃) にも同様の活動が起き、その時形成された海底熱水鉱床が地層中に取り込まれ、北海道西南部～東北地方の日本海側、山陰地方に点在する「黒鉱」と呼ばれる鉱床をつくったと考えられています (鹿園, 1988; 産業技術総合研究所地質標本館編, 2006)。第 12 図 B には秋田県深沢鉱山・餌釣鉱山産の黒鉱及び関連する標本を示しますが、4 つの標本のうち、写真右下が閃亜鉛鉱、方鉛鉱を主とする「黒鉱」、右上が石英、赤鉄鉱を主とする「珪鉱」、左下がその中間的な「黒鉱質珪鉱」、左上が黄鉄鉱、黄銅鉱を主とする「黄鉱」です。さら

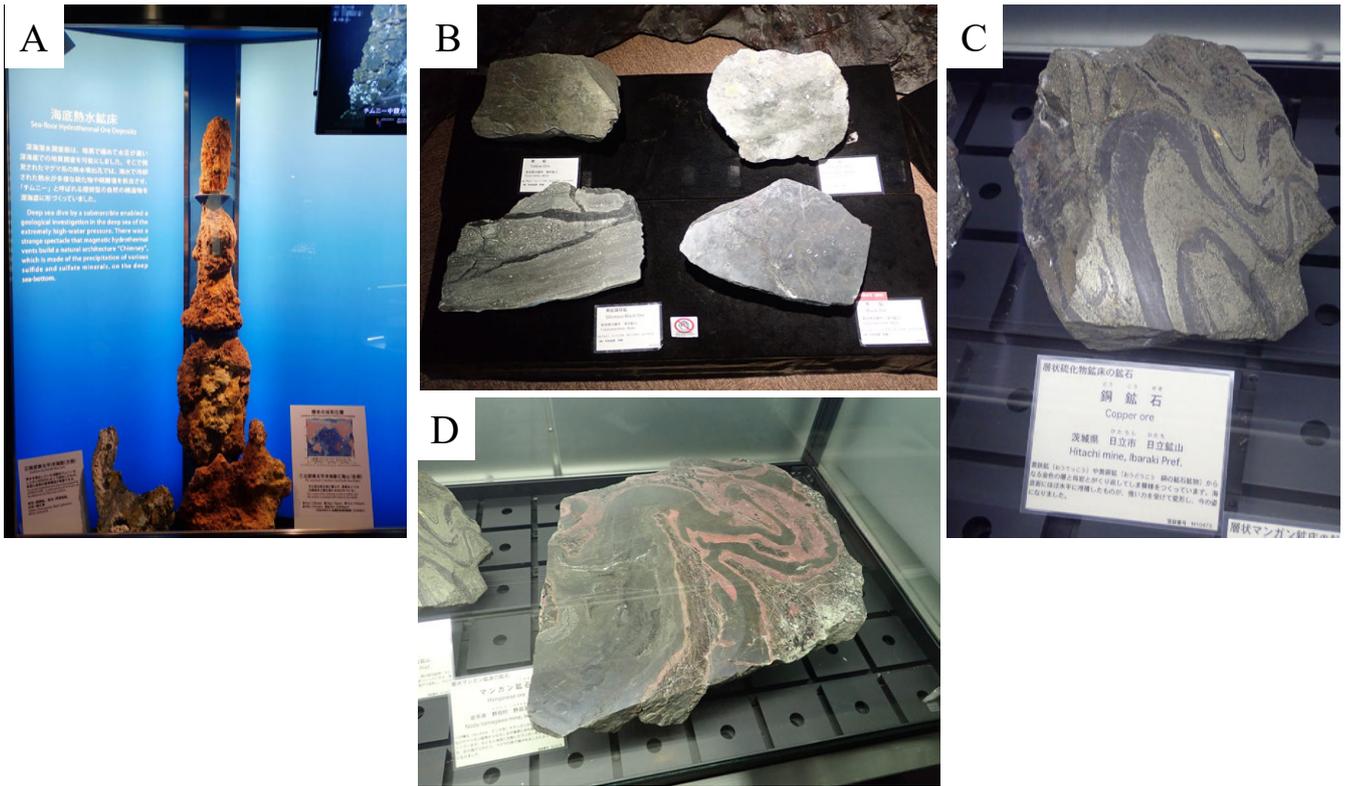
に、このような黒鉱鉱床が變成作用を受けたものが、層状含銅硫化鉄鉱床 (ドイツ語でキースラーガー : Kieslager) と呼ばれる鉱床になります。この例としては別子鉱山、日立鉱山 (第 12 図 C) があります。

一方、海底で、硫化物をあまり含まない熱水 (温泉水) からマンガンが沈殿して鉱床を形成することもあり、このようなタイプは、北上山地、足尾山地、丹波山地などの付加体の堆積物中に見いだされます (産業技術総合研究所地質標本館編, 2006)。第 12 図 D は岩手県の野田玉川鉱山のマンガン鉱石ですが、この鉱床は、白亜紀の花崗岩の貫入による接触變成作用を被っており、また吉村石、木下雲母、原田石などの日本産新鉱物を産したことで有名です (松原, 2009)。

4.9 海底沈殿鉱床

海底には、前節のような高温の熱水から沈殿したものだけでなく、低温の海水から成分が沈殿して形成される鉱床もあります。その例として、マンガン団塊 (第 13 図 A, B)、コバルトリッチ (マンガン) クラスト (第 13 図 C) があります。これらは、一般的には前節の海底熱水鉱床と共に「海底鉱物資源」と表現されることが多いようですが、第 2 章の資源の定義のところでも述べたとおり、「資源」という表現には経済性の観点が含まれるため、ここではあえてその表現を避け、「海底沈殿鉱床」と表現することにしました。

マンガン団塊は、大きさ 1～十数 cm の球～楕円体で、鉄・マンガン酸化物を主体としています。マンガン団塊は、火山岩の礫や生物の遺骸を核とし (第 13 図 B)、海水や堆積物中の間隙水に溶けている金属成分が海底表面で酸化され、数 mm/百万年という非常にゆっくりとした速度で核の上に沈殿して形成されたものです。地域的な偏在があ



第12図 海底熱水鉱床の例 A: 東太平洋海嶺のチムニー, B: 秋田県深沢鉱山・餌釣鉱山の黒鉱鉱床の鉱石, C: 茨城県日立鉱山の層状含銅硫化鉄鉱床の銅鉱石, D: 岩手県野田玉川鉱山のマンガン鉱石 (A~D 全て2階第2展示室)

り、ハワイ南東海域の水深 4,000 m を超える深海底には、銅、ニッケル、コバルトの総重量が 2.5 % を超えるマンガン団塊が濃集しており、資源として有望視されています(産業技術総合研究所地質標本館編, 2006)。また、コバルトリッチ(マンガン)クラストは、堆積物があまり溜まらない海山の頂部や斜面で、岩石の表面に海水中の金属、特にマンガンや鉄などが酸化物として沈殿して形成されます。酸化物層の厚さは数 mm ~ 十数 cm のものまであり、その成長速度は、マンガン団塊と同様、非常に遅いと考えられています。この酸化物層には、コバルトや白金などが含まれており、資源として有望だと考えられています(産業技術総合研究所地質標本館編, 2006)。

4.10 風化(残留)鉱床

風化作用とは、岩石が、地表付近で気象現象(降水、気温など)や生物の活動などを受けて分解される作用のことです。この風化作用によって、新たに有用な鉱物が形成されて鉱床となったものが風化鉱床です。逆に、風化されにくい鉱物ばかりが残って形成される、風化残留鉱床もあります(須藤, 1992)。「水のちから」という点では熱水鉱床と似ているところもありますが、風化(残留)鉱床は、常温の「水」が岩石の成分を溶かし、分別することで形成されると

いう点が違います。

第14図には、その例として、岐阜県大垣市^{きんしょうざん}金生山の赤鉄鉱を示します。金生山は、現在も石灰岩を採取している鉱山です。石灰岩台地では、風化作用によってしばしば鉄分に富む赤土(terra rossa)が発達し、その中に褐鉄鉱・赤鉄鉱の塊が含まれることがあります(高島, 1954)、この標本はその例の一つです。このほかによく知られているのは、アルミニウムの原料となるボーキサイトです。

4.11 漂砂鉱床

第2図の最上段には、地表に露出した鉱脈が雨水によって削られ、運ばれ、海や湖などの堆積場に運ばれて溜まるという状況を示していますが、これが漂砂鉱床のでき方です。これまでは化学的な「水のちから」が中心でしたが、漂砂鉱床の場合は、物理的な「水のちから」が重要になります。

第15図には代表的な漂砂鉱床である砂金の標本を示しますが、北海道では砂白金が産することも知られています(弥永, 2006)。漂砂鉱床をつくる鉱物は、一般に変質に強く、比重が高く、化学的に安定なものであり、上述の金、白金族元素(白金、イリジウムなど)のほか、錫石、ルチル、ジルコン、モナズ石、チタン鉄鉱、磁鉄鉱などがあり



第13図 海底沈殿鉱床の例 A: マンガン団塊 (2階第2展示室), B: マンガン団塊とその切断面(1階第4展示室), C: コバルトリッチクラスト (2階第2展示室)



第14図 風化残留鉱床の例 岐阜県大垣市金生山産の赤鉄鉱 (1階第4展示室)

ます(鞠子, 2008)。鉄鉱が集まったものがいわゆる砂鉄鉱床になり, 日本ではたたら製鉄の原料として使われていました。

なお, 似たようなプロセスではありますが, 地表での風化・熱水変質で生成された粘土鉱物が純粋かつ多量に湖や内湾などに堆積した場合は, 堆積性の粘土鉱床となります。こちらは漂砂鉱床ではなく, 堆積鉱床に分類されることが一般のようです。このような堆積性の粘土鉱床としては, 愛知県瀬戸地域, 岐阜県多治見地域, 三重県島ヶ原地域などに産する木節粘土, 蛙目粘土が有名で, これらの地域の窯業の重要な原料となっています(須藤, 1992)。

4.12 蒸発鉱床

蒸発鉱床とは, 「水」が蒸発することで後に沈殿して残った溶存成分が集まって鉱床となったものです。端的な例は, 第16図に示す岩塩です。これらは, 過去の塩湖や浅い海が干上がって沈殿・堆積した塩分が地層中に取り込まれて鉱床となったものです。現在の乾燥地帯の湖ではまさにこのようなことが起きており, 特にリチウムの供給源として非常に高く期待されています(荒岡, 2015)。



第15図 漂砂鉱床の例 山形県寒河江市の砂金 (1階第4展示室)



第16図 蒸発鉱床の例 アメリカ合衆国ニューメキシコ産(左)及びドイツ産(右)の岩塩 (1階第4展示室)

5. おわりに

以上、駆け足で「水」がどのようにして鉱物の鉱床をつくるかを示しました。繰り返しになりますが、鉱物の鉱床をつくる「水のちから」で特に重要なのは、「溶かしこむ」、「運ぶ」、「沈殿させる」です。「水は生命をつくった源である」ということはよく知られています。それと同様に、社会を支える資源として重要な様々な鉱物(鉱床)も、「水のちから」が働いて作られたものが非常に多いことがご理解いただけたと思います。

ただし、ここに挙げたのは多様な鉱物の鉱床のほんの一部であって、物理化学条件、地質学的条件に応じて、複雑な形成過程を持つ鉱床がほかにもたくさんあります。地質標本館内にもそのような標本がまだまだ多数展示されていますので、ご来館の折は、一つ一つの標本をよく観察いただき、それらがどのように形成されたのかを想像していただければ幸いです。

なお、鉱床学に関してより専門的に知りたい方は、本文中でもいくつか挙げましたが、例えばスキナー〔松尾訳〕(1971)、岡野(1975)、立見編(1977)、鎌田ほか編(1985)、鹿園(1988, 1997)、飯山(1989, 1998)、長沢・クズヴァルト(1989)、番場(1990)、松葉谷(1991)、石川(1991)、千田(1996)、黒田(2002)、野津・清水(2003)、鞠子(2008)などの鉱床学及びそれに関連する地球化学に関わる文献をご覧いただきたいと思います。

文 献

青木正博(2017) 含鉛重晶石(北投石). 地質標本館お

すすめ標本ストーリー (https://www.gsj.jp/Muse/story/src/story_020.pdf 閲覧日: 2021年6月4日) 荒岡大輔(2015) リチウム資源—各鉱床タイプの概要とリチウム同位体による成因論—. 岩石鉱物科学, 44, 259-270.

番場猛夫(1990) いま地球の財産を診る—鉱床学と鉱物資源—. 教育出版センター, 東京, 286p.

千田 佑(1996) 地球化学反応速度と移動現象. コロナ社, 東京, 175p.

地学団体研究会(地学事典編集委員会)(1983) 増補改訂地学事典(改訂版第3刷). 平凡社, 東京, 1612p.

地熱エネルギー基準用語集委員会(1982) 新エネルギー技術用語集—地熱編—. 日本産業技術振興協会, 東京, 107p.

深海博明(1972) 2 日本の資源問題と資源学. 板垣與一編, 日本の資源問題, 日本経済新聞社, 東京, 314p.

飯山敏道(1989) 鉱床学概論. 東京大学出版会, 東京, 196p.

飯山敏道(1998) 地球鉱物資源入門. 東京大学出版会, 東京, 195p.

石川洋平(1991) 地学ワンポイント4 黒鉱—世界に誇る日本の資源をもとめて. 共立出版, 東京, 119p.

科学技術庁資源調査会(1961) 日本の資源問題(上). 科学技術庁資源調査会報告第19号, 612p.

科学技術庁資源調査会(1971) 将来の資源問題 人間尊重の豊かな時代へ(上). 科学技術庁資源調査会報告第60号, 772p.

鎌田政明・小沢竹二郎・村上悠紀雄・吉田 稔編(1985) 地熱流体の化学—環境科学の視点から—. 東京大学

- 出版会, 東京, 215p.
- 金子正彦 (2012) 世界の地熱法. 日本地熱学会誌, **34**, 123-137.
- 金子正彦 (2016) 世界の地熱法 (2). 日本地熱学会誌, **38**, 85-100.
- 国立天文台編 (2004) 理科年表 (机上版) 第 78 冊. 丸善, 東京, 1015p.
- 黒田吉益 (2002) 水素同位体比から見た水と岩石・鉱物. 共立出版, 東京, 203p.
- 草下英明 (1990) 鉱物採集フィールドガイド (第 8 刷). 草思社, 東京, 254p.
- 鞠子 正 (2008) 鉱床地質学 — 金属資源の地球科学—. 古今書院, 東京, 580p.
- 松原 聡 (2009) 増補改訂フィールドベスト図鑑 14 日本の鉱物. 学研教育出版, 東京, 268p.
- 松葉谷 治 (1991) 熱水の地球化学. 裳華房, 東京, 139p.
- 森田澄人・谷田部信郎 (2021) ケロジェン. 地質標本館おすすめストーリー (https://www.gsj.jp/Muse/story/src/story_038.pdf 閲覧日: 2021 年 6 月 4 日).
- 長沢敬之助・クズヴァルト, M. (1989) 工業原料鉱物資源. 修学館, 東京, 280p.
- 野津憲治・清水 洋 (2003) 地球化学講座 3 マントル・地殻の地球化学. 培風館, 東京, 308p.
- 岡野武雄 (1975) 地球科学講座 12 地下資源. 共立出版, 東京, 230p.
- 酒井禮男 (1994) 私の推薦する天然記念物 馬谷城山鉱山のペグマタイトと大水晶. 地質ニュース, no. 476, 58.
- 産業技術総合研究所地質標本館編 (2006) 地球 図説アースサイエンス. 誠文堂新光社, 東京, 175p.
- 佐藤壯郎 (1983) 地球史の中の黒鉱型鉱床. 鉱山地質特別号, no. 11, 1-21.
- 佐脇貴幸 (2003) 流体包有物: その基礎と最近の研究動向. 岩石鉱物科学, **32**, 23-41.
- 柴田秀賢 (1956) 鉱物と地下資源 (再版). 研究社学生文庫, 研究社, 東京, 181p.
- 志賀美英 (2019) 鉱物資源問題と日本 — 枯渇・環境汚染・利害対立—. 九州大学出版会, 福岡, 148p.
- 鹿園直建 (1988) 地の底のめぐみ — 黒鉱の化学—. 裳華房, 東京, 182p.
- 鹿園直建 (1997) 地球システムの化学 — 環境・資源の解析と予測—. 東京大学出版会, 東京, 319p.
- 下川浩一 (2017) リチウムペグマタイト. おすすめ標本ストーリー (https://www.gsj.jp/Muse/story/src/story_022.pdf 閲覧日: 2021 年 6 月 4 日).
- 須藤定久 (1992) 第 1 章 日本の窯業原料総説. 工業技術連絡会議窯業連合部会編, 日本の窯業原料 1992, ティー・アイ・シー, 1-30.
- スキナー, B. J. [松尾禎士訳] (1971) 地球科学入門シリーズ 7 地球資源学入門. 共立出版, 東京, 166p.
- スミルノフ, ヴェー・イー [渡辺武男監訳, 岸本文男訳] (1976) 新版鉱床地質学. ラテイス, 東京, 859p.
- 鈴木淑夫 (2005) 岩石学辞典. 朝倉書店, 東京, 877p.
- 高島 彰 (1954) I 鉄鉱. 地質調査所編, 日本鉱産誌 B I-c 主として金属原料となる鉱石 — 鉄・鉄合金および軽金属 —, 工業技術院地質調査所, 6-55.
- 高多 明 (1992) 地球資源戦略ノート. 白亜書房, 東京, 245p.
- 竹内 均・片山信夫・森本良平・木村俊雄 (1970) 新版地質辞典 (I). 古今書院, 東京, 483p.
- 武内寿久禰 (1986) 4 鉱床の分類と成因. 山口梅太郎編, 現代資源論, 財団法人放送大学教育振興会, 東京, 28-36.
- 立見辰雄編 (1977) 現代鉱床学の基礎. 東京大学出版会, 東京, 257p.
- 梅田美由紀・吉澤康暢編 (2012) 第 72 回特別展 きら² クリスタル — 水晶とそのなかまたち—. 福井市自然史博物館, 福井市, 72p.
- 歌代 勤・清水大吉郎・高橋正夫 (1978) 地学の語源をさぐる. 東京書籍, 東京, 195p.
- 渡辺武夫・岩生周一 (1959) III 日本の鉱床の成因. 地質調査所 (編), 日本鉱産誌 A 総論, 工業技術院地質調査所, 150-323.
- 山口梅太郎 (1981) 2 資源の有限性について. 山口梅太郎編著, 鉱物資源とその開発 — 技術者にとっての資源論 —, ラジオ大学講座, 旺文社, 東京, 17-24.
- 弥永芳子 (2006) 砂白金 ~ その歴史と科学 ~. 文葉社, 東京, 233p.

SAWAKI Takayuki (2021) Water's function that produces geo-resources: (1) Mineral resources.

(受付: 2021 年 7 月 9 日)