

レニウムーオスミウム法による年代測定

野崎 達生
Nozaki Tatsuo

1. はじめに

近年の前処理法と分析機器の向上によって、レニウムーオスミウム (Re-Os) 同位体による年代決定法が盛んに用いられている。地球化学、特に鉱床学分野において広く利用されているが、前者は地球史の様々なイベント時期を決定する年代目盛りとして、後者は鉱床の成因を解明する基礎的情報として活用されている。鉱床の生成年代は、ターゲットとする元素がなぜ、いつ濃集したのか、それを支配する地質学的現象は何かという成因解明だけでなく、新規鉱体を探査する際に対象地域を絞り込む上で有用な指標である。

従来、鉱床の生成年代は、(1) 鉱床母岩に含まれる珪酸塩鉱物（雲母や長石など）の K-Ar, ^{40}Ar - ^{39}Ar , Rb-Sr 年代や (2) 鉱床母岩や周辺岩石に含まれる化石記録から求められてきた。これらの年代値は鉱石試料に対する“間接的”な年代制約であることから、鉱床と母岩の関係が不明瞭な場合や、鉱化作用がマルチステージの場合にしばしば年代決定を行うことが困難であった。また、鉱床が高温・高圧下で変成作用を被ると、同位体系の二次的擾乱（同位体情報のリセット）や化石の再結晶が起こり、初生的な年代値を求められない場合がある。

Re, Os は岩石試料中の一般的な濃度が ppt~ppb レベルの極微量元素であるが、親鉄・親銅元素であるために鉱床を形成する硫化鉱物に濃集する性質がある。したがって、低濃度ゆえに前処理や測定に手間と費用が掛かるものの、硫

化物鉱床の生成年代を鉱石試料から“直接的”に決定できる大きなメリットを有している。本稿では、Re の放射性同位体を用いた Re-Os 法による年代決定の原理と最近の応用例について紹介したい。

2. Re-Os 年代決定法の原理

Re, Os は原子番号 75 番, 76 番の元素であり、Os は 6 つある白金族元素の 1 つである。Re には質量数 185 と 187 の 2 つの同位体が存在する (図 1)。そのうち ^{187}Re は放射性同位体であり、半減期 416 億年で β^- 壊変し ^{187}Os を生じる。Os には質量数 184, 186, 187, 188, 189, 190, 192 の 7 つの同位体が存在する。安定同位体比である ^{188}Os との比を取ると、 $^{187}\text{Re} \Rightarrow ^{187}\text{Os}$ の放射壊変系は次式で表される。

$$\left(\frac{^{187}\text{Os}}{^{188}\text{Os}}\right)_t = \left(\frac{^{187}\text{Os}}{^{188}\text{Os}}\right)_i + \left(\frac{^{187}\text{Re}}{^{188}\text{Os}}\right)(e^{\lambda t} - 1) \quad (1)$$

ここで、 t は年代値、 i は初期値、 λ は壊変定数 (1.666×10^{-11} ; Smoliar *et al.*, 1996) を表している。測定して得られる $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 比及び $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比を XY プロットすると、一定条件を満たす場合これらの測定値は一直線上に並ぶ (図 1)。この近似直線は Re-Os アイソクロンと呼ばれており、アイソクロンの傾きから年代値 t を求めることができる。直線の切片 ((1) 式の右辺初項) は Os 同位体比初期値と呼ばれ、鉱石試料が生成した当時の $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比である。

硫化鉱物の中でも、モリブデンの硫化鉱物で

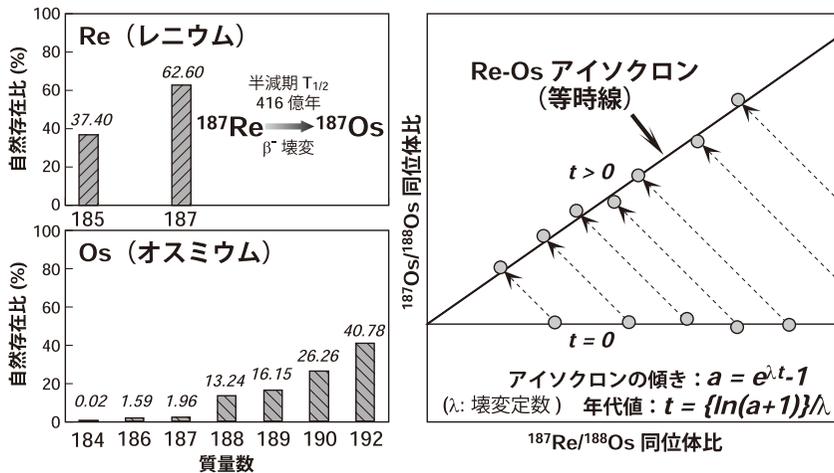


図1 Re-Os 同位体による年代決定の原理²⁾

ある輝水鉛鉱 (Molybdenite : MoS₂) は、結晶学的に Re を取り込みやすい一方、Os を取り込みにくい性質を有している。したがって、初生的な Os をほとんど無視できる、すなわち Os 同位体比初期値をゼロとみなせるため、(1)式が次式のように簡略化される。

$$({}^{187}\text{Os})_t = {}^{187}\text{Re} \times (e^{\lambda t} - 1) \quad (2)$$

輝水鉛鉱の場合は単純な放射壊変の式に基づいて、1 試料から年代決定を行うことが可能である。この年代値はアイソクロン年代と区別して Single model age と呼ばれている。

Re, Os は硫化鉱物だけでなく有機物にも濃集する性質を有しているため、アイソクロン法により、硫化物鉱床、隕石、黒色頁岩、石油鉱床などの年代決定が可能である。従来手法では年代決定が困難であった鉱物やホスト相について、直接的に数値年代を得られる点が大きな特長である。Re-Os 年代決定法の原理については、鈴木 (1999) や野崎ほか (2014) に詳述されているので、そちらも参照されたい。次章からは筆者らによる最近の応用例について紹介する。

3. 茨城県日立鉱床の生成年代決定

茨城県日立鉱床 (図2) は、海底熱水鉱床が陸上に露出した Cu-Zn 鉱床である。1591 年の開発開始から 1981 年の閉山までに、約 3,000 万トンの硫化物鉱石、44 万トンの Cu、5 万トンの Zn を生産した日本屈指の大規模鉱床であり、その機械部門が現在の (株) 日立製作所グループの発祥となっている。日立鉱床の成因については長年研究がなされてきたが、日立地域は高温・高圧の変成作用を被った変成帯であり、化石記録や放射年代記録に乏しい地域である。これまで、鉱床周辺に分布する石灰岩中の数少ない珊瑚化石記録から、鉱床の生成年代は石炭紀前期 (約 3 億 2,320 万年前~3 億 5,890 万年前) であり、日立鉱床は大雄陸層に胚胎すると考えられてきた。しかし、日立地域は飛騨帯や南部北上帯のように中国古大陸の断片が含まれており、その地質帯の年代はカンブリア紀 (4 億 8,540 万年前~5 億 4,100 万年前) まで遡る可能性が指摘されていたが、年代情報の乏しさから鉱床の生成年代を直接的に決定するに至っていなかった。そこで、筆者らを含む研究グループは、日立鉱山不動滝鉱床と藤見鉱床 (それぞれ、図2の Fd, F に位置する) の鉱石試料を用いて、Re-Os 同位体による年代決定を試み

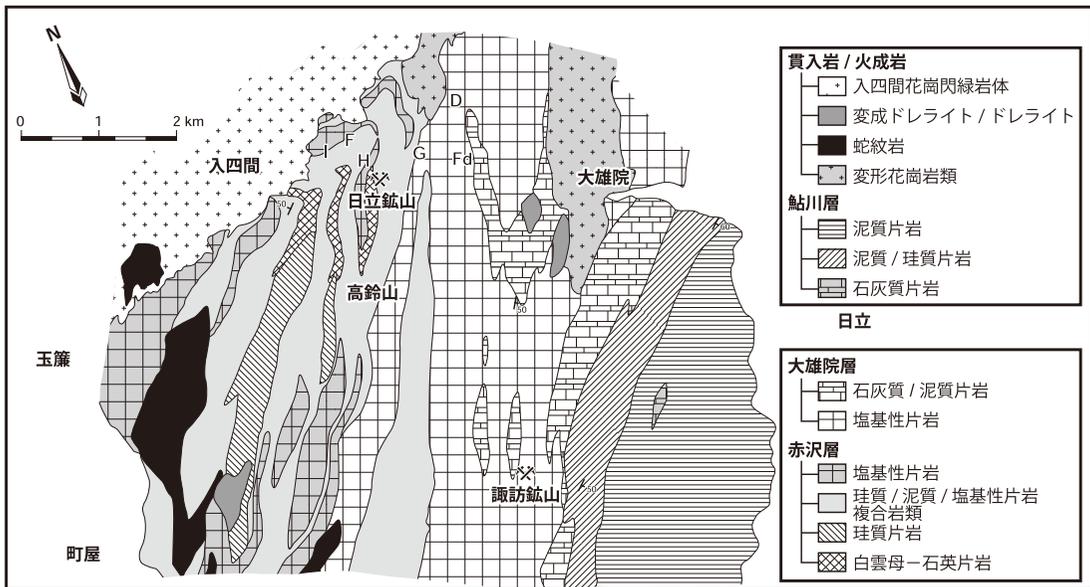


図2 日立鉱山周辺の地質図⁴⁾

た⁵⁾。

Re-Os 分析には、1971~1973 年にかけて、岡山大学の加瀬克雄名誉教授によって坑道内から採取された試料を用いた。鉱石試料は黄鉄鉱 (FeS₂) を主体とし、閃亜鉛鉱 (ZnS)、黄銅鉱 (CuFeS₂)、方鉛鉱 (PbS) などを伴う硫化物鉱石であり (図3)、これらの硫化物のみを重液分離によって選別した後に粉末化し、Re-Os 同位体分析に用いた。Re-Os 分析は、海洋研究開発機構に設置されている負イオン表面電離型質量分析装置 (N-TIMS) を用いて行い、Re-Os 濃度は粉末試料に ¹⁸⁵Re 及び ¹⁹⁰Os スパイク溶液を添加して、同位体希釈法により求めた。

日立不動滝鉱床の Re-Os 同位体比は幅広い同位体比組成を有し、良好な直線性を示す (図4)。一方、日立藤見鉱床の Re-Os 同位体比は不動滝鉱床よりも狭い範囲を示し、良好な直線性を示さなかった。不動滝及び藤見鉱床ともに緑簾石-一角閃岩相低温部以上 (約 450 度、2 kbar 以上) の広域変成作用を被っているが、藤見鉱床は入四間花崗閃緑岩体 (図2) の貫入による熱的な接触変成作用も重複して被ってい

る。したがって、不動滝鉱床は初生的な Re-Os 同位体情報を保持しているために、同位体比が良好な直線性を示す一方、藤見鉱床の Re-Os 同位体比は変成作用によって二次的に擾乱されていると考えられる。また、各硫化物鉱石の Re-Os 同位体比系の閉鎖温度は明らかになっていないものの、黄鉄鉱を主体とする硫化物鉱石試料の Re-Os 同位体情報は、緑簾石-一角閃岩相低温部程度の変成作用を被っても擾乱されないことが明らかになった。

藤見鉱床からは直線性の良好な Re-Os アイソクロンが得られなかったが、不動滝鉱床の生成年代はアイソクロンの傾きから 5 億 3,300 ± 1,300 万年前と求められた。この年代値は、従来考えられていた鉱床の生成年代よりも約 1 億 5,000 万年古く、これまで数値年代が得られている鉱床の中では“日本列島最古”の鉱床年代である。また、この年代値から、(1) 日立地域にはカンブリア紀の地層が広く分布していること、(2) 日立鉱床は大雄院層ではなく上部赤沢層に胚胎すること、(3) 近年発見された不動滝鉱床周辺に分布する不整合露頭と合わせると、

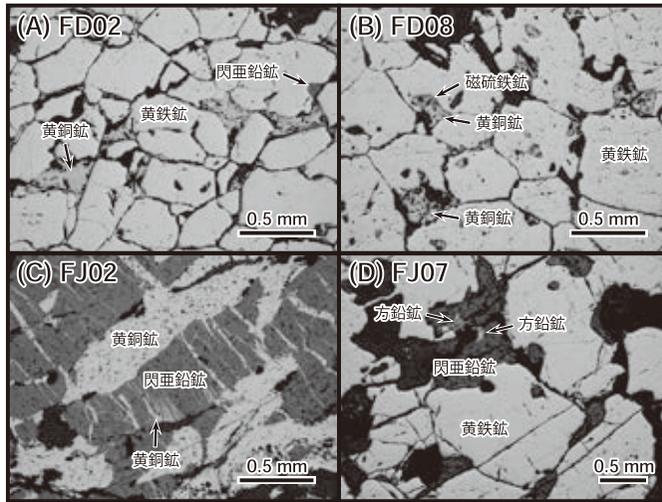


図3 Re-Os 同位体分析に用いた日立鉱山不動滝鉱床及び藤見鉱床鉱石試料の反射顕微鏡写真⁵⁾

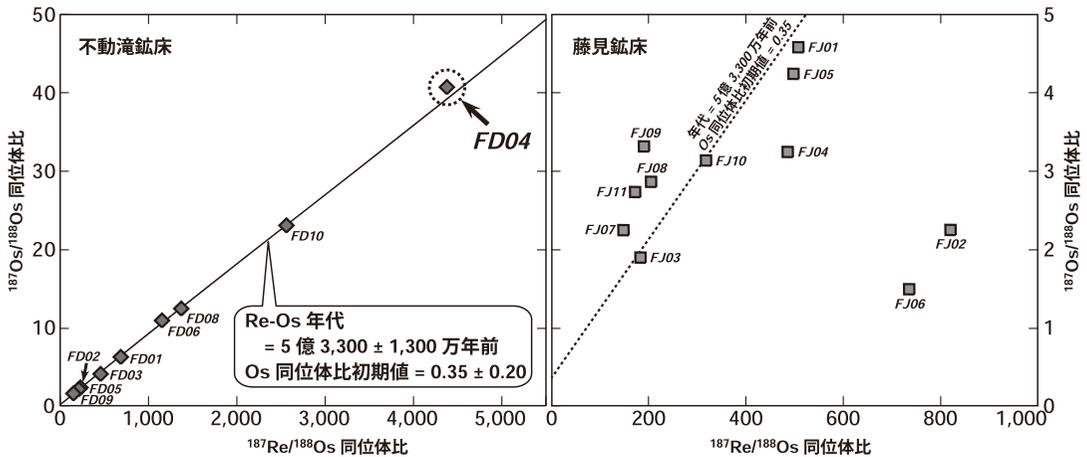


図4 日立鉱山不動滝鉱床及び藤見鉱床の Re-Os 同位体比及びアイソクロン⁵⁾
不動滝鉱床のアイソクロンからは、最も同位体比が大きい試料 (FD04) は除いている

カンブリア紀～石炭紀前期の約1億5,000万年にわたる地質記録が本地域から欠落していることが明らかになった。また、日立鉱床の Re-Os 年代、鉱床母岩の地球化学的特徴及びカンブリア紀の大陸配置から、日立鉱床は中国大陸とパンサラッサ海 (古太平洋) の沈み込み帯の間の島弧域 (背弧域) で生成したことが明らかになった。したがって、日本列島構造史の初期過程解明に繋がる重要な年代制約が得られた。ま

た、黄鉄鉱を主体とする硫化物鉱石が緑簾石一角閃岩相低温部程度の変成作用を被っても初生的な Re-Os 同位体情報を保持していることから、今後 Re-Os 法による年代決定が世界の変成帯に応用され、地球史の解明や様々な鉱床の年代決定、そしてより効率的な資源探査指針の策定に貢献していくことが期待される。

4. まとめと今後の展望

Re, Os は ppt~ppb レベルの極微量元素であるが、N-TIMS を用いた高精度分析法が 1991 年に開発されてから 20 年以上が経過しており、今後ますます広く利用されているであろう円熟期に差し掛かっている。本手法を用いた日本の研究グループによる最近のほかの主な研究成果として、オーストラリアのピルバラ地域に分布する赤鉄鉱 (Fe_2O_3) を切る黄鉄鉱脈の Re-Os 年代が約 27.6 億年前であることが報告されており、従来考えられていたよりも 3 億年以上前から地球上に酸化的大気が存在したことが明らかになっている⁶⁾。また、住友財閥の発祥となった愛媛県別子鉱床をはじめとする Cu-Zn 鉱床の Re-Os 年代決定も行われ、古海洋環境変動と鉱床の生成・保存の関係が明らかになりつつある⁷⁾。

Re-Os 同位体は年代決定の時計としての役割だけでなく、地球上のリザーバー間の Os 同位体比が異なる性質を利用して、古環境変動解読のツールとしても盛んに利用されている。最近では、岐阜県木曾川流域に分布する遠洋性堆積物の露頭から、約 6,550 万年前の恐竜絶滅を引き

起こしたイベントに次ぐ規模の隕石衝突が約 2 億 1,500 万年前に起こったことが Os 同位体から明らかになっている⁸⁾。今後、地球化学や鉱床学分野において Re-Os 同位体が益々応用され、未知の地質学的イベントが解明されるだろう。

参考文献

- 1) Smoliar, M.I., Walker, R.J., and Morgan, J.W., *Science*, **271**, 1099–1102 (1996)
- 2) 野崎達生, 加藤泰浩, 鈴木勝彦, *地球化学*, **48**(4), 279–305 (2014)
- 3) 鈴木勝彦, *地球化学*, **33**(2), 67–102 (1999)
- 4) Kase, K. and Yamamoto, M., *Mining Geol.*, **35**, 17–29 (1985)
- 5) Nozaki, T., Kayo, Y., and Suzuki, K., *Econ. Geol.*, **109**, 2023–2034 (2014)
- 6) Kato, Y., *et al.*, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **278**, 40–49 (2009)
- 7) Nozaki, T., Kato, Y., and Suzuki, K., *Sci. Rep.*, **3**, 1889, doi: 10.1038/srep01889 (2013)
- 8) Sato, H., Onoue, T., Nozaki, T., and Suzuki, K., *Nat. Commun.*, **4**, 2455, doi: 10.1038/ncomms3455 (2013)

(海洋研究開発機構
海底資源研究開発センター)