

氏名（本籍）	Sarangua Nergui（モンゴル）
専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	国博甲第2号
学位授与の日付	平成31年3月21日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	国際資源学研究科・資源学専攻
学位論文題目（英文）	モンゴル西部ハルザンブルゲイ過アルカリ複合岩体のレアメタル鉱化作用 (RARE METAL MINERALIZATION OF THE KHALDZAN BURGEDEI PERALKALINE COMPLEX, WESTERN MONGOLIA)
論文審査委員	(主査) 教授 渡辺 寧 (副査) 教授 Antonio Arribas (副査) 教授 石山 大三

論文内容の要旨

西モンゴルに分布するハルザンブルゲイ岩体は中期古生代に形成されたサヤンリフトの南端に位置する約 400Ma の過アルカリ複合岩体であり、本岩体には、ジルコニウム、ニオブ、希土類元素が濃集することが、ロシア人地質学者コバレンコにより 1984 年に明らかにされた。本博士論文の目的は、岩石学、鉱物学、地球化学をもとに本岩体中のレアメタル含有鉱物の同定とジルコニウム、ニオブ、希土類元素の濃集メカニズムを明らかにすることである。そのために X 線回折分析、走査型分析電子顕微鏡、蛍光 X 線分析、電子線マイクロ分析、流体包有物分析、レーザーラマン分析法が用いられた。

ハルザンブルゲイ複合岩体は主に石英閃長岩と花崗岩ユニットに区分される。石英閃長岩は岩体の大部分を構成し中心部を花崗岩に貫入されている。石英閃長岩は粗粒で主としてカリ長石、アルバイト、斜長石、アルベルゾン閃石、第一鉄リヒター閃石、エジリン普通輝石、石英からなり、アクセサリ鉱物としてジルコン、パイロクロア、フェルスマイト、アパタイトを含む。花崗岩はカリ長石、アルバイト、石英、アルベルゾン閃石からなり、アクセサリ鉱物として、ジルコン、パイロクロア、フェルスマイトを含む。花崗岩体の上部では石英のモードが増加し、ペグマタイト脈を含んでいる。

全岩化学組成分析結果は、石英閃長岩、花崗岩ともに ASI ダイアグラムで「peralkaline」の組成領域にプロットされ、コンドライトで標準化した希土類元素図では Eu の負異常をもつやや軽希土類元素に富んだパターンを示す。ハーカー図では、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 、 TiO_2 、 CaO が SiO_2 の増加とともに直線的に減少する傾向を示すが、石英閃長岩と花崗岩との間で組成ギャップが認められる。SiO₂ と微量元素との関係図では、La、Ce、Nb が SiO₂ が 75%

以上の試料に濃集する以外、系統的な変化は認められない。

これらの岩石には 2 種の熱水変質が認められる。1 つは曹長石化で特徴づけられる交代作用で、主として花崗岩に近接する石英閃長岩に広く認められる。もう 1 つは緑泥石やイライト、スメクタイト等の含水鉱物に特徴づけられる変質で、交代作用を受けた石英閃長岩中に脈状に発達する。交代作用による変質では、長石のほとんどがアルバイトに、アルベルゾン閃石はエジリンに交代されるとともに、螢石、ジルコン、ニオブ鉱物が伴われる。より低温の熱水変質帯では上述した含水鉱物の他に螢石、赤鉄鉱、方解石、石英およびジルコン、フッ化希土類炭酸塩鉱物が含まれる。

ジルコンについてみると、本岩体にはマグマ性ジルコンと熱水性ジルコンが認められる。マグマ性ジルコンは、半自形から自形で、石英閃長岩でも長石に包有されるものや最末期に鉱物の粒間を埋める石英に伴われるもの、より分化した花崗岩に含まれるものに細分される。熱水性ジルコンは主として交代作用を受けた石英閃長岩に認められる。コアにマグマ性ジルコンを包有し、その縁辺部に熱水性ジルコンが成長している組織や、コアにゼノタイムやシンキサイトを含む組織が一般的である。多くの熱水性ジルコンは集斑状組織を呈し、角閃石仮像に螢石とともに出現する。また一部のジルコンは熱水変質帯の螢石脈中に螢石や石英とともに出現する。ジルコンの微量元素の分析結果は、マグマの分化とともにマグマ性ジルコン中の Sn, Ti, Nb, REE 含有量が増加する傾向を示す。曹長石化作用に伴うジルコンはマグマ性のジルコンに比較すると、著しく不純物に富んでおり、中でも Nb, Th, U, Ca, REE の含有量が高い。最末期の石英に伴われるジルコンは Hf を除きこれら不純物の量が減少する。レーザーラマン分析結果は、交代作用によるジルコンに著しく水が含まれていることを示す。

最末期の石英閃長岩や花崗岩を切る螢石—石英脈の螢石、石英の流体包有物の均質化温度は 300 度から 100 度であり、塩濃度は 20-25%の塩濃度を示す。

以上の分析結果から、本複合岩体では、HFSE 元素、希土類元素は 1)分化の進んだ花崗岩およびペグマタイト、2)交代作用を受けた石英閃長岩、3)より低温での熱水変質を受けた石英閃長岩に濃集していることが判明した。花崗岩やペグマタイトへのこれらの元素の濃集はマグマの分化とともに不適合元素が濃集したことにより説明される。交代作用の原因となった熱水は著しく F に富んでいたと推定され、HFSE 元素や帰途類元素はフッ化ジルコニウム、フッ化希土類、フッ化ニオブ化合物イオンとして熱水中に存在し、それが石英閃長岩中の造岩鉱物(特に Ca を含む斜長石や普通輝石、第一鉄リヒター閃石)が分解することによりもたらされた Ca イオンと反応することにより、これらの F 化合物が分解し、螢石、ジルコン、ニオブ酸化物、および希土類炭酸塩鉱物として沈殿したと説明される。最末期の熱水では F に加えて Cl が主要な配位子となり希土類元素を運搬し、温度の低下、Ca イオンの増加とともに螢石、ジルコン、フッ化希土類炭酸塩鉱物の沈殿がもたらされたと説明される。

ハルザンブルゲイ複合岩体のニオブ、ジルコニウム、希土類鉱化作用は、これまで、1)マグマの分化に伴う HFSE 元素の濃集、2)岩体定置後の新たなカーボナタイトメルトの深部への貫入による F-Ca に富んだ熱水の供給による交代作用、により説明されてきた。本研究では、マグマの分化にともなう HFSE 元素の濃集も認められるものの、花崗岩マグマから分別した F に富む熱水が石英閃長岩中の Ca を含む鉱物と反応することにより HFSE 元素、希

土類元素の沈殿が生じたとする新たなモデルが提示された。このモデルは、マグマの固結年代と交代作用の年代とに大きな間隙が認められないこと、深部に貫入したとされるカーボナタイトが発見されていないことなどからも支持される。

論文審査結果の要旨

論文審査は提出された論文を本学位審査委員会委員で査読し、その内容について審議を行った。

本論文は、モンゴル西部のリフト帯に古生代に貫入したハルザンブルゲイ過アルカリ岩中のレアメタル鉱床の成因を、地質調査、岩石試料の光学顕微鏡観察、電子顕微鏡—分析電子顕微鏡による鉱物同定、岩石の全岩化学組成、電子線マイクロアナライザーによる鉱物化学分析、流体包有物マイクロサーモメトリー、レーザーアブレーション ICP を用いたジルコンの U-Pb 年代測定等、様々な手法を用いて研究したものである。

本研究結果によると、ハルザンブルゲイ貫入岩体は過アルカリ岩の化学組成を持ち、石英閃長岩相と花崗岩相に区分される。全岩化学組成分析の結果からこれらの 2 相はマグマの分化により形成されたことを示す。Zr, Nb 等の不適合元素や希土類元素はマグマの分化とともにマグマ中に濃集し、最末期に生成された花崗岩およびペグマタイトにフェルスサイト、コロンバイト、ジルコンとして晶出したことが明らかにされた。

花崗岩と接触する石英閃長岩は、広範囲にわたる交代作用を受けており、石英閃長岩中の長石はアルバイトに、ナトリウム角閃石はエジリンに交代されている。これらの鉱物とともにジルコン、蛍石、希土類鉱物が沈殿しており、交代作用の際に母岩である石英閃長岩中の長石や角閃石、輝石に含まれていた Ca が溶出し、流体中の F と反応した結果、これらの鉱物の沈殿をもたらしたと結論された。

さらに交代作用を受けた石英閃長岩の一部には後期の熱水変質作用が重複しており、鉄緑泥石やセリサイト、鉄スメクタイト等の含水鉱物がジルコン、蛍石、石英、希土類鉱物とともに形成している。流体包有物の均質化温度、塩濃度の測定結果は、この反応に寄与した熱水が塩素に富んでいたことを示し、希土類元素は塩化物イオンとして熱水により運搬されたと結論されている。

このような不適合元素や希土類元素の挙動は、岩体に普遍的に存在するジルコンの化学組成に反映されており、マグマ起源のジルコンでは、分化した岩石に含まれているものの方により不適合元素や希土類が濃集している。交代作用で形成されたジルコンにはマグマ性のジルコンよりさらに不適合元素や希土類元素が濃集している。後期の熱水変質作用に伴うジルコンは、このような不純物成分は少なく、よりストキオメオメトリーに近い組成を示す。このことは、低温ではジルコンに希土類元素等の不純物があまり含まれず、希土類元素は希土類鉱物として分別して沈殿したためと説明された。

交代作用で生じたジルコンの示す U-Pb 年代は先行研究による本岩体の固結年代と測定誤差の範囲内で一致し、マグマの固結から交代作用、引き続く熱水変質作用が一連の過程で進行したことを示す。

これらの結果から、ハルザンブルゲイ岩体では、1) マグマの結晶分化作用、2) Na や F に富む流体による交代作用、3) 塩素に富む熱水による変質作用、の 3 つの異なる作用により Zr

や Nb 等の不適合元素と希土類元素の濃集が生じたと結論されている。

この結論は、先行研究によるマグマの結晶分化作用が主要な鉍化作用の要因とする形成モデルや、岩体形成後に岩体深部にカーボナタイトマグマが貫入し F に富む流体が岩体にもたらされて交代作用が生じたとするモデルとは異なっている。交代作用による鉍床母岩の石英閃長岩からの Ca の溶出が鉍化作用の大きな要因であったとする本研究結果は、過去の研究結果を覆す斬新なもので、博士の学位にふさわしいものであると判断された。