

東南極セールロンダーネ山地バルヒエン山における塩素に富む流体の流入時期と希土類元素に富む鉱物の挙動

東野文子¹、河上哲生¹、サティシュ・クマール²、土屋範芳³、石川正弘⁴、ジェフ・グランサム⁵
¹京都大学、²新潟大学、³東北大学、⁴横浜国立大学、⁵南アフリカ地質調査所

Timing of chlorine-rich fluid infiltration and behavior of REE-bearing minerals from Balchenfjella, Sør Rondane Mountains, East Antarctica

Fumiko Higashino¹, Tetsuo Kawakami¹, M. Satish-Kumar², Noriyoshi Tsuchiya³, Masahiro Ishikawa⁴ and Geoff Grantham⁵
¹Kyoto University, ²Niigata University, ³Tohoku University, ⁴Yokohama National University and ⁵Council for Geoscience, South Africa

In the granulite facies rocks, CO₂-rich fluid has been considered important because it is often found as fluid inclusions. On the other hand, studies on Cl-rich fluid that also has low H₂O activity are not sufficiently available, because the Cl-rich fluid inclusions are less found than the CO₂-rich ones. Some of the reasons Cl-rich fluid inclusions are less observed are low viscosity and low wetting angle of them (Watson & Brenan, 1987; Holness, 1997). Chlorine-rich fluid can coexist with CO₂-rich fluid even under high *P-T* conditions (Heinrich et al., 2004), and shifts the wet solidus to the high-*T* side and dehydration reactions to the low-*T* side (Newton et al., 1998). Therefore, Cl-rich fluid is increasingly recognized as playing an important role in high-*T* metamorphic rocks, for example as a powerful solvent (Newton & Manning, 2010). However, there are not enough studies to understand when and how wide the Cl-rich fluid activity took place during the high-*T* metamorphism.

In the Sør Rondane Mountains, East Antarctica, Late Proterozoic to Cambrian granulites are widely exposed (Shiraishi et al., 2008). We investigated the field distribution of Cl-rich biotite among 27 pelitic gneisses of the Sør Rondane Mountains, and recognized Cl-rich biotites included in garnets were linearly distributed for 200 km long. Detailed study on one of the suitable samples from Balchenfjella in constraining the *P-T-t* condition of Cl-rich fluid infiltration revealed that it infiltrated under the near-peak metamorphic condition of ca. 800 °C, 8 kbar at 603 ± 14 Ma (Higashino et al., 2012).

Garnet in this sample has core-rim boundary defined by P-zoning, rim formation being contemporaneous with the Cl-rich fluid infiltration. Mainly the garnet core includes monazite, and the rim includes xenotime and rounded, coarse-grained zircon. This suggests that originally LREE-rich mineral assemblage changed to HREE- and Zr-rich ones, simultaneously with the Cl-rich fluid infiltration. This interpretation is supported by several pieces of observation; (i) modal amount of zircon included in the garnet rim is higher than the modal amount of zircon that can be formed by the breakdown of Zr-bearing garnet. (ii) monazite included in the garnet core has higher Th content than that included in the garnet rim and present in the matrix, despite the decrease of the modal amount of monazite from garnet core to the matrix. These pieces of observation suggest open system behavior of REE, Zr and Th in the course of garnet rim growth.

Although the mobility of Zr in Ca-bearing fluids associated with alkalis is well known (Harlov & Dunkley, 2011), in the present case, the mechanism of Zr and REE elements' transport is still ambiguous. For example, Lieftink et al. (1994) reported that Cl can move with HREE, and Harlov et al. (2006) reported that F will make more complexes with HREE than Cl. Therefore, further study is needed to understand the mechanism of transport of HREE and Zr in the Cl-rich fluid.

高温変成岩中で見られる変成流体は、二酸化炭素に富むものが多いとされ、塩素に富む流体活動の報告は少ない。この理由として、塩素に富む流体は二酸化炭素に富む流体に比べて粘性および濡れ角が小さい (Watson & Brenan, 1987; Holness, 1997) という性質を持つために、流体包有物としては岩石中に残りにくいという事実が挙げられる。すなわち、高温変成作用の過程における塩素に富む流体活動は、今までその存在が見落とされてきた可能性がある。塩素に富む流体は、高温下でも二酸化炭素に富む流体とは不混和であり (Heinrich et al., 2004)、流体中の H₂O 分圧を下げる効果があるために、脱水反応線を低温側に、wet solidus を高温側へと移動させる (Newton et al., 1998)。さらには、鉱物の溶解度を上昇させる働きをもつ (Newton & Manning, 2010) ため、変成作用を理解する上で重要な役割を担っている。しかし、Cl に富む流体の活動時期や空間的広がりに関しては、まだ分かっていないことが多い。

東南極セールロンダーネ山地は約 6 億年前に東西 Gondwana 大陸の衝突によるグラニュライト相の広域変成作用を受けたとされる (Shiraishi et al., 2008)。同山地全域における泥質片麻岩を 27 試料調べたところ、東西約 200 km にわたり、Cl に富む黒雲母がザク口石中の包有物として分布することが確認された。これは、ザク口石が成長するような変成ピーク近くで、Cl に富む黒雲母が形成されたことを意味する。これらの試料のうち、変成条件を

最も厳しく制約することのできたバルヒエン山の試料（以下、本試料）では、 603 ± 14 Ma に変成ピーク近くの約 800°C 、 8 kbar という条件下で Cl に富む流体が流入したことが分かった (Higashino et al., 2012)。

本試料では、リン (P) による組成累帯構造を用い、ザクロ石斑状変晶のコア・リム境界（融食・再成長境界に相当）を定義した。Cl に富む黒雲母および燐灰石はザクロ石のリムにのみ包有され、ザクロ石のコアには Cl に乏しい黒雲母および燐灰石が包有される。そのため Cl に富む流体は、ザクロ石が融食・再成長するタイミングで流入し、そのとき一時的に Cl に富む組成に変化したマトリクスの黒雲母および燐灰石は、後に Cl に乏しい流体と再平衡に達し、Cl に乏しい組成になったと結論された (Higashino et al., 2012)。

本試料に含まれる REE に富む副成分鉱物は、ジルコン、モナズ石、ゼノタイムである。本試料に含まれるジルコンは特徴的な丸い形をした粗粒なものが多い。ザクロ石のコアには丸い粗粒ジルコンは包有されず、モナズ石が多数包有される。一方ザクロ石のリムおよびマトリクスには、丸い粗粒ジルコンおよびゼノタイムが多数存在する傾向がある。すなわち、ザクロ石のコアからリムにかけて、包有される鉱物が、LREE に富む鉱物から、HREE に富む鉱物へと変化しており、Cl に富む流体の流入と同時期に HREE と Zr の添加があったように見える。ザクロ石コアには細粒ジルコンが少量しか包有されないため、本試料がもともとジルコンに富む岩石であった可能性は低い。Zr はザクロ石にも含まれるため、その分解によってもジルコンは形成される。そこでザクロ石中の Zr 濃度を 200 ppm と仮定し、ザクロ石の分解に伴って形成されるジルコンの最大量を見積もった。その結果、ザクロ石の分解により形成されるジルコンのモードは、本試料中のザクロ石リムのジルコンのモードよりも約 2 桁低いということが分かった。したがって、本試料中に偏在するジルコンは、ザクロ石の分解では説明できず、Zr がメタソマティックに外部からもたらされた可能性を示す。また、ザクロ石コアに包有されるモナズ石は、ザクロ石リム・マトリクスに分布するモナズ石よりも Th 濃度が高い。ザクロ石コアから、ザクロ石リム・マトリクスにかけてモナズ石のモードが減少することを鑑みると、Th についてもザクロ石成長段階の途中(コア・リム境界)で全岩濃度に変化している可能性がある。

ジルコンはアルカリ元素や Ca を含む流体に溶けると言われている (Harlov & Dunkley, 2011)。一方、HREE と Cl の関係については、Cl と HREE が共に動く (Lieftink et al., 1994) とするものや、HREE は Cl よりも F と錯体を形成して動きやすい (Harlov et al., 2006) とする研究もあり、本試料での観察に合致する実験的研究は未だ存在しない。したがって、今後さらに天然試料の観察に基づいた、副成分鉱物の産状と流体の特性の総合的観察が必要である。

References

- Harlov, D.E., Dunkley, D.J., Experimental high-grade alteration of zircon using alkali- and Ca-bearing solutions. Abstracts of the Goldschmidt Conference 2011. 2011.
- Harlov, D.E., Johansson, L., Van den Kerkhof, A., Föster, H.-J., The role of advective fluid flow and diffusion during localized, solid-state dehydration: Söndrum Stenhuggeriet, Halmstad, SW Sweden. *Journal of Petrology* 47, 3-33, 2006.
- Heinrich, W., Churakov, S.S., Gottschalk, M., Mineral-fluid equilibria in the system Ca-MgO-SiO₂-H₂O-CO₂-NaCl and the record of reactive fluid flow in contact metamorphic aureoles. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 148, 131-149, 2004.
- Higashino, F., Kawakami, T., M. Satish-Kumar, Ishikawa, M., Maki, K., Tsuchiya, N., Grantham, G., Hirata, T., Chlorine-rich fluid in granulite facies continental collision zone. Abstracts of Goldschmidt Conference 2012, 2012.
- Holness, M.B., Surface chemical controls on pore-fluid connectivity in texturally equilibrated materials. In: Jamtveit, B., Yardley, B.W.D. (Eds.), *Fluid Flow and Transport in Rocks*. Chapman and Hall, London, pp. 149-169, 1997.
- Lieftink, D.J., Nijland, T.G., Maijer, C., The behavior of rare-earth elements in high-temperature Cl-bearing aqueous fluids: Results from the Ødegårdens Veak Natural Laboratory. *The Canadian Mineralogist* 32, 149-158, 1994.
- Newton, R.C., Manning, C.E., Role of saline fluids in deep-crustal and upper-mantle metasomatism: Insights from experimental studies. *Geofluids* 10, 58-72, 2010.
- Newton, R.C., Aranovich, J.V., Hansen, E.C., Vandenheuveel, B.A., Hypersaline fluids in Precambrian deep-crustal metamorphism. *Precambrian Research* 91, 41-63, 1998.
- Shiraishi, K., Dunkley, D.J., Hokada, T., Fanning, C.M., Kagami, H., Hamamoto, T., Geochronological constraints on the Late Proterozoic to Cambrian crustal evolution of eastern Dronning Maud Land, East Antarctica: a synthesis of SHRIMP U-Pb age and Nd model age data. In: Satish-Kumar, M., Motoyoshi, Y., Osanai, Y., Hiroi, Y., Shiraishi, K. (Eds.), *Geodynamic Evolution of East Antarctica: A Key to the East-West Gondwana Connection*, 308. Geological Society of London, Special Publications, 308, pp. 21-67, 2008.
- Watson, E.B., Brenan, J.M., Fluids in lithosphere, 1. Experimentally determined wetting characteristics of CO₂-H₂O fluids and their implications for fluid transport, host-rock physical properties and fluid inclusion formation. *Earth and Planetary Science Letters* 85, 594-615, 1987.