



海洋科学掘削によるマントル到達への挑戦  
—地球最大のフロンティアに挑む—

# マントルと海洋プレート 最上部マントル

森 下 知 晃  
西 尾 郁 也

The mantle and the uppermost mantle of  
oceanic plates

Tomoaki MORISHITA, Ikuya NISHIO

もりした ともあき : 金沢大学・海洋研究開発機構  
にしお いくや : 金沢大学大学院

プレートテクトニクス開始以降の地球マントルは、中央海嶺下でマントル物質が溶融し、地殻が形成されることによって変化を続けている。この仮説に従い現在の海洋プレートの最上部マントル物質の特徴を予想し、海洋プレート由来のマントル物質と比較することでプレートテクトニクスが地球の進化に与えている影響に関する答え合わせができるはずである。

## 1. はじめに

地球でプレートテクトニクスが機能し始めて以降は、海洋プレートの形成場である中央海嶺下でマントル物質の部分溶融によって形成されたマグマが地表に運ばれることで地球の地殻・マントルの変化に加え海水や大気の組成に影響を与えてきた。地球内部由来の限られた試料からこのプレートテクトニクスに伴う地球進化を理解するためには海洋プレート下のマントル物質はどのような化学的特徴を有する岩石であるかを予想し、天然の試料と比較することが重要である。この作業は、海洋プレートの形成と消滅を伴うプレートテクトニクスが地球固有の特徴を生み出す要因であるとする仮説の検証に他ならない。

## 2. 中央海嶺下でのマントルの変遷 (図 1)

中央海嶺下では主にカンラン岩からなるアセノスフェアが断熱上昇し、カンラン岩のソリダス条件よりも高い温度に達することで部分溶融が起きる (Klein and Langmuir, 1987 ; McKenzie and Bickle, 1988)。断熱上昇するアセノスフェアが部分溶融せずに地表に達したと仮定したときの温度をポテンシャル温度と呼ぶ。上昇するアセノスフェアの部分溶融の開始は、マントルの含水量も含めた化学組成、ポテンシャル温度によって変化する (Asimov and Langmuir, 2003)。部分溶融によって形成されたメルトは、結晶粒界に形成され、それらが連結し、移動することでメルトと固相の分離が起きる (例えば、Toramaru and Fujii, 1986)。溶け残ったカンラン岩は、残渣カンラン岩や、溶け残りカンラン岩と呼ばれる (以下、本文では残渣カンラン岩

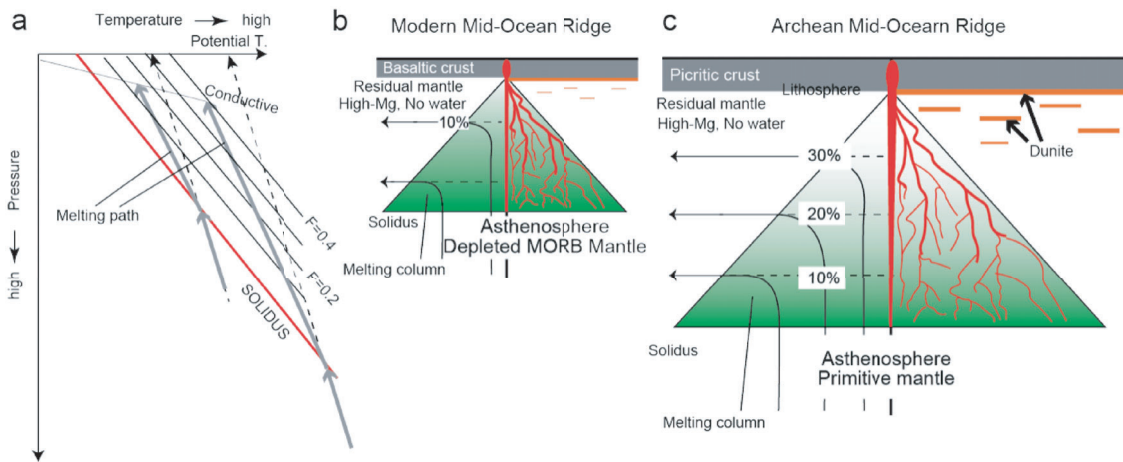


図1 中央海嶺下に上昇するアセノスフェアの温度圧力履歴 (a) とポテンシャル温度 (Potential T.) が異なる現在 (b) と太古代 (c) の溶融領域を模式的に示した図。赤がメルト-残渣カンラン岩が反応している領域で、反応後はダナイトが形成される。形成されたダナイトはその後のマンテル流でリソスフェアの一部となる (オレンジ)。中央海嶺下溶融領域の模式図は[2,15,17,18, 23]を参考にした。

と呼ぶ)。部分溶融をしながらマンテル物質は上昇するため、より浅い低圧条件では部分溶融程度が高くなる。また、上昇するマンテル物質には、より高圧条件下で形成された部分溶融メルトが浸透し、残渣カンラン岩とメルトとの反応によって90体積%以上がカンラン石で構成されるダナイトが形成される (Kelemen et al., 1995a)。このダナイトを本論では反応性ダナイトと呼ぶ。この反応性ダナイトが形成される領域にはメルトの流入が集中し、部分溶融体におけるメルトの移動経路になっていると考えられている (Kelemen et al., 1995b, Spiegelman et al., 2001)。海洋プレートが陸上に露出したと考えられているオフィオライトで、ダナイト層が下部地殻相当のハンレイ岩の下に普遍的に存在しているという観察事実 (Boudier and Nicolas, 1995) から、上昇する部分溶融領域中に形成された反応性ダナイトに富む層はマンテル流によって、海洋プレート下部地殻物質直下の主要岩石種となると考えられている (Braun and Kelemen, 2002)。中央海嶺で形成されるマグマの化学組成はこのようなカンラン岩の溶融とメルトの移動・反応を経験したさまざまなステージで形成されたメルトが集積したものと解釈する。

### 3. 地球史における中央海嶺下での火成活動とマンテル・地殻の進化

現在まで地球がコンドライト質隕石から形成されたとし、コンドライト組成からコアが形成された後に残ったケイ酸塩鉱物に富む層を Primitive mantle (PM), Bulk silicate Earth (BSE) などと呼ぶ (Hart and Zindler, 1986 ; Hofmann, 1988) (以下、本論ではこれらをPMと呼ぶ)。PMが形成されたのち、プレートテクトニクスの開始によって、海洋プレート形成場である中央海嶺では海嶺下マンテル物質が部分溶融を受けて中央海嶺火成岩が形成される。また、大陸の形成に伴いPMから大陸成分も抜けている。これらのPMから太古の海洋・大陸地殻成分に枯渇したマンテル物質が、現在の中央海嶺玄武岩を形成する出発物質 (Depleted MORB Mantle: DMM) であると考えられる (Salters and Stracke, 2004 ; Workman and Hart, 2005)。そこで、マンテルの組成としてPMからDMMまでを想定し、35億年前より中央海嶺で形成された可能性の高い火成岩組成 (Herzberg et al., 2010) を再現できるマンテルの化学組成、ポテンシャル温度、溶融条件を推定したのが Kimura et al. (2017)

である。Kimura et al. (2017) の結果からは、地球のポテンシャル温度の太古代から現在に向かう低下傾向や、それらに伴う中央海嶺下の溶融条件の違い、形成されるマグマの組成、同位体組成進化など、一部の例外火山岩組成を除き、総合的には地球マントルが PM から部分溶融メルトが抜けて DMM が現在の中央海嶺玄武岩のソースとなるまで整合的に説明できることを示した (図 1)。つまり、我々が現在想定しているプレートテクトニクスのプレート形成場である中央海嶺下での溶融プロセスを想定することで、地球形成初期から現在までの中央海嶺系で形成されてきたであろう地殻の化学的特徴、残渣カンラン岩の特徴も予想できることになる。

#### 4. 現在の深海性カンラン岩とモデルの比較 1: 整合的データ

予想される海洋マントル物質と実際に得られた海洋マントル起源物質とは整合的であろうか。海洋底から直接採取されたカンラン岩は深海性カンラン岩と呼ばれる (Dick, 1989)。現在の中央海嶺で形成された海洋プレートを構成していたと思われるカンラン岩は主に海洋プレートの拡大速度が遅いインド洋、大西洋のトランスフォーム断層・断裂帯、海洋コアコンプレックスから採取されており、高速拡大海域である太平洋からは、限られた海域でしか採取されていない (Warren, 2016)。ハンレイ岩脈などの近傍や、斜長石カンラン岩は、メルトの抽出を受けた残渣カンラン岩にメルトが浸透し、そのメルトが完全に分離せず残った可能性があるが、これらを除けば深海性カンラン岩の多様性は溶融程度の異なる残渣カンラン岩の特徴と解釈されている (Dick et al., 1984)。深海性残渣カンラン岩中の単斜輝石の微量元素組成の特徴は分別溶融を経たメルト分離効率の良い溶融であったことを示す (Johnson et al., 1990)。

これまで採取された深海性残渣カンラン岩中の単斜輝石の微量元素濃度は、海嶺したで期待される溶融程度で説明できる (Harigane et al., 2016; Kimura et al., 2017) (図 2)。しかしながら、中央海

嶺下で形成される単斜輝石組成に調和的な深海性カンラン岩は、定常的な火山活動がない低速拡大海域で採取されたカンラン岩であることから、現在の中央海嶺で溶融する以前にマグマの抽出を受けた古融解カンラン岩である可能性もあるため、注意が必要である (森下, 2015)。

上昇するアセノスフェアの中で起きていることが予想されるメルト-残渣カンラン岩反応によって形成された反応性ダナイト (+クロミタイト) も深海性カンラン岩から報告されていること (Arai et al., 1998; Morishita et al., 2007; Payot et al., 2014) は、メルト-岩石反応領域が中央海嶺下のメルトの輸送に重要な役割を担っている可能性を支持する。

#### 5. 現在の深海性カンラン岩とモデルの比較 2: 非整合的データ

上述したように残渣カンラン岩に期待される単斜輝石の微量元素的特徴の一致は、海洋プレートの拡大速度が遅い海域から採取された試料である。本来、中央海嶺下モデルが最も一致するのは定常的に中央海嶺玄武岩が形成されているプレートの拡大速度が速い海域であることが期待される。では、プレート拡大速度の速い太平洋から採取されたカンラン岩中の単斜輝石の微量元素の特徴と比較した場合どうであろうか。太平洋の Hess Deep から採取された深海性カンラン岩中の単斜輝石中の微量元素は絶対量が乏しく、液相濃集元素である Sr に正の異常が見られることが特徴的で、単純な残渣カンラン岩のものとは異なる (図 2)。この試料では微量元素の絶対量が乏しいため、Sr のような水流体と移動しやすい成分が正の異常を示すこと理由を検証する必要があり、低温の変質の影響なども考慮していく必要があるだろう。

中央海嶺下で形成される残渣カンラン岩中の液相濃集元素濃度は溶融程度が高くなると著しく低くなる。特に、海洋プレート最上部マントルの残渣カンラン岩は溶融程度が相対的に高くなるほど、メルトに分配されやすい H<sub>2</sub>O などの濃度は

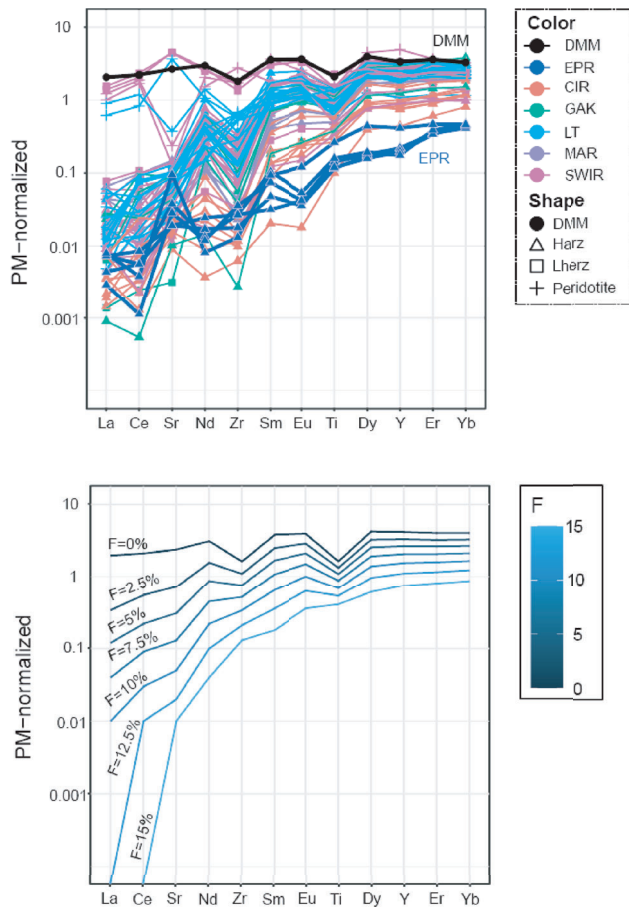


図2 Primitive mantle値<sup>[22]</sup>で規格化した深海性残渣カンラン岩中の単斜輝石の微量元素パターンとDMMからスピネルカンラン岩安定領域ではほぼ分別溶融した後の残渣カンラン岩中の単斜輝石の組成を示した図。モデルはOzawa (2001) の計算シートを用いて求めた。EPR = 東太平洋海膨, CIR = 中央インド洋, GAK = ガッケル海嶺, LT = レナトラフ, MAR = 大西洋, SWIR = 南西インド洋, Harz = ハルツバージャイト, Lherz = レールゾライト, F = 部分溶融程度。鉱物化学組成, DMMのデータは[8,34,37]を参照した。

著しく低いことが期待される (Schmädicke et al., 2018)。無水鉱物であっても、微量な H<sub>2</sub>O 成分を結晶構造に含み得ることが指摘されてから (Bell and Rossman, 1992)、深海性カンラン岩中の無水鉱物中の含水量が測定され、試料採取地点ごとに差があり、残渣カンラン岩から予想される値よりも高いことが報告されている (Warren and Hauri, 2014; Hesse et al., 2015; Schmädicke et al., 2018; Li et al., 2020) (図3)。この予想値よりも高い深海性カンラン岩中の無水鉱物中の含水量は、残渣カンラン岩として形成された後に水成分が付加した可能性や出発物質であるカンラン岩の水成分が想定されているよりも高いなどの可能性が考えられるが、その理由は不明なままである。また、Klein et al. (2019) では、深海性カンラン岩を含むさまざまな

まな苦鉄質岩、超苦鉄質岩のカンラン石中にメタンや水素が検出される流体包有物痕が普遍的に観察されることを報告し、深海性カンラン岩中の流体包有物は海水が蛇紋石安定領域よりも高温で流入した可能性を指摘している。カンラン岩の蛇紋岩化プロセスには、水流体の流入に伴う蛇紋岩化反応による局所的な割れ目の形成と溶解-沈殿が伴うような過程も想定される (Plümper et al., 2012)。無水鉱物であるため極微量の蛇紋石が混入することで見かけ上の含水量が高くなる可能性があり、現在の海洋底に露出したカンラン岩試料においては、マントル条件から地殻条件までの上昇過程における浅所での水の流入の影響をマイクロなスケールで検証する必要がある。

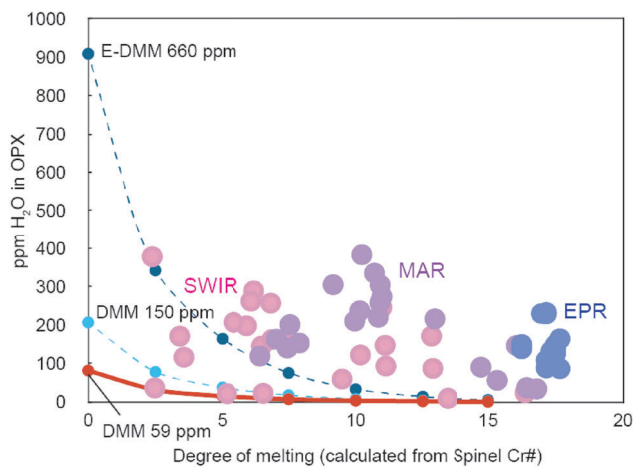


図3 深海性残渣カンラン岩中の直方輝石中の含水量とDMM (出発時の含水量が 600 ppm, 150 ppm, 59 ppm) がスピネルカンラン岩安定領域ではほぼ分別溶融した後の残渣カンラン岩中の直方輝石の含水量見積もりと溶融程度との関係を示した図。モデルは Ozawa (2001) の計算シートを用いて求めた。残渣カンラン岩の溶融程度は直方輝石と共存するスピネルの化学組成から Warren (2016) の経験式を用いて求めた。EPR = 東太平洋海嶺, MAR = 大西洋, SWIR = 南西インド洋。直方輝石の含水量データは[12,20, 21,30,31,36]の中から共存するスピネルのCr#が得られる試料を抜粋した。

## 5. 終わりに：マントル掘削で得られるマントル直接掘削試料の重要性

本論で述べてきたように、地球の中央海嶺で形成されてきた火山岩の特徴は、PMからの中央海嶺でのマグマ過程を想定することで説明可能であるにもかかわらず、実際の我々が手にできている深海性カンラン岩は、高い含水量や、単純な中央海嶺下の部分溶融—メルトの分離では説明できない特徴を持つ試料が存在する。特に、海洋プレート中の水の挙動はプレートの物性、地球の水循環に影響を与えるため、その理解が求められる。そのためには、なんらかの理由で海洋底に露出するに至った深海性カンラン岩の履歴と微小領域の観察・分析の精査を継続して行なっていく必要がある。特に、現在の地球においてプレート拡大速度が速い太平洋下のマントルはマントル掘削計画の最優先ターゲットであるにも関わらず (Umino et al., 2013), 試料がほとんど採取されていない。火山島やプチスポット火山の捕獲岩などからの情報も含めて検討していく必要があるが、やはりこれらの捕獲岩は中央海嶺下プロセス後の火成活動の影響を受けている可能性を否定できない。やはり、現在の海洋プレート最上部マントル物質を採取するマントル掘削で得られる試料は、地球が地球固有の惑星となった要因であるプレートテクトニクス仮説の検証に必須の試料である。

## 参考文献

- [ 1 ] Arai, S., Matsukage, K. (1998) Petrology of a chromitite micropod from Hess Deep, equatorial Pacific: a comparison between abyssal and alpine-type podiform chromitites. *Lithos* 43, 1-14.
- [ 2 ] Asimow, P.D., Langmuir, C.H. (2003) The importance of water to oceanic mantle melting regimes. *Nature* 421, 815-820.
- [ 3 ] Bell, D.R., Rossman, G.R. (1992) Water in Earth's mantle: the role of nominally anhydrous minerals. *Science* 255, 1391-1397.
- [ 4 ] Boudier, F., Nicolas, A. (1995) Nature of the Moho transition zone in the Oman ophiolite. *Journal of Petrology* 36, 777-796.
- [ 5 ] Braun, M.G., Kelemen, P.B. (2002) Dunite distribution in the Oman ophiolite: Implications for melt flux through porous dunite conduits. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 11, 8603, doi:10.1029/2001GC000289
- [ 6 ] Dick, H.J.B. (1989) Abyssal peridotites, very slow spreading ridges and ocean ridge magmatism. *Geological Society Special Publication* 42, 71-105.
- [ 7 ] Dick H.J.B, Fisher, R.L., Bryan, W.B. (1984) Mineralogical variability of the uppermost mantle along mid-ocean ridges. *Earth and Planetary Science Letters* 69, 88-106.
- [ 8 ] Grambling, N.L., Dygert, N., Boring, B., Jean, M.M., Kelemen, P.B. (2022) Thermal history of lithosphere formed beneath fast spreading ridges: Constraints from the mantle transition zone of the East Pacific Rise at Hess Deep and Oman Drilling Project, Wadi Zeeh, Samail ophiolite. *Journal of Geophysical Research*, in press.
- [ 9 ] Harigane, Y., Abe, N., Michibayashi, K., Kimura, J.-I., Chang, Q. (2016) Melt-rock interactions and fabric development of peridotites from North Pond in the Kane area, Mid-Atlantic Ridge: Implications of microstructural and petrological analyses of peridotites samples from IODP Hole



- U1382A. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 17, doi:10.1002/2016GC006429
- [10] Hart, S.R., Zindler, A. (1986) In search of a bulk-earth composition. *Chemical Geology* 57, 247-267
- [11] Herzberg, C., Condie, K., Korenaga, J. (2010) Thermal history of the Earth and its petrological expression. *Earth and Planetary Science Letters* 292, 79-88.
- [12] Hesse, K.T., Gose, J., Stalder, R., Schmädicke, E. (2015) Water in orthopyroxene from abyssal spinel peridotites of the East Pacific Rise (ODP Leg 147: Hess Deep). *Lithos* 232, 23-34.
- [13] Hofmann, A.W. (1988) Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters* 90, 297-314.
- [14] Johnson, K.T.M., Dick, H.J.B., Shimizu, N. (1990) Melting in the oceanic upper mantle: an iron microprobe study of diopsides in abyssal peridotites. *Journal of Geophysical Research* 95, 2661-2678.
- [15] Kelemen, P.B., Shimizu, N., Salters, V.J.M. (1995a) Extraction of mid-ocean-ridge basalt from the upwelling mantle by focused flow of melt in dunite channels. *Nature* 375, 747-753.
- [16] Kelemen, P.B., Whitehead, J.A., Aharonov, E., Jordahl, K.A. (1995b) Experiments on flow focusing in soluble porous media, with applications to melt extraction from the mantle. *Journal of Geophysical Research* 100, 475-496.
- [17] Kimura, J.-I., Gill, J.B., van Keken, P.E., Kawabata, H., Skora, S. (2017) Origin of geochemical mantle components: Role of spreading ridges and thermal evolution of mantle. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 18, 697-734, doi:10.1002/2016GC006696
- [18] Klein, E.M., Langmuir, C.H. (1987) Global correlations of ocean ridge basalt chemistry with axial depth and crustal thickness. *Journal of Geophysical Research* 92, 8089-8115.
- [19] Klein, F., Grozeva, N.G., Seewald, J.S. (2019) Abiotic methane synthesis and serpentinization in olivine-hosted fluid inclusions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 116, 17666-17672.
- [20] Li, W., Soustelle, V., Jin, Z., Li, H., Chen, T., Tao, C. (2017) Origins of water content variations in the suboceanic upper mantle: Insight from Southwest Indian Ridge abyssal peridotites. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 18, 1298-1329.
- [21] Li, P., Xia, Q.-K., Dallai, L., Bonatti, E., Brunelli, D., Cipriani, A., Ligi, M. (2020) High H<sub>2</sub>O content in pyroxenes of residual mantle peridotites at a Mid Atlantic ridge segment. *Scientific Reports* 10, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57344-4>.
- [22] McDonough, W.F., Sun, S. (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology* 120, 223-253.
- [23] McKenzie, D. and Bickle, M.J. (1988) The volume and composition of melt generated by extension of the Lithosphere. *Journal of Petrology* 29, 625-679.
- [24] 森下知晃 (2015) 中央海嶺下のマントル多様性を形成した古融解イベントーその検出方法と固体地球ダイナミクスにおける意義ー. *地学雑誌* 124, 333-354.
- [25] Morishita, T., Maeda, J., Miyashita, S., Kumagai, H., Matsumoto, T., Dick, H.J.B. (2007) Petrology of local concentration of chromian spinel in dunite from the slow-spreading Southwest Indian Ridge. *European Journal of Mineralogy* 19, 871-882.
- [26] Ozawa, K. (2001) Mass balance equations for open magmatic systems: Trace element behavior and its application to open system melting in the upper mantle. *Journal of Geophysical Research* 106, 13407-13434.
- [27] Payot, B.D., Arai, S., Dick, H.J.B., Abe, N., Ichiyama Y. (2014) Podiform chromitite formation in a low-Cr/high-Al system: an example from the Southwest Indian Ridge (SWIR). *Mineralogy and Petrology* 108, 533-549.
- [28] Plümer, O., Røyne, A., Magrasó, A., Jamtveit, B. (2012) The interface-scale mechanism of reaction-induced fracturing during serpentinization. *Geology* 40, 1103-1106.
- [29] Salters, V.J.M., Stracke, A. (2004) Composition of the depleted mantle. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 5, A05004, doi:10.1029/2003GC000597
- [30] Schmädicke, E., Gose, J., Will, T.M. (2011) Heterogeneous mantle underneath the North Atlantic: Evidence from water in orthopyroxene, mineral composition and equilibrium conditions of spinel peridotite from different locations at the Mid-Atlantic Ridge. *Lithos* 125, 308-320.
- [31] Schmädicke, E., Gose, J., Stalder, R. (2018) Water in abyssal peridotite: Why are melt-depleted rocks so water rich *Geochemistry Geophysics Geosystems* 19, 1824-1843.
- [32] Spiegelman, M., Kelemen, P.B., Aharonov, E. (2001) Causes and consequences of flow organization during melt transport: the reaction infiltration instability in compactible media. *Journal of Geophysical Research* 106, 2061-2077.
- [33] Toramaru, A., Fujii, N. (1986) Connectivity of melt phase in a partially molten peridotite. *Journal of Geophysical Research* 91, 9239-9252.
- [34] Umino, S., Neelson, K., Wood, B. (2013) Drilling to Earth's mantle. *Physics Today* 66, 36-41, doi:10.1063/PT.3.2082.
- [35] Warren, J.M. (2016) Global variations in abyssal peridotite compositions. *Lithos* 248-251, 193-219.
- [36] Warren, J.M., Hauri, E.H. (2014) Pyroxenes as tracers of mantle water variations. *Journal of Geophysical Research* 119, 1851-1881, doi:10.1002/2013JB010328.
- [37] Workman, R., Hart, S.R. (2005) Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM). *Earth and Planetary Science Letters* 231, 53-72.

